

复合材料气瓶铝内衬缺陷对疲劳及爆破性能的影响

林松^{1,2} 罗明² 王俊锋² 孙红卫² 杨小平¹

(1 北京化工大学有机无机复合材料国家重点实验室,北京 100029)

(2 航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 研究了复合材料气瓶在生产过程中金属内衬存在的凹坑、裂纹以及腐蚀等的缺陷类型,并且对存有以上缺陷类型的复合气瓶进行疲劳及爆破实验,研究其对气瓶的性能影响。结果表明:金属内衬缺陷的存在会使得气瓶在承受内压载荷的过程中,金属内衬在缺陷位置出现应力集中,提前出现裂纹的扩展,使得金属内衬失效,无法充分发挥复合材料层高强度的优势,使得复合材料气瓶的疲劳失效次数及爆破强度大大降低,影响最终的使用性能。

关键词 纤维缠绕,复合材料气瓶,疲劳,缺陷

Effect of Aluminum Liner Vice to Fatigue and Burst Characteristics of Composite Pressure Vessels

Lin Song^{1,2} Luo Ming² Wang Junfeng² Sun Hongwei² Yang Xiaoping¹

(1 Key Laboratory of Carbon Fiber and Functional Polymers, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029)

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

Abstract This paper was aimed at the investigation of effect of the aluminum liner vices to the fatigue and burst characteristics of the filament winding composite pressure vessels. These vices included hollowness, corrosion and cracks on the metal liner. The results shown that the vices existed on the metal liner could lead to stress concentration, which brought on cracks spreading along these vices. So the invalidation of the metal liner was advance of the composite. All of those could stimulate more damages to the vessels, which lead to degrade final burst pressure and fatigue cycling. These vices hereby gave rise to a great effect on final properties of the composite pressure vessels.

Key words Filament winding, Composite pressure vessel, Fatigue cycling, Vice

0 引言

纤维缠绕复合材料气瓶由于其具有质量轻、爆破压力较高、“泄露先于爆破”的高可靠性,且容器特征系数较高等优点,在航空航天领域应用较多^[1-4]。研究表明采用薄壁金属内衬可以最大限度的减轻复合材料气瓶的质量,提高其结构效率^[5-6]。

试验表明,气瓶疲劳寿命设计的关键在于其金属内衬^[7]。在实际使用过程中金属内衬承受的为低周疲劳,而金属内衬在制备过程中或多或少存在凹坑、裂纹等缺陷,在承受载荷的过程中,缺陷位置容易造成应力集中,导致金属内衬提前失效,从而无法充分发挥外层纤维缠绕层高强度的特性,影响最终的使用

性能^[8]。特别是对于薄壁金属内衬复合材料气瓶,其疲劳及爆破性能对金属内衬的缺陷存在更加敏感。本文主要开展研究金属内衬的缺陷对气瓶的疲劳以及爆破性能的影响。

1 实验

1.1 材料和设备

TDE-85 环氧树脂,天津津东化工厂;环氧树脂稀释剂、胺类固化剂,自制;T700 碳纤维,12 K,日本东丽公司。

水压试验工装(自制);4轴联动缠绕机(江南机器);高倍电子显微镜(ZEISS EVO 60,美国)。

1.2 复合材料气瓶制备

收稿日期:2013-03-15;修回日期:2013-06-06

作者简介:林松,1983年出生,工程师,主要从事结构复合材料成型工艺研究。E-mail:linsong28@126.com

T700 碳纤维在张力作用下浸渍树脂,采用数控缠绕机在金属内衬表面缠绕成型复合材料气瓶,缠绕完成后筒身段复合材料层厚度为 10 mm,采用螺旋向与环向交替缠绕成型,再采用烘箱旋转固化成型。共成型 10 个气瓶,编号为 1# ~ 10#。本文金属内衬有 56 与 130 L 两种规格,均采用 6061-T6 铝合金板材冲压后,两端旋压成型,筒身段直径均为 402.6 mm。56 L 气瓶金属内衬的筒身段壁厚为 1.4 mm,长为 668 mm,130 L 气瓶的筒身段壁厚为 2 mm,长为 1.2 m。

1.3 试验方法

采用扫描电镜观察漏水区域金属内衬的表面形貌。

对复合材料气瓶进行 0 ~ 35 MPa ~ 0 的水压疲劳失效试验,研究气瓶的疲劳性能,升压速率为 10 MPa/min;以及进行水压爆破试验:升压速率为 10 MPa/min,研究复合材料气瓶的爆破强度。

