

航天无内衬复合材料压力容器结构设计与制备

章 轩 王宇飞 王 昊 袁 杏 叶周军

(上海航天精密机械研究所, 上海 201699)

文 摘 随着航天领域竞争愈发激烈,国内外加大了压力容器“皇冠上的明珠”无内衬纤维缠绕复合材料压力容器(V型COPV)的开发力度,无内衬结构意味着必须实现复合材料层密封屏蔽/结构承载功能一体化设计,在材料性能和结构设计方面面临巨大挑战。本文针对结构设计进行系统性的梳理,综述了V型COPV结构设计的研究进展,主要从功能阻隔层、形貌、接口设计及不同分析优化方法进行了阐述,介绍了基于模块化设计理念的新型V型COPV构型,并对未来航天用V型COPV结构设计方面的发展进行了展望。

关键词 无内衬,复合材料压力容器,结构设计,优化方法,模块化设计

中图分类号:TB332

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2025.04.001

Design and Manufacturing of Liner-less Composite Pressure Vessel for Space Application

ZHANG Xuan WANG Yufei WANG Hao YUAN Xing YE Zhoujun

(Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201699)

Abstract As competition in the aerospace field intensifies, both domestic and international entities have increased their efforts to develop the “crown jewel” of pressure vessels—made of liner-less fiber-wrapped composite materials (V-type COPV). The liner-less structure necessitates an integrated design that combines the sealing/shielding function of the composite material layers with structural load-bearing capabilities, presenting significant challenges in terms of material performance and structural design. This paper systematically reviews the structural design of V-type COPVs, summarizes the latest research progress in their structural design. It focuses on functional barrier layers, morphology, interface design, and various analysis and optimization methods. The paper introduces a novel V-type COPV configuration based on a modular design philosophy and provides insights into the future development of structural design for V-type COPVs in the aerospace industry.

Key words Liner-less, Composite pressure vessel, Structural design, Optimization method, Modular design

0 引言

纤维缠绕复合材料压力容器(COPV)凭借其容质比高、安全可靠、抗腐蚀、耐疲劳等优点,在航天领域有着广泛的应用。COPV根据其功能特性可分为工作压力10~75 MPa,装备于运载火箭动力增压、卫星姿态调控等系统的高压气瓶(HPV),以及工作压力<1 MPa贮存低温液氢、液氧等燃料的液体贮箱(CCT)^[1]。随着航天航空技术发展,对装备的轻量化、可靠性要求日趋严苛,并提出了低成本、可多次重复使用的需求^[2]。压力容器根据发展历程和结构形式可分为5类。I型压力容

器为全金属结构,因其结构效率低、抗腐蚀及疲劳性能弱等缺点逐渐被COPV取代。II型压力容器在I型基础上,对筒体部分金属层减薄的同时,通过环向纤维对筒体部分进行补强达到减重目的。III型压力容器通过在薄壁金属内衬上纤维螺旋全缠绕,筒体部分环向缠绕增强的设计,进一步提升结构效率,降低金属内衬被腐蚀的风险。然而III型压力容器存在如下缺点:(1)大尺寸/薄壁内衬制造成本高,成型难度大,报废率高;(2)内衬与复合材料层为异质材料,在成型、工况条件下,力场、温度场的不均匀性极易引发内衬与复合材料层脱

收稿日期:2024-05-27

第一作者简介:章轩,1991年,博士,结构设计师,主要从事复合材料结构与成型工艺设计的工作。E-mail:564524318@qq.com

黏、屈曲失稳问题;(3)需解决内衬与存储介质相容性问题,不宜存储潮湿、腐蚀性气体,贮存氢气易发生“氢脆”结构失效^[3]。Ⅳ型压力容器采用高分子内衬取代了Ⅲ型压力容器的金属内衬,较Ⅲ型压力容器结构效率更高,耐疲劳性能更加优越,但在航天领域却鲜有应用,原因如下:(1)高分子内衬材料耐化学腐蚀性差,氢漏率较金属材料高3~6个数量级^[3-4],无法满足航天领域复合材料贮箱类氢漏率 $\leq 1 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot (\text{m}^3/\text{s})$,气瓶类 $\leq 1 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot (\text{m}^3/\text{s})$ 的标准^[5],且材料服役温度窗口窄,不适用于火箭发射及空间高低温交变环境;(2)内衬刚度低,成型、服役过程中极易发生屈曲失稳。V型压力容器采用无内衬纤维全缠绕结构形式,规避上述制约Ⅲ/Ⅳ型压力容器性能和服役场景的不利因素,在结构质量、成本和可靠性方面具有独特优势,在未来航天领域有着广阔的应用前景^[6]。

表1^[7]对上述5类压力容器的结构效率、制造费用和结构特点进行了比较,可以看出:I-Ⅲ型压力容器随着纤维复合材料层比例的增加,金属内衬承担载荷的功能逐渐弱化,主要起到密封介质的作用。Ⅳ型COPV中高分子内衬仅起到密封介质的作用,力学载荷由复合材料层承担,而V型COPV无内衬结构设计意味着必须实现复合材料层密封屏蔽/结构承载功能一体化,如何在保证结构效率的前提下提升抗渗漏性能是结构设计面临的重大挑战。值得注意的是,I-Ⅲ型COPV的接口与金属壳体是一体的,而Ⅳ/V型COPV的金属接口作为单独元件,在设计时需要考虑接口与高分子内衬(Ⅳ型)和复合材料层(V型)的连接强度与抗渗漏能力。本文根据V型COPV特点阐述整体结构及各组成部分的设计要点及分析优化方法。

表1 5类复合材料压力容器
Tab. 1 Five types of composite pressure vessel

类型	主要特征	容质比/ $\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$ (与Ⅰ型比较)	制造费用/time (与Ⅰ型比较)	复合材料层承 担载荷比例/%
Ⅰ型	全金属	1	1	-
Ⅱ型	金属内衬,筒体 纤维环向缠绕(轻15%~35%)	0.5~0.68 (轻15%~35%)	>1.5	约45
Ⅲ型	金属内衬 全缠绕	0.41~0.45 (轻44%~48%)	>3	约80
Ⅳ型	高分子内衬 全缠绕	0.25~0.39 (轻51%~56%)	>3.5	约99
V型	无内衬 全缠绕	比Ⅳ型轻 10%~20%	-	100

