

石灰回转窑低热值煤气燃烧器结构优化

刘校端¹, 涂福泉¹, 李文恺², 刘 建²

(1. 武汉科技大学 冶金装备及其控制教育部重点实验室, 湖北 武汉 430081;

2. 新余钢铁股份有限公司, 江西 新余 338001)

摘要:针对工业生产中石灰回转窑使用低热值煤气作为燃料时所面临的燃烧稳定性差、高温火焰过于集中的问题,本文设计一种新型的煤气内部预混燃烧器,采用数值模拟方法对石灰回转窑中的传统多通道煤气燃烧器与新型煤气内部预混燃烧器进行深入研究,对比分析速度场、温度场、组分浓度场以及 NO_x 排放等关键参数的变化情况。结果表明:增设的混煤空间和旋流出口,可以实现不同煤气燃料的部分预混合,调节回转窑内燃烧过程中的火焰形状和燃烧强度,使得回转窑内中心线的温度峰值相比传统燃烧器下降了75 K,同时,窑尾的平均温度提升了40 K。整体而言,这样的改进显著提升了回转窑内的温度分布,满足了高质量石灰石煅烧的工艺要求。研究表明,煤气内部预混燃烧器对于低热值煤气燃料的高效燃烧具有积极作用。它不仅提高了燃料的燃烧效率,还有效减少了CO的生成量。尽管此举导致了 NO_x 排放量的小幅增加,从 98 mg/m^3 增至 104 mg/m^3 ,增幅为6.12%,但总体来看,污染物排放得到有效控制,符合环保标准。本文验证了煤气内部预混燃烧器在提高能效和减少环境污染方面的潜力,为石灰回转窑的燃烧技术提供了重要的改进方向。

关键词:石灰回转窑; 低热值煤气; 燃烧器; 数值模拟; 火焰控制

中图分类号:TF055;TQ177.2+6

文献标志码:A

文章编号:1000-8764(2025)04-0170-08

doi:10.13403/j.sjqt.2025.04.071

Optimization of low heat value gas burner structure in lime rotary kiln

LIU Xiaoduan¹, TU Fuquan¹, LI Wenkai², LIU Jian²

(1. Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology, Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China; 2. Xinyu Iron & Steel Co., Ltd., Xinyu 338001, Jiangxi, China)

Abstract: In order to solve the problems of poor combustion stability and excessive concentration of high-temperature flame when using low calorific value gas as fuel in lime rotary kilns in industrial production, a new type of gas internal premix burner is designed, and the traditional multi-channel gas burner and the new gas internal premix burner in lime rotary kiln are studied by numerical simulation method, and the changes of key parameters such as velocity field, temperature field, component concentration field and NO_x emission are compared and analyzed. The results show that the additional coal mixing space and swirl outlet can realize the partial premix of different gas fuels, adjust the flame shape and combustion intensity during the combustion process in the rotary kiln, so that the temperature peak of the centerline in the rotary kiln is decreased by 75 K compared with the traditional burner, and the average temperature at the end of the kiln is increased by 40 K. Overall, this improvement significantly improves the temperature distribution in the rotary kiln and meets the process requirements for high-quality limestone calcination. The results show that the internal premix burner of gas has a positive effect on the efficient combustion of low calorific value gas fuel. It not only improves the combustion

收稿日期: 2024-06-17; 修回日期: 2024-07-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52375061)

作者简介: 刘校端(1998—),男,硕士研究生,从事燃烧器结构改进及燃料高效利用的研究。

通信作者: 涂福泉(1970—),男,教授,从事液压系统集成、液压元件方面的研究与开发工作。

efficiency of fuel, but also effectively reduces the amount of CO generated. Although this leads to a slight increase in NO_x emissions, from 98 mg/m^3 to 104 mg/m^3 , an increase of 6.12%, overall, pollutant emissions are effectively controlled and meet environmental standards. The potential of gas internal premix burners in improving energy efficiency and reducing environmental pollution is found out and verified, and an important improvement direction for the combustion technology of lime rotary kilns is provided.

