

DOI: 10.7652/xjtuxb201911016

准东煤旋风燃烧的数值模拟

张向宇, 杨玉, 白文刚, 徐宏杰

(西安热工研究院有限公司电站锅炉煤清洁燃烧国家工程研究中心, 710032, 西安)

摘要: 为掌握准东煤在液态排渣旋风炉中的燃烧特性,对准东煤旋风燃烧过程进行了数值模拟。通过建立传热传质模型求解熔渣层的热物性参数,并作为边界条件代入燃烧 CFD 模拟中构建联合迭代算法。结果表明,迭代收敛后火焰温度与热电偶测量值基本吻合,误差小于 4%。大于 10 μm 的飞灰颗粒与熔渣层碰撞并被黏附,颗粒沉积可简化为一次碰撞。熔渣层厚度沿筒长方向呈非均匀分布,最大厚度约为 2 mm,可近似为牛顿流体的流动边界层。排渣口处熔渣温度大于黏度 25 Pa·s 对应的温度,能够实现稳定液态排渣。立式旋风炉捕渣率大于 0.6,捕渣率分布主要受配风方式的影响。

关键词: 旋风燃烧;准东煤;传热传质;液态排渣;捕渣率

中图分类号: TQ546 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)11-0112-06

Numerical Simulation on the Cyclone Combustion of Zhundong Coal

ZHANG Xiangyu, YANG Yu, BAI Wengang, XU Hongjie

(National Engineering Research Center of Clean Coal Combustion, Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd, Xi'an 710032, China)

Abstract: To understand the combustion characteristics of Zhundong coal in the cyclone furnace with liquid slagging, numerical simulation of cyclone combustion process of Zhundong coal was conducted. The heat and mass transfer models were established to solve the thermophysical parameters of the slag film, and the parameters were introduced into the combustion CFD model as the boundary condition. The results show that the calculated flame temperature is consistent with the measured value of thermocouple, and the maximum error is less than 4%. The ash particles larger than 10 μm may collide with the slag film and be adhered to the slag, and the particle deposition can be simplified to a single collision. The slag film thickness is non-uniformly distributed along the cyclone furnace length, and the maximum thickness is about 2 mm. The slag film can be approximated as the flow boundary layer of Newtonian fluid. The slag temperature in the slagging outlet is higher than the temperature corresponding to the one with a viscosity of 250 Pa·s, and the liquid slagging is stable. The slag capture rate of vertical cyclone furnace is higher than 0.6, and its distribution is influenced mainly by the air supply mode.

Keywords: cyclone combustion; Zhundong coal; heat and mass transfer; liquid slagging; slag capture rate

我国的一次能源结构决定了煤电在未来相当长时间内仍然是保障电力稳定供应的主力^[1]。我国新

疆地区准东煤储量达 3 900 亿 t,其中探明储量 2 000 亿 t,将成为西部重要的煤电产业基地和特高压输电起点。准东煤的清洁高效利用是目前研究的热点问题^[2]。

准东煤易沾污和结渣,目前我国新疆地区燃用准东煤的锅炉普遍通过掺烧低钠煤来缓解结渣和沾污。液态排渣旋风燃烧技术是实现电站锅炉全烧准东煤的潜在途径。旋风燃烧技术在国外的研究与应用已经比较成熟,在美国旋风炉已广泛应用于 PRB (powder river basin)高碱煤的燃烧^[3]。在国内旋风技术主要用于煤粉和生物质的气化^[4],旋风燃烧煤粉炉仅在一些小容量自备电厂中采用^[5],还缺乏大机组运行的经验,尤其是改烧准东煤时技术消纳能力存在明显不足。

液态排渣造成炉内的燃烧反应及传热过程极为复杂,灰渣在壁面沉积后将形成液态渣膜,熔渣侧与燃烧侧相互影响、相互耦合^[6]。很多研究工作采用燃烧数值模拟和结渣建模相结合的方法来研究旋风燃烧过程。周俊虎等将数值模拟得到的气化炉内温度分布代入渣生成模型中,求解了不同控制区域固态渣层厚度和液态渣层厚度,但模型中未考虑渣层对燃烧的反馈作用^[7-8]。汪小慈等详细探讨了液态排渣炉内灰渣沉积以及煤粉的附壁燃烧机理,提出了一种考虑渣液流动的粉煤壁面沉降燃烧模型,但该方法未将附壁燃烧模型与炉内燃烧进行很好地耦合^[9-10]。刘升等在煤灰渣颗粒壁面沉积模型的基础上考虑壁面反应,建立了完善的渣层流动、传热传质和相变模型,并以炉内计算结果为边界条件求解了煤气化炉内液态渣层温度和厚度的分布^[11-12]。

