文章编号：1008－8857(2025)02－0116－08　**DOI**: 10.13259/j.cnki.eri.2025.02.007

复合材料气瓶关键参数优化设计

梁明曦，徐　琳，陈思源，李剑铮
（广州汽车集团股份有限公司汽车工程研究院，广东 广州 511400）

摘　要：高压气态储氢是目前车载储氢的主流技术路线。相对于金属气瓶，复合材料气瓶具有更高的储存密度和更好的安全性能。近年来，随着制造技术的成熟，复合材料气瓶的应用占比逐步提升。介绍了复合材料气瓶铺层的设计建模方法，通过变更封头形状和调整缠绕工艺，实现了气瓶有效容积的增加以及纤维用量的减少。经分析：参考经验公式设计的缠绕层厚度存在冗余，因而可参考特征位置的第一主应力结果对其进行缩减；因铺层顺序影响纤维受力，建议将螺旋缠绕层集中在靠近内胆内壁的区域；选用椭球形封头，降低平均缠绕角均有利于气瓶容积变化率的控制。该设计方法已通过单品试验验证，对同类结构的产品开发具有一定借鉴意义。

关键词：复合材料气瓶；储氢瓶；缠绕角；铺层顺序
中图分类号：TK91　　**文献标志码：**A

Optimization design of key parameters for a composite gas cylinder

LIANG Mingxi，XU Lin，CHEN Siyuan，LI Jianzheng
(Automobile Engineering Research Institute, Guangzhou Automobile Group Co., Ltd., Guangzhou 511400, China)

Abstract: High-pressure gaseous hydrogen storage is currently the mainstream technical solution for onboard hydrogen storage. Compared to metal gas cylinders, composite gas cylinders offer higher storage density and better safety performance. In recent years, with the maturation of manufacturing technology, the application proportion of composite gas cylinders has gradually increased. A design and modeling method for composite gas cylinder ply is proposed in this study. By changing the head shape and adjusting the winding process, increased effective volume of the cylinder and reducing fiber usage is achieved. Results shows that the winding layer thickness designed using empirical formulas contains redundancy and can be reduced based on first principal stress results at characteristic locations. The ply sequence affects fiber stress distribution, and it is suggested that helical winding layers should be concentrated near inner wall of the liner. Using ellipsoidal heads and reducing the average winding angle helps control the gas cylinder's volumetric change rate. This design method has been verified through single-product testing and

收稿日期：2024－07－23
第一作者：梁明曦(1991—)，男，工程师。研究方向：车载储氢技术。E-mail：liangmingxi@gacrnd.com

provides valuable reference for development of similar products.

Keywords: composite gas cylinder; hydrogen storage cylinder; winding angle; layer order

发展氢能是交通行业实现“低碳”目标的重要途径。在氢的储存方式上，高压、液化和金属氢化物储氢方案各具优势。对于车载应用场景，得益于较高的重量储氢密度和技术成熟度，使用复合材料气瓶作为核心元件的高压气态储氢是目前最主流的技术路线。对高强度碳纤维材料的依赖，以及冗长的生产制备过程，一直以来都是制约复合材料气瓶规模化生产的瓶颈。为此，国内外研究人员对复合材料气瓶缠绕线型设计和制造工艺开展了大量研究。

丰田公司对 Mirai 车型的储氢瓶缠绕线型与铺层顺序进行了优化，通过减少高角度螺旋缠绕的使用，并将环向缠绕层集中在复合材料层内侧，可在满足性能目标的前提下减少 20% 的纤维用量[1]。福特公司研究了不同牌号纤维对气瓶性能的影响。相比于使用传统的 T700 牌号纤维，使用 T720S 牌号纤维的产品能够在减少 3 kg 纤维用量的基础上提高约 4% 的储氢量[2]。阿贡国家试验室提出在层间插入补强层和使用内胆预缠绕技术 2 种方法对封头局部位置进行补强，减少了 10% 的纤维用量[3]。岐阜大学与村田机械共同开发了多元供给纤维缠绕工艺，实现了整层纤维同时铺放，从而有效改善了纤维纱带因交叠导致的性能下降，大幅提高了生产效率[4–5]。刘培启等[6]求解了不同滑线系数下的非测地线缠绕轨迹。经对比发现，0.2 左右的滑线系数下能够获得最高的预测爆破压力。张广哲等[7]参考 DOT CFFC 标准对铝内胆气瓶自紧工艺参数进行寻优，验证了自紧工艺对铝内胆气瓶承压能力的提升效果。