2 结果与讨论

2.1 复合材料气瓶的疲劳及爆破性能

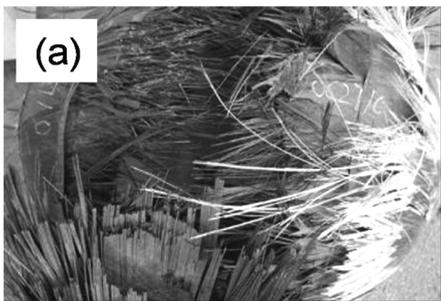
从表 1 可看出,56 L 复合材料气瓶的平均爆破压强为 88 MPa,平均疲劳失效次数为 863 次,容器特征系数为 39.4 km。130 L 气瓶的平均爆破压强为 87 MPa,疲劳次数为 692 次,容器特征系数为 37.5 km,56 以及 130 L 气瓶均具有较高的结构效率,并且在 35 MPa 的压力下具有较好的疲劳性能。

表 1 56 与 130 L 复合材料气瓶性能

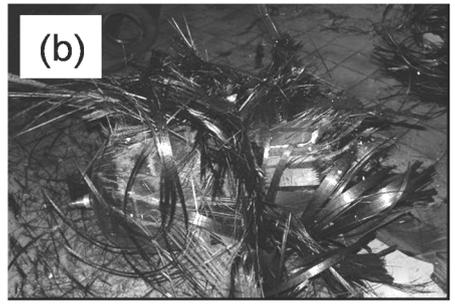
Tab.1 Mechanical properties of the composite pressure vessels in 56 and 130 L registered capacity

气瓶容积/L	疲劳次数/次 (0 ~ 35 MPa ~ 0)	平均爆破压力/MPa
56	863	88
130	692	87

复合材料气瓶的爆破模式如图 1 所示,两种规格气瓶的爆破模式具有较好的一致性,均为筒身段靠近气瓶肩部沿环向破坏,在筒身段沿着纵向破坏,内胆撕裂,爆破碎片较多,冲击能量较大。



(a) 56 L



(b) 130 L

图 1 复合材料气瓶的爆破模式

Fig.1 Blast form of the composite pressure vessels

2.2 金属内衬凹坑缺陷对疲劳性能的影响

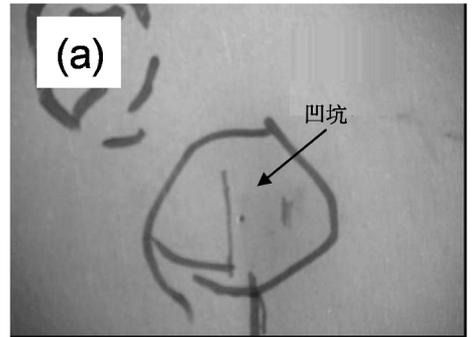
金属内衬由板材冲压成胚管后采用旋压成型,在板材冲压以及运输过程中容易由于夹杂颗粒等缺陷导致金属内衬易于出现凹坑等缺陷。气瓶在承受内压过程中使得在凹坑处出现应力集中,导致金属内衬提前失效。从表 2 可以看出,56 L 复合材料气瓶的疲劳次数仅为 210 次,比正常气瓶的下降约 76%,失效方式为水压试验过程中气瓶漏水。

表 2 金属内衬凹坑缺陷复合材料气瓶疲劳性能

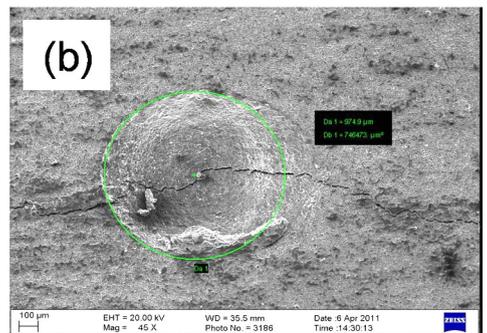
Tab.2 Fatigue property of the composite pressure vessels exited hollowness lacuna in the metal liner

