

抗拉强度1100 MPa以上钢质无缝气瓶的疲劳特性研究

张宇平, 祖 宁, 郭 勇

天津市特种设备监督检验技术研究院, 国家市场监管重点实验室(特种设备数字孪生共性技术), 天津

收稿日期: 2025年11月13日; 录用日期: 2025年12月14日; 发布日期: 2025年12月24日

摘 要

本研究针对抗拉强度1100 MPa以上的钢质无缝气瓶, 以其常用材料34CrMo4H为研究对象, 系统开展成分优化、拉伸力学性能测试、有限元应力分析及疲劳寿命预测等工作。通过实验获取34CrMo4H材料的S-N曲线并拟合疲劳寿命方程, 明确周向应力为主要应力分量、疲劳裂纹易沿轴向萌生扩展; 基于有限元模型模拟内压循环载荷下的应力状态, 结合抽样试验验证模型准确性——实际疲劳寿命与预测结果处于同一数量级, 裂纹萌生位置与模拟的最大周向应力集中区域完全一致。研究结果揭示了该类气瓶在复杂载荷下的失效机理, 为其全生命周期监测方案(包括监测方法与关键位置布设)提供数据支撑, 深化了对1100 MPa级钢质无缝气瓶疲劳寿命特性的认知, 助力我国高端钢质无缝气瓶的工程化应用与安全保障水平提升。

关键词

钢质无缝气瓶, 34CrMo4H钢, 疲劳特性, 有限元分析, S-N曲线

Study on Fatigue Characteristics of Steel Seamless Gas Cylinders with Tensile Strength Exceeding 1100 MPa

Yuping Zhang, Ning Zu, Yong Guo

State Key Laboratory of Market Regulation (Digital Twin Generic Technology for Special Equipment), Tianjin Special Equipment Inspection Institute, Tianjin

Received: November 13, 2025; accepted: December 14, 2025; published: December 24, 2025

Abstract

This study systematically investigates steel seamless gas cylinders with tensile strength exceeding

文章引用: 张宇平, 祖宁, 郭勇. 抗拉强度 1100 MPa 以上钢质无缝气瓶的疲劳特性研究[J]. 材料科学, 2025, 15(12): 2235-2244. DOI: 10.12677/ms.2025.1512238

1100 MPa, focusing on their common material 34CrMo₄H. It conducts composition optimization, tensile mechanical property testing, finite element analysis (FEA), and fatigue life prediction. Experimental results derive the S-N curve and fatigue life equation for 34CrMo₄H, identifying hoop stress as the primary stress component and axial fatigue crack initiation/propagation. FEA simulates stress under cyclic internal pressure, verified with sampling tests—actual fatigue life matches predictions in order of magnitude, and crack positions align with maximum hoop stress concentration areas. Findings reveal failure mechanisms of such cylinders under complex loading conditions, provide data support for full-life cycle monitoring plans (including monitoring methods and critical location deployment), deepen understanding of 1100 MPa-grade cylinder fatigue life characteristics, and advance engineering application and safety assurance level of China's high-end steel seamless gas cylinders.

Keywords

Steel Seamless Gas Cylinder, 34CrMo₄H Steel, Fatigue Characteristics, Finite Element Analysis, S-N Curve

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着工业领域对高压气体存储运输效率及轻量化需求的持续攀升, 抗拉强度 1100 MPa 以上的新型钢质无缝气瓶凭借其高比强度、轻量化优势, 正逐步成为替代传统低强度气瓶的关键装备。当前, 国际层面已有成熟探索——基于 ISO 9809-2:2019 标准, 美国 Chart Industries、德国 Hexagon Ragasco 等企业已开发 1100 MPa 级特种无缝气瓶, 广泛应用于深海探测、火箭燃料储存等对重量与可靠性要求极高的场景。

相较之下, 我国在该领域仍处于技术追赶阶段: 一方面, 针对 1100 MPa 以上钢质无缝气瓶的专用标准体系尚未完善; 另一方面, 虽可通过非线性超声等技术[1]-[3]开展全生命周期监测, 但核心挑战在于材料服役性能的精准把控。值得注意的是, 国内中材科技、北京天海等行业龙头已率先试制出 1100 MPa 级氢气瓶, 为技术突破奠定了基础。然而, 此类超高强钢瓶在服役过程中需承受循环内压波动、外部冲击等复杂变载工况[4], 其高强度特性虽提升了承载能力, 却也使得材料内部微观缺陷更易在循环应力下累积, 诱发疲劳裂纹甚至断裂失效。

