

花瓣稳燃器流场的数值模拟与特性分析

赵伶俐, 周强泰, 赵长遂

(东南大学 动力系 洁净煤发电及燃烧技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘 要:建立了三维(360°)贴体坐标及复杂曲面几何计算模型;数值模拟了花瓣稳燃器的流场;理论分析了花瓣稳燃器的流场特性及掺混特性,研究了花瓣稳燃器的稳燃原理。花瓣稳燃器的设计使得风粉气流与回流烟气的热混合边界增长;除中心回流区外在每个花瓣后面都形成一个径向回流区,与中心回流区融合在一起,引导煤粉气流与高温烟气对流混合,提高了二者的热质交换强度,延长了煤粉在回流区内的循环时间,为煤粉颗粒的着火燃烧提供了稳定热源,有利于煤粉特别是低挥发分煤及低负荷的着火与燃尽。本文工作为花瓣稳燃器的优化设计提供了理论依据。

关 键 词:花瓣稳燃器;数值模拟;稳燃;流场特性

中图分类号:TK223.23 文献标识码:A

1 引 言

花瓣稳燃器是根据第四类稳燃技术设计的一种新型的旋流燃烧器稳燃装置^[1~3]。以其特殊的几何形状,形成特殊的流场,存在多种回流区。除中心回流区外,能在每个花瓣瓣后形成一个径向和两个轴向回流区,这些回流区与中心回流区融合在一起,不但能使煤粉颗粒迅速地与高温烟气混合,还能使煤粉颗粒与高温烟气的热质交换不再只是边界层上的湍流脉动,而是宏观的对流混合。

对花瓣燃烧器的流场区分为:花瓣稳燃器的流场和花瓣燃烧器的流场。前者燃烧器只有一次风投入;后者一、二次风同时投入。文中通过数值模拟的方法,主要研究花瓣稳燃器的流场特性。

2 几何模型

讨论的花瓣稳燃器是针对用于某厂贫煤锅炉花瓣燃烧器(见图 1)的设计^[2],该花瓣稳燃器花瓣瓣数为 6,计算的一次风速(一次风道内)为 16 m/s,中心风速为零。

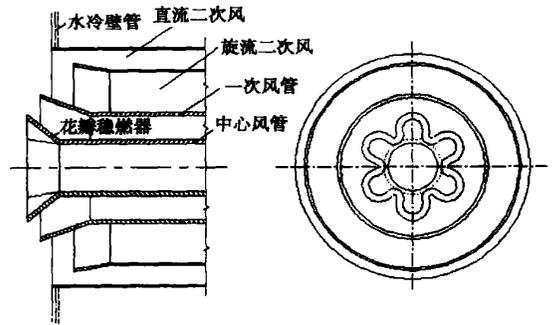


图 1 花瓣燃烧器(PSB)喷嘴局部放大图

3 物理模型

3.1 数学模型

湍流模型采用重正化群 RNG (Renormalization Group) 的 $k-\epsilon$ 模型。RNG $k-\epsilon$ 模型是对标准 $k-\epsilon$ 双方程模型的修正。计算与应用结果表明 RNG $k-\epsilon$ 方程优于标准 $k-\epsilon$ 方程。RNG $k-\epsilon$ 方程与标准 $k-\epsilon$ 方程有相似形式,计算量不增加,程序修改方便^[3]。RNG $k-\epsilon$ 方程的湍流动能和耗散方程分别为:

$$u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = G_k - \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (1)$$

$$u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = C_1 \frac{\epsilon}{k} G_k - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \quad (2)$$

3.2 边界条件

在流场计算中,进口边界条件一般由来流参数给定,来流的流量和进口的尺寸确定后,则确定入口速度。对于应用 $k-\epsilon$ 方程求解的边界条件, k 和 ϵ 的确定可以根据湍流度 I 和水利直径 D_H 来加以定义^[4]。

3.3 计算方法

花瓣燃烧器的几何设计形状复杂,存在多个三维渐变曲面,故网格生成难度较大。根据花瓣燃烧

器的设计,建立花瓣燃烧器计算域的三维(360°)贴体网格。网格生成采用结构化网格,绝大多数的网格满足流体流动方向垂直网格边界进入微元体的要求,从而能减少数值的伪扩散。

