

# 岩石声发射技术的应用现状

彭新明<sup>1</sup>, 孙友宏<sup>2</sup>, 李安宁<sup>3</sup>

(1.北京市地质工程勘察院,北京 100037;2.长春科技大学 工程技术学院,吉林 长春 130026;3.北京市地质矿产勘查开发局,北京 100050)

**摘要:**介绍了国内外岩石声发射技术在测定地应力、钻进监测、岩石力学与岩石破岩学研究、坑道岩体稳定性监测等方面的应用现状及发展趋势。

**关键词:**岩石声发射技术;应用;现状

**中图分类号:**P634.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-5589(2000)03-0303-04

固体物质在外界条件(机械载荷、温度变化等)作用下,其内部将产生局部应力集中现象。由于应力集中区的高能状态是不稳定的,它必将向稳定的低能状态过渡,在这一过渡过程中,应变能将以弹性波的方式快速释放,即声发射现象。各种材料的声发射范围很宽,从次声频、声频到超声频,所以声发射有时也称为应力波发射(Stress wave emission)。在地质上有时称为微震(Microseismic)。声发射是一种非常普遍的物理现象,大多数金属材料 and 几乎所有的岩石在塑性变形和断裂时都有声发射发生。但一般情况下,声发射信号的强度很弱,人耳不能直接听到,需要藉助灵敏的电子仪器才能检测出来。用仪器检测、分析和利用声发射信号推断声发射源的技术称为声发射技术。岩土体在受压临近破坏时,引起微裂隙的产生与扩展,产生声波或超声波,即所谓的岩石声发射现象。一般认为在岩石中,位错可能产生微水平的声发射,而孪晶、颗粒界面的移动、裂缝的产生和传播可能产生宏观水平的声发射。

## 1 岩石声发射技术的应用

目前对岩石声发射技术的实际应用主要集中在以下几个方面。

### 1.1 测定地应力

1953年,德国学者 Kaise 在研究金属的声发射(AE)特性时发现,受单向拉伸的金属材料,只有当应力达到材料所受的最大先期应力时才开始出现明显的声发射现象,这就是以他的名字命名的凯塞效应。60年代 Goodman 发现岩石的压缩试验中 Kaise 效应仍然成立。70年代末以来,日、中、美学者对这一问题进行了广泛的理论和实验研究,使 Kaise 效应测定地应力开始由探索阶段向实用阶段发展。

岩石 Kaise 效应,是指对取自地下一定深度的岩石试件进行单轴压缩试验,当所施加荷载达到岩石所经受的先期最大应力值时,岩石开始出现明显的声发射。因此,在现场获取经历过地应力作用的岩石,利用岩石 Kaise 效应,经过室内加工试件后,进行单轴压缩试验,然后利用弹性理论求得岩石的地应力大小和方向。

收稿日期:1999-08-10

作者简介:彭新明,男,1970年生,工程师,主要从事工程勘探技术研究。

Hupe 等人用常规的套钻应力解除法和 AE 凯塞效应法测定花岗岩中的原位应力,得出的结论是:套钻法与凯塞效应法的数据组之间存在着明显的差异;凯塞效应法测得的应力值比预期的应力值明显要低些,这是由于取出的岩芯与进行 AE 试验之间的时间延迟和凯塞效应应力记忆的保留时距较短所致;凯塞效应保留时距(KERS)的研究证明了 KERS 可能与试验岩样的直径有关,较大直径具有较长的保留时距。Hupe 等人还断定:尽管凯塞效应在深孔原位应力测量方面有应用前景,但是,目前此技术还不成熟,效果还不够确凿。因此,它还不能提供原位应力可靠的测定。在该项技术能够转入常规应用之前,有些因素,诸如凯塞效应保留时距,二次钻取岩芯试样的影响,以及单轴岩石试验与多轴应力之间的关系等,必须得到充分的了解。归根结底,对凯塞效应试验必须采取使其标准化途径<sup>[1]</sup>。

