

水泥三喷腾分解炉煅烧过程数值模拟研究

杨 郁,李侍津,罗 晓,边永欢,刘仁平

(河北科技大学环境科学与工程学院,河北石家庄 050018)

摘 要:为了深入研究分解炉内的煅烧过程,提高煅烧效果,运用 Fluent 软件对国内某水泥公司 4 500 t/d TTF 分解炉进行了数值建模。在选取 Standard $k-\epsilon$ 模型、离散相模型和组分传输模型模拟出流场和温度场的基础上,分析了煤粉燃烧过程及生料角度、三次风速度和温度对炉内煅烧过程的影响。结果表明:生料入射角度对分解率有较大的影响;三次风速度较大时,生料分解率和焦炭燃烬率也较高;三次风温度升高,会引起助燃空气不足,降低焦炭反应活性,从而降低燃烬率;通过优化 3 个参数, CaCO_3 分解率达到 90.3%,焦炭燃烬率达到 88.0%。开展水泥分解炉煅烧过程数值模拟研究并将之应用于实际工程项目中,可为优化水泥生产工况提供理论参考,对水泥工业与资源环境的协调发展具有较大的现实意义。

关键词:工业锅炉;TTF 分解炉;煤粉燃烧;生料分解;优化;数值模拟

中图分类号:TK175 文献标志码:A

Numerical simulation study on calcination process of cement triple-spouting precalciner

YANG Yu, LI Shijin, LUO Xiao, BIAN Yonghuan, LIU Renping

(School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract: To study the calcination process in a precalciner and improve calcination effect, the 4 500 t/d TTF precalciner in a domestic cement company is numerically modeled by Fluent. By selecting the standard $k-\epsilon$ model, discrete phase model and component transfer model, the flow field and temperature field are simulated, based on which, the pulverized coal combustion process and the effects of cement raw meal angle, tertiary air velocity and tertiary air temperature on calcination process are analyzed. The results show that the incidence angle of raw meal has great influence on the decomposition rate. When the tertiary air velocity is higher, the decomposition rate of raw meal and the burning rate of coke are also higher. Increase in tertiary air temperature causes insufficient combustion air and reduces coke reactivity, thereby reduces combustion rate. By optimizing the three parameters, the decomposition rate of CaCO_3 and the burning rate of coke can reach 90.3% and 88.0%, respectively. The research on the numerical simulation of cement precalciner calcination process and its application in practical engineering

收稿日期:2019-01-02;修回日期:2019-03-04;责任编辑:张士莹

基金项目:河北科技大学科学治霾及大气污染防治重点攻关预研专项;河北省重点研发计划项目(18273703D);河北省重点研发计划自筹项目(17273716);石家庄市科学技术研究与发展计划项目(181240347A)

第一作者简介:杨 郁(1994—),女,河北邢台人,硕士研究生,主要从事水泥分解炉低氮燃烧数值模拟方面的研究。

通信作者:刘仁平副教授。E-mail:27455271@qq.com

杨郁,李侍津,罗晓,等.水泥三喷腾分解炉煅烧过程数值模拟研究[J].河北科技大学学报,2019,40(2):182-188.

YANG Yu, LI Shijin, LUO Xiao, et al. Numerical simulation study on calcination process of cement triple-spouting precalciner[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2019, 40(2): 182-188.

projects can provide theoretical reference for optimizing cement production conditions, and has great practical significance for the cement industry and its coordinated development with resources and environment.

Keywords: industrial boiler; TTF precalciner; pulverized coal combustion; raw meal decomposition; optimization; numerical simulation

近年来中国水泥产量居高不下,在获取产品的同时,消耗了大量的煤炭资源^[1]。为此,国家对水泥行业的能耗总量和单位产品能耗提出了明确要求^[2]。分解炉是目前水泥生产的核心设备之一,其内部主要发生煤粉燃烧和生料分解以及热交换等过程,这些过程相互作用,影响水泥产品的质量和能源消耗量^[3-4],针对分解炉内燃烧和分解过程及其影响因素进行研究显得尤为重要。

