

# 低气压下链条炉的运行特性与热力计算方法

宗思雨<sup>1</sup>, 杜勇博<sup>1</sup>, 徐琼<sup>1</sup>, 张井坤<sup>1</sup>, 笪耀东<sup>2</sup>, 车得福<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 中国特种设备检测研究院, 100029, 北京)

**摘要:** 针对低气压导致锅炉出现的出力不足、排烟温度升高及效率下降等问题,以某 10 t/h 燃煤链条炉为研究对象,采用数值方法分析了气压下降对炉膛内温度分布、煤的燃尽情况和炉膛出口烟气参数的影响规律。通过用户自定义函数实现煤颗粒在炉排上的运动,并根据实际链条炉的炉排结构,对模拟真实炉排孔隙的三维物理模型加以改进。考虑到燃烧中灰层不断累积在炭核表面,阻碍氧气扩散进而对燃烧速率造成的影响,改进了焦炭燃烧模型。数值结果表明:随着气压降低,炉排煤颗粒相较常压下的燃烧进程推迟,焦炭燃尽率减小;炉膛出口的  $\text{NO}_x$  排放量先增大后减小,其在 77.273 kPa 下的增幅约为常压下的 8.79%;低气压下,气体火焰黑度减小造成辐射传热量减少,炉膛出口烟气温度升高,但气压过低时,由于不完全燃烧热损失的增大,炉膛出口烟气温度略有降低。提出的  $M$  数(火焰形状系数)修正公式可为低气压下采用热力计算方法预测炉膛出口烟气温度提供参考。

**关键词:** 链条炉;低气压;燃煤;热力计算

**中图分类号:** TK16 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.7652/xjtuxb202508006 **文章编号:** 0253-987X(2025)08-0053-11

## Operational Characteristics and Thermodynamic Calculation Method for Chain-Grate Stokers under Low-Pressure Conditions

ZONG Siyu<sup>1</sup>, DU Yongbo<sup>1</sup>, XU Qiong<sup>1</sup>, ZHANG Jingkun<sup>1</sup>, DA Yaodong<sup>2</sup>, CHE Defu<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China)

**Abstract:** To address the issues of insufficient output, increased flue gas temperature, and decreased efficiency caused by low pressure in boilers, this study focuses on a 10 t/h coal-fired chain grate boiler. A numerical method is employed to analyze the effects of pressure drop on temperature distribution within the furnace, coal burnout, and flue gas parameters at the furnace exit. Through a user-defined function, the motion of coal particles on the grate is simulated, and the three-dimensional physical model is improved to accurately reflect the actual grate structure. Considering the accumulation of ash on the surface of the carbon core during combustion, which hinders oxygen diffusion and affects the combustion rate, the coke combustion model is refined. Numerical results indicate that as pressure decreases, the combustion process of coal particles on the grate is delayed compared to normal pressure, resulting in a reduced coke burnout rate. The  $\text{NO}_x$  emissions at the furnace exit initially increase and then decrease, with an increase of

收稿日期: 2025-01-13。 作者简介: 宗思雨(2000—),女,硕士生;车得福(通信作者),男,教授,博士生导师。

基金

项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFF0600603)。

网络出版时间: 2025-04-09

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20250408.2036.002>

approximately 8.79% at 77.273 kPa compared to normal pressure. Under low pressure, the reduced blackness of the gas flame leads to decreased radiative heat transfer, causing an increase in the flue gas temperature at the furnace exit. However, when the pressure is too low, the increase in heat loss due to incomplete combustion slightly lowers the furnace exit flue gas temperature. The proposed correction formula for the  $M$  number provides a reference for predicting the flue gas temperature at the furnace exit using thermodynamic calculation methods under low pressure conditions.

**Keywords:** chain boiler; low atmospheric pressure; coal burning; thermodynamic calculation

我国幅员辽阔,海拔高度超过 2 000 m 的区域约占国土面积的 30%,且大多位处西部地区。在国家西部大开发政策的鼓励下,广大西部地区工业事业迅猛发展,越来越多的工业锅炉在高海拔地区投入运行。链条锅炉是常用的固体燃料设备,由于链条炉运行操作简单,能够燃烧各种不同水分和碳含量的燃料,且便于生物质和煤共燃,因而在工业生产中被广泛使用。目前,链条炉在我国工业燃煤/生物质锅炉中占据很大份额。高原地区由于能量需求密度较低,且工业生产企业间距离较远,不利于采用热电联产集中供热,更适合采用小型分布式供热,因此煤粉炉使用较少而链条炉应用相当广泛<sup>[1]</sup>。

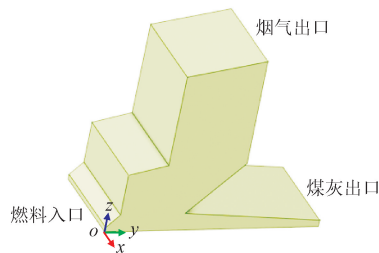
锅炉大多针对标准大气压设计,并未将高原环境因素对锅炉运行的影响考虑在内。高原地区海拔高,气压低,空气密度低,相应氧气分压即氧气质量分数也低于标准大气压<sup>[2]</sup>,这会对炉膛内的燃烧与传热产生负面影响,导致锅炉出力不足,排烟温度升高,热效率减小,还会出现过热器沾污加剧、对流受热面局部过早磨穿等问题<sup>[3-4]</sup>,大大降低了锅炉运行的经济性和安全性。随着气压降低,煤的燃烧速率减小,燃尽时间也将延长<sup>[5-8]</sup>。针对炉膛传热方面,研究人员采用锅炉热力计算方法理论分析得到:低气压下火焰黑度减小,致使炉膛内的辐射传热量减少,造成炉膛出口排烟温度上升<sup>[3,9]</sup>。曾有报道称:某台 4 t/h 锅炉由于运行时出力不足,为保证出力而增大风量,导致炉膛内维持正压,炉门变形,锅炉房内污染严重<sup>[10-11]</sup>。由于锅炉制造成本较高,且采用实验方案的研发成本太高、周期太长,因此越来越多的科研人员选择利用仿真软件来解决工程实际问题,亦能得到误差允许范围内的结果。近年来,由于国外燃煤层燃炉使用骤减,因此对于链条炉模型的研究仍停留在一维床层燃烧模型阶段<sup>[12-14]</sup>,国内学者则侧重于将床层与炉膛相耦合,对锅炉整体流场、温度场等进行研究<sup>[15-19]</sup>。然而,对于高原地区链条炉的运行情况则少有研究。

综上所述,低气压会造成锅炉出力不足、效率减小等,但迄今为止对于高海拔地区层燃炉实际运行特性还认识不足,缺乏系统深入的专门研究来指导高原条件下锅炉的设计和运行。为了保证锅炉能够在高原地区安全稳定高效地运行,研究海拔高度即气压对层燃锅炉运行情况的影响十分必要。本文以某 10 t/h 的燃煤链条锅炉为研究对象,采用数值模拟方法,分析了气压下降对炉内温度分布、煤燃尽情况和炉膛出口烟气参数的影响,为高原层燃锅炉的生产制造及稳定运行提供了理论指导。

