

工业净化工程在现代精密制造中的核心作用与系统性构建研究

秦真强 黄文静

山东齐都药业有限公司 山东淄博 255420

摘要：工业净化工程是一门综合性极强的应用工程技术。它的主要目标是通过一系列技术手段对特定空间环境中的污染物进行有效控制。这些污染物包括但不限于空气中的悬浮微粒、有害气体、微生物以及环境中的温湿度、压差和气流组织等参数。随着现代制造业向着精密化、微型化、高可靠性方向飞速发展，生产制造过程对于所处环境的洁净程度提出了前所未有的苛刻要求。一个设计优良、运行稳定的洁净环境已成为许多高端产业不可或缺的基础性支撑平台。其应用范围早已超越了早期的半导体工业和生物医药领域，迅速扩展到航空航天、精密光学、纳米材料、新能源电池以及食品包装等众多关键行业。因此，深入探讨净化工程的系统构成、核心原理与控制策略，对于提升我国高端制造业的整体水平具有十分重要的理论意义与现实价值。

关键词：工业净化工程；污染物控制；洁净环境

一、洁净室系统的定义与动态平衡原理

洁净环境的实现并非依靠单一设备，而是依赖于一个复杂且高度集成的系统。这个系统我们通常称之为洁净室系统。洁净室的定义是一个利用层层控制手段将空间内空气的悬浮粒子浓度维持在标准以下的特殊房间。其建造与运行是一个涉及建筑结构、空气动力学、流体力学、材料科学、自动化控制等多个学科知识的复杂过程。整个系统的设计初衷是最大限度地减少或消除室内尘源，同时持续不断地将室内已有的污染物通过过滤后的洁净空气进行稀释并排出，从而形成一个动态平衡的洁净环境。

二、洁净度分级标准与行业应用差异

净化工程的核心理论基础源于对空气中悬浮微粒的控制理论。而在无菌药品生产中，微生物这种活体粒子才是需要严格控制的重点对象。为了量化洁净程度，国际标准化组织（ISO）制定了ISO 14644-1标准。该标准根据单位体积空气中特定粒径粒子的最大允许浓度，将洁净室空气洁净度划分为九个等级。例如，ISO5级相当于传统的百级洁净室，即每立方米空气中，大于等于0.5微米的粒子数不能超过3520个。这个标准为全球范围内的净化工程提供了统一的设计和验收依据。

三、净化工程的核心子系统构成

为了达到并维持所需的洁净度等级，一套完整的净化工程系统通常由以下几个核心子系统共同构成。

1. 围护结构系统：洁净空间的物理屏障

第一是围护结构系统。它构成了洁净环境的空间边

界，是洁净室的第一道屏障。围护结构包括天花板、墙体、地面以及门窗等。这些材料的选择必须满足严格的要求。首先必须具备光滑、耐磨、不产尘、不积尘的特性，其次要具备良好的气密性，防止外部未经过滤的空气渗入洁净区域。常用的墙面和吊顶材料是金属夹芯板，其表面涂层通常采用抗静电材料，以防止静电吸附微粒。地面则多采用环氧自流坪或PVC卷材，形成无缝、易清洁的整体表面。所有接缝处都需要进行密封处理，确保整个围护结构成为一个密闭的壳体^[1]。

2. 空气净化系统：洁净环境的“心脏”

第二是空气净化系统。这是整个洁净工程的“心脏”部分，承担着输送、过滤、调节空气的关键任务。该系统主要由空气处理机组、风管系统以及末端高效过滤器组成。空气处理机组内部集成了多重过滤器、风机、冷却盘管、加热盘管、加湿器等部件。新风与回风在此混合后，经过初效过滤器、中效过滤器的预处理，去除较大颗粒物，再经过温湿度调节，最后由风机加压，通过风管输送至洁净室顶部。最关键的一步是空气在进入房间前，必须经过设置在末端的高效过滤器（HEPA）或超高效过滤器（ULPA）。HEPA过滤器对0.3微米粒径的微粒过滤效率可达99.97%以上，而ULPA过滤器的效率则更高。正是通过这些高效过滤器，空气才得以达到设计的洁净标准。

3. 气流组织模式：洁净空气的输送与置换策略

第三是气流组织模式。目前主流的气流模式主要有两种。一种是单向流，formerly known as层流模式。在

这种模式下,气流以均匀的截面 velocity,沿着单一方向平行流动,像活塞一样将室内污染物瞬间推至出口处。这种模式适用于ISO 5级及以上,对洁净度要求极高的区域,如芯片的光刻区。另一种是非单向流,formerly known as乱流模式。它通过高效送风口将洁净空气送入室内,与室内空气混合后,通过下侧的回风口排出。这种模式依靠洁净空气对污染物的稀释作用来降低浓度,适用于ISO 6级至ISO 8级的区域。