因此, 针对我国某厂试制的 1100 MPa 级钢质无缝气瓶材料, 亟需建立贴合实际服役条件的疲劳寿命曲线, 并结合有限元仿真开展疲劳寿命分析。这一研究不仅能科学揭示材料在复杂载荷下的失效机理, 更能为制定针对性的全生命周期监测方案(包括监测方法选择与关键位置布设)提供数据支撑, 同时深化对该类气瓶疲劳寿命特性的认知, 助力我国高端钢质无缝气瓶的工程化应用与安全保障水平提升。

2. 高强度气瓶钢的研究

2.1. 成分分析

针对抗拉强度达 1100 MPa 及以上的高强度气瓶用钢材料, 国外相关气瓶制造企业在传统 34CrMo₄ 钢成分框架下, 常通过将钼(Mo)元素质量分数提升至 0.5%来强化材料的强度性能。但这种调整并非最优解——钼作为高熔点稀有合金元素, 其含量增加会直接推高原材料成本, 且因钼在钢中扩散速率慢、易

偏聚的特性，会给后续热加工环节(如锻造开坯、热轧成型)带来明显挑战：过高的钼易导致材料在热变形过程中出现局部硬化不均，甚至引发热裂纹，增加了工艺控制的复杂度与废品率。

基于这一行业痛点，本研究围绕“如何在 34CrMo₄ 钢基础上优化成分以实现高强度与良好工艺性的平衡”展开探索。首先系统分析了各合金元素对 34CrMo₄ 钢力学性能的作用机制——例如碳(C)是强化基体的核心元素，但过高会降低韧性；钒(V)可通过析出细小碳化钒(VC)颗粒产生弥散强化，且对塑性的影响较小[5]；硼(B)、锆(Zr)等微量元素则能细化晶粒，改善焊接性能。基于这些规律，开发企业普遍在保留 34CrMo₄ 基础成分的前提下，引入 0.050%~0.080%的钒(V)以增强析出强化效果[6]，同时调整 C、Mn、Cr、Mo 等主元素的配比(如适度降低碳含量以避免韧性损失，微调钼含量以平衡强度与热加工性)，并补充优化 Ti、Nb、B、Zr 等微量合金元素——最终形成了一套兼顾“高强度、易加工、低成本”的成分体系[7]。

本研究选取的试验样本来自国内某专业气瓶制造厂生产的规格为 $\phi 140 \times 4.0$ mm 的钢质无缝气瓶，该产品采用了上述优化后的成分设计方案，其具体的化学成分详情列于表 1。

Table 1. Chemical compositions of 34CrMo₄ high-strength steel
表 1. 34CrMo₄ 高强度化学成分

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	S + P	V + Nb + Ti + B + Zr + Sn
标准	0.32~0.36	0.15~0.30	0.70~0.90	≤0.015	≤0.005	0.95~1.15	0.20~0.30	0.10~0.40	≤0.020	≤0.15
实际	0.34	0.24	0.80	0.009	0.002	1.03	0.23	0.23	0.011	0.03

2.2. 拉伸力学性能

该规格气瓶拉伸试样设计参照 GB/T 228.1-2021，取自气瓶轴向，试验前对试样表面进行了抛光，确保表面粗糙度达到标准要求，测试试样共 3 根，测试结果均值如表 2 所示。根据拉伸试验测试结果，材料拉伸力学性能设计要求[8]，同时也满足企业瓶式容器壳体 34CrMo₄H 热处理后的力学性能。

Table 2. Mechanical properties of 34CrMo₄ high-strength steel
表 2. 34CrMo₄ 高强度力学性能

项目	抗拉强度(Rm)/MPa	屈服强度(Rp 0.2)/MPa	断后伸长率(A)/%
平均值	1174	1074	15.6
技术要求	1100 ≤ Rm ≤ 1220	≥980	≥12.0

3. 高强度气瓶的研究

34CrMo₄H 气瓶有限元应力分析

有限元分析采用 ANSYS 软件，实际气瓶规格 $\phi 140 \times 4.0$ mm，材料弹性模量 207 GPa，泊松比 0.3，由于模型为轴对称结构，为简化模型计算[9]，取 1/4 模型进行建模(见图 1)。