本文在介绍复合材料气瓶铺层的设计建模方法的基础上，通过变更封头形状和调整缠绕工艺，以期实现气瓶有效容积的增加以及纤维用量的减少。

1　铺层设计方法

复合材料气瓶结构如图 1 所示。气瓶内胆主要用于密封气体。经树脂基体增强的碳纤维缠绕复合材料层实现了 75% 以上的压力承载功能。设计时通常将复合材料层简化为依次铺放的层合板，并在建模过程中手动离散不同部位的缠绕角和缠绕厚度以体现各向异性。合理规划缠绕轨迹以获取不同坐标位置的缠绕角和缠绕厚度是方案设计的基础。

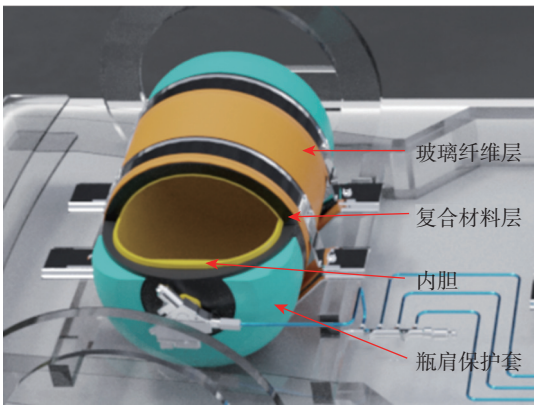


图 1　复合材料气瓶结构

Fig. 1　Structure of composite gas cylinders

1.1　缠绕角求解

气瓶筒身段是规整的圆柱面。缠绕过程中芯模转动速度与丝嘴移动速度之比恒定，缠绕角不发生变化。筒身段缠绕角 α 可通过式(1)、(2)获取，也可在稳定缠绕不滑线的条件下按需求调整。

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{D+b_{\mathrm{p}}}{D_{\mathrm{i}}}\right)\text{（螺旋缠绕角）} \tag{1}$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{b_{\mathrm{p}}}{\pi D}\right)\text{（环向缠绕角）} \tag{2}$$

式中：D为筒身段直径；D_{i} 为极孔直径；b_{p} 为纱带宽度。

在极孔位置，纱带与极孔边缘相切，缠绕角为 90°。纱带经过封头表面后缠绕角又恢复至与筒身段的一致，因此封头段缠绕角会随轴向位置和芯模转角发生改变。遵循式 (3)～(4) 的规律，利用数值计算工具求解方程[8]。

$$\frac{\mathrm{d}\alpha}{\mathrm{d}x}=\frac{\lambda\left[\left(1+r_0'^2(x)\right)\sin^2\alpha-r_0(x)r_0''(x)\cos^2\alpha\right]-\left(1+r_0'^2(x)\right)r_0'(x)\sin\alpha}{r_0(x)\left(1+r_0'^2(x)\right)\cos\alpha} \tag{3}$$

$$\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}x}=\frac{\sqrt{1+r_0'^2(x)}}{r_0(x)}\tan\alpha \tag{4}$$

式中：θ 为芯模转角；λ 为滑线系数；x 为沿回转体轴线方向特征点到长轴的距离；$r_0(x)$为回转体母线方程。

随着缠绕过程的进行，回转体外轮廓会随纤维堆叠发生改变，因此需要不断更新迭代才能获取精确的缠绕角。

1.2 缠绕厚度求解

气瓶筒身段厚度可以根据爆破压力要求，并结合纤维性能发挥半经验系数进行预测，如式 (5) ～ (7)[9]所示。

$$t=t_\alpha+t_\theta \tag{5}$$

$$t_\alpha=\frac{p_\mathrm{b}R}{2\sigma\cos^2(\alpha)k_1k_2k_3k_4} \tag{6}$$

$$t_\theta=\frac{p_\mathrm{b}R\left[2-\tan^2(\alpha)\right]}{2\sigma k_1k_2k_3} \tag{7}$$

式中：t 为缠绕层总厚度；t_α为螺旋缠绕层厚度；t_θ为环向缠绕层厚度；p_b 为设计爆破压力；R 为筒身段半径；σ 为纤维抗拉强度；k_1 为纤维强度发挥率；k_2 为纤维生产波动系数；k_3 为纤维体积分数；k_4 为纤维螺旋应力系数。

