

V 型球阀 HVOF 喷涂防护的技术进展、产业驱动与未来赛道展望

钟金杰 苏 辉^[通讯作者] (博雷(中国)控制系统有限公司, 浙江 杭州 311231)

摘要: V型球阀是流体控制系统的主体, 被普遍使用在石油化工、冶金电力等恶劣的环境下。V型球阀表面耐磨、防腐性能的优劣直接影响到设备运行的稳定性与使用寿命。高速火焰喷涂(HVOF)因涂层结合强度高、孔隙率低等优点, 成为V型球阀防护的主要技术路线。本文整理出V型球阀HVOF喷涂防护技术的发展脉络, 分析工艺优化与材料创新的主要方向, 探究高端装备制造升级、行业标准完善等产业驱动因素, 根据技术发展趋势和市场需求变化预测该领域未来的发展赛道。

关键词: V型球阀; HVOF喷涂; 表面防护; 技术产业化

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167(2026)003-0019-03

Technological progress, industrial drive, and future track outlook of HVOF spraying protection for V-shaped ball valves

Zhong Jinjie, Su Hui^[Corresponding Author] (Bray (China) Control Systems Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang 311231, China)

Abstract: V-shaped ball valves constitute the backbone of fluid control systems and are extensively utilized in harsh environments such as petrochemical, metallurgical, and power industries. The wear resistance and corrosion resistance of the surface of V-shaped ball valves directly impact the stability and service life of the equipment. High-velocity oxy-fuel (HVOF) spraying, with its advantages of high coating bonding strength and low porosity, has emerged as the primary technical approach for the protection of V-shaped ball valves. This article outlines the development trajectory of HVOF spraying protection technology for V-shaped ball valves, analyzes the main directions for process optimization and material innovation, explores industrial driving factors such as the upgrading of high-end equipment manufacturing and the improvement of industry standards, and predicts the future development trajectory of this field based on technological trends and changes in market demand.

Keywords: V-shaped ball valve; HVOF spraying; surface protection; technology industrialization

V型球阀因调节性能好、密封性好, 在高磨损、强腐蚀的工业流体输送系统中具有不可替代的作用。传统防护技术, 电镀、刷涂防腐涂料等长期无法达到严苛工况下长效防护的目的, 容易出现涂层脱落、性能下降等问题, 影响设备的运行效率与安全。高速火焰喷涂技术的出现, 给V型球阀防护提供新的解决方式。该技术用高温高速火焰流将涂层材料熔融并喷射到球阀表面, 形成致密均匀的防护涂层, 有效提高部件的耐磨防腐能力。

1 V型球阀 HVOF 喷涂防护的技术进展

1.1 HVOF 喷涂技术的核心原理与性能优势

高速火焰喷涂技术用氧气与燃料的混合燃烧作为热源, 燃料一般选用丙烷、丙烯或者煤油等, 燃烧过程充分且可控, 能精准调控火焰的温度梯度与流速稳定性, 燃烧产生的高温高速火焰流速可达 2000m/s 以上, 温度可以达到 3000℃到 5000℃。涂层材料粉末在火焰流中被迅速加热到熔融或者半熔融状态, 获得高速动能, 撞击到经过预处理的 V 型球阀基体表面后发生塑性变形, 通过机械咬合与冶金结合的双重作用

沉积形成防护涂层。与传统的喷涂技术相比, HVOF 喷涂形成的涂层具有明显的优势, 涂层的结合强度大于 70MPa, 孔隙率小于 1%, 涂层的致密度与均匀性也远超传统工艺, 可以在严苛工况下长期维持表面完整性, 因此涂层在承受流体冲刷、介质腐蚀、部件摩擦等情况下不容易出现剥落、开裂等失效现象。V 型球阀关键磨损部位阀座、阀球体采用 HVOF 喷涂处理之后, 使用寿命提高 3 到 10 倍, 能适应强酸、强碱、高颗粒含量等恶劣环境。

