节能环保与综合利用

燃料燃烧特性及其对烧结烟气 CO 排放的影响

钟庭梁[1]，王延江[2]，佘雪峰[1]，李晓海[2]，田祥正[1]，薛庆国[1]
（1. 北京科技大学 绿色低碳钢铁冶金全国重点实验室，北京 100083；2. 德龙钢铁有限公司 烧结厂，河北 邢台 054009）

摘要：本文采用热重分析试验开展焦粉和洗精末的燃烧特性分析，随后通过烧结杯试验探究不同燃料结构和粒度分布下燃料的燃烧行为对烧结烟气中 CO 排放的影响，从烧结 CO 生成机理分析出发，深入解析了固体燃料在热解和燃烧过程中固体碳的反应机制，阐述了烧结燃料结构与粒度分布变化导致料层内部温度及氧势变化对燃料燃烧产生 CO 的不同影响。结果表明，随着洗精末比例的逐渐提高，烟气中 CO 体积分数逐渐上升，尤其在洗精末配比超过 50% 后，CO 体积分数由 2.12% 显著上升到 2.60%，燃料粒级分布改善后烟气中的 CO 体积分数有较明显的下降，降幅约为 39.5%。因此，适当的增加烧结燃料中洗精末的配比再配合燃料粒度的提高可以有效降低烧结烟气中 CO 的排放。

关键词：固体燃料；燃烧特性；烧结烟气；CO；热重分析；焦粉；洗精末
中图分类号：X757 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)03－0097－09
doi：10.13403/j.sjqt.2024.03.047

Fuel combustion property and their influence on CO emissions from sintering exhaust gas

ZHONG Tingliang[1], WANG Yanjiang[2], SHE Xuefeng[1], LI Xiaohai[2],
TIAN Xiangzheng[1], XUE Qingguo[1]
(1. State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing, 100083, China; 2. Sintering Plant of Delong Steel, Xingtai 054009, Hebei, China)

Abstract: The combustion property of coke and washed powder are analyzed by a thermogravimetric analysis test, and then the influence of fuel combustion behavior on CO emissions in sintering exhaust gas under different fuel structures and particle size distributions is explored through a sintering cup test, and the formation mechanism of solid carbon in the pyrolysis and combustion process of solid fuels is deeply analyzed from the analysis of sintered CO generation mechanism, and the different effects on the change of internal temperature and oxygen potential of the material layer on the CO produced by fuel combustion caused by the change of sintering fuel structure and particle size distribution are described. The results show that, with the gradual increase of the proportion of washed powder, the CO volume fraction in the exhaust gas is increased gradually, especially after the proportion of washed powder exceeds 50%, the CO volume fraction is increased significantly from 2.12% to 2.60%, and the CO volume fraction in the exhaust gas is decreased significantly after the improvement of fuel particle size distribution, with a decrease of about 39.5%. Therefore, an appropriate increase in the proportion of washed powder in the sintering fuel and the increase of fuel particle size can effectively reduce the CO emission in the sintering exhaust gas.

Key words: solid fuel; combustion property; sintering exhaust gas; CO; thermogravimetric analysis; coke; washed powder

收稿日期：2023－02－17；**修回日期**：2023－07－13
基金项目：中国宝武低碳冶金创新基金资助项目(BWLCF202101)
作者简介：钟庭梁(1997—)，男，硕士研究生，从事铁矿石烧结工艺相关研究。
通信作者：佘雪峰(1978—)，男，博士，教授，从事高炉低碳炼铁和冶金固废综合利用相关工艺技术研究。

2022 年，我国的粗钢产量达到了 10.18 亿吨[1]，且目前我国炼铁工序仍以长流程为主，烧结矿作为炼铁工序的主要原料，占比大约在 70% 左右。据统计，烧结工序能耗占钢铁企业工序能耗的 10%~15%，而烧结总能耗当中绝大部分都来自于燃料的消耗，大约占 75%~80%[2]。燃料在铁矿石烧结过程中的主要作用是提供烧结物料熔融所需的热量与还原气氛[3]，伴随着燃烧反应和碳素的变化为烧结生产提供了超过 80% 的热量[4]。烧结过程的燃料主要是固体燃料和气体燃料[5]，气体燃料一般是焦炉煤气、高炉煤气和天然气，大多数是在烧结点火时使用，烧结生产中所使用的固体燃料主要是焦粉和煤粉，一般为两种燃料的不同配加量的组合。由于两种燃料的燃烧性和反应性的自身性能差异以及燃料不同的粒度占比，布料完成、点火开始烧结后，料层内部燃料燃烧发出的热量在抽风作用下，向下供给效果对料层温度场分布、燃烧带、料层透气性等影响烧结顺行和烧结矿质量的因素有重要影响。对于使用不同的燃料组合成混合燃料进行烧结时，二者不同配比以及不同的粒度组成将会直接影响到烧结烟气中 CO 含量的高低。

根据烧结过程 CO 生成机理可知[6]：烧结烟气中的 CO 产生来源主要是固体燃料中的挥发分和固体碳的不完全燃烧反应产生，即燃烧型 CO[7]，因此研究燃料特性及燃料在料层中的燃烧行为是烧结减排 CO 排放的关键要素[8]。固体燃料粒度的大小对烧结过程的影响很大，过粗或过细均不利于铁矿石的烧结[9~11]。当分布在料层内部的燃料颗粒粒度过大时，燃料的燃烧速度慢，燃烧反应持续时间长，持续的热量产生导致燃烧带变宽，烧结过程料层透气性下降等不利影响。反之，参与料层内部燃烧反应的燃料粒度过小时，较大的比表面积使得燃料燃烧速度加快，快速的放热会导致热量被抽风带走，液相反应热量不足，难以持续完全反应，烧结矿成品率降低，最终会导致燃料利用率下降，固体燃料消耗升高。此外，不同粒级的固体燃料在转运和布料过程中会产生不一样的分布状态。烧结混合料在布料过程中存在燃料偏析，燃烧时产生热量分布不均从而使料层产生的液相含量分布不均，将直接导致料层的透气性降低，对烧结顺行不利。当前烧结工序使用的燃料基本上是焦粉和煤粉，单一或混合的使用，从成分分析和生产应用表明，焦粉的烧结性能要优于大部分的煤粉，但大量的使用焦粉生产会导致成本的增加。因此，目前各企业的烧结厂在保证烧结矿质量和烟气排放标准的情况下，努力寻求焦粉和煤粉的适当比例组成混合燃料进行生产，进而实现降本增效的生产目标。但由于焦粉和煤粉的燃烧性能存在着差异，进而对混合燃料的配比结构和粒度组成控制要求更高，导致生产现场对燃料结构的控制和混合燃料粒度分布的调整面临困难，对烧结烟气 CO 排放源头和过程控制不利。