## 1 模拟方法

### 1.1 物理模型

本文研究的链条炉是一个单锅筒自然循环水管锅炉,使用 Spaceclaim 软件建立三维物理模型如图 1(a)所示。根据锅炉实际尺寸,设置炉膛高度为 5 100 mm,炉排长度为 6 200 mm,炉膛深度为 2 800 mm,一次风分为 7 个风口。将炉排部分划分为多个不同区域,风口沿炉膛深度方向进行相间均匀布置,以模拟真实炉排的孔隙。考虑到划分的困难程度,将每个一次风口分为 4 个小风口进风,风量均匀分配,具体如图 1(b)所示。沿  $x$  轴负方向为炉膛深度方向,风口和风壁在深度方向相间布置;沿  $y$  轴正方向为炉排移动方向,分为 7 个不同区域;风口在  $y$  方向上的流量不同,炉排通风截面比(炉排面通风孔截面积之和与炉排总面积之比)为 25%。



(a)链条炉三维物理模型

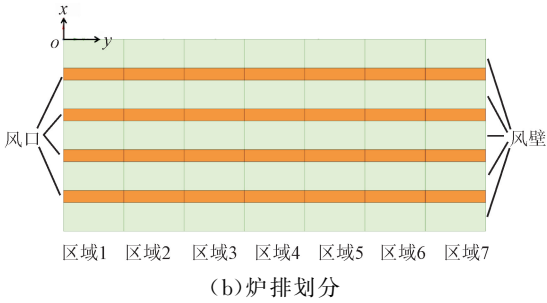


图 1 链条炉物理模型示意图

Fig. 1 Physical model diagram of chain furnace

采用 ICEM 软件对链条炉三维物理模型进行网格划分,具体如图 2 所示。采用结构化六面体网格,网格质量均大于 0.4,满足工程计算中网格最小正交质量大于 0.3 的要求。计算前,首先进行网格无关性验证。设置大气压力为  $1.013 \times 10^5$  Pa,选取网格数分别为 24 万、50 万和 97 万,得到的炉膛出口烟气温度分别为 1 094.8、1 088.1、1 086.7 K。由此可知,网格数为 50 万与 97 万的计算结果相当接近,误差小于 2%。综合考虑到收敛性与计算速度,决定选用网格数为 50 万开展后续数值仿真。

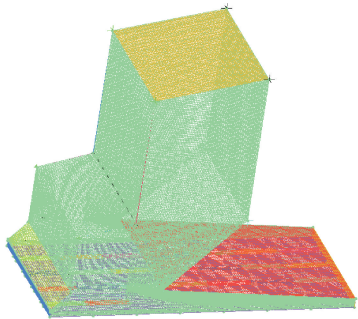


图 2 链条炉三维物理模型网格划分

Fig. 2 Mesh division of three-dimensional physical model of chain furnace

1.2 数学模型

使用商业计算软件 Fluent 对三维链条炉排床层燃烧及炉膛气体燃烧开展数值仿真。由于工业锅炉的燃烧通常处于稳态,因此可假设整个过程为稳态燃烧。连续性方程的一般形式为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = S \tag{1}$$

式中:  $\rho$  为流体的密度;  $t$  为时间;  $u_j$  为沿  $j$  方向的表观速度;  $x_j$  为流体质点沿  $j$  方向的位移;  $S$  为源项,假定在流体中不存在质量源,即  $S = 0$ 。

由组分质量守恒定律,得到组分  $i$  的质量守恒方程如下

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_i) + \text{div}(\rho u_i c_i) = \text{div}(D_i \text{grad}(\rho c_i)) + S_i \tag{2}$$

式中:  $c_i$ 、 $\rho c_i$ 、 $u_i$ 、 $D_i$  分别为组分  $i$  的浓度、质量浓度、表观速度和扩散系数;  $S_i$  为系统内部单位时间内单位体积通过化学反应产生的组分  $i$  的质量。

Navier-Stokes 方程被广泛应用在黏性不可压缩流体的计算中,气相的动量守恒方程如下

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j - \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) = S_{i,M} + S_{i,u_i} \tag{3}$$

式中:  $\mu$  为动力黏度;  $S_{i,M}$  为常规动量源项;  $S_{i,u_i}$  为床层阻力引起的动量损失源项。

能量方程的一般形式如下

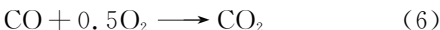
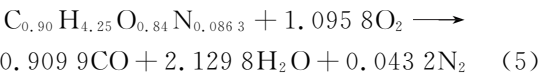
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i}(k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i}) + \tau_{ij} u_j + S_h \tag{4}$$

式中:  $h$  为比热焓;  $k_{\text{eff}}$  为有效热传导系数;  $T$  为温度;  $\tau_{ij}$  为偏应力张量;  $S_h$  为包括化学反应热及其他用户定义的体积热源项。

标准  $k-\epsilon$  模型适用范围广,计算量适中,系数由经验公式给出,收敛性与计算精度能够满足一般的工程计算要求,而 realizable  $k-\epsilon$  模型精度更高<sup>[20]</sup>,因此本文选用 realizable  $k-\epsilon$  模型计算湍流,选用考虑了烟气与颗粒间换热的 DO 模型作为辐射模型。

链条炉中,煤在炉排上的燃烧主要包含水分析出、挥发分析出与燃烧以及焦炭燃烧等过程<sup>[21]</sup>。数值模拟中,假设煤颗粒在炉排上水平运动的同时和底部送入的空气混合并发生反应,因此可看作是气体和固体之间的流动<sup>[22]</sup>。采用欧拉-拉格朗日法将流体的流动视作连续性介质的流动,将颗粒视作离散相,对颗粒相使用拉格朗日法求解颗粒轨道方程,即离散相模型(DPM),就能够计算颗粒轨道和与颗粒相关的传热传质过程,包括化学反应、燃烧等。脱挥发分模型采用 Two-Competing-Rates 模型来描述。由于挥发分与氧气的燃烧反应属于气相均相燃烧,因此本文采用 Species Transport 模型,子模型采用有限速率/涡耗散模型<sup>[23-24]</sup>,综合考虑了动力学和湍流因素,能够规避涡耗散模型出现的超前燃烧问题。

煤的两步反应方程式可写为



式中:  $\text{C}_{0.90} \text{H}_{4.25} \text{O}_{0.84} \text{N}_{0.0863}$  为煤挥发分的分子式。

采用阿伦尼乌斯公式描述式(5)和式(6)的反应

速率

$$V_r = AT_{\exp} \left( -\frac{E}{RT} \right) \quad (7)$$

式中:  $A$  为指前因子;  $E$  为活化能;  $R$  为气体常数。式(5)所对应的指前因子为  $2.119 \times 10^{11}$ , 活化能为  $2.027 \times 10^8 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{mol})$ ; 式(6)所对应的指前因子为  $2.239 \times 10^{12}$ , 活化能为  $1.7 \times 10^8 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{mol})$ 。

