

多晶硅设备管道腐蚀防护技术实践探索

杨月龙

青海亚洲硅业半导体有限公司, 青海 西宁 810000

DOI:10.61369/ETQM.2026020020

摘 要： 多晶硅作为光伏、半导体等高端产业的核心原材料，其生产过程涉及氯硅烷、盐酸、氢气等多种腐蚀性介质，设备管道腐蚀问题直接影响生产连续性、产品质量及运营安全。本文基于多晶硅生产工艺特点，深入分析设备管道腐蚀的主要类型及成因，重点探讨材料选型优化、涂层防护、阴极保护、工艺优化及腐蚀监测等核心防护技术的实践应用效果，结合生产场景提出防护技术体系的优化方向，为多晶硅行业提升设备管道腐蚀防护水平、降低运维成本提供实践参考。

关 键 词： 多晶硅；设备管道；腐蚀防护；材料选型；涂层防护；腐蚀监测

Practical Exploration of Corrosion Protection Technology for Polycrystalline Silicon Equipment Pipelines

Yang Yuelong

Qinghai Asia Silicon Semiconductor Co., Ltd. Xining, Qinghai 810000

Abstract： As a core raw material for high- industries such as photovoltaics and semiconductors, the production process of polycrystalline silicon involves a variety of corrosive media such as chlorosilanes, chloric acid, and hydrogen, and the corrosion problem of equipment pipelines directly affects the continuity of production, product quality, and operation safety. Based on the characteristics of polycrystalline silicon production process, this article deeply analyzes the main types and causes of equipment pipeline corrosion, and focuses on discussing the practical application effects of core protection technologies such as material selection, coating protection, cathodic protection, process optimization, and corrosion monitoring. Combined with the production scene, it proposes the optimization direction of the protection technology system, and provides practical references the polycrystalline silicon industry to improve the level of equipment pipeline corrosion protection and reduce operation and maintenance costs.

Keywords： Polycrystalline silicon; equipment pipeline; corrosion protection; material selection; coating protection; corrosion monitoring

引言

多晶硅生产采用改良西门子法等工艺，整个流程需经过氯硅烷合成、精馏提纯、还原沉积、尾气回收等多个环节，设备管道长期处于高温、高压、强腐蚀性介质的复杂工况中。腐蚀现象不仅会导致管道壁厚减薄、密封失效，引发介质泄漏等安全隐患，还可能造成产品污染，降低多晶硅纯度，同时增加设备维修更换频率，大幅提升生产成本。当前，多晶硅行业对生产效率和产品质量的要求不断提高，传统腐蚀防护手段已难以完全适配复杂的生产工况，因此深入探索针对性强、稳定性高的腐蚀防护技术，构建完善的防护体系，对推动多晶硅行业高质量发展具有重要的现实意义^[1]。

一、多晶硅设备管道腐蚀类型及成因分析

多晶硅生产环境的复杂性决定了腐蚀类型的多样性，不同工艺环节的介质成分、温度压力不同，腐蚀成因也差异很大。通过生产现场腐蚀失效案例的梳理，主要腐蚀类型及成因有以下几点。

（一）化学腐蚀

化学腐蚀主要是腐蚀介质与设备管道材料的直接化学反应产

生腐蚀性产物，造成材料的破坏。三氯氢硅、四氯化硅等氯硅烷类介质，在多晶硅生产中产生的化学腐蚀主要是在常温下水解形成盐酸，盐酸作为强酸性介质，同金属材料发生化学反应。例如普通碳钢管道接触盐酸时，就可产生可溶性氯化物，使管道内壁不断地腐蚀减薄。此外，在高温条件下还原反应环节产生的氢气与金属材料中的碳元素发生反应形成氢脆现象，进一步加剧材料腐蚀失效。介质的浓度、温度对化学腐蚀的速率有显著的影响，在精馏塔塔顶等

