

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20201211002

圆形开口建筑火灾外立面热羽流温度演化研究*

张子健^{1,2}, 吕柏恩¹, 张孝春¹, 陶浩文³, 程章昆¹, 黄鑫宝¹

(1. 广东工业大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510006; 2. 哈尔滨工业大学(深圳)机电工程与自动化学院, 广东 深圳 518055; 3. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 建筑火灾是火灾科学领域的重要研究方向之一, 外立面热羽流温度是评价建筑火灾危险性的重要指标。基于弗洛德相似准则, 利用缩尺寸单一开口燃烧腔室模型开展建筑火灾实验, 对不同火源功率和开口尺寸下圆形开口建筑火灾外立面热羽流温度分布规律进行探究。研究表明: (1) 在燃烧状态稳定下, 对于确定开口尺寸和火源功率, 圆形开口燃烧室内顶棚下方热气体温度基本均匀且保持一致; (2) 在圆形开口建筑火灾中, 火溢流和顶棚射流火焰的扩展工况下, 外立面溢出热羽流温度演化与矩形开口火溢流工况相似; (3) 基于热羽流温度实验数据, 分别建立了不同开口尺寸、火源功率下圆形开口建筑火灾顶棚射流火焰扩展和火溢流工况的外立面溢出热羽流向温度预测模型。

关键词: 建筑火灾; 圆形开口; 火溢流; 顶棚射流火焰扩展; 外立面热羽流温度

中图分类号: X932 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)04-0812-07

Study on Temperature Evolution of Facade Thermal Plume from a Fire Compartment with Circular Opening

ZHANG Zijian^{1,2}, LYU Baien¹, ZHANG Xiaochun¹, TAO Haowen³,
CHENG Zhangkun¹, HUANG Xinbao¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. School of Mechanical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China; 3. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Building fire is one of the important research orientations in fire science, and the temperature of facade spill thermal plume is a vital indicator for the hazard evaluation of building fire. On the basis of Froude similarity theory, the fire experiments on a reduced-scale fire compartment with a single opening were carried out. The temperature profile of facade thermal plume under fire of buildings with different circular openings was investigated considering various heat release rates of the fire source. The results reveal that: (1) At a steady combustion state, hot gas temperatures beneath the ceiling of the fire compartment are almost uniform for a given opening and a specific heat release rate of the fire source. (2) For both cases of spill fire plume and ceiling jet flame extension, the tempera-

* 收稿日期:2020-12-11;修回日期:2021-02-19

基金项目:广东省重点领域研发计划项目(2019B111102003)、广东省自然科学基金项目(2019A1515011846)、广东工业大学大学生创新计划项目(xj201911845390)资助

作者简介:张子健(1994—),男,博士研究生。主要从事建筑火灾与燃烧科学研究。E-mail:zijianzhang@stu.hit.edu.cn

通讯作者:张孝春(1987—),男,副教授,硕导,博士。主要从事火灾安全与燃烧科学研究。E-mail:xczhang1@gdut.edu.cn

ture evolutions of facade thermal plume under fire of buildings with circular opening are similar to that of spill fire plume for rectangular opening. (3) With experimental data of thermal plume temperature, new non-dimensional correlations for the cases of spill fire plume and ceiling jet flame extension were established to predict the vertical temperature of facade thermal plume under fire of buildings with different circular openings and various heat release rate of the fire source.

Keywords: building fire; circular opening; spill fire plume; ceiling jet flame extension; facade thermal plume temperature

引言

当前,现代建筑行业的迅速发展,各类建筑不断增多,火灾风险随之增加。建筑火灾事故频发,造成了重大人员伤亡和财产损失,建筑火灾安全问题引起了全社会的广泛关注,建筑火灾危险特性已成为火灾科学领域重要的研究课题之一^[1-3],研究建筑外立面火羽流特征参数演化规律显得尤为重要。

