

复合材料气瓶缠绕层的内部缺陷检测

胡 昆¹, 夏 莉¹, 张松松², 张 耕^{1,3}, 杨 刚¹, 谭 粤¹, 李 蔚¹

(1. 广东省特种设备检测研究院, 广州 510000; 2. 中国特种设备检测研究院, 北京 100029;

3. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510000)

摘 要: 复合材料气瓶具备质量轻、强度高、耐腐蚀与疲劳性能好等优势, 但目前针对复合材料气瓶检验的国家标准主要以宏观检查为主, 内外表面缺陷以及缠绕层的内部缺陷难以检出。分析了内部缺陷对复合材料气瓶的影响, 对比并分析了3种缠绕层内部缺陷的检验方法, 以期复合材料气瓶的定期检验提供一定参考。

关键词: 复合材料气瓶; 缠绕层; 内部缺陷; 检测方法

中图分类号: TK91; TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2024)08-0083-06

Inner defects testing of winding layer of composite gas cylinder

HU Kun¹, XIA Li¹, ZHANG Songsong², ZHANG Geng^{1,3}, YANG Gang¹, TAN Yue¹, LI Wei¹

(1. Guangdong Institute of Special Equipment Inspection and Research, Guangzhou 510000, China;

2. China Special Equipment Inspection & Research Institute, Beijing 100029, China;

3. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510000, China)

Abstract: Composite gas cylinders have the advantages of light weight, high strength, good corrosion resistance and fatigue performance, but the current national standards for composite gas cylinders are mainly based on macroscopic inspection, searching for internal and external surface defects. Inner defects of winding layer cannot be detected. In this paper, the influence of inner defects on composite gas cylinders was analyzed. Three kinds of testing methods for inner defects of winding layer were compared to provide reference for periodic inspection of composite gas cylinders.

Key words: composite gas cylinder; winding layer; inner defect; testing method

复合材料气瓶由于具有高强度、高质量密度、较好的抗腐蚀及疲劳等性能, 被广泛应用于呼吸器、CNG(压缩天然气)气瓶、储氢气瓶以及航空航天等领域。复合材料气瓶主要由内胆、缠绕层等组成, 其中内胆主要用于储存气体且是纤维缠绕的骨架, 缠绕层是气瓶承载压力的主要部件, 通常承担75%~95%的压力荷载。

现行的气瓶检验国家标准, 如GB/T 24161—

2009《呼吸器用复合气瓶定期检验与评定》、GB/T 24162—2022《汽车用压缩天然气金属内胆纤维环缠绕气瓶定期检验与评定》、GB/T 42626—2023《车用压缩氢气纤维全缠绕气瓶定期检验与评定》、ISO 11623: 2023 “Gas cylinders-composite construction-periodic inspection and testing”等, 对气瓶缺陷主要以宏观检查为主, 查找内外表面缺陷, 而缠绕层内部缺陷(如分层、脱黏、疲劳裂纹等)很难通过宏观检查发现。而缠绕层内部缺陷的存在会严重影响气瓶的承压性能与安全性, 现今, 还缺少缠绕层内部缺陷检测的国家标准。仅有T/CATSI 02012—2022《纤维缠绕复合气瓶红外热成像检测方法》、T/ZJASE 017—2022《车用压缩氢气铝内胆碳纤维全缠绕气瓶工业计算机层析成像(CT)检测方法》等团体标准采用红外热成像

收稿日期: 2024-04-28

基金项目: “氢能储运设备检验机构认可关键技术研究”项目(2022CNAS14); 广东省重点领域研发计划项目(2020B0404020004); “复合材料气瓶缠绕层无损检测方法研究”项目(2020CT01)

作者简介: 胡 昆(1993—), 男, 博士, 主要从事承压类特种设备检验与研究工作

通信作者: 胡 昆, 13533227907@163.com

检测方法、工业CT方法检测缠绕层内部缺陷。笔者在明确缠绕层内部缺陷对气瓶性能影响的基础上,对比分析了声发射检测方法、红外热成像检测方法、工业CT方法等缠绕层内部缺陷检测方法,提出了多方法结合的检测方式。

1 缠绕层的内部缺陷类型与影响分析

1.1 缠绕层的内部缺陷类型

复合气瓶在生产过程中可能存在微小空隙等问题,且在后续试验或使用过程中,亦可能受瓶体内压循环、内胆与缠绕层复合材料线膨胀系数的差异、弹性模量、延伸率差异以及外部冲击等诸多因素的影

