

化学实验室新风系统设计与建设研究

苏 敏^{1,2}, 肖云超^{1,2*}, 杨雅茹^{1,2*}, 席 曼¹

¹嘉兴大学材料与纺织工程学院, 浙江 嘉兴

²嘉兴大学纳米技术研究院, 浙江 嘉兴

收稿日期: 2025年1月10日; 录用日期: 2025年2月3日; 发布日期: 2025年2月13日

摘 要

针对当前化学实验室普遍存在的缺乏新风系统设计与建设的问题, 本文通过文献研究, 阐述了化学实验室新风系统的重要性, 综述了化学实验室新风系统设计与建设的国内外研究进展; 通过对常用的几种排风补风系统进行详细对比分析, 分析了不同技术方案的特点和优缺点, 进一步探讨了数值模拟技术(CFD)在化学实验室新风系统设计中的应用, 在此基础上, 对化学实验室新风系统设计与建设提出了系统总结分析与建议, 为化学实验室新风系统的科学设计与建设提供了理论依据和实践指导。

关键词

化学实验室, 新风系统, 研究进展, CFD数值模拟

Research on Design and Construction of Fresh Air Systems for Chemical Laboratories

Min Su^{1,2}, Yunchao Xiao^{1,2*}, Yaru Yang^{1,2*}, Man Xi¹

¹College of Materials and Textile Engineering, Jiaxing University, Jiaxing Zhejiang

²Nanotechnology Research Institute, Jiaxing University, Jiaxing Zhejiang

Received: Jan. 10th, 2025; accepted: Feb. 3rd, 2025; published: Feb. 13th, 2025

Abstract

In view of the common problem of lack of design and construction of fresh air system in chemical laboratories at present, through literature research, this paper expounds the importance of fresh air system in chemical laboratories and reviews the research progress at home and abroad on the design and construction of fresh air system in chemical laboratories. Through detailed comparative analysis of several commonly used exhaust and makeup air systems, the characteristics, advantages

*通讯作者。

and disadvantages of different technical schemes are analyzed. Furthermore, the application of numerical simulation technology (CFD) in the design of fresh air system in chemical laboratories is discussed. On this basis, a systematic summary analysis and suggestions are put forward for the design and construction of fresh air system in chemical laboratories, providing a theoretical basis and practical guidance for the scientific design and construction of fresh air system in chemical laboratories.

Keywords

Chemical Laboratory, Fresh Air System, Research Progress, CFD Numerical Simulation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

化学实验室作为科学研究的重要场所,其室内空气质量对实验人员的健康和实验结果的准确性具有重要影响[1]。然而,目前许多化学实验室在新风系统设计与建设方面存在不足,导致室内空气质量不佳,有害气体和蒸汽滞留,给实验人员带来健康风险,并影响实验结果的准确性和可重复性[2]。此外,由于我国现有化学实验室普遍缺乏科学的新风设计与建设,导致实验室门窗因为室内外气压差过大而无法正正常启闭、门窗缝隙处出现明显的啸叫噪音,甚至出现排风效果丧失等问题[3]。近年来,随着科技发展和健康、环保意识的提高,现代实验室的各项设计正朝着安全、舒适、环保、节能的方向全面发展。实验室新风系统直接影响实验室房间压差、空气洁净度、噪声、排风、室内温湿度控制等[4],对于化学实验室的各项功能和正常运行至关重要。此外,随着日益增长的能源消耗与可持续发展之间的矛盾日益凸显,节能已成为新型实验室建设的一项重要参考指标[5]。因此,科学合理地设计并建设化学实验室新风系统显得尤为重要。

本文旨在通过梳理现有资料,阐明化学实验室新风系统的重要性,并综述化学实验室新风系统设计与建设的国内外研究进展;通过对比分析化学实验室常用的几种排风补风系统,阐明各自特点、适用场景及优缺点。进一步地,探讨数值模拟技术在实验室新风系统设计中的应用。通过多方位对比分析,提出化学实验室新风系统设计与建设的建议。

