



高等级生物安全设施通风系统风机配置模式综合分析

曹国庆^{1*}, 陈紫光¹, 王荣²

1. 建科环能科技有限公司, 北京 100013;

2. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072

* 联系人, E-mail: cgg2000@126.com

2023-06-13 收稿, 2023-09-28 修回, 2023-10-10 接受, 2023-10-11 网络版发表

中国建筑科学研究院有限公司基金(20220106330730007)资助

摘要 高等级生物安全设施是国家生物安全体系的基础支撑平台,是人口健康与动物卫生领域开展科研、生产和服务的重要保障条件,在我国重大疫病防控中发挥着至关重要的作用.生物安全设施安全的核心措施是通过通风空调系统保持负压,送、排风机是通风空调系统的重要设备,也是实现持续负压环境的核心保障.国内外相关标准规范、指南文件对高等级生物安全设施通风空调系统风机配置提出了明确要求.本文在对比分析这些要求的基础上,结合工程实例梳理了近年来我国高等级生物安全设施建设现状,对高等级生物安全设施通风空调系统风机运行模式、多台风机互为备用、送排风机变频控制、高海拔地区风机选型等关键问题进行了探讨.通过综合分析指出,高等级生物安全设施风机配置模式应经风险评估确定;通风空调系统设置相互独立、互为备用的两台风机是最佳工程选择;风机变频控制是高等级生物安全设施有效的压力梯度控制及节能运行措施之一;高海拔地区高等级生物安全设施应根据环境大气压对风机全压进行修正.

关键词 生物安全实验室, 高生物安全风险车间, 通风系统, 风机配置模式, 标准规范

生物安全与国家核心利益密切相关,是国家安全的重要组成部分,越来越受到各国政府的高度重视,许多国家把生物安全纳入国家战略^[1].自新型冠状病毒感染疫情暴发以来,高等级生物安全设施(包括高等级生物安全实验室和高生物安全风险车间)在我国重大疫病防控中发挥着至关重要的作用,充分体现了其作为国家生物安全体系的基础支撑平台和人口健康与动物卫生领域开展科研、生产、服务的重要保障条件.高等级生物安全设施实验研究或生产操作往往涉及生物气溶胶,研究者已对生物气溶胶与人类健康、国家生物安全等问题进行了详细论述^[2-5].

通风空调系统是保障实验室生物安全的重要措施,有效的气流组织、持续的负压环境、合理的换气次数等是生物安全实验室建设时需重点考虑的要素. Liu等

人^[6-8]研究了高等级生物安全实验室气流组织、室内空间布局、设备布置等对生物气溶胶时空分布和沉积的影响,提出了生物安全实验室消毒薄弱环节及效果验证关键部位. Barbosa和Brum^[9]通过数值模拟研究指出,实验室内生物安全柜防护效果取决于室内气流流型、湍流度以及安全柜吸入气流速度,应谨慎提高室内换气次数,避免因增加室内湍流度而影响安全柜防护效果,增大操作人员暴露风险.钱华等人^[10]研究了呼吸道传染病气溶胶传染致病机理及预测方法,阐述了飞沫传播、短距离空气传播、长距离空气传播疾病的传播特性、致病机理和相关的风险预测模型,并根据致病机理给出了感控预防措施.送、排风机是通风空调系统的重要设备,也是实现有效气流组织、持续负压环境、合理换气次数的核心保障,但有关生物安全

引用格式: 曹国庆, 陈紫光, 王荣. 高等级生物安全设施通风系统风机配置模式综合分析. 科学通报, 2024, 69: 825-833

Cao G Q, Chen Z G, Wang R. Comprehensive analysis of fan configuration modes in the ventilation system of high-level biosafety facilities (in Chinese). Chin Sci Bull, 2024, 69: 825-833, doi: [10.1360/TB-2023-0567](https://doi.org/10.1360/TB-2023-0567)

实验室风机配置模式研究的文献比较少。

生物安全设施通风系统风机配置的系统性、匹配的
科学性, 以及安全冗余与投资 and 运行费用的平衡, 是
建设时需要重点考虑的问题。国内外相关规范、标
准、指南都对高等级生物安全设施通风系统风机配
置问题提出了明确要求。随着新型冠状病毒菌种的不断
出现、生物科技的飞速发展、生物反恐形势的日益严
峻, 高等级生物安全设施将持续发挥关键作用。本文结
合工程实例, 梳理了近年来我国高等级生物安全设施
通风系统风机配置的建设现状, 对比分析了国内外相
关规范、标准与指南情况, 就目前存在的问题进行了
思考, 并对未来的建设发展方向给出了建议, 以期推动
我国高等级生物安全设施的健康发展。

