

煤浆管输大口径高压阀门技术现状与展望

王中慧*

中煤科工集团武汉设计研究院有限公司, 湖北武汉, 中国

*通讯作者

【摘要】粗颗粒煤浆管道输送技术是提升煤炭运输效率与经济性的一个重要发展方向, 其中大口径高压耐磨阀门是影响系统可靠运行的核心装备。本文针对千公里级输煤管道对 DN800 以上口径、承受 10MPa 以上压力阀门的迫切需求, 分析了粗颗粒煤浆强磨蚀、易沉积等特性对阀门密封、材料、结构和腐蚀等方面提出的严峻挑战。指出了当前阀门在密封可靠性、耐磨材料、流道设计、腐蚀与冲蚀耦合防护等方面存在的关键技术瓶颈。在此基础上, 提出了以高性能复合材料、CFD/FEA 辅助结构优化和智能传感预警系统为主要方向的技术创新路径。研究表明, 通过材料—结构—智能的协同创新, 实现大口径高压耐磨阀门的自主研发与应用, 对保障我国长距离煤炭清洁输送系统的安全稳定运行、推动重大装备自主化具有重要意义。

【关键词】粗颗粒煤浆; 管道输送; 大口径高压阀门; 耐磨材料; 结构优化; 智能化监测; 性能检测

【基金项目】中煤科工集团武汉设计研究院有限公司自主研发项目“超长运距数智化输煤管道成套装备研发”(编号: 2025-ZDGJ014)

1. 引言

粗颗粒煤浆管道输送技术是破解煤炭规模化、低成本运输难题的关键路径, 而大口径高压耐磨阀门[1]作为该输送系统的核心控制装备, 其性能直接决定系统运行的稳定性、安全性与经济性。在千公里级输送距离、千万吨级年输送量的大型工程场景中, 系统运行压力常超 10MPa, 管道通径需达到 DN800 及以上, 且粗颗粒煤浆具有高浓度、大粒径、强磨蚀的本质特性, 对阀门的通径适配能力、承压等级、耐磨性能[2]及密封[3]可靠性提出了极致要求。当前国内外大口径高压耐磨阀门的技术发展仍面临显著瓶颈: 国内现有煤浆阀门通径多局限于 DN650 以下, 难以匹配 DN800 及以上粗颗粒煤浆管道的应用需求; 抗磨材料[4]方面, 传统金属合金存在耐磨寿命短的问题, 新型复合抗磨材料的研发与工程化应用仍不充分; 结构设计上, 常规阀门的流道布局易导致煤浆颗粒滞留冲刷, 加剧局部磨损与密封失效风险。这些技术短板不仅限制了粗颗粒煤浆管道输送技术的规模化推广, 还导致输送系统频繁出现非计划停机, 显著增加了运营成本。

因此, 阀门作为粗颗粒煤浆管道输送技术产业化的核心设备, 其技术突破与工程应用对于实现煤炭等矿产资源的安全高效输送

具有不可替代的关键作用。

2. 煤浆管输大口径高压阀门的研究现状

2.1 国内外技术发展现状

在全球浆体输送阀门技术领域, 美国、澳大利亚、南非等国家起步较早, 已形成以美国 Flowserve、澳大利亚 Weir Group、南非 Metso Outotec 为代表的技术垄断格局。这些企业生产的大口径高压耐磨阀门产品, 例如 DN1000、15MPa 等级型号, 已在多个大型浆体输送工程中成功应用, 阀门使用寿命可达 12 至 18 个月, 密封泄漏率低于 $10^{-6} \text{MPa} \cdot \text{m}^3 / \text{s}$ 。其核心技术优势集中体现于多个方面, 包括采用碳化复合材料制备过流部件, 结合流线型流道设计与弹性补偿密封结构, 并搭配在线监测系统来实现预测性维护。此外, 国外企业在材料研发、数值模拟仿真、智能化技术集成等领域投入巨大, 逐步构建起从材料研发到产品交付的全链条技术体系, 进一步夯实了其在行业中的主导地位。