气瓶容积/L	疲劳试验压力/MPa	疲劳次数/次	现象
56	0 ~ 35 ~ 0	210	凹坑缺陷

对漏水区域进行解剖(图 2)。



(a) 照片



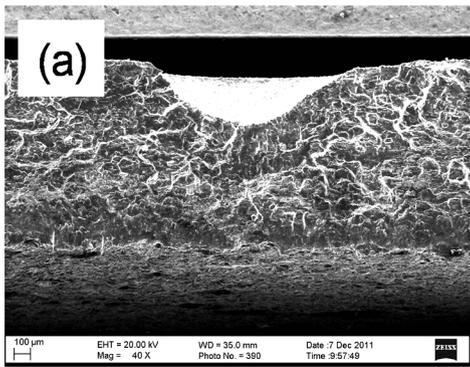
(b) 电镜观察

图 2 金属内衬内表面凹坑形貌

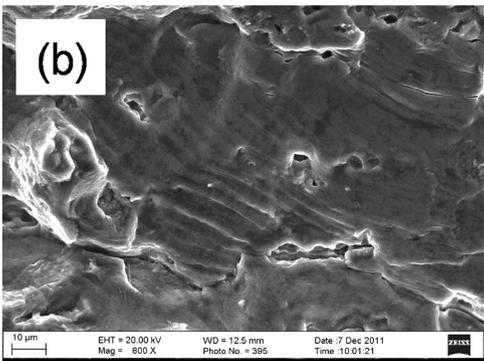
Fig.2 Observation of hollowness lacuna in metal liner

在金属内衬内表面位置发现一个凹坑缺陷。并且对其进行电镜观察,从图 2(a)可以发现一个明显的凹坑,并且从图 2(b)发现具有一条贯穿凹坑的裂纹存在。经测量凹坑的直径为 0.98 mm,左右两侧裂纹大致对称,裂纹长度约为 7.47 mm。

为了进一步研究裂纹内部情况,采用机械方法沿着裂纹方向将裂纹掰开,采用扫描电镜观察其断面[图 3(a)]。凹坑的裂纹扩展呈现散射状趋势,凹坑为裂纹的起始源区,并且断面较为粗糙,存在较多的韧窝。从图 3(b)可以看出断面呈现明显的片状裂纹扩展的趋势,符合金属疲劳失效的一般形式。这主要是由于复合材料气瓶在承受内压过程中凹坑位置容易造成应力集中,导致其开始作为裂纹扩展源,以凹坑为中心向四周扩展,导致金属内衬在疲劳过程中逐渐失效,从而使得复合材料气瓶在工作压力下的疲劳次数较正常的气瓶低。金属内衬凹坑缺陷的存在对复合材料气瓶疲劳性能的影响较大。



(a) 断面全貌



(b) 局部放大

图 3 金属内衬凹坑断面形貌

Fig. 3 Observation of the section of the hollowness lacuna

2.3 金属内衬裂纹缺陷对疲劳性能的影响

金属内衬在冲压以及旋压成型过程中易于出现裂纹等缺陷,其对复合材料气瓶的性能影响也较大。如表 3 所示存在裂纹缺陷的 130 L 气瓶在工作压力下的疲劳次数仅为 132 次,明显低于 692 次正常的范围,与平均疲劳性能相比,降低约 81%。与凹坑缺陷的复合材料气瓶的失效方式相似,主要表现为在水压

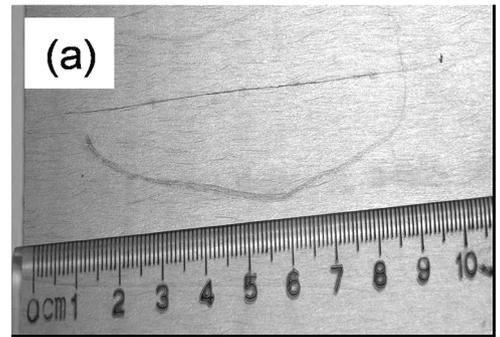
试验下气瓶漏水,复合材料层无出现明显异常。

表 3 金属内衬裂纹缺陷复合材料气瓶疲劳失效

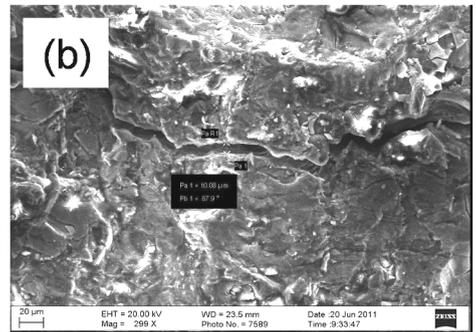
Tab. 3 Fatigue property of the composite pressure vessels exited hollowness lacuna in the metal liner