1 国内外标准规范对通风系统风机配置要求

1.1 高等级生物安全实验室

生物安全实验室作为保障生物安全的桥头堡, 主
要用于具有传染可能性的微生物或动物实验, 是开展
生物研究工作和传染病预防与检测的实验场所。按照
实验室处理的有害生物因子的风险, 国际上将生物安
全实验室分为四级(一级风险最低, 四级最高), 把三、
四级生物安全实验室定义为高等级生物安全实验室。
高等级生物安全实验室的建设越来越受到各国的重视,
只有具备这样的硬件设施, 才有可能进行高致病生物
因子的研究, 才能具备防范、控制重大疫情传播的
能力。

生物安全实验室领域比较有影响力的相关国际标
准、手册或指南包括世界卫生组织(World Health Orga-
nization, WHO)《实验室生物安全手册》(Laboratory
Biosafety Manual, LBM)、美国《微生物和生物医学实

验室生物安全》(Biosafety in Microbiological and Bio-
medical Laboratories, BMBL)、加拿大《实验室生物安
全手册》(Laboratory Biosafety Handbook, LBH)等^[1]。
相较于欧美发达国家的高等级生物安全实验室, 我国
高等级生物安全实验室建设起步发展时间虽然较晚,
但近10年来快速发展, 相关的国家标准主要有GB
19489-2008《实验室 生物安全通用要求》和GB
50346-2011《生物安全实验室建筑技术规范》。

表1给出了上述国内外代表性标准现行版本对高
等级生物安全实验室通风系统风机配置的相关要
求^[12-16]。可以看出, 我国标准着眼于落地实施, 在通风
空调系统风机备用问题上有相对明确的规定, 尤其是
建筑类标准GB50346-2011, 这在我国生物安全实验室
建设发展初期是符合国情且很有必要的。但随着社会
发展及科学技术的进步, 尤其近10年来, 我国在高等
级生物安全实验室的建设及运行管理上积累了大量经验,
有关风机配置问题可进一步探讨, 相关标准条文可进
一步修订完善。加拿大标准是2015年发布的, WHO、
美国均在2020年发布了新版标准或手册, 新版文件更
加注重风险评估, 而我国两个国家标准发布时间在
2010年前后, 已有10余年未修订, 有必要结合国内外最
新的标准文献、国内实际建设经验, 修订相关标准
规范。

1.2 高生物安全风险车间

高生物安全风险车间指用于生产高致病性病原微
生物或特定菌(毒)株的疫苗原液或相关制品的生产车
间, 是开展疫苗或相关生物制药产品研发生产、保障
公共卫生安全的重要平台。与实验室比较, 高生物安全
风险车间在空间布局的复杂性、生产及实验活动的多
样性、空间高度、大规模病毒原液处理量风险、工艺

表1 国内外代表性标准对高等级生物安全实验室通风系统风机配置要求

Table 1 Requirements for redundant fans employed in ventilation systems of high-level biosafety laboratories in representative standards

国内外标准	发布年份	风机备用
WHO手册LBM-4	2020	三级实验室无要求, 四级实验室(安全柜型、正压防护服型实验室)要求排风机应有备用
美国BMBL-6	2020	三级实验室无要求; 四级实验室(安全柜型、正压防护服型实验室)建议送风机备用, 排风机要求有备用
加拿大CBH-2	2016	无规定
我国GB 50346-2011	2011	三级实验室: BSL-3宜设置备用送风机, ABSL-3应设置备用送风机, BSL-3、ABSL-3均应设置备用排风机; 四级实验室: 送风机、排风机均应设置备用
我国GB 19489-2008	2008	三、四级实验室: 排风机应设置备用

罐体排放方式、活毒废水生物安全级别等众多环节均存在较大差异,其设计、建造及运行均应结合车间生产特点进行科学有效的风险评估。

高生物安全风险车间领域比较有影响力的相关国际标准、手册或指南主要包括欧洲联盟(简称欧盟)标准《大规模生物制剂生产车间危害等级》BS EN 1620:1997、欧盟《口蹄疫(FMD)设施最低标准》(以下简称EuFMD)。另外,美国BMBL-6以附录M专门阐述了大规模生物安全问题,加拿大CBH-2以第14章专门阐述了大规模生产问题。我国高生物安全风险车间建设相关的规范、指南主要包括:2017年8月农业农村部发布的《兽用疫苗生产企业生物安全三级防护标准》(以下简称《三级防护标准》),以及2020年6月由国家卫生健康委、科技部、工业和信息化部、国家市场监督管理总局、国家药监局联合发布并实施的《疫苗生产车间生物安全通用要求》(以下简称《车间通用要求》)。

