

两种不同类型实验动物屏障设施的气流组织计算流体力学模拟技术分析

周斌¹, 赵勇², 汪亚兵¹, 刘吉宏¹

(1. 上海开纯洁净室技术工程有限公司, 上海 201233; 2. 上海实验动物研究中心, 上海 201203)

[摘要] 选取动物实验和生产两种不同类型屏障设施作为研究对象, 以余热排除效率、氨气排污效率、二氧化碳排污效率以及平均空气龄作为其气流组织的评价指标。采用计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 数值模拟技术, 对比分析了在不同换气次数、不同排风口位置情况下, 两种类型实验动物设施的气流组织优劣势。结果表明, 以上述指标评价时, 顶部送风、下侧排风辅助的送排风形式较为适合。此外, 对于饲养密度高的实验动物生产设施, 建议根据饲养室的热负荷程度调整最低换气次数。

[关键词] 动物实验; 动物生产; 屏障设施; 排污效率; 平均空气龄; 气流组织

[中图分类号] Q95-33 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1674-5817(2021)03-00252-07

Analysis on Air Distribution by Computational Fluid Dynamics Simulation in Two Types of Laboratory Animal Barrier Facilities

ZHOU Bin¹, ZHAO Yong², WANG Yabing¹, LIU Jihong¹

(1. Shanghai Kaichun Clean-Room Technology Co. Ltd., Shanghai 201233, China; 2. Shanghai Laboratory Animal Research Center, Shanghai 201203, China)

Correspondence to: LIU Jihong, E-mail: jsyzljh@163.com

[Abstract] Taking the removal efficiencies of waste heat, ammonia, and carbon dioxide, and the mean age of air as the evaluation indicators of air distribution, the pros and cons of air distribution in two different types of animal barriers, an experimental facility and a breeding facility, were analyzed at various air change rates and exhaust outlet positions by computational fluid dynamics (CFD) numerical simulation technology. The results of selected indicators showed that ceiling air supply plus bottom exhaust outlet were suitable for the laboratory animal barrier facilities. In addition, air change rate in high-density breeding facilities should be adjusted according to the room temperature.

[Key words] Animal experiment; Animal breeding; Barrier facility; Removal efficiency; Mean age of air; Air distribution

实验动物屏障设施用于清洁级或 SPF 级实验动物的饲养或实验, 是开展实验动物科学研究的硬件基础。实验动物屏障设施主要分两大类。一类是以进行动物实验为主的设施, 如大多数科研机构的动物实验设施, 其特点有: (1) 房间面积较小, 一般为 15~30 m²/间; (2) 房间内饲养密度相对较小, 一般为 10~15 笼/m²。另一类

是以实验动物生产为主的设施, 如大型实验动物供应商的动物生产饲养设施, 其特点是: (1) 房间面积大, 单间面积可达 200~300 m²; (2) 房间内饲养密度较大, 一般为 20~30 笼/m²。实验动物相关国家标准对室内温湿度、洁净度、气流速度、氨气浓度等指标均有严格的要求^[1-2]。而气流组织形式对室内的污染物排除效率、温湿度

[基金项目] 上海市科学技术委员会科研计划项目: 实验动物设施与环境动态质量、运行能力的检测与评价(18140900600)

