

# 复合材料高压气瓶声发射检测研究

## Acoustic Emission Detection of Composite Pressure Vessle

北京航空材料研究院 任荣镇 袁振民

航天医学工程研究所 侯继东

Ren Rongzhen Yuan Zhenmin (Institute of Aeronautical Materials, Beijing)

Hou Jidong (Institute of Space Medico-Engineering)

**[摘要]** 芳纶纤维缠绕气瓶水压及爆破过程声发射特性表明, 费利西蒂比是评价气瓶内部损伤的重要参数, 它直接影响爆破强度。高的幅度分布值是气瓶爆破的先兆。

**关键词:** 费利西蒂比 幅度分布

**[Abstract]** The pressure cylinder being made of aramid fiber reinforced resin matrix composite has been studied by means of acoustic emission technique. The results show that the Felicity's ratio is an important acoustic emission parameter for evaluating the inner failure of a pressure cylinder and has a direct effect on blasting strength. High amplitude events can be indications of a cylinder blast.

**Keywords:** Felicity's ratio amplitude distribution

### 1 前言

由于重量轻, 纤维缠绕金属内衬复合材料高压气瓶已广泛应用于航空航天领域。

70 年代, 曾对玻璃纤维气瓶水压过程进行大量的声发射检测研究, 并找出了早期声发射峰与爆破强度的关系<sup>[1]</sup>。

最近新研制的芳纶纤维缠绕铝内衬高压气瓶, 其水压和爆破过程亦采用声发射技术寻找气瓶损伤与声发射参数间的关系, 对气瓶设计、制造和使用提供参考数据。

### 2 试验概况

#### 2.1 试件

22 升气瓶 94 编号计 11 个; 0.25 升气瓶 3 个; 2mm × 12mm × 200mm 芳纶胶板。

#### 2.2 试验仪器及装置

美国 D/E3000 系列双通道声发射仪。水压过程检测装置见图 1。

#### 2.3 测试参数

- (1) 独立的双通道振铃计数与压力关系;
- (2) 主通道幅度分布直方图;
- (3) 费利西蒂 (Felicity) 比;

(4) 爆破压力。

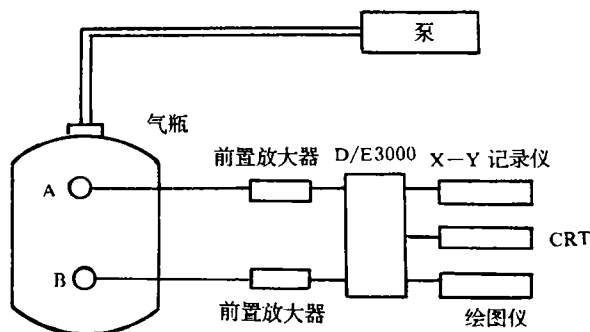


图 1 水压试验过程的声发射检测

#### 2.4 试验过程

##### 2.4.1 芳纶胶板拉伸试验

在拉力试验机上对胶板加载至断裂, 记录并绘制位移-载荷-声发射关系图和幅度分布图, 以考察芳纶纤维胶板声发射特性。

##### 2.4.2 水压试验

用水泵向气瓶注水加压, 最高压力为设计工作压力的 1.25 倍, 约 26MPa, 卸压到零, 再进行第二次升压卸压。二次升压过程通过 A、B 两个探头接收声发射信号, 经过仪器的处理, 在记录仪和绘图仪上绘出相应曲线。

##### 2.4.2 水压爆破试验

加压及声发射检测与水压试验基本相同, 只是压力

一次性上升直至气瓶破坏且只用一个探头。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 芳纶胶板声发射特性

