

高温高压工况下设备安全阀密封性能优化

叶 盛

中百阀门有限公司 浙江 丽水 323000

【摘要】在石油化工、能源发电、航空航天等工业领域，高温高压工况下的设备安全运行至关重要，而安全阀作为保障设备压力稳定的关键部件，其密封性能直接决定了设备的运行安全性与经济性。本文针对高温高压工况下安全阀密封性能易失效的问题，首先分析了高温高压环境对安全阀密封面材料、密封结构及密封副接触状态的影响机制，指出了当前安全阀密封存在的密封面磨损、材料老化、热变形导致密封失效等核心问题。随后，从密封结构优化、密封材料改进、密封工艺创新及密封性能检测技术四个维度提出了具体的优化策略，包括采用多道密封结构设计、选用高温合金与陶瓷复合材料、引入激光熔覆表面强化工艺以及开发实时在线密封性能监测系统等。研究结果表明，优化后的安全阀在温度 300-600°C、压力 10-30MPa 的工况下，密封泄漏量降低了 85% 以上，密封寿命延长了 2-3 倍，有效提升了高温高压工况下设备的运行安全性与可靠性。本文的研究成果为高温高压设备安全阀的设计、制造与维护提供了理论依据与技术支撑。

【关键词】高温高压工况；安全阀；密封性能；密封结构；密封材料；性能优化

DOI:10.12417/2705-0998.25.21.062

1 引言

在石油化工、煤化工、超临界发电等领域，设备逐渐向高温、高压、大型化方向发展，如超临界二氧化碳发电系统工作温度可达 600°C 以上、压力超 20MPa，石油炼制加氢裂化装置工作温度约 400-450°C、压力高达 15-20MPa，此类工况下设备压力超限易引发爆炸、介质泄漏等安全事故。安全阀作为自动泄压保护装置，其密封性能是设备安全运行的关键，但高温会导致密封面材料软化老化、高压加剧密封副接触应力，叠加作用下密封失效风险显著升高，据统计高温高压工况下因安全阀密封失效引发的设备故障占比超 30%，因此开展安全阀密封性能优化研究具有重要工程价值。国外对安全阀密封性能研究起步早，在高温合金、陶瓷基复合材料应用及密封结构设计上成果显著，国内近年虽在高温合金改性、密封结构优化方面取得进展，但高端材料制备工艺、在线监测精度及极端工况设计规范仍待完善，本文围绕高温高压工况下安全阀密封性能优化展开深入研究。

2 高温高压工况对安全阀密封性能的影响机制

2.1 高温对安全阀密封性能的影响

(1) 对密封面材料性能的影响

高温会导致密封面材料物理与力学性能发生显著变化。从材料软化角度看，温度升高使原子动能增加、晶格间距扩大，材料硬度与强度大幅下降。在材料老化与腐蚀方面，高温加速密封面材料氧化反应，形成的氧化膜若结合不牢固，会在阀瓣启闭过程中脱落引发磨损；同时高温提升介质活性，加剧对密封面的腐蚀，如含硫介质中高温会导致材料发生硫化腐蚀，形成疏松硫化物层，直接降低密封性。此外，高温工况下安全阀阀瓣频繁启闭，使密封面温度反复升降产生热疲劳应力，当应力超过材料疲劳极限时，密封面会出现微裂纹。

(2) 对密封结构变形的影响

高温易引发安全阀密封结构热变形，且不同部件变形差异显著。一方面，阀瓣与阀座因材料成分、几何尺寸不同，热膨胀系数存在差异，高温下膨胀系数大的部件变形量更大，导致密封面无法完全贴合形成间隙。另一方面，阀体整体热变形会改变阀瓣与阀座相对位置，影响密封副接触状态，如阀体高温下可能出现弯曲变形，导致阀瓣与阀座中心线偏移，造成密封面接触应力分布不均，局部应力过大引发磨损、应力过小则无法实现有效密封。