ISO 9809-2:2019 标准[10]中要求，抗拉强度 1100 MPa 以上高强度气瓶的型式试验指标必须通过钢瓶的水压循环实验，用无腐蚀性液体使钢瓶在至少等于液压试验压力的高循环压力下连续反复。根据气瓶受力特点，对瓶口端面施加圆柱坐标系下的位移约束(Z 轴与 Y 轴位移归零)，模拟气瓶安装时的固定端约束，模拟气瓶水压试验时瓶口与打压阀门的连接状态(见图 2)。采用对称边界条件，利用几何对称性降低计算规模，同时确保应力分布符合轴对称特性，气瓶承受内压，在金属内表面施加均布压力 45 MPa (见图 3)，模拟循环试验最大水压时的情况。

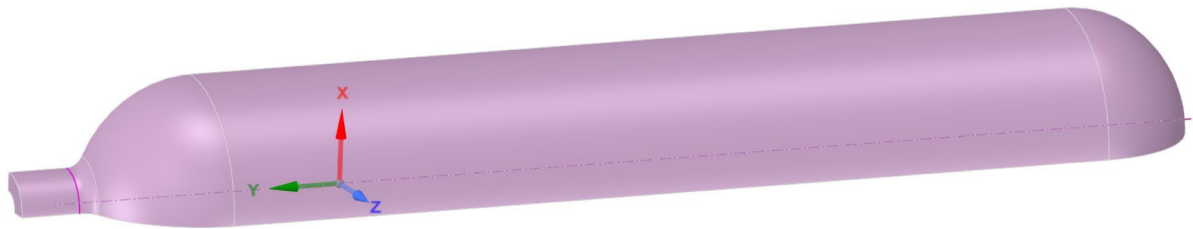


Figure 1. 1/4 finite element model