国内方面, 粗颗粒煤浆阀门技术研发起步较晚, 长期处于跟跑状态。现有煤浆阀门产品主要集中于 DN650 以下、压力 10MPa 以下的中低端场景, 难以匹配 DN800 及以上、压力 10MPa 以上的粗颗粒煤浆管道应用需求。一方面是抗磨材料性能不足, 传统金属合金(如高铬铸铁、硬质合金)耐磨寿命

短（国内产品平均使用寿命仅 3-6 个月），新型复合抗磨材料的研发与工程化应用不充分，材料性能与国外差距明显；二是结构设计不合理，常规阀门的流道布局易导致煤浆颗粒滞留冲刷，加剧局部磨损与密封失效风险，且大口径高压工况下的结构强度与操作扭矩平衡难题尚未有效解决，数值模拟仿真技术在结构优化中的应用深度不足；三是智能化水平低，缺乏对阀门运行状态的实时监测与故障预警能力，导致系统频繁出现非计划停机，显著增加了运营成本；四是性能检测评价体系不完善，缺乏针对粗颗粒煤浆工况的专用检测设备与标准，难以全面准确评估阀门的实际使用性能。

2.2 大口径高压耐磨阀门的关键问题

2.2.1 材质问题

粗颗粒煤浆具有较高的磨蚀性，对阀门内部的流道磨损严重，尤其是阀座、阀芯和阀体等与煤浆直接接触的部位，极大的降低了阀门使用寿命。因此，阀门材质需要具备优异的耐磨性能，以延长阀门的使用寿命。常见的耐磨材料有硬质合金、陶瓷、高铬铸铁等，但这些材料的成本较高，加工难度大。同时，大口径高压压力耐磨煤浆阀需要承受较大的压力[5]和冲击力，因此阀门材质需要具备足够的强度和韧性，以保证阀门的安全运行。如果材质的强度不足，可能会导致阀门变形、破裂等事故；如果韧性不足，可能会导致阀门在冲击载荷下发生脆性断裂。

2.2.2 密封问题

在高压工况下，阀门需承受较大的压力差，密封性[6]能直接决定系统的运行安全性与经济性。粗颗粒煤浆阀门的密封主要在密封材料磨损与颗粒卡涩问题，且两者相互影响，加剧密封失效。

密封材料方面，常用的密封材料如橡胶、聚四氟乙烯等，在长期的煤浆冲刷和高压作用下，容易老化、变形和磨损，导致密封失效。虽然硬质合金密封耐磨性好，但密封面加工精度要求极高，且在高压工况下易出现“硬碰硬”密封的泄漏问题，同时缺乏弹性补偿能力，无法适应密封面的轻微磨损与变形。

颗粒卡涩方面，粗颗粒煤浆中的固体颗粒（尤其是 1-5mm 的颗粒）可能进入阀门密封面之间，影响密封效果，甚至导致卡阀事故。例如，当阀门关闭时，颗粒可能嵌入密封面间隙，导致阀门无法完全关闭；当阀门

开启时，颗粒可能卡在阀芯与阀座之间，导致阀门无法正常开启，严重影响系统的稳定安全运行。此外，煤浆中的细颗粒还会在密封面形成沉积层，进一步加剧密封面的磨损与卡涩。

大口径阀门的密封面加工与安装精度难以保证，也是导致密封失效的重要原因。DN800 以上阀门的密封面周长超过 2.5m，要保证整个密封面的平面度 $\leq 0.02\text{mm}$ 、垂直度 $\leq 0.03\text{mm}$ ，加工难度极大，国内现有加工设备的精度难以满足要求，导致部分阀门在安装后即存在轻微泄漏。同时，大口径阀门的密封面受力分布不均，在高压工况下易出现局部应力集中，加速密封面磨损与失效。