在目前的研究中,燃烧侧与熔渣侧的计算相对独立,未考虑壁面熔渣层对炉内燃烧的影响,导致数值模拟结果与实际燃烧过程存在较大差别。本文将结合壁面熔渣层传热传质模型和炉内燃烧 CFD 模拟,研究准东煤旋风燃烧时温度、熔渣层厚度和捕渣率的分布特性,并与试验数据对比来验证计算模型的准确性。

1 计算模型

模拟计算的对象为一立式旋风炉试验台,如图 1 所示,主要包括立式旋风筒、过渡烟道、燃尽室、水平烟道、空气预热器和旋风除尘器等部分。旋风筒设计容量为 100 kW,高度为 1 100 mm,筒径为 300 mm。炉内壁为耐火混凝土,炉膛及烟道均采用水系统冷却。煤粉和一次风由旋风筒顶部喷入,助燃

二次风由筒壁切向分级送入。

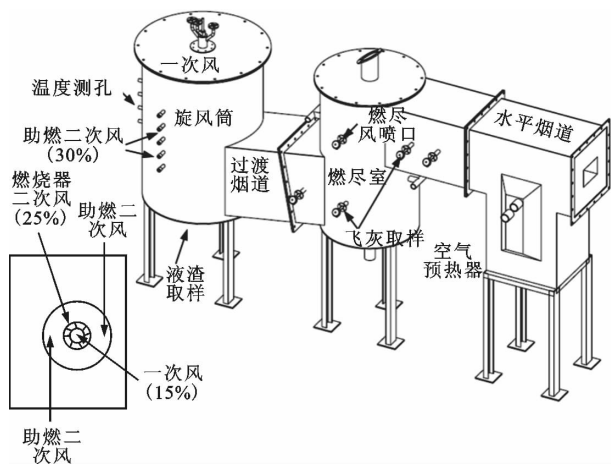


图 1 立式旋风炉试验台示意图

主要考虑旋风筒内的燃烧过程,建立燃烧侧 CFD 模型如图 2 所示。由于二次风喷口附近存在较高的速度梯度和温度梯度,对一二次风混合区域进行网格加密。炉膛采用六面体网格,二次风喷口不规则区域采用四面体网格过渡,网格总数为 1.56×10^7 。网格数继续增加时,模拟结果的差异性很小。

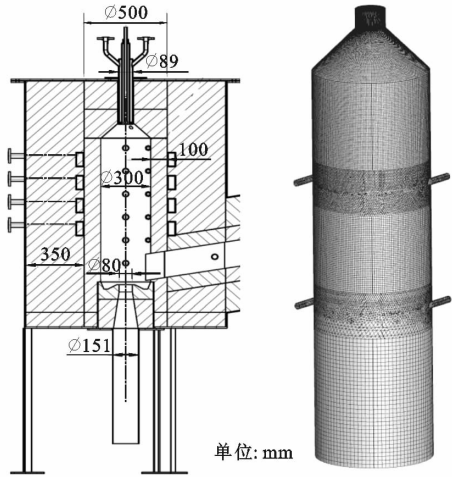


图 2 燃烧侧 CFD 模型

热态计算采用三维稳态模型,气相湍流流场采用 realizable $k-\epsilon$ 双方程模型,颗粒相采用拉格朗日离散相模型。煤粉燃烧采用 PDF 模型,采用双匹配速率模型模拟煤粉挥发分的析出,焦炭燃烧采用动力/扩散控制燃烧模型。用 P-1 模型计算辐射传热。熔渣层辐射率受化学组分影响较小,仅与温度有关, $1\,200 \sim 1\,400\,^{\circ}\text{C}$ 范围内取值 0.69^[13]。

