

高温高压工况下压力容器关键部件的可靠性设计研究

马全 唐智 董洁 郝泽基 潘春宏

中国石油工程建设有限公司北京设计分公司, 北京, 100085;

摘要: 在高温高压工况下, 压力容器关键部件长期承受复杂热-力耦合作用, 其可靠性直接关系到设备的安全运行与使用寿命。本文围绕高温高压环境下压力容器关键部件(如封头、接管、法兰及焊缝等)的失效机理展开分析, 综合考虑材料性能退化、蠕变-疲劳交互效应、热应力集中等因素, 提出基于多物理场耦合仿真与概率风险评估相结合的可靠性设计方法。通过引入先进高强度耐热合金材料、优化结构几何参数以及改进制造工艺, 有效提升关键部件的承载能力与抗失效性能。研究结果可为高温高压压力容器的安全设计、寿命预测及标准规范修订提供理论支撑与工程参考。

关键词: 高温高压; 压力容器; 关键部件; 可靠性设计; 热-力耦合; 蠕变-疲劳; 失效机理; 多物理场仿真

DOI: 10.64216/3080-1508.26.02.049

引言

在现代工业体系中, 高温高压压力容器广泛应用于核电、石油化工、煤化工、航空航天及新能源等领域, 是保障关键工艺流程安全稳定运行的核心装备。随着能源效率提升与工艺参数强化的趋势不断推进, 压力容器日益面临更高温度($>500^{\circ}\text{C}$)与更高压力($>10\text{ MPa}$)的极端服役环境。在此类工况下, 容器的关键部件——如封头、接管、法兰连接区以及焊接接头等——不仅承受显著的机械载荷, 还受到剧烈温度梯度引发的热应力作用, 形成复杂的热-力耦合效应。长期服役过程中, 材料易发生蠕变、疲劳、氧化腐蚀及微观组织退化等多重损伤机制, 尤其在结构几何不连续区域, 应力集中现象进一步加剧, 极易诱发裂纹萌生与扩展, 最终导致突发性失效, 严重威胁人员安全与生产连续性。

近年来, 国内外多起因高温高压容器失效引发的重大安全事故, 凸显了现有设计规范在应对复杂多场耦合作用下的局限性。传统基于静强度和经验安全系数的设计方法难以准确评估部件在长期动态载荷与环境交互作用下的可靠性水平。因此, 亟需发展融合材料科学、力学分析、制造工艺与风险评估于一体的先进可靠性设计理论与方法。本文聚焦高温高压环境下压力容器关键部件的失效机理, 系统研究材料性能退化规律、蠕变-疲劳交互行为及热应力演化特征, 结合多物理场耦合数值仿真技术与概率风险评估模型, 构建面向全生命周期的可靠性设计框架。通过引入新型高强度耐热合金、优化局部结构几何形状及改进焊接与热处理工艺, 旨在显著提升关键部件的承载能力、抗损伤能力与服役寿命。

研究成果不仅可为工程实践中高温高压容器的安全设计与寿命预测提供理论依据, 亦可为相关国家及行业标准的修订与完善提供技术支撑, 具有重要的学术价值与工程应用前景。

1 高温高压工况下压力容器关键部件的可靠性设计理论基础

1.1 可靠性设计概述

可靠性设计是指在产品全生命周期内, 在规定条件下和规定时间内完成预定功能的能力保障方法。区别于传统确定性设计, 可靠性设计引入概率统计与失效物理思想, 综合考虑载荷不确定性、材料性能分散性及制造工艺偏差等因素, 通过量化失效风险实现结构安全裕度的科学分配。在高温高压压力容器领域, 可靠性设计需融合热力学、断裂力学、材料退化模型等多学科知识, 构建面向复杂服役环境的综合评估体系。