高温、高浓度介质部位，化学腐蚀问题更加突出^[2]。

（二）电化学腐蚀

电化学腐蚀是指由于在设备管道材料表面形成的微电池在电解质溶液的作用下氧化还原而引起的腐蚀。在多晶硅生产过程中，各种设备管道往往是不同材质拼接而成，例如碳钢与不锈钢、不锈钢与钛合金连接部位不同材质的电极电位差异大，形成明显的原电池。同时，管道内壁附着的积液、结垢等物质构成电解质溶液，使阳极区域发生氧化溶解，阴极区域发生还原反应，导致局部腐蚀加剧。此外，管道内壁的划痕、焊渣等缺陷，会形成局部电位差，引发点蚀、缝隙腐蚀等局部电化学腐蚀形式^[3]。

（三）应力腐蚀开裂

应力腐蚀开裂是材料在腐蚀介质和拉应力共同作用下发生的脆性断裂现象，多晶硅设备管道在制造、安装及运行过程中均存在不同程度的应力，为应力腐蚀开裂提供了必要条件。在精馏提纯环节，管道需承受较高的工作压力和温度波动，产生热应力和机械应力；管道焊接过程中形成的残余应力，也会长期作用于材料内部^[4]。而氯硅烷水解产生的氯离子，会穿透材料表面的氧化膜，在应力集中区域引发腐蚀，逐渐形成微裂纹，裂纹扩展后最终导致管道突发性断裂。应力腐蚀开裂具有隐蔽性强、破坏速度快的特点，往往在无明显腐蚀痕迹的情况下发生失效，对生产安全构成严重威胁，是多晶硅设备管道腐蚀防护的重点难点问题。

二、多晶硅设备管道腐蚀防护核心技术实践

针对多晶硅设备管道不同的腐蚀类型及成因，结合生产工艺特点，通过材料升级、表面处理、工艺优化及监测预警等多维度技术手段，构建全方位的腐蚀防护体系，已在实践中取得显著效果。

（一）材料选型优化技术

材料选型是腐蚀防护的基础，通过选用耐腐蚀性适配工况的材料，从源头降低腐蚀风险。根据多晶硅不同生产环节的腐蚀环境差异，采用差异化的材料选型策略：在氯硅烷合成及精馏等强腐蚀环节，传统碳钢材料已难以满足防护需求，实践中采用双相不锈钢替代普通不锈钢，其兼具奥氏体和铁素体不锈钢的优点，具有优异的耐氯化物腐蚀性能和抗应力腐蚀开裂能力，可有效适应高温、高浓度氯硅烷介质环境；在盐酸储罐、尾气吸收塔等强酸性介质接触设备中，采用钛合金材料，在钛合金表面形成的致密氧化膜具有良好的化学稳定性，可抵御盐酸等强腐蚀性介质的侵蚀；对于低温、低压且腐蚀性较弱的辅助管道，采用增强聚丙烯等非金属材料，其具有重量轻、耐腐蚀性好、成本低等优势，同时避免了金属材料的电化学腐蚀问题。材料选型过程中，需综合考虑介质特性、工况参数及成本因素，实现防护效果与经济性的平衡^[5]。

（二）表面涂层防护技术

表面涂层是在设备管道表面形成致密的防护层，使腐蚀介质与基体材料相隔绝，它是多晶硅设备管道腐蚀防护的重要手段。针对不同使用场合，选择适宜的涂层材料及施工工艺：碳钢材质的储罐、反应釜内壁采用环氧树脂涂层，具有良好的附着力和耐

化学腐蚀性，施工中严格控制表面除锈等级，以喷砂除锈的方法去除表面氧化皮和锈蚀，并使涂层与基体紧密结合，同时多层涂覆提高涂层厚度，提高防护效果；在高温工况下的管道外壁，采用有机硅耐高温涂层，在较高温度下有较好的化学性能，能有效抵抗此外针对传统涂层易出现的局部破损问题，实践中采用“涂层+牺牲阳极”的复合防护方式，当涂层破损时，牺牲阳极优先发生腐蚀，保护基体材料不受侵蚀，使防护体系更趋稳定。

