

航站楼火灾场景下的人员疏散仿真研究

刘明辉, 张龙财, 徐健平, 刘 斌, 李祉良

(中国民用航空飞行学院 机场学院, 四川 广汉 618307)

摘要:机场航站楼结构复杂,发生火灾时极易对人员的生命财产安全造成威胁。为直观了解航站楼中不同位置发生火灾时产生的烟雾对人员疏散的影响,建立航站楼到达厅与夹层通道的火灾模型与人员疏散模型,分析3种不同火源情况下各关键位置烟气的温度、CO浓度和减光系数与疏散情况。结果表明,行李转盘区与夹层通道发生火灾时烟气会弥漫整个夹层通道,影响疏散安全。在航站楼现有建筑结构下,到达口联动开启可有效缩短人员疏散时间。

关键词:仿真模拟;航站楼;火灾;应急疏散

中图分类号:V351.17 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)19-0204-06

随着民航业的发展,我国民航运输机场的数量在逐年增加,《“十四五”民用航空发展规划》指出在2020—2025年,我国会续建34个机场,新开工建设39个机场,进行67个机场的前期准备工作。机场航站楼作为航空运输与陆路运输重要的节点,具有人流量大、建筑结构复杂、人员疏散困难等特点,消防问题应得到重视^[1]。近年来,国内外机场航站楼火灾事故高达数十起。航站楼一旦发生火灾,不仅会造成人员伤亡,使航空运输中断,还会对社会带来严重的负面影响。所以,机场相关部门为航站楼火灾事故制定有效的应急预案十分重要。

国内外学者对人员在火灾场景下的疏散展开了相关研究。宋洋和姜红肖^[2]对机场航站楼进行火灾模拟,分析了航站楼在有喷淋系统的情况下的烟气弥漫情况。张立茂等^[3]运用Pyrosim与Pathfinder软件分析地铁站的人流量容纳能力和火源功率容纳能力。梁永健和杨建鹏^[4]以某大学学生宿舍为例,模拟了火灾情况下人员的疏散情况。刘芳等^[5]模拟了古建筑不同火灾情况下的火灾发展过程。陈永鸿等^[6]利用蚁群算法对古建筑群人员疏散的路径进行了规划分析。刘谦等^[7]、闫卫东等^[8]分别对车间与图书馆进行了火灾模拟与人员疏散的

仿真研究。Watts^[9]在1972年运用计算机模拟了航站楼发生火灾对人员疏散的影响。2012年, Mohammed和 Alsulaiman^[10]将Pyrosim软件与Pathfinder软件相结合,进行火灾模拟与人员疏散行为研究。

综上所述,航站的人流量大,建筑结构独特,国内现阶段的航站楼结构多为廊式结构,到岗旅客需要通过夹层通道前往到达厅,由于旅客对机场结构不熟悉,如若发生火灾事故极易对人员的生命财产安全造成威胁。目前对航站楼到达通道的研究比较少,因此,基于火灾动力学模型(fire dynamics simulator, FDS)建立以兰州中川国际机场T2航站楼到达厅与夹层通道区域的火灾与疏散模拟模型,全面分析到达通道在不同位置发生火灾时的火灾产物对人员疏散的影响,给出疏散方案的改进建议,为机场有关部门制定应急预案提供参考。

1 航站楼火灾模拟

1.1 火灾燃烧模型

火灾燃烧根据火源热释放速率(heat release rate, HRR)的不同发展规律,分为稳态和非稳态两种类型。本文选取非稳态类型中的 t^2 火作为火源。火源热释放速率的发展分为初期增长、稳定燃烧和

收稿日期:2023-07-01

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目-面上项目(J2022-041);大学生创新创业训练计划项目(S202210624080)。