1 V型COPV结构设计

1.1 功能阻隔层设计

碳纤维复合材料(CFRP)在力学性能和环境耐受/稳定性方面优势明显,在COPV制造中应用最为

广泛。采用CFRP制造V型COPV无法回避其抗渗漏性能弱以及热膨胀性能与金属接口匹配性差、胶黏区在低温冲击下易脱粘的问题。可通过在结构中设计功能阻隔层,起到类似内衬的作用,在保证结构效率的同时,弥补CFRP的缺点。研究表明玻纤复合材料(GFRP)较CFRP具有更好的耐冲击性和抗渗漏能力^[8-9],采用GF细纱平纹织物制作的层合板较CFRP层合板氢漏率下降41.2%^[10]。UFUK等^[11]在水溶性芯模上首先通过湿法缠绕GFRP抗渗漏阻隔层,固化成型后在GFRP阻隔层表面缠绕固化CFRP力学承载层,制得的混杂纤维V型COPV样件在3 MPa的内压作用下表现出良好的气密性能。文献[12]中介绍通过设置一层或多层膜/毡富树脂层用于隔绝液氧的设计,在一定程度上起到类似金属内衬的效果,极大提高了低温液氧贮箱的抗渗漏能力。WEI等^[13]采用0.05 mm无针孔超薄铝箔夹层进行高阻隔设计,考虑到铝箔和CFRP层热膨胀不匹配,在两者之间增加柔性层或树脂膜进行协调改善,抗渗漏能力比复合材料提高15倍,这种兼具两种材料优势的超混杂纤维/金属层合板结构可运用至V型COPV设计中,但需要解决金属/复合材料层界面强度提升^[14]以及成型工艺问题。

1.2 形貌设计

筒型COPV是最常见也是应用范围最广的构型,由封头和筒体构成,筒段轴向为环向应力一半,因此具有各向异性特性的纤维增强树脂基复合材料(FRP)相较于各向同性材料在材料利用率上更具优势,筒段采用纵向层/环向层厚度接近1/2或采用54.3°螺旋缠绕能够最大化材料利用率。然而在封头段无法实现环向铺层,为了实现工艺制造封头段为变厚度、变角度结构,且为满足V型COPV密封功能,封头段不能出现基体破坏,结构设计面临巨大挑战。封头形貌与线型设计是V型COPV设计核心内容。

1.2.1 基于缠绕工艺的设计方法

根据缠绕线型可分为测地线、平面、准测地线三种类型,VASILIEV^[3]推导了测地线缠绕等张力封头(ID)、平面缠绕(PD)、准测地线缠绕(QD)均衡型缠绕等类椭圆封头控制方程。ID无须考虑摩擦力因素,而PD和QD设计过程中需满足不滑线条件,针对非测地线封头学者展开了一系列优化设计研究^[15-17]。蔡强等^[18]通过计算得出PD结构效率比ID效率更高,而ID的纤维受力更均匀,为了避免封头曲面的不连续性,同时考虑到设计加工的便捷性,宜采用测地线或平面缠绕椭球封头。文献[3]分析了极孔相对尺寸($r_0=r/R$)对非测底线缠绕COPV形貌的影

响规律, r_0 较小时, 上述三种封头形状接近, r_0 越大差异性愈发明显。COPV 根据极孔尺寸特点, 可分为等极孔和非等极孔结构, 对于非等极孔且长径比较小的 COPV, 不同极孔尺寸匹配的筒体螺旋缠绕角差异性会引发滑线、结构效率降低的问题。为兼顾整体结构效率和缠绕工艺性, 需根据 COPV 的尺寸要求选择合适的封头形貌和缠绕策略, 表 2^[3] 罗列了不同类型封头优选方案。

表 2 不同类型封头优选方案			
Tab. 2 Optimal solutions for different types of domes			
封头类型	长径比 (L/D)	极孔相对尺寸 r_0	适用条件
ID	-	-	常用于等级孔结构, 非等极孔情况下, 筒段非测地线缠绕
PD	<2.5	<0.2	极孔大小差异不宜过大
QD	>2.5	<0.3	常用于非等级孔结构, 极孔尺寸相差较大情况下, 筒段非测地线缠绕
ID+QD	>2.5	<0.5	常用于非等极孔结构

上述设计方法是建立在壳体薄膜假说和网格理论基础之上的, 该模型能够高效准确地预测仅受面内载荷形状规则的薄壁壳体力学行为^[3, 19-21], 然而, 基于网格理论的等张力封头设计旨在均衡纤维方向应力分布, 忽略了复合材料层受载发生横向/剪切破坏的情况, 封头存在泄露的风险, 因此该方法更适用于 III/IV 型具有内衬结构的 COPV 设计。文献[22]给出等应变封头控制方程, 封头段各区域的应变相等, 微裂纹萌生条件具有一致性, 更适用于 V 型 COPV 的无内衬结构设计。

另外, 封头/筒体过渡区及极孔/金属接口区域应力状态极其复杂^[23-24], 薄膜假说在此处并不适用。文献[25]中结合基于薄膜理论的 3D 模型和实验方法, 评估铺层顺序对子尺度容器试样的结构变形和破裂压力的影响。研究表明, 该方法能够预测圆柱形截面的力学响应, 而在筒体/封头过渡区, 实验结果和分析结果存在较大差异, 筒体与封头界面处曲率发生变化, 局部产生较大弯矩是导致该现象的主要原因。KUMAR 等^[26]通过数值模拟分析了不同封头高度对于 COPV 应力分布的影响, 结果表明随着封头高度的降低, 过渡区域层合板二次应力有增大的趋势, 分析原因是曲率变化速率增加, 导致该处的弯曲应力和平面剪切应力上升。NIMDUM 等^[27]采用数值模拟的方法研究了 COPV 轴向变形的非线性效应, 研究表明该现象产生的原因是金属接口在内压作用下产生较大的局部弯矩, 导致与复合材料层脱粘引起的。LIN 等^[28]通过 SEM 分析发现在筒体/封头过渡区域产生大量基体裂纹, 该区域在水压实验中检测到大量应力集中。综上, V 型 COPV 在上述

局部弯矩作用区域, 易发生基体断裂、界面分层破坏, 引发泄露失效, 因此考虑弯矩作用在 V 型 COPV 设计过程是必要的。

除此之外, 缠绕工艺决定了封头段厚度是持续变化的, 大壁厚 HPV 在封头段厚度变化较大, 实物封头高度偏离基于薄膜理论计算值较大^[5], 因此精确计算封头厚度有利于结构优化。另外, 极孔附近由于连续缠绕的工艺特性, 纤维在该处大量堆积, 易产生纤维架空、漂移等问题, 常采用扩孔技术改善上述问题^[29-30]。文献[31-34]比较分析了几种常见计算封头厚度的方法, 并基于二次公式法提出了数种扩孔工艺方案, 结果表明合理的扩孔工艺能够降低极孔附近厚度峰值, 并提高 COPV 的极限承载能力。

