

# 近流线数值计算方法在四角切圆燃烧炉膛中的应用

(哈尔滨工业大学) 张 泽 吴少华 秦裕琨

**摘 要:** 采用独立开发的组合坐标网格体系、强非均匀的交错网格划分及交错计算的数值计算方法, 对具有复杂结构的燃烧器喷嘴及其四角射流切圆燃烧的大型锅炉炉膛的三维流场特性进行了详细计算, 较好地解决了在所有计算区域由于合速度方向与网格线方向之间有较大夹角而产生的伪扩散问题, 同时与工业性试验的结果相对照, 证明了该数值模拟方法可以较准确地反映实际炉内燃烧区域的流场特征, 较好地实现了近流线的数值计算。

**关键词:** 数值模拟; 伪扩散; 近流线方法;  
四角切圆燃烧

中图分类号: TK224. 11

文献标识码: A

## 1 前言

在采用四角切圆燃烧的锅炉炉膛中, 对燃烧区域的空气动力场进行数值模拟计算时, 当流动方向与网格线成一倾斜角, 并在与流动方向相垂直的方向上存在非零的因变量梯度时, 绝大多数的离散化格式都会或多或少地产生数值伪扩散<sup>[1]</sup>现象。这种在数值计算中产生的伪扩散严重地影响了炉内流场计算结果的准确性, 成了在炉内流动、燃烧等领域的数值计算中关心的焦点。

目前许多学者对流动过程中出现的伪扩散现象进行了深入的研究, 认为产生伪扩散的根本原因在于将流过每一控制容积面的多维流动处理成局部的一维流动而造成<sup>[1]</sup>。De Vahl Davis 和 Mallinson 曾针对二维流动中在垂直于流速方向上的伪扩散, 给出了估计伪扩散系数的一个近似表达式<sup>[1]</sup>:

$$\Gamma_f = \frac{\rho U \Delta x \Delta y \sin 2\theta}{4(\Delta x \cos^3 \theta + \Delta y \sin^3 \theta)} \quad (1)$$

式中  $\Gamma_f$  是伪扩散系数,  $U$  合速度,  $\theta$  为合速度向量与网格线方向之间的夹角(在  $0^\circ \sim 90^\circ$  之间)。由上式可知, 当合流动方向与网格线相平行或重合时, 不存在伪扩散, 当合流动方向与网格线方向之间的夹角为  $45^\circ$  时,  $\Gamma_f$  值最大, 伪扩散最为严重。

对于四角切圆燃烧锅炉的炉内流场, 由于一般的假想切圆直径与炉膛的当量直径之比都不大于 0. 1, 这样, 在炉膛中采用笛卡尔直角坐标系, 网格线与壁面平行布置, 则燃烧器喷嘴出口射流轴线与网格线之间的夹角即在  $45^\circ$  左右, 因而极大地夸大了射流在燃烧器出口附近的伪扩散现象, 进而导致在整个计算流场中的计算结果的不正确性。

目前针对该问题提出了几个改进方案, 从改进差分格式的精确性入手的, 有 Raithby 提出的斜迎风格式<sup>[2]</sup>、Leonard 提出的 QUICK 格式<sup>[2]</sup>、周向阳提出的“27 点格式”<sup>[3]</sup>、任安禄等采用的中心差分流向平衡粘性方法克服流动方向与网格线夹角过大而引起的伪扩散<sup>[4]</sup>等; 从改进计算的网格体系入手的, 刘向军提出了任意平行四边形网格及流场计算的 ALE 算法<sup>[5]</sup>、朱彤提出的与壁面成  $45^\circ$  夹角的网格划分方法<sup>[6]</sup>等。这些方法都对减小四角切圆燃烧锅炉的炉内流场计算中的伪扩散现象取得了一定的效果。

本文针对四角切圆燃烧炉内流场的流动特征, 采用从改进网格划分的体系入手, 为了有效地防止所有计算区域的伪扩散, 并且方便地模拟大型四角切圆煤粉燃烧锅炉的大切角和复杂的角部喷嘴结构, 独立开发了一套近流线的数值计算程序, 该程序采用组合坐标网格体系、强非均匀性交错网格划分和交错计算的流场数值模拟方法, 该方法可以较好地保证合速度方向与网格线方向的夹角在较小的范围之内及模拟角部复杂的燃烧器喷嘴结构, 结合对一台 300 MW 贫煤燃烧锅炉进行的工业性冷态空气动力场试验, 采用该程序对该炉的炉内燃烧区域的空气动力场进行了详细的数值模拟计算, 并与试验结果相比较。