焦炭燃烧是气固两相燃烧, 本文采用动力学/扩散控制模型, 假设焦炭的燃烧速率同时受化学反应动力学和扩散控制参数的影响。若粒子直径不变, 密度变化, 焦炭燃烧的反应速率为

$$R = Kp^n(\text{O}_2) \quad (8)$$

式中:  $p(\text{O}_2)$  为氧气分压力;  $n$  为反应级数,  $0 < n < 1$ ;  $K$  为总反应速率常数, 公式如下

$$K = \frac{1}{(1/K_s + 1/K_d)} \quad (9)$$

式中:  $K_s$ 、 $K_d$  分别为化学反应的速率常数和扩散常数。

如图1所示, 燃料从炉排左侧送入炉膛中, 煤颗粒跟着炉排匀速运动, 同时发生燃烧反应, 直至煤灰从右端尾部排出。由于链条燃煤锅炉使用的煤颗粒直径较大, 而煤块的燃烧过程与煤粉不一样, 假设颗粒间无相对运动, 不会发生磨损, 产生的灰层在表面累积, 大块煤内部还存在传热与传质, 使得层状燃烧更加复杂, 导致链条炉的研究无法直接套用煤粉炉的模拟方法。因此, 本文采用用户自定义函数(UDF)编写代码, 使得煤颗粒在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  这3个方向上的曳力均为0, 并使粒子沿水平方向作匀速运动, 从而模拟煤颗粒在炉膛内与炉排片一直保持相对静止的真实情况。当运动到炉排尾部时, DPM相逃逸, 避免煤灰堆积。考虑到软件互通及耦合较为复杂, 使用该方法模拟链条炉燃料特定的运动方式, 亦便于对气压改变进行操作。

由于链条炉燃用煤颗粒尺寸可达厘米级, 炭核燃烧后产生的灰不断累积在炭核外侧, 影响氧气向中间炭核扩散的速率, 进而影响煤的燃烧速率。而Fluent自带的焦炭燃烧模型中, 碳粒外包裹着一层气膜, 氧气需穿过气膜再与焦炭反应。此过程仅计算了碳粒外的气膜阻力, 也就是氧化剂扩散到碳粒表面的速率, 而未计算灰层阻力对氧气扩散速率的影响<sup>[25-26]</sup>。因此, 本文对颗粒燃烧模型亦做出改进, 基于Fluent动力学/扩散控制模型, 采用UDF改写焦炭燃烧反应速率, 以考虑灰层阻力对氧气扩散速率的影响。假设燃烧过程中颗粒直径不变, 炭

核不断缩小, 灰层增厚, 推导出焦炭燃烧速率

$$R_{\text{char}} = \frac{A_{\text{char}}}{M(\text{O}_2)} \alpha S_s c_{\infty} \frac{1}{k_r^{-1} + k_m^{-1} + k_{\text{ash}}^{-1}} \quad (10)$$

式中:  $A_{\text{char}}$  为焦炭相对原子质量;  $M(\text{O}_2)$  为氧气相对分子质量;  $\alpha$  为每摩尔氧气消耗的焦炭物质的量;  $S_s$  为颗粒表面积;  $c_{\infty}$  为气膜表面的氧气浓度;  $k_m$  为气膜扩散速率;  $k_r$ 、 $k_{\text{ash}}$  分别为动力燃烧速率和灰层扩散速率, 可写为

$$k_r = AT_s \exp \left( -\frac{E}{RT_s} \right) \quad (11)$$

$$k_{\text{ash}} = \frac{L_{\text{ash}}}{D_{\text{ash}}} \quad (12)$$

式中:  $T_s$  为颗粒温度;  $L_{\text{ash}} = (d - d_c)/2$ , 为灰层厚度,  $d$ 、 $d_c$  分别为颗粒直径和未反应的炭核直径;  $D_{\text{ash}}$  为氧气在灰层中的扩散系数。

未反应炭核直径  $d_c$  可由燃烧反应中的灰分守恒计算得到, 写为

$$d_c = \sqrt[3]{\frac{\rho d^3 - \rho_{0, \text{wvf}} d_{0, \text{wvf}}^3 (1 - Y_{\text{char, wvf}})}{\rho_{0, \text{wvf}} Y_{\text{char, wvf}}}} \quad (13)$$

式中:  $\rho_{0, \text{wvf}}$  为焦炭开始反应时干燥无挥发分煤的密度;  $d_{0, \text{wvf}}$  为焦炭开始反应时的直径;  $Y_{\text{char, wvf}}$  为干燥无挥发分煤中碳的质量分数。

链条炉煤反应产生的氮氧化物大多为  $\text{NO}$  和  $\text{NO}_2$ <sup>[27]</sup>。  $\text{NO}$  体积分数大致占比95%,  $\text{NO}_2$  则是通过少量  $\text{NO}$  在火焰带下游或是排放在大气中后氧化产生。煤反应生成的  $\text{NO}_x$  来源有3种<sup>[28]</sup>, 大部分为燃料型  $\text{NO}_x$ , 占总氮氧化物质量的75%~90%, 热力型  $\text{NO}_x$  占10%左右, 快速型  $\text{NO}_x$  较少<sup>[29]</sup>。因此, 本文在模拟过程中仅考虑了热力型和燃料型  $\text{NO}_x$  的生成。

采用改进焦炭燃烧模型与Fluent自带模型计算得到的温度场对比如图3所示, 具体的模拟结果见表1。由图3可见, 改进后的炉膛出口排烟温度为1088.1 K, 处于链条炉实际运行数据范围内。其炉膛最高温度相对更低, 炉膛出口排烟温度降低, 煤颗粒的焦炭燃尽率也降低, 这是由于自有模型不计

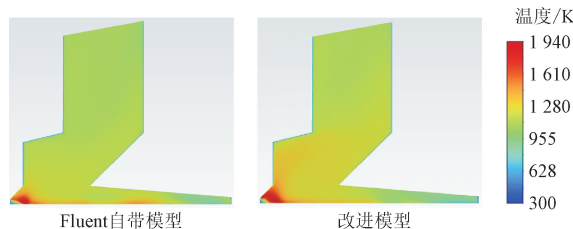


图3 自带模型与改进模型炉膛中心纵截面的温度场对比  
Fig. 3 Comparison of temperature field in longitudinal section of furnace center between original model and improved model



算灰层阻力对氧气扩散速率的减缓,焦炭燃烧速率相对较高,因此燃尽程度更深,燃烧产生的热量更高。同时,未修正燃烧模型燃尽情况随着过量空气系数(1.30~1.60 范围内)的增大而变差,改进后燃尽情况随着过量空气系数增大而变优,的确更符合真实情况,也更加合理。

表 1 自带模型与改进模型模拟结果的对比  
Table 1 Comparison of simulation results between the original model and the improved model

| 模型   | 炉膛最高<br>温度/K | 炉膛出口<br>排烟温度/K | 焦炭<br>燃尽率/% |
|------|--------------|----------------|-------------|
| 自带模型 | 1 975.6      | 1 093.3        | 91.03       |
| 改进模型 | 1 937.8      | 1 088.1        | 88.85       |

1.3 边界条件

将一次风分为 7 个区域,进行分段配风,质量分数关系如表 2 所示。前 6 个区域的风口垂直于炉排送入空气,第 7 个区域风口入风方向和水平线的夹角为 32°。该炉所用燃料的主要成分是煤,过量空气系数设置为 1.50。不同气压下的燃煤和空气入口均设置为质量入口,一次风温度为 473 K,炉排风壁部分壁面条件设置为绝热,炉拱亦设置为绝热。水冷壁面设置为恒温壁面,管内为饱和蒸汽,温度保持不变。设置水冷壁的发射率为 0.8,外壁面温度为 600 K(按照额定蒸汽温度 466.45 K 加上修正温差后取整得到,其中修正温差考虑了管道热阻及管壁污染结渣导致的增温);出口设置为微负压力出口边界。壁面计算边界条件按照标准壁面函数处理。变负荷工况下,将 80%、60%、40% 负荷对应下的入煤量与炉排移动速度分别设置为基准工况的 80%、60%、40%;同时,适量增加过量空气系数,负荷为 80%、60%、40% 时,对应的过量空气系数分别为 1.55、1.60、1.65。