Key words: lime rotary kiln; low calorific value gas; burner; numerical simulation; flame control

石灰回转窑是生产活性石灰的核心设备,其热工效率直接影响着产品的质量和生产成本。传统石灰回转窑生产常使用烟煤、焦炉煤气、天然气等高热值燃料,以满足生产要求^[1]。然而,随着能源资源的日益紧张和环保要求的不断提高,在石灰生产过程中,利用工业副产物产生的低热值煤气作为替代燃料得到了广泛的关注。由于低热值煤气在燃烧时存在燃烧效率低、火焰控制困难以及煅烧效果不理想等问题^[2],传统的石灰回转窑生产方式无法满足要求。因此,如何提高低热值煤气在石灰回转窑中的燃烧效率成为重要的研究方向。

针对该问题,研究人员已开展了若干相关研究。如 HE 等^[3]采用数值模拟与试验分析了高炉煤气燃烧反应的浓度场分布、反应湍流速率和反应当量比等参数的变化,对低热值煤气的燃烧性质进行了深入的研究,为燃烧效率的提高提供了理论基础;MOON 等^[4]和 BÅ 等^[5]研究了预热燃烧技术在提高低热值煤气火焰稳定性方面的效果,发现通过控制燃料与空气的预热温度可以有效提升燃烧效率,然而,他们亦指出这种改进可能导致燃烧器结构的复杂化;根据 ILBAS 等^[6]、PAULASKAS 等^[7]和林日成等^[8]的研究,富氧燃烧可以有效增强低热值煤气的燃烧性能,提高火焰温度和燃烧速度,但这也会带来氧气供应成本的增加以及 NO_x 排放量的增多;ZHANG 等^[9]、HOU 等^[10]和孙晓慧等^[11]采用掺烧高热值燃料的混煤燃烧技术,对混合燃料的燃烧特性进行理论和试验研究,结果表明,高热值燃料的掺烧有助于提高整个燃烧系统的热效率,减少 NO_x 的排放,但是,这种做法也带来了燃料成本上升以及可能影响燃烧稳定性的问题。

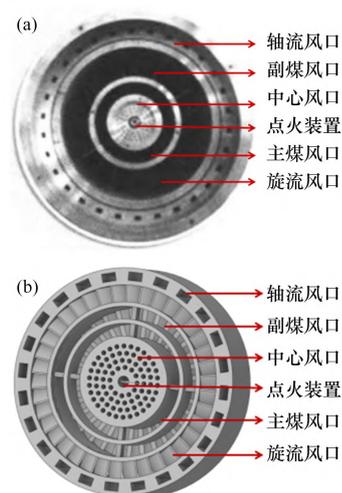
综上,现有研究虽然在一定程度上改善了低热值煤气的燃烧性能,但仍然存在环境污染、操

作复杂和成本增加等问题。为此,本文从回转窑燃烧器结构优化的角度出发,提出一种具有内部混煤空间和旋流出口的煤气内部预混燃烧器,并采用试验与数值模拟相结合方法验证新结构的效果,以期为低热值煤气在石灰回转窑中的高效清洁燃烧提供新的解决方案。

1 模型建立及数值研究

1.1 物理模型构建

以某钢厂实际生产的石灰回转窑($\text{Ø}4 \text{ m} \times 50 \text{ m}$)为研究对象。该窑采用的多通道煤气燃烧器实体模型如图 1(a)所示,构建的煤气内部预混燃烧器物理模型如图 1(b)所示。图 2 为煤气内部预混燃烧器的简化结构,该燃烧器一次风由内到外分别由中心风口、主煤气口、副煤气口、旋流风口和轴流风口组成,其中在主煤气口和副煤气口间增设了一个内部预混空间和旋流出口结构。这一改进相较于传统的多通道煤气燃烧器,能够实



(a) 多通道煤气燃烧器实体模型;
(b) 煤气内部预混燃烧器物理模型

图 1 回转窑筒体模型及煤气内部预混燃烧器物理模型
Fig. 1 Rotary kiln cylinder model and physical model of internal premixed gas burner

现煤气的内部预混，并通过旋流出口调整气流的速度和方向，从而精确控制低热值煤气的燃烧过程。煤气内部预混燃烧器各风口尺寸如表 1 所示。

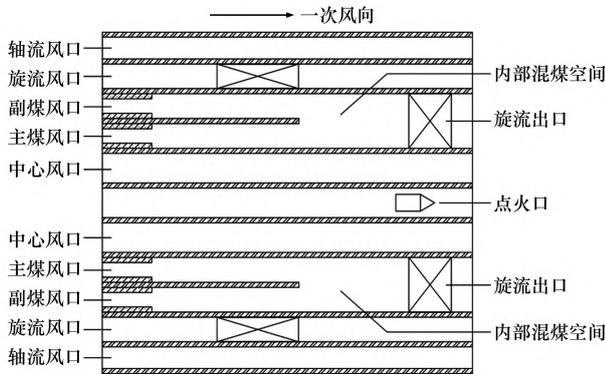


图 2 煤气内部预混燃烧器结构

Fig. 2 Structure of internal premixed gas burner

表 1 煤气内部预混燃烧器各风口尺寸

Table 1 Dimensions of tuyeres of internal premixed burner for gas mm

轴流风口 宽度	旋流风口 长度	副煤风口		主煤风口		中心风 口半径
		外径	内径	外径	内径	
75	125	1 700	1 400	1 325	1 100	800

