

有限空间内低旋流流动与燃烧特性

邓洋波, 宋德彦, 徐震, 姜曦

(大连海事大学轮机工程学院, 辽宁大连116026)

摘 要: 为了对低旋流流动特性及其对火焰传播与稳定影响进行深入理解,通过实验与数值模拟相结合的方法,对有限空间内低旋流流动与燃烧特性进行研究。结果表明:改变中心孔板小孔直径,可以形成不同旋流数的旋流喷射器;在冷态条件下,随着旋流数增加,在展向平面上逐渐形成“W”形速度矢量分布;在铅垂截面内,速度矢量分布存在一个环形高速区域、中心低速区和外侧低速区。由于燃烧气体吸热膨胀、涡量诱导和温度斜压效果,使得冷态高旋回流流动转变为了燃烧条件下低旋无回流流动;在有限空间内,低旋流燃烧没有形成脱体火焰,而是形成类似于扩散燃烧火焰;随着旋流数增大,温度分布边界和化学反应边界在展向平面逐渐缩短,而在铅垂截面逐渐扩大。

关 键 词: 低旋流流动; 旋流数; 流动特性; 燃烧特性; 旋流喷射器

中图分类号: V235.21

文献标志码: A

Characteristics of low swirl flow and combustion in a limited space

DENG Yang-bo, SONG De-yan, XU Zhen, JIANG Xi

(Marine Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116026, China)

Abstract: To further understand the characteristics of low swirl flow and its effect on the propagation and stability of flame, the characteristics of low swirl flow and combustion in a limited space were studied, through combining experiment method with numerical simulation method. Results show that, changing the diameter of the hole in the plate of center hole can form the swirl injectors with different swirl numbers; in cold state, with increasing of swirl number, gradually formed the “W” shape the velocity vector distribution on spanwise section. there are higher velocity in the annulus zone, lower velocity in central zone and lower velocity outside zone on vertical section. The absorption and heat expansion of gas, vorticity induced and temperature baroclinic effect induce a transition from high swirl flow with recirculation in cold state to low swirl flow without recirculation in combustion state; In a limited space, the low swirl combustion cannot form detached flame, but form a flame similar to the diffusion combustion flame; the temperature distribution boundary and chemical reaction boundary gradually get shorter along spanwise section, and gradually get wider along vertical section.

Key words: low swirl flow; swirl number; flow characteristic; combustion characteristic; swirl injector

低旋流燃烧(low swirl combustion, LSC)是美国劳伦斯伯克国家实验室新近开发的预混合燃

烧技术^[1-7],依靠预混合气体组成成分、气流气动条件和湍流强度控制火焰传播速度,利用气流扩

收稿日期:2014-12-11

基金项目:国家自然科学基金委员会-神华集团有限公司煤炭联合基金资助项目(U1361111)

作者简介:邓洋波(1970—),男,辽宁沈阳人,教授,博士,主要从事高效低污染燃烧技术研究。

散流动捕捉快速传播的湍流预混燃烧波,形成与传统的高旋流不同的燃烧方式,气流轴向速度变化梯度大、无回流、火焰锋面稳定在火焰传播速度与当地气流速度相等的位置.由于燃气在高温区域停留时间短,NO_x的排放极低.目前,燃气轮机排放要求日益严格,对LSC技术的开发研制,对现代气体燃料低污染燃气轮机的发展有着重要的应用价值^[8-12].

Chan等^[13]将切向射流低旋流流动方法应用在甲烷预混燃烧中,发现流场中在无回流区条件下,仍然可以形成稳定火焰.Cheng等^[14]应用激光多普勒测速仪(LDA),对叶片式旋流器产生的低旋流流动速度分布进行了测试,结果显示叶片式旋流器与切向射流产生的低旋流流动速度分布基本相同.De Lange等^[15]应用三维粒子成像测速(particle image velocimetry, PIV)测试技术,对旋流器出口位置旋流数为0.2的低旋流流动速度分布进行了三维测试,结果显示低旋流流动呈刚体旋转流动特点,气流旋流数沿中轴线由0.2降低至0.07,中轴线上湍动能波动在5%~10%之间.Johnson等^[16]对比了高旋流燃烧器和低旋流燃烧器燃烧特性,并发现:在相同的负荷范围内,低旋流燃烧器产生甲烷火焰稳定性不受当量比、入口温度、入口压力和中心通道射流流速的影响,NO_x排放水平比高旋流燃烧器低60%.Cheng等为了将LSC技术应用于实地运行的工业燃气轮机中,对LSC技术开展了全面研究,发现LSC喷射器能够形成具有自相似性、受燃料成分影响不明显、无回流的贫燃料预混燃烧,而且在燃烧过程中,燃烧器出口的低温火焰和燃气在反应区域停留时间短的燃烧特性,降低了NO_x和CO的排放.

