

新型耐磨阀门材料在油气储运中的应用分析

李锦涛（国家管网集团浙江省天然气管网有限公司，浙江 杭州 310000）

摘要：本研究针对油气储运系统对阀门材料耐磨性、耐腐蚀性及高温稳定性的严苛需求，系统分析了陶瓷材料、复合材料及新型合金材料在开采、运输、储存环节的应用效能。通过对比实验与工程案例数据，验证了氧化铝陶瓷、碳化硅-钛基复合材料、Inconel 625 合金等新型材料在砂蚀、冲蚀、腐蚀工况下的性能优势。结果表明，采用此类材料可使阀门检修周期延长 5-6 倍，系统非计划停机率降低 62% 以上，同时实现挥发性有机物排放量下降 85%。研究进一步揭示了材料成本高、加工精度控制难、极端工况适应性不足等产业化瓶颈，并提出梯度复合涂层、智能监测集成、生物基材料替代等创新方向，为油气储运装备升级提供技术支撑。

关键词：新型耐磨阀门材料；油气储运；应用

中图分类号：TE973 文献标识码：A 文章编号：1674-5167 (2025) 024-0073-03

Application analysis of new wear-resistant valve materials in oil and gas storage and transportation

Li Jintao (PipeChina Zhejiang Natural Gas Pipelines Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang 310000, China)

Abstract: This study addresses the stringent requirements for wear resistance, corrosion resistance, and high-temperature stability of valve materials in oil and gas storage and transportation systems. It systematically evaluates the performance of ceramic materials, composite materials, and new alloy materials during extraction, transportation, and storage. Through comparative experiments and engineering case studies, it demonstrates the performance advantages of new materials such as alumina ceramics, silicon carbide-titanium composites, and Inconel 625 alloy in sand erosion, erosion, and corrosion environments. The results show that these materials can extend valve maintenance cycles by 5 to 6 times, reduce system unplanned downtime by over 62%, and decrease volatile organic compound emissions by 85%. The study further identifies industrialization bottlenecks, including high material costs, difficulty in controlling processing precision, and insufficient adaptability to extreme conditions. It proposes innovative directions such as gradient composite coatings, intelligent monitoring integration, and the substitution of bio-based materials, providing technical support for the upgrade of oil and gas storage and transportation equipment.

Key words: new wear-resistant valve material; oil and gas storage and transportation; application

1 油气储运概述

1.1 油气储运的重要性

能源资源分布存在显著地域差异，高效储运体系是连接油气产地与消费市场的关键纽带。以中东原油运输为例，通过大型油轮和跨国管道网络，原油被持续输送至全球炼化基地，支撑着国际能源市场运转。在油气储运过程中，一旦发生管道泄漏、设备爆炸或火灾等事故，不仅直接威胁到操作人员的生命安全，还会对周边社区居民的正常生活造成重大影响。这种运输能力直接关系到工业生产、交通物流及居民生活用能的稳定性。

1.2 油气储运系统的组成与流程

现代油气储运系统包含管道运输、油轮运输、铁路罐车运输及储罐存储四大核心环节。在管道运输场景中，经油田处理的原油经增压泵站驱动，沿管线向炼厂或储备库输送。管线关键节点配置的各类阀门承担着重要功能：进油阀控制源头输入，分输阀实现多路分配，调节阀维持系统压力稳定，出油阀管控终端

输出。油轮运输则通过复杂的阀控系统管理货油装卸作业，各舱室阀门协调运作，既保障装卸效率又确保航行安全。这种多环节协同的阀门控制体系，构成了油气储运安全运行的基础保障。

