

# 油雾旋流燃烧的实验和计算分析

刘镇剑 朱 民 李少帅

(清华大学 热能工程系热科学与动力工程教育部重点实验室 北京 100084)

**摘 要:** 为提高油雾旋流燃烧时燃烧效率, 结合搭建实验台进行实验测量和建立数学模型模拟计算, 研究了油雾旋流燃烧时旋流流体对流场结构、液滴蒸发和燃烧特性的影响。结果表明: 旋流流场的结构主要可以分为中心回流区和两层螺旋涡结构, 随着旋流数的增加, 内层涡旋的强度增加, 外层涡旋的强度降低。旋流数的增加还能促进液滴的扩散、蒸发以及液滴和空气掺混, 使得燃烧室上游燃料浓度增加, 燃烧效率提高。随着雷诺数的增加, 中心回流区增加, 火焰长度变短。

**关 键 词:** 油雾旋流燃烧; 旋流数; 中心回流区; 螺旋涡; 液滴蒸发; 数值计算

中图分类号: TK16 文献标识码: B

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.02.017

## 引 言

在能源动力系统中, 油雾旋流燃烧是一种常见的燃烧方式。液体燃料雾化形成液滴, 液滴蒸发并和空气混合最终发生燃烧, 液滴的雾化质量、空间分布、液滴和空气的掺混质量都会对火焰结构和燃烧效率产生影响。而旋流流过时会形成回流区和复杂的涡结构, 影响液滴分布、掺混和蒸发。因此, 研究旋流如何改变流场结构, 影响液滴的分布蒸发和燃烧特性对提高油雾旋流燃烧的燃烧效率、减少排放有重要意义。

针对油雾旋流燃烧, 人们已经做过很多研究。在旋流对流场和火焰的影响这方面, 文献[1]总结旋流燃烧时具有稳定火焰、影响火焰结构和高效清洁燃烧等作用, 而旋流的强度通常由旋流数描述, 强旋流会形成中心回流区, 能减少熄火现象的发生和提高燃烧效率。文献[2]针对旋流数对流场、燃烧特性的影响进行过分析, 总结了速度分量和湍动能沿径向的变化规律, 分析认为强旋流会增加湍流强度和火焰速度, 减小火焰面积, 但放热率变化不大。文献[3]发现在旋流燃烧时由于 Kelvin-Helmholtz 不稳定性形成两种涡结构, 一种在回流区边缘, 一种

在环境伴流旁边, 两种涡结构会绕着中心轴作周期性地旋转。对于液滴在旋流燃烧中的运动和分布, 文献[4]通过激光测量的方法研究冷态和热态下旋流对于轴向速度场分布的影响并统计了液滴在不同轴向位置处, 速度和尺寸的分布情况。文献[5]通过 PIV 测量提出旋流主要是通过气流和液滴之间的强剪切作用, 使液滴的数量增加, 尺寸变小, 最终提高混合和燃烧效率。随着计算机技术的发展, 人们也开始用数值方法去模拟油雾旋流燃烧。文献[6]用大涡模拟得到随着旋流数增加, 液滴明显从轴心向周向扩散, 并对下游螺旋涡的成因做出推测。文献[7]用大涡模拟对油雾旋流燃烧进行了非定常模拟, 观察到瞬时时流场中两种旋转的涡结构, 并记录液滴在三维空间中的位置和尺寸分布。而对于油雾旋流燃烧的火焰结构, 文献[8]用 DNS 模拟液滴的旋流燃烧观察到预混火焰和扩散火焰, 并且以扩散火焰为主, 预混火焰主要出现在雾化锥附近。尽管关于油雾旋流燃烧的研究已经很多, 但对于其中旋流流场与液滴蒸发燃烧的相互作用机制还未完全认识, 尤其是不同旋流特征参数对涡旋结构和液滴分布蒸发的影响。本研究将通过实验和数值模拟的方法分析旋流特征参数对流场结构、液滴分布蒸发和燃烧特性的影响, 希望为提高旋流油雾燃烧的油雾掺混质量和燃烧效率提供支持。

## 1 实验测量

图1所示为实验中的燃烧器和实验台结构。燃烧器为圆筒状, 直径 122 mm, 总长 472.5 mm。燃烧器的 4 个侧面为石英玻璃(两个为 80 mm × 338 mm, 两个为 40 mm × 338 mm)。燃料侧柴油的供应由一个供油和回油装置控制压力雾化喷嘴的油压, 达到控制油压调节液滴雾化的目的。空气侧空气通过燃烧器顶端的风机加压, 又流过轴向旋流器产生

收稿日期: 2015-02-12

作者简介: 刘镇剑(1990-), 男, 重庆涪陵人, 清华大学硕士研究生。

旋流。实验采用两个旋流数分别为 0.47 和 0.81 的轴向旋流器。喷油嘴的旁边为一电火花点火器, 燃烧的尾气通过烟道排到室外。测量系统由激光发射器和高速摄像机组成, 激光发射器通过燃烧室侧面 40 mm 宽度的石英玻璃射入, 而高速摄像机在另一侧 80 mm 宽度的石英玻璃拍摄, 观察液滴的雾化、掺混和火焰的形态等。