作者简介:刘明辉(1999—),男,辽宁本溪人,中国民用航空飞行学院机场学院,硕士研究生,研究方向为航站楼火灾模拟与应急疏散;张龙财(1981—),男,四川资中人,中国民用航空飞行学院机场学院,教授,博士,研究方向为机场运行;徐健平(1998—),男,安徽合肥人,中国民用航空飞行学院机场学院,硕士研究生,研究方向为机场管理与工程;刘斌(1997—),男,山东泰安人,中国民用航空飞行学院机场学院,硕士研究生,研究方向为机场管理与工程;李祉良(1999—),男,山东泰安人,中国民用航空飞行学院机场学院,硕士研究生,研究方向为航空交通运输。

火势减弱 3 个阶段^[11]。

t^2 火热释放速率表示^[12] 为

$$Q = \alpha t^2 \quad (1)$$

式中: Q 为火源热释放速率; α 为火灾增长系数; t 为火灾燃烧的时间。根据 α 的不同值, t^2 火可分为超快速、快速、中速和慢速 4 种类型^[13]。如若火灾燃烧的初期增长阶段没有得到有效控制而使火源达到稳定燃烧阶段, 此时的热释放速率将趋于平缓, 这个稳定的值被称为最大火源功率。

1.2 火灾动力学模型(FDS)

火灾燃烧可看作流体的运动, 质量守恒、动量守恒与能量守恒是火灾燃烧与烟气流动的基础, 不同反应物的燃烧均遵循此规律^[14]。

1.2.1 质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \bar{u} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (3)$$

式中: ρ 为密度; t 为事件; $\bar{u}$ 为速度; u, v, w 分别为 $\bar{u}$ 在 x, y, z 3 个方向上的速度分量。

1.2.2 动量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \bar{u}) = \nabla \cdot (\gamma \cdot \text{grad } u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \bar{u}) = \nabla \cdot (\gamma \cdot \text{grad } v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \bar{u}) = \nabla \cdot (\gamma \cdot \text{grad } w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \quad (6)$$

$$\text{grad}() = \frac{\partial()}{\partial x} + \frac{\partial()}{\partial y} + \frac{\partial()}{\partial z} \quad (7)$$

式中: p 为压力; grad 为 x, y, z 3 个方向的分量; γ 为流体的动力; S_u, S_v, S_w 为各自的驱动量在 x, y, z 方向上延伸的源。

1.2.3 能量守恒方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} = \\ \frac{\partial\left(\frac{k}{c} \frac{\partial T}{\partial x}\right)}{\partial x} + \frac{\partial\left(\frac{k}{c} \frac{\partial T}{\partial y}\right)}{\partial y} + \frac{\partial\left(\frac{k}{c} \frac{\partial T}{\partial z}\right)}{\partial z} + S_T \end{aligned} \quad (8)$$

式中: c 为比热容; T 为温度; k 为传热系数; S_T 为微元体内的热源。

1.3 航站楼火灾模型

选取兰州中川国际机场 T2 航站楼为研究对象, 建立该机场到达厅与夹层的 3D 模型, 如图 1 所示。

为研究到达区域不同位置发生火灾对人员疏散

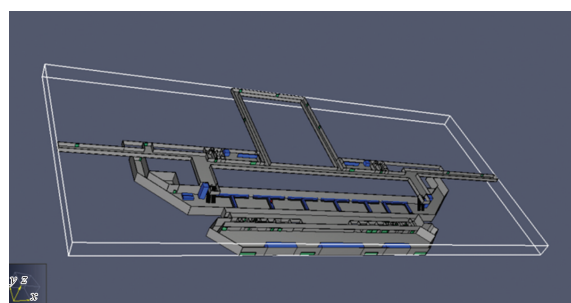


图 1 航站楼到达厅与夹层火灾模型

的影响, 将火源设置在夹层通道、行李转盘和到达厅商铺 3 个位置, 在到达厅与夹层中各到达口、出口及 10 个重要节点位置, 分别放置烟气浓度传感器、热电偶、CO 浓度探测器, 高度分别为 1.75、1.7、1.8 m, 如图 2 所示。火源为 t^2 快速火, 模型运行时间为 500 s。