2.2.3 流道设计与结构优化问题

流道设计与结构优化[7]是保障煤浆阀适配粗颗粒煤浆输送工况的关键，核心目标在于减少煤浆流经阀门的流动阻力，提升管道输送效率，同时降低系统能耗。由于粗颗粒煤浆属于固液两相流，具备颗粒粒径大、流动性复杂的特性，流道设计需充分契合其流动规律与颗粒分布特征，重点规避煤浆在流道内出现颗粒沉淀、管道堵塞及局部冲刷磨损等问题，此类问题不仅会降低输送效率，还会加剧阀门部件损耗，严重影响系统运行稳定性。通过采用针对性的流道优化设计可有效改善上述问题，例如流线型流道能减少流场扰动，避免形成涡流区与颗粒滞留区；渐扩式流道可缓解高速煤浆对阀门过流部件的冲击冲刷；多孔式流道则能均衡流场分布，降低局部颗粒浓度过高导致的堵塞风险。通过这类优化设计，可显著改善煤浆流动状态，同步提升阀门耐磨性能与系统运行可靠性，为粗颗粒煤浆的稳定输送提供保障。

2.2.4 腐蚀与冲蚀耦合防护问题

粗颗粒煤浆中不仅含有大量固体颗粒，还可能含有水分、盐分、酸性或碱性物质，这些物质会与阀门材料发生化学腐蚀反应[8]，同时颗粒的冲刷作用会破坏腐蚀产物膜，形成“腐蚀—冲蚀”耦合效应，加速阀门部件的失效。腐蚀类型主要包括电化学腐蚀、化学腐蚀与应力腐蚀开裂：电化学腐蚀是由于阀门材料中不同金属成分形成原电池，在煤浆电解质环境中发生氧化还原反应，导致材料腐蚀；化学腐蚀是煤浆中的酸性物质（如 CO_2 、 H_2S ）与阀门材料直接发生化学反应，生成易脱落的腐蚀产物；应力腐

蚀开裂是在腐蚀环境与结构应力的共同作用下，阀门材料表面产生微裂纹并不断扩展，最终导致断裂失效。

目前，国内阀门企业对“腐蚀—冲蚀”耦合效应的研究不足，缺乏有效的防护措施。常用的防护方法如涂覆防腐涂层、采用耐腐蚀材料等，存在涂层易脱落、材料成本高的问题。例如，常规防腐涂层在颗粒冲刷下的使用寿命仅1-2个月，无法满足长期运行要求；而完全采用耐腐蚀陶瓷材料则面临加工难度大、成本过高的问题。因此，研发兼顾耐磨、耐腐蚀、抗冲击的复合防护技术，是解决“腐蚀—冲蚀”耦合问题的关键。

3.未来研究方向及展望

3.1 未来研究方向

3.1.1 材料创新

材料创新是提升阀门耐磨性与服役寿命的根本途径。未来重点在于研发新型高性能复合材料，例如碳纳米管增强陶瓷基复合材料及纳米颗粒增强金属基复合材料，通过多相材料的协同效应实现性能突破。以碳纳米管增强陶瓷为例，碳纳米管凭借其极高的强度与韧性，可有效桥联和抑制微裂纹扩展，显著改善陶瓷材料的本征脆性，从而在保持高硬度的同时提升断裂韧性，使阀门关键部件在承受高流速煤浆冲蚀时兼具优异的抗磨损能力与抗冲击性能。此类材料的应用将为极端工况下阀门的长期稳定运行提供关键材料基础。

3.1.2 结构优化

基于数值模拟的流道与结构优化是降低磨损、提升效率的核心手段。借助计算流体力学（CFD）与有限元分析（FEA）等先进仿真工具[9]，可对阀门内部流场、颗粒运动轨迹及结构应力进行精确模拟与可视化分析。通过CFD仿真能够识别流道内的涡流、滞止区及局部高速冲蚀区域，进而对流道型线进行参数化与优化设计，旨在实现流场的均匀分布与能量损耗的最小化。结合FEA进行结构强度与疲劳寿命评估，可确保优化后的阀门在承受高压与脉冲载荷下的力学可靠性，最终实现流体性能与结构完整性的协同优化。