一二次风喷口采用速度入口边界条件,烟气出口选择压力出口边界条件。壁面采用无滑移边界,壁面温度采用定壁温计算,数值由熔渣侧传热传质

模型校正。

旋风燃烧条件下,高温熔融的飞灰颗粒在炉内气流的带动下在壁面沉积燃烧并形成液态的渣层。熔渣边界层在流动过程中与烟气侧发生传热传质,熔渣层厚度和温度均呈非均匀分布,对应的熔渣物性参数也将发生改变。传统的集总参数模型在精度和空间分辨率上均存在不足^[14],因此本文针对熔渣侧建立了分布参数的传热传质模型,如图3所示。

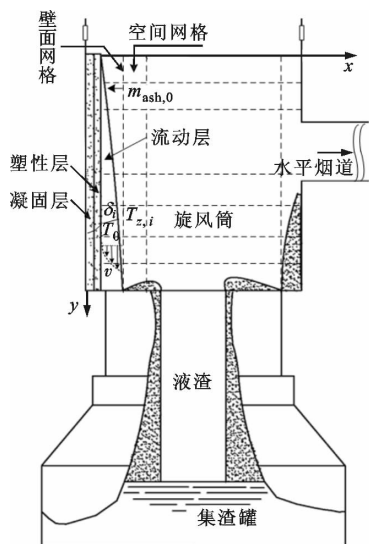


图3 熔渣侧传热传质模型

一般认为液态渣膜分为3层:第1层为向火面的真实液态流动层;第2层为塑性层;第3层为不流动的凝固渣层^[15]。由于熔渣的流动和传热传质主要发生在液态流动层,因此本文中的熔渣侧只考虑流动层。

炉内烟气通过辐射和对流的方式将热量传递给熔渣膜,将渣膜与炉壁之间的热量传递简化为沿法线方向上的多层壁导热,传热方程如下式所示

$$q_w = \frac{\lambda}{\delta_i} (T_{z,i} - T_0) \quad (1)$$

式中: i 表示壁面网格单元数,这里假定每个壁面网格内热物性参数是均匀的; q_w 表示壁面热流密度; T_z 表示渣膜表面温度; T_0 表示灰临界温度; δ 表示液渣流动层厚度; λ 表示液渣流动层导热系数。由于熔渣内温降幅度较小,可假定熔渣层导热系数不变。

高温熔融的颗粒与渣膜发生碰撞,并被渣层捕集。熔渣层内的传质方程如下

$$\int m_{ash,i} di = \pi D \rho \int_0^{\delta_i} v_i dx \quad (2)$$

式中: m_{ash} 表示飞灰颗粒质量沉积速率; D 表示旋风筒内径; ρ 表示熔渣密度; v 表示渣膜流动速度。在

每个网格内,熔渣层的流动可简化为黏性牛顿流体的边界层流动,流变方程如下式所示

$$0 = u_i \frac{d^2 v_i}{dx^2} + \frac{du_i}{dx} \frac{dv_i}{dx} + \rho \quad (3)$$

式中: ρ 代表重力项,这里忽略烟气曳力项; u 表示熔渣的黏度,可通过黏温特性试验确定,其随温度的变化如下式所示

$$\left. \begin{aligned} u_i &= u_0 e^{-\varphi_i x / \delta_i} \\ \varphi_i &= \ln(u_0 / u_{z,i}) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中 u_0 为熔渣临界温度下的黏度, u_z 为熔渣表面温度对应的黏度, φ 为量纲一的数。将边界条件代入式(1),离散得到液渣流动层内速度分布为

$$v_i = \frac{\rho \delta_i}{u_0 \varphi_i} \left[\left(\delta_i + \frac{\delta_i}{\varphi_i} \right) (e^{\varphi_i x / \delta_i} - 1) - x e^{\varphi_i x / \delta_i} \right] \quad (5)$$

液态渣膜的形成主要受炉内复杂气固两相流动、温度分布等影响,同时渣膜的流动和分布特性又会影响炉内的燃烧和换热过程。为提高旋风燃烧数值模拟的精度,提出如图4所示的联合迭代计算流程,其原理是利用燃烧侧CFD模拟更新颗粒沉积速率和壁面热流密度,利用熔渣侧传热传质模型更新壁面温度,两者交叉迭代,直到收敛。燃烧侧壁温初值取1500 K,熔渣侧沿筒长方向划分为6个网格。