通过调整油路的供油装置, 得到不同雾化压力下柴油雾化情况如图 2 所示, 从工况 1 到工况 4 雾化压力逐渐增加。柴油液滴在雾化压力的作用下发生破碎, 并形成规则的雾化锥。当压力较低时如图 2(a) 所示, 液滴形成的雾化锥不稳定, 当压力足够时, 雾化锥变得稳定。对比不同压力下的图像, 压力越高, 锥形气泡破碎越迅速, 破碎后液滴直径越小, 分布愈均匀。柴油受到高压在喷嘴出口附近形成流体薄暮, 在外扰动下流体薄环从圆锥形薄暮脱落, 而薄环再根据 Rayleigh(瑞利) 机制分解为液滴<sup>[9]</sup>。随着压力增加, 薄暮对抗动的敏感性增加, 破碎液滴直径更小。图 3 为测量所得不同压力下流量和雾化角的变化,

随着压力增加, 液滴的动量增加, 一方面使得燃料流量增大; 另一方面, 破碎液滴径向速度增加, 雾化角变大。

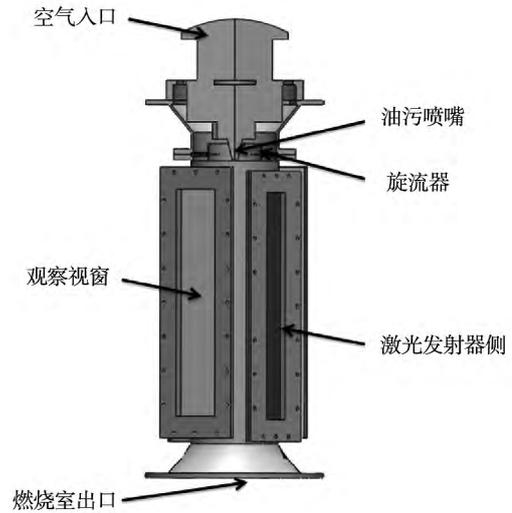


图 1 实验燃烧器的建模结构图

Fig. 1 Model of experimental burner

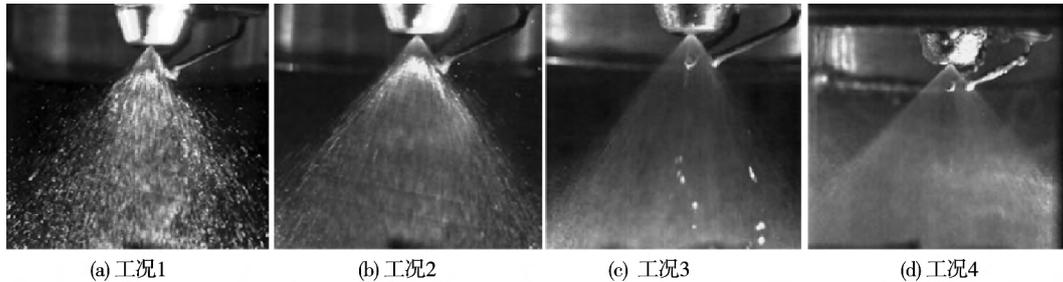


图 2 不同压力工况下液滴雾化的图像

Fig. 2 Droplet atomization under different pressures

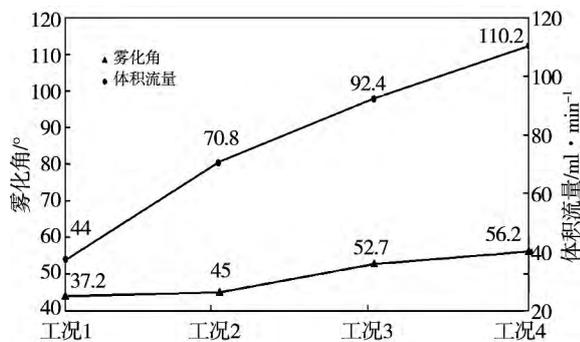


图 3 不同压力工况下雾化角和流量的变化

Fig. 3 Variations of spay angle and volumetric flow rate under different pressures

由上述测量可知, 雾化压力会影响液滴雾化尺寸、燃料量和雾化角。综合考虑雾化稳定性、雾化质量和当量比, 选择工况 3 的雾化压力进行不同旋流数的实验。图 4 展示的是旋流数分别为 0.47 和 0.81 时冷态和热态的瞬时情况, 图片上方为喷嘴和气流进口。可以看出, 冷态下当旋流数较低时, 雾化锥的形态保持较好, 特别是喷嘴周围的液滴数量很少, 与图 2 时相比变化不大; 而在高旋流数条件下, 喷嘴附近的液滴数量密度明显增加, 喷嘴周围也有很多液滴分布, 下游液滴随旋流空气运动, 已经观察不到雾化锥结构。这是因为旋流数的增大, 离心力增大, 卷吸液滴向周围扩散; 另一方面中心回流区的

