

复合材料气瓶声发射检测初步研究

刘哲军 葛丽 王俊峰 伍颂 林松

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 通过对十个碳纤维复合材料气瓶的声发射检测试验研究,初步探索了平面定位技术、费利西蒂比对复合材料气瓶工艺质量和损伤严重性评价的可行性,同时还摸索了复合材料气瓶压力循环疲劳过程的声发射特性。研究认为:声发射作为复合材料气瓶工艺质量和损伤严重性评价方法是可行的,平面定位结果和疲劳试验结果对气瓶质量评价有一定的辅助作用,声发射费利西蒂比值越高则气瓶损伤严重性越低。

关键词 复合材料,气瓶,声发射

Acoustic Emission Testing of Composite Pressure Vessels

Liu Zhejun Ge Li Wang Junfeng Wu Song Lin Song

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract Ten C/E composite pressure vessels were testing by acoustic emission technique to research the Feasibility of evaluating the craft quality and damage seriousness by Δt -location and the Felicity ration. In addition, the fatigue test of the C/E composite pressure vessels were examined by the acoustic emission technique. The results show that the acoustic emission technique is feasible to evaluating the composite pressure vessel and Δt -location and fatigue test are the assistant function for evaluation. Damage of the vessel is more serious as the Felicity ratio is bigger.

Key words Composite, Pressure vessels, Acoustic emission

0 引言

复合材料气瓶(以下简称气瓶)是通过在金属或非金属内胆上缠绕浸渍过的高强度纤维制造而成,具有质量轻、强度高、抗疲劳性能好等优点,目前逐步在航空航天、船舶等军工领域展开应用研究。受到复合材料制造工艺复杂、干扰因素较多等影响,如何保证气瓶的质量稳定性和强度一致性成为气瓶工艺摸索和检测研究的难点。为了验证气瓶的设计压力并保证后续使用的安全,需要对气瓶进行逐一液压强度筛选试验,但单纯的过载强度试验并不能保证气瓶后续的使用安全,如何利用无损检测技术对气瓶进行评价成为气瓶研制阶段的主要检测问题之一。

声发射作为动态无损检测技术在压力容器液压验收试验和在役运行监测中有着广泛而重要的应用。在航天工业中,声发射检测技术已经成功应用于钛合金压力容器的批量验收检测中,利用声发射检测技术可以发现对容器有害的活动性缺陷,并可进行定位和严重性级别评估,从而实现了对容器完整性和安全系数的评定^[1]。

国外以美国为代表,主要开展了玻璃纤维、芳纶纤维等增强复合材料压力容器的声发射检测研究^[2]。在美国材料实验协会的推动下,相继制定了复合材料压力容器与储罐、管道的声发射检测方法,并纳入了

ASTM 标准^[3]。该标准规范了复合材料压力容器声发射检测的一般程序,并且提出了几个判断损伤严重性时应注意的声发射参数:信号幅度、费利西蒂比和恒载声发射延续时间等,但并没有给出评价判据。国内,开展了复合材料压力容器的声发射试验研究,文献[4-8]中报道了取得与国外研究相似的结论,尽管如何利用声发射特征来表征容器损伤严重性的关系不尽相同,但都认为声发射作为复合材料压力容器的动态评价手段是可行的,尤其是费利西蒂比显示出比其他参数更突出的表征作用。本文对不同工艺状态的十个碳纤维缠绕复合材料气瓶的液压强度和疲劳试验进行声发射检测跟踪,并根据气瓶不同压力下的升压和保压及疲劳过程的声发射信息进行分析。

1 检测装置

检测仪器为美国 PAC 公司 DiSP32 通道检测系统,试验采用 R15 型(共振频率 150 kHz)传感器,前放增益为 40 dB。气瓶的外形为圆封头柱形,两端分布有管口。气瓶的体积约为 56 L,内衬材料为铝合金,纤维为 T700 碳纤维。气瓶的传感器布置共采用 8 个传感器,其中 7#和 8#传感器分别布置在上下管口处,1#、2#、3#号传感器均匀布置在气瓶上过渡段处,4#、5#、6#号传感器均匀布置在气瓶下过渡段处,但与