1.2 回转窑的网格划分

回转窑筒体及燃烧器的网格划分如图 3 所示。考虑到燃烧器端部存在显著的湍流活动，并伴随着剧烈的流场变动，对该区域进行网格局部加密，旨在提升数值模拟的计算效率。在仿真过程中，为确保结果的精确可靠，需要排除网格数量可能引起的计算偏差，即进行网格独立性验证。图 4 为不同网格密度下，窑尾平均温度的变化趋势。由图 4 可以观察到，当网格数量超过 142 万个时，窑尾的平均温度趋于稳定，波动误差保持在可接受的范围。因此，本文采用这一级别的网格数量进行后续的仿真分析。



图 3 回转窑的网格划分

Fig. 3 Grid division of rotary kilns

1.3 边界条件

数值模拟采用某钢铁厂石灰生产中所用的高炉和转炉煤气作为燃料，混烧比为 2:3。对于燃烧器的一次风入口以及窑头的二次风入口均采用速度

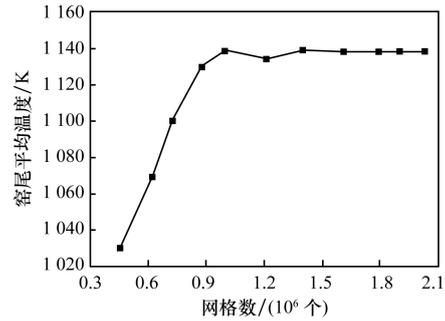


图 4 网格独立性验证

Fig. 4 Grid independence verification

入口作为边界条件、回转窑出口采用压力出口作为边界条件。回转窑壁面温度设置为 600 K，空气中氧气体积分数取为 21%。边界条件的选取均参考实际工况下回转窑的真实数据，各进口的详细边界条件如表 2 所示，两种煤气成分如表 3 所示。

表 2 数值模拟边界条件

Table 2 Numerical simulation boundary condition

风型	风孔名称	温度/K	风速/(m·s ⁻¹)
一次风	轴流风口	312	45
	旋流风口	312	18
	副煤风口	312	10
	主煤风口	312	10
二次风	中心风口	312	25
	高温风口	623	8

表 3 煤气成分分析(体积分数)

Table 3 Gas composition analysis %

煤气种类	CO	CO ₂	O ₂	N ₂	H ₂	CH ₄
高炉煤气	21.6	17	2.2	55.7	3.2	0.3
转炉煤气	61.8	15.5	0.1	19.5	2.6	0.5

1.4 数值模型的建立

回转窑的燃烧是一个综合流体流动、传热、传质的复杂物理化学过程。当石灰回转窑处于稳定状态时，窑内的气体作为连续相^[12]，适合在欧拉参考系中求解。气体的连续性方程、动量方程、能量方程如下。

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = S \tag{1}$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau} + \rho \vec{g} + \vec{F}) \tag{2}$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} h) = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_i h_i \vec{J}_i) + S \tag{3}$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \tag{4}$$

式中： ρ 、 \vec{u} 、 h 和 T 分别为气体的密度(kg/m³)、

速度 (m/s)、焓 (J/kg) 和温度 (K); p 为静压, N/m^2 ; \vec{g} 为重力速度, m/s^2 ; $\vec{\tau}$ 为应力张量, N/m^2 ; k_{eff} 为有效传热系数, $W/(m \cdot K)$; J_i 为物质 i 的扩散通量, $kg/(m^2 \cdot s)$; Y_i 为物质 i 的质量分数; R_i 为物质 i 通过化学反应的净速率, $kg/(m^3 \cdot s)$; \vec{F} 和 S 为源项。

考虑燃烧器附近复杂的旋流和回流, 采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型^[13] 作为紊流模型。计算方法如下。

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}k) = -\nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}\varepsilon) = -\nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v\varepsilon}} \quad (6)$$

式中: k 为湍流动能, m^2/s^2 ; ε 为紊流耗散率, m^2/s^3 ; G_k 为平均速度梯度产生的湍流动能, m^2/s^3 ; μ 和 μ_t 分别为分子动力黏度和湍流黏度, $kg/(m \cdot s)$; C_1 和 C_2 为常数; σ_k 和 σ_ε 分别为 k 和 ε 的湍流普朗特数。

