

# 烧结温度与气氛对准颗粒燃烧行为和烟气排放的影响

吕思源, 胡长庆, 李超然

(华北理工大学 冶金与能源学院, 河北 唐山 063210)

**摘要:** 铁矿粉烧结过程中, 烧结工艺参数对燃烧过程中准颗粒的燃烧行为和 CO、NO 排放情况影响较大, 为了更好地研究低温区燃料燃烧过程的燃烧行为和 CO、NO 的排放特点, 为实际烧结过程烟气污染减排提供一定的理论指导, 本文选取白云石为核颗粒且黏附比为 71% 的外包型 (C 型) 准颗粒, 利用燃烧反应炉、烟气分析仪, 研究烧结气氛、烧结温度对准颗粒燃料燃烧行为、烧结过程 CO 与 NO 排放量的影响规律。结果表明, 随着温度和 O<sub>2</sub> 体积分数的提高, CO 的峰值质量浓度呈下降趋势, NO 的峰值质量浓度呈上升趋势。与之相反的是, 随着 CO<sub>2</sub> 体积分数的增加, CO 的峰值质量浓度升高, 而 NO 的峰值质量浓度降低。当 O<sub>2</sub> 体积分数由 10% 提升至 21%, CO 排放总量减少 66.7%、NO 排放总量提升 64%; 当 CO<sub>2</sub> 体积分数由 5% 提升至 15%, CO 排放总量提升 99.6%、NO 排放总量下降 53.7%; 当温度由 600 °C 上升至 1 050 °C, CO 排放总量减少 65.4%、NO 排放总量提升 90.4%。在最佳工艺参数: 温度为 900 °C, O<sub>2</sub> 体积分数为 16%, CO<sub>2</sub> 体积分数为 10% 条件下, 准颗粒燃烧过程中的 CO 和 NO 排放情况得到明显的改善。

**关键词:** 铁矿粉烧结; 准颗粒; CO 排放; NO 排放; 燃烧行为; 温度; 气氛

中图分类号: X701

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)02-0120-09

doi:10.13403/j.sjqt.2025.02.033

## Effects of sintering temperature and atmosphere on quasi-granules combustion behavior and gas emissions

LÜ Siyuan, HU Changqing, LI Chaoran

(College of Metallurgy and Energy, North China University of Technology, Tangshan 063210, Hebei, China)

**Abstract:** During the sintering process of iron ore powder, the sintering process parameters have a great impact on the combustion behavior of quasi-granules as well as CO and NO emissions during the combustion process. In order to better study the combustion behavior of fuel combustion process in the low-temperature zone and the emission characteristics of CO and NO, and provide certain theoretical guidance for the reduction of emissions of polluted gases in the actual sintering process, the outsourcing (C) quasi-granules with nuclear particles and adhesion ratio of 71% are selected, the combustion reactors and gas analyzers are used to study the impact rule of sintering atmosphere, sintering temperature on the combustion behavior of fuel, CO and NO emission rules and emissions during the sintering process. The results show that with the increase of temperature and O<sub>2</sub> volume fraction, the peak mass concentration of CO shows a downward trend, and the peak mass concentration of NO shows an upward trend. In contrast, as the CO<sub>2</sub> volume fraction increases, the peak mass concentration of CO increases, while the peak mass concentration of NO decreases. The O<sub>2</sub> volume fraction increases from 10% to 21%, the total CO emissions decrease by 66.7%, and the total NO emissions increase by 64%. The CO<sub>2</sub> volume fraction increases from 5% to 15%, the total CO emissions increase by 99.6%, and the total NO emissions decrease by 53.7%. The temperature increases from 600 °C to 1 050 °C, the total CO emissions decrease by 65.4%, and the total NO emissions increase by 90.4%. Under the conditions of optimal process parameters: temperature is 900 °C, O<sub>2</sub> volume

收稿日期: 2023-06-24; 修回日期: 2024-08-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52074127)

作者简介: 吕思源(1999—), 男, 硕士研究生, 从事烧结工艺参数、准颗粒燃烧方面的研究。

fraction is 16%, and CO<sub>2</sub> volume fraction is 10%, the CO and NO emissions during quasi-granules combustion have been significantly improved.