F2<sup>#</sup> 试样拉伸过程位移-载荷-声发射振铃计数关系图和幅度分布直方图分别见图 2 和图 3。

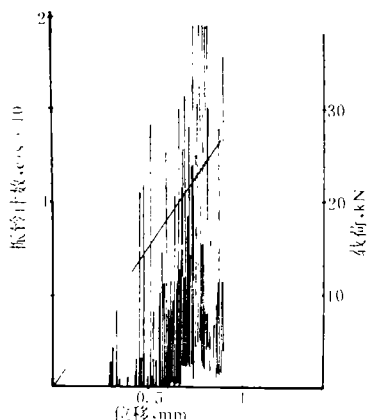


图 2 F2<sup>#</sup> 试样拉伸断裂过程振铃-位移-载荷关系图

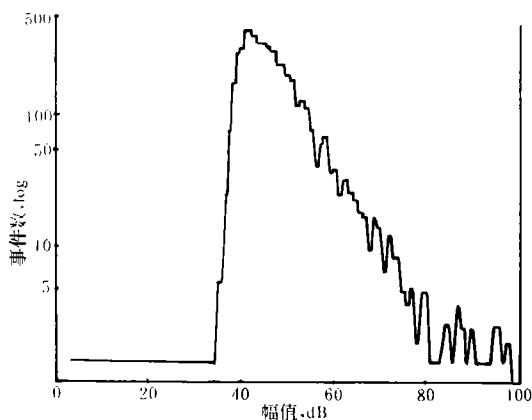


图 3 F2<sup>#</sup> 试样幅度分布图

芳纶胶板在拉伸过程有丰富的声发射源,在出现损伤和临近断裂时振铃计数已满标,即能达到 3000c/s,相应幅度分布在 80~100db 间出现小峰。

#### 3.2 22 升气瓶水压试验

参试共有 11 个气瓶,虽然都存在早期声发射峰,但各自的声发射形态差异很大,大致可分为三组:第一组以 9404 为代表,其早期峰平缓,见图 4。第二次加压见图 5。试验结果相同的共有 9401、9406、9407、9404 四个气瓶。第二组以 9403 为代表,早期峰陡有拐点,见图 6。9402、9409、9410、9403 四个气瓶试验结果均如此。第三组以 9405 为代表,有 9408、9405 两个气瓶,典型特点是早期峰前存在前期峰,参见图 7。

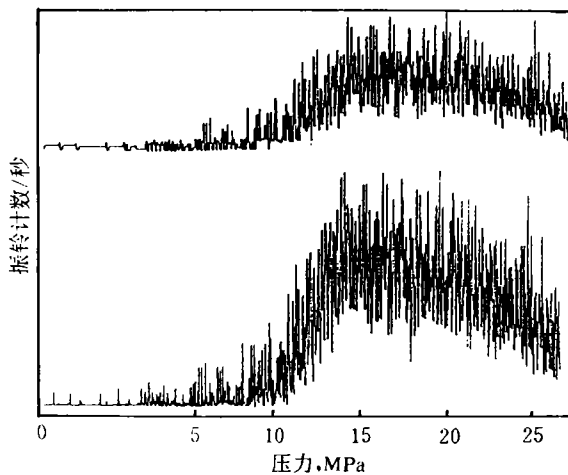


图 4 第一次升压过程中声发射振铃计数曲线(9404)

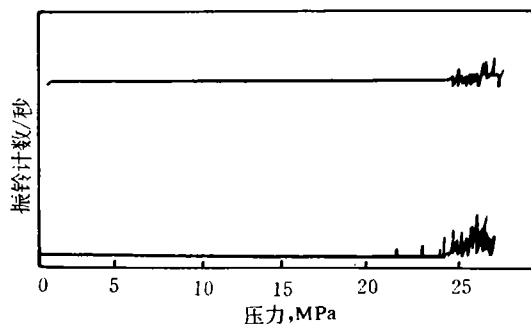


图 5 第二次升压过程中声发射振铃计数曲线(9404)

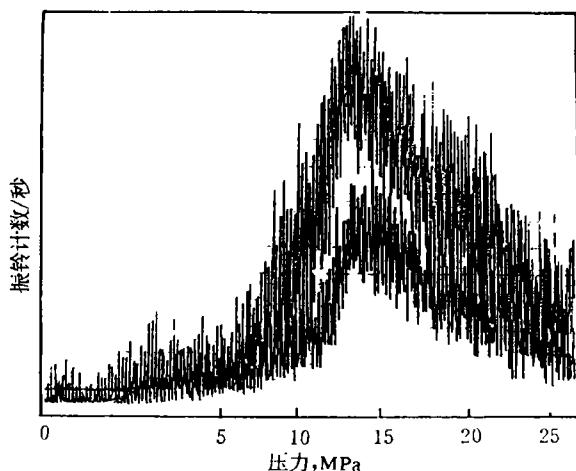


图 6 第一次升压过程中声发射振铃计数曲线(9403)

图 5 是第二次升压时振铃计数曲线,在压力超过第一次最大压力  $P_1$  之前就有声发射产生,即在  $P_2$  时出现声发射,由此可以算出费利西蒂比 ( $P_2/P_1$ )。早期峰的形态不同,说明气瓶质量存在差异,爆破压力值离散。

