

河南理工大学

硕士学位论文

冻结状态多级应变速率下凝灰岩力学特性的试验研究

姓名：王开林

申请学位级别：硕士

专业：采矿工程

指导教师：儿玉淳一;尤明庆

20050601

摘要

岩体的力学性质受到自然条件的影响。在日本北海道以及世界各地的严寒地区,岩体的力学性质因气候而产生变化。虽然加载速率对岩石力学性质的影响已有许多试验研究和理论分析,但是在冻结状态下加载速率对岩石力学性质影响规律的研究尚未见到报道。本研究采用北海道登别凝灰岩为研究对象,利用MTS312.21型电液伺服试验机在五级不同的应变速率下对冻结状态下自然干燥岩样和水饱和岩样进行了单轴压缩试验和巴西劈裂试验,研究了应变速率对冻结状态下岩样强度、弹性模量、泊松比、峰值应变等力学参数的影响规律,建立了冻结状态下反映应变速率的水饱和岩样单轴抗压强度和间接拉伸强度的经验公式分别为: $\lg \sigma_0 = 2.04 + 0.08 \lg \dot{\epsilon}$ 和 $\lg \sigma_t = 1.283 + 0.1413 \lg \dot{u}$, 为冻结状态工程设计和数值模拟计算时岩性参数的选择提供参考。同时对试验采集的声发射事件进行了初步的分析研究,对岩样变形破坏过程有了更清晰的了解。进行了单一岩样多级应变速率下的单轴压缩试验,确定岩石的单轴抗压强度,以消除岩样间的差异对试验结果的影响。并对单一岩样多级应变速率下的试验可行性进行了分析讨论。最后,对冻结状态和常温下岩石的力学参数进行了比较分析,指出了在冻结状态下冰对岩石的强度有强化作用。

关键词: 岩石力学, 凝灰岩, 冻结状态, 岩性参数, 单轴压缩, 应变速率, 声发射事件

Study on the mechanical property of tuff at different strain rates in freezing condition

The mechanical properties of rock are influenced greatly by weather condition in those freezing areas such as Hokkaido, Japan and some other bitter cold places in the world. In the study field of rock mechanics and rock engineering, the loading and displacement rates can occur over a rather wide range. The main purpose of this paper is to report an investigation on the influence of different strain rates on the mechanical properties of welded tuff in freezing condition. Specimens of welded tuff are manufactured from rock in Noboribetsu, Hokkaido, Japan and are homogeneous in structure, are chosen for these tests. Here, specimens are separated into two kinds, one is air-dried specimen, the other is water-saturated specimen. Many specimens of standard size are observed at five strain rates with uniaxial compression and Brazilian test(split test). Based on the complete stress-strain(or load-load point displacement) curves, the effects of strain rates on rock strength, ultimate strain, Elastic Modulus, poisson's ratio and so on are discussed in detail. The empirical equations to evaluate the strain rate dependent on rock mechanical properties are presented as well, which will provide some reference for the choice of rock mechanical parameters in field rock engineering design. According to the analysis on Acoustic Emission event, so people can grasp the process of rock failure. A suggested method performing the compressive experiment on a single specimen at stepwise strain rate was proposed to obtain the uniaxial compression strength and eliminate the influence of different specimens on the testing results. Finally, comparison of mechanical parameters are made in freezing condition and room temperature, it is found that ice play a great role in rock strength greatly in freezing condition.

Key words: rock mechanics, tuff, freezing condition, rock character parameters, uniaxial compression test, strain rate, acoustic emission event

河南理工大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。论文中除了特别加以标注和致谢的地方外，不包含任何其他个人或集体已经公开发表或撰写过的研究成果。其他同志对本研究的启发和所做的贡献均已在论文中作了明确的声明并表示了谢意。

本人学位论文与资料若有不实，愿意承担一切相关的法律责任。

学位论文作者签名：王开树

2005 年 5 月 30 日

河南理工大学

学位论文知识产权声明书

本人完全了解学校有关保护知识产权的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属于河南理工大学。学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版。本人允许论文被查阅和借阅。学校可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密论文待解密后适用本声明。

学位论文作者签名：王开树

2005 年 5 月 30 日

指导教师签名：尤明庆

2005 年 6 月 1 日

1 引言

在材料均质、连续、各向同性、小变形、完全弹性等假设条件，弹性力学解决了物体的变形问题^[1]。然而，真实材料如岩石、混凝土等，并不能满足或始终满足这些假设，对其力学特性必须加以具体且详细的研究，由此而产生了各种力学学科。岩石力学便是其中一个重要的分支，是一个研究岩石和岩体力学性能的理论 and 应用的学科，是探讨岩石和岩体对其周围物理环境力场的反应的力学分支^[2]，已经广泛应用于土木、建筑、水利、采矿等诸多工程和生产实践领域。

1.1 研究的目的是和意义

覆盖于地球表面的岩石，是人类赖以生存和发展的基础。为了更好地利用这些岩石为人类服务，防止或减小与岩石相关的自然灾害，如地基失稳、矿柱岩爆、岩体滑坡等等，人们从强度、变形和破坏等各个方面对岩石材料的力学特性进行了深入而持久的研究，并取得了许多重要的研究成果^[3]。

为了满足对资源的需求，人们不断地对地下资源进行着开发。尤其在近代，随着工业的发展，对资源的需求日益增多。相应地，对地下资源开采的规模也日益增加。对固体资源，如煤炭、金属矿物等的开采；液体能源，如石油、天然气等的抽取等每时每刻都在世界各地进行着。不仅开采量在增加，开发深度、开采所涉及的岩石种类也在不断地增加。

岩石作为自然界的一种天然材料，人们对其力学特性的研究，最初也是沿着一般材料力学、弹性力学、塑性力学的过程而逐步展开的。由于水库大坝、铁路隧道、跨江桥梁等重大工程项目的兴建，以及地下采矿业的巨大发展，刺激了对岩石力学性质的研究，岩石材料的天然复杂性也越来越为人们所认识。地下工程所涉及的建筑物深基础、穿山隧道、海底隧道、扬水式地下发电站硐室、石油地下储藏室等建设项目都涉及到地下空间的利用。而且如今正在积极地探索着的放射性废弃物地下保存也涉及到地下空间的利用，在 21 世纪，高放射性核废料地下深部处理将继续成为举世关注的岩石力学难题。虽然经过全球科学家 40 多年的不懈努力，但迄今为止，这个问题没有彻底解决。

随着人们环保意识的提高，对无污染能源的追求将会成为研究热点，在地表以下 2000m~4000m 的某些构造部位，埋藏有热干岩 (Hot Dry Rock, HDR)，这是

一种干净的新能源。据估计,它包括的能量约为地球全部石油、天然气和煤炭蕴藏能量的30倍。从70年代中期开始,美国、日本、法国、澳大利亚等国就致力于热干岩的基础研究和现场试验,在此基础上,形成一定规模商业性生产。日本是一个地热资源丰富的国家之一,遍布全国各地的温泉就是对地热资源的最直接利用。我国对热干岩的开发利用处于初期阶段。

近年来,世界各国都日益重视地下空间的开发利用,地下空间已经成为一种新型的国土资源,并在总体上称之为“地下产业”^[4]。开发范围涉及交通、能源、城市建设等各个方面,开发深度达地表以下50m~100m。由于地下具有恒温性,长期安定性,隔离性等特点。这些特点吸引着人们不断地对地下工程、地下设施进行开发和建设。

此外,象日本的东京等大城市,由于人口积聚,地价急剧上升,为了有效地利用有限的土地,积极开发地下空间的呼声渐高。最近日本提出了地下爱丽丝城(Alice City)规划,深达200m以上。由此看来,与岩石相关的开发领域和规模大有增长之势。随着各项经济建设事业的迅速发展,大量的水库大坝、桥梁隧道等重大工程项目的兴建以及地下采矿业的巨大发展,极大地促进了对岩石力学特性的研究,同时人们也越来越深刻地认识到岩石材料的天然复杂性,如非均质性、各向异性以及不连续性等等。

1956年4月,在美国科罗拉多(Corolado)矿业学院举办的岩石力学研讨会上,首次提出了“岩石力学(Rock Mechanics)”这个名称^[5],从而使岩石力学成为一门独立于固体力学的新学科而发展起来。在我国,岩石力学作为一门独立的应用学科则始于20世纪50年代末,在当时,由于我国许多有历史意义的大型水利水电工程的勘测设计和施工大规模展开,为岩石力学的试验与理论研究以及实际的工程应用注入了巨大的活力。其中,最重要的进展可能是其后出现各种地质资料的采集与围岩分类、现场地应力与岩性测量、复杂岩体开挖以及关于岩爆和冲击地压的理论与实践研究等等^[6-7]。

另一方面,近年来,由于地下采掘,地下工程建设等原因造成的事故时有发生。如日本大谷石采掘基地的地表沉陷事故;美国发生的地面下沉,特别是东部产煤地区发生的地表下沉事故;中国也曾出现过矿井坍塌,导致地表沉降,地上建筑物破坏事故,以及发生在世界各地的大型斜坡滑落事故,这都给人类的生产、生活等带来极大的不便和危害。

象这样,随着地下资源不断开发,地下及地上大型岩石工程建设的不断开展,

同时人们对地下空间利用的广度和深度也日渐增加，对施工的安全性、工程的长期安定等的要求也不断提高。这急需建立一套合适的评价方法以用来对涉及岩体的工程项目进行设计、施工、维护、和管理。这就要求深刻了解和充分把握与岩石工程有深刻关系的岩体性质，特别是岩体的力学性质。

而岩体的力学性质是随着时间和空间而变化的，同时也受到自然条件的影响。在日本的北海道以及世界各地的严寒地带，由于天气的变化，岩体的力学性质发生了巨大的变化。在低温冻结状态下，由于温度的变化导致的变形以及温度应力分布使岩石的力学性质发生了质的变化，在日本以及世界很多地方的冰雪山体因此发生的大型滑坡事件屡有发生。为了对这些现象有一个合理的解释和有效的应对措施，需要人们对冻结状态下岩石力学性质有一个充分的了解。另一方面，在日本、欧洲和美国，伴随着对液化天然气资源消费持续增长的需求，人们已经开始关心它的储存问题。现在半地面上的储油罐被广泛的用来储存温度在 -162°C 的液化天然气，但是在日本，这牵扯到一个重要的问题就是占用了大量可利用宝贵土地资源，于是一个可供选择的用来解决此问题的方案就是把液化天然气储存到地下。这也要求人们对于冻结状态下岩石力学性质有一个全面的了解，以便为地下储存系统的设计施工提供安全保证。

在东京，人们对地下空间的利用已经发挥到了一个很高的水平，除了纵横交错的地下交通道路，人们已经开发了2000多个地下空间场所用于储存应急设备和物资，以便在意外事故发生时备用。在东京新宿的地下工程中，有一个世界上最先进最大的冷暖房，它可以为新宿一带22座高层建筑提供冷暖服务。这些地下设施的开挖和建设，都与岩石工程有着或多或少的联系，同时对于岩石力学理论的丰富和发展也做出了巨大的贡献。在地下防护工程稳定性研究中，不同的加载速率对岩石力学特性有很大的影响。

时至今日，虽然人们对常温下岩石的力学性质进行了各种各样的实验研究和理论分析，取得了巨大的成就，但是在冻结状态不同应变速率下岩石力学性质的研究却很少见到报道，因此，“冻结状态多级应变速率下凝灰岩力学特性的试验研究”这一研究课题具有十分重要的意义。

1.2 冻结状态下岩石力学特性的研究现状

1.2.1 冻结状态下岩石力学特性的研究现状

岩石力学主要是研究岩石在环境和荷载的作用下,其强度、变形与破坏等力学性质和力学效应的学科。分布于自然界的岩石受到很多因素的影响,随着时间和空间的变化,它的力学性质会发生很大的变化。

在日本北海道登别盛产凝灰岩,由于外观上的美丽和加工容易,在北海道已经被广泛的应用到土木工程的建设中,比如坝基、斜坡、地基、山林中的道路建设等工程。但是同时,人们对在冻结状态下的岩石力学性质以及岩体稳定性方面存在很多的疑问。从80年代至今在日本北海道地区发生了多起大规模的岩石边坡崩塌破坏,给社会带来了很大灾害。特别是1987年北海道层云峡岩石崩塌造成3人死亡,多人受伤的事故,并最终导致国道39线在层云峡段(原为沿河谷边盘行)改成隧道线(层云峡天城岩滑落调查委员会,1988)^[8]。还有1996年北海道丰滨(Toyohama)隧洞发生大规模的岩石崩塌,造成20人死亡的特大事故(丰滨隧道崩塌事故调查委员会,1996)^[9],使日本政府下决心对全国所有的边坡、隧洞进行安全大检查。1997年又在北海道第2白系隧洞口发生大规模岩石边坡崩塌事故(第2白系隧洞崩塌事故调查委员会,1998)^[10]。这些事故发生后,日本政府都成立了专门的调查事故委员会,调查事故发生原因和对策,也引发学术界更加深入地研究寒冷地区岩石边坡破坏的机理和预防措施,相关研究成果在许多学术刊物和年会上都有发表(福田正己,1996^[11];菊地宏吉,1997^[12];高桥辉明,1997^[13])。这些研究成果主要是研究冻结融解作用对岩石的物理力学性质和裂缝发展的影响,并结合北海道地区岩石崩塌调查成果,提出了寒冷地区岩石边坡破坏模式。

冻结融解作用产生的裂缝首先发生在试件表层,然后向岩心内部发展,裂缝开口也是试件表层比内部大。冻结融解作用引起的边坡破坏首先从表层开始发生小规模崩塌,然后逐渐向内部发展,通过长期的反复作用,边坡稳定性逐渐降低,直至边坡破坏。岩石边坡暴露于空气中,当气温低于零度时,边坡表层开始冻结,形成冻结面。随着气温的进一步降低及持续时间的延长,冻结面逐渐向内部延伸,由于水分有向冻结面移动的趋势,边坡内部的水分通过裂隙或空隙向冻结面移动,造成冻结面上含水饱和度增加。当饱和度增加到一定程度时,由水转化成冰产生的膨胀力超过岩石强度,裂缝就产生,造成岩石强度降低(陈天城)^[14]。

1.2 冻结状态下岩石力学特性的研究现状

1.2.1 冻结状态下岩石力学特性的研究现状

岩石力学主要是研究岩石在环境和荷载的作用下，其强度、变形与破坏等力学性质和力学效应的学科。分布于自然界的岩石受到很多因素的影响，随着时间和空间的变化，它的力学性质会发生很大的变化。

在日本北海道登别盛产凝灰岩，由于外观上的美丽和加工容易，在北海道已经被广泛的应用到土木工程的建设中，比如坝基、斜坡、地基、山林中的道路建设等工程。但是同时，人们对在冻结状态下的岩石力学性质以及岩体稳定性方面存在很多的疑问。从80年代至今在日本北海道地区发生了多起大规模的岩石边坡崩塌破坏，给社会带来了很大灾害。特别是1987年北海道层云峡岩石崩塌造成3人死亡，多人受伤的事故，并最终导致国道39线在层云峡段(原为沿河谷边盘行)改成隧道线(层云峡天城岩滑落调查委员会，1988)^[8]。还有1996年北海道丰滨(Toyohama)隧洞发生大规模的岩石崩塌，造成20人死亡的特大事故(丰滨隧洞崩落事故调查委员会，1996)^[9]，使日本政府下决心对全国所有的边坡、隧洞进行安全大检查。1997年又在北海道第2白系隧洞口发生大规模岩石边坡崩塌事故(第2白系隧洞崩落事故调查委员会，1998)^[10]。这些事故发生后，日本政府都成立了专门的调查事故委员会，调查事故发生原因和对策，也引发学术界更加深入地研究寒冷地区岩石边坡破坏的机理和预防措施，相关研究成果在许多学术刊物和年会上都有发表(福田正己，1996^[11]；菊地宏吉，1997^[12]；高桥辉明，1997^[13])。这些研究成果主要是研究冻结融解作用对岩石的物理力学性质和裂缝发展的影响，并结合北海道地区岩石崩塌调查成果，提出了寒冷地区岩石边坡破坏模式。

冻结融解作用产生的裂缝首先发生在试件表层，然后向岩心内部发展，裂缝开口也是试件表层比内部大。冻结融解作用引起的边坡破坏首先从表层开始发生小规模的崩塌，然后逐渐向内部发展，通过长期的反复作用，边坡稳定性逐渐降低，直至边坡破坏。岩石边坡暴露于空气中，当气温低于零度时，边坡表层开始冻结，形成冻结面。随着气温的进一步降低及持续时间的延长，冻结面逐渐向内部延伸，由于水分有向冻结面移动的趋势，边坡内部的水分通过裂隙或空隙向冻结面移动，造成冻结面上含水饱和度增加。当饱和度增加到一定程度时，由水转化成冰产生的膨胀力超过岩石强度，裂缝就产生，造成岩石强度降低(陈天城)^[14]。化成冰产生的膨胀力超过岩石强度，裂缝就产生，造成岩石强度降低(陈天城)^[14]。

长期反复的冻结融解作用使得边坡稳定性降低,产生崩塌。这种表层崩塌的破坏模式是岩石边坡长期冻结融解作用的主要表现形式,如果结合地形和地下水等条件,也可能诱发大规模的边坡破坏。

为调查冻结作用对岩石边坡的影响,许多学者对北海道地区岩石边坡破坏进行分类,分析崩塌的地点、时期、规模、气象和地下水情况等。北海道地区可分成环太平洋带(沿海地区)和内陆带,内陆地区岩石边坡在4—6月份崩塌达到高峰,4—6月份内陆地区正是积雪融化季节,1987年北海道层云峡岩石崩塌就是发生在6月份,刚好是该地区的融雪期。在严寒的冬天岩石崩塌事故是比较少的,原因是在低温下岩石强度比常温情况要高,同时低温情况下地下水及地表水的活动都受到限制。沿海地区在8—9月份边坡崩塌达到高峰,8—9月份是沿海地区的降雨季节,降雨量多造成地表水及地下水活动频繁,岩石崩塌就比较容易发生。以上分析认为寒冷地区岩石边坡破坏与融雪及降雨等气象条件有关。北海道地区岩石边坡破坏的规模一般在 1000m^3 以下,主要表现为表层破坏,平均深度在2—3m,浅层破坏发生的频率很高。按照北海道的气温情况及实地测量结果,地表冻结影响深度一般在2m范围以内,由冻结融解作用直接造成的破坏一般仅限在表层破坏。但是因冻结作用间接引起大规模边坡破坏的情况也有,其中北海道丰滨隧洞口岩体崩塌就是实例之一。总结前人关于冻结状态岩石工程的研究现状,寒冷地区岩石边坡崩塌的原因可以归纳为以下3个方面。

(1) 岩石内部含有的水分转化成冰时产生的膨胀力,水转化成冰,其体积大约增加9%,这种体积膨胀在 -22°C 时会产生 200MPa 的压力,同时在冰的结晶体成长时也会产生压力(G. P. DavNson, 1985)^[15]。溶结凝灰岩的抗拉强度仅有 $1.04\text{--}1.35\text{MPa}$,冻结融解试验结果显示(陈天城, 2000),当岩石的含水饱和度超过70%时,冻融作用对岩石的影响程度就很明显,例如当饱和度为78%时冻融作用循环10次后,岩石单轴抗压强度减少14%,抗拉强度减少20%,如果为饱和状态,经一次冻结作用岩石就会破坏。

(2) 边坡表面和内部温差产生的热应力

根据实测资料^[16],温度变化 1°C 大约产生 0.03MPa 的热应力,按照北海道气温条件,岩石边坡表层(2m以内)的内外温差最大可达 20°C ,产生的热应力为 0.6MPa ,这个数值比凝灰岩的抗拉强度($1.04\text{--}1.35\text{MPa}$)要小许多,因此,单独热应力作用对边坡影响应该不大,但对边坡软弱部位的影响不能否定,热应力可以起到促进岩石风化的一个因素。

(3) 因表层冻结造成边坡内部水压力增加, K. Terzaghi^[17]就已提出陡倾角岩石边坡表层冻结造成地下水位上升, 裂隙面上水压力增加, 诱发边坡破坏。1996年2月北海道丰滨隧洞口岩体崩塌, 其影响因素之一就是由于山体表层冻结造成地下水位上升。

在寒冷地区冻结融解作用是主要的岩石物理风化作用, 降低岩石强度, 产生裂缝, 造成岩石边坡崩塌等破坏, 这种破坏发生的频率比较高, 一般属于规模比较小的表层破坏, 但是另外有地下水, 地震等其它外在因素作用时也可能发生大规模的破坏。还宜采用模型试验, 以验证设计的可靠性。

1.2.2 不同应变速率下岩石力学特性的研究现状

岩石力学中的加载速率是一个变化幅度很大的参数。在一般岩体工程中, 如煤炭和采矿爆破卸载速率为每秒几分之一量级^[18], 但对于巷道矿柱, 其变形量却很小。在不同的加载方式下, 岩石材料的力学性能不仅在量上, 而且在质上发生变化, 因而有关岩石材料在不同应变速率作用下的力学效应分析一直被视为岩石流变力学基础研究课题之一^[19]。蔡跃军等曾于1983年利用300t材料试验机对细粒叶蜡石进行了应变速率从 $10^{-3}/s$ - $10^{-7}/s$ 的试验, 得出岩石峰值强度及其应变、弹性模量均随应变速率的增加而增大的结论。陈升强通过采用刚性加荷技术进行岩石变形全过程观测后指出^[20], 应变速率较高时岩石的峰值后卸荷刚度明显小于应变速率较低的状况。国外有关岩石的加载速率研究是与60年代刚性试验机在岩石观测方面的应用紧密联系在一起^[21,22]。Bieniawski^[23]和Peng^[24,25]分别对细砂岩和凝灰岩等进行了不同应变速率下加载观测。1980年Chong等^[26]利用Instron电液伺服刚性试验机对油页岩进行了应变速率从 $10^{-4}/s$ - $10/s$ 的室内试验, 另外又对裂隙岩体含水量的影响进行了观测和分析^[27]。1990年, Okubo^[28,29]等对应力峰值过后应变值减小的所谓第二类岩石进行了不同应变速率作用下的试验, 提出了峰值强度随应变速率增大而增大的经验公式。1991年, Lajtai等^[30]将应变速率效应的研究扩展到脆性石灰岩和延性盐岩等观测分析中。

由于岩石材料的复杂性, 现行岩石试验规范中尚未有完全统一的加载速率标准, 一般有 a. 加载时间控制如美国岩石试验规程和日本矿业规程中要求试件在1-15min内压坏。b. 荷载控制, 如国际岩石力学学会建议方法、加拿大采矿所规程, 以及我国水利规程要求按 $\dot{\sigma}=0.5\text{MPa/s}$ 的应力速率加载。c. 变形控制, 这是

继伺服刚性试验机普遍应用后逐渐推广的。

虽然前人对自然状态下加载速率对岩石力学性质的影响进行了各种各样的试验研究和理论分析,但是对于冻结状态下加载速率对岩石力学性质影响规律的研究尚未见到任何报道。本研究着重对冻结状态下自然干燥岩样和水饱和岩样进行单轴压缩试验和劈裂试验,讨论了冻结状态下加载速率对岩石力学性质的影响规律,并且对两种岩样在冻结状态下的力学性质进行了比较分析。

1.3 本论文的研究思路和主要内容

近年来,随着冻结状态下岩石工程的开挖和兴建,同时因这些岩石工程而引起的岩体滑坡事故时有发生。所以越来越迫切需要把握冻结状态下应力—变形—温度以及应力—变形—应变率的变化规律。到目前为止,还没有见到冻结状态下应变率变化对岩石力学性能影响的研究报道,也没有见到冻结状态下自然干燥岩样和水饱和岩样试验研究的比较分析。

本研究为岩石力学性质方面的基础研究,通过单轴压缩试验和劈裂试验对冻结状态下北海道登别凝灰岩的力学特性进行研究。研究的内容主要有以下几个方面:

(1)岩石的地质方面性质以及岩石的初始物理性质对它的力学性质有很大的影响;试验设备、试验方法、测试方法、试件含水条件等对试验结果也有很大的影响,甚至决定着试验的成败。本研究首先对以上性质、条件、方法等进行测试、分析,以保证本研究的可行性和试验结果的正确性。

(2)研究冻结状态下应变速率的变化对单轴压缩下自然干燥和水饱和岩样强度、应变、杨氏模量、泊松比等力学参数的影响规律,并对自然干燥和水饱和岩样的力学参数进行了对比分析。

(3)研究冻结状态下应变速率的变化对劈裂试验下自然干燥和水饱和岩样强度的影响规律,并对自然干燥和水饱和岩样的力学参数进行了对比分析。

(4)基于试验结果建立能够反映应变率变化对单轴压缩下岩样强度影响规律的经验公式和加载速率的变化对岩石间接拉伸强度影响规律的经验公式。

(5)基于声发射事件累积值与轴向应变(或 AE 累积值—时间)的试验结果,对岩石破坏过程中的 AE 事件变化规律进行了探索性的分析,以期望对岩石的破坏过程有一个更加深入的认识和把握,为地下各种设施的安全性监视、预报手段开辟

一个新的方法。

(6) 利用冻结状态下同一岩样在多级应变速率下的单轴压缩试验，以此确定岩石的单轴压缩强度，并与不同岩样的试验结果进行了对比分析，初步探讨同一岩样在多级应变速率下试验可行性和试验结果的合理性。

(7) 实施常温下自然干燥和水饱和岩样的单轴压缩试验和劈裂试验，与冻结状态下岩石的力学参数进行对比，探讨温度的变化对岩石力学参数的影响规律。

2 凝灰岩的性质与试验方法

2.1 引言

岩石的成因、种类、成分以及密度、空隙率等物理性质对岩石的力学性质有很大的影响。岩石是矿物颗粒的集合体，具有明显的非均质性。其内部含有裂隙、孔洞、层理等众多类型的缺陷，这些缺陷随机地分布于岩石材料中，极大地影响着岩石的物理性质如声学特性，从而也造成了一定的离散性，通常表现为同一岩体切割下来的岩块，甚至由同一岩块加工的两个形状和尺度均完全相同的岩样，其声学特性均呈现出不同程度的差异性。在研究岩石的力学性质之前，有必要对岩石的这些性质进行考察。另外，试验装置、实验方法、测试方法等对实验结果的正确性、可信赖度具有深刻的影响。

本章对供试岩石特征、试件的制作方法进行描述。并介绍了试验装置和测试装置，其中对 AE 测试方法进行了较为详细的叙述。最后对试件的一些物理特性进行测试和分析。

2.2 凝灰岩的性质

2.2.1 凝灰岩的异向性以及方向的定义

岩石是矿物的集合体。岩石的力学性质决定于构成岩石的一个一个矿物晶粒的性质及其结合状态，也即岩石内部的结构和构造。构成岩石的矿物、结晶以及晶粒的种类、晶粒的大小及其配置、晶粒之间的结合情况、空隙等缺陷是否存在以及存在程度等不同的话，岩石的力学性质就会有很大的差异。在岩石形成过程中，经常要受到上部岩石的压力、环境温度、构造运动的影响。这些影响因素是有方向性和时间性的。在这些因素的影响下，岩石内部粒子的分布往往具有一定的方向性。这就造成了岩石力学性质具有方向性，也即力学性质的异向性。

凝灰岩内部粒子的分布、潜在微裂隙的分布也存在着方向性，也存在容易裂开的面。一般这样的面有三个，彼此几乎相互垂直，方向不同的话，强度、变形特征就存在着差别，凝灰岩有肉眼可见层理构造，如图中线条所示。

本研究为了测定凝灰岩的异向性，首先从岩块中加工了一块边长大约为 5cm 的凝灰岩岩块，用脉冲透过法测量了试块三个相互垂直方向的 P 波速度(如图 2.1 所示)。测试结果发现 Y 方向的 P 波速度比其他两个方向的速度小，这是因为流理面的存在影响了 P 波速度。可以明显地看出登别凝灰岩存在异向性。

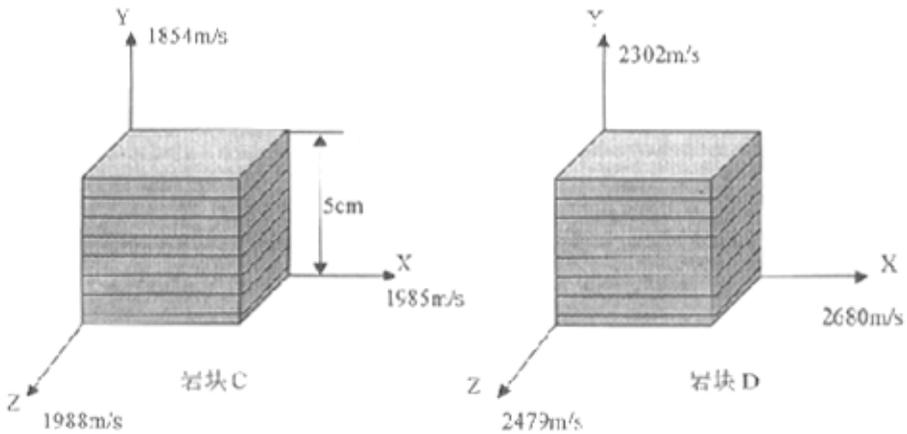


图 2.1 登别凝灰岩岩块 C 和岩块 D 三个方向的 P 波速度的测定

Fig.2.1 Measurement of P-wave speed in three directions of welded tuff

2.2.2 岩石的岩石学性质

岩石由于其生成条件及其形成后亿万年地质构造及大气风化作用，在岩石内部形成裂隙、节理、孔洞、层理、弱面等众多类型的缺陷，它们直接影响岩石的物理力学性质。地球上岩石的成分是非常复杂的。岩石的分类方法也是多种多样的。其中应用较多的一种分类方法如图 2.1 所示。据图所示，岩石根据成因可以分为三大类^[31]。

火成岩(岩浆岩)是岩浆在高温高压下，从地下上升、贯入地壳或喷出地表，冷凝而成的岩石。其显著特点为：颗粒边界起伏很大，可以相互嵌入；颗粒之间粘结力大，且结构致密。一般而言，其强度较高，易产生脆性破坏。花岗岩是一种典型的岩浆岩。沉积岩是地壳上各种松散物质或化学物质，经过搬运、沉积和成岩作用而形成的岩石。其显著特点为：颗粒之间咬合得并不很紧，与岩浆岩相

比，裂隙较大，颗粒较圆，因而颗粒之间易于发生相对滑移。凝灰岩、砂岩为这类岩石的典型代表。变质岩是岩石在高温高压等外在环境下经变质而形成的岩石。其显著特点是：宏观上结构致密，但细观上粘结力很弱，塑性变形较大。大理岩就是一种典型的变质岩。

沉积岩可进一步分为碎屑性沉积岩、火山性沉积岩、生物化学性沉积岩三类。本研究以北海道登别溶结凝灰岩为供试岩石，以后统称为登别凝灰岩。登别凝灰岩是由火山灰和火山砂经固结形成的，属于沉积岩的一种，主要矿物成分为斜长石(0.13~1.35mm)、紫苏辉石(1.0~2.5mm)、普通辉石、浮石，安山岩和玄武岩片等，在这些矿物颗粒之间有直径小于0.02mm的不透明矿物和火山玻璃被填埋。登别凝灰岩含有明显的流理面，颜色为石褐色。

