

Innovative Practice of Key Technologies in Nucleic Acid Detection Laboratory of Gas Membrane Building Structure

Chen Wurong¹, Su Yunsheng², Chen Zhaorong^{3,*}, Li Wenqi¹, Yin Ye¹, Wen Lijuan⁴, Li Ruoyu⁵, Chen Weijun¹

¹BGI Genomics Co., Ltd, Shenzhen, China

²College of Design and Innovation, Tongji University, Shanghai, China

³China Construction Fifth Engineering Bureau the Third Construction Co., Ltd. Changsha, China

⁴Clinical Medical Examination, Regular College Course, Guangzhou Development Zone Hospital, Guangzhou, China

⁵Shanghai Etopia Building Technology Co., Ltd, Shanghai, China

Email address:

245140142@qq.com (Chen Zhaorong)

*Corresponding author

To cite this article:

Chen Wurong, Su Yunsheng, Chen Zhaorong, Li Wenqi, Yin Ye, Wen Lijuan, Li Ruoyu, Chen Weijun. Innovative Practice of Key Technologies in Nucleic Acid Detection Laboratory of Gas Membrane Building Structure. *Science Discovery*. Vol. 10, No. 1, 2022, pp. 7-16. doi: 10.11648/j.sd.20221001.12

Received: December 16, 2021; Accepted: January 5, 2022; Published: January 8, 2022

Abstract: The novel corona-virus pneumonia outbreak that broke out at the end of 2019, and it has spread to many countries around the world, so the world's public health security is facing great challenges. As a key medical resource, nucleic acid testing laboratories directly affect the management and control capabilities of countries in response to the epidemic; there are disadvantages in the traditional laboratories for nucleic acid testing, such as high implementation costs, long construction periods, difficult installations, and difficult overall storage and transportation. In view of the rapid spread of the virus, it is particularly important to solve the problems that how to quickly provide laboratories for nucleic acid testing, which must be with fast mass production, low cost, easy installation, and convenient storage and transportation. This article introduces the importance of viral nucleic acid testing laboratories, and discusses the domestic nucleic acid testing capabilities during the epidemic and the innovative solutions of testing laboratories. An innovative design plan was proposed, the air-film structure nucleic acid testing laboratory adopted fresh air systems to achieve positive and negative pressure conversion, it equipped with intelligent technical equipment and combined with air film structure, which is rapid installation and high airtightness. The air-film structure nucleic acid testing laboratories have been successfully used in 9 countries and 26 cities in the world. The local nucleic acid testing capabilities have significantly improved, it was up to 1,000,000 single tubes a day. The newly designed laboratories have contributed to global epidemic prevention and control.

Keywords: Air-film Structure Building, New Type of Coronavirus Pneumonia, Nucleic Acid Testing Laboratory, Positive and Negative Pressure Conversion, Intelligent

气膜性建筑结构核酸检测实验室关键技术的创新实践

陈戊荣¹, 苏运升², 陈兆荣^{3,*}, 李雯琪¹, 尹焯¹, 温丽娟⁴, 李若羽⁵, 陈唯军¹

¹深圳华大基因股份有限公司, 深圳, 中国

²同济大学设计创意学院, 上海, 中国

³中建五局第三建设有限公司, 长沙, 中国

⁴广州开发区医院, 广州, 中国

⁵上海易托邦建筑科技有限公司, 上海, 中国

邮箱
245140142@qq.com（陈兆荣）

摘要：2019年底爆发的新型冠状病毒肺炎疫情已蔓延至全球多国，世界公共卫生安全面临极大挑战。核酸检测实验室作为关键性医疗资源，直接影响各国应对疫情的管控能力；传统核酸检测实验室的建筑结构和负压空调系统实施成本较高、建造周期较长、安装难度高、难于整体储备和运输。针对病毒快速传播的特性，如何快速地提供一种量产快、成本低、安装简易、储运便捷的核酸检测实验室显的尤为重要。本文介绍了病毒核酸检测实验室的重要性，探讨了疫情期间国内核酸检测能力情况与检测实验室创新方案相关研究；利用新风系统实现正负压转换和配以智能化技术设备，结合气膜结构建筑快速安装和高密闭性的特点提出了气膜结构核酸检测实验室创新设计方案，并成功用于全球9个国家，共有26座城市启动了气膜版火眼实验室，合计建设日检测通量达100万单管，显著提升了当地的核酸检测能力，有助于全球疫情防控。

关键词：气膜结构建筑，新型冠状病毒肺炎，核酸检测实验室，正负压转换，智能化技术

1. 引言

从2019年底至今，新型冠状病毒肺炎疫情令世界公共卫生安全面临极大挑战。据世界卫生组织发布的新冠疫情统计数据显示，截止北京时间2021年11月30日16:22，全球疫情累计262,203,718例，累计死亡5,207,775例[1]；其中我国确诊127,825例，死亡5,697例，治愈119,249例[2]。

新冠疫情已在全世界范围迅速发展成一起特别重大传染病疫情。在本次疫情防控过程中，我国国家治理体系的制度优势和强大基建能力得到了充分体现，但另一方面也暴露了城市流行病防疫的软肋，尤其在公共卫生医疗系统较薄弱的国家，如果没有强大基建能力和紧急调度的协控能力，疫情将会在该国全面失控，全球疫情概览见图1所示。