### 1.2 钻进监测

钻进过程中,由于岩石在受力作用下的裂纹扩展和破碎以及切削具与岩石的相互作用会激发出一种弹性波,亦即声发射。这种波可以沿着钻杆和地层向外传播。岩石破碎是一个由钻头、钻遇岩石和所采用的钻进参数及条件决定的具有特质的过程。过程中激发的弹性波携带着反映这种特质的丰富的信息,采用适当的手段采集到这种信号并加以分析处理,就能提取这方面的信息。从得到的信息中查明钻头工作情况、岩性变化情况、岩石破碎情况、孔底状态情况(钻头抛光、正常钻进、烧钻、事故)、钻探技术指标(机械钻速、钻头进尺)等与声发射的关系,就有可能对钻进过程进行监测、进行控制,以达到最优化钻进、获得高的钻探技术经济指标的目的。例如,根据钻进声波场频谱,判断钻头的工作状态,可以随时调整钻进规程,实现自动化钻进。国外对钻进过程的声发射监测研究始于 80 年代初。德、日、美、前苏联等都开展了这方面的研究工作。尽管开展研究的时间不长,但各国的研究异常活跃且进展显著。1980 年美国卡茨利用声发射研究了油田钻进时的钻头位置<sup>[2]</sup>。1985 年日本东京大学研究了判层问题。1987 年德国克劳斯塔尔工业大学深井研究所对钻头和单元切削体切削岩石时产生的振动信号进行了测量<sup>[3]</sup>。近年来全俄勘探技术研究所阿尔希波夫和沙特罗夫等人对钻探过程中的声波探测问题进行了较多的研究,不仅进行了实验室研究,而且还进行了野外试验,取得了不少资料,他们利用声发射研究了岩石的可钻性、钻头结构、钻进规程参数优化、孔底能量分布和区分地质剖面等情况,并提出了相应的建议<sup>[4,5]</sup>。

国内在这项研究方面的工作还是初步的。钻进过程中背景信号噪声大,声发射传感器与信号接收器间难于建立通讯。国内尚未见到将声发射技术用于钻探实践的报道。然而,钻进过程中声发射的产生是一个极为复杂的过程,声发射信号产生的机理及其与孔底状态之间的关系还远没有弄清楚,还没有一种非常适合于钻进过程监测的声发射采集和处理系统,因此要使声发射技术真正成为一种钻进过程监测的有效方法,尚要进行大量的研究工作。其中,首要课题是进一步深入了解发射信号与碎岩状态之间的相关关系及其内在机理。

### 1.3 在岩石力学与岩石破碎学中的运用

运用岩石声发射技术,研究拉伸、压缩和弯曲载荷下岩石变形及破坏的基本特性;建立声发射信号和岩石性质之间的相关关系;确定单向应力和三向应力状态下岩石样品中非稳定裂隙的起始点;确定岩盐及其它塑性岩石的屈服极限;研究岩石声发射机理、声信号与岩石破碎过程的联系。1962 年,茂木(Mogi)通过室内试验得出了岩石声发射活动按加载的大小依次为:a. 声发射不明显;b. 零星发生较小的声发射;c. 随应力增加而逐步增加声发射;d. 接近脆性破坏时急剧增加声发射<sup>[6]</sup>。保伊斯(Boyce)在 1981 年研究了 12 种岩石的声发射

活动,他发现上述茂木的研究结果可与宾涅夫斯基(Bieniawski)于1967年提出的岩石脆性破坏四阶段相对应,即:①在应力较低时,岩石中裂隙闭合阶段;②当应力逐步增加,岩石发生线弹性变形阶段;③应力继续增大,开始出现新裂纹,岩石处于裂隙稳定扩展阶段;④当应力加大到某种程度时,岩石处于裂隙失稳扩展阶段,终致产生断裂破坏,并不是所有的岩石在断裂前都经历上述四个阶段。

保伊斯总结了大量的试验结果,归纳出四种类型:

I型 裂隙闭合、线弹性变形、裂隙稳定扩展和裂隙失稳扩展声发射四阶段完全具备的岩石,如花岗岩、片麻岩、白云岩和某些砂岩等。

II型 声发射活动经历裂隙闭合、线弹性变形阶段后立即进入裂隙失稳扩展阶段,缺失裂隙稳定扩展阶段的岩石,如大理岩及某些页岩等。

III型 声发射活动只表现出线弹性变形、裂隙稳定扩展和失稳扩展三个阶段的岩石,如云母片岩及某些页岩等。

IV型 声发射活动只有线弹性变形和裂隙失稳扩展两个阶段的岩石,如石灰岩、粉砂岩等。

这种根据声发射特征对岩石脆性破坏机制的研究,揭示了岩石破坏的发展过程。

国内学者也在这方面进行了一些研究,在多种岩样上用多种形状的压头进行了单齿压入试验,分别测定了它们产生的声发射特征。根据试验结果找出了不同压头作用下声发射率曲线的变化特点,根据声发射率的变化曲线将脆性岩石的受力破碎过程分为若干阶段,并对影响岩石声发射的因素进行了分析。另外曾做了压头压入时声发射图像与岩石破碎过程的关系的研究,试验得到了声信号频率和平均幅度的图像,并据此对较硬岩石的破碎阶段进行了划分。另外还发现岩石压入硬度与声发射的峰值平均幅度有良好的相关关系<sup>[7]</sup>。