图 1. 1/4 有限元模型

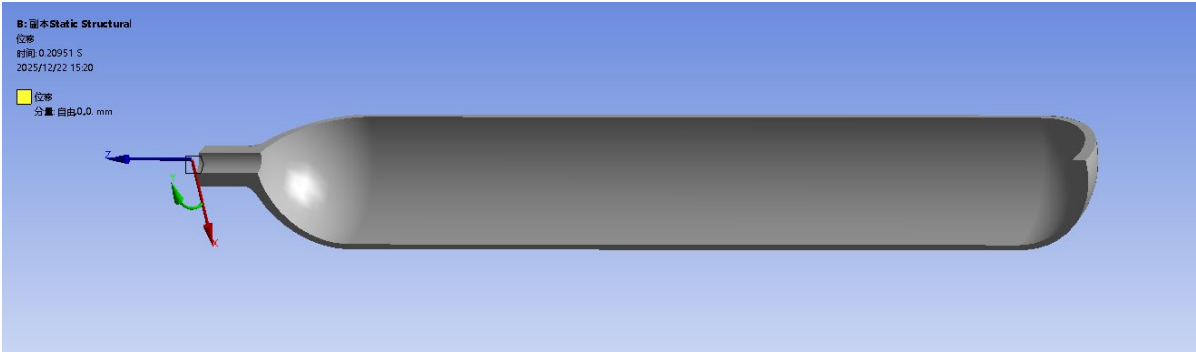


Figure 2. Boundary setting
图 2. 边界设置

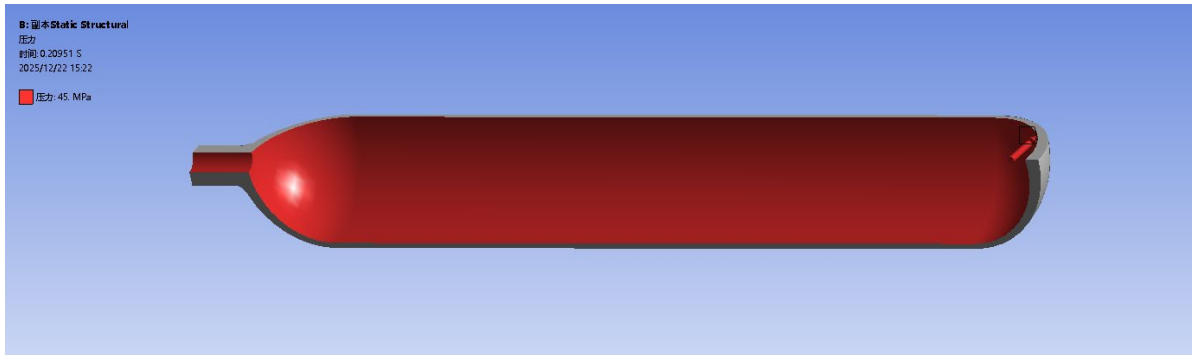
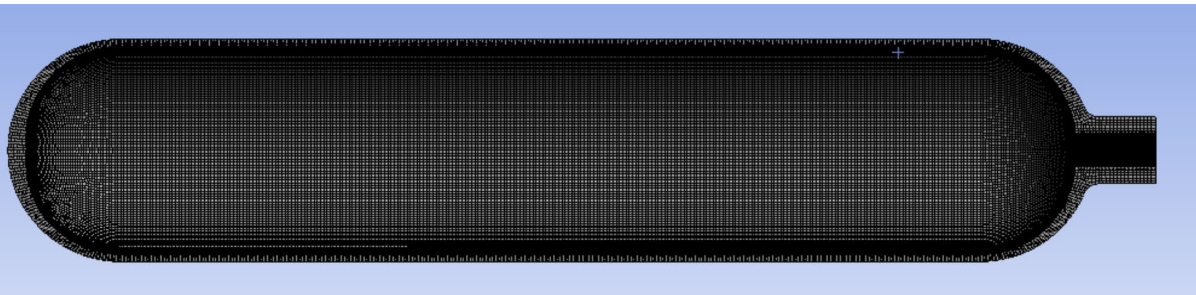


Figure 3. Pressure setting
图 3. 压力设置

采用 8 节点实体单元 SOLID185 进行网格划分，过渡部位、壁厚最薄处均保持 6 层网格，网格划分见图 4。



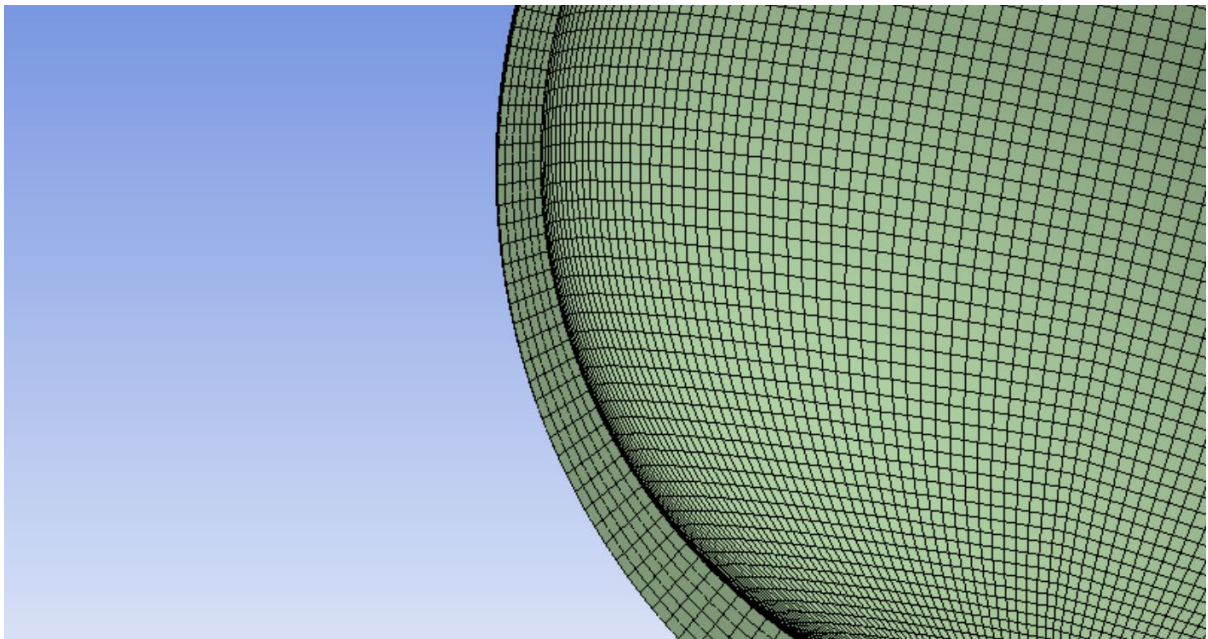
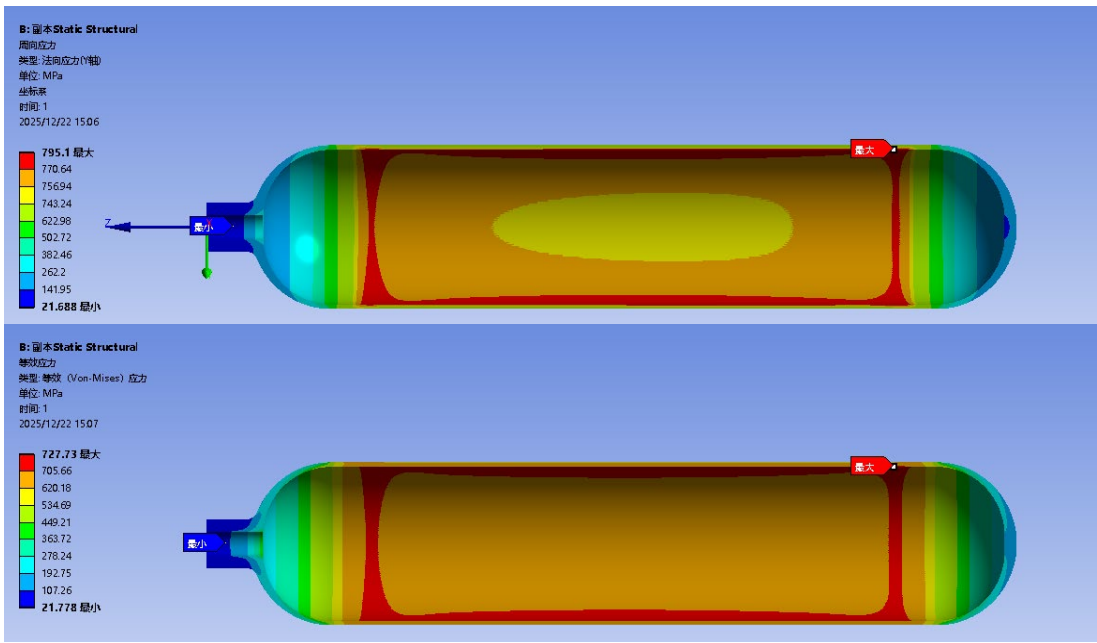


