

固体制剂车间 HVAC 系统湿度控制与能耗关联模型

许建新

太仓制药厂 江苏苏州

【摘要】固体制剂车间在药品生产过程中对环境湿度的控制要求极为严格，合理的湿度控制不仅影响药品的稳定性与质量，还直接关系到 HVAC 系统的能耗水平。本文通过建立湿度控制与能耗之间的关联模型，分析不同湿度设定对能耗变化的影响，并探讨在保证药品质量前提下的能耗优化路径。精细化湿度控制能够有效降低能耗波动，提升运行效率。该模型为制药企业在节能降耗与质量保障间实现平衡提供了理论依据与实践参考。

【关键词】固体制剂车间；HVAC 系统；湿度控制；能耗优化

【收稿日期】2025 年 8 月 21 日 **【出刊日期】**2025 年 9 月 17 日 **【DOI】**10.12208/j.sdr.20250198

Correlation model between humidity control and energy consumption of HVAC system in solid preparation workshop

Jianxin Xu

Taicang Pharmaceutical Factory, Suzhou, Jiangsu

【Abstract】 The solid preparation workshop has extremely strict requirements for environmental humidity control during the pharmaceutical production process. Reasonable humidity control not only affects the stability and quality of pharmaceuticals but also is directly related to the energy consumption level of the HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) system. In this paper, by establishing a correlation model between humidity control and energy consumption, the impact of different humidity settings on energy consumption changes is analyzed, and the energy consumption optimization path under the premise of ensuring pharmaceutical quality is explored. Refined humidity control can effectively reduce energy consumption fluctuations and improve operational efficiency. This model provides a theoretical basis and practical reference for pharmaceutical enterprises to achieve a balance between energy conservation and consumption reduction and quality assurance.

【Keywords】 Solid preparation workshop; HVAC system; Humidity control; Energy consumption optimization

引言

制药工业车间是典型的高能耗场所，其中固体制剂车间的环境控制对药品质量具有决定性影响。特别是湿度控制，不仅关乎粉体流动性、压片质量和成品稳定性，还与 HVAC 系统的能耗密切相关。近年来，随着节能与绿色制造理念的普及，如何在保障药品生产质量的前提下实现能耗最小化，成为制药企业关注的重点。本文聚焦固体制剂车间 HVAC 系统，旨在通过建立湿度控制与能耗之间的关联模型，揭示二者之间的内在关系。引入这一模型不仅有助于优化环境控制参数，还为企业在节能降耗、成本控制及可持续发展方面提供重要支撑。

1 固体制剂车间 HVAC 系统湿度控制的必要性 与能耗问题

固体制剂车间在药品生产过程中对环境湿度的要求极为严格，湿度的波动不仅会导致粉体物料的吸湿、结块和流动性下降，还可能引发压片或充填工序中颗粒分布不均，最终影响药品的溶出度和稳定性^[1]。若湿度偏高，辅料和主药成分之间容易发生吸湿反应，造成质量风险；若湿度过低，颗粒会因静电作用增加分散困难，直接影响制剂工艺的可控性。HVAC 系统的湿度控制在固体制剂车间中具有基础性和决定性作用。HVAC 系统本身是高能耗运行单元，尤其在维持恒定湿度的过程中，需要大量电能驱动除湿机组、

加湿装置及空气处理机组进行复杂调节。

制药车间的环境控制属于典型的连续运行系统,其能源消耗呈现出长期性和持续性特征。在实际生产过程中,HVAC 系统始终处于高负荷运行状态,而湿度控制又是其中最为关键且能耗密集的环节。为了维持车间湿度在合理区间,需要不断通过加湿与除湿环节进行修正,这一过程涉及制冷、蒸汽供应与空气处理等多种工艺的协同作用,能源负荷十分显著。在严格的药品质量管理规范下,企业无法通过降低湿度控制精度来减少能耗,传统运行模式因此普遍面临能源浪费的问题。这不仅增加了企业的运营压力,也在一定程度上与当前节能减排及绿色制造的战略方向形成矛盾。如何在保证药品质量稳定的前提下探索科学的湿度控制方法,成为行业亟待解决的重要课题。