形成,会将下游未蒸发燃烧的液滴带回喷嘴附近,提高燃烧室上游的燃油浓度。因此,热态实验中当旋流数较小时,火焰较为细长;而旋流数较大时,整个燃烧室头部都有液滴燃烧,从发光强度看出火焰燃烧更加剧烈,且主要集中在燃烧室上游。

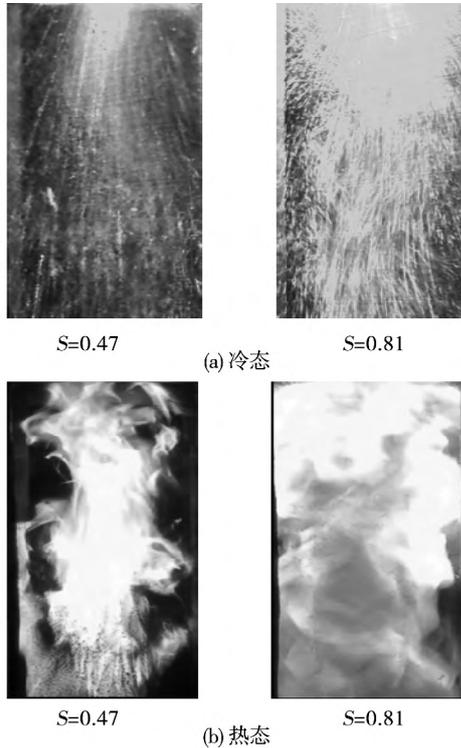


图 4 不同旋流数下冷态和热态的实验结果

Fig. 4 Experimental results of different swirl numbers under non-reacting and reacting conditions

## 2 数值计算

为了进一步探究旋流如何对流场结构、液滴分布和燃烧特性的影响,本研究采用商业软件 Fluent 对油雾旋流燃烧进行了数值计算。在计算模型方面:湍流模型采用  $k-\epsilon$  模型。燃烧模型采用 PDF 模型。PDF 燃烧模型求解守恒标量(混合物分数)的输运方程再结合燃料数据库和概率密度函数,计算各个统计平均物理量(如温度、组分质量分数)。雾化模型线性不稳定液膜雾化模型,仅考虑上文提到薄雾破碎为液滴的机理,不考虑液滴形成后与空气作用发生二次破碎的过程。整个计算域的网格总数为 120 万结构化网格,并对旋流器和燃烧筒上游

部分做加密,保证计算精度。边界条件方面,进出口的设置参考实验数据。旋流器和燃烧器壁面都采用无滑移绝热壁面条件。燃料为柴油,其主要成分为  $C_{10}H_{22}$ ,以实验中工况 3 的条件  $7\text{ g/s}$  的流速  $52.7^\circ$  雾化角喷入燃烧室。为了对比旋流数对流动和燃烧的影响,旋流器的旋流数分别为 0.47、0.81 和 1.41。按照上述边界条件和计算模型,分冷态和热态作数值计算。

### 2.1 冷态结果讨论

#### 2.1.1 冷态流场结构

计算得到冷态下的速度场结果。图 5 为旋流流场轴向速度沿燃烧室径向的变化图像,可以看到在轴线附近轴向速度小于 0;  $r = 32\text{ mm}$  开始轴向速度迅速增加;  $r = 55\text{ mm}$  后迅速下降。在文献 [10] 中,将旋流流场分为 3 个主要结构:中心回流区、中心回流区周围的内剪切层、来流气体和外侧空气形成的外剪切层,如图 5 所示。旋流会引起压力梯度的变化,并形成轴向速度小于 0 的区域,即中心回流区。旋流气体由于旋转和燃烧室中的其他气体发生剪切作用,剪切作用发生在速度梯度剧烈变化的地方。

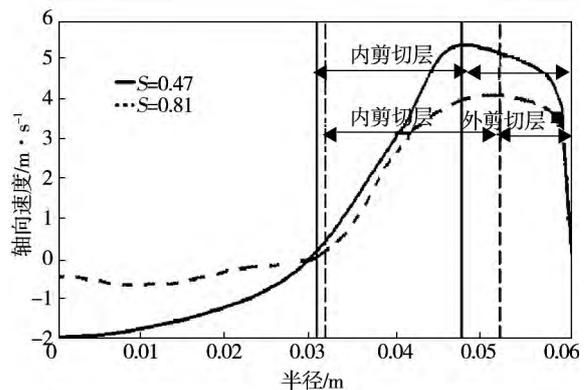


图 5 流场轴向速度沿燃烧室半径的变化

Fig. 5 Variation of axial velocity along burner radius

如图 6 展示的是旋流数为 0.47 和 0.81 时冷态时的轴向速度场和回流区。可以看到随着旋流数的增大,回流区的长度也逐渐增加。对于旋流燃烧而言,中心回流区的增加能提高火焰的稳定性、燃料和空气的掺混质量,使得燃料燃烧更加充分。但当旋流数太大时,可能会发生回火现象。