[作者简介] 周斌(1989—), 男, 硕士, 研究方向: 暖通设计。E-mail: 18817367393@163.com

[通信作者] 刘吉宏(1982—), 男, 博士, 研究方向: 实验动物学与兽医学、实验动物设施建设与管理。E-mail: jsyzljh@163.com

均匀性、洁净度等环境条件起着重大影响。

气流组织形式不仅影响动物设施的空气质量,而且不同的设计方案对空气冷量或热量的需求也不同,因此也会影响能源利用效率。近年来,实验动物设施的气流组织形式已引起实验动物行业相关学者的重视。例如,何靖等^[3]采用实验加计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)模拟的方法,对采用顶侧送风、下侧排风、20次/h左右全新风换气条件下的实验动物设施进行了温湿度、气流速度以及洁净度的研究,结果表明现行的气流组织形式基本能达到国家标准对实验动物设施环境控制的要求,但存在送风气流速度场不均匀、平均速度小的问题。蒋新波等^[4]通过CFD模拟的方法分析比较了不同风口形式、不同换气次数情况下的实验动物设施室内环境,得出极限换气次数为24次/h,推荐的节能换气次数为12次/h。杨五强等^[5]通过CFD模拟的方法分析了四角排风和双侧下排风的气流组织形式在实验动物设施中的应用情况,从气流产生的涡流尺寸分析认为后者更优。

随着计算机技术的深度应用,CFD数值模拟技术在优化实验动物设施的气流组织方面发挥着重要作用,它能够精确地反映实验动物设施室内环境参数。本文采用CFD模拟技术,对不同类型实验动物设施的气流组织进行模拟分析。已知在动物饲养过程中会产生大量的氨气和二氧化碳,这是实验动物设施内主要空气污染物。国家标准^[1-2]对氨气浓度提出了严格的控制要求;而二氧化碳浓度对大鼠、小鼠的行为和生理均有明显的影响。另外,二氧化碳的密度比空气大,而氨气的密度比空气小,这有利于研究不同密度的污染物气体对气流组织的影响。本文采用氨气排污效率、二氧化碳排污效率、余热排除效率和室内空气龄^[6]指标来评价气流组织的优劣,为今后类似的实验动物屏障设施气流组织的设计提供参考。

排污效率(ε)^[6]是衡量稳态通风性能指标,它表示送风排除污染物的能力,定义为送风口污染物浓度和房间内平均浓度的比值,定义式为:

$$\varepsilon = \frac{c_e}{c} = \frac{\text{出风口平均浓度}}{\text{房间平均浓度}}$$

余热排除效率(η)^[6]用温度定义,用于考察气流组织形式的能量利用有效性,定义为排风口和送风口的平均温度差与工作区和送风口的平均温度差的比值,定义式为:

$$\eta = \frac{t_e - t_s}{t_a - t_s} = \frac{\text{排风口平均温度} - \text{送风口平均温度}}{\text{工作区平均温度} - \text{送风口平均温度}}$$

1 物理模型的建立

1.1 小型动物实验设施(A类)的几何模型

A类实验动物设施如6.3 m(长)×3.7 m(宽)×2.5 m(高)的某小鼠实验室。室内设有4台1.8 m(长)×0.5 m(宽)×2.0 m(高)的单面小鼠独立通气笼盒(individual ventilated cages, IVC)笼具,具体布置详见图1A。

1.2 大型动物生产设施(B)的几何模型

B类实验动物设施如15.0 m(长)×14.0 m(宽)×2.5 m(高)的某小鼠饲养室。室内设有36台1.8 m(长)×0.9 m(宽)×2.0 m(高)的双面小鼠IVC笼具,具体布置详见图1B。

2 边界条件

2.1 室内发热源边界条件

A类实验动物设施的每个单面有80个小鼠笼盒,每个笼盒按饲养4~5只小鼠计算。每只小鼠发热量为0.828 W^[2](1 W = 3 600 J/h),每个笼架的发热量为331 W。