## 2 数值模拟方法

由于伪扩散产生的原因很大程度上在于流动方向与网格线成一倾斜角, 故若能采用一种与流动方向较一致的网格体系, 则能有效地减小伪扩散的影

收稿日期: 1999-04-26; 修订日期: 1999-06-09

作者简介: 张 泽(1969-), 男, 重庆璧山人, 博士生, 主要从事煤粉炉内流动及燃烧的研究。通讯处: 150001 哈尔滨工业大学热能工程教研室

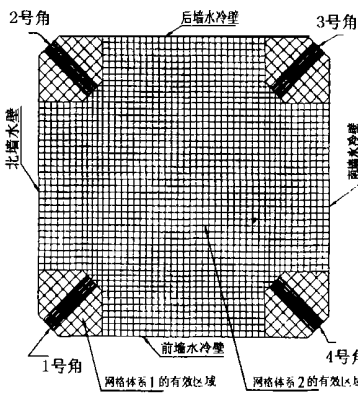


图 1 计算有效主网格点示意图

响。针对四角切圆燃烧的炉内流场特性,本计算方法根据坐标组合法的原理<sup>[2]</sup>,结合炉内四角射流的流动特性,提出了组合坐标网格体系。对于炉内流场,该方法的计算网格由两套网格体系组成(见图1),即在四个角部燃烧器喷嘴出口附近区域(称区域1)采用与壁面成45°夹角的网格划分(称网格体系1),和在其它区域(称区域2)采用与壁面平行的网格划分(称网格体系2)。但这两套网格都覆盖整个计算区域,且相互重叠。对于炉内计算的三维网格,保证在沿炉膛高度方向的网格间距相同。而在计算中设定的两个区域的交界处,即是在流场的水平截面上根据网格1计算的合速度方向与网格线方向的夹角最小而选定,以实现近流线的数值模拟,这样即可较好地减小整个流场计算区域中的伪扩散现象。

根据炉内四角射流的特点,首先采用网格体系1对整个流场进行计算,然后根据其计算结果,仅保留区域1的数据为有效数据,而在两个区域交界处,通过插值的方法,将网格体系1在两区域交界处的计算结果再经坐标变换而传递到网格体系2上,作为网格体系2计算的边界条件,进行流场在网格体系2下的计算。这样,流场在两个网格体系间进行交错计算,在两个区域交界处进行数据传递。

该计算模型采用湍流  $k-\epsilon$  双方程模型,其守恒方程的通用形式在许多文献上都有描述,这里从略。计算过程采用 SIMPLE-C<sup>[2]</sup> 方法,幂函数差分格式,在每个网格体系中都采用交替方向的逐线,逐面 TDMA 方法。流场计算采用两套网格体系,最后计算的有效网格点见图1,角部燃烧器区域网格划分见图2。对整个三维燃烧区域流场共分了379120个网格,其中网格体系1分  $54 \times 54 \times 70$  个网格,网格体系2分  $50 \times 50 \times 70$  个网格,计算收敛判据见上所述。

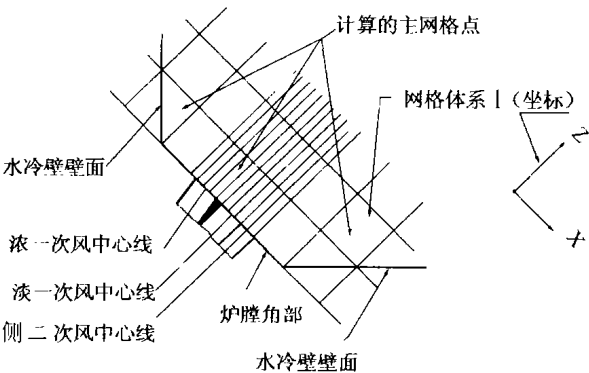


图 2 带水平浓淡风煤粉燃烧器的炉膛燃烧区域角部网格划分示意图

为了模拟大型四角切圆燃烧锅炉炉膛的大切角和复杂的角部喷嘴结构,同时在网格体系1中对四个角部燃烧器喷嘴出口区域采用了强非均匀的交错网格划分(见图1,2),并在计算迭代过程中辅以尽