表2给出了上述国内外代表性标准现行版本对高生物安全风险车间通风系统风机配置的相关要求^[15-20]。可以看出,我国规范性文件对高生物安全风险车间通风系统风机备用问题提出了明确要求,而欧美国家要求相对宽泛。

2 风机配置模式分析

从表1和2可知,我国相关规范文件、标准对高等级生物安全设施通风系统风机冗余备用的要求比国外同类标准或指南文件更细致和明确,可实施性强,有利于降低生物安全风险。当然,通风系统风机冗余备用只是建筑设施可靠性提高了,是否足以确保生物气溶胶或危险气体不造成危害,仍需进一步研究。近些年来,国外生物安全实验室获得性感染事件时有发生^[21-23],表明国外生物安全设施或管理方面仍存在较大的安全漏洞,统一、适合国情的国家标准和现代的生物安全技术对于高等级生物安全设施的建设、运行、维护、管理是非常必要的。

在我国高等级生物安全设施建设工程实践中出现了多种风机配置及运行模式,但不论哪种风机配置模式,主、备用风机基本都是同一型号规格的,避免不同型号规格风机并联出现工作状态点偏离大的问题。本文对这些风机配置模式的优缺点及适用范围进行分析探讨,这些分析是在对高等级生物安全设施通风系统进行风险评估的基础上,结合国内生物安全设施相关

表2 国内外代表性标准对高生物安全风险车间通风系统风机备用要求

Table 2 Requirements for redundant fans employed in ventilation systems of high-biocontainment production plant facilities in representative standards

国内外标准	风机备用
美国BMBL-6	无规定
加拿大CBH-2	无规定
欧盟BS EN 1620:1997	三级可设置备用,四级应设置备用
欧盟口蹄疫标准EuFMD	建议排风机设置备用
我国《三级防护标准》	送风机宜设置备用,排风机应设置备用
我国《车间通用要求》	送、排风机均应设置备用

标准规范要求提出的,属于定性分析范畴。目前,国内外均缺乏实验室获得性感染事件与实验室设施故障之间关系定量分析的研究。Pike^[24]对3291例实验室相关感染事件进行了统计,可查明原因的只有18%,原因不明的达82%。但这种基于循证的研究是未来的发展趋势,WHO在《实验室生物安全手册》(第4版,2020年发布)中建议根据实际情况开展以循证为基础的风险评估,强调基于风险和循证的生物安全方法而不是规定性方法,以确保实验室设施、安全设备和工作实践与当地相关、相称且可持续^[25]。

2.1 送风机配置

我国早期建设的生物安全三级实验室一般不设置备用送风机,但2010年以后建设的高等级生物安全实验室、高生物安全风险车间大部分都设置了备用送风机。在备用送风机的设置形式上存在一定差异,有的是整个新风空调机组(makeup air handling unit, MAU)一用一备,即整个空调机组备用(图1(a));有的仅是送风机一用一备,MAU其他功能段共用(图1(b))。对这3种送风机配置模式对比分析如下。

若MAU不设置备用送风机,当主送风机发生故障时,虽然可以通过排风机降频运行、排风管道阀门关小等自控技术措施实现室内负压环境,但不容易保证各房间之间的负压梯度,也不能保证室内温湿度参数。这对于需要长时间运行的高等级生物安全设施(如高等级动物生物安全实验室内的动物饲养、高生物安全风险车间内的正常疫苗生产)而言,可能是不可接受的,除非主送风机短时间内可以修好或更换一台新的。