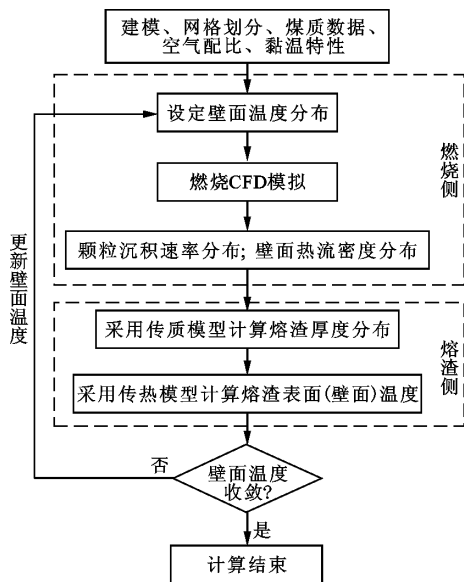


图4 联合迭代计算流程

2 结果及分析

试验煤样为天池煤,煤质分析数据如表1所示,属于高挥发分、低灰分的准东高碱煤,收到基低位发热量为17660 kJ/kg。煤灰碱酸比为2.35,煤灰流动温度为1473 K,灰渣密度为2400 kg/m³。

表 1 煤质分析数据

$w/\%$ (工业分析)			$w/\%$ (元素分析)				
M_{ar}	A_{ar}	V_{daf}	C_{ar}	H_{ar}	N_{ar}	O_{ar}	$S_{t,ar}$
30.8	7.62	31.26	48.05	2.13	0.45	9.17	1.78

注:M、A、V 分别表示水分、灰分、挥发分;下标 ar 表示收到基,下标 daf 表示干燥无灰基,下标 t 表示全部。

利用旋转高温黏度计在弱还原性气氛下测定 3 种典型准东煤灰的黏温曲线如图 5 所示。熔渣排出过程相当于降温黏度特性。熔渣在降温过程中,黏度曲线会产生两个明显的拐点,高温拐点即对应灰临界温度^[16],表征熔渣开始析出晶体。试验煤种灰渣的临界温度为 1 543 K,临界黏度为 8 Pa·s。

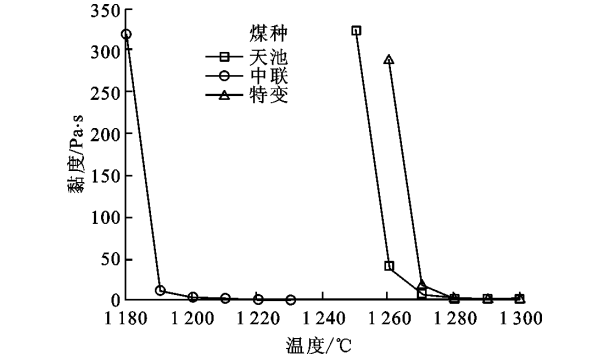


图 5 准东煤灰渣黏温特性

旋风炉内颗粒运动及沉积特性主要受筒径、煤粉细度和一二次风速的影响。不同粒径颗粒的运动轨迹如图 6 所示。可以看出,飞灰颗粒在烟气曳力作用下向壁面富集,10 μm 及以下细颗粒在近壁面区域随烟气绕流,粗颗粒与壁面碰撞并被黏附。颗粒粒径越大,到达壁面的速度越快。高温熔融的颗粒与渣膜均具有很强的黏性,颗粒与渣膜碰撞后动量损失很大,撞击反力远小于刚性碰撞,颗粒着膜可认为是一次有效的^[17]。因此,可以假定飞灰颗粒与渣膜一次碰撞后即被黏附。

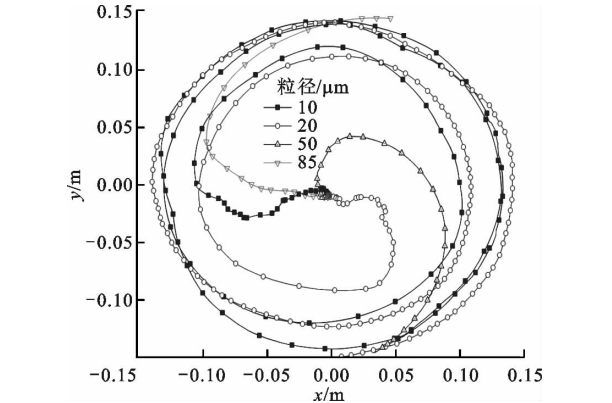


图 6 飞灰颗粒运动轨迹

使用 LS 颗粒粒度分析仪对旋风筒出口(水平烟道处)飞灰样品进行粒径分布测试,结果如图 7 所示。旋风筒出口飞灰粒径均小于 10 μm,远小于室燃炉飞灰粒径。颗粒相运动轨迹的模拟结果与粒径测试数据基本吻合,表明对粗颗粒与渣膜碰撞并黏附的假设是合理的。

