

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.08.022

竖通道内火旋风中轴线羽流温度特性

霍岩¹,李玉峰²,黄德香¹,董惠¹

(1.哈尔滨工程大学 航天与建筑工程学院, 150001 哈尔滨;2.中国船舶重工集团公司第七一三研究所, 450015 郑州)

摘要:为掌握竖通道内火旋风热流场温度特性,利用数值模拟方法对竖通道内火旋风中轴线上温度进行研究.通过将数值模拟结果和实验数据对比,验证了构建的数学模型对有侧开缝的竖通道内火旋风中轴线上温度模拟的准确性;基于 McCaffrey 油池火羽流温度分区思想,发现竖通道内火旋风羽流温度可被近似为3个被纵向拉长的区域;通过对结果的数据拟合得到了适用于竖通道内火旋风中轴线上羽流温度计算公式的各分区高度及公式中相应系数值.

关键词:竖通道;火旋风;火羽流;温度

中图分类号: TU998.1;X932

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2015)08-0113-04

Centerline plume temperature characteristics of fire whirls in the vertical shaft

HUO Yan¹, LI Yufeng², HUANG Dexiang¹, DONG Hui¹

(1.College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, 150001 Harbin, China;

2.The 713th Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, 450015 Zhengzhou, China)

Abstract: In order to understand the temperature characteristic of fire whirls in the vertical shaft, numerical simulations were carried out to study the centerline plume temperature of fire whirls in the vertical shaft. The numerical simulation results of centerline plume temperature were verified by using experimental data. It was found that plume temperature of fire whirls in the vertical shaft can be approximately divided into three regions which were stretched in the vertical direction based on the theory proposed by McCaffrey. The height values of different regions and formula coefficients were obtained, which are suitable for centerline plume temperature of fire whirls in the vertical shaft.

Keywords: vertical shaft; fire whirls; fire plume; temperature

火旋风是一种特殊的火焰形态^[1-4],尤其是竖通道等有限开口空间内由自然对流形成的火旋风还受到空间尺寸和壁面开口等条件的影响^[5],因此还未形成成熟的理论体系.由于中轴线上温度可以表征火焰的基本特性,所以在火旋风实验过程中很多研究者都把中轴线上的温度作为需要获取的重点数据内容^[6-9].对于油池火,McCaffrey^[10]曾提出经典的火焰中轴线上羽流温度计算公式,但由于火旋风与普通池火存在差异,因此公认此计算公式不适用于火旋风中轴线羽流温度的计算.目前,对于火旋风中轴线上的温度多是对实验数据简单的定性分析,对其特性分析还不够深入,至今还未形成适用的理论计算公式.Lei等^[11]曾发现火旋风也与普通池火一样分为连续火焰、间歇火焰和烟气羽流3个区间,间

接说明了火旋风与普通池火之间存在联系.本文由火旋风与普通池火之间的差异性都可以在宏观上被归结到各羽流状态区域高度差异的观点出发,以McCaffrey^[10]的普通池火羽流温度计算公式为基础进行修正,尝试提出适用于火旋风中轴线上羽流温度的计算公式.所得结论对于深入理解有限开口空间内的旋转火焰特性有一定意义.

1 数学模型及有效性验证

火灾产生的流动是多组分、有粘性、弱可压的浮力驱动流.针对火灾流场的特点,Rehm等^[12]将压力表示为环境气压、浮力和压力脉动3部分,然后对N-S方程组中的动量方程和能量方程进行了修正,为了适应数值求解的需要,对修正后的控制方程组进行了进一步变形与简化^[13-16].数值计算过程中采用大涡模拟(LES)技术使方程组封闭.研究所使用的软件平台为美国国家标准与技术研究院(NIST)开发的软件FDS(fire dynamics simulator, version4)^[15].

为了验证数值方法对于火旋风中轴线上温度模

收稿日期: 2014-07-17.

基金项目: 国家自然科学基金(51206030);中央高校基本科研业务费专项基金(HEUCF130203).

作者简介: 霍岩(1980—),男,讲师.

通信作者: 霍岩,huoyan205@126.com.