（三）阴极保护技术

阴极保护技术是在设备管道基体上通过施加外部电流或牺牲阳极使阴极被氧化，从而抑制阳极的氧化反应，达到防护目的，该技术多用于多晶硅生产的大型储罐、长距离管道等设备。实践中，根据设备类型及工况特点，选择不同的阴极保护方式：对于地下敷设的尾气回收管道，采用外加电流阴极保护系统，利用恒电位仪向管道施加直流电流，使管道表面电位维持在保护电位范围内，同时设置参比电极实时监测电位变化，保证保护效果；对于小型储罐等设备，采用牺牲阳极阴极保护，选用锌合金或镁合金作牺牲阳极，通过阳极与储罐基体的电极电位差形成保护，需要和表面涂层防护配合使用，涂层能降低保护电流的消耗，能延长牺牲阳极的使用寿命，两者联合起来可大大提高防护效果。在施工中，阳极位置要合理布置，电流要分布均匀，不要出现保护死角。

（四）工艺优化防护技术

控制腐蚀风险从工艺源头控制腐蚀风险，通过优化生产工艺参数，减少腐蚀介质的生成及对设备管道的侵蚀，是腐蚀防护的根本性措施。在多晶硅生产实践中，工艺优化主要从以下方面开展：在氯硅烷合成环节，严格控制反应温度和原料配比，避免因反应温度过高导致介质腐蚀性增强，同时优化原料净化工艺，减少杂质对反应过程的影响，降低腐蚀性副产物的生成量；在精馏提纯环节，通过优化塔内件结构，改善气液接触效果，减少介质在管道内的滞留时间，降低局部腐蚀风险，同时控制精馏塔的升温、降温速率，避免温度波动过大产生过大的热应力，引发应力腐蚀开裂；在尾气处理环节，优化吸收剂配方及喷淋方式，提高尾气中腐蚀性介质的吸收率，减少未处理尾气对后续管道的腐蚀；对于易发生水解的氯硅烷管道，采用伴热保温措施，防止介质温度过低发生冷凝水解，生成盐酸引发腐蚀。工艺优化过程中，需结合生产流程模拟分析，确保在提升腐蚀防护效果的同时，不影响产品质量和生产效率。

（五）腐蚀监测预警技术

腐蚀监测预警通过实时获取设备管道的腐蚀状态信息，及时发现腐蚀隐患，为防护措施的调整及维护提供依据，是保障防护体系有效性的关键。多晶硅生产中，根据设备重要程度及腐蚀风险等级，采用差异化的监测手段：对于关键反应釜、精馏塔等设备，采用在线腐蚀监测系统，通过安装电阻探针、电化学传感器等设备，实时采集腐蚀速率、介质成分等数据，数据经无线传输至监控中心，工作人员可实时掌握设备腐蚀状态，当监测数据超出预警阈值时，系统自动发出警报；对于长距离管道，采用定期巡检与无损检测相结合的方式，在巡检过程中重点检查管道表面

涂层破损、法兰密封泄漏等情况，无损检测采用超声波测厚技术，定期检测管道壁厚变化，判断腐蚀程度；建立腐蚀监测数据库，对监测数据进行统计分析，结合设备运行时间、工况参数等信息，预测设备剩余使用寿命，制定预防性维护计划。通过腐蚀监测预警，实现了腐蚀问题的早发现、早处理，有效减少了突发腐蚀失效事故的发生。