3.1.3 腐蚀与冲蚀耦合防护技术

针对粗颗粒煤浆工况下“腐蚀—冲蚀”耦合难题，未来研究应聚焦三大方向。一是复合防护涂层研发，着力开发耐磨—耐蚀—

体化涂层，如金属陶瓷涂层、碳化物涂层、聚脲涂层等，依托等离子喷涂、激光熔覆、超音速火焰喷涂等先进工艺提升涂层与基体结合强度、硬度及耐磨性，典型如超音速火焰喷涂WC-CoCr涂层，兼具优异耐磨与耐腐蚀性能。二是表面改性技术，通过表面淬火、渗碳、渗氮等方法强化阀门过流部件表面，提升硬度、耐磨性与耐腐蚀性，例如对高铬铸铁阀芯实施表面渗氮处理形成致密氮化层。三是腐蚀监测技术，开发在线腐蚀监测传感器实时追踪部件腐蚀状态，结合数据驱动模型预测发展趋势，为防护措施制定与维护优化提供依据，如采用电化学腐蚀传感器动态监测腐蚀过程。三者协同构建从主动防护到状态感知的全链条解决方案，以应对复杂工况下的耦合损伤挑战。

3.1.4 智能化升级

阀门系统的智能化[10]升级是构建未来智慧管道的关键环节。通过在阀门本体集成压力、温度、声发射、阀位反馈等传感器，可实时监测运行状态参数与关键部件的健康状态（如密封面磨损量）。结合边缘计算与数据驱动模型（如机器学习算法），实现对阀门性能退化趋势的预测与故障的早期诊断。当系统研判密封性能临近失效阈值时，可自动触发预警，指导进行预测性维护，从而避免非计划停机并杜绝泄漏风险。进一步地，智能阀门可作为分布式控制节点，通过工业物联网（IIoT）与上游泵送系统、下游调节装置进行协同联动，实现全管道输送系统的自适应优化运行与能效管理。

3.2 展望：阀门技术革新的方向

3.2.1 数字孪生与虚实融合技术

数字孪生技术将实现阀门全生命周期的精准管控。通过搭建阀门运行数字镜像，实时映射流场分布、磨损演化、应力状态与腐蚀程度，结合AI算法模拟不同工况下的性能衰减趋势，为预防性维护与工况自适应调节提供决策支撑。例如，基于数字孪生模型，可预测阀门在不同煤浆参数、压力工况下的磨损寿命，提前制定维护计划；当实际运行数据与数字镜像出现偏差时，可自动调整模型参数，优化阀门运行状态。同时，数字孪生技术可与虚拟现实（VR）、增强现实（AR）技术结合，实现阀门设计、制造、安装、维护的全流程可视化与智能化。

3.2.2 极端工况定制化技术

针对超高压（10MPa以上）、超大口径

(DN800 以上) 及高浓度粗颗粒 (粒径 $\geq 5\text{mm}$) 等极限场景, 开发模块化组合式阀门结构, 通过可替换过流部件设计提升设备适配性与维护效率。同时, 开展极端工况下阀门性能的基础研究, 建立极端工况下的磨损、腐蚀、密封失效理论模型, 为定制化设计提供理论支撑。

3.2.3 绿色低碳技术

全生命周期绿色闭环技术将同步推进, 从材料选型、制造工艺到报废回收全流程降低碳足迹。材料选型方面, 优先选用可循环利用的金属基复合材料, 减少稀有金属的使用; 制造工艺方面, 采用近净成型技术 (如 3D 打印、精密铸造), 降低材料浪费率; 运行阶段, 开发低能耗驱动系统 (如节能液压驱动、永磁同步电动执行机构), 降低阀门运行能耗; 报废回收阶段, 建立阀门材料回收再利用体系, 实现耐磨部件的翻新与再制造, 契合“双碳”战略要求。此外, 研发低碳环保的密封材料与涂层材料, 减少挥发性有机化合物 (VOC) 排放, 降低对环境的污染。