**Key words:** iron ore powder sintering; quasi-granules; CO emissions; NO emissions; burning behavior; temperature; atmosphere

铁矿粉烧结是高炉—转炉流程中不可或缺的环节之一,烧结工序所排放的SO<sub>2</sub>、氮氧化物、烟粉尘、二噁英分别占钢铁制造流程的70%、50%、40%、90%<sup>[1-4]</sup>,而排放出的SO<sub>2</sub>、氮氧化物在空气中形成气态污染物,成为PM<sub>2.5</sub>的主要来源,而雾霾的形成又与PM<sub>2.5</sub>有不可分割的关系<sup>[5]</sup>。烧结工序作为钢铁行业中CO排放量最大的工序,占比高达36.06%<sup>[6]</sup>。国务院在《“十四五”节能减排综合工作方案》中对钢铁行业提出明确要求,要在2025年前对大气污染防治重点区域全面实现超低排放改造<sup>[7]</sup>。

根据现有研究,将烧结混合料中的准颗粒分为4类<sup>[8]</sup>:大粒级焦粉颗粒,即S'型准颗粒;细铁矿粉、熔剂包裹的大粒级焦粉颗粒,即S型准颗粒;小粒级焦粉和铁精粉等包裹的铁矿粉、熔剂等粗颗粒,即C型准颗粒;小粒级焦粉与细铁矿粉、熔剂混合的颗粒,即P型准颗粒<sup>[9]</sup>。目前对准颗粒烧结的研究多从准颗粒制粒过程、准颗粒粒度组成、准颗粒类型、焦粉粒径、黏附层种类等方面进行研究<sup>[10-12]</sup>,朱德庆等<sup>[13]</sup>对镜铁矿粉在铁矿烧结混合料中的制粒行为进行了研究,结果表明:水分对制粒效果有显著的影响,随着镜铁矿粉配比增加,适宜制粒水分逐渐降低。当镜铁矿粉与制粒性能优良的褐铁矿粉合理搭配使用时,有利于改善制粒效果,提高镜铁矿粉配比。张俊等<sup>[14]</sup>考察了铁矿石烧结中碱性熔剂对煤粉燃烧速率和产物的影响,研究了熔剂对煤粉燃烧的催化机理,并定量分析了催化效果。周明顺等<sup>[15]</sup>通过烧结杯实验开展了焦粉粒度最佳组成试验研究,指出在实际烧结生产过程中,应根据烧结生产目标调整焦粉粒度组成,从而优化烧结生产指标。

燃烧时的气氛条件与燃烧温度同样对烟气排放及准颗粒燃烧行为有重要的影响<sup>[16]</sup>。WANG等<sup>[17]</sup>采用非等温热重分析法探究了无烟煤和焦炭在CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>气氛中的燃烧特性。结果表明,当反应气体中CO<sub>2</sub>的比例增加时,无烟煤和焦炭的点火

性能和综合燃烧性能下降,较高的加热速率不利于反应。袁亚强等<sup>[18]</sup>利用非等温热重法,探究了低温条件下,燃烧速率、着火稳定性和燃烧性能与燃料粒径和氧气体积分数的关系。

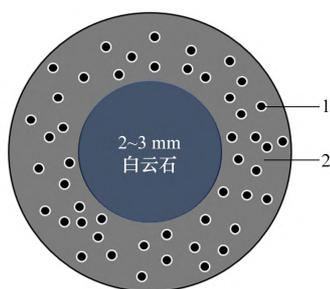
目前,温度对燃料燃烧的影响主要表现为焦炭NO<sub>x</sub>转化率会随着温度升高而减小,缩短NO<sub>x</sub>析出时间,提高NO释放速度,降低NO<sub>2</sub>排放总量。而提高氧气体积分数会导致NO瞬时释放量增加,同时有利于NO向NO<sub>2</sub>的氧化反应。在1000℃时,随着氧气体积分数的升高,焦炭NO<sub>x</sub>转化率随之升高,但是在1100℃时,焦炭NO<sub>x</sub>转化率会随着氧气体积分数升高而减小。并且,在CO<sub>2</sub>气氛下的燃料燃烧排放的CO和NO明显降低。本文利用燃烧反应炉,通过改变O<sub>2</sub>与CO<sub>2</sub>体积分数、燃烧温度研究准颗粒燃烧行为,并利用烟气分析仪对烧结烟气成分进行记录分析,从而探究燃烧气氛与燃烧温度对准颗粒燃烧行为的影响,为提高燃料燃烧效率和改善烧结成矿过程提供理论依据。同时阐明烧结工艺参数对CO生成与二次燃烧和NO生成与还原的影响规律,获得烧结过程烟气CO和NO排放特征,为铁矿粉烧结烟气污染物的生成抑制和减排提供理论基础和技术支撑。