低旋流燃烧主要依靠气流气动流动条件,对低旋流流动特性及其对火焰传播与稳定的影响的深入理解,是低旋流燃烧技术在富氢燃气轮机开发和应用过程中主要研究内容.对有限空间内低旋流流动与燃烧特性研究,对低旋流燃烧推广和应用更有实际意义.本文通过实验与数值模拟相结合的方法,对有限空间内低旋流流动与燃烧特性进行了研究.

1 旋流喷射器结构

旋流喷射器结构形式如图1所示^[17],主要由圆管、旋流叶片和中心孔板构成.内径 $r_1=20$ mm的圆管、内径 $r_2=30$ mm圆管和旋流叶片构成环

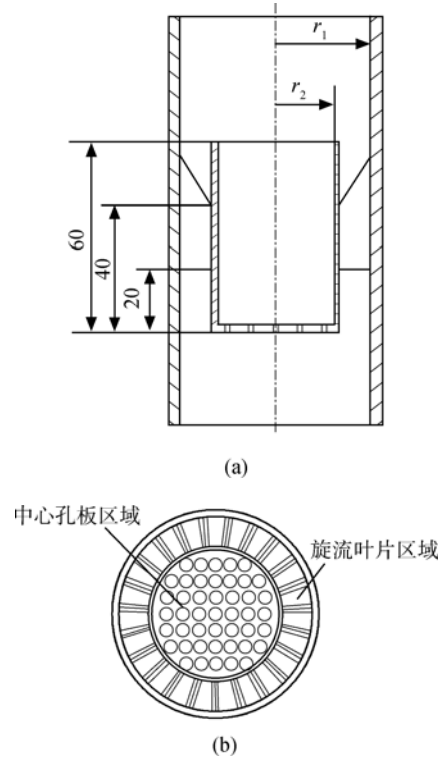


图1 旋流喷射器结构示意图(单位:mm)

Fig. 1 Structure schematic diagram of swirl injector (unit:mm)

形旋流通道;内径 $r_1=20$ mm的圆管和中心孔板构成直流通道.中心孔板上开45个等直径的小孔.旋流叶片的叶片角 $\theta_0=37^\circ$,叶片重叠角 $\alpha=25^\circ$,叶片内边缘半径 $R_1=49.85$ mm,叶片厚度 $\delta=1$ mm,叶片数计算公式如下:

$$n = \frac{2\pi r_1}{R_1 (\cos \alpha - \cos \theta_0)} \quad (1)$$

按式(1)计算, $n=23$.旋流叶片曲面结构按文献^[18]提供的方法确定.

流通旋流喷射器的气流分别流经旋流通道和直流通道,在两股不同流动状态气流的作用下,在旋流喷射器出口外形成不同的流动状态.生成气流的旋流数 S 的计算公式如下:

$$S = \frac{2}{3} \tan \alpha \frac{1 - \omega^3}{1 - \omega^2 + \left[m^2 \left(\frac{1}{r^2} - 1 \right) \right]^2 \omega^2} \quad (2)$$

式(2)中 r 表示在铅垂截面内距离轴线的距离; ω 表示 r_1 与 r_2 的比值.

通过改变中心孔板小孔的直径 d ,可以改变中心流域质量流量 m_c 与旋流流域质量流量 m_s 之比 m ,由此改变旋流喷射器出口位置气流的旋流数 S .应用数值方法计算 m_c 和 m_s 值.不同小孔直径的中心孔板,形成的流动参数在表1中列出.

表1 旋流喷射器流动参数表

Table 1 Flow parameters list of swirl injector

d	m	S
4.20	0.47	0.50
4.00	0.42	0.52
3.78	0.38	0.54
3.66	0.35	0.55
3.53	0.33	0.56
3.26	0.28	0.58

2 实验装置

实验装置如图2所示,用风机提供稳定连续的气源.空气压缩机将高压气体存储于储气瓶中,作为示踪粒子供气气源.有限空间是一个长、宽、高分别为600,300,300 mm的矩形通道,末端由4个导管引出气流.旋流喷射器通过法兰与矩形通道连接.矩形通道两个壁面上布置有机玻璃观测窗口,用于PIV系统对旋流喷射器在矩形通道内形成的速度分布进行测试.