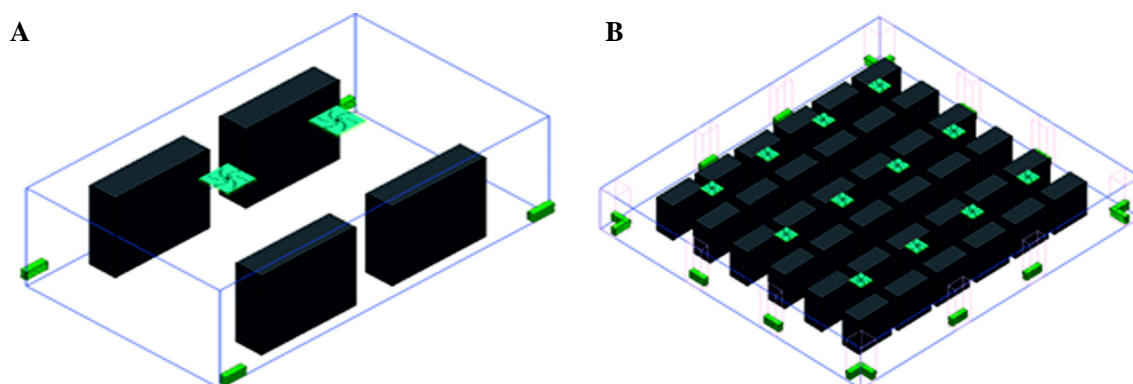
B类实验动物设施的每个双面有144个小鼠笼盒,每个笼盒按饲养4~5只小鼠计算,每只小鼠发热量为0.828 W^[2],每个笼架的发热量为596 W。

2.2 围护结构边界条件

由于动物屏障设施位于建筑内区,因此将墙面、吊顶、地面均简化成绝热边界。

2.3 氨气释放源边界条件

笼盒内的动物及脏垫料是氨气的释放源,其释放量与气流速度、换气次数、动物的饲养量以及垫料的更换频率密切相关。动物笼具的氨气释放量较难精确确定。蒋新波等^[4]通过文献提供的数据计算出每只小鼠的氨气释放量为0.000 1 mg/s,得到结论:实验动物设施满负荷饲养小鼠的情况下,即使换气次数降低至2次/h,室内的氨气质量浓度也低于1 mg/m³;如果增大换气次数,室



注：A 为小型动物实验设施，B 为大型动物生产设施。

图 1 A 类和 B 类实验动物设施顶送风下侧排风模型

Figure 1 Ceiling air supply/bottom exhaust outlet model in type A and B facilities

内的氨气浓度平均值会更低。该结果与毕波等^[7]及张鑫等^[8]实测的实验动物设施中氨气浓度严重不符。毕波等^[7]对第三军医大学实验动物中心的 4 个大鼠、小鼠实验动物设施中氨气浓度进行动态实测，结果表明在 17.2~18 次/h 换气全新风空调状况下，室内的氨气质量浓度为 5.7~7.6 mg/m³。张鑫等^[8]对中国食品药品检定研究院实验动物资源中心平 5 号屏障设施的 4 个大鼠、小鼠饲养间进行动态实测，结果表明在 11~14 次/h 换气的全新风空调状况下，室内的氨气质量浓度为 5.08~7.86 mg/m³。

在国家标准规定的 15 次/h 换气的全新风空调状况下，常规实验动物设施卫生条件下的室内氨气质量浓度为 5~8 mg/m³。这是因为氨气的主要来源为笼盒内含动物粪尿的脏垫料，而通常实验动物设施中脏垫料的更换频率为 1 周 1 次，这导致氨气的释放量远大于通过理论计算的动物氨气释放量。本文重点探讨气流组织对实验动物设施内氨气浓度变化的影响，而不是具体的氨气浓度值。因此，为简化计算，将整个笼具作为体污染源，经反复模拟计算，在体污染源释放质量浓度为 0.55 mg·m⁻³·s⁻¹ 条件下，室内的氨气浓度值与毕波等^[7]及张鑫等^[8]的实测值接近，因此将该数值作为氨气释放源的边界条件。

2.4 二氧化碳释放源边界条件

实验动物设施中二氧化碳的释放源主要是实验动物的呼吸。徐卫华^[9]测定小鼠呼出与吸入气体容积差值，结果表明体质量为 20 g 左右的小鼠呼出气体量为 0.283 mL。孙泽等^[10]通过小鼠呼气

末二氧化碳分压快速检测方法及其在气道阻力评估中的应用研究发现，鼠类呼出的气体中二氧化碳质量浓度为 102 164 mg/m³。此外，小鼠的呼吸频率约为 100 次/min。为简化计算，将整个笼具作为体污染源，经计算恒定释放质量浓度为 5.45 mg·m⁻³·s⁻¹。