1[#]-3[#]传感器相错开(图1)。相邻传感器最大间距为460 mm,传感器间距上的最大衰减约32 dB。

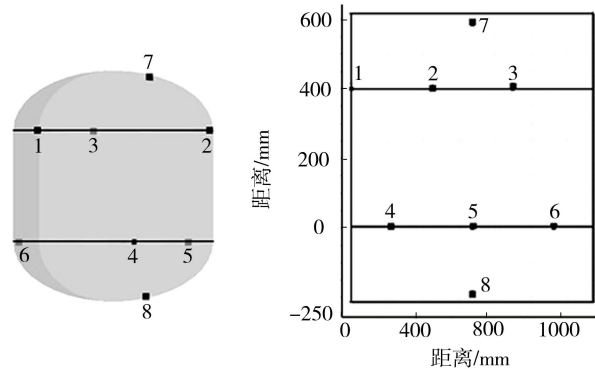


图1 源定位布置
Fig.1 Source location

2 加压程序

气瓶压力验证试验的加压程序见图2,部分气瓶进行了两次44 MPa 试验。图中各保压台阶的保压时间为5 min。正式加压之前还进行了最大压力5 MPa的多次预压。压力循环疲劳试验的最高压力为36 MPa,循环周次为100次。

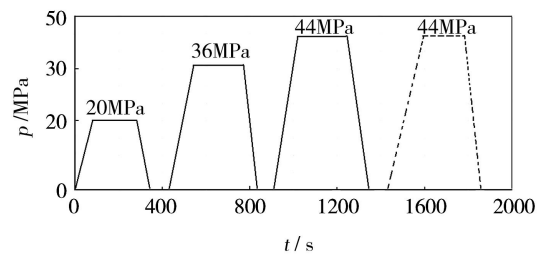


图2 压力验证试验加压程序
Fig.2 Pressure verification procedure

3 结果与分析

3.1 时差定位

复合材料的时差定位一直局限于线性定位,这主要是由于复合材料结构中由于纤维铺层方向不同,造成声发射波的传播速度存在各向异性,从而使平面时差定位的不确定度大大上升。在气瓶上进行声速测量的结果见表1。

表1 气瓶不同位置声速测量结果

Tab.1 Velocity of sound measured on vessel of different position

位置	间距 /mm	平均时差 /μs	声速 /km·s ⁻¹
气瓶直段沿气瓶长度方向	400	65	6.154
气瓶过渡段,沿圆弧方向	470	81	5.802
气瓶整个长度方向	900	135	6.667
平均	590	93.67	6.208

由于复合材料的各向异性,在气瓶表面的不同方向进行声速测量,声速最大偏差约800 m/s,平均声速约6.2 km/s。考虑到声速测量的各种误差以及声发射检测技术中设置声速应小于测量声速的原则,在后期数据分析时选取6 km/s 做为柱形时差定位阵列的计算声速。图3 为在该计算声速下进行定位校准

的结果,校准结果显示定位偏差最大为8%最大传感器间距,小于时差定位技术许可的10%最大传感器间距的偏差,这表明在复合气瓶上进行平面时差定位具有一定的可行性。

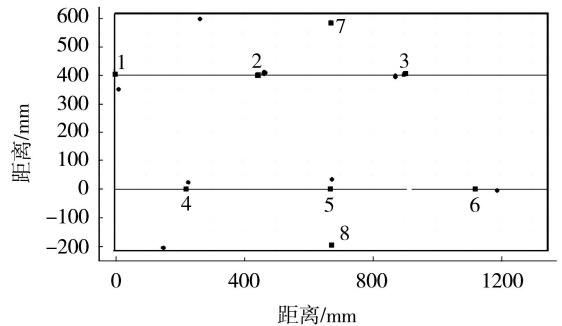
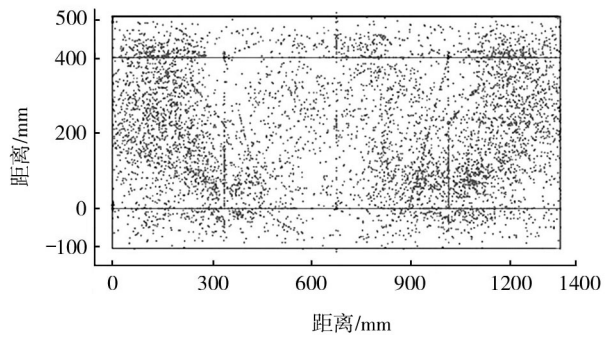


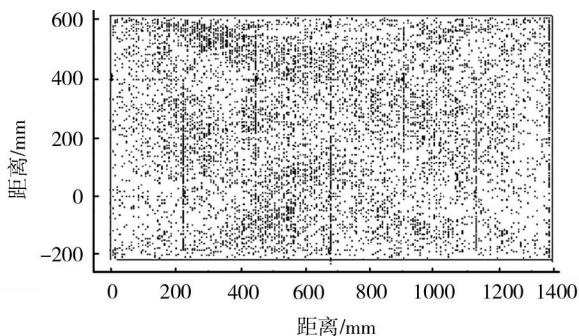
图3 气瓶校准定位结果
Fig.3 Verification location results for vessel