1.4 火灾模拟结果分析

1.4.1 CO 浓度

火灾燃烧过程中会产生 CO 等有毒物质, 人体处在 CO 浓度为 8×10^{-4} mol/mol 的环境中会出现呕吐等不适症状^[15]。因此选取 8×10^{-4} mol/mol 作为人员在疏散时所能承受的 CO 临界浓度。由图 3 可知, 在火源 1 情况下, 到达厅与夹层连接通道区域 CO 浓度上升最快, 均超过 0.006 mol/mol, 严重威胁人员生命安全。夹层中位置 8、到达口 6 与到达口 12 的 CO 浓度到均在 300 s 后开始发生明显变化, 但均超过 8×10^{-4} mol/mol。位置 3 是到达厅左侧疏散通道, 在 310 s 前 CO 浓度对人体影响较小。到达口 3 与到达口 4 是到达厅右侧疏散出口, CO 浓度在 345 s 后会威胁人员生命安全; 火源 2 情况下夹层通道中所有关键位置 CO 浓度均超过 8×10^{-4} mol/mol, 相比火源 1 情况, 夹层通道发生火灾时 CO 浓度上升速度较快; 火源 3 情况下 CO 浓度超过临界值区域集中在到达厅前侧, 到达厅行李转盘区域与夹层各危险位置的 CO 浓度未达到人体耐受极限。

1.4.2 减光系数

在人员疏散过程中, 疏散的速度会随着烟气减光系数的增加而减小。当减光系数超过 50%/m² 时, 人员的行进速度会降到 0.3 m/s, 相当于盲人的状态^[16]。所以选取 50%/m² 为减光系数的临界值。由图 4 可知, 在火源 1 情况下, 火灾初期烟气会使夹层与到达厅连接通道的减光系数增加。位置 3 与位置 4 处通道变窄, 烟气会受墙壁阻挡造成回流, 所以到达厅两侧区域与到达口的减光系数存在波动。烟气可从到达口排出导致到达