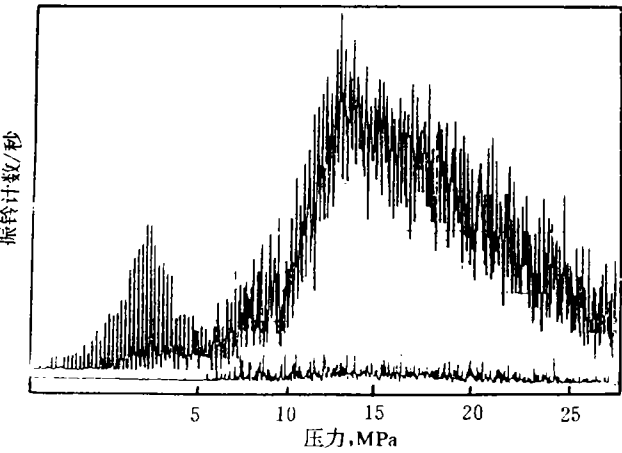


图 7 第一次升压过程中声发射振铃计数曲线 (9405)

3.3 22 升气瓶爆破试验结果

根据二次升压而折算出来的费利西蒂比与气瓶爆破压力分别列入表 1。

表 1 22 升气瓶爆破试验结果

编号	疲劳次数	Felicity 比	爆破压力 (MPa)
9401	0	0.81	48
9402	0	0.87	未做
9403	0	0.75	30
9404	0	0.82	52
9405	200	0.89	42
9406	0	0.88	61
9407	0	0.82	57
9408	0	0.88	未做
9409	0	0.71	未做
9410	0	0.81	54
9411	200	0.90	62

费利西蒂比已被国内外有关部门用作评价复合材料损伤的主要依据之一<sup>[2]</sup>。本次试验的费利西蒂比与爆破压力值的关系见图 8。

从图中看出, 比值越大, 其爆破强度越高, 第一、二类早期峰特性气瓶便符合此规律。第三类 9405 气瓶表现异常, 尚待进一步深入研究。

3.4 0.25 升气瓶爆破试验

由图 9 看出, 气瓶从 10MPa 开始随压力升高声发射明显增大。由于气瓶小, 升压快, 早期峰已不明显。临近爆破时, 高幅值事件 (>96dB) 显著增加, 见图 10。对应幅度分布呈现 3 个峰值, 说明存在着多种损伤机制。

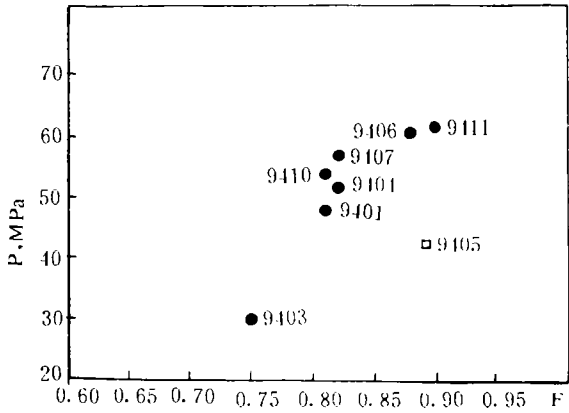


图 8 气瓶爆破压力与 Felicity 比的对应关系

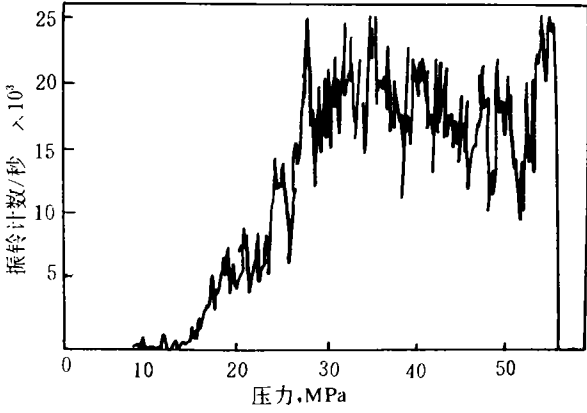


图 9 0.25 升气瓶打压爆破过程的  
压力-振铃计数曲线 (6#)

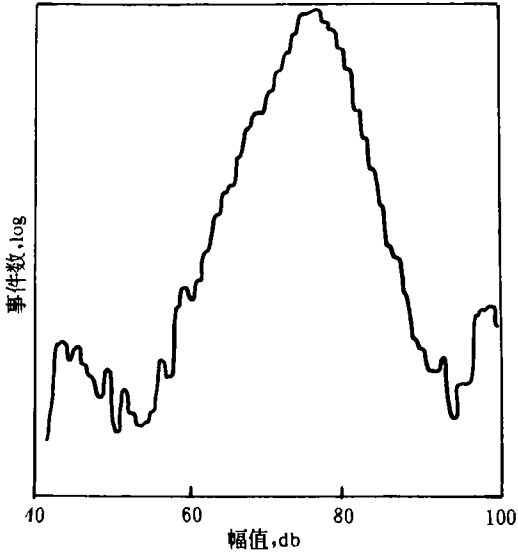


图 10 0.25 升气瓶打压爆破过程的  
声发射幅度分布直方图 (6#)