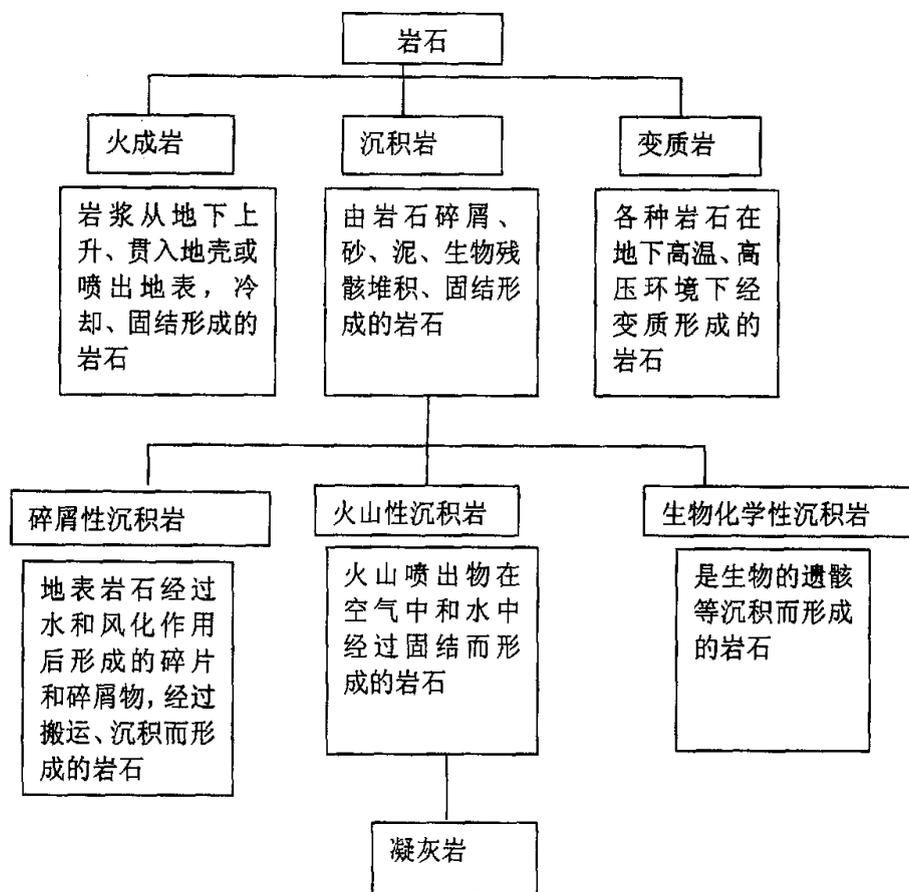


图 2.2 岩石的分类

Fig.2.2 Classification of rock

2.2.3 试件的制作方法

从北海道登别采石场,采取大小为 $40\text{cm} \times 40\text{cm} \times 80\text{cm}$ 的凝灰岩岩块 C 和 $20\text{cm} \times 30\text{cm} \times 20\text{cm}$ 的岩块 D(用于同一岩样多级应变速率下的单轴压缩试验)。试件钻孔方法如图 2.3 所示,单轴压缩试验用试件的钻孔方向沿着垂直于流理面的方向,劈裂试验用的试件沿着平行于 Z 轴的方向。

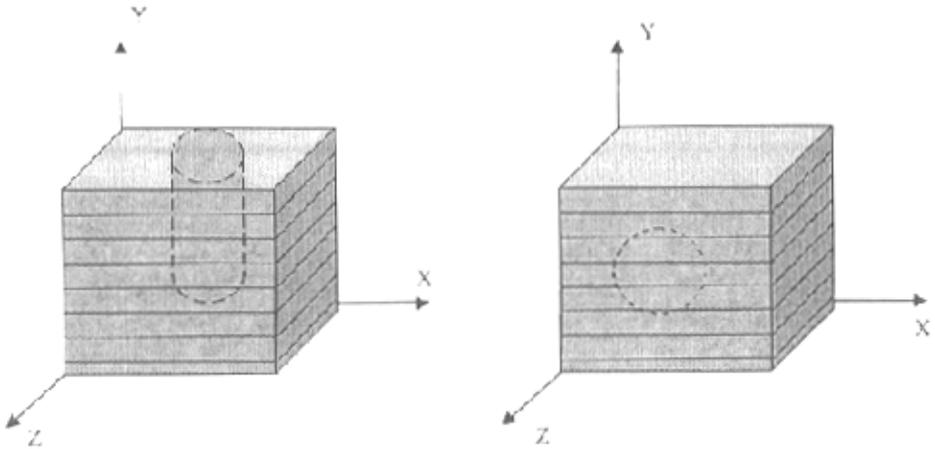


图 2.3 单轴压缩试验和劈裂试验试件的钻孔方向

Fig.2.3 Boring direction of specimen in experiment

把钻出的岩芯的两端用钻石切割器切平整(如图 2.4 所示)。然后,在磨石机上进行研磨,制成直径 30mm 、长度 60mm 和直径 30mm 、厚度 30mm 并且端面精度达到 $\pm 1/20\text{ mm}$ 之内的两种圆柱形试件。试件作成后,在自然状态下干燥一周以上。



图 2.4 单轴压缩试验和劈裂试验所使用的试件示意图

Fig. 2.4 Sketch map of specimen used in experiment

2.2.4 试件的物理性质

(1) 试件的含水条件

试件加工好后，将全部试件放在温度为 105℃ 的干燥炉中，经过 24 小时后，将其取出，并在数字式质量仪上测其质量，此质量称为炉干燥质量。然后将一部分放在自然状态下干燥一周以上后，测量了它的质量，此质量称为自然干燥质量。再将剩下的自然状态下的另一部分试件置于纯静水中，放置两周以上后，测量了它的质量，此质量称为水饱和质量。在试验中，把自然干燥岩样和水饱和岩样放置在温度为 -20℃ 的温度控制箱中，进行低温下岩石力学特性的试验研究。所以这里说的自然干燥岩样和水饱和岩样不是指在常温下，我们称之为冻结状态下自然干燥岩样和水饱和岩样。

经过上面的操作后，我们得到了实验所需要的两种试件，即自然干燥试件和水饱和试件，如表 2.1 所示。

表 2.1 试验试件的平均含水比
Table 2.1 Average ratio of containing water of specimen

试验类型	自然干燥状态平均含水比	水饱和状态平均含水比
单轴压缩试验	0.1747%	13.1570%
劈裂试验	0.1864%	13.5440%
多级应变速率 单轴压缩试验	0.225%	12.17%

从表中可以看出，试件在自然干燥和水饱和状态的含水比分别大约为 0.2% 和 13% 左右。

(2) 测定项目以及测定方法

采用单一岩石材料进行试验观测的目的是尽可能排除岩性差异引起的离散性影响，所得到的分析结果能够方便地应用到其他岩石种类。对试验用的试件，希望它们的初期物理性质尽可能相似。这里，首先测定了所有试件的物理性质。

测定的项目如下所示：

- 长度
- 直径
- 质量
- 密度
- 弹性波 (P 波) 速度

长度和直径用游标卡尺进行测量；质量用数字式质量测定仪进行测定。密度以及弹性波的计算方法如下所示。

密度：

用以上所得到的长度和直径值求出岩样的体积，根据下式可求出试件的密度。

$$\text{密度 (g/cm}^3\text{)} = \frac{\text{试件的质量 (g)}}{\text{试件的体积 (cm}^3\text{)}} \quad (2.1)$$

弹性波 (P 波) 速度

P 波通过岩石时对岩石不产生破坏，而且 P 波速度比较容易测定。因此，在推测岩石的力学性质以及岩石的内部构造时经常利用 P 波速度^[32]。

本研究为了得到凝灰岩内部结构方面的信息，用脉冲透过法测定了 P 波速度。为了测定 P 波速度，首先把两压头对准压紧，测出 P 波通过的时间。然后把试件夹在中间，测出 P 波的通过时间。后者减去前者便得到 P 波通过试件的延迟时间 t。P 波通过时间单位为 μs ，精确到小数点后两位，如试件 di1 的通过时间为 $26.96 \mu\text{s}$ 。用它和试件的长度通过下式可算出 P 波速度。

$$V_p (\text{km/s}) = \frac{L(\text{mm})}{t(\mu\text{s})} \quad (2.2)$$

V_p : P 波速度

t: P 波延迟时间

L: 试件的长度

(3) 测定结果

根据以上测定项目以及测定方法测出的试件初始物理性质值如表 2.2、2.3 所示。表 2.2 里的试件用于与单轴压缩相关的实验里；表 2.3 里的试件用于与劈裂

相关的实验里；表 2.4 里的试件用于与多级加载速率关的单轴压缩实验里。

表 2.2 中的为从试验岩块 C 加工的单轴压缩试件，最大长度为 60.40mm，最小长度为 59.50mm。试件的密度基本相同，最大为 1.967 g/cm^3 ，最小为 1.873 g/cm^3 ，平均为 1.937 g/cm^3 。从同一岩块取出的试件基本上没有太大的差别；P 波速度也大体相同，最大为 1.993 km/s ，最小为 1.792 km/s ，平均为 1.901 km/s ，变异度为 10.57%。虽然所有试件均来自同一岩块，但试件物理参数之间还是存在或多或少的差异，这是由于岩石材料具有明显的非均质性，试件的物理参数并不是局部参数的算术平均，局部结构的细微差异使得弹性波并非匀速地通过岩样。进而可以认为，试件实际上是由波速或力学性质相差很大的材料构成，不同试件含有这些材料的比例稍有差异，引起了超声波通过岩样的时间不同，从而使得波速有所不同。

表 2.3 中的为从试验岩块 C 加工的劈裂用试件，最大长度为 30.50mm，最小长度为 29.70mm。试件的密度也基本相同，最大为 1.972 g/cm^3 ，最小为 1.875 g/cm^3 ，平均为 1.944 g/cm^3 。可以发现劈裂实验试件的密度与单轴压缩试件基本上一致；劈裂试件的 P 波速度则有相对较大的差别，最大值为 2.32 km/s ，最小值为 1.988 km/s ，平均值为 2.054 km/s ，变异度为 16.16%。可以看出，平行于流理面方向加工的劈裂用试件 P 波速度有很大的变化，这主要是由于凝灰岩是一种明显的非均质材料，含有很多微小的裂隙，这些裂隙的存在对 P 波存在或大或小的影响。

表 2.4 中的为从试验岩块 D 加工的多级应变速率下的单轴压缩试件，最大长度为 60.50mm，最小长度为 59.65mm。试件的密度基本相同，最大为 2.014 g/cm^3 ，最小为 1.953 g/cm^3 ，平均为 1.977 g/cm^3 。从同一岩块取出的试件基本上没有太大的差别；P 波速度也大体相同，最大为 2.438 km/s ，最小为 2.233 km/s ，平均为 2.315 km/s ，变异度为 8.86%。D 岩块加工的试件密度和 P 波速度较 C 岩块的试件有所提高，这是因为 D 岩块结晶程度较高。

岩块具有明显的非均质性，其结构内部含有位错、裂隙、孔洞、节理和弱面等众多类型的缺陷。这些缺陷随机地分布在岩块中，对弹性波在其中的传播速度有着极大影响。岩体的声学特性除受到其内部结构，如断层、褶皱、节理、弱面等的影响外，还与含水量、应力应变状态等因素密切相关，这样现场岩体测得的声学参数离散性更大，因而岩土工程设计中声学参数的选取一定要谨慎。

表 2.2 单轴压缩试验用试件的初期物理性质

Table 2.2 Physical property of specimens used in uniaxial compression test

No.	质量(g)	长度(cm)	P 波速度(km/s)	密度(g/cm ³)
c i 1	79.62	6.00	1.792	1.9294
c i 2	80.22	6.01	1.906	1.9407
c i 3	78.58	5.98	1.841	1.9105
c i 5	80.93	6.02	1.844	1.9546
c i 6	79.74	5.97	1.923	1.9420
c i 7	80.73	6.04	1.885	1.9433
c i 8	80.84	6.00	1.878	1.9606
c i 9	79.33	5.96	1.835	1.9353
c i 10	79.24	6.00	1.847	1.9202
c i 11	80.41	6.00	1.845	1.9485
c i 12	79.77	6.01	1.885	1.9298
c i 13	80.77	6.03	1.889	1.9491
c i 14	80.5	6.02	1.884	1.9458
c i 15	80.1	5.99	1.911	1.9443
c i 16	76.65	5.95	1.893	1.8730
c i 17	80.9	6.00	1.96	1.9604
c i 18	81.15	6.04	1.94	1.9534
c i 19	79.91	6.02	1.909	1.9300
c i 20	79.71	6.00	1.921	1.9316
c i 21	80.03	6.03	1.919	1.9313
c i 22	79.4	6.02	1.898	1.9177
c i 23	81.13	6.03	1.892	1.9578
c i 24	80.95	6.01	1.939	1.9583
c i 25	78.96	6.00	1.949	1.9134
c i 26	81.05	6.00	1.967	1.9640
c i 27	79.8	5.99	1.928	1.9370
c i 28	79.3	6.01	1.894	1.9184
c i 29	81.31	6.01	1.982	1.9671
c i 30	79.88	6.02	1.879	1.9309
c i 31	80.42	6.02	1.885	1.9423
c i 32	79.88	6.00	1.888	1.9357
c i 33	80.61	6.02	1.89	1.9485
c i 34	79.96	6.03	1.9	1.9296
c i 35	80.28	6.02	1.862	1.9389
c i 36	78.96	5.97	1.866	1.9230
c i 37	80.14	6.03	1.909	1.9323
c i 38	80.44	5.98	1.909	1.9558
c i 39	79.34	6.00	1.933	1.9226
c i 40	78.75	6.01	1.993	1.9051
c i 41	80.5	6.01	1.955	1.9475

表 2.3 劈裂试验用试件的初期物理性质
Table 2.3 Physical property of specimens used in split test

No.	质量(g)	长度(cm)	直径(cm)	P波速度(km/s)	密度(g/cm ³)
ca1	39.26	2.97	2.96	2.2	1.9219
ca2	40.95	3.03	2.965	2.1	1.9584
ca3	38.87	3.00	2.96	1.988	1.8838
ca4	40.46	3.03	2.96	2.32	1.9415
ca5	39.48	2.98	2.96	2.12	1.9262
ca6	40.2	2.98	2.96	2.15	1.9614
ca7	40.49	3.02	2.96	2.179	1.9493
ca8	39.78	3.04	2.96	2.139	1.9026
ca9	40.2	3.03	2.965	2.3	1.9225
ca10	40.73	3.01	2.96	2.16	1.9674
ca11	40.27	3.03	2.96	2.15	1.9324
ca12	40.69	3.03	2.96	2.163	1.9525
ca13	41.02	3.03	2.96	2.164	1.9683
ca14	40.8	3.03	2.97	2.164	1.9446
ca15	40.09	3.01	2.96	2.15	1.9365
ca16	40.61	3.02	2.96	2.123	1.9551
ca17	39.85	3.01	2.96	2.121	1.9249
ca18	41.25	3.05	2.96	2.101	1.9664
ca19	40.28	3.02	2.96	2.142	1.9392
ca20	40.07	3.01	2.965	2.135	1.9290
ca21	40.92	3.03	2.965	2.243	1.9569
ca22	40.58	3.01	2.965	2.201	1.9536
ca23	40.36	3.03	2.965	2.167	1.9301
ca24	40.12	3.00	2.965	2.146	1.9379
ca25	38.82	3.00	2.965	2.161	1.8751
ca26	40.97	3.02	2.96	2.176	1.9724
ca27	39.62	3.03	2.96	2.179	1.9043
ca28	40	3.02	2.96	2.17	1.9258
ca29	40.08	2.99	2.96	2.189	1.9490
ca30	40.35	3.01	2.96	2.194	1.9491
ca31	39.38	2.98	2.97	2.17	1.9084
ca32	40.02	3.00	2.96	2.211	1.9396
ca33	40.36	2.98	2.96	2.147	1.9692
ca34	40.69	3.02	2.97	2.177	1.9458
ca35	39.9	3.01	2.96	2.24	1.9273
ca36	39.93	3.00	2.97	2.16	1.9222
ca37	39.4	2.98	2.97	2.145	1.9094
ca38	40.24	3.01	2.97	2.205	1.9307

表 2.4 同一岩样多级应变速率单轴试验试件的初期物理性质
Table 2.4 Physical property of the same specimen used in different strain rates

No.	质量(g)	长度(cm)	P 波速度(km/s)	密度(g/cm ³)
d i 1	81.670	6.020	2.233	1.959
d i 2	82.120	6.005	2.330	1.975
d i 3	82.280	6.00	2.326	1.980
d i 4	82.440	6.03	2.252	1.974
d i 5	81.780	5.965	2.345	1.980
d i 6	81.680	6.04	2.307	1.953
d i 7	83.950	6.02	2.438	2.014
d i 8	82.910	6.05	2.292	1.980

2.3 加载装置和测量仪器

2.3.1 加载装置

加载装置和控制装置如图 2.5 所示。加载装置用的是 MTS 公司制造的伺服材料试验机(以下简称为材料试验机)。加载装置所能加的最大荷载,单轴压缩下为 100KN。材料试验机主要能实现对三种功能的控制,也即 LOAD(荷载控制)、DEFORMATION(变形控制)、STRAIN(应变控制)。在本研究中、单轴压缩试验采取应变控制、应变率最小为 $1.68 \times 10^{-7}/s$; 劈裂试验中采取变形控制,变形率最小为 $1.01 \times 10^{-5} mm/s$ 。

如图 2.5 所示,右边为材料试验机控制装置,通过人工干预,可以实现要完成的试验。左边有一个自动温度控制箱(如图 2.6 所示),变温范围为 $-35^{\circ}C \sim +100^{\circ}C$,通程序设

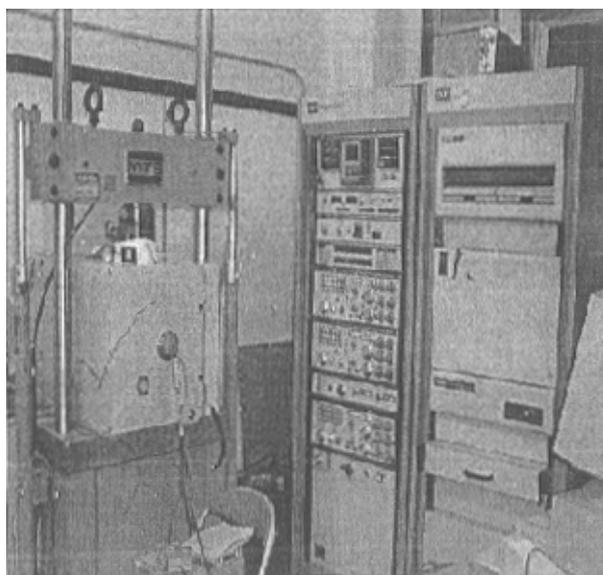


图 2.5 加载装置和控制装置

Fig. 2.5 Load equipment and control equipment

置可以达到所期望的温度。

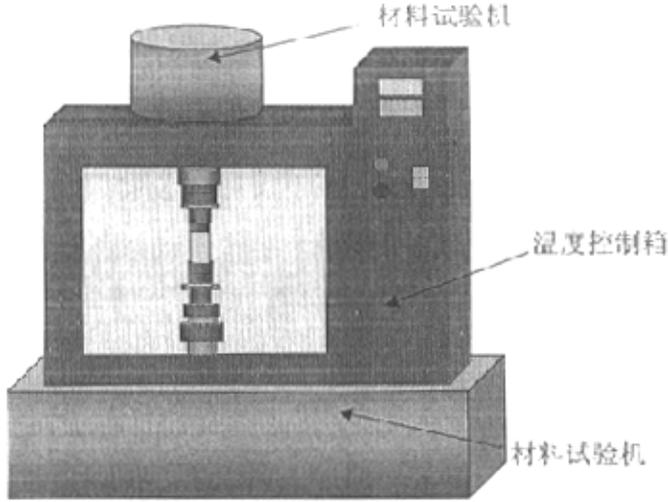


图2.6 温度控制箱示意图

Fig. 2.6 Sketch map of temperature control box

2.3.2 伺服材料试验机控制原理

试件-试验机组成的系统可以用图 2.7 力学模型来分析^[33]。图中上面的弹簧代表试验机，下面部分代表试件， P 为试验机施加在试件上的荷载， s 表示岩石试件和试验机的轴向总位移， u 为试件在轴向上的位移，设 K 为试验机的刚度，则依据胡克定律可知： $P=K(s-u)$ ，而 $P_s=f(u)$ ， $f(u)$ 为试件的位移-荷载曲线。若试验系统处于平衡状态时，则下式成立： $P=P_s$ ，即 $K(s-u) = f(u)$ 。将上式对时间求导得到：

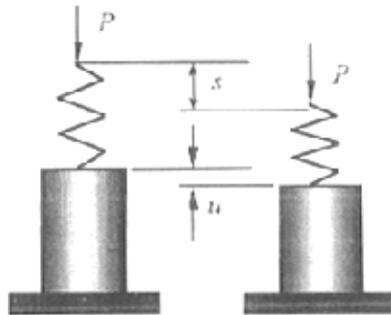


图 2.7 试件-试验机系统力学模型

Fig. 2.7 Mechanical model of specimen-test machine system

$$\begin{aligned}
 K(\dot{s} - \dot{u}) &= f'(u) \cdot \dot{u} \\
 \Rightarrow f'(u) \cdot \dot{u} + K(\dot{u} - \dot{s}) &= 0 \\
 \Rightarrow \dot{u} &= \frac{K}{K + f'(u)} \dot{s} \dots \dots \dots (2.3)
 \end{aligned}$$

公式(2.3)中 $f'(u)$ 为岩石试件位移—荷载曲线在 u 点的切线斜率, 记作 K_s 。这样公式(2.3)又可写成公式(2.4):

$$\dot{u} = \frac{K}{K + K_s} \dot{s} \dots \dots \dots (2.4)$$

通常试验机是通过油压推动活塞将力作用于试件的, 因此可以认为公式(2.4)中的 \dot{s} 是一个与油缸进油量有关的参数, 反映试验机的加载速率。

在非伺服控制情况下, 当接近试件破坏阶段时, 由于试件变形速率的急剧增大, 而人工控制油阀的反应速度较之要慢得多。故在这种情况下, 一般可以认为试验机的位移速率基本不变, 即 \dot{s} 是常数。因而由公式(2.4)易得到试件—试验机系统的稳定加载条件, 因为当公式(2.4)中的分母 $K + K_s \rightarrow 0$ 时, 如果不作相应变化, 则 $\dot{u} \rightarrow \infty$, 即试件的变形速率急剧增大, 试件将迅速发生崩溃式失稳破坏。因而, 在非位移控制的普通试验机上加载时, 失稳的临界条件为 $K + K_s = 0$ 。此式所表明的失稳条件是在 $\dot{s} > 0$ 且 $\dot{s} \rightarrow 0$ 的情况下才能成立。为了消除这一现象, 在试验过程中必须对 \dot{s} 进行调节, 使得在 $K + K_s \rightarrow 0$ 时, u 的变化也保证 $\dot{s} \rightarrow 0$ 且为 $K + K_s$ 的等价或更高阶无穷小, 即保证岩石试件的变形速率

$$\dot{u} = \frac{K}{K + K_s} \dot{s} = \text{常数}$$

这表明即使 $K + K_s \rightarrow 0$, 但由于 \dot{s} 的变化协调了 $K + K_s$ 的变化, 同时保证了试验机的变形速率恒定, 即稳定加载。这就是试验机的伺服原理。显然伺服试验机并不依靠其刚度, 而是当 $K + K_s$ 减小导致 \dot{u} 增大时, 通过伺服控制减小 \dot{s} 来使 \dot{u} 降下来, 如此循环, 便达到了恒变形速率加载的目的。

2.3.3 测量仪器

在与单轴压缩有关的试验(如图 2.8 所示)里, 测定了荷载、轴向位移、横向位移和 AE。在与劈裂有关的试验(如图 2.9 所示)里, 测定了荷载和 AE。荷载用 load cell 进行测量。单轴压缩试验里, 轴向位移用两个直线形轴向位移计(东京测量仪器研究所制 CDP-5), 安装在试件两边进行测量, 然后取两者的平均值。横向应

变用环状应变计(东京测量仪器研究所制 RAW-30)进行测量, 计测装置示意图 2.10 所示。

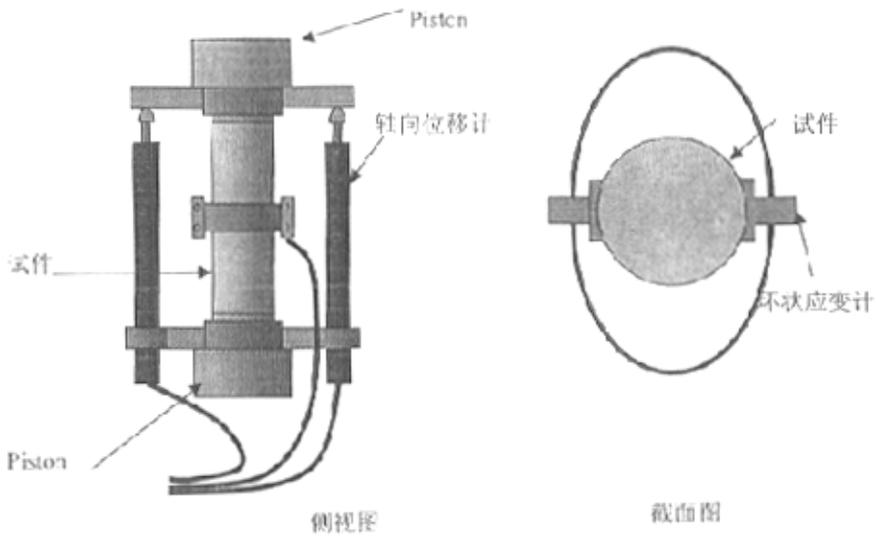


图 2.8 单轴压缩试验示意图

Fig.2.8 Sketch map of uniaxial compression test

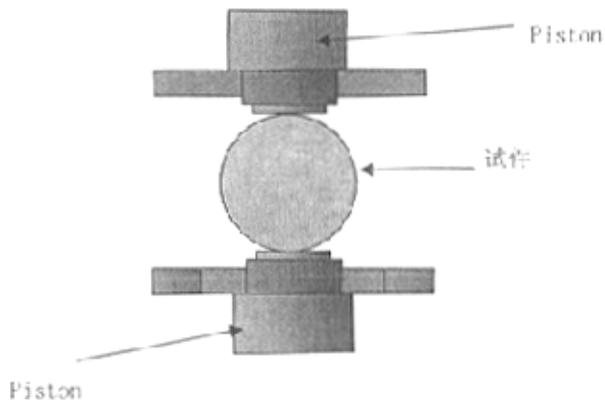


图 2.9 劈裂试验示意图

Fig.2.9 Sketch map of split test

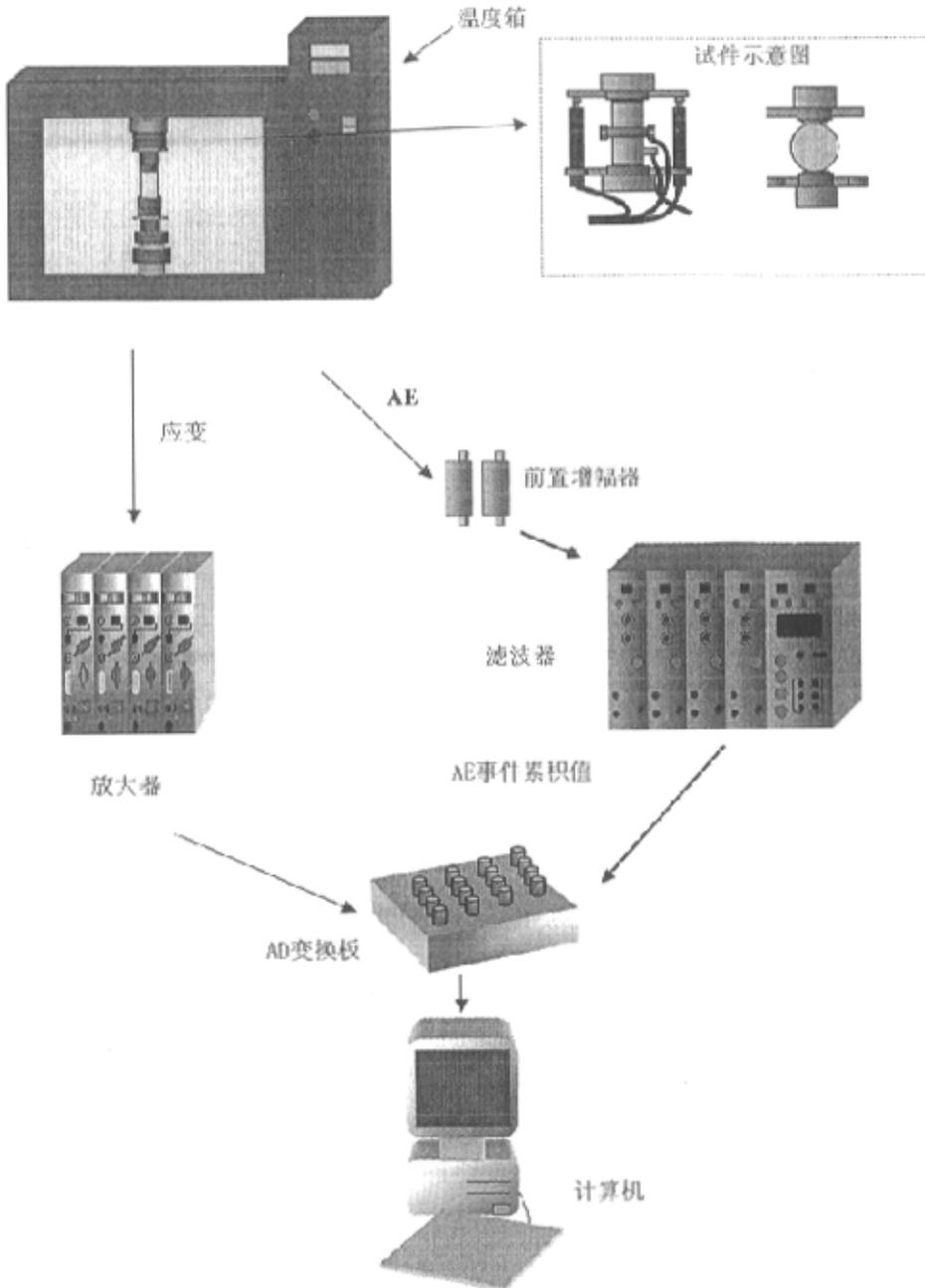


图2.10 计测装置
Fig.2.10 Measurement equipment

2.4 破坏过程与AE

2.4.1 AE的一般特征

近年来,有关AE的研究以及应用AE的研究相当活跃。AE被认为是一种预测和监视材料破坏的有用手段。

Acoustic Emission即声发射,简称AE。最初,人们考虑到AE也许用来预测材料的破坏而引起人的注意。这里请先考虑一下破坏现象。人们常说某种东西“突然破坏”。实际上,一般先产生微小的破坏,微小的破坏逐渐扩展导致最终的破坏。正因为如此,若能检测出微小的破坏,那么就可能预测破坏的发展。AE一般指与微小破坏相伴产生的、可检测到的微弱的信号(非可听音)。

AE可以这样定义“因固体材料内部发生微小破坏或因破坏而放出能量而产生的弹性波动现象”^[34]。这当然包括裂隙形成现象,另外还包括结晶物质的变位,变形等现象。根据定义,凡能使固体材料内部发生弹性波动的现象统称AE。

现以裂隙为对象说明一下能量的放出过程。当固体材料受到力的作用或发生变形,外力做的功以能量形式储存在材料内部。当能量积聚到一定程度时,就会产生裂隙而释放多余的能量。这时,大部分能量都消耗于形成新表面。根据Griffith破坏理论,这个过程中应变能主要转换成表面能。实际上,在形成表面能的同时,还有少量其它能量,转化为光能、声能、磁能等而消耗掉。作为AE而可以被检测到的弹性波动也是这少量能量中的一种。

AE是与微小破坏相伴而产生的。根据检测装置的性能和材料,象0.1mm大小的裂隙可轻松地检测出来。当然,这需要使用增幅装置进行增幅。另外还需要有能检测弹性波动的变换器,通常是感度高、变换效率好的PZT压电材料。

除感度之外,AE的另一特征是频率。一般把kHz—MHz的高频段称做AE,但以地基和岩石为对象的领域,AE的频率值是比较低的。人的可听域最高为20kHz,AE的主要部分在可听域之外,属于超声波。也就是说,作为研究对象的AE是物体发生主要破坏之前由于内部微小裂隙的形成或与之类似的能量释放过程而产生的小振幅、高频率的弹性波。

发现金属有AE现象是在1953年。但在与岩体有关的领域,AE在很早以前已被提及。矿山采矿、隧道工程等施工过程中,很早以前人们就察觉到与破坏现象相伴随的“山叫”现象。作为AE现象用仪器检测出来是1938年的事情。当时,

轴压缩试验示意图如第二章图 2.8 所示, 计测装置示意图如第二章图 2.10 所示。

3.2.2 试验的控制

单轴压缩试验采用材料试验机的轴向控制机能, 载荷按应变控制方式施加。根据应变速率的不同, 分别做了冻结状态下自然干燥岩样和水饱和岩样的单轴压缩试验。

试验采用位移控制, 设置此试验机变位 1cm 所需要的时间为 4×10^1 s、 4×10^2 s、 4×10^3 s、 4×10^4 s、 4×10^5 s, 经过计算后应变速率共为五级, 分别为 4.17×10^{-3} /s、 4.17×10^{-4} /s、 4.17×10^{-5} /s、 4.17×10^{-6} /s、 4.17×10^{-7} /s。试验温度设定为 -20°C , 试验前 24 小时, 把试件用保鲜膜包好, 置于温度控制箱里; 试验前, 把保鲜膜拔掉。在每一个试验结束后新试验进行前, 都要等待一个小时以上, 从而使温度控制箱的温度恢复到试验设定值。