Figure 4. Mesh generation
图 4. 划分网格

在水压试验压力下，有限元静力学分析应力分布见图 5，数值见表 3。

Table 3. Stress distribution
表 3. 应力分布

	等效应力 Mises	轴向应力	周向应力
最大应力值/MPa	727.73	480.38	795.1



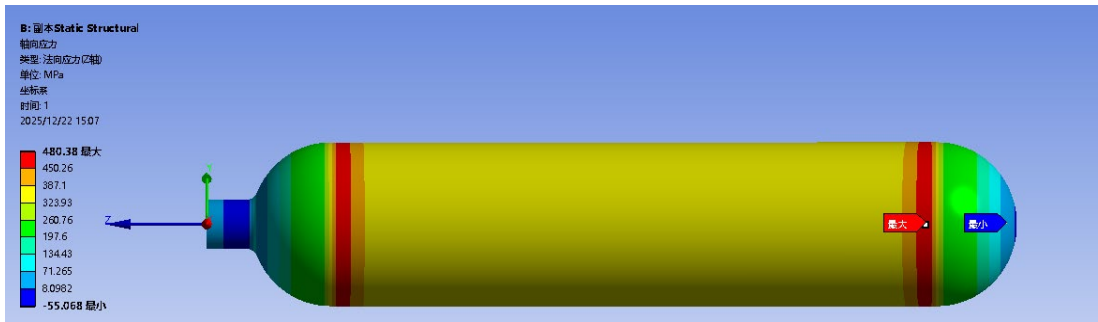


Figure 5. Stress nephogram of the steel cylinder

图 5. 钢瓶应力云图

在内压载荷下，气瓶筒体的应力分布呈现典型的非均匀特征，其中周向应力(即环向应力)为主要应力分量。定量分析显示，最大周向应力达到 727.73 MPa，显著高于同位置的轴向应力(约为 480 MPa)。这一应力分布特征与薄壁压力容器的理论预测(周向应力约为轴向应力的 2 倍)基本吻合，验证了模型的有效性。据此可以推断，在疲劳载荷过程中，由于周向应力幅值更高，微裂纹的萌生与扩展将优先沿垂直于周向应力的方向(即轴向)发生，从而导致损伤在周向路径上更易连接、贯通，表现为沿周向的损伤积累更为显著。这一结论对于预判气瓶的潜在失效位置和关键位置布设超声类方法进行检测具有关键指导意义。