国内外学者针对外立面溢出火羽流温度演化规律开展了大量研究^[4-6]。日本学者 S. Yokoi^[7]通过缩尺寸实验研究了不同开口尺寸和火源功率下溢出热羽流温度的演化规律,利用特征长度 $r_0 = \sqrt{HW/2\pi}$ 建立了溢出热羽流温度分布模型。在 S. Yokoi 的研究^[7]基础上, Y. Ohmiya 等^[8]引入虚拟点源理论^[9],提出了外立面热羽流温度修正模型。近年来, Y. P. Lee^[10]提出了虚拟矩形火源理论用于表征外立面火羽流行为特性,虚拟矩形火源位于开口中性面高度,长宽分别为 $l_1 = (A\sqrt{H})^{5/2}$ (平行于开口) 和 $l_2 = (AH^2)^{1/4}$ (垂直于开口),其长边紧贴于建筑开口。根据虚拟矩形火源理论, Y. P. Lee 等^[11]利用新定义的特征长度 $\tilde{l}_1 = (\rho_g/\rho_\infty)^{2/5} l_1$ 提出了新的溢出热羽流温度预测模型。随后, F. Tang 等^[12]进一步考虑虚拟点源理论^[9],对外立面火羽流竖向温度分布模型进行了有效修正。不难发现,上述外立面火羽流温度分布模型都主要针对矩形(正方形)开口建立。

随着人们对建筑的个性化追求明显增加,建筑风格趋于多元化发展态势,圆形窗口(开口)建筑日渐增多,如日本中银胶囊塔、美国纽约 Dream Downtown(梦幻市区酒店)等。关于圆形开口建筑火灾的研究仍然相当缺乏。目前, X. C. Zhang 等^[13]

利用缩尺寸实验研究并揭示了圆形开口建筑火灾室内气体温度和外立面火焰演化规律。然而,尚未有圆形开口建筑火灾外立面火羽流温度分布的相关报道,矩形开口的理论模型对于圆形开口的适用性仍然未知。因此,有必要对圆形开口建筑火灾外立面火羽流温度演化开展研究,对建筑火灾经典理论进行有效补充,为圆形窗口建筑消防设计提供实验依据。

本文基于弗洛德相似准则^[14],首次通过开展缩尺寸模型实验,重点分析了不同开口尺寸和火源功率下的圆形开口建筑火灾外立面溢出热羽流竖向温度演化规律,并结合无量纲分析建立了数学预测模型。

1 实验装置

图1为实验装置示意图,主要包括缩尺寸建筑模型、燃烧系统及温度数据采集系统3个部分。通过实验可获取室内热气体和外立面热羽流温度数据。

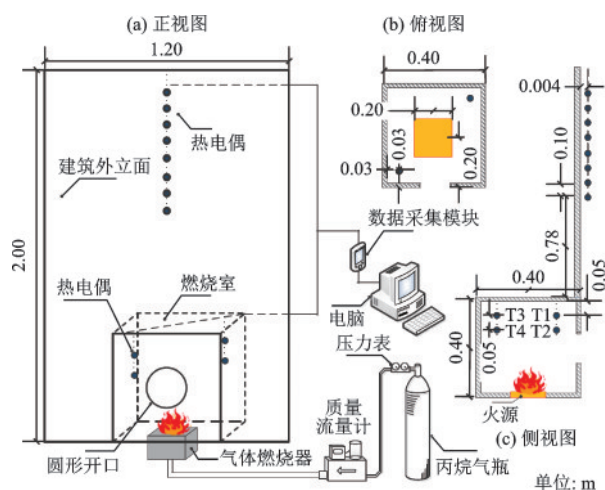


图1 实验装置

Fig.1 Experiment setup

(1)缩尺寸建筑模型。采用边长 0.40 m 的立方体燃烧室模拟室内火灾,外部为 1 mm 厚的钢板,内衬有 3 mm 厚的陶瓷纤维板(其密度为 285 kg/m³,热导率为 0.18 W/(m·K),比热容为 1 390 J/(kg·K))。在侧墙上设置单一圆形开口,2.00 m×1.20 m 的防火板紧贴开口模拟建筑外立面。在燃烧室侧壁和外立面上钻有小孔以布置热电偶,地板正中央预留边长为 0.20 m 的区域设置燃烧器。