1.2.2 基于 AFP 的设计方法

随着热塑性预浸丝成型工艺及自动铺放技术 (AFP) 的发展, AFP 在 COPV 制造过程中也得到了应用。NASA 和波音公司采用 AFP 成型 5.5 m 级的 V 型 CCT, 除此之外国外已成熟掌握 AFP 成型 IV 型 HPV 技术^[35-36]。AFP 的成型过程是通过铺丝头将预浸丝按设计的工艺路径准确地铺放至芯模表面, 采用热烘枪、红外热源等加热设备铺放过程中可将热塑性预浸丝中基体熔融, 搭配冷却单元实现原位固化, 大大降低了生产成本和周期。铺丝头多功能模块化设计能够完成预浸丝裁断和重送, 极大提升材料的利用率。还可通过纤维转向技术实现变角度非测地线铺放 (VAT), 拓宽了 COPV 的设计空间^[37], 实现结构应力分布优化。DAGHIGHI 等^[38]利用 AFP 铺放路径可控、纤维可不连续铺放的技术特点, 通过均衡复合材料层厚度方向应力分布和封头形貌调控, 设计了一种无弯矩“超级椭球”结构, 并深入研究了热载荷作用下的无弯矩 COPV 结构设计。FAN 等^[39]给出了无矩椭球封头形貌的控制方程, 并通过数值模拟分析了不同封头高度与缠绕角度之间的关系, 数值分析结果表明, 采用无矩封头设计的弯曲载荷在封头/筒体过渡区较各向同性材料和测底线缠绕封头分别下降 13.7% 和 34.9%。上述方案为 V 型 COPV 设计提供了思路。如图 1 所示, 无矩封头在过

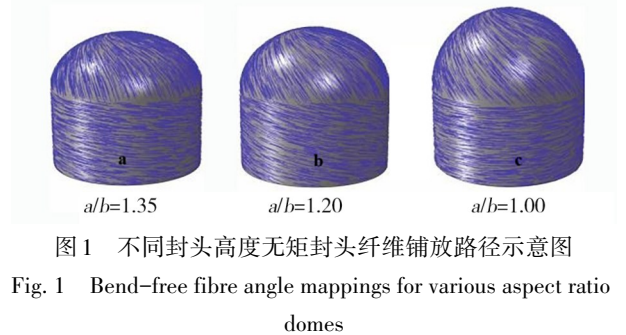


图 1 不同封头高度无矩封头纤维铺放路径示意图
Fig. 1 Bend-free fibre angle mappings for various aspect ratio domes

渡区域线型急剧变化,且该设计是基于无极孔结构,如何实现工程制造是当前面临的技术挑战。BELARDI等^[40]基于弯矩理论和边界效应,推导了V型COPV封头与筒体过渡区应力/应变解析解,结果与有限元分析结果吻合良好,分析比较了不同封头高度和准各向同性 $[90/0]_{2s}/[\pm 45]_{2s}$ 铺层结构特点,研究表明采用球形封头和准各向同性铺层能够有效降低过渡区域的弯矩载荷。

1.2.3 接口设计

Ⅲ/Ⅳ型COPV中接口作为内衬的一部分,可直接留存在壳体内部,而V型COPV的接口需要与水溶性材料或分体式金属元件制作成整体芯模(图2、图3),待FRP在芯模表面固化成型后,通过冲洗水溶性材料或拆卸分体式金属元件^[41-42],仅将接口保留在壳体内部。JONES等^[43]基于AFP技术开发了一种新型的接口植入技术,具体工艺如图4所示。



图2 PVP/石英砂水溶性芯模

Fig. 2 The sand water-soluble mandrel of PVP/quartz



图3 分体式金属芯模

Fig. 3 Metal mandrel with splitting structure

在接口设计过程中需要注意金属与FRP物理性能的差异性,导致接口在热/力载荷作用下极易与复合材料层发生脱粘^[11,27]引发泄露。文献[44]研究表明在内压作用下金属接口在极孔处产生接触压力,接口主要承受剪切载荷,其几何形状对COPV爆破强度影响较大。文献[3]给出了Ⅳ型COPV的接口设计及力学性能验证方法,在结构强度方面该方法适用于V型COPV的接口设计,但仍然需要考虑接口抗渗

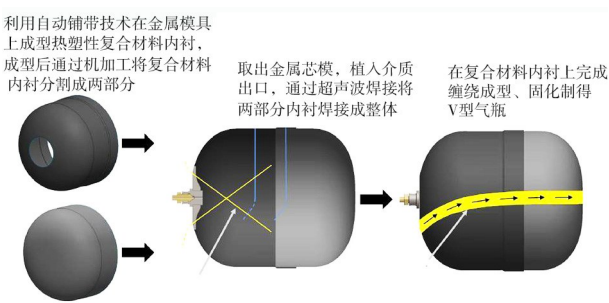


图4 热塑性复合材料分体芯模成型工艺过程

Fig. 4 Molding process of thermoplastic composite mandrel with splitting structure

漏结构的设计。本文收集整理了数种常见的V型COPV接口类型,其中HPV类多采用小口径螺纹接口(图5),在接口与复合材料层中一般需要设置阻隔层提升结构抗渗漏性能。图5(a)是最常见的接口类型,由于金属接口与复合材料层接触面积较小,连接强度不足,有发生“冲头”的风险,该结构形式常用于内压载荷不高COPV设计。图5(b)增加了金属接口与复合材料层的粘接面积,降低了脱黏风险,提高了封头段的抗渗漏能力,但是结构效率有一定下降。图5(c)金属接口与高分子封头采用自紧连锁设计,较前一种具有更高的结构效率。图5(d)的接口常用于高压厚壁COPV,该设计不仅在保证结构效率的前提下,解决了封头纤维堆积的问题,还能延长介质渗漏路径。