尽管定位校准偏差在可允许范围内,但考虑到影响定位准确性的因素很多,尤其对于复合材料结构,在加压过程中信号数量巨大、幅度很高,这会导致定位阵列将来自不同源的信号鉴别为同一个源的几率大大上升,因而复合气瓶平面定位的实际准确性会远小于定位校准。尽管如此,若是气瓶因局部强度降低造成的局部信号集中依然能在平面定位图上得到较为明显的显示。另外,加压初期和泄压过程由于信号数量较少,定位结果可以准确验证初始声发射源位置和严重损伤部位。

对于复合材料气瓶损伤严重性的分析,声发射定位信息的作用主要在于观察定位集中度,从而获取气瓶严重损伤的部位或区域等信息。采用柱形时差定位阵列后,通过观察定位信号分布的均匀性还可进一步推断出气瓶整体工艺质量的均匀性。信号分布越均匀则气瓶整体工艺和应力释放也越均匀。从十个气瓶定位结果来看,声发射在气瓶圆弧与直段的过渡处都表现出相对集中,分析认为这与气瓶结构和受力状态有关。本次试验的十个气瓶工艺状态不完全一致,但从定位结果来看,当工艺条件变化越来越小并趋于稳定时,声发射信号定位分布的均匀性也越来越高(图4)。



(a) 2[#]气瓶



(b) 8#气瓶

图4 气瓶的平面定位显示

Fig.4 Source location for vessel

在复合材料检测中,时差定位阵列得到的声发射事件数远小于区域定位阵列,其数量只有区域定位阵列的三分之一到八分之一不等。数据量的减少大大缩减了数据分析的工作量,有利于提高检测效率。另外时差定位所得的声发射事件不仅包含了声发射源的位置信息而且还包含了组成该事件的其他通道的相关信息,这是区域定位技术所不具备的,这些信息对于损伤严重性的判断具有不可忽视的作用。

3.2 费利西蒂比

费利西蒂比是指在相同检测灵敏度下,二次加压出现“明显声发射”时的压力与先前所加最高压力之比。费利西蒂比值越大,说明二次加压声发射起始压力越高,先前的加压过程对被检件造成的损伤越轻。对于复合材料构件而言,费利西蒂比值不小于0.95,是传统认为结构没有受到严重损伤的重要依据之一。文献[2-8]显示,如何确定二次加压过程出现“明显声发射”并没有统一的标准。在本文中,选取“声发射事件率不小于3~5个/s”作为“明显声发射”的表征。

气瓶在安装完成后,首先进行5 MPa的多次预压以进行排气和检漏,随后进入正式加压程序。表2列出了十个气瓶分别对应20、36、44 MPa下的费利西蒂比值 F_{20} 、 F_{36} 、 F_{44} 的统计计算结果。

表2 十个气瓶各压力下的费利西蒂比与爆破压力

Tab.2 Felicity ratio and burst pressure of ten vessels

气瓶编号	F_{20}	F_{36}	F_{44}	爆破压力/MPa
1#	0.75	0.87	0.83	62(小于设计压力)
2#	1.0	0.89	-	84
3#	1.0	0.91	-	88
4#	1.0	0.92	-	90
5#	1.0	0.92	-	88
6#	0.95	0.94	0.93	84
7#	1.0	0.93	0.91	78
8#	1.0	0.93	0.91	-
9#	1.0	0.96	0.95	-
10#	0.95	0.96	0.95	76

从表2可以看出,除1#气瓶外其余各气瓶的费利西蒂比值都具有 $F_{20} > F_{36}$ 或 $F_{20} > F_{36} > F_{44}$ 的关系,这与试验

压力增加使得气瓶制造应力的进一步充分释放以及气瓶复合层弱界面、弱纤维的损伤断裂扩展等声发射机制的活跃活动等传统认识是一致的。1#气瓶的费利西蒂比则呈现 $F_{36} > F_{44} > F_{20}$ 的关系,且 F_{20} 值远小于0.95。