为了更好地观察内外剪切层处涡的结构和变化,对流场用  $Q$  准则进行处理<sup>[11]</sup>,  $Q$  准则是速度梯度  $\nabla u$  的二阶不变量,其定义为:

$$Q = (\Omega_{ij}\Omega_{ij} - S_{ij}S_{ij}) / 2$$

式中:  $S_{ij}$ 、 $\Omega_{ij}$ —速度梯度张量中的对称张量  $s^{-2}$ 、反对称张量  $s^{-2}$ 。因此  $Q$  准则的大小代表了当地应变率的大小关系。在  $Q > 0$  的区域,与流体的应变率相比,转动速率占主导地位,即在该区域中涡旋结构占主导地位。 $Q$  准则也可以用  $N-S$  方程的压力源项解释,由压力的泊松方程( $\nabla^2 p = 2\rho Q$ )和最大值原理,压力的最小值仅可能出现在  $Q > 0$  的区域。用  $Q = 0$  的等值面作为涡的边界得到的轮廓形状并不准确,应当选用一个大于 0 的阈值来定义,可以选用  $Q$  的均方根来定义涡的边界<sup>[12]</sup>。选取  $S = 0.81$  和  $S = 1.4$  时轴截面上  $Q$  值的均方根作为阈值。 $Q$  准则的等值面的形状代表了涡旋的形状, $Q$  的大小表示了涡旋强度的大小。

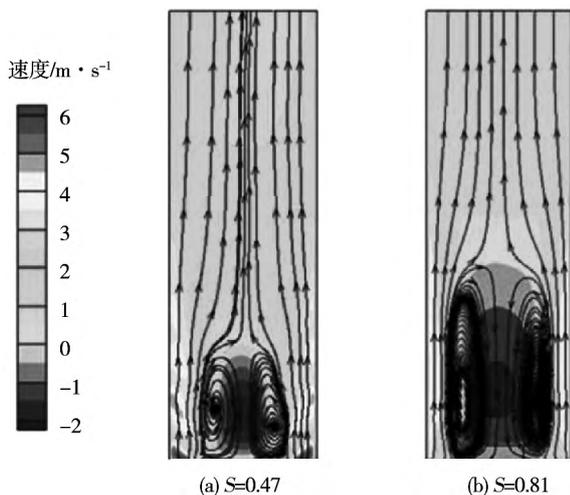


图 6 冷态下轴向速度场和回流区分布  
Fig. 6 Axial velocity field and recirculation zone under non-reacting condition

图 7 表示由于旋流剪切作用所形成的内层涡结构,图 8 表示外层涡结构。可以看出这两种涡都是螺旋形的涡结构。观察同一个旋流数的涡形态图 6 (a),可以看到螺旋形涡结构在下游破碎耗散;对比同一个旋流数不同  $Q$  值如图 6 (a)、(b) 所示,高涡旋强度  $Q = 40\ 000\ s^{-2}$  仅在旋流器出口附近观察到,说明流体流动涡旋的强度往下游有衰减的趋势。对

比同一个  $Q$  值不同旋流数(图 6 (a)、(c)、(e)),随着旋流数的增加,内剪切层  $Q$  准则的等值面变大,涡的尺寸变大。另外回流区内也有涡的结构,但涡旋的强度较内螺旋涡小,但当旋流数足够大,内剪切层涡在下游会破碎,与回流区的涡混合。而对于外螺旋涡,随着旋流数的增加, $Q$  准则的等值面长度逐渐变小,外螺旋涡比内螺旋涡衰减更早。

