

阀门材料选用及耐腐蚀性能研究

李 静 柴小然 万丽丽 董胜帅

河南泉舜流体控制科技有限公司 河南 郑州 450001

【摘 要】：阀门属于流体控制系统的中心启闭和调节元件，材料选择同设备寿命、运行安全以及维护费用有着直接联系。腐蚀属于造成阀门失效的主要原因，包含均匀腐蚀、局部腐蚀、应力腐蚀开裂等。本文对铸铁、碳钢、不锈钢、非铁金属和非金属材料的耐腐蚀性能及适用工况进行分析，研究了在不同的使用环境下材料选择的原则，提出了一些表面处理、合金优化、热处理和衬里技术等提高耐腐蚀性能的方法，以供阀门工程设计和材料选择时参考。

【关键词】：阀门；材料选用；耐腐蚀性能；腐蚀机理；表面处理

DOI:10.12417/2811-0528.26.19.067

1 引言

阀门被广泛地用在各种流体输送及控制装置上，具有截断、调节、分流、止回、减压等多种功能。其工作环境千差万别，所接触的介质有酸、碱、盐溶液、海水、蒸汽、氧气、氢气和各种有机溶剂等^[1]。不同的介质对于金属材料的腐蚀速率以及破坏形式存在较大的差别，同时温度、压力、流速等工况参数也会对其产生影响，因此阀门材料的耐腐蚀性能成了决定设备是否可靠的决定性因素^[2]。

2 阀门材料的耐腐蚀机理与失效形式

2.1 均匀腐蚀

均匀腐蚀是最常见的腐蚀形式，是金属表面整体均匀减薄。阀门材料中碳钢、低合金钢在酸性或者潮湿的环境下容易发生均匀腐蚀，腐蚀速率一般用失重法来评价。均匀腐蚀的严重程度和介质浓度、温度、流速、金属表面的氧化膜稳定性有关^[3]。对耐腐蚀合金（不锈钢、镍基合金）来说，均匀腐蚀不是主要问题，因为表面钝化膜可以很好地阻止腐蚀介质的侵蚀。但是当钝化膜被破坏并且不能及时修复的时候，均匀腐蚀就会加快。工程设计中对均匀腐蚀一般用增加腐蚀裕量来补偿^[4]。

2.2 局部腐蚀

局部腐蚀有点蚀、缝隙腐蚀、晶间腐蚀等。点蚀属于一种高度局部的腐蚀形式，在金属表面会形成许多小而深的蚀坑，具有很强的隐蔽性以及破坏性。点蚀的发生与介质中卤素离子（主要是氯离子）有关，不锈钢在含氯的环境中容易发生点蚀。合金元素钼、氮的加入可以提高点蚀抗力。缝隙腐蚀发生在阀门法兰连接面、密封垫片接触处等狭小间隙里，因为缝隙内介质滞留、氧浓度下降而产生氧浓差电池，加快局部腐蚀。晶间腐蚀是在金属晶界上发生的腐蚀，多见于奥氏体不锈钢在敏化温度区间（约450~850℃）停留之后，晶界处析出富铬碳化物

（Cr₂₃C₆），使晶界附近区域缺乏耐腐蚀性的铬。焊接热影响区属于晶间腐蚀易发区域，低碳牌号（304L、316L）或者稳定化牌号（321、347）可以降低晶间腐蚀敏感性。

2.3 应力腐蚀开裂

应力腐蚀开裂是材料在一定的腐蚀介质和拉伸应力共同作用下发生的脆性断裂。奥氏体不锈钢在高温含氯介质中容易产生应力腐蚀开裂，裂纹一般呈树枝状或者穿晶扩展，断口呈脆性特征。碳钢在含硫化氢或者硝酸盐溶液中也会出现应力腐蚀开裂。应力来源有外加载荷、装配应力、焊接残余应力和腐蚀产物楔入应力。预防应力腐蚀开裂的方法有选用抗某种介质不敏感的合金材料（双相不锈钢代替奥氏体不锈钢）、消除焊接残余应力、降低工作应力水平、控制介质中腐蚀性组分的浓度等。

2.4 腐蚀疲劳与冲蚀

腐蚀疲劳是由循环应力和腐蚀介质共同作用所造成的材料破坏，疲劳极限比单纯的机械疲劳低得多。阀门频繁启闭时，阀杆、阀瓣等零件处在交变应力作用下，如果同时处于腐蚀环境中，很容易造成腐蚀疲劳失效。冲蚀是流体中携带的固体颗粒或者高速流体对金属表面的机械磨损和电化学腐蚀的联合作用。阀门节流口、密封面和弯头等处流速大，冲蚀严重。提高表面硬度、改善流道结构、采用司太立合金堆焊密封面等措施可以减缓冲蚀破坏。