在同一个试验条件下, 自然干燥岩样和水饱和岩样试验分别重复了三次。通过对试验中测得的应力—应变全过程曲线的分析, 探讨了应变速率对岩石强度、变形模量、极限应变(峰值点对应处应变)、泊松比以及破坏形式的影响规律, 并回归整理得到经验方程, 可用于计入应变速率这一重要影响因素的岩石强度和变形估算与评价。杨氏模量和泊松比是采用应力—应变曲线中直线段(应力为压缩强度的 20%—60%阶段)的相应值。

3.3 试验结果与分析

3.3.1 单轴压缩试验结果

2.4.2 AE 的分析参数

AE 的参数主要有声发射事件数 (AE event count)、声发射计数率 (AE count rate) 等。

一般来说, 材料的破坏是由微小的破坏(裂隙、空洞)不断积聚而导致全体破坏(主破坏)。AE 是与微小破坏相伴产生的。研究 AE 发生频度对研究这样的破坏过程是非常有用的。很早以前已被用来作为预测主破坏的参数之一。一般地, 声

发射计数的累计称做声发射计数累积值 (AE accumulated value); 一定时间间隔 (如 1 秒、1 分等) 内的声发射计数称为声发射计数率 (AE count rate)。

AE 的计算方法一般有两种, 即振铃 (ringdown) 计数和声发射事件计数。如下图所示:

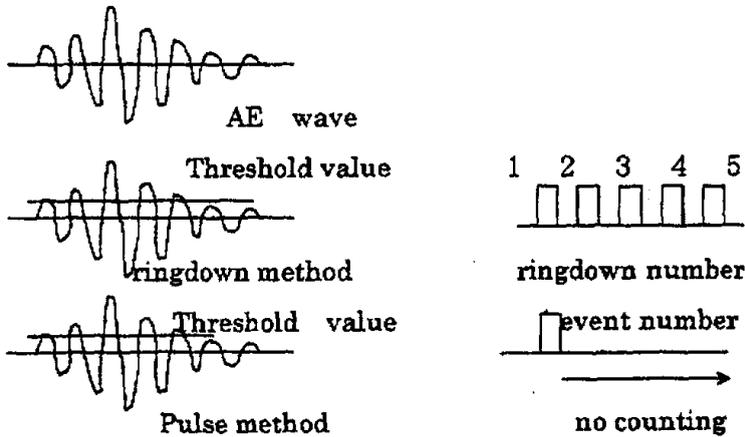


图 2.12 AE 的计数方法

Fig. 2.12 AE account method

首先对 AE 信号 (波形) 设定阈值 (threshold level) 电压为 80mv, 振铃计数把超过阈值的振幅的个数全部计算在内。而声发射事件计数对一个 AE 信号只计算一次。象图中那样, 只要有超过阈值的振幅, 就有一个脉冲信号向计数器送信, 采用脉冲方式对这个信号衰减过程所需要的不感应时间进行设定。

虽然对 AE 的发生频度与微小裂隙扩展的对应性进行过观察, 但到底多大的裂隙与所计的数对应呢? 这一点到现在为止还是很难把握。虽然, 原则上讲, 这样微小规模的裂隙的发生频度与声发射计数是一一对应的, 但并非象用显微镜观察的那样严格地对应, 最好把声发射计数看作一种相对的记数法。

2.4.3 材料的 AE 举动

较早以前人们就用声发射的发生频度来检测材料的种种微小破坏。最先是用于金属、岩石、混凝土等领域, 接着是玻璃、木材、冰、新材料等方面。今后, 应用声发射的范围将会进一步扩大。

对单轴压缩试验, 可以看到 AE 的发生有以下特征。应力—应变关系曲线几乎

呈直线的阶段，声发射计数率基本上不发生改变。在这个阶段之后，从体积应变反向增大开始，声发射事件计数率加速度增长，直至试件破坏。象这样声发射事件的发生与体积应变以及横向应变的对应关系，早已在岩石力学领域得到研究，据说相关性很高。这意味着声发射的发生与裂隙的生长是相对应的。

AE 是监视破坏过程的一种工具，它对判定材料的强度、劣化程度、耐久性非常有效，AE 技术在岩石力学性能检测、混凝土及岩土工程结构的稳定性评价及破坏事故预报等方面有良好的应用前景，

在本研究里，为了深入了解凝灰岩的破坏过程，采用了 AE 测试方式。实验时把声发射传感器（共振频率 150kHz）布置于试件的表面，采取了声发射计数累积值（AE accumulated value）的计数方法。

3 应变速率对岩石力学效应的单轴压缩试验研究

3.1 序言

载荷与变形的关系,即全程应力应变曲线是研究岩石力学特性的重要方法。就试验原理和试验条件而言,单轴压缩试验是最简单的也是最先采用的确定岩石强度、变形等力学参数的方法。即使在岩石力学试验迅速发展的今天,岩石单轴压缩试验仍然比较常用。

到目前为止,不同应变速率下的研究被广泛地报道^[35-40]。但冻结状态不同应变速率下岩石力学特性的研究报道很少。而在冻结状态下关于岩石不同含水量的试验研究几乎没有见到报道。为了给冻结状态下的岩体工程设计以及稳定性评价提供准确的力学参数,本章将通过自然干燥状态岩样和水饱和岩样在冻结状态不同应变速率下进行单轴压缩试验。基于试验结果,研究冻结状态下应变速率的变化分别对自然干燥岩样和水饱和岩样强度、变形等力学参数的影响规律,力图冻结状态工程设计和数值模拟计算时岩性参数的选择提供一定的参考依据。

本章里,在实施了单轴压缩试验的基础上,以试验结果为依据,主要作了以下几方面的分析:(1)轴向应力与轴向应变的关系;(2)轴向应力与横向应变的关系;(3)AE累积值与轴向应变的关系。另外,为了研究方便,压缩用正号表示。

3.2 试验装置和试验的控制

3.2.1 试验装置

本研究所使用的岩石力学试验系统为MTS公研制的312.21型电液伺服试验机,如第二章图2.5所示。试验机的最大载荷为10t。根据试验目的的不同,该试验机可以设置的不同最大载荷有1t、2t、5t、10t四个档。

试验中,轴向位移用轴向应变计进行采取,横向位移用环状的横向应变计进行采集,AE信号被设置在物体表面的AE传感器捕获采集,采集的结果经增幅器增幅后,与载荷信号一起输入A/D变换板,经变换后的数据用计算机进行提取。单

轴压缩试验示意图如第二章图 2.8 所示, 计测装置示意图如第二章图 2.10 所示。

3.2.2 试验的控制

单轴压缩试验采用材料试验机的轴向控制机能, 载荷按应变控制方式施加。根据应变速率的不同, 分别做了冻结状态下自然干燥岩样和水饱和岩样的单轴压缩试验。

试验采用位移控制, 设置此试验机变位 1cm 所需要的时间为 4×10^1 s、 4×10^2 s、 4×10^3 s、 4×10^4 s、 4×10^5 s, 经过计算后应变速率共为五级, 分别为 4.17×10^{-3} /s、 4.17×10^{-4} /s、 4.17×10^{-5} /s、 4.17×10^{-6} /s、 4.17×10^{-7} /s。试验温度设定为 -20°C , 试验前 24 小时, 把试件用保鲜膜包好, 置于温度控制箱里; 试验前, 把保鲜膜拔掉。在每一个试验结束后新试验进行前, 都要等待一个小时以上, 从而使温度控制箱的温度恢复到试验设定值。

在同一个试验条件下, 自然干燥岩样和水饱和岩样试验分别重复了三次。通过对试验中测得的应力—应变全过程曲线的分析, 探讨了应变速率对岩石强度、变形模量、极限应变(峰值点对应处应变)、泊松比以及破坏形式的影响规律, 并回归整理得到经验方程, 可用于计入应变速率这一重要影响因素的岩石强度和变形估算与评价。杨氏模量和泊松比是采用应力—应变曲线中直线段(应力为压缩强度的 20%—60%阶段)的相应值。

3.3 试验结果与分析

3.3.1 单轴压缩试验结果

根据试验采集的数据, 整理后通过计算机处理, 得到了应力—轴向应变、应力—横向应变、AE 累积值—轴向应变的变化曲线。在曲线绘制中, 把相同试验条件三个岩样的试验结果绘制于同一图中, 便于比较分析。

图 3.1-3.2 应变速率为 4.17×10^{-3} /s, 图 3.3-3.4 应变速率为 4.17×10^{-4} /s, 图 3.5-3.6 应变速率为 4.17×10^{-5} /s, 图 3.7-3.8 应变速率为 4.17×10^{-6} /s, 图 3.9-3.10 应变速率为 4.17×10^{-7} /s。在每一个应变速率下, 自然干燥和水饱和岩样的单轴压缩试验分别各做了三次, 每一个岩样的试验结果包括应力—轴向应变、应力—横向应变和 AE 累

积值—轴向应变三条曲线，同一岩样的用相同的图标表示，图标有圆圈、三角、方块等。

从试验结果可以看出，在相同的试验条件下，不管是自然干燥岩样还是水饱和岩样，即使由同一岩块加工的两个形状和尺度均完全相同的岩样，其强度、变形等力学参数差异很大。这是由于岩石材料具有明显的非均质性，其内部随机分布着裂隙、孔洞、位错等众多类型的不同尺度的微缺陷，从而使得岩石的力学特性存在差异性^[41]。

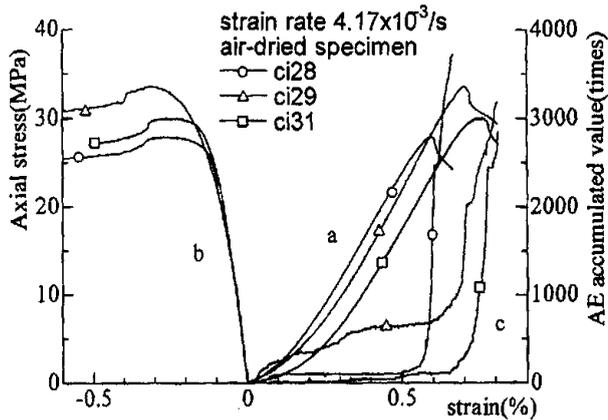


Fig. 3.1 Stress-strain and AE-strain curves obtained by uniaxial compression test in freezing condition

图 3.1 单轴压缩试验自然干燥岩样应力—应变曲线和声发射累积值—应变曲线
a. 应力—轴向应变曲线；b. 应力—横向应变曲线；c. 声发射累积值—轴向应变曲线

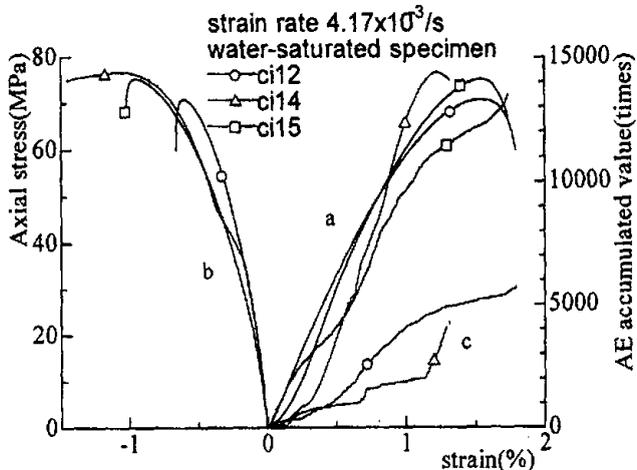


Fig. 3.2 Stress-strain and AE-strain curves obtained by uniaxial compression test in freezing condition

图 3.2 单轴压缩试验水饱和岩样应力—应变曲线和声发射累积值—应变曲线
a. 应力—轴向应变曲线；b. 应力—横向应变曲线；c. 声发射累积值—轴向应变曲线

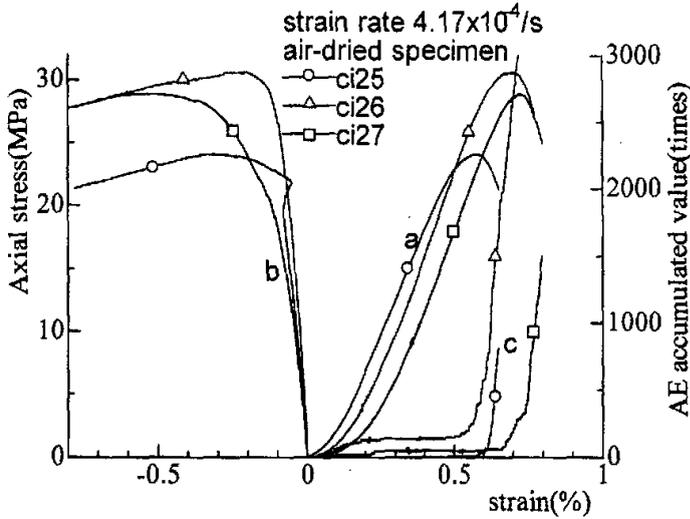


Fig. 3.3 Stress-strain and AE-strain curves obtained by uniaxial compression test in freezing condition

图 3.3 单轴压缩试验自然干燥岩样应力—应变曲线和声发射累积值—应变曲线
a. 应力—轴向应变曲线；b. 应力—横向应变曲线；c. 声发射累积值—轴向应变曲线

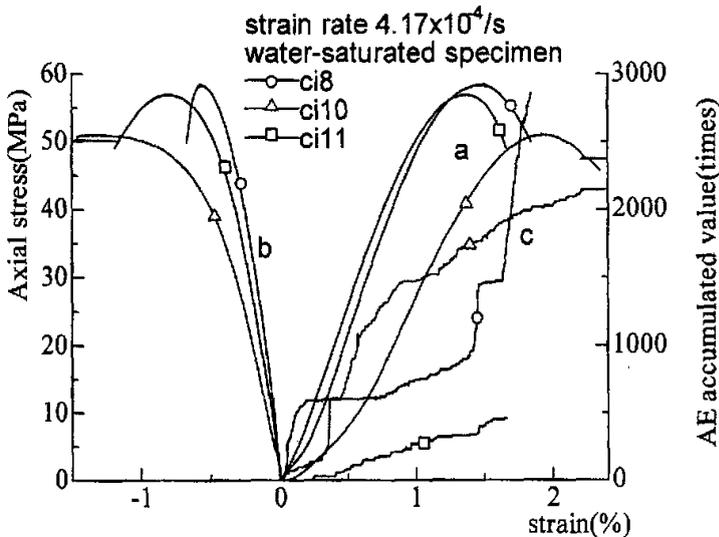


Fig. 3.4 Stress-strain and AE-strain curves obtained by uniaxial compression test in freezing condition

图 3.4 单轴压缩试验水饱和岩样应力—应变曲线和声发射累积值—应变曲线
a. 应力—轴向应变曲线；b. 应力—横向应变曲线；c. 声发射累积值—轴向应变曲线

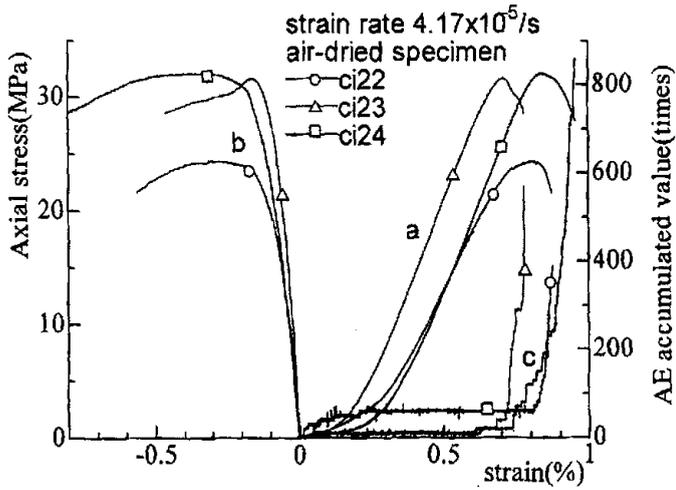


Fig. 3.5 Stress-strain and AE-strain curves obtained by uniaxial compression test in freezing condition

图 3.5 单轴压缩试验自然干燥岩样应力—应变曲线和声发射累积值—应变曲线
a. 应力—轴向应变曲线；b. 应力—横向应变曲线；c. 声发射累积值—轴向应变曲线

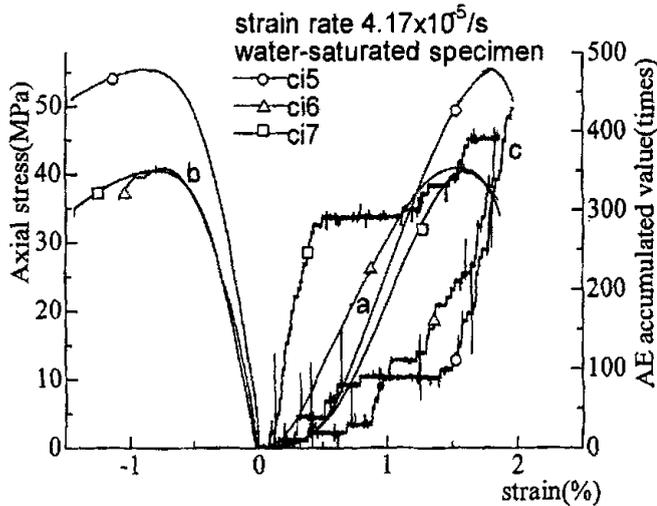


Fig. 3.6 Stress-strain and AE-strain curves obtained by uniaxial compression test in freezing condition

图 3.6 单轴压缩试验水饱和岩样应力—应变曲线和声发射累积值—应变曲线
a. 应力—轴向应变曲线；b. 应力—横向应变曲线；c. 声发射累积值—轴向应变曲线

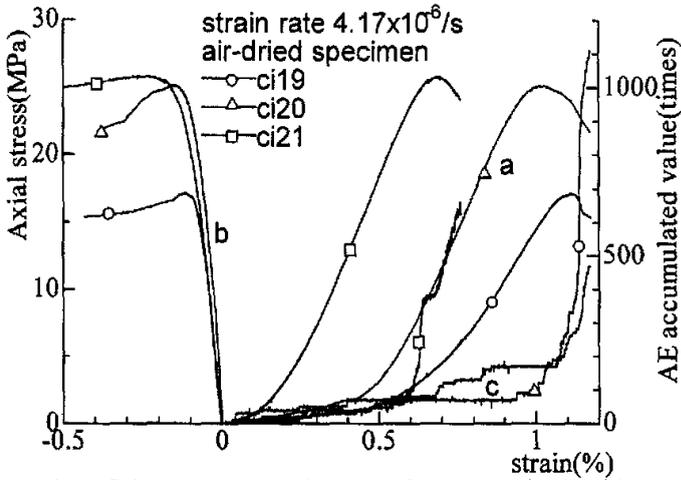


Fig. 3.7 Stress-strain and AE-strain curves obtained by uniaxial compression test in freezing condition

图 3.7 单轴压缩试验自然干燥岩样应力—应变曲线和声发射累积值—应变曲线
a. 应力—轴向应变曲线；b. 应力—横向应变曲线；c. 声发射累积值—轴向应变曲线

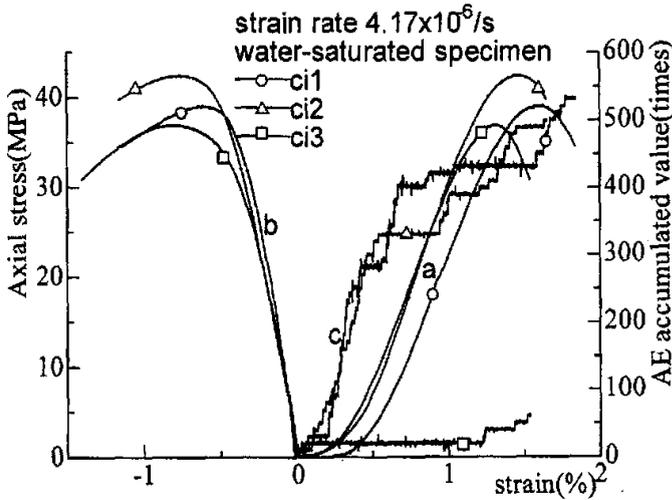


Fig. 3.8 Stress-strain and AE-strain curves obtained by uniaxial compression test in freezing condition

图 3.8 单轴压缩试验水饱和岩样应力—应变曲线和声发射累积值—应变曲线
a. 应力—轴向应变曲线；b. 应力—横向应变曲线；c. 声发射累积值—轴向应变曲线

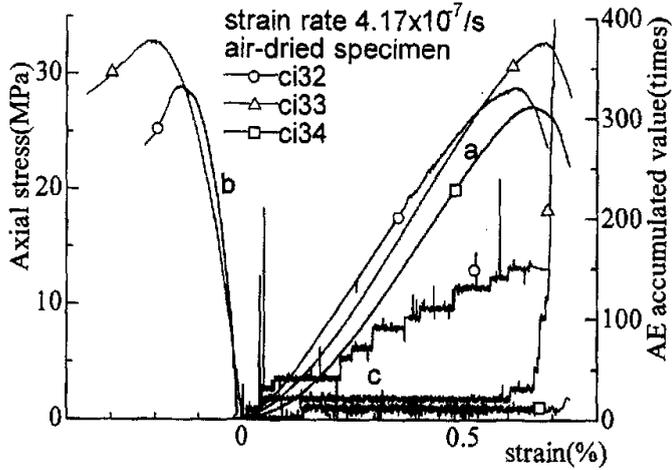


Fig. 3.9 Stress-strain and AE-strain curves obtained by uniaxial compression test in freezing condition

图 3.9 单轴压缩试验自然干燥岩样应力—应变曲线和声发射累积值—应变曲线
a. 应力—轴向应变曲线; b. 应力—横向应变曲线; c. 声发射累积值—轴向应变曲线

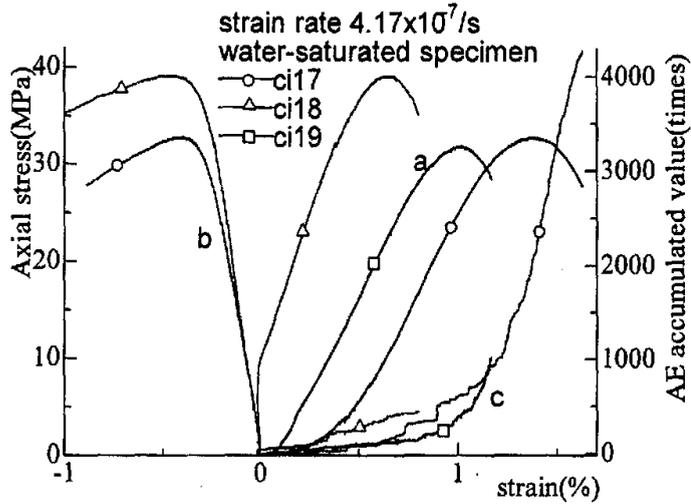


Fig. 3.10 Stress-strain and AE-strain curves obtained by uniaxial compression test in freezing condition

图 3.10 单轴压缩试验水饱和岩样应力—应变曲线和声发射累积值—应变曲线
a. 应力—轴向应变曲线; b. 应力—横向应变曲线; c. 声发射累积值—轴向应变曲线

3.3.2 单轴加载下岩样的应力应变曲线

岩石的应力应变曲线在岩石力学中占据着重要地位。它是研究岩石力学特性、确定其本构关系的物理基础，也是评价岩石工程稳定性的重要依据之一。遗憾的是，长期以来由于实验手段的限制，人们并不能对岩石峰后的力学特性进行研究。直至1966年，N.G.W.Cook和J.P.R.Hojem研制出液压-热力混合加载的刚性试验机，才获得了岩石峰值强度后的应力应变曲线^[42]。并在以后的几十年中，随着刚性试验机和先进的测试记录仪器的出现和发展，在进行了大量试验研究之后，岩石峰后的力学特性才为人们所深刻了解。

图3.11和图3.12分别为自然干燥岩样和水饱和岩样的典型轴向应力和轴向应变、轴向应力和横向应变、轴向应力和体积应变、AE累积值和轴向应变的关系曲线。岩样均为 $\phi 30 \times 60\text{mm}$ 的标准圆柱形试件，试验在MTS公研制的312.21型电液伺服试验机上进行，采用位移控制方式。试验设置的最大载荷范围为5t，荷载用测力传感器(load cell)进行测量，轴向位移用两个直线形轴向位移计(东京测量仪器研究所制CDP-5)，安装在试件两边进行测量，然后取两者的平均值。应变速率为 $\dot{\epsilon}=4.17 \times 10^{-6}/\text{s}$ 。试验机每秒采样一次，图3.11试验共采集3759个样，图3.12试验共采集5770个样。由图可知，岩石的应力应变曲线可以分为如下几个阶段^[43]。

I 压密阶段(OA)：自然干燥和水饱和岩样的应力应变曲线均出现上凹，其斜率逐渐增大，其中水饱和岩样的斜率增大更快，岩样的刚度逐渐增加。同时岩样的体积逐渐减小，这主要是由于在外载荷作用下，岩样内部裂隙、裂纹、孔洞等初始缺陷闭合的缘故，因而岩样初期加载出现非线性变形。同时从图中轴向应力与横向应变的关系曲线可以看出本阶段内横向变形很小，基本上为零，该阶段自然干燥岩样的声发射不活跃，累积值没有太大的变化，基本上保持在200回左右。而水饱和岩样的声发射在这一阶段很活跃，这是因为加载初期岩样内部的冰被压坏。

II 弹性变形阶段(AB)：自然干燥和水饱和岩样的轴向应力和轴向应变关系均近似成线性关系，变形主要为弹性变形，但也包含有少量不可恢复的塑性变形，应力应变关系近似服从虎克定律。在这一阶段，裂隙面闭合后之间的摩擦力抑制了微裂隙面之间的相互错动，从而使得变形主要为弹性的。同时，随着载荷的增加，岩样内部也产生较多微细观裂隙，在这些微细观裂隙两端会产生应力集中，

并由此而产生新的微细观裂隙或进一步扩展裂隙。本阶段内横向应变随着轴向应力的增大以较大的斜率成直线增加，干燥岩样的体积基本上呈线性均匀地减小，而水饱和岩样的体积在此阶段基本上没有变化，从 B 点开始水饱和岩样的体积开始膨胀。从声发射累积值的变化曲线可以看出，干燥岩样和水饱和岩样在该阶段声发射新事件基本上为零，累积值几乎没有太大的变化。

III 非线性变形阶段(BC)，也称为变形局部化阶段。干燥岩样和水饱和岩样曲线斜率均逐渐变缓，裂隙由随机分布逐渐向宏观裂纹过渡。由于裂纹的密集、扩展和汇合，而导致宏观裂纹的产生，在岩样非线性变形的过程中，产生裂隙面之间的滑移，从而使得横向应变的变化速率明显高于轴向应变。这一阶段由于裂纹的密集、扩展和汇合，岩样发生塑性变形，若承载断面上材料强度差异较大，则应力峰值附近的变形也将较为显著；若承载断面上材料强度差异不大，则应力峰值附近应该成为一个尖点。本阶段在峰值强度附近，干燥岩样的体积减小到最小值，然后开始膨胀；水饱和岩样的体积从 B 点开始一直在膨胀，也就是从 B 点开始岩石材料开始进入非弹性阶段，即弹塑性变形阶段。同时从声发射曲线中可以看出，该阶段声发射新事件数激增增加，这明显地证实了有大量新裂隙的产生。

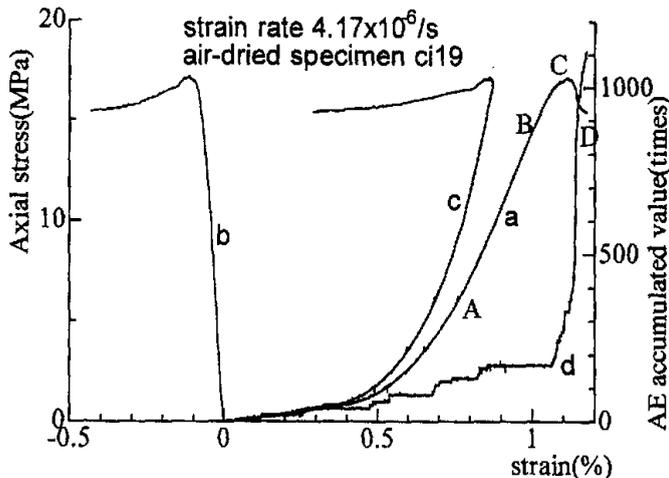


Fig. 3.11 Stress-strain and AE-strain curves obtained by uniaxial compression test in freezing condition

图 3.11 单轴压缩试验自然干燥岩样应力—应变曲线和声发射累积值—应变曲线
 a. 应力—轴向应变曲线；b. 应力—横向应变曲线；c. 应力—体积应变曲线
 d. 声发射累积值—轴向应变曲线

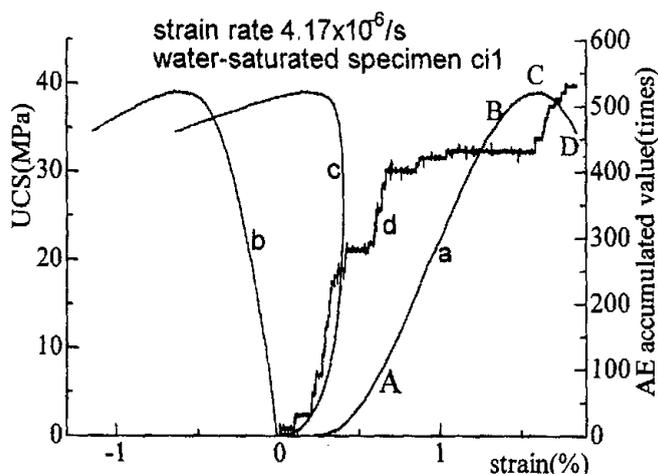


Fig. 3.12 Stress-strain and AE-strain curves obtained by uniaxial compression test in freezing condition

图 3.12 单轴压缩试验水饱和岩样应力—应变曲线和声发射累积值—应变曲线
a. 应力—轴向应变曲线；b. 应力—横向应变曲线；c. 应力—体积应变曲线
d. 声发射累积值—轴向应变曲线

IV 应变软化阶段(CD): 干燥和水饱和岩样内部均已形成宏观裂纹带, 岩样应力应变曲线的斜率为负值。此时, 由于宏观裂纹带的形成, 岩石的承载骨架总体已经破坏, 岩样主要依靠裂隙面之间的摩擦力来承载, 而且内部能够承载的有效面积也随着裂纹的扩展而逐渐减小, 因而其承载能力越来越低。轴向应力与横向应变的关系曲线也近似成线性关系, 当横向应变达到一定值后, 岩石完全失去承载能力而不能承载。这一阶段, 由于横向变形的增加, 岩样的体积继续膨胀直到破裂; 与此同时, 伴随着新裂隙的产生, 声发射事件数继续增加。要说明的是, 在较低的应变速率下的单轴试验, 由于耗时特别长, 应力应变曲线达到峰值后, 在 D 点人为停止试验; 而在高应变速率下, 由于岩样发生脆断, 所以没有得到包括峰后区完整的应力应变曲线。

3.3.3 应变速率对全程应力应变曲线的影响规律

岩石并非线弹性体, 其内部含有各种裂隙、孔洞等初始缺陷, 非均质性明显。由于这一点, 岩石的应力应变曲线较为复杂^[44-56]。

将图 3.1-3.10 中自然干燥状态下凝灰岩岩样应力应变曲线通过计算机分别绘

制在同一图中，如图 3.13 所示；经过同样的处理，将图 3.1-3.10 中水饱和状态下凝灰岩岩样的应力应变曲线绘制于图 3.14 中，相同应变速率下的试验曲线用相同的颜色表示。

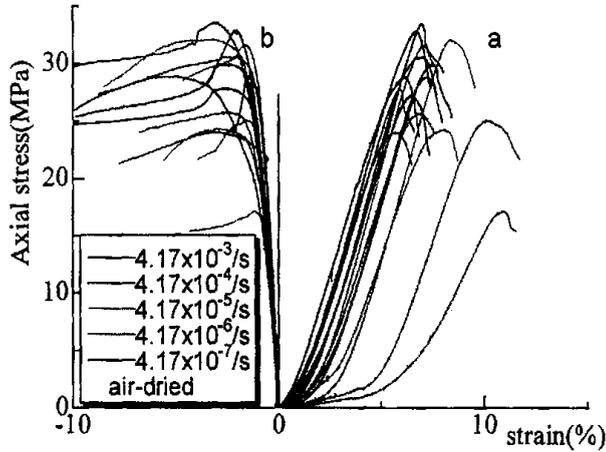


Fig. 3.13 Stress-strain curves obtained by uniaxial compression test in freezing condition