表 2 各区域一次风质量分数

Table 2 Primary air quality core for each region

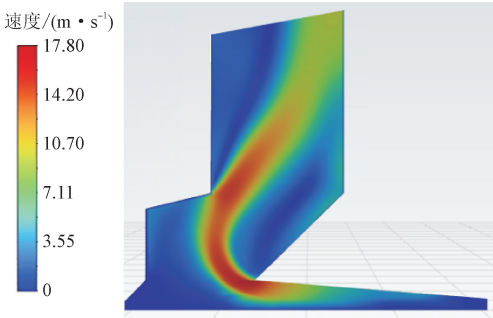
| 区域     | 1 | 2  | 3  | 4  | 5  | 6 | 7 |
|--------|---|----|----|----|----|---|---|
| 质量分数/% | 6 | 15 | 25 | 25 | 15 | 6 | 8 |

2 结果与讨论

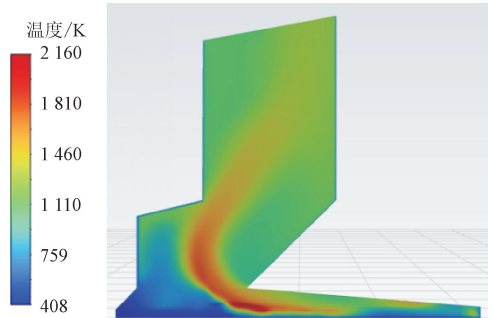
2.1 常压链条炉运行特性

未划分炉排时,常压条件下燃煤链条炉内稳态反应后炉膛中心纵截面处的速度场和温度场云图,以及炉排上燃料的燃烧情况如图 4 所示。可以看

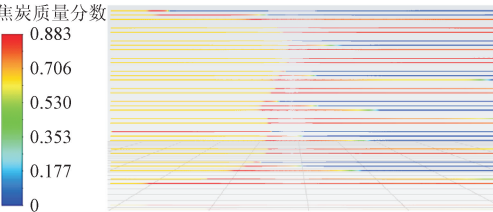
到,燃烧过程开始时为煤颗粒干燥脱水阶段,焦炭含量不变,脱挥发分后碳分数升高,挥发分的燃烧进一步提高了煤颗粒的温度并引燃焦炭,焦炭燃烧后碳含量又降低,燃烧规律符合链条炉排煤燃烧的分阶段过程。



(a) 炉膛中心纵截面速度场



(b) 炉膛中心纵截面温度场



(c) 炉排煤颗粒燃烧情况

图 4 常压下未划分炉排的模拟结果

Fig. 4 Simulation results with undivided grate under normal pressure

过量空气系数为 1.50 时,基准工况下不同风口中心纵截面的温度场分布和炉排上煤的燃烧情况如图 5 所示。由图可见,风口 1 中心纵截面的最低温度为 300 K,最高温度为 1 937.8 K;风口 2 中心纵截面的最低温度为 300 K,最高温度为 1 964.4 K。两个风口中心纵截面处的温度场分布相似,且温度相差不超过 26.6 K,误差不超过 2%。最高温度出现位置相似,均在炉膛内燃料进口处附近的炉排上部,表明燃料在进入炉膛后和氧气接触,迅速发生反应,产生的大量热量使得炉膛前部温度迅速上升。炉排上煤的焦炭质量分数变化也验证了这一点。

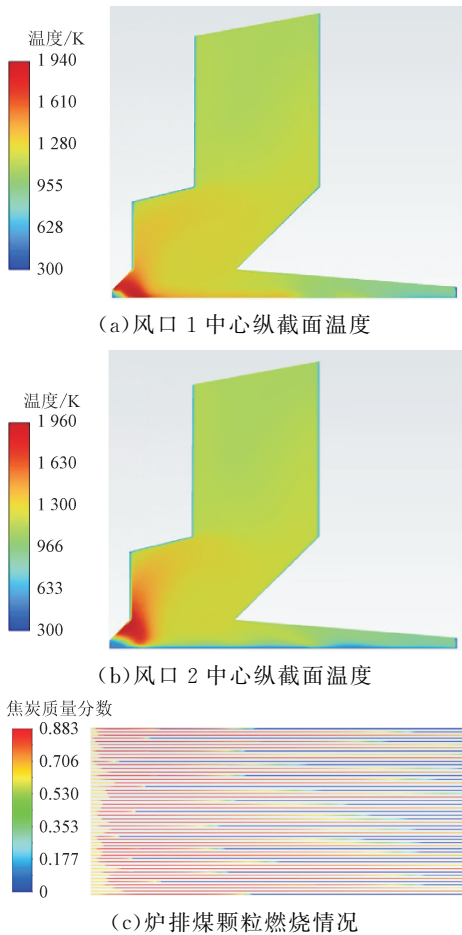


图 5 常压下切分炉排后的模拟结果

Fig. 5 Simulation results after cutting grate under normal pressure

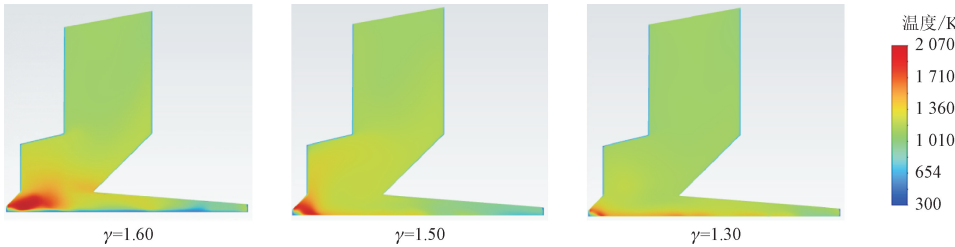


图 6 不同过量空气系数下风口中心纵截面的温度场

Fig. 6 Temperature field of longitudinal section of tuyere center under different excess air coefficient

表 3 不同过量空气系数下的模拟结果

Table 3 Simulation results under different excess air coefficients

| 参数                                                      | 数值            |               |               |
|---------------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
|                                                         | $\gamma=1.60$ | $\gamma=1.50$ | $\gamma=1.30$ |
| 炉膛最高温度/K                                                | 2 067.6       | 1 937.8       | 1 846.8       |
| 炉膛出口排烟温度/K                                              | 1 089.8       | 1 088.1       | 1 073.9       |
| 炉膛平均温度/K                                                | 1 169.2       | 1 145.8       | 1 121.5       |
| 出口 $\text{CO}_2$ 体积分数/%                                 | 4.64          | 4.33          | 2.73          |
| 出口 $\text{NO}_x$ 质量浓度/( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | 389.3         | 344.8         | 325.1         |
| 挥发分燃尽率/%                                                | 100           | 100           | 100           |
| 焦炭燃尽率/%                                                 | 91.90         | 88.85         | 83.42         |

