

电子级盐酸管线安装难点分析及总结

王玉博

中国电子系统工程第二建设有限公司 江苏 无锡 214188

摘要: 本文以某电子级盐酸生产线为载体,系统阐述了电子级盐酸制备与输送管线的安装技术难点。盐酸作为半导体制造中晶圆清洗、蚀刻及金属杂质去除的关键工艺化学品,其强腐蚀性、高纯度要求对管道系统的材料选型、连接工艺、安全防护及洁净度控制提出了极为严苛的挑战。某项目采用孔网钢带 PE 复合管道作为工业级原料盐酸输送主材,其具有较高的抗腐蚀性、耐磨性,承压能力较强,满足盐酸原料运输的同时,施工方便、焊接工艺简单,降低项目投入成本。本文围绕孔网钢带管道的特殊连接工艺、强腐蚀性介质的施工安全防护、全系统洁净度控制及双套管防泄漏设计四大维度,深入剖析了安装过程中的核心技术难点,并总结了相应的标准化作业程序与质量控制措施,为同类高纯、强腐蚀性化学品输送系统的建设提供了系统的实践参考。

关键词: 电子级盐酸;孔网钢带复合管;高纯化学品管线;腐蚀防护;洁净管道安装

引言: 电子级盐酸(通常为31%浓度,SEMI Grade 3及以上)是半导体制造工艺中不可或缺的湿电子化学品,广泛应用于晶圆表面的金属杂质去除、氧化层清洗及光刻胶剥离等关键工序。其纯度要求达到ppt级,金属离子含量需控制在极低水平,杂质超标将直接导致芯片良率下降。电子级盐酸生产线需将工业级盐酸通过精馏提纯等工艺处理提升为高纯电子级盐酸,再经管道输送至使用终端。盐酸具有强腐蚀性与挥发性(HCl气体),对金属材料(如碳钢、普通不锈钢)具有显著腐蚀作用。同时,电子级盐酸的应用对管道的离子析出率和颗粒产生率有极苛刻的限制,使管道材料的选择面临“耐腐蚀”与“高洁净”的双重约束。盐酸管线安装过程中,克服了材料选型、特殊连接工艺、腐蚀防护、洁净控制及安全施工等多方面技术难题。本文旨在梳理电子级盐酸管线的安装实践,总结相关技术经验与管理方法。

1 电子级盐酸管线系统构成与材料选型分析

1.1 系统工艺流程概述电子级盐酸系统涵盖以下主要工艺段

1.1.1 原料盐酸运输段:工业级31%盐酸经孔网钢带管输送至厂区内原料储罐,此段介质为工业级浓盐酸,腐蚀性极强,管道需具备优异的耐化学腐蚀性能。1.1.2 精馏提纯段:原料盐酸经精馏塔加热提纯,去除金属离子及有机杂质,产出高纯盐酸蒸汽,经冷凝后形成电子级盐酸液体。此段涉及高温(80-110℃)盐酸介质,对管材的耐温性能与抗蠕变性能要求更高。1.1.3 成品储存与

输送段:电子级盐酸成品经检测合格后,储存于高纯储罐中,再通过成品输送管道分配至各灌装线、槽车及工艺使用点,此段对管道洁净度要求最高,须杜绝任何颗粒与金属离子污染。

1.2 管材选型:孔网钢带复合管道

某盐酸原料输送管线主材选用孔网钢带增强聚乙烯复合管(以下简称“孔网钢带复合管”)。该管材为多层复合结构,由内而外依次为:1)内层:高密度聚乙烯(HDPE)或耐高温聚乙烯(PE-RT)塑料内衬,直接接触盐酸介质,提供优异的耐化学腐蚀性能。HDPE对31%盐酸具有良好的耐蚀性,在常温至60℃范围内可长期稳定使用^[1]。2)增强层:冷轧钢带经氩弧焊接成型的多孔钢带网,作为管材的承压骨架,大幅提升管道的环刚度与抗外压能力。该结构使复合管的拉伸、抗弯、抗冲击指标接近Q235钢管。3)外层:HDPE保护层,保护钢带免受外界环境腐蚀,同时提供额外的抗冲击防护。孔网钢带复合管在产线中的选型优势体现在以下方面:1)耐腐蚀性优异:内层HDPE/PE-RT对盐酸具有出色的化学稳定性,在31%盐酸、常温工况下腐蚀速率极低^[2]。2)承压能力充足:钢带增强层弥补了纯塑料管道耐压能力不足的缺陷,使管材同时具备塑料的耐腐蚀性与金属的力学强度。3)洁净度可控:内表面光滑(HDPE内壁粗糙度远低于金属管道),不易附着颗粒物,且离子析出率极低,满足电子级应用要求。

