

方形竖槽道内受浮力驱动旋转火焰及热流场特性

武红梅^{1,2}, 何红叶³, 霍岩¹

1. 哈尔滨工程大学航天与建筑工程学院, 哈尔滨 150001

2. 中国舰船研究设计中心, 武汉 430064

3. 河北联合大学迁安学院, 河北迁安 063000

摘要 针对受限空间内受浮力驱动的旋转火焰及热流场所表现出的复杂特性, 采用实验方法对一尺寸为 2.0m×2.0m×15.0m 的有单侧缝的方形竖槽道内产生的火旋风流场进行研究, 并对中心轴线上的温度进行测量。同时采用基于大涡模拟技术的数值方法进行了模拟计算, 验证了构建的数学模型对于预测该方形竖槽道内的热流场的准确性。通过对火旋风在稳定期内热流场的平均压强、温度、密度在高度方向和径向的分布情况和变化规律的分析, 验证了火旋风的斜压影响机制, 确定了温度和压力在高度上的分层特性, 并发现等密度面更易于表现旋转火焰的变化情况。整个实验与数值计算结果都可作为受限空间内的旋转火焰研究提供参考。

关键词 旋转火焰; 火旋风; 浮力; 大涡模拟; 热流场

中图分类号 TU998.1, X932

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.16.004

Characteristics of Thermal Flow Field and Swirling Flame due to Buoyancy in a Quadrate Shaft

WU Hongmei^{1,2}, HE Hongye³, HUO Yan¹

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

2. China Ship Design and Research Center, Wuhan 430064, China

3. Qian'an College, Hebei United University, Qian'an 063000, Hebei Province, China

Abstract In order to interpret the characteristics of the thermal flow field and swirling flames in an enclosure, an experiment in a quadrate shaft having size of 2.0m×2.0m×15.0m with a single corner gap was conducted, and the temperature along the central axis of the shaft was measured. Besides, in order to verify whether or not the numerical method with Large Eddy Simulation (LES) is able to predict the thermal flow field, the predicted temperature was compared with the experimental data. Furthermore, the distributions of average pressure, temperature, and density along the lines of height and radius are obtained, when the fire swirl is steady. And the baroclinity of the swirling flames due to buoyancy is analyzed. The stratification of the temperature and pressure with height are concluded. These results provide a reference for the research on the swirling flames driven by buoyancy in an enclosure.

Keywords swirling flame; fire whirl; buoyancy; large eddy simulation; thermal flow field

0 引言

火旋风又叫火怪、火焰龙卷风,是指当火情发生时,空气的温度和热能梯度满足某些条件,火苗形成一个垂直的漩涡,旋风般直插入天空的罕见现象。火苗的高度 9—60m 不

等,持续的时间也有限,一般只有几分钟,但如果风力强劲能持续更长的时间。

火旋风与一般火灾现象相比,最显著的特征是燃料燃烧时呈螺旋式上升,燃烧过程出现火焰旋涡。在旋转火焰的运

收稿日期: 2012-01-05; 修回日期: 2012-05-06

作者简介: 武红梅, 博士, 研究方向为火灾动力学, 船舶火灾安全和消防设计等, 电子信箱: zhaowuhongmei@yahoo.com.cn

动中,它不仅具有水平方向的旋转速度,而且还具有向上运动的羽流速度^[1]。而火灾中一旦有火旋风出现,将会大大增加火灾的过火面积和危害程度。因此,对火旋风的产生机理,以及由于火旋风而形成的热流场进行研究是非常有意义的。

国外火旋风实验研究^[2]最早始于 20 世纪中期,已有近半个世纪的发展历程。很多研究学者^[3-5]都将研究关注于室内或有限空间内的火旋风或旋转火焰的形成以及发展规律。Snegiren 等^[6]提出,不管是实验还是理论研究、数值研究,房间内的小尺寸旋转火焰与室外产生的大尺寸火旋风差别甚大,与强迫旋转产生的火焰有很大不同。Chow 和 Zou 等^[7-8]对有侧缝的竖槽道内产生的火旋风已经进行了研究。受浮力驱动的旋转

