

文章编号: 1671-6612 (2025) 05-789-06

基于 FDS 模拟的 烟草仓库排烟系统有效性设计探讨

李俊昆¹ 汪 顺¹ 崔 跃² 杨亚博¹

(1. 云南省设计院集团有限公司 昆明 650228;

2. 云南安泰建筑设计管理有限公司 昆明 650228)

【摘 要】 以某烟草存储类仓库为研究对象, 利用火灾模拟软件 FDS 对该仓库进行火灾模拟, 探究不同因素下烟控机制的有效性。模拟结果表明: 当两个防烟分区合用一个排烟系统时, 系统排烟量无法满足火场疏散救援需求, 当防烟分区的排烟系统分别独立设置时, 仓库处于可耐受状态; 当补风系统风量按防火分区内单点火灾考虑且均匀布置时, 可满足火场排烟时的补风需求; 自然补风口自身具有调节性, 增加补风口面积有利于烟层高度的稳定性, 烟层高度变化波动较小。

【关键词】 烟草存储类仓库; 排烟系统; 有效性; FDS 火灾模拟; 火场可耐受度

中图分类号 TU834.27 文献标志码 A

Discussion on the Design of the Effective Smoke Exhaust System in Tobacco Warehouses under the Coupling Effects of Multiple Factors

Li Junkun¹ Wang Shun¹ Cui Yue² Yang Yabo¹

(1. Yunnan Design Institute Group Co., Ltd, Kunming, 650228;

2. Yunnan Antai Architech & Management Co., Ltd, Kunming, 650228)

【Abstract】 Taking a certain tobacco storage warehouse as the research object, the fire simulation software FDS was used to conduct fire simulation on the warehouse to explore the effectiveness of the smoke exhaust system under the coupling effect of multiple factors. The simulation results show that when two smoke control zones share one smoke exhaust system, the system's smoke exhaust volume cannot meet the requirements of fire scene evacuation and rescue. When the smoke exhaust systems of the smoke control zones are set up independently, the warehouse is in a tolerable state. When the air supply volume of the air supply system is considered based on a single-point fire in the fire compartment and is evenly distributed, it can meet the air supply requirements during smoke exhaust. The natural air supply opening itself has adjustability. Increasing the area of the air supply opening is beneficial to the stability of the smoke layer height, and the fluctuation of the smoke layer height is relatively small.

【Keywords】 Tobacco storage warehouse; Smoke exhaust system; Effectiveness; FDS fire simulation; Fire tolerance

0 引言

烟草仓库在发生火灾时, 不但具有普通仓库的火灾事故特点, 且由于烟草中含有挥发性芳香烃油, 高温作用下产生大量燃烧产物, 使燃烧强度急

剧增大, 火势蔓延速度加快, 造成严重经济损失^[1]。

近年来, 随着烟草企业技术改造和易地搬迁项目体量的不断增大, 以及国家新的工程建设消防技术标准的发布实施^[2,3], 结合烟草仓库消防设计的实际

作者简介: 李俊昆 (1986-), 男, 本科, 高级工程师, E-mail: 18987517677@163.com

通讯作者: 杨亚博 (1997-), 女, 本科, 工程师, E-mail: 18987517677@163.com

收稿日期: 2025-07-09

情况，对其火灾场景进行分析研究，可有效减少火灾损失，发挥烟草仓库的最大效益。

火灾中的高温和浓烟对人的生命有直接威胁，严重阻碍和延误消防员实施救援和灭火行动。排烟系统的有效性关系到人员疏散、财产保护和灭火救援行动。国内外已有诸多学者利用火灾模拟软件 FDS 对火场中的烟气控制系统进行研究，但当前尚未有针对烟草仓库实际工程设计中常采用的多种消防措施在协同作用下的有效性分析。因此，利用 FDS 模拟分析烟草仓库的排烟系统在火灾自动报警系统、自动喷水灭火系统、补风系统等不同因素作用下的有效性是有必要的，以期为后续排烟系统的相关设计提供借鉴。