1.3 管道连接方式设计

孔网钢带复合管的连接是电子级盐酸产线安装的核心

心技术环节。与传统金属管道的焊接或塑料管道的热熔连接不同,孔网钢带复合管需采用电熔连接与法兰连接相结合的方式:1)电熔连接:用于直管段之间的连接。通过电熔管件(内置电阻丝)通电加热,使直接管件内壁与管材外壁的聚乙烯材料熔融结合,形成一体化的密封接头。钢带层在接头处通过专用铜网跨接件实现电气连续性。2)法兰连接:用于管道与阀门、设备、储罐等接口的连接,以及便于检修的管段。法兰采用钢制松套法兰与HDPE法兰适配器组合,密封垫片选用高纯PTFE材质。

2 核心安装难点及系统性解决方案

2.1 难点一:孔网钢带复合管的特殊连接工艺控制

2.1.1 挑战孔网钢带复合管的多层复合结构使其连接工艺远复杂于单一材质管道。主要难点包括:1)电熔连接的参数精准控制:电熔连接的质量取决于电压、电流、通电时间、环境温度等多因素的综合控制。参数偏差将导致接头过熔(内壁塌陷、污染介质)或欠熔(接头强度不足、泄漏风险)。2)钢带层的电气连续性:钢带增强层在管道连接处需保持电气连续,以便于全系统的防静电接地。电熔接头处钢带层的跨接方式直接影响接地系统的可靠性。3)接头内壁的洁净度保持:电熔连接过程中,聚乙烯熔融可能产生微量挥发物或颗粒,若控制不当将污染管道内壁,影响电子级盐酸的纯度。2.1.2 解决方案标准化电熔焊接工艺规程:针对管径(DN50-DN150)和环境条件(施工温度5-35℃),编制专项电熔焊接工艺规程(WPS),明确以下关键参数:

1)焊接电压:39.5V±0.5V(根据管件制造商推荐值)。2)焊接时间:依据管径和管件类型确定(通常为80-200秒)。3)冷却时间:不少于焊接时间的1.5倍,冷却期间严禁移动管道或拆卸夹具。4)环境温度补偿:当环境温度低于5℃或高于35℃时,按制造商提供的温度补偿曲线调整焊接参数。5)焊口全过程管控:每道电熔焊口实施唯一的焊口编号,记录焊接参数(电压、电流、时间、环境温度、操作人)。焊接前检查管材端面平整度、氧化层刮削质量(刮削厚度0.1-0.2mm),确保管材插入深度符合管件标记线。6)焊接完成后进行外观检查:观察孔内熔融物料溢出情况、管件表面有无变形或裂纹。按10%比例进行电熔接头的剥离试验和静液压强度试验验证。7)钢带层跨接处理:电熔管件内预设铜质跨接片,焊接时与管材钢带层形成可靠电气连接,每道电熔接头焊接后测量接头两端钢带层的电气导通电阻,要求 $\leq 0.01\Omega$,全系统钢带层通过跨接线形成连续接地

网络,最终对地电阻 $< 10\Omega$ 。8)洁净施工保障:电熔连接在Class 5及以上洁净环境中进行,管材切割采用专用塑料管切割机,切割后立即用高纯氮气吹扫内壁清除碎屑,管端刮削后、插入管件前,用无尘布沾异丙醇擦拭管材外壁和管件内壁,焊接过程中管件开口端用洁净封堵帽临时密封。

2.2 难点二:强腐蚀性盐酸介质的施工安全防护

2.2.1 挑战:盐酸的强腐蚀性与挥发性(HCl气体)使施工过程中的安全风险显著高于常规化学品管道。具体挑战包括:1)人员安全风险:盐酸接触皮肤可造成化学灼伤,吸入HCl蒸汽可刺激呼吸道甚至导致肺水肿。安装、试压、冲洗各环节均存在接触风险。2)设备与工具腐蚀:盐酸泄漏或挥发可腐蚀周边金属设备、电气元件及施工工具。3)环境控制:HCl气体比空气重,易在低洼处聚集,需保证充分通风。4)泄漏应急:盐酸泄漏的应急处置要求迅速、准确,需配备专用中和剂与防护装备。