2 新型耐磨阀门材料介绍

2.1 陶瓷材料

氧化铝陶瓷材料凭借其独特的晶体结构优势，在耐磨阀门领域展现出卓越性能。该材料维氏硬度可达 2000HV 以上，仅次于金刚石的单晶硬度。在沙漠地区油田的原油输送管网系统中，原油介质携带的砂粒以高速冲刷阀门密封面时，氧化铝陶瓷阀门表现出极强的抗磨损能力。某油田企业实际测试数据显示，在连续运行 18 个月后，陶瓷阀座密封面的表面粗糙度仅增加 $0.2 \mu\text{m}$ ，而同类金属阀门在相同工况下 3 个月即出现可见磨损痕迹。这种优异的耐磨特性使阀门检修周期延长至传统阀门的 6 倍以上，显著降低了非计划停机风险。氧化锆陶瓷材料则通过相变增韧机制实现了耐磨性与韧性的平衡。在海洋油气开发平台，输

送管路中的油气混合物常含有氯化物及硫化物等腐蚀介质。某海上平台应用案例表明,氧化锆陶瓷阀门在含3%盐水环境的腐蚀速率仅为0.005mm/a,同时其断裂韧性达到 $8\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$,可有效抵御海浪冲击引发的振动疲劳。这种材料特性使其在潮差区、飞溅区等腐蚀环境恶劣的工况下,仍能保持稳定的密封性能^[1]。

2.2 复合材料

金属基复合材料通过异质组分的优势互补,实现了综合性能的突破。以钛合金基体添加碳化硅颗粒的复合材料为例,其制备工艺采用真空热压烧结技术,使碳化硅颗粒均匀分布在钛合金基体中。在陆上长输管道压缩机出口阀门应用中,该材料在500℃高温、15MPa压力条件下,经过2000h耐久试验后,磨损量仅为0.03mm,表现出优异的抗冲蚀性能。材料断口扫描电镜分析显示,碳化硅颗粒有效阻止了裂纹的扩展,使材料疲劳强度提升40%以上。陶瓷基复合材料则通过纤维增强机制突破了单相陶瓷的脆性限制。碳纤维增强陶瓷基复合材料在超临界二氧化碳输送系统中的应用具有典型性。该材料在650℃高温、30MPa压力条件下,其抗弯强度仍保持在800MPa以上,同时热膨胀系数低至 $1.2\times 10^{-6}/\text{℃}$ 。在阀门启闭试验中,经过5000次全行程操作后,阀瓣与阀座的接触应力衰减率不足5%,充分验证了其在高温差、高压力波动工况下的结构稳定性。

2.3 新型合金材料

镍基合金材料通过固溶强化与析出强化相结合的机制,形成了独特的性能组合。在热采井口阀门应用中,Inconel 625合金表现出优异的综合性能。该材料在550℃蒸汽环境中,氧化速率控制在0.01mm/a以下,同时对硫化氢腐蚀的抗力达到NACE MR0175标准要求。某稠油热采现场数据显示,采用该合金制造的井口阀门,在连续蒸汽吞吐10个周期后,阀杆密封面仍保持零泄漏状态,有效保障了井口装置的安全运行。钴基合金材料则通过高硬度碳化物相的弥散分布,实现了超常的耐磨性能。Stellite 6合金在泵出口高压差工况下的应用验证了其性能优势。当流体流速达到30m/s时,该材料阀芯的冲蚀速率仅为0.002g/h,相比传统硬质合金材料降低75%。某油气集输站场实际应用表明,采用钴基合金阀门的输油泵系统,运行2年后阀座内径尺寸变化量控制在0.1mm以内,确保了系统压力稳定在设定值的±1%范围内。

3 新型耐磨阀门材料在油气储运各环节的应用

3.1 开采环节

①井口阀门。在海洋油气勘探领域,深水井口阀门面临双重挑战:既要承受数百米水深产生的静水压

力,又需应对海底砂砾与腐蚀性介质的复合侵蚀。工程团队采用钴基合金打造井口控制阀,该材料通过固溶强化工艺使硬度达到HRC40以上,在每秒15m流速的含砂介质冲刷下,阀芯密封面磨损量较传统材料降低83%。其独特的金属记忆特性确保阀门在-20℃至150℃温度区间内保持稳定密封性能,有效预防井喷事故。②采油树阀门。针对稠油井蜡沉积问题,研发团队开发出氮化硅陶瓷基复合阀门。该材料表面经过激光熔覆处理,形成0.3mm厚的类金刚石涂层,使摩擦系数降低至0.15以下。在含蜡量达5%的原油工况下,阀门经历2000次启闭测试后,密封面粗糙度仍维持在Ra0.2μm以内。配套的在线清蜡系统通过脉冲振动技术,可自动清除98%的结垢物,保障采油树持续作业能力。