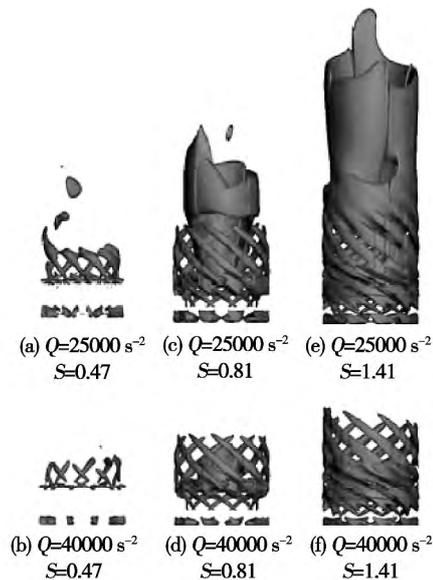


图 7  $Q$  准则处理后内剪切层的涡结构  
Fig. 7 Vortex of inner shear layer by  $Q$ -criterion

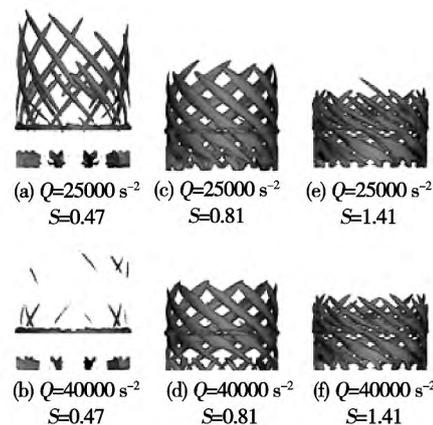


图 8  $Q$  准则处理后外剪切层的涡结构  
Fig. 8 Vortex of outer shear layer by  $Q$ -criterion

2.1.2 液滴分布情况讨论

图 9 所示为冷态情况下,液滴数量密度百分比在燃烧室不同横截面上沿着半径方向的分布,分别

选取了  $z = 10 \text{ mm}$   $z = 80 \text{ mm}$  的截面位置,横轴为半径,纵轴为该半径位置液滴数目占总液滴数的百分比。从总体上讲,液滴的分布呈对称分布。对于相同旋流数  $S$ ,在靠近喷嘴出口的地方如图 9(a)所示,液滴集中在半径  $20 \text{ mm}$  内区域内,而在超过半径  $20 \text{ mm}$  的地方存在的液滴仅占总液滴数目的  $5\%$  左右。随着  $z$  的增加,液滴分布主要表现出两个特点,一是液滴分布的峰值和边缘向外侧移动,这跟压力式雾化形成的雾化锥的液滴分布相符合;二是液滴沿径向的分布越来越均匀。对比同一位置不同旋流数  $S$  的情况,对于高旋流数 ( $S = 0.81$ ),液滴分布有向外扩散的趋势,液滴更早地在径向分布上变得均匀,这从图 9(a)(b)可以看出。这也和图 3(a)冷态时液滴分布的实验结果较为符合,低旋流下液滴雾化锥较为明显,强旋流下液滴向外扩散。由上一节流场的讨论可知,气流的涡旋会加强,所以在涡旋的作用下液滴的扩散和掺混质量提高。

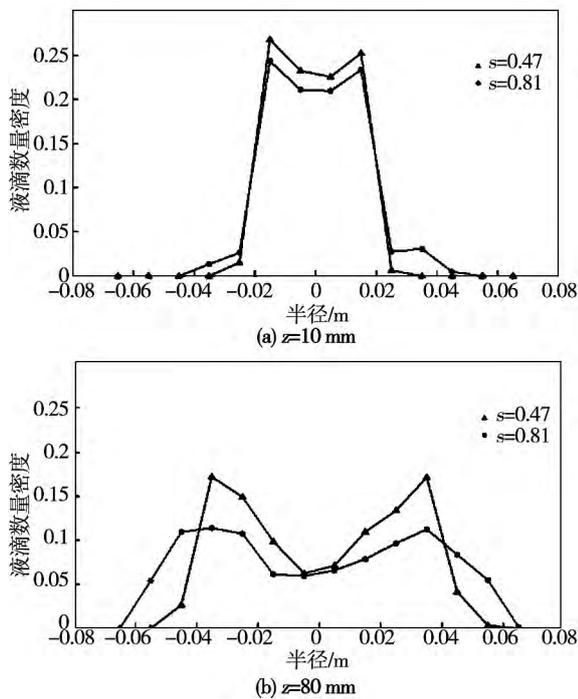


图 9 液滴数量密度沿径向方向的变化  
Fig. 9 Variation of droplet concentration along burner radius

## 2.2 热态结果讨论

### 2.2.1 热态流场结构

为了研究由于液滴运动和分布的改变对燃烧特

性造成的影响作了热态的数值计算。热态时,液滴燃烧会对流场的结构带来影响。图 10 为旋流数为  $0.47$  时,油雾燃烧室冷态和热态轴向速度沿轴向方向变化图。以速度为负表示回流区的范围,我们可以看到热态情况下回流区长度变短,这一方面是由于热态时液滴蒸发后的气体会大于零的轴向速度,另一方面流场气体由于燃烧放热产生压力降,所以有燃烧时回流区的长度会变短<sup>[6,13]</sup>。所以,对于油雾燃烧室,由于油雾燃烧会使得旋流的作用减弱。

同样用  $Q$  准则的方法对比分析旋流数为  $0.47$  时冷态和热态的涡量场,得到图 11。当  $Q = 10\ 000 \text{ s}^{-2}$  时,冷态下可以明显地观察到由于旋流剪切作用引起的涡结构,而对于同样的  $Q$  值在热态下,涡主要集中在喷嘴和轴心附近,并没有观察到旋流剪切引起的涡结构。当  $Q = 1\ 500 \text{ s}^{-2}$ ,即当我们观察强度较低的涡时,热态下也能观察到旋流剪切作用引起的涡结构。这说明,燃烧时温度的变化导致粘性变化,导致涡的耗散增强,旋流剪切引起的涡强度降低。