2.5 风口边界条件之送风口模型

A 类和 B 类实验动物设施的送风均采用开孔率为 40% 的高效孔板风口。由于孔板风口送风射流由多股小孔射流汇聚而成，数值模拟时若要详细描述每个小孔的入流条件，必将导致计算区域内的网格节点数目巨大，超过了通用计算机的运算能力，因此需要对风口模型进行简化。赵彬等^[8]使用 *N* 点风口模型来处理孔板风口入流边界条件，建模分析孔板风口的射流特性，并与实测数据对比，具有高度的吻合性。因此，本文采用 *N* 点风口模型理论，将孔板风口用一个外形尺寸相同的简单风口代替，并保证其入流的质量流量和动量流量符合实际场景。

A 类实验动物设施的基准换气次数为 15 次/h，总送风量为 876 m³/h。共有 2 个送风口，单个风口的外尺寸为 0.54 m × 0.54 m，风量为 438 m³/h，居中均匀布置；送风温度为 18 °C，送风的氨气浓度为 0，二氧化碳浓度为 391 mL/m³^[11] (=780.83 mg/m³)。

B 类实验动物设施的基准换气次数为 15 次/h，总送风量为 10 500 m³/h。共有 12 个送风口，单个风口的外尺寸为 0.63 m × 0.63 m，单个风口风量为 875 m³/h，均匀布置；送风的氨气浓度

为 0, 二氧化碳浓度为 391 mL/m³[11]。

考虑到 B 类实验动物设施的饲养密度较高, 需降低送风温度以满足室内的温度要求。但送风温度也不宜过低, 否则离送风口较近的笼具上层的温度偏低, 从而影响小鼠的正常活动。因此 A、B 类设施送风温度均选择为 16 °C。

2.6 风口边界条件之排风口模型

A 类基准实验动物设施采用四角下侧排风, 共 4 个。排风口的尺寸为 0.4 m × 0.2 m, 距地 0.15 m, 自由出流。

B 类基准实验动物设施采用四角下侧排风, 共 8 个。排风口的尺寸为 0.8 m × 0.4 m, 距地 0.15 m, 自由出流。

3 数学模型

本模拟采用室内零方程模型。赵彬等[12]通过实验及模拟对比发现, 在非等温流动的空调通风领域中, 室内零方程比标准 κ - ϵ 双方程模型的模拟结果精度更高, 计算速度更快。为简化计算, 做如下假设: 将室内空气视为理想气体, 符合 Boussinesq 假设, 流动为稳态流动。送风口采用速度入口, 新风出风口采用压力出口。采用有效容积法对求解区域进行离散, 应用 SIMPLE 算法求解离散控制方程。

4 模拟结果分析

4.1 换气次数对气流组织的影响

为分析不同换气次数对室内气流组织的影响, 对 A 类实验动物设施进行了以下 3 种不同工况的模拟分析 (表 1)。对比工况 1、2、3 的模拟结果 (表 2), 再计算气流组织评价指标如余热排除效率、排污效率 (表 3)。结果表明: 通过气流组织评价指标可知, 在提高换气次数后, 室内空气龄降低, 表明会提升室内空气质量, 但几乎不影响余热排除效率、氨气排污效率和二氧化碳排污效率。

