

高性能复合材料在压力容器封头中的应用研究

庞 可, 杨 倩

(河南九天封头制造有限公司, 河南 商丘 476300)

摘 要 压力容器作为能源和化工等领域的核心设备, 其安全可靠与否直接关系到安全性能。鉴于传统金属封头在轻质、抗腐蚀等方面的局限性, 本文以高性能复合材料封头为研究对象, 选取三种不同的碳纤维 / 环氧树脂铺设方式, 以模压成形为主要研究手段, 研究不同铺层方式对其力学性能的影响。结果表明, 采用环形和纵向交错铺设方式, 配合最佳养护工艺, 可以获得 28.6 MPa 的冲击压力, 并能得到较为均匀的应力分布。

关键词 高性能复合材料; 压力容器封头; 铺层设计; 水压爆破; 成型工艺

中图分类号: TH49; TB33

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.003

0 引言

压力容器在石油、化工和航空航天等行业具有重要的应用价值, 其安全运行对人身和财产的安全起着至关重要的作用。封头是压力容器的主要承载构件, 其结构的完整性和耐久性是设计的首要问题^[1]。随着工业向大型化、高参数化方向发展, 传统金属封头在轻质、抗腐蚀等领域的应用越来越突出, 对新材料提出了更高的要求。高性能纤维增强复合材料因其高比强度和可设计性等优点而被广泛用于各类结构件, 是打破传统技术瓶颈, 实现压力容器轻质、高性能化的一条重要途径, 具有重大的理论和实际意义。

1 试验方法和设计

1.1 原材料与规格

本研究选用 T700 级碳纤维作为增强材料, 其具有拉伸强度高、弹性模量适中、断裂延伸率大等特点,

适用于压力容器类承压结构的制造。基体材料选用耐热性能和韧性良好的双酚 A 型环氧树脂体系, 该树脂体系具有粘度适中、浸润性好、固化收缩率低以及与碳纤维匹配性好等优点。为改善树脂与纤维的界面结合性能, 在树脂体系中添加适量的硅烷偶联剂作为界面改性剂^[2]。

1.2 封头试样制备工艺

对复合材料封头样品进行模压成形, 使其具有较好的成形精度, 并能有效地控制纤维含量。该模具由冲模、凹模及定位引导机构构成, 其型面粗糙度 $Ra \leq 0.4 \mu m$, 以保证成形后的封头表面平滑。根据封头的受力特点, 在封头的极孔边、过渡弧等应力集中部位, 对其进行局部加固。本研究拟采用三种铺层方案, 即方案 A (全环向铺层为主)、方案 B (环向与纵向交替铺层) 和方案 C (准各向同性铺层), 如表 1 所示。

表 1 复合材料封头铺层方案设计

铺层方案	铺层角度	铺层比例 / %	总层数	设计厚度 / mm
方案 A	90° (环向) 为主	75% 环向, 25% 轴向	24	6.0
方案 B	环向 / 纵向交替	55% 环向, 45% 轴向	24	6.2
方案 C	0° / +45° / -45° / 90°	各方向各 25%	24	6.1

铺装作业是在清洁的环境下进行的, 根据预先设定的铺铺次序, 将预浸料切割成薄片, 然后铺入模腔内, 并在 2 ~ 3 层铺片后再进行预压, 以减小层间空隙。铺装完毕后, 将模具合上, 放入油压机内加热、加压。将其硫化过程分为三个阶段: 升温、保温、保压及冷却。采用 1.5 °C / min 的升温速度, 130 °C 的硫化温度, 0.8 MPa

的硫化压力, 120 min 的保温时间, 冷却到低于 60 °C, 脱模。为了考察硫化过程中封头性能的变化, 设计三个不同的硫化工艺参数, 如表 2 所示。

1.3 试验方案设计

采用非破坏性测试 (超声波 C 扫描)、水压爆破 (加载速度 0.5 MPa/min)、电阻—应变测试和显微组织等

作者简介: 庞可 (1995-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 机械工程。

表 2 复合材料封头固化工艺参数

工艺编号	固化温度 /℃	固化压力 /MPa	保温时间 /min	升温速率 / (℃ /min)
工艺 I	120	0.6	90	2.0
工艺 II	130	0.8	120	1.5
工艺 III	140	1.0	150	1.0