若MAU仅送风机一用一备,其他功能段(如冷热处理段、空气过滤段、加湿段等)共用,当主送风机发生

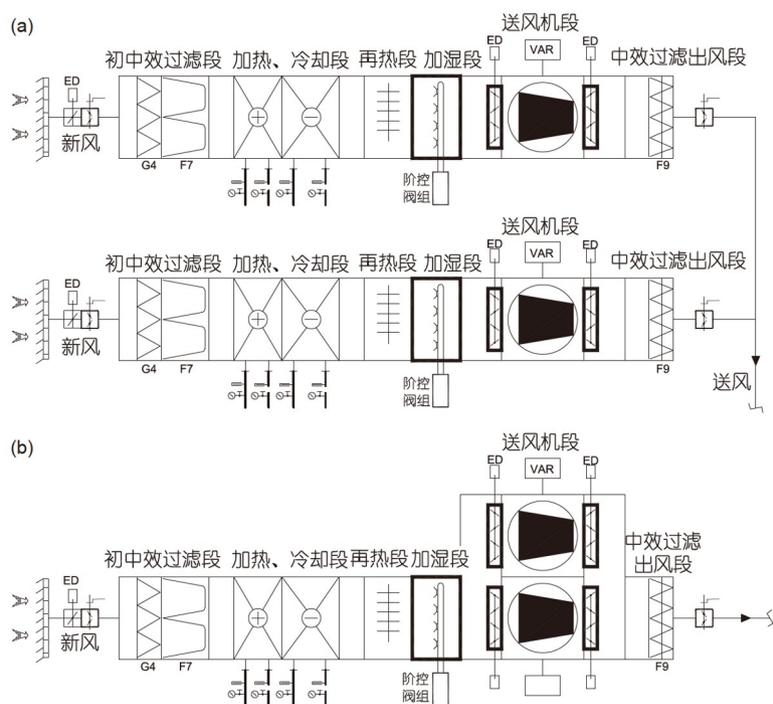


图1 送风机配置常见模式。(a) 新风空气处理机组备用; (b) 仅送风机备用
 Figure 1 Common modes of supply fan configurations. (a) Fresh air handling unit backup; (b) only supply fan backup

故障时, 备用送风机自动切换运行, 可实现室内负压梯度、保证室内温湿度参数等, 但存在其他功能段发生故障的潜在风险(如我国严寒地区冬季可能会出现机组内盘管冻裂的风险), 此时无法保证室内温湿度参数。这对于需要长时间运行的高等级生物安全设施而言, 风险是否可以接受, 需要风险评估确定。

MAU整机一用一备, 既可以满足室内负压梯度要求, 又可以满足室内温湿度环境参数要求, 是理想的备用配置模式, 但存在备用MAU占地面积大、机组初投资高的问题。

2.2 排风机配置

实现室内负压环境的核心设备是排风机, 故国内已建高等级生物安全实验室、高生物安全风险车间均设置了备用排风机。但在备用排风机的设置形式上存在一定差异, 有的是整个排风机组(exhaust air unit, EAU)一用一备(图2(a)); 有的是一个排风机组内设置一用一备两台排风机, 即共用排风机箱(图2(b))。对这两种排风机配置模式对比分析如下。

国内已建高等级生物安全设施绝大部分均是排风机组一用一备, 当主排风机发生故障不能工作时, 备用

排风机立即启动, 房间负压及系统负压梯度仍能保持。这种状况下维护人员可以及时对发生故障的排风机进行在线维修, 即在不影响实验室正常使用(通风系统正常运行)的情况下进行维修。

对于一用一备两台排风机共用一台排风机箱的情况, 在早期的生物安全三级实验室建设中出现过。这种情况不是真正意义上的风机备用, 虽然可以解决主排风机发生故障时备用排风机自动切换的问题, 但无法对发生故障的排风机进行在线维修, 必须等实验室停止使用、通风系统停止运行后才能进行维修。这对于需要长时间运行的高等级生物安全设施而言, 存在一定风险。

3 关键点探讨

3.1 风机运行模式

两台风机互为备用的配置模式, 在实际运行中, 又有两种不同的运行状态: 一种状态是两台风机一用一备, 这种情况备用风机是不运行的(称之为“冷备”), 当主风机发生故障时, 备用风机自动启动运行, 以确保室内环境参数; 另一种状态是两台风机同时低频运行互

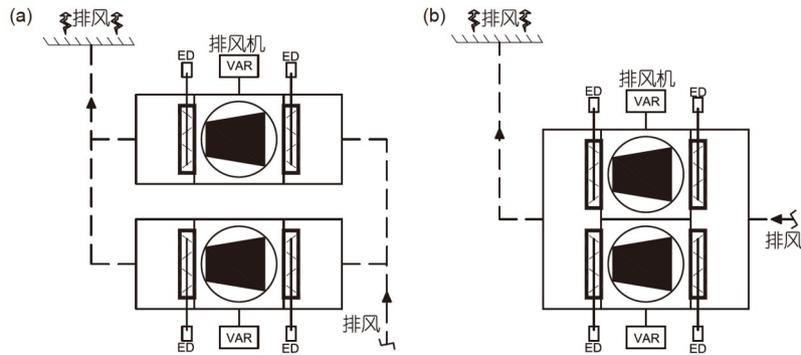


图 2 排风机配置常见模式. (a) 排风机组备用; (b) 两台排风机共用排风机箱
 Figure 2 Common modes of exhaust fan configurations. (a) Exhaust fan unit backup; (b) two exhaust fans share the same exhaust box

为备用(称之为“热备”), 当一台风机发生故障停止运行时, 另一台风机自动高频运行, 以确保室内环境参数.