响,缠绕层可能出现的内部缺陷类型有夹杂、空隙、基体开裂、纤维/基体脱黏、分层、纤维断裂等。

1.2 内部缺陷的影响分析

缠绕层内部缺陷的存在会严重影响气瓶的承压性能,对其进行相关研究时,当前内部缺陷的制作手段主要有外部冲击产生内部缺陷及预制内部缺陷。缠绕层内部缺陷的相关研究如表1所示,可见,内部缺陷的存在可导致水压爆破压力下降9%~69%,疲劳失效次数下降72.9%,即气瓶耐压性能、耐疲劳性能显著下降。因此,为了提高复合材料气瓶的安全性,需要开展缠绕层内部缺陷的检测方法研究。

表1 缠绕层内部缺陷的相关研究

作者	研究内容	研究对象	研究方法	影响分析
张国晋 ^[1]	跌落、冲击对气瓶应力的影响	铝内胆碳纤维缠绕气瓶	仿真模拟	跌落冲击可导致机体开裂和纤维断裂。气瓶以 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度垂直跌落,水压爆破压力降低15.7%。速度为 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的球体冲击气瓶,水压爆破压力降低17.5%。
WU等 ^[2]	冲击对气瓶的损伤机理	铝内胆碳纤维缠绕气瓶	仿真模拟	平头、半球头和锥头冲击,碳纤维缠绕层的破坏机制分别以压缩剪切、拉伸和穿刺为主。
赵兵等 ^[3]	跌落对气瓶疲劳寿命的影响	铝内胆碳纤维缠绕气瓶	试验	气瓶经跌落冲击后,疲劳失效次数从17 693次变为4 796次,下降了72.9%,疲劳寿命大大降低。
廖斌斌 ^[4]	低速冲击对气瓶极限承压性能的影响	塑料内胆碳纤维缠绕气瓶	仿真模拟	受7, 10, 15, 20, 30 J能量冲击后,气瓶水压爆破压力分别为34.5, 30.5, 23.5, 19.2, 11.6 MPa, 下降了9%, 19%, 38%, 49%, 69%。
魏雪 ^[5]	冲击对气瓶的损伤	塑料内胆碳纤维缠绕气瓶	仿真模拟	冲击能量达到50 J时,气瓶有17层出现基体受损,其中有4层发生纤维断裂,气瓶已发生严重破坏。
高兆江等 ^[6]	碳纤维缠绕层损伤对气瓶极限承压性能的影响	钢内胆玻璃纤维缠绕气瓶	试验+仿真模拟	仿真模拟:面积为 $250\text{ mm}\times 250\text{ mm}$ (长 \times 宽),深度为3 mm的体积性损伤,内胆应力几乎未变,缠绕层应力增加38.9%。试验:含面积为 $250\text{ mm}\times 250\text{ mm}$ (长 \times 宽)缠绕层损伤的缠绕气瓶,当损伤深度为3 mm时爆破压力下降9.9%,当损伤深度为6 mm时水压爆破压力下降20.9%。

2 内部缺陷的检测方法

对于复合材料气瓶缠绕层的内部缺陷,目视检测、射线检测、超声检测、渗透检测、涡流检测、微波检测等无损检测方法存在其适用范围和局限性^[7-8]。目视检测适用于宏观表面缺陷,精确度低,无法检测到内部缺陷;射线检测的影像重叠,使得缺陷评判困难;超声检测适用于匀质材料,不适用于非均匀的缠绕层;渗透检测仅适用于表面缺陷;涡流检测仅适用于导电材料的表面缺陷;微波检测可检出复合材料中的脱黏、分层、裂缝、孔隙等缺陷,但由于趋肤效应,不适用于检测导电性能较好的复合材料(如碳纤维缠绕层)内部缺陷。当前,针对复合材料气瓶缠绕层的内部缺陷,主要的检测方法有声发射方法、红外热成像方法、工业CT方法等。

2.1 声发射检测方法

声发射又称应力波发射,检测原理为:材料因受

力产生变形时,会由于释放能量而发射弹性应力波,利用仪器探测、记录并处理分析声发射信号,便可对损伤进行判断和定位。声发射技术就是利用以上原理来判断裂纹萌生和扩展的,是一种动态检测方法。

