

# 三级生物安全实验室的安全防护设计及实践初探

孙亮 杨旭华

中国中元国际工程有限公司

**摘要：**随着社会经济的不断发展，高等级生物安全实验室的建设数量不断攀升。本文着眼于三级生物安全实验室建设中的重要环节-安全防护设计，重点阐述相关的概念、防护对象、具体技术措施及实践案例的分享解析，对生物安全实验室建设中有关技术要点进行详细论述，希望对此类项目未来的建设提供有益的帮助。

**关键词：**三级生物安全实验室；安全防护设计；技术措施

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.22.116

## 一、生物安全实验室概述

生物安全实验室 (biosafety laboratory)，也称生物安全防护实验室 (biosafety containment for laboratories)，是通过防护屏障和管理措施，能够避免或控制被操作的有害生物因子危害，达到生物安全要求的生物实验室和动物实验室。

在《实验室生物安全通用要求》分类要求中，按其操作生物因子的危害程度和相应的防护措施，将生物安全实验室的生物安全防护水平分为4级。其中对个体和群体低危害和中等危害的通常为BSL-1级、BSL-2级。对个体和群体危害程度较高的为BSL-3级、BSL-4级。

BSL-3级：通过直接接触或气溶胶使人传染上严重的甚至是致命疾病的致病因子，通常有预防和治疗措施。

通常生物安全水平为BSL-1、BSL-2的实验室称为基础实验室，病原微生物危害等级较小，常为I级、II级。实验室的类型多为基础教学、研究，初级卫生服务、诊断、研究。BSL-3级以上的则多为屏障实验室、BSL-4级称为高度屏障实验室。

本文以生物安全水平BSL-3级实验室为主要研究对

象，针对此类实验室的安全防护有关措施进行论述。BSL-3生物安全防护三级实验室，简称P3实验室（下文简称P3实验室），P代表Physical Containment（物理性防护）。这类实验室专门处理病原体且可能会因吸入而导致严重或潜在的致命疾病，但已具有相应的治疗方法。这些病原体包括各种细菌、寄生虫和病毒，例如：炭疽杆菌、结核杆菌、马脑炎病毒、SARS冠状病毒、伤寒杆菌等。

## 二、安全防护设计的保护对象

P3实验室因实验对象具有严重致病性的特点，会随着环境产生不宜发觉的生物气溶胶而加大传染扩散的风险。因此该类实验室需对使用者和实验品（洁、污物品）进行严格的安全防护设计，以确保人员和物品的安全性。防护对象可通俗理解为使用人员、实验品、实验环境。针对前二者需在建筑设计中设计专用的人流、物流路线，进行物理性实体隔离。实验环境则需要在通风空调、监控报警及自动控制方面进行特殊设计。

人流路线通常为：入口→外缓冲（一更）→淋浴→外更衣（二更）→内准备间→缓冲→BSL-3及ABSL-3核心工作间。

物流路线通常为：物品处理→高压蒸汽灭菌器→内准备间→传递窗→BSL-3及ABSL-3核心工作间。

## （三）安全防护的技术措施

安全防护设计主要针对人、物、环境来进行，采用的设计策略可以统称为隔离措施。生物安全实验室一般会实施两级隔离，一级隔离是在操纵对象（试验品）和操纵者（实验人员）之间，主要通过生物安全柜、负压隔离器等设施装备实现。二级隔离是在实验室和外部环境之间，通过建筑技术（如建筑平面布局、空调净化和电气控制系统）实现，P3实验室实施两级隔离。