与理论分析、冷模实验和工厂试验相比,运用 Fluent 软件进行分解炉数值模拟实验,更能高效展现炉内物理和化学过程,是目前研究分解炉的主要方式之一^[5]。通过对分解炉内煤粉燃烧过程进行模拟,可得到炉内温度场和组分浓度场的细节信息^[6-8]。例如:通过研究,耿宗俊等^[9]得到了炉内最高温度为 1 800 K;有不少研究者针对 DD 和 DDF 两种炉型分解炉内煤粉燃烧和生料分解耦合作用进行模拟,在得到炉内温度场、组分浓度场基础上,又分析了燃料、生料的物理化学过程^[10-11];梅书霞等^[12-14]针对分解炉内煤粉燃烧和碳酸钙分解进行了大量研究,其中包括煤粉、垃圾衍生燃料两种燃料共燃与碳酸钙分解耦合作用机制。目前,该领域的研究工作主要集中在 DD 和 DDF 两种炉型上,针对 TTF 分解炉的研究较少。此外,关于分解炉优化研究,主要以三次风、生料和煤粉结构参数对污染物生成规律的影响为主,对煤粉燃烧和生料分解研究较少^[15-16]。

笔者针对某水泥厂 4 500 t/d TTF 三喷腾分解炉进行了数值模拟。在验证流场、温度场与实际工况相符的基础上,研究了煤粉燃烧过程及生料角度、三次风速度和温度对煅烧过程的影响,并对优化工况进行了详细分析,以期为深入研究分解炉及指导水泥生产提供理论参考。

1 模型与数值解法

1.1 几何模型与数学模型

根据实际工艺设备尺寸进行建模,图 1 为分解炉结构和网格示意图。回转窑窑尾烟气从分解炉底部 A 垂直进入,B 为分解炉出口。三次风水平进入炉内,其进口连在锥体上方 C 处。D 和 E 分别为 2 个煤粉进口和 1 个生料进口,煤粉管与水平方向呈 25°角,所有的进口对称分布在分解炉两侧。为方便网格划分,提高模拟精确度,对炉体结构进行部分简化,将煤粉进口和生料进口简化为一个矩形进口。整体采用六面体网格进行划分。

采用 Standard $k-\epsilon$ 模型模拟气相湍流,采用离散相模型(discrete phase model)及随机轨道模型进行颗粒相的运动轨迹计算,采用组分传输模型模拟煤粉燃烧和生料分解耦合过程,采用 P1 辐射模型进行传热计算,采用双步竞争速率模型对析出的挥发分进行计算,焦炭燃烧采用固有(内在)模型。

1.2 边界条件

煤粉进口采用射入方式,颗粒相边界条件设为“逃逸”,出口采用压力出口(-1 500 Pa)。各进口边界条件见表 1,煤的工业分析、元素分析数据见表 2。

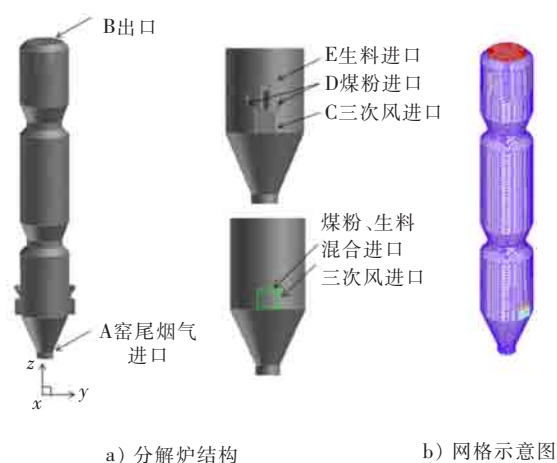


图 1 分解炉结构和网格示意图

Fig.1 Structure and mesh of the precalciner

表1 边界参数设置

Tab.1 Boundary conditions

边界	温度/K	质量流率/($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
窑尾烟气进口	1 399	50.46	—
三次风进口	1 173	—	30
煤粉进口	298	5.90	—
生料进口	1 035	59.93	—

表2 煤的工业分析及元素分析

Tab.2 Proximate and ultimate analysis of coal

工业分析(ad)/%				元素分析(ad)/%				Q _{ad} /($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)
M	V	C	A	C	H	O	N	
10	25	50	15	75	5	4	1	24 048