手段，全面评价其机械性能^[3]。每一组采用 3 个平行样品，平均测试结果。检查封头的内部缺陷和壁厚分布情况，并对其进行爆破实验。在试验过程中，采用三个方向的应变花片，以 10 Hz 的频率进行数据采集，

并对各应力状态下的应变和应变计进行测试。

在爆破实验结束后，对破损部位进行切削采样，利用 SEM 对断口进行显微观测，分析纤维断裂、基体断裂和界面剥离等失效形式。利用金相显微镜对其横断面进行了显微组织分析，并测定了纤维的体积含量及孔隙度。根据相关标准对纤维的体积含量进行测定，采用图象分析方法对其进行检测^[4-5]。表 3 总结了测试的内容，测试条件和使用的准则。

1.4 试验质量控制与数据处理

为保障实验数据的可靠性，采用全流程质控措施：原材料入厂复验性能，预浸料树脂含量萃取法检测控

表 3 复合材料封头性能测试项目及方法

测试项目	试验方法 / 仪器	试样数量	测试标准 / 条件
超声 C 扫描	Omniscan MX2	全数	5 MHz 聚焦探头
水压爆破试验	爆破试验台	3 件 / 组	加压速率 0.5 MPa/min
应力应变测试	DH3820 静态应变仪	3 件 / 组	采样频率 10 Hz
纤维体积含量	硝酸消化法	5 个 / 组	GB/T 3366-2021
孔隙率测定	图像分析法	5 个 / 组	放大 200 倍
微观形貌观察	扫描电镜	5 个 / 组	加速电压 15 kV

制 ±2% 偏差；激光投影辅助铺层定位，固化过程温压实时监测；爆破试验前对试样外观、尺寸进行检测（见表 4）。

2 结果分析

2.1 无损检测与成型质量分析

超声波 C 扫描测试结果显示（见表 5），三种组合封头的总体内部整体良好，没有明显的致命缺陷。从缺陷的分布来看，环形纵向交错铺设（方案 B）的成形质量最好，其缺陷率为 3.2%；其次是方案 A（4.8%），最大的是方案 C（6.5%）。试验结果表明，适当的铺层角改变有利于树脂的流动性和密实性。

如表 5 所示，方案 B 封头实测厚度与设计值偏差

表 4 复合材料封头试样几何尺寸测量结果

试样组别	封头高度 /mm	极孔直径 /mm	直边段高度 /mm	平均厚度 /mm	厚度偏差 /%
方案 A	152.3	80.1	30.2	5.92	3.5
方案 B	151.8	79.8	30.5	6.15	2.8
方案 C	152.5	80.2	29.8	6.08	3.1
工艺 I 组	152.1	80.0	30.3	6.12	4.2
工艺 II 组	151.8	79.8	30.5	6.15	2.8
工艺 III 组	151.5	80.3	30.0	6.05	3.8

最小（2.8%）且精度最高。厚度分布呈顶部薄、边缘厚特征，此现象与树脂成型时向边缘流动相关。工艺 II（130 ℃ /0.8 MPa/120 min）制备的封头孔隙率最低（1.2%），优于工艺 I（2.1%）和工艺 III（1.8%），表明适宜温压条件可提高固化密度。

2.2 水压爆破性能分析

水力爆破实验结果显示（见表 6），铺层方式和养护方式对复合材料封头的承载性能有较大的影响。其中，环向和纵向环向交错铺设方式的最大爆破压力为 28.6 MPa，分别比 A 和 C 分别增加 13.0% 和 25.4%，说明在双向应力条件下，合理的环向纤维配比可以有效地提高承载能力。爆炸压力与纤维体积分数成正比，

表 5 复合材料封头无损检测与质量参数

试样组别	缺陷面积比例 /%	平均孔隙率 /%	纤维体积含量 /%	玻璃化转变温度 /℃
方案 A	4.8	1.8	58.3	128.5
方案 B	3.2	1.3	62.1	131.2
方案 C	6.5	2.2	55.6	125.8
工艺 I 组	5.3	2.1	59.2	122.6
工艺 II 组	3.2	1.3	62.1	131.2
工艺 III 组	4.1	1.8	60.5	133.5