2. 化学实验室新风系统国内外研究进展

目前,国内外针对实验室尤其是专业性较强的化学实验室新风系统研究不够系统深入,部分研究仍处于探索和优化阶段。国外针对化学实验室新风系统的相关研究起步较早,各项规范和标准也相对较为全面。例如,William A. Burgess 等人[6]对现代化学实验室通风柜的设计演变进行了较为系统的介绍,讨论了常见的通风柜设计最佳面风速的长期争论,包括垂直和水平滑动窗通风柜以及辅助空气供应通风柜。此外,还讨论了影响通风柜性能的众多因素,并总结了实验室设计和运营的操作规范。

国外研究主要集中在通风系统的优化设计以提供安全舒适的实验环境和减少能源消耗等方面。例如,Al Neelain 大学针对化学实验室通风系统设计优化,选择了五种最常用且最具危险性的化学物质(甲醛、硝酸、乙酸、二甲苯和乙醇)进行研究,通过计算实验室中物质的浓度水平与空气交换率、蒸气压和实验室面积的相关性,提出了设计最佳通风系统的方案,包括合理的通风设备选择、空气交换率的确定、气流组织设计等[7]。此外,Yuki Nabeshima 等人[8]通过计算流体动力学(CFD)对化学实验室进行气流分析,

以了解通风系统对气流的影响以及气流变化如何影响化学物质的扩散。通过烟雾测试和粒子图像测速(PIV)对实际气流进行了可视化分析,并将结果与 CFD 模拟结果进行了比较。研究表明,化学实验室的室内气流不仅受通风系统风量的影响,还受气流方向和流速的影响,在化学实验室的设计中需要仔细考虑实验室布局,以减少实验人员意外接触化学物质的风险。

近年来,国内高校和研究院等机构对实验环境和科研人员的健康日益重视,针对化学实验室新风系统进行了系列探究、改造和智能升级。亓丽萍等人[3]初步分析了有机化学实验室普遍缺乏新风设计与新风系统建设的现状,阐述了化学类实验室没有新风装置可能出现的各种严重不利后果。通过对有动力新风系统和无动力新风系统等各种可选用新风补充方案的技术特征与优缺点进行分析探讨,让有机化学实验室建设者和管理者意识到这些问题,掌握各种解决方案的优缺点,为提供健康安全的实验室环境提供参考。段辉等人[9]以上海某大学化学科学与工程学院的实验楼通风系统改造项目为例,对化学实验楼通风系统设计与改造中有关暴露控制设备选择、同时使用率、换气次数、气流组织、新风系统、变风量控制、废气处理、隔振降噪等关键要素进行研究。探索了基于安全原则下的高校既有实验建筑通风系统改造与节能减排措施,经改造后的实验室污染物浓度得到有效控制,性能指标满足设计要求,系统运行良好,节能效果显著。

国内研究更加侧重于实际项目的改造与创新,以及对通风系统设计方法的总结归纳。例如,在另一项新风系统改造案例中,项目以 EHS 理念为指导,对同济大学化学馆进行整体改造建设,在设计中融入 EHS 体系、依据通风要求分等级分区设计、各项节能措施以及长效运行机制,系统介绍了基于智能新风排风联动系统的化学馆楼宇整体改造的各项措施,完成了旧楼改造的既定目标,实现了节能长效的目标,师生满意度达到 99% [10]。

目前,化学实验室新风系统设计与建设正朝着智能化、节能化和安全化的方向发展。国内外的研究和实践表明,通过合理的设计和先进的技术应用,可以有效提升实验室的空气质量、实验人员的安全性和能源利用效率。例如,北京某科学园区实验楼化学实验室,采用全新风直流式系统,换气次数为每小时 20 次,新风经过初效和高中效过滤器处理,末端风口采用高效过滤风口。化学实验室排出的气体通过活性炭干吸附法处理,并高空排放,以避免对周围环境造成污染。天津某化学实验室采用恒博图安提供的新风换气系统控制解决方案,通过变频风机调节送排风量,保持实验室负压状态,并实时监控温湿度和压力;系统具备通风柜视窗自动控制功能,实验人员离开时自动降低排风量,节约能源。此外,SICOLAB 喜格实验室通风系统通过将全室通风和局部排风相结合的方式,换气次数为每小时 6~12 次,确保空气质量,系统采用耐腐蚀材料,并配备热回收装置,降低能耗。