量保证连续性的强压力修正和欠松弛等计算技巧,得到了良好的收敛性能(计算在两套网格中各自收敛,收敛判据为压力修正方程的最大源项和源项之和均小于  $1 \times 10^{-6}$ ,并且各节点前后两次解偏差的最大绝对值或相对偏差的最大绝对值小于  $1 \times 10^{-5}$ )。

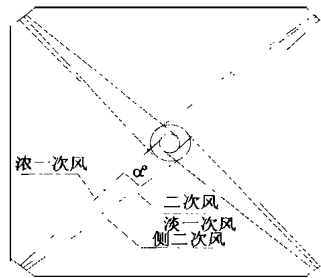


图 3 水平浓淡风煤粉燃烧系统示意图

量保证连续性的强压力修正和欠松弛等计算技巧,得到了良好的收敛性能(计算在两套网格中各自收敛,收敛判据为压力修正方程的最大源项和源项之和均小于  $1 \times 10^{-6}$ ,并且各节点前后两次解偏差的最大绝对值或相对偏差的最大绝对值小于  $1 \times 10^{-5}$ )。

本文数值模拟及工业性试验的对象是一台300MW四角切圆燃烧的贫煤锅炉,为SG-1025/18.3-M833型亚临界、中间再热、控制循环汽包炉。炉膛宽为11970mm,深为11760mm,四层(A、B、C、D)16只直流煤粉燃烧器分成上下两组,四角各角部宽为1202mm,煤粉燃烧器的一次风采用水平浓淡风喷嘴,该燃烧系统见图3。

该计算模型采用湍流  $k-\epsilon$  双方程模型,其守恒方程的通用形式在许多文献上都有描述,这里从略。计算过程采用 SIMPLE-C<sup>[2]</sup> 方法,幂函数差分格式,在每个网格体系中都采用交替方向的逐线,逐面 TDMA 方法。流场计算采用两套网格体系,最后计算的有效网格点见图1,角部燃烧器区域网格划分见图2。对整个三维燃烧区域流场共分了379120个网格,其中网格体系1分  $54 \times 54 \times 70$  个网格,网格体系2分  $50 \times 50 \times 70$  个网格,计算收敛判据见上所述。

### 3 数值模拟及工业性试验结果

根据在上述的300MW四角切圆煤粉锅炉中进行的冷态空气动力场试验,和采用近流线的数值计算方法对该炉进行的数值模拟,在流场计算的结果中,我们选取了一层(D层)带水平浓淡风煤粉喷嘴的四角切圆燃烧流场,并与同层的工业性试验<sup>[7]</sup>结果进行比较,数值模拟计算的所有入口条件皆来源于工业性试验中的现场实测数据。

图4为该层水平截面上的  $UW$  矢量图,结合图1可以看出,在每个计算网格点上的水平截面上合速度的方向基本与网格线方向平行,避免了由于流动方向与网格线成一较大夹角而产生的伪扩散。同时,从图中可以发现,由于实际各喷嘴出口射流的速度不一致,导致了靠后墙侧气流的速度高于其它三侧,并且切圆中心稍偏向前墙。

图5为D层3号角水平浓淡风喷嘴出口射流在流场中的轴向速度分布图,  $U$  代表沿喷嘴设计的假想射流轴线方向的速度分量,  $L$  为距喷嘴出口的距离,  $d$  为喷嘴出口的定性尺寸,横坐标与喷嘴出口平

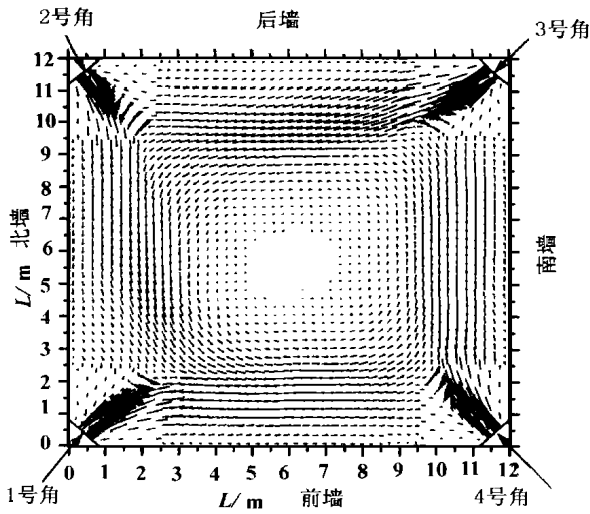


图 4 D 层一次风喷口截面速度矢量分布图

行, 0 点为喷嘴中心线位置。从图中可以看出, 计算结果和试验结果符合较好, 由于计算采用了强非均匀交错网格的划分 (见图 2), 并保证了在喷嘴出口附近的网格线方向与射流方向一致, 计算可反映出该射流在出口附近的分叉双峰结构及各种细致的流场特性, 在四角切圆的流场中, 射流在距喷嘴  $2d$  时, 浓淡射流已经完全混合, 并已经偏向背火侧, 射流的衰减、偏斜等都与试验较好地吻合。