拟的有效性,搭建了2 m高、顶部开口的竖通道实验装置,通道内部尺寸为0.32 m×0.32 m×2.0 m,竖通道除前壁面为钢化玻璃外,其余侧壁面均为0.005 m厚的胶合板.实验通道侧壁有两个0.035 m宽的斜对侧开缝,一直径0.1 m的圆形燃料池被放置于通道底部中心,采用25 mL质量分数为97%的正庚烷为燃料,在通道的中轴线上不同高度布置直径

0.5 mm的K型热电偶裸丝测量温度,实验通道与测点见图1.以文献[17]中15 m高竖通道内火旋风实验为基础进行数值模拟,其通道内部尺寸为2.0 m×2.0 m×15.0 m,选取竖通道四壁面侧开缝且开缝宽度均为0.2 m、燃料池直径0.5 m、燃料为正庚烷的实验场景.数值模拟过程中,对通道壁面条件均按实际使用的材料属性进行设置,按一维导热方式处理.

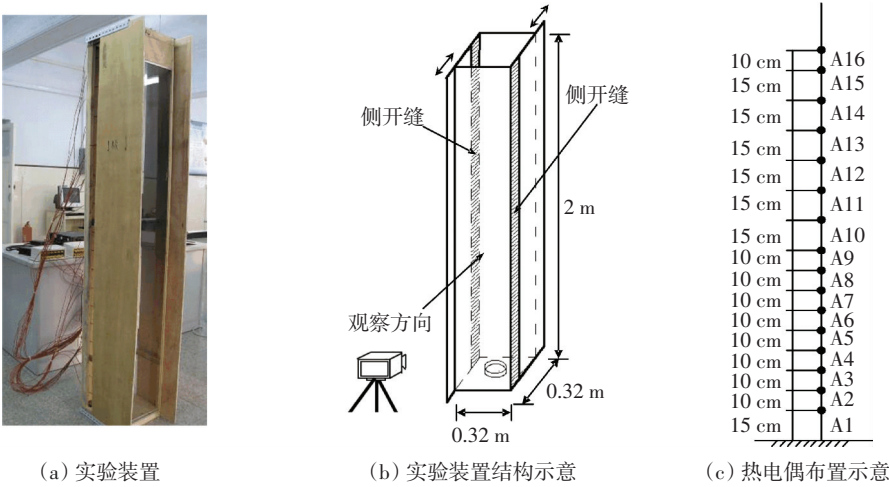


图 1 高度为 2 m 的火旋风实验通道

图 2 为竖通道内火旋风稳定阶段中轴线上各高度 z 处平均温度 T 的实验结果与模拟值比较.可以看出,在竖通道底部附近区域两者偏差稍大,最大约为 30%,这可能是由于火焰区的化学反应模型不够完善所带来的偏差;除通道底部区域外,两者结果均

比较接近,偏差均小于 15%.因此,除底部区域外,中轴线上温度模拟结果整体上符合流场流动和传热物理规律,与实验值的偏差在可接受的范围内,可以认为对于高度 15 m 以下的竖通道内火旋风,构建的数学模型计算结果足够准确.