2.2 高压对安全阀密封性能的影响

(1) 对密封副接触状态的影响

高压会显著加剧密封副接触应力，引发系列问题。从接触应力过大角度看，高压下阀瓣与阀座密封面接触应力大幅增加，当超过材料许用接触应力时，密封面会产生塑性变形，且启闭过程中密封面滑动摩擦会加剧磨损。在接触应力分布不均方面，由于密封面存在加工误差，高压下接触应力分布差异显著，局部区域应力过大、局部过小甚至无接触，应力过小区域无法形成有效密封，介质易从这些区域泄漏。

(2) 对密封材料密封性的影响

高压会加剧介质对密封材料的渗透与侵蚀。在介质渗透方面，高压提升介质分子动能，使其易渗透密封材料微小孔隙，如石墨密封材料内部存在孔隙，高压氢气环境下氢气分子易渗透导致密封失效。从介质侵蚀角度看，高压下介质流速加快，对密封面冲刷作用增强，若介质含固体颗粒，冲蚀磨损会更严重。

2.3 温度与压力耦合作用对密封性能的影响

高温高压工况下，温度与压力并非单独作用，而是呈现耦合效应加剧密封失效风险。首先是热应力与接触应力叠加，高

温使密封结构产生热应力，高压使密封副产生接触应力，两者叠加后密封面总应力显著升高，超过材料承载极限，长期运行易引发密封面开裂。其次是材料性能劣化加速，高温降低材料强度硬度，高压加剧材料塑性变形与磨损，耦合作用下材料性能劣化速度大幅提升。

3 高温高压安全阀密封性能优化方案

3.1 密封结构优化设计

(1) 多道密封结构设计

针对高温高压工况下单一密封结构易失效的问题，设计“主密封+副密封+辅助密封”的多道密封结构。主密封结构采用 30° ~ 45° 锥角的锥形密封面设计，利用高压介质压力实现自紧密封，压力越高密封面接触应力越大、密封效果越好，主密封面选用 Inconel 718 高温合金，表面粗糙度控制在 $Ra 0.1 \mu m$ 以下、平面度误差不超过 $0.01mm$ ，确保贴合精度。副密封结构在主密封面外侧设置，采用金属包覆石墨密封环，利用其弹性变形补偿主密封面热变形与磨损，密封环选用石墨-金属复合材料，兼顾弹性与强度耐磨性。辅助密封在阀瓣与阀体之间设置氟橡胶改性 O 型圈，可在 $-20^{\circ}C$ ~ $250^{\circ}C$ 范围内保持良好弹性，防止介质从阀瓣与阀体间隙泄漏，同时外侧设置防尘圈，避免固体颗粒进入密封区域造成磨损，三道密封相互配合形成全方位密封体系，大幅提升密封可靠性。

(2) 热变形补偿结构设计

为解决高温导致的密封结构热变形问题，设计基于弹性元件的热变形补偿结构。一方面在阀瓣与阀杆之间设置 Haynes 282 高温合金波形弹簧，可在 $650^{\circ}C$ 以下保持良好弹性，温度升高时通过压缩或伸长补偿阀瓣与阀座的热变形，确保密封面始终良好接触。另一方面将阀座设计为分体式结构，由阀座本体与弹性支撑圈组成，弹性支撑圈采用不锈钢材料，利用其弹性补偿阀座本体热变形，同时在阀座本体与阀体之间设置陶瓷纤维隔热垫片，减少阀体热量向阀座传递，降低阀座温度变化幅度，减少热变形量，通过该结构可将密封面热变形量控制在 $0.02mm$ 以下，显著降低热变形导致的密封间隙。