3. 化学实验室常用排风补风系统对比分析

实验室尤其是化学实验室,在实验过程中不可避免地要使用到有毒有害化学品,这就要求化学实验室必须配备良好的排风系统,及时有效地去除化学品挥发物,避免化学品在室内弥散而造成工作人员吸入,影响生命健康[11]。随着环保意识日益增强,实验室废气排放问题日益突出,常见的外排和强排方式也备受诟病并被逐渐取代,化学实验室新风系统作为改善实验废气排放的有效手段,受到越来越多的关注。

排风补风系统是新风系统的核心组成部分,主要负责排除实验过程中产生的有害气体和异味,同时补充新鲜空气以维持实验室内的空气质量和环境舒适度[12]。化学实验室应保持室内微负压($-5\text{ pa}\sim 10\text{ Pa}$)状态,避免有毒有害气体向外泄露扩散,保证外界走廊不受实验室污染[13],补风量为排风量的 90%~95%,剩余所需的风量一般由公共区域补入[14]。下面针对化学实验室常用的几种排风补风系统进行对比分析,阐明各自特点、适用场景及优缺点。

3.1. 传统排风型通风柜与补风型通风柜

传统排风型通风柜与补风型通风柜是实验室常用的两种通风设备。传统排风型通风柜主要通过机械排风的方式，将柜内的有害气体和粉尘等污染物单向排出室外，其工作原理是在通风柜内形成负压，使污染物被吸入通风管道，然后排放到室外大气中。而补风型通风柜除了具备排风功能外，还能够通过特定的方式引入新鲜空气，对通风柜内的气流进行补充。补风型通风柜可以有效地减少室内空气的流失，降低空调系统的负荷。补风型通风柜排风功率更大，防护性能更强，能有效排除高毒、高浓度的有害物质，广泛应用于需要处理危险物质和有害气体的实验工作中[15]。总的来说，两者各有特点，选择时需根据实际工作需求和实验操作的有毒有害程度进行综合考虑。表 1 是传统排风型通风柜与补风型通风柜的特点、适用场景及优缺点的对比：

Table 1. Comparison between traditional exhaust ventilation cabinets and air supply ventilation cabinets
表 1. 传统排风型通风柜与补风型通风柜对比

	排风型通风柜	补风型通风柜
特点	主要通过排风来去除柜内有害物质、柜内形成负压，防止有害气体逸出	在排风的同时，从柜外引入新鲜空气进行补风，保持柜内压力平衡，提高排风效率
适用场景	适用于有害物质产生量较小，或实验室整体通风良好的情况	适用于有害物质产生量较大，或需要高效排除有害气体的实验环境
优缺点	优点：结构简单，易于安装和维护 能耗相对较低 缺点：若实验室通风不佳，可能影响排风效果、柜内负压可能导致操作不便	优点：排风效率高，能有效去除有害气体、保持柜内压力平衡，操作舒适 缺点：结构相对复杂，安装和维护成本较高、能耗较大，需要额外的补风设备

3.2. 局部排风系统与全面通风系统

Table 2. Comparison between local exhaust systems and general ventilation systems
表 2. 局部排风系统和全面通风系统对比

	局部排风系统	全面通风系统
组成	排风机、废气净化装置(如需要)、风管、局部排风设备(如通风柜、排风罩等)、控制风阀及控制系统	排风机、送风机或新风处理机组、废气净化装置(如需要)、送排风口、风管、控制风阀及控制系统
特点	主要针对有害物质产生区域进行排风处理，能以较小的风量排走大量的有害物质，能量省且效果好	对整个实验室房间进行通风换气 通过送入室内的新鲜空气将房间内的有害气体浓度稀释到安全范围内 并将污染空气排出室外
适用场景	适用于有害物质产生源相对集中且量较大的实验室区域	适用于实验室内无特定有害物质产生源或需要整体改善室内空气质量的情况
优缺点	优点：排风效率高，能耗低 缺点：系统布局较为复杂，需要精确计算风量并合理布置排风设备	优点：能有效改善整个实验室的空气质量 缺点：能耗较高，在某些情况下可能无法有效排除局部高浓度有害物质

