

立磨内部流场的数值模拟

孙亚忠,陈作炳,董新营

(武汉理工大学机电工程学院,湖北 武汉 430070)

摘 要:以水泥生产中常见的原料立磨为研究对象,利用计算流体力学 CFD 软件来模拟分析立磨内部流场的动力学特性,模拟计算尽可能的考虑气固两相之间的相互作用.根据模拟结果,从速度场、温度场和粒子轨迹等角度去讨论和分析磨内的流场特性.并与实际生产情况相结合进行分析总结,这为今后原料立磨的进一步优化设计和生产应用提供流体动力学依据.

关键词:立磨;CFD;数值模拟;湍流模型;气固流

中图分类号:TQ172.6

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2011.04.023

0 引 言

立磨是建材行业水泥生产中广泛使用的一种粉磨机械,其集细碎、烘干、粉磨、选粉、输送为一体,具有粉磨效率高、电耗低、烘干能力大、产品细度易于调节、工艺流程简单、噪音低、运行可靠等优点.其基本工作原理是:需要粉磨的物料由喂料设备送入旋转磨盘中心,在离心力作用下,物料向磨盘周围移动,进入粉磨辊道,物料受到挤压、研磨和剪切作用而被粉碎.同时,热风从围绕磨盘的风环高速向上喷出,物料被高速气流吹起,由气流带入分离器完成气固分离.在立磨工作的过程中,气体对物料的输送和气固分离直接影响到立磨的粉磨效率和产品细度,对生产成本也有一定的影响^[1-2].

立磨从诞生到现在已经有二十多年的历史,但其仍然没有达到成熟完善的地步,立磨研究者还继续对其结构进行研究和改进,特别是磨内流场气体和生料的耦合及分离的研究方面才刚刚开始.近年来随着计算机软硬件技术的飞速发展,以计算流体力学 CFD 为基础的数值模拟技术迅速发展和成熟起来.简单的说,CFD 相当于“虚拟”地在计算机做实验,用来模拟仿真实际的流体流动情况. FLUENT 作为 CFD 的一种模拟和分析流体的软件目前已在多种工程问题中得到应用和推广^[3-4].为深入了解立磨内流体的流动情况,利用该软件模拟研究立磨内的气体和生料的耦合流场,并进行相关分析,为明确立磨内流场情况和立磨的结构优化提供依据.

1 立磨的初始条件

本模拟研究选择直径为 4.8 m 的某型立磨,研磨区域外径为 5.6 m,磨盘最大外径为 6.1 m,是国内最大规格的原料立磨.该立磨结构对称,采用对称的两辊运行,磨辊个数为 4.该立磨的初始条件根据实际工况条件来确定,如下:入磨物料粒度: ≤ 100 mm,产量:380~450 t/h,产品细度: $R_{0.08} \leq 16\%$,出磨风量:860 000 m³/h(工况下),出磨风温:80℃~90℃,入磨风温: < 350 ℃.总结可以得出立磨的主要工况条件参数如表 1 所示.

表 1 立磨的工况条件参数

Table 1 Parameters of vertical grinder under operation conditions

入磨风量/ m ³ ·s ⁻¹	入磨气体 温度/K	入磨生料 流量/kg·s ⁻¹	入磨生料 温度/K	入磨物料平 均粒径/m
280~320	523	100~125	323	4.5×10^{-5}

根据以上参数和立磨的结构尺寸,可计算出每个进口风速大小大约为 34.7 m/s,气体进口面积为 4.9 m²,所以进口的压力直径为 2 m.在进口压强和温度下,气体的黏性系数为 $\mu = 1.79 \times 10^{-5}$,密度为 $\rho = 0.675$ kg/m³,则气体的雷诺数为

$$Re = \frac{VD\rho}{\mu} = \frac{34.7 \times 2 \times 0.675}{1.79 \times 10^{-5}} = 1.3 \times 10^6 \quad (1)$$

式(1)中: Re 为雷诺数; V 为来流速度; D 为压力直径.

该模型的雷诺数 Re 远大于湍流临界值,所以判定磨内流场区域为湍流流动^[5-6].同时可以计算出进口的湍流强度大约为 3%.