三、多晶硅设备管道腐蚀防护技术优化方向

尽管现有腐蚀防护技术在多晶硅生产中取得了良好的应用效果，但随着行业对生产连续性和安全性要求的不断提高，仍需从技术创新、体系完善等方面进行优化提升。

（一）新型防护材料研发与应用

现有材料在极端工况下的防护性能仍存在不足，如高温、高浓度氯硅烷介质中，双相不锈钢的抗应力腐蚀开裂性能仍有提升空间。未来应加强新型防护材料的研发，重点开发耐极端工况的高性能合金材料，如在不锈钢中添加稀土元素，改善材料的微观结构，提高其耐腐蚀性和力学性能；探索新型非金属复合材料的应用，如碳纤维增强复合材料，其具有高强度、耐腐蚀性好、重量轻等优势，可用于替代部分金属材料，降低设备重量及腐蚀风险。同时，加强材料腐蚀机理研究，深入分析多晶硅生产复杂介质与材料的相互作用规律，为材料选型提供更科学的依据。此外，应积极推动材料表面改性技术的研究与应用，通过先进的涂层或渗层工艺，在不改变基体材料性能的前提下，显著提升其表面耐蚀、耐磨及抗高温氧化能力。同时，重视材料在实际生产环境中的长期服役性能数据积累，建立完善的腐蚀数据库与寿命预测模型，为设备的安全运行与精准维护提供关键支撑。通过多学科交叉融合，结合人工智能与高通量计算，加速新材料的设计与筛选进程，最终构建起覆盖全工况、全生命周期的高效防护材料体系，为多晶硅等流程工业的提质增效与安全可持续发展奠定坚实基础。

（二）智能化腐蚀防护体系构建

当前腐蚀监测多以单点监测为主，监测数据的集成分析及智

能化应用不足。未来应构建智能化腐蚀防护体系，利用物联网技术实现多测点、多参数的同步监测，通过大数据分析技术对监测数据进行深度挖掘，结合设备运行历史数据、工艺参数等信息，建立腐蚀预测模型，实现腐蚀风险的精准预测；引入人工智能技术，开发智能诊断系统，自动识别腐蚀失效模式，为维护方案的制定提供智能化建议；将腐蚀监测系统与生产控制系统联动，当监测到腐蚀风险升高时，自动调整工艺参数，如降低反应温度、增加吸收剂用量等，实现腐蚀防护的主动控制。

（三）全生命周期防护管理模式建立

现有腐蚀防护多集中于设备运行阶段，缺乏从设计、制造、安装、运行至报废的全生命周期管理。未来应建立全生命周期防护管理模式，在设备设计阶段，开展腐蚀风险评估，根据评估结果优化设备结构及材料选型；在制造安装阶段，要加强焊接工艺控制，减少焊接残余应力，严格执行表面处理及涂层施工标准，确保施工质量；在运行阶段，结合腐蚀监测数据制定个性化维护计划，定期开展维护保养；在报废阶段，对设备腐蚀失效原因进行分析总结，为后续设备设计及防护技术优化提供经验。通过全生命周期管理，实现腐蚀防护的全程管控，最大化提升设备使用寿命。

四、结论

多晶硅设备管道腐蚀防护是保障生产安全、提升产品质量、降低运营成本的关键环节，其腐蚀类型多样，成因复杂，需采用多维度、系统化的防护手段。实践表明，材料选型优化、表面涂层防护、阴极保护、工艺优化及腐蚀监测等核心技术的综合应用，可有效控制腐蚀风险，提升设备运行稳定性。未来，随着新型材料研发、智能化技术应用及全生命周期管理模式的建立，多晶硅设备管道腐蚀防护技术将向更高效、精准、可靠的方向发展，为多晶硅行业的持续健康发展提供有力支撑。在实际生产中，需结合具体工况特点，针对性选择防护技术，不断优化防护体系，实现防护效果与经济性的统一。

参考文献

- [1] 李和. 电解脱硫设备在油气储运含硫污水管道腐蚀控制中的应用研究 [J]. 中国设备工程, 2025, (09): 202-204.
- [2] 陈志光, 吴聪, 张静思, 秦朝葵. 建筑防潮设备对埋地钢质燃气管道的腐蚀风险 [J]. 煤气与热力, 2024, 44(12): 7-14.
- [3] 陆士平, 范东亮, 陆奇. 《工业设备及管道防腐蚀工程技术标准》GB/T 50726-2023 修订技术内容解读 [J]. 全面腐蚀控制, 2024, 38(04): 1-11.
- [4] 杨海维. 采油厂集输管道和设备硫化氢腐蚀评估与维护分析 [J]. 中国设备工程, 2024, (08): 180-182.
- [5] 胡昭朝, 李羽, 刘言霞, 陆原. 海上某油田腐蚀因素分析及防腐综合治理研究 [J]. 广州化工, 2023, 51(21): 94-97.