4.2 排风口位置对气流组织的影响

为分析不同的排风口位置对气流组织的影响, 对 A 类实验动物设施进行了以下 3 种不同工况的模拟分析 (表 4)。

表 1 A 类实验动物设施不同换气次数的模拟工况

Table 1 Simulated conditions at different air change rates in type A facility

不同工况	换气次数 / (次·h ⁻¹)	送排风形式
工况 1	20	顶送风下侧排风
工况 2(基准模型)	15	顶送风下侧排风
工况 3	10	顶送风下侧排风

表 2 A 类实验动物设施不同换气次数的模拟结果

Table 2 Simulated results at different air change rates in type A facility

不同工况	温度 / °C	氨气 / (mL·m ⁻³)	二氧化碳 / (mL·m ⁻³)	空气龄 / s
工况 1				
室内平均值	22.0	6.58	480	161
排风口平均值	21.3	5.62	467	-
工况 2				
室内平均值	23.2	7.49	492	215
排风口平均值	22.3	6.41	478	-
工况 3				
室内平均值	25.3	8.79	510	314
排风口平均值	24.2	7.66	495	-

注: 温度指标的室内平均值指 0~2 m 高的工作区的平均温度, 氨气、二氧化碳、空气龄的室内平均值是指全室的平均值。在一个标准大气压下, 氨气 1 mL/m³ = 0.771 mg/m³, 二氧化碳 1 mL/m³ = 1.997 mg/m³。

对比工况 2、4、5 的模拟结果 (表 5), 再计算气流组织评价指标如余热排除效率、排污效率 (表 6)。结果表明: (1) 相比于顶送风下侧排风的气流组织形式, 采用以顶送风下侧排风为主、辅助顶风的方式, 有利于降低室内空气龄, 并提高氨气和二氧化碳的排污效率, 以及提高余热排除效率; (2) 相比于顶送风下侧排风的气流组织形式, 采用顶送风顶排风的气流组织形式, 虽然能提高氨气和二氧化碳的排污效率, 以及提高余热排除效率, 但室内空气龄上升明显, 不利于室内下方污染物的及时排除; (3) 仅从能源利用率、有效性而言, 即采用余热排除效率以及室内平均温度进行分析, 顶送风顶排风方式最优, 顶送风下排风辅助顶排风方式次之, 顶送风下侧排风最差。

综上所述, 顶送风下侧排风辅助顶排风的形式较适合 A 类实验动物设施, 一方面能提高氨气

表 3 A 类实验动物设施不同换气次数的气流组织评价指标

Table 3 Evaluation index of air distribution at different air change rates in type A facility

不同工况	余热排除效率 /%	氨气排污效率 /%	二氧化碳排污效率 /%	全室空气龄 /s
工况 1	91.7	85.4	97.3	161
工况 2	89.6	85.6	97.2	215
工况 3	91.2	87.1	97.1	314

表 4 A 类实验动物设施不同排风口位置的模拟工况

Table 4 Simulated conditions at different exhaust outlet locations in type A facility

不同工况	换气次数 / (次·h ⁻¹)	送排风形式	备注
工况 2	15	顶送风下侧排风	模型详见图 1A
工况 4	15	顶送风下侧排风辅助顶排风	模型详见图 2A
工况 5	15	顶送风顶排风	模型详见图 2B

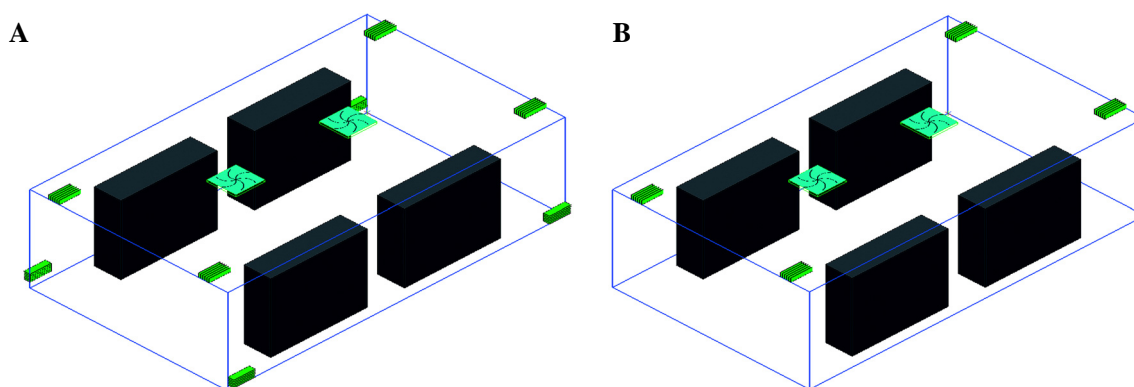


图 2 A 类实验动物设施顶送风下侧排风辅助顶排风模型 (A) 和顶送风顶排风模型 (B)