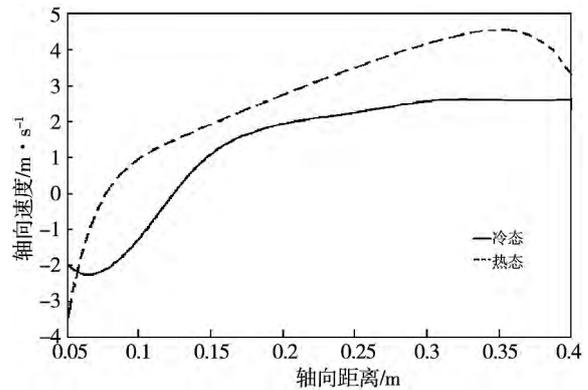


图 10 旋流数为  $0.47$  时冷态和热态轴向速度沿轴向的变化

Fig. 10 Variation of axial velocity for swirl number of  $0.47$  under non-reacting and reacting conditions

### 2.2.2 燃料蒸发速率、浓度分布和温度场分布

图 12 表示的是热态下不同旋流数下燃料蒸发速率分布,从图可以看出液滴蒸发主要发生在雾化锥附近,随着旋流数的增加,液滴蒸发主要发生两方面的变化:一方面蒸发速率有所增加,当旋流数为

1.41 时大部分液滴的蒸发速率为 $10^{-8}$  kg/s 数量级; 另一方面, 液滴蒸发的区域缩小。这说明旋流数的增加, 有利于液滴更快更彻底地蒸发。

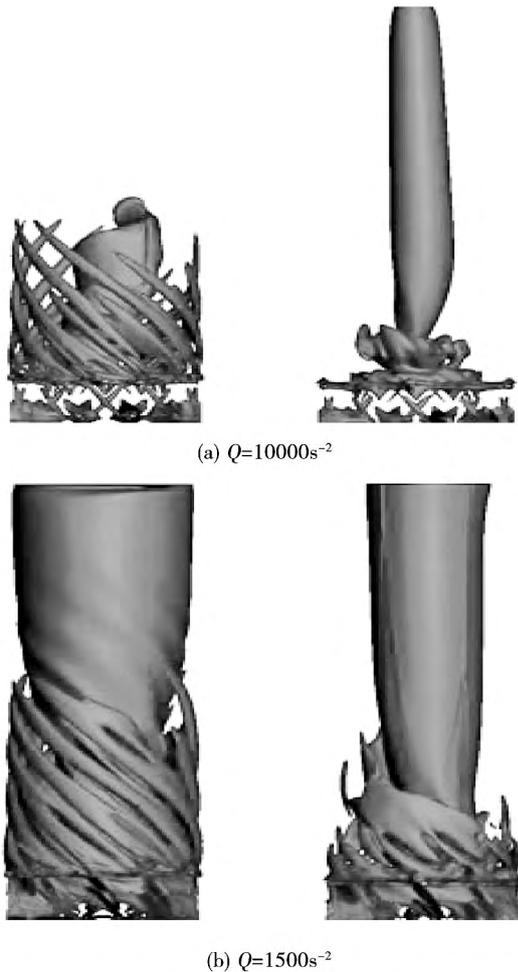


图 11 旋流数为 0.47 时热态和冷态下涡结构  
Fig. 11 Vortex for swirl number of 0.47 under non-reacting and reacting conditions

图 13 表示的是不同旋流数下燃料量的云图分布, 可以看出随着旋流数的增加, 燃烧室上游燃料液滴浓度变大, 等值线区域的长度变短。这是因为一方面蒸发速率提高, 另一方面随着旋流数的增加, 逆压梯度区和回流区增大, 由喷嘴喷雾到下游的燃料液滴被回流的空气带回到喷嘴周围, 所以液滴的浓度在上游增加, 在下游减小。同时, 液滴的分布也随着旋流增强向两侧扩散, 这与冷态下液滴的分布相符合。由于随着旋流数变化燃料量分布会发生变化, 所以燃烧也发生相应的变化。火焰长度会随着

旋流数的增加而变短, 火焰主要集中在燃烧室上游, 这跟图 3(b) 热态下的实验结果较为吻合。

### 2.2.3 雷诺数的影响

为了对比雷诺数对燃烧的影响, 调整了燃烧室进口空气的流量, 比较了  $Re = 24\ 700$  和  $Re = 58\ 800$  时温度场的分布, 如图 14 所示。可以看到当雷诺数  $Re$  增大时, 燃烧室内燃烧温度增加, 火焰长度变短<sup>[14]</sup>。造成这样的原因, 一方面随着雷诺数的增加, 剪切应力的增加, 中心回流区逐渐增加, 燃烧产物的卷吸加强, 燃烧集中在燃烧室上游, 提高了温度和燃烧效率; 另一方面, 增加空气流量, 当量比减小, 火焰变短, 燃烧更加充分。

