

生物实验室高效通风系统设计与气流组织优化研究

文旭 张龙

中国建筑第八工程局, 中国·辽宁 大连 116021

摘要: 生物实验室是生物科学研究的核心场所, 它为研究人员提供了进行实验、观察和测试的环境, 是技术发展和创新的重要基石。实验室建设是一个国家或者一个组织发展的标志之一, 不仅有助于提高科技创新能力、培养人才, 还可以促进经济发展、提高国际竞争力, 只有不断地提高实验室的建设水平, 才能进一步促进各个领域科技的进步发展。实验室通风系统是实验室建设的重要组成部分, 通过科学应用空调及通风控制系统, 可进一步提供安全、舒适的科研工作实验环境, 使科研人员具有良好的操作条件保障科研人员的身体健康, 增强实验结果的可靠性。

关键词: 智能通风调控; 生物安全气流; 高效空气净化; 跨学科协同研究

Design of Efficient Ventilation System and Optimization of Airflow Organization in Biological Laboratory

Xu Wen Long Zhang

China Construction Eighth Engineering Division Corp., LTD, Dalian, Liaoning, 116021, China

Abstract: The biological laboratory is the core site of biological science research, which provides an environment for researchers to conduct experiments, observations and tests, and is an important cornerstone of technological development and innovation. Laboratory construction is one of the symbols of the development of a country or an organization, which not only helps to improve the ability of scientific and technological innovation, cultivate talents, but also promotes economic development and improves international competitiveness. Only by constantly improving the level of laboratory construction can we further promote the progress and development of science and technology in various fields. Laboratory ventilation system is an important part of laboratory construction. Through the scientific application of air conditioning and risk control system, it can further provide a safe and comfortable experimental environment for scientific research work, so that researchers have good operating conditions to ensure the health of researchers and enhance the reliability of experimental results.

Keywords: intelligent ventilation control; biosafe airflow; high efficiency air purification; interdisciplinary collaborative research

0 前言

在生物科技日新月异的时代下, 生物实验室作为科研探索的前沿阵地内部环境的安全性及实验效率的提升成为不容忽视的课题。高效通风系统的精心设计与气流组织的深度优化确保着实验室环境安全无虞, 也是提升科研产出质量的关键环节。鉴于生物实验室常涉及高风险性实验材料通风系统需严格遵循行业标准, 确保洁净度达标、压力梯度合理、温湿度适宜满足高频次的换气需求。更为重要的是, 系统需有效防止有害物质的扩散与交叉污染, 保障实验人员的人身安全与健康。论文聚焦于生物实验室高效通风系统的创新设计与气流组织的精细优化通过理论探讨与实践分析, 为构建安全、高效、舒适的科研环境提供科学依据与实用方案。深入研究通风系统的设计原则、气流组织的优化策略, 力求为生物实验室通风系统的升级改造贡献智慧与力量。

1 生物实验室通风系统概述

1.1 通风系统的作用与要求

在生物实验室中, 通风系统是保障实验环境安全与实

验人员健康的关键。它必须具备高效性, 以迅速排除实验过程中产生的有害气体、蒸汽和微生物, 维持室内空气的清洁度, 确保污染物得到有效控制避免交叉污染的风险。系统的灵活性也是设计时必须考虑的因素, 以适应不同实验需求和实验室规模的变化。针对生物实验室的通风系统设计, 气流的组织和优化是核心环节。通过精确的气流模拟和分析, 可以优化送风和排风路径, 实现对局部排风装置和整体通风模式的合理布局。有助于减少污染物在室内的滞留和扩散提高空气净化的效率, 确保实验环境在整个过程中保持一致性和可控性, 为高质量的实验结果提供了坚实的基础^[1]。

1.2 现有通风系统类型与特点

通风系统主要分为自然通风和机械通风两种类型。自然通风依靠室内外的自然压力差实现空气交换成本较低但受环境因素影响较大, 控制精度有限。相比之下, 机械通风通过设备强制空气流动能够更精确地控制空气质量, 适用于高风险的生物实验操作。机械通风系统进一步细分为局部通风和全面通风。局部通风, 如通风柜和生物安全柜, 直接在污染源头进行有效控制和排除。全面通风则涉及整个实验室