由于纤维丝束具有连续性，当它们经过封头的各平行圆时纤维横截面积处处相等，且与筒身段螺旋缠绕层横截面积一致。因此，可计算出封头段任意位置铺层厚度，即

$$t_r=\frac{R\cos(\alpha_r)}{r\cos(\alpha_r r)} \tag{8}$$

式中：t_r为半径为 r 的封头平行圆位置缠绕层厚度；α_r 为半径 r 处的缠绕角。

采用式 (8) 计算时，在极孔外约 1 个带宽位置会出现厚度极值。为避免纤维在同一位置堆积，缠绕中常对不同铺层的极孔大小进行动态调整。设计完成的气瓶铺层设计基础方案如图 2 所示。

1.3 对照组设计方案

本文选取对产品性能影响明显的平均缠绕角、纱带宽度和封头形状参数进行正交计算，并研究不同方案对铺层顺序和内胆材料性能的影响。设计方案及参数如表 1 所示。

2 试验验证

为验证按本文所提方案设计的产品与实物的一致性，在测试台架上使用点云扫描的方法对采用方案 1 设计的产品在不同水压下的过渡段外

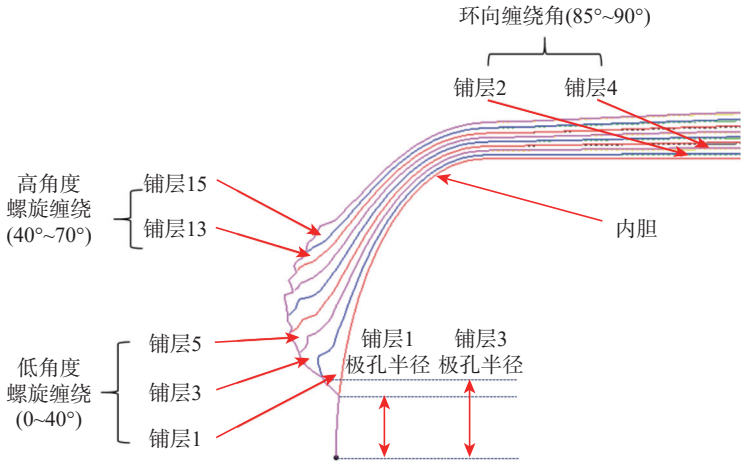


图 2 铺层设计基础方案

Fig. 2 Basic ply design scheme

表 1　设计方案及参数

Tab. 1　Design schemes and parameters

方案	平均缠绕角/(°)	纱带宽度/mm	封头短轴、长轴长度比值/%
1	35.0	10	100
2	35.0	10	75
3	35.0	10	50
4	42.5	10	100
5	42.5	10	75
6	42.5	10	50
7	35.0	20	100
8	35.0	20	75
9	35.0	20	50
10	42.5	20	100
11	42.5	20	75
12	42.5	20	50
13	在方案1基础上交换螺旋和环向层铺放顺序		
14	在方案1基础上将内胆材料由PA6更改为6061		

径 D_1、直筒段外径 D_2 和容积 V 进行测试。

该测试台架主要由压力控制系统、点云扫描采样系统两部分构成。测试时使用活塞式增压设备为介质增压，通过高压管路和进水阀将介质注入复合材料气瓶内。待介质压力达到设定压力后，将气瓶静置，待其恢复至室温，再进行下一个压力等级测试，直至瓶内介质压力达到目标工作压力 70 MPa。整个试验过程中，点云扫描设备从多个方向对提前布置在气瓶表面的测试点进行扫描，并根据反射光携带的方位、距离等信息拟合出气瓶外表面形状随压力的变化，将结果用于后续有限元模型的校准。测试台架与测试位置如图 3 所示。图 4 为过渡段、直筒段外径随压力的变化。图 5 为容积随压力的变化。

由图 4 可知，所设计的气瓶筒身过渡段外径计算值与实测值接近，直筒段外径计算值比实测值大 1 mm。加载至工作压力后计算得到的外径变化率大于实测值，差值约为 0.4%。由图 5 可知，在初始加压阶段容积变化存在一定的非线性。该特性是内胆材料局部屈服后的模量变化和层间间隙导致[10]。加载至工作压力后容积变化率实测值为 3.2%，计算值为 4.1%。试验结果验证了该模型与实物的一致性良好。