(2)燃烧系统。在燃烧室地板正中央设置边长为 0.20 m 的多孔气体燃烧器,其上表面与地板齐平,钻有 400 个直径为 5 mm 的小孔,小孔间距为 10 mm。选择丙烷气体作燃料,丙烷气体由气瓶通过管路依次经压力阀和质量流量计输送至燃烧器。在实验中,假设丙烷的燃烧效率为 100%^[15],通过调节质量流量计可控制丙烷气体流量,可计算确定火源功率。

(3)温度数据采集系统。在燃烧室的内部和外部的角落共设置 4 个直径为 0.5 mm 的 K 型热电偶,距离相邻侧墙表面 0.03 m,内外角落的热电偶分别位于顶棚下方 0.05 m 和 0.10 m 处,用于测量室内热气体温度。在外立面上设置 8 个直径为 0.5 mm 的 K 型热电偶,以测量外立面热羽流温度。热电偶位于圆形开口中心线正上方,距离外立面 4 mm,相邻两个测点间距为 0.10 m,最下方热电偶与燃烧室外部顶棚距离为 0.78 m。实验中热电偶将温度信号转化为电信号,经补偿导线输送到数据采集模块,最后由电脑记录并输出温度数据。

2 实验开展

实验时,在不同的圆形开口尺寸条件下,点燃燃烧室内燃烧器输出的丙烷气体,通过质量流量计将丙烷气体流量调节至不同的实验设计值,进而调节至不同的火源功率(HRR),每个功率工况维持一段时间,待燃烧室内燃烧状态达到稳定后,利用温度数据采集系统记录稳定状态下不同开口尺寸和火源功率下室内热气体温度和外立面热羽流温度数据,记录时间间隔为 1 s。实验时环境温度约为 298 K。实验工况设定见表 1。

表 1 实验工况

Table 1 Summary of experimental conditions

序号	开口直径 d/m	火源功率(HRR)/kW
1-7	0.15	17.51, 18.76, 23.45, 28.14, 32.83, 37.52, 46.90
8-16	0.20	17.20, 18.76, 20.32, 23.45, 26.58, 31.27, 34.39, 39.08, 46.90
17-22	0.25	15.63, 18.76, 23.45, 28.14, 32.83, 46.90

3 实验结果与讨论

实验中,所有工况均能形成外立面火焰。结合前人研究^[13]可知(这里需注意,文献[13]存在文字编辑错误,即理论推导分析中主要考虑理想状态,所使用的气体流动系数 C_d 为 1.0 而非 0.7),对于直径为 0.15 m 及直径为 0.20 m 中 $HRR \leq 26.58$ kW 的工况,外立面火焰由火溢流(通风控制火灾)诱导产生;对于直径为 0.25 m 及直径为 0.20 m 中 $HRR > 26.58$ kW 的工况,外立面火焰由室内顶棚射流火焰扩展(燃料控制火灾)诱导产生。这里,火溢流是指室内空气被燃烧完全消耗,剩余燃料随热气体流出室外,与空气接触发生外部燃烧。顶棚射流火焰扩展是指开口较大时室内火焰撞击并沿着顶棚扩展至室外,室内空气未完全被燃烧消耗,其火源功率小于火溢流阶段室内最大功率。

3.1 室内上层热气体温度

图 2 为典型圆形开口工况燃烧室内上层热气体温度(T_g)随时间变化的关系。由图 2 可知,在稳定燃烧状态下,对于确定的开口尺寸和火源功率,燃烧室内 4 个热电偶测得的热气体温度基本保持一致,每个测点温度随时间变化趋于稳定。基于此,通过计算可得到稳定状态下不同工况室内热气体平均温度,用于分析外立面热羽流竖直温度规律。实验测量得到的室内热气体平均温度见表 2。

3.2 外立面热羽流竖向温度分布

在圆形开口通风控制火灾中,开口中性面位置(H_n)在 $0.41d$ 与 $0.44d$ 范围内^[13]。选择开口中性面高度(H_n)为 $0.42d$ 的位置作为参考高度,以分析外立面热羽流温度。图 3 为圆形开口建筑火灾外立面

