

## 外循环式高固气比分解炉气相流场的数值模拟

陈延信<sup>1,2</sup>, 施寿芬<sup>1</sup>, 徐德龙<sup>1,2</sup>

(1. 西安建筑科技大学粉体工程研究所, 陕西 西安 710055;

2. 西部建筑科技国家重点实验室(筹), 陕西 西安 710055)

**摘 要:**外循环式分解炉是一种新型的反应器,主要用于新型干法水泥生产工艺。理论计算表明该炉型具有更稳定的热工性能和更高的出炉物料表观分解率。采用带旋流修正的  $k-\epsilon$  双方程模型对外循环式分解炉内的气相湍流流场进行了数值模拟。分析了该分解炉内的气流流线特征和不同截面的压力分布和气流速度情况。结果表明:受三次风偏心进入的作用,气流在分解炉下部形成较为强烈的返混和旋流效应,进入分解炉上部后趋于稳定。流体进入旋流分离器后,形成稳定的下行旋转流动,接近出口时,受流动空间缩小的影响,流体加速流出分解炉。以上结果验证了该分解炉设计合理,为煤粉在炉内的燃烧、碳酸盐的分解提供了较好的流场。

**关键词:**分解炉;气相湍流; $k-\epsilon$  模型;数值模拟

**中图分类号:** TU522.064

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2011)01-0048-05

分解炉是新型干法水泥生产技术的核心设备之一。其功能是在悬浮态下完成煤粉燃烧与碳酸钙分解反应。一个设计合理的新型干法水泥熟料烧成生产线,分解炉承担了 60% 左右的煤粉燃烧量,入窑物料的碳酸钙表观分解率应高于 95%。大量的研究表明了炉内煤粉的燃烧效率、生料分解率与炉内气相流动规律密切相关,即炉内煤粉和生料分布是否均匀、生料在炉内的停留时间与炉内气相流场、温度场等状况有重要关系。西安建筑科技大学通过理论计算表明增加分解炉的物料循环量,有助于提高碳酸钙的表观分解率,提高分解炉的热稳定性,还可适当降低分解炉的操作温度<sup>[1]</sup>,开展了冷态模型试验,在工业现场也有了成功的应用案例。因此,研究分解炉气相流动规律是对分解炉进行研究的基本工作。

冷态、热态模拟试验、热工标定是研究分解炉内流动规律的传统方法。这些方法所得结果有不同程度的参考价值,但受测试设备和测试方法的限制,这类方法很难获得炉内三维湍流流动问题的全部真实信息,且投资相对较大、周期也较长。随着计算机软硬件技术的发展,数值模拟方法已逐步得到这一领域内研究者的认可,尤其对于分解炉内气相流动的数值模拟,已经可以获得相当可靠的流场信息<sup>[2]</sup>。

本文采用带旋流修正的  $k-\epsilon$  双方程模型对西安建筑科技大学粉体工程研究所开发的外循环式高固气比分解炉进行内部气相流场的数值模拟,为这种新型分解炉的进一步优化设计提供参考<sup>[3-4]</sup>。

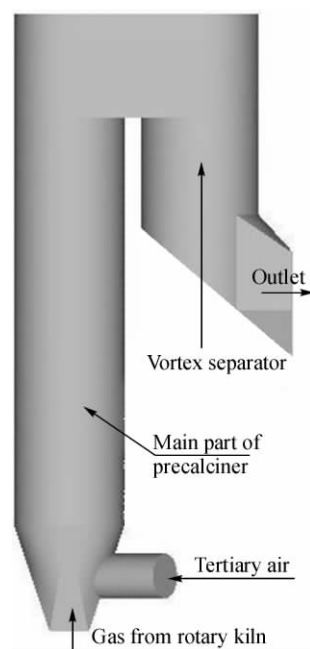


图 1 分解炉结构示意图

Fig. 1 Schematic of precalciner

收稿日期:2010-05-24 修改稿日期:2010-11-12

基金项目:陕西省重大科技创新资助项目(2010ZKC0117, 2010ZKC0507)

