

生物实验室通风柜面风速稳定性影响因素分析

吴海涛

中南建筑设计院股份有限公司 湖北武汉 430061

摘要：生物实验室通风柜面风速稳定性，是保障实验安全及环境控制的关键。本文通过分析空气流速标准、环境温湿度、通风柜设计与结构等核心因素，揭示其对风速稳定性的影响机制。研究表明，风速需要符合国家标准，以避免涡流或泄露；环境温湿度变化会改变空气密度，进而影响排风效率；通风柜内部导流设计及密封性直接影响气流均匀性。本文为优化通风柜设计及使用策略提供科学依据，助力实验室安全管理。

关键词：生物实验；通风柜面；风速稳定性；影响因素

实验室通风柜作为生物安全的重要屏障，其风速稳定性直接影响有害气体控制效果与人员防护水平，但是风速易受多重因素干扰，导致实验环境波动。本文从空气动力学、环境适应性、设备结构特性等角度切入，系统梳理影响风速稳定性的关键因素。通过整合国内外研究数据与工程实践案例，明确各因素作用路径，旨在为实验室通风系统设计与运维提供理论指导，提升实验环境的安全性及可靠性。

一、生物实验室通风柜面风速稳定性影响因素

（一）空气流速标准：构建安全基准的核心参数

空气流速标准，是衡量通风柜性能的基础指标，直接决定有害气体控制的有效性。根据国家标准的要求，通风柜面风速需控制在0.4—0.6m/s区间，且偏差不得超过15%，该标准设定以空气动力学原理为基础，能够确保柜内形成稳定的负压环境，从而有效抑制有害气体外溢。当风速低于0.4m/s时，空气置换效率下降，会导致有害气体滞留，而超过0.6m/s时，虽然可以增强排风能力，但会引发柜内涡流，破坏气流均匀性。同时，不同的实验场景，对风速的需求也有所不同，比如化学诱变剂实验中，要求最低平均流速不低于45m/min，可以有效对高危害性物质扩散风险。因此，生物实验室需要设定科学的空气流速标准，综合考量实验类型、有害物质特性及通风系统承载能力，通过精密计算与实验验证，建立动态调节机制，从而能够保证风速始终维持在安全阈值内^[1]。

（二）环境温湿度：影响空气物理特性的关键变量

环境温湿度通过改变空气密度与粘滞系数，可以间接影响通风柜排风效率。在温度升高的情况下，空气密

度会降低，相同体积下质量减少，从而会导致排风系统实际抽力下降；在湿度增加的情况下，则会提升空气粘滞度，增加管道阻力，降低气流流动性。对于生物实验而言，温湿度控制不仅关乎实验样本稳定性，更直接影响通风柜运行环境，比如细胞培养需要恒定37℃环境，如果出现温湿度波动的情况，则会干扰实验进程，还会改变通风柜内部空气状态，进而影响风速稳定性。此外，极端温湿度条件会加速设备老化，比如高温导致风机轴承润滑失效，高湿引发电路短路风险，进一步威胁通风柜整体性能。

（三）通风柜设计与结构：优化气流路径的物理基础

通风柜设计时，必须遵循空气动力学原理，通过优化结构参数，能够提升风速稳定性。柜体材料选择时，需要考虑到耐腐蚀性与表面光滑度，比如不锈钢材质具有良好的化学稳定性，其细密缝隙设计可减少气流扰动，提升排风效率。操作窗口设计时，可以采用可调节滑窗结构，能够控制开放高度，还可以引导气流方向，避免湍流产生。在排风系统设计时，风机选型需要匹配实验需求，确保能够提供足够的静压以克服管道阻力；风道布局需要避免直角转弯，采用渐扩式管径设计，降低局部阻力损失^[2]。

二、生物实验室通风柜面风速稳定性的优化方案

（一）项目概况

某生物实验室长期面临通风柜面风速不稳定问题，表现为风速波动频繁、局部区域风速过低或过高，严重影响实验安全与效率，为了系统性解决该问题，实验室启动了风速稳定性优化项目，涵盖问题诊断、方案设计、实施验证及长期维护全流程。

(二) 前期准备

在项目初期,团队通过多维度诊断方法梳理问题根源,首先团队进行了通风柜结构检查,发现部分导流板存在设计缺陷,导致气流分布不均,局部区域形成涡流;密封性测试结果显示,柜体与管道连接处存在微小缝隙,在负压环境下产生泄漏,加剧了风速波动。风机性能测试表明,现有风机静压不足,难以克服管道阻力,且缺乏智能调控功能;通过环境参数监测发现,实验室温湿度控制精度较低,空气密度变化进一步影响排风效率。