图 6 展示了常压时不同过量空气系数  $\gamma$  下的风口中心纵截面温度场分布,表 3 给出了部分参数的模拟结果。可以看出,不同过量空气系数下的风口中心纵截面温度分布略有不同,但最高温度的出现位置仍基本一致,均在炉膛燃料入口附近的炉排上方。当过量空气系数为 1.30~1.60 时,随着过量空气系数增大,炉膛内通入空气量增加,固体燃料与氧气反应更加充分,燃料燃尽程度加深,焦炭燃尽率增大,燃料燃烧释放出的热量增加,固体未完全燃烧热损失减少,炉膛最高温度和平均温度升高。随着过量空气系数增加,焦炭燃尽更完全,出口  $\text{CO}_2$  的体积分数增加, $\text{NO}$  排放量相对增加。当过量空气系数由 1.50 增大至 1.60 时,由于通入的一次风量增加,燃烧反应更充分,产生的热量增加,炉膛平均温度上升,出口排烟温度也升高。而当过量空气系数由 1.50 减小至 1.30 时,炉膛内的出口排烟温度降低,这是由于通入的一次风量减少,使得炉膛内燃料煤与氧气反应减缓,而氧气量的不足又导致固体未完全燃烧热损失增加,燃烧释放的热量减少,炉膛平均温度降低,因此出口排烟温度相对降低,煤的焦炭燃尽率也降低,不利于燃烧反应的进行和锅炉的正常运行。综合考虑多方面因素,最终选取 1.50 作为基准过量空气系数进行计算。

常压时不同负荷下的风口中心纵截面温度场分布如图 7 所示,部分参数的模拟结果如表 4 所示。可见,由于降低负荷的同时适当增大了过量空气系数,同样质量的燃煤与更充分的空气接触并发生燃烧反应时,燃尽程度增加,其焦炭燃尽率随负荷的降低而增大,出口  $\text{NO}_x$  排放量随负荷的降低而减少。然而,由于锅炉在低负荷运行时消耗的燃煤量大幅减少,释放出的热量大大降低,因此炉膛内的温度相对较低,导致燃烧工况变差,炉膛平均温度随着锅炉负荷的降低而减小,炉膛出口排烟温度也随着负荷

降低而下降。特别是当锅炉负荷小于 50%时,由于炉膛温度骤降,燃烧反应难以继续稳定进行,导致出

力不足,达不到原本的蒸发量,因此锅炉运行效率也大幅降低。

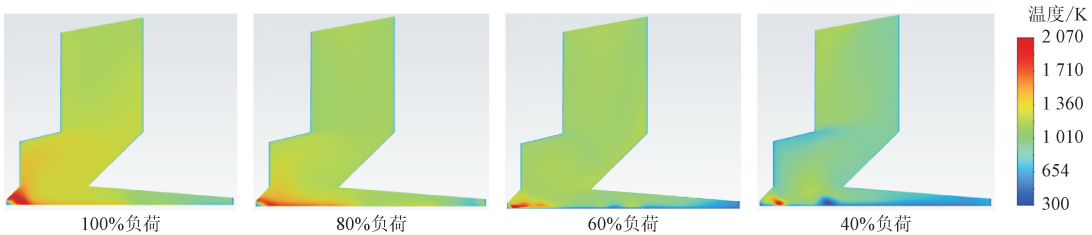


图 7 不同负荷下风口中心纵截面的温度场

Fig. 7 Temperature field of longitudinal section of tuyere center under different load

表 4 不同负荷下的模拟结果

Table 4 Simulation results under different loads

| 参数                                                | 数值      |         |         |         |
|---------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|
|                                                   | 100%    | 80%     | 60%     | 40%     |
|                                                   | 负荷      | 负荷      | 负荷      | 负荷      |
| 炉膛最高温度/K                                          | 1 937.8 | 1 833.1 | 1 969.7 | 1 940.5 |
| 炉膛平均温度/K                                          | 1 145.8 | 1 087.5 | 1 085.2 | 1 011.8 |
| 炉膛出口排烟温度/K                                        | 1 088.1 | 1 054.1 | 1 049.1 | 933.5   |
| 出口 CO <sub>2</sub> 体积分数/%                         | 4.33    | 3.91    | 4.12    | 4.67    |
| 出口 NO <sub>x</sub> 质量浓度/<br>(mg·m <sup>-3</sup> ) | 344.8   | 260.4   | 205.1   | 187.3   |
| 挥发分燃尽率/%                                          | 100     | 100     | 100     | 100     |
| 焦炭燃尽率/%                                           | 88.85   | 92.3    | 92.32   | 93.65   |

表 5 为中国特检院提供的同一型号(SHW21-

1.25/130/70-AⅡ)两台锅炉在 2 690 m 海拔下运行时的能效测试数据。可见,负荷越高,排烟温度越高,焦炭燃尽率越低,NO<sub>x</sub> 排放量越高。计算结果与实际测试数据的变化趋势相吻合,进一步验证了本文模拟方法的合理性。

表 5 高原燃煤锅炉能效测试数据

Table 5 High altitude boiler energy efficiency test data

| 负荷/%  | 排烟<br>温度/℃ | 热效率/<br>% | 焦炭<br>燃尽率/% | NO <sub>x</sub> 质量浓度/<br>(mg·m <sup>-3</sup> ) |
|-------|------------|-----------|-------------|------------------------------------------------|
| 58.21 | 106        | 73.76     | 82.57       | 284.91                                         |
| 88.88 | 109.3      | 70.87     | 79.15       | 295.12                                         |

2.2 低气压链条炉运行特性

过量空气系数取 1.50 时,不同气压  $p_a$  下链条炉风口中心纵截面的温度场分布如图 8 所示。

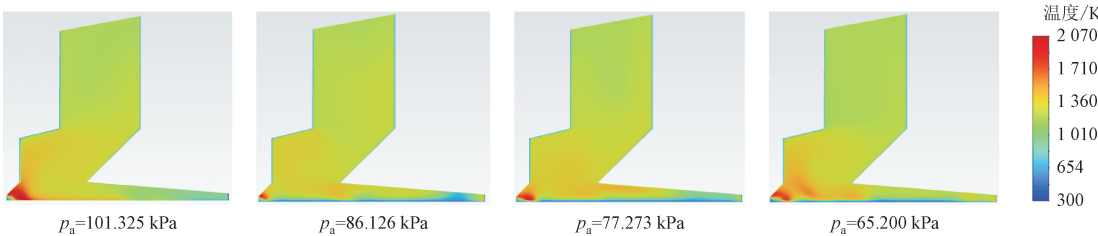


图 8 过量空气系数为 1.50 时不同气压下风口中心纵截面的温度场

Fig. 8 Temperature field of longitudinal section of tuyere center under different pressure when excess air coefficient is 1.50

表 6 给出了模拟得到的部分参数。观察温度场云图可以发现,炉排上发生了剧烈的气固两相燃烧反应,最高温度区域分布在炉排上部附近,炉膛大空间内则发生挥发分气体与氧气的气相燃烧反应。炉膛内整体温度较高,垂直方向上越接近烟气出口处温度越低,这是由于水冷壁吸收炉膛内高温烟气辐射的热量所致。水平方向上,燃烧反应主要发生在炉排前部,中后部由于燃料燃烧反应已基本结束且底部较低温度的空气不断吹入,整体温度相对前部降低。由于气压降低,炉膛内着火延迟,导致温度分布即最高温度点位