张璐莹^[9]、李伟等^[10]根据不同缺陷类型的模态变化规律,研究气瓶损伤声发射动态表征,采用相关向量机算法实现了基体开裂、分层损伤、纤维断裂等不同缺陷类型的准确识别,气瓶声发射信号模态分布曲线如图1所示。LIAO等^[11]、WANG等^[12]研究了70 MPa(承压)4型储氢气瓶水压试验、水压爆破试验过程中不同缺陷的声发射信号,采用 k 均值算法和小波包变换对声发射信号进行聚类,出现了基体开裂、纤维/基体脱黏、纤维断裂3种聚类,3种聚类信号的数量随着压力的增加而增加,表明损伤随压力的增加而累积和加重。沈书乾^[13]对冲击损伤后的碳纤维缠绕复合材料气瓶进行声发射监测,根据小

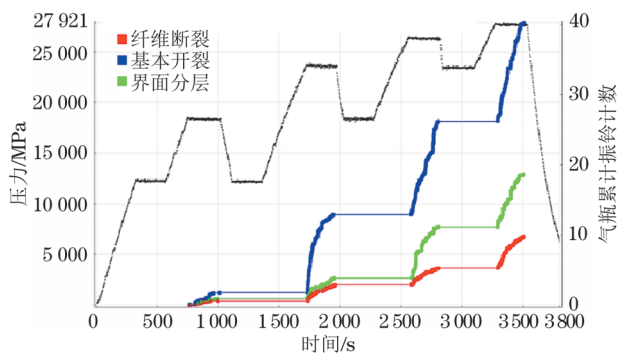
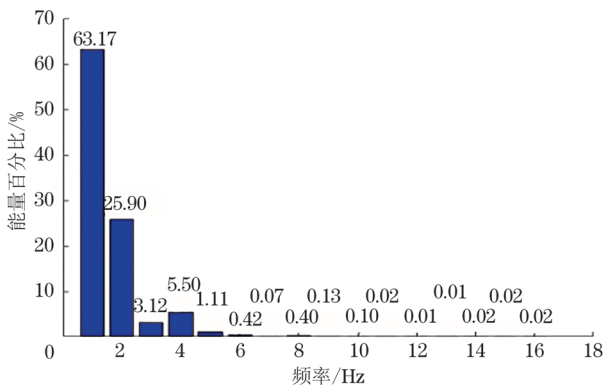
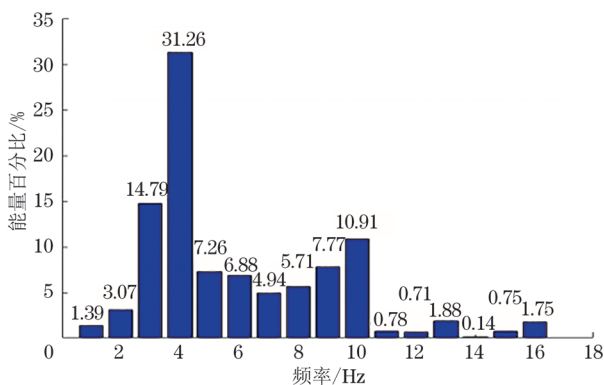


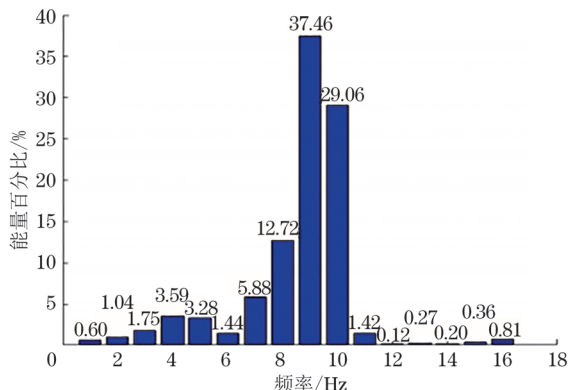
图1 气瓶声发射信号模态分布曲线



(a) 基体开裂小波包能谱图



(b) 分层损伤小波包能谱图



(c) 纤维断裂小波包能谱图

图2 气瓶声发射信号小波包能谱图

2.2 红外热成像检测方法

红外热成像检测方法通过检测物体热辐射的红外线特定波段信号,然后将该信号转换成可供视觉分辨的图像和图形来识别缺陷。该方法具有无接触、检测面积大、检测快、安全性高等优点,其原理是温度梯度的差异,故检测时需要对被测对象施加热激励,施加过程中通过温度场的变化来捕获温度梯度,通过缺陷处的结构不均性引起的温度梯度差异来识别缺陷。