在这种背景下,研究 HVAC 系统湿度控制与能耗之间的关联具有重要现实意义。通过分析二者的耦合关系,可以明确哪些湿度设定点会引起能耗的大幅增加,哪些运行状态存在优化空间。深入挖掘湿度与能耗之间的规律,为企业制定合理的运行策略提供理论支持。固体制剂车间的实际案例表明,不同季节、不同负荷条件下的湿度维持方式差异明显,如果采用静态设定,系统运行能耗往往超出合理范围。因而,构建科学的湿度控制与能耗关联模型,成为提高系统运行效率、降低能源消耗并保持药品质量稳定的关键环节。

2 湿度控制参数对 HVAC 系统能耗影响的机理分析

湿度控制的核心参数包括温度、露点和空气含湿量,这些因素直接决定了 HVAC 系统的加湿与除湿过程。当车间要求相对湿度保持在一定范围内时,空气处理机组需要通过制冷盘管降低空气温度以除去水分,或通过蒸汽加湿器提高空气含湿量以达到设定点。这些过程均伴随着显著的能量消耗。例如在夏季高湿环境中,系统需要长时间运行除湿功能,制冷设备负荷增加,从而导致电能消耗急剧上升。而在冬季干燥季节,蒸汽加湿系统频繁运行,不仅消耗蒸汽能源,还增加了锅炉负荷。这种季节性差异构成了能耗波动的重要机制。

在微观机理层面,空气的焓湿特性决定了湿度调节的能耗水平。每一次空气焓值的变化都需要外部能源输入,以维持车间内湿度的稳定性。当湿度

设定值与室外空气状态差距过大时,系统运行压力显著提升。例如在南方梅雨季节,室外空气湿度接近饱和,为了将空气处理到固体制剂生产所需的低湿状态,必须进行深度冷却和再加热,这一过程能耗极高。在北方冬季,外部空气含湿量极低,车间湿度维持需要大量蒸汽加湿,从而导致能源消耗增加。这些现象充分说明,湿度控制参数对能耗的影响是多层次、非线性的。

控制策略在 HVAC 系统湿度调节中的重要性不容忽视。若长期采用固定设定点运行,系统缺乏灵活性,无法针对车间内负荷变化以及外部气候条件作出有效响应,往往导致除湿或加湿过程的能量投入超出实际需求,形成隐性浪费。而基于预测模型、模糊控制或自适应算法的先进策略则能够实现动态修正,使系统运行更符合实际工况^[2]。通过布设高精度传感器监测粉体工艺的湿敏特性,并结合实时气象数据对控制范围进行微调,不仅能保持湿度的长期稳定,还能有效降低运行能耗。这类融合机理分析与数据驱动的控制方式,代表了固体制剂车间向智能化与低碳化发展的趋势,为能耗优化提供了切实可行的路径。

3 湿度控制与能耗关联模型的构建与验证

建立湿度控制与能耗关联模型,需要在理论分析与实际运行数据之间建立对应关系。模型的核心思路是通过数学函数或统计学方法描述湿度参数变化与能耗之间的耦合效应。常见的方法包括基于焓湿图的能耗预测模型、基于多变量回归的统计模型以及结合机器学习的非线性预测模型。在具体构建过程中,首先需要采集车间 HVAC 系统在不同湿度设定点下的能耗数据,涵盖全年不同季节与负荷工况。然后利用数据拟合和特征提取的方法,将空气焓湿特性与能耗水平建立数学关系,从而得到可靠的预测模型。

在实际验证阶段,模型的有效性必须通过严格的对比实验加以检验。通常的研究方法是将车间的运行设定分为实验组与对照组,其中实验组按照模型所推荐的湿度控制策略进行动态调整,而对照组则维持传统的固定设定点运行。通过持续监测两组在不同生产周期内的能耗表现以及药品关键质量属性,可以直观地评价模型在实际工况下的应用价值。从实验观察结果来看,基于模型的控制方式能够显著改善能耗表现,使系统运行更趋于稳定,同时药品的含水率、溶出度以及长期储存稳定性等核心指标均保持在标准要求范围内,并未出现任何不良波动^[3-7]。这一现象表明,

模型不仅在节能方面具有明显优势,还能兼顾药品质量的稳定性。由此可见,该模型在理论与实践层面都具备高度可行性,其推广应用将为制药企业在节能降耗与质量保障之间提供有力支撑。