3.2 密封材料改进

(1) 高温合金材料的筛选与改性

针对传统密封材料硬度低、耐磨性差的问题，优先筛选镍基高温合金与钴基高温合金作为密封面基材。Inconel 718 合金在 $650^{\circ}C$ 以下具有优异强度与韧性，常温硬度达 HRC 35， $600^{\circ}C$ 时仍保持 HRC 28 以上，满足温度 $\leq 600^{\circ}C$ 、压力 $\leq 30MPa$ 的中高温高压工况密封要求；Stellite 6 合金含大量铬、钨元素，耐高温腐蚀性能突出，在含硫、含氯腐蚀性介质中仍能保持良好密封性，适合化工领域高温高压设备安全阀。

(2) 陶瓷基复合材料的应用

针对温度 $> 600^{\circ}C$ 、压力 $> 30MPa$ 的极端高温高压工况，采用以碳化硅、氧化铝为基体，碳纤维、碳化硅纤维为增强相的陶瓷基复合材料作为密封面材料，其具有耐高温、高硬度、耐腐蚀特性。材料制备采用化学气相渗透工艺，将碳纤维预制体放入反应炉，通入甲烷与硅烷混合气体， 900 ~ $1100^{\circ}C$ 下气体在纤维表面反应生成 SiC 基体，保温 20 ~ $30h$ 确保基体致密性，避免基体与纤维界面反应。

(3) 金属-石墨复合密封材料的研发

针对高压工况下密封面磨损严重的问题，研发以金属为骨架、石墨为润滑相的金属-石墨复合密封材料，兼具金属高强度与石墨自润滑特性。材料配比上，金属骨架占比 60% ~ 70% ，选用纯度 99.9% 、粒度 50 ~ $100 \mu m$ 的电解铜粉确保强度；石墨相占比 30% ~ 40% ，选用粒度 50 ~ $80 \mu m$ 的高纯度鳞片石墨提升自润滑性；同时添加 1% ~ 2% 锡粉作为粘结剂，增强金属与石墨结合强度。

3.3 密封工艺创新

(1) 激光熔覆表面强化工艺

采用激光熔覆表面强化工艺提升密封面硬度与耐磨性，该工艺利用高能激光束将熔覆材料与基体表面快速熔化，形成高性能熔覆层。熔覆材料选择需匹配基材，Inconel 718 合金基材选用含铬、硼、硅的 Ni60A 镍基合金粉末，可形成耐磨耐腐蚀熔覆层；碳钢基材选用 Fe314 铁基合金粉末，提升密封面硬度强度。工艺参数优化为激光功率 1.5 ~ $2.5kW$ 、扫描速度 200 ~ $300mm/min$ 、光斑直径 3 ~ $5mm$ 、送粉量 10 ~ $15g/min$ ，确保熔覆层与基体冶金结合，熔覆层厚度控制在 0.5 ~ $1mm$ 、表面粗糙度 $Ra \leq 0.8 \mu m$ 。经该工艺处理的 Inconel 718 合金密封面，硬度达 HRC 55 以上， $500^{\circ}C$ 、 $25MPa$ 工况下磨损速率较未处理表面降低 70% ，密封寿命延长 2 倍以上。

(2) 精密加工工艺优化

密封面加工精度直接影响密封性能，需优化精密加工工艺。平面度加工采用超精密磨削工艺，选用 800 ~ 1000 目金刚石砂轮，磨削速度 30 ~ $40m/s$ 、进给量 5 ~ $10 \mu m/次$ ，通过多道磨削工序将密封面平面度误差控制在 $0.005mm$ 以下，确保贴合精度。粗糙度加工采用超精密抛光工艺，选用 1 ~ $3 \mu m$ 粒度金刚石抛光膏，抛光压力 5 ~ $10N$ 、时间 10 ~ $20min$ ，使密封面粗糙度达 $Ra 0.02$ ~ $0.05 \mu m$ ，减少密封间隙降低泄漏风险，同时抛光过程中密封面表面形成氧化膜，可提升耐腐蚀性能。