1.3 数值解法

本研究采用的数值解法是有限体积法,空间离散上设置压力为标准模式,动量为二阶迎风差分格式,湍流方程中湍流动能及能量耗散取一阶迎风差分格式进行求解。对离散方程组的压力-速度耦合选用SIMPLE算法求解,方程的空间离散化采用一阶迎风格式。采用无滑移壁面,对近壁区域采用标准壁面函数进行处理。收敛标准为能量项和P1项残差小于 10^{-6} ,其余各残差小于 10^{-3} [17-18]。

2 结果

2.1 流场分析

图2为速度云图和局部速度矢量图。图2 a)显示炉内共产生三次喷腾效应,速度场沿分解炉中心线呈良好的对称分布。模拟结果图2 b)和图2 c)显示,由于上升的窑尾烟气受三次风阻挡,因此在三次风下方形成部分回流区;在三次风上方,受上升窑尾烟气的影响,形成另外2个较大的回流区。回流作用使生料在分解炉内的分散更加均匀,并且增加了煤粉在分解炉内的燃烧时间,促进煤粉充分燃烧和碳酸钙的彻底分解。模拟展示的气相流场的分布特点与实际工况的测定分析结果较为一致,表明了模拟结果的准确性。

2.2 温度场分析

煤粉通过喷煤管采用喷射方式进入分解炉内,与高温三次风及高温窑尾烟气相混合。通过换热,煤粉的温度被升高,当被加热到一定温度后发生燃烧反应,并释放出大量热量,这些热量为碳酸钙的分解提供温度条件。

图3为分解炉温度云图。模拟结果显示,高温窑尾烟气遇到温度较低的三次风和生料,在分解炉下部产生梯度较大的温度变化,分解炉内温度降至1 150 K左右。煤粉进入分解炉后大量燃烧,炉内高温区升至1 480 K左右。随着分解炉高度的增加,温度逐渐降低直至趋于稳定,表明煤粉燃烧反应已经较为充分。分解炉出口平均温度为1 250 K,实际生产监测数据为1 196 K,相对误差在5%以内。

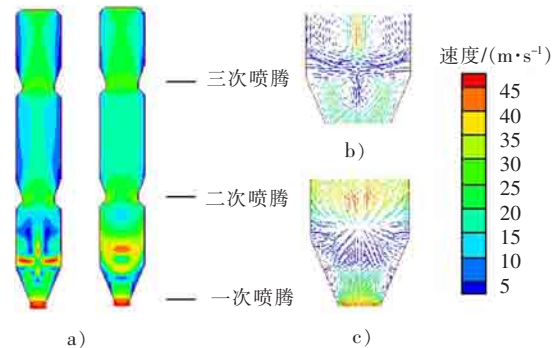


图2 速度云图和矢量图

Fig.2 Velocity contours and vectors

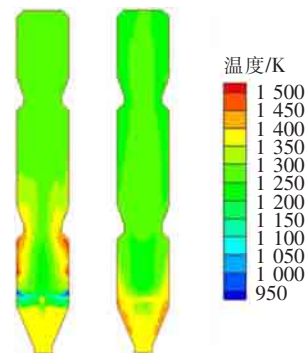


图3 温度云图

Fig.3 Temperature contours

2.3 煤粉燃烧过程

有不少研究者对煤粉的燃烧特性进行了分析。该燃烧过程可分为 2 部分,即挥发分的析出和燃烧与焦炭的燃烧^[19-21]。图 4 为挥发分在分解炉 z 方向上的摩尔分数云图与曲线图。由曲线图可见,在 7~15 m 高度处,挥发分浓度发生明显变化;结合挥发分摩尔分数云图可知,在 10.5 m 高度处,2 个对称的煤粉燃烧器斜向下喷射煤粉,在此过程中挥发分大量析出并迅速燃烧至完全。

图 5 为其中一个煤粉入口的颗粒轨迹图。煤粉采用面入射方式,由入口均匀喷射进炉内。受运动气流的影响,焦炭颗粒在分解炉锥部以上区域的轨迹变得曲折,增加了焦炭颗粒在炉内的停留时间。与挥发分分布不同,自锥部向上直至分解炉出口,均产生焦炭颗粒燃烧反应,维持了解析炉的整体温度,并保障了碳酸钙的分解。结果显示,焦炭燃烬率为 85.4%,与实际工况相符合。