(三) 多层次优化方案设计

1. 结构优化

在结构优化时,生物实验室通风柜采用了流体力学仿真优化导流板设计,将传统平直导流板改为曲面渐变结构。新导流板分为三段式排风设计,上段采用抛物线曲面,中段为多孔整流板,下段设置导流叶片;材料选用5mm厚实芯抗倍特板,表面经特殊涂层处理,兼具耐腐蚀性与低表面能特性;导流板曲率半径 $R=800\text{mm}$,整流孔孔径 $\phi=8\text{mm}$,孔隙率35%,导流叶片倾角 $\theta=15^\circ$ 。仿真结果显示,该设计可使气流均匀性提升40%,涡流区减少65%。

设计人员实施了三级密封体系,初级密封采用硅胶密封圈,二级密封采用氟橡胶膨胀条,三级密封采用磁吸式密封条;重点改进柜体—管道连接处,设计双法兰结构,内嵌弹性密封垫,配合快速锁紧装置;密封材料经 $-40^\circ\text{C}\sim 120^\circ\text{C}$ 高低温循环测试,老化率 $<5\%/年$;密封性测试显示,泄漏率从 $0.3\text{m}^3/\text{h}$ 降至 $0.02\text{m}^3/\text{h}$ 。

2. 设备升级

设计人员选用了耐腐蚀玻璃钢离心风机,其中全压 $P=1200\text{Pa}$,风量 $Q=2500\text{m}^3/\text{h}$,转速 $n=2900\text{r}/\text{min}$,效率 $\eta=78\%$;配套了变频控制器,采用矢量控制算法,频率调节范围设定为 $0.1\sim 50\text{Hz}$,并设计冗余静压储备,确保在管道阻力波动时依然可以维持风速稳定。在变频控制逻辑方面,设计人员构建了双闭环控制系统,其中内环采用PID算法控制风速,采样周期 $T=50\text{ms}$;外环采用模糊控制算法调节风机转速,响应阈值 $\Delta P=10\text{Pa}$;根据实际业务需求,设计人员设置了多场景控制模式,主要包括常规模式(风速 $0.5\text{m}/\text{s}\pm 5\%$)、节能模式(无人时降至 $0.3\text{m}/\text{s}$)、应急模式($1.0\text{m}/\text{s}$ 强制排风)^[3]。

3. 智能监控

设计人员在通风柜中配置了多维传感器阵列,包括风速传感器(精度 $\pm 0.02\text{m}/\text{s}$,响应时间 $<1\text{s}$)、温湿度

传感器(精度 $\pm 0.5\%\text{RH}$, $\pm 0.2^\circ\text{C}$)、压差传感器(精度 $\pm 1\text{Pa}$)以及颗粒物传感器($0.3\mu\text{m}$ 检测效率 $>99\%$);传感器采用分布式安装,柜内设置5个监测点,管道关键节点设置3个检测点。同时,基于BIM技术,设计人员建立了实验室三维模型,集成了CFD仿真模块;模型可以实时映射物理空间数据,预测风速变化趋势,并开发自适应调节算法,当预测风速偏离设定值时,自动触发控制指令;模型更新频率 1Hz ,预测误差 $<3\%$ 。

(四) 实施与验证

为了验证该改进方案的有效性,第一阶段完成结构优化与密封升级(周期2周),第二阶段安装新风机与传感器网络(周期3周),第三阶段部署数字孪生平台并完成系统联调(周期4周)。验证实验采用示踪气体法,释放SF6气体模拟污染物扩散,监测不同工况下风速稳定性。根据验证结果显示,风速波动标准差从 $0.18\text{m}/\text{s}$ 降至 $0.03\text{m}/\text{s}$,恢复时间从 12s 缩短至 4s ,能效比提升35%。

三、生物实验室通风柜面风速稳定性控制的优化措施

(一) 严格遵循空气流速标准

为了确保能够达到空气流速标准,技术人员可以在通风柜排风口边缘设置多个测量点,采用压差式或热线式传感器实时监测风速;传感器数据需传输至PID控制器,通过比较设定值与实际值动态调节排风机转速或风阀开度。例如,当柜门开度变化导致风速低于 $0.4\text{m}/\text{s}$ 时,系统自动增加排风量;当风速超过 $0.6\text{m}/\text{s}$ 时,则相应减少排风量;该系统需定期进行校准,确保测量误差小于 $\pm 0.05\text{m}/\text{s}$,且响应时间不超过3秒。

同时,技术人员可以采用变风量(VAV)控制策略,在通风管道中安装文丘里阀或压力无关型调节阀,通过位移传感器监测柜门开启高度,结合风速设定值计算所需风量。当实验人员调整柜门位置时,控制系统同步调节阀门开度和风机频率,维持风速稳定在 $0.5\text{m}/\text{s}\pm 0.03\text{m}/\text{s}$ 范围内;对于多台通风柜并联运行的实验室,技术人员需要配置总风量调节装置,根据各柜实际使用状态动态分配风量,从而能够避免局部风速超标或不足的问题发生^[4]。

