

# 复合气瓶声发射幅度衰减测量技术

刘哲军<sup>1</sup> 葛丽<sup>1</sup> 陈博<sup>1</sup> 张志超<sup>1</sup> 邱斌<sup>2</sup>

(1 航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

(2 四川航天长征装备制造有限公司, 成都 610100)

**文 摘** 针对宇航级复合气瓶声发射传播与衰减特性的测量难题, 探索了声发射波的幅度衰减系数理论计算方法, 得到了适用于混杂波幅度衰减系数的理论计算公式。利用两种规格的声发射模拟源在复合气瓶上进行了试验。结果表明: 理论衰减曲线与实测衰减曲线吻合良好; 不同模拟源产生的声发射模拟信号在频率成分、信号强度上存在较大的不同, 综合考虑认为,  $\Phi 0.5$  mm/2H 铅笔芯折断模拟源更适合复合气瓶的声发射检测。

**关键词** 声发射, 复合气瓶, 幅度衰减

中图分类号: TB332

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2021.01.014

## Measurement of Acoustic Emission Amplitude Attenuation of Composite Gas Cylinders

LIU Zhejun<sup>1</sup> GE Li<sup>1</sup> CHEN Bo<sup>1</sup> ZHANG Zhichao<sup>1</sup> QIU Bing<sup>2</sup>

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

(2 Sichuan Aerospace Changzheng Equipment Manufacturing Co. Ltd., Chengdu 610100)

**Abstract** To overcome the difficulty in measurement of the acoustic emission (AE) propagation and attenuation characteristics of aerospace composite cylinders, the theoretical formula for the amplitude attenuation coefficient of hybrid wave was obtained by studying theoretical calculation method of AE wave amplitude attenuation coefficient. The experiments on the composite cylinder were carried out by using two specifications of the AE simulators. The results demonstrate that the actual attenuation curves match well with the theoretical attenuation curves. The signal frequency and strength are different by using different AE simulators. The AE simulator of  $\Phi 0.5$  mm/2H pencil is more suitable for AE detection of composite cylinder.

**Key words** Acoustic emission, Composites gas cylinder, Amplitude decay

### 0 引言

复合气瓶因其具有比强度高、抗疲劳性能好等优点, 目前逐步在航天、船舶、航空等军工领域展开应用与研究。国内外的相关研究均表明由于复合材料本身的各向异性、非线性以及破坏形式的复杂性、不连续性等, 使得声发射波在材料中不同介质界面处会产生反射、折射现象, 造成在声波传播方向上的能量损失, 波包幅度的衰减变化, 这种变化在固体和气体间的交界面尤为严重<sup>[1-4]</sup>。声发射波的传播与衰减特性是进行复合气瓶声发射严重性评价的重要基础, 也是确定声发射传感器布置方案、检测门槛、检测频率等重要检测参数的关键基础工作之一<sup>[3]</sup>。

本文结合我国新一代运载火箭用 56L 复合气瓶的研制<sup>[3]</sup>, 开展复合气瓶声发射传播衰减研究, 探索

声发射波的幅度衰减系数理论计算方法, 拟得到适用于混杂波传播幅度衰减系数的理论计算公式。

### 1 声波传播衰减的基本理论

在声发射检测技术中, 衰减主要控制了远距离低幅度声发射源的可测性。材料和结构的声发射波的衰减规律直接决定了传感器有效监测半径和定位有效性、准确性。从理论上讲, 引起声波衰减的主要原因一般包括声束扩散衰减、材料组成相造成的散射衰减以及传播介质吸收衰减等 3 种<sup>[2-4]</sup>。

在铝合金内胆碳纤维增强复合气瓶中, 金属铝内胆的壁厚为 1.4 mm, 复合层厚度为 12 mm, 二者之比约为 0.116 7。因此复合气瓶的声波衰减主要是复合层的衰减, 铝内胆对声波幅度的衰减影响几乎可以忽略不计, 甚至有助于传播各向异性的改善<sup>[3]</sup>。

收稿日期: 2020-09-15

第一作者简介: 刘哲军, 1971 年出生, 高级工程师, 主要从事材料和结构件的声发射检测与评价工作。E-mail: 13501129472@163.com

复合层的声发射波衰减大致归结为以下4个方面：(1)树脂对声发射波的衰减 $\alpha_R$ ；(2)碳纤维对声发射波的衰减 $\alpha_F$ ；(3)孔隙对声发射波的衰减 $\alpha_V$ ；(4)其他缺陷如分层、孔洞、夹杂等对声发射波的衰减 $\alpha_0$ 。