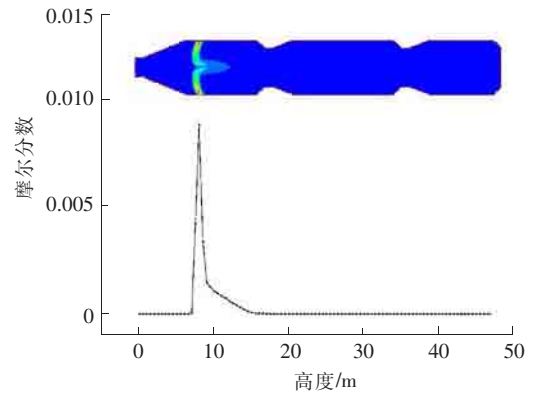


图 4 挥发分摩尔分数云图与曲线图

Fig.4 Molar fractional contour and graph of volatile parts



图 5 颗粒轨迹图

Fig.5 Particle traces

3 影响因素

分解炉内同时发生复杂的流体运动、燃烧、分解和传热等物理化学过程,合理的工况条件对提高分解率和燃烬率有重要影响^[22]。分解炉外形、下料点位置、数量和角度、三次风速度和温度、喷煤口数量等都是影响煅烧过程的因素。在原分解炉结构不变的情况下,选取生料入射角度、三次风速度及三次风温度共 3 个因素进行研究。

3.1 生料角度

生料的加入会对炉内气固两相流场产生一定的影响,而流场特性会影响炉内物料的分散状况,在生料分解和煤粉燃烧方面起着重要作用^[23]。根据分解炉原始工况,选取与水平面夹角 10°~60°范围内,每隔 5°设置一个生料入射角度,研究生料入射角度对分解炉煅烧的影响。

图 6 为生料入射角度与分解炉出口生料分解率及焦炭燃烬率的关系曲线,图 7 为生料入射角度与炉内压力损失(三次风进口至分解炉出口)的关系曲线。结合图 6 和图 7 可知,随着入射角度增加,焦炭燃烬率稳定在 81% 以上,说明生料入射角度不是影响焦炭燃烧的主要因素;在 10°~40°之间,压力损失较小,并且分解率比较稳定,说明生料入射角度对炉内流场的影响不大;在 40°~60°之间,压力损失迅速增加,分解率明显下降,表明生料的加入对流场产生一定的扰动作用,阻碍了生料和煤粉的有效混合。根据模拟实验结果,得出在较低压力损失下,生料分解率在入射角度分别为 25°,30°,35°时,分别比 60°时高 12.2%,12.5%和 12.7%。

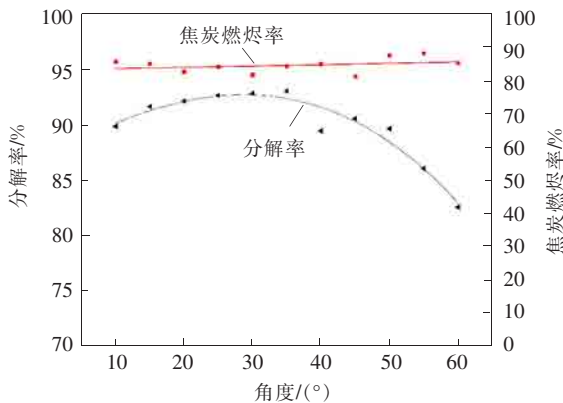


图 6 入射角度与分解率和燃烬率关系曲线

Fig.6 Relationship between the inlet angle and the decomposition rate and burnout rate

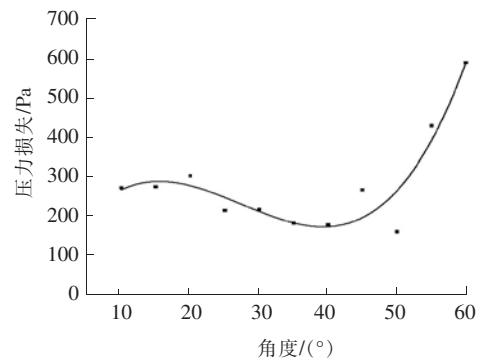


图 7 入射角度与压力损失关系曲线

Fig.7 Relationship between the inlet angle and the pressure loss

3.2 三次风速度

在确定生料入射角度为 35° 的基础上,选取三次风速度分别为 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32 m/s 共 7 个条件,研究三次风速度对分解炉煅烧的影响。