1 工程概况

某烟厂原烟仓库一层建筑面积 9622m²，层高 11.0m，分为 4 个防火分区，每个防火分区内设 7.5m 高 16 排 15 列货架，货架上存放原烟，储存物品火灾危险性类别为丙类 2 项。仓库设置了火灾自动报警系统、自动喷水灭火系统、排烟系统和补风系统等。

2 烟草仓库火灾模型

2.1 模型建立

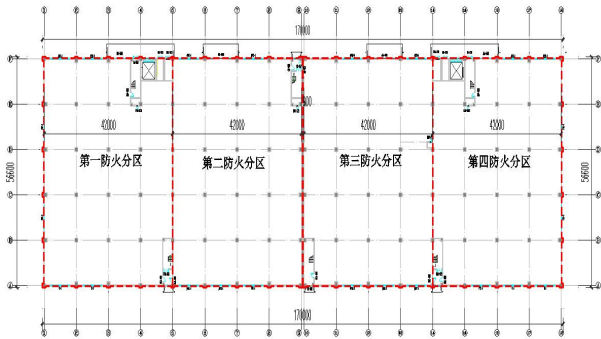


图 1 原烟仓库一层平面示意图

Fig.1 First Floor Plan of Raw Tobacco Warehouse

模拟以图 1 中第二防火分区为例，该防火分区长 42m，宽 56m，高 11m，划分为两个防烟分区。综合考虑精度和计算速度，本次模拟采用均一网格，设置网格尺寸为 0.5m×0.5m×0.5m，网格数为 206976 个。

拟定仓库内外空气温度均为 20℃，压力为 1 个标准大气压。采用 FDS 的默认热边界条件设置，即网格边界默认为砖墙。仓库仓储区域火灾探测器

采用红外对射感烟探测器，灵敏度为 1 级（25%减光率），其光束轴线距地高度为 10m。

2.2 火灾场景设定

烟叶的火焰传播速度远小于 4.5mm/s，着火类型属于慢速增长火灾^[4]。考虑到线路老化短路、叉车电池着火等其他着火可能性，以及烟叶堆放在货架内，火灾增长系数与储存高度成正比^[5]等因素，基于保守不利原则，本次模拟火灾类型选为快速火。仓库设置有自动喷水灭火系统，根据《建筑防排烟系统技术标准》（GB 51251-2017）下称《烟标》中第 4.6.6 条规定，火灾热释放速率取 4MW^[6]。同时设置货架上的烟叶在达到着火条件后被引燃，烟叶的材料特性设置为：点燃温度 182℃，热值 15.8kJ/g^[7]，作为模型中火灾蔓延情况的判定。

经对比分析，排烟系统作用的最不利火源点位于仓库中心附近的货架，因此将火源点设置在仓库中心靠右的一层货架处（X=30m，Y=22m，Z=1m），仓库模型如图 2 所示。

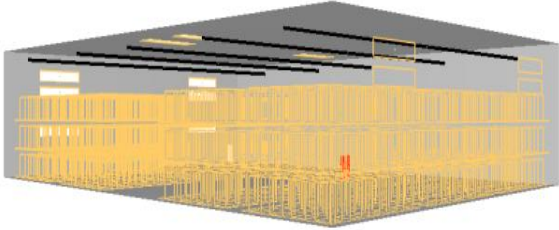


图 2 仓库模型示意图

Fig.2 Warehouse Model Schematic Diagram

2.3 工况设定

为探究不同形式的喷淋系统、排烟系统设计及排烟量取值、补风量取值等多种因素耦合作用下排烟系统的有效性，设置工况如表 1 所示。

表 1 工况表

Table 1 Operating Conditions Table

工况	喷淋	排烟系统		补风系统	
		形式	排烟量 (m ³ /h)	系统/个	通风窗/m ²
1		均失效			24
2	失效	自然/电动窗	142000	2	24
3	湿式	自然/电动窗	142000	2	24
4	预作用	自然/电动窗	142000	2	24
5	预作用	自然/电动窗	142000	2	48
6	预作用	机械/V=5m/s	142000	2	24