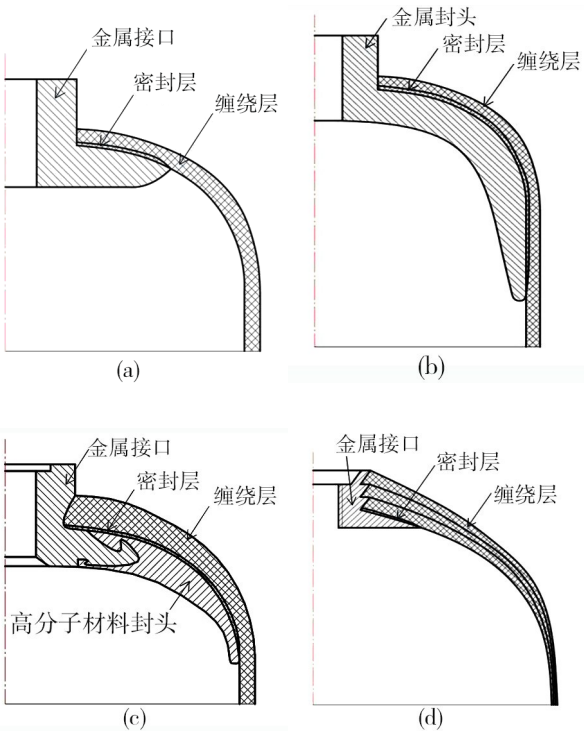


图5 常见V型HPV接口类型

Fig. 5 Common types of V-type HPV interface

对于低压CCT一般采用大开口法兰盘式接口(图6),金属接口与复合材料层之间需设置柔性过渡层提升低温条件下异质材料匹配度。图6(b)中两个金属接口元件通过螺接固定,在外侧包覆阻隔密封材料能够极大提升该区域低温抗渗漏能力。文献[7]采用在分子接口与复合材料层之间采用各向同性铺层GF平纹布增加接口与复材层的连接强度和整体抗渗漏能力。JOHNNY等^[45]设计了一种由带螺纹金属环、纤维束和套筒组成的加强接口,通过实验表明新型加强片接头较普通螺栓接头静态承载能力提升了100%,传递效率达到60%,且疲劳寿命得到大幅度提升,为未来COPV接口设计提供了新的设计思路。

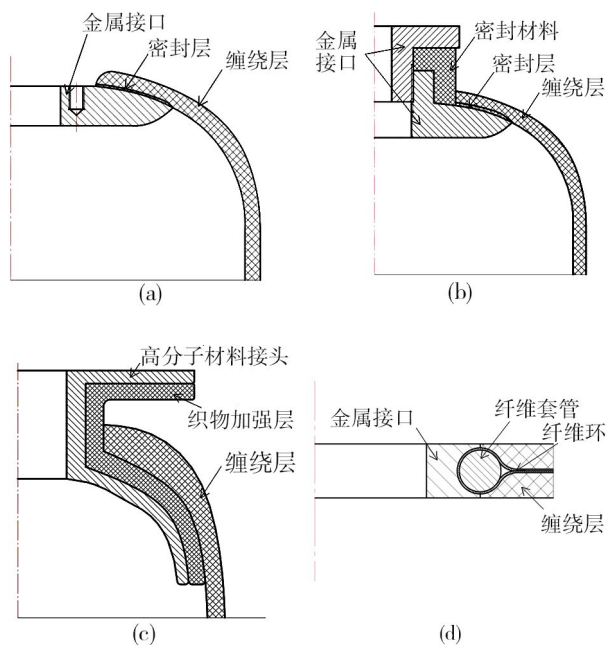


图6 常见V型低压CCT接口类型

Fig. 6 Common types of V-type low-pressure CCT interface

2 计算模型及结构优化技术

2.1 材料本构模型

COPV的失效压力是评判其承载能力的重要设计指标,构建能够准确描述FRP力学性能的本构模型和选用合适的失效判据是准确预测COPV失效压力的关键。早期研究人员^[46-47]基于各向异性材料弹性力学本构模型预测COPV发生“首层失效”时的压力,计算与实验结果偏差较大。近年来,许多学者^[48-53]采用基于持续破坏理论的渐进损伤模型描述Ⅲ/Ⅳ型COPV复合材料层非线性力学响应特征,预测得到的爆破压力与实验数据吻合度较高。该宏观模型能够描述材料在满足失效条件下发生的突变现象,然而对于损伤因子选取是唯象经验性的。采用高韧性树脂作为基体材料可提升V型COPV的抗渗

漏能力,为了准确描述其相较常规树脂更为明显的非线性力学特性,进一步提升V型COPV泄露失效压力的预测精度,KAUSHIK等^[22,54]利用极限能量释放率作为裂纹萌生和发展的判定条件,构建了基于裂纹演化机制的FRP材料渐进损伤模型,并通过双轴拉伸试验对模型中的参数进行拟合,通过该模型可准确描述应变与裂纹密度之间的关系,与实验结果误差小于5%。一些纤维热固/热塑共混树脂基复合材料观测到的塑性力学行为^[3]。SARBAYEV^[55]基于内时定理和流动理论提出了一种能够描述FRP塑性力学行为的本构模型,对于FRP在横向/剪切载荷作用下的应力-应变关系,相较渐进损伤模型预测精度有较大提升。为了描述低温试验观测到的CFRP材料力学性能的变化^[56],马帅^[57]基于黏弹性材料Maxwell本构模型,采用细观力学有限元法建立了低温下复合材料热力学本构模型,研究了纤维体积分数和微观排列对本构关系的影响,实现了热力学耦合作用下CCT的跨尺度层次分析。现阶段,随着有限元技术发展许多学者^[58-59]通过建立元胞细观模型分析材料在不同载荷条件下的力学性能,将分析结果赋予宏观材料模型,通过上述跨尺度分析方法能够高效精确地评估COPV不同工况条件下的性能。

2.2 失效判据

文献[60]整理了Ⅲ/Ⅳ型COPV分析中最常用的失效判据如Tsai-Wu, Tsai-Hill 和 Hoffman,研究表明V型COPV基体开裂和分层是形成泄露通道的主要原因^[61-63],上述失效判据在宏观层面识别层合板整体失效,但无法辨别其失效模式。采用Hashin, Christensen, Rotem, McCartney, Yamada-Sun, Hinton, Chang-Chang, Puck 和 Huang criteria等细观准则能够识别纤维脱粘、基体开裂和分层,可用于预测V型COPV的泄露失效强度。ROHAM等^[64]通过应力-应变相关/无关和破坏模式相关/无关对几种常见失效准则进行区分,基于利用上述失效判据对不同铺层制度的V型COPV“首层失效”强度进行了预测,并通过超声手段进行了验证,发现最大应力准则和Hashin失效准则精确性最高。作者还基于“末层失效”准则和Hashin失效判据计算了V型COPV的最终爆破压强,精度误差为13%。REN^[65]团队提出采用宏细观一体化方法对CCT进行分析,对比分析了宏观Hashin,改进宏观Tsai-Wu,细观最大应力,细观Mises和细观Hashin准则对于FRP层合板结构开裂载荷的预测精度,结果表明采用基于细观最大应力准则的宏细观一体化分析方法预测CCT结构泄露失效强度最为精确。