图 8 为三次风速度与分解率及焦炭燃烬率的关系曲线,分解率及焦炭燃烬率随三次风速度变化的规律,展现了良好的一致性。随着三次风速度的增加,分解炉内的氧含量增加,为煤粉充分燃烧提供了更有利的条件。当风速增加至 28 m/s 时,炉内氧气含量已经满足煤粉燃烧条件,因此焦炭燃烬率不再增加;当风速为 26~32 m/s 时,分解率为 90%~95%,为分解炉的适宜分解率。

图 9 为三次风速度与炉内压力损失(三次风进口至分解炉出口)的关系曲线。三次风速度对分解炉压力损失影响较小,压力损失在 200 Pa 上下波动。在 24~28 m/s 范围内,压力损失较低。结合图 8 和图 9 可知,三次风在炉内速度为 28 m/s 时,压力损失较低,并且有较高的分解率和燃烬率。

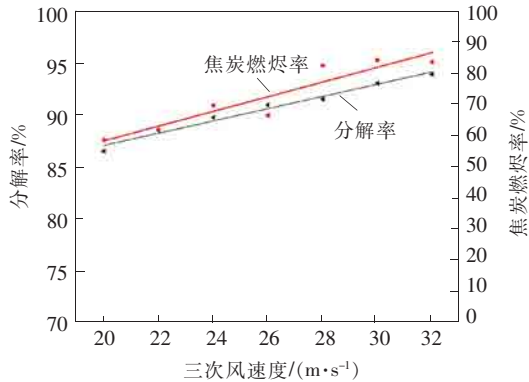


图 8 三次风速度与分解率及燃烬率关系曲线

Fig.8 Relationship between the tertiary air velocity and the decomposition rate and burnout rate

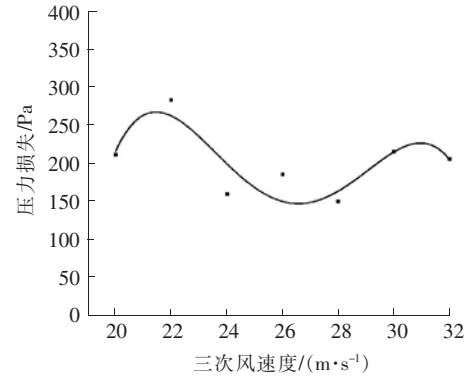


图 9 三次风速度与压力损失关系曲线

Fig.9 Relationship between the tertiary air velocity and the pressure loss

3.3 三次风温度

温度对分解炉中生料的分解起着至关重要的作用。在生料入射角度为 35° 、三次风速度为 28 m/s 基础上,根据工厂实际经验,选取三次风温度分别为 1 123, 1 173, 1 223, 1 273 和 1 323 K 共 5 个条件,研究三次风温度对分解炉煅烧的影响。

图 10 为三次风温度与分解率及焦炭燃烬率的关系曲线。由图 10 可知,随着三次风温度的增加,焦炭燃烬率呈现下降趋势。这是由于提高三次风温度且保证风速不变,则降低了入炉三次风的质量流量,引起助燃空气不足,从而使焦炭燃烬率降低;同时由于风温升高,使得煤粉燃烧时焦炭颗粒的温度升高。有研究表明,当热处理温度为 1 373~1 673 K 时,焦炭中部分物质的结构发生变化,从而增加了焦炭反应的活化能,降低其反应活性,最终增加了出口焦炭的未燃烬率^[24]。随着温度升高,生料分解率增加,表明升高温度对生料分解有明显的促进作用。

图 11 为三次风温度与炉内压力损失(三次风进口至分解炉出口)的关系曲线。随着三次风温度的增加,压力损失先增加后下降,在三次风温度为 1 275 K 时,压力损失最大。结合图 10 和图 11 可知,三次风温度为 1 123~1 173 K 时,压力损失较低,并且存在较高的分解率和燃烬率。

