

超纯阀门无泄漏密封系统设计与密封性能研究

宿翔¹ 王蕾² 孙科¹ 郭喜顺¹ 关元昊¹

1. 大连华邦化学有限公司 辽宁 大连 116000

2. 大连福华机械有限公司 辽宁 大连 116000

摘要: 超纯阀门在半导体、生物制药、高纯化工等领域具有关键作用,其密封性能直接影响介质纯度和系统安全。本文针对超纯阀门密封系统的特殊要求,分析传统密封结构存在的问题,提出基于金属波纹管与高性能聚合物密封件组合的无泄漏密封系统设计方案。通过密封结构优化、材料选型分析、密封机理研究,建立了密封性能评价体系。实验结果表明,所设计密封系统的泄漏率低于 $1 \times 10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$,使用寿命超过10万次循环,满足超纯介质工况下的无泄漏要求,为超纯阀门设计提供技术参考。

关键词: 超纯阀门; 无泄漏密封; 金属波纹管; 密封性能; 可靠性

引言: 随着半导体制造、生物制药、高纯电子化学品等高新技术产业的快速发展,对超纯介质输送系统的密封性能提出了极高要求。超纯阀门作为关键控制元件,其泄漏问题不仅导致介质浪费和环境污染,更可能造成产品质量下降甚至生产事故。传统阀门密封结构多采用填料密封形式,存在摩擦阻力大、易磨损、密封寿命短等固有缺陷,难以满足超纯工况下的无泄漏要求。本文旨在设计一种适用于超纯工况的无泄漏密封系统,系统研究其密封机理与性能特性,为超纯阀门的工程应用提供理论依据和技术支撑。

1 超纯阀门密封系统设计要求与技术难点

1.1 超纯阀门的工作环境与性能要求

超纯阀门主要应用于高纯气体、超纯水、高纯化学品等介质的输送与控制。介质纯度要求极高,半导体制造用工艺气体纯度需达99.9999%以上,微量泄漏即可能导致芯片报废。介质多具有腐蚀性或毒性,泄漏后危害极大。工作压力从高真空到数十兆帕,温度条件复杂,密封系统需在不同工况下保持可靠。因此,超纯阀门密封系统需满足以下性能要求:泄漏率低于 $1 \times 10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$,达到无泄漏标准;密封寿命不低于10万次循环操作;材料与介质相容性良好,不产生析出物或颗粒污染;具备长周期免维护能力。

1.2 传统密封结构的局限性

传统阀门密封结构主要有填料密封和O形圈密封。填料密封依靠压盖压紧柔性石墨或聚四氟乙烯产生密封比压,存在摩擦阻力大、启闭力矩高的问题,频繁操作下填料磨损加快,且相对运动产生微细颗粒污染介质,泄漏率通常为 10^{-5} 至 $10^{-7} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 量级,难以达到无泄漏要求。O形圈密封依靠橡胶压缩变形实现密封,但长期使用

中存在老化、蠕变松弛问题,化学兼容性有限,在腐蚀性介质中易溶胀失效,高低温工况性能稳定性差。这些缺陷决定了传统结构难以满足超纯阀门的无泄漏、长寿命、高洁净度要求。

1.3 无泄漏密封系统的技术难点

实现超纯阀门无泄漏密封面临多方面技术挑战。密封材料选型需在密封性、耐磨性、耐腐蚀性、低析出性之间取得平衡,金属波纹管常用材料包括不锈钢316L、哈氏合金C-276等,聚合物密封件需低摩擦、高耐磨、低析出。密封结构设计中,波纹管与聚合物密封件的组合方式、预紧力控制、应力分布优化等需精细设计,波纹管壁厚、波距、层数等参数对疲劳寿命影响显著。制造工艺方面,波纹管成形精度、焊接质量、表面光洁度直接影响密封可靠性,超纯环境下的洁净处理与装配工艺也是关键^[1]。

2 无泄漏密封系统设计

2.1 总体设计方案

本文设计的超纯阀门无泄漏密封系统,采用金属波纹管与高性能聚合物密封件组合的复合密封结构。金属波纹管作主密封元件,两端分别与阀杆、阀体焊接,隔绝介质与大气,兼具静、动密封功能,随阀杆伸缩保证运动灵活且防外漏。高性能聚合物密封件为辅助密封,装于波纹管外侧,波纹管失效时提供第二道屏障,还防尘导向。系统采用模块化设计,便于装配维护。波纹管设计寿命不低于10万次循环,安全系数2.0。辅助密封件为迷宫式,多重密封环串联逐级密封,整体结构紧凑,集成度高,适用于多种介质控制场合。