2 数值模拟方法选择

立磨的内部流场为气固两相流模型,包括气

体连续相和生料颗粒的离散相. 并且考虑到连续相和离散相的相互作用, 这就需要选择合适的多相流模型和湍流模型.

2.1 两相流模型选择

针对该立磨, 根据工况条件参数, 进口风为 $Q_0=320\text{ m}^3/\text{s}$, 生料即离散相流量为 $M_s=120\text{ kg/s}$, 生料密度为 $\rho_s=2\,800\text{ kg/m}^3$, 离散相所占体积为:

$$Q_s=\frac{M_s}{\rho_s}=\frac{120}{2\,800}=0.043\text{ m}^3/\text{s}\quad(2)$$

离散相所占的体积分数为:

$$\frac{Q_s}{Q_0}=\frac{0.043}{320}=0.01\%\quad(3)$$

其远小于体积分数 10%, 故在此需用离散相模型进行模拟^[7].

离散相模型中可以通过在一个确定的流场中, 即非耦合方法来预测离散相的分布, 也可以在考虑离散相对连续相有影响的流场, 即耦合方法中考虑颗粒的分布. 在相间耦合计算中, 离散相的存在影响了连续相得流场, 而连续相的流场反过来影响了离散相的分布. 该模拟问题中, 包含较高的质量、动量承载率, 为了考虑离散相对连续相的影响, 使用耦合的方法.

2.2 湍流模型选择

由于模型的雷诺数 $Re=1.3\times10^6$, 所以磨内流场区域为高雷诺的湍流流动, 可选用常见的标准 $k-\epsilon$ 二方程模型. 标准 $k-\epsilon$ 模型有较高的稳定性、经济性、和计算精度, 应用广泛, 适合高雷诺数湍流.

标准 $k-\epsilon$ 模型是把涡粘系数和湍动能及湍动能耗散联系在一起, 湍动粘度模型为

$$\mu=\rho C_\mu\frac{k^2}{\epsilon}\quad(4)$$

在模型中, 湍动耗散率 ϵ 为

$$\epsilon=\frac{\mu}{\rho}\left(\frac{\partial u'_j}{\partial x_k}\right)\left(\frac{\partial u'_j}{\partial x_k}\right)\quad(5)$$

在标准 $k-\epsilon$ 模型中, k 和 ϵ 是两个基本未知量, 与之相对应的输运方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+G_b-\rho\epsilon-Y_m+S_k\quad(6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon)+\frac{\partial(\rho\epsilon u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}\right)\frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}\right]+G_{1\epsilon}\frac{\epsilon}{k}(G_k+G_{3\epsilon}G_b)- \\ & (G_{2\epsilon}\rho\frac{\epsilon^2}{k}+S_\epsilon) \end{aligned}\quad(7)$$

式(7)中: G_k 为由平均速度梯度引起的湍动能 k 的

产生项; G_b 为由浮力引起的湍动能 k 的产生项; Y_m 为代表可压湍流中脉动扩张的贡献; C 为经验常数; σ_k 、 σ_ϵ 为 k 方程和 ϵ 方程的湍流 Prandtl 数; S_k 、 S_ϵ 为用户自定义的源项.

3 数值模拟

3.1 建立几何模型和划分网格

由于立磨内腔为实际的流体区域, 因此在建立模型时只需要建立内腔的实体模型. 所以根据立磨的基本结构, 利用三维建模工具建立简化的几何模型如图 1 和图 2 所示.

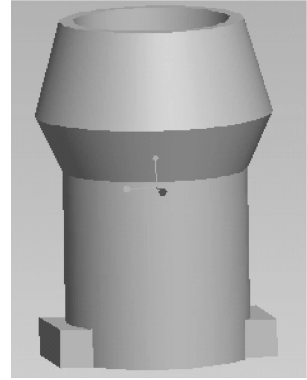


图 1 立磨三维模型

Fig. 1 3D model of vertical grinder

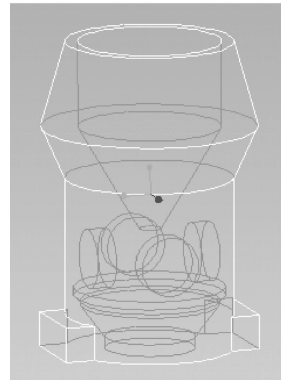


图 2 立磨三维模型透视图

Fig. 2 3D model perspective of vertical grinder

立磨几何模型包括两个热风进口、物料进口、出口、磨盘和磨辊, 热风从立磨下面的两个进风口进, 生料从进料口进入. 本模型中不包含分离器, 两相在立磨流场耦合后从模型最上端出口出去. 把建立好的模型利用网格划分软件进行前处理^[8~9]. 由于立磨内部流体场结构比较复杂, 在网格生成过程中, 采用多种方法来控制网格质量, 以提高计算的准确性. 生成的网格如图 3 所示.