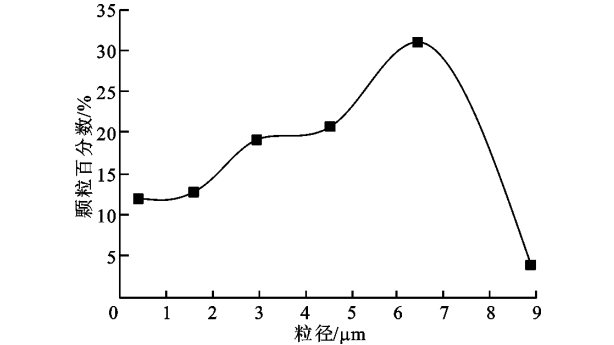


图 7 飞灰粒径分布

迭代收敛后火焰温度分布如图 8 所示。采用 B 型热电偶在 6 个观火孔(见图 2)处测量火焰温度,对燃烧侧模拟结果进行校核。沿筒长方向,火焰温度逐渐降低;沿炉膛横截面,温度先升高后降低。这表明在旋风燃烧条件下,煤粉贴壁燃烧,炉膛中心温度低,壁面附近温度高。温度计算结果与热电偶测量值基本吻合,误差小于 4%。

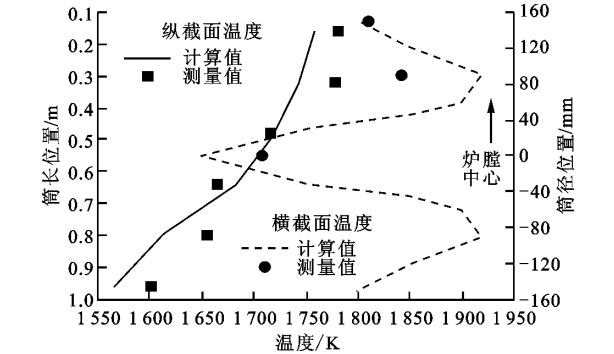


图 8 火焰温度分布

颗粒沉积速率与壁面热流密度分布如图 9 所示。可以看出:沿筒长方向随着火焰温度降低及煤粉燃尽,壁面热流密度逐渐减小;颗粒沉积速率分布沿筒长方向先升高后降低,这与二次风喷口位置及配风方式有关。采用分级送风时,助燃二次风由第 2 级(高度 0.32 m)和第 4 级(高度 0.64 m)喷口送入,风量各占 30%,因此颗粒沉积速率在第 2 级达到最大值,然后逐渐减小到 0,颗粒沉积在炉膛上半部已基本完成。

根据沉积速率和壁面热流密度更新液态渣膜的表面温度和厚度分布,结果如图 10 所示。主燃区火

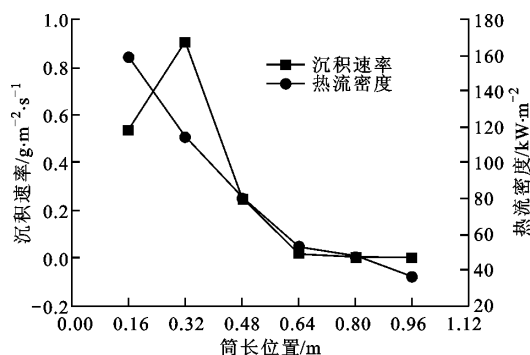


图9 颗粒沉积速率与壁面热流密度分布

焰温度高,壁面热流密度大,但颗粒沉积少,渣膜厚度小,渣膜表面温度较低。随着颗粒沉积量增加,渣膜厚度逐渐增加,渣膜流动速度加快,表面温度升高。在炉膛下部,由于壁面散热的影响,烟气温度和壁面热流密度减小,熔渣表面温度降低,渣膜流动速度减慢,引起渣膜厚度增加。熔渣流动层厚度约为2 mm,远小于旋风筒直径。为保证正常液态排渣,应根据炉膛底部排渣口处熔渣温度建立边界条件^[18]。

