

钛合金压力容器声发射检测技术

刘哲军 伍颂 程茶园

(航天材料及工艺研究所 北京 100076)

文 摘: 作为声发射技术成功应用于生产检验工序的典型实例,本文系统介绍了航天钛合金压力容器的声发射检测原理、检测程序、结果判定方面的技术应用现状和今后主要研究方向。

关键词: 钛合金压力容器; 声发射; 检测

1 前言

钛合金具有轻质高强度的特点,是航天飞行器用压力容器的典型材料之一。钛合金压力容器根据贮存介质不同分为贮箱和气瓶两大类,其中贮箱主要来贮存燃料,而气瓶主要贮存贮箱增压用的气体。贮箱的使用压力一般较低,通常不超过 10MPa,而气瓶的使用压力一般较高,最高可达 30 多 MPa。由于钛合金材料在冶炼、成型等工艺过程中容易出现脆性亮带等脆性组织缺陷而难以用常规方法检出,造成部分容器在液压验收试验中发生低压破坏,并对通过考核试验的容器造成严重质量隐患。因此为严格控制产品质量,除去 100%常规无损检测、液压验收和批次抽爆外,还在液压验收试验过程中引入了声发射无损检测技术。

声发射作为动态无损检测新技术从上世纪 70 年代开始,结合钛合金气瓶的研制生产开始在压力考核验收试验中进行应用研究。在经过对几百个 TC4 钛合金气瓶进行压力试验和爆破验证的基础上,累积了大量的试验数据,在 1980 年制定出以恒载声发射为主的四级声源严重性评价判据和检测方法,同时将声发射技术列入 TC4 钛合金气瓶批次性生产检验工序,从此钛合金压力容器声发射检测正式进入标准化检测阶段。至今 30 多年来,航天各单位利用声发射技术已累计对 4000 多件各类钛合金压力容器进行了成功检测,声发射检测技术在排除气瓶质量隐患、提高验收率、促进研制和生产进程方面,获得了良好的经济社会效益。声发射检测技术现已成为钛合金压力容器不可替代的无损检测手段之一。

2 检测原理

声发射是材料局部应力快速释放而产生并发出瞬态弹性波的物理现象。声源是指材料局部产生声发射现象的物理源。声发射检测技术就是对声源进行评价的无损检测技术。检测人员利用数据处理软件计算出声发射源的位置并作出各种参数的相关图表,然后根据这些图表来判断声发射源的位置、严重性等结构信息,经过综合分析给出容器整体完整性结果和批次质量排序。

在声发射检测技术中如何排除噪声干扰一直是声发射检测技术的难题。在钛合金压力容器声发射检测中,我们关心的声源为容器本身的缺陷,例如裂纹、局部偏析、应力集中点、各种焊接缺陷、母材缺陷等等,但在压力试验过程中,还有很多来自容器或外界的非结构意义的声发射机制产生的噪声干扰,例如摩擦、振动、粘连开裂、气泡开裂等等。因而在检测技术中我们通常还会利用空间鉴别排除定位阵列之外的声发射信号,并将声发射事件作为分析的主要数据类型,此外还利用振铃计数、能量及上升时间、持续时间进行参数鉴别,排除某些不符合的声发射事件,还利用高频窄带传感器及相应的频率滤波范围进行噪声的频率鉴别。但值得注意的是,各种噪声鉴别方法在排除噪声的同时,也会阻碍检测所关心的声发射信号的采集,因此在使用噪声鉴别功能时应视具体情况灵活处理,不能一概而论。

3 检测程序

钛合金压力容器的声发射检测程序主要分为检测准备、检测设置与校准、检测三个过程。

3.1 检测准备

钛合金压力容器的检测准备主要包括声发射检测系统的准备和加载程序的确定两部分。声发射检测系统的准备工作主要包括检测系统通道一致性检查、电缆的连通性检查以及传感器、前置放大器的性能检查。系统各部件的性能要求见表 1。