“冷备”状态下, 主风机、备用风机在每次通风空调系统启动运行时, 可以根据风机使用时间统计自动切换以保持两台风机(下文将两台风机分别简称为A风机、B风机)运行时间基本一致. 如上一次系统运行时是A风机运行、B风机备用, 则下一次系统启动运行时可以切换为B风机运行、A风机备用.

“热备”状态下, A、B风机是同步运行的. 优点是: 当其中一台风机发生故障时, 另一台风机自动升频运行, 有利于减少房间负压梯度的波动时间, 系统比较容易达到稳定, 即备用风机切换过程相对比较平稳. 缺点是: 与“冷备”状态相比, A、B风机的累计使用时间是“冷备”状态的2倍, 这对于风机使用寿命有一定的不利影响, 风机低频运行也未必在风机的最佳运行状态, 这种“热备”运行状态不是绝对意义上的备用.

随着自控技术和人工智能的飞速发展, 现在很多采用“冷备”运行状态的高等级生物安全设施通风系统, 也可以实现备用风机切换过程的快速响应和稳定运行. 目前, 国内已建高等级生物安全设施大部分采用“冷备”运行状态.

3.2 多台风机互为备用

国内已建高等级生物安全设施不论是送风机, 还是排风机, 设置备用时大部分情况都是设置两台风机(互为备用), 但也有少部分案例设置了3台风机(主要是排风机), 即设置3台排风机, 主要采用“两主一备”的运行状态, 即两台排风机同时运行、1台备用. 当正在运行的某一台排风机发生故障时, 备用的那台排风机自动启动运行, 恢复“两主”同步运行状态. 这种情况是对

3.1节分析的“冷备”“热备”各自优缺点的一个互补, 即仅设置两台排风机时, 可以解决“冷备”运行状态下发生故障时系统稳定时间长、负压梯度波动大的问题, 也可以解决“热备”运行状态下每台排风机累计使用时间长的问题.

这种风机配置模式下, 3台排风机中的主备排风机由自控程序随机设置, 这样3台排风机各自工作时间基本相当, 延长了各自使用寿命. 这种运行模式既有绝对意义上的备用排风机, 又易于解决备用排风机切换工程中出现的问题, 是理想的风机配置及运行模式, 自控系统设计、调试相对简单, 但初投资相对较高.

3.3 风机变频控制

负压控制是高等级生物安全设施风险控制的核心技术措施之一, 房间压力波动的原因主要有正常运行工况下的扰动、异常故障扰动、通风系统开关机扰动3类. 其中, 正常运行工况下的扰动包括开关门、正压防护服及化学淋浴释放到室内的压缩空气、生物安全柜等局部排风设备的启停、室内温湿度显著变化等, 异常故障扰动包括送、排风系统故障扰动^[26].

为了抵消影响房间压力波动的因素, 以确保有效的压力梯度, 一般要对高等级生物安全设施送、排风系统进行风量调节控制, 而进行送、排风机变频控制是调节风量的重要技术措施之一. 当通风系统需求风量变化时, 可通过调节风机转速的方式实现变风量, 调试难度小且节能效果好; 如果风机处于定频运行状态, 只能通过改变管路阻力或调节风机入口导流器的方法实现风量调节, 调试难度大且节能效果差. 另一方面, 定频风机适应小风量运行的能力较差, 容易出现喘振, 减少风机寿命. 目前国内已建高等级生物安全设施的

送、排风机均采用了变频控制的方式,运行效果良好.

3.4 高海拔地区风机选型

由于一般风机样本所提供的性能数据是在标准条件下(大气压强为101325 Pa,空气温度为20°C,相对湿度为50%)经试验得出的,当被输送的空气温度及压强与上述样本条件不同时,即流体密度改变时,则风机的性能也发生相应的改变.文献[27]给出了风机全压、轴功率的温度修正,如式(1)所示:

$$\begin{cases} Q = Q_0 \text{ 且 } \eta = \eta_0, \\ \frac{p}{p_0} = \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{B}{101325} \cdot \frac{273+t_0}{273+t}, \\ \frac{N}{N_0} = \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{B}{101325} \cdot \frac{273+t_0}{273+t}, \end{cases} \quad (1)$$

式中,变量下标“0”代表样本条件(标准条件); B 为当地大气压(Pa); Q 为风机风量(m^3/h); η 为风机效率(%); p 为风机全压(Pa); ρ 为被输送气体的密度(kg/m^3); t 为被输送气体的温度($^{\circ}\text{C}$); N 为风机轴功率(kW).