空间的空气交换, 保证整体空气质量。高级生物安全实验室 (如 P3、P4 级别) 通常采用全新风系统, 确保送风和排风均为外界新鲜空气避免室内空气的再循环造成污染。变风量控制系统 (VAV) 是现代实验室通风管理中的一项先进技术, 通过传感器实时监测通风柜的运行状态, 并自动调节风量以维持恒定的安全风速, 提高系统响应速度和节能效率。智能通风系统则进一步集成了传感器、控制系统和通风设备, 实现对实验室内部环境参数的实时监测和智能调控, 提升了工作环境的安全性和舒适性。

气流组织优化是通风系统设计的另一个重要方面。通过计算流体动力学 (CFD) 模拟等技术手段, 可以对气流组织形式进行优化, 如上送下排的气流组织方式, 已被证实排除室内污染物方面效果显著优于上送上排方式^[2]。

2 高效通风系统设计原则

2.1 安全性原则

在生物实验室通风系统的设计中安全性一定是必须首先考虑的因素, 系统的核心目标是维持实验室内的负压状态, 防止潜在的污染物通过空气流动溢出至外部环境。为此, 通风系统需配备高效的过滤机制, 特别是针对高级别生物安全实验室, 排风在排出前必须经过严格的高效过滤确保拦截包括病原体在内的所有有害物质。通风柜和其他局部排风装置在设计时必须考虑到其在各种操作条件下的捕集效率, 确保有害气体或颗粒不会逸散至实验室内环境。系统应内嵌精密的监测和报警设备, 用以实时监控实验室内的压力、风速和污染物浓度, 一旦检测到任何异常, 能够迅速触发警报并自动执行安全措施。智能化控制系统的应用进一步提升了系统的安全性它通过自动化调节风量和压力, 显著减少了人为操作失误的可能性, 确保实验室在各种工作状态下均能维持安全运行。通风系统设计中还应包含应急预案, 如在紧急情况下能够迅速启动的排风和密闭程序, 以最大限度地控制和降低潜在的安全风险^[3]。

2.2 节能性原则

生物实验室通风系统设计的节能性原则是实现绿色运行和可持续发展的关键, 它直接关联到实验室的长期运行成本和环境影响。目前, 许多新建实验室通过引入全新风系统并结合热回收技术能够在不牺牲空气质量的前提下, 通过回收排风中的热量, 有效降低预处理新风所需的能量。变风量控制系统 (VAV) 的应用通过感应通风柜的使用状态, 动态调整送风量, 满足实际需求避免了过度通风造成的能源浪费。智能控制系统的集成, 进一步优化了能源使用。系统通过传感器实时监测实验室内的环境参数, 并自动调节通风设备响应环境变化, 确保了实验环境的稳定性和能源效率。优化的气流组织设计, 如上送下排的气流形式, 提升了污染物的排除效率减少了空气交换次数, 从而降低整体能耗^[4]。

在选择通风设备时, 优先采用高效率的风机和过滤设备, 这些设备在维持系统性能的同时, 有助于降低能源消耗。房间压力的精确控制, 通过平衡送风和排风量, 保持实验室

内的适当负压, 防止污染物外溢, 同时减少因压力波动导致的能耗。对于多通风柜的实验室, 集中排风系统的设计可以提高风机的使用效率, 减少能源的无效消耗。自适应控制技术, 通过人体感应器监测通风柜前的人体活动智能调节风速, 进一步提升系统的节能性能。针对具有特殊恒温要求的工艺设备考虑循环风系统的可行性, 同时确保回风经过高效过滤处理, 满足设备对环境温度稳定性的需求。这些综合措施的实施, 确保了生物实验室通风系统在保障实验安全和效率的同时实现了能源的优化使用, 支持了节能减排的环保目标。