## 1 试验原料及方法

### 1.1 准颗粒选取与制备

在研究准颗粒结构对燃烧过程烟气排放的试验中发现:C型准颗粒相较于S'型、S型、P型准颗粒具有更好的减排效果,燃烧总体所释放的CO和NO量最少<sup>[8]</sup>,所以选择此种类型的准颗粒进行试验。C型准颗粒结构如图1所示。

选取粒径在2~3mm之间的白云石作为核颗粒,将纽曼粉、铁精粉、生石灰、白云石试剂等比例充分混合作为黏附层,控制黏附层的粒径小于0.25mm。表1为C型准颗粒各组分质量及黏附比。



1— $<0.25\text{ mm}$  焦粉；2— $<0.25\text{ mm}$  等比例混合纽曼粉、铁精粉、生石灰、白云石。

图 1 C 型准颗粒结构

Fig. 1 Type-C quasi-particle structure

表 1 C 型准颗粒黏附比及各组分质量

Table 1 C-type quasi-particle adhesion ratio and mass of each component

| 核颗粒质量/g | 黏附层质量/g | 黏附比/% |
|---------|---------|-------|
| 10      | 15      | 71    |

## 1.2 试验方案

使用 KSZ-2015A 反应炉进行准颗粒燃烧试验，并在试验过程中分别改变温度和气氛，研究不同燃烧温度和气氛条件时的样本失重、燃烧过程中 CO 与 NO 排放规律、CO 与 NO 排放总量。试验期间使用 PTM600-4-KL 型便携式烟气分析仪对 CO、NO 的质量浓度进行记录，燃烧过程失重数据收集由与试验反应炉相连接的计算机完成。

### 1.2.1 燃烧气氛的影响

在 Ar 气氛下进行等温燃烧试验，将准颗粒以  $15\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  的升温速率由室温上升至  $900\text{ }^\circ\text{C}$  并保持不变，之后分别通入不同气氛，当质量不再变化时停止试验。研究燃烧气氛对燃烧特性和烟气质量浓度的影响。各组燃烧气氛状态如表 2 所示。

表 2 各组燃烧气氛状态

Table 2 Combustion atmosphere conditions for each group state

| 燃烧温度                 | 恒温气氛   | 研究目标                  |
|----------------------|--|-----------------------|
| 900 $^\circ\text{C}$ | $\text{O}_2/\text{Ar}(10:90)$                | $\text{O}_2$ 质量浓度的影响  |
|                      | $\text{O}_2/\text{Ar}(16:84)$                |                       |
|                      | $\text{O}_2/\text{Ar}(21:79)$                |                       |
|                      | $\text{O}_2/\text{CO}_2/\text{Ar}(21:5:74)$  | $\text{CO}_2$ 质量浓度的影响 |
|                      | $\text{O}_2/\text{CO}_2/\text{Ar}(21:10:69)$ |                       |
|                      | $\text{O}_2/\text{CO}_2/\text{Ar}(21:15:64)$ |                       |

### 1.2.2 燃烧温度的影响

在空气气氛下进行等温试验，将准颗粒以

$15\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  的升温速率由室温分别上升至  $600$ 、 $800$ 、 $900$ 、 $1\ 050\text{ }^\circ\text{C}$ ，之后保持恒温通入空气，当质量不再变化时停止试验。研究燃烧温度对燃烧特性和烟气质量浓度的影响。

## 1.3 试验数据处理

根据准颗粒燃烧过程重量变化可计算得到准颗粒燃烧过程质量转化率，如式(1)所示：

$$\alpha = \frac{m_0 - m_t}{m_0 - m_\infty} \times 100\% \quad (1)$$

式中： $m_0$ 、 $m_t$ 、 $m_\infty$  分别为试样中焦粉的初始质量、燃烧至  $t$  时刻的剩余质量、燃尽时的残余质量，mg。

根据反应过程中 CO 和 NO 质量浓度变化曲线可计算得到准颗粒燃烧 CO 和 NO 排放总量，如式(2)所示：

$$S_{\text{NO}(\text{CO})} = \int_0^{t_\infty} \frac{Q \varphi_t M}{60 V_{\text{mol}}} dt \cdot 10^3 \quad (2)$$