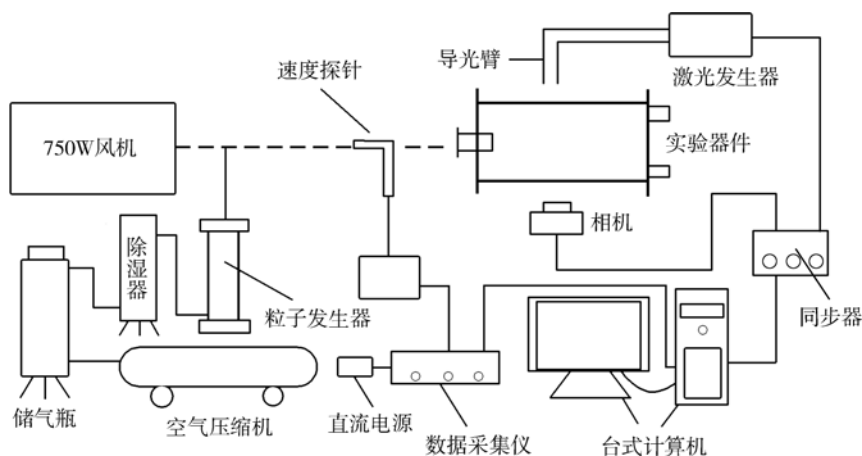


图2 实验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of experiment facility

PIV系统由美国TSI公司生产,CCD(charge coupled device)相机分辨率为2048像素×2048像素,捕捉区域为284 mm×284 mm的矩形区域.示踪粒子是粒径为8 μm的空心玻璃微珠,示踪粒子的跟随性应用斯托克斯数 St 衡量,其公式如下^[10]:

$$St = \frac{\tau_p}{\tau_f} = \frac{\rho_p d_p^2 / 18\mu}{D/U} \quad (3)$$

式中 τ_p 为粒子响应时间, τ_f 为流体特征时间, ρ_p 为粒子密度, d_p 为粒子半径, μ 为流体动力黏度, D 为喷口直径, U 为出口平均速度.

通过计算得出 $St = 0.39 \times 10^{-7} \ll 1$,因此粒子具有较好的跟随性,能够表征真实流动的状态.

实验对冷态流动条件下,旋流喷射器在矩形通道内展向平面内和铅垂截面内速度矢量分布,进行PIV测试.相同来流条件下,进行200张图像捕捉.在处理数据时,取测量平均值,用于提高测量精度.实验结果也用于验证数值计算结果.

3 计算模型及方法

低旋流流动与燃烧特性数值模拟研究过程中,所采用旋流喷射器和矩形通道有限空间的几何结构和尺寸与冷态实验相同.

应用Fluent商业软件,对三维矩形通道有限空间内氢气和空气预混合低旋流燃烧和流动特性进行数值模拟研究.应用专业网格生成软件ICEM CFD对旋流喷射器在矩形通道内形成的流场计算区域三维立体几何模型网格划分,采用非结构适体网格,网格节点单元数为736211.计算过程中,对比不同网格疏密程度的计算结果,验证计算结果对网格的灵敏度.结果表明,网格疏密程度对数值模拟所得的物理参数误差均在-1.5%~1.5%范围内波动.

给定旋流喷射器在有限空间矩形通道内形成的低旋流流动与燃烧计算模型的控制方程中,湍流模型选取realizable $k-\epsilon$ 模型,近壁面处采用标准壁面函数法.控制方程离散采用基于控制体中心的有限体积方法,选用隐式格式,对流扩散项采

用1阶迎风格式. 燃烧模型采用部分预混燃烧模型. 进出口边界条件分别为速度进口和压力出口, 壁面采取无滑移的绝热壁面. 求解器选用分离式求解器, 求解残差小于 1×10^{-4} .

边界条件如下: 氢气和空气预混气体当量比为 0.65; 旋流喷射器入口气流流速为 13.5 m/s, 静压为 101725 Pa, 温度为 300.15 K; 矩形通道有限空间壁面均视为绝热.