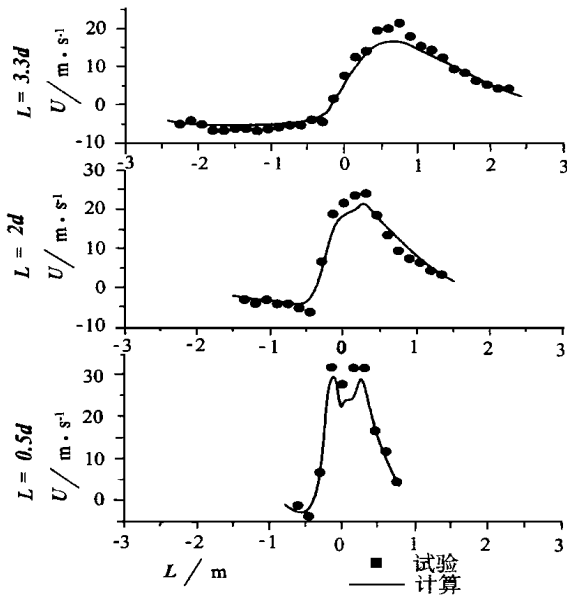


图 5 四角切圆炉内流场中水平浓淡风射流轴向速度分布图

图 6 是该层水平截面上的炉膛十字中心线上的切向速度分布图, 在炉内的试验中发现, 由于炉膛相对于其它 300 MW 锅炉偏小, 并且由于实际的四角配风偏差等原因, 导致了炉内实际切圆较大, 并发现

靠后墙侧的切向速度较大, 这一切都在数值模拟的结果中得到了较好的体现。从图中也可以发现, 在后墙处的计算结果与试验结果的偏差大于其它位置, 主要表现在最大切向速度点的位置偏差, 但在其它方面计算结果与试验结果吻合得相当好。

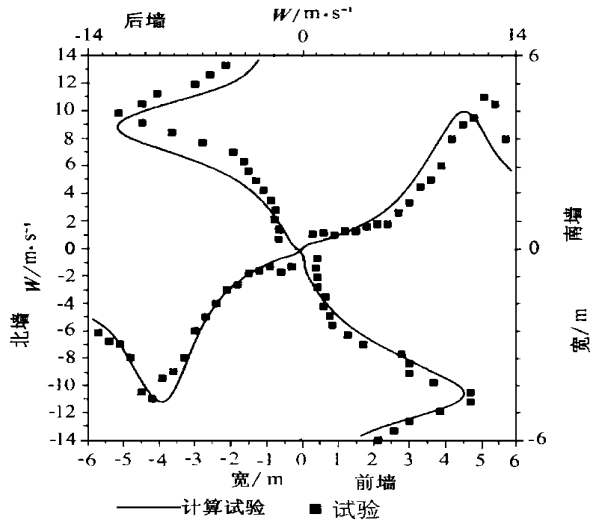


图 6 炉膛十字中心线上的切向速度分布图

### 4 结论

(1) 本数值模拟, 采用了组合坐标网格体系及交错计算的方法, 较好地解决了四角切圆燃烧流场中, 由于合速度方向与网格线方向之间较大夹角而产生的伪扩散问题, 较好地实现了近流线的数值模拟计算。