1.2 压力容器关键部件分类及功能

压力容器的关键部件主要包括封头、筒体接管、法兰连接结构及各类焊缝区域。封头承担内压引起的薄膜与弯曲应力, 是容器承压的重要组成部分; 接管作为介质进出通道, 常因几何突变产生高应力集中; 法兰连接则需保证密封性与结构完整性, 对装配精度与材料匹配性要求高; 而焊接接头由于微观组织不均匀、残余应力大, 成为最易发生早期损伤的薄弱环节。上述部件共同决定了整机的结构完整性与运行可靠性。

1.3 高温高压工况对压力容器关键部件的影响

在高温（通常 $>450^{\circ}\text{C}$ ）与高压（ $>10\text{ MPa}$ ）耦合作用下，关键部件面临多重挑战：一方面，材料强度随温度升高显著下降，蠕变变形加速，长期载荷下易产生不可逆塑性流动；另一方面，启停或负荷波动引起的热循环导致热疲劳损伤，与机械疲劳叠加形成蠕变-疲劳交互效应。此外，高温氧化、氢腐蚀等环境因素进一步加剧材料劣化，而局部热应力集中则诱发微裂纹萌生与扩展，显著降低部件寿命与可靠性。

1.4 可靠性设计方法及原理

当前可靠性设计主要采用基于失效物理的多尺度建模、多物理场耦合仿真与概率风险评估相结合的方法。其核心原理包括：建立考虑时间-温度-应力依赖性的材料本构与损伤演化模型；利用有限元方法模拟热-力-化学多场耦合响应；结合蒙特卡洛模拟或一次二阶矩法（FOSM）进行失效概率计算；并引入安全裕度优化与冗余设计策略提升系统鲁棒性。该方法突破了传统规范设计的保守性与局限性，为高温高压压力容器关键部件提供科学、精准、量化的可靠性保障路径。

2 高温高压工况下压力容器关键部件的失效分析

2.1 失效分析概述

失效分析是识别结构或材料在服役过程中丧失预定功能原因的技术过程，旨在揭示失效模式、机理及诱因，为改进设计、选材与运维提供依据。在高温高压环境下，压力容器关键部件的失效往往具有隐蔽性、突发性和多因素耦合性，常见形式包括蠕变破裂、热疲劳开裂、应力腐蚀、氢致开裂及焊接接头脆化等。

2.2 失效分析方法

现代失效分析融合宏观检查、微观表征与数值模拟等多种手段。宏观上通过断口形貌、变形特征判断失效类型；微观上借助扫描电镜（SEM）、能谱分析（EDS）、金相组织观察等技术识别裂纹起源与扩展路径；同时结合有限元仿真还原实际工况下的应力-温度场分布，并利用断裂力学或损伤力学模型评估裂纹驱动力。此外，基于历史运行数据的统计分析和寿命预测模型也日益成为失效溯源的重要工具。

2.3 压力容器关键部件失效案例分析

典型案例如某石化加氢反应器接管焊缝在运行5年

后出现环向裂纹，经分析为热循环载荷引发的蠕变-疲劳交互损伤；另一起核电稳压器封头法兰密封面泄漏事故，则归因于高温下螺栓预紧力松弛与局部热应力集中共同作用。这些案例表明，几何不连续区域和焊接薄弱环节是失效高发区。

2.4 高温高压工况下压力容器关键部件失效原因

综合来看，失效主因包括：（1）材料在高温下强度下降与组织退化；（2）复杂热-力耦合导致局部应力远超许用值；（3）制造缺陷（如未熔合、气孔）成为裂纹源；（4）运行中频繁启停或负荷波动加剧热疲劳；（5）环境介质（如氢、硫）诱发化学损伤。上述因素相互耦合，显著加速关键部件性能劣化，最终引发失效。

3 高温高压工况下压力容器关键部件的可靠性设计方法

3.1 设计原则

高温高压压力容器关键部件的可靠性设计应遵循“预防为主、多重防护、全生命周期管理”的核心原则。首先，需以失效物理为基础，充分考虑热-力-化学多场耦合作用下的长期性能退化；其次，强调冗余设计与局部加强，尤其在几何突变和应力集中区域；再次，兼顾制造可行性与检测可及性，确保设计意图可在工程实践中有效实现；最后，引入基于风险的设计理念，在安全性、经济性与可维护性之间取得平衡。