式中： $t_\infty$  为燃烧反应结束时间，s； $Q$  为燃烧过程反应气体流量，取  $5\text{ L}/\text{min}$ ； $\varphi_t$  为燃料反应过程  $t$  时刻 CO、NO 的体积分数，%； $M$  为 CO、NO 的相对分子质量，分别为  $28\text{ g}/\text{mol}$  和  $30\text{ g}/\text{mol}$ ； $V_{\text{mol}}$  为  $273\text{ K}$  下标准摩尔体积，取  $22.4\text{ L}/\text{mol}$ 。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 准颗粒燃烧行为

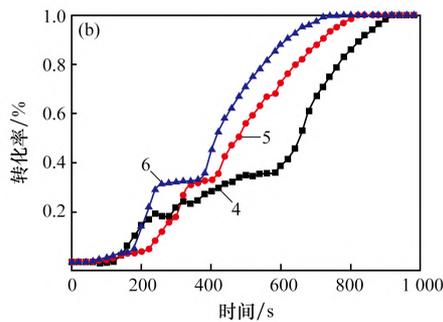
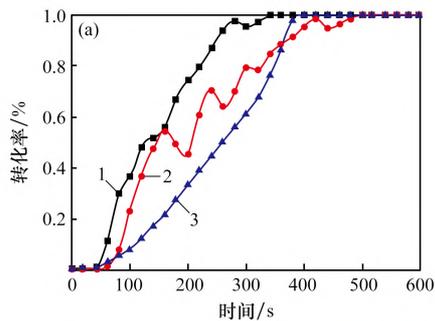
#### 2.1.1 燃烧气氛的影响

在  $900\text{ }^\circ\text{C}$  的恒温条件下，分别探究  $\text{O}_2$  和  $\text{CO}_2$  质量浓度对于准颗粒燃烧行为的影响，质量转化率曲线如图 2 所示。

由图 2(a)可知， $\text{O}_2$  体积分数与准颗粒燃烧速率呈正相关关系， $\text{O}_2$  体积分数的增加使准颗粒转化率提升速率更快，同时使得转化率曲线整体向左上偏移，减少了反应时间，准颗粒的失重开始及结束时间均提前。产生这一现象的原因：氧气体积分数越大，氧气与焦粉接触越充分，焦粉与氧的物理吸附和化学吸附达到平衡时间缩短，限制着内部基团与氧结合的反应，进而影响 CO 释放与焦粉燃烧热演化过程，使反应速率加快；同时，氧气体积分数增大，促进了碱性熔剂的氧吸附和极化能力，氧化铁的氧化还原能力增强，大部分燃料分子被活化，使得反应所需的反应活化能降

低,增大了燃烧速率。

由图2(b)可知,当CO<sub>2</sub>体积分数增加时,反应时间延后,反应速率降低,转化率曲线整体向右下偏移。这种现象的原因在于CO<sub>2</sub>的气化反应吸收了更多的热量从而使准颗粒燃料的燃烧速度减缓;同时,由于CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>和Ar等多种气氛同时存在,致使混合气体产物的密度存在差异,相应的扩散能力不同,从而抑制了准颗粒的燃烧反应。



(a) O<sub>2</sub> 体积分数; (b) CO<sub>2</sub> 体积分数

O<sub>2</sub>: Ar: 1—21: 79; 2—16: 84; 3—10: 90;

O<sub>2</sub>: CO<sub>2</sub>: Ar: 4—21: 15: 64; 2—21: 10: 69; 3—21: 5: 74。

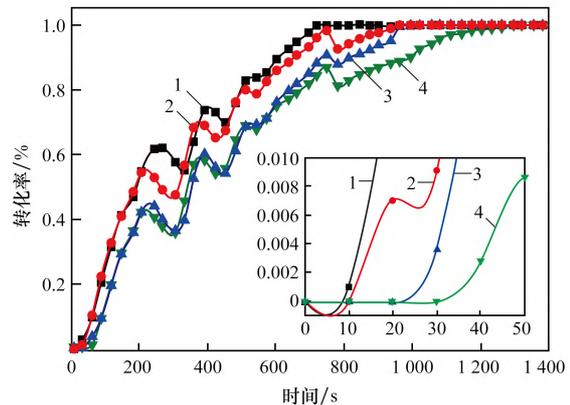
图2 不同气氛准颗粒燃烧质量转化率曲线

Fig. 2 Conversion curve of quasi-particle combustion mass in different atmospheres