火焰延长的程度和强迫旋转情况相比小很多。

1 方形竖槽道热流场的实验研究

本文实验采用的是一个顶部开口的方形竖槽道空间,几何尺寸为 2.0m×2.0m×15.0m,实图和几何示意图见图 1。在装置左壁面拐角处开有进风槽,宽度为 0.28m。装置后侧壁面底端紧贴地面,其余三侧壁面底端距地面 0.15m,底端有可调节宽度的开口,以便调整底部开口的宽度从而调整进入竖形通道的通风量。本文只研究在有单侧缝而无底部开口时形成的火旋风情况。底部中央放置一个直径为 0.46m,高度为 0.05m 的油盆,燃料为 2.0L 的 93# 汽油,坐标原点设在油盆中心。

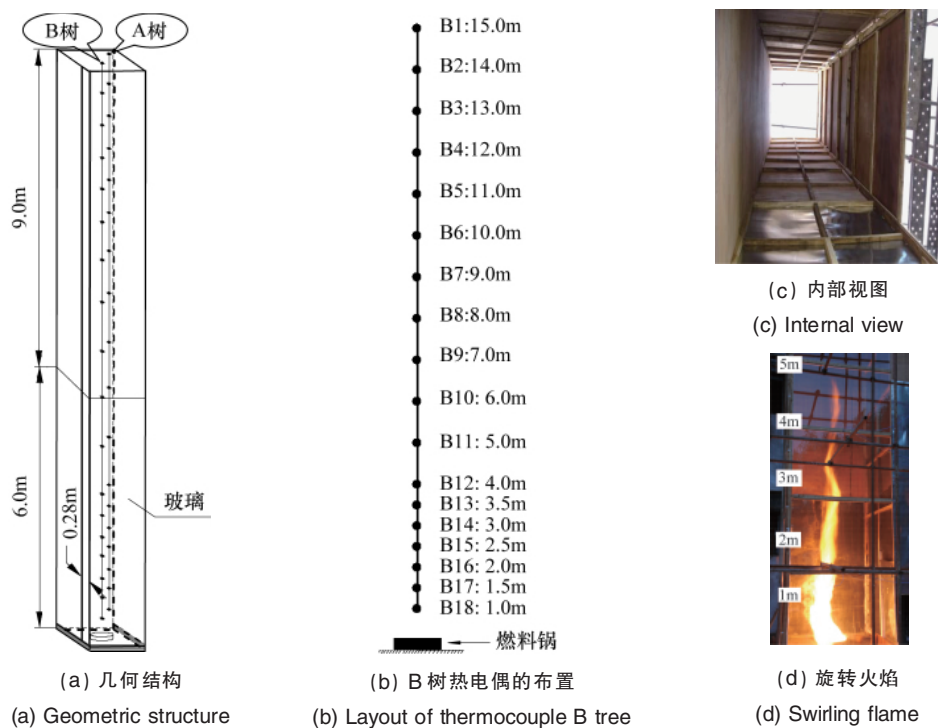


图 1 实验装置的结构

Fig. 1 Scheme of experimental setup structure

通道壁面材料为木板与铁皮,前壁面 6.0m 高度以下设置为玻璃,便于观察火焰变化情况。从实验观察到火焰发生旋转,火焰长度明显增加,发光度变亮,同时火焰外围有明显的螺旋式上升趋势,但是火旋风的旋转火焰高度不超过 4.0m,见图 1(d)。因此,在对实验结果进行分析时主要考虑通道 6.0m 以下流场温度的分布情况,见图 2 和图 3。

图 2 给出了在方形竖槽道中心轴线上的温度变化,在高度 1.0—2.0m 的范围内,火焰温度较高,说明是旋转火焰的主体区域。之后随着高度升高,温度逐渐降低,在 6.0m 处的温度基本在 100℃左右,属于旋转火焰引起的外围热流场区域。中心轴线上的温度随着高度而递减,有明显的分层;每一时刻温度的最大值都是位于高度 1.0m 处,最大温度达到 550℃。

