

简析药厂净化空调节能的设计要点

刁守利

中国电子系统工程第四建设有限公司 河北 石家庄 050000

摘要：药厂净化空调系统能耗占比高，节能设计对行业可持续发展意义重大。洁净等级与换气次数、温湿度控制精度、设备选型及新风负荷等因素显著影响系统能耗。合理规划洁净分区与气流组织、选用高效设备并优化系统配置、应用热回收与新风预处理技术，以及集成智能控制系统，是实现节能的关键路径。通过多维度设计优化，可在满足GMP规范要求的同时，降低系统运行能耗，提升能源利用效率。

关键词：药厂净化；空调整节能；设计要点

引言

在制药行业中，净化空调系统是保障药品生产环境符合GMP标准的核心设施，但其高能耗特性也给企业带来较大成本压力。本文聚焦药厂净化空调整节能设计，分析洁净等级、换气次数、温湿度控制精度等因素对能耗的影响机制，从洁净分区规划、设备选型、热回收技术及智能控制等方面，探讨如何在确保洁净环境要求的前提下，通过系统性设计优化实现节能目标，为行业节能实践提供技术参考。

1 药厂净化空调系统概述

药厂净化空调系统作为药品生产过程中保障洁净环境的核心设施，通过精确控制空气的温度、湿度、洁净度、压力梯度及气流组织等参数，为药品生产创造符合GMP标准的生产环境。其核心功能是去除空气中的微粒、微生物等污染物，防止交叉污染，确保药品质量稳定可控。该系统主要由空气处理机组、风管系统、空气过滤器、风机、温湿度控制系统及压力调节装置构成。空气处理机组作为系统中枢，对室外新风与室内回风进行混合处理，经过过滤、冷却、加热、加湿或除湿等环节，将空气处理至符合要求的温湿度及洁净度标准。初效、中效、高效三级过滤器串联使用，分别拦截不同粒径的颗粒污染物，其中高效过滤器对 $0.3\mu\text{m}$ 微粒的过滤效率可达99.97%以上，有效保障送入洁净区的空气洁净度。气流组织形式在药厂净化空调系统中至关重要，常见的有层流与乱流两种方式。层流系统通过使空气呈活塞状均匀平行流动，将污染物迅速排出，适用于对洁净度要求极高的关键生产区域，如无菌药品的灌封、分装工位；乱流系统则利用稀释原理，通过高效过滤器送风与回风口排风，使室内空气充分混合稀释污染物，多用于辅助生产区域及洁净走廊。压力梯度设计是防止污染扩散的重要手段，通过合理设置洁净区与非洁净区、不

同洁净级别区域间的压力差（通常保持5-10Pa），确保空气从洁净度高的区域流向洁净度低的区域，避免污染物逆流。温湿度控制系统根据药品生产工艺需求，将洁净区内温度控制在18-26°C，相对湿度维持在45%-65%，保障药品生产过程中物料性质稳定，防止微生物滋生及药品变质。药厂净化空调系统的稳定运行，为药品质量安全提供了坚实的环境保障，是现代制药企业不可或缺的基础设施。

2 影响药厂净化空调整节能的因素分析

2.1 洁净等级与换气次数

药厂不同生产区域对洁净等级有着严格要求，而洁净等级直接关联着换气次数，这对净化空调的能耗影响显著。例如，在无菌药品生产区，如粉针剂的灌装间，通常需达到百级洁净标准，其换气次数可能高达50-60次/小时，这是为了持续置换室内空气，确保尘埃粒子和微生物数量维持在极低水平，满足药品生产的严苛质量要求。相比之下，口服固体制剂车间，如片剂生产区域，洁净等级一般为三十万级，换气次数仅需12-15次/小时。较高的洁净等级和频繁的换气，意味着净化空调系统的风机需长时间高功率运行，以实现大量空气的输送和循环。据测算，换气次数每增加10次/小时，风机能耗约提升20%-30%。为保证送入空气的洁净度，多级高效过滤器会增加空气阻力，进一步加大风机克服阻力所需的能耗。在满足生产工艺对洁净等级需求的前提下，合理优化换气次数，是降低净化空调整节能的关键环节。

2.2 温湿度控制精度

温湿度对药品质量和生产过程的稳定性影响重大，药厂净化空调系统需精准控制温湿度，而这也在很大程度上影响着能耗。在生物制品生产车间，如疫苗生产区域，温度通常需控制在2-8°C，相对湿度维持在45%-65%，微小的温湿度波动都可能影响疫苗的活性和稳定性。