Figure 2 Ceiling air supply air/bottom exhaust outlet model (A) and ceiling air supply/ceiling exhaust outlet model (B) in type A facility

表 5 A 类实验动物设施不同排风口位置的模拟结果

Table 5 Simulated results at different exhaust outlet locations in type A facility

不同工况	温度 / ℃	氨气 / (mL·m ⁻³)	二氧化碳 / (mL·m ⁻³)	空气龄 / s
工况 2				
室内平均值	22.8	7.49	492	215
排风口平均值	22.3	6.41	478	-
工况 4				
室内平均值	21.9	6.85	484	201
排风口平均值	22.4	7.04	486	-
工况 5				
室内平均值	21.3	6.21	475	304
排风口平均值	22.4	7.50	506	-

注：关于温度指标的室内平均值指 0~2 m 高的工作区的平均温度，氨气、二氧化碳、空气龄的室内平均值是指全室的平均值。

和二氧化碳的排污效率，也能提高能源利用率，同时又能保证较低的室内空气龄，提高室内空气的新鲜度。

4.3 不同类型实验动物设施的气流组织分析

为分析不同类型实验动物设施的气流组织，本文选取了换气次数均为 15 次/h 的 A 类实验动物设施和 B 类实验动物设施进行了模拟对比分析。同时也分析了换气次数为 20 次/h 的 B 类实验动物设施的模拟结果。模拟工况如表 7。

对比工况 2、6、7 的模拟结果（表 8），再计算气流组织评价指标余热排除效率、排污效率（表 9）。结果表明：由于 B 类实验动物设施的饲养密度较大，在相同的 15 次/h 的换气情况下，相比于 A 类实验动物设施，送风温度已从 18 °C 下降到 16 °C，但室内温度仍然明显偏高，工作区的平均温度达到 25.4 °C。

表 6 A 类实验动物设施不同排风口位置的气流组织评价指标

Table 6 Evaluation index of air distribution at different exhaust outlet locations in type A facility

不同工况	余热排除效率/%	氨气排污效率/%	二氧化碳排污效率/%	全室空气龄/s
工况 2	89.6	85.6	97.2	215
工况 4	112.8	102.8	100.4	201
工况 5	133.3	120.8	106.5	304

表 7 不同类型实验动物设施的模拟工况

Table 7 Simulated conditions in different types of facilities

不同工况	换气次数/(次·h ⁻¹)	送排风形式	备注
工况 2	15	顶送风下侧排风	A 类实验动物设施, 模型详见图 1A
工况 6	15	顶送风下侧排风	B 类实验动物设施, 模型详见图 1B
工况 7	20	顶送风下侧排风	B 类实验动物设施, 模型详见图 2A

选取工况 2 和工况 6 离地 1 m 高的室内温度进行对比分析 (图 3A~B), 结果表明工况 6 的 B 类实验动物设施离地 1 m 高的温度场分布较不均匀, 送风口下方及送风口 1.5 m 范围内的温度较低, 在 20~23 °C; 东西两侧无送风口的区域温度超过了 25 °C, 且大部分区域超过 26 °C, 该值已超规范推荐值的上限。计算其余热排除效率、氨气排污效率和二氧化碳排污效率, 两类实验动物设施的差值均较小。

为进一步分析 B 类实验动物设施的室内温度场的分布, 选取工况 7 的 B 类实验动物设施分析

离地 1 m 高的温度场分布, 具体如图 3C 所示。从整体温度分布来看, 除送风口正下方的区域, 其余区域的温度在 23 °C 左右, 这是实验动物设施较适宜的温度, 但整体温度场分布不均匀的问题仍较严重。建议可增加送风口的数量, 合理布置送风口的位置, 以提高室内温度场的均匀性。