3 不同使用环境下的材料选用原则

3.1 酸性介质环境

酸性介质有盐酸、硫酸、硝酸、磷酸、有机酸等。不同的酸类对于材料的腐蚀行为存在较大的差别。对于稀硫酸环境，可以选用316L不锈钢或者哈氏合金C系列；浓硫酸在常温下可以使碳钢钝化，但是高温时需要使用高硅铸铁或者特种合金。盐酸对绝大多数金属有很强的腐蚀性，哈氏合金B系列、

钽和锆材是较好的选择,但是成本很高,工程上常采用非金属衬里阀门代替。硝酸为氧化性酸,304或者304L不锈钢具有良好的耐腐蚀性,腐蚀速度很低。磷酸介质中可以使用316L不锈钢、双相不锈钢,但是需要考虑氯离子、氟离子的影响。有机酸(醋酸、甲酸等)腐蚀性小,316L不锈钢一般可以满足要求。

3.2 碱性介质环境

氢氧化钠、氢氧化钾等碱性溶液对碳钢的腐蚀性随着浓度、温度的升高而增大。常温低浓度碱液可以使用碳钢阀门,但是需要留出足够的腐蚀裕量。高温浓碱溶液会引发碳钢的碱脆(应力腐蚀开裂),这时应选镍或镍基合金(蒙乃尔、镍200)。不锈钢在碱性介质中稳定,但是不能长时间在高温浓碱中工作。铝和铝合金在碱性环境中腐蚀严重,不能使用。输送碱液的阀门密封面材料应选用耐碱性好的PTFE或者PEEK。

3.3 盐水与海水环境

海水和含盐水体对金属材料的腐蚀主要是点蚀、缝隙腐蚀和电偶腐蚀。铸铁、碳钢在海水中的腐蚀速度较快,不能直接使用。铜合金(铝青铜、锡青铜等)具有较好的耐海水腐蚀性,被用来制造海水阀门。304不锈钢在海水中容易产生点蚀,不建议使用;316L不锈钢在静态或者低流速的海水中有一定的耐蚀性,在高流速或者停滞的情况下仍然会发生点蚀。双相不锈钢(2205)、超级奥氏体不锈钢(254SMO)耐蚀性好,在海水中已经成了海水冷却系统阀门的主要材料。钛及其合金在海水中具有很好的耐腐蚀性,几乎不会发生任何腐蚀现象,适合于对材料性能有较高要求的船舶以及海水淡化阀门使用。

3.4 高温水蒸气与氧化性环境

高温水蒸气环境对于阀门的耐腐蚀性有很强要求,即抗高温氧化、抗蒸汽腐蚀。碳钢在450℃以下的水蒸气环境中表面可以形成稳定的氧化膜,但是当温度超过这个范围的时候,氧化膜容易剥落并且发生严重的氧化腐蚀。合金钢(1Cr5Mo、12Cr1MoV)具有较好的高温抗氧化性,适合于锅炉给水和过热蒸汽系统。不锈钢(304H、321H)在更高的温度下仍然可以保持较好的抗氧化性,但是需要考虑晶间敏化的问题,应该选择稳定的或者超低碳的牌号。高温氧化性介质(热空气、烟气)中,表面形成保护性氧化铬或者氧化铝层的材料有更好的使用寿命。阀门密封面在高温工况下要采用堆焊钴基或者镍基硬质合金来提高耐磨、抗擦伤性能。

3.5 特殊介质环境

特殊介质有氯气、氟气、熔盐、液态金属等。湿氯气对大多数金属有很强的腐蚀性,钛和钛合金在干湿氯交替的环境下表现最好,镍基合金(哈氏合金C)也有一定的抗氯气腐蚀能

力。氟气、氢氟酸对含硅材料有反应,蒙乃尔合金、铂族金属是较好的选择。熔盐介质高温、强氧化性,对阀门材料有高耐高温强度和抗熔盐侵蚀的要求,常用的是钴镍合金和钴基合金。液态金属(液态钠、锂)对大多数金属有溶解作用,高纯钼、钨及难熔金属可以作为阀门材料,但是工程应用很少,一般采用特殊的无密封阀门。

4 阀门材料耐腐蚀性能的优化措施

4.1 材料表面处理技术

表面处理是提高阀门材料耐腐蚀性能的经济有效的方法。化学镀镍磷合金可以给碳钢阀门表面形成均匀致密的非晶态镀层,有很好的耐酸碱腐蚀性。电镀铬、镀锌后钝化处理可以提高碳钢阀杆和小零件的耐蚀性,但是镀层孔隙率控制是关键。渗铝、渗硅等化学热处理可以在金属表面形成富铝或者富硅的扩散层,在高温下可以生成保护性的氧化膜,适合于高温氧化环境。激光熔覆、等离子堆焊技术可以将高强度耐蚀合金(司太立合金、镍基合金)在阀座和关键处做熔覆处理,从而达到提高基体硬度与表面耐蚀性的目的。