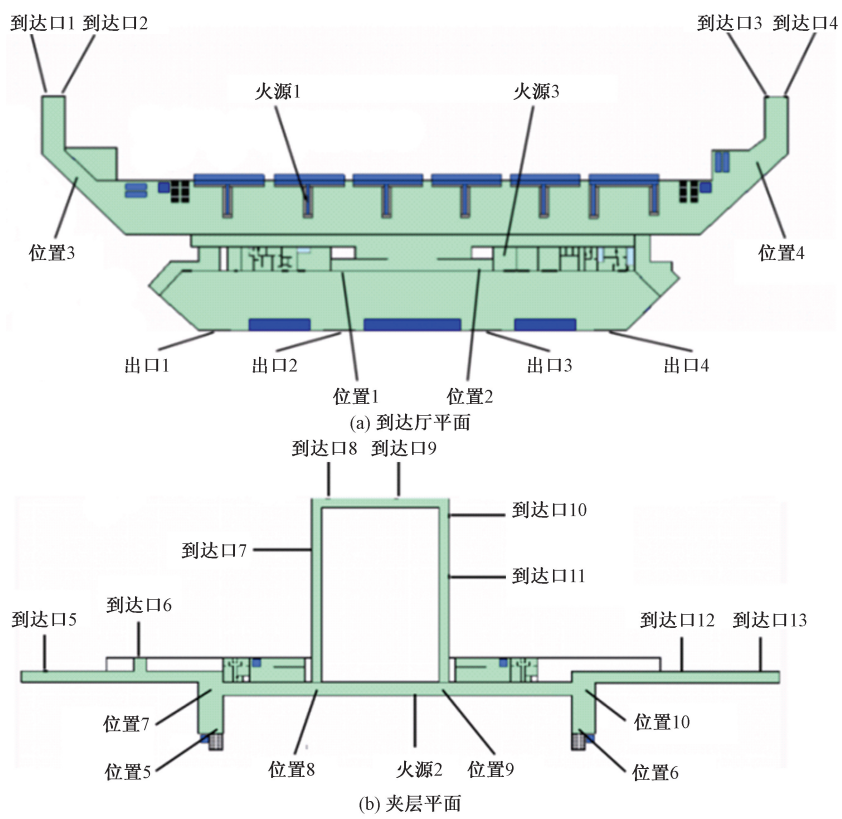


图 2 航站楼到达厅与夹层平面布置

口 3 与到达口 4 在 400 s 后存在下降趋势；火源 2 情况下由于夹层通道层高低，纵深长，烟气会迅速在夹层蔓延开，夹层的 5 个关键位置与 7 个到达口的减光系数均以较快速度超过临界值；火源 3 情况下，烟气到达位置 1 与位置 2 时存在墙壁阻挡，导致烟气聚集，所以位置 1 与位置 2 减光系数上升较快。到达厅前侧通往室外的出口较宽导致减光系数存在较大波动。

1.4.3 温度

由于航站楼相对比较封闭，火灾产生的热羽流会使环境温度升高，当环境温度达到 60 ℃ 时，人体会出现头晕眼花等不良反应^[17]。所以选取 60 ℃ 作为人员疏散时的临界温度。火源 3 情况下各位置探测器温度均未达到临界值，火源 1 与火源 2 各危险位置温度变化情况如图 5 所示。由于烟气温度超过 60 ℃ 的区域集中在火源附近，所以火灾烟气温度对人员疏散的影响较小。

1.5 可用安全疏散时间

经上述分析，当行李转盘区发生火灾时，烟气会弥漫到夹层，影响范围较大；夹层通道发生火灾时烟气会弥漫整个夹层通道，人员疏散易发生危险；到达厅商铺发生火灾的影响区域在到达厅前侧。对比 3 种火源情况各个位置的 CO 浓度、减光

系数与温度到达临界值的时间，取最短时间作为该位置的可用安全疏散时间 (available safe egress time, AEST)。3 种火源情况下各超过临界值位置 AEST 见表 1。

表 1 不同火源情况下各危险位置的可用安全疏散时间

火源 1		火源 2		火源 3	
位置	AEST/s	位置	AEST/s	位置	AEST/s
位置 3	270	位置 5	267.5	位置 1	329.5
位置 4	325	位置 6	318.5	位置 2	405
位置 5	145.5	位置 7	196	出口 1	273
位置 6	268	位置 8	124	出口 2	306.5
位置 7	225	位置 9	59	出口 3	369
位置 8	371	位置 10	197.5	出口 4	271.5
位置 10	311	到达口 5	377.5		
到达口 3	345	到达口 6	320		
到达口 4	355	到达口 7	266		
到达口 6	366	到达口 8	366		
到达口 12	425.5	到达口 9	443		
		到达口 12	328		

2 航站楼疏散模拟

2.1 人员疏散理论

必须安全疏散时间 (required safe egress time, REST) 是指火灾发生时，人员疏散到安全地点所需要的时间。为保证人员安全疏散，应满足 REST < AEST。REST 一般由 3 部分组成，即