气瓶容积/L	疲劳试验压力/MPa	疲劳次数/次	现象
130	0 ~ 35 ~ 0	132	裂纹缺陷

采用解剖的方法对异常区域进行检查(图 4)。从图中可以看出金属内衬有微小裂缝,裂纹较为平直,长约 100 mm。从图 4(b)可以看出裂纹的最大宽度约为 0.15 mm。



(a) 表面裂纹照片

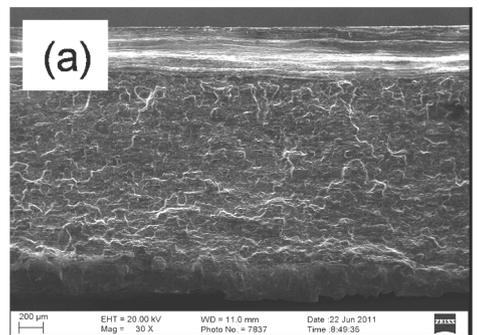


(b) 表面裂纹电镜照片

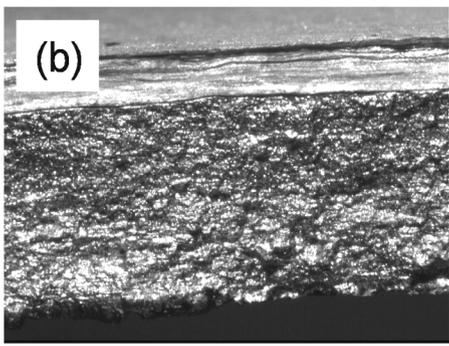
图 4 金属内衬内侧裂纹形貌观察

Fig. 4 Observation of the cracks in the metal liner

对裂纹位置进行机械解剖试验,观察其断面形貌(图 5),可以看出在断面的上端,断口较为平整,应该为裂纹扩展的源区,深度约为 0.2 mm,为金属内衬在生产制造过程中产生的缺陷。而下端断面较为粗糙,并且存在韧窝,应该为裂纹的扩展区。



(a) 微观

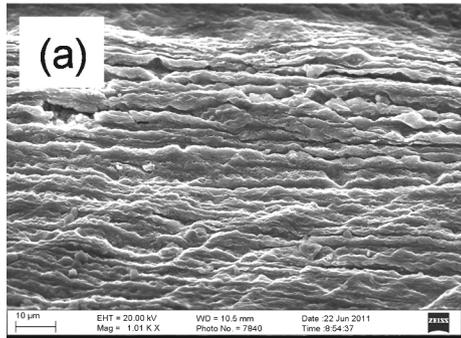


(b) 宏观

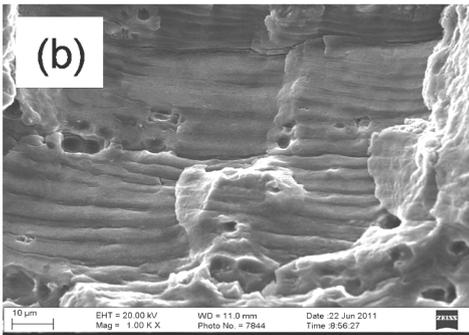
图5 裂纹断口形貌

Fig.5 Observation of section of cracks in metal liner

图6所示的为裂纹扩展区放大的电镜照片,可以看出,金属内衬存在明显的裂纹扩展的片状层区域。在疲劳过程中,裂纹源区为扩展起始区域,沿着其出现明显疲劳失效的形貌特征。说明在气瓶承压的过程中,裂纹缺陷的存在容易造成应力集中,裂纹沿着源区扩展导致出现提前破坏,裂纹缺陷的存在对金属内衬复合材料气瓶的疲劳性能影响较大。



(a) 断面



(b) 局部放大

图6 裂纹断口扩展区电镜照片

Fig.6 SEM pictures of cracks prepagation areas

2.4 金属内衬腐蚀缺陷对气瓶性能的影响

复合材料气瓶由于内衬采用金属材料,而外层采用碳纤维复合材料,存在电势差,导致其在长期存放或者弱碱性水的环境中金属内衬出现被逐渐腐蚀的现象。表4所示的为130 L复合材料气瓶存在腐蚀点缺陷复合材料气瓶的疲劳及爆破强度。可以看出,9#复合材料气瓶在70 MPa下出现漏水现象,10#气瓶宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2013年 第4期