局部排风系统与全面通风系统是两种常见的通风方式，它们各自具有独特的特点和应用场景。局部排风系统主要针对实验室中特定的污染源进行排风，如通风柜、实验台等。其工作原理是在污染源附近设置排风罩，将污染物直接吸入排风管道，然后排放到室外大气中。局部排风系统可以有效地控制污染源处的污染物浓度，减少污染物向室内其他区域扩散的风险。这种方式适用于污染源较为集中、需要重

点控制的场合。而全面通风系统则是对整个空间进行通风换气，通过送风口和排风口的设计，实现室内空气的循环和更新，保持室内空气的清新和舒适度。其工作原理是通过风机将室外新鲜空气引入实验室，然后通过排风管道将室内空气排出室外。全面通风系统可以有效地维持实验室的空气质量，但对于特定污染源的控制效果不如局部排风系统。全面通风系统适用于需要整体改善室内空气质量、提供良好工作环境的场所。在实际应用中，局部排风系统和全面通风系统可以根据具体需求和场景进行选择和组合使用，以达到最佳的通风效果和空气质量。例如，陈建润等人[16]结合实际案例分析了湿热地区实验室新风-补风系统的节能效果，结果显示分功能新风-补风系统可以将补风不经过室内热湿交换直接送至通风柜前，在确保实验室舒适性和安全性的同时节能 60%以上，如图 1 所示。表 2 总结了局部排风系统和全面通风系统在组成、特点、适用场景以及优缺点方面的对比。

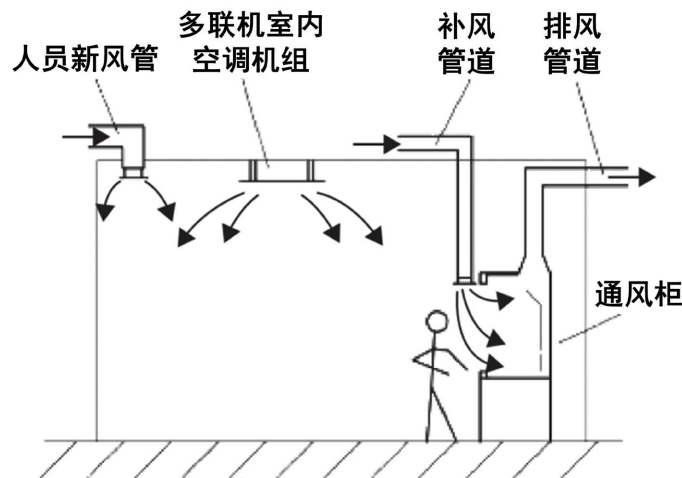


Figure 1. Air flow distribution of functional fresh air-supplementary system [22]
图 1. 分功能新风-补风系统气流分布[22]

3.3. 变风量控制系统与定风量控制系统

Table 3. Comparison between variable air volume control systems and constant air volume control systems
表 3. 变风量控制系统与定风量控制系统对比

	变风量控制系统(VAV)	定风量控制系统(CAV)
特点	能根据实验室内的实际排风需求自动调节送排风量，保持室内压力和空气质量的稳定，通常采用静压传感器监测管道内压力，并通过控制器调节风机频率来实现风量调节	为所有通风柜和加热炉等排风设备提供恒定的排风流量，通过机械限位挡块限制调节阀门开度来保持总流量恒定
适用场景	实验室排风量变化较大的情况多个通风柜同时运行或实验室内有害物质产生量不稳定的情况	实验室排风量相对稳定或设备使用率较低的情况
优缺点	优点：能耗低，调节灵活 缺点：系统复杂度高，对控制精度要求较高	优点：系统结构简单，易于维护 缺点：能耗较高，无法根据实际需求灵活调节风量

变风量控制系统与定风量控制系统是通风系统中常见的两种控制策略。定风量控制系统通过维持恒定的风量来保持室内环境的稳定，这种系统简单可靠，适用于对室内环境要求相对稳定的场所。然而，在实际应用中，由于室内负荷的变化，定风量系统可能会导致能源的浪费。而变风量控制系统可以通过传感器检测室内的污染物浓度、温度、湿度等参数变化，自动调节通风系统的风量，以达到节能和舒适