3　结果与分析

本文采用 Python 软件编程，通过导入芯模曲面、定义极孔大小和切点数目求解缠绕轨迹和堆叠厚度。前处理完成后，使用 Abaqus 软件中的 WCM 模块进行复合材料层建模，为各铺层中各单元格赋予各向异性的材料特征并完成加载，以便开展有限元计算。

3.1　第一主应力结果

内胆属于各向同性材料而纤维缠绕层属于各向异性材料。进行应力分析时，内胆可采用范式等效应力，而纤维缠绕层需采用其纤维丝束的拉

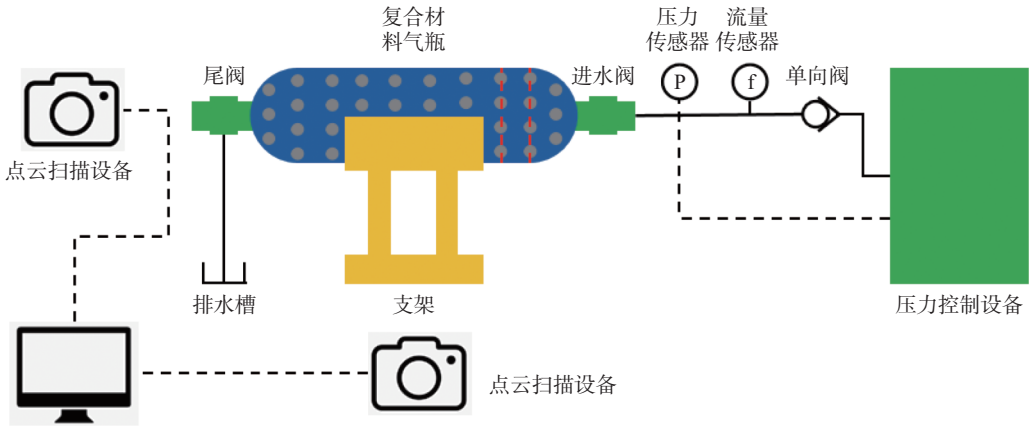


图 3　测试台架与测试位置

Fig. 3　Test rig and measuring positions

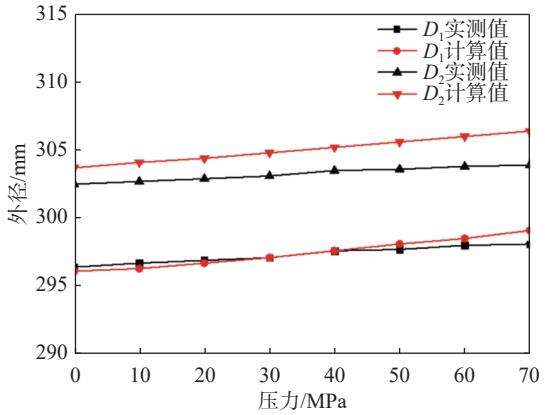


图 4 过渡段、直筒段外径随压力的变化

Fig. 4 Variation of outer diameter of transition section and straight section with pressure

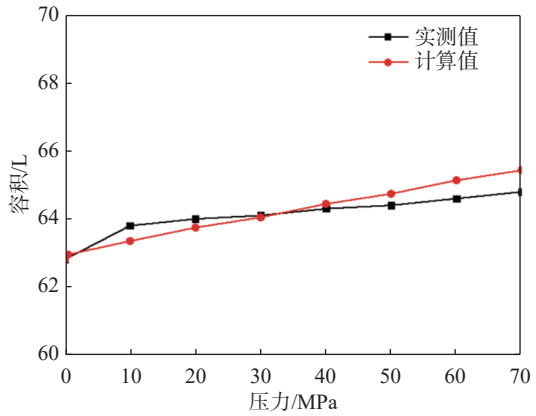


图 5 容积随压力的变化

Fig. 5 Variation of cylinder volume with pressure

伸方向的应力，即第一主应力进行受力分析[3,6]。本文选取 4 个特征位置进行应力对比：位置 1 位于直筒段非缩进部位；位置 2 位于直筒段缩进部位；位置 3 位于封头部位，在封头中心与第 8 螺旋缠绕层厚度峰值点连线方向；位置 4 位于封头部位，在封头中心与第 4 螺旋缠绕层厚度峰值点连线方向。特征位置能够反映局部力学特性，同时也是铺层中高应力水平区域。应力取值特征位置如图 6 所示。