表 1 检测系统性能要求

系统部件	项目	指标
信号处理器	通道	≥ 4
	功能	至少包括平面定位, 声发射参数采集等功能
	通道一致性	各通道幅度灵敏度偏差 $\leq 2\text{dB}$
传感器	峰值灵敏度	$> 65\text{dB}$ [相对于 $1\text{V/m}\cdot\text{s}^{-1}$]
	频率带宽	$80\text{kHz}\sim 250\text{kHz}$
前置放大器	增益	40dB
	频率带宽	$100\sim 400\text{kHz}$
	动态范围	$> 80\text{dB}$

加载程序主要包括最大考核压力、保压时间、加载方式三个方面。钛合金压力容器的最大考核压力一般选定 1.5 倍的容器工作压力, 保压时间为 10min, 加载方式选用分级恒载的方式进加载, 分级台阶和分级保压时间需根据具体的试验和声发射情况灵活确定。检测失败后的重复加载载荷一般不超过首次最大载荷的 5%, 验证性重复加载的最大载荷一般不超过首次加载最高载荷的 0.95 倍。

3.2 检测设置及校准

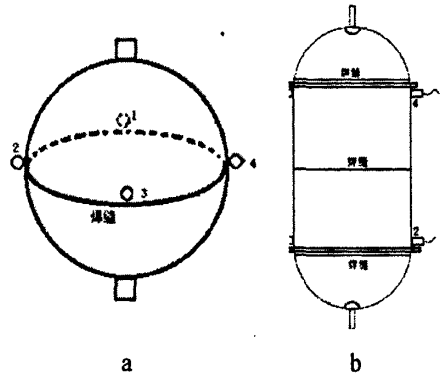
由于钛合金压力容器的声衰减都很小, 利用四个声发射通道足够监视整个容器。因而目前钛合金压力容器最多采用四通道平面定位的方式进行检测, 传感器布置方式根据容器形状略有不同: 对于球形容器多数采用如图 1a 的方式布置传感器, 例如某运载火箭用 TC4 钛合金气瓶; 对于柱形的容器多采用如图 1b 的方式布置传感器, 例如某卫星永 TC4 钛合金贮箱。

钛合金压力容器声发射检测主要参数设置见表 2。

传感器布置结束, 系统参数设置完毕后, 进入检测校准程序。检测校准包括定位有效性校准、通道灵敏度校准和定位准确度校准三个方面。定位有效性校准的主要目的是检查系统连通性及设置是否有错。校准的方法是在定位阵列的中心用铅笔芯模拟源激发声发射模拟信号, 若系统显示有定位信号说明系统设置基本正确, 否则需要从系统前端到软件设置进行重新检查。

通道灵敏度校准是保证各传感器的耦合灵敏度基本一致, 在钛合金压力容器的声发射检测中要求, 各通道灵敏度不小于 90dB , 各通道灵敏度偏差不超过 3dB 。否则必须对传感器进行重新耦合或者更换。

定位准确度校准是调整定位计算用声速值, 使得屏幕显示位置与实际位置的偏差在某个精度范围内, 钛合金压力容器声发射检测技术要求的定位精度一般为 5% 的传感器间距。这里需要指出的是, 声发射时差定位的准确度受到很多因素的影响, 尤其对于一些较大容器且内部或外部有影响声波传播的结构时, 我们可以将定位精度的要求放大到 10% 甚至 15% 的传感器间距, 定位精度的降低对数据的整体的分析没有重要影响。



图中 1、2、3、4 为声发射传感器
图 1 钛合金压力容器常用传感器布置示意

表 2 参数设置

检测参数	推荐量	备注
检测门槛	40dB	低温试验>50dB
PDT	1000 μ s	/
HDT	2000 μ s	/
HLT	50000 μ s	>20000
定位方式	二维定位, 四个通道均匀布置	低温试验为单通道区域定位
声速	3000m/s	视具体定位精度修改

3.3 检测

在检测开始后声发射检测人员的主要工作是观察屏幕图表显示, 详细记录检测过程中的所有信息。主要观察的图表有四个: (1) 定位图, 观察信号发生的位置及集中度情况; (2) 幅度时间历程图, 观察声发射信号随时间(载荷)的变化情况, 尤其是恒载声发射延续时间; (3) 振铃计数累计曲线, 分析声发射在检测过程中累计损伤情况; (4) 平均信号电平随时间的变化曲线, 判断容器是否发生泄漏。

