

基于模态声发射的储氢气瓶检测方法研究

沈俊

上海市特种设备监督检验技术研究院有限公司, 上海, 200062;

摘要: 本文针对纤维缠绕储氢气瓶的损伤模式识别等方面进行研究, 验证通过模态声发射检测技术可以及时发现气瓶复合材料纤维断裂、基体脱开、分层等损伤, 避免因缺陷扩展导致的安全事故, 提升纤维缠绕储氢气瓶的检验质量, 对储氢气瓶的安全长周期运行, 具有重要意义。

关键词: 模态声发射; 纤维缠绕; 储氢气瓶; 损伤识别

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 03. 059

1 应用背景及研究动机

受全球碳中和的驱动, 在氢能源汽车技术快速发展进步、产业协同有序发展的背景下, 氢能源汽车产业在全球范围内呈现出跨越式的发展趋势, 国际氢能委员会预测到 2030 年全球氢燃料电池汽车保有量将达到 1000 万辆以上。随着氢能源汽车越来越普及, 其所使用的 I V 型纤维缠绕储氢气瓶在服役过程中进行损伤检测与评估的需求也越来越高, 因为储氢气瓶是氢燃料电池汽车主要组成部件之一, 车辆的安全性能直接取决于储氢气瓶。

2 从失效模式确定检测方法

本文在深入探究储氢气瓶损伤模式的基础上提出了基于模态声发射技术的新型检测方法, 并采用理论推导、试验实验等方式综合研究了在循环载荷作用下纤维缠绕储氢气瓶的损伤模式规律及模态声发射的特征图谱显示。实验表明: 模态声发射技术能够识别出包括纤维断裂、基体开裂、界面脱粘在内的典型损伤模式, 损伤识别准确率极高。该研究成果的应用可为储氢气瓶的安全监测提供新的检测手段, 有助于保障氢能源汽车的安全运行。

3 检测方法的比较

相比传统的无损检测方法而言, 声发射检测法具有如下的特点: 实现实时、在线检测, 快速发现缺陷; 可用于任何类型的材料, 不受材料的种类及形状等的影响; 可检测是否存在裂纹、腐蚀等缺陷是否存在扩展情况; 检测手段不会给设备造成损伤。声发射检测方法能够通过捕捉和识别材料在受力变形过程中产生的声信号, 来判断材料的内部是否存在问题缺陷的方法。其基本原理是: 在外部载荷状态下其内部会产生微小的塑性变形, 这些变形会以弹性波的形式释放出来, 这一过程产生了

声发射的信号。所以声发射技术可以实现对材料在变形、断裂等过程中的弹性波的捕捉, 并以此分析材料的状态及结构完整程度。

目前主流的 IV 型储氢气瓶大多采用碳纤维复合材料缠绕层结构, 工作压力高达 35MPa。在长期充放氢循环过程中, 复合材料层易产生纤维断裂、基体开裂、界面脱粘等损伤, 损伤形式与金属压力容器不同, 因此传统无损检测方法难以对其进行检测以及实时在线监测。但在利用声发射技术检测纤维缠绕储氢气瓶的损伤状态的过程中, 发现声发射系统采集到信号的数量极大, 且其中以干扰信号居多, 这给声发射信号的后续处理包括损伤模式的识别和缺陷部位的定位等带来了困难。与传统声发射技术相比, 模态声发射检测是利用宽频带声发射传感器采集波形数据, 并根据波的传播特性来分析波形, 以确定声源的类型, 然后通过软件分离 Lamb 波中的板内扩展波和板面弯曲波来区分声发射源的特性与位置。该方法主要适合于对声发射波长大于板厚度的薄板材料的应用, 比如碳纤维缠绕储氢气瓶。

4 模态声发射检测实验

通过以上理论推导, 得出模态声发射检测比传统声发射检测更适用于纤维缠绕储氢气瓶的检测, 以下通过三个阶段加载水压的实验, 进一步研究验证模态声发射检测对于纤维缠绕储氢气瓶的检测具备更佳的优势。

4.1 实验仪器简介

(1) 满足 ISO - 19016 标准并经美国 DOT 认证许可的模态声发射系统 - Express8 声发射系统, Express - 8 采集卡及 Micro II Express