在高海拔地区(本文泛指海拔高度在1000 m以上的地区,在我国包括黄土高原、青藏高原和云贵高原等西部及西北、西南地区^[28]),当使用风机的转速、效率及气温没有变化时,风机送出的体积风量 Q 不变,但空气密度大的,产生的压力大,空气密度小的,产生的压力也小.由式(1)可知,高海拔地区使用风机的实际运行全压 p 低于其在标准条件下测试得出的风机全压 p_0 .所以,在设计阶段,应根据当地大气压对风机选型予以修正,即在风机选型时,风量可依据“设计值”确定,但风机全压要按当地大气压对风机全压“设计值”进行修正,根据修正计算后的风机全压值进行选型.

表3给出了我国主要的高海拔城市的海拔高度、当地大气压及风机全压修正系数,其中海拔高度、当

地大气压数值摘自文献[29].当地大气压选择的是夏季时的大气压(夏季大气压略低于冬季,按最不利条件计算),风机全压修正系数为标准条件下的大气压(1013.25 hPa)与当地大气压的比值.

对于表3的应用,举例说明如下:位于拉萨的某实验室,其排风机设计值为风量10000 m^3/h 、风机全压2000 Pa,选型时以风量10000 m^3/h 、风机全压2000 Pa \times 1.55=3100 Pa进行选型,即在查阅风机样本进行选型时,应选择风机风量为10000 m^3/h 、风机全压为3100 Pa的风机.部分工程项目未考虑海拔高度因素,按常规进行风机选型时出现了风机出力不足的问题.

4 总结

我国高等级生物安全设施建设历经十余年,从几乎一片空白,到今天已经初具规模和体系.作为生物安全保障最重要的硬件设施,高等级生物安全实验室、高生物安全风险车间已经取得了前所未有的发展.这十余年也是我国高等生物安全设施建设及运行管理大讨论、大发展的十余年.送、排风机作为高等级生物安全设施安全保障的核心设备之一,其选型计算、冗余备用配置、运行模式、自控方案等在我国十余年的工程建设中积累了丰富的经验和教训,目前认识渐渐趋同.

生物安全是个纷繁复杂的系统工程,贯穿于建筑设计、建设、验收、运行、监管等诸多环节.因此,生物安全设施建设的全面性、匹配的科学性,以及安全冗余与投资 and 运行费用的平衡,是建设时需要重点考虑的问题.高等级生物安全设施风机配置模式应经风险评估确定,建议设置冗余备用,每套通风空调系统设置相互独立的两台送风机组(一用一备)、两台排风机组(一用一备)是最佳工程选择,条件受限不能整

表3 我国主要高海拔城市风机全压修正系数计算值

Table 3 Calculated values of the correction coefficient for full-pressure of fans employed in major high-altitude cities in China

城市	海拔高度(m)	当地大气压(夏季)(hPa)	风机全压修正系数
呼和浩特	1063.0	888.4	1.14
银川	1111.4	881.4	1.15
兰州	1517.2	841.5	1.20
西宁	2295.2	770.6	1.31
贵阳	1223.8	888.2	1.14
昆明	1892.4	807.3	1.26
拉萨	3648.9	652.0	1.55