性。为实现如此高精度的控制，空调系统需频繁启停制冷、制热和加湿、除湿设备。以夏季制冷为例，当室内温度超出设定上限 0.5°C 时，制冷压缩机启动工作，将冷冻水温度降低至 7°C 左右，通过表冷器冷却空气，达到降温目的；当湿度高于设定值时，除湿设备启动，通过冷凝除湿或转轮除湿等方式降低空气湿度，之后可能还需再热装置对除湿后温度过低的空气进行升温，以满足送风温度要求。这种频繁的设备启停和复杂的温湿度调节过程，极大地增加了能耗。研究表明，当温湿度控制精度从 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 5\%$ 提高到 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 3\%$ 时，空调系统能耗可增加15%-25%。在不影响药品质量的情况下，适当放宽温湿度控制精度，可有效降低能耗^[1]。

2.3 设备选型与系统配置

设备选型和系统配置的合理性，直接关系到药厂净化空调整节能效果。在冷热源设备选择方面，若选用能效比低的冷水机组，如一些活塞式冷水机组，其单位制冷量能耗相对较高，相比之下，离心式和螺杆式冷水机组在大型药厂中具有更高的能效比，可有效降低制冷能耗。水泵和风机作为输送冷热量和空气的关键设备，其性能也至关重要。传统定频水泵和风机在运行过程中，无法根据实际负荷变化调整转速，始终以额定功率运行，造成大量能源浪费。而采用变频水泵和风机，可根据系统负荷实时调节转速，当生产负荷降低、所需冷热量或送风量减少时，设备自动降低转速，减少能耗。例如，当车间部分区域停产，送风量需求减少30%时，变频风机可相应降低转速，能耗可降低约50%。在系统配置上，合理的风道设计可减少空气输送过程中的阻力，若风道过长、弯头过多或管径过小，会使风机需消耗更多能量来克服阻力。高效的空气过滤器虽能保证空气洁净度，但也会增加空气阻力，因此需在满足洁净要求的前提下，选择风阻较小的过滤器，优化系统配置，降低能耗。

2.4 新风负荷

新风在药厂净化空调系统中不可或缺，其主要作用是保证室内空气质量、维持正压以及补充室内排风量。然而，新风负荷是影响能耗的重要因素。药厂生产过程中，如固体制剂车间的粉碎、制粒等工序会产生大量粉尘，为防止粉尘扩散和交叉污染，需引入大量新风进行稀释和置换。一些产尘量大的区域，新风比甚至可达100%，即采用全新风系统。在处理新风时，需对其进行过滤、冷却或加热、加湿或除湿等一系列处理过程。在夏季，室外新风温度高达 35°C 以上，相对湿度70%左右，而室内要求温度 24°C ，相对湿度50%，此时需通过制冷系统将新风温度降低，并除湿至合适状态，这一过程消

耗大量冷量；在冬季，室外新风温度可能低至 0°C 以下，相对湿度20%左右，又需对新风进行加热和加湿，耗费大量热量。据统计，新风负荷约占净化空调系统总负荷的30%-50%。若新风系统设计不合理，如新风量过大，超出实际需求，会进一步增加能耗。合理确定新风量，优化新风处理方式，是降低新风负荷、实现净化空调整节能的重要举措^[2]。

3 药厂净化空调整节能的设计要点

3.1 合理规划洁净分区与气流组织

(1) 依据药品生产工艺流程与洁净度需求，科学划分不同等级洁净区域，确保高洁净度区域处于上风侧，低洁净度区域处于下风侧，形成阶梯式洁净梯度，有效降低交叉污染风险的同时，减少不必要的空气处理能耗。例如，将无菌制剂灌装区设置为最高洁净等级区域，紧邻其旁布置物料传递与人员缓冲区域，通过区域布局优化缩短空气流通路径，降低风机运行功率与能耗。(2) 选择适配的气流组织形式对节能意义重大。对于关键生产区域，采用垂直单向流或水平单向流形式，可在较低换气次数下实现高效净化，相比乱流形式大幅降低风机能耗；非关键区域采用混合流或局部单向流结合乱流的气流组织，在满足洁净度要求的前提下，合理控制换气次数，平衡净化效果与能耗支出。(3) 精确计算各区域换气次数，避免因过度换气造成能源浪费。结合洁净室的体积、污染源强度、人员数量等因素，运用CFD（计算流体力学）模拟技术对气流分布进行仿真分析，优化送风口、回风口位置与形式，确保气流均匀分布，减少涡流与气流死角，提高空气净化效率，降低整体运行能耗。