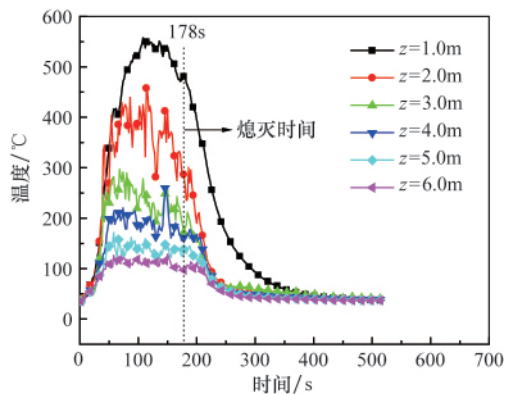


图 2 B 树热电偶测点温度随时间变化

Fig. 2 Temperature variation of thermocouple B tree with time

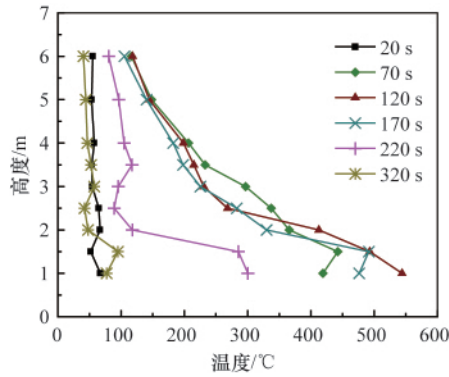


图3 B树热电偶测点温度随高度方向的变化

Fig. 3 Temperature variation of thermocouple B tree with height

2 控制方程

火灾所引起的流动中,燃烧放出的热量导致温度显著升高,从而引起密度的显著变化,流动是弱可压的,热驱动下浮力流的速度远远小于音速,实际火灾场的流动是多组分、低马赫数、有黏性和热驱动的浮力流。

Rehm 和 Baum^[9]在 1978 年首先提出热驱动浮力流的模型方程,后来美国国家标准与技术研究院(NIST)的 McGrattan 与其合作者在此基础上对该模型做了进一步的修正,得到了修正后的控制方程组。

2.1 连续性方程

连续性方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

其中, ∇ 为拉普拉斯算子, ρ 为气体密度, kg/m^3 , \mathbf{u} 为流场中某一点的速度矢量。

2.2 动量方程

动量方程为

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) + \nabla p - \rho \mathbf{g} = \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (2)$$

其中, $\boldsymbol{\tau}$ 为黏性应力张量; p 为压强, Pa , \mathbf{g} 为重力加速度矢量, 其分量表达式为

$$\tau_{ij} = \mu \left(2S_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \right) \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i=j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (3)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (4)$$

其中, δ_{ij} 为单位张量的分量表达形式; S_{ij} 为变形速率张量; μ 为流体的黏性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; u_i, u_j 分别为速度矢量的分量, x_j 为坐标系中坐标方向。

2.3 能量方程

能量方程为

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h \mathbf{u}) - \frac{dp}{dt} = \dot{q}^m + \nabla \cdot (k \nabla T + \sum \rho_i D_i \nabla Y_i + \dot{q}_R) \quad (5)$$

其中, h 为总的比焓, J/kg ; h_i 为组分 i 的比焓, J/kg ; k 为热扩散系数, m^2/s ; D_i 为组分 i 的扩散系数, m^2/s ; Y_i 为组分 i 的质量分数, kg/kg ; \dot{q}^m 为体积热源, W/m^3 ; \dot{q}_R 为辐射热通量, W/m^2 。

2.4 组分方程

组分方程为

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho Y_i \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\rho D_i \nabla Y_i) + \dot{m}_i^m \quad (6)$$

其中, \dot{m}_i^m 为单位体积内组分的 i 的生成率或消耗率, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

2.5 状态方程

状态方程为

$$p_0(t) = \rho TR \sum_i (Y_i / M_i) \quad (7)$$

其中, M_i 为组分 i 的分子量, kg/mol 。

3 涡量方程

要研究火旋风的特征就要先了解旋涡运动理论。

首先,定义涡矢量 $\boldsymbol{\omega}$:

$$\boldsymbol{\omega} = \nabla \times \mathbf{u} \quad (8)$$

接着,引入矢量恒等式:

$$(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \frac{1}{2} \nabla |\mathbf{u}|^2 - \mathbf{u} \times \boldsymbol{\omega} \quad (9)$$

从理论上分析火旋风的形成机制,需要根据弱可压黏性流的动量方程(2)来推导出热气流的涡量方程。对于弱可压流黏性流体来说,一般浮力流的动量方程^[6]可表示为

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla \bar{p} + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \frac{\rho - \rho_\infty}{\rho} \mathbf{g} \quad (10)$$