封头形状对直筒段的纤维受力不产生影响，因此输出位置 1、2 的应力结果时选取方案 1、4、7、10、13、14 进行对比；铺层顺序对封头段的纤维受力不产生影响，因此输出位置 3、4 的应力结果时选取方案 1、2、3、4、7、14 进

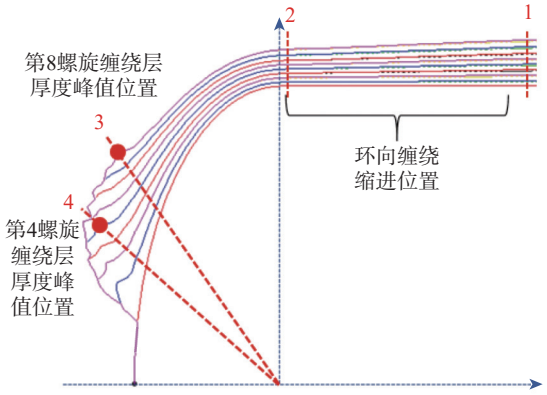


图 6 应力取值特征位置

Fig. 6 Characteristic stress evaluation locations

行对比。各方案的第一主应力计算结果如图 7 所示。

由图 7(a)、(b) 可知，直筒段最大第一主应力出现在方案 13 的首个铺层，约为 2 145 MPa。环向缠绕层纤维受力明显大于螺旋缠绕层，同类型缠绕层越接近内胆内壁，应力越大，而纤维受力受平均缠绕角和纱带宽度影响较小。相比于塑料内胆，金属内胆能够发挥一部分承载功能，从而改善筒身段复合材料层的受力情况。在铺层厚度不变的情况下，合理调换铺层顺序能够降低 5% ～ 10% 的筒身段最大应力。

由图 7(c)、(d) 可知，封头段最大第一主应力出现在方案 3 的最后一个铺层，约为 1 200 MPa。封头段铺层通常在内侧与外侧存在 2 个高应力区间，带宽越宽应力峰值越大。在不同的封头形状中，球形封头受力较为均匀，且金属内胆同样也能在一定程度上改善封头段复合材料层受力。除方案 3 封头段出现应力集中外，合理选择封头形状能够降低 8% ～ 10% 的封头段最大应力。

根据单向纤维缠绕成型的复合材料环形试样(NOL 环)测试结果，T700−12K 碳纤维与 5313A/B 树脂固化后抗拉强度为 2 210 MPa[11]。可见，所有方案中纤维均未达到拉伸破坏条件，因此在内胆应变允许的情况下，仍有一定的铺层厚度优化空间。