(2) 满足 ISO - 19016 标准并经美国 DOT 认证许可的传统声发射传感器-PK15I, 模态声发射传感器 - P

KBBI

(3) 满足 ISO-19016 标准并经美国 DOT 认证许可的模式声发射数据采集软件 AEWin-MAE; 模式声发射数据分析软件 NOESIS-MAE

4.2 仪器调试过程

(1) 灵敏度实验: 距离每个传感器 0mm、100mm 处各断三次铅, 并记录数据

(2) 衰减实验: 最大传感器间距约为 700mm, 用 1 个传感器做衰减实验, 在距离该传感器 0/100/200/300/400/500/600/700mm 处分别断铅 3 次

4.3 气瓶受载情况

实验所用纤维缠绕储氢气瓶尺寸为直径 420mm, 长度 1500mm, 传感器数量布置 8 个, 传感器布置形式为两

行四列。以下实验阶段中, 疲劳实验均为水压加载, 加载速率约为 3.5MPa/min。共进行 11000 次循环, 相当于约 10 年使用期的等效损伤。声发射传感器布置方式已确保对全瓶身的覆盖监测。进行压力实验 (0→35MPa→52.5MPa→0), 实验过程中实时采集声发射信号。加载顺序如下:

(1) 设计压力实验: 0-35MPa, 保压 5-15 分钟, 两次加载循环

(2) 11000 次循环疲劳实验。2MPa-43.75MPa

(3) 水压实验: 0-52.5MPa, 保压 1 分钟

4.4 实验数据分析

(1) 灵敏度实验: 在传感器旁和在距传感器 100mm 处分别断三次铅。以下数据为三次断铅信号传感器的平均幅值:

传统声发射 PK15I 传感器断铅信号幅值:								
传感器编号	1	2	3	4	5	6	7	8
传感器旁断铅	99db	95.3	98.3	97	99	97.3	95.6	97.3
距传感器 100mm 处断铅	96db	91	89	89	91	91	88	90.6
模态声发射 PKBBI 传感器断铅信号幅值:								
传感器编号	1	2	3	4	5	6	7	8
传感器旁断铅	98.6db	98	97.6	87.3	97.3	98.6	97	98.3
距传感器 100mm 处断铅	96	95.6	87	73.6	92.6	90.3	92.6	92

由以上实验数据可见, 用传统声发射传感器 PK15I 传感器在气瓶上做灵敏度实验, 在距传感器 100mm 处断铅, 幅值相应普遍只有 80-85dB, 模态声发射 PKBBI 传感器的幅值相应普遍 90db 左右, 可见模态声发射 PKBB

I 传感器灵敏度较高。

(2) 衰减实验: 在距传感器 0/100/200/300/400/500/600/700mm 处分别断三次铅。以下数据为三次断铅信号传感器的平均幅值:

距传感器距离	0	100	200	300	400	500	600	700
传统声发射 PK15I 传感器	99	92.3	81.6	69.3	63	60.3	58	55.3
模态声发射 PKBBI 传感器	98.6	93.6	83	71	67.6	60.6	62	63.6

由以上实验数据可见, 在气瓶表面断铅, 使用传统声发射传感器 PK15I 传感器与模态声发射 PKBBI 传感器相比, 使用模态声发射 PKBBI 传感器的气瓶衰减更小。

4.5 水压加载疲劳实验

(1) 设计压力 0-35MPa, 保压 5-15 分钟, 两次循环:

由于气瓶出厂之前都要先做自紧实验和水压实验。做完实验后, 在设计压力下再做两种不同声发射传感器的实验, 声发射数据量均很少, 保压阶段几乎没有声发射数据。

(2) 11000 次疲劳试验后:

<1>设计压力下的实验 0-35MPa, 保压 5-15 分钟, 两次循环

<2>水压压力下的实验 0-52.5MPa, 保压 5-15 分钟, 两次循环

通过对两种声发射检测模式在 11000 次疲劳试验后的数据分析, 传统声发射传感器 PK15I 传感器对疲劳试验前的数据数据量几乎没有变化, 说明经过 11000 次疲劳实验传统声发射对气瓶碳纤维层损伤的采集数据不敏感。模态声发射 PKBBI 传感器数据量明显比试验前的数据数据量急剧上升, 可见在此阶段采集的信号是纤维层损伤进一步加大了。

(3) 水压实验, 0-52.5MPa 升压, 保压 1 分钟:

下面两个图是两种声发射检测方式在加压到 52.5 MPa 过程中的数据图,从图中可以看出装设传统声发射 PK15I 传感器的气瓶(图 1)在一次保压过程中均有一定数量的声发射信号,在二次保压过程几乎没有声发射信号;装设模态声发射 PKBBI 传感器的气瓶(图 2)在两次保压过程均有一定的声发射信号。如图所示,0 至第一个时间标签是一次升压;第一个时间标签至第二个时间

间标签是一次保压;第二个时间标签至第三个时间标签是二次升压;第三个时间标签至结束是二次保压。相对来说,装设模态声发射 PKBBI 传感器的气瓶数据量更多一些,信号的产生是由于自紧和水压实验过程中,表面的纤维层发生了一定的损伤,而这些数据更容易被 PKBBI 传感器有效采集到。

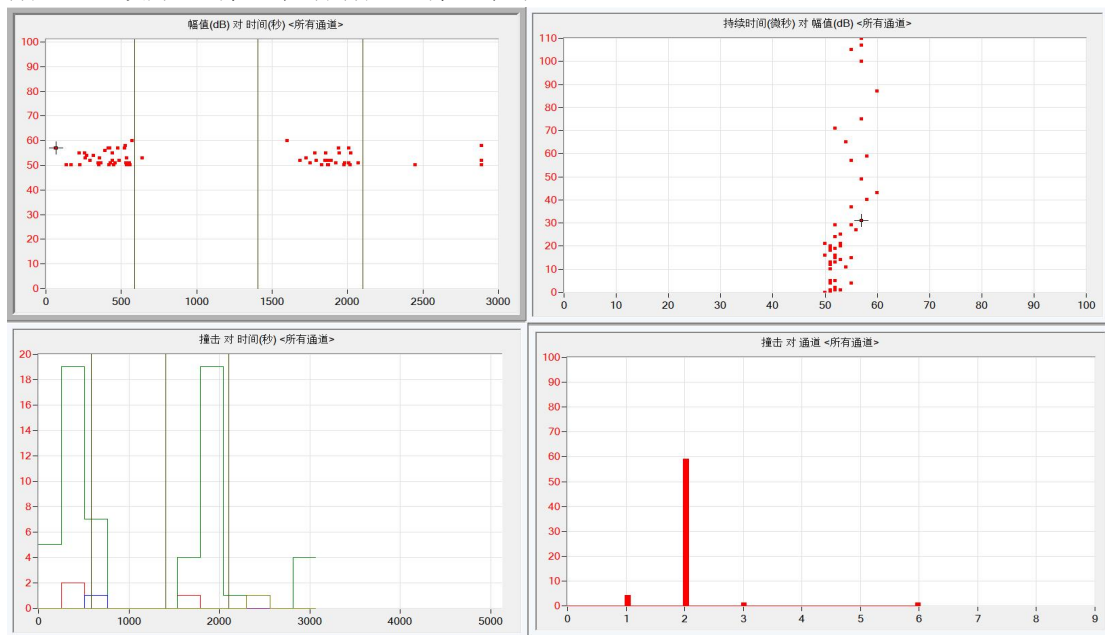


图 1 传统声发射 PK15I 传感器信号数据图

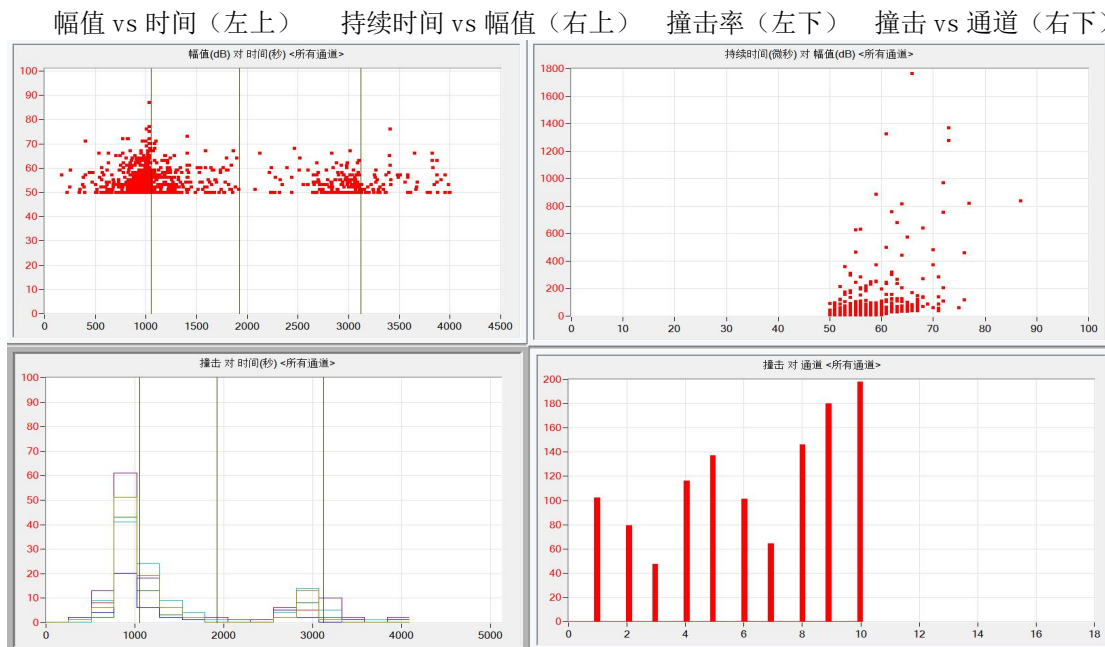


图 2 模态声发射 PKBBI 传感器数据图

幅值 vs 时间(左上) 持续时间 vs 幅值(右上) 撞击率(左下) 撞击 vs 通道(右下)

4.6 损伤模式的信号处理及波形分析验证阶段:

通过观察保压阶段信号的波形,并对其进行小波分

析,大部分信号的特征可总结如下:

(1) 分层的信号是典型的连续型声发射信号信号,

持续时间较长,频率较低

(2) 各种典型纤维断裂的信号持续时间短,中高频率段的能量百分比比较高

(3) 基体开裂的信号持续时间偏长,频率通常较低

4.7 损伤演化过程分析

实验过程中损伤演化呈现三阶段特征:

(1) 初期阶段(0-4000次循环):主要损伤形式:基体微裂纹(占信号总量的72.3%)

(2) 中期阶段(4001-8000次循环):新增损伤:界面脱粘(占比升至41.5%)和初始分层

(3) 后期阶段(8001-11000次循环):主要损伤形式:纤维断裂(占信号总量的36.8%)和大面积分层