2.2.2 解决方案:1)全过程人员防护:所有参与盐酸管线施工的人员须经专项安全培训并考核合格。2)危险作业时穿戴:耐酸防护服(PVC或氯丁橡胶材质)、耐酸手套(丁腈橡胶,厚度 $\geq 0.5\text{mm}$)、防化护目镜、配备酸性气体滤毒盒的全面罩防毒面具^[3]。3)在可能接触液态盐酸的作业中,增穿防酸围裙和防酸靴。4)施工区域管控:盐酸管线施工区域划定为管制区,设置明显警示标识,区域配备移动式局部排风设备,确保HCl气体及时排出,设置固定式HCl气体浓度检测报警仪,报警阈值设定为5ppm(立即危及生命或健康浓度IDLH为50ppm),施工区域禁止烟火、禁止无关人员进入。5)应急设施配置:作业点10米范围内设置紧急洗眼淋浴器,每周检查确认功能正常。6)配备盐酸泄漏应急处理箱:内含石灰或碳酸氢钠中和剂、防化密封袋、专用泄漏收集容器,制定盐酸泄漏现场处置方案并组织演练。7)管道试压与冲洗的特殊安全措施:水压试验用水须添加pH指示剂,试压完成后及时排放并中和处理,严禁使用压缩空气进行盐酸管线的气压试验(防止盐酸雾化扩散),化学清洗废液按危废管理要求收集,交专业机构处置。

2.3 难点三:全系统的洁净度保障与杂质控制

2.3.1 挑战:电子级盐酸对金属离子(如Fe、Cr、Ni、Cu等)含量要求极为严格(通常要求各金属离子 $< 10\text{ppb}$)。管道安装过程中引入的任何污染——包括颗粒物、金属碎屑、油脂、焊渣、施工人员接触带来的污染

物——都可能使成品盐酸纯度不合格。2.3.2 解决方案：材料进场验收与保管：

所有孔网钢带复合管材、管件、阀门到场后检查包装完整性，包装破损者拒收，管材存放于清洁、干燥的室内场地，远离化学品、油污和粉尘源，管材开口端保持出厂密封状态，使用后方可开启。

分级洁净施工：成品盐酸输送段（精馏塔出口至使用点）在 Class 5 洁净棚内施工，原料及精馏段在 Class 6 环境下施工，施工人员穿戴洁净服、洁净手套，工具专用化并定期清洁。2）安装过程污染防控：3）管材切割采用专用切割机，切割后高压氮气吹扫内壁，管材插入电熔管件前，用异丙醇或无尘布清洁管端外壁，每一道工序完成后及时封堵管口，防止异物进入，法兰连接用 PTFE 垫片安装前用异丙醇擦拭。

3 电子级盐酸生产与输送过程中污染因素分析

电子级盐酸在制备与输送过程中极易受到污染，主要包括以下几类：

3.1 材料污染

管道内壁、阀门、储罐等材质析出的金属离子（如 Fe、Cr、Ni、Cu 等）。密封材料、垫片（如普通橡胶）释放的有机物或颗粒。孔网钢带复合管若内衬损伤，钢带层暴露将直接污染盐酸介质。

3.2 施工过程污染

电熔连接时聚乙烯熔融产生的微量挥发物。管材切割、刮削产生的塑料碎屑未清理干净。工具、操作人员带入的颗粒与污染物。

3.3 系统残留污染

水压试验用水中的杂质、微生物残留。吹扫用工业氮气中的水分、油分、颗粒。

4 项目实践总结与建议

4.1 推行“先验证、后安装、再调试”的质量控制理念

1）安装前验证：对所有到场管材、管件进行材质复核与洁净度抽检；对电熔焊机进行参数校准；对操作人员进行资质确认与实操考核。2）安装过程控制：每道工序实行“自检 + 互检 + 专检”三级检查制度；关键工序（电熔焊接、双套管同心安装）实行旁站监督。3）调试与验证：严格遵循“水压试验 → 化学清洗 → 纯水冲洗 → 氮气吹扫 → 氦检漏 → 联动调试”的顺序，严禁工序倒置。

结语

电子级盐酸生产线的建造需系统性地应对强腐蚀性介质与超高纯度要求在单一系统中并存所带来的重大技术挑战。本项目以孔网钢带增强复合管为主材，通过精细化的电熔连接工艺控制、严格的施工安全防护体系、全流程洁净度管理以及符合规范的双套管防泄漏设计，有效保障了电子级盐酸从原料到使用点全过程的安全输送与纯度保持。

本项目实践形成的以“复合管材的特殊连接工艺为核心、以腐蚀防护与安全施工为底线、以洁净控制与双套管监测为保障”的方法体系，为半导体及显示面板行业高纯、强腐蚀性化学品（盐酸、硫酸、氢氟酸等）输送系统的建设提供了完整的技术参考与管理范式。

参考文献

- [1] 陈伟, 张华, 赵明. 氟聚合物管道在电子级化学品输送中的性能评估与应用 [J]. 中国塑料, 2022, 36(8): 89-95.
- [2] 刘志强, 王晓辉, 李建国. 高纯化学品输送系统内表面处理技术研究进展 [J]. 化工设备与管理, 2023, 60(4): 45-50.
- [3] 李明, 周涛, 王磊. 盐酸介质中聚合物管道材料的腐蚀行为与选型研究 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2023, 35(6): 512-518.