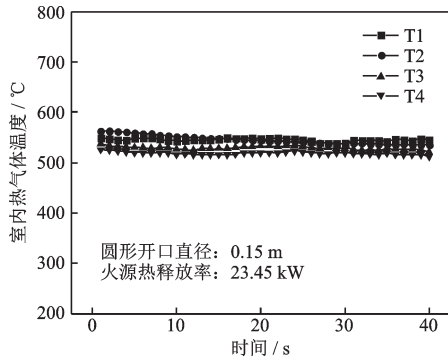


图2 典型圆形开口工况室内上层热气体温度随时间变化
Fig.2 Hot gas temperature history of upper layer inside typical circular opening room

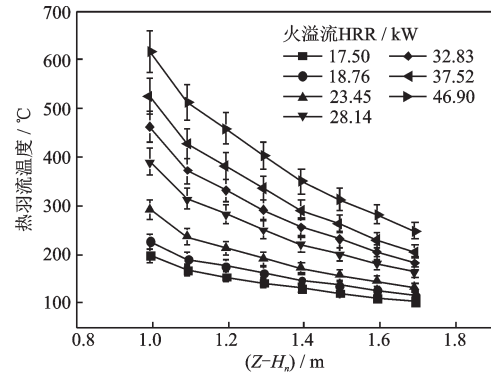
表2 不同开口尺寸和火源功率下室内热气体平均温度
Table 2 Average temperature of hot gas inside room for different opening dimensions and total heat release rates

序号	开口直径/m	室内上层热气体平均温度/°C
1-7	0.15	597.39, 588.65, 534.36, 511.07, 488.12, 478.35, 454.44
8-12	0.20	703.17, 711.73, 715.70, 724.69, 731.12
13-16	0.20	736.13, 736.74, 736.89, 722.68
17-22	0.25	675.85, 713.45, 733.99, 750.33, 761.80, 769.88

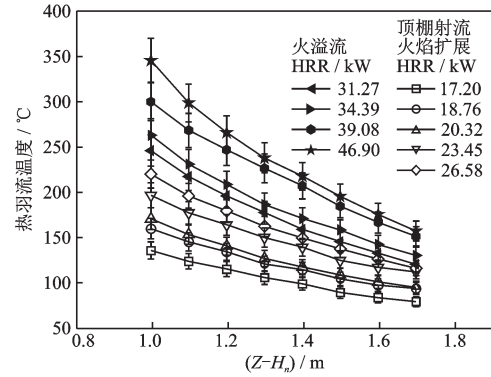
热羽流竖向温度分布曲线,图中 $Z-H_n$ 表示热电偶至参考高度的距离(m)。可知:(1)在火源功率和开口尺寸相同条件下,热羽流温度随垂直高度的增加而降低,且垂直高度越高热羽流温度下降速率越小;(2)当火源功率和垂直高度一定时,开口尺寸越小的工况热羽流温度越高;(3)对于确定的圆形开口,在相同垂直高度位置的热羽流温度随火源功率的增大而升高。特别地,圆形开口顶棚射流火焰扩展工况的热羽流竖向温度演化趋势与火溢流工况相似。圆形开口建筑外立面竖向热羽流温度演化过程与矩形开口火溢流工况^[13-14]基本一致。

3.3 外立面热羽流竖向温度模型

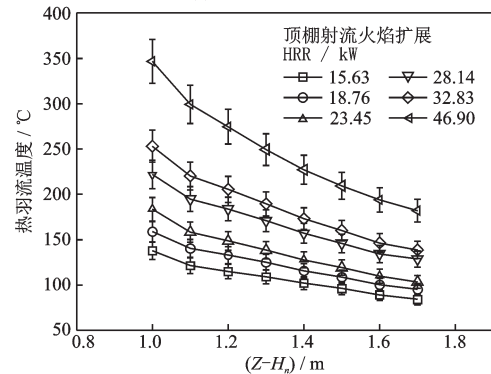
依据Y. P. Lee^[10]的研究,外立面火羽流演化特性受开口形状和尺寸的影响。F. Tang等^[12]通过理论分析得到与矩形开口尺寸相关的特征长度,基于实验数据建立了矩形开口溢出热羽流温度无量纲预测模型:



(a) 圆形开口直径0.15 m



(b) 圆形开口直径0.20 m



(c) 圆形开口直径0.25 m

图3 不同开口尺寸和火源功率下外立面热羽流竖向温度分布

Fig.3 Vertical temperature profile of facade thermal plume with different opening dimensions and total heat release rates

$$\theta = \frac{\Delta T_z / T_\infty}{\left(\frac{\dot{Q}_{\text{conv}}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g} \tilde{\ell}_1^{5/2}} \right)^{2/3}} = \frac{\Delta T_z / T_\infty}{(\dot{Q}_{\text{conv}}^*)^{2/3}} = f\left(\frac{Z - H_n}{\tilde{\ell}_1} \right) \quad (1)$$

式中, θ 为无量纲溢出热羽流温升; ΔT_z 为溢出热羽流温升,K; T_∞ 为环境温度,K; \dot{Q}_{conv} 为外立面火焰上方热羽流对流功率,kW; ρ_∞ 为环境空气密度, kg/m^3 ; c_p 为环境空气定压比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; g 为重力加速度, m/s^2 ; \dot{Q}_{conv}^* 为外立面火焰上方无量纲热羽流对流

功率; \bar{l}_1 为特征长度(与矩形开口尺寸相关), m。

结合图3可知, 将式(1)中特征长度替换为圆形开口尺寸相关的特征长度, 可表征圆形开口外立面热羽流温度。

对于矩形开口, S. Yokoi^[7]假设开口中性面高度约为开口高度的一半, 选取了中性面上方开口面积的等效半径作为特征长度表征溢出热羽流温度。同理, 可通过理论分析得到圆形开口中性面上方开口面积的等效半径, 以对圆形开口溢出热羽流竖直温度演化特性进行表征。

依据 S. Yokoi^[7]的研究, 圆形开口中性面上方开口面积(A_{upper})可表示为(r 为圆形开口半径, m):

$$A_{upper} = (r - H_n) \sqrt{r^2 - (r - H_n)^2} + [\pi r^2 - \pi r^2 \times (2 \arccos \frac{r - H_n}{r}) / 2\pi] = (r - H_n) \sqrt{r^2 - (r - H_n)^2} + r^2 (\pi - \arccos \frac{r - H_n}{r}) \quad (2)$$

中性面上方开口面积的等效半径(r_e)可表示为:

$$r_e = \sqrt{\frac{A_{upper}}{\pi}} \quad (3)$$

结合上述特征长度 r_e 以及式(1)可推断, 圆形开口外立面热羽流温升应满足下面无量纲关系式:

$$\theta = \frac{\Delta T_z / T_\infty}{(\frac{\dot{Q}_{conv}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g} r_e^{5/2}})^{2/3}} = f(\frac{Z - H_n}{r_e}) \quad (4)$$

其中, 外立面火焰上方的热羽流对流功率 \dot{Q}_{conv} 等于开口流出气体对流功率与溢出室外功率之和^[15-16], 即:

$$\dot{Q}_{conv} = (\dot{m}_f + \dot{m}_a) c_p (T_g - T_\infty) + \dot{Q}_{ex} \quad (5)$$

式中, \dot{Q}_{ex} 为燃料溢出功率, kW; \dot{m}_f 为燃料质量流率, kg/s; \dot{m}_a 为空气质量流率, kg/s。燃料质量流率远小于空气质量流率 ($\dot{m}_f \ll \dot{m}_a$), 故可忽略不计^[11, 15]。结合前人研究^[13], 可以确定外立面火焰上方对流热功率。

对于顶棚射流火焰扩展工况 ($\dot{Q} < \dot{Q}_{inside}$):

$$\dot{Q}_{conv} = \dot{m}_a c_p (T_g - T_\infty) + \dot{Q}_{ex} = \frac{\dot{Q}_{critical}}{\Delta H_{ox}} c_p (T_g - T_\infty) + (\dot{Q} - \dot{Q}_{critical}) \quad (6)$$