度的双重目标。这种系统更加灵活高效,能够适应不同的室内环境和负荷变化,因此在需要精细控制室内环境和节能减排的场合得到广泛应用[17][18]。总的来说,变风量控制系统与定风量控制系统各有优势,二者详细对比见表3。

通过以上对比分析可以看出,化学实验室常用的排风补风系统各有优缺点,适用于不同的实验场景和需求。在选择和设计通风系统时,应综合考虑实验室的具体情况、实验类型、有害物质产生量、能耗要求以及预算等因素。对于大多数化学实验室而言,补风型通风柜和局部排风系统结合变风量控制系统可能是较为理想的选择。这种组合既能有效排除实验过程中产生的有害气体和异味,又能保持室内空气的新鲜度和质量;同时,通过变风量控制系统实现能耗的优化调节,降低运行成本。此外,在设计通风系统时还应注重系统的稳定性、可靠性和易维护性。采用先进的控制技术和高质量的设备材料可以确保系统的长期稳定运行;同时,合理的布局 and 优化的管道设计可以减少系统的维护工作量并降低维护成本[19]。

4. 数值模拟技术在实验室新风系统设计中的应用探讨

实验室通风-补风系统设计问题实际上是实验室内空气环境的流体动力学问题,因此理论上可以通过数值模拟分析技术,研究新风系统各影响因素在不同指标下对系统性能的影响程度,并找到最佳设计方案[20]。

计算流体动力学(CFD)数值模拟技术是通过对研究对象进行数值计算和分析的一种方法技术,其原理是通过求解质量、动量、能量等守恒方程,模拟流体在特定条件下的流动情况。CFD技术的引入对我国暖通空调专业领域的发展起到了相当大的促进作用[21]。例如,Chen等人[22]提出了基于直接数值模拟的零方程湍流模型,并在实际模拟中进行应用;赵彬等[23]对空气混合对流分别采用MIT零方程和两方程的湍流模型进行数值模拟,结果表明MIT零方程模型的模拟结果更贴合实验数据。此外,已有学者将CFD技术应用于住宅新风系统,例如,张莉[24]选取了一典型房间作为分析对象,利用数值模拟技术,对新风系统引入后的室内空气质量变化进行了详细分析。结果表明,住宅新风系统的引入不仅显著提高了室内空气质量,还满足了室内的空调要求,实现了空气流通与温度调节的双重效果。在数值模拟过程中,作者对风量分配装置内的空气流动进行了合理假设,并采用了适当的计算方法和边界条件。通过对新风系统不同运行参数的调整和优化,得出了最佳的进风口位置和进风速度,进一步验证了新风系统在改善室内空气质量方面的有效性。康清等人[25]选取某工业厂房作为研究对象,运用CFD技术对不同新风比条件下的室内污染物浓度场进行了数值模拟,最终成功地确定了一个既能实现节能目标,又能满足室内允许污染物浓度要求的新风比,为优化室内通风系统设计提供了有力支持。

基于上述案例可知,CFD数值模拟技术是一种有效的实验模拟方法,可以通过构建化学实验室新风系统的数值模型,模拟不同通风条件下的气流分布、温度场、湿度场及有害气体浓度分布。通过数值模拟,可以直观地观察和分析新风系统的工作状态,为系统优化提供理论依据。以下是关于数值模拟技术在实验室新风系统设计中应用的一些探讨。

4.1. 优化气流组织

在实验室环境中,合理的气流组织对于控制污染物扩散、保持空气洁净度至关重要。数值模拟技术可以帮助设计者模拟不同气流组织方案下的空气流动情况,从而选择最优方案。采用计算流体动力学(CFD)技术,通过求解质量、动量、能量等守恒方程,模拟实验室内的风速、温度、湿度及污染物浓度分布。常用的CFD软件包括Fluent、Ansys CFX、PHOENICS等[26]。相较于传统的实验方法,数值模拟具有周期短、费用低、可重复性强等优势,能够模拟实验条件下难以实现的复杂工况。