1.2 V型球阀 HVOF 喷涂的工艺优化方向

V型球阀 HVOF 喷涂工艺优化主要针对涂层与基体的适配性、涂层厚度均匀性、工艺稳定性进行。喷涂前的基体预处理是保证涂层质量的基础环节, 优化后的预处理工艺包括表面除油、除锈、粗化等, 粗化处理多采用喷砂工艺, 通过改变喷砂粒度、压力、角度来获得零件表面合适的粗糙度, 提高涂层与基体的机械结合力。喷涂过程中工艺参数的优化是重点, 主要是燃料和氧气的配比、喷涂距离、喷枪移动速度、送粉速率等参数的调节。

燃料与氧气的配比影响火焰流的温度和速度，配比不恰当会造成涂层材料熔融不充分或者过度氧化，降低涂层性能。喷涂距离和喷枪移动速度的协同调整可以解决 V 型球阀曲面结构造成的涂层厚度不均匀问题，保证球体、阀座等关键部位涂层厚度偏差控制在 $\pm 5 \mu\text{m}$ 以内。送粉速率的优化要匹配火焰流的承载能力，防止粉末团聚或者未熔融颗粒影响涂层致密性。另外，喷涂后处理工艺的优化也成了技术发展的新方向，低温回火处理可以消除涂层内部的残余应力，提高涂层的抗疲劳性能，封孔处理可以降低涂层孔隙率，提高其耐腐蚀性。

1.3 涂层材料体系的创新与升级

涂层材料体系的革新，成为改善 V 型球阀 HVOF 喷涂防护性能的重要推力。早期使用的涂层材料主要是碳化钨钴基硬质合金，该材料硬度高、耐磨性好，可以满足一般磨损工况的防护要求，但是强腐蚀环境下钴相容易被腐蚀溶解，导致涂层出现点蚀、鼓泡等问题，严重影响 V 型球阀的密封性能和运行稳定性，最终导致涂层失效。为此研发人员研发出了碳化钨铬钴合金涂层材料、碳化钨镍铬合金涂层材料等多种合金涂层材料，在涂膜中加入铬元素，形成钝化膜，从而提高涂膜的耐腐蚀性，拓展材料在盐雾、强酸等恶劣环境中的使用范围。

金属陶瓷复合涂层材料也取得显著进展，氧化铝、氧化铬等陶瓷颗粒与金属粉末混合，用 HVOF 喷涂形成金属陶瓷复合涂层，陶瓷颗粒均匀分散在金属基体中，可以有效阻止腐蚀介质的渗透和磨损颗粒的切削作用，兼具金属的韧性和陶瓷的耐磨防腐性，适用于同时承受磨损和腐蚀的复杂工况。

2 V 型球阀 HVOF 喷涂防护的产业驱动要素

2.1 高端装备制造产业的需求拉动

高端装备制造产业的迅速发展，给流体控制部件的性能提出了更高的要求，成为推动 V 型球阀 HVOF 喷涂防护技术产业化的主要动力。石油化工方面，深海油气开采、页岩气开发等项目推进过程中，流体输送系统所处的工况环境为高温高压、高腐蚀，传统防护的 V 型球阀无法满足长期稳定运行的要求，采用 HVOF 喷涂防护的 V 型球阀可以有效抵御油气介质的腐蚀和冲刷，保证开采和输送设备的安全运行。冶金电力行业冶金高炉煤气净化系统、火电厂脱硫脱硝系统流体介质中含有的腐蚀性离子和固体颗粒对 V 型球阀耐磨防腐性能要求很高，HVOF 喷涂技术的应用可以大大提高球阀的使用寿命，降低设备维护成本。

2.2 工业领域防护标准的持续提升

工业领域对设备部件防护性能标准不断提高，倒逼

V 型球阀制造企业采用 HVOF 喷涂防护技术。随着环保政策越来越严格，石油化工、冶金等行业对设备的泄漏率、使用寿命等指标提出了明确的要求，传统防护技术的 V 型球阀由于涂层性能不好，容易出现介质泄漏、部件失效等问题，无法满足新的行业标准。国家相关部门发布的高端装备制造业发展规划、智能制造标准体系建设指南等政策文件，均提出要提高关键零部件的防护性能和可靠性，给 HVOF 喷涂防护技术的应用提供政策导向。行业内也相继制定了 HVOF 喷涂涂层的检测标准，对涂层的结合强度、孔隙率、硬度等性能指标做了详细的规定，规范了技术的应用和推广。市场竞争促使 V 型球阀制造企业为了满足客户高标准的要求，相继采用 HVOF 喷涂防护技术，提高产品的市场竞争力，从而加快了 HVOF 喷涂防护技术的产业化进程。