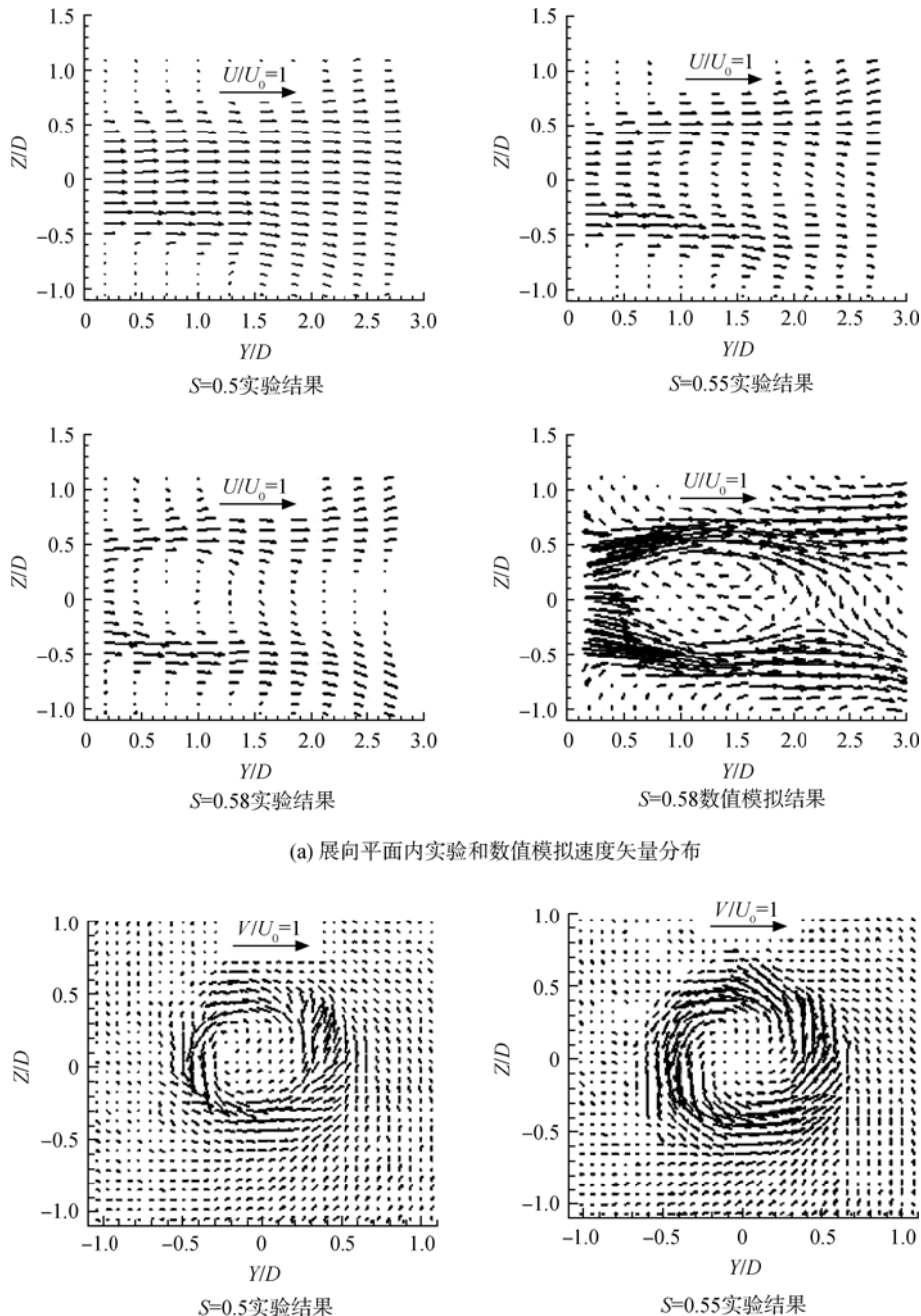
4 结果与分析

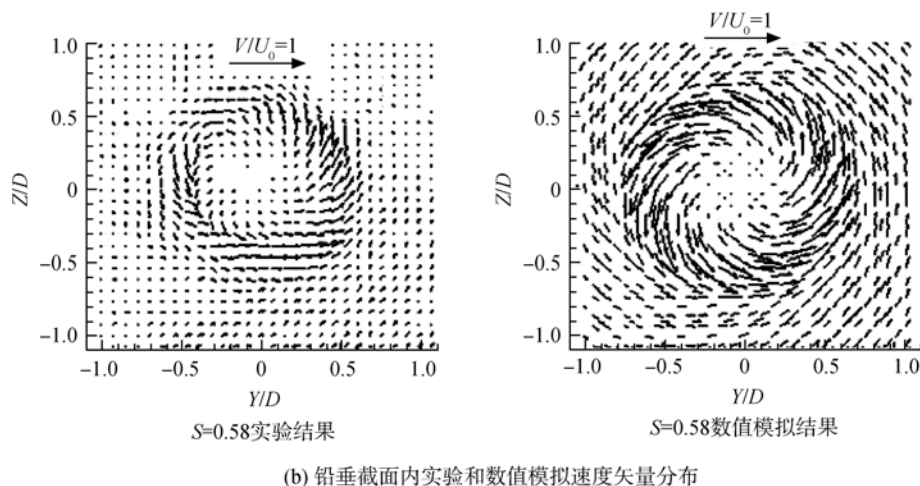
对实验数据和数值模拟结果进行整理, 并分析不同旋流条件下, 有限空间内低旋流流动特点; 对比冷态流动和热态流动条件下, 有限空间内低

旋流流动状态的变化特点; 分析不同旋流条件下, 有限空间内低旋流燃烧和流动特点.

4.1 冷态流动特性

图3是进口速度 $U_0 = 13.5$ m/s 时, 改变中心孔板小孔直径形成旋流喷射器, 在观测区域形成不同旋流数的冷态流动, 在展向平面和距离喷口 40 mm 铅垂截面内二维速度矢量(下文简称速度矢量)分布, 用 PIV 系统捕捉并绘制成无量纲速度矢量分布图. 由图3(a)可以看出, 在展向平面内, 随着旋流数增加, 沿中心线方向中心区域内速度矢量逐渐减小; 与中心线垂直的铅垂截面内, 逐渐形成环形高速区域而中部和外部形成低速区域





(b) 铅垂截面内实验和数值模拟速度矢量分布

图3 展向平面和铅垂截面速度矢量分布
Fig. 3 Velocity vector distributions on spanwise section and vertical section