因此，本文以某钢铁企业烧结厂为例，通过烧结杯试验研究当前燃料条件(焦粉与洗精末组合使用)下，从固体燃料燃烧角度出发，分析燃料结构和粒度组成变化对烧结气氛氧势及烟气 CO 排放的影响规律，以便为现场节能减排与降本增效提供参考。

1 烧结过程 CO 生成机理

在烧结工序中，烟气中的 CO 主要来源于点火煤气及固体燃料中含碳物质的不完全燃烧[12]，很少一部分来自物料中碳酸盐的分解[13]。此外，由于燃料在料层中处于无规律、不规则的散乱分布，因此，烧结料层中燃料的燃烧规律性介于单体焦粒燃烧与焦粒层燃烧之间，属非均相反应[14]。

刘文强等[15]从焦炭燃烧过程的热力学角度分析了烧结烟气 CO 排放规律。其认为烧结点火后，烧结料层中的固体燃料碳发生以下 4 种主要燃烧反应：

$$C + O_2 = CO_2 \quad \Delta G^{\theta} = -395\,350 - 0.54T \tag{1}$$

$$2C + O_2 = 2CO \quad \Delta G^{\theta} = -228\,800 - 171.54T \tag{2}$$

$$2CO + O_2 = 2CO_2 \quad \Delta G^{\theta} = -561\,900 + 170.46T \tag{3}$$

$$CO_2 + C = 2CO \quad \Delta G^{\theta} = -166\,550 - 171.00T \tag{4}$$

烧结点火开始后固体燃料燃烧释放出了大量的热量，烧结物料在高温下软化熔融，在抽风负

压的作用下燃烧过程向料层下部进行，烧结过程形成的燃烧带温度范围大约在 1 200 ~ 1 500 ℃[16]。上述的 4 种碳燃烧基本反应，在烧结过程中都是同时进行的。随着温度的上升，当温度达到 500 ~ 700 ℃时，碳此时处于红热状态下，但未发生碳氧的燃烧反应。当温度高于 700 ℃，则最先发生 CO 二次燃烧反应，之后才是生成 CO_2 的碳氧燃烧反应，但是也会有碳氧不完全燃烧产生 CO 存在。由温度对吉布斯自由能的影响(图 1)可知，反应需要的吉布斯自由能越高，反应越不易发生。当温度超过 727 ℃后，温度升高，首先发生生成 CO 的碳氧反应；其次是生成 CO_2 的反应；最后，则是需要更高的吉布斯自由能的 CO 二次燃烧反应。

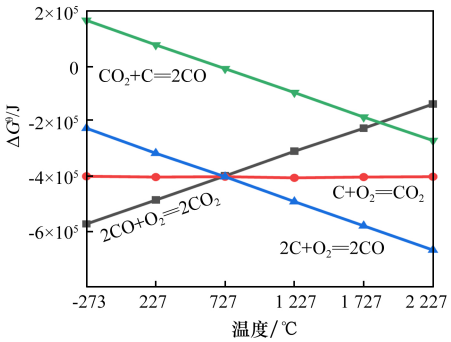


图 1　温度对吉布斯自由能的影响

Fig. 1　Effect of temperature on Gibbs free energy

裴元东等[4]从烧结过程中焦炭燃烧过程的动力学角度对 CO 生成进行分析表明，烧结过程中，在抽风的作用下，空气从上至下穿过烧结料层，气流以一定流速与固体物料接触，如图 2 所示。根据对流扩散气固两相传质模型可知，两者间一定会存在一个气相边界层影响着氧气达到反应界面以及气体产物离开反应界面。因此，焦炭的燃烧程度不仅受温度的影响，还和烧结过程料层中

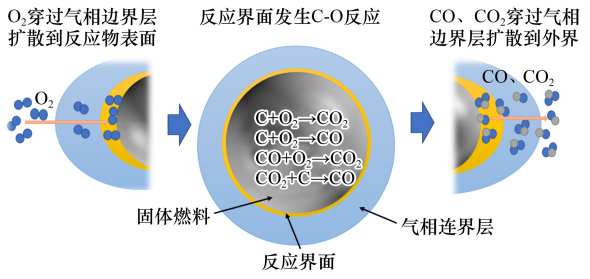


图 2　对流扩散气固两相传质模型

Fig. 2　Mass transfer model of convection diffusion gas-solid two-phase

的气氛和气流条件密切相关。

根据气固反应模型[17]，碳燃烧反应过程：① O_2 通过自由扩散从气相扩散到达 C 的表面；② O_2 吸附在 C 的表面；③ C 和 O_2 在 C 的表面发生界面化学反应；④ CO 和 CO_2 从 C 的表面脱附；⑤ 气态反应产物通过自由扩散从界面向外扩散到气相中。

2　试验部分

2.1　试验原料

烧结杯试验所用的原、燃料以及各物料的配比方案全部来源于烧结车间生产现场，包括混匀料、3 种熔剂、焦粉和洗精末等。其中，焦粉和洗精末均购自外厂，原燃料粒度分布较为稳定，主要集中在 1 ~ 3 mm，其工业分析见表 1。其它物料主要成分见表 2，试验用配比见表 3。

表 1　固体燃料工业分析(质量分数)