其中, ρ_∞ 为标况下空气的密度。

涡量的运动是由涡量方程控制的,对式(11)两边求旋度,再结合式(8)和式(9),即可得到涡量的输运式:

$$\frac{\partial \boldsymbol{\omega}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \boldsymbol{\omega} = -\nabla \frac{1}{\rho} \times \nabla \bar{p} + \nabla \times \left(\frac{1}{\rho} \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \right) - \frac{\rho - \rho_\infty}{\rho} \times \mathbf{g} - \boldsymbol{\omega} (\nabla \cdot \mathbf{u}) + (\boldsymbol{\omega} \cdot \nabla) \mathbf{u} \quad (11)$$

其中,式(11)右端第一项表示密度梯度和压力梯度相互作用,可以生成涡或破坏涡,也即所谓的斜压影响机制。

4 数值模拟与分析

4.1 场景设定

本文使用大涡模拟技术,应用 FDS 4.07 版本模拟了实验情况。模拟的基本假设:(1) 设定的单位面积的热释放速率是 2500 kW ,在 $0-50 \text{ s}$ 内沿 t^2 增长到最大值后保持不变,所得参数如温度、压强、密度等在 $60-120 \text{ s}$ 内求平均值;(2) 燃烧所释放的总能量中有 35% 的能量通过热辐射损失掉;(3) 从缝隙开口处自吸进入计算区域内的外界空气温度为 20°C ,压强为 1 个大气压。

运用大涡模拟 LES 模型模拟火旋风的诱发机制与燃烧特点时,其重点在于网格尺寸的大小。模拟对象的网格尺寸

必须小于一定的尺度方能使亚网格尺度应力模型(SGS)精确地计算出流场的黏滞应力(viscous stress)以及由浮力和斜压力产生的涡流。对于一个火羽流,其特征直径的计算式

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (12)$$

其中, ρ_∞ 为气体的密度, 1.293 kg/m^3 ; c_p 为等压比热容, $1.004 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$, T 为气体温度, 293.15 K , g 为重力加速度, 9.8 kg/s^2 。本文要模拟的火羽流的特征直径为 0.656 m , 若要是能捕捉到火羽流的信息, 要求特征直径至少能覆盖 10 个网格^[9], 则要求网格尺寸约为 0.0656 m , 因此本文设置的网格尺寸为 $0.05 \text{ m} \times 0.05 \text{ m}$ 。

4.2 实验与数值模拟比较

为了便于比较, 建立笛卡尔坐标系。以该方形竖槽道底端平面的中心为坐标原点, 沿着竖槽道中心轴线向上为 z 轴。图 4 比较了方形竖槽道内高度在 6.0 m 以下实验数据和数值模拟结果的比较。数值模拟的结果是 $x=0$ 处不同高度的温度值。在 $1.0\text{--}2.5 \text{ m}$ 高度内, 两者的差值较小, 其最大的相对误差仅为 13.2% , 在 $3.0\text{--}6.0 \text{ m}$ 内, 两者的绝对差值较大, 其最大的相对误差为 27.8% , 这是因为在数值模拟时装置墙壁设置为绝热, 损失的热量比实际实验要小。图 4 表明上述所采用的数学模型以及相关边界条件的设置在一定程度上可以预测该方形竖槽道内的热流场。

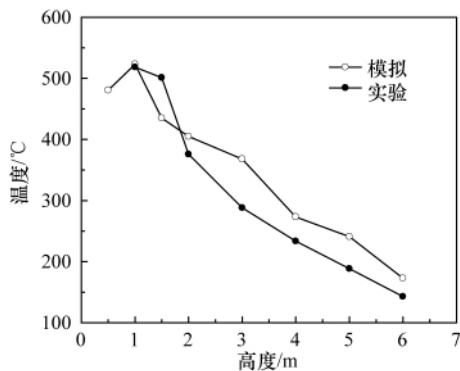


图 4 B 树热电偶的实验与数值模拟结果的比较
Fig. 4 Comparisons between calculated results and measured data

4.3 数值模拟结果

图 5 至图 7 分别显示了旋转火焰产生的热流场内气体对时间平均的压强、温度、密度在水平和垂直方向上的分布情况。由图 5 知, 压强的变化在高度方向上有明显而均匀的层状分布; 而沿径向方向的变化则像“V”字, 在中心轴线附近的压强有最低值, 在高度为 1.0 m 处甚至达到 -50 Pa 的负压状态。图 6 与图 7 的平均温度和密度分布并不像压强在高度方向上有严格的分层现象; 分别在 $x=-0.35 \text{ m}$ 和 $x=0.1 \text{ m}$ 左右, 温度和密度在高度方向上得变化都有快速的逆转, 且在 $x=-0.35 \text{ m}$ 处变化更快。这是因为在接近旋转火焰区域, 气体温度主要是来自火焰的热辐射, 从而使气体温度在高度方向上递减,