呈“W”形的速度矢量分布特点. 由图3(b)图可以看出, 在距离喷口40 mm 铅垂截面内, 速度矢量分布特点是, 存在一个环形高速区域、中心低速区和外侧低速区. 表明流通旋流喷射器气流形成环形旋转气流和直流气流两股气流, 环形旋转气流诱导周围气流旋转, 形成了上述速度矢量分布. 当旋流数 $S \leq 0.56$ 时, 在展向平面内, 速度矢量分布呈现出扩散形状, 具有低旋流流动自相似特性. 在旋流数 $S=0.58$ 时, 气流切向旋转角速度诱导气流“旋涡散裂”, 出现了在中心线上展向平面速度矢量为负值的回流区域, 形成高旋流状态. 图3中也显示旋流数为 $S=0.58$ 时, 展向平面速度矢量分布和距离喷口出口40 mm 铅垂截面内速度矢量分布, 数值模拟所得结果与实验所获得速度矢量分布结果基本相同.

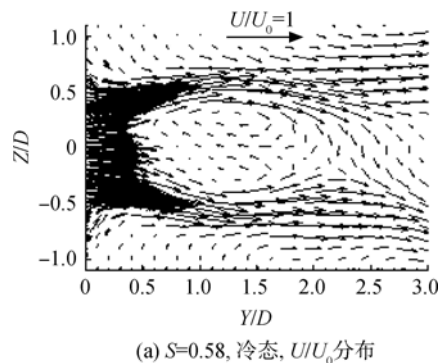
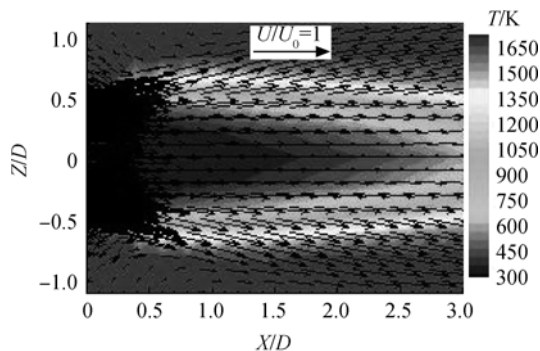
4.2 冷态与燃烧状态下流动对比

图4为旋流数为0.58时, 在展向平面内, 冷态流动和燃烧状态下速度矢量(U/U_0)分布图、燃烧状态下温度(T)分布图. 在距离喷口40 mm 铅垂截面内冷态流动和燃烧状态下速度矢量(V/U_0)和涡量(Ω)分布图. 在低旋流燃烧状态下流动相对冷态流动, 由于气体燃烧吸热体积膨胀, 速度矢量在喷射气流边缘沿着火焰层向外扩展, 使得喷射气流扩散程度更强. 由图可以看出, 当旋流数为0.58时, 燃烧状态下流动相对冷态流动, 铅垂截面中心区域速度矢量增大; 涡量分布由冷态条件下具有一个环形高涡量区域, 转变为具有中心和外部环形两个高涡量区域, 涡量分布特点诱使流动由轴心向外部螺旋推进流动; 由于燃烧气体吸热膨胀、涡量诱导和温度斜压效果使得展

向平面内流动状态由冷态高旋回流流动转变为了低旋无回流流动.

4.3 燃烧与流动特性

图5、图6和图7是旋流数分别为0.5、0.55和0.58时, 在相同进口边界条件的燃烧状态下, 展向平面内温度、氢气质量分数(w_{H_2})、速度矢量和涡量的分布图. 不同旋流数流动条件下, 由涡量分布图可以看出, 涡量分布具有中心部分和环形部分两个高涡量区域; 随着旋流数增大, 喷口位置中心高涡量区域涡量值逐步增强. 当 $S \leq 0.58$, 在上述分布特点的涡量诱导条件下, 以及气流燃烧