Table 1　Industry analysis of solid fuel　　%

燃料种类	挥发分	S	C	灰分	水分
焦粉	1. 46	0. 85	84. 26	14. 07	1. 85
洗精末	2. 21	0. 59	81. 98	14. 68	7. 94

表 2　物料主要化学成分(质量分数)

Table 2　Main chemical composition of sintering materials　　%

物料	TFe	CaO	SiO_2	MgO	H_2O
混匀料	62. 15	3. 23	5. 55	2. 11	7. 60
生石灰	—	84. 69	1. 80	—	—
石灰石	—	53. 16	1. 25	1. 61	1. 90
返矿	54. 56	12. 18	5. 26	2. 74	—

由表 1 可知，试验用洗精末(在无烟煤的精洗过程中产生的一种燃料)的固定碳含量明显低于焦粉，而挥发分和灰分的含量高于焦粉。洗精末能否在一定程度上代替焦粉完成烧结过程，并保证烧结矿质量和控制 CO 排放，需要进一步试验验证。

由表 2 可知，混匀料 w(TFe)、w(SiO_2)、w(MgO)分别为 62. 15%、5. 55%、2. 11%，水分控制在 7. 6%；返矿铁品位较低，仅为 54. 56%，而 w(CaO)较高，为 12. 18%。

表 3 是试验过程的烧结物料基准配比，其中固体燃料占总物料配比的 4. 2%，是后续试验不同

燃料结构下，单一焦粉、单一洗精末或者两者作为混合燃料时的配比。

表 3 烧结物料基准配比(质量分数)

Table 3 Benchmark roportion of sintered materials %

混合料	返矿	燃料	石灰石	生石灰
72.50	10.00	4.20	6.30	7.00

2.2 试验方法

2.2.1 烧结杯试验

试验使用的烧结杯规格为 ∅200 mm × 900 mm，试验布料厚度为 860 mm，使用天然气在负压为 6 kPa 的条件下点火 2 min，点火温度为(1 150 ± 50)℃；加水量控制在(7.5 ± 0.1)%；w(MgO)控制在(2.20 ± 0.1)%，碱度控制在 1.88 ± 0.02，燃料配比为 4.2%，返矿配比为 10%。在烧结杯中部，高度为 400 mm 处布置热电偶测量料层温度变化；在烧结烟道布置紫外差分烟气分析仪 MH3200，烧结开始后每隔 30 s 记录一次烧结烟气的中 O_2 和 CO 质量浓度的变化情况。试验装置如图 3 所示。

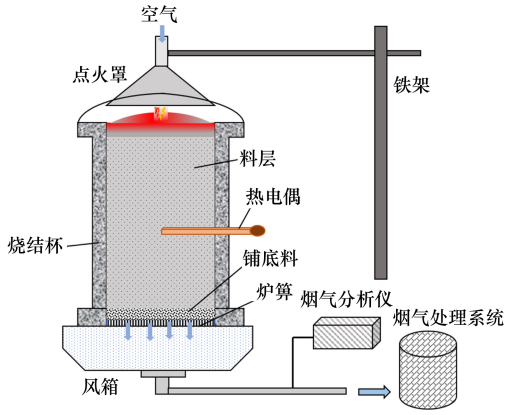


图 3 烧结杯试验

Fig. 3 Experimental diagram of sintering cup

2.2.2 热重试验

燃料热重分析试验样品质量为(10 ± 0.5) mg，在设置程序从室温(25 ℃)逐渐升温至 950 ℃(升温速率为 20 ℃/min)，气氛为空气，气体压力为 0.1 MPa，气体流量为 40 mL/min 的条件下在热重分析仪上进行试验。试验结束后从电脑导出热重分析试验数据，使用软件 Origin 处理数据得到试验样品 TG 和 DTG 燃烧曲线。热重分析仪试验设备结构示意如图 4 所示。

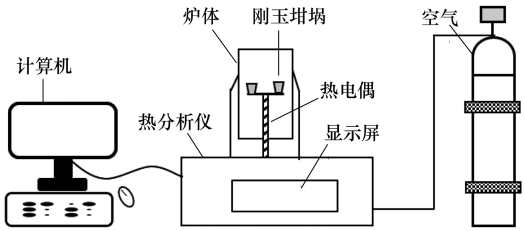


图 4 热重分析试验设备结构示意

Fig. 4 Structure diagram of thermogravimetric analysis experimental equipment

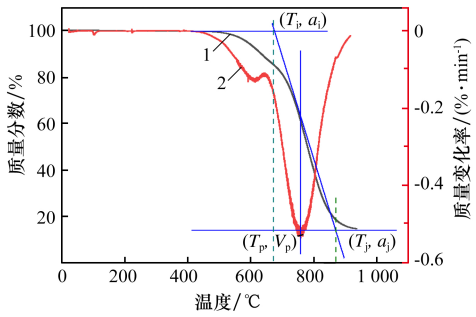
3 结果与讨论

3.1 燃料燃烧特性分析

根据热重试验所得到的热重曲线和微商热重曲线(TG-DTG)，具体如图 5 所示。并采用公式(5)求得样品的平均燃烧速率。

$$v_m = \beta \times \frac{\alpha_j - \alpha_i}{T_j - T_i} \tag{5}$$

式中：v_m 为平均燃烧速率，mg/min；β 为升温速率，T_i 为着火温度，℃；T_j 为燃尽温度，℃；α_i 为着火温度对应的样品质量分数，%；α_j 为燃尽温度对应的样品质量分数，%。