3.2 边界条件和求解方法设置

划分网格后, 要建立边界条件. 本研究对象模拟采用离散相模型, 热风和生料颗粒分别从不同的入口进入. 如图 4 所示, 热风从立磨底部的两个进口



图 3 模型计算网格

Fig. 3 Grid of model calculations

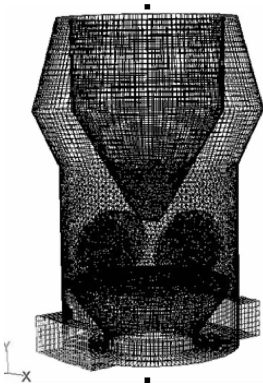


图 4 模型边界条件设置

Fig. 4 Boundary conditions setting of model

进入;生料颗粒从立磨中间的进料口作为离散相射入.进口都设置为质量流量入口,出口设置为压力出口.对于颗粒离散相必须对入射颗粒流进行设置,材料选择为碳酸钙,颗粒分布采用 rosin-rammler 分布.由于模型采用离散相模型,且考虑颗粒对连续相的影响,即相间耦合计算,所以首先要计算连续相流场,然后引入离散相,使用已经得到的颗粒计算结果中的相间动量、热量、质量交换项重新计算连续相流场,重复上述计算,直到获得收敛解.

3.3 模拟结果及分析

立磨流场模拟采用的两相离散相模型,湍流模型采用两方程模型中的标准 Standard 模型,根据以上的要求和设置,对模型进行模拟计算.图 5 和图 6 分别是该立磨模拟模型 $X=0$ 截面的速度云图和速度矢量图.由云图可见:热风在立磨进风口的风速约为 35 m/s,到磨盘座后沿着磨盘座壁旋转向上;随着磨腔面积的减少,风速逐渐增大,风速在风环处急速增加,向上喷出,达到最大值约 65 m/s,这与实际生产中立磨内部最高风速控制在 70 m/s 左右相应.从物料进口落到磨盘上的物料随转动的磨盘移动到磨盘边缘被风环处高速的热风吹起.此时若风速过小,风量不足,将会引起过多物料不能被热风吹起,造成物料循环量增多,

粉磨效率降低.甚至还会使磨内压差上升,引起振动,影响设备的正常运转.

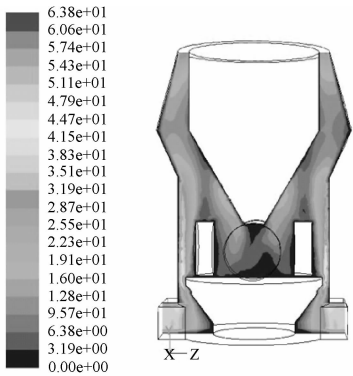


图 5 模型 $X=0$ 截面速度场云图

Fig. 5 Velocity nephogram of model with section $x=0$

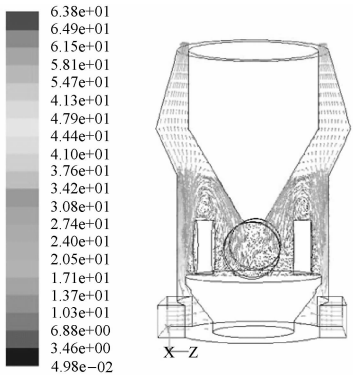


图 6 模型 $X=0$ 截面速度矢量图

Fig. 6 Velocity vectorgraph of model with section $x=0$

从矢量图 6、7 可以看出,物料被热风吹起后,随着风流向,在磨辊上端旋转形成涡流,大部分风量继续向上流动,一小部分形成回流.向上的风量带着物料从上面的出口流出,即相当于进入立磨的分离器,此时风速大小相同,这使物料颗粒能在进入分离器前分布均匀,有利于颗粒的进一步分离.回流的风则加杂着大的物料颗粒吹向磨盘,这一方面控制掉落物料颗粒的大小,另一方面控制了物料的循环量和磨盘上的料层厚度.既有利于物料分级的内部循环,又使磨盘上的料层厚度合适,提高了粉磨效率.