3 通风系统关键技术与组件

3.1 风机与过滤系统

风机与过滤系统是生物实验室内部环境安全与舒适的关键组成部分。风机负责提供足够的动力维持实验室内的空气流动, 而过滤系统则用于捕捉和去除空气中的污染物, 防止其在室内传播或溢出至外部环境。在高级别生物安全实验室中通常采用全新风系统, 避免交叉污染的风险, 并且送、排风总管安装气密阀门确保系统的密封性。污染区和半污染区内不得安装普通的风机盘管机组或房间空调器, 防止污染物的传播。

过滤系统的设计则应考虑到过滤效率和容尘量。高效过滤器 (如 HEPA 或 ULPA 过滤器) 能够去除空气中至少 99.97% 直径为 0.3 微米的颗粒物, 适用于一般洁净度要求的环境; 而 ULPA 过滤器则适用于极高洁净度要求的环境。过滤器的选择和配置应确保在满足安全标准的同时, 也能保持系统的能效。气流组织优化是通风系统设计的另一个重要方面。通过合理的气流组织设计, 提高污染物的排除效率减少不必要的空气交换次数降低整体能耗。

3.2 智能监控与自动化系统

智能监控与自动化系统通过集成高精度传感器实时监测实验室内的关键环境参数, 如温度、湿度、压力差以及污染物浓度等。数据被传输至中央控制单元利用先进的算法进行分析, 确保实验室环境的稳定性和安全性。通过监测通风柜前的人体活动, 系统能够智能调节风速适应操作者的实际需求, 同时减少不必要的能源浪费。自动化系统进一步通过预设的程序逻辑整合传感器数据。常用的是可编程逻辑控制器 (PLC) 能够根据实验室的具体需求, 自动调节风量, 以适应不同实验条件下的通风需求。在气流组织优化方面, 智能系统通过计算流体动力学 (CFD) 模拟, 对实验室内的气流进行细致分析优化送风和排风路径。有助于形成有序的气流流动有效控制污染物的扩散, 提高空气净化效率。节能是现代实验室设计的重要考虑因素。通过采用变频技术调节风机的转速根据实际需求调整通风量, 可以达到节能的目的。智能控制系统能够预测室内负荷的变化, 自动调节送风温度和风量实现更加节能的运行。

安全警报系统也是智能监控系统的一部分当实验室内的有害气体浓度超标时, 能够自动报警并启动应急通风程序

为实验室提供了额外的安全保障^[5]。

3.3 材料与施工技术

生物实验室的通风系统设计须遵循严格的安全标准,保障实验人员健康和实验过程的准确性。在材料的甄选上优先采用耐腐蚀、耐高温且便于清洁的材料,如不锈钢和特制塑料抵御实验室内可能存在的化学物质和高温环境的侵蚀。在施工技艺上,重点聚焦于确保通风管道的密封性和整个系统的气密性,防止有害气体的外泄及外部污染物的渗透。

气流组织优化在高效通风系统设计中扮演着至关重要的角色,其实现依赖于精细的施工技术。利用计算流体动力学(CFD)模拟技术,可以在施工前对气流模式进行预测和优化,确保气流的均匀分布和有效排除污染物。施工过程中,必须严格依照设计图纸和 CFD 模拟结果,确保送风和排风系统的合理布局,以及通风柜、生物安全柜等关键设备的精确安装。

智能监控系统的融合,赋予了通风系统自我调节的能力。在施工阶段,需要精心布置众多传感器和执行器,实现对实验室内环境参数的实时监测和自动调整。这些设备的安装位置、连接方式及兼容性,均需在施工设计阶段予以周密考量,以确保系统的稳定运行和后期维护的便捷性。节能理念贯穿于现代实验室设计的每一个环节。施工中,通过变频技术调节风机转速,根据实际需求调整通风量,以此实现能源的有效节约。同时,施工过程中还需重视系统的保温性能,减少能量损耗,提升系统的整体能效。

安全始终是生物实验室通风系统设计的首要考虑。在施工环节,必须确保所有设备和管道的安装均达到安全标准,包括但不限于压力控制、紧急排放和安全警报系统。此外,施工设计还应充分考虑系统的可扩展性,为实验室未来可能的改造或扩建提供便利。