4. 压差与温湿度控制:防止污染与保障工艺稳定的关键

第四是压差与温湿度控制。维持洁净室与相邻区域、不同洁净等级房间之间合理的空气压差,是防止污染物交叉污染的重要手段。其基本原则是:洁净度高的区域压力应高于洁净度低的区域,最高洁净度的房间压力最高。这样,当门开启时,气流只能从高压区流向低压区,从而有效阻止低级别区域的污染空气侵入高级别区域。这个压差梯度通常需要维持在5-20帕斯卡之间。因此,空气处理机组需要具备高精度的温湿度调节能力,通常要求温度控制精度在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内,湿度控制精度在 $\pm 5\%\text{RH}$ 以内^[2]。

5. 配套系统:保障洁净室稳定运行的综合支撑

第五是配套系统。现代净化工程还包含许多必不可少的配套系统。照明系统需采用密闭防尘的洁净灯具,同时其安装方式必须与吊顶板完美契合,维持天花板的平整与气密性。动力系统要为生产工艺设备提供稳定可靠的电力供应,特别是针对精密仪器,往往需要配备不间断电源(UPS)和稳压器,以应对电网波动和突发停电,防止生产中中断和数据丢失。给排水系统所使用的管道材料必须耐腐蚀、不易滋生细菌,通常采用316L不锈钢等优质材料,其设计与安装需避免死水区,防止微生物膜的形成。消防系统则需要针对洁净室高价值设备、密闭空间和正压环境的特点进行特殊设计,例如采用极早期烟雾探测报警系统(VESDA)和环保型惰性气体(如IG-541)灭火装置,确保在灭火的同时不损坏精密设备且对人体安全。最后,所有的子系统都应由一套先进的环境监控系统(EMS)进行集中监控与管理^[3]。该系统通过遍布各处的传感器,实时采集温度、湿度、压差、粒子浓度等数据,并自动调节机组运行状态,确保环境参数始终处于设定范围内,同时记录所有历史数据,满足审计追踪的要求,为生产过程的质量追溯提供数据支撑。

四、净化工程的关键控制要素

在净化工程的实践过程中,有几个关键控制要素需

要给予格外关注。这些要素直接决定了净化工程的最终效果与运行经济性。

1. 人员控制:管理与规范最大污染源

首先是人员的控制。在洁净室内,人员是最大的污染源。人体皮肤、头发、衣物以及日常活动会持续不断地产生微粒和微生物。因此,必须制定严格的人员净化程序。这包括进入洁净区前,必须经过更衣、洗手、穿戴洁净服、风淋等一系列步骤。洁净服通常采用长纤维、不易脱落的面料制成,能够将人体产生的污染物包裹在内,其款式设计通常为连体式,并包含专用的洁净鞋甚至头盔,以最大程度减少人体暴露。风淋室则利用高速洁净气流吹落人员体表附着的不洁微粒,吹淋时间通常设定在15至20秒,且喷嘴方向需经过科学设计以覆盖全身。此外,对人员进行定期的规范操作培训,提升其洁净意识,是维持洁净环境长效性的重要软性措施。培训内容应包括洁净室行为规范,如避免快速移动、不必要的交谈(以减少飞沫产生)、以及正确使用手套和指套等。

2. 物料控制:阻断外部污染源传入通道

其次是物料的净化。所有进入洁净室的原材料、设备、工器具、包装材料本身都可能携带污染物。因此,必须设置专门的物料净化通道。这些物料需要通过传递窗或货淋室进行处理。传递窗通常带有互锁装置,避免内外门同时开启,并可内置紫外线灯进行表面杀菌。对于较大物品,则使用货淋室,以其高速洁净空气吹扫物体表面。物料净化流程的标准制定与严格执行,是阻断外部污染源进入洁净区的关键环节。对于极其敏感的区域,甚至需要采用剥离式包装,确保万无一失。

3. 工艺布局:从源头优化减少污染与能耗

再次是合理的工艺布局。在净化工程的设计初期,就应充分考虑生产流程的合理性。工艺布局应遵循流程最短、避免交叉的原则。不同洁净等级的区域应明确划分,并通过气压梯度形成有效的缓冲与隔离,例如设置气锁间和更衣室作为不同洁净区域的过渡通道。物流通道应分开设置,避免相互干扰,原材料和成品、人员与废物都应设有独立的移动路径。产尘量大的工序应集中布置,并考虑增加局部排风装置,防止污染物扩散到整个房间,例如在点胶、焊接工位上方安装排气罩。一个经过优化设计的工艺布局,能从源头上减少污染的发生与传播,降低后续空气净化的能耗与负担,是实现高效、经济生产的基础^[1]。