而在远离旋转火焰的区域, 由于浮力的作用使高温气体向上运动, 从而使靠近竖槽道四周壁面区域气体的温度随着高度的增加而升高; 同理, 平均密度的分布情况也如此, 只是在高温区域密度小, 而在低温区域密度大。

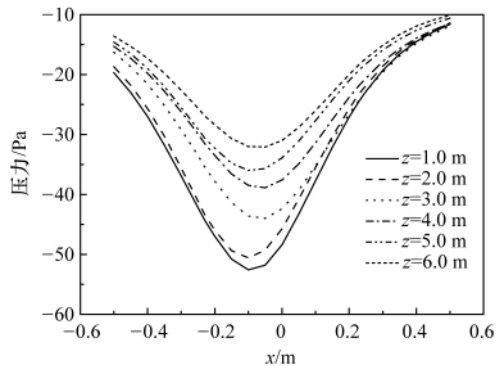


图 5 x 轴上不同高度处的平均压强分布

Fig. 5 Time-averaged pressure distributions with different heights on the x axis

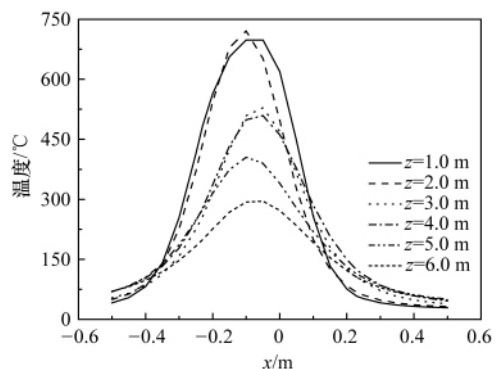


图 6 x 轴上不同高度处的平均温度分布

Fig. 6 Time-averaged temperature distributions with different heights on the x axis

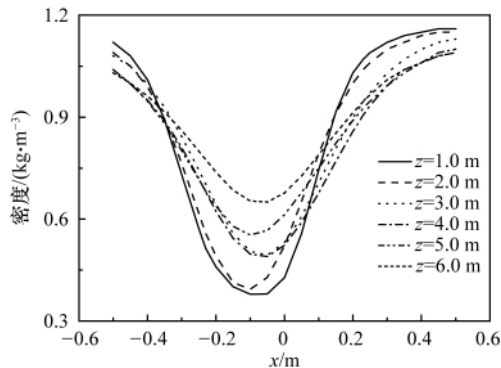


图 7 x 轴上不同高度处的平均密度分布

Fig. 7 Time-averaged density distributions with different heights on the x axis

图 8 和图 9 分别是形成稳定的火旋风后, 在高度为 1.0 m 和 4.0 m 截面上的压强和密度某一时刻的分布。从图中知, 两个高度处的压强分布均匀规则, 等压线近似呈菱形, 只是在