在检测过程中若发现强噪声干扰或异常情况时应首先停止加载, 临时保压或降压, 以防止发生容器爆破从而损坏检测设备。

3.4 低温环境声发射检测

在 TA7ELI 钛合金气瓶的考核试验程序中除进行常温压力考核试验外还必须在液氮低温下进行气压考核试验。鉴于声发射传感器不能在液氮低温下工作, 因而声发射检测必须借助波导杆进行。检测时传感器耦合在波导杆上, 波导杆用物理的办法固定在气瓶上, 气瓶浸泡在液氮中进行充氮气加压。为避免液氮沸腾造成声发射平均信号电平值的升高影响声发射检测, 一般采用不小于 50dB 的检测门槛。鉴于信号通过波导杆进行传播, 要求波导杆对信号的衰减不超过 15dB。

以往的试验发现, 在低温试验时, 降低加载速率, 适当设置分级保压台阶, 注意观察声发射平均信号电平显示的变化, 有助于判断气瓶低压泄漏信号和其它危险性缺陷扩展信号的发生。

4 结果判断

判据一直是声发射检测技术中尚不成熟的部分。在许多同类构件判据中, 多采用简便的验收/拒收式判据, 包括: 恒载声发射、振铃计数率、事件计数、高幅度事件、活动性。这种判据主要指示缺陷的存在, 而多级分级判据, 则还可以指示缺陷的结构意义, 为后续处理提供更为具体的指南。根据气瓶批量检测的特点, 钛合金压力容器的评价判据选择了多级分级方案。判据以恒载声发射延续时间为主, 升压声发射活动性为辅的多级声源严重性分级判据。在数据分析时, 我们观察定位图可以发现声源的集中度或分布状况; 观察振铃计数活动性曲线可以判断声源的活动性; 观察幅度—时间关系图(点图)可以分析恒载声发射延续时间和高幅度事件计数。

4.1 TC4 钛合金容器

TC4 钛合金容器声发射严重性评价判据以恒载声发射延续时间为主, 参考高幅度事件计数、事件或振铃计数随压力的变化趋势将声发射严重性结果定为三个级别。以 TC4 钛合金气瓶为例, 其声发射严重性评价判据详见表 3。

在判断声发射严重性级别时要求: (1) I 级必需三项判据全部符合; II 级、III 级只要求单项符合。(2) 当每分钟幅度高于门槛的事件计数小于 3 时认为保压声发射收敛。(3) 声发射源严重性评定一般以声发射通道或声发射定位集中区为基础, 有效声源内事件计数一般不少于 5 个。

表3 TC4 钛合金气瓶声发射源分级判据

检测门槛 (dB)	严重性级别	保压声发射延续时间	高幅度事件计数	事件或振铃计数	严重程度	处理意见	
		Ti (min)	≥80dB	随压力变化			
40	I	<1	0	收敛或恒速增加	不严重	不需要验证	
		a	-	快速增加			
	II	b	≥1	-	-	较严重	可进行抽样验证
		c	≥3	-	-		
		III	≥8	-	-		

在检测实践中，多次爆破验证结果证实，声源的级别与破裂源处缺陷及破坏压力之间复合良好。例如 I 级气瓶，断口组织正常，均达到设计强度；III 级气瓶，均暴露出宏观亮带类缺陷或焊接缺陷，低于设计强度；II 级（尤其是 IIc 级）显示出过渡性特征。在批量生产检验中，通常以 III 级作为拒收基准，而在 II 级中选择声发射特性最严重的气瓶作为批次性抽爆验证件，为批次验收提供依据。在实际检测应用中，许多情况比较复杂，对声发射严重性级别判断时不仅要考虑表中的三个判据，还要结合升压声发射幅度及频度、噪声情况、气瓶的工艺状况、定位情况等进行综合考虑最终给出声发射严重性级别。例如有数据指出，在升压过程中出现定位集中的高幅度信号，而在保压过程中保压声发射延续时间很短，这种声发射特性与严重的偏析缺陷相关。