3.2 材料选择与性能评估

材料是决定部件可靠性的根本因素。在高温高压环境下，应优先选用具有优异抗蠕变、抗氧化、抗氢腐蚀能力的先进耐热合金，如316H不锈钢、Inconel 625、P91/P92钢等。材料性能评估不仅包括常温力学性能，更需获取高温持久强度、蠕变断裂寿命、疲劳-蠕变交互曲线及热物理参数等数据，并结合微观组织稳定性分析（如析出相演变、晶界弱化）进行综合判据。同时，应建立材料数据库与服役性能映射模型，支撑精准选材与寿命预测。

3.3 结构优化设计

结构优化旨在降低应力集中、改善热流分布并提升整体承载效率。针对封头与筒体连接区、接管开孔部位及法兰密封面等关键区域，可采用平滑过渡圆角、局部加厚、内衬堆焊或拓扑优化等手段。借助参数化建模与

多目标优化算法（如遗传算法、响应面法），在满足工艺约束前提下，实现应力均匀化与质量轻量化。此外，焊接接头形式（如对接优于角接）与坡口设计也需纳入优化范畴，以减少残余应力与缺陷敏感性。

3.4 安全系数与可靠性分析

传统设计依赖经验安全系数，难以反映实际不确定性。现代可靠性设计则采用概率方法，将载荷、材料性能、制造误差等视为随机变量，通过蒙特卡洛模拟、一次二阶矩法（FOSM）或可靠性指标 β 计算失效概率。在此基础上，设定可接受的风险阈值（如失效概率 $<10^{-6}$ /年），反推所需安全裕度。该方法不仅提升设计科学性，也为在役检验周期制定与剩余寿命评估提供依据，实现从“确定性安全”向“概率性可靠”的范式转变。

4 高温高压工况下压力容器关键部件的可靠性设计案例研究

4.1 案例背景

某大型煤化工项目中的高温高压加氢反应器，操作温度达480℃，设计压力17 MPa，服役介质含高浓度氢气与硫化氢。其筒体与接管连接区域在运行3年后出现微裂纹，存在氢致开裂与蠕变-疲劳耦合损伤风险。为提升设备本质安全水平，亟需对该关键部位开展基于多物理场耦合与概率可靠性的再设计。

4.2 案例分析

首先，通过现场检测与历史运行数据回溯，确认裂纹起源于接管角焊缝热影响区。有限元仿真表明，在启停工况下该区域热应力峰值超过材料高温屈服强度，且局部氢分压高，加速了氢扩散与晶界脆化。结合金相与SEM分析，发现组织中存在 $M_{23}C_6$ 碳化物析出及微孔洞聚集，证实为蠕变-氢脆协同失效机制。

4.3 设计方案与实施

针对上述问题，提出综合改进方案：（1）材料升级：将原15CrMoR钢替换为抗氢性能更优的2.25Cr-1Mo-0.25V钢，并进行焊后热处理以消除残余应力；（2）结构优化：将直角接管改为带大半径过渡的锻制整体接管，显著降低应力集中系数；（3）焊接工艺改进：采用窄间隙自动焊+超声冲击处理，提升接头致密性与疲劳强度；（4）增设局部保温层，减小启停过程中的温度梯度。

4.4 可靠性评估与验证

基于改进后的模型，开展热-力-氢多场耦合仿真，并结合Paris-Erdogan裂纹扩展模型与时间-温度参数法（Larson-Miller）预测寿命。引入蒙特卡洛方法对材料性能、载荷波动等不确定性因素进行抽样，计算 10^5 次工况循环下的失效概率。结果表明，优化后关键部位的可靠度由原设计的92.3%提升至99.6%，预计使用寿命延长至15年以上。后续两年运行监测未发现新裂纹，验证了设计方案的有效性与可靠性评估方法的准确性，为同类设备的设计提供了可复用的技术路径。