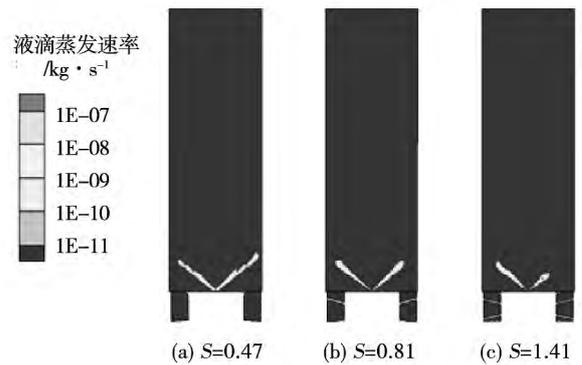


图 12 不同旋流数时燃料蒸发速率分布  
Fig. 12 Fuel evaporation rate distribution for different swirl numbers

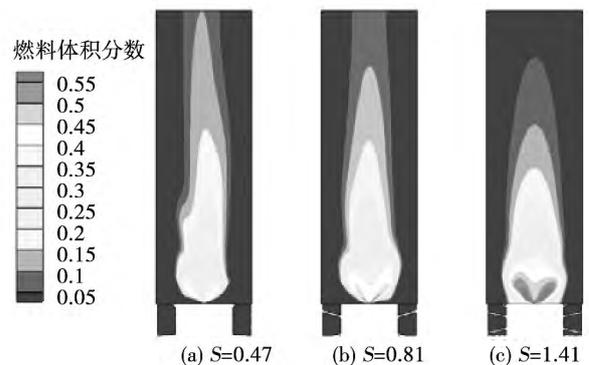


图 13 不同旋流数时燃料体积分数分布  
Fig. 13 Fuel volume fraction distribution for different swirl numbers

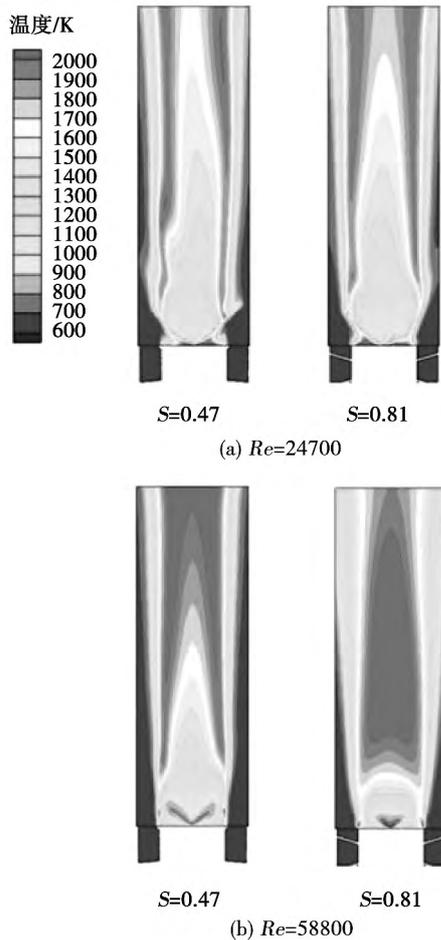


图 14 不同雷诺数下温度场的分布  
Fig. 14 Temperature distribution for different Reynolds numbers

### 3 结 论

(1) 旋流流动的流场可以分为 3 种主要结构: 中心回流区、内剪切层、外剪切层。中心回流区随着旋流数增加而变长。螺旋涡结构由旋流气体和周围空气的剪切作用形成。随着旋流数增加,内剪切层涡强度增加,外剪切层涡强度减小,外螺旋涡比内螺旋涡衰减更早。

(2) 对于同一旋流数,液滴呈对称有峰值的分布。沿轴向,越往下游峰值向外侧移动,分布的比例也越来越均匀。不同旋流数时,随着旋流数的增加,离心力增加,液滴的分布会更加分散,液滴和空气掺混更加充分。

(3) 当发生燃烧时,由于燃烧放热,气体膨胀轴向速度增加,回流区的长度会变短,旋流的作用相比冷态时减弱。燃烧会导致涡耗散,由旋流剪切形成

的螺旋涡强度降低。

(4) 随着旋流数增加,液滴蒸发加快,燃烧主要发生在燃烧室上游部分,火焰长度变短,燃烧效率有所提高。随着雷诺数的增加,剪切应力的增加,中心回流区逐渐增加,燃烧产物的卷吸作用增加。