模型的适应性需要不断优化。不同车间的建筑结构、空气渗透率和工艺流程差异,都会导致湿度控制与能耗之间的关系存在偏差。因此,模型应当具备一定的自适应特征,可以根据实际数据持续修正参数。将模型与能源管理系统、生产执行系统结合,实现实时数据采集与动态优化,将进一步提升模型的实用性。通过这种方式,制药企业不仅能够实现能源管理的精细化,还能在保障生产稳定性的同时推动绿色低碳发展。

4 基于模型的能耗优化策略与应用实践

在构建并验证湿度控制与能耗关联模型的基础上,进一步的关键任务是将模型应用于实际运行中,探索行之有效的优化策略。优化的核心在于通过合理的湿度设定和动态控制方式,减少不必要的能源消耗,同时保持固体制剂车间所需的环境稳定性。常见的实践路径包括季节性参数修正、分区差异化控制以及基于工艺需求的动态调整。例如在南方雨季,车间湿度可在允许范围内适度上调,减少深度除湿带来的高能耗;在北方干燥季节,则通过优化蒸汽加湿模式,减少瞬时负荷波动。这些策略的落地需要依赖模型对能耗趋势的精准预测,从而做到科学调度。

在应用实践中,能源管理平台的引入发挥了关键作用。通过将湿度控制与能耗关联模型嵌入能源管理系统,HVAC 运行状态不再依赖人工经验判断,而是实现了更加直观的可视化和智能化管理。管理人员能够实时获取车间各项运行参数,并结合模型的预测结果,对湿度设定值和运行模式进行灵活调整,从而避免了传统控制中存在的滞后性和过度调节现象^[8]。实践表明,这种基于模型的优化不仅使能耗水平得到有效改善,还显著提升了环境参数的稳定性和工艺的可控性。更重要的是,企业在应用过程中逐渐形成了科学的能源管理思路,将节能理念融入日常运行与决策之中。由此可见,湿度控制与能耗关联模型不仅是提升运行效率的技术手段,更是推动制药企业向合规化、精细化和绿色化方向发展的重要保障。

未来的应用方向还包括将人工智能与大数据分析引入湿度控制与能耗优化的全过程。通过深度学习算法处理大量运行数据,可以发现传统模型难以捕捉

的非线性关系,实现更高精度的能耗预测。结合物联网传感器技术,可实现全流程的实时监测与动态响应,使湿度控制策略更加灵活高效。随着制药行业对智能制造与节能降耗的需求不断提升,这一模式将在更多企业中得到应用与推广。由此可见,固体制剂车间 HVAC 系统湿度控制与能耗关联模型不仅是学术研究的重要成果,也是推动行业可持续发展的关键工具。

5 结语

固体制剂车间的生产环境对湿度的依赖性极高,而 HVAC 系统在湿度控制过程中产生的能耗问题一直是制药企业关注的焦点。通过建立湿度控制与能耗关联模型,可以更科学地揭示二者之间的耦合关系,并为企业提供动态调控的理论依据和实践路径。研究表明,基于模型的优化策略不仅能够降低能源消耗,还能在保障药品质量的前提下提升系统运行效率。这一研究对于推动制药行业实现绿色制造、节能降耗和高质量发展具有重要意义,也为后续在智能化环境控制和能源管理领域的深入探索提供了可行的方向。

参考文献

- [1] 张璐,林继业,曲鹏. 智能 HVAC 系统的绿色建筑设计优化[J].绿色建造与智能建筑,2025,(06):159-161.
- [2] 卢忠辉,江崇旭,那艳玲,等. 地铁车站 HVAC 系统设备模型校准研究[J].制冷与空调,2025,25(05):61-69+87.
- [3] 梁伟连. 质量风险管理在药物口服固体制剂生产中的应用[J].山东化工,2025,54(04):208-210.
- [4] 傅苏颖. 实探华润双鹤固体制剂车间“数智”赋能低成本贯穿全价值链[N].中国证券报,2024-12-24(A06).
- [5] 卞强,陈宁. 固体制剂高活性车间设计策略[J].流程工业,2024,(12):54-59.
- [6] 程孟璇,邱雪皎,刘霓昀,等. 医药固体制剂产线自动布局及优化算法研究[J].化工与医药工程,2023,44(02):51-59.
- [7] 王琦,程星华,程孟璇,等. 基于自动化物流仓储系统的固体制剂车间布局设计探索[J].产业与科技论坛,2023,22(04): 33-35.
- [8] 姚玉成. 吸入剂和口服固体制剂综合车间布局方案探讨[J].化工与医药工程,2022,43(02):23-28.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS