

回转窑内煤粉-烟气混合燃烧特性

赵楠¹, 刘鹏¹, 马梓舰², 胡仁国³, 刘安洲³

(1. 沈阳化工大学 机械与动力工程学院, 辽宁 沈阳 110142; 2. 天津修船技术研究所, 天津 300000; 3. 大连华锐重工集团股份有限公司, 辽宁 大连 116000)

摘 要: 为了解决矿热炉冶炼过程中存在排放大量高温烟气造成能源浪费、环境污染的问题, 提出回收矿热炉烟气中 CO 等可燃成分作为回转窑辅助燃料的工艺, 并设计了一款新型 5 通道燃烧器, 以此实现回转窑内煤粉-烟气燃料的混合燃烧, 利用 CFD(Computational Fluid Dynamics) 理论, 建立了煤粉-烟气混合燃烧的数学模型, 数值模拟了回转窑中气固两相燃料混合燃烧的过程, 分析了气固两相燃料不同混合比时, 回转窑内温度场、燃烧特性(组分场)以及 NO_x 的变化情况。结果表明: 回转窑内存在内外循环区, 可加速燃料与空气的混合, 提高窑内换热量。烟气燃料的加入有助于改善煤粉的燃烧特性, 当烟气燃料发热量占总发热量的比值由 20% 增至 40%, 窑内温度场均呈现轴对称分布, 黑火头的长度逐渐由 4.51 m 减小至 2.32 m, 火焰峰值温度逐渐降低, 挥发分的燃烧速率逐渐由 4.21 mol/(m³·s) 提高至 7.33 mol/(m³·s), 炉窑出口处 NO_x 的质量浓度逐渐降低, 由 1 013 mg/m³ 下降至 677 mg/m³。当烟气燃料发热量占总发热量的比值由 20% 增至 30% 时, 火焰形状由“球团状”逐渐变长变窄, 煤粉的燃烧位置由 X=4.68 m 前移至 X=2.26 m, 回转窑焙烧带长度由 18.50 m 增至 20.50 m。但随着烟气燃料发热量占总发热量的比值由 30% 增至 40% 时, 火焰形状逐渐向“棒槌状”转变, 煤粉的燃烧位置无明显变化, 焙烧带长度由 20.50 m 降至 16.43 m。综合分析焙烧带长度、燃料燃烧等特性, 确定当烟气燃料发热量占总发热量的比值为 30% 时为最佳掺混比。

关键词: 回转窑-矿热炉工艺(RKEF); 烟气回收; 混合燃烧; NO_x 排放; 燃烧器; 数值模拟

中图分类号: TF815 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)04-2284-09

Characteristics of coal powder-gas mixture combustion in rotary kiln

ZHAO Nan¹, LIU Peng¹, MA Zijian², HU Renguo³, LIU Anzhou³

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China; 2. Tianjin Shiprepairing Technology Research Institute, Tianjin 300000, China; 3. Dalian Huarui Heavy Industry Group Co., Ltd., Dalian 116000, China)

Abstract: Currently, a large amount of high temperature furnace gas is discharged in the smelting process of electric furnace, which causes energy waste and environmental pollution. The process of recovering combustible components such as CO from electric furnace flue gas as auxiliary fuel for rotary kilns was proposed. A new five-channel burner was designed to realize the mixed combustion of pulverized coal and electric furnace flue gas in rotary kilns. Afterwards, CFD(Computational Fluid Dynamics) theory was used to establish the mathematically model of pulverized coal and electric furnace flue gas co-combustion. The process of gas-solid two-phase fuel co-combustion in a rotary kiln was numerically simulated.

收稿日期: 2024-03-28 策划编辑: 韩晋平 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0331

基金项目: 辽宁省教育厅面上基金资助项目(LJKMZ20220775)

作者简介: 赵楠(1998—), 女, 山西晋城人, 硕士研究生。E-mail: 18406584412@163.com

通讯作者: 刘鹏(1986—), 男, 辽宁营口人, 讲师, 博士。E-mail: liu_peng86@syuct.edu.cn

引用格式: 赵楠, 刘鹏, 马梓舰, 等. 回转窑内煤粉-烟气混合燃烧特性[J]. 煤炭学报, 2025, 50(4): 2284-2292.

ZHAO Nan, LIU Peng, MA Zijian, et al. Characteristics of coal powder-gas mixture combustion in rotary kiln[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(4): 2284-2292.



移动阅读

The temperature fields, combustion characteristics and NO_x changes in rotary kilns were analyzed under different electric furnace flue gas mixing ratios. The results show that the inner and outer circulation zones can be observed in the rotary kiln, which can accelerate the mixing of fuel and air. As a result, the amount of heat transfer in the rotary kiln is increased. The addition of electric furnace flue gas helps to improve the combustion characteristics of pulverized coal. When the electric furnace flue gas ratio increases from 20% to 40%, the temperature distribution inside the rotary kiln exhibit axisymmetry, and the length of the black flame gradually decreased from 4.51 m to 2.32 m. Then the peak flame temperature gradually decreases, the combustion rate of volatile components gradually increases from $4.21 \text{ mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ to $7.33 \text{ mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$. Besides, the concentration of NO_x at the rotary kiln outlet gradually decreases from $1\,013 \text{ mg}/\text{m}^3$ to $677 \text{ mg}/\text{m}^3$. With increasing the electric furnace flue gas ratio from 20% to 30%, the flame shape gradually elongates and narrows from a “pellet”, the combustion position of pulverized coal moves forward from $X=4.68 \text{ m}$ to $X=2.26 \text{ m}$, and the length of rotary kiln roasting zone increases from 18.50 m to 20.50 m. However, with increasing the electric furnace flue gas ratio from 30% to 40%, the flame gradually shift to a “wooden-club shaped”, there is no significant change of the combustion position of pulverized coal. Besides, the length of roasting zone correspondingly decreases from 20.50 m to 16.43 m. By comprehensively analyzing the length of the roasting zone and the characteristics of fuel co-combustion, it is determined that the optimal electric furnace flue gas ratio is 30%.

Key words: rotary kiln electric furnace(RKEF); electric furnace gas recovery; co-combustion; NO_x emissions; burner; numerical simulation

0 引言

回转窑-矿热炉 (Rotary Kiln-Electric Furnace, RKEF) 工艺是目前应用较为广泛的红土镍矿冶炼工艺,其工艺具有技术成熟、设备简单易控、生产效率高优点。但在煤炭资源需要绿色、高效利用的背景下^[1], RKEF 工艺存在高能耗和高排放的问题制约其自身的发展。当封闭式矿热炉进行镍铁冶炼时,释放的烟气中含有 CO 、 CH_4 、 H_2 等可燃成分,其中 CO 体积分数大,可达到 65%~80%^[2],且炉内的烟气温度可以达到 800°C ,因此含有大量化学能和热能^[3-5]。为了回收矿热炉烟气中的余热余能以提高 RKEF 工艺的热效率,本研究采用回收矿热炉烟气中 CO 等可燃成分作为回转窑辅助燃料的方法,开展了对回转窑内煤粉-烟气的固两相混合燃烧过程的数值研究。

由于回转窑设备体积较大,窑内煤粉燃烧过程复杂,直接进行热态试验操作难度较大,且难以监测到各项参数的具体分布。为了研究煤粉的燃烧机理进而提高回转窑的热效率,研究者们采用了试验与数值模拟结合的方法。WANG 等^[6]采用 CFD 数值模拟理论研究了水泥窑中富氧燃烧特性,并分析了不同氧氮比对温度场和 NO_x 分布的影响。GRANADOS 等^[7]通过建立欧拉-拉格朗日数学模型分析了烟气再循环(FGR)对水泥窑中富氧燃烧脱碳过程的影响。马爱纯^[8]通过现场热工测试、冷态模化实验以及数值仿真技术,对熟料窑内气体与物料的流动、高温传热和煤粉燃烧等过程进行了全面分析。为了提高工艺的燃料利用

率,学者们对混燃技术开展了大量研究。ELATTER 等^[9]数值模拟了回转窑内甲烷和沼气混合燃烧过程,对比分析了混合燃料的燃烧特性,根据炉窑运行情况提出了限制火焰长度的相关性。徐顺生等^[10]利用热重分析-差示扫描量热分析联合方法,研究了回转窑中不同烟煤掺混量下混煤的燃烧特性。随着人们节能降耗意识的提高,学者开始尝试废料再燃技术的研究。MACPHEE 等^[11]数值模拟了工业废油与煤粉在回转窑内混合燃烧的过程。MIKULCIC 等^[12]利用生物质作为辅助燃料与煤粉协同燃烧,研究了混燃技术对燃料热解过程的影响。

现有的 RKEF 工艺具有废弃物排放量大,烟气中含有大量 CO 等可燃气体,余热余能回收率低等特点。因此,本研究基于回收矿热炉烟气中 CO 等可燃气体作为回转窑辅助燃料的工况,建立了一款带有 5 通道燃烧器的回转窑模型,使用 ANSYS FLUENT 软件对回转窑进行气固两相燃烧的数值模拟。高温的矿热炉烟气会经过净化回收系统的降温、分离、过滤等处理后,与煤粉共同通过 5 通道燃烧器后进入回转窑。研究在加入矿热炉烟气的工况下,回转窑内的温度分布、燃烧特性以及 NO_x 浓度的变化情况。

1 几何模型

本研究建立的回转窑几何模型由 5 通道燃烧器和窑体 2 部分组成,其中 5 通道燃烧器结构自内向外依次为:中心风通道、旋流风通道、煤粉风通道、烟气通道、轴流风通道;窑体尺寸为 $\phi 4.8 \text{ m} \times 60 \text{ m}$,模型不

考虑窑内的物料分布情况以及回转窑的倾斜情况。燃烧器和回转窑均采用六面体结构网格划分,如图 1 所示。

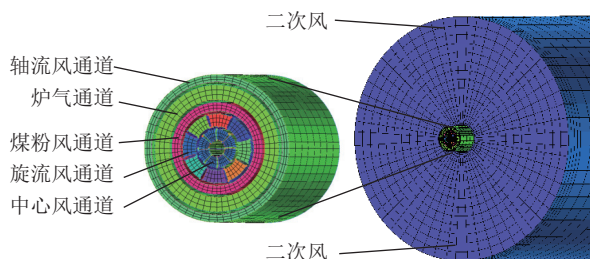


图 1 回转窑结构示意图

Fig.1 Mesh of rotary kiln

由于燃烧器附近区域流场复杂,所以对该区域网格进行加密处理。为了开展模型网格无关性验证研究,选取烟气燃料发热量占总发热量的比值为 20% 时窑尾的出口温度作为测量值。综合考虑计算精度和计算量,最终确定网格数量为 130 万,结果如图 2 所示。

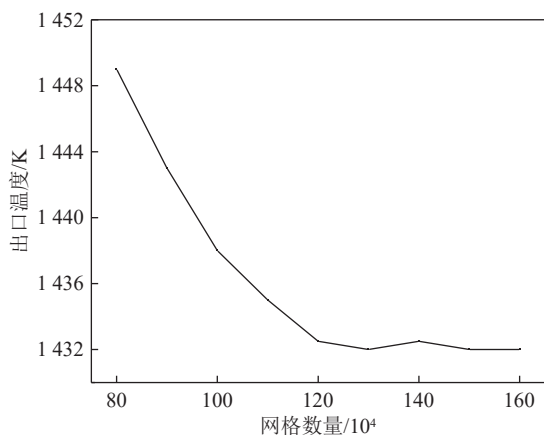


图 2 网格无关性验证

Fig.2 Mesh dependence verification

2 数学模型

2.1 气固流动模型

本文采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型来描述气相介质的运动情况。采用离散相模型 (Discrete Phase Model) 求解气相介质和固相介质之间的能量、质量以及动量的耦合^[13],采用随机轨道模型对固相介质进行轨迹追踪^[14]。煤粉粒径采用 Rosin-Rammler 模型^[15],假设煤粉颗粒为球形,其参数见表 1。

表 1 煤粉颗粒直径分布

Table 1 Coal particle properties

分布类型	最小粒径/m	最大粒径/m	平均粒径/m	分布指数
Rosin-Rammler	7×10^{-5}	2×10^{-4}	1.34×10^{-4}	3.5

2.2 燃烧模型

本研究采用组分输运模型 (Species Transport Model) 和有限速率/涡耗散模型 (Finite-rate/Eddy-dissipation) 模拟煤粉的燃烧过程。燃烧过程可分为 2 个过程: 首先是煤粉进入回转窑内受热析出挥发分,挥发分先行燃烧,然后为煤粉中剩余焦炭的燃烧。本研究采用单步反应模型 (Single Rate Model) 预测挥发分的燃烧过程^[16],采用多表面反应模型 (Multiple Surface Reactions Model) 对焦炭的燃烧过程进行描述,并采用自定义缩核模型对燃烧过程进行优化。本文设定灰层阻力、气膜阻力以及碳核温度控制焦炭的反应速率,反应速率系数如下:

$$F = d_c/d \quad (1)$$

$$k = \frac{F^2}{F^2 k_m^{-1} + F k_{ash}^{-1} + k_r^{-1}} \quad (2)$$

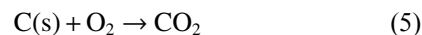
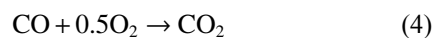
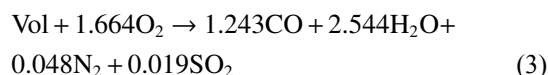
式中: d_c 为未反应碳核的直径, μm ; d 为碳颗粒的初始直径, μm ; k_m 为气膜扩散速率, $\mu\text{m/s}$; k_{ash} 为灰层扩散速率, $\mu\text{m/s}$; k_r 为动力燃烧速率, $\mu\text{m/s}$ 。

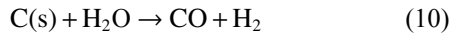
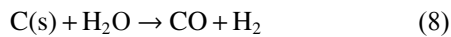
燃料在回转窑内的主要反应方程式如式 (3)~式 (8) 所示,其中 Vol 为煤粉热解后的挥发分,其反应动力学参数见表 2。

表 2 总包反应动力学参数

Table 2 Total package reaction kinetic parameters

总包反应	正向总包反应动力学参数	
	指前因子	活化能/(J · kmol ⁻¹)
式(3) ^[17]	2.119×10^{11}	2.209×10^8
式(4) ^[18]	2.239×10^{12}	1.702×10^8
式(5) ^[19]	0.002	7.9×10^7
式(6) ^[20]	0.005	7.4×10^7
式(7) ^[18]	4.4	1.62×10^8
式(8) ^[18]	1.33	1.47×10^8
式(9) ^[21]	1.03×10^{14}	2.84×10^7
式(10) ^[22]	1.6×10^{10}	1.08×10^8

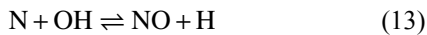




2.3 NO_x 生成模型

通常 NO_x 生成方式有热力型、燃料型和快速型 3 种。在煤粉燃烧过程中快速型 NO_x 的生成量占总生成量的比例过小, 所以对于 NO_x 生成的方式本研究只考虑热力型和燃料型。

1) 热力型 NO_x。在高温条件下, 空气中的 N₂ 与 O₂ 反应生成 NO_x, 反应温度是影响热力型 NO_x 生成的关键因素, 本文采用 Zeldovich 机理对热力型 NO_x 进行模拟^[23]。



$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = k_1[\text{O}][\text{N}_2] + k_2[\text{N}][\text{O}_2] + k_3[\text{N}][\text{OH}] - k_{-1}[\text{NO}][\text{N}] - k_{-2}[\text{NO}][\text{N}] - k_{-3}[\text{NO}][\text{H}] \quad (14)$$

由式 (12) 可知, 求解 NO 的生成速率, 除了需要知道组分 N₂、O₂ 的浓度之外, 还需求解 [N] 和 [O] 的浓度, 在本文中用部分平衡法来确定未知参数的浓度。k₁、k₂、k₃ 为上述可逆反应的正反应速率, k₋₁、k₋₂、k₋₃ 为可逆反应的逆反应速率。

2) 燃料型 NO_x。在燃料型 NO_x 的生成过程中, 煤粉挥发分中的 N 以 HCN 和 NH₃ 的形式释放, 随后被氧化为 NO 或者被还原为 N₂, 含氮组分 HCN 和 NH₃ 被氧化生成 NO^[24]:

$$S_{\text{HCN}-1} = -R_{1,\text{HCN}} \frac{M_{\text{w,HCN}}P}{RT} \quad (15)$$

$$S_{\text{HCN}-2} = -R_{2,\text{HCN}} \frac{M_{\text{w,HCN}}P}{RT} \quad (16)$$

$$S_{\text{HCN}} = S_{\text{pvc,HCN}} + S_{\text{HCN}-1} + S_{\text{HCN}-2} \quad (17)$$

式中: S_{HCN-1}、S_{HCN-2} 分别为 HCN 消耗率, kg/(m³·s); S_{pvc,HCN} 为煤热解初始阶段释放 HCN 的生成速率, kg/(m³·s); S_{HCN} 为 HCN 总源项, kg/(m³·s); R_{1,HCN}、R_{2,HCN} 分别为 HCN 的转化速率, mol/(m³·s); p 为压力, Pa; $\bar{T}$ 为平均温度, K; M_{w,HCN} 为 HCN 的摩尔质量, kg/mol。

$$S_{\text{NH}_3-1} = -R_{1,\text{NH}_3} \frac{M_{\text{w,NH}_3}P}{RT} \quad (18)$$

$$S_{\text{NH}_3-2} = -R_{2,\text{NH}_3} \frac{M_{\text{w,NH}_3}P}{RT} \quad (19)$$

$$S_{\text{NH}_3} = S_{\text{pvc,NH}_3} + S_{\text{NH}_3-1} + S_{\text{NH}_3-2} \quad (20)$$

式中: S_{NH₃-1}、S_{NH₃-2} 分别为 NH₃ 消耗率, kg/(m³·s); S_{pvc,NH₃} 为煤热解初始阶段释放 NH₃ 的生成速率, kg/(m³·s); S_{NH₃} 为 NH₃ 总源项, kg/(m³·s); R_{1,NH₃}、R_{2,NH₃} 分别为 NH₃ 的转化速率, mol/(m³·s); M_{w,NH₃} 为 NH₃ 的摩尔质量, kg/mol。

上述反应和时间、温度有关, 因此通过不同的化学反应速率来计算 HCN 和 NH₃ 的消耗率。

2.4 边界条件

本研究中燃烧器通道入口均设置为速度进口, 燃烧器各通道壁面为绝热, 各通道尺寸见表 3, 回转窑出口设置为压力出口。辐射计算采用 P1 模型^[25]。煤样和矿热炉烟气的化学成分见表 4。燃烧器通道参数见表 5, 令不同工况下燃料的总发热量不变, α 为烟气燃料热量占总热量的比值, 其中煤粉的低位发热量为 2.5×10⁷ J/kg, 烟气的热值为 1.15×10⁷ J/kg。在本研究中煤粉风、旋流风、中心风和轴流风的入口温度为 304 K, 烟气的入口温度为 503 K, 二次风的入口温度为 1 100 K。过量空气系数均为 1.1, 内外风量比在 27%~36% 范围内变化, 一次风的旋流系数为 0.6^[26]。

表 3 燃烧器结构尺寸

Table 3 Burner structure size

通道	中心风通道	旋流风通道	煤粉风通道	烟气通道	轴流风通道
面积/10 ⁻³ m ²	10	24	26	42	38

表 4 煤的工业分析、元素分析及烟气的化学成分分析

Table 4 Ultimate and proximate analysis of coal and chemical analysis of burner gas

工业分析/%				元素分析/%				烟气组分/%			
M	A	V	FC	C	H	O	N	CO	H ₂	CH ₄	N ₂
5.54	6.57	26.99	60.90	84.57	5.25	8.15	1.39	73.8	1.6	4.5	17.4

2.5 试验数据验证

为了验证所建立模型的准确性, 本文将烟气燃料

发热量占总发热量的比值为 20% 时的工况在大连华锐重工有限公司进行试验, 将现场采集数据与模拟进

表 5 边界条件
Table 5 Boundary conditions

$\alpha/\%$	一次风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)					二次风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	煤粉供给量/($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	烟气供给量/($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)
	中心风	旋流风	煤粉风	烟气 ^[27]	轴流风			
20	58.5	64.2	25	55.3	148.9	3.14	0.77	0.42
25	57.6	63.6	25	69.8	139.5	3.07	0.72	0.52
30	56.9	63.1	25	80.6	130.4	3.01	0.67	0.62
35	55.2	62.5	25	98.13	119.6	2.95	0.62	0.73
40	54.1	62.0	25	112.1	108.7	2.89	0.58	0.83

行对比。表 6 为本研究模拟的数据与实测数据的对比结果。研究发现回转窑出口处温度、CO₂ 摩尔分数、NO_x 质量浓度、O₂ 摩尔分数模拟结果与测量值的偏差在 10% 以内,考虑到窑内矿料的焙烧、煤粉燃烧过程的复杂性、外界环境的变化以及数值模拟自身的误差,其差值在允许范围内,说明上述计算模型具有合理性。

表 6 模拟结果与测量结果对比
Table 6 Comparison between calculation value and measured value

参数	测量值	模拟值(误差)
出口温度/K	1 359	1 432(5.1%)
$n(\text{CO}_2)/\%$	17.69	16.98(4.2%)
$\omega(\text{NO}_x)/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 047	1 013(3.4%)
$n(\text{O}_2)/\%$	1.93	1.80(7.6%)

3 结果与分析

3.1 速度场

图 3 为 $\alpha=30\%$ 时回转窑中心截面速度分布。如图 3 所示,速度矢量整体呈现轴对称分布。在距窑头 $X=7.5 \text{ m}$ 处的窑壁附近可明显观察到外循环区,因为高速的轴流风和低速的二次风之间的速度差,导致轴流风卷吸二次风形成外循环区。外循环区可以增强气流扰动,加速燃料与空气的混合,增大窑内换热量,同时又避免高温区域与窑皮直接接触,起到保护窑皮的作用。

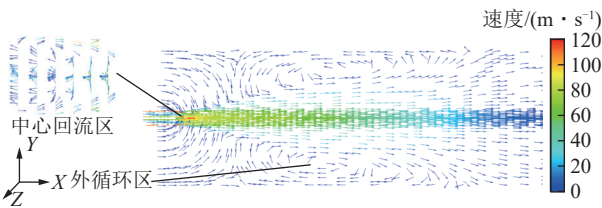


图 3 $\alpha=30\%$ 时回转窑中心截面速度矢量
Fig.3 Velocity vectors of central section under $\alpha=30\%$

3.2 温度场

图 4 为不同燃料比时回转窑轴向纵切面上的温度云图。不同工况下窑内温度场均呈现轴对称分布,火焰位于回转窑中轴线上且远离窑壁,燃烧器出口处附近存在黑火头。黑火头为燃烧器出口处的贫氧富燃料区,煤粉在此区域内未完全发生燃烧反应,此阶段内温度较低,具有保护燃烧器的作用。随着烟气燃料发热量占总发热量的比值的增加,黑火头的长度由 4.51 m 减小至 2.32 m。当烟气燃料发热量占总发热量的比值由 20% 增至 30% 时,火焰形状随着烟气燃料发热量占总发热量的比值的增加由“球团状”逐渐变长变窄,这是由于固体燃料不易扩散,导致高温集中于一个较小的区域内,随后通过辐射、对流等方式向周围传递热量,而烟气燃料具有易扩散、燃烧迅速、易与空气混合的特点导致火焰形状变长变窄。随着烟气燃料发热量占总发热量的比值由 30% 继续增至 40% 时,黑火头两侧火焰呈现出明显的“双峰状”,沿窑长方向火焰由“双峰状”逐渐向“棒槌状”转变。这是由于矿热炉烟气属于低热值燃料^[28],烟气燃料燃烧释放的热量被煤粉热解和挥发分燃烧所利用,导致烟气燃料发热量占总发热量的比值低于 30% 时未出现火焰“双峰状”特性。随着烟气燃料发热量占总发热量的比值持续增大,可以为煤粉燃烧提供更充足的热量,火焰“双峰状”的特性开始显现。

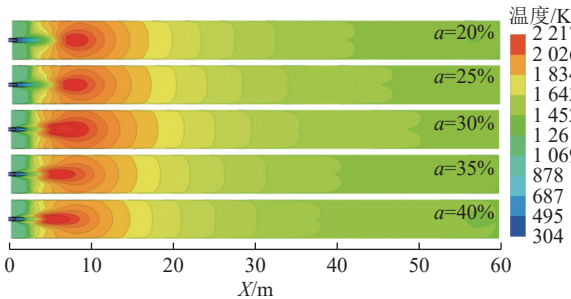


图 4 回转窑轴向纵切面上温度分布云
Fig.4 Temperature distribution in axial longitudinal section

表 7 为不同燃料比时温度峰值的变化情况。由

于固体燃料具有能量密度高、耐燃烧特性,而烟气燃料具有易扩散、热值低的特性,导致在相同发热量的条件下,随着烟气燃料发热量占总发热量的比值的不断增加,火焰峰值温度不断降低,由 2 217 K 降至 2 184 K,降低了 33 K。这与文献[29]的研究规律一致。

表 7 不同燃料比例温度峰值

Table 7 Highest temperature of different fuel ratios

$\alpha/\%$	20	25	30	35	40
峰值温度/K	2 217	2 211	2 203	2 197	2 184

图 5 为不同燃料比时回转窑 $Y=-1$ m 处截面平均温度曲线。经研究发现,回转窑内料层高度为 1.4 m (即 $Y=-1$ m),本文假定料层温度为 1 700~2 100 K 的区域为焙烧带,并根据 $Y=-1$ m 处的温度分布来反映物料的焙烧状态。如图 5 所示,当烟气燃料发热量占总发热量的比值由 20% 增至 40% 时,回转窑焙烧带长度依次为 18.50、19.70、20.50、18.27 和 16.43 m,呈现先增大后减小的趋势。烟气燃料具有易扩散、易燃烧的特性,燃烧区域相对分散,导致在 $\alpha=20\%\sim 30\%$ 的范围内,焙烧带长度不断增加。随着烟气燃料的比例继续增加,气体燃料因其低热值和易扩散特性,使其燃烧时所释放的热量更为分散,从而降低了窑内温度。所以气体燃料比例过大时,会导致窑内高温区范围缩小并逐渐低于焙烧温度,即当烟气燃料的比例增至 $\alpha=30\%\sim 40\%$ 时,焙烧带长度反而随之减小。理想的焙烧带长度应为回转窑直径的 4 倍左右,以保证焙烧砂的品质,5 种工况下焙烧带长度均符合生产要求。

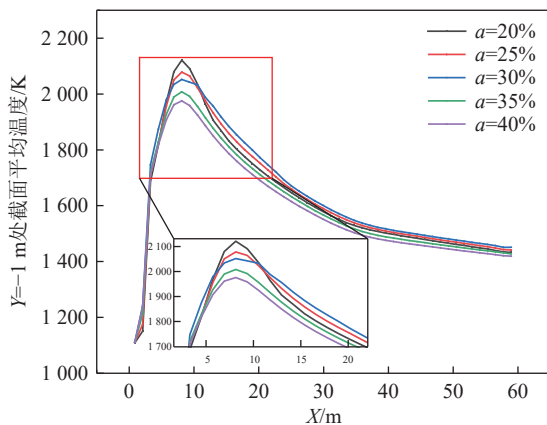


图 5 $Y=-1$ m 处温度分布曲线

Fig.5 Temperature distributions at $Y=-1$ m

3.3 组分场分析

图 6 为不同燃料比时挥发分的燃烧速率曲线图。随着烟气燃料的比例逐渐增加,挥发分的燃烧速率有显著的提升,其峰值由 $4.21 \text{ mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 增至

$7.33 \text{ mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$, 峰值位置由 $X=4.01 \text{ m}$ 逐渐前移至 $X=2.26 \text{ m}$ 。这是因为烟气燃料具有易燃性,导致其进入窑体后被迅速点燃,发生燃烧反应释放大热量,煤粉燃料吸收热量发生热解反应,析出挥发分,促进挥发分提前且快速燃烧。

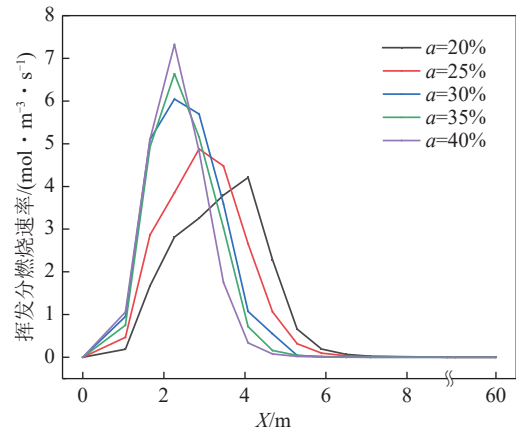


图 6 不同比例挥发分燃烧速率

Fig.6 Vol combustion rate under different conditions

图 7 为不同燃料比时焦炭的燃烧速率曲线图。随着烟气燃料发热量占总发热量的比值的增加,火焰峰值温度逐渐降低,导致焦炭的燃烧速率不断下降,其峰值由 $4.62 \text{ mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 降至 $2.17 \text{ mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。由于烟气燃料燃烧会释放大热量,使得挥发分提前燃烧,导致焦炭燃烧随之提前,其燃烧速率的峰值位置由 $X=4.68 \text{ m}$ 前移至 $X=2.26 \text{ m}$ 。烟气燃料发热量占总发热量的比值由 20% 增至 30% 时,烟气燃料的快速燃烧使得煤粉燃料提前燃烧,导致焦炭燃烧位置不断前移,但当烟气燃料发热量占总发热量的比值由 30% 增至 40% 后,燃烧区域无法继续前移,这是因为焦炭的燃烧速率降低,外循环区的气流扰动减缓,外循环区与高温二次风的气流产生了明显的抑制作用。综合图 6 和图 7 发现,挥发分先于焦炭进行燃烧,焦炭

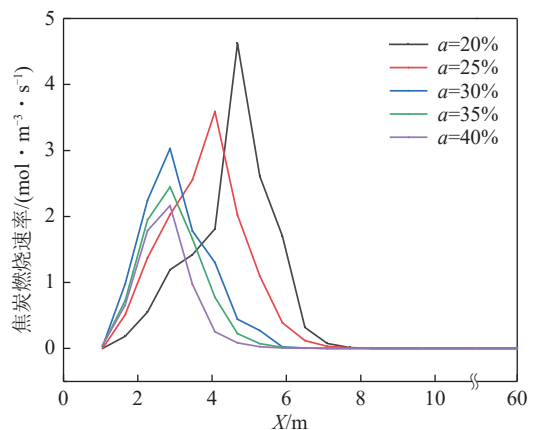


图 7 不同比例焦炭燃烧速率

Fig.7 Char combustion rate under different conditions

燃烧速率较为缓慢,但可以为炉窑提供持续且稳定的热量。

图 8 为不同燃料比时 CO 摩尔分数变化情况。如图 8 所示,当烟气燃料发热量占总发热量的比值为 $\alpha=20\%$ 时,第 1 阶段为 $X=0\sim 1.0$ m,随着 CO 快速燃烧反应的发生,CO 含量迅速下降。第 2 阶段为 $X=1.0\sim 2.5$ m,挥发分的燃烧反应产生部分 CO,其含量略有增加,导致 CO 含量的下降速率减缓,当 $X=2.5\sim 3.5$ m,CO 含量的下降速率增加,重新回到第 1 阶段的速率。在 $X=3.5\sim 9.0$ m,由于发生了焦炭与水的还原反应($C+H_2O=CO+H_2$),使得 CO 的含量有明显的增加。在 $X=9.0$ m 后,CO 的含量趋近于零,表明窑内 CO 已基本燃尽。不同燃料比时第 1 阶段内 CO 的下降速率相差不大。随着烟气燃料发热量占总发热量的比值的增加,第 2 阶段内,CO 含量的下降速率逐渐增大,这是由于烟气燃料易燃烧的特性所致;第 3 阶段内,CO 含量的增加量略有提升,此时焦炭与水的还原反应速率逐渐提高,与图 8 中所示的 H_2O 含量的趋势相吻合,各阶段所处的区域位置逐渐提前,这与参考文献[30-31]所述现象相符。

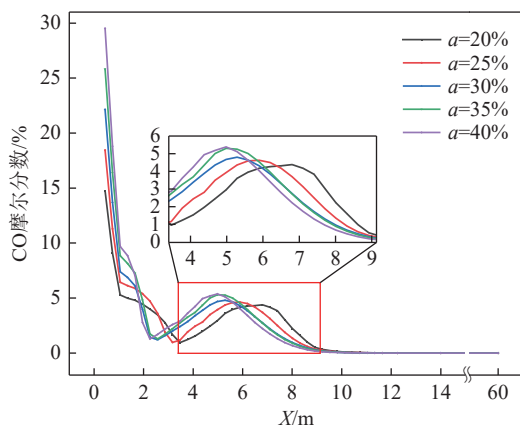


图 8 CO 摩尔分数分布

Fig.8 CO mole fraction distribution

图 9 为不同燃料比时 H_2O 摩尔分数的变化情况。由于烟气燃料中含有部分 H_2 和 CH_4 ,其燃烧产物之一为 H_2O 。因此随着烟气燃料发热量占总发热量的比值的增加,窑内 H_2O 的含量整体呈现逐渐上升的趋势。当烟气燃料发热量占总发热量的比值为 $\alpha=20\%$ 时,在 $X=1.0\sim 4.5$ m, H_2 和 CH_4 的快速燃烧导致 H_2O 含量快速上升;在 $X=4.5\sim 8.0$ m, H_2O 的含量下降,这是由焦炭与水的还原反应所致的。在 $X=8.0$ m 之后, H_2O 的含量趋于稳定。

图 10 为不同燃料比时 O_2 摩尔分数的变化情况。当烟气燃料发热量占总发热量的比值为 $\alpha=20\%$ 时,

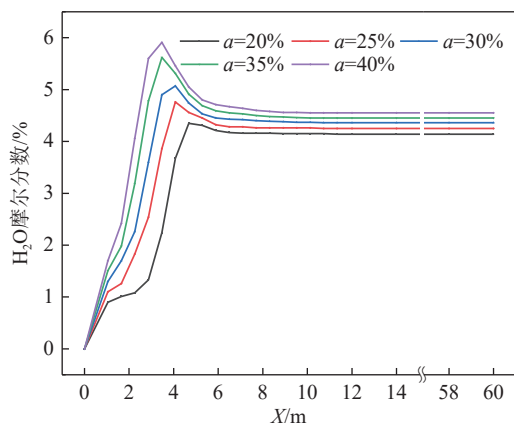


图 9 H_2O 摩尔分数分布

Fig.9 H_2O mole fraction distribution

O_2 的变化趋势可以分为 3 个阶段,第 1 阶段为 $X=0\sim 4$ m, O_2 含量缓慢下降,此阶段为烟气燃料以及煤粉中挥发分的燃烧;第 2 阶段为 $X=4\sim 8$ m,煤粉中焦炭发生燃烧反应导致 O_2 含量迅速下降;第 3 阶段为自窑头 $X=8$ m 之后的区域,煤粉燃料已经燃尽, O_2 含量基本稳定。随着烟气燃料发热量占总发热量的比值的逐渐增加,第 1 阶段内 O_2 下降的斜率逐渐加大,与图 5 和图 7 所示的变化趋势一致;第 2 阶段内 O_2 的下降斜率逐渐减缓,与图 6 所示的变化趋势一致;第 3 阶段 O_2 含量稳定点的位置逐渐前移,这是由于烟气燃料快速燃烧导致大量 O_2 被迅速消耗,煤粉吸收热量发生燃烧反应,高温区域整体前移所致。

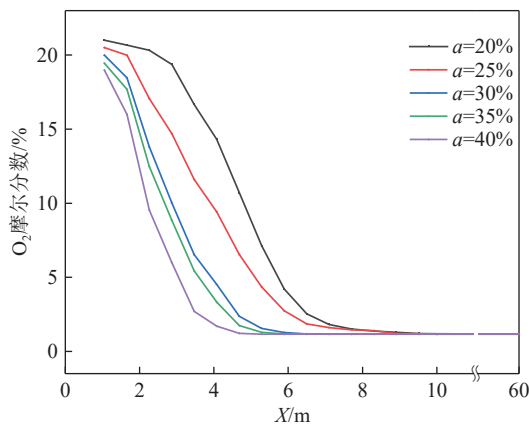


图 10 O_2 摩尔分数分布

Fig.10 O_2 mole fraction distribution

3.4 NO_x 质量浓度

图 11 为不同燃料比情况下 NO_x 含量变化曲线。本研究中主要考虑 NO_x 的生成方式为热力型和燃料型,热力型 NO_x 的生成主要受气体温度的影响,而燃料型 NO_x 的生成对于温度要求较低,主要与窑内氧气浓度有关。2 种类型 NO_x 同时开始反应时,首先生成燃料型 NO_x ,当窑内温度达到 1 800 K 后^[22],开始生成

热力型 NO_x 。峰值处 NO_x 的生成方式主要为热力型, 受温度影响较大。当烟气燃料发热量占总发热量的比值由 20% 升至 40% 时, 对应的窑内煤粉含量逐渐下降导致回转窑出口处的 NO_x 质量浓度由 $1\,013\text{ mg/m}^3$ 下降至 677 mg/m^3 。

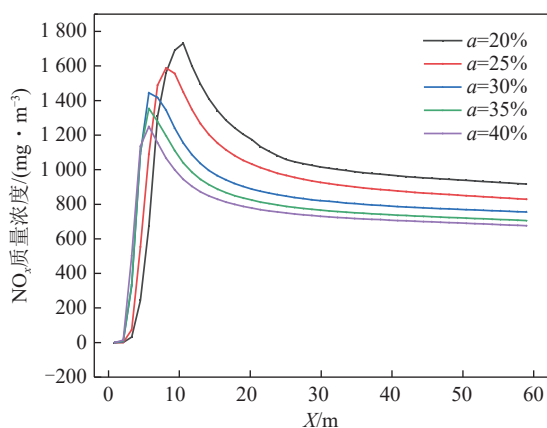


图 11 回转窑轴线方向 NO_x 含量曲线

Fig.11 NO_x concentration curves in axis direction along rotary kiln

4 结 论

1) 在 $\alpha=20\%\sim 30\%$ 的区间内, 随着烟气燃料发热量占总发热量的比值不断增加, 煤粉燃烧的高温区域位置由 $X=4.68\text{ m}$ 逐渐前移至 $X=2.26\text{ m}$; 但是由于高温二次风和外循环区产生抑制作用, 导致高温区域在 $\alpha=30\%$ 之后无法继续前移。

2) 火焰的峰值温度随着烟气燃料发热量占总发热量的比值的增加而不断降低, 由 $\alpha=20\%$ 时的 $2\,217\text{ K}$ 降至 $\alpha=40\%$ 时的 $2\,184\text{ K}$ 。

3) 当 $\alpha=20\%\sim 30\%$ 时, 回转窑内焙烧带长度呈现增大趋势; 当 $\alpha=30\%\sim 40\%$ 时, 焙烧带长度呈现减小趋势; 当 $\alpha=30\%$ 时, 焙烧带长度最大, 为 20.50 m 。

4) 随着烟气燃料发热量占总发热量的比值由 20% 增至 40% 时, 炉窑出口处 NO_x 质量浓度逐渐降低, 由 $1\,013\text{ mg/m}^3$ 下降至 677 mg/m^3 。

参考文献(References):

- [1] 强海洋, 郭冬艳. 中国矿业绿色发展的标准体系建设研究[J]. 绿色矿山, 2024, 2(1): 94–102.
QIANG Haiyang, GUO Dongyan. Research on the construction of standard system for green development of China's Mining Industry[J]. Journal of Green Mine, 2024, 2(1): 94–102.
- [2] 王俊勇. 矿热炉余热分析及 SPSS 节能研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.
WANG Junyong. Analysis of residual heat of mineral furnace and study on energy saving by SPSS[D]. Kunming: Kunming University

of Science and Technology, 2014.

- [3] HAN X Q, LIU M, WU K L, et al. Exergy analysis of the flue gas pre-dried lignite-fired power system based on the boiler with open pulverizing system[J]. Energy, 2016, 106: 285–300.
- [4] LU D, CHEN G F, GONG M Q, et al. Thermodynamic and economic analysis of a gas-fired absorption heat pump for district heating with cascade recovery of flue gas waste heat[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 185: 87–100.
- [5] 张群力, 汪玉诗, 翟洪宝, 等. 热泵型烟气余热回收及降氮系统性能[J]. 化工进展, 2023, 42(12): 6600–6608.
ZHANG Qunli, WANG Yushi, ZHAI Hongbao, et al. Analysis of heat pump flue gas waste heat recovery and nitrogen reduction system[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(12): 6600–6608.
- [6] WANG M Y, LIAO B, LIU Y Q, et al. Numerical simulation of oxy-coal combustion in a rotary cement kiln[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 103: 491–500.
- [7] GRANADOS D A, CHEJNE F, MEJÍA J M. Oxy-fuel combustion as an alternative for increasing lime production in rotary kilns[J]. Applied Energy, 2015, 158: 107–117.
- [8] 马爱纯. 熟料窑内流动、传热和煤粉燃烧的数值模拟和优化研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007: 35–90.
MA Aichun. Numerical simulation and optimization of flow, heat transfer and pulverized coal combustion in clinker kiln[D]. Changsha: Central South University, 2007: 35–90.
- [9] ELATTER H F, STANEV R, SPECHT E, et al. CFD simulation of confined non-premixed jet flames in rotary kilns for gaseous fuels[J]. Computers & Fluids, 2014, 102: 62–73.
- [10] 徐顺生, 石永彬, 黄日升, 等. 基于燃烧特性研究的热转窑混煤配比优化[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(10): 2636–2642.
XU Shunsheng, SHI Yongbin, HUANG Risheng, et al. Optimization of the blended coal proportion within rotary kiln based on the combustion characteristic research[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(10): 2636–2642.
- [11] MACPHEE J, SELLIER M, JERMY M, et al. Combustion modelling of a rotary limekiln[J]. Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal, 2010, 10(5-6): 384.
- [12] MIKULČIĆ H, CERINSKI D, BALETA J, et al. Improving pulverized coal and biomass co-combustion in a cement rotary kiln by computational fluid dynamics[J]. Chemical Engineering & Technology, 2019, 42(12): 2539–2545.
- [13] 程海鹰, 李建新, 张勇, 等. 风速对骨料烘干煤粉燃烧器排放特性的影响[J]. 过程工程学报, 2019, 19(5): 1037–1046.
CHENG Haiying, LI Jianxin, ZHANG Yong, et al. Effects of air velocity on emission characteristics of aggregate drying pulverized coal burner[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2019, 19(5): 1037–1046.
- [14] GORENFLO R, MAINARDI F, MORETTI D, et al. Discrete random walk models for space-time fractional diffusion[J]. Chemical Physics, 2002, 284(1-2): 521–541.
- [15] GHOSE P, PATRA J, DATTA A, et al. Prediction of soot and thermal radiation in a model gas turbine combustor burning kerosene fuel spray at different swirl levels[J]. Combustion Theory and

- Modelling, 2016, 20(3): 457–485.
- [16] LIEDMANN B, WIRTZ S, SCHERER V, et al. Numerical study on the influence of operational settings on refuse derived fuel co-firing in cement rotary kilns[J]. *Energy Procedia*, 2017, 120: 254–261.
- [17] HEIKKINEN J M, VENNEKER B C H, DI NOLA G, et al. CFD simulation and experimental validation of co-combustion of chicken litter and MBM with pulverized coal in a flow reactor[J]. *Fuel Processing Technology*, 2008, 89(9): 874–889.
- [18] NIKOLOPOULOS A, MALGARINOS I, NIKOLOPOULOS N, et al. A decoupled approach for NO_x - N_2O_3 -DCFD modeling in CFB plants[J]. *Fuel*, 2014, 115: 401–415.
- [19] KUANG Y C, HE B S, TONG W X, et al. Numerical simulation of pulverized coal MILD-oxy combustion under different oxygen concentrations[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2020, 93(4): 1713–1725.
- [20] NEMTSOV D A, ZABANIOTOU A. Mathematical modelling and simulation approaches of agricultural residues air gasification in a bubbling fluidized bed reactor[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2008, 143(1-3): 10–31.
- [21] ZHONG W Q, XIE J, SHAO Y J, et al. Three-dimensional modeling of olive cake combustion in CFB[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 88: 322–333.
- [22] ALGANASH B, PAUL M C, WATSON I A. Numerical investigation of the heterogeneous combustion processes of solid fuels[J]. *Fuel*, 2015, 141: 236–249.
- [23] 李全亮, 梅书霞, 谢峻林, 等. 回转窑二次风富氧燃烧的数值模拟[J]. *过程工程学报*, 2022, 22(11): 1565–1573.
- LI Quanliang, MEI Shuxia, XIE Junlin, et al. Numerical simulation of oxygen-enriched combustion in secondary air of rotary kiln[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2022, 22(11): 1565–1573.
- [24] 秦中华. 水泥回转窑四通道燃烧器 NO_x 生成与控制的数值模拟[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011: 18–19.
- QIN Zhonghua. Numerical simulation of NO_x generation and control of four-channel burner in cement rotary kiln[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011: 18–19.
- [25] SAZHIN S S, SAZHINA E M, FALTSI-SARAVELOU O, et al. The P-1 model for thermal radiation transfer: Advantages and limitations[J]. *Fuel*, 1996, 75(3): 289–294.
- [26] YADAV S, MONDAL S S. Numerical modelling of oxy-coal combustion to access the influence of swirl strength, combustion environment and gasification reactions on the flow and combustion behaviour[J]. *Combustion Theory and Modelling*, 2021, 25(3): 488–513.
- [27] KIM K M, KIM G B, LEE B H, et al. Methane gas cofiring effects on combustion and NO_x emission in 550 MW tangentially fired pulverized-coal boiler[J]. *ACS Omega*, 2021, 6(46): 31132–31146.
- [28] FORTUNATO V, MOSCA G, LUPANT D, et al. Validation of a reduced NO formation mechanism on a flameless furnace fed with H_2 -enriched low calorific value fuels[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 144: 877–889.
- [29] ZHANG C L, VLADISLAV L, XU R S, et al. Blast furnace hydrogen-rich metallurgy-research on efficiency injection of natural gas and pulverized coal[J]. *Fuel*, 2022, 311: 122412.
- [30] MURAO A, FUKADA K, SATO M, et al. Effect of natural gas injection point on combustion and gasification efficiency of pulverized coal under blast furnace condition[J]. *ISIJ International*, 2019, 59(12): 2165–2173.
- [31] GU H Y, HE P, MEI S X, et al. Numerical simulation of coal and natural gas co-combustion with different fuel proportions in a rotary lime kiln[C]//2009 International Conference on Information Engineering and Computer Science. Piscataway, NJ: IEEE, 2009: 1–4.