作者简介:陈延信(1974-),男,安徽庐江人,博士研究生,主要从事新型干法水泥工艺研究和难选铁矿石的资源化开发研究。

1 建立模型

1.1 几何模型

根据分解炉的内部结构建立的几何模型如图 1 所示. 模型建立过程中采用分解炉圆柱部分与下部锥体相交面的中心为直角坐标系的原点, 分解炉轴线为 Z 轴, 三次风进口切向进入锥体上部, 窑尾烟气从分解炉的底部进入; 生料进口、三次风口和两个煤粉进口的位置集中分布在分解炉下部扩张段与中部平直段相连的部位. 在分解炉顶部气流切向进入旋流分离器, 再从五边形出口流出, 进入旋风分离器.

1.2 数学模型

分解炉炉内的气体流动的基本形式为三维湍流, 其平均流可以视为稳态流. 分解炉内局部湍流流动过程是强旋和带有回流的. 基本控制方程表示如下<sup>[5]</sup>:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + s_\phi$$

(1)

微分方程组可以写成如下统一形式:

$$\frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\phi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\Gamma_\phi \frac{\partial\phi}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\Gamma_\phi \frac{\partial\phi}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\Gamma_\phi \frac{\partial\phi}{\partial z}\right] + s_\phi$$

(2)

上述方程左边为对流项, 右边前三项为扩散项, 最后一项  $s_\phi$  为源项. 其中  $\phi$  为因变量,  $\Gamma_\phi$  为扩散系数. 若设  $\phi = 1, \Gamma_\phi = 0$  为连续性方程; 若设  $\phi = u, v, w$ , 则分别表示为  $x, y, z$  方向的动量方程.

2 边界条件和数值方法

2.1 边界条件

分别定义分解炉烟气和三次风为速度进口、分解炉出口为压力出口, 在进口处给定速度、温度和湍流参数, 出口给定静压和湍流参数. 壁面函数选取无滑移标准壁面函数, 且假设壁面绝热.

边界上的湍流强度可以通过下式给出<sup>[6]</sup>:

$$I = \frac{u'}{u_{avg}} = 0.16(\text{Re}_{D_H})^{-\frac{1}{8}}$$

式中:  $D_H$  为近似等于入口段的特征尺寸.

烟气的温度 1 050℃、速度 28 m/s; 三次风的温度为 850℃、速度 30 m/s; 出口压力为 -600 Pa.

2.2 数值方法

分解炉网格的划分采用不同密度大小的非结构化四面体网格和结构化网格构成的混合网格. 动量方程的离散格式为二阶迎风格式, 离散方程组的压力和速度耦合采用 SIMPLE 算法, 方程求解采用 TDMA 的逐面迭代及低松弛因子, 同时采用标准壁面, 收敛标准取能量方程的余项小于  $10^{-6}$ , 其余各余项小于  $10^{-3}$ .

3 计算结果与分析

采用带旋流修正的 k-ε 模型模拟了分解炉内的三维湍流流场, 分别给出了分解炉内气流流线、压力场和速度场分布的情况.