1—TG；2—DTG。

图 5 TG－DTG 特征参数曲线

Fig. 5 Schematic diagram of characteristic parameters of TG-DTG

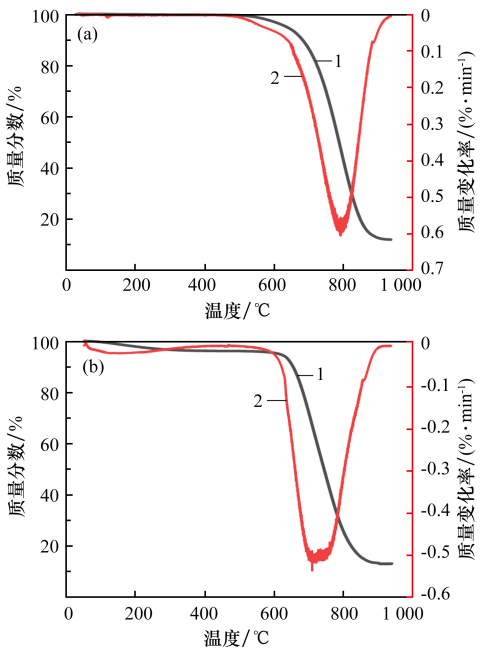
通过上述所得特征参数，可利用公式(6)和(7)进一步求得用于评价燃料燃烧前期反应能力和燃料燃尽综合特性的指数。两者的值越大代表燃料的着火稳定性和燃烧性能越好[18-20]。

$$C = \frac{v_p}{T_i^2} \tag{6}$$

$$S = v_p \times \frac{v_m}{T_i^2 \times T_j} \tag{7}$$

式中：C 为可燃性指数，$min^{-1}/℃^2$；S 为综合燃烧特性指数，$min^{-1}/℃^3$；T_p 为最大燃烧速度的温度，℃；v_p 为最大燃烧速率，mg/min。

对两种燃料的燃烧过程进行了 TG-DTG 分析，结果图 6 所示。由图 6 可知，焦粉燃烧区间都集中在某一区域，大部分的反应失重可以认为是焦粉中固定碳燃烧造成的。因为洗精末的挥发分含量要高于焦粉，从热重图可以看出洗精末的燃烧区间有两个区域。此外，洗精末中的挥发分随着温度的升高率先开始燃烧会促进固定碳的燃烧，会在较低温度优先达到最大燃烧速率，但是此时温度恰好是在焦粉的着火温度附近，洗精末的燃烧区间在 670 ~ 800 ℃左右，要略小于焦粉的燃烧区间 700 ~ 880 ℃。



（a）焦粉；（b）洗精末

1—TG；2—DTG。

图 6　燃料在空气气氛中的非等温失重过程

Fig. 6　Non-isothermal weightlessness process of fuel in air atmosphere

结合公式(5) ~ (7)可以得出，烧结用的焦粉和洗精末的燃烧特性参数，结果如表 4 所示。由表 4 可知，洗精末的着火点温度、燃尽温度和最高燃烧速率温度都要低于焦粉，从计算结果来看，洗精末的燃烧前期反应能力的可燃性指数要比焦粉的要更好一些，但它的燃尽综合特性的综合燃烧特性指数要比焦粉的略低一些。两者的燃烧性能差异不大，但是在作为烧结使用两者组成的混合燃料时，要考虑两者分别在燃烧前期和后期的燃烧特性的差异对燃烧及料层局部氧势的影响。

3.2　燃料结构对料层温度分布的影响

基准物料配比下，采用 5 种燃料结构(见表 5)进行烧结杯试验。

将热电偶放置在烧结杯中部，在料层高度为 400 mm 位置处测量料层温度，5 组方案温度变化曲线如图 7 所示。

当燃烧带到达热电偶位置时，温度开始上升并达到最大值，定义温度开始到达 1 100 ℃后持续升高到最高温度并开始下降到 1 100 ℃这段时间为高温时间段。由图 7 可知，随着洗精末比例增大，燃烧带高温持续时间(温度 >1 100 ℃)先略微增大后快速下降，其中在配加 25% 洗精末情况下，高温持续时间最长(约为 110 s)，而使用 100% 洗精末的高温持续时间最短(约为 70 s)。

从热力学角度分析可知，由于洗精末配比的提高，单位体积分布的燃料中洗精末含量增多，挥发分含量相对较高的洗精末率先反应，导致洗精末颗粒附近 O_2 体积分数下降，料层局部氧势降低，剩余焦粉在氧势低的气氛下的不完全燃烧，导致燃料燃烧产生的热量降低且 CO 的生成量增加；此外，在抽风负压的作用下，洗精末的燃烧速度进一步加快，燃料燃烧后的热量难以被有效利用，烧结过程中料层高温停留时间变短，高温区域变窄，烧结液相反应时间变短，造成烧结矿质量的下降。

表 4　焦粉和洗精末的燃烧特性参数

Table 4　Combustion characteristic parameters of coke powder and detergent powder

试样	T_i/℃	T_p/℃	V_p/(mg·min^{-1})	T_j/℃	V_m/(mg·min^{-1})	$C\times10^{-6}$/(min^{-1}·℃$^{-2}$)	$S\times10^{-9}$/(min^{-1}·℃$^{-3}$)
焦粉	741.3	797.8	0.58	832.5	19.298	1.055	0.245
洗精末	670.5	712.6	0.506	792.3	14.450	1.125	0.205

表 5 燃料结构烧结试验燃料配比方案

Tables 5 Fuel proportioning scheme for sintering test of fuel structure

试验编号	燃料配比(质量分数)/%		燃料结构
	外购焦粉	普通洗精末	
A	4.20	0.00	100% 焦粉
B	3.15	1.05	75% 焦粉 +25% 洗精末
C	2.10	2.10	50% 焦粉 +50% 洗精末
D	1.05	3.15	25% 焦粉 +75% 洗精末
E	0.00	4.20	100% 洗精末