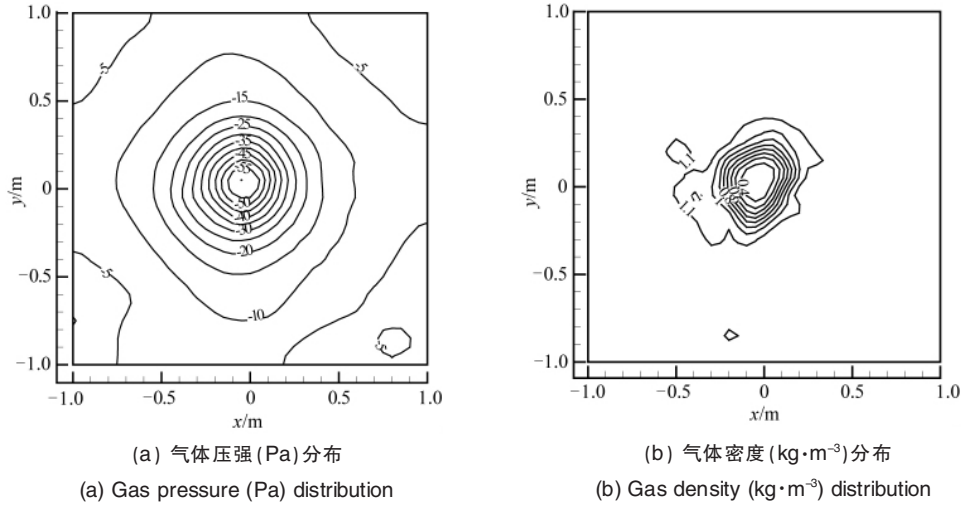


图 8 $t=60\text{s}$ 时平面 $z=1.0\text{m}$ 的压强和密度分布图

Fig. 8 Pressure and density distributions with $t=60\text{s}$ and $z=1\text{m}$

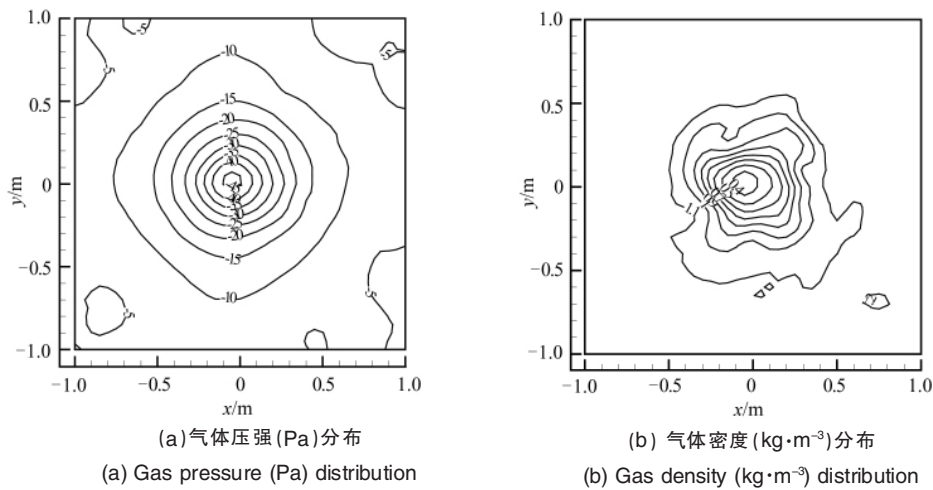


图 9 $t=60\text{s}$ 时平面 $z=4.0\text{m}$ 的压强和密度分布图

Fig. 9 Pressure and density distributions with $t=60\text{s}$ and $z=4\text{m}$

$z=1.0\text{m}$ 的等压线更为紧凑,说明此处旋转较 $z=4.0\text{m}$ 处剧烈;而密度的分布不规则,等密度线是不规则的闭合曲线;压强的梯度和密度的梯度不是正交的,这也说明了涡量的产生原因;在高度 $z=1.0\text{m}$ 的密度梯度大于 $z=4.0\text{m}$ 的密度梯度,说明在 1.0m 的火焰形状紧凑,火焰半径小。

图 10 是 60s 时高度 5.0m 以下的等密度面和等压面的比较图。从图中可以看到,等密度面的变化比等压面的变化更明显,也更趋近于在实验观察中看到的火焰形状,说明等密度面更易于反映旋转火焰的形状。密度为 $1.0\text{kg}/\text{m}^3$ 的等密度面形状类似于螺旋上升式,而压强为 -20Pa 的等压面像一个圆柱体。同时说明,在火旋风产生的旋转热流场内,气体的等压面和等密度面不是正交的,而是有一个交角的,这也就是所谓的斜压影响机制。火灾热流场形成的火焰旋涡主要是由火焰面附近温度和密度显著变化导致的。由火源引起的热流场温度增加,导致局部区域体积膨胀。在火场热量释放区域,由于火焰阵面的扩散,使得温度和密度变化很大,这时与火焰面相切的压力梯度会使密度小的气体和密度大的气体产

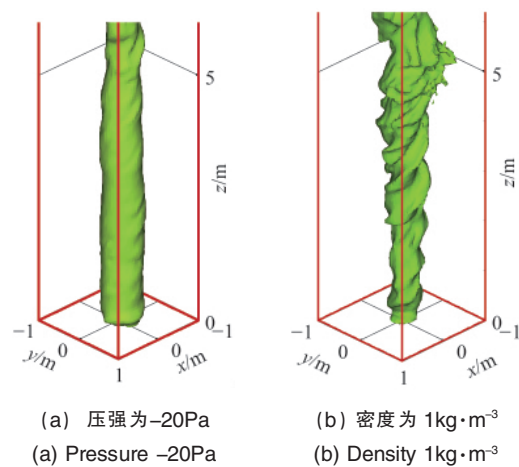


图 10 60s 时等压强面和等密度面

Fig. 10 Isobaric surface and isopycnic surface with $t=60\text{s}$

生不同的加速,形成的平均密度梯度和脉动压力梯度就会使火焰区产生火旋风。

5 结论

通过大尺寸的火旋风实验,测量了该方形竖槽道内中心轴线上的温度分布,同时通过数值方法对其进行了模拟,并对实验数据和模拟计算结果进行了比较,最后分析了在该竖槽道高度三分之一的底部压强、温度和密度的分布情况,可以得到以下结论。