4. 监测与维护:确保系统持续合规运行的保障

最后是监测与维护。净化工程并非一劳永逸,其性

能会随着时间推移而衰减。因此，建立一个全面的监测与维护体系至关重要。高效过滤器需要定期进行尘埃粒子计数器扫描的检漏测试，确保其纤维介质、框架密封处无泄漏，一旦发现泄漏必须及时更换或修补。空调机组中的初、中效过滤器则需根据压差计的提示进行更换，以保护后端高效过滤器并保证送风量。所有维护和监测活动都应形成详细记录，成为证明洁净室持续符合规定要求的重要质量文件，也是进行趋势分析、预测性维护和应对审计的关键依据^[1]。

五、未来发展趋势与挑战

1. 节能技术：降低高昂运行成本的核心途径

尽管净化技术已经相当成熟，但其未来发展仍面临着诸多挑战与机遇。能源消耗是一个首要的挑战。洁净室是一个能耗巨大的设施，其电力成本约占整个生命周期总成本的70%以上，其中空调系统又是耗能主力^[2]。因此，开发和应用节能技术是未来研究的重点方向。这包括采用变频驱动技术调节风机水泵转速，使其输出与实际负荷动态匹配，避免能量浪费；使用更节能的磁悬浮离心压缩机，消除齿轮摩擦损失和油路系统，大幅提升制冷效率；应用热回收装置如转轮式或板翅式热交换器，对排风中的冷热量进行回收，用以预处理新风，显著降低温湿度处理的能耗；以及通过计算流体力学（CFD）模拟仿真技术优化气流模型，在保证洁净效果的前提下减少不必要的送风量，降低风机能耗。

2. 智能化与数字化：迈向预测性维护与精细管理

智能化的运行管理是另一个重要趋势。借助物联网技术和大数据分析，未来的环境监控系统将不再是简单的数据记录仪，而是能够进行预测性维护的智能大脑^[3]。系统可以通过分析历史运行数据、过滤器压差变化趋势、设备振动频率等预测过滤器更换的最佳时间点、识别风机轴承的潜在故障，并能根据实际生产计划自动调整环境参数设定值，在非生产时段自动进入低能耗的“值班”运行模式，从而实现精细化、智能化的能源管理，进一步降低运行成本。同时，数字孪生技术也开始应用于净化工程，通过创建一个与物理洁净室完全同步的虚拟模型，可以实时监控状态、模拟不同运行策略的效果、进行故障诊断和人员培训，极大提升了管理效率与系统可靠性。

3. 新材料与新建造方式：提升性能与效率的创新动力

在新材料与新技术方面，抗菌抗病毒表面材料的应用将更加广泛，这有助于降低微生物污染风险。此外，

模块化、预制化的建造方式正在兴起。这种方式将洁净室的墙体、顶板、管线乃至功能模块在工厂内高精度预制完成，再到现场进行“搭积木”式的组装，大大缩短了施工周期，减少了现场施工带来的污染和不确定性，同时也提高了工程质量的可控性和可追溯性，特别适用于需要快速扩建或改造的项目。

4. 绿色净化：贯穿全生命周期的可持续发展理念

绿色净化的概念也逐渐深入人心。这意味着在净化工程的设计、建造、运行乃至报废拆除的全生命周期中，都需要考虑环境保护和资源节约^[4]。选择全球变暖潜能值（GWP）低的环保型制冷剂、可回收的建筑材料（如可回收金属板）、低阻力的高效过滤器（降低风机能耗）、以及水耗低的加湿系统等，都是绿色净化的具体体现。这也符合全球可持续发展的总体趋势，并可能成为企业获得绿色建筑认证（如LEED）、提升社会形象和竞争力的加分项。

结论

综上所述，工业净化工程是现代高端制造业赖以生存和发展的基石。它是一个集成了建筑、机械、电气、自动控制等多学科技术的复杂系统工程。其核心价值在于为一个受控的环境提供可靠且持续的保障，从而确保精密制造产品的质量一致性与高良率。一个成功的净化工程项目，不仅依赖于先进合理的工程设计、高质量的设备和材料，更依赖于科学严谨的运行管理和持续不断的维护优化，以及所有操作人员一丝不苟的严格执行。面对未来，通过技术创新和管理优化，不断降低能源消耗，提升智能化与数字化水平，并融入绿色环保理念，将是净化工程领域持续发展的主要方向。这对于推动我国从制造大国向制造强国转变，突破高端技术领域的瓶颈，具有不可忽视的战略意义和深远的经济价值。

参考文献

- [1] 许钟麟. 空气洁净技术原理（第四版）[M]. 北京：科学出版社，2014.
- [2] 陈长鸣，李洪欣. 洁净室节能设计与运行管理研究进展[J]. 暖通空调，2020，50（08）：1-8.
- [3] 张彦国，李亚栋. 工业洁净室环境控制技术研究[J]. 环境工程，2019，37（04）：130-134.
- [4] 王清勤，张彦国. 绿色洁净室技术评价体系研究初探[J]. 建设科技，2018，（17）：56-59.