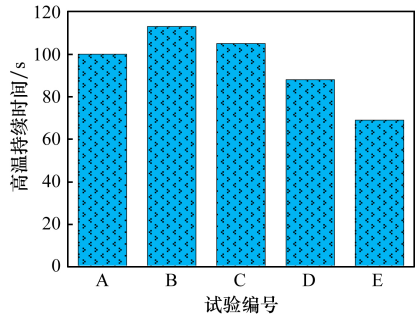


图 7 不同燃料结构下料层中部燃烧带温度变化

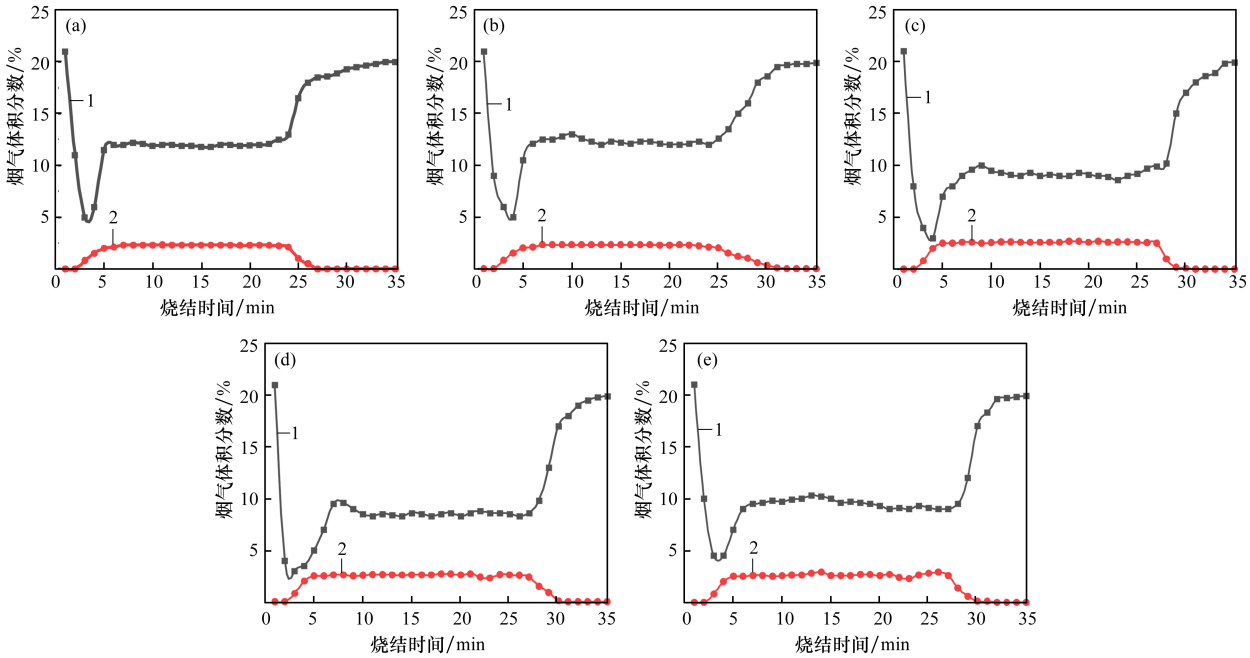
Fig. 7 Temperature changes in the middle combustion zone of different fuel structures

3.3 燃料结构对烟气成分的影响

为了进一步研究烧结燃料中洗精末配比对烧结烟气中 CO 生成量的影响。以表 4 燃料结构方案，进行 5 种燃料结构下的烧结杯试验，具体结果如图 8、9 所示。

由图 8、9 可知，烧结开始时 CO 体积分数逐渐上升，在整个烧结全程均有 CO 生成，体积分数维持在 2.5% 左右，没出现明显的峰值，直至到达烧结终点快速降低到 0。通过对 5 种燃料结构下总的 CO 排放量进行计算，发现随着洗精末比例升高，CO 体积分数逐渐上升，尤其在洗精末配比超过 50% 后更加明显，体积分数由 2.12% 迅速上升到 2.60%，同时烟气中 O_2 体积分数由 14.21% 逐步下降到 9.89%。

试验中，随着混合燃料中洗精末的比例上升，造成烟气中 CO 体积分数升高。从燃料燃烧特性角度分析，对于不同比例的洗精末与焦炭构成的混合燃料，由于反应性的差异，两者的燃烧速度不一样，洗精末与焦粉相比，其相对较高的挥发分致使在较低的温度下先开始燃烧，导致混合燃料在燃烧时会存在“抢风”现象，使焦炭在料层局

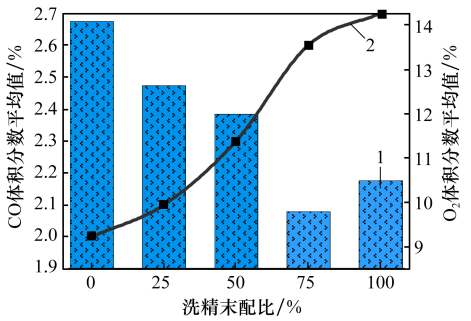


（a）100% 焦粉；（b）75% 焦粉 +25% 洗精末；（c）50% 焦粉 +50% 洗精末；（d）25% 焦粉 +75% 洗精末；（e）100% 洗精末

1—O_2；2—CO。

图 8 洗精末配比对烧结烟气中 CO 和 O_2 体积分数的影响

Fig. 8 Influence of the volume fraction of CO and O_2 in sintering flue gas on the content of XJ-coal



1—CO；2—O_2。

图 9　洗精末配比对烧结烟气中 CO 和 O_2 体积分数平均值的影响

Fig. 9　Influence of the average volume fraction of CO and O_2 in sintering flue gas on the content of XJ-coal

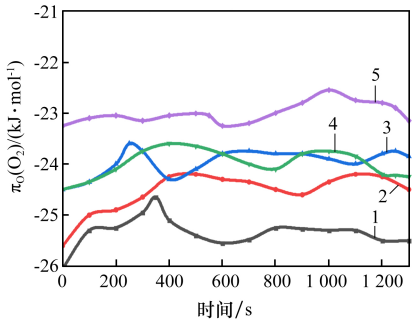
部相对缺氧的气氛中燃烧，从而造成了焦炭完全燃烧更加的困难，生成了较多的 CO。

利用烟气中氧气的体积分数进行烧结氧势理论计算，来预测不同洗精末配比下料层中氧势水平，氧气的体积分数可用氧分压 Po_2 表示。依据公式(8)进行氧势理论计算。

$$\pi_{0(O_2)} = \mu_{O_2} - \mu^{\theta}_{O_2} = RT\ln P_{O_2} \tag{8}$$

式中：$\pi_{0(O_2)}$ 为氧势，J/mol；R 为常数，R = 8.314；T 为温度，℃；P_{O_2}为氧分压单位，P；由烧结烟气成分数据可得。

针对烧结燃料配比这一研究因素，以点火结束后 1 200 s 作为终点，假设料层燃烧带温度为 1 250 ℃，其计算料层氧势结果如图 10 所示。



1—100% 洗精末；2—75% 洗精末；3—50% 洗精末；4—25% 洗精末；5—全焦。

图 10　燃料种类氧势变化规律(料层温度 1 250 ℃)