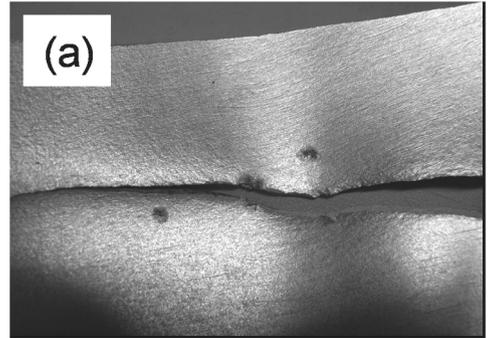
在401次疲劳试验后出现漏水情况,爆破压强以及疲劳次数分别降低21%与42%,明显低于正常复合材料气瓶的疲劳以及爆破强度。

表4 金属腐蚀点缺陷复合材料气瓶性能

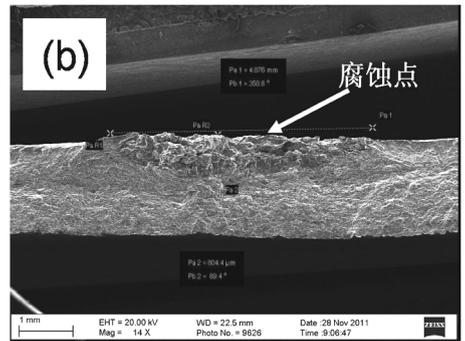
Tab.4 Fatigue property of composite pressure vessels exited corrosive vice in metal liner

气瓶编号	气瓶容积/L	爆破试验	疲劳次数/次
9#	130	70MPa 漏水失效	-
10#	130	-	401

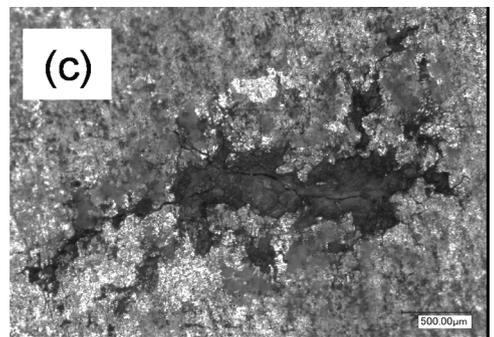
分别对两件气瓶的漏水区域进行了解剖试验。图7所示的为9#气瓶的内表面腐蚀点照片。



(a) 破坏形式



(b) 腐蚀点断面



(c) 表面的腐蚀

图7 9#气瓶金属内衬内表面腐蚀点照片

Fig.7 Pictures of corrosive areas in metal liner(9#)

可以看出金属内衬出现长裂纹,是导致复合材料气瓶在74 MPa下出现漏水的原因,并且在内衬的内表面出现大量的腐蚀点。采用电镜照片观察其断面如图7(b)所示,可以看出腐蚀点位置的长度约为

4.88 mm,深度约为0.8 mm,爆破裂口的位置刚好穿过腐蚀点。从图7所示内表面其他位置腐蚀点的照片可以看出,腐蚀点位置一般伴随着裂纹、粗糙的凹坑等缺陷。以上结果说明腐蚀点的存在容易使气瓶在高压下出现内衬提前失效,导致气瓶漏水所能承受的压力降低。

图8为10#复合材料内衬最终的漏水区域,金属内衬存在一条长裂纹,长度为18 mm,裂纹的宽度约为70 μm。

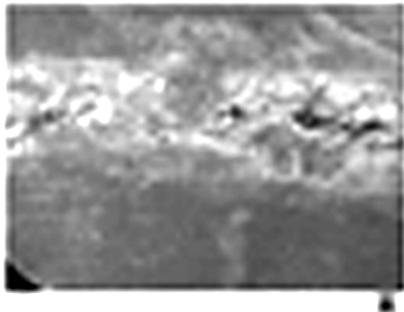
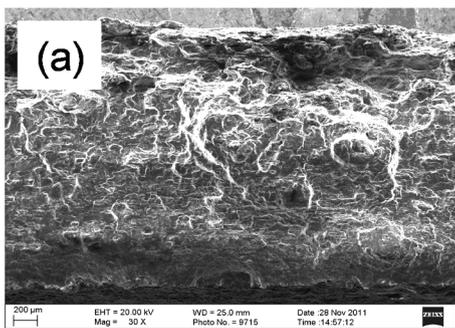
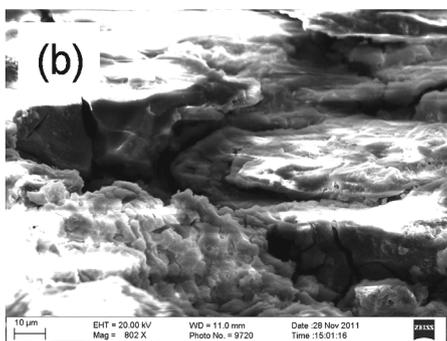