图1 全球疫情概览（来源：约翰斯·霍普金斯大学）。

为应对全球百年来最大公共卫生危机和不同流行病在人类社会加剧蔓延的危险，以及冬季时期疫情复发的可能，加强综合筛查检测常态化建设能力极为重要。在新冠疫情防控过程中，需进行大量病毒核酸检测以确诊病例、发现疑似病例和监控病人病程发展，同时还需监测病毒在传播过程中可能发生的变异和其他病原体。但病毒核酸检测的环节多，污染危险大，其检测实验室对气流控制、负压环境、洁净度等还有极为严苛的要求，突发急性感染病原微生物核酸检测时往往需要高级别的生物安全要求。

核酸检测实验室室内需要维持负压状态保证空气定向流动，以有效防止被传染性病原微生物污染的空气向污染概率低的区域及外环境扩散。实现负压环境的新风系统是一种强制性机械排风设备，如果房间密闭性不好，室外的空气会从房间缝隙进入室内，影响新风质量[3-4]。由此可见，核酸检测实验室必须有一定的气密性。而传统实验

室的建筑结构无法实现完全密闭，需要构造复杂的负压系统，通过专业计算机编程控制器实现室内负压系统的自动控制。但大部分临床检测实验设备落后、硬件条件差，甚至基本的生物安全仍未满足。更有甚者，在某些国家或地区根本没有病毒核酸检测的实验室。

该项目的目标是通过气膜性建筑结构核酸检测实验室关键技术的创新实践使全球疫情得到控制。快速研发出在疫情爆发不确定性的应急产品，用最短时间建成大量负压空间，同时可方便储存在全球不同国家的后备基地，疫情爆发后精准调配到各个城市。通过饱和检测，及早发现感染者；通过饱和收治，极力降低病死率。当认识到这是一场全球同时爆发的疫情，首先考虑的是如何在最短时间内建成大量负压空间，同时可空运到世界各地。从去年2月中旬开始，同济大学设计创意学院苏运升就构思了充气膜结构的防护隔离系统，并带领团队申请了专利、开发了

样品。随着去年初全国抗击疫情形势日益严峻，华大基因董事长汪建提出通过“火眼”实验室一体化建造方案来解决城市检测能力不足的问题，而后华大基因CEO尹烨和同济大学苏运升基于新冠病毒检测需求和痛点，共同萌生了火眼实验室（气膜版）的想法[5-6]。

充气膜结构建筑体系是这些年发展起来的创新建造技术，建造速度快，性价比高，便于日常储存，并且体积压缩比高，运输快捷，便于在各个城市间调配资源，也便于利用现有的生产系统及时大规模生产和建造。利用双层充气拱结构，其弧度使得结构稳固，形似有1400多年历史的中国赵州桥。

2. 疫情期间国内核酸检测能力情况与检测实验室创新方案研究

2.1. 国内核酸检测能力情况

截至2021年10月24日，已收录全国8500多个核酸检测点并持续更新。与去年疫情发生之初相比，全国医疗卫生机构的核酸检测能力有了大幅提升。在检测能力方面，全

国核酸检测能力从3月初的每天126万人/份，提高到目前1500万人/份，检测量世界第一。

在疫情爆发前期，因核酸检测实验室供应量不足，大量患者无法确认，无法进行及时救治。由此可见，在应对重大突发公共卫生事件时，检测实验室医疗资源供给与配置模式起决定性的作用。在本次新冠肺炎疫情中，核酸检测实验室作为关键性医疗资源，直接影响了各国应对疫情的管控能力[7]。

2.2. 核酸检测实验室国内外设计发展动态

由于新冠病毒是全新的传染病，根据其飞沫气溶胶传播、接触传播、口粪传播的特征，需要针对新冠病毒的隔离病房的对应不同分级的生物安全实验室的环境标准深入研究。

生物安全实验室是指达到生物安全防护标准的实验室，根据病原对人体危害的程度，美国国立卫生研究院(NIH)及美国疾病控制中心(CDC)分别将生物安全实验室定为P1、P2、P3、P4。以BSL-1、BSL-2、BSL-3、BSL-4 (bio-safety level, BSL)表示仅从事体外操作的实验室的相应生物安全防护水平。

表1 生物安全实验室分级。

分级	生物危害程度	操作对象
一级	低个体危害，低群体危害	对人体、动植物或环境危害较低，不具有对健康成人、动植物致病的致病因子
二级	中等个体危害，有限群体危害	对人体、动植物或环境具有中等危害或具有潜在危险的致病因子，对健康成人、动物或环境不会造成严重危害，有有效的预防和治疗措施
三级	高个体危害，低群体危害	对人体、动植物或环境具有高度危害性，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，或对动植物和环境具有高度危害的致病因子，通常有预防和治疗措施
四级	高个体危害，高群体危害	对人体、动植物或环境具有高度危害性，通过气溶胶途径传播或传播途径不明，或未知的、高度危险的致病因子，没有预防和治疗措施