体备用送风机组时,宜备用送风机。由于高等级生物安全设施压力波动的影响因素较多,风机变频控制是高等级生物安全设施有效的压力梯度控制及节能运行措

施之一;由于不同海拔地区的空气密度存在一定差异,高海拔地区的高等级生物安全设施在进行风机选型时,应根据环境大气压对风机全压进行向上的修正。

参考文献

- 1 Cao G Q, Tang J S, Wang D, et al. Design and Construction of Biosafety Laboratory (in Chinese). Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. 1-2 [曹国庆, 唐江山, 王栋, 等. 生物安全实验室设计与建设. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019. 1-2]
- 2 Zheng Y H, Li J, Chen H X, et al. Bioaerosol research: Yesterday, today and tomorrow (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 878-894 [郑云昊, 李菁, 陈灏轩, 等. 生物气溶胶的昨天、今天和明天. 科学通报, 2018, 63: 878-894]
- 3 Huang S X. Air pollution and control: Past, present and future (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 895-919 [黄顺祥. 大气污染与防治的过去、现在及未来. 科学通报, 2018, 63: 895-919]
- 4 Wu Y, Rong J H, Luhung I. Influence of air conditioning and mechanical ventilation (ACMV) systems on indoor microbial aerosols (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 920-930 [武艳, 荣嘉惠, Luhung I. 空调通风系统对室内微生物气溶胶的影响. 科学通报, 2018, 63: 920-930]
- 5 Li Y P, Liu P X, Xie Z S, et al. Recent research progress and perspective of characteristics of ambient bioaerosols during hazy pollution in China (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 940-953 [李彦鹏, 刘鹏霞, 谢铮胜, 等. 霾污染天气大气微生物气溶胶特性的研究进展. 科学通报, 2018, 63: 940-953]
- 6 Liu Z, Zhuang W, Hu X, et al. Effect of equipment layout on bioaerosol temporal-spatial distribution and deposition in one BSL-3 laboratory. *Build Environ*, 2020, 181: 107149
- 7 Liu Z, Zhuang W, Hu X, et al. Potential infection risk assessment of improper bioaerosol experiment operation in one BSL-3 laboratory based on the improved Wells-Riley method. *Build Environ*, 2021, 201: 107974
- 8 Liu Z, Zhuang W, Hu L, et al. Experimental and numerical study of potential infection risks from exposure to bioaerosols in one BSL-3 laboratory. *Build Environ*, 2020, 179: 106991
- 9 Barbosa B P P, Brum N D L. Sensitivity tests of biological safety cabinets' contaminant contention to variations on indoor flow parameters in biosafety level laboratories. *Build Environ*, 2017, 124: 1-13
- 10 Qian H, Zhang C Y, Zheng X H. The function of aerosols in transmitting and infecting of respiratory infectious diseases and its risk prediction (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 931-939 [钱华, 章重洋, 郑晓红. 呼吸道传染病气溶胶传染致病机理及预测方法. 科学通报, 2018, 63: 931-939]
- 11 Asia Pacific Construction Technology Information Research Institute Co., Ltd., Tongji University. Report on the Construction and Development of Biosafety Laboratories (in Chinese). Beijing: Science Press, 2021. 46-61 [亚太建设科技信息研究院有限公司, 同济大学. 生物安全实验室建设与发展报告. 北京: 科学出版社, 2021. 46-61]
- 12 China National Accreditation Service for Conformity Assessment. Laboratories—General Requirements for Biosafety GB19489-2008 (in Chinese). Beijing: Standards Press of China, 2008. 6-12 [中国合格评定国家认可中心. 实验室 生物安全通用要求GB19489-2008. 北京: 中国标准出版社, 2008. 6-12]
- 13 China Academy of Building Research. Architectural and Technical Code for Biosafety Laboratories, GB50346-2011 (in Chinese). Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. 13-18 [中国建筑科学研究院. 生物安全实验室建筑技术规范GB50346-2011. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. 13-18]
- 14 World Health Organization. Biological Safety Cabinets and Other Primary Containment Devices. Geneva: World Health Organization, 2020. 33-41
- 15 Centers for Disease Control and Prevention and National Institutes of Health. Biosafety in Microbiological and Biomedical Laboratories. 6th ed. Atlanta: Centers for Disease Control and Prevention and National Institutes of Health. 2020, 43-67
- 16 Public Health Agency of Canada. Canadian Biosafety Handbook. 2nd ed. Ottawa: Minister of Health and the Minister of Agriculture and Agri-Food, 2016. 117-124
- 17 European Committee for Standardization. Biotechnology Large-scale Process and Production Plant Building according to the Degree of Hazard: BS EN 1620:1997. London: British Standards Institution, 1997. 2-8
- 18 General Session of the European Commission for the Control of Foot-and-mouth Disease (EuFMD) at the Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations. Minimum standards for laboratories working with FMDV *in vitro* and *in vivo*. 2022, http://www.fao.org/ag/againfo/commissions/docs/genses38/Appendix_10.pdf
- 19 Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Biosafety Level III Protection Standard for Veterinary Vaccine Production Enterprises (in Chinese). 2022, http://www.moa.gov.cn/govpublic/SYJ/201709/t20170906_5808192.htm?keywords=2573 [中华人民共和国农业农村部. 兽用疫苗生产企业生物安全三级防护标准. 2022, http://www.moa.gov.cn/govpublic/SYJ/201709/t20170906_5808192.htm?keywords=2573]

[keywords=2573](#)]