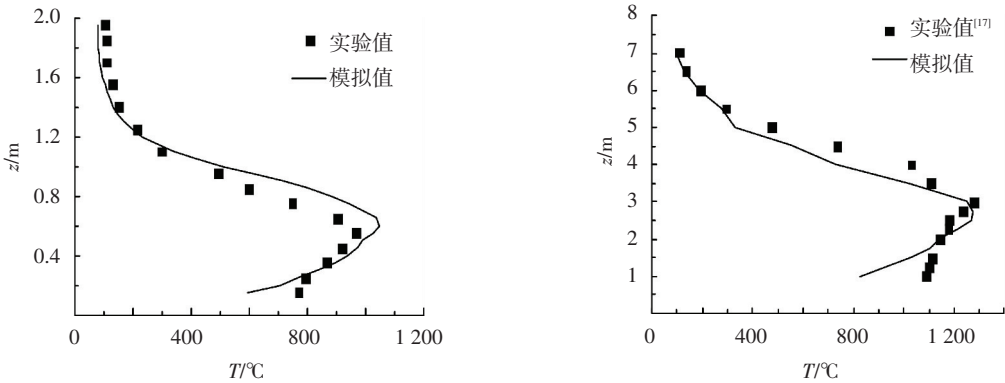


图 2 通道内中轴线上各高度处温度实验值与模拟值比较

2 竖通道内火旋风中轴线温度公式拟合

McCaffrey^[10]提出的对普通油池火中轴线羽流过余温度的无量纲计算公式为

$$\frac{T_c - T_\infty}{T_\infty} = \left(\frac{\kappa}{0.9\sqrt{2g}} \right)^2 \left(\frac{z}{\dot{Q}^{2/5}} \right)^{2\eta - 1}, \quad (1)$$

式中: T_c 为中轴线温度,K; T_∞ 为环境温度,K; z 为高度值,m; $\dot{Q}$ 为热释放速率,kW; κ 和 η 为取决于所处火焰区域的常数,其值见表1.

表 1 由 McCaffrey^[10]提出的普通油池火羽流温度公式参数

区域	$z/\dot{Q}^{2/5}$	κ	η
连续火焰区	<0.08	6.8	1/2
间歇火焰区	0.08~0.2	1.9	0
烟气羽流区	>0.2	1.1	-1/3

对式(1)取对数可得:

$$\lg \left(\frac{T_c - T_\infty}{T_\infty} \right) = 2 \lg \left(\frac{\kappa}{0.9\sqrt{2g}} \right) + (2\eta - 1) \lg \left(\frac{z}{\dot{Q}^{2/5}} \right) = \alpha \lg \left(\frac{z}{\dot{Q}^{2/5}} \right) + \beta, \quad (2)$$

其中:

$$\alpha = (2\eta - 1), \quad \beta = 2\lg(\kappa) - 2\lg(0.9\sqrt{2g}), \quad (3)$$

式(2)中, $\lg\left(\frac{T_c-T_\infty}{T_\infty}\right)$ 与 $\lg\left(\frac{z}{Q^{2/5}}\right)$ 呈线性相关, α 为斜率, β 为 Y 轴上的截距. 则式(2)可表示为

$$\lg Y = \alpha \lg X + \beta, \quad (4)$$

表 2 火旋风模拟条件设置

编号	通道高度/m	侧开缝形式	侧开缝高度/m	开缝宽度/m	油池直径/m	热释放速率/kW
A	2.0	斜对双开缝	2.0	0.035	0.1	26.0
B	15.0	四开缝	15.0	0.200	0.5	719.8
C	10.0	斜对双开缝	4.0	0.200	0.5	771.4
D	2.0	斜对双开缝	2.0	0.350	0.1	30.0
E	9.0	斜对双开缝	9.0	0.200	0.5	680.0
F	12.0	斜对双开缝	12.0	0.200	0.5	500.0

将所得的中轴线温度结果进行拟合, 见图 3. 由于模拟结果在竖通道底部火焰所在区域内的误差较

大, 所以在数据拟合过程中, 在保证准确性的前提下适当忽略此区域的部分数据.

式中 $Y = (T_c - T_\infty) / T_\infty, X = z / Q^{2/5}$.

为得到火旋风中轴线上羽流过余温度的无量纲公式, 选取 6 个在不同尺寸侧开缝方形竖通道内均可形成较强烈火旋风的热流体温度场进行模拟, 数值模拟的具体条件设置见表 2, 所有通道边界均按绝热条件处理.