图 3.13 单轴压缩试验自然干燥岩样应力—轴向应变曲线和应力—横向应变曲线

a. 应力—轴向应变曲线；b. 应力—横向应变曲线

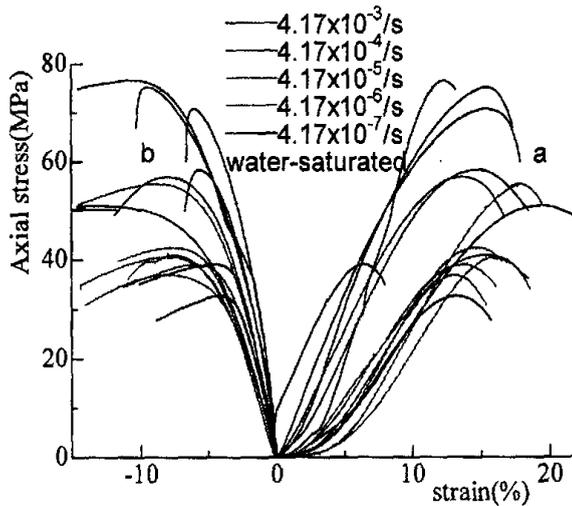


Fig. 3.14 Stress-strain curves obtained by uniaxial compression test in freezing condition

图 3.14 单轴压缩试验水饱和岩样应力—轴向应变曲线和应力—横向应变曲线

a. 应力—轴向应变曲线；b. 应力—横向应变曲线

由图 3.13 可见, 在自然干燥状态下, 应变速率不同, 岩样强度也不同, 但并非应变速率越大, 强度越高。应变速率对岩石变形特性也存在明显影响, 应变速率高时, 材料峰后脆性较强; 而应变速率低时, 峰后延性较强。由图 3.14 可见, 在水饱和状态下, 应变速率不同, 岩样强度也不同, 并且随着应变速率的增大, 强度有明显的提高。应变速率对岩石变形特性的影响不是很明显, 在应变速率最大时, 材料峰后脆性稍微有所增强; 而在稍微较低的四个应变速率下, 峰后都具有较强的延性。并且即使是采自同一岩块的同种尺度的自然干燥岩样或水饱和岩样, 屈服之前的变形大致等同, 但峰后力学特性较为复杂, 缺乏明显的规律, 因而特定应变速率下岩样的应力应变曲线并非岩石本身固有的材料特性, 而仅是材料特性在具体构件中的宏观表现, 应用于工程设计时应持谨慎态度。

从图 3.13 和图 3.14 中可以看出, 在不同应变速率下, 自然干燥岩样的峰值强度没有太大的变化, 除了应变速率最大时峰值强度有所增大外, 其它应变速率下的峰值强度呈杂乱无章的变化。而在水饱和状态下, 岩样的峰值强度随着应变速率的增大有明显增大的趋势。这是由于在自然干燥状态下, 凝灰岩是典型的非均质材料, 其内部含有各种裂隙、孔洞等初始缺陷, 非均质性明显, 所以凝灰岩的应力应变曲线较为复杂; 而在水饱和状态下, 由于冰的作用, 凝灰岩的均质性得到增强, 成为一种结构更加致密的弹性体, 缓慢的加载速率使得材料内初始损伤和增生的裂纹具有充分的时间进一步地演化和发展, 导致材料的峰值强度下降和破坏后变形曲线的跌落, 从峰后的变形曲线可以看出, 岩样的延性较自然干燥下有很大的提高。

岩样中同一承载断面其材料强度不等。随着轴向应力的增加, 岩样中低强度部分首先屈服弱化, 其承载能力降低, 但并没有完全失去承载能力, 从而使得未屈服的材料实际应力增大, 弹性应变增大, 这就造成应力应变关系曲线逐步偏离直线状态。因而, 岩样在达到峰值应力之前, 强度较低的材料均可能发生屈服弱化。另一方面, 岩样中最弱断面达到承载极限后, 轴向应力将下降, 岩样发生总体弱化。与金属材料的塑性屈服不同的是, 由于轴向应力降低, 岩样中除最弱断面在轴向压缩变形作用下屈服面积将逐步增加, 材料继续弱化外, 其它材料将处于卸载状态, 即应力峰值之后的屈服只发生在局部化区域。这实质上是岩石变形的局部化^[57]。因而, 岩样应力峰值后的屈服破坏由于轴向应力的降低而具有局部化特征。

3.3.4 岩石材料力学参数的离散性

强度、杨氏模量、泊松比、峰值应变等岩石材料重要的力学参数，在岩土工程实践中占据举足轻重的地位。由于岩石单轴压缩的应力应变关系并非直线，因而其杨氏模量具有切线模量、平均模量和变形模量等选取方法。切线模量是指应力应变曲线上某点处的切线斜率。切线斜率实际上是微小割线的斜率，在计算时涉及到两个微小量的比值，其精度难以得知，因而该值目前应用较少。而变形模量是指应力为峰值强度 1/2 处的应力与应变的比值，平均模量是指应力应变曲线上近似直线部分的平均斜率，一般也称为弹性模量，在本文研究中均选取平均模量为力学参数。对岩石材料而言，岩样的卸载过程和加载过程通常不能重复，线性变形也并不意味着弹性^[58-60]。

表 3-1 列出了图 3.1-图 3.10 中自然干燥岩样应力应变曲线对应的力学参数；表 3-2 列出了图 3.1-图 3.10 中水饱和岩样应力应变曲线对应的力学参数。

表中 E 为岩样的平均模量； ε_a 和 ε_L 分别为岩样的轴向峰值应变和横向峰值应变； σ_0 为岩样的峰值强度； ν 为岩样的泊松比。 $\bar{\varepsilon}$ 、 s 和 ξ 分别为力学参数的平均值、标准差和变异系数。通过对不同应变速率下凝灰岩岩样力学参数的统计分析，可以发现，在水饱和状态下凝灰岩岩样的平均模量以及强度、轴向峰值应变和横向峰值应变、以及泊松比均较自然干燥状态下有所增大。变化最明显的是峰值强度，随着应变速率的增大，自然干燥岩样的峰值强度变化不明显，而水饱和岩样的峰值强度却有明显的变化。可以看出，应变速率对力学参数的影响并非呈单调的线性关系。即使对于相同试验条件而言，尽管岩样尺度、形状完全等同，但其力学参数仍存在差异性，如水饱和岩样，应变速率为 $\dot{\varepsilon}=4.17\times 10^{-7}/s$ 时，其峰值强度、平均模量、泊松比以及峰值横向应变的差异系数分别达到 11.38%、24.67%、9.16% 和 5.05%，而其峰值轴向应变差异却高达 34.69%。

表 3-1 不同应变速率下凝灰岩自然干燥岩样的力学参数及其离散性
Table 3-1 Mechanical parameters and scatter of air-dried specimens in different strain rates

应变速率 /(s ⁻¹)	岩样 编号	强度 σ_0 /(MPa)	峰值轴向应变 $\varepsilon_a/(10^{-3})$	峰值横向应变 $\varepsilon_t/(10^{-3})$	弹模 E/(GPa)	泊松比 ν
4.17E-07	ci34	27.36	6.53		5.74	
4.17E-07	ci33	32.94	6.75	-2.07	4.79	0.18
4.17E-07	ci32	28.94	6.15	-3.47	5.15	0.13
	\bar{x}	29.75	6.48	-2.77	5.23	0.155
	s	2.88	0.3	0.98	0.48	0.04
	ξ	9.66%	4.67%	35.55%	9.24%	22.81%
4.17E-06	ci19	17.19	10.94	-1.16	2.67	0.1
4.17E-06	ci20	25.19	10.11	-1.45	4.56	0.15
4.17E-06	ci21	25.84	6.94	-2.61	4.56	0.18
	\bar{x}	22.74	9.33	-1.74	3.93	0.14
	s	4.82	2.11	0.76	1.09	0.04
	ξ	21.18%	22.62%	43.99%	27.85%	28.74%
4.17E-05	ci22	24.37	8.1	-2.98	4.78	0.19
4.17E-05	ci23	31.69	7.07	-1.55	5.5	0.15
4.17E-05	ci24	32.16	8.37	-3.15	5.32	0.2
	\bar{x}	29.41	7.85	-2.56	5.2	0.18
	s	4.36	0.69	0.88	0.37	0.03
	ξ	14.84%	8.77%	34.35%	7.19%	15.80%
4.17E-04	ci25	24.12	5.78	-3.14	5.43	0.2
4.17E-04	ci26	30.65	6.76	-2.06	5.74	0.18
4.17E-04	ci27	28.92	7.29	-5.42	5.34	0.25
	\bar{x}	27.9	6.61	-3.54	5.5	0.21
	s	3.38	0.77	1.72	0.21	0.04
	ξ	12.13%	11.58%	48.54%	3.85%	17.79%
4.17E-03	ci28	27.93	5.93	-2.45	5.34	0.21
4.17E-03	ci29	33.62	7.03	-3.16	5	0.22
4.17E-03	ci31	30.03	7.5	-2.40	4.93	0.18
	\bar{x}	30.53	6.82	-2.67	5.09	0.2
	s	2.88	0.81	0.43	0.22	0.02
	ξ	9.42%	11.86%	16.04%	4.34%	10.13%

表 3-2 不同应变速率下凝灰岩水饱和岩样的力学参数及其离散性
Table 3-2 Mechanical parameters and scatter of water-saturated specimens in different strain rates

应变速率 (s^{-1})	岩样 编号	强度 σ_c (MPa)	峰值轴向应变 $\epsilon_a/(10^{-3})$	峰值横向应变 $\epsilon_L/(10^{-3})$	弹模 E/(GPa)	泊松比 ν
4.17E-07	ci17	32.88	13.16	-3.99	4.17	0.36
4.17E-07	ci18	39.21	6.33	-4.36	6.16	0.43
4.17E-07	ci39	31.96	10.09	-4.00	4.06	0.38
	\bar{x}	34.68	9.86	-4.12	4.8	0.39
	s	3.95	3.42	0.21	1.18	0.04
	ξ	11.38%	34.69%	5.05%	24.67%	9.16%
4.17E-06	ci1	39.18	13.99	-6.29	4.22	0.39
4.17E-06	ci2	42.53	14.72	-7.65	4.61	0.51
4.17E-06	ci3	37.01	13.14	-7.96	3.92	0.41
	\bar{x}	39.57	13.95	-7.30	4.25	0.44
	s	2.78	0.79	0.89	0.35	0.06
	ξ	7.03%	5.67%	12.17%	8.16%	13.77%
4.17E-05	ci5	55.53	17.87	-8.69	4.85	0.38
4.17E-05	ci6	41.34	15.93	-7.98	3.85	0.39
4.17E-05	ci7	40.63	16.05	-7.92	3.95	0.42
	\bar{x}	45.83	16.62	-8.19	4.21	0.39
	s	8.4	1.09	0.43	0.55	0.02
	ξ	18.33%	6.54%	5.21%	13.07%	5.94%
4.17E-04	ci8	58.55	15.13	-5.75	5.89	0.37
4.17E-04	ci10	51.18	19.21	-12.58	4.27	0.46
4.17E-04	ci11	56.99	13.7	-7.99	5.69	0.47
	\bar{x}	55.57	16.01	-8.77	5.28	0.43
	s	3.89	2.86	3.48	0.89	0.06
	ξ	6.99%	17.88%	39.67%	16.78%	12.93%
4.17E-03	ci12	71	15.15	-5.90	6.52	0.34
4.17E-03	ci14	76.77	12.25	-10.43	7.74	0.47
4.17E-03	ci115	75.31	15.44	-9.47	7.61	0.46
	\bar{x}	74.36	14.28	-8.60	7.29	0.42
	s	3	1.76	2.39	0.67	0.07
	ξ	4.04%	12.35%	27.79%	9.19%	17.47%

3.3.5 应变速率对峰值强度的影响规律

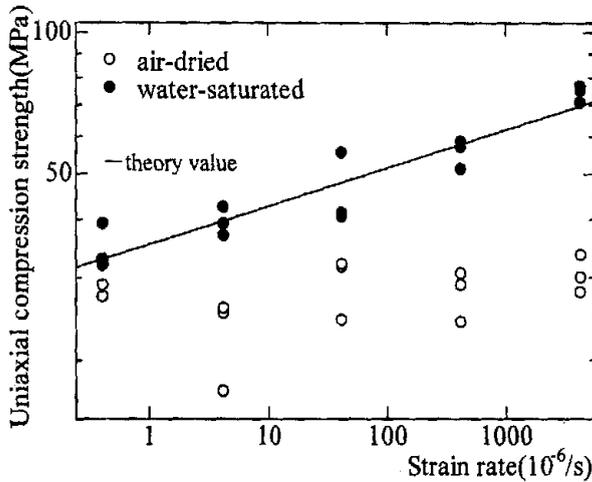


Fig. 3.15 Relation between uniaxial compression strength and strain rate obtained by uniaxial compression test in freezing condition

图 3.15 冻结状态下单轴压缩试验应变速率对峰值强度的影响规律

峰值强度即为岩石的单轴抗压强度。根据五个不同应变速率下的试验测试结果，其中每一个应变速率下都有三个岩样的试验结果，将自然干燥岩样和水饱和岩样的峰值强度绘在同一双对数坐标系中，如图 3.15 所示。从总体上看，除了个别点外，当应变速率从 $10^{-7}/s$ 增大至 $10^{-3}/s$ 时，对应的峰值强度的平均值分别为 29.75MPa、22.74 MPa、29.41 MPa、27.9 MPa、30.53 MPa，自然干燥岩样的峰值强度基本上没有太大的变化。因此在冻结状态下自然干燥岩样的峰值强度特性受应变速率的影响不大，但由于试验中并未能对变化范围更大的应变速率进行观测，因而图 3.15 求算的峰值强度仅使用于一定的应变速率范围；从图中还可以看出，五级应变速由小变大时，对应的峰值强度的平均值分别为 34.68MPa、39.57 MPa、45.83 MPa、55.57 MPa、74.36 MPa。当应变速率从 $10^{-7}/s$ 增大至 $10^{-3}/s$ 时，水饱和岩样的峰值强度增大了 114%。经过对试验数据的分析观察后发现峰值强度与应变速率在双常用对数坐标系里呈线性关系，其关系曲线为 $\lg \sigma_0 = a + b \lg \dot{\epsilon}$ ，其中 σ_0 为单轴抗压强度， $\dot{\epsilon}$ 为轴向应变速率。a、b 为试验常数。通过最小二乘法拟合图中的实测值分布规律，可得， $a=2.04$ ， $b=0.08$ ，相关系数 $|r|=0.94$ 。

对于凝灰岩，冻结状态下水饱和岩样峰值强度与应变速率的关系为

$$\lg \sigma_0 = 2.04 + 0.08 \lg \dot{\epsilon} \quad (3.1)$$

或写成幂函数形式的方程

$$\sigma_0 = 109.6 \cdot \dot{\epsilon}^{0.08} \quad (3.2)$$

但是由于试验中并未能对变化范围更大的应变速率进行观测，因而运用公式 3.1 用于求算峰值强度时只使用于一定的应变速率范围。

3.3.6 应变速率对峰值应变的影响规律

将岩石试件达到峰值强度时所产生的轴向应变值称为轴向峰值应变，记为 ϵ_a ；与此同时所产生的横向应变值称为横向峰值应变，记为 ϵ_L 。峰值应变是隧洞、坝基和边坡工程设计和施工中直接量测和加以控制的物理量。因此，把握不同应变速率下的峰值应变变化规律对于工程设计和施工都有积极的意义。

根据实测结果，经过计算机处理后，把不同应变速率干燥岩样峰值应变计算结果绘于同一个图中，如图 3.16 所示。

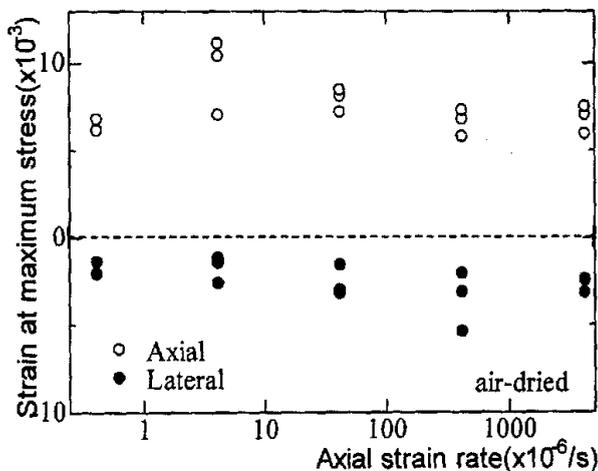


Fig. 3.16 Strain at maximum stress-strain rate curves obtained by uniaxial compression test in freezing condition

图 3.16 冻结状态自然干燥岩样单轴压缩试验应变速率对峰值应变的影响规律
空圆圈为轴向峰值应变，实圆圈为横向峰值应变

从图中可以看出,在自然干燥状态下,应变速率分别为 $4.17 \times 10^{-7}/s$ 、 $4.17 \times 10^{-6}/s$ 、 $4.17 \times 10^{-5}/s$ 、 $4.17 \times 10^{-4}/s$ 、 $4.17 \times 10^{-3}/s$ 时,对应的轴向峰值应变和横向峰值应变的平均值分别为 0.65%、0.93%、0.79%、0.66%、0.68% 和 0.18%、0.17%、0.26%、0.35%、0.27%。当应变速率为 $10^{-6}/s$ 和 $10^{-5}/s$ 时,凝灰岩岩样的轴向峰值应变稍微有所增大,但轴向峰值应变与应变速率之间并没有明显的关系,即应变速率的变化对轴向峰值应变没有很大的影响;同样,可以发现应变速率为 $10^{-4}/s$ 时,凝灰岩岩样横向应变最大,但应变速率的变化对横向峰值应变也没有明显的影响。

同样,根据实测结果,把不同应变速率水饱和岩样峰值应变计算结果绘于同一个图中,如图 3.17 所示。

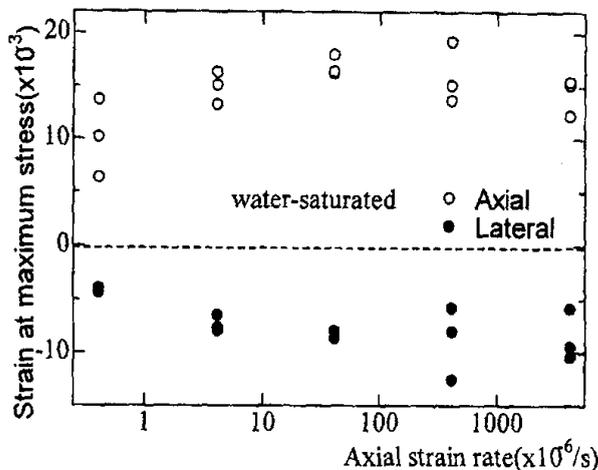


Fig. 3.17 Strain at maximum stress-strain rate curves obtained by uniaxial compression test in freezing condition

图 3.17 冻结状态水饱和岩样单轴压缩试验应变速率对峰值应变的影响规律
空圆圈为轴向峰值应变,实圆圈为横向峰值应变

从图中可以看出,在水饱和状态下,应变速率分别为 $4.17 \times 10^{-7}/s$ 、 $4.17 \times 10^{-6}/s$ 、 $4.17 \times 10^{-5}/s$ 、 $4.17 \times 10^{-4}/s$ 、 $4.17 \times 10^{-3}/s$ 时,对应的轴向峰值应变和横向峰值应变的平均值分别为 0.99%、1.40%、1.66%、1.60%、1.43% 和 0.41%、0.73%、0.82%、0.88%、0.86%。当应变速率为 $10^{-7}/s$ 时,凝灰岩岩样的轴向峰值应变和横向峰值应变均为最小;当应变速率超过 $10^{-7}/s$ 时,轴向峰值应变与横向峰值应变均有所增大,但与应变速率之间的关系不很明显。

通过试验发现,冻结状态下水饱和岩样的轴向峰值应变和横向峰值应变比自

然干燥岩样增大很多；但即使采自同一岩块的同种尺度的自然干燥和水饱和岩样，在相同的应变速率下其轴向峰值应变和横向峰值应变也有很大的差异，这是因为凝灰岩是典型的非均质材料，其内部含有各种裂隙、孔洞等初始缺陷，导致了岩石变形特性的差异。

3.3.7 应变速率对弹性模量和泊松比的影响规律

杨氏模量和泊松比是岩石材料重要的力学参数，在岩土工程实践中占据举足轻重的地位。由于岩石单轴压缩的应力应变关系并非直线，因而其杨氏模量具有切线模量、平均模量和变形模量等选取方法。切线模量是指应力应变曲线上某点处的切线斜率。切线斜率实际上是微小割线的斜率，在计算时涉及到两个微小量的比值，其精度难以得知，因而该值目前应用较少。而变形模量是指应力为峰值强度 1/2 处的应力与应变的比值，平均模量是指应力应变曲线上近似直线部分的平均斜率，一般也称为弹性模量，在本文研究中均选取平均模量为力学参数。对岩石材料而言，岩样的卸载过程和加载过程通常不能重复，线性变形也并不意味着弹性。

根据冻结状态自然干燥岩样和水饱和岩样实测结果，绘制应力应变曲线，通过这些曲线上直线段（压缩强度的 20%—60%阶段）的相应值通过计算机处理后，得到各个岩样的弹性模量和泊松比，干燥和水饱和状态分别如图 3.18 和图 3.19 所示。

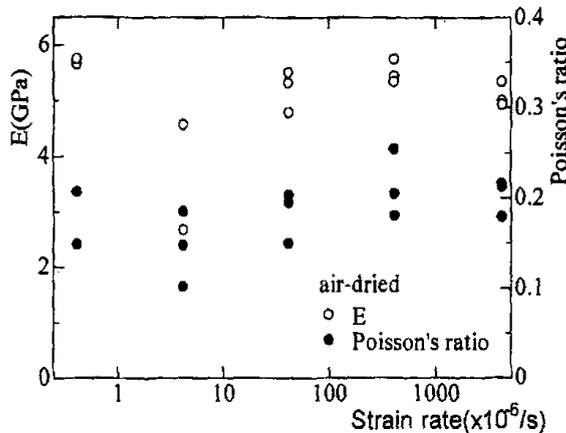


Fig. 3.18 Relation between elastic modulus,poisson's ratio and strain rate obtained by uniaxial compression test in freezing condition

图 3.18 冻结状态自然干燥岩样单轴压缩试验下应变速率对弹性模量和泊松比的影响规律
空圆圈为弹性模量，实圆圈为泊松比

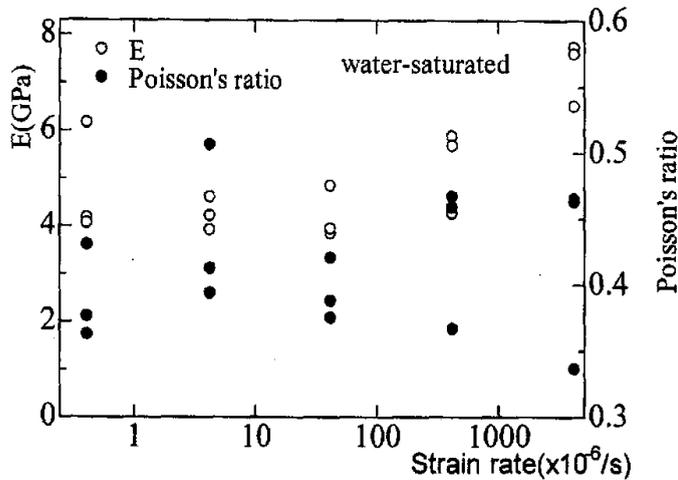


Fig. 3.19 Elastic modulus and Poisson's ratio-strain rate curves obtained by uniaxial compression test in freezing state

图 3.19 冻结状态水饱和岩样单轴压缩试验下应变速率对弹性模量和泊松比的影响规律
空圆圈为弹性模量，实圆圈为泊松比

在自然干燥状态下，应变速率分别为 $4.17 \times 10^{-7}/s$ 、 $4.17 \times 10^{-6}/s$ 、 $4.17 \times 10^{-5}/s$ 、 $4.17 \times 10^{-4}/s$ 、 $4.17 \times 10^{-3}/s$ 时，对应的弹性模量和泊松比的平均值分别为 5.23GPa、3.93 GPa、5.2GPa、5.5GPa、5.09 GPa 和 0.1、0.14、0.18、0.21、0.2。应变速率为 $\dot{\epsilon}=4.17 \times 10^{-6}/s$ 时，凝灰岩岩样的弹性模量明显减小，而在其它应变速率下弹性模量基本上保持在 5Gpa 以上，这主要是因为凝灰岩是一种典型的非均质材料，含有很多肉眼可见的裂隙、孔洞等，这些宏观缺陷的存在，导致岩石材料力学参数的离散性。在水饱和状态下，应变速率分别为 $4.17 \times 10^{-7}/s$ 、 $4.17 \times 10^{-6}/s$ 、 $4.17 \times 10^{-5}/s$ 、 $4.17 \times 10^{-4}/s$ 、 $4.17 \times 10^{-3}/s$ 时，对应的弹性模量和泊松比的平均值分别为 4.8GPa、4.25 GPa、4.21GPa、5.28GPa、7.29 GPa 和 0.39、0.44、0.39、0.43、0.42。从图中可以看出，在水饱和状态下，岩样的泊松比较自然干燥岩样有很大的提高，大约为 0.4 左右，但泊松比与应变速率之间没有明显的联系；应变速率从 $10^{-5}/s$ 增大到 $10^{-4}/s$ 时，弹性模量有很大的提高，当应变速率为 $\dot{\epsilon}=4.17 \times 10^{-3}/s$ 时，凝灰岩的弹性模量增大到 7.29GPa，比应变速率 $\dot{\epsilon}=4.17 \times 10^{-7}/s$ 时的弹性模量增大了 50% 左右。

通过试验发现，冻结状态下自然干燥岩样和水饱和岩样弹性模量和泊松比与应变速率没有明显的联系。在相同的应变速率下，两种状态岩样的弹性模量差别不大，但水饱和岩样的泊松比有很大程度的提高。

3.3.8 应变速率对体积应变的影响规律

岩石在峰前区的弹塑性段及峰后区的体积变化,很难从理论上研究。本研究通过大量的实验研究,分析不同应变速率下体积应变的变化规律。在这里,规定压缩为正,膨胀为负。

图 3.20 和图 3.21 分别为不同应变速率下部分干燥和水饱和岩样的应力—轴向应变、应力—横向应变以及应力—体积应变的曲线图,从图可以看出,在开始阶段,应力—体积应变曲线出现上凹,这主要是由于岩样在变形初期,其内部裂隙孔洞等闭合的缘故。随着应力的增加,岩样内部的空隙大部分已经闭合,岩样进入弹性变形阶段,其中自然干燥岩样的体积均匀地减小,而水饱和岩样的体积应变在此阶段几乎没有发生改变。当岩样的体积减小到一定程度后,也就是岩样开始进入屈服点时,岩石变形进入弹塑性段,体积开始膨胀,尤其在峰后区试件急剧膨胀。

从图 3.20 和图 3.21 可以看出,自然干燥岩样在达到峰值强度时,并没有恢复到原始体积,但这并不代表岩样没有发生膨胀,主要是由于凝灰岩是一种典型的非均质材料,含有肉眼可见的孔隙,因此在压缩初期由于孔隙的闭合体积减小很大,才导致岩样体积在达到峰值时也没有恢复到原始体积,也可以看出应变速率对自然干燥岩样的体积应变曲线没有太大的影响。而水饱和岩样的孔隙由于被冰充填,均质性有所提高,但由于冰的抗拉强度在 -19°C 时仅有 0.2MPa ^[61,62],所以在低应变速率下水饱和岩样的体积在达到峰值强度时仍没有恢复到原始体积,但岩样在达到最小体积后已经开始膨胀;而在高应变速率下,由于冰的冲填作用,岩样在达到峰值强度 50%附近就开始膨胀,很快恢复到原始体积,在很短的时间发生脆断。

岩石在塑性段及峰后区的体积膨胀,称为扩容和剪胀现象,这主要是由于新裂隙产生、贯穿、滑移、错动,甚至张开所造成的。因此在岩石工程施工和设计中,要避免岩石材料发生扩容或剪胀现象,也就是要把岩石应力—体积应变曲线控制在岩石轴向应力开始屈服点以内,即保证岩石的变形在弹性范围内,从而保证岩石工程的稳定性。

在研究巷道变形和围岩对支护造成的压力等问题时,考虑到岩石在塑性阶段以及峰后软化段的这一特殊的剪胀现象,有极其重要的理论意义和实际价值。例如,当用多点位移计实测粘土质岩石底板变形时,如果不论距巷道远近的两测点

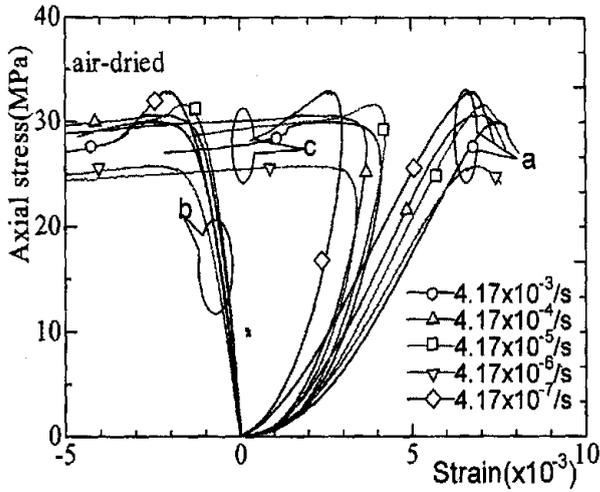


Fig. 3.20 Stress-strain curves obtained by uniaxial compression test in freezing condition

图 3.20 冻结自然干燥岩样单轴压缩试验下应变速率对体积应变等的影响规律
a. 应力-轴向应变曲线, b. 应力-横向应变曲线, c. 应力-体积应变曲线

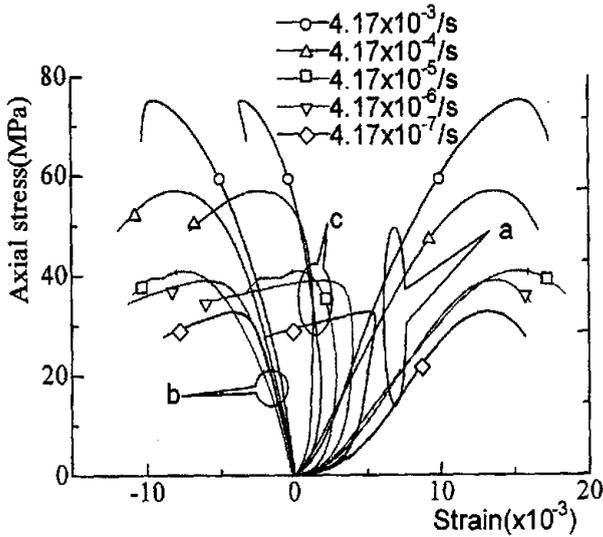


Fig. 3.21 Stress-strain curves obtained by uniaxial compression test in freezing condition

图 3.21 冻结水饱和岩样单轴压缩试验下应变速率对体积应变等的影响规律
a. 应力-轴向应变曲线, b. 应力-横向应变曲线, c. 应力-体积应变曲线

间的相对应变皆相等，说明岩石底板仅有弹性变形，或有由于粘土吸水而产生的均匀膨胀变形。但实际常发现靠近巷道两测点间的相对应变，大于较远的两测点间的相对应变，这就说明邻近巷道的一定范围的岩体有由于破裂而引起的扩容现象。因此可以据此推断巷道围岩松动圈的范围，进而为工程支护设计提供准确的力学参数。

3.3.9 不同应变速率下岩样的破坏形式

不同应变速率作用下观测得到的试件破坏形式极其复杂，基本上有以下几种类型：

①如图 3.22 所示，应变速率较低时的单向和双向剪切破坏，自然干燥岩样有

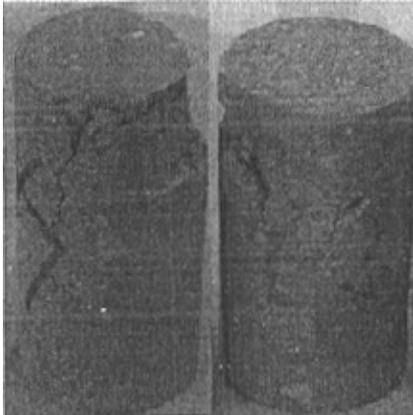


图 3.22 低应变速率下岩样的破坏形式
Fig.3.22 Fracture type of rock in low strain rate

单一断面的剪切滑移破坏和双向剪切滑移而破坏，而且基本为开口裂面破坏，应变速率为 $10^{-7}/s$ 、 $10^{-6}/s$ 时，试件多为此两种破坏方式。同时由于凝灰岩岩样粒径较大，沿轴向出现较多的劈裂面，边缘经常会有剥落岩块掉落，这可能是由于横向拉伸破坏所致。尽管岩样由同一岩块加工而成，但岩样的破坏形式显著不同，这表明由于岩石内部颗粒材料组合形式和排列方式的差异，岩样破坏形式表现出随机性。低应变速率下水饱