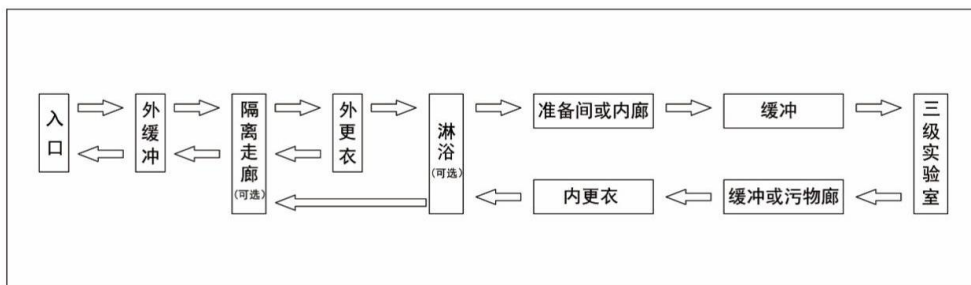


图1 P3级实验室人员进出流程示意图

## （一）建筑平面布局

根据实验操纵对象和工艺要求，P3实验室一般划分为污染区、半污染区和清洁区。在不同的区域之间、实验室进出口及有特殊需要的地方设置缓冲间，该缓冲间起到区域间的过渡隔离作用，通常有一定的洁净度级别要求并且进出的两樘门不应同时开启。每个不同区域之间应设有明显的区域标志和负压显示装置。

在房间布局规划上常为两种方式，“三区两通道”和“三区一通道”，所谓的“三区”即指上面所提到的污染区、半污染区、清洁区。“两通道”指人、物独立的通道，“一通道”指人、物混合的通道。如果面积和成本情况允许，在P3实验室中最好设计“两通道”的模式。如条件有限在做好防护措施的情况下“一通道”的模式也可行。

P3实验室中的清洁区为未被病原微生物污染的区域。通常包括：办公区、休息室、监控室、更衣间（清洁）、培养基配置室与试剂储藏室等。半污染区为可能被病原微生物污染的区域。包括：更衣间（防护服）、淋浴间、缓冲间及核心工作间的缓冲间、内准备间。污染区为已被污染的区域，如：接收标本、接种、分离培养、鉴定等核心工作间。实验人员在进入核心工作间，要经过一更、淋浴至二更，在此穿上内层和外层的隔离衣、防护服，戴帽子、手套、面罩、鞋套等，确保实验人员的身体完全覆盖，减少接触致病微生物的可能性。离开前在二更中换下防护服、淋浴后、穿上清洁服。实验室的物料、实验品进出均应经清洁、净化或消毒灭菌实施处理。进入实验室的所有物品，必须经彻底消毒后方可带出实验室。在实验过程中产生的废品及污物须装入可高压灭菌的黄色塑料袋，并置于防渗漏的容器内，经温度达120℃以上双扉高压灭菌锅、时间30分钟以上灭菌后方可送出。



图2 呼吸过滤器

### （二）室内净化通风环境

P3实验室中使用的环境为人工环境，利用设置的空调净化、通风系统实现室内空间的气流组织、净化等级、环境舒适等要求。合理的压力梯度控制和气流组织是确保实验室环境稳定性和安全性的重要前提。在实验室的空调系统中通过安装压力传感器和控制器，可以实时检查室内的压力值，并对其进行监测和调整。实验室的气流应由“清洁区”流向“污染区”，室内空气须经高效过滤后通过排风管道排出，不得从其他部位排至室外。

实验室内的排风口不应采用双侧均匀分布的布置，应确保生物安全柜与排风系统的压力平衡。排风口要远离实验台和操作区域，用以充分地移除污染物和有害气体。合理设置排风口的数量，通常每个排风口应能满足200平方米的实验室面积。为防止排出有害气体和微生物，排风系统应配备初、中、高效三级过滤，为保证其有效性过滤器应定期更换和清洁。在进风和排风总管处安装气密性生物密闭阀，采用耐化学腐蚀和高温的材料