续表 1 工况表

Table 1 Operating Conditions Table					
工况	喷淋	排烟系统		补风系统	
		形式	排烟量 /(m ³ /h)	系统/个	通风窗/m ²
7	预作用	机械/V=5m/s	142000	1	24
8	预作用	机械/V=10m/s	142000	2	24
9	预作用	机械/V=10m/s	142000	1	24
10	预作用	自然/电动窗	88804	2	15
11	预作用	自然/电动窗	88804	2	30
12	预作用	机械/V=5m/s	87396	2	15
13	预作用	机械/V=5m/s	87396	1	15

注：表中单个防烟分区面积 1176m²，长 42m，宽 28m，空间净高度 10.8m，最小清晰高度 2.68m，防烟分区间不设置挡烟垂壁。

当采用自然排烟时，设计清晰高度：6m，储烟仓厚度：4.8m，排烟量按《烟标》第 4.6.5~4.6.13 条的计算（公式法）为：88804m³/h，有效自然排烟窗面积：30m²；排烟量按表 4.6.3（查表法）取：142000m³/h，有效自然排烟窗（口）面积：47m²。当采用机械排烟时，设计清晰高度：5m，储烟仓厚度：5.8m，排烟量按《烟标》计算为：87396m³/h，按表 4.6.3 取：142000m³/h。

2.4 火灾危险判定指标

对于烟草仓库来说，烟气控制的主要目的有：保证仓库内工作人员安全疏散、保障火灾扑救期间消防人员的生命安全、为抢救物品提供条件。设定烟气控制系统的持续运行时间为 20min，期间正常人体能忍受的温度、能见度、CO 体积分数的耐受极限分别为 60℃、10m、0.05%^[8]。根据上述因素，本文以温度、能见度、CO 体积分数作为火场达到危险状态的依据，即判断排烟系统有效性的依据。

3 模拟结果分析

3.1 火场初期烟气运动规律

如图 3 所示，火源点着火后，受热浮力作用，烟气从燃烧区域垂直上升，同时受货架影响，烟气沿货架空隙蔓延，约 50s 后烟气到达仓库顶棚，约 175s 后烟气蔓延至仓库侧墙。顶棚形成烟气层后，烟气开始下沉，由于仓库内设货架，下沉的同时，烟气回流至二三层货架间隙。250s 时，仓库上部形