(下转第 25 页)

析,可以认为爬波适于检查表面精度较低的高温合金小直径棒材(小棒可视为薄片),并可以从试验得到验证。

### 3 方法、参数及试验结果

#### 3.1 探头

爬波检测是近几年才提出的一种探伤方法,迄今大都采用双探头方式,而且涉及到的工件大都具有平面表面。

根据小棒材的特点,我们采用单晶线聚焦探头进行探伤,而且采用水浸方式,且探头的聚焦线与棒轴平行。

探头在水中的焦距  $f$  可参照普通水浸聚焦探头的公式(6)进行计算,因水中只能传播纵波。

$$f = r(1 - C_2/C_1) \quad (6)$$

式中  $r$  为声透镜的曲率半径,  $C_1$  和  $C_2$  分别为透镜和水中的纵波声速。但应注意的是,此时  $f$  不是垂直水距,即:探头焦点(实为焦线)不在探头的正下方,而是按水/棒界面时第一临界角的方向偏移,如图4所示。

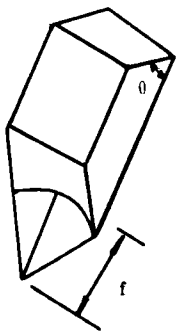


图4 探头斜楔示意图

水平偏移量  $L$  可按(7)式计算:

$$L = f \cdot \sin \alpha_{c1} \approx f \cdot \sin 14.5^\circ \approx 0.25f \quad (7)$$

因探头中声束是斜入射于声透镜,故探头斜楔的倾斜角  $\theta$  可由(8)式求出

$$\theta = \arcsin \left( \frac{C_0}{C_2} \sin \alpha_{c1} \right) \quad (8)$$

式中  $C_0$  和  $C_2$  分别为斜楔和水中声速。声束方向与探头斜楔倾角的关系示于图5。

试验表明,对于  $\phi 4 \sim 25\text{mm}$  的小直径棒材,当水中焦点落于棒材中心轴线与上表面之间时,其灵敏度、分辨率及信噪比都比较高。

考虑到被探棒材是按制而成的,缺陷的取向大都沿

棒轴延伸,故第一类人工反射体为加工在试棒端面的  $\phi 0.8$  平底孔,同时考虑到对各种取向缺陷的可探性,我们还加工了与棒轴垂直的平底孔,直径亦为  $\phi 0.8$ 。结果表明,上述人工缺陷均能可靠发现,并且具有较高的信噪比。且能发现位于下表面的表面裂纹。

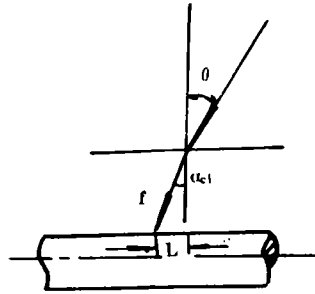


图5 声束方向

### 4 结论

(1) 单探头水浸线聚焦爬波法适合于检测直径为  $4 \sim 25\text{mm}$  高温合金小棒材,即使这类棒材具有较粗糙的表面。

(2) 此方法在检查小棒材时具有较高的灵敏度和分辨力,能同时检查棒材内部和靠近表面的缺陷。

#### 参考文献

- 何祚镛,赵玉芳.《声学理论基础》,国防工业出版社,1981, PP67~76
- J. Krautkramer, H. Krautkramer. Ultrasonic Testing of Materials, third Ed., New York, 1983, PP611
- 李克明编译.表面下纵波的研究和实验,《国外无损检测》,1985年, No. 1, P2163~2166

\*\*\*\*\*  
(上接第16页)

### 4 结论

(1) 芳纶纤维缠绕铝内衬复合材料气瓶在打压爆破过程中存在早期声发射峰,这点与玻璃纤维相一致,但个别气瓶还有前期峰,这是玻璃纤维气瓶所没有的。

(2) 费利西蒂比是评价结构完整性重要指标,它与爆破强度存在着对应关系,有望作为气瓶质量筛选和分级的关键判据,但仍需要进一步研究。

(3) 临近爆破时,高幅值事件( $>96\text{dB}$ )明显出现,是气瓶破坏前重要预兆。

#### 参考文献(略)