4 优化工况分析

经过对分解炉生料分解率影响因素的研究,以条件为 35° 生料入射角、28 m/s 三次风速和 1 123 K 风温

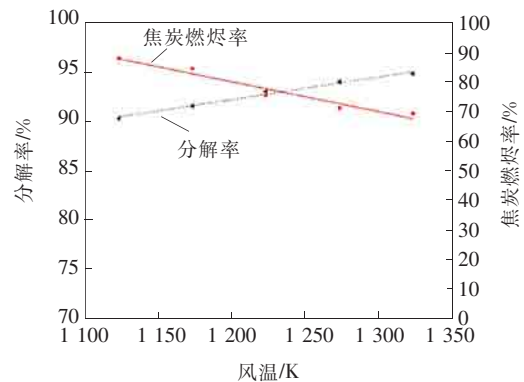


图 10 三次风温度与分解率及燃烬率关系曲线

Fig.10 Relationship between the tertiary air temperature and the decomposition rate and burnout rate

的工况为例,研究分解炉内的煅烧过程。优化工况与原始工况的流场、温度场和煤粉燃烧过程基本特点相似,因此只对优化工况的 CaCO_3 分解过程进行分析。

图 12 a), b), c), d) 分别为 y 轴截面 CaCO_3 , CaO , CO_2 和 O_2 的摩尔分数等值线图。

结合图 12 a) 和图 12 b) 分析, CaCO_3 由分解炉壁面处加入, 其运动方向受到三次风、上升窑尾烟气和重力的共同影响。在分解炉下部, 柱体 CaCO_3 的浓度梯度较大, 在生料入口处 CaO 含量增加明显, 这是由于高温引起 CaCO_3 迅速分解。随着分解炉高度的增加, 未分解完全的 CaCO_3 逐步分解, 使得 CaO 浓度逐渐增加直至分解炉出口。如图 12 c) 所示, 炉内 CO_2 与 CaO 含量变化趋势相同。回转窑窑尾烟气含有部分 CO_2 , 其摩尔分数约为 0.04, 三次风的 CO_2 含量最少, 从三次风上方直至分解炉出口 CO_2 含量出现明显的递增趋势, 这是由于煤粉燃烧和 CaCO_3 分解的共同作用。观察图 12 d) 得知, 三次风提供了煤粉燃烧必要的氧气条件, 煤粉由三次风上方加入, 在足够高的温度环境下, 遇到三次风中的大量 O_2 得以迅速燃烧, O_2 被大量消耗, 在三次风周围 O_2 含量迅速降低。

根据模拟结果可知, 经过优化后, 分解炉的结构设计和参数设置较为合理, CaCO_3 分解率可达到 90.3%, 比初始工况分解率提高了近 8%; 焦炭燃烬率达到 88.0%, 比初始工况燃烬率提高近 3%。

5 结 论

通过对某水泥厂实际生产工艺中 4 500 t/d TTF 三喷腾型分解炉进行数值模拟, 分析了炉内速度场、温度场及煤粉燃烧过程, 并依次改变生料角度、三次风速度和三次风温度 3 个因素进行研究, 结论如下。

1) 流场内产生三次喷腾效应, 且三次风上方产生 2 个较大回流区, 分解炉出口平均温度为 1 250 K, 模拟结果与实际工况吻合较好。

2) 改变生料入射角度对焦炭燃烬率影响不大, 入射角度为 25° , 30° 和 35° 时, 分解炉出口分解率分别比 60° 时高 12.2%, 12.5% 和 12.7%; 三次风速度由 20 m/s 增加至 32 m/s 时, 生料分解率和焦炭燃烬率都增加; 三次风温度为 1 123~1 323 K, 生料分解率都在适宜范围内, 随着温度的增加, 焦炭燃烬率出现下降趋势, 这是由助燃空气不足和焦炭反应活性降低导致的。

3) 通过优化生料角度、三次风速度和三次风温度 3 个参数, 可使 CaCO_3 分解率达到 90.3%, 比初始工况提高近 8%; 焦炭燃烬率达到 88.0%, 比初始工况提高近 3%。在接下来的研究中, 应在保证 CaCO_3 分解率的同时, 进一步提高焦炭的燃烬率。

参考文献/References:

- [1] MADLOOL N A, SAIDUR R, HOSSAIN M S, et al. A critical review on energy use and savings in the cement industries[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(4): 2042-2060.
- [2] 吴孟辉. 基于能源计量的水泥能耗监测系统研究与应用[J]. 计量与测试技术, 2018, 45(3): 55-57.
WU Menghui. Research and application of energy measurement based monitoring system for cement energy consumption[J]. Metrology & Measurement Technique, 2018, 45(3): 55-57.