来源：《GB50346-2011生物安全实验室建筑技术规范》

根据不同生物安全实验室的防护级别和相应的环境指标，未经培养的感染性材料在采用可靠的方法灭活前进行的病毒抗原检测、血清学检测、核酸提取、生化分析等

操作应在生物安全二级实验室开展，同时采用生物安全三级实验室的个人防护。生物安全主实验室二级屏障的主要技术指标见表2所示。

表2 生物安全主实验室二级屏障的主要技术指标[8-9]。

级别	相对于大气的最小负压	与室外方向上相邻相通房间的最小负压差(Pa)	洁净度级别	最小换气次数(次/h)	温度(℃)	相对湿度(%)	噪声[dB(A)]	平均照度(lx)	维护结构严密性(包括主实验室及相邻缓冲间)
BSL-1/ABSL-1	--	--	--	可开窗	18-28	≤70	≤60	200	--
BSL-2/ABSL-2中的a类和b1类	--	--	--	可开窗	18-27	30-70	≤60	300	--
ABSL-2中的b2类	-30	-10	8	12	18-27	30-70	≤60	300	--
BSL-3中的a类	-30	-10							
BSL-3中的b1类	-40	-15							所有缝隙应无可见泄漏
ABSL-3中的a类和b1类	-60	-15							
ABSL-3中的b2类	-80	-25	7或8	15或12	18-25	30-70	≤60	300	房间相对负压值维持在-250Pa时，房间内每小时泄漏的空气量不应超过受测房间净容积的10%
BSL-4	-60	-25							房间相对负压值达到-500Pa，经20min自然衰减后，其相对负压值不应高于-250Pa
ABSL-4	-100	-25							

注：1三级和四级动物生物安全实验室的解剖间应比主实验室低10Pa。

2本表中的噪声不包括生物安全柜、动物隔离设备等的噪声，当包括生物安全柜、动物隔离设备的噪声时，最大不应超过68dB(A)。

3动物生物安全实验室内的参数尚应符合现行国家标准《实验动物设施建筑技术规范》GB50447的有关规定。

仪、QPCR仪等新冠病毒核酸检测设备,未来可扩充抗体检测设备、基因测序仪、高性能服务器等先进实验室设备[14]。

火眼实验室(气膜版)还具有全国产、高集成智能化、可收纳、易运输等优点。打包后可以通过货机空运,可实现灵活选址、快速布局、快速建造、快速启用,可根据需求灵活调整配置,帮助各个国家快速建立和提升用于确诊新冠的核酸检测能力。火眼实验室(气膜版)平面图及流线图见图2所示。结构图、表面图、剖面图见图3~5所示。

人流和物流和垃圾流向:

①人流出入口采用入口缓冲区→入口更衣区→样本接收区/标本制备区/扩增区→出口更衣区→入口缓冲区流向管理。

试剂出入口采用入口缓冲区→入口更衣区→标本制备区流向管理。

②设备出入口采用样本接收区/标本制备区/扩增区的通道门流向管理。

③样本出入口采用标本接收区→标本制备区→扩增区的传递窗流向管理。

④垃圾出口采用样本接收区/标本制备区/扩增区的专用垃圾传递窗流向管理。

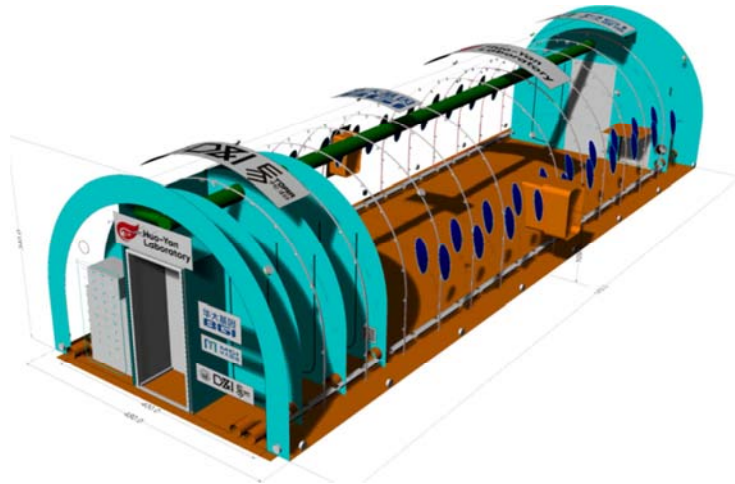


图3 火眼实验室(气膜版)结构图。



图4 火眼实验室(气膜版)表面图。



图5 火眼实验室(气膜版)剖面图。

3.2. 系统创新设计方案

(1) 气膜建筑特性

充气膜结构按照形态可分为单层充气膜结构、双层充气膜结构和管式充气膜结构；按传力途径和膜内气压不同，分为气承式和气囊式。本气膜建筑采用双层充气膜结构，属于气囊式充气膜结构，通过在膜面形成的密闭空间中充气使膜面张紧以获得抵抗外部荷载所需的张力[15]。

本气膜建筑主体采用PVC夹网布，具有易成型、防风雨、防潮湿、抗紫外线、阻燃的特点，并用热合技术确保气膜结构密闭性。使用环境也可满足不同地区的环境条件，既可放在室内，也可放在室外。且经实践检测，本气膜实验室的抗风等级：7级（极限9级）；最大积雪载荷45kg/m²；耐温：-40℃~120℃；阻燃性能等级：B1(B-s1)；抗紫外线等级：灰级等级4。