4.8 实验结果总结

(1) 模态声发射专用传感器PKBBI传感器相对于传统声发射PK15I传感器具有更高的灵敏度,更宽的频率响应范围,识别准确率更高,抗干扰能力更强

(2) 模态声发射检测技术能够实现对复合材料的基体开裂、基体脱粘和纤维断裂等损伤形式的识别和准确定位

(3) 模态声发射技术能够区分不同传播模式的弹性波(扩展波、弯曲波等),从而更准确地识别损伤类型和位置

(4) 当声源方向垂直于板平面时弯曲波幅度将大于扩展波,由此可辅助判别损伤来自材料自身破坏的信号(比如纤维断裂、基体开裂、分层等)还是来自干扰

信号(比如电磁噪音、机械摩擦、泄漏等)

(5) 通过对典型波形的图谱进行分析,可以确定复合材料损伤的类型

5 结论与展望

模态声发射技术是一种先进的无损检测方法,在未来氢能汽车安全保障体系方面将发挥更大作用,但是对于纤维缠绕储氢气瓶检测方面还存在不少技术难题:比如复合材料的各向异性,造成超声波传播特性复杂;再者是车载环境下对数据的采集干扰大;最后是其没有量化的评价标准。所以以后的研究重点应是如何提高技术的工程适用性以及标准规范的建设。

随着对模态声发射检测技术的研究不断深化,在纤维缠绕储氢气瓶检测方面将起到更大作用,作为一种高效率、可靠性都较强的无损检测技术,结合氢能产业发展新趋势,必将为工业生产的安全、高效运行提供坚实保障。

参考文献

- [1]程亮.大容积钢内胆纤维缠绕气瓶疲劳失效原因分析.特种设备安全与节能技术2013:246-251.
- [2]马全胜.复合材料全缠绕储氢气瓶研制及应用进展.高科技纤维与应用2023(3):13-19.
- [3]李德翔.氢气瓶缠绕工艺分析及机构设计[D].上海:东华大学,2022.
- [4]许家忠.纤维缠绕复合材料成型原理及工艺[M].北京:科学出版社,2013.
- [5]陈明和等.IV型车载储氢气瓶关键技术研究进展[J].压力容器,2020,37(11):39-50.