图8 10#气瓶金属内衬漏水区域电镜照片
Fig.8 SEM picture of leak area of metal liner(10#)

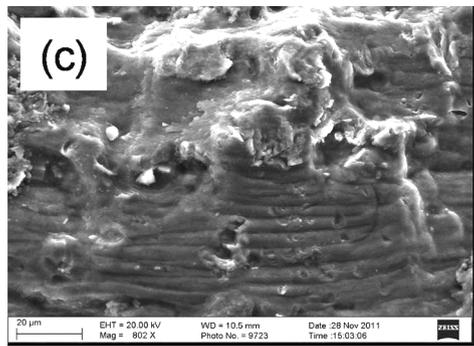
图9的漏水区域,内表面的裂纹处经过2个腐蚀点区域。采用机械手段打开裂纹(图9),腐蚀的厚度约为0.5 mm,约占内衬厚度的25%。金属内衬的腐蚀点位置出现了大量的孔洞及裂纹,并且从腐蚀点位置以下,金属内衬出现了明显的疲劳失效模式,说明腐蚀点位置为裂纹扩展的起始点。



(a) 整个断面



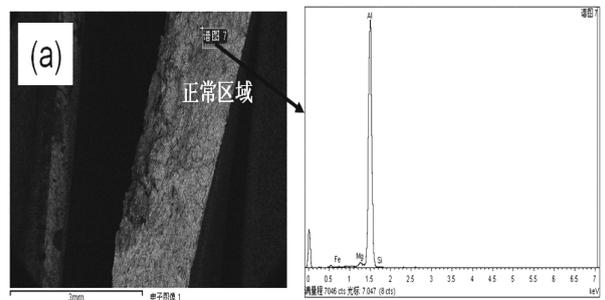
(b) 腐蚀点区域



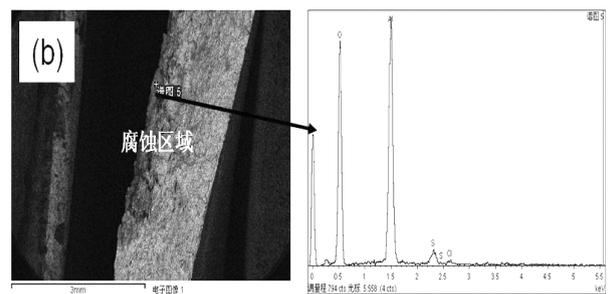
(c) 疲劳扩展区域

图9 10#气瓶漏水区域裂纹断面电镜照片
Fig.9 SEM pictures of section of cracks in metal liner(10#)

对内衬的腐蚀与非腐蚀区域进行了能谱分析(图10),可以发现腐蚀区域除有金属Al外还有O、S、Cl等元素,而正常区域均为金属元素Mg、Al、Si、Fe,符合6061-T6状态铝合金的基本成分^[9]。结合电镜照片以及气瓶的性能可以说明腐蚀区域由于发生化学反应降低金属内衬的力学性能,从而影响整个气瓶的疲劳及爆破性能。



(a) 正常区域



(b) 腐蚀区域

图10 10#气瓶漏水裂纹断面的能谱分析
Fig.10 Section of cracks in metal liner(10#)

3 结论

研究金属内衬的缺陷对复合材料气瓶的疲劳以及爆破性能的影响研究表明:复合材料气瓶在制备过程中金属内衬的凹坑、裂纹以及腐蚀点缺陷的存在会使气瓶在承受工作压力下的反复疲劳过程中在缺陷位置造成应力集中,形成裂纹的起始扩展区域从而极大地降低复合材料气瓶的疲劳寿命。

(下转第77页)