热激励方式主要有外部热激励和内部热激励两种,热激励加热的均匀性会影响红外热成像检测效果。外部热源激励主要采用闪光灯等,内部热

波包能量谱识别出基体开裂、分层损伤、纤维断裂等类型缺陷,气瓶声发射信号小波包能谱图如图2所示。有研究表明,通过声发射信号趋势和累积可实现对复合材料气瓶缺陷的定性分析,但很难实现定量分析^[14]。同时,声发射检测方法不能对缺陷位置进行定位^[15]。

综上所述,声发射检测方法可实现基体开裂、纤维/基体脱黏、分层损伤、纤维断裂等内部缺陷的定性分析,但很难实现定量分析且不能定位缺陷位置。

源激励主要有温水注排、蒸汽吹扫、加压升温等方式。闪光灯作为外部热源激励时,由于其圆柱型筒体、两端弧面封头与光源的空间距离不同,靠近光源的母线易形成局部亮斑,存在明显的加热不均匀现象,检测效果一般^[16],且仅对近表面缺陷有一定的检出效果^[17]。温水注排作为内部热源激励时,加热均匀,不会出现局部亮斑,可以清晰发现缺陷,检测效果良好^[18]。蒸汽吹扫作为内部热源激励时(标准 T/CATSI 02012—2022《纤维缠绕复合气瓶红外热成像检测方法》采用该方式),加热较为均匀,缺陷明显,检测效果良好^[19]。然而,气瓶温度变化受蒸汽枪通气方向影响^[20],气瓶内部会产生不同的

气体回旋区域^[8],进而影响气瓶受热的均匀性。各标准中关于复合材料气瓶的工作温度、干燥温度的要求如表2所示,对于蒸汽温度高于国家标准规定的复合材料气瓶的工作温度、干燥温度时,应注意

防止温度过高影响气瓶的承压性能。加压升温作为内部热源激励时,加热最均匀,检测效果良好^[20]。但加压升温过程是带压检测,可与气密性试验^[21]相结合,对安全性提出了要求。

表2 各标准中关于复合材料气瓶工作温度、干燥温度的要求

标准	对象	工作温度/℃	干燥温度/℃
GB/T 24161—2009	碳纤维全缠绕铝合金内胆复合气瓶	—40~60	≤65
GB/T 24162—2022	金属内胆纤维环缠绕气瓶	—40~65	≤65
GB/T 42626—2023	纤维全缠绕气瓶	—40~85	≤70

在缺陷检测方面,薛彬^[22]、张宏鹏等^[23]通过仿真模拟研究得出以下结论:分层缺陷的面积越大、深度越浅、厚度越大,红外热成像检测更容易检出,对热激励的强度要求也越低。张宏鹏^[16]、彭泽军等^[19]开展了复合材料气瓶红外检测试验,清晰地发现了分层缺陷。刘彪等^[20-21]、卢军等^[24]通过试验发现缠绕层的分层、脱胶缺陷在红外热像图中均显示为低温区,脱胶区域的红外热成像结果如图3所示,原因是分层、脱胶缺陷处的空气导热系数 $[0.022\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$ 远小于缠绕层的空气导热系数 $[12\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$,阻碍了热量的向外传递。孔松涛等^[25]利用人工神经网络实现缠绕层缺陷的定位以及缺陷深度、面积的定量检测,缺陷深度、面积识别的最大误差分别约为7%和10%。何少鹏^[26]开展了碳纤维复合材料孔缺陷体积的红外热成像定量检测研究,得到的缺陷体积测量误差为3.6%~83.2%。标准T/CATSI 02012—2022中指出:红外热成像检测方法适用于物体的分层、脱黏、蜂窝结构积水、蒙皮锈蚀等类型缺陷的检测,能用于缺陷形状、大小、深度、涂覆层厚度的测量。