由于转炉和高炉煤气燃料的使用, 可以假设燃烧过程由湍流混合控制。在这种情况下, 选择有限速率 - 涡耗散模型 (finite-rate/eddy-dispersion model)。该模型综合考虑了动力学和湍流的影响, 利用阿伦尼乌斯公式作为化学反应动力学的“开关”^[14]。反应速率常数 k_r 的计算方法如下。

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

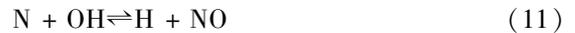
式中: A 为指前因子, $m^3/(mol \cdot s)$; E 为活化能, kJ/mol ; R 为通用气体常数, $J/(mol \cdot K)$; T 为局部温度, K 。

在数值模拟过程中, 回转窑内的辐射换热是影响温度的重要因素。本文采用 P-1 辐射模型, 该模型能考虑辐射的散射作用, 适用于光学厚度较大的燃烧设备, 并且求解函数简单, 占用内存较少, 常为国内外研究者所使用^[15]。辐射热量 q_r 的计算方法如下。

$$q_r = -\frac{1}{3(\alpha + \sigma_s) - C\sigma_s} \nabla G \quad (8)$$

式中: α 和 σ_s 分别为辐射吸收系数和衰减系数, m^{-1} ; G 为入射辐射, W/m^2 ; C 为线性各项异性相位函数系数。

根据所用转炉和高炉煤气燃料的性质, 燃烧生成的 NO_x 中燃料型 NO_x 可以忽略, 而燃烧过程中始终存在的瞬时型 NO_x 占比较小, 因此本文只考虑热力型 NO_x 。根据 Zeldovich 提出的反应机理计算热力型 NO_x ^[16]。反应过程如下。



2 模拟结果与分析

2.1 速度场对比

图 5 为两种不同燃烧器条件下, 回转窑窑头附近中心截面的速度矢量分布情况, 图 6 为该速度场对应区域的局部放大图。由图 5 可知, 两种

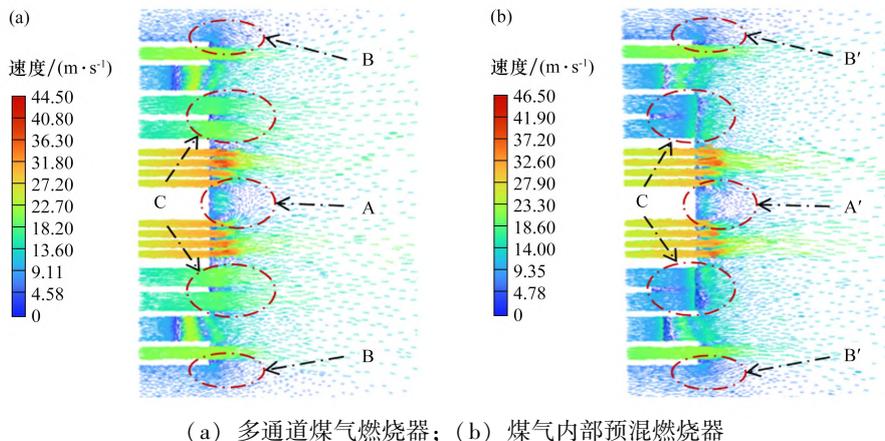
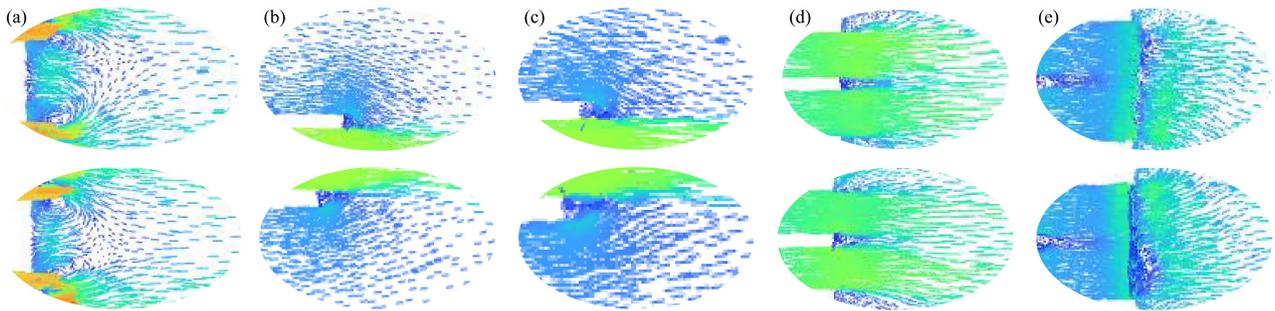