2.3 绿色制造理念的政策推动

绿色制造理念的深入推行，给 V 型球阀 HVOF 喷涂防护技术的产业发展提供政策支持。绿色制造是在产品全生命周期内实现资源节约、环境友好的一种制造方式，HVOF 喷涂技术比传统的电镀等防护技术能耗低、污染小。电镀工艺在生产过程中会产生大量的含重金属的废水、废气，对环境造成严重的污染，而 HVOF 喷涂工艺的污染物排放量大大降低，涂层材料利用率高，符合绿色制造的发展要求。

国家出台的推动绿色制造的政策有，绿色制造工程实施指南、工业绿色发展规划等，鼓励企业采用环保型表面处理技术，限制高污染、高耗能工艺的使用。在政策引导下，V 型球阀制造企业加快工艺升级速度，淘汰传统落后的防护工艺，转而采用 HVOF 喷涂技术，推动 HVOF 喷涂防护技术产业化应用，同时促进相关企业绿色生产转型。

2.4 技术创新突破与产业链配套完善

HVOF 喷涂核心技术不断革新，产业链配套体系日趋完善，给 V 型球阀 HVOF 喷涂防护技术产业化打下了核心基础。科研机构同企业一起攻关，喷涂材料、喷涂设备和喷涂工艺都有了突破。新型纳米复合涂层、金属陶瓷涂层的研发成功，使涂层的耐磨、防腐、耐高温性能得到进一步提高，扩大了技术的应用范围，喷涂设备领域自动化、智能化设备的研发与推广，减少了人工的依赖，提高了涂层制备的稳定性、一致性，工艺优化上参数调控、流程改进，降低了生产能耗、成本，提高了产业化可行性。

3 V 型球阀 HVOF 喷涂防护的未来赛道展望

3.1 涂层材料的高性能化与定制化

涂层材料的高性能化、定制化将会成为 V 型球阀 HVOF 喷涂防护领域的主要发展方向。未来研发方向主

要是超高性能涂层材料的研发, 纳米晶涂层、梯度功能涂层等。纳米晶涂层由于纳米颗粒小尺寸效应、界面效应, 具有更高的硬度、耐磨性和耐腐蚀性, 用纳米晶涂层对 V 型球阀进行防护, 可以进一步提高部件在极端工况下使用年限。梯度功能涂层是通过改变涂层材料的组成和结构, 使涂层从基体到表面性能逐渐变化, 消除涂层和基体之间性能的突变, 提高涂层的抗热震性及结合强度, 适合于温度变化剧烈的工况。定制化涂层材料的开发也将成为趋势, 根据不同的行业、不同的工况研发出强酸环境耐蚀型涂层、高磨损环境耐磨型涂层、高温环境耐热型涂层等专用涂层材料, 给客户量身定做个性化的防护方案, 提高技术市场适应性。

3.2 喷涂工艺的智能化与精准化

喷涂工艺的智能化、精准化是 V 型球阀 HVOF 喷涂防护技术未来的发展方向。智能制造技术发展之后, 智能化喷涂装备的研发和应用就会成为主流。在喷涂设备上加装传感器、机器视觉系统和数控系统, 对喷涂过程进行实时监测和精确控制。传感器可以对火焰流的温度、速度、涂层厚度等参数进行实时采集, 机器视觉系统可以对 V 型球阀表面形貌进行在线检测, 数控系统根据采集到的参数自动调节喷涂工艺, 保证涂层质量的稳定、一致。