和岩样的破坏形式比较单一，在试件的表面出现轻微的裂纹，岩样整体完整性保持的较好。

②如图 3.23 和图 3.24 所示，在高应变速率下自然干燥的破坏形式极其复杂，多为轴向劈裂破坏，岩样沿轴向存在相当多的劈裂面，



图 3.23 高应变速率下自然干燥岩样的破坏形式
Fig.3.23 Fracture type of rock in high strain rate

但有一个贯穿整个岩样的剪切破坏面。在高应变速率下岩样的破坏形式有些一端为破裂圆锥面，在锥底产生沿轴向的张裂破坏。这可以从岩样端面与刚性垫块之间的摩擦效应来解释。单

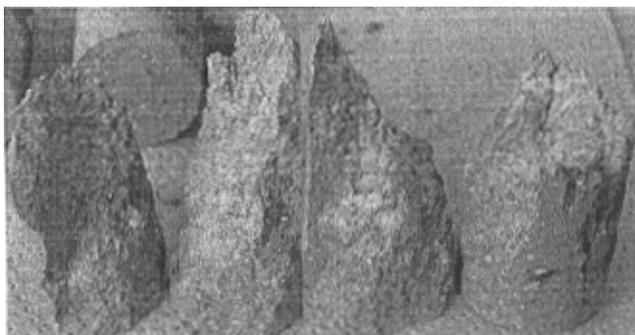


图 3.24 高应变速率下自然干燥岩样剪切破坏断口典型的照片

Fig.3.24 Fracture type of rock in high strain rate

轴压缩时，岩样应该处于一维受压状态，但由于刚性垫块的刚度大于岩样刚度，端面与刚性垫块之间存在摩擦作用，这种摩擦力改变了岩样端部的应力状态，从而使得岩样上下端部形成了三维压缩应力区，长度越小的岩样，整体均受三维压缩应力区的影响。因而由于岩样端面与刚性垫块之间的摩擦效应，岩样上下端部三维压缩应力区的影响使得岩样的破坏形式变得复杂。需要特别指出的是，在实验室岩石力学试验中，岩样端面与刚性垫块之间的摩擦效应是不可忽略的因素，可能会对岩石强度和变形特性产生一定程度的影响。

与自然干燥岩样的破坏形式相比，高应变速率下水饱和岩样的破坏形式趋于简单化，多为单一断面的剪切滑移破坏，试件在达到峰值的前后，会形成一个贯穿试件顶与底的主控断裂面，如图 3.25 所示。剪切破坏面上明显有摩擦滑移产生的白色粉末，而且断裂面较为平整。

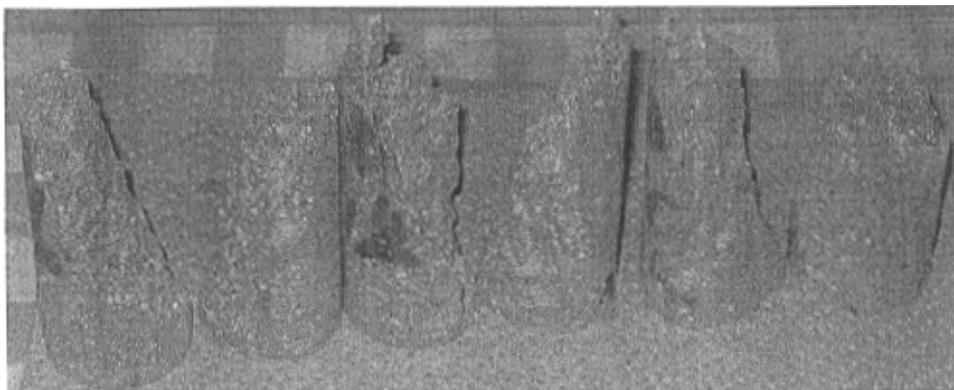


图 3.25 高应变速率下水饱和岩样剪切破坏断口典型的照片

Fig.3.25 Fracture type of rock in high strain rate

3.4 同一岩样多级应变速率下的试验

在单轴压缩试验的基础上,提出利用单一岩样进行多级应变速率加载路径下的单轴压缩试验,以此确定岩石的单轴抗压强度,这样可以消除不同岩样之间的差异对试验结果的影响,并对同一岩样不同加载路径下的试验可行性进行了初步探讨。

3.4.1 试验方法及加载路径的设置

岩石力学试验系统与前面章节里所使用试验装置是一样的。主要进行了同一岩样在冻结状态多级应变速率下的单轴压缩试验。试验的计测装置和前面单轴压缩试验里的计测装置一样。

单轴压缩试验采用材料试验机的轴向控制机能,载荷按应变控制方式施加。根据应变速率的不同,做了冻结状态水饱和岩样的单轴压缩试验。

本章的试验温度均设置为 -20°C ,岩样为水饱和岩样。

单轴压缩试验共设置了四级加载应变速率分别为 $4.17\times 10^{-3}/\text{s}$ 、 $4.17\times 10^{-4}/\text{s}$ 、 $4.17\times 10^{-5}/\text{s}$ 、 $4.17\times 10^{-6}/\text{s}$ 。在试验前24小时把岩样用保鲜膜包好置于温度控制箱中,试验时把保鲜膜去掉,然后把岩样在试验机上设置完毕,由于温度发生改变,所以要再等待一个小时开始第一级应变速率下的试验;该应变速率下的试验结束后对采集的数据保存后,进行下一个应变速率下的试验,依次而推,这样同一岩样在多级应变速率下的单轴压缩试验共成功了2个。其次进行了一次同一岩样同一应变速率下的循环加卸载试验,加载应变速率设置为 $4.17\times 10^{-6}/\text{s}$,卸载应变速率设置为 $4.17\times 10^{-4}/\text{s}$ 。在此实验中,通过x-y函数记录仪和显示的电压值(在试验过程中,通过外接显示设备可以观测到电压值,电压值的变化间接反映了应力的变化过程)确定岩样是否达到应力-应变屈服平台时即峰值强度,并且在屈服平台点停止加载同时控制试验机进行卸载。

3.4.2 试验结果与分析

如图3.26所示,为同一岩样多级应变速率下的单轴压缩试验,设置卸载速度为 $10\text{mm}/\text{s}$ 。

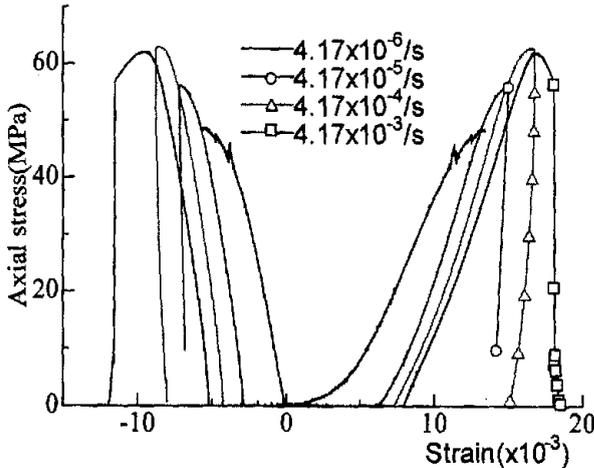


Fig. 3.26 Stress-strain curves of the same specimen with different strain rate obtained by uniaxial compression test in freezing condition

图 3.26 冻结状态同一水饱和岩样在不同应变速率的加卸载应力应变曲线
左边为应力-横向应变曲线，右边为应力-轴向应变曲线

试验在应变速率 $4.17 \times 10^{-6}/s$ 下的试验结束后，卸载过程中没有采集到样，这是因为卸载时间极短，发生时间超出了试验机的响应，也就是说小于实验数据的采样时间间隔 $0.001s$ 。第一次卸载后，在应变速率 $4.17 \times 10^{-5}/s$ 下进行第二次加载，此时岩样的强度有所增加，岩样在此加载速率下的刚度有所提高。在卸载的过程中，通过对实验数据的分析研究发现试验机只采集到 2 个样，如图中曲线上的小圆圈所示。第二次卸载后，在应变速率 $4.17 \times 10^{-4}/s$ 下进行第三次加载，发现岩样的强度一直在提高，整体刚度没有太大的变化，在达到屈服平台时开始卸载，如图中曲线上的三角形所示，卸载过程中试验机采集的样明显增多。

这说明了在较高的加载应变速率下岩样储存的弹性能增大，同时卸载所需要的时间延长。第三次卸载后，在应变速率 $4.17 \times 10^{-3}/s$ 下进行第四次加载，直至岩样发生破坏。发现岩样的峰值强度有所降低，这是因为岩样在重复加卸载过程中产生了不可恢复的塑性变形和新微裂隙的生成，从而使其强度和刚度有所降低，而没有像 3.3.5 节得到的试验结果一样，随着应变速率的升高单轴抗压强度明显增大。因此我们在进行同一岩样关于多级应变速率不同加载路径下的试验时，要选取正确的应变速率量级，从而保证试验结果的正确性和真实性。

在上面的试验中，由于在第一次卸载时，试验机没有采集到样，考虑到是由

于卸载速率过大引起的，因此又重新进行了一次试验，曲线如图 3.27 所示，确定其卸载速率为 $2.5 \times 10^{-3} \text{ mm/s}$ ，期望能够在卸载的过程中采集到样，并且以此来判断岩样在同一卸载应变速率下变形特性。

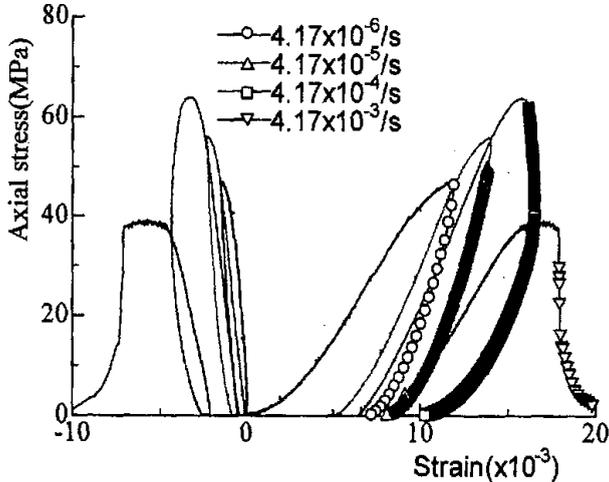


Fig. 3.27 Stress-strain curves of the same specimen with different strain rate obtained by uniaxial compression test in freezing condition

图 3.27 冻结状态同一水饱和岩样在不同应变速率的加卸载应力应变曲线
左边为应力—横向应变曲线，右边为应力—轴向应变曲线

需要说明的是，在第一次至第四次卸载中，试验机采集的样均以不同的图标表示，分别为圆圈、上三角形、方块、下三角形。通过这次较低卸载速率下的试验发现，其实在每一次卸载过程中都有数据点，并且随着应变速率的增大（除去最后一次加载），数据点的数目增大很多，采集的样个数依次为：21、236、2611。这说明岩样在高应变速率下所储存的应变能有很大提高。同时，从不同加载应变速率的曲线还可以看出，在第一次加载后，岩样内部的裂隙等缺陷已经闭合，在后来的加载应变速率下岩样更呈现出弹性体的力学特性。同样在最后一次加载直至岩样破坏试验中，由于裂隙等缺陷的产生，岩样的强度和刚度明显降低。因此通过关于应变速率下不同加载路径的试验发现，用同一岩样确定力学参数时必须把握好应变速率的量级，只有这样，才能为岩体工程的设计和计算提供正确的参数。

为了验证重复加载对岩样的破坏情况及其岩样内部裂隙的进展，我们进行了

同一岩样同一加载应变速率 $4.17 \times 10^{-6}/s$ 和同一卸载应变速率 $4.17 \times 10^{-4}/s$ 下循环四次的单轴压缩试验。试验曲线如图 3.28 所示。

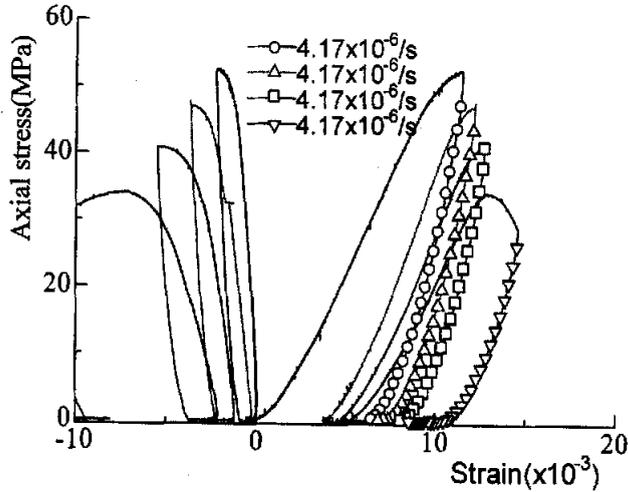


Fig. 3.28 Stress-strain curves of the same specimen with the same strain rate obtained by uniaxial compression test in freezing condition

图 3.28 冻结状态同一水饱和岩样在同一应变速率的加卸载应力应变曲线
左边为应力-横向应变曲线，右边为应力-轴向应变曲线

通过图 3.28 的变化趋势可以看出，伴随着循环次数的增多，岩样的单轴抗压强度呈现降低的趋势。通过对试验数据的分析得到在卸载过程中试验机采集到的样个数依次为 22、23、21、22。这说明了岩样在同一加载应变速率多次循环中的弹性应变是基本上一样的。图 3.29 为同一岩样和不同岩样的单轴抗压强度随加载应变速率的变化规律。

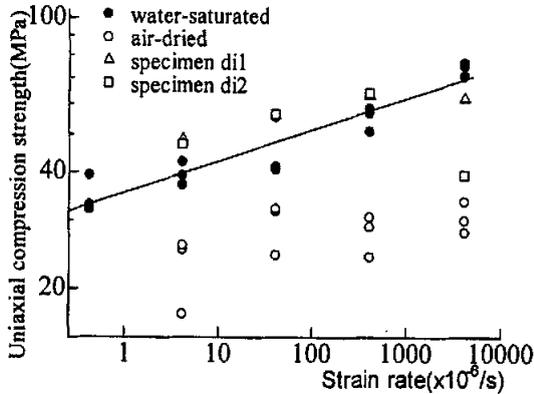


Fig. 3.29 Relation between uniaxial compression strength and strain rate obtained by uniaxial compression test in freezing condition

图 3.29 同一岩样和不同岩样的单轴压缩强度随加载应变速率的变化规律

3.5 与常温下的凝灰岩力学参数的比较分析

本论文的主要研究目的是探明冻结状态不同应变速率下凝灰岩的力学特性。为了对凝灰岩的力学特性有一个全面的了解,本节对常温下凝灰岩自然干燥岩样和水饱和岩样实施了单轴压缩试验。

试验的加载装置、控制装置和计测装置与前面单轴压缩试验一样。常温下的单轴压缩试验应变速率 $\dot{\epsilon}$ 为 $4.17 \times 10^{-6}/s$,试验机荷载范围设置为5t,温度控制在 $20^{\circ}C$ 。自然干燥岩样和水饱和岩样的单轴压缩试验分别做了三次,试验结果分别如图3.30和图3.31所示。

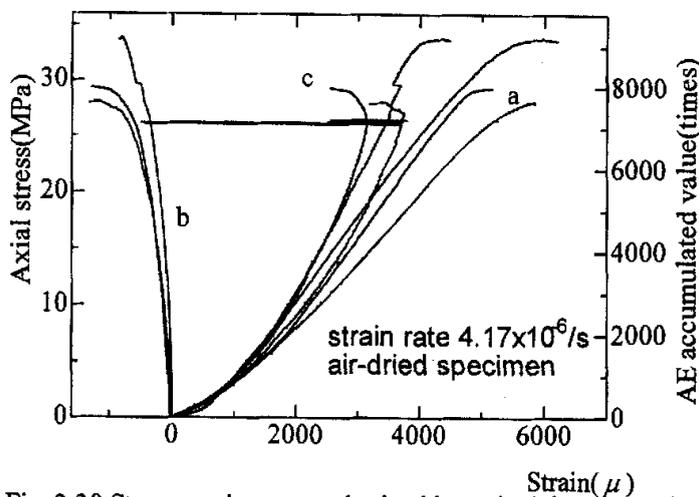


Fig. 3.30 Stress-strain curves obtained by uniaxial compression test in room temperature

图 3.30 常温下单轴压缩试验自然干燥岩样的应力—应变曲线
a. 应力—轴向应变曲线; b. 应力—横向应变曲线; c. 应力—体积应变曲线

室温下自然干燥岩样的应力应变曲线出现上凹,这主要是由于在外载荷作用下,岩样内部裂隙、裂纹、孔洞等初始缺陷闭合的缘故,因而岩样初期加载出现非线性变形。需要说明的是由于试验加载速度较慢,耗时长,所以在岩样达到峰值强度后即停止试验,因此没有得到完整的全应力应变曲线。

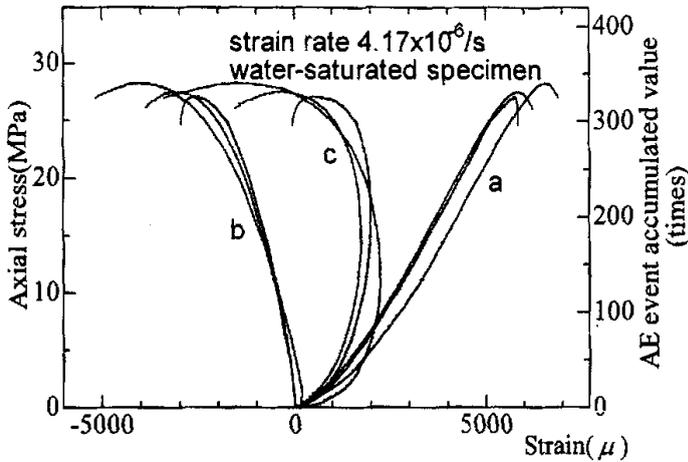


Fig. 3.31 Stress-strain curves obtained by uniaxial compression test in room temperature

图 3.31 常温下单轴压缩试验水饱和岩样的应力—应变曲线

a. 应力—轴向应变曲线；b. 应力—横向应变曲线；c. 应力—体积应变曲线

从试验结果看出，室温下水饱和岩样的抗压强度比自然干燥岩样低，这主要是因为水对岩石有弱化作用，导致岩样强度降低。从水饱和岩样的应力—体积应变曲线可以看出，在轴向应力达到峰值强度的 50% 时，岩样的体积就达到最小值并且开始膨胀；轴向应力达到峰值强度时，岩样出现扩容现象，这主要是由于裂隙产生、贯穿、滑移、错动甚至张开所造成的。可以看出，水对岩石的扩容现象有促进作用。

为了比较凝灰岩在室温和冻结状态下的力学参数，把冻结状态下应变速率为 $4.17 \times 10^{-6} \text{ s}$ 的试验岩样结果汇总于表 3-2 中。试验状态共四个，常温下自然干燥、水饱和和冻结下自然干燥、水饱和。

表中 E 为岩样的平均模量； ε_a 和 ε_L 分别为岩样的轴向峰值应变和横向峰值应变； σ_0 为岩样的峰值强度； ν 为岩样的泊松比。 \bar{x} 力学参数的平均值。

表 3-3 室温和冻结状态下凝灰岩力学参数的比较
Table 3-3 Comparison of mechanical parameters of tuff in room temperature and freezing condition

试验状态	强度 σ_0 /(MPa)	峰值轴向应变 $\varepsilon_a/(10^{-3})$	峰值横向应变 $\varepsilon_L/(10^{-3})$	弹模 E/(GPa)	泊松比 ν
dry 20°C	33.87	5.72	-0.78	6.35	0.13
dry 20°C	28.14	5.80	-1.20	6.03	0.15
dry 20°C	29.68	4.82	-0.97	6.83	0.15
\bar{x}	30.56	5.45	-0.99	6.40	0.14
wet 20°C	28.33	6.75	-4.56	6.75	0.40
wet 20°C	27.62	5.86	-3.16	6.02	0.38
wet 20°C	27.14	6.04	-4.06	6.54	0.46
\bar{x}	27.70	6.21	-3.92	6.44	0.41
dry -20°C	17.19	10.94	-1.16	2.67	0.10
dry -20°C	25.19	10.11	-1.45	4.56	0.15
dry -20°C	25.84	6.94	-2.61	4.56	0.18
\bar{x}	22.74	9.33	-1.74	3.93	0.14
wet -20°C	39.18	13.99	-6.29	4.22	0.39
wet -20°C	42.53	14.72	-7.65	4.61	0.51
wet -20°C	37.01	13.14	-7.96	3.92	0.41
\bar{x}	39.57	13.95	-7.30	4.25	0.44

通过对不同试验状态下凝灰岩岩样力学参数的统计分析发现, 常温下水对岩石强度有弱化作用; 而在冻结状态下, 冰对岩石强度有强化作用。在四种状态中, 低温下自然干燥岩样强度最小, 这是由于温度的降低在岩石内部产生了变温应力, 导致岩石的抗压强度降低。

低温状态下干燥岩样和水饱和岩样的轴向峰值应变和横向峰值应变均较常温下有所增大, 即低温下岩样的变形更大。低温下弹性模量减小很大, 而巧合的是在常温和低温下干燥和水饱和岩样的泊松比几乎没有变化。

以上分析得知, 温度的改变对岩石材料的力学参数除了泊松比外均有不同程度的影响, 而关于温度对岩石力学效应的研究目前还很少, 因此应该加大这方面的研究工作。

3.6 本章小结

本章首先对冻结状态下自然干燥和水饱和凝灰岩岩样进行了单轴压缩试验以及同一水饱和岩样在多级应变速率下的试验,然后做了常温下自然干燥和水饱和岩样的单轴压缩试验。基于试验结果,研究了岩石材料在冻结状态下应变速率对其强度、塑性变形等力学参数的影响规律,简要分析了温度的改变对岩石材料力学参数的影响规律,主要结论如下:

(1) 根据单轴压缩试验的结果,在相同的试验条件下,不管是自然干燥岩样还是水饱和岩样,即使由同一岩块加工的两个形状和尺度均完全相同的岩样,其强度、变形等力学参数差异很大。这是由于岩石材料具有明显的非均质性,其内部随机分布着裂隙、孔洞、位错等众多类型的不同尺度的微缺陷,从而使得岩石的力学特性存在差异性。

(2) 冻结状态同一应变速率下,水饱和状态的岩样峰值强度比自然干燥岩样的峰值强度有很大的提高。随着应变速率的增大,水饱和凝灰岩岩样的峰值强度相应提高,其变化规律在双对数坐标系中通过最小二乘法拟合得到如下的变化规律: $\lg \sigma_0 = 2.04 + 0.08 \lg \dot{\epsilon}$ 。而自然干燥岩样的峰值强度基本上不受应变速率的影响。

(3) 凝灰岩试件的弹性模量、泊松比以及达到峰值强度时的应变值与所施加的应变速率的变化无关。自然干燥和水饱和状态下的岩样对应力学参数的离散性较大。不同应变速率下岩石的变形模量和泊松比离散性显著,不能作为材料的力学参数表征岩石的变形特性,应用于现场工程设计时应谨慎。

(4) 岩石材料的非均质性、岩样端面不平行度的误差、端面与垫块之间的摩擦效应以及屈服破坏的局部化均有可能对岩石力学特性造成很大的影响,由此造成的离散性完全可以屏蔽掉应变速率对岩石强度的影响。

(5) 冻结状态单轴压缩下岩样的破坏形式主要为剪切滑移破坏和轴向劈裂破坏。而且应变速率越大,破坏形式越复杂;自然干燥岩样的破坏形式随着应变速率的增大明显的由单一断面的剪切滑移破坏向复杂形式转变,并且即使同一应变速率下岩样的破坏形式也是各不相同。水饱和岩样的破坏形式随着应变速率的增大由表面轻微的裂纹到单一断面的剪切滑移破坏,也就是说冻结状态下水饱和岩样的破坏形式趋于简单化。

(6) 在单轴压缩试验的基础上,提出利用单一岩样进行多级应变速率加载路

径下的单轴压缩试验，以此确定岩石的单轴抗压强度，这样可以消除不同岩样之间的差异对试验结果的影响。

(7) 通过低温和常温下岩石力学参数的对比分析，发现相同的含水条件下，温度的改变对力学参数除了泊松比外影响很大；常温下水对岩石强度有弱化作用，而在低温下冰对岩石强度有强化作用。

4 劈裂试验加载速率对岩石力学效应的试验研究

4.1 序言

随着今后对地下空间利用规模的增加,在地下工程施工、维护过程中,岩石顶板等部位肯定会存在局部受拉伸应力作用的地方,这不仅会产生落石等现象,还会对地下设施整体的安全性带来很大的影响。为解决这样的问题,就必须对作为岩石集合体的岩体的强度、变形、破坏进行研究。这就需要首先对岩石在拉伸应力下强度、变形、破坏的规律进行研究。

但遗憾的是,根据笔者所知,对拉伸应力下岩石的力学性质的研究不是很多,特别是在冻结状态不同加载速率下岩石的变形、破坏方面的研究进行得更少。

本章在运用巴西法(劈裂试验)进行了大量间接拉伸试验的基础上,就加载速率的变化对间接拉伸强度以及变形的力学性质进行了研究。

到目前为止,冻结状态下岩石力学特性的研究报道很少。而在冻结状态下关于不同含水量岩石在不同加载速率下的试验研究几乎没有见到报道,为了给冻结状态下的岩体工程设计以及稳定性评价提供准确的力学参数,本章将通过对自然干燥状态岩样和水饱和岩样在冻结状态不同加载速率下进行间接拉伸试验,基于试验结果,研究冻结状态下加载速率的变化分别对自然干燥岩样和水饱和岩样强度、变形等力学参数的影响规律,以为冻结状态工程设计和数值计算时岩性参数的选择提供一定的参考依据。

4.2 试验方法

4.2.1 试验装置

本研究所使用的岩石力学试验系统为 MTS 公司研制的 312.21 型电液伺服试验机,如第二章图 2.5 所示。试验机的最大载荷为 10t。根据试验目的的不同,该试验机可以设置的不同最大载荷有 1t、2t、5t、10t 四个档。试验中,轴向载荷用恒温槽外面的设置的加载元件进行记载,加载点位移根据材料试验机活塞的变位进行计测,AE 信号被设置在物体表面的 AE 传感器捕获采集,采集的结果经增幅

器增幅后,与载荷、荷载点位移信号一起输入 A/D 变换板,经变换后的数据用计算机进行提取。劈裂试验示意图如第二章图 2.9 所示,计测装置示意图如第二章图 2.10 所示。

4.2.2 关于抗拉强度试验的方法

表征岩石类材料力学特征的刚度、强度与断裂参数,如弹性模量 E 、抗拉强度等对现代岩土工程的设计和研究变得日益重要。抗拉强度为岩石试件在受到轴向拉应力后其试件发生破坏时的单位面积上所受的拉力。

在地下工程设计和施工中,岩石的抗拉强度是一个非常重要的力学指标。地下工程围岩体常处于复杂的应力状态,例如铁路隧道、公路隧道、工程边坡及地下工程洞室的围岩体,有的地方处于拉伸应力状态,而有的部位则处于压缩应力状态,由于岩石的抗拉强度远低于抗压强度,所以围岩总是从拉应力区开始破坏。因此,正确进行地下围岩体应力状态区域划分,即破坏危险区的确定是地下工程围岩稳定性分析评价的关键,而岩石抗拉强度又是确定工程围岩破坏区的基础资料之一。

由于试件不易加工,除研究直接的拉伸的夹具外,研究了大量的间接试验方法^[63-66]。径向压缩圆盘测试岩石抗拉强度已被应用了50多年,这就是著名的巴西试验,是由巴西人Hondros提出的。1999年国家质量技术监督局和中华人民共和国建设部联合颁布了《工程岩体试验方法标准》。在这个规程中,将劈裂法规定为测定岩石抗拉强度的试验方法。这样规定的理由,可能是基于轴向拉伸试验难度大,一般试验单位难以完成;而劈裂法好做,试验结果也能反映岩石的抗拉强度。

劈裂法(巴西试验)是目前国内外岩土工程界中测定岩石抗拉强度最基本的和应用最广泛的试验方法。我国各部门的岩石试验规程规范几乎都列有该法。劈裂试验是在圆柱体(亦称圆盘)试样的直径方向上对径施加线性载荷,使试样沿直径破坏的试验^[67]。根据弹性理论,圆盘内任意一点A的应力状态为:(坐标如图4.1所示)。

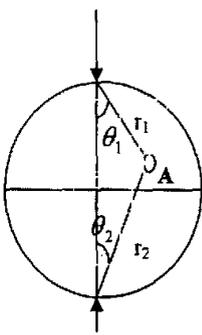


图 4.1 圆盘上的坐标

Fig.4.1 Coordinate of the disc

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{2P}{\pi d} \left(\frac{\sin^2 \theta_1 \cos \theta_1}{r_1} + \frac{\sin^2 \theta_2 \cos \theta_2}{r_2} \right) + \frac{2P}{\pi dl} \\ \sigma_y &= -\frac{2P}{\pi d} \left(\frac{\cos^3 \theta_1}{r_1} + \frac{\cos^3 \theta_2}{r_2} \right) + \frac{2P}{\pi dl} \\ \tau_{xy} &= -\frac{2P}{\pi d} \left(\frac{\cos^2 \theta_1 \sin \theta_1}{r_1} + \frac{\cos^2 \theta_2 \sin \theta_2}{r_2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

式 4.1 中

d, l — 分别为岩石圆盘试样直径和厚度;

P — 岩石圆盘试样所受的对径压力;

θ_1, θ_2 — 分别为点 A 同上下端点连线与 y 轴之间夹角;

r_1, r_2 — 分别为该点与上下端点间距离。

在圆盘中心处, $r_1 = r_2 = d/2, \theta_1 = \theta_2 = 0$. 所以

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{2P}{\pi dl} \\ \sigma_y &= -\frac{6P}{\pi dl} \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

通过公式分析表明, 圆盘中心线各点的拉应力相等; 而压应力为变化值, 在上下端点产生局部应力集中, 圆盘中心处为拉应力 3 倍数值。由于岩石抗拉强度比抗压强度低很多, 故采用劈裂法测定岩石抗拉强度值 σ_t , 且

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi dl} \quad (4.3)$$

在圆盘中心线沿 Y 轴方向各点的应力状态如图 4.2 所示,

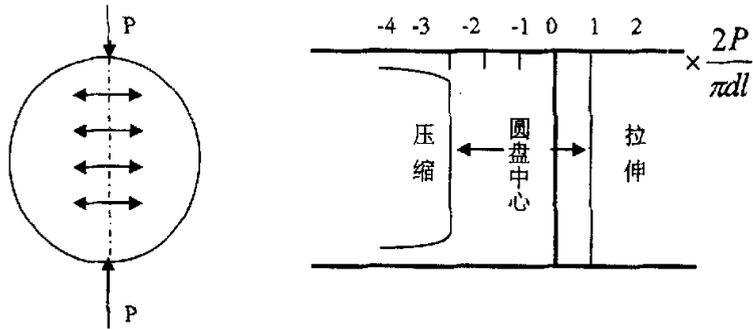


图 4.2 圆盘中心线各点处的应力状态

Fig.4.2 Stress state of the central line in the disc

劈裂法测试岩石抗拉强度，当圆盘边上受一对径向（压缩）集中力作用时，圆心处为拉应力状态，应力方向与集中力作用方向垂直。岩石抗拉强度低于其抗压强度。因此，劈裂试验时，岩石圆盘圆心处一般先拉伸破断。拉伸破坏是岩石破坏的基本形式之一，抗拉强度是岩石力学性质的重要指标，对地下工程设计、分析、计算有着重要意义。由于直接拉伸法的岩石试件加工复杂，试验操作困难，因此，普遍采用间接拉伸试验—劈裂法测定岩石抗拉强度。

4.2.2 试验的控制

劈裂试验采用材料试验机的轴向控制机能，载荷按变形控制方式施加。根据加载速率的不同，分别做了冻结状态下自然干燥岩样和水饱和岩样的劈裂试验。

加载速率 \dot{u} 共有五级，分别为 $1.01 \times 10^{-5} \text{mm/s}$ 、 $4 \times 10^{-5} \text{mm/s}$ 、 $4 \times 10^{-4} \text{mm/s}$ 、 $4 \times 10^{-3} \text{mm/s}$ 、 $4 \times 10^{-2} \text{mm/s}$ 。试验温度设定为 -20°C ，试验前 24 小时，把试验试件用保鲜膜包好，置于温度控制箱里；试验前，把保鲜膜拔掉。在每一个试验结束后新试验进行前，都要等待一个小时以上，从而使温度控制箱的温度恢复到试验设定值。