2.3 结构优化技术

随着计算机科技的发展,凭借计算机强大的算

力,结合有限元仿真技术(FEM)各类优化算法(OA),能够高效实现COPV最优结构策略制定和性能评估。常见的优化设计流程是选取COPV铺层角度、厚度、顺序、结构形貌等参数一种或几种作为设计变量,以结构质量、应力应变容限、抗冲击性能等作为目标函数,通过优化算法与有限元建模求解结果之间信息的相互传递,搜寻满足约束条件的最优解。文献[66]以爆破压力为约束条件,选取单层纤维厚度和极孔半径为设计变量,采用基因/模拟退火/人工免疫算法对COPV进行减重优化分析,结果表明人工免疫算法具有更好的搜索精度和收敛速度。文献[67]提出了一种基于机器学习的IV型COPV优化设计策略,利用高精度有限元模型训练人工神经网络,实现优化过程所需的结构损伤快速预测。采用FEM和OA组合优化还可以实现异形结构在复杂载荷条件下的结构优化设计,卜璠梓^[68]以结构减重为优化目标,采用下山单纯形法、模拟退火算法、遗传算法对复杂载荷条件下异形复合材料贮箱结构进行优化设计,并以轴向屈曲载荷作为优化目标,优化了复合材料层的铺层顺序,通过比较多种算法分析结果发现自适应模拟退火算法和下山单纯形法相结合的组合优化策略,可以更好地平衡优化结果和优化效率之间的关系。航天COPV会受到发射加速度、引擎振动、热冲击等载荷影响^[59],利用有限元仿真软件丰富的分析模块,能够实现结构多物理场耦合和瞬态载荷作用下的结构优化。耿发贵等^[69]基于瞬态动力学理论和遗传优化算法,给出了COPV最佳抗冲击损伤能力条件下的铺层顺序设计方案。

3 V型COPV新型模块化设计

通过前面的论述可以发现FRP各向异性无法在封头段发挥其优势,反而成为其缺点,而且实现V型COPV脱模对芯模的设计要求很高,同时将COPV与周围环境固定一直是困扰业界的难题,需额外通过柔性捆绑装置对其进行固定。研究人员提出了一种新型模块化设计方法用于解决上述问题。BRANDES^[70]最早提出利用热塑性复合材料的可焊性,通过注塑工艺成型短切纤维热塑性复合材料封头和筒体,并通过超声波焊接将封头、筒体、固定机构加工为整体(图7)。

文献[71]提出了一种通过连锁装置固定金属封头的设计概念,金属封头被镶嵌在固化成型的复合材料筒体端口,通过上端板与封头和筒体连接一方面可以防止增压阶段封头飞出,同时避免减压过程中封头被压入筒体,在筒体端口外表面进行环向加强,控制该区域的变形量(图8)。

上述两种结构封头与筒体连接强度较弱,无法

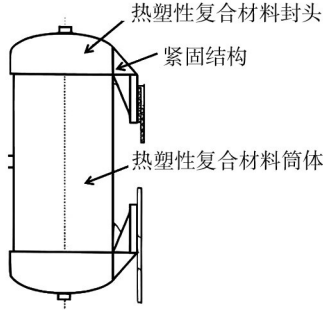


图7 短切热塑性复合材料V型COPV

Fig. 7 V-type COPV of chopped thermoplastic composite

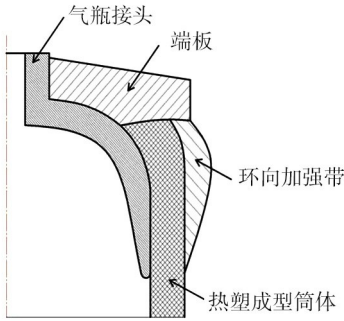


图8 带有连锁机构的模块化V型COPV

Fig. 8 Modular V-type COPV with chain mechanism

承载较大的轴向载荷,另一种设计方案是采用额外的连接元件承担轴向载荷。文献[72-73]中取消了封头结构,分别使用单向复合材料肩带[图9(a)]和金属拉杆[图9(b)]连接两端盖板,然而该方案存在结构复杂、空间利用率低的缺点。

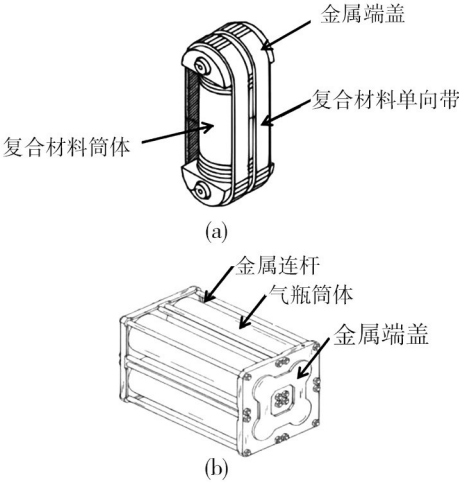


图9 无封头筒型COPV

Fig. 9 Cylindrical COPV without domes

ROBIN等^[74]采用直接沉积增材制造方法制作了超薄钛合金封头,采用湿法缠绕工艺和挂纱盘工装成型FRP筒段,封头和筒段采用胶接连接后,通过如图10所示连接元件固定,轴向载荷主要有外部金属连杆承担,该V型COPV用于贮存液氮在0.4 MPa工

况下无泄漏发生,在3 MPa内压下筒体发生破坏。这种结构设计的优点是兼具了金属和FRP材料的性能优势,最大化了材料的性能利用率,只需通过改变筒体长度即可满足不同体积、长度的COPV设计,该方案在超长COPV结构设计中具有独特优势。

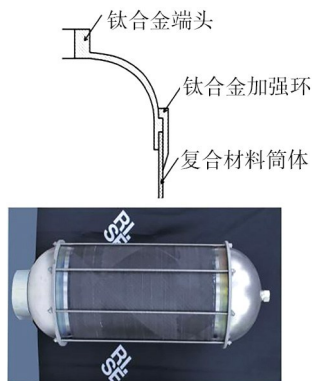


图10 钛合金封头FRP筒体V型COPV

Fig. 10 V-type COPV with FRP cylinder with titanium domes

以上介绍的几种方案仅适用于低压载荷工况,文献[75]介绍了一种具有凹型封头,容压极限为47 MPa的V型COPV,如图11所示。通过准各向同性铺层FRP成型凹型封头,筒体采用连续纤维热塑性复合材料,通过短切纤维复合材料制作镶嵌件,镶嵌件和筒体通过连接元件焊接为一体,连接元件能够将凹型封头在内压作用下承受的载荷传递到筒段。然而该设计方案的合理性仅通过有限元仿真验证,由于焊接工艺限制尚未实现原理样机制备。