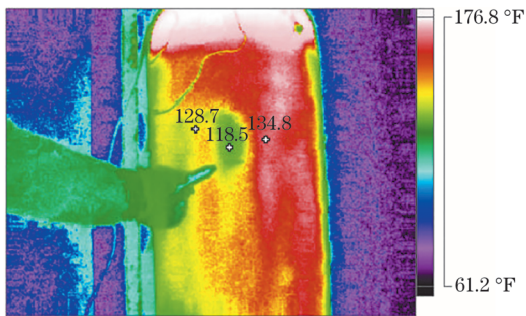


图3 脱胶区域的红外热成像结果

综上,红外热成像检测方法可实现分层、脱黏、蜂窝结构积水、蒙皮锈蚀等缺陷的定性与定量检测,但在定性检测中通过红外热像图无法分辨出缺陷类型;定量检测的准确性有待提升,缺陷大小、深度等的测量需要建立缺陷数据与温度梯度之间的非线性定量关系,

非线性定量关系的准确性取决于数据样本量。

2.3 工业CT方法

工业CT方法能在不损伤检测物体的条件下,以二维断层图像或三维立体图像的形式,清晰、准确、直观地展示被测物体的内部结构、组成、材料及缺损状况^[27],其基本原理是依据射线在被检测物体中的减弱和吸收特性获得图像。

工业CT方法在复合材料检测领域应用广泛,包括探测内部结构、评估制造过程、获取损伤失效演变等应用。在复合材料气瓶检测方面,雷闽等^[28]采用工业CT方法观察气瓶变形与内压的关系。朱延霆等^[29]开展了碳纤维复合材料气瓶的CT检测试验,结果表明该方法对夹杂、空隙、分层等缠绕层内部缺陷的检出效果好,可通过灰度值分辨缺陷类型。SHI等^[30]搭建了装载气瓶的工业CT检测装置,检出了最小尺寸为0.2 mm的分层缺陷。标准T/ZJASE 017—2022中指出该方法适用于缠绕层分层、夹杂等缺陷检测,可进行缺陷定性、定量检测。缠绕层分层缺陷的工业CT灰度图如图4所示。

综上,工业CT方法可实现夹杂、空隙、分层等内部缺陷的定性、定量检测,检测精度高,但检测成本高,耗时长,对检测人员的专业性与检测环境的安全性亦有要求。

3 检测方法之间的对比分析

在检出效果上,工业CT方法最优,其次是红外热成像检测方法,声发射检测方法只能对内部缺陷进行定性分析且无法定位缺陷位置,仍需要其他检测方法复检。

声发射、红外、CT三种方法的对比分析结果如表3所示,可见三种检测方法都存在局限性。所以,结合气瓶定期检验过程,考虑检测成本与时间,采用多方法结合的检测方式更为合理。多方法结合的检测方式可以互补地获取缺陷信息,提供更准确的缺

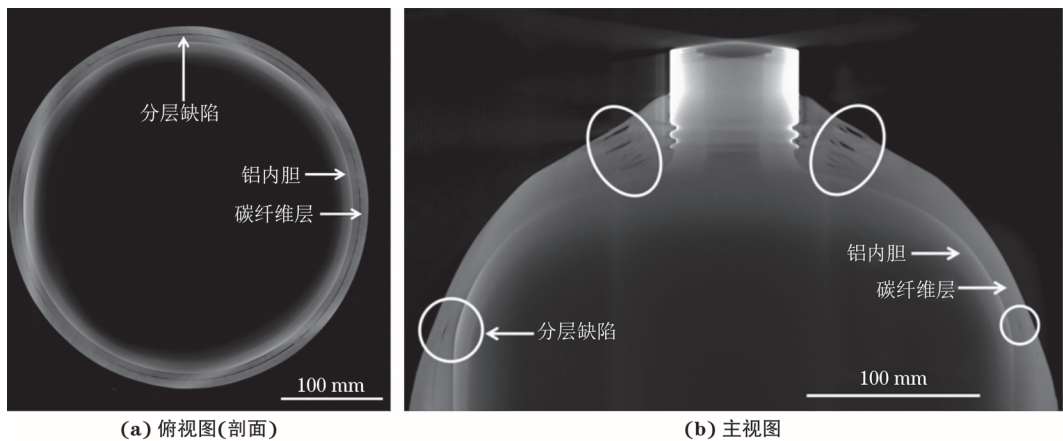


图4 缠绕层分层缺陷的工业CT灰度图

表3 声发射、红外、CT三种方法的对比分析结果

检测方法	分析类型	精确性	检测成本	检测时间	局限性
声发射检测方法	定性	低	较高	短	不能定位缺陷位置,仍需要其他检测方法复检。
红外热成像检测方法	定性、定量	一般	低	短	不能分辨缺陷类型,定量检测的准确性取决于缺陷数据样本量。
工业CT方法	定性、定量	高	高	长	成本高、耗时长,对人员专业性、安全性提出了要求。

