

复合材料高压气瓶的碳纤维缠绕设计和 ANSYS 分析技术

刘志军 胡亮 聂依昕 陈雕 杨杰

西安向阳航天材料股份有限公司 陕西西安 710000

DOI:10.12238/ems.v7i9.15260

[摘要] 本文分析了复合材料高压气瓶缠绕的碳纤维设计, 结合网格理论和 ANSYS 有限元方法, 建立了基于优化缠绕线型和张力递减控制的缠绕设计方法。通过对螺旋缠绕与环向缠绕组合的线型分析, 探讨筒体和封头各区域强度分布对封头最佳缠绕角计算、采用薄膜理论获取复合层厚度和爆破压力的映射关系。基于 ANSYS 建立含有金属内衬和碳纤维复合层的多层结构模型, 采用 Shell191 单元模拟复合材料的正交各向异性性能, 并通过对缠绕张力、层间剪切应力对疲劳寿命影响的分析, 得到了合适的缠绕张力制度为 70~0.5N 递减式张力, 56L 气瓶的设计爆破压强可以达到 95MPa, ANSYS 仿真结果和爆破试验结果差值在 3.2% 以内, 证明了对螺旋缠绕层切根位置进行优化, 避免了应力集中现象发生的可行性, 为高压储氢容器的轻量化设计提供了技术依据。

[关键词] 复合材料高压气瓶; 碳纤维缠绕设计; ANSYS 有限元分析; 网格理论; 爆破压强优化; 缠绕线型优化

引言

随着车载式高压气瓶氢能储运技术的更新, 提升载气容量和使用安全性迫切需要采用碳纤维复合材料替代传统钢制气瓶。而第三代车载式铝内胆全缠绕的碳纤维增强气瓶 (CNG-3) 可通过改进纤维缠绕工艺达到提高比强度 40% 以上的改进目标, 但碳纤维材料呈现的各向异性的应力状态给封头与圆筒之间区域 (即过渡区域) 的结构安全性提出了严峻挑战, 已有文献中几乎都是单因素影响研究, 尚未见针对全缠绕铝内胆碳纤维增强气瓶封头结构 (即过渡区域) 的多参数耦合的工艺与结构性能的复合协同效应研究^[1]。为此, 本文跳出经验设计的思路, 建立基于网格理论、Tsai-Wu 强度准则和 ANSYS 中的复合材料模块的复合材料工艺-结构分析全流程新思路, 通过解决单体气瓶缠绕过程、张力递减过程和封头结构各部件间的界面不均匀应力分布、缠绕层间的剪切失效等问题, 最终形成全参数耦合的新型高压气瓶典型产品, 为指导新型高压气瓶的标准化产品设计提供理论基础。

一、金属内衬复合材料气瓶碳纤维缠绕设计方法

1、缠绕线型

碳纤维缠绕线型作为复合材料高压气瓶结构设计中最为关键的部分, 不仅影响缠绕纤维在芯模上的排布规律, 同时也决定着复合材料高压气瓶的结构性能、纤维利用率及缠绕工艺可行性。复合材料高压气瓶线型设计包括确定线型原则、测地线缠绕的曲线与成形与控制, 缠绕线型的原理根据材料性能、气瓶几何结构尺寸及确定的性能指标等需求综合考量。测地线缠绕是最为常见的复合材料高压气瓶缠绕方式,

缠绕线型的起始条件为最短路径原理, 缠绕曲线所包含的纤维上所受到的张力分布均匀且稳定, 且缠绕线型在气瓶曲面上的轨迹能够满足一定的数学关系即 $\sin \alpha / r$ 为常数 (式中 α 表示缠绕角, r 表示测地曲率半径), 当缠绕曲线在气瓶封头段时能够达到最佳效果, 但非测地线在气瓶筒身段时表现出了比较优异的性能优势, 例如测地线非测地线缠绕的纤维曲率半径差别可使非测地线缠绕的环向强度有所提高, 非测地线缠绕方式在芯模的筒身段内壁上缠绕后可达到更加均匀的缠绕纤维, 芯模结构稳定, 能够使复合材料高压气瓶结构具有较强的稳定性。线型是通过缠绕机运动学参数确定的, 即主轴旋转角速度 n 、导丝头的运动速度 v 、缠绕角 α 决定的线型, 其中缠绕线型 α 值为 $\tan \alpha = (v / (\pi * D * n))$ (D 为芯模直径)。针对现实的设计应用, 为最佳达到缠绕效果, 需根据实际的工艺参数及材料的特性进行多坐标联动精确控制^[2]。