4.2. 节能设计

实验室新风系统能耗较高,通过数值模拟技术可以优化系统设计,降低能耗。通过模拟不同送风温度、湿度、风速条件下系统的能耗情况,结合实验室的实际使用情况(如人员密度、设备发热量等),确定最优的运行参数。此外,还可以模拟带有热量回收的新风系统,分析其在节能方面的潜力。在带有热量回收的新风系统中,数值模拟技术可以分析不同换热器结构对换热效率、压降的影响,从而优化换热器设计。同时,结合实验室的实际情况,模拟不同安装位置对新风系统性能的影响,确定最佳的安装方案。

4.3. 安全性评估

在实验室通风柜的设计中,数值模拟技术可以模拟不同操作条件下的气流组织情况,确保有害气体被有效捕集并排出室外。同时,还可以模拟通风柜在机械故障或异常情况下的性能表现,为系统的安全稳定运行提供保障。此外,还可以利用数值模拟技术模拟实验室在紧急情况下的通风效果,如火灾、化学品泄漏等。通过模拟分析,评估通风系统的应急响应能力,并提出改进措施。

4.4. 智能化控制

可以利用数值模拟技术为自动控制系统提供设计依据,如确定最佳的面风速设定值、优化传感器布置等。同时,通过模拟不同工况下的系统响应情况,验证自动控制系统的稳定性和可靠性。例如,在实验室新风系统中安装红外线人体监测器,结合数值模拟结果确定不同操作条件下的面风速设定值。当操作台前有操作人员工作时,面风速控制在某一设定值;当通风柜前无人操作时,系统自动转换到另一设定值以降低能耗[27]。

综上所述,数值模拟技术在实验室新风系统设计中的应用具有广泛的前景和重要的价值。通过优化气流组织、节能设计、安全性评估以及智能化控制等方面的应用,可以显著提升实验室新风系统的性能和效益。

5. 总结与展望

本文综述了化学实验室新风系统的国内外研究现状,通过对比分析常用的几种排风补风系统,深入阐明了各系统的特点、适用场景及优缺点,为化学实验室新风系统的选择与设计提供了有力依据。此外,探讨了数值模拟技术在实验室新风系统设计中的应用,展示了其在优化气流组织、预测污染物扩散等方面的独特优势。展望未来,随着数值模拟技术的不断发展和完善,其在化学实验室新风系统设计中的应用将更加广泛,为设计者提供更加精准、高效的工具,推动化学实验室环境控制与空气洁净技术的不断进步。

针对新建化学实验室,可参考上述要点总结并通过 CFD 模拟分析进行优化设计,结合控制系统、材料与设备配置以及节能、环保等因素,进行技术方案优选;现有化学实验室则可根据实验室的具体需求进行合理的空间规划和功能分区,通过新风系统加装改造工程进行改善提高。随着电子信息和人工智能系统的发展和普及,未来实验室新风系统将朝着智能化、可视化的方向发展,例如将分功能“补风-新风”通风空调系统结合智能控制系统,实现 VOC 及颗粒物实时监测,智能自动启闭、自动风量调节,工作状态在线监控、维护提醒等。总之,化学实验室新风系统建设是一个庞杂的系统工程,设计和建设既要具备一定的前瞻性,同时要结合实际情况、兼顾实验需求,选择高性价比的实验室新风系统方案,避免浪费。

基金项目

浙江省高校实验室工作研究项目(ZD202304)、浙江省自然科学基金(LQ22C100002)、嘉兴市科技计划项目-青年科技人才专项(2023AY40034)、嘉兴市公益性研究计划项目(2023AD11042)。

