

洁净室工程的技术与管理：从设计到实施的全程把控

张杰

南京超净空调系统工程技术有限公司，江苏省南京市，210000；

摘要：洁净室作为现代工业和科研领域的关键基础设施，其工程的技术与管理直接关系到产品质量、生产安全及科研成果的可靠性。本文从洁净室工程设计原则、技术要点、施工管理流程及质量控制体系等方面展开深度探讨，结合半导体、生物医药等行业的典型案例，系统阐述洁净室工程从设计到实施的全程把控策略，为行业提供可落地的技术管理框架。

关键词：洁净室工程；气流组织；压差控制；施工管理；质量验证

DOI：10.69979/3029-2727.26.03.058

引言

洁净室通过控制空气中尘埃粒子、微生物及有害气体浓度，为精密制造、生物实验等提供稳定环境。随着半导体芯片制程向2nm迈进、mRNA疫苗产业化加速，洁净室技术面临更高挑战：ISO 1级洁净室需控制 $0.1\mu\text{m}$ 粒子浓度 ≤ 10 个/ m^3 ，温湿度波动范围缩小至 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。本文基于行业实践，构建覆盖设计、施工、验收全周期的技术管理体系，助力企业突破技术壁垒。

1 洁净室工程设计的技术内核

1.1 气流组织与压差控制：筑牢洁净度的核心防线

气流组织设计作为洁净室工程的关键环节，需严格遵循“送风高效、回风彻底”的核心原则。在半导体制造领域，鉴于其对洁净度的严苛要求，垂直单向流（层流）成为主流选择。该模式借助FFU（风机过滤单元）与高架地板的协同作用，可精准实现 $0.45\text{m/s} \pm 20\%$ 的风速均匀性。这种均匀且稳定的气流，能引导粒子沿特定方向有序排出，有效避免粒子在室内无序扩散与沉积，为芯片制造提供超洁净环境。生物医药行业则因工艺特性，多采用非单向流（乱流）方式。通过科学规划送风口与回风口的位置、数量及尺寸，使室内空气形成有序的循环流动，换气次数达到20-60次/小时。如此高的换气频率，可快速稀释并排出室内产生的污染物，满足动态千级洁净度的严格要求，保障药品生产质量。压差控制是防止不同区域间交叉污染的重要屏障。合理的分级压差设计，能在洁净室内形成有序的压力梯度。以某疫苗生产基地为例，核心生产区维持 $+20\text{Pa}$ 的正压，准洁净区为 $+15\text{Pa}$ ，辅助区为 $+10\text{Pa}$ ，从内至外形成递减的压力分布。同时，系统配备文丘里阀，可依据实时

压力数据动态调节风量，确保各区域压差波动严格控制在 $\pm 2\text{Pa}$ 以内，有效阻断微生物逆流，避免交叉污染风险。

1.2 材料选型与构造节点：把控污染控制的微观要点

墙面材料的选用需综合考虑耐腐蚀性与低发生性。在高端制造领域，如12英寸晶圆厂，常采用304不锈钢蜂窝夹芯板。其表面粗糙度 $R_a \leq 0.8\mu\text{m}$ ，能有效减少粒子附着；配合硅酮密封胶填缝，可实现气密性N5级（泄漏率 $\leq 0.05\%/h$ ），防止外界污染物渗入。地面系统采用环氧自流平与导电PVC卷材双层结构。环氧自流平可打造平整基面，平整度 $\leq 2\text{mm}/2\text{m}$ ，为上层材料提供稳定支撑；导电PVC卷材通过内置铜箔网格，实现静电耗散，表面电阻控制在 $1 \times 10^6 - 1 \times 10^9 \Omega$ ，避免静电吸附尘埃，保障洁净度。构造节点设计是消除污染隐患的关键。在基因治疗实验室等对洁净度要求极高的场所，墙面与地面交接处采用R50mm圆弧过渡，避免直角积尘；门窗框与墙体连接处使用抗菌型密封胶，抑制微生物滋生，确保所有阴角清洁覆盖率达100%，从细节处保障洁净室的整体性能。

2 洁净室工程施工管理的系统化实践

2.1 三阶段动态管控模型

在洁净工程施工过程中，为确保最终环境的高洁净度，通常将整个流程科学划分为净化板材安装、设备系统集成、调试验证三个关键阶段，并针对各阶段特点实施差异化的精准管控策略。前期管控阶段，重点在于构建“无尘化施工区”。所有进入施工区域的材料，必须先