4. 气瓶疲劳特性研究

4.1. 材料 S-N 曲线

气瓶材料 34CrMo₄H，通过实验获取疲劳试样沿气瓶轴向截取，其几何尺寸依据 GB/T 3075-2008《金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法》设计。试样具体型式尺寸如图 6 所示。考虑到气瓶的水压试验压力工况下应力分布，应力未达到屈服强度，处于弹性阶段，试验采用应力控制模式，通过周期性施加轴向恒定应力幅，设置 5 个应力幅水平分别为 400 MPa、500 MPa、600 MPa、700 MPa、800 MPa，每个应力水平设置 4 个有效试样，应力比 $R = -1$ ，试验温度 20℃，加载波形为三角波，频率 f 为 2 Hz，失效判据为试件断裂，记录循环载荷次数与试样失效情况。疲劳试验结果见表 4。

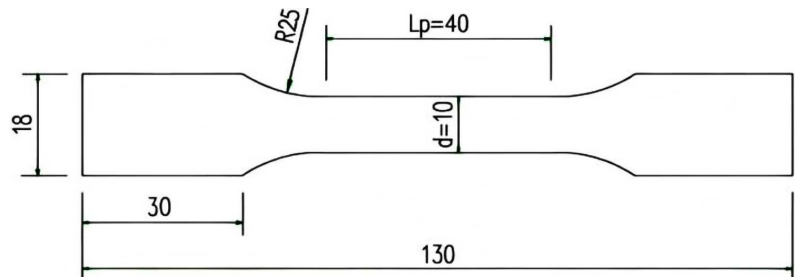


Figure 6. Schematic diagram of the fatigue specimen structure

图 6. 疲劳试样结构示意图

Table 4. Fatigue test results

表 4. 疲劳试验结果

		应力幅值	400 MPa	500 MPa	600 MPa	700 MPa	800 MPa
		应力范围	800 MPa	1000 MPa	1200 MPa	1400 MPa	1600 MPa
试样编号	1	循环次数	$\geq 1e^7$	305,200	74,022	12,432	2412

续表

2	循环次数	$\geq 1e^7$	466,025	94,728	19,787	2321
3	循环次数	$\geq 1e^7$	260,431	99,646	16,042	2883
4	循环次数	$\geq 1e^7$	315,520	73,078	18,884	2597

应力(S)与寿命(N)之间的关系在双对数坐标下通常呈现良好的线性趋势，因此采用幂律模型进行拟合，其线性化表达式为：

$$\lg N = a + b \times \lg S$$

$\lg N$ 为疲劳寿命的常用对数，由于使用的 nCode 疲劳分析软件需要输入应力范围， $\lg S$ 取应力范围的常用对数， a 为截距， b 为斜率。采用最小二乘法对试验数据进行线性回归分析，拟合结果如下：截距 $a = 3.53377$ ，斜率 $b = -0.09434$ ，据此得到 34CrMo₄H 材料的 S-N 曲线方程为：

$$\lg N = 3.53377 - 0.09434 \times \lg S$$

拟合曲线见图 7，拟合优度判定系数 $R^2 = 0.974$ ，表明该线性模型能够解释 97.4% 的试验数据变异，拟合效果优异。Pearson 相关系数 $r = -0.987$ ，证实了应力幅与疲劳寿命之间存在极强的负相关关系，即应力水平越高，材料疲劳寿命越短。斜率为负值(-0.09434)，其绝对值大小反映了疲劳寿命对应力变化的敏感程度，是材料本身的疲劳性能特征参数。