3.1 解炉内气体流线的分布特征

图 2 给出了分解炉内气流流线分布的情况, 从图中可以看出: 高速的三次风进入分解炉后与从烟室上来的烟气在分解炉下部强烈混合, 在分解炉主体

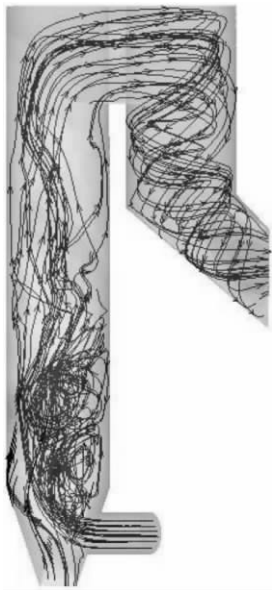


图 2 分解炉内气流  
流线分布图  
Fig. 2 Stream lines distribution  
in the precalciner

下部扩张段形成强的回流和旋转流,随着气流的上升,气流在分解炉主体的上部形成较为稳定的平推流,并切向进入旋流分离器,在旋流分离器内折流向下,形成规律性明显的旋转向下流动,至五边形出口流出。气流在炉内不同区域的不同流动形式,体现了在分解炉不同部位需要重点完成的功能的不同,在三次风入口的上部,正是待分解物料进入炉体,与下部喷入的煤粉强力混合,在助燃空气的共同作用下,实现煤粉大量燃烧、碳酸钙快速分解的目的,而分解炉下部流体强烈回流与旋流流动形式,将非常有利于物料的混合和煤粉的燃烧,避免局部煤粉颗粒集中燃烧造成局部高温,产生炉壁结皮的问题。随着反应的进行,物料随气流流向分解炉上部,煤粉燃烧与碳酸钙分解的剧烈程度减弱,流动形态也变成平推流形式;进入旋流分离器后,煤粉中残余的燃烧速率较低的固定碳成为制约整个反应过程的环节,旋转运动有利于延长物料在炉内的停留时间,从而提高煤粉的燃尽率和碳酸钙的分解率,同时,旋转流动也有助于粗物料的外循环。

### 3.2 分解炉内压力场的分布特征

图3给出了分解炉的静压力分布,从图中可以看出分解炉主体内的静压力随炉体高度增加而增大,在三次风入口上方,分解炉主体的下部,静压力最低,同样说明了气流在该处有强烈的回流和旋转流。

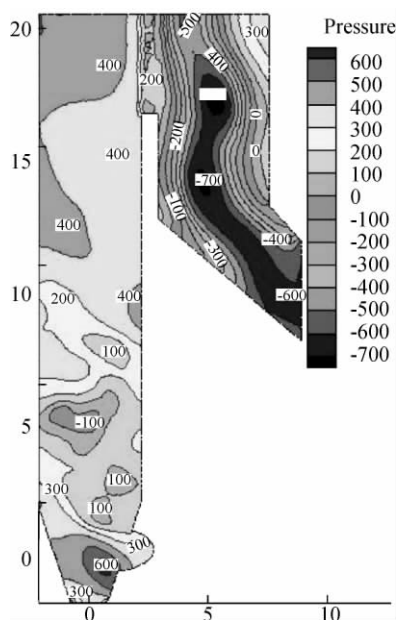


图3 分解炉压力分布

Fig. 3 Pressure profile of precalciner

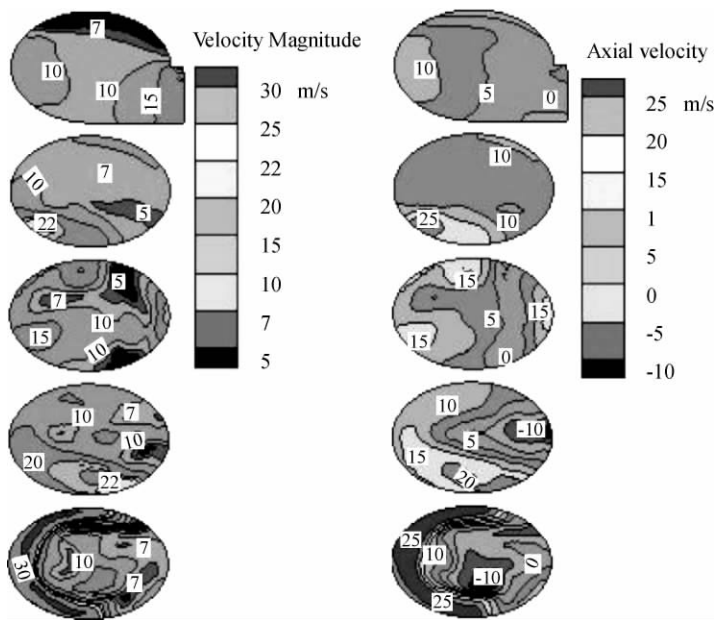


图4 分解炉主体速度分布

Fig. 4 Velocity profile in main part of the precalciner

在旋流分离器内,静压力分布为中心低,边壁高。符合分离器内气体旋流向下运动的特征,随着接近分离器的出口,静压力明显变小,这是由于出口处流动通道变小,气体加速流出分离器形成的。这些特征与流线分布特点相对应。在出口附近,气体的加速流动,可以避免分解炉出口至五级旋风分离器入口区段,物料沉降造成堵塞的问题。