参考文献

- [1] He, Y., Hii, D.J.C., Wong, N.H. and Peck, T. (2021) Unsteady RANS Simulations of Laboratory Ventilation with Chemical Spills and Gas Leakages—Toward Balanced Safety and Energy Effectiveness. *Building and Environment*, **191**, Article ID: 107576. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107576>
- [2] 曹志刚, 马晨钰, 杨毅, 等. 高校化学实验室通风系统设计方法[J]. 暖通空调, 2023, 53(12): 12-17.
- [3] 亓丽萍. 有机化学实验室新风系统不同技术方案初探[J]. 实验室科学, 2022, 25(3): 204-206.
- [4] 吴相甫, 李冬梅. 气候环境实验室新风系统控制方法研究[J]. 控制工程, 2017, 24(S1): 3035.
- [5] 于丽颖, 罗亚楠. 构建绿色有机化学实验室的探讨与实践[J]. 广州化工, 2012, 40(19): 175-176.
- [6] Burgess, W.A., Ellenbecker, M.J. and Treitman, R.D. (2004) Chemical Laboratory Ventilation. John Wiley & Sons, Inc.
- [7] Abdoon, G.I. and Bashir, N.F. (2017) Proposed Procedure to Design an Optimum Ventilation System for Chemical Laboratory. *Advances in Chemical Engineering and Science*, **7**, 325-332. <https://doi.org/10.4236/aces.2017.73024>
- [8] Nabeshima, Y., Nezu, Y., Yamamoto, H., et al. (1978) Analysis on the Influence of Laboratory Design and Operations on Airflow in Experimental Laboratory. *Journal of Chemical Education*, **55**, 111-114.
- [9] 段辉, 曹同成, 夏本明, 等. 高校化学实验室通风系统改造与节能研究[J]. 实验技术与管理, 2023, 40(5): 190-195.
- [10] 段辉, 曹同成, 黄国珍, 等. 基于智能新风系统的旧实验楼宇改造的探索[J]. 实验室科学, 2024, 27(1): 195-198.
- [11] 徐伟鹏. 某高校现代化实验室通风空调系统设计研究[J]. 洁净与空调技术, 2021(4): 63-66.
- [12] 朱勉顺. 高性能补风型实验室通风柜的设计研究[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2021.
- [13] 庄挺. 高校实验室通风柜污染物泄漏原因与对策探究[J]. 设备管理与维修, 2021(1): 11-13.
- [14] 赵静, 张福群. 化工类高校实验室危险性分析与通风设计研究[J]. 辽宁化工, 2018, 47(4): 301-302.
- [15] 钱江, 施能进, 张煜炯, 等. “全新风”实验室建设的探索[J]. 实验室研究与探索, 2011, 30(12): 222-224.
- [16] 陈建润, 刘丽儒, 黄家豪, 等. 湿热地区实验室分功能的新风-补风系统的空调能耗分析[J]. 广东工业大学学报, 2020, 37(1): 65-68.
- [17] 韩君辉, 孙婷. 化学实验室变风量通风自控系统[J]. 电子技术与软件工程, 2018, 128(6): 127-128.
- [18] 夏本明. 变风量控制系统在化学实验室暖通空调系统中的应用[J]. 暖通空调, 2022, 52(9): 115-121.
- [19] 张悦, 徐文华, 吕天宇. 实验室和变风量排风柜的安全控制[J]. 暖通空调, 2007(1): 116-119.
- [20] Ciuman, P. and Lipska, B. (2014) The Improvement of Numerical Modelling of Airflow in Ventilated Room. *Architecture, Civil Engineering, Environment*, **7**, 77-83.
- [21] 刘九五, 连之伟, 王月梅. CFD 在暖通空调系统中的应用现状与发展[J]. 建筑热能通风空调, 2010, 29(6): 1-6.
- [22] Chen, Q. and Xu, W. (1998) A Zero-Equation Turbulence Model for Indoor Airflow Simulation. *Energy and Buildings*, **28**, 137-144. [https://doi.org/10.1016/s0378-7788\(98\)00020-6](https://doi.org/10.1016/s0378-7788(98)00020-6)
- [23] 赵彬, 李先庭, 彦启森. 用零方程湍流模型模拟通风空调室内的空气流动[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001(10): 109-113.
- [24] 张莉. 住宅新风系统的应用分析及数值模拟[C]//山东土木建筑学会建筑热能动力专业委员会第十二届学术交流会论文集. 2008.
- [25] 康清, 魏兵, 张玮. 应用 CFD 技术模拟新风对室内污染物的排除效果[J]. 北方环境, 2011, 23(5): 77.
- [26] 谢锋. 基于 CFD 的高校实验室通风优化模拟研究[J]. 技术与市场, 2022, 29(6): 53-55.
- [27] Cao, S. (2018) Challenges of Using CFD Simulation for the Design and Online Control of Ventilation Systems. *Indoor and Built Environment*, **28**, 3-6. <https://doi.org/10.1177/1420326x18810568>