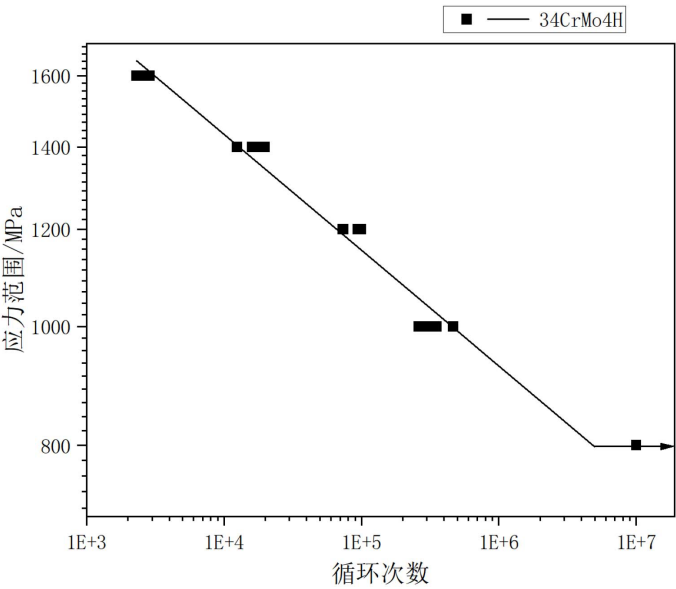


Figure 7. Fitted S-N curve
图 7. 拟合 S-N 曲线

4.2. 气瓶疲劳寿命预测

在 34CrMo₄H 气瓶疲劳寿命分析过程中，首先将材料通过实验获取的疲劳寿命曲线通过 nCode 材料库映射功能与有限元模型材料属性进行关联。由于本文 S-N 曲线实验在对称循环($R = -1$ ，平均应力为 0)下完成，而气瓶实际承受的为脉动循环载荷($R \approx 0$)，材料疲劳性能受到平均应力的显著影响，存在不可忽略的拉伸平均应力。为准确预测寿命，必须按照“等寿命原则”将不同平均应力下的交变应力幅，修正为平均应力为零时的等效交变应力幅。

在工程中常用的几种平均应力修正模型[11]为 Goodman、Gerber、Soderberg 等, 本文采用 Goodman 模型对平均应力效应进行修正, 其表达式为:

$$S_{ar} = \frac{S_a}{1 - S_m / R_m}$$

其中, S_{ar} 为等效应力幅, S_a 为实验应力幅, S_m 为平均应力, R_m 为材料抗拉强度。

选择该模型主要基于其合理性及适用性: Goodman 模型通过线性关系描述平均应力的影响, 形式简洁, 且在涉及拉伸平均应力的疲劳问题中预测相对保守, 适用于本研究中气瓶以弹性变形为主的工况, 能有效保障寿命预测的可靠性。

将静力学模拟得到的应力结果导入 nCode 求解单元进行求解, 得到实际工况下的疲劳寿命预测结果, 如图 8 所示。

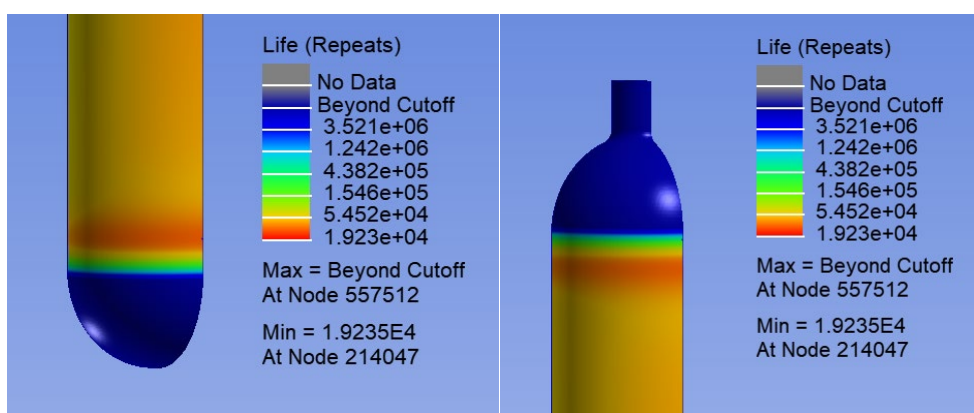


Figure 8. Fatigue life prediction results

图 8. 疲劳寿命预测结果



Figure 9. Sampling test

图 9. 抽样试验

为验证有限元模型的准确性及实际评估气瓶的疲劳性能, 本研究从同一批次产品中随机抽取三只气瓶进行了疲劳耐久试验。在模拟工作压力的循环载荷下, 三只气瓶的疲劳寿命分别为 13,787 次、13,812 次和 14,002 次, 均值为 13,867 次。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}}$$

其中, x_i 为单只气瓶寿命, $\mu = 13,867$ 为均值, $n = 3$ 。

偏差平方和:

$$(13,787 - 13,867)^2 + (13,812 - 13,867)^2 + (14,002 - 13,867)^2 = 6400 + 3025 + 18,225 = 27,650 \text{ 次}$$