选取SIMPLE求解方法^[5],对花瓣燃烧器模型进行求解。

4 数值模拟结果

数据处理后,瓣峰剖面上轴向流场和压力场分布示于图2和图3。

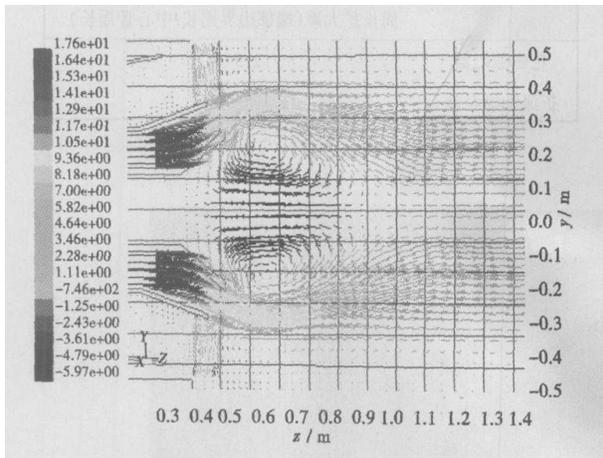


图2 花瓣稳燃器瓣峰剖面速度矢量图

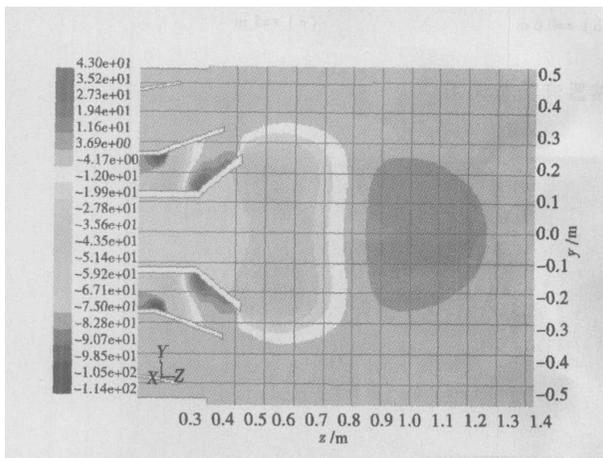


图3 花瓣稳燃器瓣峰剖面压力分布图

计算所采用的三维坐标系,以燃烧器中心线为Z轴,沿气流方向为正向;上、下方向的Y轴穿过花瓣的瓣峰,左右方向的X轴穿过花瓣的瓣谷。在计算模型中,燃烧器壳体的长度取为300 mm,故坐标 $z=0.3$ m处与炉墙壁面齐平。在数据处理中,速度场、压力场等分布图左边坐标数值的单位分别为m/s、Pa。

5 花瓣稳燃器流场特性分析

5.1 花瓣稳燃器的流场特点

花瓣稳燃器与普通扩流锥稳燃器的流场不同,在每个花瓣的后面都会形成较低的静压和一个二次环流,并由此而产生大尺度的径向涡。因此,除中心回流区外,在每个花瓣的后面都存在一个径向回流区。由图2和图3可以清楚看出瓣后的径向回流区和负压区。该径向回流区与中心回流区融合在一起,引导煤粉气流与高温烟气对流混合,相互穿透渗入,从而提高了二者的热质交换强度。