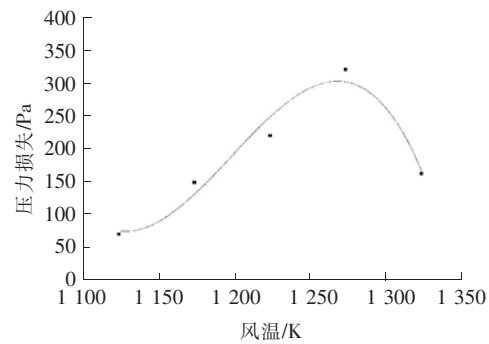


图 11 三次风温度与压力损失关系曲线
Fig.11 Relationship between the tertiary air temperature and the pressure loss

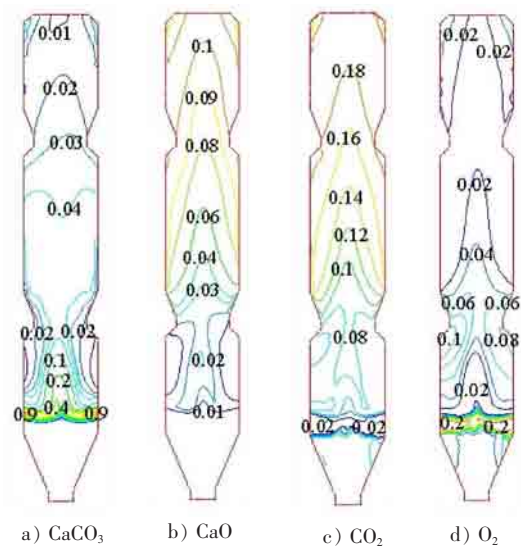


图 12 y 轴截面摩尔系数等值线图
Fig.12 Equivalent line of mole fraction at y section

- [3] FIDAROS D K, BAXEVANOU C A, DRITSELIS C D, et al. Numerical modelling of flow and transport processes in a calciner for cement production[J]. Powder Technology, 2007, 171(2): 81-95.
- [4] LIU Huanpeng, LIU Wentie, ZHENG Jianxiang, et al. Numerical study of gas-solid flow in a precalciner using kinetic theory of granular flow[J]. Chemical Engineering Journal, 2004, 102(2): 151-160.
- [5] 梅书霞, 谢峻林, 何峰, 等. DD分解炉改变生料进口位置的数值模拟[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(9): 26-30.
MEI Shuxia, XIE Junlin, HE Feng, et al. Numerical simulations in double-sprayed precalciner by changing the location of raw meal inlets[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(9): 26-30.
- [6] 蔡鑫, 马永亮. 水泥预分解炉内流场及温度场的数值模拟[J]. 环境工程学报, 2014, 8(10): 4349-4354.
CAI Xin, MA Yongliang. Numerical simulation of flow and temperature field in a cement precalciner[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(10): 4349-4354.
- [7] 巴清心. 水泥生产用分解炉传热和流动特性的数值模拟及实验研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
BA Qingxin. Numerical Simulation and Experimental Research of Precalciner Heat Transfer and Flow Characteristics in Cement Production[D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [8] GIDDINGS D, EASTWICK C N, PICKERING S J, et al. Computational fluid dynamics applied to a cement precalciner[J]. Journal of Power and Energy, 2000, 214(3): 269-280.
- [9] 耿宗俊, 邢宇宁, 赵蔚琳, 三喷腾 DD分解炉内煤粉燃烧的数值模拟[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(5): 908-912.
GENG Zongjun, XING Ningning, ZHAO Weilin, et al. Numerical simulation of pulverized coal combustion process in three-spout DD calciner[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013, 32(5): 908-912.
- [10] 陈作炳, 汤师, 项勤. DDF分解炉煤粉燃烧与生料分解耦合过程的数值模拟[J]. 现代机械, 2016(6): 45-48.
CHEN Zuobing, TANG Shuai, XIANG Qin. Numerical simulations on the coupling process of the combustion of coal powder and the decomposition of raw material in DDF precalciner[J]. Modern Machinery, 2016(6): 45-48.
- [11] MIKULCIC H, VUJANOVIC M, DUIC N. Improving the sustainability of cement production by using numerical simulation of limestone thermal degradation and pulverized coal combustion in a cement calciner[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 88(6): 262-271.
- [12] 梅书霞, 谢峻林, 何峰, 等. DD分解炉燃烧与分解耦合过程的数值模拟[J]. 化工学报, 2013, 64(3): 897-905.
MEI Shuxia, XIE Junlin, HE Feng, et al. Numerical simulation of coupling mechanism between pulverized coal combustion and calcium carbonate decomposition in double-sprayed precalciner[J]. CIESC Journal, 2013, 64(3): 897-905.
- [13] MEI Shuxia, XIE Junlin, CHEN Xiaolin, et al. Numerical simulation of the complex thermal processes in a vortexing precalciner[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 125: 652-661.