图 5 多通道煤气燃烧器和煤气内部预混燃烧器下的中心截面速度矢量分布

Fig. 5 Center section velocity vector distribution under multi-channel gas burners and internal premixed gas burners



(a) A、A'；(b) B；(c) B'；(d) C；(e) C'

图 6 速度场局部区域放大图

Fig. 6 Localized enlargement of velocity field

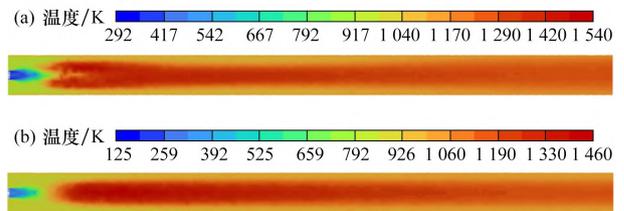
燃烧器附近都存在着明显的回流区 A (A') 和 B (B')：即中心回流区和外回流区。中心回流区形成于中心风向内的部分回流，这一现象有助于火焰的集中；而外回流区则产生于最外层高速轴流风卷吸的高温二次风，该回流区促进了燃料与高温二次风的充分混合，对燃料的完全燃烧起到积极作用。

对比图 6(a)、(b) 可知，区域 A (A') 和区域 B (B') 中的中心回流区和外回流区变化不明显，对燃烧过程的影响较小；而在区域 C 和区域 C' 中，燃烧器附近的气流场流速和角度发生了显著的变化，该处区域的流速迅速减小，并呈现多方向的角度变化。结合新型燃烧器的结构可知，通过增设混煤空间和旋流出口，将一次风中的主煤风与副煤预混，随后通过旋流出口控制混合煤气的喷射速度和角度等关键参数，以达到对火焰形状和强度的精准调控。

2.2 火焰温度场对比

在石灰回转窑的煅烧过程中，确保充足的热量供应至关重要。为了保障高质量活性石灰的生产，减少“生烧”或“过烧”石灰的产生，采用低热值煤气作为热源进行石灰石的煅烧时，维持回转窑内理想的燃烧火焰形态和温度分布是必不可少的。图 7 为在不同燃烧器条件下，回转窑内沿轴向的火焰温度分布情况。由图 7(a) 可知，当使用多通道煤气燃烧器燃烧低热值煤气时，回转窑内的火焰分布不均匀，高温区域主要聚集在窑头，且火焰沿轴线方向迅速缩减，导致温度梯度较大；而图 7(b) 显示，使用煤气内部预混燃烧器的回转窑内燃烧火焰整体形状良好，具有强度高、波动

小和稳定性好等特点，使得高温区域恰当地分布在窑内的煅烧区，从而为石灰石的均匀煅烧提供了更佳的热环境。

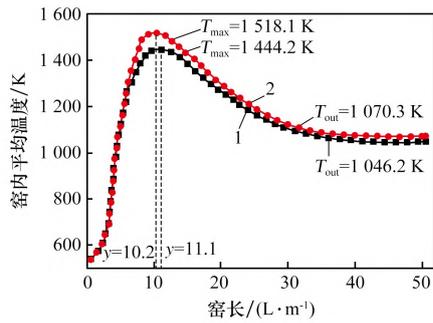


(a) 多通道煤气燃烧器；(b) 煤气内部预混燃烧器

图 7 不同燃烧器条件下回转窑内轴向温度分布

Fig. 7 Axial temperature distribution inside a rotary kiln under different burner conditions

为进一步探讨不同燃烧器对低热值煤气燃烧过程的影响，绘制沿窑长方向的窑内平均温度变化曲线，如图 8 所示。由图 8 可知，两种燃烧器条件下，窑内总体温度的变化趋势一致，均是先升高后降低，并逐渐趋于稳定值。与多通道煤气燃烧器相比，使用煤气内部预混燃烧器时，温度峰值点从 8.8 m 的位置后移至 11.6 m 处，沿窑长方向后延了 2.8 m，这表明热量在窑内的停留时间延长，有助于石灰石更充分地煅烧。而峰值温度本身则从 1 531 K 下降至 1 456 K，降低了 75 K，这在降低能源消耗的同时减轻了物料局部过烧的风险，同时有助于减少热力型 NO_x 生成。此外，窑尾的平均温度从 1 037 K 上升到 1 076 K，增加了 39 K，有利于保持窑内后端的温度，避免生烧现象。整体而言，采用新结构燃烧器后，火焰温度场变化过程使得高温区域在回转窑内的分布更加均匀，有利于形成理想的煅烧环境，有助于提高物料焙烧质量。