3.2 容积变化结果

现有加注协议中采用等效密度对车辆剩余氢气量S_{OC}进行估算，见式(9)[12]。

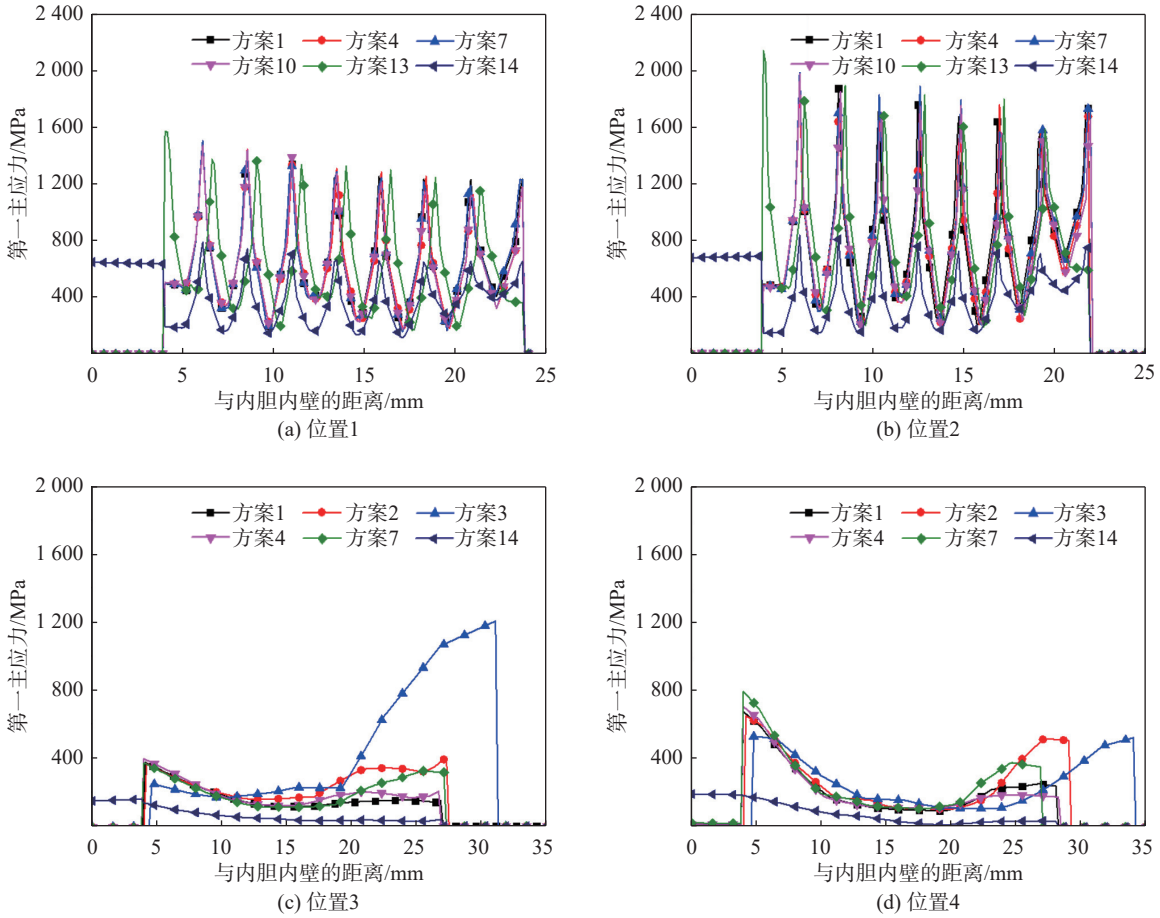


图 7　特征位置第一主应力计算结果

Fig. 7　First principal stress results at characteristic locations

$$S_{OC}=\frac{\rho_1}{\rho_2}\times 100\% \tag{9}$$

式中：ρ_1 为氢气在压力 p、温度 T 时的等效密度；ρ_2 为氢气在气瓶工作压力、15 ℃ 时的等效密度。

计算过程中忽略压力对气瓶容积的影响。对于塑料内胆复合材料气瓶，工作压力下容积变化率接近 5%，因此如不修正将对 S_{OC} 的估算精度产生较大影响。修正公式为

$$S_{OC}=\frac{\rho_1 V_1}{\rho_2 V_2}\times 100\% \tag{10}$$

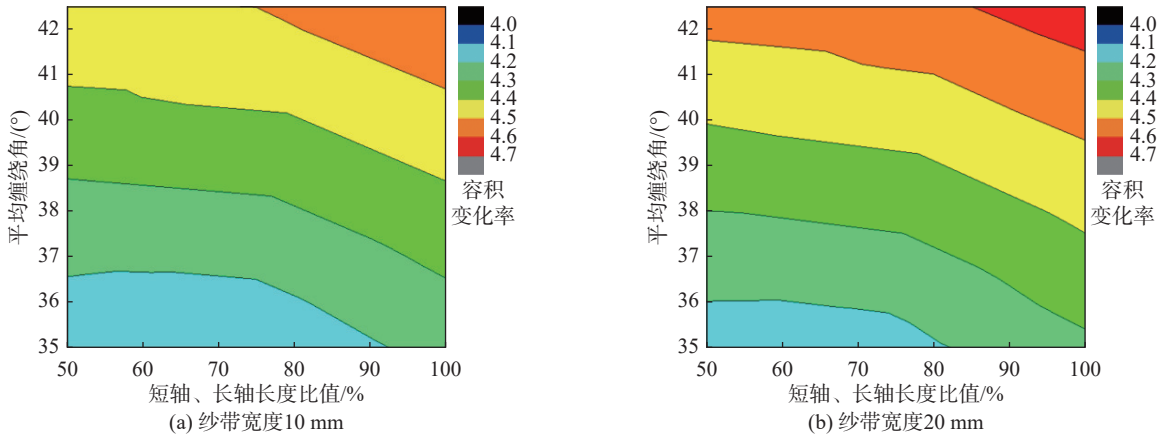
式中：V_1 为气瓶在压力 p 时的容积；V_2 为气瓶工作压力下的容积。

图 8 为不同纱带宽度下容积变化率随平均缠绕角和封头形状的变化。随着平均缠绕角的增加，螺旋缠绕层纤维对封头段的约束能力下降，导致容积变化率增加。而容积变化率对封头形状变化的敏感度较低，封头短轴、长轴长度比值在 50% ～ 80% 时，容积变化率几乎不随封头形状发生变化。

3.3　方案优化

经分析，原方案(方案 1)主要存在缠绕层过厚、纤维强度发挥率低等问题，且采用球形封头时相同的布置空间内产品有效容积小于采用椭球形封头时的值。优化方案(方案 15)针对现有问题进行了改进，尝试通过调整铺层顺序来改善纤维受力，并适当增加缠绕角来控制容积变化率。原方案、优化方案参数对比如表 2 所示。优化方案的优化效果如表 3 所示。原方案与优化方案应力对比如图 9 所示。