2、缠绕角计算

缠绕角 α 是纤维线迹与芯模轴线的夹角, 是复合材料高压气瓶设计的关键设计参数。缠绕角的选择对于气瓶的结构强度、纤维利用、制造工艺均至关重要。在筒身段的缠绕角设计既要兼顾环向强度, 又要兼顾轴向强度要求。环向缠绕 ($\alpha \approx 90^\circ$) 提供环向强度, 主要用来抵抗内压引起的环向应力。而螺旋缠绕 (α 常为 $10^\circ \sim 30^\circ$) 主要用来提供轴向强度和剪切强度。网格理论认为最佳螺旋角 α 满足 $\tan 2\alpha_{opt} = 2$ (即 $\alpha \approx 54.7^\circ$), 此时环向、轴向强度最为平衡。封头段的缠绕角设计需兼顾曲率变化。因封头段曲率大, 其缠绕角需随曲率连续变化, 按照等张力或等强度原则可

由微分方程求解缠绕角 α 的表达式。在实际设计过程中, 还需考虑工艺 (如最小缠绕角限制、纤维堆积等) 约束进行迭代优化^[3]。

3、复合层强度计算

3.1 圆柱筒体强度计算

圆柱筒体强度计算是金属内衬复合材料气瓶碳纤维缠绕设计的最重要的计算步骤之一。为切实对圆柱筒体受力进行计算与分析, 首先对复合材料在碳纤维缠绕方向进行分析。以单丝和单向织物的形式将复合材料作为在无基体的纤维网络进行考虑, 因此, 仅需要分析纤维在受力状态。所以对圆柱筒体环向应力 σ_θ 与轴向应力 σ_z 计算是十分重要的。环向应力 σ_θ 承受的主要为径向应力, 其计算如下: $\sigma_\theta = (p \cdot r) / t_\theta$, 式中, p 为内压, r 为圆柱筒体半径, t_θ 为圆柱筒体环向层等效厚度。类似, 轴向应力 σ_z 承受的主要为轴向力, 其计算如下: $\sigma_z = (p \cdot r) / (2 \cdot t_z)$, 式中, t_z 为圆柱筒体螺旋层等效厚度。最后根据上述分析, 若圆柱筒体材料需要进行强度校核时, 该强度指标应该同时满足如下要求: $\sigma_\theta \leq [\sigma_{f\theta}]$ 且 $\sigma_z \leq [\sigma_{fz}]$ 。式中, $[\sigma_{f\theta}] = V_f \times \sigma_{fu} \times \cos^2 \alpha$, $[\sigma_{fz}] = V_f \times \sigma_{fu} \times \sin^2 \alpha$, V_f 为纤维体积分数, σ_{fu} 为纤维极限应力。

3.2 等张力封头强度计算

作为复合气瓶金属内衬中的关键结构, 等张力封头的设计对于尽量提升材料利用率和节约内衬制造成本至关重要。为了使纤维在整个内压下的各位置张力相同, 等张力封头的平衡方程是其设计的核心内容, 平衡方程求解结果可作为纤维的张力分布。平衡方程为 $d(N_\phi / r_\phi) / d\phi + (N_\theta - N_\phi) / r_\phi \cot \phi = 0$, 其中, N_ϕ 、 N_θ 分别表示各处纤维的经、纬向内力, r_ϕ 、 r_θ 分别表示对应的主曲率半径。等张力解是假设纤维均沿经线方向、张力 T 沿厚度均匀变化设计得出的, 此时封头所占曲面为回转壳, 由纤维的张力沿经线方向可知其子午线方程为 $r = R \sin^2 \phi$ (R 为赤道半径)。