气膜材料采用B1级阻燃材料建造，同时配置消防灭火设备，且逃生时通过尖锐物品划破气膜便可快速逃生。气膜版火眼实验室属于单层平房，疏散距离符合国家防火规范，电力设备采用符合生产资质的厂商生产的国家及出口认证标准的电箱，采用阻燃电缆，因此防火疏散也具有保障。

气膜只需充气即可快速成型，前期搭建与后期运营耗能都比传统建筑大大减少，具有极高经济性。

气膜建筑内部同样具有舒适性，气膜建筑系统的内部空间中，气压、温度、湿度、新风量、照度等皆可按需控制。且有效利用膜材对光的高反射率为建筑内部提供均匀的照明效果。室内的透光膜可视窗，能够充分利用日间自然光的效果。因此应用膜结构搭建气膜实验室均可满足生物安全实验室节能、环保和舒适性的要求。

(2) 高体积压缩比以便空运

气膜建筑高体积压缩比，能够进行空运，或者在有限的空间内放置多个进行陆运。如用集装箱的解决方案，占用的空间大，空运承载量有限，只能用铁路运输或者轮船海运。而要运到海外国家，尤其是欠发达的国家和地区，首先要确保有铁路可通行，而采用轮船运输，则会大大增加运输时间。

飞机按机身尺寸分为窄体飞机、宽体飞机，按机舱载货类型分为全货机和客货两用机。日检测通量达5000份的气膜实验室所需三个气膜单体和一个备用气膜单体，经测量计算，气膜主体打包后长宽高分别为2m、1m和1m，体积约为2m³，重量约为400kg；气膜主体及其所有相关配件装箱后的总体积约为40m³，总重量为6000~7000kg；为方便标准化装货运输，考虑到货车装载货物限制和飞机舱门尺寸限制，每个木箱规格不超过2.4m×1.2m×1.3m。因此根据货物规格，主要考虑采用宽体飞机运输，常见机型基本都可运输。常见机型表见表3所示。

表3 常见机型表。

机型	类型	载客量	载货量	容积（立方米）	适航距离（公里）	备注
		标准布局（人）	理论（吨）			
A319	窄体	124	3	10	6850	客机
A320	窄体	150	4	20	6100	客机
A320neo	窄体	165 (189)	4	30	6500	客机
A321	窄体	185	4	20	5950	客机
A321neo	窄体	185 (240)	6	40	7400	客机
A330-200	宽体	253 (293)	15	130	13400	客机
A330-300	宽体	295 (335)	20	162	11300	客机
A330-200F	宽体	/	65	/	7400	货机
A340-600	宽体	380 (419)	24	200	13900	客机
A350-900	宽体	315	25	160	14350	客机
A380-800	宽体	555 (644)	20	125	15000	客机
B737-700	窄体	126 (149)	4	27	6000	客机
B737-800	窄体	162 (189)	5	15	5660	客机
B737-900	窄体	189 (215)	6	52	5900	客机
B737nax	窄体	175 (200)	/	44	6500	客机
B737F	窄体	/	14	120	4100	货机
B747-400	宽体	416	25	170	13500	客机
B747-200F	宽体	/	100	600	8300	货机
B747-400F	窄体	/	100	600	10000	货机
B757-200	窄体	243 (280)	4	40	6400	客机
B767-400	宽体	245 (304)	6	40	10400	客机
B767-300F	宽体	/	54	400	6000	货机
B777-200	宽体	320 (440)	25	90	9600	客机
B777-300	宽体	368 (451)	25	100	11100	客机
B777F	宽体	/	100	600	9100	货机
B787-8	宽体	223 (242)	16	120	13620	客机
B787-9	宽体	259 (290)	16	150	14140	客机

来源：广州悦递安国际货运代理有限公司理论数据资料

(3) 充气结构可快速搭建、灵活布局

气膜实验室通过充气膜结构和预制化建造系统结合，确保整个系统密闭，气膜被内部气压顶起，大大简化了建筑支承的结构。一个气膜实验室利用智能充气设备充气，只需要20分钟，便可完成充气，挺立成型。因气膜结构特性，设置灵活，对搭建场地基础要求低，可适应不同的基地，室内室外均可，并且可随时搬迁。气膜自重轻，可建筑于原有建筑之上，如在室外则需要考虑当地环境影响的因素。气膜实验室还可实现快速拆卸，之后进行折叠打包储存，可反复多次使用。

除了气膜主体本身能够快速搭建外，强电配电箱、电缆插座、智能设备等设备都已在工厂预制化安装好，大大节约了安装时间和减小了安装难度。气膜实验室功率主要分为三部分，包括气膜自带功率（照明、空调和新风机组功率）和生产设备功率，以5000通量为例，总负荷不超过100KW，每个气膜单体配备一个三级配电箱，三个三级配电箱配备一个二级配电箱。气膜充好气后，只需在配电箱上连接好电缆，并将预制好防水盒（插排功能）的电缆直接拉进实验室，实验设备接上电源后即可投入使用。传统实验室和火眼实验室安装人工时对比表见表4所示。