由表 3 可知，椭球形封头能够提升空间利用率。采用优化方案后，气瓶容积增加了 3.7%，且在去除承载能力较差的高角度螺旋缠绕层和最外层环向缠绕层后，纤维用量减少了 14.1%，但



(a) 纱带宽度10 mm (b) 纱带宽度20 mm

图 8 不同设计参数下气瓶容积变化率

Fig. 8 Volume change rate of gas cylinder under different design parameters

表 2 原方案、优化方案参数对比

Tab. 2 Parameters of original and optimized designs

方案	原方案	优化方案
气瓶规格/mm	310(直径)、1 400(长度)	305 (直径)、1 400 (长度)
直筒段厚度/mm	19.6	17.1
短轴、长轴长度比值/%	100	75
铺放顺序	交叠铺放	螺旋层集中在内侧
平均缠绕角/(°)	35	30

表 3 优化方案的优化效果

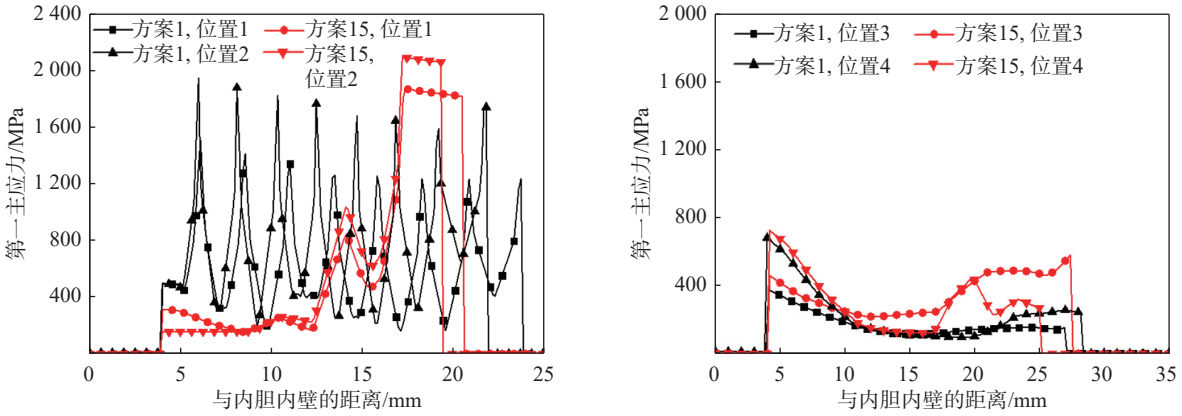
Tab. 3 Performance gains of the optimized design

方案	原方案	优化方案
容积/L	62.8	65.1
容积变化率/%	4.13	4.65
纤维用量/kg	29.8	25.6
纤维强度发挥率/%	88	95

容积变化率的改变并不明显；纤维强度发挥率得到了提高。由图 9 可知，铺层顺序调整后，应力较低的螺旋缠绕层集中在复合材料层内侧，外侧的环向缠绕层应力较原方案的有所提高，但仍未超出材料的许用范围。