经过风淋室的强力除尘处理，有效去除表面附着的尘埃颗粒后，方可进入施工场地。对于会产生大量粉尘的切割作业，则安排在负压隔离间内进行。该隔离间配备高效的 HEPA 过滤器，能够迅速收集并过滤作业过程中产生的粉尘，防止其扩散到周边环境，从源头上控制污染物的产生与传播。中期管控阶段，着重落实“人员 - 物料双通道管理”模式。施工人员需依次经过更衣室和气闸室的两级净化程序，去除身上携带的污染物后，才能进入施工区域。同时，施工工具采用无尘布进行包裹运输，避免在运输过程中沾染灰尘。在空调系统安装等关键环节，通过实时监测送风管内的尘埃粒子数量，依据监测数据动态调整清洁频次，确保风管内部的洁净度始终维持在较高水平，满足严格的洁净要求。后期管控阶段，采用“封闭式调试法”。空调系统先进行长达 12 小时的空吹运行，以彻底清除系统内部可能残留的杂质和灰尘。之后，再安装高效过滤器，确保进入洁净区域的空气达到极高的洁净标准。通过这种严谨的调试流程，能够有效延长 FFU 初效滤网的使用寿命，降低运营成本。

2.2 关键工序的质量控制要点

高效过滤器安装工序至关重要。采用先进的液槽密封技术，确保过滤器与安装框架之间的密封性能达到极致。在安装完成后，必须进行严格的 DOP 检漏测试，且合格率需达到 100%，以保证过滤器能够有效拦截微小颗粒，防止泄漏。同时，利用激光定位装置精确控制过滤器的安装位置，将安装偏差严格控制在 $\leq 1\text{mm}$ 的范围内，进一步降低泄漏风险，使泄漏率控制在 0.01% 以下。风管制作环节，选用自动咬口机进行咬口操作，并采用角钢法兰连接方式，确保风管连接紧密、牢固。在漏光检测方面，按照“暗室条件下每 10m 接缝漏光点 ≤ 2 处”的严格标准执行，及时发现并处理风管制作过程中的质量问题，有效降低风管系统的阻力损失，提高通风效率。电气布线工序，选用低烟无卤阻燃电缆，这种电缆在燃烧时产生的烟雾和有害气体较少，能够有效保障人员安全。桥架安装时预留 20% 的余量，为后期可能的扩容需求预留充足空间，避免因扩容导致电缆拥挤，进而产生电磁干扰，影响电气设备的正常运行，确保生产线的稳定性和可靠性。

3 洁净室工程的质量验证体系

3.1 验证流程的三维架构

验证流程构建起涵盖设计、安装、运行及性能的多维体系，确保洁净环境精准达标。设计确认 (DQ) 环节，借助计算流体力学 (CFD) 模拟技术，对气流组织进行深度优化。通过大量迭代计算，精准模拟粒子在洁净空间内的运动轨迹，从而调整送风口、回风口布局及风速参数，有效缩短粒子沉降时间，提升洁净效率。安装确认 (IQ) 阶段，运用激光跟踪仪等高精度检测设备，对设备安装精度进行严格把控。该技术可实现微米级的测量精度，确保设备安装的水平度、垂直度等参数符合设计要求，为洁净系统的稳定运行奠定基础。运行确认 (OQ) 过程中，实施全天候连续监测。通过部署温湿度传感器网络等监测设备，实时获取洁净室内的环境参数，并利用先进的控制系统实现动态调节，确保温湿度等关键指标始终维持在设定范围内。性能确认 (PQ) 环节，开展模拟生产测试。在接近实际生产的工况下，对洁净室进行长时间满负荷运行验证，全面评估其性能稳定性，确保洁净室能够持续满足相应的洁净度标准。

3.2 动态监测与智能运维

动态监测与智能运维是保障洁净环境长期稳定的关键。部署物联网监测系统，实时采集粒子计数器、压差传感器等设备的数据，实现对洁净室环境的全方位、实时监控。借助 AI 算法对海量历史数据进行分析挖掘，能够提前预测设备维护需求，合理安排维护计划，降低维护成本。同时，建立建筑信息模型 (BIM) 运维模型，通过三维可视化平台，快速定位设备故障位置，显著缩短故障排查时间，提高运维效率。