置发生变化。此外,气压降低也会造成空气密度下降,相应的氧气分压即氧含量减小,炉膛内空气及烟气的体积增大,未反应气体体积膨胀,导致气体未能完全燃烧,造成热损失增大,对锅炉炉膛燃烧和传热产生负面影响,炉膛内的最高温度随着气压的降低而降低。常压与低气压下的挥发分燃尽率均为 100%,表明低气压未对挥发分的燃尽造成明显影响。有研究显示<sup>[5]</sup>,低气压有利于减小挥发分析出的阻力,而挥发分析出燃烧的速率中析出速率占主导,因此低气压下挥发分析出燃烧速率增加。随着海拔升高,气压降低,空气中氧

含量降低,焦炭燃尽时间延长,导致炉排上焦炭的燃尽率下降,锅炉的固体不完全燃烧热损失增大。故

气压降低,燃烧进程推迟,焦炭燃尽率减小,煤的燃烧速率减缓,颗粒的未完全燃烧程度加深。

表 6 过量空气系数为 1.50 时不同气压下的模拟结果

Table 6 Simulation results at different pressures with excess air coefficient of 1.50

| 参数                                            | 数值                       |                         |                         |                         |
|-----------------------------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                                               | $p_a=101.325\text{ kPa}$ | $p_a=86.126\text{ kPa}$ | $p_a=77.273\text{ kPa}$ | $p_a=65.200\text{ kPa}$ |
| 炉膛最高温度/K                                      | 1 937.8                  | 1 876.2                 | 1 847.8                 | 1 768.7                 |
| 炉膛平均温度/K                                      | 1 145.8                  | 1 178.6                 | 1 187.4                 | 1 146.8                 |
| 炉膛出口排烟温度/K                                    | 1 088.1                  | 1 117.0                 | 1 128.8                 | 1 103.1                 |
| 水冷壁吸热量/MW                                     | 3.297                    | 3.230                   | 3.190                   | 2.971                   |
| 出口 CO <sub>2</sub> 体积分数/%                     | 4.33                     | 2.94                    | 2.65                    | 2.22                    |
| 出口 NO <sub>x</sub> 质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> ) | 344.8                    | 358.6                   | 375.1                   | 364.6                   |
| 挥发分燃尽率/%                                      | 100                      | 100                     | 100                     | 100                     |
| 焦炭燃尽率/%                                       | 88.85                    | 83.05                   | 82.41                   | 77.83                   |

由表 6 可知,水冷壁吸热量随着气压的降低而减少,这是由于气压降低导致炉膛内气体的火焰黑度下降,进而导致炉膛辐射传热量减少。随着气压从 101.325 kPa 降至 77.273 kPa,炉膛辐射换热量减少,炉膛的出口排烟温度升高。而当气压从 77.273 kPa 降至 65.200 kPa 时,炉膛出口排烟温度相对降低,这是因为气压降低导致炉膛内的燃料燃烧不充分,释放热量减少,不完全燃烧热损失增加,炉膛内整体温度大幅降低,平均温度仅有 1 146.8 K。尽管辐射传热量因受到气压影响而减少,但压力为 65.200 kPa 下的炉膛出口排烟温度相对于压力为 77.273 kPa 最终还是降低的。然而,压力为 65.200 kPa 下的炉膛平均温度与常压时接近,表明燃烧反应产生的热量相当,但辐射传热量却因气压造成的火焰黑度下降而降低,致使压力为 65.200 kPa 下的炉膛出口排烟温度相对于常压时是升高的。气压降低,含氧量降低,导致炉膛火焰中心位置改变,火焰黑度下降,炉膛出口排烟温度升高,而含氧量过低时的不完全燃烧热损失将导致出口排烟温度降低。40%负荷工况时,不同气压下炉膛的出口烟气温度均偏低,最低仅为 933.5 K。这是由于锅炉负荷下降,消耗的燃煤量大幅减少,燃烧释放出的热量大大降低,炉膛内的温度相对较低,导致出口烟气温度偏低,无法达到设计要求。

当气压由 101.325 kPa 降至 77.273 kPa 时,出口 NO<sub>x</sub> 排放量升高,这是因为气压降低使得挥发分的析出速率加快,导致燃烧时耗氧量增加,主要以 HCN 和 NH<sub>3</sub> 形式存在的挥发分氮在氧化性气氛下转化成 NO,挥发分氮产生的 NO<sub>x</sub> 量增加。77.273 kPa 下,NO<sub>x</sub> 的排放量比常压高出约 8.79%,变化

较小。当气压从 77.273 kPa 降至 65.200 kPa 时,出口 NO<sub>x</sub> 排放量略微减少,这是由于气压降低,空气中氧含量减少,燃料氮发生氧化反应产生 NO 的减少,且炉内平均温度大幅降低,产生的热力型 NO<sub>x</sub> 也迅速减少,导致 NO<sub>x</sub> 总排放量减少。炉膛出口 CO<sub>2</sub> 体积分数随着气压的降低而减小,这是由于高原低氧气含量会遏制反应中间物 CO 的燃烧反应,进一步导致 CO 浓度上升,CO<sub>2</sub> 浓度减小,气体未完全燃烧热损失增加。此外,低气压将会导致烟气中 CO<sub>2</sub> 的离解率上升,造成出口 CO<sub>2</sub> 含量进一步降低。

3 低气压下炉膛热力计算方法研究

作为锅炉热力计算的典型方法,苏联 73 标准被大部分锅炉厂家采用。热力计算中,炉膛出口烟气温度的计算公式如下

$$\theta'_1 = \frac{T_a}{M(5.7 \times 10^{-11} \varphi F_{1a_1} T_a^3 / \varphi B_j V_c)^{0.6} + 1} - 273$$

(14)

$$M = a - bX_m$$

(15)

式中:  $\theta'_1$  为炉膛出口排烟温度;  $T_a$  为理论燃烧温度;  $M$  为火焰形状系数,取决于火焰中心的相对位置  $X_m$  (设为炉膛温度最高点与炉膛高度之比),且与燃料种类和燃烧方式有关;  $a_1$  为炉膛黑度;  $\varphi$  为热有效系数;  $F_1$  为炉膛辐射受热面积;  $B_j$  为燃料消耗量;  $V_c$  为平均热容量;  $\varphi$  为保热系数;  $a$ 、 $b$  为经验系数,分别取 0.59 和 0.50。

对于火床炉,炉篦上的高温煤层亦存在辐射换热。假设煤层的黑度为 1,煤层温度等于火焰温度,则炉膛黑度为

$$a_1 = \frac{a_{hy} + (1 - a_{hy})\beta}{1 - (1 - a_{hy})(1 - \varphi)(1 - \beta)}$$

(16)



式中:  $a_{hy}$  为火焰黑度;  $\beta$  为炉排面积与除炉排外的炉膛壁面积之比。

火焰黑度按下式计算

$$a_{hy} = 1 - e^{-k\beta\delta} \quad (17)$$

式中:  $k$  为火焰辐射减弱系数, 取为火焰中各种辐射介质减弱系数的代数和;  $p$  为炉膛气体压力;  $\delta$  为有效辐射层厚度。

燃用固体燃料时, 火焰辐射减弱系数  $k$  的计算公式为

$$k = k_q r_q + k_h \mu_h + k_j x_1 x_2 \quad (18)$$

$$k_h = \frac{43\,000\rho_y}{\sqrt{(\theta'_1 + 273)^2 d_h^2}} \quad (19)$$

式中:  $k_q$ 、 $r_q$  为三原子气体辐射减弱系数和容积份额;  $k_h$  为灰粒子辐射减弱系数;  $\mu_h$  为灰粒无因次浓度;  $k_j$  为焦炭粒子的辐射减弱系数, 取  $10\text{ m/MPa}$ ;  $x_1$  为与燃料种类相关的修正参数, 对于褐煤和烟煤, 取  $0.5$ ;  $x_2$  为与燃烧方式相关的修正参数, 对于层燃炉取  $0.03$ ;  $\rho_y$  为烟气密度, 取  $1.3\text{ kg/m}^3$ ;  $d_h$  为灰粒平均直径, 对于层燃炉, 取  $20\text{ }\mu\text{m}$ 。