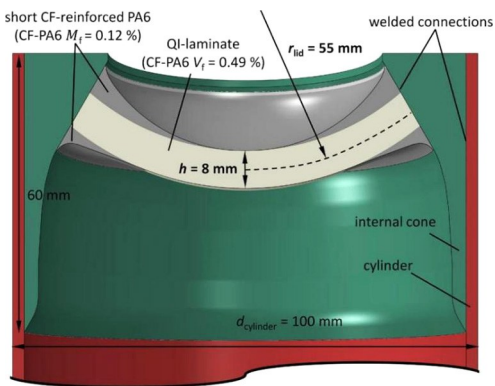


图11 新型凹型封头V型COPV

Fig. 11 New V-type COPV with concave dome

4 结语

V型COPV凭借其质量优势在未来航天领域有着相当广阔的应用前景,正朝着功能结构一体化、低成本、可重复使用方向发展。这项颠覆性技术需要完成在材料性能提升、结构优化设计、成型工艺方法方面开展系统性研究工作。在复合材料性能和结构成型技术快速发展的牵引下,相关结构设计和理念必须完成快速迭代更新。未来关于V型COPV

结构设计研究重点将集中在以下几点:

(1)根据HPV和CCT的结构功能特点,提出对应的设计标准规范;

(2)AFP技术材料利用率高,生产周期短,自动化程度高,未来在复合材料结构成型领域应用会越来越广泛,需要基于AFP技术特点开展结构优化方法创新工作,研究其工艺参数与结构性能之间的关系;

(3)随着计算机和人工智能技术的发展,需要充分发挥有限元分析和优化算法的优势,利用人工智能辅助,对V型COPV进行多尺度、高精度分析和优化提升,模拟超低温、高过载、振动、辐照等航天器发射/服役工况条件所带来的影响。

(4)复合材料连接技术的发展为V型COPV模块化设计带来了可能,根据不同材料、结构的特点,取长补短,兼具优势,实现COPV的低成本化和功能化结构一体化设计。

参考文献

- [1] 张辰威,张博明. 复合材料贮箱在航天飞行器低温推进系统上的应用与关键技术[J]. 航空学报, 2014, 35(10): 2747-2755.
- [2] ZHANG Chenwei, ZHANG Boming. Application and key technology of composites tank in space cryogenic propulsion system [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(10): 2747-2755.
- [3] ANDREWS S W. Space delivers composite liquid oxygen tank to AFRL [EB/OL]. http://www.space-travel.com/reports/Andrews_Space_Delivers_Composite_Liquid_Oxygen_Tank_To_AFRL_999.html. (2009-07-23).
- [4] VASILIEV V V. Composite Pressure Vessels—Analysis, Design and Manufacturing [M]. Blacksburg: Bull Ridge Publ., 2009: 704.
- [5] LAADEL N E, EL MANSORI M, KANG N, et al. Permeation barriers for hydrogen embrittlement prevention in metals—a review on mechanisms, materials suitability and efficiency [J]. Int. J Hydrogen Energy, 2022, 47(76): 32707-32731.
- [6] 张建宝,尚呈元,周宇,等. T800/607低温复合材料应用评价研究[J]. 复合材料科学与工程, 2020(2): 97-100.
- [7] ZHANG Jianbao, SHANG Chengyuan, ZHOU Yu, et al. Application evolution research on T800/607 cryogenic composite material [J]. Composites Science and Engineering, 2020(2): 97-100.
- [8] RYAN K, CRONIN J, ARZBERGER S, et al. Prediction of pressure cycle induced microcrack damage in linerless composite tanks [C]//47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference AIAA, Newport, Rhode Island, 2006, DOI: 10.2514/6.2006-2201.
- [9] WOJCIECH B, MICHAL B, MICHAL S. A novel design of a low-pressure composite vessel with inspection opening—

design, manufacturing and testing [J]. Alexandria Engineering Journal, 2024, 91: 442–456.

[8] KUTZ M. Handbook of Materials Selection [M]. USA: John Wiley & Sons International Rights, 1995: 335–358.

[9] 黄道明. 复合材料构件真空气密性能的提升技术研究[J]. 真空科学与技术学报, 2013, 33(8): 744–750

HUANG Daoming. The research of improving the vacuum air-proof performance of composite [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2013, 33(8): 744–750.

[10] 张栋. 低温贮箱用碳纤维/环氧复合材料的抗渗漏性能研究. [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021: 66

ZHANG Dong. Study on the Anti-leakage of Carbon Fiber/Epoxy Composites for Cryotank. [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021: 66.

[11] UFUK R, KARAKAŞ T, BILGEET K, et al. Cryogenic type-V pressure vessel design, manufacturing and testing [C]// 23rd International Conference on Composite Materials (ICCM23), Belfast, Ireland, 2024: 24.

[12] 王晓蕾, 王芳, 刘千立, 等. 一种防渗防漏的运载火箭全复合材料低温液氧贮箱的制备方法[P]. CN 108058406 A, 2021. 05. 21.

WANG Xiaolei, WANG Fang, LIU Qianli, et al. A method of manufacturing anti-leakage composite cryotank for carrier rocket [P]. CN 108058406 A, 2021. 05. 21.

[13] WEI R, WANG X, CHEN C, et al. Effect of surface treatment on the interfacial adhesion performance of aluminum foil/CFRP laminates for cryogenic propellant tanks [J]. Materials & Design, 2017, 116: 188–198.

[14] 武肖鹏. GFRP/铝合金超混杂复合材料层间力学性能改进研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.

WU Xiaopeng. Study on the Improvement of Interlaminar Mechanical Properties of GFRP/aluminum Alloy Super-hybrid Composite [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.

[15] 祖磊, 穆建桥, 王继辉, 等. 基于非测地线纤维缠绕压力容器线型设计与优化[J]. 复合材料学报, 2016, 33(5): 1125–1131.

ZU Lei, MU Jianqiao, WANG Jihui, et al. Pattern design and optimization of filament-winding pressure vessels based on non-geodesics [J]. Acta Materialia Composita Sinica, 2016, 33(5): 1125–1131.

[16] KIM C U, KANG J H, HONG C S, et al. Optimal design of filament wound structures under internal pressure based on the semi-geodesic path algorithm [J]. Composite Structures, 2005, 67(4): 443–452.

[17] LIANG C C, CHEN H W, WANG C H. Optimum design of dome contour for filament-wound composite pressure vessels based on a shape factor [J]. Composite Structures, 2002, 58(4): 469–482.

[18] 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(6): 90–96.