图 8 所示为模拟模型 $X=0$ 截面温度云图.从图中可以看出,高温热风在风环处与带有水分的物料接触耦合后,风的温度开始明显下降,这实现了立磨对湿料的烘干功能.热风的热量一大部分传递给物料,进行了热交换,物料中的水分温度达到一定程度的时候发生汽化,物料被烘干.但从风量方面考虑,在进口风温一定时,物料水分不能太大,否则会使磨内温度过低,造成风量减少,风速

下降,不利于物料的输送.所以要调节物料水分,选择合适的进风温度来控制立磨的出口温度.另外从图 9 中还可以看出,湿的物料在从进料口下落时已经开始与回流的热风发生热交换.相当于湿的物料在破碎粉磨之前已经被预烘干,这样降低物料了的湿度,减少物料在被粉磨时对磨盘和磨辊的粘附,可以提高粉磨效率.

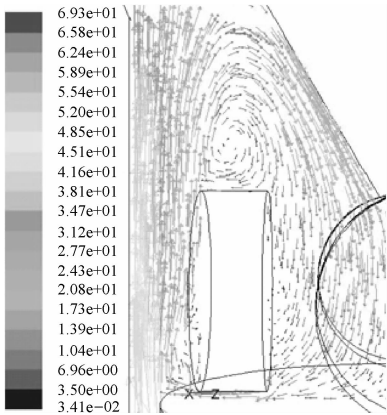


图 7 速度矢量图(局部放大)

Fig. 7 Velocity vectorgraph (partial enlarged)

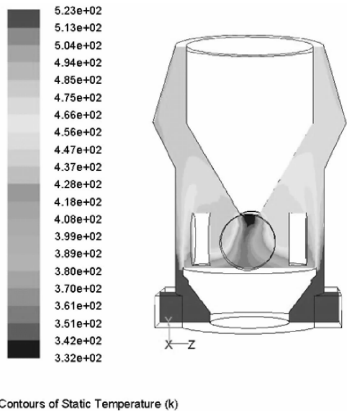


图 8 模型 X=0 截面温度场云图

Fig. 8 Temperature field nephogram of model with section $x=0$

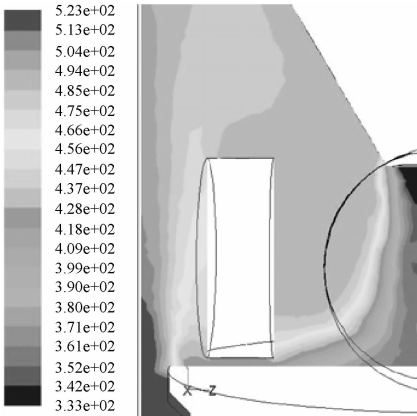


图 9 温度场云图(局部放大)

Fig. 9 Vectorgraph of temperature field(partial enlarged)

图 10 为磨内的物料颗粒轨迹图.因为本文模拟计算中物料大小是按实际生产要求的颗粒细度

分布加入的.所以模拟中物料颗粒大小采用 rosin-rammler 分布^[10],平均粒径 0.045 mm,普朗克常数为 3.5,保证大于 80 mm 的颗粒比例控制在 16%之内.根据图中可见,物料颗粒都随风从出口吹出,进入选粉分离器.所以在实际生产中在保证不影响窑煅烧的情况下,适当放宽生料的细度,这可提高立磨的产量,也是节能增产的好办法.