(1) 在有单侧缝的方形竖槽道内,其高度的 1/3 以下中心轴线上的温度随着高度而递减,有明显的分层;每一时刻温度的最大值都是位于高度 1.0m 处,最大温度达到 550℃。

(2) 压强的变化在高度方向上有明显而均匀的层状分布,而沿径向方向的变化则像“V”字,在中心轴线上附近的压强有最低值,在高度为 1.0m 处甚至达到-50Pa 的负压状态。

(3) 温度和密度在径向上的分布不是单调变化,而是在远离火焰中心区域的位置发生变化,在靠近单侧缝开口一侧的变化要快于另一侧的变化。

(4) 等密度面的变化比等压面的变化更明显,也更趋近于在实验观察中看到的火焰形状,说明等密度面更易于反映旋转火焰的形状。

参考文献 (References)

- [1] 夏云春,王清安. 旋转火焰动力学特性研究[J]. 火灾科学, 2003, 12(4): 209-212.

- Xia Yunchun, Wang Qingan. *Fire Safety Science*, 2003, 12(4): 209-212.
- [2] Emmoms H W, Ying S J. The fire whirl [C]//Proceedings of the Eleventh International Symposium on Combustion. Pittsburg, 1967: 475-488.
- [3] Soma S, Saito K. Reconstruction of fire whirls using scale models[J]. *Combust Flame*, 1991, 86(3): 269-284.
- [4] Satoh K, Yang K T. Measurements of fire whirls from a single flame in a vertical square channel with symmetrical corner gaps [J]. *Proc ASME, Heat Transfer Division*, 1999, 364(4): 167-173.
- [5] Battaglia F, Mcgrattan K B, Reim R G. Simulating fire whirls[J]. *Combustion Theory Modeling*, 2000, 4(2):123-138.
- [6] Snegiren 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.
- [7] Chow W K, Han S S. Experimental investigation on onset of internal fire whirls in a vertical shaft[J]. *Journal of Fire Sciences*, 2009, 27(6): 529-543.
- [8] Zou G W, Yang L, Chow W K. Numerical studies on fire whirls in a vertical shaft [C]//Proceedings of 2009 US-EU-China Thermophysics Conference-Renewable Energy. May 28-30, 2009, Beijing, China, 2009.
- [9] Rehm R G, Baum H R. The equations of motion for thermally driven buoyant flows [J]. *Journal of Research of the National Bureau of Stand.*, 1978, 83(3): 297-308.
- [10] Wang H Y. Numerical study of under-ventilated fire in medium-scale enclosure[J]. *Building and Environment*, 2009, 44(6): 1215-1227.

(责任编辑 岳臣)

· 学术动态 ·

“2012 年全国空间电子学学术年会”征稿

2012 年 9 月在昆明市召开 2012 年全国空间电子学学术年会,本届年会由中国航天科技集团公司科技委有效载荷技术专业组、中国空间技术研究院科技委通信与导航有效载荷专业组、中国电子学会空间电子学分会、中国宇航学会空间电子学专业委员会共同主办。

征文范围:空间电子学领域的国内外动态、综述、发展建议及应用前景展望;通信卫星有效载荷技术;微波遥感与光学遥感技术;卫星电子侦察及预警载荷技术;卫星导航技术;深空通信与测控技术;星间链路与捕获跟踪、组网技术;海量数据高速存储、压缩与传输技术;空间大型天线及其展开技术;合成孔径雷达与动目标检测技术;空间激光通信和微波光子技术;大规模集成电路、抗辐射、抗单粒子效应技术;其他有关技术。

论文截稿日期:2012 年 6 月 30 日。

电子信箱:space504@163.com。

会议网站:<http://www.cie-info.org.cn>ShowNews.jsp?NewsID=1346>。