CAI Qiang, ZHAO Xiaoning, LI Xintian, et al. Comparative analysis on multi-type domes of filament-wound composite pressure vessels. [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2020, 46(6): 90–96.

[19] VULLO V. Circular Cylinders and Pressure Vessels [M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2014.

[20] GHESLAGHI R M, HOJJATI M H, DANIALI H R M. GDOUTOS E E, Ed. Analysis of composite pressure vessels. In fracture of nano and engineering materials and structures [C]// Fracture of Nano and Engineering Materials and Structures, Dordrecht, Netherlands, 2006, 117: 335–336.

[21] ZHANG Q, XU H, JIA X, et al. Design of a 70 MPa type IV hydrogen storage vessel using accurate modeling techniques for dome thickness prediction [J]. Composite Structure, 2020, 236: 111915–11922.

[22] K MALLICK, J CRONIN, K RYAN, et al. An integrated systematic approach to linerless composite tank development [C]// 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Austin, Texas, 2005: 17.

[23] ALMEIDA J H S, FARIA H, MARQUES A T, et al. Load sharing ability of the liner in type III composite pressure vessels under internal pressure [J]. J. Reinf. Plast. Compos., 2014, 33: 2274–2286.

[24] COSKUN T, SAHIN O S. Effects of geodesic dome trajectories on the specific strength of composite overwrapped pressure vessels: FE modelling [J]. Int. J. Hydrogen Energy, 2023, 48: 13669–13681.

[25] NEBE M, ASIJEET T J, BRAUN C, et al. Experimental and analytical analysis on the stacking sequence of composite pressure vessels [J]. Composite Structure, 2020, 247: 112429–11234.

[26] JOIS K C, WELSH M, GRIES T, et al. Numerical analysis of filament wound cylindrical composite pressure vessels accounting for variable dome contour [J]. Composite Science, 2021, 5(6): 1–15.

[27] NIMDUM P, PATAMAPROHM B, RENARD J, et al. Experimental method and numerical simulation demonstrate non-linear axial behaviour in composite filament wound pressure vessel due to thermal expansion effect [J]. Int. J. Hydrogen Energy, 2015, 40(38): 13231–13241.

[28] LIN S, YANG L, XU H, et al. Progressive damage analysis for multiscale modelling of composite pressure vessels based on Puck failure criterion [J]. Composite Structure, 2021, 255: 113046–113052.

[29] 吕广普, 刘洪上, 杜相荣. 大直径纤维缠绕水容器封头增强研究[J]. 纤维复合材料, 2015, 32(4): 8–11.

LYU Guangpu, LIU Hongshang, DU Xiangrong. Study on the reinforcement of the end closure of large diameter filament winding water treatment vessels [J]. Fiber Composites, 2015, 32(4): 8–11.

- [30] 胡俊,李鹏,吴耀楚. 螺旋缠绕厚壁压力容器封头段的线型调整[J]. 化工机械,2003,30(1):26-28.
- HU Jun, LI Peng, WU Yaochu. Linear adjustment of the head of a spiral wound thick-wall pressure vessel[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2003, 30(1): 26-28.
- [31] 刘培启,杨帆,刘岩,等. 扩孔工艺对复合材料气瓶强度的影响[J]. 压力容器,2018,35(12):26-33.
- LIU Peiqi, YANG Fan, LIU Yan, et al. Effect of reaming process on strength of composite gas cylinder[J]. Pressure Vessel Technology, 2018, 35(12): 26-33.
- [32] 矫维成,王荣国,刘文博,等. 纤维缠绕复合材料压力容器封头厚度预测[J]. 复合材料学报,2010,27(5):116-121.
- JIAO Weicheng, WANG Rongguo, LIU Wenbo, et al. Dome thickness prediction of composite pressure vessels [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2010, 27(5): 116-121.
- [33] 唐修卿,何钦象,李辅安. 基于微分几何纤维缠绕回转壳封头的厚度计算[J]. 宇航材料工艺,2010,40(4):27-29.
- TANG Xiuqing, HE Qinxang, LI Fu'an. Calculated thickness of filament winding ellipsoidal head based on differential geometry [J]. Aerospace Materials & Technology, 2010, 40(4): 27-29.
- [34] 许家忠,张殿鑫,栾胜罡,等. 纤维缠绕压力容器封头壁厚预测方法分析[J]. 玻璃钢/复合材料,2016(7):14-19.
- XU Jiazhong, ZHANG Dianxin, LUAN Shenggang, et al. Analysis of prediction method of head wall thickness of filament-wound pressure vessel[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2016(7): 14-19.
- [35] SCHÄKEL M, JANSSEN H, BRECHER C. Process analysis of manufacturing thermoplastic type- IV composite pressure vessels with helical winding pattern[C]//SAMPE neXus Proc. , Aachen, Germany, 2021, DOI: 10. 33599/nasampe/s. 21. 0557.
- [36] L MARK, L PATRICK. Development of advanced manufacturing technologies for low cost hydrogen storage vessels [C]//Development of Advanced Manufacturing Technologies for Low Cost Hydrogen Storage Vessels, USA, 2013.
- [37] A AIR, M SHAMSUDDOHA, B GANGADHARA PRUSTY. A review of type V composite pressure vessels and automated fibre placement based manufacturing [J]. Composite Part B: Engineering, 2023, 253: 110573.
- [38] DAGHIGHI S, ZUCCO G, ROUHI M, et al. Bend-free design of super ellipsoids of revolution composite pressure vessels [J]. Composite Structure, 2020, 245: 112283.
- [39] FAN H, LIU P Q, YAN K, et al. Momentless design of variable stiffness composite cylindrical vessels with elliptical heads [J]. Composite Structure, 2021, 271: 114165.
- [40] BELARDI V G, OTTAVIANO M, VIVIO F. Bending theory of composite pressure vessels: A closed-form analytical approach[J]. Composite Structures, 2024, 329: 117799.
- [41] XIAO Z, HARPER L T, KENNEDY A R, et al. A water-soluble core material for manufacturing hollow composite 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2025年 第4期
- sections[J]. Composite Structures, 2017, 182: 380-390.
- [42] MCCARVILLE D A, GUZMAN J C, DILLON A K, et al. Design, manufacture and test of cryotank components[OL]. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20170012407/downloads/20170012407.pdf>.
- [43] JONES B, LI M C. Liner-less tanks for space application- design and manufacturing considerations [C]// Presented at the 5th Conf. Aerospace Materials, Processes, and Environmental Technology, Huntsville, AL, USA, 2003: 16-18.
- [44] PRAMOD R, KRISHNADASAN C, SIVA S N. Design and finite element analysis of metal-elastomer lined composite over wrapped spherical pressure vessel[J]. Composite Structure, 2019, 224: 1-18.
- [45] JOHNNY J, BENNY E, FAHIMEH S. Bolt joint method for composite materials using a novel fiber/metal patch as hole reinforcement-improving both static and fatigue properties [J]. Composite Part B: Engineering, 2024, 269: 111105.
- [46] HWANG T K, HONG C S, KIM C G. Probabilistic deformation and strength prediction for a filament wound pressure vessel [J]. Composite Part B: Engineering, 2003, 34 (5) : 481-497.
- [47] COHEN D. Influence of filament wound parameters on composite vessel quality and strength [J]. Composite Part A: Applied Science and Manufacturing, 1997, 28(12): 1035-1047.
- [48] ZHENG J Y, LIU P F. Elasto-plastic stress analysis and burst strength evaluation of Al carbon fiber/epoxy composite cylindrical laminates [J]. Comput. Mater. Sci. , 2008, 42 (3) : 453-461.
- [49] LIU P F, ZHENG J Y. Progressive failure analysis of carbon fiber/epoxy composite laminates using continuum damage mechanics[J]. Mater. Sci. Eng. A, 2008, 485(1/2): 711-717.
- [50] XU P, ZHENG J Y, LIU P F. Finite element analysis of burst pressure of composite hydrogen storage vessels [J]. Mater. Des. , 2009, 30(7): 2295-22301.
- [51] WANG L, ZHENG C, LUO H, et al. Continuum damage modeling and progressive failure analysis of carbon fiber/epoxy composite pressure vessel[J]. Composite Structure, 2015, 134: 475-482.
- [52] LEH D, SAFRÉ P, FRANCESCATO P, et al. A progressive failure analysis of a 700-bar type IV hydrogen composite pressure vessel[J]. Int. J Hydrogen Energy, 2015, 40 (38): 13206-13214.
- [53] JU J, PICKLE B D, MORGAN R J, et al. An initial and progressive failure analysis for cryogenic composite fuel tank design[J]. J. Compos. Mater. , 2008, 42(21): 569-592.
- [54] KAUSHIK M, JOHN C, STEVEN A. Ultralight linerless composite tanks for in-space applications [J]. Space 2004 Conference and Exhibit AIAA, San Diego, CA, 2004, <https://doi.org/10.2514/6.2004-5801>.
- [55] SARBAYEV B S. On the theory of plasticity of