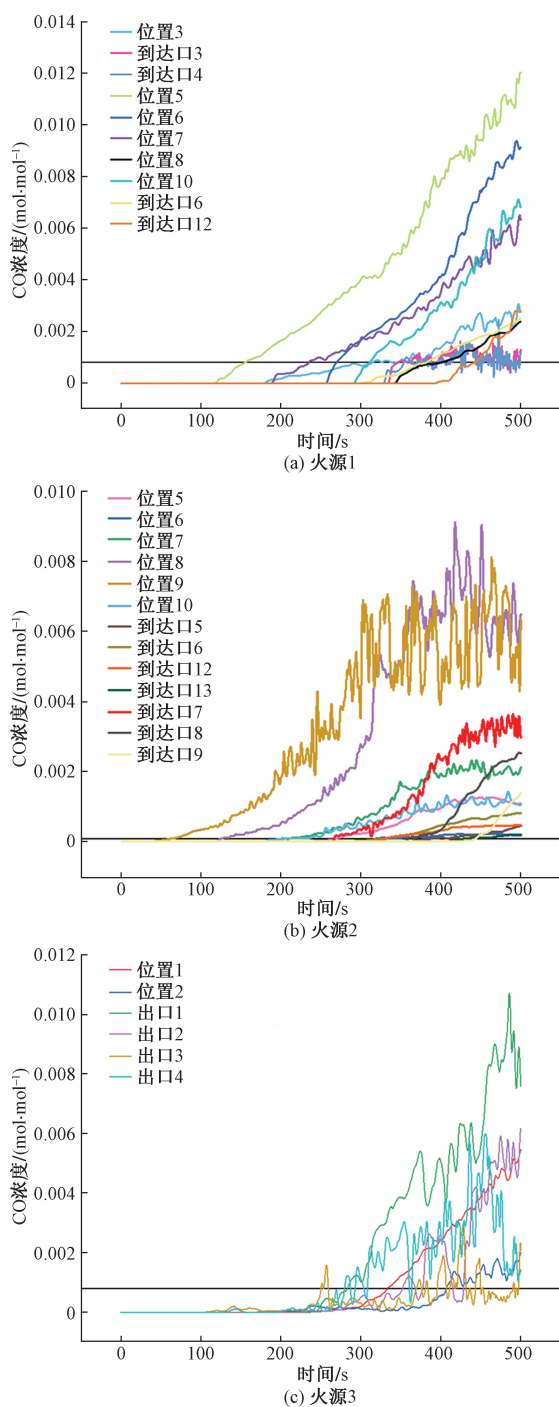


图3 不同火源情况危险位置CO浓度变化

$$\text{REST} = t_p + t_r + t_m \quad (9)$$

式中: t_p 为火灾探测系统检测到火灾发生并报警所需要的时间; t_r 为人员接收到报警信息并疏散的准备时间; t_m 为人员从开始疏散至疏散完成的时间。现阶段火灾探测系统可探测的火灾规模为100 kW,所以火源1、火源2与火源3的火灾探测时间均为33.5 s。根据《火灾报警控制器通用技术条件》(GB 4717—1993)的相关规定, t_p 为40 s。航站楼具实时事故广播的条件,其中的人员属于清醒状态,