Fig. 10　Change law of oxygen potential of fuel types (bed temperature 1 250 ℃)

由图 10 可以看出，随着燃料中洗精末配比的提高，氧势总体上呈现出降低的趋势。因为焦粉和洗精末组成的烧结混合燃料中，两者的燃烧性能存在差异，导致烧结过程中两者燃烧速率不匹配。洗精末的燃烧速度较快且前期燃烧能力较强，当洗精末比例提高时，洗精末的快速燃烧致使料层氧势下降，料层局部缺氧后燃料的燃烧不完全加剧，CO 生成量有所提高。同时在抽风作用下，燃料燃烧不充分，料层后续热量不足，导致燃烧带温度降低，烧结液相量生成不均匀，料层透气性恶化之后也会造成料层氧势降低。

3.4　燃料粒度对 CO 排放的影响

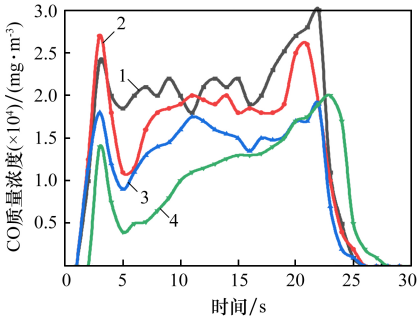
在混合制粒过程中配加不同粒度分布阶梯的焦粉进行烧结杯试验，烧结过程中监测、记录烧结烟气中 CO 和 O_2 质量浓度的变化数据，用于观察分析燃料粒径变化对烧结过程 CO 的影响规律。

根据不同焦粉粒径的试验方案，对焦粉进行筛分处理，分为 4 种粒级即［0，1）mm、［1，2）mm、［2，3）mm、［3，5）mm。在基准物料配比下，以配碳量 4.2%，配加不同粒级焦粉进行烧结杯试验，通过 MH3200 型烟气分析仪测定出烧结全过程中排放的 CO、O_2 质量浓度的变化，其 CO 和 O_2 质量浓度变化分别如图 11、12 所示，烧结从开始至终点(烧结废气温度达到最高点)过程 CO 排放量如图 13 所示。

表 6　不同焦粉粒径试验方案

Table 6　Experimental schemes of different coke powder particle sizes

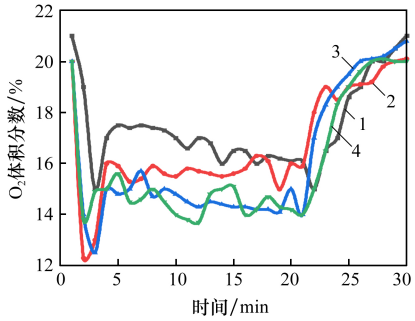
试验编号	1	2	3	4
焦粉粒径	［0,1）mm	［1,2）mm	［2,3）mm	［3,5）mm



1—［0,1）mm；2—［1,2）mm；3—［2,3）mm；4—［3,5）mm。

图 11　焦粉粒径对烧结烟气中 CO 质量浓度的影响

Fig. 11　Influence of coke powder particle size on CO concentration in sintering flue gas



1—[0,1) mm；2—[1,2) mm；3—[2,3) mm；4—[3,5) mm。

图 12 焦粉粒径对烧结烟气 O_2 体积分数的影响

Fig. 12 Influence of coke powder particle size on O_2 volume fraction in sintering flue gas

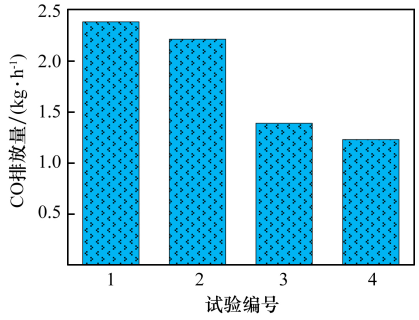


图 13 焦粉粒径对烧结烟气中 CO 排放量的影响

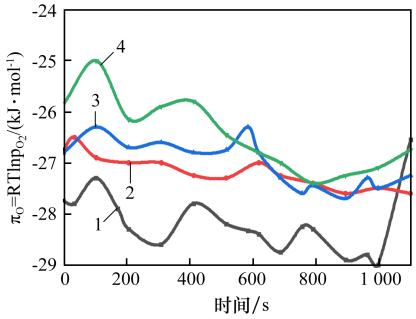
Fig. 13 Influence of coke powder particle size on CO emission in sintering flue gas

由图 11、12 可以看出，当焦粉粒度为[0,1) mm 时，CO 质量浓度总体处于较高的水平，点火结束后维持在 21 g/m^3，峰值达到 29 g/m^3，且 O_2 体积分数维持在约 15.3%。当焦粉粒度增加至[1,2) mm 时，CO 质量浓度有一定程度的降低，平均维持在 18 g/m^3，峰值大约在 26 g/m^3；当焦粉粒度继续增加至[2,3) mm 时，制粒效果一定程度上变好，料层透气性一定程度上得到改善，随着氧化性气氛改善，焦粉燃烧效率增加，CO 质量浓度显著降低，峰值约为 18 g/m^3，相较[0,1) mm 时降低了约 37.2%；当焦粉再次增加至[3,5) mm 时，CO 质量浓度仍有所减少。

由图 13 可知，当焦粉粒径由[0,1) mm 增至[1,2) mm 时，CO 排放量有所降低，下降约 8%，但当粒径进一步增加至[2,3) mm 时，CO 的排放量急剧下降，下降约 39.5%，当粒径继续增加至[3,5) mm 时，CO 的排放量亦有一定程度下降，相较于[2,3) mm 下降约 6%。