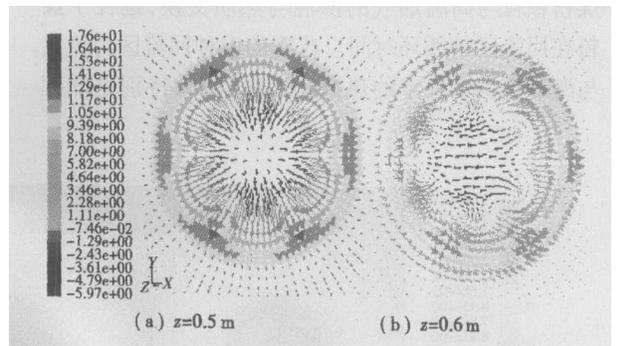


图4 花瓣稳燃器瓣后的径向回流区

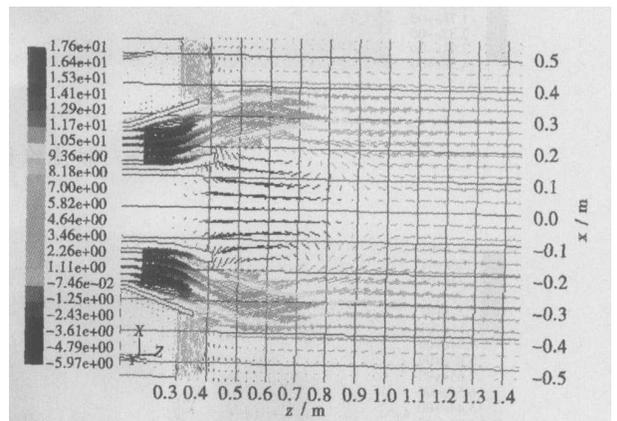


图5 花瓣稳燃器瓣谷剖面速度矢量图

图4示出了花瓣稳燃器气流出口处XY平面的流场,可以明显看出每个花瓣背流面的径向回流区的形状。花瓣的瓣数有几个就有几个径向回流区,本计算的花瓣瓣数为6,则有6个径向回流区。在径向回流区内,径向回流区流体的流动方向与来流方向垂直,使回流流体与一次风粉气流之间的混合形式不只是传统燃烧器双向流体平行流动时剪切层边界上的湍流脉动,而是垂直对流交换,该交换速度是湍流脉动速度的10~100倍,卷吸量大,增加了热

质交换强度,使得煤粉颗粒一进入炉膛即能快速进入瓣后的回流区,与高温烟气迅速混合。

在瓣谷区,流场分布如图 5 所示。花瓣稳燃器瓣谷近似于平直出口,风粉气流只外扩很小的角度就直接进入回流区中。

由此可见,当煤粉气流流经花瓣稳燃器时,一部分煤粉气流可以从瓣谷直接进入中心回流区与高温烟气接触。而其它煤粉气流流经瓣峰时又有一部分进入瓣后的径向回流区,煤粉气流与高温烟气剧烈混合,煤粉颗粒在其中着火燃烧反复循环。花瓣的特殊形状大大增加了进入回流区的煤粉量,增强了煤粉颗粒与高温烟气的掺混与热质交换,延长了煤粉在回流区的循环时间。花瓣的多种回流区为着火与燃烧提供了稳定的热源,有利于煤粉特别是低挥发分煤及低负荷时的着火、稳燃与燃尽。

5.2 花瓣稳燃器的热混合边界

花瓣稳燃器的另一大特点是它的特殊设计使得风粉气流与回流热烟气混合边界长。表 1 列出了花瓣稳燃器和普通扩流锥稳燃器在扩角相同的情况下周长扩大率的比较。花瓣稳燃器的周界可达扩流锥稳燃器的 2~3 倍。说明高温回流烟气与风粉气流之间的接触边界很大,有利于两者之间的热质交换,故一次风粉气流升温快,着火早。