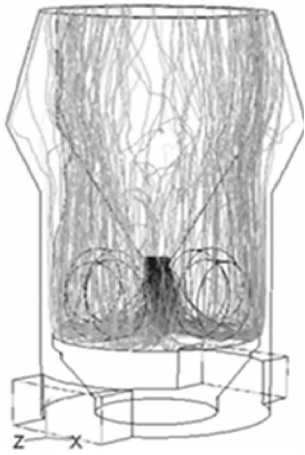


图 10 模型物料颗粒轨迹图

Fig. 10 Locus diagram of model material particles

4 结 语

利用 CFD 数值模拟软件对型立磨进行了内部流场模拟计算,考虑了气固两相之间的热量交换和相互作用.根据模拟结果,结合实际生产情况,从速度场、温度场和粒子轨迹等角度去讨论和分析,并得出以下结论:

- a. 在磨盘边缘,即风环处风速达到最大,并与物料颗粒开始耦合,输送物料.风速低,会导致回料量增多;风速过大,耗能大,造成浪费,所以选择合适的风速,既可以控制物料细度,提高输送效率,还可以降低能耗.
- b. 流场在磨辊上端形成漩涡,产生回流.这样使物料内部循环,控制了磨盘上料层厚度,可以提高粉磨效率;同时也有利于物料颗粒大小的分级,提高分离效率.也起到在粉磨前预烘干生料的作用,提高粉磨的效率.
- c. 热风和含有水分的物料耦合后,开始相互作用,主要是热量的交换,起到烘干物料的目的.生产中要根据物料的水分,选择合适的风温,这样既保证物料的烘干;也不会因为磨内温度过高或过低,造成粉磨效率低或设备的损伤.

参考文献:

[1] 邓小林. HRM4800 立式磨在 5000t/d 水泥熟料生产线上的应用[J]. 中国水泥, 2009(3): 51 - 56.

[2] 谭凤林. HRM 型立磨结构设计及制造[J]. 中国水泥,2007(1):68 – 69.

[3] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京:清华大学出版社,2004.

[4] 于勇. FLUENT 入门与进阶教程[M]. 北京:北京理工大学出版社,2008.

[5] 张建文. 流体流动与传热过程的数值模拟基础与应用[M]. 北京:化学工业出版社,2009.

[6] Fluent, Inc. Fluent6. 2 User’s Guide Manual [M]. Lebanon;America Fluent. Inc,2005,1(6).

[7] 岑可法,樊建人. 工程气固多相流动的理论及计算[M],杭州:浙江大学出版社,1990.

[8] Yewang SUN, Xiaobo ZE. Analysis of Flow Field in Vertical Roller Mill Chamber Based on Turbulent Models [C]//2009 International Conference on Environmental Science and Information Application Technology,2009:637 – 640.

[9] Kamalesh S, Bhambare, Zhanhua Ma. CFD modeling of MPS coal mill with moisture evaporation [J]. United States: Fuel Processing Technology, 2010 (91):566 – 571.

[10] Bhaskar C. Numerical simulation of turbulent flow in complex geometries used in power plants [J]. Advances in Engineering Software,2002(33):71 – 83.

Numerical simulation study of internal flow field in vertical roller mill

SUN Ya-zhong , CHEN Zuo-bing , DONG Xin-ying

(School of Mechanical and electrical Engineering Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: This paper studied the vertical roller mill of the raw meal, which has very popular applications in the cement industry. Based on Computational Fluid Dynamics (CFD) software and considering the interaction between the gas-solid flow, the aerodynamic characteristics in the internal flow field of vertical roller mill is simulated and analyzed. According to the results of the simulation, the flow characteristics is discussed and analyzed from the contour of velocity, the temperature, the particle tracks et al. By combining the practical processs of the vertical roller mill, we analyze and summarize the flow characteristics, which provides the aerodynamic bases for the optimization of the design and actual applications.

Key words: vertical roller mill; CFD; numerical simulation; turbulence model; gas-solid flow

本文编辑:陈小平

☆

(上接第 84 页)

Design and implementation of software license system based on LabVIEW

WANG Hui-qing^{1,2} , CHENG Yong^{1,2}

(1. Hubei Province Key Laboratory of Intelligent Robot, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;
2. School of Computer Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In terms of the certain loopholes and defects of the current software licenses protection technology, a software license protection system based on LabVIEW is designed in this paper. The software license system realizes the authentication management by combining the registry, license document, the used days and times closely. The practical applications show that the system provides software copyright protection effectively.

Key words: LabVIEW ;Software Protection;Encryption Algorithm

本文编辑:陈小平