4 典型案例分析：某 12 英寸晶圆厂洁净室工程

4.1 项目背景与挑战

本项目需建设一座符合 ISO 3 级标准的洁净室，该洁净室将作为 2nm 芯片制造的核心生产环境。然而，要达成这一目标，面临着诸多严峻的技术挑战。在洁净度方面，对 $0.1\mu\text{m}$ 粒子的浓度有着近乎苛刻的要求，必须控制在 ≤ 10 个/ m^3 ，任何微小的颗粒污染都可能对芯片制造产生致命影响。温湿度控制同样不容小觑，波动范围需严格限定在 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ，以确保芯片制造过程中的化学反应和物理特性稳定。此外，振动值也必须控制在 $\leq 0.5\mu\text{m}/\text{s}^2$ ，过大的振动会干扰精密设备的正常运行，影

响芯片的制造精度。

4.2 技术解决方案

针对气流组织难题,采用垂直单向流与局部百级层流罩相结合的方式。通过精心布置 6000 个 FFU,实现了 0.5m/s 的风速均匀性,确保粒子能够高效定向排出。在振动控制上,运用独立基础搭配空气弹簧隔振系统,有效隔离外界振动,将光刻机平台的振动值成功降至 $0.3\mu\text{m}/\text{s}^2$ 。智能调控方面,部署 1000 个传感器节点,借助数字孪生技术,对温湿度、压差等关键参数进行实时监测与精准调控,实现毫秒级响应,保障洁净室环境始终稳定。

4.3 管理创新实践

管理上,采用模块化施工模式,将洁净室划分为 200 个标准模块,通过预制化生产大幅缩短工期 40%。建立材料二维码管理系统,实现材料从进场到安装的全流程质量追溯,确保每一个环节都符合高标准要求。同时,引入 AR 辅助施工系统,为技术人员提供直观的操作指导,使培训周期从 2 周大幅缩短至 3 天,有效提升了人员效能。

5 行业发展趋势与应对策略

5.1 技术升级方向

在高效洁净与节能背景下,技术升级至关重要。原子层沉积(ALD)技术可实现原子级致密薄膜,有效控制 $0.01\mu\text{m}$ 粒子,为芯片制造和生物医药等高洁净行业提供可靠保障。绿色节能方面,大力推广磁悬浮离心机与热回收系统的协同应用。磁悬浮离心机以其高效、低噪音、无摩擦等优势,显著降低制冷能耗;热回收系统则可将排风中的余热进行回收再利用,实现能源的循环利用。二者结合,可使数据中心等场所的电源使用效率(PUE)值降至 1.2 以下,大幅降低能源消耗与运营成本。智能化运维领域,积极应用数字孪生技术。通过构建与实际设备一一对应的虚拟模型,实时采集设备运行数据并进行分析,能够提前洞察设备潜在故障,实现故障预测准确率 $\geq 90\%$,为设备的预防性维护提供有力支

持,减少设备停机时间,提高生产效率。

5.2 管理优化路径

管理优化是提升行业整体水平的重要举措。标准化建设上,推动 ISO 14644 与 GMP 标准的深度融合,整合两大标准的优势,建立行业统一的基准与规范,促进不同企业、不同项目之间的协同与互认。全生命周期管理方面,构建“设计-施工-运维”一体化平台。该平台整合各阶段的信息与资源,实现数据的无缝传递与共享,优化项目流程,降低全周期成本 20%,提高项目的整体效益。人才培养体系上,建立“理论教学+虚拟仿真+现场实操”三级培训机制。理论教学夯实专业基础,虚拟仿真提供安全、高效的实践环境,现场实操强化实际操作能力,三者有机结合,有效缓解专业人才短缺的困境,为行业发展提供坚实的人才支撑。

6 结论

洁净室工程的技术与管理需实现“精准设计-精细施工-精确验证”的三维闭环。通过气流组织优化、智能监控系统部署、模块化施工等创新实践,可有效突破 ISO 3 级洁净度、 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 温湿度控制等技术瓶颈。未来,随着 AIoT 技术与洁净室工程的深度融合,行业将向“零污染、零故障、零浪费”的终极目标迈进,为高端制造提供更强大的环境保障。

参考文献

- [1] 王国栋,邢军,郭明,等. 洁净室“技术夹层”吊挂系统探究[J]. 洁净与空调技术, 2024, (02): 25-34.
- [2] 程童. VR/AR 产品生产洁净环境构建与评价[D]. 山东大学, 2024.
- [3] 沈晋明,刘燕敏. 无级别受控环境理念与应用——生物洁净技术发展新趋势[J]. 暖通空调, 2021, 51(06): 29-34.
- [4] 沈晋明,刘燕敏. 手术室手术环境控制不应照搬洁净室技术[J]. 暖通空调, 2017, 47(08): 31-35+24.
- [5] 郑茹悦. 高校十万等级洁净室的设计、维护与管理[J]. 洁净与空调技术, 2021, (03): 116-118.