(a) $S=0.58$, 冷态, U/U_0 分布(b) $S=0.58$, 热态, U/U_0 和 T 分布

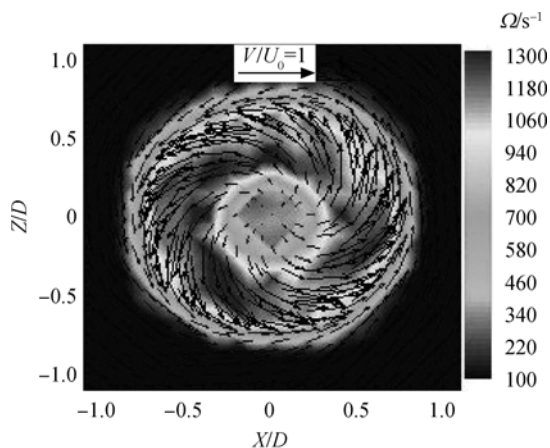
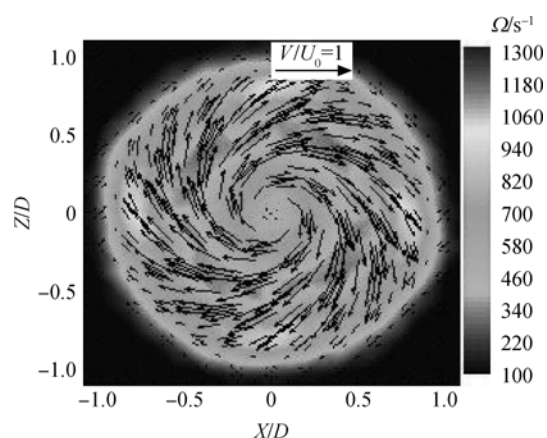
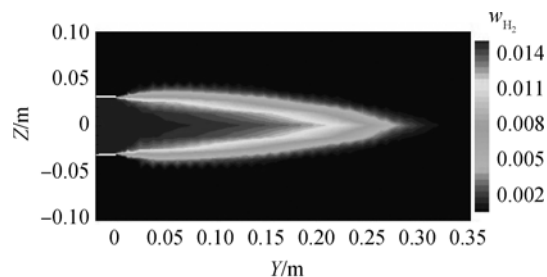
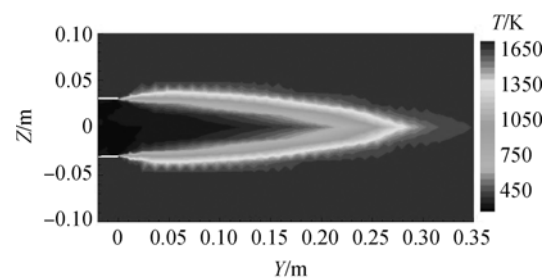
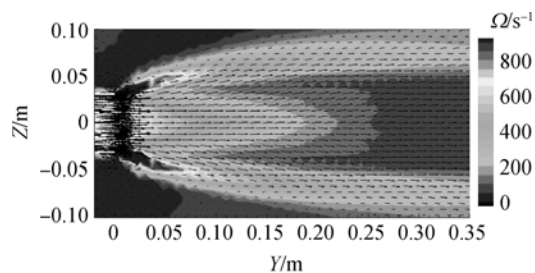
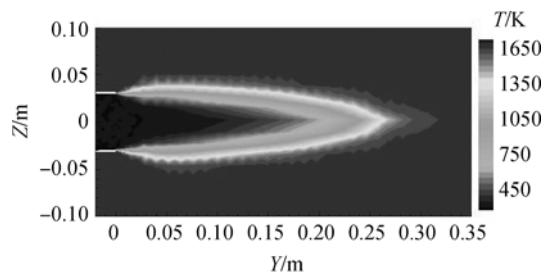
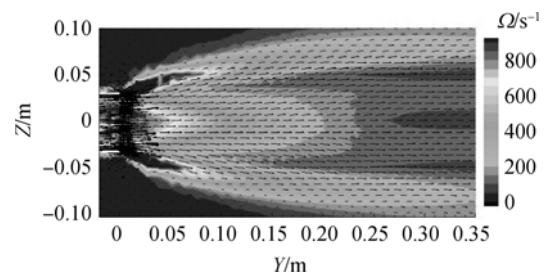
(c) $S=0.58$, 冷态, V/U_0 和 Ω 分布(d) $S=0.58$, 热态, V/U_0 和 Ω 分布

图 4 展向平面和铅垂截面内速度矢量、温度和涡量分布

Fig. 4 Distribution of velocity vector, temperature vorticity on spanwise section and vertical section

(a) w_{H_2} 分布(b) T 分布(c) U/U_0 和 Ω 分布图 5 $S=0.5$ 时展向平面内氢气质量分数、温度、速度和涡量分布Fig. 5 Distribution of hydrogen mass fraction, temperature, velocity vector and vorticity on spanwise section when $S=0.5$ (a) T 分布(b) U/U_0 和 Ω 分布图 6 $S=0.55$ 时展向平面内温度、速度矢量和涡量分布
Fig. 6 Distribution of temperature, velocity vector and vorticity on spanwise section when $S=0.55$

吸热膨胀, 还有火焰区域温度斜压效果, 旋流喷射器产生绕中心轴由内向外螺旋低旋无回流、无旋涡的流动状态.

由图 5 可以看出, 在有限空间内, 不同旋流数的旋流喷射器, 温度分布边界和化学反应边界相重合; 化学反应区域由中心轴开始, 由内向外氢气质量分数逐渐减小, 而温度逐渐升高, 化学反应边界以外是完全反应区域, 温度分布边界以外是均匀分布的高温区域. 由温度分布边界和化学反应边界, 可以判断有限空间内, 低旋流燃烧火焰并非脱体火焰, 而是形成类似于扩散燃烧火焰. 随着旋流数增大, 温度分布边界和化学反应边界在展向