anisotropic solids with isotropic and kinematic hardening [J]. Computational Material Science, 1996(6):211–224.

[56] J SCHNEIDER, M DYESS, C HASTINGS, et al. Lightweight cryogenic composite over-wrapped pressure vessels for launch vehicle applications [C]//48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Honolulu, Hawaii, 2007, <https://doi.org/10.2514/6.2007-2148>.

[57] 马帅. 低温复合材料贮箱跨尺度层次化分析[D]. 大连:大连理工大学, 2013:82.

MA Shuai. Trans-scale Hierarchical Analysis of Cryogenic Composite Tank [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013:82.

[58] HAJ-ALI R M, MULIANA A H. A multi-scale constitutive formulation for the nonlinear viscoelastic analysis of laminated composite materials and structures [J]. International Journal of Solids and Structures, 2004, 41(13):3641–3690.

[59] BLASSIAU S, THIONNET A, BUNSELL A R. Micromechanisms of load transfer in a unidirectional carbon fibre-reinforced epoxy composite due to fibre failures. Part 3. Multiscale reconstruction of composite behavior [J]. Composite Structures, 2008, 83(03):312–323.

[60] LIU P F, CHUA J K, HOUA S J. Numerical simulation and optimal design for composite high-pressure hydrogen storage vessel: A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012(16):1817–1827.

[61] KUMAZAWA H, SUSUKI I, AOKI T. Gas leakage evaluation of CFRP cross-pylaminates under biaxial loadings [J]. J. Compos. Mater., 2006, 40:1–10.

[62] FLANAGAN M, GROGAN D M, GOGGINS J, et al. Permeability of carbon fibre PEEK composites for cryogenic storage tanks of future space launchers [J]. Composite Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 101:173–184.

[63] YOKOZEKI T, AOKI T, ISHIKAWA T. The effect of matrix cracks on gas permeability through CFRP laminates [J]. Adv. Compos. Mater., 2004, 13(3/4):227–236.

[64] ROHAM R, MOHAMMAD A T. Stochastic prediction of burst pressure in composite pressure vessels [J]. Composite

Structures, 2018, 185:573–583.

[65] REN M, ZHANG X, HUANG C, et al. An integrated macro/micro-scale approach for in situ evaluation of matrix cracking in the polymer matrix of cryogenic composite tanks [J]. Composite Structures, 2019, 216:201–212.

[66] LIU P F, XU P, ZHENG J Y. Artificial immune system for optimal design of composite hydrogen storage vessel [J]. Computational Materials Science, 2009, 47:261–267.

[67] LI F, CHEN X, XU P, et al. Optimal design of thin layered composites for type IV vessels: Finite element analysis enhanced by ANN [J]. Thin-Walled Struct., 2023, 187:110752.

[68] 卜璠梓. 异形复合材料贮箱结构设计与优化[D]. 大连:大连理工大学, 2014.

PU Panzi. Design and Optimization of Special-shaped Composite Tanks [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.

[69] 耿发贵, 李强, 宋薛思, 等. 基于冲击损伤的复合材料气瓶铺层顺序优化设计 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(2):777–786.

GEN Fagui, LI Qiang, SONG Xuesi, et al. Optimal design of laying sequence of composite gas cylinders based on impact damage. [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(2):777–786.

[70] BRANDES H. Behälter für kraftfahrzeuge [P]. DE Inventor Appl. 1032798 B4, 2003.

[71] FUNCK R. Druckbehälter und Verfahren zu dessen Herstellung [P]. DE Inventor Appl. 10246868 A1, 2002.

[72] TÄUBNER F. Druckbehälter in einfacher Bauform [P]. DE Inventor Appl. 102005006998 A1, 2005.

[73] O'BRIEN J A, HUBBS R, ROSTON G. Compact Hydraulic Accumulator [P]. USA WO 2008157327A1, 2008.

[74] ROBIN O, CHRISTOPHER C, FLORENCE M, et al. Design, manufacture, and cryogenic testing of a linerless composite tank for liquid hydrogen [J]. Applied Composite Materials, 2024(3):24.

[75] E DAHL, J S BECKER, C MITTELSTEDT, et al. A new concept for a modular composite pressure vessel design [J]. Composites Part A, 2019(124):10547554755475.