在同一个试验条件下，自然干燥岩样和水饱和岩样试验分别重复了三次。通过对大量试验中测得的荷载—荷载点位移曲线的分析，探讨了加载速率对岩石间接拉伸强度以及声发射事件总数的影响规律，首次提出的经最小二乘法回归整理得出的经验方程，可用于计入加载速率这一重要影响因素的岩石强度和变形估算与评价。

4.3 试验结果与分析

4.3.1 间接拉伸试验结果

根据试验采集的数据，整理后通过计算机处理，得到了荷载—荷载点位移、AE 事件累计值—荷载点位移的变化曲线。在曲线绘制中，把相同试验条件三个岩样的试验结果绘制于同一图中，便于比较分析。

图 4.3—4.4 载速率为 $1.01 \times 10^{-5} \text{mm/s}$ ，图 4.5—4.6 加载速率为 $4 \times 10^{-5} \text{mm/s}$ ，图 4.7-4.8 加载速率为 $4 \times 10^{-4} \text{mm/s}$ ，图 4.9-4.10 加载速率为 $4 \times 10^{-3} \text{mm/s}$ ，图 4.11-4.12 加载速率为 $4 \times 10^{-2} \text{mm/s}$ 。在每一个加载速率下均有自然干燥和水饱和两种岩样。

从试验结果可以看出，在相同的试验条件下，不管是自然干燥岩样还是水饱和岩样，即使由同一岩块加工的两个形状和尺度均完全相同的岩样，其劈裂荷载、变形和声发射累积值等力学参数差异很大。

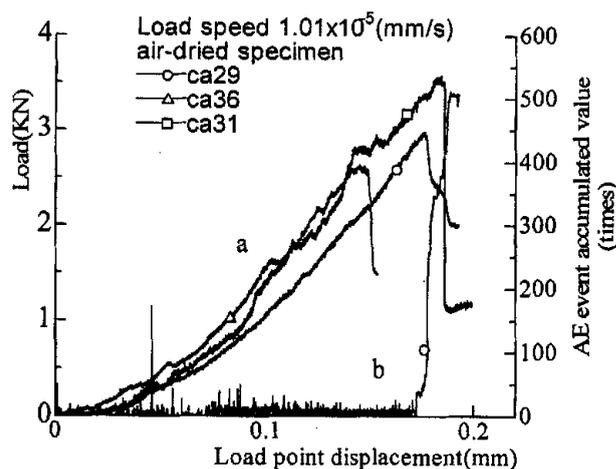


Fig.4.3 Load-load point displacement and AE-LPD curves obtained by Brazilian test in freezing condition

图 4.3 冻结状态自然干燥岩样劈裂试验下荷载、声发射累积值—荷载点位移曲线
a. 荷载—荷载点位移曲线，b. 声发射累积值—荷载点位移曲线

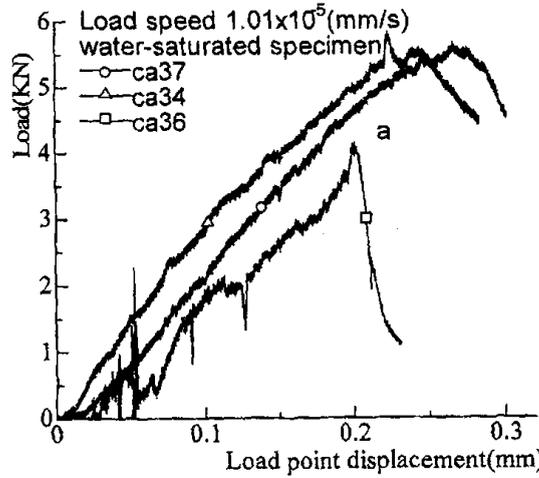


Fig. 4.4 Load-load point displacement curves obtained by Brazilian test in freezing condition

图 4.4 冻结状态水饱和岩样劈裂试验下荷载-荷载点位移曲线
a. 荷载-荷载点位移曲线

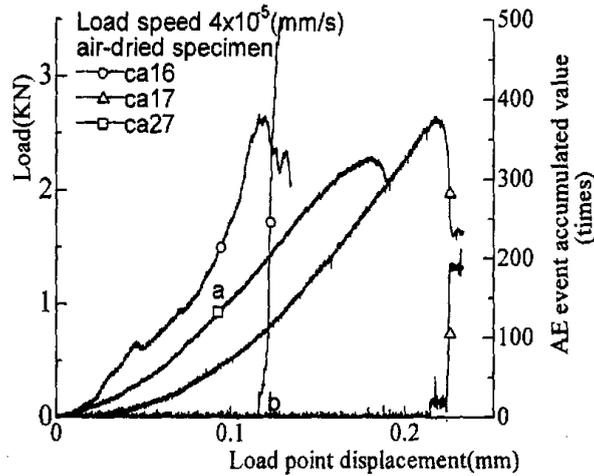


Fig. 4.5 Load-load point displacement and AE-LPD curves obtained by Brazilian test in freezing condition

图 4.5 冻结状态自然干燥岩样劈裂试验下荷载、声发射累积值-荷载点位移曲线
a. 荷载-荷载点位移曲线, b. 声发射累积值-荷载点位移曲线

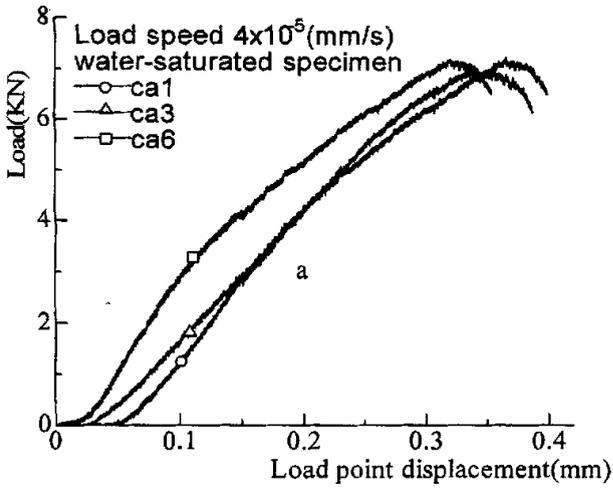


Fig. 4.6 Load-load point displacement curves obtained by Brazilian test in freezing condition

图 4.6 冻结状态水饱和岩样劈裂试验下荷载—荷载点位移曲线
a. 荷载—荷载点位移曲线

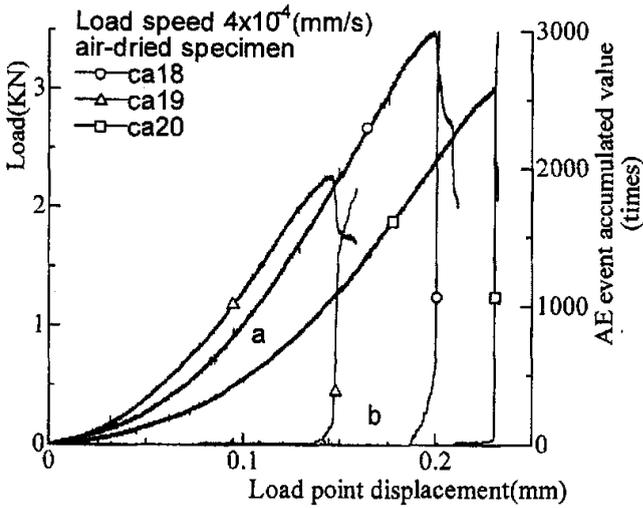


Fig. 4.7 Load-load point displacement and AE-LPD curves obtained by Brazilian test in freezing condition

图 4.7 冻结状态自然干燥岩样劈裂试验下荷载、声发射累积值—荷载点位移曲线
a. 荷载—荷载点位移曲线, b. 声发射累积值—荷载点位移曲线

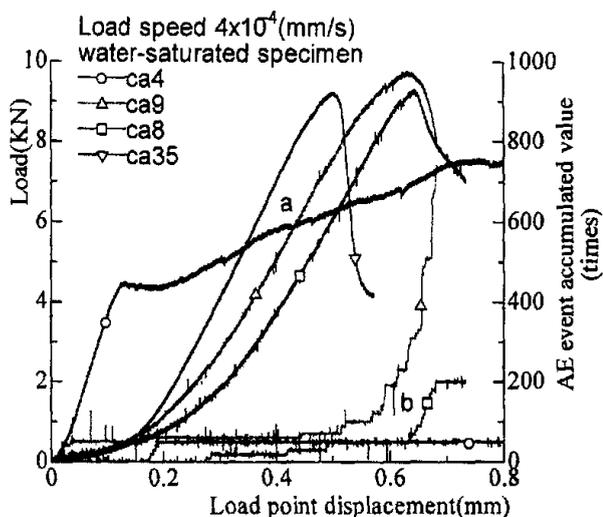


Fig. 4.8 Load-load point displacement and AE-LPD curves obtained by Brazilian test in freezing condition

图 4.8 冻结状态水饱和岩样劈裂试验下荷载、声发射累积值—荷载点位移曲线
a. 荷载—荷载点位移曲线, b. 声发射累积值—荷载点位移曲线

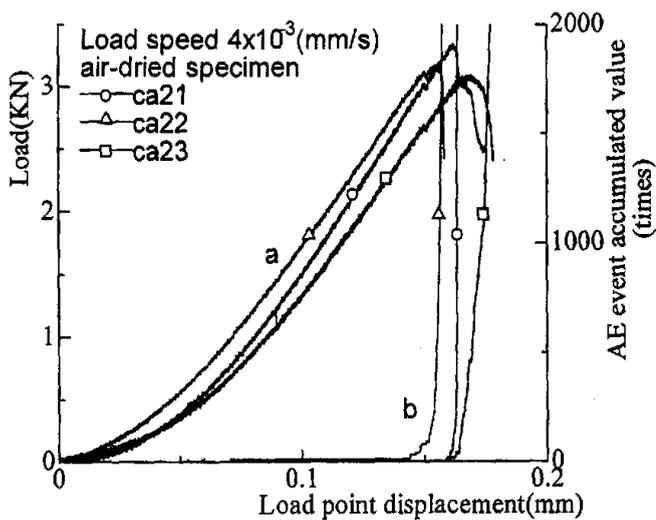


Fig. 4.9 Load-load point displacement and AE-LPD curves obtained by Brazilian test in freezing condition

图 4.9 冻结状态自然干燥岩样劈裂试验下荷载、声发射累积值—荷载点位移曲线
a. 荷载—荷载点位移曲线, b. 声发射累积值—荷载点位移曲线

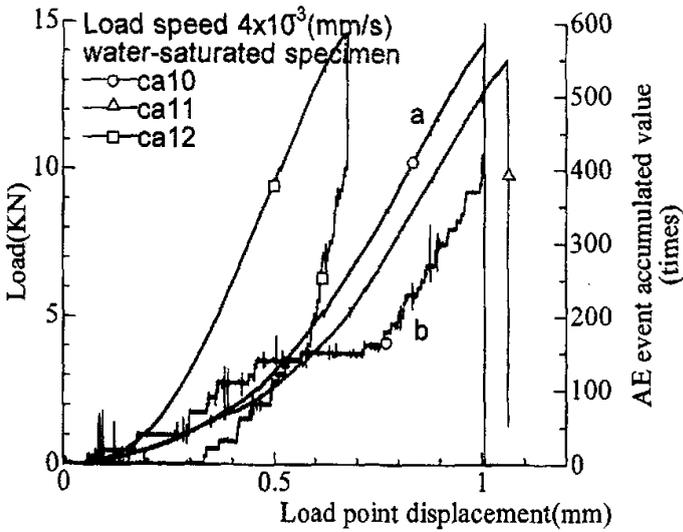


Fig. 4.10 Load-load point displacement and AE-LPD curves obtained by Brazilian test in freezing condition

图 4.10 冻结状态水饱和岩样劈裂试验下荷载、声发射累积值-荷载点位移曲线
a. 荷载-荷载点位移曲线, b. 声发射累积值-荷载点位移曲线

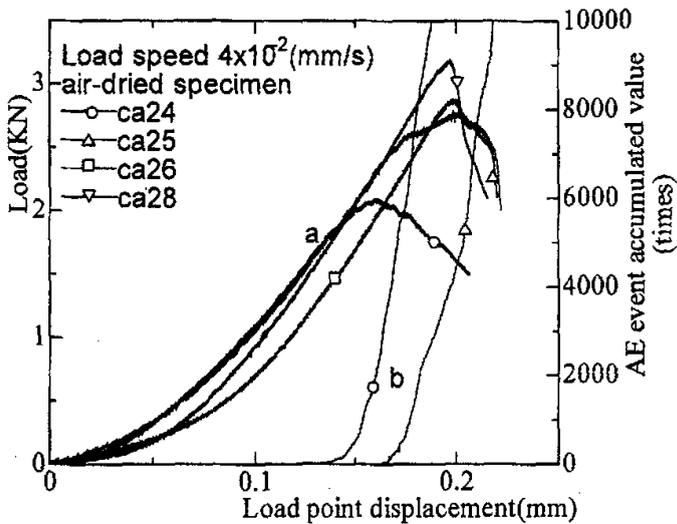


Fig. 4.11 Load-load point displacement and AE-LPD curves obtained by Brazilian test in freezing condition

图 4.11 冻结状态自然干燥岩样劈裂试验下荷载、声发射累积值-荷载点位移曲线
a. 荷载-荷载点位移曲线, b. 声发射累积值-荷载点位移曲线

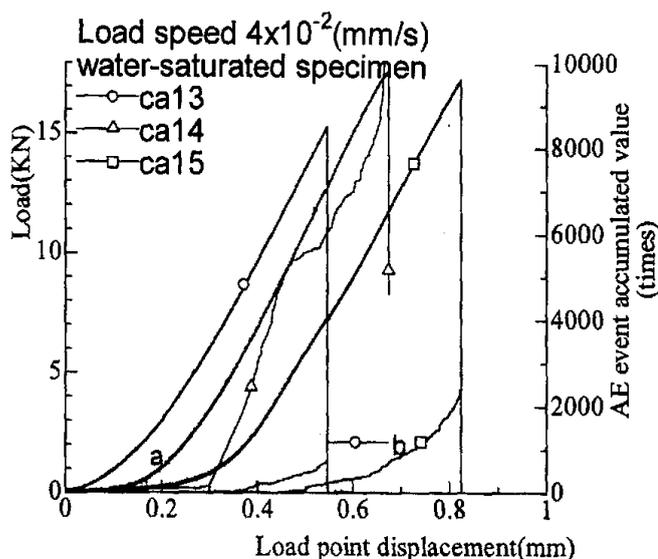


Fig. 4.12 Load-load point displacement and AE-LPD curves obtained by Brazilian test in freezing condition

图 4.12 冻结状态水饱和岩样劈裂试验下荷载、声发射累积值—荷载点位移曲线
a. 荷载—荷载点位移曲线, b. 声发射累积值—荷载点位移曲线

从图 4.3—图 4.12 的荷载—荷载点位移及 AE 事件累积值—荷载点位移曲线中可以看出, 在相同的试验条件即同一加载速率下, 自然干燥岩样和水饱和岩样的变形特性有很大的不同。自然干燥岩样的荷载—荷载点位移曲线开始阶段出现下凸, 这主要是由于在外荷载作用下, 岩样内部裂隙、裂纹、孔洞等初始缺陷闭合的缘故, 因而岩样初期加载出现非线性变形。在低加载速率下劈裂试验得到的荷载—荷载点位移曲线变化十分复杂。如图 4.13 所示, 自然干燥岩样的劈裂试验, 其加载速率为 $\dot{u}=1.01 \times 10^{-5} \text{mm/s}$, 此为材料试验机的最小加载速率, 试验机每 4 秒采样一次, 共采集 4820 个样, 试验历时约 5 小时 30 分钟; 图 4.14 为水饱和岩样相同试验条件下的劈裂试验, 共采集 7533 个样, 试验历时 8 个多小时。图 4.13a 和图 4.14a 分别为局部放大后的曲线图。

通过放大后的图可以发现, 劈裂试验的破坏总是在加载—卸载—加载这样的循环中实现的, 这直观地说明了岩石材料的非均质这一特性。在低加载速率下自然干燥岩样达到劈裂荷载时呈现脆性破坏, 声发射事件累积值在劈裂荷载以前很少, 在达到劈裂荷载时, 声发射事件数剧增; 而水饱和岩样在低加载速率下多呈

现延性破坏，在达到劈裂荷载前声发射较活跃，达到劈裂荷载时声发射事件数急剧增加。在高加载速率下自然干燥岩样和水饱和岩样均呈现出脆性破坏，而水饱和和岩样呈现的脆性更明显。

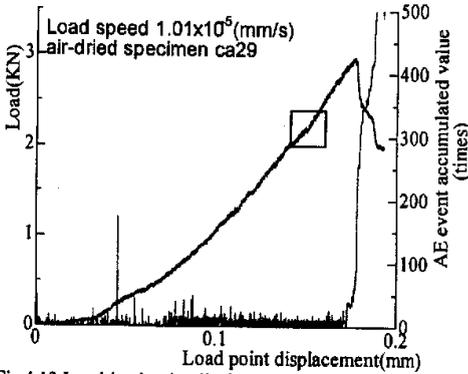


Fig.4.13 Load-load point displacement and AE-LPD curves obtained by Brazilian test in freezing condition

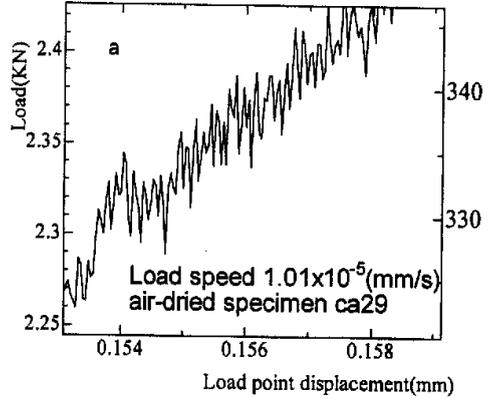


Fig.4.13 Load-load point displacement curves obtained by Brazilian test in freezing condition

图 4.13 冻结状态自然干燥岩样劈裂试验下荷载、声发射累积值—荷载点位移曲线
a 图为左边小方框放大后的曲线图

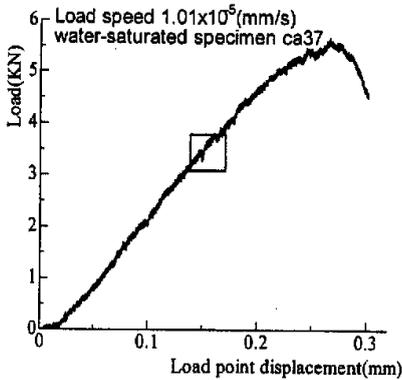


Fig. 4.14 Load-load point displacement and AE-LPD curves obtained by Brazilian test in freezing condition

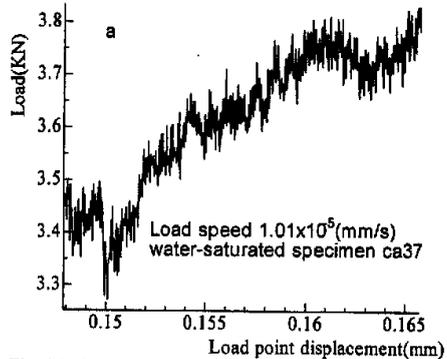


Fig. 4.14 Load-load point displacement and AE-LPD curves obtained by Brazilian test in freezing condition

图 4.14 冻结状态水饱和岩样劈裂试验下荷载、声发射累积值—荷载点位移曲线
a 图为左边小方框放大后的曲线图

4.3.2 岩石材料力学参数的离散性

由于岩石是一种天然、典型的非均质材料。即使由同一岩块加工的两个形状和尺度均完全相同的岩样，在相同的试验条件下其强度、变形等力学参数差异很大。这是由于其内部随机分布着裂隙、孔洞、位错等众多类型的不同尺度的微缺陷，从而使得岩石的力学特性存在差异性。

表 4-1 不同加载速率下凝灰岩的力学参数及其离散性

加载速率 (mm/s)	间接拉伸强度 (MPa)		加载速率 (mm/s)	间接拉伸强度 (MPa)	
	自然干燥 岩样	水饱和 岩样		自然干燥 岩样	水饱和 岩样
1.01E-05	2.15	4.10	\bar{x}	2.08	6.37
1.01E-05	1.88	2.97	s	0.43	0.68
1.01E-05	2.57	4.15	ξ	20.61%	10.67%
\bar{x}	2.20	3.74	4.00E-03	2.37	10.29
s	0.35	0.66	4.00E-03	2.27	9.77
ξ	15.77%	17.72%	4.00E-03	2.19	10.41
4.00E-05	1.90	5.25	\bar{x}	2.28	10.16
4.00E-05	1.89	5.02	s	0.09	0.34
4.00E-05	1.64	5.20	ξ	3.96%	3.32%
\bar{x}	1.81	5.16	4.00E-02	1.51	10.90
s	0.15	0.12	4.00E-02	2.00	12.50
ξ	8.37%	2.38%	4.00E-02	2.06	12.40
4.00E-04		6.60	4.00E-02	2.28	
4.00E-04	2.16	5.38	\bar{x}	2.11	8.30
4.00E-04	2.47	6.58	s	0.14	7.19
4.00E-04	1.62	6.93	ξ	16.60%	7.52%

表 4-1 中列出了图 4.3-4.12 中自然干燥和水饱和岩样的间接拉伸强度；表中 \bar{x} 、 s 和 ξ 分别为力学参数的平均值、标准差和变异系数。通过对不同应变速率下凝灰岩岩样力学参数的统计分析，可以发现，随着加载速率的增大，水饱和岩样比自然干燥岩样的间接拉伸强度依次增大了 69.78%、184.77%、205.66%、346.06%、508.34%。即使对于相同试验条件而言，尽管岩样尺度、形状完全等同，但其间接拉伸强度却存在差异性。当加载速率为 $\dot{u}=4 \times 10^{-4} \text{mm/s}$ 时，自然干燥岩样的间接拉伸强度变异系数高达 20.61%；加载速率为 $\dot{u}=1.01 \times 10^{-5} \text{mm/s}$ 时，水饱和岩样的间接拉伸强度变异系数高达 17.72%。

4.3.3 加载速率对间接拉伸强度的影响规律

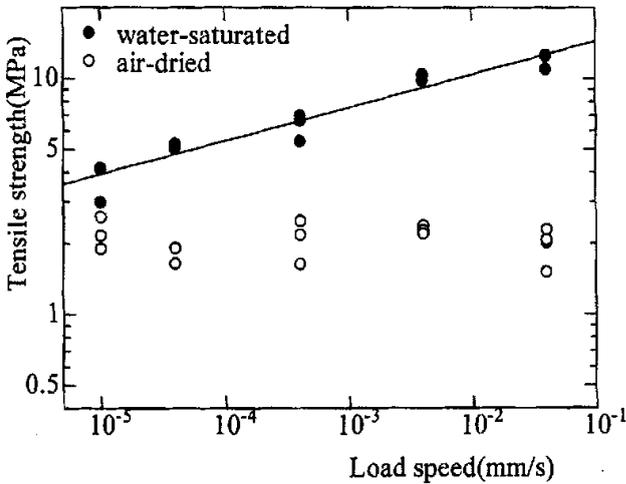


Fig. 4.15 Relation between tensile strength and load speed obtained by Brazilian test in freezing condition

图 4.15 冻结状态劈裂试验下加载速率对间接拉伸强度的影响规律

根据五个不同加载速率下的试验测试结果，其中每一个加载速率下都有三个岩样的试验结果，将自然干燥岩样和水饱和岩样的峰值强度绘在同一双常用对数坐标系中，如图 4.15 所示。从总体上看，当加载速率从 10^{-5} mm/s 增大至 10^{-2} mm/s 时，自然干燥岩样的间接拉伸强度基本上没有太大的变化，加载速率 \dot{u} 分别为 1.01×10^{-5} mm/s、 4×10^{-5} mm/s、 4×10^{-4} mm/s、 4×10^{-3} mm/s、 4×10^{-2} mm/s 时，对应的间接拉伸强度的平均值分别为 2.20 MPa、1.81 MPa、2.08 MPa、2.28 MPa、1.96 MPa。因此冻结状态下自然干燥岩石的间接拉伸强度特性受加载速率的影响不大，但由于试验中并未能对变化范围更大的应变速率进行观测，因而图 4.15 求算的间接拉伸强度仅适用于一定的加载速率范围；从图中还可以看出，当加载速率从 10^{-5} mm/s 增大至 10^{-2} mm/s 时，水饱和岩样的间接拉伸强度增大了 219.05%。经过对试验数据的分析观察后发现峰值强度与加荷载速度在双对数坐标系里呈线性关系，其关系曲线为 $\lg \sigma_t = a + b \lg \dot{u}$ ，其中 σ_t 为间接拉伸强度， \dot{u} 为加荷载速率。a、b 为试验常数。通过最小二乘法拟合图中的实测值分布规律，可得， $a=1.283$ ， $b=0.1413$ ，相关系数 $|r|=0.96$ 。

对于凝灰岩，冻结状态下水饱和岩样间接拉伸强度与加荷载速率的关系为

$$\lg \sigma_t = 1.283 + 0.1413 \lg \dot{\epsilon} \quad (4.4)$$

或表示成幂函数方程为

$$\sigma_t = 19.2 \cdot \dot{\epsilon}^{0.1413} \quad (4.5)$$

但是由于试验中并未能对变化范围更大的加载速率进行观测，因而运用公式(4.5)求算间接拉伸强度时只适用于一定的应变速率范围。

4.3.4 不同加载速率下岩样的破坏方式

在劈裂试验中要求：a. 载荷使试件沿径向破坏，并不是全试件即时劈拉断裂。
b. 保证在试件表面均匀线性加载。岩样的破坏形式在很大程度上决定着试验的成败，因此就劈裂试验中岩样的破坏形式进行观察分析是必要的，以此判断试验的正确性。

如图 4.16 所示，为不同应变速率下凝灰岩岩样的典型破坏形式。在低应变速率下，试验结束后在岩样的端面中心处沿直径方向有一条清晰的裂纹，这显然满足了劈裂试验的要求。

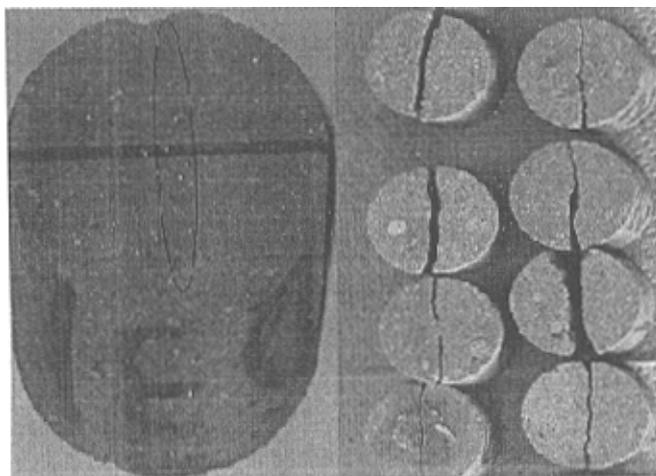


Fig. 4.16 Pictures of rock in different loading rates

图 4.16 不同加载速率下岩石劈裂的典型照片(左右各为低和高加载速率)

在低加载速率下凝灰岩一般是沿着直径方向的微裂纹破坏(如上图中椭圆所示),当然也有所差别,一些岩样在达到劈裂荷载后,肉眼根本无法观测到其表面有任何变化;在高加载速率下,岩样呈现出崩溃式破坏,同时伴有较大响声。

从岩石的破坏形式来看,本研究所进行的劈裂试验是很成功的,保证了试验结果的正确性。

4.4 AE 的变化规律分析

在对地下设施安全性进行监测时,过去主要使用应变仪对岩体位移进行测量,在这方面也取得了许多可喜的成果。但是,对一些岩体破坏的预测,特别是对岩体内部具体变化情况的探测,应变仪则不能很好地满足要求。岩体的变形、破坏特性是相当复杂的,需要采取多种手段对它进行监控。以前的测试手法尚存在一些不完善的地方。这就需要寻求新的测试手段、新的测试方法。

AE 是与物体的微小破坏相伴产生的弹性波动。一般情况下,大规模的破坏发生之前,AE 的发生就会表现得非常活跃。从以前的研究成果看来,AE 监测将成为对地下各种设施的安全性进行监视、预报的有效手段⁽³⁶⁾。本研究因试验条件限制,只对声发射事件进行了测定,作出了声发射事件计数累积值(AE event accumulated value)和时间的关系曲线。对声发射事件累积值随时间的变化规律,仅发表一些粗浅的见解。

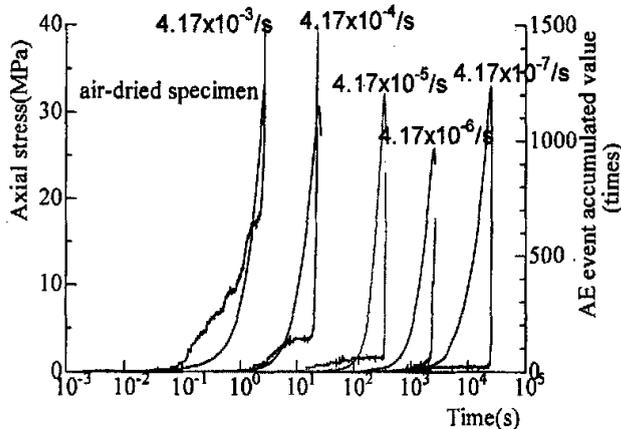


Fig. 4.17 AE-time and stress-time curves obtained by uniaxial compression test in freezing condition

图 4.17 单轴压缩试验自然干燥岩样不同应变速率下声发射累积值—时间变化曲线图

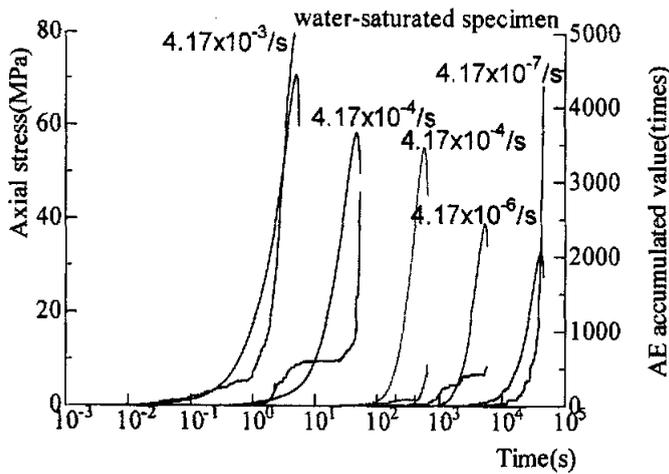


Fig. 4.18 AE-time and stress-time curves obtained by uniaxial compression test in freezing condition

图 4.18 单轴压缩试验水饱和岩样不同应变速率下声发射累积值—时间变化曲线图

图 4.17 为冻结状态单轴压缩试验下自然干燥岩样得到的应力—时间和 AE 事件累积值—时间的变化曲线图。图 4.18 为水饱和岩样的曲线图。

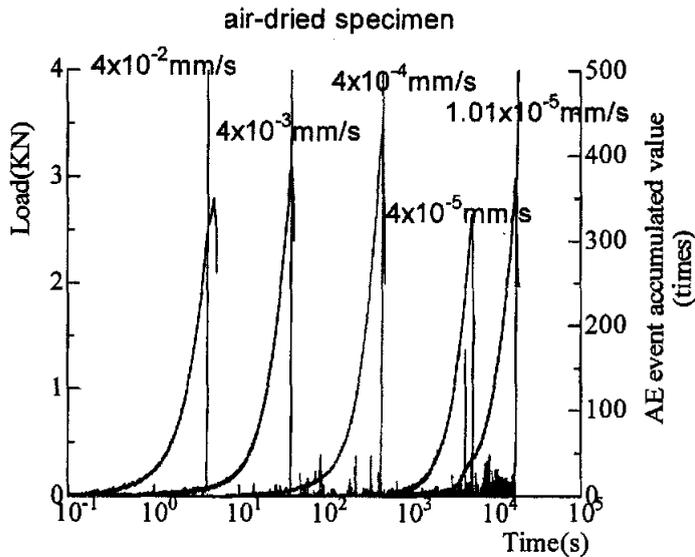


Fig. 4.19 AE-time and load-time curves obtained by Brazilian test in freezing condition