- [14] 梅书霞, 谢峻林, 陈晓琳, 等. 涡旋式分解炉中煤及垃圾衍生燃料共燃烧耦合 CaCO_3 分解的数值模拟[J]. 化工学报, 2017, 68(6): 2519-2525.
MEI Shuxia, XIE Junlin, CHEN Xiaolin, et al. Numerical simulation of co-combustion of coal and refuse derived fuel in coupling with decomposition of calcium carbonate in precalciner with swirl type prechamber[J]. CIESC Journal, 2017, 68(6): 2519-2525.
- [15] 田苗. 分解炉分级燃烧低 NO_x 释放特性研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2018.
TIAN Miao. Research on Low NO_x Release Characteristics of Staged Combustion in Precalciner[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2018.
- [16] 张丽娜. 分解炉混煤高效低 NO_x 燃烧的数值模拟与结构优化[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2014.
ZHANG Lina. Numerical Simulation and Structural Optimization of Coal Blends Efficient and Low NO_x Combustion in Calciner[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2014.
- [17] ZHDANOVA A O, KUZNETSOV G V, STRIZHAK P A. Numerical analysis of effective conditions of chemical reaction suppression during typical forest fuel material combustion[J]. Appl Mech & Mater, 2014, 3636(1384): 267-271.
- [18] 李睿. 分解炉内燃烧与 NO_x 生成的数值模拟研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2017.
LI Rui. Numerical Simulation and Research on Combustion and NO_x Formation in Precalciner[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2017.
- [19] 左启伟, 苍大强, 赵军, 等. 煤粉压力燃烧特性及动力学分析[J]. 河北科技大学学报, 2016, 37(1): 88-95.
ZUO Qiwei, CANG Daqiang, ZHAO Jun, et al. Combustion characteristics and kinetic analysis of pulverized coal under different pressure grades[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2016, 37(1): 88-95.
- [20] 郑善凯, 周月桂, 曾柱楷, 等. 高温低氧气氛下煤粉颗粒燃烧特性实验[J]. 热力发电, 2018, 47(9): 41-47.
ZHENG Shankai, ZHOU Yuegui, ZENG Zhukai, et al. Experimental research on combustion characteristics of pulverized coal particles in high temperature and low oxygen content environments[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(9): 41-47.
- [21] 左启伟, 苍大强, 安霞, 等. 煤粉预热燃烧特性及动力学分析[J]. 河北科技大学学报, 2015, 36(4): 431-436.
ZUO Qiwei, CANG Daqiang, AN Xia, et al. Combustion characteristics and kinetic analysis of preheating pulverized coal[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2015, 36(4): 431-436.
- [22] ZHANG Y, CAO S X, SHAO S, et al. Aspen plus-based simulation of a cement calciner and optimization analysis of air pollutants emission[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2011, 13(3): 459-468.
- [23] 陈作炳, 卢海波, 彭建新, 等. 强化悬浮式分解炉内气固两相流场的数值模拟[J]. 硅酸盐学报, 2006, 34(1): 50-54.
CHEN Zuobing, LU Haibo, PENG Jianxin, et al. Numerical Simulation of the gas-solid two phase flow in a reinforced suspension precalciner[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2006, 34(1): 50-54.
- [24] 张守玉, 黎永, 吕俊复, 等. 煤焦反应活性影响因素的探讨[J]. 煤炭转化, 2003, 26(2): 25-28.
ZHANG Shouyu, LI Yong, LYU Junfu, et al. Discussion on the effect of heating treatment on the intrinsic reactivity of coal-char[J]. Coal Conversion, 2003, 26(2): 25-28.