### 3.3 分解炉流场分布特征

#### 3.3.1 分解炉主体速度场分布

图4给出了分解炉主体内速度分布情况。从图中可以看出:在分解炉下部,烟气与三次风在分解炉内混合,喷腾效应显著,在分解炉上部,气流的速度变化剧烈程度减弱,基本在7~10 m/s的范围内变化,符合最初的设计要求。从轴向速度分布图中可以看出:分解炉下部有负的轴向速度区的形成,也证明了气流在该部分有回流的产生。

3.3.2 旋流分离器内速度场分布

图 5 给出了旋流分离器的各向速度的分布情况. 从速度量值图中可以看出,从分解炉主体切向进入旋流分离器的气流具有明显的旋流特征,但旋转流动的轴心与分离器的几何轴心有较大的偏离;从轴向速度图中可以看出,气流主体呈现向下旋流运动,但仍有小部分区域,存在返混流动的现象. 从切向和径向速度图中可以看出,旋流分离器内存在明显的回流,旋流过程的发展并不充分,这应当与较短的旋流分离器的构造相关. 但旋流分离器带来的旋转流场和回流现象,将有利于物料的返混,延长物料在炉内的停留时间.

3.4 分解炉出口速度矢量分布特征

图 6 给出了分解炉出口的速度矢量分布情况. 从图中可以看出:气流受旋流分离器内旋转流动效应的影响,在出口断面内的速度分布很不均匀. 存在旋转流动,且在出口的内侧区域(图中所示为左侧)和上部区域,速度相对较高,这种流场形式,一方面可以缓解含尘气流对外壁的冲刷,另一方面有助于后面旋风分离器分离效率的提高.

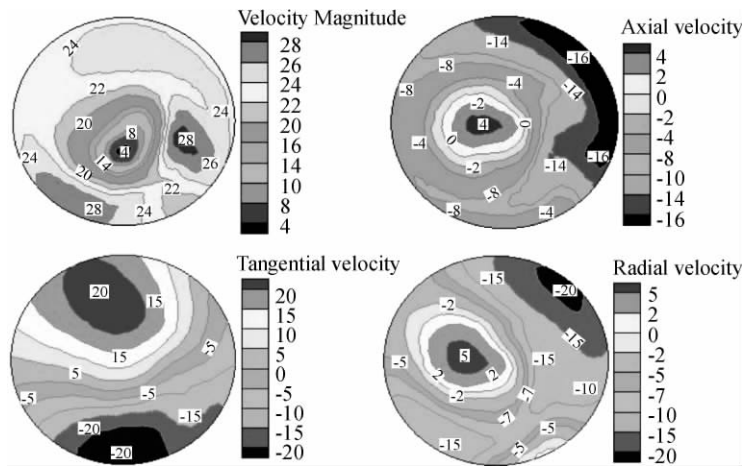


图 5 旋流分离器内 Z=16 m 截面上的速度分布

Fig. 5 Velocity profile in Z=16 m of the vortex separator

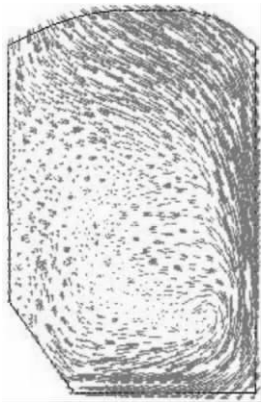


图 6 分解炉出口速度矢量分布

Fig. 6 Velocity vector profile in outflow of the precalciner

4 结 论

对于外循环式高固气比分解炉,采用带旋流修正的  $k-\epsilon$  双方程模型进行的模拟,获得了分解炉内流场的基本形态,验证了开发者的原始构思.