对于火溢流工况 ($\dot{Q} \geq \dot{Q}_{inside}$):

$$\dot{Q}_{conv} = \dot{m}_a c_p (T_g - T_\infty) + \dot{Q}_{ex} = 3.0 r^{5/2} c_p (T_g - T_\infty) + (\dot{Q} - \dot{Q}_{inside}) \quad (7)$$

式中, $\dot{Q}_{critical}$ 为顶棚射流火焰扩展引起的外立面火焰出现临界火源功率, kW; ΔH_{ox} 为每消耗单位空气质量释放的热量 (约为 3 000 kJ/kg^[16-17]); \dot{Q}_{inside} 为火溢流阶段室内最大功率 ($\dot{Q}_{inside} \approx 3 000 r^{5/2}$ ^[13]), kW。

依据式(4), 对外立面热羽流温升进行无量纲处理, 做出外立面热羽流竖向无量纲温升 θ 与无量纲竖直高度 $(Z - H_n) / r_e$ 的变化关系, 如图4所示。本文主要探究外立面热羽流温度演化, 暂不分析间歇火焰区域温度。基于温度数据最优拟合可分别得到顶棚射流火焰扩展 ($\dot{Q} < \dot{Q}_{inside}$) 与火溢流 ($\dot{Q} \geq \dot{Q}_{inside}$) 工况外立面热羽流竖向温升预测公式:

$$\theta = \frac{\Delta T_z / T_\infty}{(\frac{\dot{Q}_{conv}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g} r_e^{5/2}})^{2/3}} = 4.1 (\frac{Z - H_n}{r_e})^{-4/3} \quad (8)$$

$$\theta = \frac{\Delta T_z / T_\infty}{(\frac{\dot{Q}_{conv}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g} r_e^{5/2}})^{2/3}} = 17.6 (\frac{Z - H_n}{r_e})^{-5/3} \quad (9)$$

公式(8)和(9)在 $0.19 \leq r / H_{wall} \leq 0.31$ 时适用 (H_{wall} 为燃烧室的外墙高度, 0.40 m)。

在矩形开口火溢流情况下, F. Tang 等^[12]认为, 当溢出热羽流表现为类线性羽流时, 热羽流温升的拟合指数为 -1; 当溢出热羽流表现为半轴对称羽流时, 热羽流温升的拟合指数为 -5/3。在圆形开口建筑火灾中, 对于顶棚射流火焰扩展工况, 拟合指数约为 -4/3, 介于 -1 与 -5/3 之间, 说明外立面热羽流处于类线性羽流与半轴对称羽流之间的过渡区域。对于火溢流工况, 拟合指数约为 -5/3, 说明可认为外立面热羽流表现为半轴对称羽流。由图4可知, 公式(8)和(9)对应的 R^2 分别为 0.97 和 0.91, 表明了拟合公式具有良好的预测效果。

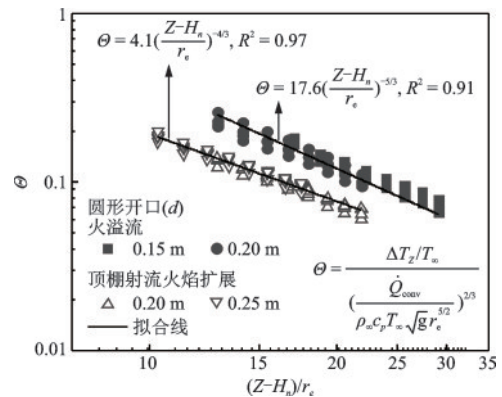


图4 外立面热羽流无量纲温升与无量纲竖直高度的拟合关系
Fig.4 Correlation of dimensionless temperature rise of facade thermal plume and dimensionless vertical height

图5为基于拟合公式(8)和(9)得到的外立面热羽流温度预测值与实验结果的对比关系。由图可知,在相对偏差小于10%的范围内,外立面热羽流温度预测值与实验结果表现出良好的一致性,进一步证明无量纲预测公式(8)和(9)能有效预测圆形开口室内火灾火溢流和顶棚射流火焰扩展工况下外立面热羽流垂直温度。