表4 传统实验室和火眼实验室安装人工时对比表。

类型	通量	面积	工人	国内安装工时	国际安装工时	备注
传统实验室	10000通量	435m ²	20人	90天	120天	含设计、咨询造价、施工周期
气膜实验室	10000通量	435m ²	10人	1天	2天	

（4）新风系统正负压转换的实现

气膜检测实验室的功能区是通过膜结构将其分开，并和气压差分区相结合，从而实现人流、物流和垃圾流的有效分离。空调系统可调节的室内温湿度，再通过设置新风机与排风机，形成内部气流的定向流动。空气的进入与排出均经过HEPA高效过滤，以确保实验室空气的高效过滤。（新风机与排风机内的HEPA网等级越高，本次设计新风机与排风机的滤网级别为HEPA12，由三层滤网组成。）并且在气体排出环境前做消杀工作。空调产生的冷凝水和洗手池排放的污水也会被分别收集在污水箱并放入消毒片经由无害化处理后排放。

新风系统可实现室内正负压的转换，通过利用智能自动风阀控制新风机的送风风量和排风机的排风量，例如当送风量低于排风量时即可实现负压环境，不同的控制方法使病房不同功能区形成不同气压差，经实践验证，此系统的正负压转换值为±30Pa。

根据生物实验室相关规范的设计要求，在每个单体气膜建筑内，前后门设置了缓冲区、前门处的入口更衣间和出口更衣区。工作人员开启前门首先进入缓冲区，缓冲区内设置了洗手池；再从缓冲区进入更衣区穿防护服，然后进入到核心工作间；工作人员离开核心工作间时首先进入出口更衣区脱换防护服，再进入到缓冲区，然后从前门离开[16-18]。同样，根据生物安全实验室的设计规范，实验室安装的独立送排风系统，应确保在实验室运行时气流由低风险区向高风险区流动，同时确保实验室空气只能通过高效过滤器（本项目采用HEPA）过滤后经专用的排风管道排出[19]。因此气压压力值关系如下：入口更衣区>缓冲区>出口更衣区>核心工作间。同时根据相关规范要求，设定了不同区域具体的正负压参数值。火眼实验室（气膜版）气流情况见图6所示。

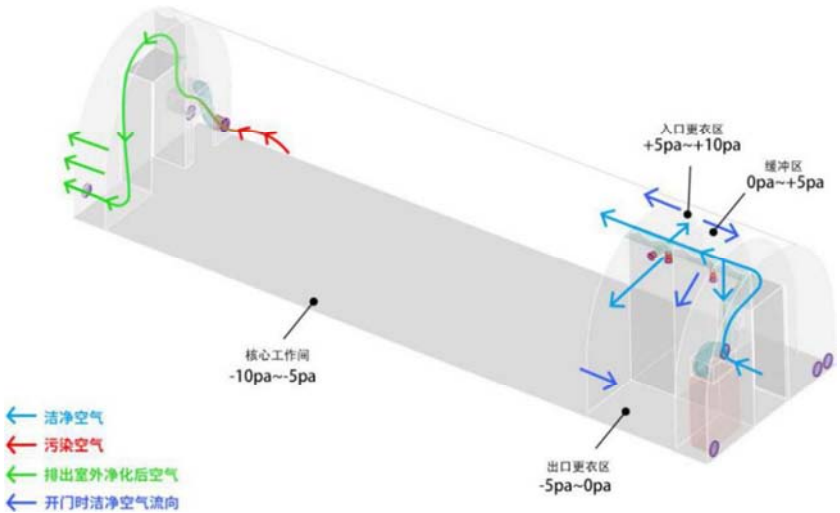


图6 火眼实验室（气膜版）气流情况（来源：自绘）。

根据计算得出气膜检测实验室截面面积为10.28m²，不含设备的室内体积为113.64m³，而每个舱内设备和人员占用体积比约为12%~17%，由此得出室内体积为96.12~99.51m³而室内空间所占风量比分别为：主舱空间80%、缓

冲间10%、入口更衣区5%和出口更衣区5%，按照P2实验室标准，每小时换气量需要在10~12次，满足洁净室洁净等级8~9级的要求，并根据相关规范要求，采用非单向流的气流流型，气膜检测实验室主要设定为顶送风侧下排风