4 结论

本文介绍了复合材料气瓶铺层的设计建模方法，提取了影响力学特性的关键设计参数。通过变更封头形状和调整缠绕工艺，实现了气瓶有效



(a) 直筒段应力 (b) 封头段应力

图 9 原方案与优化方案应力对比

Fig. 9 Stress comparison between original and optimal scheme

容积的增加以及纤维用量的减少。主要结论为：

(1)由于参考经验公式设计的缠绕层厚度存在冗余，可参考特征位置的第一主应力计算结果对其进行缩减。去除承载能力较差的缠绕层能够提高纤维强度发挥率，减少纤维用量。

(2)合理的铺层顺序能够降低纤维主应力。同样的缠绕参数下越接近内胆内壁应力越高。建议在工艺允许的前提下，将应力较低的螺旋缠绕层尽可能集中于靠近内胆内壁区域。

(3)选用椭球形封头可降低平均缠绕角，有利于气瓶容积变化率的控制。

受限于建模精度，本文采用的方法未考虑纤维交叠对结果的影响，且对封头段变角度、变厚度的离散处理也与实际产品存在差异，因此需要在后续的工作中进一步研究验证。

参考文献：

[1] YAMASHITA A, KONDO M, GOTO S, et al. Development of high-pressure hydrogen storage system for the Toyota “Mirai”[C]//Detroit: SAE 2015 World Congress & Exhibition. SAE International, 2015.

[2] JOHNSON K, VEENSTRA M, GOTTHOLD D, et al. Advancements and opportunities for on-board 700 bar compressed hydrogen tanks in the progression towards the commercialization of fuel cell vehicles[J]. SAE International Journal of Alternative Powertrains, 2017, 6(2)：201－218.

[3] ROH H S, HUA T Q, AHLUWALIA R K. Optimization of carbon fiber usage in type 4 hydrogen storage tanks for fuel cell automobiles[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(29)：12795－12802.

[4] UOZUMI T, OHTANI A, TANIGAWA M, et al. Non-crimp tubular preforming with automation system and high productivity[C]//20th International Conference on Composite Materials. Copenhagen, 2015.

[5] HYODO T, KANEMITSU Y, UOZUMI T, et al. Mechanical properties of CFRP pipes made by multi filament winding method (MFW)[C]//20th International Conference on Composite Materials. Copenhagen, 2015.

[6] 刘培启, 杨帆, 黄强华, 等. T700 碳纤维增强树脂复合材料气瓶封头非测地线缠绕强度 [J]. 复合材料学报, 2019, 36(12)：2772－2778.

[7] 张广哲, 王和慧, 关凯书. 碳纤维缠绕储氢瓶的有限元自紧分析和爆破压力预测 [J]. 压力容器, 2011, 28(8)：27－34.

[8] 赫晓东. 先进复合材料压力容器 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.

[9] 祖磊, 张桂明, 张骞. 先进复合材料成型技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2021.

[10] RAMIREZ J P B, HALM D, GRANDIDIER J C, et al. 700 bar type IV high pressure hydrogen storage vessel burst - simulation and experimental validation[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(38)：13183－13192.

[11] 宋春雨. 基于高效建模系统的纤维缠绕储氢瓶扩孔工艺优化研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022.

[12] SAE. SAE J2601 Fueling protocols for light duty gaseous hydrogen surface vehicles[S]. SAE, 2020.

信息

我国风光装机首超火电

4 月 25 日，国家能源局发布风电光伏装机数据。2025 年一季度，我国风电光伏发电合计新增装机 7 433 万 kW，累计装机达到 14.82 亿 kW(其中风电 5.36 亿 kW，光伏发电 9.46 亿 kW)，首次超过火电装机(14.51 亿 kW)。未来，随着风电光伏新增装机持续快速增长，风电光伏装机超过火电将成为常态。

一季度，风电光伏合计发电量达到 5 364 亿 kW·h，在全社会用电量中占比达到 22.5%，较 2024 年同期提高 4.3 个百分点(带动非化石能源发电量占比达到 39.8%，同比提高 4.8 个百分点)。受风电光伏快速增长并叠加一季度全社会用电量同比增速较低(2.5%)因素的影响，风电光伏合计发电量较 2024 年同期增加 1 110 亿 kW·h，大幅超出全社会用电量增量(582 亿 kW·h)。

（王　波）