4、缠绕铺层计算

金属内衬复合材料气瓶碳纤维缠绕设计的内容很多, 其中包含纤维缠绕铺层设计, 以保证气瓶在任何工况下安全、可靠地工作。一般情况下, 通过采取分层设计的方式, 优化气瓶的纤维碳纤维缠绕铺层结构, 如采用内层为螺旋小角度层的形式提高气瓶的轴向强度, 外层则采用环向层的形式, 用于承受高压, 将不同层材料所具有的力学性能发挥到极致,

进而对气瓶的性能进行优化。在上述设计中, 通常需要进行环向层厚度 t_θ 和螺旋层厚度 t_z 的计算, 环向层厚度 t_θ 计算式为: $t_\theta = (p \cdot r) / (V_f \cdot \sigma_{fu} \cdot SF)$, 其中 p 表示气瓶内压, r 表示圆柱筒体半径, V_f 为纤维的体积分数, σ_{fu} 表示纤维的极限强度, SF 表示安全系数。同时, 螺旋层厚度 t_z 满足下式: $t_z \geq (p \cdot r) / (2 \cdot V_f \cdot \sigma_{fu} \cdot \sin^2 \alpha \cdot SF)$ 。

二、ANSYS分析技术在复合材料高压气瓶碳纤维缠绕设计中的应用

1、材料选择与建模

复合材料高压气瓶的碳纤维缠绕设计中材料的选择碳纤维是优质的材料, 强度高、轻质、抗氧化等特性都很优秀, 但也存在一些缺陷, 例如易吸潮, 耐磨性能较弱。这就要求在选择碳纤维的时候, 充分考虑碳纤维的力学性能、耐老化性能、加工性能等方面。针对复合材料高压气瓶的缠绕, 在ANSYS分析中, 可以通过构建有限元模型, 对高压气瓶的缠绕过程进行模拟分析。根据材料力学性能参数和缠绕工艺参数对材料进行建立, 充分考虑缠绕过程中的力学性能, 最终利用有限元软件, 模拟出不同碳纤维缠绕方式和材料组合下的性能指标, 对比分析。

2、缠绕过程的数值模拟

基于数值模拟分析技术对碳纤维进行复合材料高压气瓶的缠绕过程中的缠绕过程分析, 数值模拟可以清晰地表征碳纤维的缠绕排布状态、纤维内应力状态、温度变化状态、应力应变变化状态等, 利用ANSYS分析软件, 对缠绕过程进行有限元分析。首先, 根据缠绕设计参数、材料参数建立有限元模型; 然后设置合理的边界条件和载荷条件进行缠绕过程求解分析, 基于缠绕过程可以利用ANSYS中各种分析功能, 如应力应变分析功能、热分析功能等对缠绕过程中的各种重要参数进行实时的分析监测。通过数值模拟分析, 可以获得复合材料高压气瓶缠绕中的问题现象或问题症结。

3、结构强度与优化设计

高压气瓶采用复合材料制备碳纤维缠绕结构, 在对其结构强度分析与优化设计过程中, 是确保高压气瓶安全可靠地使用的关键性步骤。首先通过有限元分析软件进行气瓶的结构强度分析, 在分析过程中, 设定合理的气瓶载荷条件和边界条件, 进行模拟气瓶在实际使用的过程中受到的负载情况。研究气瓶的受力过程。研究的参数主要是气瓶的结构应力分布情况、气瓶的变形情况、气瓶的破坏模式等。在对气瓶结

构强度分析结果的基础上进行结构的优化设计。对气瓶进行结构优化,可以提高气瓶的结构强度,保持良好的结构稳定性,并且材料的消耗和制造成本较低。优化结构可以通过改变缠绕线型、优化复合材料组合方式、改变制造方式以及工艺等。

4、缠绕工艺的仿真与验证

复合材料高压气瓶的碳纤维缠绕设计不仅是结构强度分析优化设计,缠绕工艺的仿真的验证也非常重要。实际生产过程中,气瓶缠绕工艺是否合理关系到气瓶的质量和性能,因此在设计过程中应先针对缠绕工艺进行仿真,根据设定的工艺参数及材料,仿真缠绕过程中纤维的铺展方向、张力分布和温度分布等,分析不同工艺参数对缠绕工艺的影响;缠绕模拟的结果应与实际的生产数据对比验证,在实验数据和实际生产过程中发现模型仿真模型中存在的误差和缺陷等并进行改进和优化。此外在缠绕工艺仿真及验证的过程也应考虑设备选型、工艺参数确定、工艺成本等方面问题。