标准差 $\sigma = 96$ 次, 仅占均值(13,867 次)的 0.69%, 表明寿命数据离散性极小, 表现出良好的批次一致性。该试验结果与有限元模拟结论高度吻合: 一方面, 试验测得的实际疲劳寿命与基于模拟应力预测的寿命处于同一数量级, 且均满足 ISO 9809-2:2019 标准中关于气瓶需承受 12,000 次压力循环而不失效的要求。另一方面, 三只气瓶的疲劳裂纹萌生位置(即疲劳源)均一致出现在靠近瓶体两端的筒体区域, 如图 9 所示, 该结果与杨兴[12]的研究中仿真结果所揭示的应力集中区和疲劳寿命分布高度吻合。试验寿命与裂纹位置的双重一致性, 充分证实了本模型能够准确捕捉气瓶的危险部位及其应力状态, 具有可靠的预测能力。

5. 结语

本研究针对国内某气瓶制造厂制造的抗拉强度 1100 MPa 以上钢质无缝气瓶, 系统开展了材料成分优化、拉伸力学性能测试、有限元应力分析及疲劳寿命预测等工作。通过实验获取了 34CrMo₄H 材料的 S-N 曲线并拟合出疲劳寿命方程, 明确了应力分布特征——周向应力为主要应力分量、疲劳裂纹易沿轴向萌生扩展; 基于有限元模型模拟内压循环载荷下的应力状态, 结合抽样试验验证了模型的准确性, 实际疲劳寿命与预测结果处于同一数量级, 裂纹萌生位置与模拟的最大周向应力集中区域完全一致。

研究结果不仅科学揭示了该类气瓶在复杂载荷下的失效机理, 更为制定针对性的全生命周期监测方案(包括监测方法选择与关键位置布设)提供了数据支撑, 同时深化了对 1100 MPa 级钢质无缝气瓶疲劳寿命特性的认知, 助力我国高端钢质无缝气瓶的工程化应用与安全保障水平提升。

基金项目

国家市场监督管理总局科技计划项目(项目编号: 2023MK016); 国家市场监督管理总局技术保障专项项目(批准号: 2023YJ31); 天津市市场监督管理委员会科技计划项目(项目编号: 2025-W26)。

参考文献

- [1] 祖宁, 郭勇, 杨飒, 等. 非线性超声技术在气瓶早期疲劳损伤检测中的可行性研究[J]. 化工设备与管道, 2025, 62(3): 9-15.
- [2] 吴斌, 颜丙生. 非线性超声检测镁合金疲劳的仿真和实验[J]. 振动. 测试与诊断, 2012, 32(1): 96-100.
- [3] 郭勇, 李菊峰, 王璇, 等. 基于非线性超声技术的金属结构疲劳早期损伤实验测量[J]. 中国特种设备安全, 2020, 36(9): 43-48.
- [4] 陈泽鸿, 黄淞, 惠虎. 金属内胆纤维环向缠绕储氢气瓶临界疲劳循环次数影响因素探究[J]. 化工设备与管道, 2022, 59(4): 1-7.
- [5] 李宪文, 吴平森. 高压气瓶用 35CrNiMoV 高强度钢的研究[C]//2000 年全国首届高压食品暨超高压技术应用论文集. 包头: 中国兵工学会, 2000: 73-82.
- [6] 尹谢平, 陆明和, 徐淑芳, 等. 高压气瓶用 34CrMo₄-H 高强度钢的研究[J]. 压力容器, 2014, 31(10): 1-8.
- [7] 姚赞, 陆明和, 蔡海燕, 等. 合金元素及热处理工艺对高压气瓶钢性能的影响[J]. 宝钢技术, 2012(4): 14-17, 22.
- [8] 尹谢平, 陆明和, 蒋锡军. 热处理对高压气瓶用 34CrMo₄H 钢力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2015, 40(10): 176-180.
- [9] 高海静, 何玉辉. 车载 CNG 气瓶寿命预测算法[J]. 现代电子技术, 2014(5): 108-109.
- [10] ISO 9809-2:2010: Gas Cylinders-Refillable Seamless Steel Gas Cylinders-Design, Construction and Testing-Part 2: Quenched

and Tempered Steel Cylinders with Tensile Strength Greater than or Equal to 1100 MPa. International Organization for Standardization.

- [11] 秦小强. 低温高压储氢气瓶结构设计及仿真分析[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2020.
- [12] 杨兴. 有限元法对车载钢制天然气瓶疲劳分析[J]. 科技资讯, 2020, 18(4): 43-49.