陷定位与评估结果。LAINÉ等^[31]、MUNZKE等^[32]采用声发射检测方法与光学检测方法相结合的方式,监测4型储氢气瓶的水压爆破试验与疲劳试验过程,结果表明通过应变信号、声发射信号可以准确地识别出缺陷及其位置。TAPEINOS等^[33]基于声发射检测方法、数字图像相关法、光纤布拉格光栅法相结合的方式,研究了不同环境条件下4型多球形气瓶的力学性能与失效行为。

针对碳纤维缠绕层内部缺陷,采用红外热成像检测方法与工业CT方法相结合的检测方式,更有利于节约检测时间与提高检测效率。在气瓶干燥阶段可先采用红外热成像检测方法,确定是否存在内部缺陷及缺陷位置,初步分析缺陷形状、大小、深度。对确定位置的内部缺陷则可采用工业CT方法进行分析,从而获得更精确的缺陷信息。

4 结论

分析了复合材料气瓶的内部缺陷及其影响,对比了三种内部缺陷的检测方法,得出以下结论。

(1)缠绕层可能出现的内部缺陷类型有夹杂、空隙、基体开裂、纤维/基体脱黏、分层、纤维断裂等。内部缺陷的存在可导致气瓶耐压性能、耐疲劳性能的显著下降。当前研究尚未建立复合材料气瓶性能与缠绕层内部缺陷的定量关系,建议进一步开展缠绕层内部缺陷对气瓶性能影响机理的研究。

(2)声发射检测方法可实现内部缺陷的定性分

析,但很难实现定量分析且不能定位缺陷位置。红外热成像检测方法可实现内部缺陷的定性定量检测,但无法分辨缺陷类型,定量检测的准确性取决于缺陷数据的样本量。工业CT方法可实现内部缺陷的定性、定量检测,检测精度高,但检测成本高,耗时长,对人员的专业性、安全性均有一定要求。

(3)在检出效果上,工业CT方法最优,其次是红外热成像检测方法。结合气瓶定期检验过程,考虑检测成本与时间,可采用红外热成像检测方法与工业CT方法相结合的检测方式。该结论可为复合材料气瓶缠绕层的无损检测方案制定提供一定参考。

参考文献:

- [1] 张国晋. 纤维缠绕气瓶压力过载及冲击损伤行为研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [2] WU Q G, CHEN X D, FAN Z C, et al. Experimental and numerical studies of impact on filament-wound composite cylinder[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2017, 30(5): 540-549.
- [3] 赵兵, 徐维普, 李前, 等. 跌落冲击对储氢气瓶疲劳寿命影响的试验研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2019, 57(7): 47-49.
- [4] 廖斌斌. 受低速冲击的碳纤维全缠绕复合材料气瓶剩余强度研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [5] 魏雪. IV型储氢气瓶结构设计及冲击损伤研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2022.
- [6] 高兆江, 骆辉, 刘永久, 等. 含缠绕层缺陷大容积缠绕