### 参考文献:

- [1] Gupta A K, Lilley D G, Syred N. Swirl flows [J]. Tunbridge Wells, Kent, England, Abacus Press, 1984, 488 p., 1984, 1.
- [2] Huang Y, Yang V. Effect of swirl on combustion dynamics in a lean-premixed swirl-stabilized combustor [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(2): 1775 - 1782.
- [3] García-Villalba M, Fröhlich J, Rodi W. Identification and analysis of coherent structures in the near field of a turbulent unconfined annular swirling jet using large eddy simulation [J]. Physics of Fluids (1994-present), 2006, 18(5): 055103.
- [4] Presser C, Gupta A K, Semerjian H G, et al. Droplet transport in a swirl-stabilized spray flame [J]. Journal of Propulsion and Power, 1994, 10(5): 631 - 638.
- [5] Habibzadeh B, Gupta A K. Swirl effects on flow dynamics and fuel spray structure in practical combustors [C]//ASME 2002 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2002: 317 - 329.
- [6] Sankaran V, Menon S. LES of spray combustion in swirling flows\* [J]. Journal of Turbulence, 2002, 3(11): 1 - 23.
- [7] Itoh Y, Taniguchi N, Kobayashi T, et al. Large Eddy Simulation of spray combustion in swirling flows [C]. ASME/JSME 2003 4th Joint Fluids Summer Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2003: 1505 - 1510.
- [8] Luo K, Desjardins O, Pitsch H. DNS of droplet evaporation and combustion in a swirling combustor [J]. Center for Turbulence Research, Annual Research Briefs, 2008: 253 - 265.
- [9] York J L, Stubbs H E, Tek M R. The mechanism of disintegration of liquid sheets [J]. Trans. ASME, 1953, 75(7): 1279 - 1286.
- [10] Huang Y, Yang V. Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2009, 35(4): 293 - 364.
- [11] Jeong J, Hussain F. On the identification of a vortex [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1995, 285: 69 - 94.
- [12] Kunnen R P J, Clercx H J H, Geurts B J. Vortex statistics in turbulent rotating convection [J]. Physical Review E, 2010, 82(3): 36306.
- [13] 张红梅, 李德玉, 过增元. 突扩燃烧室内回流区长度研究 [J]. 燃烧科学与技术, 1999, 02: 90 - 95.  
ZHANG Hong-me, LI De-yu, GUO Zeng-yuan. Study on the length of recirculation zone in sudden - expansion combustion chamber [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 1999, 02: 90 - 95.
- [14] 郑韞哲, 朱民, 姜羲. 合成气旋流预混燃烧的大涡模拟 [J]. 推进技术, 2013, 05: 664 - 671.  
ZHENG Yun-zhe, ZHU Min, JIANG Xi. Large eddy simulation of premixed swirling combustion with synthesis gases [J]. Journal of Propulsion Technology, 2013, 05: 664 - 671.

(姜雪梅 编辑)

studied by experimentally investigating combustion characteristics of 13 blended coals optimized by using the expert system of multivariate optimization in a drop tube furnace. The effects of coal fineness R90, excess air ratio and wall temperature in ignition temperature, ignition distance and combustion emissions are reported in detail in this paper. Results show none of 13 optimized coal blends has appreciable slag, indicating this multivariate optimization technology has successfully improved the slagging characteristics of coal via effective and optimized blending. **Key words:** power coal blending, drop tube furnace, combustion properties

油雾旋流燃烧的实验和计算分析 = **An Experimental and Computational Study of Spray Combustion in Swirling Flows** [刊 汉] LIU Zhen-jian, ZHU Min, LI Shao-shuai (Key Laboratory for Thermal science and Power Engineering of Ministry of Education / Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(2). -245-251

In the energy and power systems, swirl-stabilized spray combustion is a common combustion strategy. How to further improve the combustion efficiency and reduce emissions is the core interest of basic research and technology development. In this article, we used both experiments and numerical simulations to analyze the influence of swirl on flow field structure, droplet evaporation and combustion characteristics. The structure of cyclone flow field can be divided into three parts: the central recirculation zone and two kinds of helical vortex, which structure is affected by swirl number. With the increase of swirl number, the inner vortex becomes stronger, while the outer vortex becomes weaker. With the help of swirl, the oil droplets spread outward, evaporate more quickly and mix with air more efficiently, leading to higher fuel concentration in upstream and higher combustion efficiency. With the increase of Reynolds number, the central recirculation zone increases gradually and the length of flame becomes shorter. **Key words:** swirl-stabilized spray combustion, swirl number, central recirculation zone, helical vortex, numerical simulation

风力机叶片前缘单排孔射流成膜特性研究 = **Study on the Film Forming Characteristics of Single Row Jet Holes on the Leading Edge of Wind Turbine Blade** [刊 汉] YU Jing-mei, LIU Pan-pan, MENG Fan-dan (Liaoning Technology University, Mechanical Engineering, Fuxin, Liaoning, China, Post Code: 123000) CHEN Cheng (Yanshan Lake Power Generation Co. Ltd, Chaoyang, China, post code: 122000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(2). -252-258