- 20 National Health Commission of the People's Republic of China. General Requirements for Biosafety in Vaccine Production Workshops (in Chinese). 2022, http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-06/22/content_5521006.htm [国家卫生健康委. 疫苗生产车间生物安全通用要求. 2022, http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-06/22/content_5521006.htm]
- 21 Siengsan-Lamont J, Blacksell S D. A review of laboratory-acquired infections in the Asia-Pacific: Understanding risk and the need for improved biosafety for veterinary and zoonotic diseases. *Trop Med Infect Dis*, 2018, 26: 36
- 22 Wurtz N, Papa A, Hukic M, et al. Survey of laboratory-acquired infections around the world in biosafety level 3 and 4 laboratories. *Eur J Clin Microbiol Infect Dis*, 2016, 35: 1247–1258
- 23 Choucraallah D, Sarmiento L, Ettles S, et al. Surveillance of laboratory exposures to human pathogens and toxins: Canada 2018. *Can Commun Dis Rep*, 2019, 45: 244–251
- 24 Pike R M. Laboratory-associated infections: Summary and analysis of 3921 cases. *Health Lab Sci*, 1976, 13: 105–114
- 25 Cao G Q, Lv J, Hu Z P. Development process and enlightenment of *Laboratory Biosafety Manual* by WHO (in Chinese). *J HVAC*, 2023, 53: 1–5, 95 [曹国庆, 吕京, 胡竹萍. WHO《实验室生物安全手册》发展历程及其启示. *暖通空调*, 2023, 53: 1–5, 95]
- 26 Cao G Q, Wang R, Li Y, et al. Causes and control strategies of pressure fluctuation in high-level biosafety laboratory (in Chinese). *J HVAC*, 2018, 48: 7–12 [曹国庆, 王荣, 李屹, 等. 高等级生物安全实验室压力波动原因及控制策略. *暖通空调*, 2018, 48: 7–12]
- 27 Cai Z J, Long T Y. *Fluid Mechanics Pumps and Fans* (in Chinese). 4th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999. 308–310 [蔡增基, 龙天渝. *流体力学泵与风机*. 第四版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. 308–310]
- 28 Xu Z L. *Design of Cleanrooms and Associated Controlled Environments* (in Chinese). Beijing: Chemical Industry Press, 2023. 106–107 [许钟麟. *洁净室及其受控环境设计*. 北京: 化学工业出版社, 2023. 106–107]
- 29 Lu Y Q. *Practical Heating and Air Conditioning Design Manual* (in Chinese). 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. 187–214 [陆耀庆. *实用供热空调设计手册*. 第二版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. 187–214]

Summary for “高等级生物安全设施通风系统风机配置模式综合分析”

Comprehensive analysis of fan configuration modes in the ventilation system of high-level biosafety facilities

Guoqing Cao^{1*}, Ziguang Chen¹ & Rong Wang²

¹ *Jianke Environmental Energy Technology Co., Ltd, Beijing 100013, China;*

² *School of Environmental Science & Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*

* Corresponding author, E-mail: cgq2000@126.com

The frequent occurrence of infectious diseases such as the novel coronavirus and SARS-CoV-2 has seriously affected human health and the social economy. Numerous high-level biosafety facilities, including high-level biosafety laboratories and risk workshops, have been developed worldwide to deal with highly pathogenic microbes and provide a relatively safe experimental environment. However, accidents involving laboratory-acquired infections are often reported due to the lack of protective technology and awareness during experimental procedures. This situation necessitates the implementation of a set of standard operating procedures, usage of personal and collective protective equipment, and development of engineering controls to prevent personnel from being exposed to potential infectious doses. One of the main features of engineering controls is related to the ventilation system, with ventilation fans (e.g., supply and exhaust fans) as the key equipment. Supply fans are used to provide make-up air to offset exhaust and ventilation air for dilution control and room pressurization, while exhaust fans are used to meet the exhaust demand of collective protective equipment (e.g., biological safety cabinets and individually ventilated cages) and laboratory ventilation requirements.

The core measure for the safety of biosafety facilities is to maintain negative pressure through the ventilation system. Ventilation fans are the key equipment used to ensure the safety of high-level biosafety facilities. Some important issues, including their selection calculations, redundant backup configurations, operation modes, and automatic control schemes, have attracted increasing attention from designers. Relevant domestic and international norms, standards, and guidelines have proposed clear requirements for ventilation-fan configurations. On the basis of comparing these requirements combined with actual engineering examples, herein, a comprehensive analysis is conducted on the ventilation-fan configuration, including fan operation modes, mutual backup of multiple fans, variable frequency control, and fan selection in high-altitude areas.

Ventilation-fan configurations should be determined based on risk assessment. Each ventilation and air conditioning system should be equipped with two independent supply fans (one for use and another for backup) and two exhaust fans (one for use and another for backup); this is the best engineering choice. Due to the many factors affecting pressure fluctuations in high-level biosafety facilities, fan-frequency conversion control is considered one of the most effective pressure gradient controls and energy-saving operation measures for high-level biosafety facilities. When selecting ventilation fans for high-level biosafety facilities, the total pressure of ventilation fans should be revised according to the ambient atmospheric pressure, considering the differences in air density in areas with different altitudes. This research provides suggestions for the future construction and development directions and promotion of high-level biosafety facilities in China.

biosafety laboratory, high biosafety risk workshop, ventilation system, fan configuration mode, standard specification

doi: [10.1360/TB-2023-0567](https://doi.org/10.1360/TB-2023-0567)