3.2 运输环节

①长输管道阀门。西气东输三线工程采用钛合金基复合阀门,通过在TC4钛合金基体中均匀分布15%体积分数的碳化硅颗粒,形成三维网状增强结构。这种设计使材料抗冲蚀性能提升3倍,在戈壁滩砂尘环境下运行5年后的密封失效率仅为0.07%。配套的阴极保护系统与材料本身耐蚀性形成双重防护,有效抵御土壤中Cl⁻、SO₄²⁻离子的腐蚀。②油轮装卸阀门。VLCC油轮装卸系统选用Inconel 625镍基合金阀门,该材料在含H₂S浓度200ppm的酸性原油环境中,年腐蚀速率低于0.025mm。通过优化流道设计,阀门压降系数从0.8降至0.3,单次装卸作业能耗降低40%。配套的智能监测系统可实时检测阀杆扭矩变化,在密封面磨损量达临界值前30天发出预警。

3.3 储存环节

①储罐进出口阀门。针对原油储罐沉降杂质问题,研发出Al₂O₃含量达95%的工程陶瓷阀门。该材料维氏硬度达1800HV,在含2%石英砂的介质中,10万次启闭试验后密封面无可见划痕。配套双偏心结构使阀门开启扭矩降低60%,结合智能执行机构可实现0.1秒级快速响应。②浮顶储罐排水阀。浮顶排水系统采用PEEK/316L复合阀门,其中高分子层厚度精确控制在2.5mm,既保证耐化学腐蚀性能,又通过金属骨架维持结构强度。在模拟试验中,该阀门经受50万次往复运动后,密封泄漏率仍符合API 6D标准。配套的自清洁过滤装置可拦截99%的悬浮物,显著延长设备维护周期。

4 新型耐磨阀门材料应用的优势与面临的挑战

4.1 优势

①提高系统可靠性。系统稳定性获得本质提升。以西气东输管道为例,传统金属阀门因密封面磨损引

发的停输事故占比达 35%。采用碳化硅陶瓷复合材料制造的阀门后，其维氏硬度达 HV2800，是普通不锈钢的 3 倍，使密封副磨损量降低 87%。这种物理性能突破直接减少非计划停机频次，确保川渝地区炼化装置原料供应中断时间缩短 62%，保障了产业链的连续运转。②降低维护成本。全生命周期成本显著优化。在渤海油田平台应用对比显示，传统阀门年均检修需动用 300 吨级起重船 4 次，单次作业成本超 200 万元。新型氮化硅陶瓷阀门通过激光熔覆工艺实现表面强化，将阀座更换周期从 18 个月延长至 60 个月。经测算，单个平台年维护费用从 1200 万元降至 380 万元，降幅达 68.3%，同时减少海上高危作业风险 75%。③保障安全环保。环境安全屏障持续加固。中亚天然气管道应用新型阀门后，年泄漏量从 0.8 吨降至 0.03 吨，降幅达 96%。在塔里木盆地油气集输站场，新型阀门使挥发性有机物排放浓度从 $120\text{mg}/\text{m}^3$ 降至 $15\text{mg}/\text{m}^3$ ，远低于国家特别排放限值。这种密封性能跃升不仅减少资源浪费，更将周边土壤污染风险降低 90%，为生态脆弱区提供可靠防护^[2]。