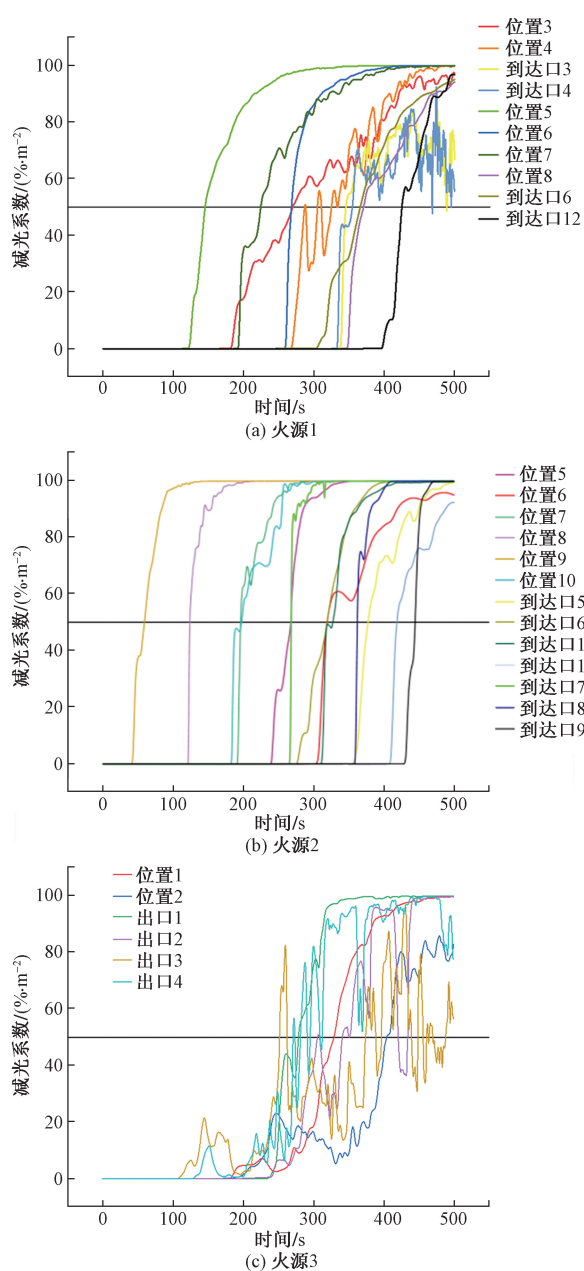


图4 不同火源情况危险位置减光系数变化

对建筑内部构造不熟悉,所以 t_r 取120 s^[18]。 t_m 由软件仿真得出。

2.2 疏散模型构建

通过Pathfinder软件建立人员疏散模型,到达厅一层出口全部开启、到达口2、到达口4开启,到达口1与到达口4关闭;夹层中到达口6、到达口8、到达口10、到达口13开启,到达口5、到达口7、到达口9与到达口12关闭。到达口可作为疏散出口进行疏散。疏散人数选取T2航站楼最大高峰小时到港的旅客人数1 000人^[19],随机分布在到达厅与夹层中。假设到达旅客中未成年人占10%,成年男性40%,成年女性占40%,老年人占10%。参照

《中国成年人人体尺寸》(GB/T 10000—1988)、《中国未成年人人体尺寸》(GB/T 26158—2010)中的数据,疏散人员的肩宽、身高、移动速度的设定见表 2。选取 Steering 模式进行疏散模拟。

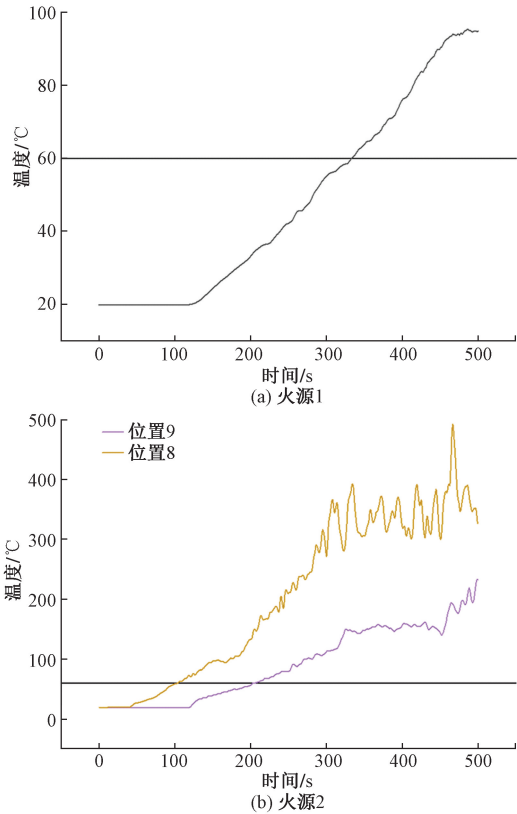


图 5 不同火源情况危险位置烟气温度变化

表 2 疏散人员属性

年龄段	肩宽/cm	身高/m	移动速度/(m·s ⁻¹)
未成年人	30.3	1.35	0.75
成年男性	40.4	1.75	1.2
成年女性	37.2	1.63	1.0
老年人	36.1	1.61	0.6