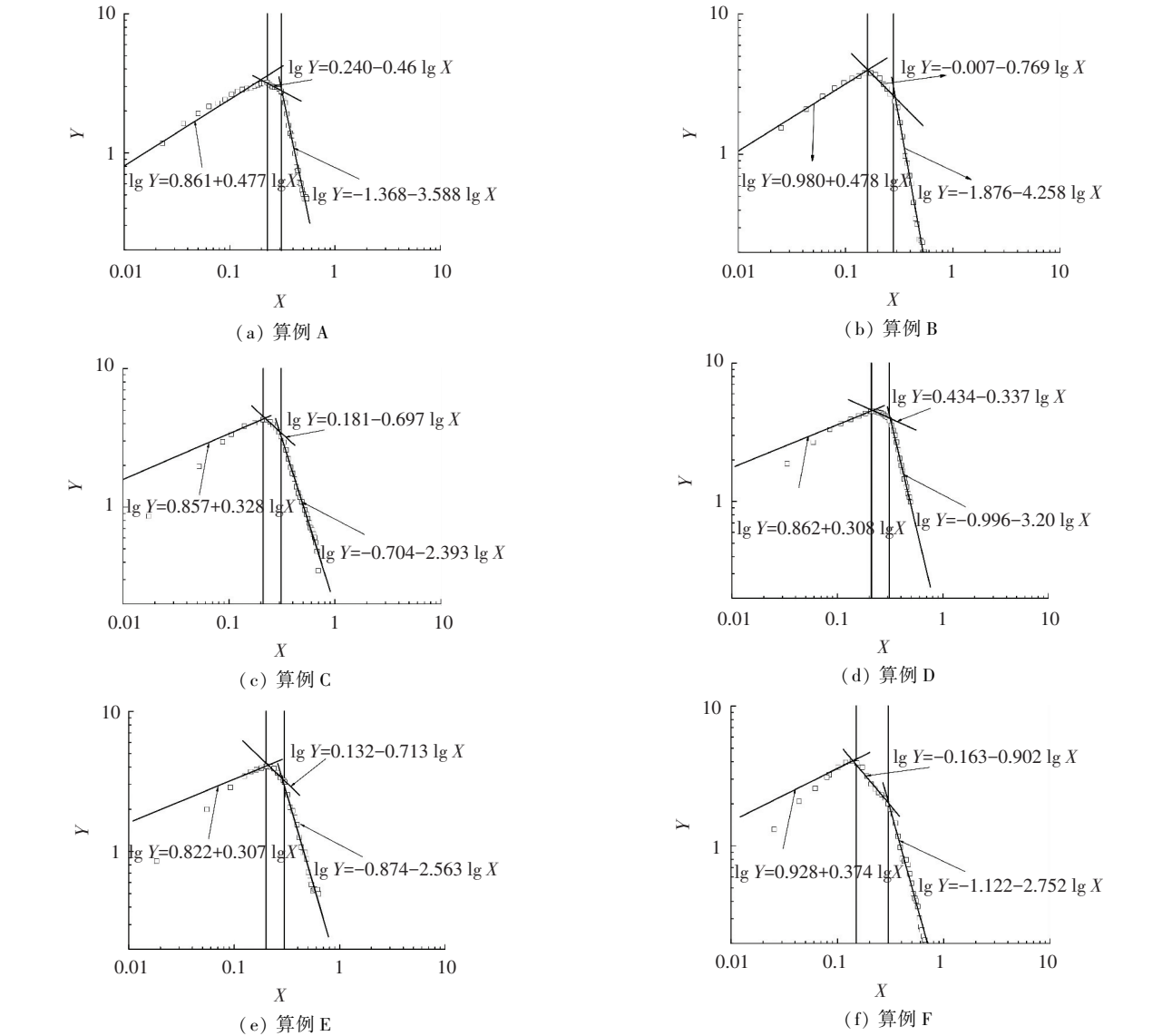


图 3 无量纲过余温度拟合结果

将拟合结果代入式(3)求得 κ 和 η 值, 列于表 3. 宏观上, 火旋风中轴线上羽流分布可被近似看成为普

通池火中轴线上的羽流各区域被竖向拉长, 这样就建立了火旋风与普通池火中轴线上羽流分布关系.

表 3 各算例结果拟合所得 η 和 κ 值

算例	连续火焰区		间歇火焰区		烟气羽流区	
	κ	η	κ	η	κ	η
A	6.13	0.74	4.49	0.30	2.01	-1.29
B	6.50	0.74	3.97	0.12	1.56	-1.63
C	6.12	0.66	4.36	0.15	2.80	-0.70
D	6.13	0.65	4.95	0.33	2.42	-1.10
E	6.01	0.65	4.26	0.14	2.57	-0.78
F	6.34	0.69	3.67	0.05	2.27	-0.88

取表 3 中各区域 κ 和 η 的平均值,对式(1)中系数 κ 和 η 进行修正,得到适用于竖通道内火旋风中轴线上羽流温度的计算公式,计算公式的各分区范围和相应系数值见表 4.