#### 1.4 坑道岩体稳定性监测

随着矿山开采深度的增加,矿井内的地压力越来越大,围岩会出现顶板冒落及巷道岩爆等一系列地质灾害,已成为采掘设计、井巷支护中必须解决的工程地质问题。因而,国内外广泛开展了利用岩石声发射技术监测和预报矿井内发生的冒顶和岩爆。70年代初,冶金工业部安全技术研究所李典文等开始研究声发射技术在矿山工程中的应用,研制成功了多种便携式声发射监测系统,对一些矿山危险工程进行了安全监测,预报了大面积地压灾害和采场冒顶。1981年7月~1982年8月门头沟煤矿曾用YSS型岩体声发射监测仪对该矿20队工作面进行了安全监测,这是我国第一次在煤矿中应用声发射技术预测井下地压,取得了满意的结果。根据煤矿要求,李典文等人又研制成功了SYK-1型安全火花岩体声发射监测仪。1988年11月,西安地质学院谭以安完成了题为“岩爆形成机理研究及综合评判”的博士论文,提出了“劈裂-剪折-弹射”三阶段的岩爆发生机制。美国矿务局对煤矿中顶板的冒落曾利用声发射技术进行过一系列研究工作,其研究重点在于监测预报可能发生冒顶的地段及其发生的时间。美国矿务局曾对科尔达兰(Coeur d'Alene)金属矿岩爆进行了大规模的长期声发射监测研究,多次成功地记录了岩爆发生前后声发射讯号。

目前,声发射技术还存在预报不准的现象。如有时声发射频度异常,而没有发生岩体破坏;有时岩体发生破坏,却没有明显的前兆信息。因而,尚需对声发射信号的声源机理进行研究,并进一步研制抗干扰能力强、信号处理功能强的现场监测仪器<sup>[8]</sup>。

### 1.5 声发射技术在其它方面的应用

(1)地质灾害监测。60年代,美国、苏联、日本等国一批学者研究了声发射现象与岩石强度及变形特性的关系,用于预测岩体滑坡和预测地震。(2)土木工程监测与预报。例如,利用声发射监测高速公路钢质桥梁和海上平台的形变,预报水坝、建筑物的安全性。(3)应用于石油工程。例如,利用声发射确定地下气储的稳定性<sup>[9]</sup>。

## 2 结 语

我国的声发射技术研究起步较晚,大约是60年代末70年代初才开始这方面的工作,首先着眼于应用,已取得可观的成就,尚需进行细致的工作。将声发射技术与计算机技术结合起来,由计算机自动完成数据的多通道采集、存储、波谱分析等。计算机的高速采样可能会对岩石声发射的一些瞬态过程给出一个直观的反应。针对某一种岩石、碎岩工具或特定规程参数条件下的钻进过程,通过实验建立其特征声谱图,即所谓的“标样”(标准样品),将监测获得的声谱图与标样对比,即可实现判别。

经过几十年的研究和应用,国内外岩石声发射技术的应用领域日益广泛,并且研制成功了许多应用于不同目的的声发射监测系统。但是,由于声发射理论上尚不完善,技术上遇到了一些棘手的问题(如干扰噪声的分离等),其每一点成绩的取得都是比较缓慢的。因而,要使岩石声发射技术成为一种成熟的监测与预报手段,还需要进行大量的、艰巨的工作。