综合来看，随着焦粉粒径的逐渐增大，烧结烟气中 CO 的排放量逐渐减少。其主要是因为焦粉的粒级增大，对制粒效果有所提升，进而改善料层透气性，氧化气势提高利于燃料的充分燃烧，减少 CO 的生成。同时，减少细粒级焦粉的快速燃烧可使料层局部氧势有所提高，从而可使粒级较大的焦粉燃烧效率提高，完全反应进一步得到发展，减少了 CO 的生成。

根据式(5)对不同燃料粒度进行氧势计算。针对燃料粒度这一研究因素，以点火开始后 1 200 s 为终点，设置料层温度为 1 250 ℃，结果如图 14 所示。



1—[0,1) mm；2—[1,2) mm；3—[2,3) mm；4—[3,5) mm。

图 14 燃料平均粒度氧势变化规律(料层温度 1 250 ℃)

Fig. 14 Variation law of average particle size oxygen potential of fuel (bed temperature 1 250 ℃)

由图 14 可知，随着燃料粒度降低，料层氧势降低，原因是粒度较细的燃料在制粒的过程中黏附于准颗粒表面，烧结开始后与氧气接触快，且比表面积较大，燃烧反应迅速，消耗了氧气，导致料层局部氧势降低。当烧结生产细粒级燃料配比较高时，将会导致粗粒级燃料处于一个低氧势的气氛条件下，从而趋于发展不完全燃烧，产生更多的 CO。氧势计算的变化趋势也和实验烧结烟气 O_2 和 CO 质量浓度变化过程一致，细粒级的燃料快速燃烧造成的料层局部缺氧以及热量供应不足，致使剩余大颗粒燃料的不完全燃烧增加，生成 CO 含量上升。此外，燃烧速度过快会导致燃烧层变薄，烧结过程中的传热速度和反应速度与燃烧速度不匹配，来不及产生足够的液相，从而影响烧结矿的强度，导致成品率降低，也会使燃料的利用率下降。

4 结 论

（1）烧结料层中的焦炭燃烧反应过程受到温度、烧结过程料层中的气氛和气流条件的共同作用影响。烧结燃烧带温度在 1 200 ~ 1 500 ℃，焦炭燃烧过程在高温下容易生成 CO，但可以通过提高燃烧环境的氧含量，提高氧势促进焦炭的完全燃烧和 CO 的二次燃烧反应进行。

（2）混合燃料配比中洗精末比例的增加会导致烧结速度加快，料层内部氧势下降，不利于燃料的完全燃烧，CO 的生成量增加。同时，形成了一个范围较宽、温度略低的燃烧带，使得烧结矿产、质量有所降低。此外，较大燃料颗粒能够减少 CO 的生成，但燃料颗粒过大会造成局部高温还原性气氛过强，影响烧结矿质量。

（3）从洗精末的配比和燃料粒度两个方面考虑，建议减少烧结燃料中洗精末的使用，并控制在 50% 以内；在燃料粒度上，应当控制细粒级燃料的占比，增大燃料平均粒级至[2,3）mm。这些举措将对对改善烧结矿产、质量和减少 CO 排放有积极的影响。

参考文献：

[1] 国家统计局．中华人民共和国 2022 年国民经济和社会发展统计公报[R/OL]．(2023 - 02 - 28)．http://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230228_1919011.html.
National Bureau of Statistics. Statistical bulletin on national economic and social development of the People's Republic of China in 2022[R/OL]. (2023 - 02 - 28). http://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230228_1919011.html.

[2] 王永红，刘建波，周俊兰，等．燃料粒度对烧结指标的影响研究[J]．烧结球团，2018，43(3)：37 - 42.
WANG Yonghong，LIU Jianbo，ZHOU Junlan，et al. Study on influence of particle size of fuels on sintering indexes[J]. Sintering and Pelletizing，2018，43(3)：37 - 42.

[3] 刘燊辉，白凯凯，倪桂虎，等．燃料粒度对铁矿烧结的影响研究[J]．烧结球团，2019，44(6)：17 - 22.
LIU Shenhui，BAI Kaikai，NI Guihu，et al. Study on influence of fuel size on iron ore sintering[J]. Sintering and Pelletizing，2019，44(6)：17 - 22.

[4] ZHAO J，LOO C E，ZHOU H，et al. Modelling and analysis of the combustion behaviour of granulated fuel particles in iron ore sintering[J]. Combustion and Flame，2018，189：257 - 274.

[5] 姜涛．铁矿造块学[M]．长沙：中南大学出版社，2013：32 - 34.
JIANG Tao. Iron ore blocking[M]. Changsha：Central South University Press，2013：32 - 34.

[6] 廖继勇，郑浩翔，甘敏，等．烧结烟气 CO 的产生及治理途径：生成机理及排放规律[J]．烧结球团，2021，46(2)：1 - 7.
LIAO Jiyong，ZHENG Haoxiang，GAN Min，et al. Generation and governance way of CO in sintering flue gas-formationmechanism and emission law[J]. Sintering and Pelletizing，2021，46(2)：1 - 7.

[7] 赵欣锋，齐西伟，张遵乾，等．烧结烟气中 NO_x 减排进展[J]．钢铁，2022，57(11)：175 - 189.
ZHAO Xinfeng，QI Xiwei，ZHANG Zungan，et al. Progress and exploration of NO_x emission reduction in sintering flue gas[J]. Iron and Steel，2022，57(11)：175 - 189.

[8] 易正明，覃佳卓，刘强，等．燃料特性对铁矿石烧结及烟气排放的影响[J]．环境工程，2022，40(3)：59 - 65.
YI Zhengming，QIN Jiazhuo，LIU Qiang，et al. Effect of fuel characteristics on sintering and flue gas emission of iron ore[J]. Environmental engineering，2022，40(3)：59 - 65.

[9] 刘自民，金俊，武轶，等．固体燃料和熔剂粒度对烧结生产影响的试验研究[J]．烧结球团，2015，40(4)：16 - 19.
LIU Zimin，JIN Jun，WU Yi，et al. Experimental study on influences of solid fuel and flux size on sintering production[J]. Sintering and Pelletizing，2015，40(4)：16 - 19.