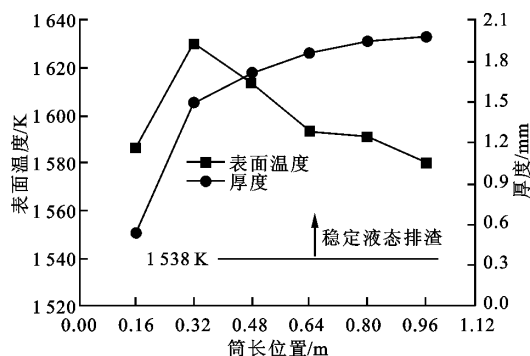


图10 液态渣膜表面温度与厚度分布

捕渣率是旋风炉设计和运行的重要参数,它表征了熔渣室中收集的灰渣占燃料煤总灰量的份额。捕渣率的试验值通过测量一段时间内除尘器收集的飞灰质量换算得到。图11给出了模拟计算得到的捕渣率沿筒长方向的分布。可以看出,捕渣率先升

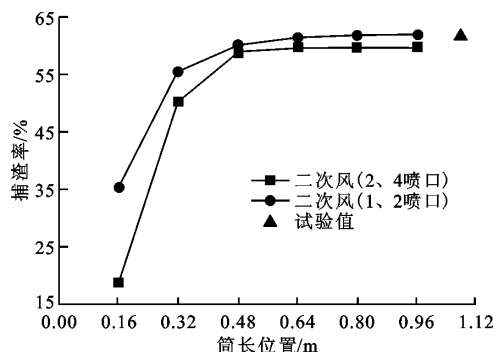


图11 沿筒长方向的捕渣率分布

高后逐渐稳定,并与试验值基本吻合。当筒壁二次风由2、4喷口提前到1、2喷口时,旋风筒上部捕渣率增加,表明配风方式对捕渣率分布具有很大影响。在未设置捕渣管束的条件下,立式旋风炉前置室捕渣率达到60%。

3 结论

本文提出了一种耦合燃烧侧CFD模拟和熔渣侧传热传质模型的联合迭代算法,并对准东煤旋风燃烧过程进行了模拟研究,温度计算误差小于4%。旋风炉内颗粒在熔渣层上的沉积可简化为一次碰撞即黏附,烟气中残留飞灰的粒径小于10 μm。熔渣流动层厚度约为2 mm,远小于炉膛直径,可近似为牛顿流体的流动边界层。旋风炉燃用天池煤时,排渣口处熔渣温度高于黏度25 Pa·s对应的温度,能够实现稳定液态排渣。数值计算给出了捕渣率沿筒长方向的近似分布,有助于指导配风方式调整,防止局部积渣。

参考文献:

- [1] XU L, LIU J, KANG Y, et al. Safely burning high alkali coal with kaolin additive in a pulverized fuel boiler [J]. Energy & Fuels, 2014, 28(9): 5640-5648.
- [2] WEI B, TAN H, WANG Y, et al. Investigation of characteristics and formation mechanisms of deposits on different positions in full-scale boiler burning high alkali coal [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 119(5): 449-458.
- [3] CHUDNOVSKY B, TALANKER A, BERMAN Y, et al. Prediction of performance from PRB coal fired in utility boilers with various furnace and firing system arrangements [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010, 32(12): 27-34.
- [4] 李小宇, 李广宇, 许世森, 等. 液态排渣煤气化炉炉内灰渣的流动和换热研究 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(14): 12-17.
- LI Xiaoyu, LI Guangyu, XU Shisen, et al. Research on flow and heat transfer of slag film in gasifier with liquid slag-removal process [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(14): 12-17.
- [5] 李代力, 王智化, 许岩韦, 等. 液态排渣炉燃烧过程的数值模拟 [J]. 浙江大学学报, 2013, 47(2): 280-286.
- LI Daili, WANG Zhihua, XU Yanwei, et al. Numerical simulation of combustion process for a slag tapping boiler [J]. Journal of Zhejiang University, 2013, 47