表 1 花瓣稳燃器及扩流锥的周长扩大率

周长扩大率(端部边界周长/中心管周长)	
花瓣稳燃器	2.5~4
扩流锥稳燃器	1.5~1.6

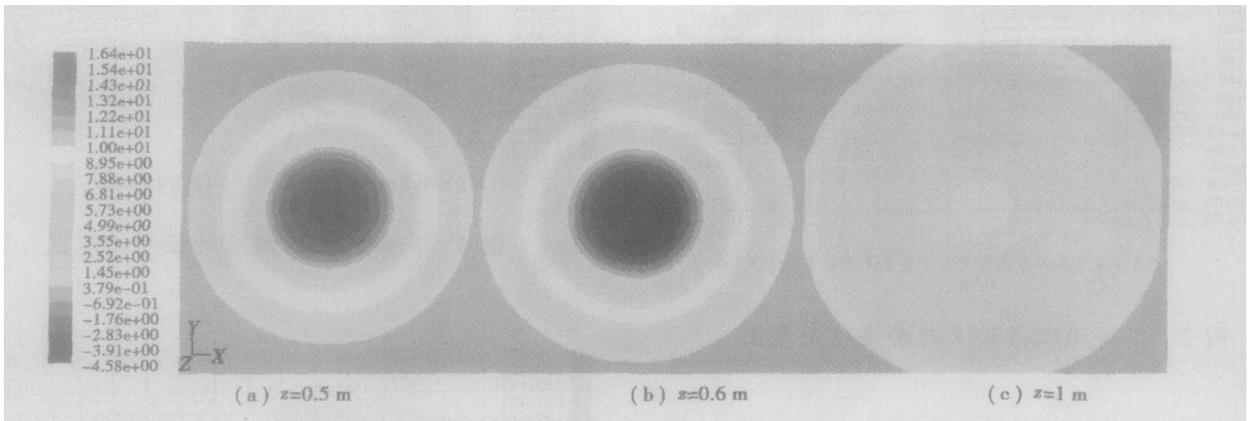


图 6 扩流锥稳燃器流场截面图

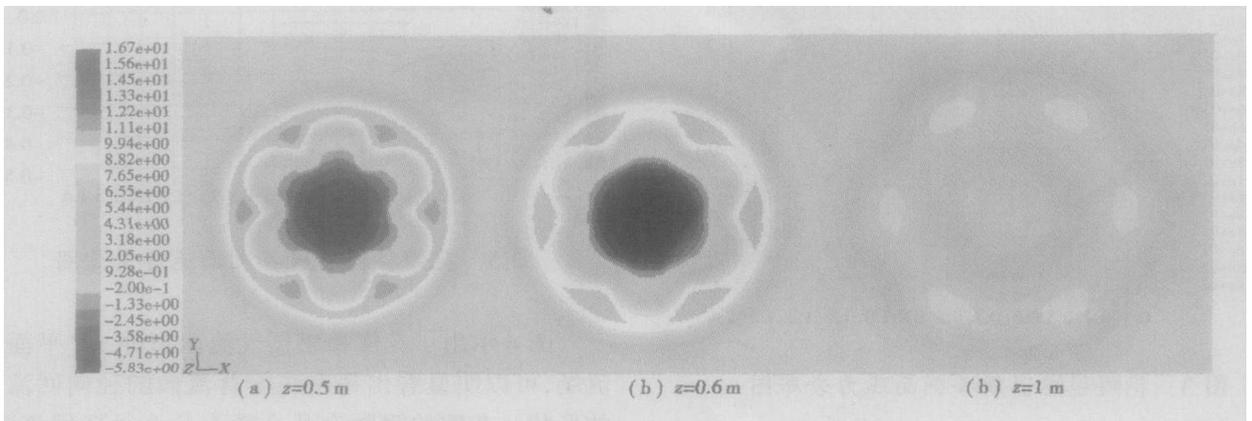


图 7 花瓣稳燃器流场截面图

风粉气流流经花瓣稳燃器进入炉膛后,风粉气流内边界受花瓣轮廓的影响也带花瓣状,并在相当距离范围内保持这种特性,其回流区呈花瓣形。图 6 和图 7 比较了普通扩流锥流场和花瓣流场在炉膛

内的渐变过程。由图看出,对于花瓣稳燃器,风粉气流流经花瓣后开始呈完整的花瓣状,并逐渐外扩;当回流区闭合后,在距离喷口 1 m 左右气流仍呈花瓣

(下转第 274 页)

用开始减弱。

5 结 论

通过对扩散式旋风分离器内两相流动特性的数值模拟,得到了连续相速度分布、颗粒相分离效率等一系列结果。模拟结果表明:

(1) 分离器内总体上呈内升外降的双层流动结构。在反射屏内轴向、径向、切向速度都比较小,有利于颗粒的分离和防止颗粒的卷起。径向速度总体上比轴向和切向速度小很多。

(2) 从截面上的轴向、径向和切向速度的分布图看,总体上都呈现较好的对称性,只是径向速度在某些部位稍有差异。矢量图显示排气管入口处有短路流。

(3) 对 $4 \mu\text{m}$ 以下的颗粒,分离效率不太理想。颗粒浓度对分离效率的影响不大,而气流速度的影响相对要复杂。

(4) 反射屏的存在对 $10 \mu\text{m}$ 以下的颗粒分级分离效率影响明显,对 $10 \mu\text{m}$ 以上的颗粒其作用相对较弱;同时反射屏能使 $3 \sim 9 \mu\text{m}$ 的颗粒在分离器内长时间停留从而增大被分离下来的机会,大约超过 $8 \mu\text{m}$ 时反射屏的影响开始减弱。

以上只是一些初步的认识和结论,关于反射屏

的作用,还有很多方面值得深究,比如对压损和分离器磨损的影响,锥顶开孔大小与锥体角度以及环隙对流场结构和分离效率的作用,能否通过改变反射屏结构来达到降阻减磨的效果等等,这些都有待后续工作的深入探讨。

参考文献:

- [1] 岑可法,倪明江,严建华,等.气固分离理论及技术[M].杭州:浙江大学出版社,1999.
- [2] 陈由旺,吴学安,陈明,等.方形扩散式旋风分离器的实验研究[J].电站系统工程,2003,19(4):251-253.
- [3] 冷碧霞,吴学安.新型扩散式气固分离器 PDA 的实验研究[J].动力工程,2003,23(3):2458-2460.
- [4] 金国森.除尘设备[M].北京:化学工业出版社,2002.
- [5] 王福军.计算流体动力学分析-CFD 软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [6] FLUENT INC. FLUENT user's guide[M]. Lebanon: Fluent Inc, 2003.
- [7] 鲁丁格 G. 气体-颗粒流基础[M].北京:国防工业出版社,1986.
- [8] 周强,程乐鸣,张仲决,等.方形卧式分离器两相流场的数值模拟[J].动力工程,2004(4):567-571.
- [9] MORSI S A, ALEXANDER A J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems[J]. *Fluid Mech*, 1972, 55(2): 193-208.
- [10] 周力行.湍流两相流动与燃烧数值模拟[M].北京:清华大学出版社,1991.

(渠源 编辑)

(上接第 266 页)

形状,甚至在 2 m 左右时仍略带花瓣结构。

花瓣稳燃器的风粉气流与热烟气的混合周界一直保持着花瓣状曲线型,随着气流的扩散,混合周界也向外逐渐扩展。高温回流烟气与低温风粉气流在炉内形成曲线形的热边界,使得二者接触周界长,有利于煤粉气流的加热与混合,对低挥发分煤煤粉气流的快速升温、迅速着火、稳定燃烧起到促进作用。

该花瓣稳燃器在某厂 210 MW 贫煤锅炉中经过长时间试验,对低挥发分煤的适应性强,点火迅速,稳燃效果良好;能在 $55\% \sim 100\%$ 负荷范围内稳定燃烧挥发分为 $V_{\text{daf}} = 12\% \sim 18\%$ 的贫煤。花瓣稳燃器在电厂运行近两年时间,未发现任何明显磨损现象。工业试验结果表明,该计算结果可靠,轴心温度分布测量结果与计算吻合良好。

6 结 论

(1) 应用 RNG $k-\epsilon$ 模型,对花瓣稳燃器建立了复杂几何模型的三维 (360°) 流场计算模型,网格划分采用三维贴体坐标结构化网格模型,实现了复杂

曲面模型的三维数值计算。

(2) 对花瓣稳燃器流场的数值计算结果从流场特点及混合边界两个方面进行了详细的理论分析。分析结果表明花瓣稳燃器所形成的特殊流场具有良好的稳燃效果,有利于低挥发分煤的着火与燃尽,计算结果对工程设计及应用有十分重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 周强泰,赵伶玲.旋流燃烧器的花瓣稳燃器[P].中国专利:CN 200410041107.7,2004-06-29.
- [2] 赵伶玲.花瓣燃烧器的稳燃性能与应用研究[D].南京:东南大学,2005.
- [3] EASTWICK C N, PICKERING S J, AROUSSI A. Comparisons of two commercial computational fluid dynamics codes in modeling pulverized coal combustion for a 2.5 MW burner[J]. *Applied Mathematical Modeling*, 1999, 23: 437-446.
- [4] 谭辉平,赵坚行.煤粉锅炉旋流燃烧器的气动热力学性能数值分析[J].南京航空航天大学学报,2001,33:82-85.
- [5] FLUENT INC. FLUENT user's guide volume 3[M]. Lebanon: Fluent Inc, 2001.