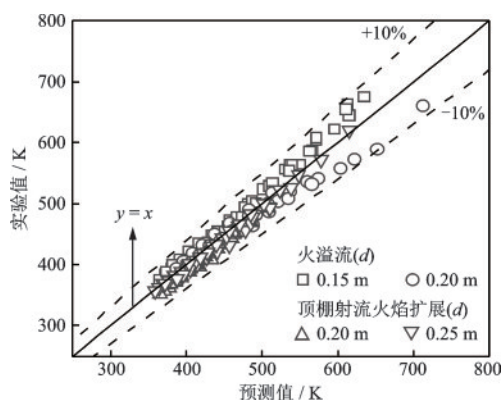


图5 外立面热羽流温度预测值与实验结果的对比

Fig.5 Comparison between predicted values of temperature of facade thermal plume and experimental results

4 结 论

基于弗洛德相似准则,通过缩尺寸实验和理论分析,对圆形开口(窗口)建筑室内火灾外立面热羽流垂直温度演化规律进行了研究,主要结论如下:

(1)在稳定燃烧状态下,对于确定的开口尺寸及火源功率,圆形开口燃烧室内顶棚下方热气体温度基本均匀一致。

(2)在圆形开口火溢流和顶棚射流火焰扩展工况下,外立面热羽流垂直温度演化与矩形开口火溢流相似。圆形开口尺寸越小,火源功率越大,相同位置处的热羽流温度越高。随着垂直高度增加,热羽流温度逐渐降低。

(3)基于矩形开口外立面溢出热羽流竖向温度分布模型,结合无量纲理论分析,建立了不同开口尺寸和火源功率下圆形开口建筑火灾外立面热羽流垂直温度预测模型。

参考文献:

[1] 段海娟,赵永峰,赵金城,等.高层住宅楼外墙保温系统

火灾蔓延的数值模拟[J]. 防灾减灾工程学报,2015,35(1): 23-27.

Duan H J, Zhao Y F, Zhao J C, et al. Numerical simulation of external wall insulation system fire in high-rise residential building [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35 (1) : 23-27. (in Chinese)

[2] 史健勇,刘湃,许清风.室外风对高层建筑外保温层火灾发展的影响研究[J]. 防灾减灾工程学报,2014,34(5): 571-576.

Shi J Y, Liu P, Xu Q F. Research on fire spread characteristics of insulation layers of high-rise buildings under outdoor wind condition [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(5) : 571-576. (in Chinese)

[3] 邓夕胜,吴仲青.大空间建筑火灾中钢梁的温升[J]. 防灾减灾工程学报,2019,39(2): 347-553.

Deng X S, Wu Z Q. Temperature rise of steel beam in large space building fire [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(2) : 347-553. (in Chinese)

[4] 雷晶晶,王妍,周汝,等.无风条件下火灾时建筑外立面烟羽流形态特征研究[J]. 中国安全科学学报,2018,28(12): 52-57.

Lei J J, Wang Y, Zhou R, et al. Study on form of smoke plume at facade of building in fire under windless condition [J]. China Safety Science Journal, 2018, 28 (12) : 52-57. (in Chinese)

[5] Sun X P, Hu L H, Ren F, et al. Flame height and temperature profile of window ejected thermal plume from compartment fire without facade wall [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2018, 127: 53-60.

[6] 任飞.不同通风及上下双层腔室火灾演化与开口火溢流行为研究[D].合肥:中国科学技术大学,2019.

Ren F. Studies on fire development inside compartment and the associated ejected facade flame behavior under different ventilation and two-floor compartment condition [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019. (in Chinese)

[7] Yokoi S. Study on the prevention of fire spread caused by hot upward current [R]. Japan: Building Research Institute, Ministry of Construction, 1960.

[8] Ohmiya Y, Hori Y, Sagimori K, et al. Predictive method for properties of flame ejected from an opening incorporating excess fuel [J]. Fire Safety Science, 2000, 4: 375-386.