#### 参考文献:

- [1] Hupe A J. 用套钻应力解除法和声发射凯塞效应法测定花岗岩中的原位应力[J]. 吴光琳译. 国外地质勘探技术, 1996, (5): 29~35.
- [2] Katz L J. Drill bit location guidance by seismic seen feasible[J]. Oil and Gas Journal, 1980, 28: 21~25.
- [3] Asanuma H, Hardy H R. Acoustic emission associated with rock drilling tests under laboratory conditions [A]. Proceedings of the 10th International Acoustic Emission Symposium[C]. Sendai, Japan, 1990. 22~25.
- [4] 汤凤林. 利用声发射研究钻进过程(上)[J]. 国外地质勘探技术, 1995, (4): 28~37.
- [5] 汤凤林. 利用声发射研究钻进过程(下)[J]. 国外地质勘探技术, 1995, (5): 35~38.
- [6] 彭一民. 岩石声发射技术的应用与进展[J]. 地质科技情报: 1989, (4): 91~97.
- [7] 吴光琳. 压头压入时声发射图像与岩石破碎机理关系的探讨[J]. 探矿工程: 1992, (2): 3~5.
- [8] 胡定成. 声发射技术在坑道工程中的应用[J]. 探矿工程: 1991, (3): 50~51.
- [9] 吴光琳. 声发射技术在岩石力学领域中的应用[J]. 探矿工程: 1991, (4): 1~3.

## Application Present of the Rock Acoustic Emission Technique

PENG Xin-ming<sup>1</sup>, SUN You-hong<sup>2</sup>, LI An-ning<sup>3</sup>

(1. Beijing Institute of Geological Engineering, Beijing 100037, China; 2. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130026, China; 3. Beijing Exploration and Development Bureau of Geology and Minerals, Beijing 100050, China)

**Abstract:** The rock AE(Acoustic Emission) technique is applied widely in measurement of crustal stress, MWD(Measuring With Drilling), rock mechanics, rock disintegration, stability measurement of surrounding rocks of tunnel. This paper introduces its current situation and development tendency.

**Key words:** rock AE technique; application; current situation

# 岩石声发射技术的应用现状

作者: [彭新明](#), [孙友宏](#), [李安宁](#)  
 作者单位: [彭新明\(北京市地质工程勘察院,北京,100037\)](#), [孙友宏\(长春科技大学工程技术学院,吉林,长春,130026\)](#), [李安宁\(北京市地质矿产勘查开发局,北京,100050\)](#)  
 刊名: [世界地质](#) **ISTIC**  
 英文刊名: [WORLD GEOLOGY](#)  
 年,卷(期): 2000, 19(3)  
 引用次数: 7次

## 参考文献(9条)

1. Hupe A J. [吴光琳](#) [用套钻应力解除法和声发射凯塞效应法测定花岗岩中的原位应力](#) 1996 (05)
2. Katz L J [Drill bit location guidance by seismic seen feasible](#) 1980
3. Asanuma H, [Hardy H R](#) [Acoustic emission associated with rock drilling tests under laboratory conditions](#) 1990
4. [汤凤林](#) [利用声发射研究钻进过程](#) 1995 (04)
5. [汤凤林](#) [利用声发射研究钻进过程](#) 1995 (05)
6. [彭一民](#) [岩石声发射技术的应用与进展](#) 1989 (04)
7. [吴光琳](#) [压头压入时声发射图像与岩石破碎机理关系的探讨](#) 1992 (02)
8. [胡定成](#) [声发射技术在坑道工程中的应用](#) 1991 (03)
9. [吴光琳](#) [声发射技术在岩石力学领域中的应用](#) 1991 (04)