(渠源 编辑)

lege of Technology, Harbin, China, Post Code: 150040)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(3). — 259 ~ 263

A full three-dimensional non-steady numerical simulation method was employed to solve the parameters of the flow field of a small-sized fan under the condition of a square-wave type total-pressure distortion at the inlet single-distortion zone. The effect of the total-pressure distortion on the parameters of the flow field of the fan has been analyzed in detail. Moreover, from the standpoint of amplitude and frequency analysis discussed are the phenomena of attenuation of total-pressure distortion via the fan and the interference between stator blades and moving ones. The calculation and analysis results indicate that the method under discussion can clearly depict the distribution of flow field parameters along the circumferential direction. The total-pressure distortion at the inlet along the circumferential direction may cause a redistribution of the inlet parameters, resulting in a marked circumferential lateral-flow at the boundary of high and low pressure areas and triggering a total-temperature distortion, which took place simultaneously with an attenuation via the fan. In addition, when the distortion degree at the inlet is identical, with an increasing distortion angle, the distortion disturbance and the interference between stator blades and moving ones will undergo a marked intensification. **Key words:** non-steady numerical simulation, fan, total-pressure distortion

花瓣稳燃器流场的数值模拟与特性分析 = Numerical Simulation and Characteristic Analysis of the Flow Fields in a Petal-shaped Combustion Stabilizer [刊, 汉] / ZHAO Ling-ling, ZHOU Qiang-tai, ZHAO Chang-sui (Power Engineering Department, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(3). — 264 ~ 266, 274

A calculation model of three-dimensional (360°) curvilinear coordinates and complex curved-surface geometry has been set up to conduct the numerical simulation of the flow-field of a petal-shaped combustion stabilizer along with a theoretical analysis of the flow field characteristics and mixing-dilution ones of the stabilizer. The operating principle of the latter's combustion stabilization has been studied. The specific design of the petal-shaped combustion stabilizers has made it possible to lengthen the thermal mixing boundary between "air"-"pulverized-coal"-"gas-flow" and flue gas return-flow. Apart from a central return-flow zone, a radial return-flow zone has been formed behind each petal to fuse with the central return-flow zone. By introducing a convection mixing of pulverized-coal gas flow with high-temperature flue gas flow, the heat-mass exchange strength of both flows was enhanced, and the circulation time of the pulverized-coal in the return zone prolonged, thus providing a stable heat source for the ignition and burning of pulverized-coal particles. This will be conducive to the ignition and burning-off of the pulverized-coal, especially for low-volatile coal and in case of operation at a low load. The research results of the authors can provide a theoretical basis for the optimized design of petal-shaped combustion stabilizers. **Key words:** petal-shaped combustion stabilizer, numerical simulation, stable combustion, flow field characteristics

可吸入颗粒粒径声学夹带法测量的实验研究 = Experimental Study of the Measurement of Inhalable Particle Diameter by the Use of an Acoustic Entrainment Method [刊, 汉] / YAO Gang, ZHAO Bing, YANG Lin-jun, et al (Education Ministry Key Laboratory of Coal Clean Combustion under the Southeast University, Nanjing, Jiangsu, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(3). — 267 ~ 269

To date, the measurement of a single particle with a diameter of about $1\ \mu\text{m}$ is still a technically intractable problem. A new approach is proposed for the measurement of micron grade and sub-micron grade single particle size by the use of acoustic wave entrainment. This approach makes full use of the dynamic characteristics of the two-dimensional force field composed of the horizontal vibration and gravity-free sedimentation of a single particle at the pressure node location in a standing-wave acoustic field. Through an analysis the relationship between a fine particle size and the particle vibration in