对比分析工况 6 和工况 7 发现, 为满足实验动物设施的温度需求, 类似 B 类高饲养密度的实验动物设施的换气次数不宜过低。本次模拟中未考虑渗透风以及人员扰动。实际的室内温度可能更高, 因此需要根据室内温度的情况, 适时调整最低换气次数, 以降低室温。

表 8 不同类型实验动物设施的模拟结果

Table 8 Simulated results in different types of facilities

不同工况	温度/ °C	氨气/ (mL·m ⁻³)	二氧化碳/ (mL·m ⁻³)	空气龄/ s
工况 2				
室内平均值	22.8	7.49	492	215
排风口平均值	22.3	6.41	478	-
工况 6				
室内平均值	25.4	8.65	508	201
排风口平均值	24.0	7.55	493	-
工况 7				
室内平均值	23.2	8.02	499	155
排风口平均值	22.0	6.74	482	-

5 小结

本文针对常见的小型实验动物实验设施和大型实验动物生产设施的各自特点, 采用 CFD 模拟技术^[3]分别进行建模分析, 对比了在不同的换气次数、不同的排风口布置形式下的室内余热排除效率、氨气排污效率、二氧化碳排污效率和空气龄等指标, 得出如下结论:

(1) 提高动物饲养间的换气次数, 可以降低室内空气龄, 提升室内空气品质, 但几乎不影响余热排除效率、氨气和二氧化碳排污效率。

表 9 不同类型实验动物设施的气流组织评价指标

Table 9 Evaluation index of air distribution in different types of facilities

不同工况	余热排除效率/%	氨气排污效率/%	二氧化碳排污效率/%	全室空气龄/s
工况 2	89.6	85.6	97.2	215
工况 6	85.1	87.3	97.0	201
工况 7	83.3	84.0	96.6	155