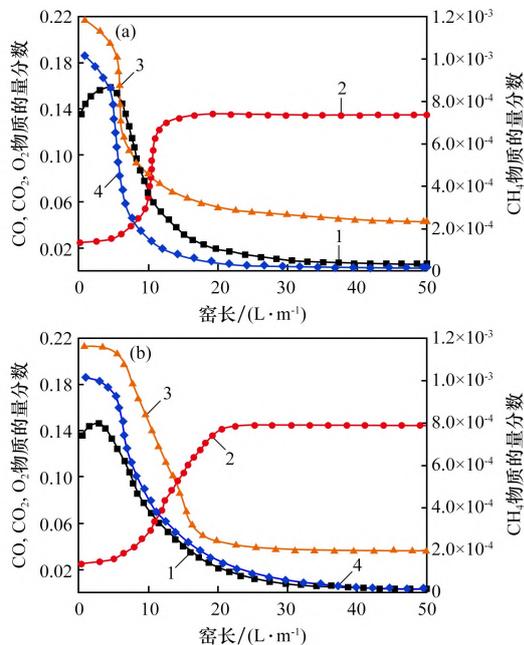
1—多通道煤气燃烧器; 2—煤气内部预混燃烧器。

图8 不同燃烧器条件下回转窑内平均温度变化

Fig. 8 Changes in average temperature inside a rotary kiln under different burner conditions

2.3 组分浓度场

通过分析不同燃烧器条件下回转窑内气体成分的浓度分布,能够更好地研究低热值煤气燃料的燃烧状态。图9为沿窑长方向不同燃烧器条件下回转窑内 CO_2 、 CO 、 CH_4 和 O_2 各组分的浓度分布曲线。由图9可知,两种燃烧器对低热值煤气进行混烧时,相同成分的浓度变化趋势基本一致:均是在进行风煤混合与点火燃烧期间,窑内组分的浓度发生剧烈变化,最终随着燃烧反应的逐渐稳定,浓度变化趋于平缓并保持稳定状态。



(a) 多通道煤气燃烧器; (b) 煤气内部预混燃烧器

1—CO; 2—CO₂; 3—O₂; 4—CH₄。

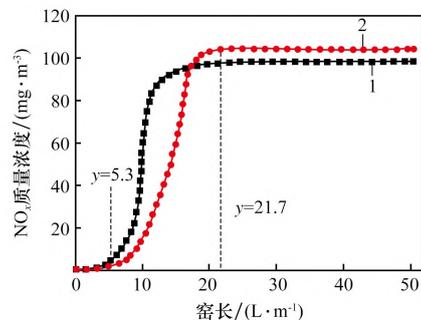
图9 不同燃烧器条件下回转窑内的组分浓度分布曲线

Fig. 9 Component concentration distribution curves in rotary kilns under different burner conditions

对比图9(a)、(b)可知,随着反应的进行,多通道煤气燃烧器下组分浓度先发生剧烈变化, CH_4 和 O_2 浓度迅速降低, CO 和 CO_2 浓度开始升高;到达一定程度后, CO_2 浓度变化速率加快,而 CO 浓度随之减少。主要原因是,相较于 CO 而言, CH_4 在空气中的反应速率更快,受一次风的影响, O_2 不足以保证 CH_4 的完全燃烧,导致大量 CO 的生成并引起其浓度升高。随着燃烧过程的继续, CO 逐渐被消耗并转化为 CO_2 ,从而使得 CO_2 的浓度快速上升。在采用煤气内部预混燃烧器的情况下,回转窑内各组分浓度的变化相对延后,其中 CO 和 O_2 的浓度略有降低, CO_2 的浓度则有所上升,且整体浓度变化趋势较为平缓。这与图7、8中显示的窑内火焰形态和温度分布的变化相一致,并且能够满足石灰回转窑工艺生产的要求。

2.4 NO_x质量浓度对比

根据回转窑燃烧器的燃烧性质及 NO_x 的产生机理,本文主要考虑热力型 NO_x 的影响。图10为不同燃烧器下回转窑内沿窑长方向的 NO_x 质量浓度分布曲线。由图10可知, NO_x 质量浓度变化分为三个阶段:①在0~5.3 m,燃烧发生在回转窑窑头部位,且温度较低,因此 NO_x 质量浓度较低;②在5.3~21.7 m,窑内温度迅速升高,整体温度维持在一个较高水平, NO_x 生成量也随之快速上升,其中在煤气内部预混燃烧器下,由于最高温度有所降低,且高温区分布较缓, NO_x 生成速率相对较低;③超过21.7 m后,窑内温度逐渐趋于稳定, NO_x 的生成反应已达到化学平衡,质量浓度不再随停留时间的增加而增加,出口 NO_x 质