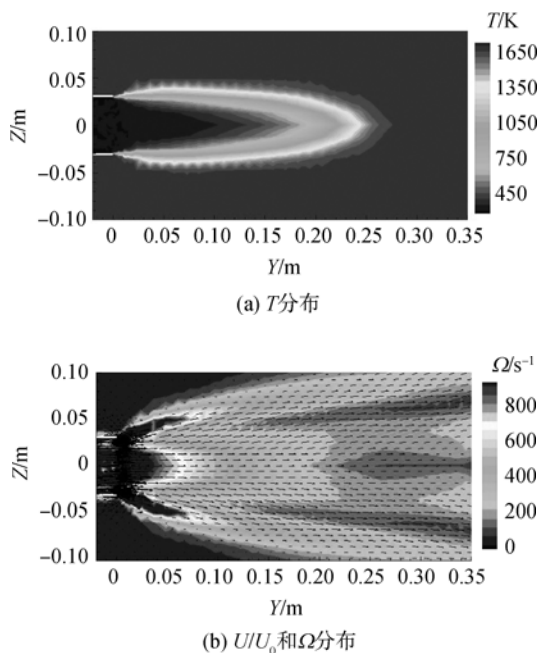
图7 $S=0.58$ 时展向平面内温度、速度矢量和涡量分布

Fig. 7 Distribution of temperature, velocity vector and vorticity on spanwise section when $S=0.58$

平面逐渐缩短,而在铅垂截面逐渐扩大.

图8是与图5、图6和图7相对应,涡量为 300 s^{-1} 的等值面结构和三维流线图,为了更清晰地显示旋流喷射器流动特点,有限空间矩形通道部分区域被隐去.由图8可以看出,涡量为 300 s^{-1} 的等值面主要位于中心区域和环形区域内;并且随着旋流数增大,中心区域涡量等值面变粗变长,环形区域涡量等值面向外扩展.图8中三维流线在涡量等值面外部纷乱的流线是气流碰到通道避免产生的.由主气流的流线分布特点可以进一步看出,在不同旋流数下,形成由内向外螺旋低旋无回流流动,到出口位置可以回转几次.

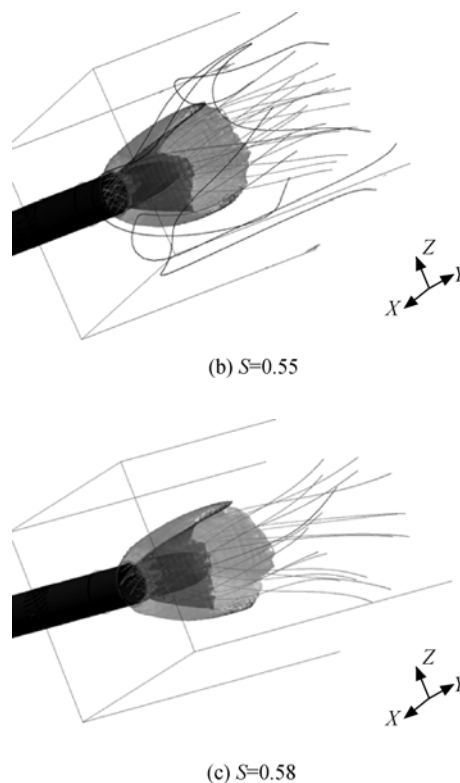
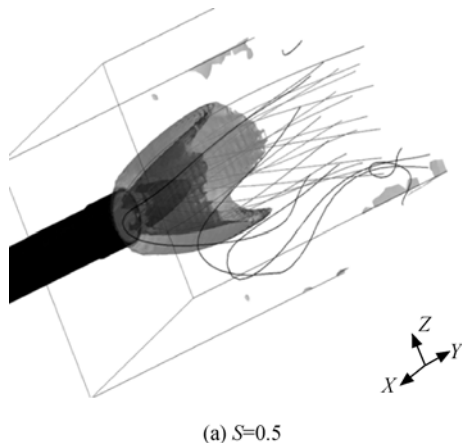


图8 燃烧状态下涡量等值面结构和三维流线

Fig. 8 Vorticity contour surface structure and 3-D streamline in combustion state

5 结 论

对改变中心孔板小孔直径形成的不同旋流数旋流器喷射器,在有限空间矩形通道内形成的流动和燃烧,进行了流场实验、数值模拟和数据分析,结果表明:

1) 冷态流动条件下,随着旋流数增加,在与中心线铅垂截面内,逐渐形成环形高速区域而中部和外部形成低速区域的速度矢量,呈“W”形的速度矢量分布特点.在铅垂截面内,速度矢量存在一个环形高速区域、中心低速区和外侧低速区.当旋流数 $S \leq 0.56$ 时,形成低旋流流动;在旋流数 $S=0.58$ 时,形成高旋流状态.

2) 由于燃烧气体吸热膨胀、涡量诱导和温度斜压效果,可以使得流动状态由冷态高旋回流流动转变为了低旋无回流流动.

3) 不同旋流数燃烧状态流动条件下,涡量分布具有中心部分和环形部分两个高涡量区域;并且随着旋流数增大,喷口位置中心高涡量区域涡量值逐步增强.