2.2 金属波纹管密封设计

金属波纹管是无泄漏密封系统的核心部件,其设计

直接决定了密封性能和使用寿命。波纹管材料选用316L不锈钢,该材料具有良好的耐腐蚀性能、焊接性能和疲劳强度,适用于多数超纯介质工况。对于强腐蚀性介质,可选用哈氏合金C-276或因科镍合金。波纹管结构采用焊接式多层结构,层数为2至3层,多层设计可在保证轴向柔性的同时提高承压能力和疲劳寿命。波纹管基本参数包括:公称通径DN6至DN50系列化设计,壁厚0.15至0.25毫米,波距3至6毫米,波高4至8毫米,有效圈数6至12圈。波纹管端部与阀杆和阀体的连接采用精密氩弧焊接,焊接工艺需严格控制热输入,避免热影响区性能退化。波纹管设计计算采用有限元分析方法,建立波纹管三维模型,模拟其在工作压力和轴向位移共同作用下的应力分布。最大等效应力控制在材料屈服强度的60%以内,确保波纹管在弹性范围内工作。疲劳寿命预测采用ASME标准推荐的方法,设计寿命不低于10万次循环,满足超纯阀门长期使用要求。

2.3 高性能聚合物密封件设计

高性能聚合物密封件作为辅助密封和导向元件,对提升系统可靠性、延长使用寿命至关重要。其材料选用填充聚四氟乙烯,通过添加碳纤维、石墨、二硫化钼等填充剂,可显著增强材料的耐磨性、抗蠕变性与导热性。该材料摩擦系数极低,能减少对阀杆表面的磨损,降低阀门启闭力矩,且化学稳定性优异,与绝大多数介质兼容,不会析出杂质造成污染^[2]。密封件采用主密封环、副密封环和防尘环组成的组合式结构:主密封环为楔形截面,在波纹管预紧力作用下径向扩张,与阀杆形成稳定密封;副密封环为V形结构,多圈串联布置,借助介质压力自紧效应强化密封;防尘环安装在最外侧,防止外部灰尘、湿气侵入。密封件接触面经镜面加工,表面粗糙度Ra优于0.2微米,装配时采用专用工装,确保安装精准、预紧力均匀。该设计中,波纹管正常工作时聚合物密封件基本不承受介质压力,仅作为备用密封,波纹管意外破裂时可立即发挥作用,防止介质大量外泄。

2.4 密封机理与性能分析

无泄漏密封靠金属波纹管弹性变形和聚合物密封件自紧效应协同实现。金属波纹管在工作压力与轴向位移共同作用下发生弹性变形,管壁内形成均匀应力分布,其两端焊接连接可将介质完全封闭在内部,阀杆运动时无外漏通道,实现真正意义上的无泄漏密封。波纹管弹性刚度经优化设计,在保障密封性能的同时,最大限度降低阀杆操作力矩。聚合物密封件在波纹管预紧力作用下产生初始密封比压,当波纹管意外失效时,介质压力作用于V形密封环内侧,使其径向扩张,密封比压随介

质压力升高而增大,形成自紧式密封。双重密封机制保障了系统可靠性。经理论分析与有限元仿真验证,密封系统在工作压力范围内泄漏率低于 $1 \times 10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$,达到氦质谱检漏仪检测下限;整体刚度与阀杆驱动力匹配良好,启闭力矩较传统填料密封降低30%至40%,便于配置气动或电动执行机构。

3 密封性能实验研究

3.1 实验方案与装置

为验证所设计密封系统的性能,搭建了专用密封性能测试平台。测试平台由气源系统、压力调节系统、测试夹具、泄漏检测系统和数据采集系统组成。气源系统可提供0至10MPa的高纯氮气或氦气,压力调节精度 $\pm 0.1 \text{MPa}$ 。泄漏检测采用氦质谱检漏仪,最小可检泄漏率 $1 \times 10^{-11} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$,满足超纯密封性能测试要求。测试夹具模拟阀门实际安装状态,可施加不同轴向位移模拟阀杆运动。实验内容包括:常温密封性能测试,在0至10MPa压力范围内测量泄漏率变化;高温密封性能测试,将测试温度升至 150°C ,评估温度对密封性能的影响;循环寿命测试,模拟阀杆往复运动,每1万次循环检测一次泄漏率,直至20万次循环;耐腐蚀性能测试,将密封组件浸泡于腐蚀性介质中,评估材料性能变化。每组测试重复3次,取平均值作为最终结果。测试过程严格遵循相关标准和操作规程,确保数据准确可靠。

3.2 实验结果与分析

常温密封性能测试结果显示,所设计密封系统在0.1至10MPa压力范围内,泄漏率均低于 $1 \times 10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$,达到超纯工况无泄漏要求。随着工作压力升高,聚合物密封件的自紧效应逐渐增强,泄漏率呈下降趋势,表明高压条件下密封更为可靠。高温密封性能测试表明,在 150°C 工况下,密封系统泄漏率仍低于 $5 \times 10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$,满足大多数超纯工艺的温度要求。泄漏率随温度升高略有增加,主要原因是金属波纹管和聚合物密封件材料性能在高温下发生微小变化,但整体密封性能仍在可控范围内。循环寿命测试结果表明,密封系统在10万次循环后泄漏率保持稳定,未出现明显劣化;在15万次循环后泄漏率略有上升但仍低于 $5 \times 10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$;20万次循环后个别样品泄漏率超过 $1 \times 10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$,建议设计寿命取10万次循环,安全裕度充足。失效分析表明,密封性能下降的主要原因是波纹管材料的疲劳损伤累积和聚合物密封件的磨损,而非突发性失效,便于预判和计划性维护。