成较厚烟层。同一防烟分区内的两个红外对射感烟探测器均发出报警信号的时间在 350s 后，此时仓库安全出口处烟层高度已低于最小清晰高度 2.7m。

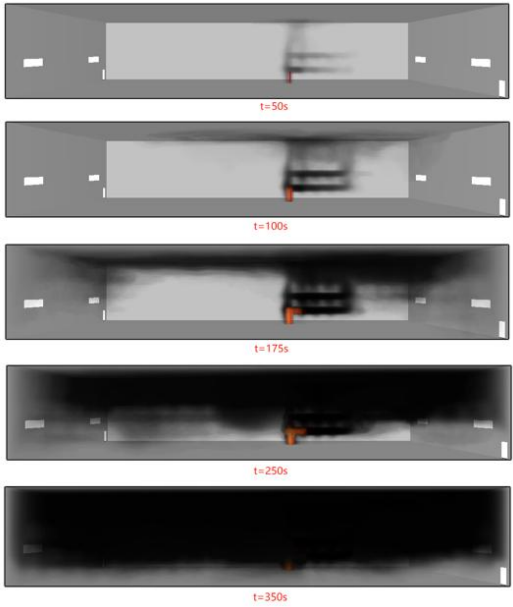


图 3 火场初期烟气走向示意

Fig.3 Schematic Diagram of Smoke Movement in Early Fire Stage

3.2 自动喷水灭火系统形式

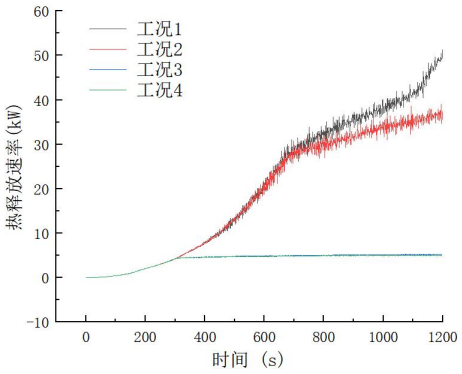


图 4 工况 1、2、3、4 热释放速率-时间曲线

Fig.4 Heat Release Rate-Time Curves for Operating Conditions 1, 2, 3, 4

图 4 为工况 1、2、3、4 热释放速率-时间曲线，工况 1 由于自动喷水灭火系统失效，火势未得到控制，周围烟草持续被引燃，热释放速率在 20min 后已高达 51.5MW，并有持续上升的趋势。工况 2 中排烟口在火灾探测器报警后开启，动作时间为 367s，在自然排烟的作用下，火势蔓延明显降低，但热释放速率在 20min 后达到 37.5MW，仍属于失

控状态。

工况 3 湿式喷淋系统的喷头动作时间为 356s, 工况 4 预作用喷淋系统的喷头动作时间为 477s。在 356~477s 期间, 由于喷淋的灭火作用, 工况 3 的热释放速率略小于工况 4, 之后两者的热释放速率差别不大, 基本都达到了动态平衡, 稳定在 4~5.5MW 之间, 有效控制火灾进一步发展到轰燃阶段。

根据火场模拟结果显示: $t=800\text{s}$ 左右, 工况 1: 左、右侧安全出口 2.5m 高处温度 $>60^{\circ}\text{C}$ 、能见度不足 2m、烟层高度 $<3\text{m}$, 已超危险判定值; $t=1200\text{s}$ 时, 工况 2: 左、右侧安全出口能见度在 5~10m 徘徊、烟层高度 $>3\text{m}$, 出现达到危险的状态点; 工况 3 与工况 4 在 800~1200s 期间均未出现危险状态, 安全出口处烟层高度稳定在 5~7m 之间。

在本次模拟的火灾场景条件下, 自动喷水灭火系统失效或未设置, 排烟系统虽可以减缓火势发展, 但火场场景均属于失控状态, 此时排烟系统作用微弱。

另外需特别注意, 根据烟草行业规范要求“采用磷化铝进行熏蒸作业的库房不应选用自动喷水灭火系统, 宜选用耐腐蚀的干粉自动灭火系统或预作用自动喷淋系统等灭火设施”^[2]。故除建设方明确采用其他杀虫方法或存储非烟叶的仓库可以采用湿式系统外, 烟草仓库一般采用预作用自动喷水灭火系统, 后文讨论的工况均采用预作用系统。

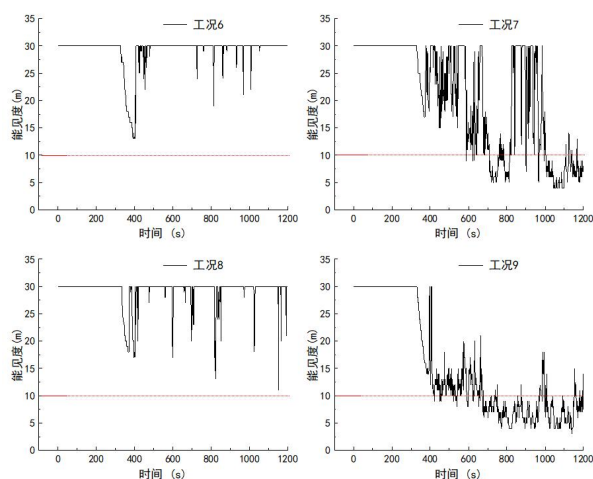
模拟结果显示, 在 20min 内, 工况 5~13 的左、右两侧安全出口处 2.5m 以下空间内温度均 $<60^{\circ}\text{C}$, 空间内 CO 体积分数均 $<0.05\%$, 差异主要体现在左侧安全出口处能见度和烟层高度, 两者变化趋势相同, 下文以能见度对上述 9 种工况进行详细分析。