## 相似文献(10条)

1. 期刊论文 [郭小云](#), [熊甜甜](#), [樊刚](#) [关于声发射技术在岩石工程中应用的研究进展 -科技信息 \(学术版\)](#) 2008, "" (32)  
 本文从Kaiser效应应用方面,介绍了岩石的Kaiser效应及声发射技术在岩土工程中的应用.最后讨论了声发射技术未来的研究方向.
2. 学位论文 [尹贤刚](#) [岩石声发射技术理论、实验与应用研究](#) 2003  
 该论文评述了声发射技术国内外的发展状况,采用MTS液压伺服刚性压力机和DYF-2便携式声发射仪等技术手段,对取自厂坝铅锌矿和三山岛金矿的岩石进行受力破坏过程的声发射特征室内实验和声发射Kaiser效应实验研究.通过实验揭示岩石破裂过程中应力、应变、声发射参数与时间参数之间的关系,进一步探讨岩石破坏的机理,提出岩石破坏的前兆判据.在室内实验研究的基础上,吸取非线性科学理论的思想与方法,运用分形理论建立声发射事件振幅和声发射累积数时间序列的数学计算模型,对试件破坏的声发射前兆特征进行分析,通过计算岩石破坏各阶段声发射强度维和关联维的分形维数的变化来描述岩石破坏过程的特征,寻找岩石破坏的判据.运用灰色GM(1,1)预测模型和分形理论相结合,建立现场岩体失稳声发射灰色一分形耦合预测预报的数学力学模型.同时,借助于VisualC++语言开发基于Windows操作系统的岩体失稳声发射灰色一分形耦合预测预报这一模型的可视化处理软件,采用该软件来处理现场声发射监测数据,计算分形维数,对岩体稳定性进行综合评判,并使这一套系统在矿山的实际声发射监测预报中得到应用.
3. 期刊论文 [张艳霞](#), [何晖](#), [ZHANG Yan-xia](#), [HE Hui](#) [岩石声发射的Kaiser效应研究进展 -地下空间与工程学报](#) 2007, 3 (6)  
 简要介绍了声发射技术的原理、发展史,从Kaiser效应应用方面,还介绍了声发射技术的研究成果.还介绍了岩石的Kaiser效应及声发射技术在岩土工程中的应用.最后讨论了声发射技术未来的研究方向.
4. 期刊论文 [王祥](#), [孙来顺](#), [黄斌](#) [声发射技术在地应力测量中的研究现状 -中国水运 \(下半月\)](#) 2009, 9 (1)  
 介绍了国内外岩石声发射技术在测量地应力的应用现状和目前的主要问题,以及声发射Kaiser效应进行地应力测试的基本原理,结合现今声发射信号处理的理论试验成果,阐述了小波分析在地应力测量中的重要性,最后根据存在问题,展望了岩石声发射技术测量地应力的发展趋势.
5. 学位论文 [罗啸泉](#) [川西拗陷中段上侏罗统蓬莱镇组次生气藏成藏模式](#) 1996  
 该文依据地质、地震、测井等资料,应用石油地质动力学理论,对川西拗陷中段上侏罗统蓬莱镇组次生气藏成藏条件进行了研究,研究中采用了BP神经网络模型,模糊判别法,粘土矿物“X”衍射,岩石声发射技术,包括测温等新技术,取得了这样一些认识.
6. 期刊论文 [金解放](#), [赵奎](#), [JIN Jie-fang](#), [ZHAO Kui](#) [岩石声发射测量地应力信号处理技术研究 -江西理工大学学报](#) 2008, 29 (3)  
 针对目前岩石声发射信号处理存在的问题,在对岩石声发射技术和信号处理技术归纳的基础上,对比了目前各种信号处理的方法,指出了小波分析理论满足岩石声发射信号处理的要求;接着,利用频谱分析等找出岩石声发射信号的频率范围;进而,通过分析研究得到合适的小波基、阈值形式;最后,对信号进行分解、去噪、重构和压缩.经理论分析和实例结果说明,借助Matlab软件,应用小波分析和小波包分析理论,可有效进行岩石声发射信号分析和处理.
7. 期刊论文 [任丽华](#), [林承焰](#), [REN Li-hua](#), [LIN Cheng-yan](#) [构造裂缝发育期次划分方法研究与应用——以海拉尔盆地布达特群为例 -沉积学报](#) 2007, 25 (2)  
 以海拉尔盆地苏德尔特构造带布达特群古潜山油藏裂缝性储层为例,对构造裂缝发育期次的划分方法进行了探讨;在大量岩心观察的基础上,结合区域

构造演化史,综合采用裂缝充填物的同位素分析、包裹体测温 and 岩石声发射技术等,分析了裂缝的形成期次.研究认为布达特群主要存在三期构造破裂:第I期裂缝的形成与南屯末-大磨拐河组沉积时期的构造运动有关,缝内以方解石充填为主,形成温度介于72~76℃之间,并见有烃类包裹体,但其成熟度较低.第II期裂缝是在伊敏时期区域伸展作用下形成的,又细分为两个亚期,第一亚期裂缝以方解石充填为主,方解石形成温度介于117~132℃之间,是深埋高温环境下的产物;第二亚期裂缝以微-细晶石英充填为主,其形成温度介于120~154℃之间.相对来讲,第II期烃类成熟度明显增强.第III期裂缝是在伊敏末期强烈的抬升作用下形成的,裂缝内充填了微-细晶方解石和石英.其形成温度介于89~110℃之间,烃类成熟度减弱.裂缝发育期次划分对于恢复裂缝发育演化历史具有重要意义.