火焰辐射减弱系数  $k$  为火焰中各种辐射介质的减弱系数的代数和,  $k_q r_q$ 、 $k_h \mu_h$ 、 $k_j x_1 x_2$  这 3 项分别表示修正后的三原子气体辐射减弱系数、灰粒子辐射减弱系数和焦炭粒子辐射减弱系数。这 3 项系数均随着气压的升降有细微变化, 但一般来说,  $k$  随压力的变化对火焰黑度影响较小。

由火焰黑度  $a_{hy}$  的计算式可知, 随着海拔升高, 气压降低, 炉膛内火焰黑度会随之下降。而火焰黑度变化将会引起炉膛黑度的改变, 影响炉膛的辐射换热热量, 从而影响出口烟气温度。与此同时, 高海拔低气压与低含氧量还会引起燃烧速率减小, 燃烧热释放速率减慢, 燃烧不完全热损失增加, 仅从热力计算方法推导得到的炉内换热情况并未考虑到气压对对流换热与燃烧速率的影响, 因而不够全面。

图 9 给出了 2.2 节数值模拟得到的炉膛出口排烟温度与苏标计算值随气压的变化情况对比。根据不同气压下的炉膛出口排烟温度, 得到相应的炉膛  $M$  数分别为  $0.653\,0$ 、 $0.625\,1$ 、 $0.616\,1$ , 对应的气压分别为  $101.325$ 、 $86.126$ 、 $77.273\text{ kPa}$ 。气压从  $101.325\text{ kPa}$  降至  $77.273\text{ kPa}$ , 炉膛的出口排烟温度升高。而当气压从  $77.273\text{ kPa}$  继续降至  $65.200\text{ kPa}$  时, 炉膛出口排烟温度相对降低。在气压高于  $65.200\text{ kPa}$  时, 苏标计算结果与本文数值模拟结果的变化趋势基本一致。随着气压从常压降至  $77.273\text{ kPa}$ , 修正得到的炉膛  $M$  数减小。对  $M$  数进行拟合, 得到  $M$  数在气压为  $77.273\sim 101.325\text{ kPa}$  时的计算

公式为

$$M = 0.001\,6p + 0.493\,1 \quad (20)$$

式(20)的决定系数  $R^2$  为  $0.981\,5$ , 表明拟合结果相对可靠。在气压下降时, 为了使热力计算得到的炉膛出口排烟温度更真实准确,  $M$  数的取值应适当增大, 不能直接选用苏标的推荐值。在压力为  $77.273\sim 101.325\text{ kPa}$  范围内,  $M$  数可按式(20)选取。此外, 当气压下降时, 除了修正  $M$  数, 也要对热力计算中的气压, 即式(17)火焰黑度中的压力进行相应修正。

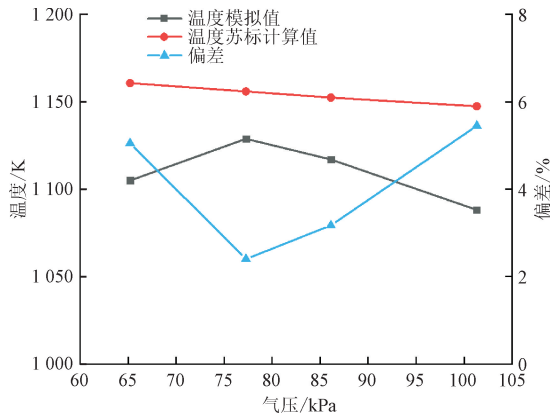


图 9 不同气压下炉膛出口排烟温度的模拟值和苏标计算值对比

Fig. 9 Comparison of simulated smoke temperature of furnace outlet and calculated value of Soviet standard under different pressure

## 4 结 论

本文采用改进后的物理模型和焦炭燃烧模型, 对某  $10\text{ t/h}$  的燃煤链条锅炉开展数值模拟, 分析了高原地区气压变化对链条炉炉膛内燃料的燃尽情况和炉膛出口烟气参数的影响规律, 并对高原链条炉热力计算方法提出修正。得到如下主要结论。

(1) 随着气压降低, 炉排煤颗粒相对于常压下燃烧进程推迟, 煤颗粒的未完全燃烧程度加深, 焦炭燃尽率减小。

(2) 气压降低, 炉膛出口  $\text{CO}_2$  体积分数减小,  $\text{NO}_x$  排放量先增大后减小,  $77.273\text{ kPa}$  气压下其排放量较常压下提高了约  $8.79\%$ 。

(3) 低气压下气体火焰黑度下降, 导致辐射传热量减少, 炉膛出口烟气温度升高; 但气压过低时, 由于不完全燃烧热损失增加, 炉膛出口烟气温度略有降低。

(4) 在  $77.273\sim 101.325\text{ kPa}$  气压范围内, 采用热力计算方法预测炉膛出口排烟温度时, 可按本文方法对炉膛  $M$  数进行修正, 同时, 也要对热力计算