3.3 排烟系统形式

仓库划分为两个防烟分区, 由于仓库净高 $>9\text{m}$, 未设置挡烟垂壁, 火灾发生时, 烟气到达顶棚后向两侧蔓延。如图 5 所示, 两个防烟分区合用一个排烟系统的工况 7、9 左侧安全出口处能见度曲线均低于防烟分区排烟系统分别独立设置的工况 6、8。

工况 7 和工况 9 均出现能见度小于 10m 的时段, 工况 9 (排烟口设定风速: 10m/s), 对周围空气的卷吸作用较强, 实际排出的烟量较工况 7 (排

烟口设定风速: 5m/s) 明显减少, 导致危险状态出现的时间更早。



注: 横线为仓库火灾场景可耐受与出现危险状态的分界线

图 5 工况 6、7、8、9 左侧安全出口能见度-时间曲线

Fig.5 Visibility-Time Curves for Left Safety Exit under Operating Conditions 6, 7, 8, and 9

图 5 中工况采用查表法, 排烟量为 $142000\text{m}^3/\text{h}$, 图 6 中工况采用公式法, 采用自然排烟时, 设计清晰高度取 6m, 排烟量为 $88804\text{m}^3/\text{h}$, 采用机械排烟时, 设计清晰高度取 5m, 排烟量为 $87395\text{m}^3/\text{h}$ 。当排烟量减少后, 排烟系统排烟效果减弱, 火场安全出口处能见度曲线波动较大。

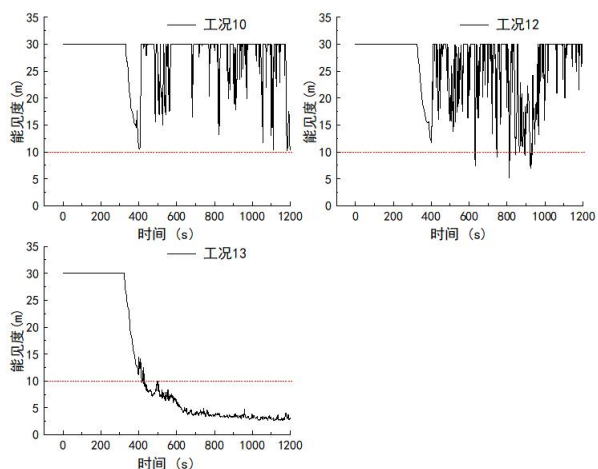


图 6 工况 10、12、13 左侧安全出口能见度-时间曲线

Fig.6 Visibility-Time Curves for Left Safety Exit under Operating Conditions 10, 12, and 13

如图 6 所示, 工况 10 能见度均在 10m 以上, 工况 12 出现少数能见度低于 10m 的状态点, 1000s 后机械排烟口作用效果明显, 能见度恢复到 20m

以上, 且稳定性高于采用自然排烟的工况 10, 工况 10 和工况 12 火场均处于可耐受状态。从 1000s 后趋势来看, 采用机械排烟方式优于自然排烟方式, 为火灾扑救期、抢救物品提供更有利的条件。