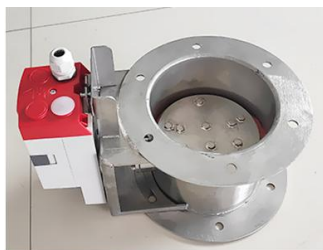


图3 生物密闭阀图

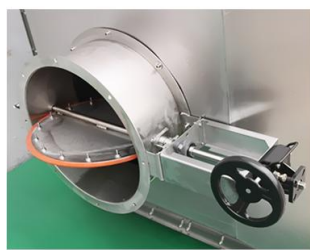


图4 生物密闭阀安装

如：聚四氟乙烯（PTFE）或硅胶密封圈来有效组织气体和颗粒物的泄漏。必要时完全密封对实验室内部进行化学熏蒸消毒。

### （三）监控及自动控制系统

P3实验室中设置监控及自动控制系统，也是保障运行使用的关键环节。该系统需要对空调通风、报警、门禁、以及安防等多个系统进行控制。对于实验室的使用人员须进行授权，核心工作区的人员更须进一步设计限制条件，在生物安全柜及实验动物的负压通风笼等重要位置须设监控，了解其工作运转情况。对实验室的压力值、主实验室和准备间的压力梯度进行报警监控。当低效、中效、高效过滤器两侧的压差、过滤器的堵塞情况超出测量标准时，能够自动进行报警。在主实验室中有应急情况（如停电、火灾等）出现时，室内的紧急报警开关应做出及时反馈并实施动作。

### 四、工程设计实践

在2020年秋，正值新冠疫情肆虐全国之际，笔者参与到西南区域某省的P3实验室的设计建设项目之中。该实验室设置于院区一栋的独立建筑生物安全楼之中，与周边建筑留有足够的安全距离。该建筑整体地上4层、局部3层，总建筑面积4345m<sup>2</sup>，建筑高度21.5m。

#### （一）工艺平面布局原则

单体建筑以实验室为核心，以人为本注重安全，按照不同安全等级科学划分实验室区域，为实验人员提供安全可靠的研究环境。办公区相对独立，按照“技术先进、安全适用、确保质量”的工程设计原则，利用园区用地与资源，建设一个环境优美、高效有序、科学严谨的现代化疾病预防控制中心。生物安全楼共四层（生物安全三级实验室独立成区，局部三层），分设南北两个主要出入口，北侧为人员及园区内部人员物品主要出入口，南侧为外来货物及污物出入口，废物运输至园区垃圾站。本单体靠近主要出入口分别设置一部客梯及一部货梯。

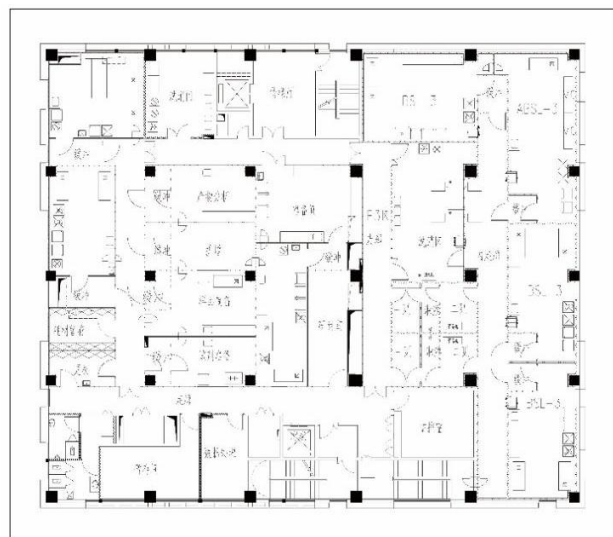


图5 P3生物安全实验室平面布置图

#### （二）生物安全实验区

P3生物安全实验室位于实验楼东侧，独立成区，

包含2套三级生物安全实验室，共4个核心工作间（3间BSL-3、1间ABSL-3），其中一套设2间BSL-3实验室，另一套设1间BSL-3实验室1间ABSL-3实验室。实验区吊顶上为管道夹层，主要布置送、排风高效过滤器及空调管道。管道夹层上部为空调机房，位于实验楼三层。实验楼一层设置活毒废水处理间，用于处理三级生物安全实验区防护区内排放的废水。每套三级生物安全实验区均具有独立的人员、物品出入口，每个核心工作间有独立缓冲间，实验物品通过生物安全型双扉高压灭菌器，灭菌后送出实验室防护区，2套三级实验室共用1间消毒间。