1—多通道煤气燃烧器; 2—煤气内部预混燃烧器。

图10 窑内NO_x平均质量浓度分布曲线Fig. 10 Average NO_x mass concentration distribution curve inside the kiln

量浓度由 98 mg/m^3 增加到 104 mg/m^3 , 增长率仅为 6.12%。

结合 2.2 的分析可知, 热力型 NO_x 的生成与窑内的温度变化密不可分, 使用具有内部混煤空间和旋流出口结构的煤气内部预混燃烧器, 不仅可以促进低热值煤气燃料的高效燃烧, 使得窑内整体温度升高的同时, 也能控制 NO_x 的生成, 减少污染物的产生。

3 结论

(1) 增设的混煤空间和旋流出口, 可以实现不同煤气燃料的部分预混合, 调节回转窑内燃烧过程中的火焰形状和燃烧强度, 使得回转窑内中心线的温度峰值相比传统燃烧器下降了 75 K, 同时, 窑尾的平均温度提升了 40 K。整体而言, 这样的改进显著提升了回转窑内的温度分布, 满足了高质量石灰石煅烧的工艺要求。

(2) 煤气内部预混燃烧器对于低热值煤气燃料的高效燃烧具有积极作用, 它不仅提高了燃料的燃烧效率, 还有效减少了 CO 的生成量。尽管此举导致了 NO_x 排放量的小幅增加, 从 98 mg/m^3 增至 104 mg/m^3 , 增幅为 6.12%, 但总体来看, 污染物排放得到有效控制, 符合环保标准。

参考文献:

[1] 张凯博. 活性石灰回转窑节能降耗和资源综合利用的探讨[J]. 矿山机械, 2007, 35(10): 152 - 154; 6.
ZHANG Kaibo. Discussion to energy saving and consumption reduction of active lime rotary kiln and resource synthetic utilization[J]. Mining & Processing Equipment, 2007, 35(10): 152 - 154; 6.

[2] FRANCISCO R W Jr, COSTA M, CATAPAN R C, et al. Combustion of hydrogen rich gaseous fuels with low calorific value in a porous burner placed in a confined heated environment[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013, 45: 102 - 109.

[3] HE J Q, LENG C, XU H F, et al. Kinetic analysis of diffusion combustion of low calorific value gas under the action of thermal dynamics[J]. Fuel, 2021, 287: 119435.

[4] MOON J W, KIM S J, SASAKI Y. Effect of preheated top gas and air on blast furnace top gas combustion[J]. ISIJ International, 2014, 54(1): 63 - 71.

[5] BÂ A, CESSOU A, MARCANO N, et al. Oxyfuel combustion and reactants preheating to enhance turbulent flame stabilization of low calorific blast furnace gas[J]. Fuel, 2019, 242: 211 - 221.

[6] ILBAS M, BEKTAS A, KARYEYEN S. Effect of oxy-fuel combustion on flame characteristics of low calorific value coal gases in a small burner and combustor[J]. Fuel, 2018, 226: 350 - 364.

[7] PAULASKAS R, SKVOR Ć INSKIENE R, ZAKARAUSKAS K, et al. Combustion performance of low calorific gas enriched by oxygen and ozone[J]. Fuel, 2022, 324: 124761.

[8] 林日成, 鄢晓忠, 何旭, 等. Oxy-steam 气氛下低热值燃气燃烧特性研究[J]. 动力工程学报, 2021, 41(12): 1061 - 1068.
LIN Richeng, YAN Xiaozhong, HE Xu, et al. Study on combustion characteristics of LCV gas in oxy-steam atmosphere[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2021, 41(12): 1061 - 1068.

[9] ZHANG L, XIE W W, REN Z Y. Combustion stability analysis for non-standard low-calorific gases: Blast furnace gas and coke oven gas[J]. Fuel, 2020, 278: 118216.

[10] HOU S S, CHEN C H, CHANG C Y, et al. Firing blast furnace gas without support fuel in steel mill boilers[J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(7): 2758 - 2767.

[11] 孙晓慧, 颜济青, 方梦祥, 等. 气化细渣掺烧煤和生物质的燃烧特性及动力学分析[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(1): 117 - 126.
SUN Xiaohui, YAN Jiqing, FANG Mengxiang, et al. Combustion characteristics and kinetic analysis of gasified fine slag blended with coal and biomass[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(1): 117 - 126.