图 4.19 劈裂试验自然干燥岩样不同应变速率下声发射累积值—时间变化曲线图

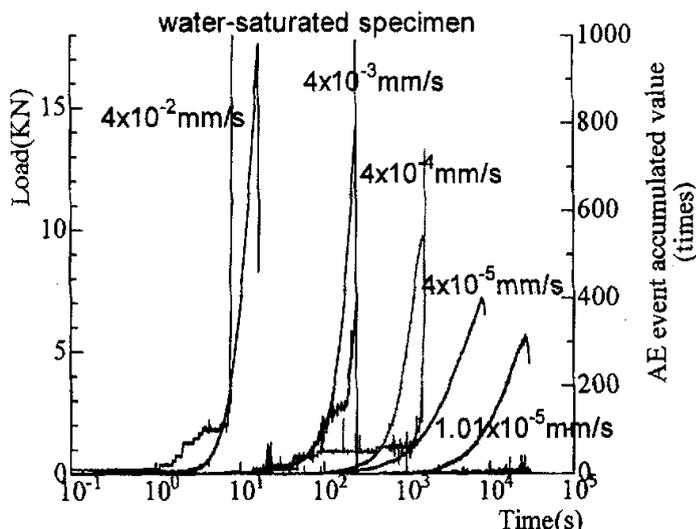


Fig. 4.20 AE-time and load-time curves obtained by Brazilian test in freezing condition

图 4.20 劈裂试验水饱和岩样不同应变速率下声发射累积值—时间变化曲线图

从单轴压缩试验下声发射事件累积值的变化曲线图可以看出，自然干燥岩样和水饱和岩样的试验刚开始时，应力比较小，声发射事件累积值基本上为零。这时，可能是试件所受应力还不足以引起它内部裂隙的扩展或新裂隙的生成。随着时间的延长，声发射事件累积值的变化非常微小，这表示试件内部裂隙等的变化相当缓慢。试验在低应变速率时，随着时间的延长声发射事件累积值几乎没有多大的变化，当单轴抗压应力达到峰值应力时，声发射事件累积值骤然增大，说明在这个时刻有大量的新裂隙生成，从而导致岩样的破坏与失稳；在高应变速率下，岩样达到峰值应力前声发射事件就开始变得很活跃，当达到峰值应力时，声发射事件骤然增多。这时，由于试件内部集聚的应变能越来越多，部分发生应力释放，引起试件内部新裂隙等的成长以及裂隙的急速扩大、连接，最终形成贯通试件的裂纹，而迅速导致试件发生整体上的破坏。

图 4.19 为冻结状态劈裂试验下自然干燥岩样得到的荷载—时间和 AE 事件累积值—时间的变化曲线图。图 4.20 为水饱和岩样的曲线图。

从劈裂试验下 AE 事件累积值—时间曲线图可以看出，自然干燥岩样和水饱和岩样的声发射事件有所不同。自然干燥岩样劈裂试验在达到劈裂荷载前，声发射

事件累计值很小，几乎为零，而在达到劈裂荷载那一刻，声发射事件数急剧增加，同时伴有响声。水饱和岩样的声发射事件在低加载速率时和自然干燥岩样的情况类似，而在高加载速率时，水饱和岩样在达到劈裂荷载前声发射在某些时刻较活跃。在达到劈裂荷载时声发射事件数剧增，直到岩样破裂。

在单轴压缩试验和劈裂试验中，随着时间的推移，试件内部的应力得以重新分配，达到新的平衡状态，裂隙等极其缓慢、稳定地扩张。这可能是声发射事件的发生保持一定的原因。裂隙接续扩展，岩石试件内部的有效承载面积越来越小，这部分面积逐渐不能维持其平衡状态而迅速产生破坏。在这个过程中，声发射事件频繁发生、裂隙等迅速扩张、相互连接、贯通试件，引起试件破坏。

从声发射的变化规律可知，声发射事件累积值急剧增加到试件发生破坏的时间非常短暂。用声发射事件的变化情况对地下工程进行长期监视、灾害预报等尚且存在着一些问题。现在人们正在研究通过 AE 信号来判断裂隙等的发生及扩展的具体位置，也许这方面的研究能很好地捕捉破坏的兆头，实现对工程安全的监测。

4.5 与常温下的凝灰岩抗拉强度的比较分析

本节对常温下凝灰岩自然干燥岩样和水饱和岩样实施了劈裂试验，探明温度变化对凝灰岩抗拉强度的影响规律。

试验加载装置、控制装置和计测装置与前面劈裂试验一样。常温下劈裂试验加载速率为 4×10^{-5} /s，荷载范围设置为 1t，温度控制在 20℃。自然干燥岩样和水饱和岩样的劈裂试验分别做了三次，试验结果分别如图 4.21 和图 4.22 所示。

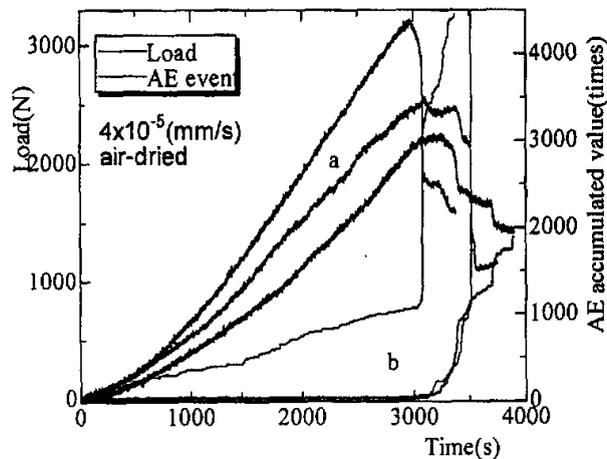


Fig. 4.21 Load-time and AE-time curves obtained by Brazilian test in room temperature

图 4.21 常温下自然干燥岩样声发射累积值、荷载—时间变化曲线图
a. 荷载—时间变化曲线，b. 声发射—时间变化曲线

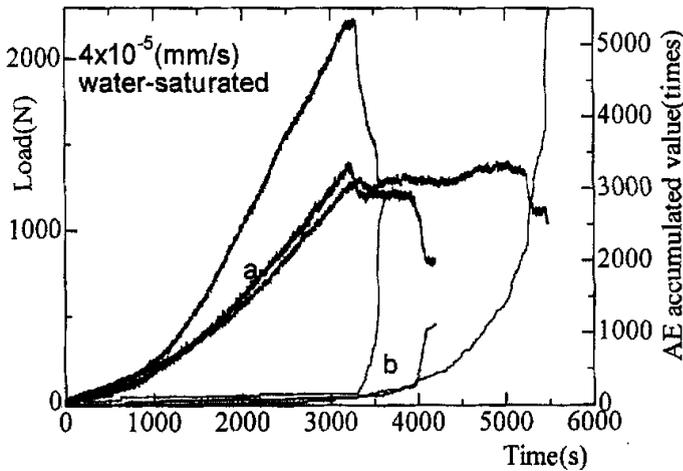


Fig. 4.22 Load-time and AE-time curves obtained by Brazilian test in room temperature

图 4.21 常温下水饱和岩样声发射累积值、荷载—时间变化曲线图
a. 荷载—时间变化曲线, b. 声发射—时间变化曲线

从试验结果可以看出，在常温相同试验条件下，不管是自然干燥岩样还是水饱和岩样，其强度、变形等力学参数差异很大。这是由于岩石材料内部随机分布着裂隙、孔洞、位错等众多类型的不同尺度的微缺陷，从而使得岩石的力学特性存在差异性。常温下声发射累积值与低温下水饱和岩样相比，在加载初期累积值很小，几乎为零，当达到劈裂荷载时，声发射数剧增；而低温下水饱和岩样在加载初期声发射就很活跃，这是由于强度很低的冰首先发生了破坏。

为了比较凝灰岩在室温和冻结状态下的间接抗拉强度，把冻结状态下应变速率为 $4 \times 10^{-5}/s$ 的试验岩样结果汇总于表 4-2 中。试验状态共四个，常温下自然干燥、水饱和和冻结下自然干燥、水饱和。

表 4-2 室温和冻结状态下凝灰岩抗拉强度的比较

Table 4-2 Comparison of tensile strength of tuff in room temperature and freezing condition

试验状态 拉伸强度(MPa)	dry 20℃	wet 20℃	dry -20℃	wet -20℃
岩样 1	2.27	1.61	1.90	5.25
岩样 2	1.80	0.99	1.89	5.01
岩样 3	1.61	0.99	1.63	5.19
平均值	1.90	1.19	1.81	5.15

通过对不同试验状态下凝灰岩岩样间接拉伸强度的统计分析发现, 常温下水对岩石间接拉伸强度有弱化作用; 而在冻结状态下, 冰对岩石间接拉伸强度有强化作用。四种状态中常温下自然干燥岩样间接拉伸强度最小。同为自然干燥岩样, 温度的降低对间接拉伸强度有弱化作用。

以上分析得知, 不同含水条件下温度的改变对岩石材料的间接拉伸强度有不同程度的影响, 而关于温度对岩石力学效应的研究目前还很少, 因此应该加大这方面的研究工作。

4.6 本章小结

本章在实施了劈裂试验的基础上, 研究了冻结状态下加载速率的变化对凝灰岩间接拉伸强度的影响规律, 试验岩样分自然干燥和水饱和两种, 所得结果主要如下:

(1) 拉伸破坏是岩石破坏的基本形式之一, 抗拉强度是岩石力学性质的重要指标, 对地下工程设计、分析、计算有着重要意义。

(2) 进行了 5 个不同加载速率下自然干燥岩样和水饱和岩样的劈裂试验, 同一状态下的试验重复三次。通过对测得的荷载—荷载点位移曲线的分析, 探讨了加载速率对自然干燥和水饱和岩石间接拉伸强度以及声发射事件总数的影响规律, 首次提出的经最小二乘法整理回归得出的经验方程为: $\sigma_t = 19.2 \cdot \dot{\epsilon}^{0.1413}$, 可用于计入加载速率这一重要影响因素的岩石强度和变形估算与评价。

(3) 从试验结果可以看出, 在相同的试验条件下, 不管是自然干燥岩样还是水饱和岩样, 即使由同一岩块加工的两个形状和尺度均完全相同的岩样, 其劈裂荷载、变形和声发射累积值等力学参数差异很大。这是由于岩石材料具有明显的非均质性, 其内部随机分布着裂隙、孔洞、位错等众多类型的不同尺度的微缺陷, 从而使得岩石的力学特性存在差异性。

(4) 对声发射事件累积值随时间的变化规律及试验过程进行分析与观察, 仅就声发射这一现象发表一些粗浅的见解。在单轴压缩试验和劈裂试验中, 随着时间的推移, 声发射事件的发生保持一定, 这是因为试件内部的应力得以重新分配, 达到新的平衡状态, 裂隙等极其缓慢、稳定地扩张。裂隙接续扩展, 岩石试件内部的有效承载面积越来越小, 这部分面积逐渐不能维持其平衡状态而迅速产生破坏。在这个过程中, 声发射事件频繁发生、裂隙等迅速扩张、相互连接、贯通试

件，引起试件破坏。

(5) 从声发射的变化规律可知，声发射事件累积值急剧增加到试件发生破坏的时间非常短暂。用声发射事件的变化情况对地下工程进行长期监视、灾害预报等尚且存在着一些问题。现在人们正在研究通过 AE 信号来判断裂隙等的发生及扩展的具体位置，也许这方面的研究能很好地捕捉破坏的兆头，实现对工程安全的监测。

(6) 通过低温和常温下岩石间接拉伸强度的对比分析，发现温度的改变对水饱和和岩样间接拉伸强度影响很大；常温下水对岩石强度有弱化作用，而在低温下冰对岩石强度有强化作用。

5 结论与展望

5.1 结论

岩石材料具有明显的非均质性,其内部随机分布着裂隙、孔洞、位错等众多类型的不同尺度的微缺陷,从而使得岩石的力学特性存在差异性,通常表现为由同一岩块加工的两个形状和尺度均完全相同的岩样,其强度、变形等力学参数差异很大。而岩体的力学性质是随着时间和空间而变化的,同时也受到自然条件的影响。在日本的北海道以及世界各地的严寒地带,由于天气的变化,岩体的力学性质发生了巨大的变化。为了给冻结状态下工程设计和数值计算时岩性参数的选择提供参考依据对这些现象有一个合理的解释和有效的应对措施,需要人们对冻结状态下岩石力学性质有一个充分的了解。低温下液化天然气资源的储存保护已经成为21世纪地下工程中一个重要的领域,这要求人们必须加强地下防护工程的研究,岩石动力学应列为该项研究的重点。在岩石动力学研究中,不同的加载速率对岩石力学性质有很大的影响,所以有必要对加载速率对岩石力学性质的影响进行深入的研究。

本文选取自然干燥和水饱和凝灰岩岩样为研究对象,采用试验研究为主,理论分析为辅的综合研究方法,对多级应变速率下凝灰岩强度和变形特性进行了分析研究。本研究得到的主要结论总结如下。

(1) 对凝灰岩岩块的弹性应力波测试结果表明试验用凝灰岩存在着异向性,从而确定流理面的方向以及试件的钻孔方向;对试验用试件的初始物理性质测试结果表明,它们的相应值基本相同,从而试验结果具有可比较性;从试件的制作方法到实验装置与测量装置都经过了精心的选取和测试,从而保证了实验结果的正确性和可信度。

(2) 就冻结状态自然干燥和水饱和两种岩样,在应变速率 $\dot{\epsilon}$ 为 $4.17 \times 10^{-3}/s$ 、 $4.17 \times 10^{-4}/s$ 、 $4.17 \times 10^{-5}/s$ 、 $4.17 \times 10^{-6}/s$ 、 $4.17 \times 10^{-7}/s$ 下进行了单轴压缩试验,研究冻结状态下应变速率的变化分别对自然干燥岩样和水饱和岩样强度、变形等力学参数的影响规律,以为冻结状态工程设计和数值模拟计算时岩性参数的选择提供一定的参考依据。不同应变速率下的凝灰岩岩样的全程应力应变曲线充分说明,岩石并非线弹性体,其内部含有各种裂隙、孔洞等初始缺陷,非均质性明显,

由于这一点, 岩石的全程应力应变曲线较为复杂。在自然干燥状态下, 应变速率不同, 岩样强度也不同, 但并非应变速率越大, 强度越高。应变速率对岩石变形特性也存在明显影响, 应变速率高时, 材料峰后脆性较强; 而应变速率低时, 峰后延性较强。在水饱和状态下, 应变速率不同, 岩样强度也不同, 并且随着应变速率的增大, 强度有明显的提高。应变速率对岩石变形特性的影响不是很明显, 在应变速率最大时, 材料峰后脆性稍微有所增强; 而在稍微较低的四个应变速率下, 峰后都具有较强的延性。并且即使是采自同一岩块的同种尺度的自然干燥岩样和水饱和岩样, 屈服之前的变形大致等同, 但峰后力学特性较为复杂, 缺乏明显的规律, 因而特定应变速率下岩样的全程应力应变曲线并非岩石本身固有的材料特性, 而仅是材料特性在具体构件中的宏观表现, 应用于工程设计时应持谨慎态度。

(3) 在不同应变速率下, 自然干燥岩样的单轴抗压强度没有太大的变化, 除了应变速率最大时峰值强度有所增大外, 其它应变速率下的峰值强度呈杂乱无章的变化。而在水饱和状态下, 岩样的峰值强度随着应变速率的增大有明显增大的趋势, 经过仔细的分析后, 得到其变化规律为 $\lg \sigma_0 = 1.55 + 0.08 \lg \dot{\epsilon}$, 通过此关系式, 可以预测不同应变速率下的水饱和岩样的单轴抗压强度。水饱和岩样的强度之所以得到提高, 是由于在自然干燥状态下, 凝灰岩是典型的非均质材料, 其内部含有各种裂隙、孔洞等初始缺陷, 非均质性明显, 所以自然干燥凝灰岩岩样的全程应力应变曲线较为复杂; 而在水饱和状态下, 由于冰的作用, 凝灰岩的均质性得到增强, 成为一种结构更加致密的弹性体, 缓慢的加载速率使得材料内初始损伤和增生的裂纹具有充分的时间进一步地演化和发展, 导致材料的峰值强度下降和破坏后变形曲线的跌落, 从峰后的变形曲线可以看出, 岩样的延性较自然干燥下有很大的提高。

(4) 单轴压缩下岩样的破坏形式较为复杂, 同一应变速率相同含水率岩样破坏形式也不同。在应变速率较低时自然干燥岩样有单一断面的剪切滑移破坏和双向剪切滑移而破坏, 而且基本为开口裂面破坏, 应变速率为 $10^{-7}/s$ 、 $10^{-6}/s$ 时, 试件多为此两种破坏方式。同时由于凝灰岩岩样粒径较大, 沿轴向出现较多的劈裂面, 边缘经常会有剥落岩块掉落, 这可能是由于横向拉伸破坏所致。尽管岩样由同一岩块加工而成, 但岩样的破坏形式显著不同, 这表明由于岩石内部颗粒材料组合形式和排列方式的差异, 岩样破坏形式表现出随机性。低应变速率下水饱和岩样的破坏形式比较单一, 在试件的表面出现轻微的裂纹, 岩样整体完整性保持

的较好。在高应变速率下自然干燥的破坏形式极其复杂,多为轴向劈裂破坏,岩样沿轴向存在相当多的劈裂面,但有一个贯穿整个岩样的剪切破坏面。高应变速率下水饱和和岩样的破坏形式趋于简单化,多为单一断面的剪切滑移破坏,试件在达到峰值的前后,会形成一个贯穿试件顶与底的主控破裂面。

(5) 在单轴压缩试验的基础上,提出利用单一岩样进行多级应变速率 $\dot{\epsilon}$ ($4.17 \times 10^{-3}/s$ 、 $4.17 \times 10^{-4}/s$ 、 $4.17 \times 10^{-5}/s$ 、 $4.17 \times 10^{-6}/s$)加载路径下的单轴压缩试验,以此确定岩石的单轴抗压强度,这样可以消除不同岩样之间的差异对试验结果的影响,并对同一岩样不同加载路径下的试验可行性进行了初步探讨。研究发现在前三级应变速率下,试验结果很理想,也就是说随着应变速率的增大峰值强度也增大;但在第四次加载时,岩样的峰值强度有所降低,这是因为岩样在重复加卸载过程中产生了不可恢复的塑性变形和新微裂隙的生成,从而使其强度和刚度有所降低。因此我们在进行同一岩样关于多级应变速率不同加载路径下的试验时,要选取正确的应变速率量级,从而保证试验结果的正确性和真实性。

(6) 在与劈裂有关的试验里,主要就冻结状态自然干燥和水饱和两种岩样在五级加载速率 \dot{u} ($1.01 \times 10^{-5}mm/s$ 、 $4 \times 10^{-5}mm/s$ 、 $4 \times 10^{-4}mm/s$ 、 $4 \times 10^{-3}mm/s$ 、 $4 \times 10^{-2}mm/s$)下的试验研究。通过对自然干燥状态岩样和水饱和岩样在冻结状态不同加载速率下进行间接拉伸试验,基于试验结果,研究发现冻结状态下加载速率的变化对自然干燥岩样间接抗拉强度没有直接的影响,而对水饱和岩样强度、变形等力学参数的影响甚大,间接拉伸强度与加载速率的变化规律为 $\lg \sigma_t = 1.283 + 0.1413 \lg \dot{u}$ 。

(7) 通过低温和常温下岩石力学参数的对比分析,发现相同的含水条件下,温度的改变对力学参数影响很大;常温下水对岩石强度有弱化作用,而在低温下冰对岩石强度有强化作用。

5.2 今后研究展望

本文通过对冻结状态不同应变速率下凝灰岩岩样进行超声波测试、单轴压缩和劈裂试验,研究了岩石的力学特性,得到了一些有助于工程设计和数值计算时岩性参数选择的结论。本研究用登别凝灰岩为试验材料,但如果岩石不同的话,试验结果也会有所差异。今后,希望用其它岩石材料进行类似的实验,以把本研究所得到的结论进行推广或提出新经验公式。今后,随着实验数据的积累,希望对本研究所得到的规律进行理论推导,对试验结果的妥当性以及适用范围进行研

究。但由于到目前为止冻结状态下的试验研究还很少见到报道，加上试验条件和时间的限制，仍有许多不够完善的地方，需今后继续进一步研究。

(1) 进行冻结状态下更大应变速率范围的试验研究，包括静态和动态加载的试验研究，以便能在更大应变速率范围内把握岩石的力学特性及变形规律。

(2) 深入研究冻结状态下温度变化对岩石力学特性的影响规律，为建立完善的本构理论关系提供试验基础；

(3) 利用计算机层析技术 CT、扫描电镜 SEM 等先进技术，从微细观层次上揭示冻结状态下岩石的破坏机制；

(4) 研究其它岩石如花岗岩、砂岩等在冻结状态下的力学和变形特性，以为工程设计和数值计算时岩性参数的选取提供范围更广的参考依据。

参考文献

- [1] 徐芝纶. 弹性力学上册(第三版)[M] 北京: 高等教育出版社, 1990, 1~10
- [2] [澳]B. H. G. 布雷迪, [英]E. T. 布朗著, 冯树仁等译. 地下采矿岩石力学[M] 北京: 煤炭工业出版社, 1990, 1~8
- [3] Sun Jun, Wang Sijing. Rock mechanics and rock engineering in China: developments and current state-of-the-art [J]. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2000(37): 447~465
- [4] 傅冰骏. 21世纪我国岩石力学面临的机遇与挑战[J]. 岩土工程界, 2000, 3(4): 9~12
- [5] First Symposium on Rock Mechanics [J]. *Quarterly of the Colorado School of Mines*, 1956, 51(3): Foreword
- [6] 周维垣. 高等岩石力学[M] 北京: 水利水电出版社, 1991, 1~6
- [7] 孙钧. 迎接新世纪的岩石力学若干进展[A] 第五届全国岩石力学与工程大会论文集[C]上海: 中国科学技术出版社, 1998, 1~10
- [8] 层云峡天城岩滑落调查委员会. 层云峡天城岩滑落事故调查报告书[R]. 1988
- [9] 丰滨隧道崩落事故调查委员会. 丰滨隧道崩落事故调查报告书[R]. 1996
- [10] 第2白系隧洞崩落事故调查委员会. 第2白系隧洞崩落事故调查报告书[R]. 1998
- [11] 福田正己. 岩石冻结融解引起的风化作用对岩体崩落的影响[J]. 月刊地球, 1996, 18(9): 574—578
- [12] 菊地宏吉. 岩体边坡的崩落问题[A]. 北海道应用地学合同研究会论文集[C], 1997. 197—207
- [13] 高桥解明. 寒冷地区边坡灾害[R]. 地盘工学会北海道支部技术报告集, 1997 第37号, 65—72.
- [14] 陈天城. 关于冻结融解作用引起的溶结凝灰岩裂缝发展过程的研究[J]. 资源与素材, 2000, 116(1): 7-12
- [15] G. P. Davidson and J. F. Nye. A Photo elastic Study Of Ice Pressure in Rock Cracks[J]. *Cold Regions and Technology*, 1985, (11): 141—153
- [16] 崛场夏峰, 等. 凝灰岩采石场的热应力测量[A]. 第51回年次学术讲演会论文集[C], 1996, 884-885

- [17] Karl Terzaghi. Stability of Steep Slopes on Har Dunweathered Rock[J]. Geotechnique, 1963, (7): 251—270
- [18] 陈子光. 岩石力学性质与构造应力场. 北京: 地址出版社
- [19] 陈宗基. 岩石力学的发展方向[J]. 岩石力学与工程学报, 1990, 9(3):175~183
- [20] 陈升强. 刚性加载技术形式对岩石变形全过程力学形态的影响[J]. 力学与实践, 1984(4):22~29
- [21] Green S J, Perkins R D. Uniaxial compression tests at strain rate from 10^{-4} to 10^4 sec^{-1} on three geological materials. In: Gray K E ed. Proc of the 10th symposium on Rock Mechanics. New York: American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineer Inc, 1968
- [22] Sedengecti S, Boozer G D. The effects of strain rate and temperature on the behaviour of rock subjected to triaxial compression. In: Fairhurst C ed. Proc 4th Symposium on Rock Mechanics. Oxford:pergamon, 1961
- [23] Bieniawski Z T. Time-dependent behaviour of fractured rock[J]. Rock Mechanics, 1970, 2(3): 123~137
- [24] Peng S S, Podnieks E R. Relaxation and the behaviour of failed rock[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1972, 9(6): 699~712
- [25] Peng S S. Time-dependent aspects of rock behaviour as measured by a servo-controlled hydraulic testing machine[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1973, 10(4): 235~246
- [26] Chong K P, Hoyt P M, Smith J W, et al. Effects of strain rate on oil shale fracturing[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1980, 17(1): 35~42
- [27] Chong K P, Borest A P. Strain rate dependent mechanical properties of New Albany reference shale[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1990, 27(3): 199~205
- [28] Okubo S, Nishimatsu Y, He C. Loading rate dependence of class II rock behaviour in uniaxial and tri-axial compression tests[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1990, 27(6): 559~562
- [29] Okubo S, Nishimatsu Y. Uniaxial compression testing using a linear combination of stress and strain as the control variable[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1985, 22(5): 323~330

- [30] Lajtai E Z, Scott Duncan E J, Carter B J. The effect of strain rate on rock strength[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1991(24): 99~109
- [31] 三木幸藏: わかりやすい岩石と岩盤の知識, 鹿児島出版社, (1978)
- [32] 王开林, 杨圣奇, 苏承东. 不同粒径大理岩样声学特性的研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2004, 32(2): 30~32
- [33] 李世平, 吴振业, 贺永年等. 岩石力学简明教程[M] 北京: 煤炭工业出版社, 1996
- [34] 大津政康: 声发射特性と理論: 森北出版社, pp. 1-20, (1988)
- [35] K. Fukui, S. Okubo and A. Ogawa. Some aspects of loading-rate dependency of Sanjome andesite strengths[J]. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2004, 41(7): 1215~1219
- [36] Lumin Ma and J. J. K. Daemen. Strain rate-dependence of mechanical properties of welded topopah spring tuff • abstract. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2004, 41(3): 395
- [37] H. J. Liao, W. C. Pu, J. H. Yin, M. Akaishi and A. Tonosaki. Numerical modeling of the effect of strain rate on the stress-strain relation for soft rock using a 3-d elastic visco-plastic model •abstract. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2004, 41(3): 423
- [38] L. Ma and J. J. K. Daemen. Strain rate-dependence of mechanical properties of welded topopah spring tuff[J]. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2004, 41(Supplement 1): 209~214
- [39] Sang Ho Cho, Yuji Ogata and Katsuhiko Kaneko. Strain-rate dependency of the dynamic tensile strength of rock[J]. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2003, 40(5): 763~777
- [40] T. Backers, N. Fardin, G. Dresen and O. Stephansson. Effect of loading rate on Mode I fracture toughness, roughness and micromechanics of sandstone. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2003, 40(3): 425~433
- [41] 杨圣奇. 岩石材料的非均质性和力学特性的研究[硕士学位论文][D] 焦作: 焦作工学院, 2003: 10~31
- [42] Cook N G W, Hojem J P M. A rigid 50-ton compression and tension testing machine[J]. *South Africa Mech. Eng.*, 1966, 16: 89~92.

- [43] J.C. 耶格, N.G.W. 库克著, 中国科学院工程力学研究所译. 岩石力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1981, 243~246
- [44] 卫宏, 张玉三, 李太任等. 岩石显微空隙粒度分布的分形特征与岩石强度的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 318~320
- [45] 姜崇喜, 谢强. 大理岩细观破坏行为的实时观察与分析[J]. 西南交通大学学报, 1999, 34(1): 87~92
- [46] 黄明利, 唐春安, 朱万成. 岩石单轴压缩下破坏失稳过程 SEM 即时研究[J]. 东北大学学报, 1999, 20(4): 426~429
- [47] 姚孝新, 耿乃光, 陈颢. 应力途径对岩石脆性-延性转化的研究[J]. 地球物理学报, 1980, 23(3): 312~319
- [48] 尤明庆, 华安增. 应力路径对岩样强度和变形特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(5): 101~104
- [49] 唐春安, 刘红元, 秦四清等. 非均匀性对岩石介质中裂纹扩展模式的影响[J]. 地球物理学报, 2000, 43(1): 116~120
- [50] 张美英, 袁建新, 李延芥等. 单轴压缩过程中岩石变形破坏机理[J]. 岩石力学与工程学报, 1998
- [51] 王明阳, 严东晋, 钱七虎. 岩石单轴压缩全程曲线的讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 1998
- [52] 吴玉山. 应力路径对凝灰岩力学特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1983
- [53] 傅宇方, 梁正召, 唐春安. 岩石介质细观非均匀性对宏观破裂过程的影响[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(6): 705~710
- [54] 黄明利, 唐春安, 朱万成. 岩石破裂过程的数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 468~471
- [55] 芮勇勤, 唐春安. 岩石剪切破坏过程的 RPPA2D 数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 364~368
- [56] Labuz J F, BiLzi L. Class I Vs Class II Stability: a demonstration of size effect[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1991, 28(2/3): 199~205
- [57] 尤明庆. 岩石试样的杨氏模量与围压的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 53~60
- [58] 尤明庆. 岩石试样的强度及变形破坏过程[M]. 北京: 地质出版社, 2000, 9

- [59] Suggested methods for determining tensile strength of rock aterials[J].
International Society of Rock Materials. 101~103
- [60] Akira Higashi, Shoichi Koinuma and Shinji Mae. Plastic yielding in ice single
crystals[J]. Japanese Journal of applied physics. Vol.3, No.10, pp. 610~616,
October, 1964
- [61] Akira Higashi. Mechanism of Plastic Deformation in Ice Single Crystals[J].
Japanese Journal of applied physics.
- [62] Gunnar Wijk. Some new theoretical aspects of indirect measurements of the
tensile strength of rocks[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.,
1978, 15: 149~160
- [63] 尤明庆, 苏承东. 平台圆盘劈裂的理论和试验[J]. 岩石力学与工程学报,
2003, 23(1): 170~174
- [64] 王启智, 贾学明. 用平台巴西圆盘试样确定脆性岩石的弹性模量、拉伸强度
和断裂韧度——第一部分: 解析和数值结果[J]. 岩石力学与工程学报,
2002, 21(9): 1285~1289
- [65] 王启智, 吴礼舟. 用平台巴西圆盘试样确定脆性岩石的弹性模量、拉伸强度
和断裂韧度——第二部分: 试验结果[J]. 岩石力学与工程学报,
2004, 23(2): 199~204
- [66] 西松裕一, 山口梅太郎: 岩石力学入門 (第 3 版), 東京大学出版社,
(1991), 122~125

附录

研究生在读期间公开发表的学术论文及科研成果一览表

1. 公开发表的学术论文				
序号	论文名称	发表刊物及时 间	名 次	与学位论文 何章节相关
1	不同粒径大理岩样声学特性的试验 研究	《煤田地质与 勘探》2004.4	1	第二章
2	冻结状态下凝灰岩强度及变形特性 的研究	《资源与素材》 2005.4	3	第三章
2. 科研成果				
序号	科研项目名称	获奖或鉴 定单位、时 间	名次	与学位论文 有何关系

不同粒径大理岩样声学特性的研究

王开林¹, 杨圣奇², 苏承东¹

(1 焦作工学院资源与材料工程系, 河南 焦作 454159; 2 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘 要: 基于不同粒径大理岩样的超声波测试结果, 研究了浸水时间和宏观裂隙对波速的影响规律, 以及岩样声学参数的离散程度。结果表明, 浸水时间对岩样的纵波速度有很大的影响, 但对横波速度影响甚微; 宏观裂隙的存在降低了岩样的纵波速度, 但波幅降低程度与岩样破坏程度有关; 随着岩石平均粒径的增大, 岩石的声学参数先减小后增大, 并非单调关系, 而且动态泊松比的变化幅度明显高于其它声学参数, 不能作为材料的力学参数表征岩石的变形特性。

关键词: 大理岩; 粒径; 纵波速度; 动态泊松比

中图分类号: TD313

文献标识码: A

0 引言

岩石的声学特性是评价工程岩体的稳定性及其完整性的基础, 也是岩石分类的重要依据之一^[1]。但由于岩石材料非均质性明显, 其内部含有各种尺度不等的缺陷, 这些缺陷随机地分布于其中, 极大地影响着岩石声学特性, 从而也造成了一定的离散性, 通常表现为同一岩体切割下来的岩块, 甚至由同一岩块加工的两个形状和尺度均完全相同的岩样, 其声学特性均呈现出不同程度的差异性。然而, 大量试验研究表明^[2-3], 同种类型岩石的物理性质参数离散性并不很大, 但其声学特性参数离散性很大。因而, 岩石声学特性参数的试验结果怎样运用于现场工程实践, 值得商榷。长期以来, 对岩石声学参数离散性的评价通常是采用确定性方法, 即对剔除那些可疑点(坏点)的数值进行平均, 取平均值作为岩石的力学特性值。本文将力图从数理统计学角度入手, 通过对大理岩样的声学特性进行试验研究, 研究岩样声学参数的离散性, 以及非均质性对声学特性的影响规律。