工况 13 由于两个防烟分区合用一个排烟系统, 系统排烟量仅为单个防烟分区的排烟量, 防火分区内烟气无法有效排出, 能见度持续降低, 最终处于失控状态。

3.4 补风系统形式

本工程采用自然补风措施, 仓库平时通风使用的低位外窗兼做自然补风口。火灾模拟时, 补风窗设为常开的通风口。如图 7 所示, 在火灾发生后排烟口动作前, 补风口风速处于 $-0.5 \sim 0.5 \text{ m/s}$ 之间, 风口仅在由烟气导致的室内外压差下作用, 风速较小。

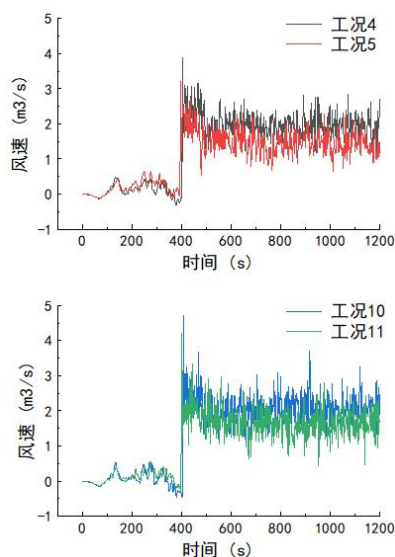


图 7 工况 4、5、10、11 补风口风速-时间曲线

Fig.7 Velocity-Time Curves for Air Supply Inlets under Operating Conditions 4, 5, 10, and 11

当排烟口动作后, 补风口开始向仓库内进风, 风速多处于 $1.0 \sim 3.0 \text{ m/s}$ 之间。图中补风口面积大小排序为工况 5 > 工况 11 > 工况 4 > 工况 10, 补风口风速大小排序与面积相反, 即自然补风口自身具备调节性, 随着补风口面积增加, 单个补风口的风速减少。

上述四种工况均未出现危险状态点, 安全出口处能见度维持在 10 m 以上。如图 8 所示, 增加补风口面积的工况 5、工况 11 能见度波动较小, 仅在火势发展且排烟口动作前能见度有所降低, 排烟

口动作后, 能见度稳定在 20 m 以上。

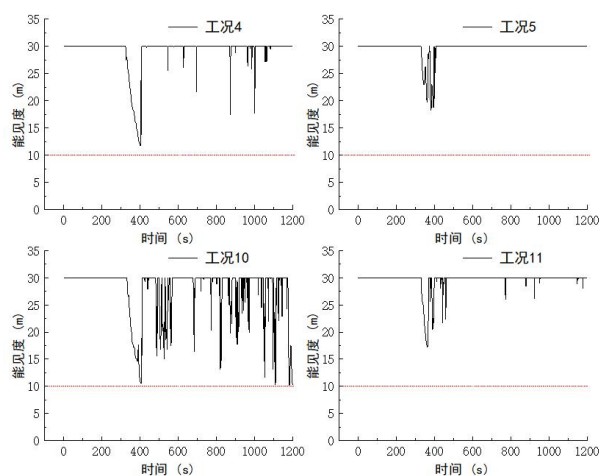


图 8 工况 4、5、10、11 左侧安全出口能见度-时间曲线
Fig.8 Visibility-Time Curves for Left Safety Exit under Operating Conditions 4, 5, 10, and 11

4 设计探讨

4.1 排烟量的取值

烟草仓库受建筑体量、存储类型等多因素影响, 排烟量的取值需考虑烟气运动规律、热释放速率时间曲线、火灾发生至达到危险状态点的时间等因素, 并结合该仓库的地理位置、火灾被发现时间、消防队员出水救火时间等项目实际情况确定。

尤其当烟草仓库内未设置自动喷水灭火系统时(或失效), 排烟系统虽可排出部分的烟气, 减缓热释放速率的持续升高, 但由于仓库内储存的烟草持续点燃, 火灾难免向轰燃阶段发展, 最终处于失控状态。在此工况下, 排烟量的取值需更加谨慎。