[12] MENTER F R, KUNTZ M, LANGTRY R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model[J]. Turbulence, heat and mass transfer, 2003, 4(1): 625 - 632.

[13] HIROMI ARIYARATNE W K, MALAGALAGE A, MELAAEN M C, et al. CFD modelling of meat and bone meal combustion in a cement rotary kiln-Investigation of fuel particle size and fuel feeding position impacts[J]. Chemical Engineering Science, 2015, 123: 596 - 608.

[14] LI Y H, CHEN G B, LIN Y C, et al. Effects of flue gas

recirculation on the premixed oxy-methane flames in atmospheric condition[J]. *Energy*,2015,89:845-857.

- [15] GÓMEZ M A, PATIÑO D, COMESAÑA R, et al. CFD simulation of a solar radiation absorber[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*,2013,57(1):231-240.

- [16] OROOJI Y, JAVADI M, KARIMI-MALEH H, et al. Numerical and experimental investigation of natural gas injection effects on NO_x reburning at the rotary cement kiln exhaust[J]. *Process Safety and Environmental Protection*,2021,151:290-298.

(上接第140页)

- [17] 黄浩,吴中贤,乔波,等.拜耳法赤泥磁选铁精矿浮选脱钛研究[J]. *矿冶工程*,2024,44(5):41-45;50.
HUANG Hao, WU Zhongxian, QIAO Bo, et al. Study on titanium removal by flotation from magnetic iron concentrate of Bayer red mud[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*,2024,44(5):41-45;50.
- [18] 杨卓,冯博,李文涛,等.铁精矿选矿除杂试验研究[J]. *工程建设*,2024,56(12):16-23.
YANG Zhuo, FENG Bo, LI Wentao, et al. Experimental

study on impurity removal from iron concentrate[J]. *Engineering Construction*,2024,56(12):16-23.

- [19] 武春涛,韩明,赵礼兵,等.承德某钒钛磁铁矿提铁降钛试验研究[J]. *现代矿业*,2025,41(6):164-167.
WU Chuntao, HAN Ming, ZHAO Libing, et al. Experimental study on iron enrichment and titanium reduction of vanadium-titanium magnetite concentrate in Chengde[J]. *Modern Mining*,2025,41(6):164-167.

(上接第150页)

- [22] 丁成义,常仁德,郭胜兰,等.烧结过程智能控制及烧结冶金性能预测研究现状[J]. *钢铁*,2024,59(4):42-56.
DING Chengyi, CHANG Rende, GUO Shenglan, et al. Research status of intelligent control of sintering process and prediction of metallurgical properties of sinter[J].

Iron and Steel,2024,59(4):42-56.

- [23] 朱德庆,李晓波,潘建,等.镜铁矿粉在铁矿烧结混合料中的制粒行为[J]. *钢铁*,2015,50(7):8-14.
ZHU Deqing, LI Xiaobo, PAN Jian, et al. Investigation of granulation behaviors of specularite fines in ferrous sinter mixture[J]. *Iron and Steel*,2015,50(7):8-14.

江苏省(沙钢)钢铁研究院介绍

江苏省(沙钢)钢铁研究院成立于2007年6月,是江苏省重点研发机构、高新技术企业,主要从事先进钢铁材料和工艺技术的研发与服务。研究院坚持以“国内领先、世界一流”为建设目标,拥有2.3万m²的研发大楼及中试工场,致力开发出高端、先进的钢铁材料和绿色的钢铁生产工艺,并力图减少废弃物排放以及降低能源消耗,以实现沙钢及江苏省钢铁工业的持续发展。沙钢研究院下设七个研究室、一个分析测试中心、一个中试场所以及一个管理部门,涵盖钢铁生产全流程,以及热轧板带材、棒线材、冷轧和超薄带产品。研发方向包括低碳化、先进钢铁材料开发、先进钢铁工艺开发和工艺优化、智能化、环保资源等。研究院每年开展项目约300项,先后承担各级政府项目30余项。通过开展各类研发项目,研究院形成了一系列自主创新知识产权成果,获授权专利765件(其中发明专利634件、国际专利9件),发表论文785篇,先后承担各级政府项目29项,其中国家项目5项,省级项目11项,荣获国家级科技奖二等奖1项、省部级科技奖一等奖10项、二等奖9项。通过科技创新,研究院有力支撑了企业的技术进步和转型升级,每年研发创效超8亿元。