1 岩性描述及测试方法

试验岩石采自河南省南阳市南召县五洲玉雕厂, 系大理岩, 俗名为汉白玉, 据粒径大小依次分为细、中、粗, 均由碳酸盐矿物成分组成, 主要矿物成分为方解石、白云石和菱镁矿, 变晶结构, 硬度为 3.5~4.0。其主要化学成分为 Ca 和 Mg。细颗粒大理岩粒度相对均匀, 为 0.5~1.0mm, 断口似砂糖状, 微有风化现象; 中颗粒大理岩粒级不均, 1.0~4.0mm 不等, 一般在 1.5mm 左右, 新鲜, 结晶程度较高; 而粗颗粒大理岩较新鲜, 粒径一般在 5.0mm 左右,



图 1 横波测试示意图

Fig. 1 The sketch of transverse wave measurement

重结晶程度高。

测试采用超声波脉冲穿透法。测试系统固定延时纵波为 $8.8 \mu s$ ，横波为 $3.3 \mu s$ 。换能器频率为 30KHz，采样频率置于 10MHz 档，发射电压为 300V，将超声波换能器用钙基润滑剂(纵波)和锡箔(横波)作耦合剂，安置在岩块相互平行的两个端面上，采用手动触发，然后调整超声波仪中示波器的接收窗口和位置，使波形等接收信号出现在示波器窗口中，并调节衰减档，直至观测到较好波形。此时，将光标移至首波点，读出弹性波通过岩块的传播时间，然后再扣除探头的延时，由此计算出声速。测量纵波时，用手按住纵波发射换能器和接收换能器；而测量横波时，采用图 I 1 所示装置。测试时，使发射和接收换能器尽可能地正对着，以减少操作带来的偶然误差。岩样典型的波形如图 I 2 所示。

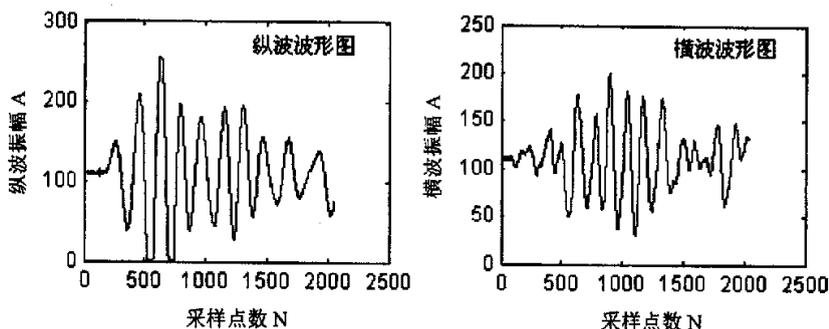


图 I 2 大理岩典型的波形图

Fig. I 2 The typical wave shape of marble specimens

2 浸水时间和宏观裂隙对岩样波速的影响

为了测定岩石的含水量对波速的影响情况，将细、中和粗颗粒大理岩样浸入水中，研究浸水时间与波速之间的关系。图 I 3 是三种不同粒径大理岩样的纵横波速度与浸水时间的关系。关系曲线的零时间对应的波速为岩样加工好后在自然状态下干燥一周以上的波速，图中标注的首字母 X、Z 和 C 分别代表粉、细、中和粗四种颗粒，而后面的字母 V_p 和 V_s 分别表示

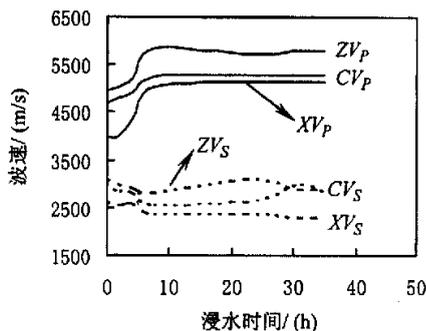


图 I 3 浸水时间对大理岩样波速的影响

Fig. I 3 The effect of dyeing time on wave speed of marble specimens

岩石的纵波速度(实线)和横波速度(虚线)，如 ZV_p 表征中颗粒岩样的纵波速度。从图 I 3 可以看出，当岩石浸入水后，纵波速度有很大的提高，如浸水 10h 的中颗粒岩样的纵波速度高出自然状态下的数值约 14%。但相对而言，横波速度变化不大。当岩石试样浸入水中接近 10h 以后，岩样波速基本保持不变，这说明岩样已达到饱和。需要特别说明的是，本文讨论的波速是指岩样在自然状态下干燥一周以上的数值。出现上述现象，可以作如下解释：岩石内

部结构中含有诸多孔隙,超声波能绕过裂隙传播,而当孔隙被水充填以后,水能传播纵波,且纵波在水中的传播速度一般为 1450m/s,远远大于纵波在空气中的数值 340m/s。因而,一般而言,同一种岩石试件,饱水状态下测得的波速往往大于干燥状态下的波速。但由于横波属剪切波,只能在固体中传播,而不能在液体和气体中传播,故浸水时间对横波速度的影响相对较小。

图 I 4 是细、中 and 粗颗粒的裂隙大理岩样和完整大理岩样纵波速度的对比分析。这里的裂隙岩样是指在轴向应力的作用下已经发生破裂的岩样,破裂面明显,肉眼可见。由图可见,裂隙岩样的纵波速度均低于完整岩样的数值,这表明宏观裂隙的存在降低了岩样的纵波速度,但影响程度不同。而且与裂隙岩样相比,取自同一岩块的完整岩样纵波速度变化幅度均相对较小。这实质上从另一个方面说明了,岩样的破坏程度显著影响其纵波速度降低幅度。

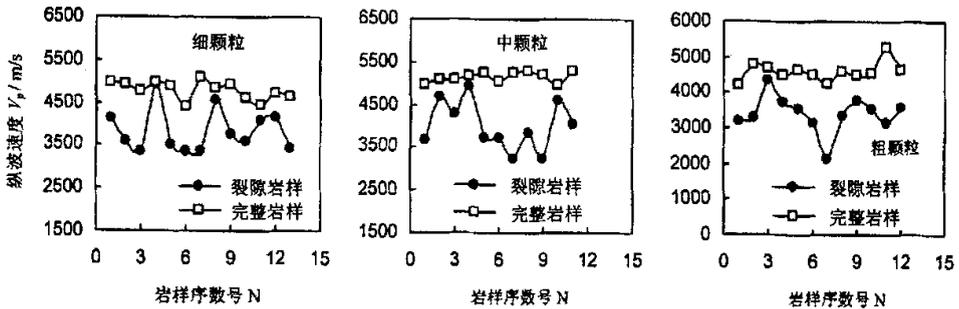


图 I 4 完整岩样和裂隙岩样纵波速度的对比

Fig. I 4 The comparison of longitudinal wave speed between intact specimens and fissure ones

3 岩样声学参数的离散性及统计分析^[6]

不同粒径大理岩样纵、横波速度之间的关系,图 I 5。由图可见,纵横波速度没有明确的关系。即使是由宏观均匀一致的同岩块加工的若干试样,纵横波速度的离散性也很大,如 XA。这是由于岩石材料具有明显的非均质性所致,岩样的特性参数并不是局部参数的算术平均。局部结构的细微差异使得弹性波并非匀速地通过岩样。如 ZB-1 和 ZB-4 两个岩样相比较,将具有相同特征的材料相抵后,波速不同的材料长度为 L 。更为明确的说,横波通过岩样 ZB-1 的时间 $38.8 \mu\text{s}$ 和 ZB-4 的时间 $33.7 \mu\text{s}$ 相差 $5.1 \mu\text{s}$,并不是发生在总长度 100mm 上均匀分布的,而只是发生在长度 L 的这段材料上。因 L 较小,相应的波速差异较大。进而可以确认,岩样实际上是由波速或力学性质相差很大的材料构成。不同岩样含有这些材料的比例

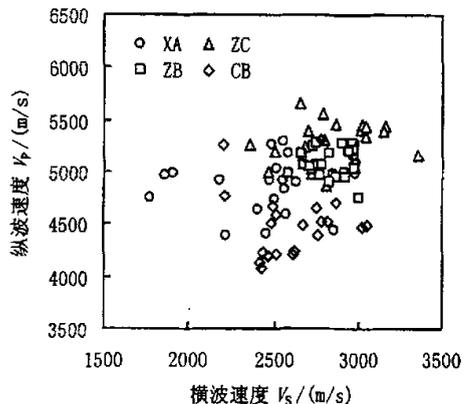


图 I 5 不同粒径岩样纵、横波速度之间的关系

Fig. I 5 The relation between longitudinal wave speed and transverse wave one of marble with different grains

稍有差异，引起了超声波通过岩样的时间不同，从而使得波速不同。

表 I 1 为不同粒径岩样声学参数的统计分析结果。

表 I 1 不同粒径岩样声学参数的统计分析

Table I 1 The statistics analysis of acoustic parameters of specimens with different grains

颗粒	岩块 编号	声学 参数	平均值	标准差	变异系数/(%)
细	XA	V_p	4873	256.7	5.27
		V_s	2392	338.9	14.2
		v_d	0.311	0.067	21.5
		E_d	44.3	9.73	22.0
中	ZC	V_p	5305	209.1	3.94
		V_s	2842	255.7	9.00
		v_d	0.293	0.054	18.4
		E_d	56.6	8.03	14.2
中	ZB	V_p	5101	145.9	2.86
		V_s	2836	126.3	4.45
		v_d	0.273	0.036	13.2
		E_d	55.4	3.82	6.9
粗	CB	V_p	4507	326.8	7.25
		V_s	2615	230.6	8.82
		v_d	0.231	0.077	33.3
		E_d	45.5	5.90	13

表中的变异系数为标准差与平均值的比值。由表可知，尽管超声波速度的变异系数 2.86%~14.2%，但由此计算的动态弹性模量的变异系数在 6.9%~22%之间；而动态泊松比的变异系数为 13.2%~33.3%。因而动态泊松比不能作为一个力学参数来表征岩石的变形特性。

图 I 6 是岩样平均粒径与声学参数离散性的关系曲线。由图可知，同一粒径下声学参数的变异系数大小(从大到小依次为)：动态泊松比、动态弹性模量、横波速度和纵波速度。这实际上从另一个方面说明了，岩石的动态泊松比离散性较大，不能表征岩石的变形特性。随着岩样平均粒径的增大，其声学参数的离散性先减小后增大，并非单调关系。动态泊松比离散性的增大程度较其它声学参数的大。如当岩样平均粒径从 1.5mm 增大到 5.0mm 时，动态泊松比的变异系数从 15.8%增至 33.3%，增大了 17.5%，而动态弹性模量仅增大了 2.45%，纵横波速度的增大程度也较低，分别为：3.85%和 2.1%。

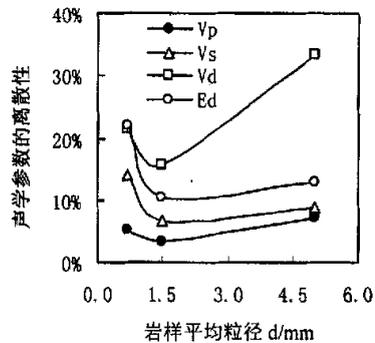


图 I 6 岩样平均粒径与离散性的关系

Fig. 1.6 The relation between the grains size and dispersion of specimens

4 结论

(1) 浸水时间对岩样的纵波速度有很大的影响,但对横波速度影响甚微。当自然状态下的岩石试样在浸入水中接近 10h 以后,岩样波速基本保持不变,达到饱和。裂隙的存在降低了岩石的纵波速度,但波幅降低程度与岩石破坏程度有关。

(2) 随着岩石平均粒径的增大,岩石的声学参数先减小后增大,并非单调关系。而且动态泊松比的变化幅度明显高于其它声学参数,因而动态泊松比不能作为材料的一个力学参数来表征岩石的变形特性。

参考文献:

- [1] 陈成宗. 工程岩体声波测试技术[M] 北京:中国铁道出版社,1990,22~40
- [2] 尤明庆,苏承东,申江. 岩石材料的非均质性与动态参数[J] 辽宁工程技术大学学报,2001,20(4): 492~494
- [3] You Mingqing, Su Chengdong. Measurement of ultrasonic wave in-situ and experiment study of rock specimen [A] IN: Proceedings of Mining Science and Safety Technology [C], Science Press, 2002: 212~219
- [4] 尤明庆,苏承东,杨圣奇. 岩石动静态参数间关系的研究[J] 焦作工学院学报,2002,21(6): 413~419
- [5] 杨圣奇,张学民,苏承东. 岩块声学特性的试验研究[J] 辽宁工程技术大学学报,2003,22(待刊)
- [6] 杨圣奇. 岩石材料的非均质性和力学特性的研究[硕士学位论文][D]焦作:焦作工学院,2003: 10~31

Study on the Acoustic Property of Marble Specimens with Different Grains

WANG Kai-lin,¹ YANG Sheng-qi², SU Cheng-dong¹

(1 Dept. of Resource & Material Engineering, Jiaozuo Institute of Technology, Jiaozuo 454159, China; 2 Institute of Geotechnical Engineering, He Hai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In this paper, based on the supersonic measurement results of marble specimens with different grains, the influence law of soaking time and macroscopical fissure on wave speed, and the dispersion of acoustic parameters of specimens were carried out. The results show that soaking time has great influence on longitudinal wave speed of marble specimens, but no clear effect on the transverse wave speed. The macroscopical fissures can reduce the longitudinal wave speed, but the extent of reducing has relation with the failure extent of specimens. With the increase of specimens' average grain, the acoustic parameters of rock isn't a monotone function, and they reduce firstly and then increase, what's more, the changeable scope of dynamic Poisson's Ratio is higher than one of other acoustic parameters, and so it can't show the deformation property of rock as the mechanical parameter of material.

Keywords: Marble; grain size; longitudinal wave speed; dynamic Poisson's ratio

致 谢

本论文是作者在日本室兰工业大学儿玉淳一教授的悉心指导下完成的，从论文的选题、技术路线的制订、具体实施到论文撰写，无不凝聚着老师的心血。三年的研究生学习生涯中，学业上始终得到了尤明庆教授和苏承东高级工程师的热情帮助和关怀，在此学生谨向老师们致以崇高的敬意和衷心的感谢！老师们严谨细致的治学态度、谦逊高尚的品德风尚、渊博的知识和兢兢业业的工作作风，将成为学生终生学习的榜样。

衷心感谢在日本留学期间的 tutor 樱井玄纪同学，无论是生活上还是在学习上，他给予了我很多的帮助，生活中点点滴滴的小事，已经变成了人生中美丽的回忆。并在论文撰写过程中给予了我热心帮助。

衷心感谢做试验中一起同甘共苦的齐藤雄哉、丹治比丰、大川达也等同学，感谢日本室兰工业大学材料评价研究室的各位老师和全体同学，感谢他们在学习和生活中给予了我莫大的帮助。

衷心感谢室兰工业大学学生课平尾尚澄课长，星正昭课长补佐，盐崎泰子留学生系系长，国际交流室的佐佐木真室长、黑田舞子、熊谷尚子。在他们的帮助和关怀下，留学期间我顺利充实的度过了每一天，使我的留学生活充满了阳光和欢乐。感谢日本室兰工业大学国际交流室的门泽健也先生、泰地先生、坂井先生，他们教给了我许多日语知识。

衷心感谢日本室兰工业大学的全体中国留学生，他们在日常生活中给予我许多的帮助和有益的建议。

作者攻读硕士研究生期间焦作工学院的领导和同学们给予了大力的帮助和热切的关怀，作者特表示诚挚的感谢。

衷心感谢硕士学习阶段的各位任课老师，感谢给予我很多鼓励的父母、女友和她的家人。

感谢各位专家、教授在百忙之中评审论文，真诚地期待得到更多的批评、指导与启迪。

作者: [王开林](#)
学位授予单位: [河南理工大学](#)

参考文献(66条)

1. [徐芝纶 弹性力学](#) 1990
2. [B·H·G·布雷迪, E·T·布朗, 冯树仁 地下采矿岩石力学](#) 1990
3. [Sun Jun, Wang Sijing Rock mechanics and rock engineering in China: developments and current state-of-the-art](#) 2000(37)
4. [傅冰骏 21世纪我国岩石力学面临的机遇与挑战](#) 2000(04)
5. [First Symposium on Rock Mechanics](#) 1956(03)
6. [周维垣 高等岩石力学](#) 1991
7. [孙钧 迎接新世纪的岩石力学若干进展](#) 1998
8. [层云峡天城岩滑落调查委员会 层云峡天城岩滑落事故调查报告书](#) 1988
9. [丰滨隧道崩塌事故调查委员会 丰滨隧道崩塌事故调查报告书](#) 1996
10. [第2白系隧洞崩塌事故调查委员会 第2白系隧洞崩塌事故调查报告书](#) 1998
11. [福田正己 岩石冻结融解引起的风化作用对岩体崩落的影响](#) 1996(09)
12. [菊地宏吉 岩体边坡的崩落问题](#) 1997
13. [高桥解明 寒冷地区边坡灾害](#) 1997
14. [陈天城 关于冻结融解作用引起的溶结凝灰岩裂缝发展过程的研究](#) 2000(01)
15. [G P Davidson, J F Nye A Photo elastic Study Of Ice Pressure in Rock Cracks](#) 1985(11)
16. [崛场夏峰 凝灰岩采石场的热应力测量](#) 1996
17. [Karl Terzaghi Stability of Steep Slopes on Har Dunweathered Rock](#) 1963(07)
18. [陈子光 岩石力学性质与构造应力场](#)
19. [陈宗基 岩石力学的发展方向](#) 1990(03)
20. [陈升强 刚性加载技术形式对岩石变形全过程力学形态的影响](#) 1984(04)
21. [Green S J, Perkins R D Uniaxial compression tests at strain rate from \$10^{-4}\$ to \$10^4\$ sec \$^{-1}\$ on three geological materials](#) 1968
22. [Sedengecti S, Boozer G D The effects of strain rate and temperature on the behaviour of rock subjected to triaxial compression](#) 1961
23. [Bieniawski Z T Time-dependent behaviour of fractured rock](#) 1970(03)
24. [Peng S S, Podnieks E R Relaxation and the behaviour of failed rock](#) 1972(06)
25. [Peng S S Time-dependent aspects of rock behaviour as measured by a servo-controlled hydraulic testing machine](#) 1973(04)
26. [Chong K P, Hoyt P M, Smith J W Effects of strain rate on oil shale fracturing](#) 1980(01)
27. [Chong K P, Borest A P Strain rate dependent mechanical properties of New Albany reference shale](#) 1990(03)
28. [Okubo S, Nishimatsu Y, He C Loading rate dependence of class II rock behaviour in uniaxial and tri-axial compression tests](#) 1990(06)

29. [Okubo S, Nishimatsu Y Uniaxial compression testing using a linear combination of stress and strain as the control variable](#) 1985(05)
30. [Lajtai E Z, Scott Duncan E J, Carter B J The effect of strain rate on rock strength](#) 1991(24)
31. [三木幸藏 わかりやすい岩石と岩盤の知識](#) 1978
32. [王开林, 杨圣奇, 苏承东 不同粒径大理岩样声学特性的研究\[期刊论文\]-煤田地质与勘探](#) 2004(2)
33. [李世平, 吴振业, 贺永年, 李晓 岩石力学简明教程](#) 1996
34. [天津政康 声发射特性と理論](#) 1988
35. [K Fukui, S Okubo, A Ogawa Some aspects of loading-rate dependency of Sanjome andesite strengths](#) 2004(07)
36. [Lumin Ma, J J K Daemen Strain rate-dependence of mechanical properties of welded topopah spring tuff • abstract](#) 2004(03)
37. [H J Liao, W C Pu, J H Yin, M. Akaishi A, Tonosaki Numerical modeling of the effect of strain rate on the stress-strain relation for soft rock using a 3-d elastic visco-plastic model • abstract](#) 2004(03)
38. [L Ma, J J K Daemen Strain rate-dependence of mechanical properties of welded topopah spring tuff](#) 2004(z1)
39. [Sang Ho Cho, Yuji Ogata, Katsuhiko Kaneko Strain-rate dependency of the dynamic tensile strength of rock](#) 2003(05)
40. [T Backers, N Fardin, G Dresen, O. Stephansson Effect of loading rate on Mode I fracture toughness, roughness and micromechanics of sandstone](#) 2003(03)
41. [杨圣奇 岩石材料的非均质性与力学特性的研究\[学位论文\]硕士](#) 2003
42. [Cook N G W, Hojem J P M A rigid 50-ton compression and tension testing machine](#) 1966
43. [J·C·耶格, N·G·W·库克, 中国科学院工程力学研究所 岩石力学基础](#) 1981
44. [卫宏, 张玉三, 李太任, 程东 岩石显微空隙粒度分布的分形特征与岩石强度的关系\[期刊论文\]-岩石力学与工程学报](#) 2000(3)
45. [姜崇喜, 谢强 大理岩细观破坏行为的实时观察与分析](#) 1999(01)
46. [黄明利, 唐春安, 朱万成 岩石单轴压缩下破坏失稳过程SEM即时研究\[期刊论文\]-东北大学学报\(自然科学版\)](#) 1999(4)
47. [姚孝新, 耿乃光, 陈颀 应力途径对岩石脆性-延性变化的影响\[期刊论文\]-地球物理学报](#) 1980(3)
48. [尤明庆, 华安增 应力路径对岩样强度和变形特性的影响\[期刊论文\]-岩土工程学报](#) 1998(5)
49. [唐春安, 刘红元, 秦四清, 杨志法 非均匀性对岩石介质中裂纹扩展模式的影响\[期刊论文\]-地球物理学报](#) 2000(1)
50. [张梅英, 袁建新, 李廷芥, 尚喜兰, 孔常静 单轴压缩过程中岩石变形破坏机理\[期刊论文\]-岩石力学与工程学报](#) 1998(1)
51. [王明洋, 严东晋, 周早生, 钱七虎 岩石单轴试验全程应力应变曲线讨论\[期刊论文\]-岩石力学与工程学报](#) 1998(1)
52. [吴玉山 应力途径对凝灰岩力学特性的影响\[期刊论文\]-岩土工程学报](#) 1983(1)
53. [傅宇方, 梁正召, 唐春安 岩石介质细观非均匀性对宏观破裂过程的影响\[期刊论文\]-岩土工程学报](#) 2000(6)
54. [黄明利, 唐春安, 朱万成 岩石破裂过程的数值模拟研究\[期刊论文\]-岩石力学与工程学报](#) 2000(4)
55. [芮勇勤, 唐春安 岩石剪切破坏过程的RPA2D数值模拟\[期刊论文\]-岩石力学与工程学报](#) 2002(3)
56. [Labuz J F, Biolzi L Class I Vs Class II Stability: a demonstration of size effect](#) 1991(2-3)

57. [尤明庆](#) [岩石试样的杨氏模量与围压的关系](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2003(1)
58. [尤明庆](#) [岩石试样的强度及变形破坏过程](#) 2000
59. [Suggested methods for determining tensile strength of rock aterials](#)
60. [Akira Higashi, Shoichi Koinuma, Shinji Mae](#) [Plastic yielding in ice single crystals](#) 1964(10)
61. [Akira Higashi](#) [Mechanism of Plastic Deformation in Ice Single Crystals](#)
62. [Gunnar Wijk](#) [Some new theoretical aspects of indirect measurements of the tensile strength of rocks](#) 1978
63. [尤明庆, 苏承东](#) [平台圆盘劈裂的理论和试验](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2004(1)
64. [王启智, 贾学明](#) [用平台巴西圆盘试样确定脆性岩石的弹性模量、拉伸强度和断裂韧度——第一部分:解析和数值结果](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2002(9)
65. [王启智, 吴礼舟](#) [用平台巴西圆盘试样确定脆性岩石的弹性模量、拉伸强度和断裂韧度——第二部分:试验结果](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2004(2)
66. [西松裕一, 山口梅太郎](#) [岩石力学入门](#) 1991

相似文献(10条)

1. 会议论文 [陈要辉, 阎铁, 刘颖, 毕雪亮](#) [基于统计损伤的凝灰岩应变软化本构方程研究](#) 2005
凝灰质岩石是一种复杂的自然地质体,由于各种外界的载荷和环境的长期作用,其内部存在着各种各样的缺陷,各种缺陷的力学性质有很大差异,且它们是随机分布的,同时这些材料的损伤也以随机方式分布于凝灰质岩石材料中.从凝灰质岩石材料内部所含缺陷分布的随机性出发,将连续损伤机理和统计强度理论有机地结合起来,建立了凝灰岩应变软化的统计损伤本构模型.该模型能够准确反映凝灰岩的全应力-应变曲线,与实验结果对比,该模型具有很好的吻合性.
2. 会议论文 [王开林, 杨圣奇, 苏承东](#) [冻结状态多级应变速率下凝灰岩力学特性的试验研究](#) 2006
本研究采用北海道登别凝灰岩为研究对象,利用MTS312.21型电液伺服试验机在五组不同的应变速率下,对冻结状态下自然干燥岩样和水饱和岩样进行了单轴压缩试验,研究了应变速率对冻结状态下的岩样强度、变形等力学参数的影响规律,建立了冻结状态下反映应变速率的水饱和岩样单轴抗压强度的经验公式.结果表明,冻结状态下应变速率的变化对自然干燥岩样的单轴抗压强度没有太大的影响;而水饱和岩样的峰值强度随应变速率的增大有明显增大的趋势.
3. 期刊论文 [高秀君, 大久保诚介, 福井胜则, GAO Xiujun, Okubo Seisuke, Fukui Katsunori](#) [气干与湿润状态下多孔裂隙岩石的黏弹性特性与力学模型](#) -[岩石力学与工程学报](#)2007, 26(7)
为研究多孔裂隙岩石的变形特性,提出一个适用于多孔裂隙岩石的非线性流变模型(本构方程).本模型是由弹簧与阻尼器串连组成,弹簧部分采用作者曾经提出的本构方程;代表黏性部分的阻尼器设定加载前黏度很小,随着荷载的增加而逐渐加大.在低应力水平下的蠕变试验中,由于弹性系数没有明显的下降,因而设定阻尼器的应变与蠕变应变相同.为验证模型的准确性,对泥质砂岩、大谷凝灰岩、田下凝灰岩与河津凝灰岩4类岩石分别进行理论计算与试验测试.对于各类岩石,计算得到的应力-应变曲线与实测曲线基本一致,而且用此流变模型,发现气干与湿润状态下杨氏模量具有明显的差异.研究结果表明,在这2种状态下,杨氏模量的差异是由于非弹性应变(即阻尼器的应变)不同而引起的.在湿润状态下,阻尼器的应变增加越大,杨氏模量则变得越小.即使在较低的应力条件下,阻尼器的应变比以往研究中所认为的应变要大很多.
4. 期刊论文 [高秀君, 羽柴公博, 大久保诚介, 福井胜则, GAO Xiujun, Hashiba Kimihiro, Okubo Seisuke, Fukui Katsunori](#) [适用于小型岩石试件的三轴压缩试验技术与设备的开发及其应用](#) -[岩石力学与工程学报](#)2006, 25(10)
为了用有限的岩石试样在室内进行大量的岩石力学试验测试,对直径10mm、长度20mm的小型岩石试件进行开发、制作.同时对S. Okubo等(2002)开发的透明围压容器进行改进,其围压可达10MPa左右.用此改进的试验设备对小型岩石试件进行三轴压缩试验.通过对田下凝灰岩的试验,由小型试件得到的力学参数—黏聚力和内摩擦角,与用常规试件获得的试验结果相一致.而且在载荷速率交替变换的试验中,用一个小试件就可获得应力-应变曲线的载荷速率相关性.通过对三峡库区周边滑坡地带采集的岩石试样的测试,成功获得不同岩石的强度特性曲线及表示载荷速率相关性的参数.
5. 会议论文 [石振明, 张雷](#) [凝灰岩的加热状态下的变形破坏机理](#) 1997
为了研究凝灰岩的热力学性质,该文对秦山地区的熔结凝灰岩做了室温到600℃范围内的不同温度下的单轴压缩试验,得到了凝灰岩的强度、变形、弹性模量和应力应变关系随温度的变化规律及不同温度下的破坏特征,并探讨了凝灰岩在温度作用下的变形破坏机理.研究和分析结果表明:温度对凝灰岩的变形和破坏特性有很大影响,在热应力和外应力的作用下,凝灰岩的变形破坏是多种机制共同作用的结果.
6. 期刊论文 [冯立, 王贤君, 王选富, 许全红, Feng Li, Wang Xianjun, Wang Xuanfu, Xu Quanhong](#) [海拉尔盆地凝灰质火山岩储层矿物学及岩石学特征研究](#) -[中国石油勘探](#)2006, 11(2)
大庆油田海拉尔盆地兴安岭群火山岩储层主要为安山-流纹质凝灰岩、安山质凝灰岩、粗面-流纹质凝灰岩,在水力压裂过程中,发生压裂早期砂堵,返排率低,压裂成功率低.针对这些特点,通过岩石水理特性实验和岩石学特征研究,提出了以下解决措施:①凝灰质火山岩储层粘土含量高时,应提高高压裂液的防膨胀性能,大排量施工,增加裂缝净压力;②碱性和偏碱性凝灰质储层,应研究使用低滤失压裂液,降低滤失量,同时提高高压裂液的防膨胀性能;③凝灰质储层塑性较强时,应尽量提高施工排量.
7. 会议论文 [商晶志, 陆家梁](#) [深部凝灰岩沉淀池支护方法的综合治理](#) 1996
阐述凝灰岩的变形机制.优化支护设计方案及支护参数.现场施工管理.观测数据整理、分析.
8. 会议论文 [冯英, 小浪底水库T' 5<, 1>, T' 6<, 1>粘土岩特性分析](#) 1997
长期观测的结果表明:干湿循环加速粘土岩的膨胀、崩解,使岩石的强度迅速降低,因而在施工中应尽量避免水的入浸.水浸后要在几小时以内采

取措施,以防粘土岩强度降低,膨胀力增大。

9. 期刊论文 [朱合华](#). [闫治国](#). [邓涛](#). [姚坚](#). [曾令军](#). [强健](#). [ZHU Hehua](#). [YAN Zhiguo](#). [DENG Tao](#). [YAO Jian](#). [ZENG Lingjun](#).

[QIANG Jian](#) 3种岩石高温后力学性质的试验研究—岩石力学与工程学报2006, 25(10)

通过单轴压缩试验,对不同高温后熔结凝灰岩、花岗岩及流纹状凝灰角砾岩的力学性质进行了研究,分析比较3种岩石峰值应力、峰值应变及弹性模量随温度的变化规律,并研究了峰值应力与纵波波速、峰值应变与纵波波速的关系.试验升温等级设为20℃,200℃,400℃,600℃,800℃五级,升温速度为30℃/min.试验结果表明,高温后3种岩石的峰值应力、弹性模量均有不同幅度的降低,且经历的温度越高,降低的幅度越大.对于峰值应变,熔结凝灰岩、花岗岩的峰值应变随温度的升高而大幅度的增加;但对于流纹状凝灰角砾岩,峰值应变随着温度的升高在降低.此外,峰值应力与纵波波速、峰值应变与纵波波速的关系依赖于不同的岩石而表现出不同的规律.

10. 会议论文 [孙少锐](#). [吴继敏](#). [董志高](#). [王文远](#). [周宏](#). [王坤](#). [魏继红](#) [金沙江金安桥水电站左岸B2崩塌体稳定性分析](#)

2006

本文对金沙江水电站左岸下游B2崩塌堆积体的工程特性进行研究,重点分析了凝灰岩夹层分布形式、分布特点,并提出了其对崩塌体的稳定性产生的影响以及可能导致崩塌体的破坏类型.运用2D有限元及极限平衡分析法分别对崩塌体的稳定性进行分析,由此得出:B2崩塌体按松动体底面和凝灰岩夹层组合滑动面的安全系数满足工程要求;地震作用对崩塌堆积体的影响较天然状态下大,根据极限平衡理论的最弱面搜索结果及计算结果,沿崩塌堆积体底面和凝灰岩夹层组合的整体性平面滑动破坏可能性存在.同时提出了对浸水后凝灰岩夹层特性进行研究及及时监控反馈分析的合理化建议.

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y819357.aspx

下载时间: 2010年5月27日