4 气流组织优化方法

4.1 气流模拟与分析

在实验室通风系统的设计上,必须全面考量送风、排风、室内气流组织和主要设备的选型。特别是对于生物安全实验室,室内压力的精确控制至关重要形成合理且稳定的压力梯度,有效防止潜在的交叉污染风险。考虑到实验室设备通常具有较大的发热量,通风系统的设计还必须兼顾全年供冷的需求,并精确计算所需的加热量满足冬季的供冷要求。依据《实验室通风设计要求及规范》,化学实验室的换气次数应超过每小时 10 次物理实验室则需超过每小时 6 次无人状态下的换气次数可适度减少。

4.2 气流分布优化策略

目前最常用的是对孔板送风结构的孔隙率进行调整,改善速度场的均匀性。研究发现,垂直下降气流速度的临界值为 0.405m/s,此速度下可以避免气流外溢或前窗流入气流贯穿的情况,确保生物安全柜内的有效控制。气流的前后分割线和左右分割线的形成及其位置,主要受负压格栅、垂直下降气流和前窗吸入气流的影响,而与送风风机位置无关。

在实验室的空调通风系统设计中,控制方案的选择对于维持室内压力稳定至关重要。推荐使用定风量阀和变风量阀的组合适应不同级别的生物安全柜的排风需求,确保实验室环境的安全性和实验的准确性。例如,在房间内设置 A2 级生物安全柜时,可以使用定风量阀来维持室内压力;而在房间内设置 B2 级生物安全柜时,则推荐采用“定排变送”的控制策略,以应对排风量的变化。

4.3 污染物控制与排放技术

生物安全柜作为实验安全的核心通过高效空气过滤器(HEPA)确保操作安全。气流模拟显示,0.405m/s 的垂直下降气流速度是防止污染物外溢的关键。实验室通风设计要新风全部来自室外,并 100% 排出室外,以维持每小时大于 10 次的换气次数,进一步减少污染物积累。通过调整孔板送风结构孔隙率,可改善速度场均匀性。双孔板节流送风方式,能进一步降低风速并改善迎面速度分布。实验室的空调通风系统采用定风量阀和变风量阀组合,以适应不同安全柜的排风需求,确保室内压力稳定。这些综合措施为生物实验室提供了一个安全、高效的工作环境。

5 结论

在深入探讨生物实验室高效通风系统设计与气流组织优化的过程中,我们成功打造出了一套集智能化管理、高效净化与精准气流调控于一体的先进通风系统方案。该系统改善了实验室内的空气质量,有效遏制了生物污染物的扩散风险通过优化气流路径与分配,实现了能源利用的最大化与运营成本的最小化。展望未来随着科技的不断革新与科研需求的持续升级,我们将秉持创新精神不断探索前沿技术,力求为生物实验室提供更加绿色、智能、人性化的通风解决方案。我们期待与各界同仁携手合作,共同推动研究成果的广泛转化与应用,为生物科学研究的蓬勃发展贡献力量。

参考文献:

- [1] 陈鑫,李晓斌,魏微,等.高等级生物安全实验室通风大系统消毒效果的验证与评价[J].暖通空调,2024,54(5):134-138+92.
- [2] 黄滢.某负压二级生物安全实验室空调通风设计探讨[J].建材与装饰,2022,18(32):51-53.
- [3] 李涛,叶青,曹国庆.高等级生物安全实验室通风空调系统冗余设计原则探讨[J].暖通空调,2020,50(1):31-36.
- [4] 赵侠,李顺,陈婷.生物化学实验室通风策略[J].暖通空调,2013,43(5):18-21+37.
- [5] 李雪柏,谷鑫,王晓雪,等.变频器在生物安全二级实验室通风系统中的节能应用[J].中国医学装备,2020,17(11):205-208

作者简介:文旭(1982-),男,朝鲜族,中国辽宁盘锦人,本科,高级工程师,从事医院手术室、电子厂房洁净室、洁净实验室通风空调的设计研究与施工研究。