的方式。因此实验室内不含设备的换气量为1130.8m³/h，含少量设备为1194.12m³/h，含最多设备为1153.44m³/h。火

眼实验室（气膜版）所需风量计算图见图7所示。

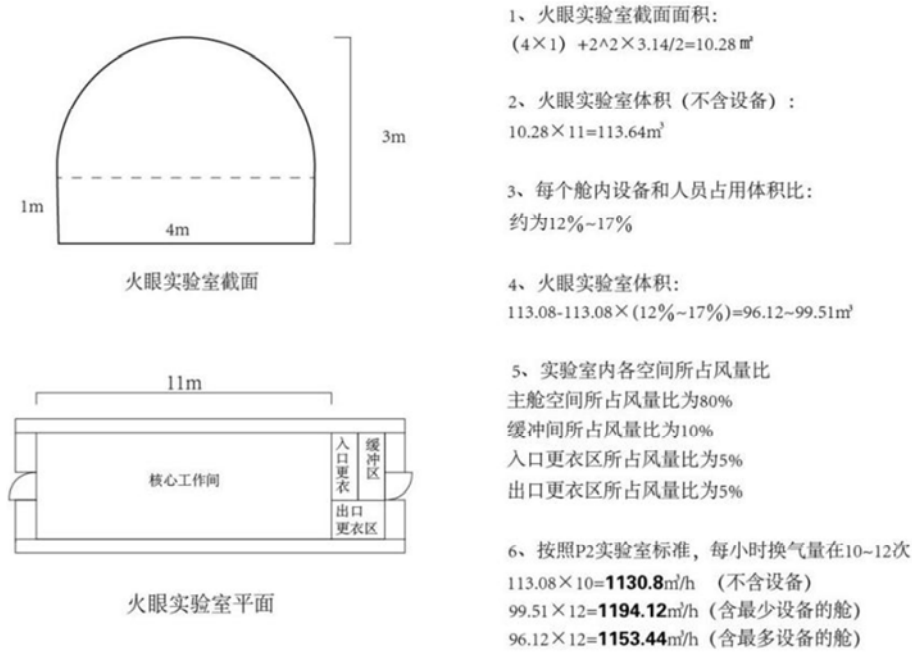


图7 火眼实验室（气膜版）所需风量计算图。

在计算新风量与排风量时，主要依据正负压漏风量、换气次数计算风量、人员满足风量进行综合考虑；其中正负压漏风量考虑不同区域的压强，根据《洁净厂房设计规范GB50073-2013》[20]进行确定，如按照换气次数法，当压差为5Pa时，正负压漏风量按照换气次数1~2次/h进行计算；当压差为10Pa时，正负压漏风量按照换气次数2次/h~4次/h进行计算。换气次数计算风量，即根据洁净等级与实验室标准确定的10~12次/h，对整个实验室空间进行

整体风量计算。而人员满足风量，主要考虑缓冲间、更衣间等较小面积情况下，其风量计算要满足每人40m³/h的要求。在三种风量计算中，考虑设备应用的房间数量，综合取得最大值，即为新风机选型所需风量，再根据得到的送风量，根据正负压要求，对正负压漏风量进行加减计算，得到排风机所需排风量；从而满足整个新排风系统的风量计算要求。各功能区风量情况见表5所示。

表5 各功能区风量情况表。

功能区	体积 (m³)	空气压力 (Pa)	换气次数	洁净要求	正负压漏风量 (m³/h)	换气次数计算风量 (m³/h)	人员送风量 (m³/h)	总送风量 (m³/h)	排风量 (m³/h)
核心工作间	113.08	-10	12	送风三级过滤	339.24	1356.96	200	1356.96	1696.20
缓冲间	6.40	5	8	排风高效过滤器	9.60	51.20	40	51.20	41.60
入口更衣区	6.40	10	8	/	19.20	51.20	80	80.00	60.80
出口更衣区	7.68	10	8	/	11.52	61.44	80	80.00	68.48
所有区域	/	/	/	/	/	/	/	1568.16	1867.08

来源：作者团队绘制

同时，考虑不同房间的压差、正负压漏风量和人员送风量的因素，最后经过计算得到最大总送风量是1568.16m³/h，最大总排风量是1867.08m³/h。因此，在实验室的在前后门隔间内分别设置了一台风量为2000m³/h的新风机，与风量为2000m³/h的排风机。前门处新风机从室外吸入空气并通过高效HEPA网经过三级过滤后，经风管与自动风阀的风量调控送达到各个区域，最后由后门处的排风机经过高效HEPA网过滤后排出室外，而实验室即通过送风、排风的风量差而形成气压差的原理来实现室内压差的调节。舱压控制系统会根据各个区域软管检测到空气

压力值，通过调节不同区域的风阀的开合度，来控制送风量，以保持每个区域不同的空气压力值，并保证气流从低风险区向高风险区流动。

（5）空调系统的设置

考虑实验室内高度集成化以及空间利用度高的优势，对实验室内的温湿度调节选择使用多个立式分体空调布置在主舱空间中。分体空调的选型主要依据于实验室的冷热负荷分布情况。根据实验室设计的相关规范规定，本实验室内温度控制在18~27℃，相对湿度为30%~60%，并在综合考虑实验室的地理位置（主要考虑天气参数）、

实验室内部的人体、渗透、新风、设备、照明等因素，通过谐波法计算得到实验室的冷负荷以及热负荷的情况。

不同的实验舱计算得到冷量的区别主要在其内部设备功率相差较大，因此对于内部设备较多，设备功率较大的实验舱来说，设备散热负荷成为冷负荷占比较大的部分；而由于实验室内部换气次数为12次/h，其新风负荷对室内冷热负荷影响同样较大，其原因在于引入室外新风时必然受到室外天气参数的影响，因此为了使得引入新风后室内达到设定的温湿度要求，空调系统需要对新风采取较多的冷热量调节。以火眼实验室（气膜版）的香港项目为例，以某一实验舱的冷负荷计算举例，主要占比如图8所示。