4) 在有限空间内,低旋流燃烧没有形成脱体火焰,而是形成类似于扩散燃烧火焰.并且随着旋流数增大,温度分布边界和化学反应边界在展向

平面逐渐缩短,而在铅垂截面内逐渐扩大。

参考文献:

- [1] Yegian D T, Cheng R K. Development of a lean premixed low-swirl burner for low NO_x practical applications[J]. Combustion Science and Technology, 1998, 139(1): 207-227.
- [2] Cheng R K, Fable S A, Chmidt D S, et al. Development of a low swirl injector concept for gas turbines[R]. New Orleans, US; International Joint Power Conference, 2001.
- [3] Nazeer W A, Smith K O, Sheppard P, et al. Full scale testing of a low swirl fuel injector concept for ultra-low NO_x gas turbine combustion systems [R]. ASME Paper GT2006-90150, 2006.
- [4] Cheng R K, Littlejohn D, Nazeer W A, et al. Laboratory studies of the flow field characteristics of low-swirl injectors for adaptation to fuel-flexible turbines[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, 130(2): 021501.1-021501.10.
- [5] Littlejohn D, Cheng R K. Fuel effects on a low-swirl injector for lean premixed gas turbines[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(2): 3155-3162.
- [6] Peter T, Cheng R K. Flashback, blow out, emissions, and turbulent displacement flame speed measurements in a hydrogen and methane fired low-swirl injector at elevated pressures and temperatures[R]. ASME Paper GT2012-68216, 2012.
- [7] 葛冰, 田寅申, 袁用文, 等. 重型燃气轮机先进低 NO_x 燃烧技术分析[J]. 热力透平, 2013, 42(4): 251-259.
GE Bing, TIAN Yinsheng, YUAN Yongwen, et al. Advanced low NO_x combustion technologies for heavy-duty gas turbine[J]. Thermal Turbine, 2013, 42(4): 251-259. (in Chinese)
- [8] 尹航, 戴韧, 张建辉, 等. 旋流器安装角对低旋流燃烧流场的影响[J]. 动力工程学报, 2011, 36(9): 664-671.
YIN Hang, DAI Ren, ZHANG Jianhui, et al. Effect of vane setting angle of swirler on flow field of a low-swirl burner [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2011, 36(9): 664-671. (in Chinese)
- [9] 尹航, 戴韧, 邹玉耐, 等. 贫预混低旋流燃烧器吹脱极限和流场的测量[J]. 燃气轮机技术, 2012, 25(2): 26-31.
YIN Hang, DAI Ren, ZOU Yunai, et al. Measurements of blow off limit and flowfields of low swirl lean premixed burners[J]. Gas Turbine Technology, 2012, 25(2): 26-31. (in Chinese)
- [10] 尹航, 钟仕立, 戴韧, 等. 合成气低旋流燃烧器设计与流动结构的分析[J]. 动力工程学报, 2011, 31(2): 131-136.
YIN Hang, ZHONG Shili, DAI Ren, et al. Design of low swirl syngas burner and analysis on the flow pattern[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2011, 31(2): 131-136. (in Chinese)
- [11] 柳伟杰, 葛冰, 田寅申, 等. 当量比对甲烷预混低旋流燃烧的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2014, 20(1): 65-69.
LIU Weijie, GE Bing, TIAN Yinshen, et al. Effect of equivalence ratio on methane pre-mixed low-swirl combustion[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2014, 20(1): 65-69. (in Chinese)
- [12] 邓洋波, 刘阳, 朱公志. 低旋流燃烧和流动特性数值模拟研究[J]. 大连海事大学学报, 2009, 35(4): 99-102.
DENG Yangbo, LIU Yang, ZHU Gongzhi. Numerical simulation of low-swirl combustion and flowfield[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2009, 35(4): 99-102. (in Chinese)
- [13] Chan C K, Lau K S, Chin W K, et al. Freely propagating open premixed turbulent flames stabilized by swirl[J]. Symposium (International) on Combustion, 1992, 24(1): 511-518.
- [14] Cheng R K, Yegian D T, Miyasato M M, et al. Scaling and development of low-swirl burners for low emission furnace and boilers[J]. Proceedings of Combustion Institute, 2000, 28(1): 1305-1313.
- [15] De Lange H C, Houben M P, van Steenhoven A A. Stereo-PIV analysis of the low-swirl flow above a partial oxidation burner [J]. Combustion Science and Technology, 2006, 178(9): 1541-1557.
- [16] Johnson M R, Littlejohn D, Nazeer W A, et al. A comparison of the flowfields and emissions of high-swirl injectors and low-swirl injectors for lean premixed gas turbines[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(2): 2867-2874.
- [17] 徐震. IGCC 低旋流燃烧器冷态流场的实验与数值研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2014.
XU Zhen. Experimental and numerical research on the flow-field of the IGCC low swirl combustor[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2014. (in Chinese)
- [18] Yang S C, Chen L C. Swirl generator with axial vanes: United States, 5186607[P]. 1993-02-16.

(编辑:王碧琚)