TC4 钛合金卫星贮箱由于在容器内部设计了适应在失重环境下确保燃料能够流出箱体的装置，因而箱体的组装结构和焊接方式与钛合金气瓶有很大不同。为了保证焊接时不损坏贮箱内部装置，在身部环焊缝部位设计了保护衬环，这样在焊接时由于衬环的遮挡使溶化的基材金属不至于飞溅到容器内部，但也正由于衬环的存在，使得焊接时融化的金属会在衬环与箱体间隙上发生飞溅焊液的凝固并使衬环与外壳发生粘连。这种粘连在此类结构焊缝上普遍存在，会受到具体焊接工艺的影响或加重或变轻。由于这种粘连呈独立的点状或不连续的条状存在，在压力试验过程中随着箱体变形的增加粘连部位会发生开裂，从而产生大量的声发射信号。因而在卫星贮箱声发射检测中声发射信号十分丰富，这时若按照表 3 的判据划分严重性就不合适了，考虑到局部粘连不会对贮箱结构完整性和安全产生影响，因而在卫星贮箱声源严重性评价时仍可套用表 3 判据结构，但在具体判据数值掌握上应宽于 TC4 钛合金气瓶的判据。

4.2 TA7ELI 钛合金气瓶

TA7ELI 钛合金气瓶又称低温气瓶，其使用环境为液氢。TA7ELI 钛合金材料在液氢温度下的力学性能与常温下比较，弹性模量提高约 15GPa；强度几乎提高一倍，但断裂韧性几乎不减少，因而成为低温环境使用的理想的气瓶原材料。TA7ELI 钛合金气瓶是我国 CZ-3 系列运载火箭三子级液氢液氧推进系统用来贮存增压气体的高压容器，其使用时浸泡在液氢介质中，具有使用环境恶劣、工作压力高等特点。

由于成分偏析引起的材料局部形成脆性金属间化合物是 TA7ELI 钛合金气瓶的典型缺陷之一。该种缺陷由于脆性大强度高而在声发射特性上表现为信号幅度大，持续时间短等特点，即从裂纹萌生到裂纹穿过整个脆性相的时间很短。这类缺陷的危害性与缺陷的大小、分布位置及在壁厚方向的尺寸有很大关系，一般而言，这类缺陷的尺寸越大，尤其在壁厚方向所占的比例越大且该处的应力越集中其危害性也就越大。在 TA7ELI 钛合金气瓶的压力考核试验中，受到外力激励的作用，这类缺陷就会产生活动并释放出声发射应力波，因而声发射活性和强度与这类缺陷的危害性大小直接相关，也就是说，缺陷的危害性越大则声发射活动的越厉害，信号强度越高。

TA7ELI 钛合金气瓶的压力考核分为常温和低温两个步骤进行，常温考核压力约 19MPa，低温考核压力约 31MPa。常温液压考核时，气瓶声发射的主要来源为材料的大量滑移变形和少量的孪晶变形、脆性金属间化合物开裂以及气瓶焊接应力的释放和焊接缺陷的活动。材料的滑移变形机制产生的声发射信号强度要小于孪晶变形机制，因而在常温声发射试验时声发射信号的幅度一般不超过 70dB，且信号

数量很少。依据声发射随压力变化的活性、强度及恒载声发射持续时间将声发射严重性级别分为三级。

当 TA7ELI 钛合金气瓶置于液氮低温下进行气压考核时, 由于材料的环境温度降低, 使得材料的强度大大提高, 而韧性有所下降。这时声发射的主要来源为材料的孪晶变形、脆性金属间化合物开裂即其它缺陷的扩展等等。由于孪晶变形的声发射信号强度很高, 且脆性金属间化合物在低温下强度也大大提升, 因而其产生的声发射信号强度也大大增加, 使得在低温下气瓶的声发射信号幅度大大增加, 大于 70dB 的信号可占到所有信号的三分之二以上。由于在低温试验的升压过程中气瓶在压力作用下不断变形, 因而在大量的孪晶变形信号和其它无结构意义的信号影响下无法分辨脆性金属间化合物及气孔、夹杂、微裂纹开裂的信号, 因而声发射检测技术不可能在升压过程及时发现并发出危险预警。而在考核压力下的保压过程中, 干扰信号大大降低, 使得危险性缺陷的活动容易鉴别, 因而在保压过程中可以及时发现危险性缺陷并作出预警, 因此 TA7ELI 钛合金气瓶低温试验的声发射严重性判据以保压过程的声发射信号特征为主要依据, 将结果分为四级