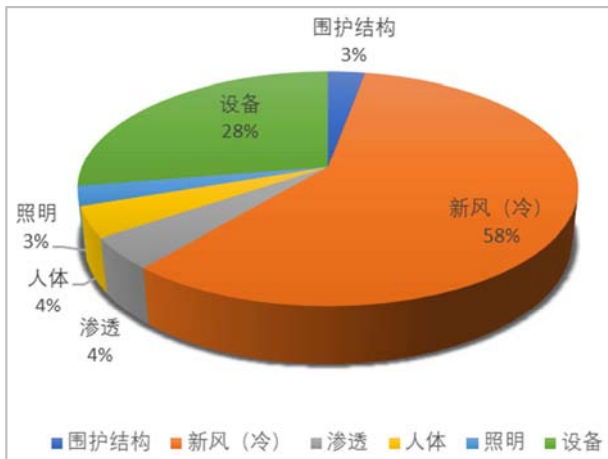


图8 实验室冷负荷占比情况统计。

在完成负荷计算后，即对室内的分体空调选型。考虑到冷量的空调噪声可能会较大，且对于主舱内部空间可能会无法达到温度分布均匀的问题，设置多台立式分体空调进行分开陈列布置，从而使得整个实验室的温湿度达到要求的情况下，也能够保证实验室内部温度分布的均匀性[21]。

(6) 智能化技术集成与应用

光交互技术可免接触交互认证人员真实身份，无需戴口罩、无需指纹、无需密码，一闪即可打卡认证通行，能够有效防控因接触导致的二次感染。确保在工作人员穿戴防护服，无法掏手机的情况下，不使用人脸扫描，也能够实现，无接触开关门和设备控制。

光交互技术又称光通讯，通过光闪传递信息。基于光交互技术，定制开发了智能集成设备，并且可通过一款功能集成的手机软件，对各个舱体内的所有智能设备的数据进行查看和管理，还可通过此软件实现闪光开门、控制灯光等操作。

智能门

每个舱体前后门都安装了光交互智能门。智能前门作为主要的出入口，在门上高度集成了环境采集器、新风面板、光交互门禁和灯控无线开关。工作人员可以使用手机软件开门，也支持输入门禁密码，或利用光ID闪光开门，保证工作人员实现无接触开门。环境采集器检测到室内的二氧化碳含量、PM2.5值、挥发性有机化合物含量、温湿度等空气质量指数，将在新风面板上显示，以保证达到P2

实验室的环境参数要求。智能后门作为紧急出口，装有紧急开关门按钮，以便工作人员及时逃生。

传递窗

根据生物实验室“专门设计以确保存储、转运、收集、处理和处置危险物料的安全”的规定，设置了不同功能的传递窗。样本接收区一侧安装了样本接收传递窗；样本接收区和制备区之间、制备区和扩增区之间设置了连接两个区域的传递窗；每个舱体内都各在后门处设置了垃圾传递窗。每个传递窗内都有紫外线消杀灯对传递物进行消杀；传递窗的门锁采用了光交互技术，输入密码或者利用光ID闪光便可开启；传递窗一侧打开时另一侧会自动保持闭锁状态；窗锁遇断电常闭，以免造成污染物泄露。

舱压控制系统

舱压智能控制柜是各个功能区气压控制的一套系统，舱压控制柜外的触控显示屏可展示运行状态和设置数值。自动模式下可根据用户设定的压差值随时自动调节风阀的开合度，从而实现功能区与室外压差的自动控制，使压差稳定在设定值。舱压控制系统可通过手机集成软件远程监控系统运行情况，获知当前各个功能区与室外大气压压差值。其中北京大兴区火眼实验室（气膜版）见图9所示。

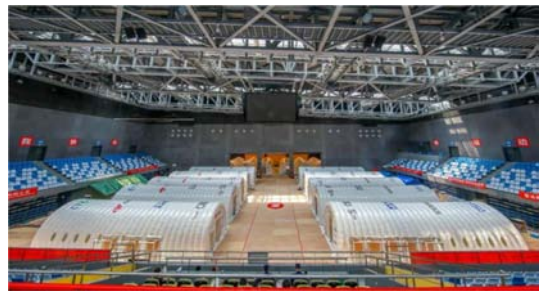


图9 北京大兴区火眼实验室（气膜版）（来源：作者团队自摄）。

4. 理论成果及实践应用情况

火眼实验室（气膜版）在充分考虑全球生物安全要求和行业规范的前提下，具有前瞻性的科技创新成果，在全球多个国家的新冠肺炎疫情防控工作中可以发挥重要作用，可满足新型冠状病毒的检测要求。其不仅短时间内可以完成搭建，迅速提升当地高通量新冠病毒核酸检测能力。在疫情平稳后，可在生育健康、传染感染疾病、肿瘤等方面的大规模人群检测上继续发挥优势，成为各地医疗卫生体系改造升级中的“标配”，也是改善民生健康，促进生命科学科学研究以及发展生命健康产业重要的“公共卫生新基建”。本文主要成果汇总如下：