2.3 疏散结果分析

火源 1 情况与火源 3 情况的 t_m 为 210.3 s。火源 2 情况下人员开始疏散时,位置 6、位置 9 与位置 8 的危险因素均超过临界值,超过临界值,所以两区域在疏散过程中禁止人员通行,重新仿真后得出火源 2 的 t_m 为 266.8 s。人员未通过的位置与关闭的到达口的 REST 为 0 s。各位置的必须安全疏散时间见表 3。火源 1 与火源 2 情况存在没有实现安全疏散的位置,因此,航站楼到达厅左侧行李转盘处发生火灾时,应重点防范夹层左侧通道人流交汇位置与到达厅右侧到达口通道;夹层通道发生火灾时应重点防范夹层两侧通道人流交汇位置;到达厅商铺发生火灾时可以实现安全疏散。

2.4 疏散方案改进尝试

为实现安全疏散,提高疏散效率。在航站楼现有建筑布局的情况下,对火源 1 与火源 2 情况的疏散方案进行改进。在火灾报警后,各个到达口联动开启后均可作为疏散通道,再次仿真后结果见表 4。

火源 1 与火源 2 情况改进后的必须安全疏散时间分别为 293.8 s 与 309.3 s,疏散时间相比到达口未联动开启情况减少了 20.7% 和 31.7%。由表 4 可见,火源 1 情况所有危险位置已经实现安全疏散,火源 2 情况夹层中位置 5 与位置 7 未实现安全疏散。所以,到达口联动开启可以有效缩短人员疏散时间,减小人员在火灾时发生危险的概率。

3 结论

1) 机场航站楼建筑结构复杂,疏散出口较多,本文基于 FDS 对不同位置火灾的仿真模拟,可以直观地反映航站楼火灾场景下各位置的烟雾与人员疏散情况,机场相关部门可根据不同火源烟气弥漫与人员疏散的特点,制定应急预案,提高疏散效率。

表 3 不同火源情况各危险位置的必须安全疏散时间

火源 1			火源 2			火源 3		
位置	REST/s	是否安全疏散	位置	REST/s	是否安全疏散	位置	REST/s	是否安全疏散
位置 3	257	是	位置 5	0	是	位置 1	256	是
位置 4	345	否	位置 6	324	是	位置 2	255	是
位置 5	0	是	位置 7	236	否	出口 1	204	是
位置 6	267	是	位置 8	0	是	出口 2	290	是
位置 7	255	否	位置 9	0	是	出口 3	288	是
位置 8	195	是	位置 10	295	否	出口 4	203	是
位置 10	238	是	到达口 5	0	是			
到达口 3	0	是	到达口 6	305	是			
到达口 4	370.3	否	到达口 7	0	是			
到达口 6	326	是	到达口 8	246	是			
到达口 12	0	是	到达口 9	0	是			
			到达口 12	0	是			

表 4 到达口联动开启后各危险位置的必须安全疏散时间

火源 1			火源 2		
位置	REST/s	是否安全疏散	位置	REST/s	是否安全疏散
位置 3	257	是	位置 5	0	是
位置 4	269	是	位置 6	0	是
位置 5	0	是	位置 7	236	否
位置 6	0	是	位置 8	0	是
位置 7	204	是	位置 9	0	是
位置 8	207	是	位置 10	285	否
位置 10	229	是	到达口 5	187	是
到达口 3	294	是	到达口 6	305	是
到达口 4	228	是	到达口 7	199	是
到达口 6	273	是	到达口 8	188	是
到达口 12	253	是	到达口 9	182	是
			到达口 12	310	是

2)到达厅行李转盘区发生火灾时,烟气会弥漫到夹层,影响范围大,但烟气弥漫速度慢;夹层的到达通道具有层高低、距离长的特点,当发生火灾时,烟气会迅速向通道内弥漫,弥漫速度快,易发生危险,机场相关部门应重点防范到达通道人流交汇的位置。

3)到达口在火灾场景下疏散时联动开启能缩短人员疏散的必须安全疏散时间。

参考文献

[1] 朱蕾. 大型航站楼的消防设计探讨[J]. 消防科学与技术, 2008,27(11):807-809.

[2] 宋洋,姜红肖. 基于 Pyrosim 的航站楼火灾差异化喷淋系统仿真[J]. 科学技术与工程,2021,21(25):10998-11004.