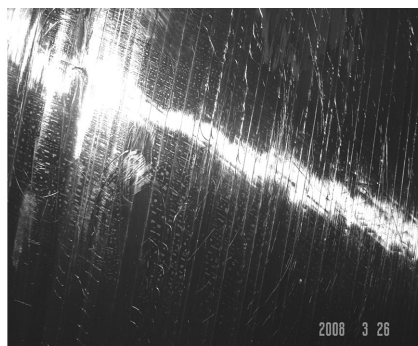


图5 压力试验后的气瓶表面横纹

Fig.5 Surface of vessel after pressure experiment

1#气瓶为首件产品,在缠绕工艺上主要存在树脂偏少、纤维束收尾不好、外形不光洁等问题。在试验过程中,在较低压力下(大约7 MPa)开始大量出现声发射活动,声发射起始压力较其他气瓶小3 MPa左右。观察幅度和持续时间等声发射参数发现,这个阶段的声发射事件的幅度主要集中在85 dB以下、持续时间集中在2~7 ms。参照碳纤维复合材料的声发射特性数据[4]分析认为,在此压力下气瓶所受的损伤主要来自基材和弱界面。当20 MPa加载结束后,肉眼观察气瓶表面,在纤维束间发现了大量的横纹(基材开裂)和纤维表层的在气瓶直段的局部脱开(图5)。这些缺陷主要集中在气瓶直段和过渡处,而在圆球部分和管嘴附近没有发现类似缺陷。经过20 MPa加压后,气瓶复合材料加强层的应力集中得到较为充分的释放,虽然在复合材料层间出现了大量的分层缺陷和基材开裂裂纹,但这些缺陷显然对后续的加压影响有限,甚至使气瓶使用压力下的声发射活动得到了一定程度的改善,1#气瓶的 $F_{36} > F_{44}$ 就说明了这点。但这点改善并不违背气瓶压力越高损伤越严重的规律,仅从侧面说明,在复合材料中缺陷对材料强度的影响远比金属材料复杂,适当存在的缺陷可能对改善应力集中以及提高应力分布的均匀性有所帮助,而对强度几乎没有影响。

2#-10#气瓶在各压力下的费利西蒂比值均高于1#气瓶,并且都不小于0.89,从最终爆破压力来看,除8#、9#气瓶未进行爆破试验外,其余七个气瓶的爆破压力值均大于气瓶的设计压力。对比2#和3#气瓶,其工艺状态完全一致,3#气瓶的 F_{36} 值略大于2#气瓶的 F_{36} 值,而爆破结果也呈现出相同的规律。

4#-6#气瓶的工艺状态不尽相同,随着产品编号的增加气瓶的增强层和内胆逐渐变薄,但从声发射 F 值上看,有增高的趋势,但爆破压力在逐渐降低。这说明增强层和内胆厚度的减薄是直接造成气瓶爆破

压力下降的原因,而不同工艺状态下费利西蒂比值之间的比较对预测气瓶的强度或爆破压力没有任何意义。这就是6#气瓶的 F_{36} 值大于4#和5#气瓶的 F_{36} 值,但爆破压力却小的原因。

观察1#-7#及10#气瓶的 F 值发现,除1#气瓶外,其余各气瓶的 F_{20} 值均不小于0.95。对比爆破压力结果,发现除1#气瓶外其余七个气瓶爆破压力均超过了设计压力。分析认为: F_{20} 值若远小于0.95,则可能预示该气瓶的工艺质量有较严重的问题,并可能影响到爆破强度合格与否。例如,10#气瓶在缠绕工艺上进行了包括树脂类型、缠绕设备、纤维层数等三项工艺参数的改变,观察产品外观发现在上半球存在明显凸起的纤维束棱和树脂局部堆积等问题。实验时,发现在首次20 MPa的升压和保压过程中出现了比其他气瓶严重的声发射,且伴有人耳可听的爆裂响声。卸压后目视观察发现在气瓶上半球和过度段处存在大量的基材开裂和明显的沿纤维束间的开裂,裂纹数量和严重程度甚至比经过44 MPa压力考核的气瓶还严重。计算10#气瓶对应的 F_{20} 值为0.95,但随后的36和44 MPa的继续升压和保压试验则没有出现更严重的声发射现象,其 F_{36} 值和 F_{44} 值均大于0.95,爆破压力也远大于设计压力。

从表2可以看出, F_{36} 值和 F_{44} 值都表现出对气瓶爆破强度合格与否进行预测的可能性,但确定 F_{36} 值和 F_{44} 值与气瓶损伤严重性程度的具体关系,还需要多个气瓶的爆破数据来支持。