- (2): 280-286.
- [6] VANEYK P J, ASHMAN P J, NATHAN G J. Mechanism and kinetics of sodium release from brown coal char particles during combustion [J]. *Combustion and Flame*, 2011, 158(12): 2512-2523.
- [7] 周俊虎, 匡建平, 周志军, 等. 粉煤气化炉冷态和热态流场分布特性的数值模拟 [J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(20): 30-35.
ZHOU Junhu, KUANG Jianping, ZHOU Zhijun, et al. Numerical simulation for pulverized coal gasifier's fluid flow characteristic on cold and hot condition [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(20): 30-35.
- [8] 周俊虎, 匡建平, 周志军, 等. 粉煤气化炉喷嘴受热分析和渣层模型的数值模拟 [J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(26): 23-29.
ZHOU Junhu, KUANG Jianping, ZHOU Zhijun, et al. Numerical simulation for pulverized coal gasifier heating nozzle and slag building model [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(26): 23-29.
- [9] WANG X, ZHAO D, HE L, et al. Modeling of a coal-fired slagging combustor: development of a slag sub-model [J]. *Combustion & Flame*, 2007, 149(3): 249-260.
- [10] WANG X, ZHAO D, HE L, et al. A review on numerical modeling of ash deposition during the process of pulverized coal combustion [J]. *Advances in Mechanics*, 2005, 35(3): 417-426.
- [11] LIU S, HAO Y. Numerical simulation of flow and heat transfer of a slag layer in an entrained-flow coal gasifier [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2009, 30(4): 631-634.
- [12] 刘升, 郝英立, 杜敏, 等. 气流床煤气化炉壁面反应模型 [J]. *化工学报*, 2010, 61(5): 1219-1225.
LIU Sheng, HAO Yingli, DU Min, et al. A model of wall reaction in entrained-flow coal gasifier [J]. *CIESC Journal*, 2010, 61(5): 1219-1225.
- [13] ZHANG X, ZHENG S, ZHOU H, et al. Simultaneously reconstruction of inhomogeneous temperature and radiative properties by radiation image processing [J]. *International Journal of Thermal Science*, 2016, 107: 121-130.
- [14] SEGGIANI M. Modelling and simulation of time varying slag flow in a Prenflo entrained-flow gasifier [J]. *Fuel*, 1998, 77(14): 1611-1621.
- [15] RICHARDS G H, SLATER P N, HARB J N. Simulation of ash deposit growth in a pulverized coal fired pilot scale reactor [J]. *Energy & Fuels*, 1993, 7(6): 774-781.
- [16] WATANABE H, OTAKA M. Numerical simulation of coal gasification in entrained flow coal gasifier [J]. *Fuel*, 2006, 85(6): 1935-1943.
- [17] 水利电力部热工研究所. 旋风炉及其灰渣综合利用 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1979: 44-46.
- [18] DONG G, LI Z, ZHANG Z. Study on the vortex structure of coupling combustion stabilizer with square cylinder-strong swirl flow [J]. *Procedia Engineering*, 2015, 99: 741-745.

[本刊相关文献链接]

要雅姝,温渡,周屈兰,等. 高温水蒸气氛围中煤燃烧特性研究. 2018, 52(12): 84-92. [doi: 10. 7652/ xjtuxb201812013]

李沁伦,王璐凯,刘银河,等. 300 MW 一次再热亚临界燃煤发电站系统改进研究. 2018, 52(9): 54-63. [doi: 10. 7652/ xjtuxb201809007]

陶子宸,王长安,王鹏乾,等. 半焦富氧燃烧扩散效应研究. 2018, 52(9): 155-161. [doi: 10. 7652/ xjtuxb201809021]

赵磊,王长安,朱晨钊,等. 灰化方式和温度对新疆高碱煤灰理化特性的影响. 2018, 52(8): 139-145. [doi: 10. 7652/ xjtuxb201808021]

王振林,李祥晟,庄士超,等. 旋进涡核与火焰面耦合作用对燃烧稳定性影响的数值研究. 2018, 52(7): 60-67. [doi: 10. 7652/ xjtuxb201807009]

王朝阳,常仁杰,朱庆玉,等. 两种水煤比控制策略下调峰机组的能耗特性. 2018, 52(7): 115-122. [doi: 10. 7652/ xjtuxb201807017]

李艳,谭厚章,王学斌,等. 生物质高温热解气、液、固三相产物及碳烟生成特性. 2018, 52(1): 61-68. [doi: 10. 7652/ xjtuxb201801010]

王长安,Justin K. WATSON,Enette LOUW,等. 耦合堆垛与孔径分布的高碱金属煤焦分子建模方法. 2017, 51(9): 1-10. [doi: 10. 7652/ xjtuxb201709001]

(编辑 荆树蓉)