3.3 密封性能影响因素分析

通过正交实验方法,系统分析了波纹管壁厚、波纹管层数、密封件材料、表面光洁度等因素对密封性能的影响。

响。波纹管壁厚是影响密封刚度和疲劳寿命的关键参数,壁厚每增加0.05毫米,波纹管刚度约提高20%至30%,疲劳寿命约降低15%至25%。设计时需在刚度和寿命之间寻求平衡,推荐壁厚0.15至0.20毫米。波纹管层数增加可显著提高疲劳寿命,2层结构较单层结构疲劳寿命提高约50%,3层结构较2层结构提高约30%,但层数过多会增加制造难度和成本,推荐采用2至3层结构。密封件材料对密封性能影响显著,填充聚四氟乙烯较纯聚四氟乙烯耐磨性提高约3倍,抗蠕变性提高约5倍,推荐采用碳纤维填充聚四氟乙烯。表面光洁度直接影响密封接触质量,阀杆表面粗糙度Ra优于0.2微米时密封性能最佳,粗糙度过高会导致微观泄漏通道,过低则不利于润滑膜形成。实验结果为密封系统的优化设计提供了定量依据^[3]。

4 工程应用与效果分析

4.1 典型应用案例

所设计的无泄漏密封系统已成功应用于某半导体制造企业的高纯特气输送系统。该企业对阀门密封性能要求极为严格,介质为高纯氯气和三氯化硼,具有强腐蚀性和剧毒特性,任何泄漏都可能导致生产安全和产品质量问题。应用前,该企业采用进口波纹管截止阀,存在采购周期长、成本高、备件供应不稳定等问题。采用本文设计的产品后,经现场安装调试,阀门密封性能完全满足工艺要求。运行12个月后复测,泄漏率仍低于 $1 \times 10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$,波纹管动作灵活,无卡滞现象。操作人员反馈,阀门启闭力矩均匀,手感良好。该案例验证了所设计密封系统的工程适用性和可靠性。

4.2 应用效果评价

从多个维度对工程应用效果进行了系统评价。密封可靠性方面,在半导体、生物制药、高纯化工三个领域共投入应用超纯阀门200余台,累计运行时间超过5万阀门年,未发生一起介质外漏事故,密封可靠性得到充分验证。使用寿命方面,首批投入运行的阀门已完成10万次循环寿命测试,密封性能保持稳定,预计实际使用寿命可达15万次循环以上,远超传统填料密封阀门的2至3

万次循环寿命。操作性能方面,与传统填料密封阀门相比,启闭力矩降低约35%,有利于实现远程自动控制,降低执行机构配置成本。维护成本方面,无泄漏密封系统基本实现免维护,较传统阀门每年节省维护费用约60%。用户满意度调查显示,90%以上的用户认为产品性能达到或超过进口同类产品水平。

4.3 存在的问题与改进方向

工程应用中也发现了一些需要持续改进的问题。高温工况下的密封性能有待进一步提升,150℃以上高温环境中聚合物密封件材料性能出现衰减,需要开发耐高温密封材料。大口径阀门的波纹管制造工艺需要优化,大口径波纹管在成形精度和焊接质量方面存在挑战,影响了成品率。密封性能在线监测技术尚不成熟,目前仍依赖离线检测,无法实时掌握密封状态^[4]。

结束语

超纯阀门无泄漏密封系统是半导体、生物制药等高技术产业的关键基础元件。本文针对超纯工况对密封性能的苛刻要求,设计了金属波纹管与高性能聚合物密封件组合的无泄漏密封系统,系统阐述了密封结构设计、材料选型、制造工艺和性能评价方法。研究成果为超纯阀门的国产化替代和技术升级提供了有力支撑。未来应进一步开展高温密封材料、大口径波纹管制造工艺、密封状态在线监测等关键技术研究,推动超纯阀门向更高性能、更智能化方向发展。

参考文献

- [1]郭加利,张鑫彬,王晓露,等.某无泄漏单向阀结构的分析与应用[J].液压气动与密封,2023,43(8):97-100.
- [2]刘艳军.基于TRIZ理论改进PE阀门密封性检测的密封方案[J].山东商业职业技术学院学报,2026,26(1):128-132.
- [3]王德妙,郑忠兴,黄维纪,等.石油管道阀门的密封性改进及应用[J].阀门,2025(6):675-680.
- [4]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(6):686-690.