[3] 张立茂,吴贤国,李博文,等. 基于火灾模拟器和 Pathfinder 的地铁火灾人员疏散[J]. 科学技术与工程,2018,18(4):203-209.

[4] 梁永健,杨建鹏. 某大学学生宿舍楼火灾危险性研究[J]. 科学技术与工程,2012,12(23):5956-5960.

[5] 刘芳,怀超平,李竞岌. 木结构古建筑室内火灾发展数值分析[J]. 科学技术与工程,2019,19(9):299-304.

[6] 陈永鸿,甘文杰,武蕾,等. 基于改进蚁群算法的古建筑群火灾疏散路径规划[J]. 科学技术与工程,2023,23(13):5662-5669.

[7] 刘谦,赵道亮,杨海明,等. 基于 Pyrosim 及 Pathfinder 的车间应急疏散研究[J]. 消防科学与技术,2020,39(7):927-930.

[8] 闫卫东,张瑞,刘家喜,等. 基于 Pathfinder 的高校图书馆火灾疏散研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2021,37(4):627-633.

[9] WATTS J W. A simulation model for studying the evacuation of large building populations[J]. Fire Technology, 1972,8(4):271-277.

[10] ALMESNED M T, ALSULAIMAN A A. simulation of fire scenarios with human behavior in a building using Pyrosim and Pathfinder software[J]. Journal of Fire Protection Engineering,2012,22(3):169-187.

[11] DINENNO P J, BEYLER C L, CUSTER R L P, et al. SFPE handbook of fire protection engineering[M]. 2nd Edition. Boston:Society of Fire Protection Engineers and the National Fire Protection Association,1995:1-3.

[12] 王静波. 建筑性能化设计方法中烟气控制安全评估方法的研究[D]. 重庆:重庆大学,2003.

[13] Fire safety engineering: design fire scenarios and design fire[R]. London:British Standards Institution,1997.

[14] 张果霞. 基于 Pyrosim+Pathfinder 的地铁火灾人员疏散研究:以青岛五四广场为例[D]. 青岛:青岛理工大学,2019.

[15] 崔红杜,张吉光,史自强. 高层建筑和地下建筑通风与防排烟[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.

[16] 易亮,朱书敏,徐志胜,等. 火灾影响下人员行为量化分析研究[J]. 中国西部科技. 2010,9(8):4-6,59.

[17] 王平. 大型公共建筑人员疏散性能化评估软件的开发[D]. 武汉:武汉大学,2005.

[18] 窦清华. 机场航站楼自然排烟模式的数值模拟研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2008.

[19] 余美君. 航站楼到港旅客应急疏散研究[D]. 广汉:中国民用航空飞行学院,2022.

Simulation Study of Personnel Evacuation under Fire Scenario in Airport Terminal

LIU Minghui, ZHANG Longcai, XU Jianping, LIU Bin, LI Zhiliang

(School of Airport,Civil Aviation Flight University of China,Guanghan 618307,Sichuan,China)

Abstract: The complex structure of the airport terminal building poses a threat to the life and property of people in case of fire. In order to visualize the impact of smoke on evacuation in different locations in the terminal building, a fire model was developed for the arrival hall and mezzanine passageway of the terminal building to analyze the temperature, CO concentration and light reduction coefficient of smoke at each key location under three different fire sources. Evacuation simulations were conducted for the arrival area of the terminal building to analyze the evacuation situation of each key location under different fire sources. The results show that among the different types of fires in the terminal building, there are areas where both the mezzanine passageway and the arrival hall are not safely evacuated in case of fire in the baggage carousel area. Smoke will fill the whole mezzanine passageway in case of fire in the mezzanine passageway, which makes evacuation of people dangerous. The stores in the arrival hall can be safely evacuated in case of fire. Under the existing building structure of the terminal building, the arrival gates can be opened to shorten the evacuation time effectively.

Keywords: simulation; terminal building; fire; emergency evacuation