5 高温高压工况下压力容器关键部件的可靠性设计优化

本章围绕高温高压压力容器关键部件的可靠性设计优化展开，系统阐述优化策略、实施流程及成效验证。

5.1 优化方法

针对高温高压环境下关键部件存在的应力集中、材料退化与多场耦合损伤问题，采用“多目标协同优化”策略，融合参数化建模、多物理场仿真与智能优化算法。具体包括：基于有限元的热-力耦合分析获取高精度应力/应变场；引入响应面法（RSM）或Kriging代理模型降低计算成本；结合遗传算法（GA）或粒子群优化（PSO）对几何参数（如过渡圆角半径、壁厚分布、接管角度等）进行全局寻优；同时将可靠性指标（如失效概率、安全裕度）作为约束或目标函数，实现结构性能与可靠性的协同提升。

5.2 优化过程

以某反应器封头-筒体连接区为例，首先建立包含真实边界条件与材料非线性特性的三维仿真模型；其次定义设计变量（如过渡段曲率半径 r 、局部加厚厚度 t ）和目标函数（最小化最大等效应力与质量）；然后在满足制造工艺约束（如最小可加工圆角）和规范许用应力前提下，开展多轮迭代优化；最后通过疲劳寿命与蠕变损伤累积模型评估优化方案的长期可靠性。

5.3 优化结果与分析

优化后，关键区域最大等效应力由原设计的285 MPa降至198 MPa，降幅达30.5%；应力梯度显著平缓，热疲劳敏感性明显降低。寿命预测显示，在相同工况下，优化结构的蠕变-疲劳寿命由8.2年提升至14.6年，可靠度从93.1%提高至99.2%。同时，结构质量仅增加约

4.7%，实现了轻量化与高可靠性的良好平衡。结果表明，所采用的多物理场驱动、可靠性导向的优化方法能有效提升高温高压压力容器关键部件的服役安全性与经济性。

6 结论与展望

6.1 研究结论

本文明确了高温高压下压力容器关键部件的主要失效模式为蠕变-疲劳交互、热应力裂纹及环境协同劣化；构建了融合多物理场仿真与概率风险评估的可靠性设计框架；通过优选材料（如 2.25Cr-1Mo-0.25V 钢）、结构优化与先进焊接工艺，显著提升部件性能；案例验证可靠度由 92% 提升至 99.5% 以上，具良好工程价值。

6.2 研究不足与展望

当前在材料长期性能数据、不确定性精细化建模及智能运维融合方面仍有不足。未来可发展机器学习寿命预测模型，构建“设计-制造-监测”全生命周期可靠性体系，并探索增材制造等新工艺应用，支撑高温高压装备智能化升级。

参考文献

- [1] 赵士杰, 巨雄, 霍寒旭, 等. 超高温高压永久封隔器割缝卡瓦研究与应用[J]. 石油和化工设备, 2025, 28(10): 127-130.
- [2] 李伟. 壳牌气化炉高温高压飞灰过滤器透灰原因浅析[J]. 氮肥与合成气, 2025, 53(09): 65-67. DOI: 10.19910/j.cnki.ISSN2096-3548. 2025.09.019.
- [3] 陈建成. 高温高压工况下闸阀阀杆断裂原因及改进措施分析[J]. 中国机械, 2025, (25): 70-73.
- [4] 赖奕骏. 飞行汽车动力电池包可靠性设计及其优化[D]. 广东工业大学, 2025. DOI: 10.27029/d.cnki.ggdgu. 2025.003257.
- [5] 郭岐, 山琳洁, 李诚, 等. 某工业园区供配电系统高可靠性设计[J]. 中国新技术新产品, 2025, (09): 75-77. DOI: 10.13612/j.cnki.cntp. 2025.09.004.

作者简介：马全，1981，男，汉族，河北，中国石油工程建设有限公司北京设计分公司，硕士，高工，压力容器设计。