检测实践发现, TA7ELI 钛合金气瓶常温和低温声发射严重性结果没有对应关系。这是由于 TA7ELI 钛合金气瓶材料在常温和液氮低温下材料力学性能及应力状态的巨大改变以及微观变形机制的不同造成的。鉴于此, 该类气瓶的常温试验不能替代低温试验, 但可为低温考核进行初步的筛选, 以降低低温试验的危险性。

5 结语

经过近 30 年研究和检测应用, 钛合金压力容器的声发射检测技术正日臻成熟, 已经进入了标准化检测阶段, 并获得了良好的经济社会效益。鉴于声发射检测结果判定判据的不足, 如何在今后的检测实践中不断积累数据进一步补充完善钛合金压力容器声发射评价判据成为声发射技术研究的主要方向。

参考文献

- [1] GJB2044-94, 钛合金压力容器声发射检测方法, 国家军用标准, 1994。
- [2] GJB XXXX, 《声发射检验》, 国家军用标准。
- [3] 杨明纬、刘哲军、马云中编 《声发射检测》机械工业出版社 2005. 1。
- [4] 刘哲军, 金周庚, 卫星用钛合金贮箱声发射检测噪声源机制研究, 第八届全国无损检测大会暨国际无损检测技术研讨会论文集, 2003 年。
- [5] 刘哲军, 声发射技术在航天工业中的应用, 第十届全国声发射会议论文集, 大庆, 2004. 8, p28。
- [6] Jin Zhou Geng et al, Inspection of TC4 High Pressure Vessels by Acoustic Emission Technique, Tenth World Conference on Non-Destructive Testing, Vol4, Moscow, 1982, P208。

ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUE FOR TITANIUM ALLOYS PRESSURE VESSELS

Liu Zhejun Wu Song Cheng Chayuan

(Aerospace Research Institute of Material and Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract: For one success applied example to produce and testing for acoustic emission, this paper introduces the present condition and research situation in the days to come of acoustic emission technology in the theory and test program and result assessing for titanium alloys pressure vessels testing.

Keywords: Titanium alloys pressure vessels, Acoustic emission, Testing

钛合金压力容器声发射检测技术

作者: [刘哲军](#), [伍颂](#), [程茶园](#)
作者单位: [航天材料及工艺研究所, 北京, 100076](#)

相似文献(1条)

1. 学位论文 [李银文](#) 钛合金气瓶和岩石声发射信号特征研究 2005

近年来,许多学者对钛合金压力容器和岩石方面进行了广泛的声发射技术研究,但它们是一种依赖于材料性质,外部条件的一种复杂变形体,因此不同的钛合金压力容器、岩石的声发射特征也不同,深入了解它们的声发射特性是非常有必要的。

本论文通过采用目前比较先进的由美国PAC公司最新开发的PCI-2声发射信号采集系统,分别对大量的钛合金气瓶的水压试验时产生的声发射信号进行实时采集,对采集到的声发射信号进行了统计分析和研究,得到了钛合金气瓶水压试验产生声发射信号的部分特征,又对岩石单轴压缩试验破坏全过程进行了声发射信号实时采集,对采集到的声发射信号进行了分析和研究,得到了岩石单轴试验产生声发射信号的部分特征。另外钛合金气瓶进行水压爆破时,也使用声发射系统采集了声发射信号,论文对钛合金气瓶水压爆破产生声发射信号的参数与过程和岩石单轴压缩试验参数与过程作了比较分析。

本文通过对钛合金气瓶水压试验以及岩石单轴压缩试验声发射测试数据的采集,对各种声发射信号参数进行了研究,所得成果将对声发射技术在完善钛合金气瓶的检验标准规范、岩土工程安全预报方面具有重大意义,同时试验结果为今后在这些方面的研究提供了宝贵的经验和数据。

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Conference_6311475.aspx

下载时间: 2010年6月22日