三、ANSYS计算结果与实测结果对比分析

1、瓶体变形结果比对

仿真预测能力的获得,除了满足 ANSYS 自身仿真边界条件设置与材料设定合理性之外,还需经过严格的试验进行验证,而水压爆破试验作为检验复合材料高压气瓶性能最直接、最可靠的方式,本部分内容侧重于对比 ANSYS 仿真预测的瓶体变形、应变响应结果与试验实测结果的同和异,进而对模型的准确性与可靠性作出评估。常用的有:激光扫描/摄影测量:外表面标记点或无标记扫描表面,在气瓶上标定位置或外表面分布,测量气瓶从加压前开始,到工作压力、至验证压力,直至爆破前(的三维外形变形变化,可获得整个变形场的变化。LVDT:在特定关键节点,如筒体中段、封头顶部、过渡区等位置安装 LVDT,实时记录此位置节点的径向、或轴向的位移情况,仿真获得:在 ANSYS 中,在该位置的仿真计算结果,提取与试验测量节点位置完全对等的节点或区域,得到其位移结果。如果为全场扫描,则可输出模型外表面所有节点坐标变化。可将仿真计算得到的加压后气瓶变形形状与试验扫描重建后的三维模型或照片直观叠加进行比对,观察气瓶整体变形趋势是否一致。选取几个有代表性的关键测量位置,分别列出或绘图对比各压力等级下各方向上的径向位移和轴向位移的仿真值与实测值。将各压力下代表点的位移随内压变化的曲线图进行绘制,仿真曲线与实测曲线绘制

在同一坐标系,直观对比吻合程度、线性/非线性特征以及趋势是否一致。

2、瓶体应变结果比对

应变比对是最直接的评估局部应力状态和复合材料层力学行为预测准确性的方式。电阻应变片为最常用的测量局部表面应变的手段。仔细选择粘贴在气瓶外表面处关键位置处的应变花。应变花只能测量平面应变状态。利用高精度应变采集系统记录所有压力步长下的测量应变值(ε_x , ε_y , γ_{xy})。应考虑温度补偿和信号屏蔽。在 ANSYS 模型中精确地对准到每个应变片粘贴区域的中心位置。提取该位置在对应方向上的弹性应变(EPELx, EPELy, EPELxy)结果。注意应确保方向与应变片测量方向严格一致。对于每一个应变片测点,分别对比其测量的环向应变(ε_{hoop})、轴向应变(ε_{axial})和剪切应变(γ)与仿真预测值在各压力等级下的数值。绘制每个测点、每个应变分量的应变随内压变化的曲线图。在图中将仿真曲线与实测曲线叠加显示。应变结果吻合度决定基于应变的失效准则(如最大应变准则)预测的可信性。良好的应变吻合度是准确预测失效起始位置和压力水平的重要基础。

四、结束语

本文建立了碳纤维缠绕工艺输入及缠绕结构力学输出之间的量化映射关系,表明 ANSYS 的仿真在复合材料高压气瓶的研制中可应用于工程实践;对碳纤维缠绕筒体零件进行螺旋缠绕角递减,验证了网格理论对纤维体积分含量的预测,表明在缠绕层厚度公差为 $\pm 0.15\text{mm}$ 的范围内可以实现纤维体积分含量的容差生产。

[参考文献]

- [1]李玉峰,赵积鹏,张海,等. 高低温对碳纤维/环氧树脂复合材料高压气瓶的性能影响[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(9): 119-125.
- [2]戚亮亮,程乐乐,余木火,等. IV型高压储氢气瓶用碳纤维复合材料界面表征与分析[J]. 合成纤维, 2023, 52(4): 28-32.
- [3]刘泽林,陈杰,于淼,等. 一种大容积钢质内胆碳纤维全缠绕高压气瓶的研制[J]. 中国化工装备, 2023, 25(1): 16-24.
- 第一作者简介:刘志军,男,生于年月:1984年2月6日,民族:汉族,籍贯:黑龙江省绥化市,学历:硕士研究生,职称:中级工程师,研究方向:复合材料。