#### 8. 学位论文 [段波 岩石Kaiser效应及隧道围岩稳定性分析](#) 2004

利用岩石Kaiser效应测定隧道围岩地应力以及分析围岩稳定性是岩土工程领域的重要研究课题之一.Kaiser效应是指施加于金属材料的应力达到其所受到的最大先期应力时才开始出现明显声发射的现象.美国学者Goodman(1963)实验发现Kaiser效应在岩石材料中仍然成立.由于岩石的这种记忆效应,使得我们能够通过室内实验来计算出岩石地应力大小和方向,应用于隧道围岩稳定性分析.该文以岩石声发射技术、岩石力学、工程地质学、地质构造学及数值分析等交叉学科的理论为基础,从地质历史分析与力学分析紧密结合的观点出发,通过大量试验以解决岩石Kaiser效应测定隧道围岩地应力.通过室内岩石单轴压缩试验,我们得到岩石的弹性模量、泊松比等物理力学指标,并且通过声发射仪记录下岩石压缩破坏过程中产生的声发射频度值,并对其中特征明显的频度值所对应的声发射特征值进行组合计算,结合该地区的地质历史,得出隧道围岩中岩石的主应力大小和方向,并进行围压下的地应力大小的修正,并将其中得到的现今地应力场应用于隧道围岩稳定性数值计算分析中.通过以上的计算分析,从得到的地应力结果认为基本符合该区域历史和现今地应力特征,该方法可以应用于隧道围岩地应力测试中,并且简单有效,对于指导隧道设计和施工都有一定的意义.

#### 9. 期刊论文 [尹贤刚,李庶林 用岩石声发射凯塞效应量测地应力研究](#) -[采矿技术](#)2006, 6(3)

凯塞效应在实际工程中的应用越来越受到重视,通过介绍利用岩石声发射技术进行地应力测试的基本原理和实验方法,指出该方法具有比一般应力解除法进行现场地应力量测所特有的经济、简便、有效的优点,并且还介绍了利用该方法对厂坝铅锌矿地应力进行测试的实例,最后指明对凯塞效应有影响的一些因素以及有待进一步研究的方向.

#### 10. 会议论文 [尹贤刚,李庶林 用岩石声发射凯塞效应量测地应力研究](#) 2006

凯塞效应在实际工程中的应用越来越受到重视,通过介绍利用岩石声发射技术进行地应力测试的基本原理和实验方法,指出该方法具有比一般应力解除法进行现场地应力量测所特有的经济、简便、有效的优点,并且还介绍了利用该方法对厂坝铅锌矿地应力进行测试的实例,最后指明对凯塞效应有影响的一些因素以及有待进一步研究的方向.

### 引证文献(9条)

1. [陈景涛 岩石变形特征和声发射特征的三轴试验研究](#)[期刊论文]-[武汉理工大学学报](#) 2008(2)
2. [邹银辉,董国伟,张庆华,吕贵春 波导管中声发射信号传播规律研究](#)[期刊论文]-[矿业安全与环保](#) 2007(6)
3. [何建平,王宁 声发射技术在土木工程中的应用发展](#)[期刊论文]-[西部探矿工程](#) 2006(11)
4. [邹银辉,赵旭生,刘胜 声发射连续预测煤与瓦斯突出技术研究](#)[期刊论文]-[煤炭科学技术](#) 2005(6)
5. [邹银辉,文光才,胡千庭,许进鹏 岩体声发射传播衰减理论分析与试验研究](#)[期刊论文]-[煤炭学报](#) 2004(6)
6. [邹银辉 煤岩声发射机理初探](#)[期刊论文]-[矿业安全与环保](#) 2004(1)
7. [邹银辉 煤岩声发射机理及实验研究](#)[期刊论文]-[湘潭矿业学院学报](#) 2003(4)
8. [赵向东,王育平,陈波,姜福兴 微地震研究及在深部采动围岩监测中的应用](#)[期刊论文]-[合肥工业大学学报\(自然科学版\)](#) 2003(3)
9. [平健,李仕雄,陈虹燕,夏媛媛 微震定位原理与实现](#)[期刊论文]-[金属矿山](#) 2010(1)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_sjdz200003019.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_sjdz200003019.aspx)

下载时间: 2010年6月2日