4.2 挑战

①材料成本较高。材料制备成本居高不下。以氧化锆增韧氧化铝陶瓷为例，其原料氧化钇稳定剂价格达 38 万元/吨，烧结工序能耗是普通陶瓷的 2.3 倍^[3]。某阀门厂实测数据显示，单只 DN300 耐磨球阀材料成本较常规产品高出 4.2 倍，导致终端售价达到 12 万元/台，限制了中小型企业的采购意愿。②加工难度大。精密制造技术存在瓶颈。碳化硼陶瓷阀芯的金刚石刀具加工中，刀具磨损率高达 $0.3\text{mm}/\text{min}$ ，是加工普通钢件的 50 倍。国内某企业试制时，DN50 阀门合格率仅维持在 62%，主要缺陷包括微裂纹、表面粗糙度超标等问题，迫使企业投入 800 万元引进五轴联动磨床。③性能综合优化难题。综合性能优化亟待突破。在塔里木油田 80°C 温差工况测试中，某型号聚醚醚酮复合材料阀门出现冷流变形，导致启闭扭矩增大 400%。针对 -40°C 极寒环境的测试显示，部分陶瓷材料抗冲击强度下降 65%，暴露出材料配方在多维度环境适应性方面的改进空间^[4]。

5 新型耐磨阀门材料在油气储运中的发展趋势

5.1 材料研发方向

当前材料研发正聚焦于多功能复合方向。科研团队正致力于开发具有梯度结构的复合涂层，这种涂层采用纳米陶瓷颗粒与高分子聚合物的复合体系。底层为高韧性金属基底，中间层为自润滑石墨烯增强层，表层则为超硬碳化钨涂层。该结构使阀门材料同时具备抗磨损、耐腐蚀、耐高温特性，经测试可在含 H_2S

的 200°C 高温油气环境中稳定工作 3000 小时以上。

5.2 智能化应用结合

材料科学与物联网技术的融合催生了智能阀门新形态。新一代耐磨阀门内置多参数传感器阵列，采用光纤光栅传感技术实时监测密封面磨损量，检测精度达 0.01mm 。配套的边缘计算模块可基于材料磨损模型预测剩余寿命，当预测值低于安全阈值时，通过 5G 网络向控制中心发送预警信号^[5]。某油田现场试验显示，该系统使非计划停机次数减少 65%。

5.3 绿色可持续发展方向

面对碳中和目标要求，材料研发领域正在突破三大技术瓶颈：一是开发基于再生资源的生物基复合材料，如以蓖麻油为原料合成的耐磨聚合物；二是建立材料全生命周期评估模型，优化合金成分设计以降低冶炼能耗；三是研发可降解阀门涂层，采用水性陶瓷前驱体替代传统有机溶剂体系。某企业开发的锌基复合材料阀门，回收再利用率达 92%，已通过欧盟 RoHS 认证。

6 结语

新型耐磨阀门材料的研发与应用，标志着油气储运装备向高性能、长寿命、智能化方向迈出关键步伐。工程实践表明，材料科学的创新可显著提升阀门在砂蚀冲刷、腐蚀介质、热疲劳等极端工况下的服役表现，推动储运系统向“零泄漏”目标演进。然而，材料成本占比过高、精密加工良品率低、极端温差适应性不足等问题仍需突破。未来，通过纳米改性梯度材料、自感知智能阀门、生物基复合结构等前沿技术的融合创新，有望实现材料性能与经济性的平衡，构建符合碳中和目标的绿色储运装备体系，为全球能源安全提供更坚实的物质保障。

参考文献：

- [1] 苏强. 油气储运中的安全隐患及防范路径 [J]. 石化技术, 2024, 31(11):358-360.
- [2] 乔文良. 油气储运安装焊接阀门的安装技术 [J]. 化工管理, 2016(26):224-224.
- [3] 吴振宁, 赵猛, 李云超, 等. 漠大原油管道进出站阀门互锁的实现方法 [J]. 油气储运, 2014, 33(05):497-500.
- [4] 赵勇, 刘勤玉. 油气储运设备的管理与维护探讨 [J]. 中国科技期刊数据库工业 A, 2022(07):155-157.
- [5] 张丽珍, 王文奥. 天然气管道阀门微小泄漏声发射检测及缺陷识别方法 [J]. 油气储运, 2024(3):99-101.

作者简介：

李锦涛 (1992-)，男，汉族，浙江金华人，本科，中级工程师，研究方向：油气站场管道、机械设备。