3.3 应用场景的拓展与跨界融合

V 型球阀 HVOF 喷涂防护技术的应用场景会不断拓展, 也会和新兴产业实现跨界融合。除了石油化工、冶金电力等传统应用领域, 该技术会慢慢向新能源、半导体这些新兴领域发展。在新能源领域, 氢能储运系统中的 V 型球阀要承受高压氢气的腐蚀, HVOF 喷涂防护涂层可以提高球阀的耐氢脆性能, 保证氢能储运的安全。光伏、风电产业中流体控制设备对部件的耐候性、可靠性要求较高, HVOF 喷涂技术的应用可以延长设备的使用寿命。在半导体领域中, 超纯流体输送系统中用的 V 型球阀需要有很高的洁净度和耐腐蚀性, 用 HVOF 涂层技术制备的陶瓷涂层可以满足半导体制造的严格要求。此外, 技术的跨界融合也会产生新的应用模式, 将 HVOF 喷涂防护技术与物联网技术结合起来, 在涂层里嵌入传感芯片, 对 V 型球阀的运行状态进行在线监测, 为设备的预测性维护提供数据支持。

3.4 产业协同创新生态的构建

构建产业协同创新生态, 将会成为 V 型球阀 HVOF 喷涂防护技术持续发展的关键举措。未来的产业发展不会只依靠单个企业的技术研发, 而会形成一个包含原材料供应商、喷涂设备制造商、球阀生产企业和终端用户在内的协同创新体系。原材料供应商主要针对高性能涂层材料展开研发和生产, 给技术发展赋

予材料支撑, 喷涂设备制造商集中精力于智能化喷涂装备的研制, 改善工艺的自动化和精准化程度, 球阀生产企业重视喷涂工艺同球阀制造的融合, 改良产品设计和生产流程, 终端用户依照实际工况需求, 给予技术改进的反馈意见。产学研用深度合作也成了协同创新的重要部分, 高校和科研机构发挥技术研发的优势, 开展基础研究、前沿技术研究, 企业负责技术的产业化转化, 实现创新成果的快速转化。产业协同创新生态的创建, 会汇聚起各种资源, 推进技术迭代更新, 促使 V 型球阀 HVOF 喷涂防护产业实现高质量发展。

4 结语

V 型球阀 HVOF 喷涂防护技术由于具有优良的性能, 在工业领域的应用越来越广泛, 技术的发展和产业的发展紧密相连。技术上工艺的改进、材料的更新, 给 V 型球阀赋予了更高的防护标准, 产业领域需求的拉动、标准的提高、政策的推动, 为技术的产业化应用打下了良好的基础。随着涂层材料的高性能化、定制化, 喷涂工艺的智能化、精准化, 应用场景的拓展、跨界融合, 产业协同创新生态的构建, V 型球阀 HVOF 喷涂防护技术会有更大的发展空间。

参考文献:

- [1] 刘侠, 常诚, 柴尚荣, 王猛, 李维火. 喷涂距离对 HVOF 喷涂 NiCrBSi/NiCr-Cr3C2 涂层高温摩擦磨损性能的影响 [J]. 热处理, 2025, 40(06): 1-8+12.
- [2] 谢长宁, 张璐, 刘刚, 李毅, 秦宇泽, 谢威威. 面向水轮机狭窄空间的小型化 HVOF 装备喷涂 WC10Co4Cr 涂层的显微结构与耐磨性能研究 [J]. 材料保护, 2025, 58(08): 162-171.
- [3] 刘军, 纪乙智, 李巍, 廖斌, 曹志刚, 黄修喜, 刘思晔, 董会. 真空热处理超音速火焰喷涂制备 Ni 基 WC 涂层的结构与耐磨性 [J]. 金属热处理, 2025, 50(03): 284-290.
- [4] 温雨. 工艺参数对超音速火焰喷涂 TiB2-Co 涂层性能的影响 [J]. 热喷涂技术, 2024, 16(04): 62-68+108.
- [5] 乔振鑫, 周平, 赵菲, 杨睿, 李华. 激光重熔功率对 HVOF 喷涂 WC-Ni 涂层耐磨性的影响 [J]. 材料保护, 2024, 57(11): 127-138.

作者简介:

钟金杰 (1986-) 男, 汉族, 浙江杭州人, 本科, 工程师, 研究方向: 球阀生产工艺、阀门加工、研磨、喷涂防护等。

苏辉 (通讯作者) (1985-) 男, 汉族, 云南昆明人, 硕士, 工程师, 研究方向: 热喷涂, 碳化钨, 耐磨损, 防腐蚀, 球阀。