4.2 排烟系统设计

按规范要求: “当一个排烟系统担负多个防烟分区排烟时, 对于建筑空间净高大于 6 m 的场所, 其系统排烟量应按排烟量最大的一个防烟分区的排烟量计算^[6]。”由于烟草仓库的预作用自动喷水灭火系统和排烟系统高度依赖于火报系统, 而经上文模拟结果, 受到货架阻挡, 顶棚烟气层形成时间大于常规轴对称型烟羽流火灾场景, 导致火报系统相应时间较晚, 火势已发展至一定阶段, 空间内积累较多烟气。此时, 两个防烟分区合用一个排烟系统的设计方案难以及时排除烟气, 安全出口附近的能见度超出安全值, 不利于人员疏散及火场救援。

4.3 补风量的取值

自然补风口自身具有自适应性,随着补风口面积的增加,“火场能见度-时间”曲线波动收敛,烟层趋于稳定。补风风量按防火分区内单点火灾考虑且补风口均匀布置时,可满足排烟系统所需的补风,火场处于可耐受状态。

《防排烟规范云南疑问释义》中提到“补风以门窗洞口自然补风,不搅扰烟羽流并实现排烟与补风体积流量的自然平衡为佳^[9]。”此番论述在 FDS 模拟结果中再次得到印证。

5 结论

烟草仓库排烟量的取值,建议在查表法、公式法的基础上,采用 FDS 模型进行火灾数值模拟(特别是当烟草存储类仓库的建设规模未达到规范要求设置喷淋系统的限值时),综合多因素考量排烟量的取值。

建议对于烟草类高大仓库,不同防烟分区的排烟系统宜独立设计,当火灾发生时,排烟量满足实际排烟需求。

烟草仓库以及类似项目的补风系统形式,应优先采用自然补风措施,对于有密闭性或其他特殊性要求的项目,自然补风口可采用电动窗代替。

参考文献:

- [1] 赵石楠.烟草类物资仓库火灾特点及处置方法初探[J].法制与社会,2011,(12):198-199.
- [2] DBJ 53-13-2012,烟草建筑消防设计规范[S].昆明:云南科技出版社,2013.
- [3] T/CECS 755-2020,烟草生产建筑设计防火规程[S].北京:中国计划出版社,2020.
- [4] 朱国庆,程远平,顾正洪,等.大空间卷烟制丝车间烟气控制性能化设计[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2007,(5):621-627.
- [5] National Fire Protection Association. Standard for smoke control systems: NFPA 92-2021[S]. Quincy, MA: NFPA, 2021.
- [6] GB 51251-2017,建筑防烟排烟系统技术标准[S].北京:中国计划出版社,2017.
- [7] 侯立萌.某卷烟配送立体仓库火灾及烟气控制数值试验[D].南宁:广西大学,2013.
- [8] BS DD240-1997, Fire Safety Engineering in Buildings[S]. London: BSI Technical Committee, 1997.
- [9] 云南省勘察设计协会.云南省有关<建筑防烟排烟系统技术标准>部分技术问题释疑(修订稿)[S].昆明,2019.
- [10] GB 50116-2013,火灾自动报警系统设计规范[S].北京:中国计划出版社,2014.

(上接第 788 页)

- [4] 叶恩恺,赵仕琦,许敏,等.粤西某图书馆过渡季节室内环境分析及自然通风的可行性[J].暖通空调,2024,54(2):139-143.
- [5] 宋文馨,王世晓,陈哲超.航站楼自然通风设计策略研究-以珠海金湾机场 T2 航站楼为例[J].城市建筑,2024,23(1):225-228.
- [6] 杨柳.建筑气候学[M].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [7] 周范卓,王昭俊,苏小文,等.夏热冬冷地区过渡季热适应模型研究[J].暖通空调,2022,52(3):132-136.
- [8] Nicol J F, Humphreys M A. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings[J]. Energy and buildings, 2002,34(6):563-572.