表 4 火旋风火羽流温度公式参数

区域	$z/\dot{Q}^{2/5}$	κ	η
连续火焰区	<0.193	6.20	0.69
间歇火焰区	$0.193\sim0.302$	4.28	0.18
烟气羽流区	>0.302	2.27	-1.06

3 结 语

在验证了数值模拟对竖通道内火旋风中轴线上温度计算有效性的前提下,分别对 2、9、10、12 和 15 m高的竖通道内火旋风流场进行了模拟.发现竖通道内火旋风中轴线上羽流温度分布可以在宏观上作为普通池火中轴线羽流各分布区域被竖向拉长,将 McCaffrey 池火羽流温度计算公式修正后可用于竖通道内火旋风中轴线羽流温度的计算.

参考文献

[1] KUWANA K, MORISHITA S, DOBASHI R, et al. The burning rate's effect on the flame length of weak fire whirls [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33 (2): 2425-2432.

[2] KUWANA K, SEKIMOTO K, SAITO K, et al. Scaling fire whirls[J]. Fire Safety Journal, 2008, 43(4): 252-257.

[3] SATOH K, YANG K T. Experimental observations of swirling fires [J]. Proceedings of ASME Heat Transfer Division, 1996, 335(4): 393-400.

[4] CHOW W K, HAN S S. Experimental investigation on onsetting internal fire whirls in a vertical shaft[J]. Journal

of Fire Sciences, 2009, 27(6): 529-543.

[5] SNEGIREV A Y, MARSDEN J A, FRANCIS J, et al. Numerical studies and experimental observations of whirling flames [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(12/13): 2523-2539.

[6] 霍岩,邹高万,李树声,等.竖通道内液体燃料燃烧形成的旋转火焰特性[J].哈尔滨工业大学学报,2014, 46 (1): 77-82.

[7] 武红梅,周允基,郜冶.单侧缝竖形槽道内的火旋风中心区域特性[J].哈尔滨工程大学学报,2010, 31(3): 329-335.

[8] ZHOU K, LIU N A, LOZANO J S, et al. Effect of flow circulation on combustion dynamics of fire whirl [J]. Proceeding of the Combustion Institute, 2013, 34 (2): 2617-2624.

[9] HUO Y, CHOW W K, GAO Y. Internal fire whirls induced by pool fire in a vertical shaft [C]//ASME/JSME 2011 8th Thermal Engineering Joint Conference (AJTEC2011). Honolulu, Hawaii, USA: ASME, 2011: 1-6.

[10] MCCAFFERY B J. Purely buoyant diffusion flames: some experimental results [R]. Washington, D. C.: National Bureau of Standards, 1979.

[11] LEI J, LIU N A, ZHANG L H, et al. Experimental research on combustion dynamics of medium-scale fire whirl [J]. Porceedings of the Combustion Institute, 2011, 33: 2407-2415.

[12] REHM R G, BAUM H R. The equations of motion for thermally driven buoyant flows[J]. Journal of Research of the NBS, 1978, 83: 297-308.

[13] MCGRATTAN K. Fire dynamics simulator (version 4), technical reference guide [R]. Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology, 2006.

[14] MCGRATTAN K, BEAUM H R, REHM R G. Large eddy simulation of smoke movement [J]. Fire Safety Journal, 1998, 30: 161-178.

[15] MCGRATTAN K, FORNEY G. Fire dynamics simulator (version 4), user's guide [R]. Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology, 2006.

[16] 霍岩.有限开口空间热驱动流大涡模拟和实验研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010: 8-15.

[17] 陈璞.火旋风的火焰与燃烧特性实验研究 [D]. 合肥:中国科学技术大学,2009: 6-7, 42.

(编辑 赵丽莹)