- 气瓶安全性能与评定研究[J]. 压力容器, 2023, 40(5): 70-78.
- [7] 李倩倩, 李哲, 李炜. X-ray CT在纤维增强聚合物复合材料中的应用研究进展[J]. 中国材料进展, 2022, 41(7): 525-535.
- [8] 杨刚, 谭粤, 夏莉, 等. 复合材料气瓶缠绕层无损检测方法分析与研究[J]. 中国特种设备安全, 2019, 35: 72-76.
- [9] 张璐莹. 碳纤维复合材料损伤模态识别方法研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2020.
- [10] 李伟, 姜智通, 张璐莹, 等. 碳纤维复合材料损伤声发射信号模式识别方法[J]. 中国测试, 2020, 46(6): 121-128.
- [11] LIAO B B, WANG D L, HAMDI M, et al. Acoustic emission-based damage characterization of 70MPa type IV hydrogen composite pressure vessels during hydraulic tests[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(40): 22494-22506.
- [12] WANG D L, LIAO B B, HAO C Y, et al. Acoustic emission characteristics of used 70MPa type IV hydrogen storage tanks during hydrostatic burst tests[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(23): 12605-12614.
- [13] 沈书乾. 车载复合材料气瓶低速冲击声发射检测与评价技术研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2023.
- [14] ZHOU W, WANG J, PAN Z B, et al. Review on optimization design, failure analysis and non-destructive testing of composite hydrogen storage vessel[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(91): 38862-38883.
- [15] LI W B, LV H, ZHANG L J, et al. Experiment, simulation, optimization design, and damage detection of composite shell of hydrogen storage vessel-a review[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2023, 42(11/12): 507-536.
- [16] 张宏鹏. 复合材料气瓶损伤红外热成像检测方法实验研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2017.
- [17] ZHENG K Y, CHANG Y S, WANG K H, et al. Improved non-destructive testing of carbon fiber reinforced polymer(CFRP)composites using pulsed thermograph[J]. Polymer Testing, 2015, 46: 26-32.
- [18] 丁克勤, 张宏鹏, 周克印, 等. 复合材料气瓶分层缺陷的红外检测热激励研究[J]. 中国特种设备安全, 2017, 33(10): 27-31.
- [19] 彭泽军, 卢军, 霍臻, 等. 基于ABAQUS含分层缺陷塑料内胆纤维缠绕气瓶红外检测研究[J]. 压力容器, 2021, 38(1): 81-86.
- [20] 刘彪, 徐亮, 凌俊, 等. 塑料内胆纤维缠绕气瓶分层、脱胶缺陷的红外检测方法探究[J]. 特种设备安全技术, 2020(1): 21-22.
- [21] 刘彪, 彭泽军, 胡滨, 等. 纤维缠绕气瓶缠绕层红外热成像检测时机和影响因素的初步探究[J]. 特种设备安全技术, 2018(4): 6-9.
- [22] 薛彬. 复合材料气瓶疲劳损伤红外检测方法研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2016.
- [23] 张宏鹏, 丁克勤, 薛彬, 等. 复合材料气瓶分层缺陷的红外检测数值模拟[J]. 武汉工程大学学报, 2016, 38(6): 583-587.
- [24] 卢军, 刘彪, 彭泽军, 等. 含脱胶缺陷塑料内胆纤维缠绕气瓶热激励方式研究[J]. 压力容器, 2022, 39(8): 1-6, 39.
- [25] 孔松涛, 张润, 兰鹰, 等. CNG气瓶缠绕层缺陷的红外定位和定量识别及实验研究[J]. 红外技术, 2020, 42(2): 144-151.
- [26] 何少鹏. 基于红外检测的碳纤维复合材料孔缺陷体积定量检测研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [27] 王增勇, 汤光平, 李建文, 等. 工业CT技术进展及应用[J]. 无损检测, 2010, 32(7): 504-508.
- [28] 雷闽, 李文春, 梁勇军. 车用压缩天然气全复合材料气瓶缺陷分析[J]. 压力容器, 2010, 27(3): 56-61.
- [29] 朱延霆, 梁丽红, 张亚军, 等. 碳纤维复合材料气瓶的CT检测实验研究[J]. CT理论与应用研究, 2013, 22(4): 651-658.
- [30] SHI Y, TANG P, MIAO C J, et al. Research on defect detection of fully-wrapped carbon fiber reinforced hydrogen storage cylinder with an aluminum liner by industrial computed tomography[C]//Proceedings of ASME 2022 Pressure Vessels & Piping Conference. Las Vegas, Nevada, USA: ASME 2022 Pressure Vessels & Piping Conference, 2022.
- [31] LAINÉ E, DUPRÉ J C, GRANDIDIER J C, et al. Instrumented tests on composite pressure vessels (type IV) under internal water pressure[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(1): 1334-1346.
- [32] MUNZKE D, DUFFNER E, EISERMANN R, et al. Monitoring of type IV composite pressure vessels with multilayer fully integrated optical fiber based distributed strain sensing[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 34: 217-223.
- [33] TAPEINOS I G, RAJABZADEH A, ZAROUCAS D S, et al. Evaluation of the mechanical performance of a composite multi-cell tank for cryogenic storage: part II-Experimental assessment[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(7): 3931-3943.