[10] 欧大明，孙骐，沈红标，等．焦粉粒度对铁矿石烧结过程的影响[J]．钢铁，2008(10)：8 - 12.
OU Daming，SUN Qi，SHEN Hongbiao，et al. Effect of coke size on lron ore sintering[J]. Iron and Steel，2008(10)：8 - 12.

[11] 韩淑峰，周明顺，夏铁玉，等．烧结固体燃料最佳粒度的研究[J]．烧结球团，2013，38(2)：20 - 24；55.
HAN Shufeng，ZHOU Mingshun，XIA Tieyu，et al. Study on optimal particle size of sintering solid fuels[J]. Sintering and Pelletizing，2013，38(2)：20 - 24；55.

[12] 赵欣锋，齐西伟，程扬，等．铁矿烧结过程烟气排放规律分析[J]．钢铁研究学报，2022，34(8)：758 - 767.
ZHAO Xinfeng，QI Xiwei，CHENG Yang，et al. Analysis of flue gas emission law in sintering process of iron mine[J]. Journal of Iron and Steel Research，2022，34(8)：758 - 767.

（下转第 113 页）

MA Guisheng, XIA Qiuyu, ZHANG Shuhua, et al. Research on Zn load control and utilization of ferrous dust in blast furnace of steel plant[J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(5):77 – 82.

[10] LANZERSTORFER C,BAMBERGER-STRASSMARY B, PILZ K. Recycling of blast furnace dust in the iron ore sintering process:investigation of coke breeze substitution and the influence on off-gas emissions[J]. ISIJ International,2015,55(4):758 – 764.

[11] 于恒,黄细聪,李科,等. 钢铁企业除尘灰综合利用现状与展望[J]. 矿产保护与利用,2021,41(4):164 – 171.
YU Heng,HUANG Xiong,LI Ke,et al. Present situation and prospect of comprehensive utilization of precipitator dust in iron and steel enterprises[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2021,41(4):164 – 171.

[12] 张鑫,姜鑫,王学斌,等. K_2O 对烧结矿强度影响的试验研究[J]. 钢铁,2020,55(8):49 – 55.
ZHANG Xin, JIANG Xin, WANG Xuebin, et al. Experimental study on influence of K_2O on strength of sinter[J]. Iron and Steel,2020,55(8):49 – 55.

[13] 秦立浩,墙蔷,阳红辉,等. 烧结机头电除尘灰的分级利用[J]. 钢铁研究学报,2020,32(9):802 – 808.
QIN Lihao, QIANG Qiang, YANG Honghui, et al. Classified utilization of sintering EAF dust[J]. Journal of Iron and Steel Research,2020,32(9):802 – 808.

[14] 安钢,徐景海,李洪革,等. 烧结除尘灰的提前制粒工艺[J]. 烧结球团,2001,26(4):45 – 49.
AN Gang,XU Jinghai,LI Hongge,et al. Development of sintering precipitator dust granulation process[J]. Sintering and Pelletizing,2001,26(4):45 – 49.

[15] 李和平,张琦,王炜,等. 冶金粉尘对铁矿粉高温性能影响研究[J]. 烧结球团,2023,48(1):8 – 14.
LI Heping,ZHANG Qi,WANG Wei,et al. Research on influence of metallurgical dust on high temperature performance of iron ore powder[J]. Sintering and Pelletizing,2023,48(1):8 – 14.

(上接第 113 页)

[13] 王兆才,刘臣,李继淦,等. 烧结烟气 CO_x 的生成机理及减排措施[J]. 烧结球团,2021,46(1):14 – 22.
WANG Zhaocai, LIU Chen, LI Jigan, et al. Generation mechanism and emission reduction measures of CO_x in sintering flue gas[J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(1):14 – 22.

[14] 傅菊英,姜涛,朱德庆. 烧结球团学[M]. 长沙:中南大学出版社,1996. 28 – 29.
FU Juying, JIANG Tao, ZHU Deqing. Sintering and pelletizing[M]. Changsha: Central South University Press,1996.

[15] 刘文强,程扬,李杰,等. 焦粉粒度对烧结烟气中 CO 排放的影响[J]. 钢铁研究学报,2020,32(7):633 – 638.
LIU Wenqiang, CHENG Yang, LI Jie, et al. Effect of particle size of coke powder on CO emission in sintering flue gas[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2020, 32(7):633 – 638.

[16] 刘子豪,周昊,周明熙,等. 焦粉粒径对烧结床中燃烧带分布的影响[J]. 浙江大学学报(工学版),2016,50(4):691 – 697;791.
LIU Zihao, ZHOU Hao, ZHOU Mingxi, et al. Influence of coke size on combustion zone distribution in sintering bed[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Edition),2016,50(4):691 – 697;791.

[17] 郭汉杰. 冶金物理化学教程[M]. 北京:冶金工业出版社,2006:114 – 126.
GUO Hanjie. Course of metallurgical physical chemistry[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2006:114 – 126.

[18] 蒋青,袁亚强,都海龙,等. 晋城无烟煤和焦粉燃烧特性与氮排放研究[J]. 江西冶金,2022,42(4):16 – 21.
JIANG Qing, YUAN Yaqiang, DU Hailong, et al. Research on the combustion characteristics and nitrogen emissions of Jinchen oanthracite and coke powder[J]. Jiangxi Metallurgy,2022,42(4):16 – 21.

[19] 范鹏远. 楠竹粉燃烧特性及阻燃剂影响规律研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2019.
FAN Yuan. Study on the combustion characteristics of phyllostachys pubescens powder and the influence law of flame retardants[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2019.

[20] 袁亚强,何志军,韩啸,等. 准颗粒中烧结用燃料燃烧特性[J]. 钢铁研究学报,2020,32(5):386 – 392.
YUAN Yaqiang,HE Zhijun,HAN Xiao,et al. Combustion characteristics of sintering fuel in quasi-particle[J]. Journal of Iron and Steel Research,2020,32(5):386 – 392.