中的气压即火焰黑度压力进行相应修正。

## 参考文献:

- [1] 林宗虎. 中国燃煤锅炉节能减排技术近况及展望 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(12): 1-5.  
LIN Zonghu. Recent situation and prospect of technologies for energy saving and emission reduction of coal-fired boilers in China [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(12): 1-5.
- [2] 车得福, 姚峤鹏, 王津, 等. 高海拔低气压条件下烟气辐射特性 [J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 1025-1036.  
CHE Defu, YAO Qiaopeng, WANG Jin, et al. Radiative properties of flue gas under high-altitude sub-atmospheric pressure [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 1025-1036.
- [3] 杜勇博, 张井坤, 笄耀东, 等. 高原锅炉燃料燃烧和烟气特性的研究与进展 [J]. 工业锅炉, 2020(5): 1-6.  
DU Yongbo, ZHANG Jingkun, DA Yaodong, et al. The research and development of plateau boiler fuel combustion and flue gas characteristics [J]. Industrial Boilers, 2020(5): 1-6.
- [4] ZHANG Jingkun, DU Yongbo, YU Jiming, et al. The influence of altitude on combustion characteristics within gas-fired boiler by numerical simulation [J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2023, 18(3): e2880.
- [5] 李锦宏. 高原环境对链条燃煤锅炉燃烧的影响与锅炉结构优化 [J]. 工业锅炉, 2019(3): 28-30.  
LI Jinhong. Effect of plateau environment on combustion of chain coal-fired boilers and its structure optimization [J]. Industrial Boilers, 2019(3): 28-30.
- [6] 温以千, 陈伟, 曹洪振, 等. 高海拔地区大容量火电机组锅炉及辅机选型研究 [J]. 电站系统工程, 2021, 37(6): 25-27.  
WEN Yiqian, CHEN Wei, CAO Hongzhen, et al. Study on selection of boiler and auxiliaries for large capacity thermal power unit in high altitude area [J]. Power System Engineering, 2021, 37(6): 25-27.
- [7] 陈韬, 高慧敏. 低氧、低气压条件下煤的燃烧反应研究及应用 [J]. 云南冶金, 2023, 52(1): 146-151.  
CHEN Tao, GAO Huimin. Study and application on combustion reaction of coal under low oxygen and low air pressure [J]. Yunnan Metallurgy, 2023, 52(1): 146-151.
- [8] 赵青林, 唐登航, 周和敏, 等. 高原环境下煤粉燃烧特性及水泥熟料烧成系统优化分析 [J]. 新世纪水泥导报, 2019, 25(1): 41-48.  
ZHAO Qinglin, TANG Denghang, ZHOU Hemin, et al. Combustion characteristics of coal powder under altitude environment and optimization analysis of cement kiln sintering system [J]. Cement Guide for New Epoch, 2019, 25(1): 41-48.
- [9] 车得福, 惠世恩, 夏长江, 等. 海拔高度对锅炉传热影响的理论分析 [J]. 热能动力工程, 1994, 9(2): 85-88.  
CHE Defu, HUI Shien, XIA Changjiang, et al. The influence of elevation above sea level on the heat transfer in boilers [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 1994, 9(2): 85-88.
- [10] 李彩亭, 曾光明, 宁友荣. 烟气除尘脱硫技术在高原地区的应用 [J]. 四川环境, 1998, 17(1): 35-37.  
LI Caiting, ZENG Guangming, NING Yourong. Application about dedusting and desulfurization of the flue gas in plateaus [J]. Sichuan Environment, 1998, 17(1): 35-37.
- [11] 杜勇博, 笄耀东, 刘学敏, 等. 高原锅炉运行性能及设计方法的研究进展 [J]. 工业锅炉, 2020(6): 1-7.  
DU Yongbo, DA Yaodong, LIU Xuemin, et al. The research progress on operation performance and design of plateau boiler [J]. Industrial Boilers, 2020(6): 1-7.
- [12] USMAN GHANI M, RADULOVIC P T, DOUGLAS SMOOT L. An improved model for fixed-bed coal combustion and gasification: sensitivity analysis and applications [J]. Fuel, 1996, 75(10): 1213-1226.
- [13] HOBBS M L, RADULOVIC P T, SMOOT L D. Combustion and gasification of coals in fixed-beds [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1993, 19(6): 505-586.
- [14] COOPER J, HALLETT W L H. A numerical model for packed-bed combustion of char particles [J]. Chemical Engineering Science, 2000, 55(20): 4451-4460.
- [15] 季俊杰. 燃煤链条锅炉燃烧的数值建模及配风与炉拱的优化设计 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [16] 杨博. 链条锅炉烟气再循环降低 NO 排放的数值模拟 [D]. 保定: 华北电力大学, 2008.
- [17] 张睿智, 汪林正, 赵善辉, 等. 大型炉排炉清洁高效燃烧的问题剖析与实炉优化 [J]. 动力工程学报, 2024, 44(5): 681-691.  
ZHANG Ruizhi, WANG Linzheng, ZHAO Shanhui, et al. Analysis and optimization for practical applications of clean and efficient combustion of large-scale grate furnace [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(5): 681-691.
- [18] 苏现强, 马仑, 方庆艳, 等. 基于一次风精细配风的

生物质炉排炉燃烧数值模拟 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(10): 3975-3986.

SU Xianqiang, MA Lun, FANG Qingyan, et al. Numerical simulation research on combustion of biomass-fired grate boiler based on refined primary air distribution [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(10): 3975-3986.

[19] 阙正斌, 李德波, 肖显斌, 等. 垃圾焚烧发电厂炉排炉数值模拟研究进展 [J]. 洁净煤技术, 2022, 28(10): 15-29.

QUE Zhengbin, LI Debo, XIAO Xianbin, et al. Research progress on numerical simulation of grate furnace system in waste incineration power plant [J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(10): 15-29.

[20] 张伟伟, 王旭, 寇家庆. 面向流体力学的多范式融合研究展望 [J]. 力学进展, 2023, 53(2): 433-467.

ZHANG Weiwei, WANG Xu, KOU Jiaqing. Prospects of multi-paradigm fusion methods for fluid mechanics research [J]. Advances in Mechanics, 2023, 53(2): 433-467.

[21] LECKNER B, LIND F. Combustion of municipal solid waste in fluidized bed or on grate: a comparison [J]. Waste Management, 2020, 109: 94-108.

[22] 于永鑫, 刘丽娜, 刘子琛, 等. 层燃炉复合燃烧方式下的炉内特性 [J]. 工业炉, 2023, 45(2): 1-5.

YU Yongxin, LIU Lina, LIU Zichen, et al. Furnace characteristics of layer fired boiler under combined combustion mode [J]. Industrial Furnace, 2023, 45(2): 1-5.

[23] 王长安, 侯育杰, 刘成昌, 等. 燃煤链条炉掺烧半焦  $\text{NO}_x$  生成特性及配风优化数值模拟研究 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(4): 1-12.

WANG Chang'an, HOU Yujie, LIU Chengchang, et al. Numerical simulation study on  $\text{NO}_x$  emission characteristics and the optimization of air induction of coal-fired chain boiler blended with semi-coke [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(4): 1-12.

[24] 张艳伟, 蔡晓锋, 吕岩岩, 等. 燃煤层燃锅炉烟气分级再循环系统性能的数值模拟 [J]. 洁净煤技术, 2024, 30(S1): 281-287.

ZHANG Yanwei, CAI Xiaofeng, LV Yanyan, et al. Numerical simulation of the performance of the flue gas staged recirculation system for a coal-fired boiler [J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(S1): 281-287.

[25] 贾永会, 闫慧博, 杜建桥, 等. 基于灰层累积的焦炭燃烧缩核模型 FLUENT 数值模拟研究 [J]. 热科学与技术, 2020, 19(5): 495-502.

JIA Yonghui, YAN Huibo, DU Jianqiao, et al. FLUENT numerical simulation of coke combustion shrinkage model based on accumulation of ash layer [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2020, 19(5): 495-502.

[26] 刘鹏宇, 李德波, 刘彦丰, 等. 燃煤电厂锅炉机组焦炭燃烧模型分析与展望 [J]. 洁净煤技术, 2022, 28(12): 59-68.

LIU Pengyu, LI Debo, LIU Yanfeng, et al. Analysis and prospect of coke combustion model for coal fired power plant boiler unit [J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(12): 59-68.

[27] 闻猛, 张凡. 燃煤锅炉再燃技术烃根浓度对  $\text{NO}_x$  还原的影响 [J]. 技术与市场, 2022, 29(7): 109-111.

WEN Meng, ZHANG Fan. Effect of hydrocarbon root concentration on  $\text{NO}_x$  reduction in reburning technology of coal-fired boiler [J]. Technology and Market, 2022, 29(7): 109-111.

[28] 殷柳玲, 曹希, 卜昌盛. 煤富氧燃烧及污染物排放特性研究进展 [J]. 电力科技与环保, 2025, 41(1): 96-109.

YIN Liuling, CAO Xi, BU Changsheng. A review of the progress of research on oxy-fuel combustion characteristics and pollutant emission characteristics of coal [J]. Electric Power Environmental Protection, 2025, 41(1): 96-109.

[29] 孙学信. 燃煤锅炉燃烧试验技术与方法 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

(编辑 李慧敏)