4.1. 火眼实验室（气膜版）理论成果

团队设计研发了气膜版的病毒核酸检测实验室。并联合申请了“充气膜结构病毒检测实验室、及覆土结构病毒检测实验室”和“充气膜结构病毒检测实验室、生物安全实验室、覆土结构病毒检测实验室”等19项专利。

2020年7月3日,深圳市标准化协会发布了《充气膜结构病毒检测实验室建设指南》团体标准,为我国乃至全球各国和地区建设充气膜结构病毒检测实验室提供统一的设计和建造指导,为已知和未知病原微生物核酸检测提供技术支撑、科学依据和质量保障。该标准在国际及国内均属首次提出,对新型冠状病毒疫情的防控具有重要指导意义,也填补了该领域的空白,此外还完成了国家标准和一带一路团体标准的立项工作。

4.2. 火眼实验室(气膜版)实践应用

火眼实验室(气膜版)已在国内和海外多个国家进行了建设,向世界展现了如何快速建设核酸检测实验室的“中国方案”。气膜版“火眼”实验室从产业链配置,再到最后的落地搭建,整合了同济大学和华大基因创新科技生态圈,集众智加速方案迭代,用设计创新助力全球抗击新冠疫情。

目前,已在全球9个国家启动了26座气膜版火眼实验室,包括中国15座,分布在哈尔滨、北京、深圳、香港、青岛、石家庄、广州、南京、珠海和呼和浩特市,国际11座,分布在沙特、加蓬、多哥、哈萨克斯坦、阿曼、埃塞俄比亚、巴布亚新几内亚和文莱等城市,合计建设日检测通量达100万单管,显著提升了当地的核酸检测能力,从而助力全球疫情防控。

5. 结论

对于突发性重大公共卫生事件,火眼实验室(气膜版)能在短时间内搭建完成,迅速提升当地高通量新冠病毒核酸检测能力。而在疫情平稳后,火眼实验室(气膜版)还将会在生育健康、传染感染疾病、肿瘤等方面的大规模人群检测上继续发挥优势,成为各地医疗卫生体系改造升级中的“标配”,也是改善民生健康,促进生命科学研究以及发展生命健康产业重要的“新基建”。

参考文献

- [1] COVID-19 Dashboard [EB/OL]. the Center for Systems Science and Engineering (CSSE) at Johns Hopkins University (JHU). <https://coronavirus.jhu.edu/map.html>, 2021.
- [2] 新型冠状病毒肺炎疫情实时大数据报告[EB/OL]. 百度. https://voice.baidu.com/act/newpneumonia/newpneumonia/?from=osari_aladin_banner, 2021.
- [3] 中国—世界卫生组织联合专家组.中国—世界卫生组织新型冠状病毒肺炎(COVID-19)联合考察报告[R].2020, 2.
- [4] 丁蕾,蔡伟,丁健青,等.新型冠状病毒感染疫情下的思考[J/OL].中国科学:生命科学,(2020-02-23)[2020-03-01].
- [5] 刘雷,孙文魁,陈璐,等.洁净手术室空气微生物检测与控制研究[J].中国消毒学杂志,2017, 34(9): 832-834.
- [6] 郝鹏飞,许汪,杜寿文,等.冠状病毒起源、受体及新型冠状病毒检测与疫苗最新研究进展[J].新发传染病电子杂志,2020, 5(2): 74-78.
- [7] 李渊婷,高小玲,李永红.新型冠状病毒核酸检测实验室的生物安全防护探讨[J].国际检验医学杂志, 2020.
- [8] 刘勇,曾征宇,江真君,等.大规模新型冠状病毒核酸检测在第三方独立实验室的实践经验[J].中华临床实验室管理电子杂志, 2020, 8(1): 54-59.
- [9] GB50346-2011, 生物安全实验室建筑技术规范[S].北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部卫生部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2011.
- [10] GB19489-2008, 实验室生物安全通用要求[S].北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2008.
- [11] T-CECS662-2020, 医学生物安全二级实验室建筑技术标准[S].北京: 中国工程建设标准化协会, 2020.
- [12] 孙琳磷,杨城,谈气膜建筑的应用与前景[J].山西建筑, 2016, 42(8): 20-21.
- [13] CNAS-CL02-2012, 医学实验室质量和能力认可准则[S].北京: 中国合格评定国家认可委员会, 2012.
- [14] WS233-2017, 病原微生物实验室生物安全通用准则[S].北京: 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 2017.
- [15] 孙琳磷,杨城,充气膜结构流固耦合效应下的风振响应分析[J].山西建筑, 2016, 42(8): 20-21.
- [16] 沈继华.充气膜结构流固耦合效应下的风振响应分析[D].上海: 上海交通大学, 2012:4-5.
- [17] 江锡虎.充气膜结构全过程分析和造型技术研究[D].同济大学.2006.
- [18] 赵大鹏.大型充气膜结构特性分析与高强膜材试验研究[D].上海交通大学.2007.
- [19] 白杨.航空物流系统分析及优化[D].南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [20] GB50073-2013, 洁净厂房设计规范[S].北京: 中华人民共和国国家计划委员会, 2013.
- [21] 陈邝尹.生物安全实验室的暖通系统划分原则[J].洁净与空调技术.2006,1: 32-38.