3.4 密封性能检测技术优化

(1) 在线密封泄漏量监测系统

开发基于差压法的在线密封泄漏量监测系统，实时监测安全阀密封泄漏量。系统由差压传感器、数据采集模块、无线传输模块与上位机组成，差压传感器安装在安全阀出口管道，测

量精度 $\pm 0.1\text{kPa}$ ；数据采集模块采用 16 位 AD 转换器，采样频率 100Hz，将模拟信号转换为数字信号；无线传输模块采用 LoRa 技术，传输距离 1-3km 确保数据稳定传输；上位机为工业控制计算机，安装监测软件实现数据实时显示、存储与报警。工作原理为：密封良好时安全阀前后压力差稳定，密封失效时介质泄漏导致压力差变化，差压传感器将信号传输至数据采集模块，经处理后通过无线模块发送至上位机，软件根据压力差变化计算泄漏量，当泄漏量超过设定阈值时，系统发出报警信号提醒维护。

(2) 密封面温度与接触应力监测

开发基于光纤传感器的密封面温度与接触应力监测系统，实现关键参数实时监测。温度监测采用分布式光纤传感器，选用直径 0.2mm 的石英光纤粘贴在密封面表面，通过光时域反射技术测量光纤背向散射光强度，根据强度与温度关系计算密封面温度，测量精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 、范围-50°C-800°C，可实时监测温度分布，及时发现局部过热区域。接触应力监测采用光纤光栅传感器，嵌入阀瓣密封面内部，密封面受接触应力时光纤光栅形变、栅距变化导致反射光波长变化，通过测量波长变化计算接触应力，测量精度 $\pm 1\text{MPa}$ 、范围 0-500MPa，可实时监测接触应力分布，避免局部应力过大损坏密封面。

(3) 离线密封性能检测装置

设计高温高压离线密封性能检测装置，用于安全阀检修后

密封性能测试。装置由高温高压试验舱、压力控制系统、温度控制系统与泄漏量测量系统组成。离线密封性能检测装置的检测流程如下：首先将检修后的安全阀安装在试验舱的安装接口上，确保连接部位密封良好；然后关闭试验舱，通过压力控制系统向舱内充入惰性气体，缓慢升压至安全阀的密封试验压力，期间密切观察压力变化，确保无异常泄漏；接着启动温度控制系统，将舱内温度升至设备实际工作温度，保温保压 30-60min，使安全阀密封面达到热稳定状态；之后通过泄漏量测量系统收集并测量泄漏气体量，若泄漏量小于相关标准规定值，则判定安全阀密封性能合格，可投入使用；若泄漏量超标，需拆解安全阀重新研磨密封面或更换密封部件，再次进行检测直至合格。该装置的应用可有效避免检修后的安全阀因密封性能不达标导致的运行风险，为安全阀的可靠运行提供保障。

4 结论与展望

本文研究明确高温高压会通过材料软化、应力叠加等加剧安全阀密封失效，提出的“结构-材料-工艺-检测”多维度优化方案效果显著，为相关设备安全运行提供支撑。但研究仍存在不足，对 800°C 以上极端工况适配性、密封长效稳定性及方案经济性考虑较少。未来需重点研发超高温密封材料与自适应结构，建立密封寿命预测模型，探索低成本国产化方案，并融合 AI 与仿生学技术，推动高温高压安全阀密封技术向更可靠、经济、智能方向发展，助力相关领域高质量进步。

参考文献：

- [1] 宿素玲,王丽娜,王晏远.模拟高温高压下安全阀校验技术探讨[C]//2012 年全国特种设备安全与节能学术会议论文集.2012:629-632.
- [2] 夏舒阳.高温蒸汽安全阀工作特性研究[D].浙江:浙江工业大学,2017.
- [3] 张学辉,朱海清,郭爱民.基于 ANSYS 的安全阀工况条件温度场的数值模拟[J].轻工机械.2015,(2).
- [4] 郭崇志.安全阀检测新技术的理论与实验研究[D].2009.