表 6 不同铺层方案与固化工艺的爆破性能对比

试样组别	平均爆破压力 /MPa	标准差 /MPa	变异系数 /%	破坏起始位置	破坏模式特征
方案 A	25.3	1.2	4.7	极孔边缘	裂纹沿环向扩展，突发性破坏
方案 B	28.6	0.9	3.1	过渡圆弧区	局部纤维断裂后逐步扩展，有预兆
方案 C	22.8	1.5	6.6	多处同时	多裂纹同时扩展，破坏突然
工艺 I 组	24.5	1.4	5.7	极孔边缘 / 过渡圆弧	混合模式，无明显规律
工艺 II 组	28.6	0.9	3.1	过渡圆弧区	局部纤维断裂后逐步扩展
工艺 III 组	27.2	1.1	4.0	过渡圆弧外侧	纤维断裂为主，伴有分层

而过高（> 65%）则会降低材料的力学性能。在破坏形态方面，A 方案从圆弧区开始，B 方案从过渡段逐渐发展，而 C 方案则是同时在多个位置发生裂纹，情况更加复杂。在固化工艺中，工艺 II 的封头爆破压力最高（28.6 MPa），工艺 III 为 27.2 MPa，工艺 I 最低（24.5 MPa）。工艺 I 因固化不足导致基体与界面性能差；工艺 III 升温过慢，可能引起纤维屈曲。

2.3 应力应变发展规律

试验结果显示（见表 7），复合材料封头的变形可以划分为线性和非线性两个阶段。在压强比不超过 0.3

的情况下，所有点的应变均呈直线上升趋势，表明该结构已进入弹性变形阶段；当应变大于 0.3 时，局部区域的应变呈现非线性增长，显示局部存在的微裂缝，而在过渡弧的外侧及极孔的周边，由于应力的集中，导致较弱的区域。在应力比为 0.7 ~ 0.8 时，应变增长速度明显增加，预示着接近失效。

对比不同铺层方案，方案 B 应变分布最均匀（最大 / 最小应变比为 1.8），方案 A 为 2.3，方案 C 最不均匀（达 2.7），显示合理铺层可有效优化应力分布。环向与经向应变比值差异亦与铺层中纤维方向配置相符。

表 7 不同压力阶段各测点应变特征对比（方案 B，工艺 II）

测点编号	弹性阶段终点 应变 / $\mu\epsilon$	非线性起始 压力比	破坏前最大 应变 / $\mu\epsilon$	环向 / 经向 应变比 *	失效预警特征
S-01	2 850	0.42	8 650	1.32	应变增长平缓，无明显拐点
S-02	3 120	0.38	9 430	1.45	压力比 0.65 后增长加速
S-03	4 250	0.32	12 860	1.28	早期非线性，持续稳定增长
S-04	2 680	0.45	7 920	1.63	线性段长，后期快速增长
S-05	4 580	0.30	14 250	1.19	早期非线性，后期增速明显

（注：* 环向 / 经向应变比取压力比为 0.5 时的数值。）

通过对两种工艺的对比研究，在同等压力下，处理 II 制备的头材料具有更高的力学强度，同时具有更高的纤维体积含量和更好的界面黏结性能，可以更有效地传递载荷，发挥纤维增强效应。

3 结论

针对高性能复合材料在压力容器封头中的应用，通过系统实验研究发现：铺层结构是影响密封性能的关键因素，环形和纵向交错铺设可以提高其承载力，优化其应力分布。结果表明，在 130 ℃、0.8 MPa 范围内，可以得到较小的孔隙率和较高的纤维体积分数。

参考文献：

- [1] 刘汉邦. 压力容器封头几何结构对其极限承载能力的影响机制分析 [J]. 内燃机与配件, 2025(24):66-68.
- [2] 卢长安. 压力容器用封头制造工艺设计分析 [J]. 机械管理开发, 2024,39(12):292-294.
- [3] 丘铭军, 李新强, 范淑琴, 等. 大直径薄壁压力容器封头成形工艺与设备合理性的探讨 [J]. 重型机械, 2023(05):1-7.
- [4] 王冰冰, 林木, 孟祥瑞. 复合材料压力容器封头连接的建模及失效分析 [J]. 机械制造与自动化, 2022,51(05):88-90.
- [5] 蔡强, 赵晓宁, 李新田, 等. 纤维缠绕复合材料压力容器多型封头对比分析 [J]. 火箭推进, 2020,46(06):90-96.