分解炉内气流流线的特征,压力分布和速度分布特点,从不同角度说明了在分解炉的不同区域,气体流场变化的显著特点,直观体现了在分解炉不同部位需要完成的不同功能. 在分解炉体的中下部,为实现煤粉大量燃烧、碳酸钙快速分解的目的,流体呈现强烈回流与旋流流动形式. 随着反应的进行,流动形态变成平推流形式;进入旋流分离器后,旋转运动有利于延长物料在炉内的停留时间,从而提高煤粉的燃尽率和碳酸钙的分解率.

参考文献 References

[1] 嵇鹰,徐德龙,李兆峰. NS-A 型分解炉系统冷模试验结果与分析[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2004,36(4):470-478.

Ji Ying, XU De-long, LI Zhao-feng. Experimental stests on a laboratory model of NS-A type calciner an analysis of

- the measurements[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. : Natural Science Edition, 2004, 36(4): 470-478.
- [2] 吴慧英, 李建锡. 分解炉内气相湍流流动的数值模拟分析[J]. 中国水泥, 2005(11): 54-57.  
YU Hui-ying, LI Jian-xi. The numerical simulation of gas turbulence flow in a precalciner[J]. China cement, 2005(11): 54-57.
- [3] 肖国权. 分解炉内伴有燃烧、化学反应的两相湍流流动的数值模拟[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.  
XIAO Guo-quan. The numerical simulation of two-Phase turbulent flow with combustion and chemical reactions in a precalciner[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2005.
- [4] 赵蔚琳, 侯立红. DD 分解炉内湍流流场的数值分析[J]. 硅酸盐通报, 2002(2): 26-28.  
ZHAO Wei-lin, HOU Li-hong. The numerical simulation of turbulence flow in the DD precalciner[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2002(2): 26-28.
- [5] 黄 来. 旋喷结合分解炉内流场的数值模拟[J]. 燃烧科学与技术, 2003, 9(3): 274-279.  
HUANG Lai. Numerical simulation of flow-field in spiraled and sprayed precalciner[J]. Journal of combustion science and technology, 2003, 9(3): 274-279.
- [6] 吴慧英, 李建锡. 基于计算流体力学的循环预烧分解炉的三维流场数值模拟[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2005.  
WU Hui-ying, LI Jian-xi. Based on the computational fluid dynamics, the numerical simulation of three-dimension gas turbulence flow in circular precalciner[D]. Kunming: Kunming University of Technology, 2005.

## The numerical simulation of flow-field in high solid to gas ration external circulating precalciner

CHEN Yan-xin<sup>1,2</sup>, SHI Shou-fen<sup>1</sup>, XU De-long<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Powder Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China

2. State Key Laboratory of Architecture Science and Technology in West China(XAUAT), Xi'an 710055, China)

**Abstract:** External circulating precalciner is a new type of reactor, which is mainly applied to the new dry process for the cement manufacture. Theoretical calculation indicates that the external circulating precalciner possess more stability of thermal performance and higher apparent resolution rate of the discharge material. The numerical simulation of the gas flow field in the external circulating precalciner based on the RNG  $k-\epsilon$  model is introduced. The characteristics of the gas flow stream line in the precalciner and the distribution of the pressure and gas velocity with different parts were analyzed. The results indicated that a relatively strong back mixing and rotational flow field formed in the under-part by the effect of the tertiary air partiality into precalciner, and the flow field becomes stable since the gas enters the top of the precalciner. When the fluid flows into the rotational flow separator, the steady downstream spin is formed. Affected by the reduction of flow space close to export, fluid flowing quicken outflow the precalciner. The simulation results verified the precalciner for the pulverized coal burning and the carbonate decomposing was designed reasonably.

**Key words:** precalciner; gas turbulent flow;  $k-\epsilon$  model; numerical simulation