设备配套：II级A2双人生物安全柜、生物安全型双扉高压灭菌器、传递窗、温箱、冰箱、冻干机、封口机、低温离心机、小鼠、豚鼠负压隔离笼具等。



图6 II级A2双人生物安全柜



图7 双扉高压灭菌器

在生物安全楼的一层和二层西侧区域，设有菌种库和样本库。菌毒种及样本存储于不同温度冰箱或液氮中。工作人员需更衣进入，样品出入通过接受发放管理，超低温冰箱及生物安全柜等设备通过缓冲进出库区。高致病性菌毒种库和三级生物安全实验区域由内部独立楼梯间通过传递窗进行菌毒种传递。

### （三）实验区设备设施

P3生物安全实验室内气流组织自污染较轻流向污染较重的区域。实验室送排风支管道设置定风量阀，以利于初调节时系统风量的平衡。需要压力保证的重要实验室、变风量通风柜排风支管、风量变化频繁的实验室送风管道等处安装变风量阀，以保证在风量变化时不影响其他房间的风量平衡。

实验室的新风经高效过滤器过滤后送入室内，排风经过可原位检漏的高效过滤风口过滤后高空排放。实验室各个房间新排风支管道上安装电动密闭阀，房间不使用时关闭，避免相互污染。动物房等有恶臭污染物排放的实验室，采用活性炭除臭装置过滤排风，过滤后的排

风高空排放。

通风柜为变风量控制，通过风门位移探测器控制与通风柜一对一设置的变风量阀，以维持风门处的面风速恒定。安装此类设备实验室的送排风管道也安装变风量阀门，与通风柜上的变风量阀连锁。在补风需求太大时，也可增加送风量；以适应实验室风量的变化。通风柜排风机设置在屋顶，通过等离子光氧一体废气处理机光催化及吸附处理后排放。



图8 等离子光氧一体废气处理机

在菌种库、P3实验室等位置的主要出入口、电梯前室，设置双鉴探测器、紧急报警按钮及声音复核装置等，组成入侵报警前端网络。在各楼内的主要出入口、公共走廊、P3实验室、重要物资品库房、菌种库、电梯轿厢内等重点部位设彩色摄像机。在重要的部门外门窗加设防盗设施。

实验废水单独排放：高压灭菌器等高温排水单独排至室外降温池，降至40℃以下后排至院区内污水处理站；三级生物安全实验室设置独立的排水及通气系统，活毒废水就地收集，经灭活罐灭活后排出室外；活毒废水管道系统的通气管汇集后需经两级串联的高效过滤器HEPA处理后方能排放。实验室强酸强碱及有机废液等危险废物收集后送交有资质单位处理。

### 五、结论

随着国内生物技术的逐步扩展、科研项目不断扩大的新形势下，高等级生物安全实验室的建设正在加速发展。P3级实验室的建设对于区域科研能力的提升起到承上启下的重要作用。只有通过严控其安全防护技术措施，才能更好地为使用者提供安全可靠的工作环境，成为相关研究工作的有力支撑。

### 参考文献

- [1] 秦玉强. 我国高级别生物安全实验室现状和发展目标探讨[J]. 暖通空调, 2018, 48 (01): 2-6, 65.
- [2] GB50346-2011, 生物安全实验室建筑技术规范[S].
- [3] GB19489-2008, 实验室生物安全通用要求[S].
- [4] 张文胜. 《生物安全实验室设计与建设》等专著出版[J]. 暖通空调, 2019, 49 (05): 94.

作者简介：孙亮，1977年，男，汉族，籍贯：山东省金乡县，学历：硕士研究生，职称：高级工程师，研究方向：医疗建筑设计。

杨旭华，1977年，女，汉，籍贯：北京市朝阳区，学历：硕士研究生，职称：高级工程师，研究方向：医疗建筑设计。