3.2.4 标准体系与国际化

行业标准体系将向精细化、国际化升级, 构建覆盖材料性能、结构设计、检测方法、安装维护、安全评估的全维度标准框架。国内企业需积极参与 ISO、API 等国际标准的制定, 推动国内标准与国际先进标准接轨, 提升我国在高端阀门领域的话语权。同时, 加强行业协同创新, 整合高校、科研院所、企业的资源, 建立产学研用一体化创新平台, 加速核心技术的研发与工程化应用。通过技术输出、国际合作等方式, 将我国自主研发的阀门技术与产品推向全球市场, 为全球大规模浆体输送工程提供中国方案。

4. 结论

大口径高压耐磨阀门的研究与工程应用, 对推动我国粗颗粒煤浆管道输送技术实现规模化、产业化发展具有重大战略意义。该技术突破将直接提升千公里级输煤管道系统的运行可靠性与经济性, 有效降低因阀门失效导致的非计划停机与维护成本, 为煤炭资源的长距离清洁高效运输提供关键装备保障。

更重要的是, 此项技术攻关将带动我国高端阀门制造水平的整体提升, 突破国外技术垄断, 实现核心装备的自主可控。通过“材料—设计—检测—智能—标准”的全链

条协同创新, 将形成具有自主知识产权的核心技术体系, 推动我国在高端流体控制装备领域实现从跟跑到领跑的跨越。这不仅能降低我国对国外高端阀门产品的依赖, 还能提升我国能源运输装备的国际竞争力, 为保障国家能源运输安全、践行“双碳”战略、推动能源行业高质量发展提供深远支撑。

未来, 随着数字孪生、新型复合材料、智能化技术、绿色低碳技术的不断发展与融合, 大口径高压耐磨阀门将向“极致性能、智能感知、绿色低碳、终身可靠”的方向迈进, 为全球大规模浆体输送工程提供更安全、更高效、更环保的解决方案。同时, 行业标准体系的不断完善与国际化推进, 将进一步规范市场秩序, 促进技术创新与产业升级, 推动我国高端阀门产业实现高质量发展。

参考文献

- [1]陈敬, 刘大志, 马清泉.浆体阀门的主要特性及选用原则[J]. 流体工程, 1990 (10): 35-39.
- [2]刘保荐.阀门耐磨材料冲蚀磨损特性研究[J]. 山西冶金, 2025, 48 (08): 199-201.
- [3]朱朝峰.高压差工况下阀门密封结构优化与动态密封技术研究综述[J]. 阀门, 2025, (06): 686-690.
- [4]汪新春, 高峰峰, 张杰.陶瓷偏心旋转阀在水煤浆工艺中的应用[J]. 通用机械, 2014 (12): 42-45.
- [5]周亚群, 徐天池, 尤童平, 等.高温高压环境下阀门材料的可靠性分析[J]. 阀门, 2024, (11): 1392-1396.
- [6]张峰铭.超高压石油化工阀门密封结构优化与验证[J]. 化工设计通讯, 2025, 51 (04): 108-110.
- [7]原佳妮.高温高压气动球阀的结构优化及响应特性研究[D]. 西安工业大学, 2025.
- [8]张克强, 何胜卫, 蒋朝, 等.新型合金材料阀门的耐腐蚀性能及应用[J]. 阀门, 2025, (07): 781-785.
- [9]石丽娜, 陈志平, 章序文, 等.基于动网格的高压煤浆输送泵内部流场数值模拟优化研究[J]. 高校化学工程学报, 2012, 26 (3): 402-411.
- [10]王浩.智能化控制阀在石油化工中的应用设计[J]. 科技与创新, 2015 (21): 115-116.