3.3 压力循环疲劳过程声发射

1#、3#-7#、10#等七个气瓶均进行了100次最大压力36 MPa的压力循环疲劳试验,该试验是在44 MPa的压力验证试验之后进行的。试验对其中六个气瓶的疲劳过程进行了全部或部分周次的跟踪,各气瓶声发射统计见表3。观察疲劳试验声发射起始压力,发现在疲劳试验过程中,除1#气瓶在前几个循环的声发射起始压力低于36 MPa外,其余压力循环和其余气瓶都是在刚达到36 MPa或是在36 MPa保压过程中才开始出现声发射,而且声发射事件出现的频率很低。

表3 六个气瓶的疲劳过程声发射统计

Tab.3 AE data of six vessels in fatigue test

气瓶	信号位置	备注
1#	直段部分	信号较多,全过程均有
3#	上半球过渡段	信号在疲劳后期明显减少
4#	上半球较多	疲劳后期没有信号
5#	管口附近	-
6#	管口附近	信号很少
7#	管口附近	几乎没有信号

从信号数量上看,各气瓶的声发射均呈现为随疲劳次数的增加而逐渐收敛甚至消失的趋势。疲劳信号最多的两个气瓶分别是1#和3#,其余气瓶的声发射信号很

少。由于疲劳压力由人眼观察压力表进行控制,因而各循环压力不尽相同,基本在(36±1) MPa范围内。若排除这种因素,有的气瓶(如7#)在整个疲劳过程中几乎没有声发射信号出现。分析认为,疲劳过程的声发射数量间接反映了气瓶的损伤严重程度,疲劳声发射越严重,气瓶的剩余强度越低,损伤严重性程度越高。分析疲劳信号的定位还发现,气瓶疲劳过程的声发射信号主要定位在管口、半球及与直段过渡段附近,少量定位在气瓶直段。这说明气瓶在压力循环疲劳过程中的声发射主要与已有损伤的界面摩擦及管口摩擦机制相关,新生损伤对疲劳过程声发射的贡献微乎其微。2#和3#气瓶的工艺状态一致,虽然2#气瓶未进行疲劳试验,但两者的爆破强度基本一致。这说明一定压力下的压力循环疲劳试验对气瓶的最终爆破强度影响不大。

4 结论

(1)在气瓶压力考核试验中合理设置加压程序和检测设置,借助声发射检测技术实现气瓶工艺质量评价和声发射损伤严重性评估是可行的。

(2)借助声发射平面时差定位技术,一方面可以通过声发射定位集中区域发现气瓶工艺均匀性或区域性性能差异等质量问题,另一方面还可大大减少数据分析的工作量,有利于提高检测效率。

(3)针对本研究中的十个气瓶,若 F_{20} 值远小于0.95,则预示着气瓶工艺质量存在较为严重的问题,气瓶爆破强度可能不合格。较高压力(大于或等于工作压力)下的费利西蒂与气瓶损伤严重程度有更高的相关性, F_{44} 值与气瓶爆破强度的相关性大于 F_{36} 值。

(4)复合材料气瓶具有良好的抗疲劳性能,在使用压力下的疲劳过程中,无论气瓶的爆破强度能否合格,六个气瓶的疲劳声发射均呈现收敛趋势。疲劳声发射起始压力越小,声发射事件数越多,则预示该气瓶声发射损伤越严重。

参考文献

[1] 刘哲军,葛丽,伍颂,等.小型钛合金压力容器的声发射评价[J].宇航材料工艺,2009,39(2):21
 [2] Moore P O. Nondestructive testing handbook[M]. third edition. American: American Society for Nondestructive Testing,2001:271
 [3] ASTM. Standard practice for acoustic emission examination of fiberglass reinforced plastic resin (FRP) tanks/vessels. An American Standard, E1067-01, 2001: 6
 [4] 金周庚,潘向华,朱成,等.碳/氧复合材料破坏过程声发射表征[C]//第五届全国声发射会议论文集,张家界:1993:47
 [5] 刘哲军,朱军辉,程茶园.声发射技术在我国航天工业中的应用进展[C]//第十届全国声发射会议论文集,大庆:2004:28
 [6] 马云中,杨明为,蒋智琼,等.大型复合材料容器异常性的声发射评估[C]//第七届全国声发射会议论文集,上海:2001:104
 [7] 傅明远,等.玻璃钢球形压力容器的声发射检验[C]//第三届全国声发射会议论文集,长春:1986:F-11
 [8] 候继东,等.复合材料高压容器水压及爆破试验声发射检测研究[C]//第六届全国声发射会议论文集,峨眉山:1995:238

(编辑 李洪泉)