4.2 合金成分优化

通过调整合金元素配比可显著改善材料的耐腐蚀性能。在碳钢中加入铬、镍、铜等元素可以提高碳钢在各种介质中的耐蚀性,低合金耐蚀钢(含铜磷的耐候钢)就是其中的代表。不锈钢中增加铬含量可以提高钝化膜的稳定性,增加钼含量可以提高抗点蚀、缝隙腐蚀的能力,加入氮元素可以强化奥氏体基体、提高局部耐蚀性。超低碳($C \leq 0.03\%$)和稳定化(Ti、Nb)处理可避免晶间腐蚀。双相不锈钢是通过控制铁素体和奥氏体的比例如1:1来获得的,具有两者的优点,在氯化物环境中具有很好的抗应力腐蚀开裂性能的材料。

4.3 热处理工艺调控

热处理会使阀门材料的腐蚀敏感性发生变化。奥氏体不锈钢的敏化处理(450~850℃保温)会产生碳化铬,使晶间腐蚀抗力降低,所以固溶处理(快速冷却通过敏化区)是恢复其耐蚀性的重要工序。马氏体不锈钢经淬火加回火后得到所需的硬度和耐蚀性之间的平衡,回火温度的选择要兼顾力学性能和腐蚀抗力。双相不锈钢在高温下会析出脆性 σ 相,降低韧性及耐蚀性,固溶处理要严格控制加热温度和冷却速度。消除应力退火可以减小焊接残余应力,对力腐蚀开裂敏感的材料来说更重要。

4.4 电化学保护与衬里技术

电化学保护分为阴极保护和阳极保护。阴极保护适合于碳钢阀门在海水或者土壤环境中外表面的防腐,利用牺牲阳极(锌、铝等)或者外加电流使阀体电位降到免蚀区。阳极保护

适合于有钝化作用的金属(不锈钢等)在强氧化性介质中使用,用外加电流来保持钝化膜的完整性。衬里技术是将耐腐蚀材料,如衬聚四氟乙烯(PTFE)、衬聚丙烯(PP)、衬橡胶等,敷设在金属阀体内腔和流道表面,从而把金属基体和腐蚀介质隔离开来。全衬里阀门适合于强酸、强碱和有机溶剂等苛刻的工况,成本比实心特种合金阀门低很多,是工程中使用最广的替代方案。

5 阀门材料选用的经济性与可靠性平衡

阀门材料最后的选择要从耐腐蚀性能、力学性能、加工工艺性和经济成本等几个方面进行权衡。通用工况下碳钢阀门采用涂层或者衬里可以达到较好的经济性。中等腐蚀环境下选择316L不锈钢阀门,由于综合性能好、成本低。对高腐蚀性介质要按照介质具体成分、温度、流速等参数做详细的经济性分析,比较实心特种合金阀门和非金属衬里阀门的全生命周期成本(初次采购、安装、维护、更换等)。不能因为选材过多而

造成资源浪费,也不能因为选材不足而产生安全隐患。创建阀门材料选型数据库以及专家系统,依靠失效案例分析,可以提升选材的科学性与可靠性。

6 结语

阀门材料的耐腐蚀性能,对于保证设备长时间稳定运行有着非常重要的作用。本文对铸铁、碳钢、不锈钢、非铁金属、非金属等阀门材料基本特性及适用工况进行了梳理,并对均匀腐蚀、局部腐蚀、应力腐蚀开裂、腐蚀疲劳等主要失效形式的机理及防控措施进行了分析。根据酸性、碱性、海水、高温水蒸气和特殊介质环境的不同,提出不同的材料选择原则。利用表面处理、合金化、热处理控制、电化学保护以及衬里技术等手段可以明显提高阀门材料的耐腐蚀性。在工程实际中要结合腐蚀风险、力学要求、制造工艺和经济成本等各方面因素来选择阀门材料。

参考文献:

- [1] 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(7):781-785.
- [2] 邓福清.高温环境下阀门材料性能稳定性研究[J].数码设计(电子版),2024(3):0868-0870.
- [3] 鲜中东.基于节能理念的铜制阀门性能提升研究[J].城市建筑空间,2024,31(S01):177-178.
- [4] 范凌燕,叶芳.高温高压环境下阀门密封材料的选用与性能研究[J].模型世界,2025(22):72-74.