在不考虑其他缺陷影响的情况下，声发射波在复合材料中的衰减 $\alpha$ 应是包括树脂、碳纤维、孔隙所共同引起的衰减，即 $\alpha_R$ 、 $\alpha_F$ 、 $\alpha_V$ 之和：

$$\alpha = C_R f P_R + C_F f^3 R_F^2 P_F + C_{V1} (g_{V1}^R)^3 f^4 P_V^{3n+1} P_1 + C_{V2} (g_{V2}^R)^3 f^2 P_V^{n+1} P_2 \quad (1)$$

式中， $\alpha$ 为衰减系数， $C_R$ 、 $C_F$ 、 $C_{V1}$ 、 $C_{V2}$ 、 $g_{V1}^R$ 、 $g_{V2}^R$ 为常数， $f$ 为声发射波频率， $P_R$ 为树脂的质量分数， $R_F$ 为碳纤维半径， $P_F$ 为碳纤维质量， $P_V$ 为孔隙质量， $P_1$ 为 $k_1 R_V < 0.8$ 范围内的孔隙与全部孔隙之比， $P_2$ 为 $0.8 \leq k_1 R_V \leq 1.0$ 范围内的孔隙与全部孔隙之比。

当声波传播距离较短时，其频率色散较小，可以近似认为信号频率不变，其传播衰减系数根据经验可以用式(2)表示<sup>[5]</sup>：

$$\alpha = C_R f P_R + C_F f^3 R_F^2 P_F + C'_{V1} f^4 P_V^2 + C'_{V2} f^2 P_V^{\frac{4}{3}} \quad (2)$$

声发射波是一种混杂波，经较长距离传播后会明显的频率色散，也即频率的衰减和改变。声发射检测技术常用的铅芯折断式模拟源触发产生的声发射波频率为宽频，这与裂纹在扩展过程中产生的信号频率一致。因此基于频率不变的衰减理论在较长传播距离上具有一定的局限性。

声发射波在复合气瓶这类柱形容器中进行较长距离传播时，由传播介质的非均匀性造成的散射衰减以及由介质吸收引起的粘滞衰减为主要的衰减模式，其规律可用式(3)表示：

$$A_0 - A = \alpha r \quad (3)$$

式中， $A_0$ 为信号初始幅值， $A$ 为传播距离 $r$ 后的信号幅值， $\alpha$ 为衰减系数， $r$ 为测量点到声源的距离。

有理论研究表明，点状声发射源会在柱形复合

气瓶中会产生柱面波，考虑到声发射点源的物理尺寸远远小于测量点到声源的最小距离，且不受声波频率和材料因素的限制，其声波幅度的衰减系数可用式(4)表示：

$$\alpha = \frac{A_0 - A - 10 \lg r}{r} \quad (4)$$

式中， $\alpha$ 为衰减系数， $A_0$ 为信号初始幅值， $A$ 为传播 $r$ 距离后的信号幅值， $r$ 为测量点到声源的距离。

## 2 声发射衰减特性实验及理论验证

采用美国声学物理公司(PAC)的PCI-2声发射检测系统，系统最大频率范围3~3 000 kHz，门槛设定为30 dB，选用共振频率为150 kHz的单端谐振式传感器。前放增益40 dB。模拟源选用常用的 $\Phi 0.5$  mm/2H和 $\Phi 0.3$  mm/2H铅笔芯折断模拟源。

在复合气瓶的身部直段布置两个传感器，分别为1#和2#，直筒段总长为270 mm，测量间距从30~270 mm，共9组。在1#传感器根部处分别触发 $\Phi 0.5$  mm/2H铅笔芯折断模拟源、 $\Phi 0.3$  mm/2H铅笔芯折断模拟源。实验系统如图1所示。

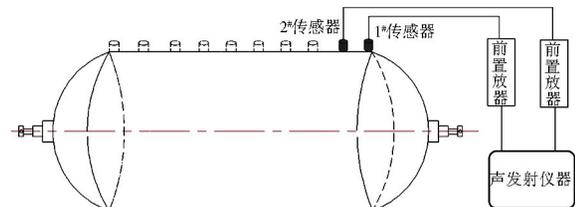


图1 声发射幅度衰减测量实验系统

Fig. 1 The experimental system for measuring the attenuation of acoustic emission amplitude

两种模拟源分别在1#传感器根部的同一位置触发产生声发射信号，2#传感器随着传感器间距的变大接收到的信号幅值不断减小。根据实测衰减数据和公式(4)，求得复合气瓶直筒段的有效衰减系数见表1。

表1 两种声发射模拟源在复合气瓶直筒段的有效衰减系数

Tab.1 Effective attenuation coefficients of two acoustic emission simulation sources in the straight section of a composite gas cylinder