3.2 高效设备选型与系统优化配置

(1) 选用高效节能的空调设备是实现节能的基础。冷水机组应优先选用能效比（EER）与综合部分负荷性能系数（IPLV）高的产品，不同负荷下运行效率高，可显著降低制冷能耗。空气处理机组采用高效过滤器与变频风机，能按实际负荷自动调节风量，减少风机能耗浪费，避免因过滤器阻力大而增耗。(2) 优化空调系统配置，构建合理的冷热源与输配系统。采用多台冷水机组并联运行，根据负荷变化灵活调整开启台数，使机组运行在高效区间；在冷冻水与冷却水系统中设置变频水泵，依据末端负荷需求调节水流量，降低水泵运行能耗。合理设计管道管径与布局，减少沿程阻力与局部阻力，降低水系统输送能耗。(3) 注重设备之间的协同运行与匹配性。对制冷机组、水泵、风机等设备进行联合调试与优化，确保整个空调系统在不同工况下均能达到最佳运行

状态。例如，通过调节冷水机组出水温度与水泵流量的匹配关系，在满足末端供冷需求的同时，实现系统整体能耗最低，提升设备综合能效^[3]。

3.3 热回收与新风预处理技术应用

(1) 采用高效的热回收装置，回收排风中的冷量或热量，用于预处理新风，降低新风处理能耗。转轮式热回收器能同时回收显热与部分潜热，适合湿度变化大的工况；板式热回收器结构紧凑，显热回收高效，适用于小型净化空调系统。通过热回收技术，可有效降低新风处理能耗，减少设备运行时间。(2) 对新风进行深度预处理，降低后续空气处理设备的负荷。利用热管式热交换器、溶液除湿等技术，在新风进入主空气处理机组前，对其进行初步的温湿度调节。例如，在夏季高温高湿地区，采用溶液除湿装置对新风进行除湿处理，降低新风含湿量，减少表冷器的除湿负荷，提高制冷机组的运行效率，降低能耗。(3) 结合自然冷源实现节能运行。在过渡季节或室外气象条件适宜时，采用全新风运行模式，引入室外低温新鲜空气，减少制冷机组的开启，利用自然冷源满足室内温湿度与洁净度要求。通过优化新风与回风的混合比控制策略，在保证室内空气质量的前提下，最大限度利用回风的冷量或热量，降低空气净化能耗。

3.4 智能控制系统集成

(1) 构建智能化的空调控制系统，实现对净化空调系统各设备的实时监测与精准控制。通过传感器采集室内外温湿度、洁净度、压力等参数，以及设备运行状态与能耗数据，利用数据采集与监控系统（SCADA）进行集中处理与分析，为系统运行优化提供数据支持。(2) 运用先进的控制算法，实现系统的自适应调节。基于模

糊控制、神经网络等智能算法，根据室内负荷变化、室外气象条件等因素，自动调节冷水机组运行台数、水泵流量、风机转速、新风回风比例等参数，使空调系统始终运行在最佳节能状态。例如，当室内负荷降低时，系统自动减少冷水机组开启动数，同时调节水泵与风机转速，降低系统能耗。(3) 建立能源管理系统，对净化空调系统的能耗进行实时监测与分析。通过能耗数据的统计、分析与对比，识别系统中的高能耗环节与设备，为节能改造与运行优化提供决策依据。通过能源管理系统实现能耗数据的可视化展示，便于管理人员直观了解系统能耗状况，及时调整运行策略，实现持续节能运行^[4]。

结语

综上所述，药厂净化空调整能设计需从系统全局出发，综合考量洁净等级、设备选型、负荷控制等多方面因素。通过合理划分洁净分区、优化气流组织，结合高效设备与热回收技术应用，以及智能控制系统的集成，可在满足药品生产环境要求的基础上，有效降低空调系统能耗。未来，随着节能技术的不断发展，需进一步探索多技术协同应用模式，推动药厂净化空调系统向高效、低碳方向升级。

参考文献

- [1] 安琪,祁永虎.制药厂净化空调系统的优化设计与节能探讨[J].科海故事博览,2024(28):70-72.
- [2] 庞善涛.建筑暖通医药净化空调系统的节能措施[J].建筑工程技术与设计,2021(14):2372.
- [3] 梁良.建筑暖通医药净化空调系统的节能措施探究[J].建筑工程技术与设计,2021(13):2646.
- [4] 丁瑞辰,张会民,唐兴隆,等.药厂净化空调系统的新风处理与优化探讨[J].数字化用户,2024(13):291-292.