技术人员需要优化实验室气流组织,比如将通风柜靠墙布置,背面留足检修空间,避免与门、窗等空气扰动源距离小于1.5米;在实验台上方,可以设置导流板,引导操作人员呼吸区气流远离通风柜,防止人体活动干

扰柜内气流；对于可能产生交叉气流的区域，可以安装空气幕或局部排风装置，维持通风柜面风速均匀性；实验室送风系统可以采用上送下回方式，从而能够保持室内微负压状态，防止有害气体外溢。

（二）全面落实环境温湿度控制

技术人员需要建立实验室环境温湿度基线标准，根据实验类型，明确温湿度控制范围。针对普通化学实验室，温度通常控制在20–25℃，湿度≤80%；对于细胞培养室，温度需要控制在18–26℃，湿度45%~65%；实验室的试剂存储区，温度需要控制为10–30℃，湿度35%~80%；精密称量区域中，温度需要控制为10–30℃，湿度35%~65%。为了准确控制温湿度，技术人员可以安装经过计量校准的温湿度传感器，在实验室四角及中心位置布设5个监测点，传感器探头避开空调出风口、门窗等气流扰动区域；监测数据通过无线传输至中央控制台，实现24小时实时显示与历史数据追溯；当温湿度偏离设定值±2℃或±5%RH时，系统自动触发三级报警机制，包括界面弹窗提示、声光报警和短信通知实验室负责人^[5]。

技术人员可以采用温湿度与通风柜面风速联动控制策略，在通风柜排风管道安装温湿度传感器，实时监测排风温湿度，当排风温度超过28℃或湿度超过70%时，控制系统自动增大排风量至额定值的120%，并调整空调系统运行频率，优先保证通风柜区域温湿度稳定。同时，设计方案中可以采用PID算法建立温湿度预测模型，根据实验室人员数量、设备发热量等参数提前调节空调输出，避免温湿度剧烈波动，比如在夏季高温时段，启动备用制冷机组，确保实验室温度不超过26℃。

（三）优化通风柜结构设计

在通风柜结构方面，可以采用变风量型通风柜结构设计，并配置文丘里阀或压力无关型调节阀，从而能够根据柜门开度自动调节排风量；可以在柜体内部设置多级导流板，首层导流板采用穿孔板结构，孔隙率根据实验类型优化至25%~40%，确保气流均匀分布；导流板一般选用耐腐蚀的316L不锈钢，表面进行电解抛光处理，减少气流附壁效应；将柜门开度传感器与变频风机联动，当门高小于30cm时自动降低风机转速，维持风速在0.5m/s±0.05m/s范围内。图1为通风柜的运行原理。

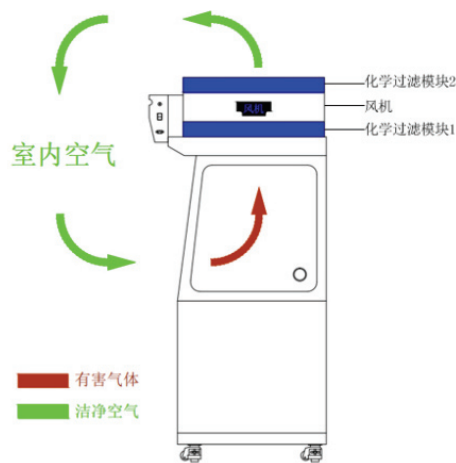


图1 通风柜运行原理

通风柜可以采用双风速控制系统，在通风柜操作口上方5cm处设置主风速传感器，并在柜内顶部安装辅助传感器监测涡流区风速；控制系统采用模糊PID算法，当主传感器检测到风速波动超过设定值10%时，自动调整导流板角度和风机转速；柜门可以采用气动悬浮设计，在门体四周安装硅橡胶密封条，关闭时形成气密性屏障，泄漏率一般可以小于0.05%。

结束语

综上所述，本文通过多维度分析，阐明生物实验室通风柜面风速稳定性的复杂作用机制。未来研究可进一步结合数值模拟与实验验证，深化对动态工况下多因素耦合效应的理解，从而可以持续提升通风柜运行效能，为生物实验提供坚实保障。

参考文献

- [1]任冰冰, 郑大为. 基于CFD模拟不同流道结构对通风柜安全性能的影响[J]. 科技风, 2024(1): 4–6, 28.
- [2]李智超. 闭环变风量控制系统在实验室通风系统中的应用[J]. 工程技术研究, 2024, 9(2): 118–120.
- [3]王楠. 基于PLC的通风柜UBC控制系统[J]. 自动化应用, 2023, 64(14): 81–83, 89.
- [4]夏本明, 张本林. 变静压控制在实验室风机变频控制中的应用[J]. 节能, 2023, 42(3): 81–83.
- [5]李晓丽, 朱小社. 实验室通风气流控制系统及节能技术探讨[J]. 无线互联科技, 2023, 19(17): 125–127.