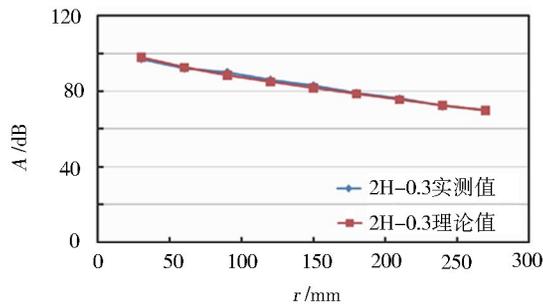
模拟源	衰减系数/dB·mm <sup>-1</sup>									计算值
	30 mm	60 mm	90 mm	120 mm	150 mm	180 mm	210 mm	240 mm	270 mm	
$\Phi 0.3$ mm/2H	97	92	90	86	83	79	76	72	70	0.0776
$\Phi 0.5$ mm/2H	98	96	91	90	86	84	81	80	74	0.0482

从表中可以看出，两种模拟源所得的衰减系数相差较大，这是由于不同模拟源产生的声发射信号的频率成分不同造成的， $\Phi 0.3$  mm/2H的模拟源相

$\Phi 0.5$  mm/2H的模拟源产生的信号频率成分更高，但强度更低，衰减也更加严重。因此对于声发射检测技术而言，实际检测需要根据检测目的选择合适的

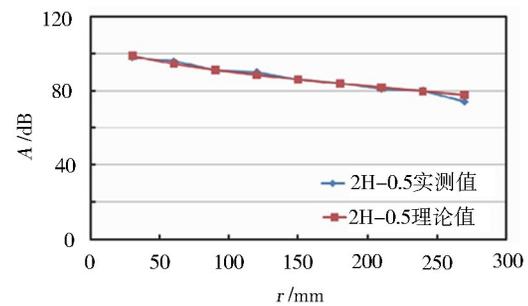
模拟源。

按照表 1 所示的两种声发射模拟源的衰减系数



(a)  $\Phi 0.3$  mm/2H模拟源

反推得到理论和实测曲线的对比见图 2。



(b)  $\Phi 0.5$  mm/2H模拟源

图 2 两种声发射模拟源的理论衰减曲线和实测衰减曲线

Fig. 2 Theoretical attenuation curve and measured attenuation curves of two kinds of acoustic emission simulation sources

从图 2 可以看出,由于衰减测量的距离较短,因此衰减曲线基本呈线性递减趋势,但两种模拟源的理论计算衰减曲线和实测曲线吻合较好。从图 2 还可以发现,由于  $\Phi 0.5$  mm/2H 笔芯模拟源产生的声发射信号强度较高且频率成分较低,因此其传播相同的距离后其幅度衰减相对要小 4~5 dB。因此在进行该型复合气瓶声发射检测时,若选用频率较低的 150 kHz 共振声发射传感器时,推荐使用  $\Phi 0.5$  mm/2H 笔芯模拟源。

### 3 结论

(1) 复合气瓶上的声发射波是一种多频多模的混杂波,其衰减呈现复杂形势。由于复合气瓶的形状简单,可以采用理论公式  $\alpha = \frac{A_0 - A - 10 \lg r}{r}$  对复合气瓶的衰减进行推演。推演得到的理论与实际测量得到衰减曲线在直筒段位置吻合良好。

(2) 不同模拟源产生的声发射模拟信号在频率成分、信号强度上存在较大的不同,综合考虑认为,  $\Phi 0.5$  mm/2H 铅笔芯折断模拟源更适合复合气瓶的声发射检测。

### 参考文献

- [1] 沈功田. 声发射检测技术及应用[M]. 北京:科学出版社,2015.
- SHENG Gongtian. Acoustic emission technology and application [M]. Beijing: China science publishing & media Ltd. ,2015
- [2] GJB6187—2008 声发射检测[S].
- GJB6187—2008 Inspection for Acoustic emission[S].
- [3] 刘哲军,葛丽,王俊峰. 复合材料气瓶声发射检测初步研究[J]. 宇航材料工艺,2011,41(2):120~123.
- LIU Zhejun, GE Li, WANG Junfeng. Acoustic emission testing technique for composite pressure vessels [J]. Aerospace Material & Technology, 2011, 41(2): 120~123.
- [4] 郑传祥. 复合材料压力容器[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- ZHENG Chuanxiang. Composites pressure vessel [M]. Beijing:Chemical industry press Co. Ltd. ,2006. 9.
- [5] WILLIAMS J H, MARQUES Jr. , E R C, LEE S S. Wave propagation in anisotropic medium due to an oscillatory point source with application to unidirectional composites [R]. NASA contractor report 4001, GRANT NAG3-328 JULY 1986.