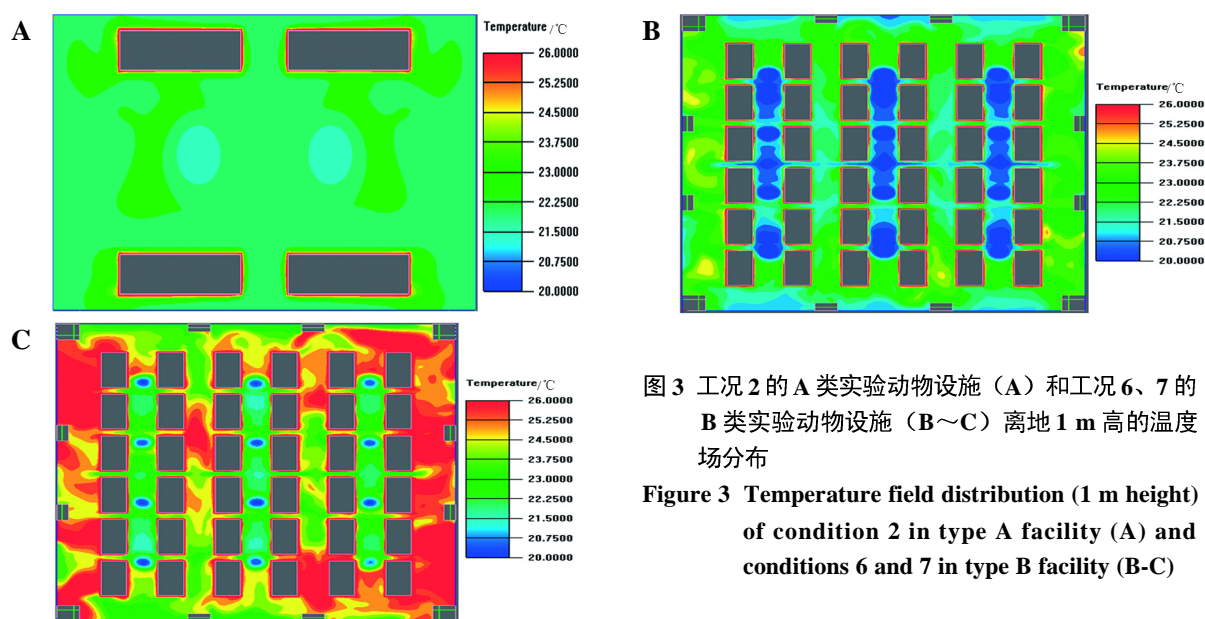


图3 工况2的A类实验动物设施(A)和工况6、7的B类实验动物设施(B~C)离地1 m高的温度场分布

Figure 3 Temperature field distribution (1 m height) of condition 2 in type A facility (A) and conditions 6 and 7 in type B facility (B-C)

(2) 从余热排除效率、氨气排污效率、二氧化碳排污效率及空气龄的气流组织评价指标来分析,顶送风下侧排风辅助顶排风的形式比顶送风下侧排风或者顶送风顶排风模式更适合实验动物设施,既能提高氨气和二氧化碳排污效率,又提高能源利用率,同时也能保证较低的室内空气龄,提高室内空气的新鲜度。

(3) 对于饲养密度较大的实验动物生产屏障设施,由于动物饲养间内热负荷较大,建议应根据房间实时温度调整换气次数的下限。此外,为提高室内温度场的均匀性,建议增加送风口的数量,同时合理布置送风口位置。需要注意,送风口不宜布置在笼具正上方,否则笼具附近的气流速度可能会超过规范 0.2 m/s 的限值。

参考文献:

- [1] 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. 实验动物 环境及设施: GB 14925—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 实验动物设施建筑技术规范: GB 50447—2008[M]. 北京: 建筑工业出版社, 2008.
- [3] 何婧. 大型实验动物房的环境控制[D]. 上海: 同济大学, 2003.
- [4] 蒋新波. 基于 CFD 实验动物房气流环境系统的优化研

- 究[D]. 衡阳: 南华大学, 2005.
- [5] 杨五强, 潘杰, 李勋. 屏障系统回风口布置方式对气流组织的模拟分析[J]. 实验动物与比较医学, 2010, 30(5): 384-387. DOI:10.3969/j.issn.1674-5817.2010.05.017.
- [6] 朱颖心. 建筑环境学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [7] 毕波, 陈志鹏, 张聪, 等. 屏障环境设施指标动态变化的研究[J]. 实验动物科学, 2016, 33(6):55-58. DOI:10.3969/j.issn.1006-6179.2016.06.013.
- [8] 张鑫, 李萌, 王金恒. 实验动物生产设施动态环境指标测定与数据分析[J]. 中国药事, 2012, 26(8):859-861. DOI: 10.3969/j.issn.1002-7777.2012.08.018.
- [9] 徐卫华. 小鼠呼出与吸入气体容量差值的测定[J]. 浙江大学学报(医学版), 2010, 39(3):322-325. DOI:10.3785/j.issn.1008-9292.2010.03.018.
- [10] 孙泽, 罗明志, 陆云, 等. 小鼠呼气末 CO₂ 分压快速检测方法及其在气道阻力评估中的应用研究[J]. 生物医学工程研究, 2016, 35(3):151-156.
- [11] 沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5):1068-1076. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0120.
- [12] 赵彬, 李先庭, 彦启森. 用零方程湍流模型通风空调室内的空气流动[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(10):109-113. DOI:10.16511/j.cnki.qhdxxb.2001.10.030.
- [13] 欧少华, 周斌, 刘吉宏. 某 GLP 实验动物设施空调及通风系统设计研究[J]. 中国比较医学杂志, 2020, 30(4):110-116. DOI:10.3969/j.issn.1671-7856.2020.04.017.

(收稿日期: 2021-04-06 修回日期: 2021-05-26)