(2) 在四角切圆燃烧流场中, 采用了强非均匀的交错网格划分及计算技巧, 可以较细致地分析各种复杂结构的燃烧器射流出口的流场特性。

(3) 从工业性试验与数值模拟的结果可见, 该数值模拟较好地反映了实际炉内燃烧区域的流场特性, 在燃烧器的工程应用及研究方面具有较高的实用价值。

### 参考文献

- [1] Patankar S V. 传热与流体流动的数值计算. 张 政译. 北京: 科学出版社, 1984.
- [2] 陶文铨. 数值传热学. 西安交通大学出版社, 1988.
- [3] 周向阳. 燃烧过程及其污染物生成的数学模化和实际应用. 华中理工大学博士论文, 1996
- [4] 任安禄等. 复杂回旋流场的数值模拟和实验研究. 空气动力学学报, 1994, 12(2): 178 ~ 184.
- [5] 刘向军. 四角切向燃烧煤粉锅炉炉内燃烧过程的数值模拟. 清华大学博士论文, 1997
- [6] 朱 彤等. 切向燃烧炉膛中网格划分方法对数值模拟的影响. 哈尔滨工业大学学报, 1997, 29, (5): 59 ~ 61
- [7] 哈尔滨工业大学, 山东工业大学, 青岛发电厂. 青岛发电厂 300 MW 机组 2 号炉改造冷态空气动力场试验报告, 1998. 10.

(复 编)

continuous on-line soot blowing. It can reduce the flue gas resistance by 100 - 400 Pa and lower the exhaust gas temperature by 5 ~ 10 °C. In addition to achieving significant economic benefits, the above unit enjoys a high potential for wide engineering applications. **Key words:** soot blowing, pulsed gas, air heater, computer-based monitoring

船用主锅炉的改进设计 = **Marine Main Boiler Improved Design** [刊, 中]/Chen Qinglong (Harbin No. 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2000, 15(1). - 41 ~ 42

A brief description is given of the marine main boilers currently manufactured in the People's Republic of China. Based on the analysis of some difficult issues involved in an improved design the author has proposed a new design scheme for academic discussion. **Key words:** marine main boiler, improved design, scheme

在不同工况下 300 MW 锅炉过热器, 再热器的特性试验研究 = **Experimental Study of the Boiler Superheater and Reheater Characteristics of a 300 MW Unit under Various Operating Conditions** [刊, 中]/Xin Zhiming, Wu Luchen, Liu Hengyu (Harbin Boiler Co. Ltd.), et al // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2000, 15(1). - 43 ~ 46

Through the tests of a boiler under steady and dynamic operating conditions a comprehensive analysis is conducted of the wall temperature profiles of a superheater and reheater at various operating conditions. The suggestions given in the present paper can be helpful for solving overheating problems of the superheater and reheater. **Key words:** superheater, reheater, wall temperature characteristics

近流线数值计算方法在四角切圆燃烧炉膛中的应用 = **Application of Quasi-streamline Numerical Simulation Method for a Boiler Furnace with Tangential Firing** [刊, 中]/Zhang Ze, Wu Shaohua, Qin Yukun (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2000, 15(1). - 47 ~ 49

A numerical simulation method incorporating a composite coordinates grid system, strong non-uniform staggered grid arrangement and a staggered calculation mode was described in this paper. This method has been employed for the first time to perform a detailed computation of the three-dimensional flow field characteristics of a large-sized boiler furnace. The latter features a tangential firing mode with the use of burner nozzles of a sophisticated construction. Because of this, the false diffusion problem in the calculation domain caused by a relatively large included angle between a resultant speed direction and grid line one has been solved relatively well. Furthermore, a comparison with industrial test results shows that the numerical simulation method can quite accurately reflect the flow field characteristics in a boiler furnace combustion zone. A quasi-streamline numerical simulation is thus effectively realized. **Key words:** numerical simulation, false diffusion, quasi-streamline method, tangential firing

链条炉排的分层模型 = **Zoned Model for a Chain Grate** [刊, 中]/Zhu Jinrong (Nanjing Electrical Power Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2000, 15(1). - 50 ~ 51

After the establishment of a mathematical zoned model for a chain grate some turbulence simulation tests were conducted. The test results were in full agreement with theoretical ones. The model can reflect the effect of air distribution on combustion results. **Key words:** boiler, chain grate, air distribution on a zone-by-zone basis, mathematical model

空冷塔内外流场的数值分析 = **Numerical Analysis of the Inner and Outer Flow Field of an Air-cooling Tower** [刊, 中]/Zhang Xiaodong, Zheng Yonggang, Wang Qingzhao (North China Electrical Power University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2000, 15(1). - 52 ~ 54

With the use of a numerical simulation method the performance of a natural draft air-cooling tower working in a cross-wind has been investigated. By consulting the Heller type air-cooling system employed at Fengzhen Power Plant in Inner Mongolia an analysis was conducted of a specific calculation example. The analytical calculation results bring forth a perfor-