### 2.1.2 燃烧温度的影响

在空气气氛下分别进行600、800、900、1050℃的等温燃烧试验,准颗粒燃烧质量转化率曲线如图3所示。由图3可知,温度越高,燃烧反应速率越快,燃烧反应整体时间越短。在燃烧初期,由于燃料失重主要由挥发分的燃烧及分解引起,挥发分提前与C-O反应导致氧气质量浓度急剧下降,此时温度的变化对挥发分释放的影响较小,挥发分的析出和燃烧对温度的敏感程度降低,所以不同温度对转化率曲线的改变并不明显;燃烧过程进入中后期,高温致使转化率曲线增速提高,并且整体向左上偏移,这是因为固定碳的

燃烧速率与燃烧温度呈正比,同时根据阿累尼乌斯反应方程,反应速率与温度之间呈正相关关系,且温度对反应速率影响较大。



温度/℃: 1—1050; 2—900; 3—800; 4—600。

图3 不同温度下准颗粒燃烧质量转化率曲线

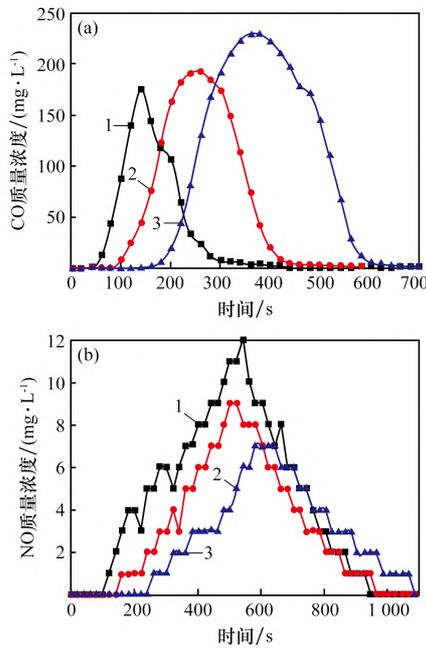
Fig. 3 Mass conversion curve of quasi-particle combustion at different temperatures

## 2.2 燃烧过程烟气排放规律

### 2.2.1 燃烧气氛的影响

O<sub>2</sub> 体积分数对准颗粒燃烧的燃烧速率有明显影响,同时O<sub>2</sub> 体积分数也影响着准颗粒燃烧过程中所释放的CO和NO质量浓度。准颗粒燃烧过程产生的CO和NO质量浓度随O<sub>2</sub> 体积分数变化如图4所示。

由图4(a)可知,CO呈现先增大后减小的变化规律,其原因:在高温条件下,O<sub>2</sub> 快速扩散到准颗粒内部被迅速消耗,CO达到瞬时峰值。随着反应进行,氧气消耗量增多,准颗粒燃料的反应速率由氧气扩散速率控制,氧气的不足导致反应速率下降,CO排放量下降。对比图中三条曲线可知,CO的瞬时峰值质量浓度随O<sub>2</sub> 体积分数的增加而降低,并且达到瞬时峰值所需时间随O<sub>2</sub> 体积分数的增大而缩短。当O<sub>2</sub> 体积分数为21%时,CO瞬时峰值质量浓度为175 mg/L;当O<sub>2</sub> 体积分数为10%时,CO瞬时峰值质量浓度为228 mg/L。当O<sub>2</sub> 体积分数分别由10%提升至16%、由16%提升至21%,CO瞬时峰值质量浓度下降比例分别为15.3%和9.3%,产生这一现象的原因:随着O<sub>2</sub> 体积分数的增大,提高了燃料的燃烧速度和自由基质量浓度,让燃烧更加充分,致使CO<sub>2</sub> 量增加而CO量减少。

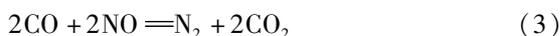


O<sub>2</sub>: Ar: 1—21: 79; 2—16: 84; 3—10: 90。

图 4 O<sub>2</sub> 体积分数对燃烧过程污染物排放质量浓度的影响  
Fig. 4 Effect of O<sub>2</sub> concentration on pollutant emission concentration during combustion

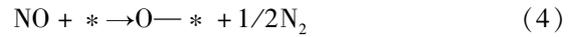
由图 4(b) 可知, 与 CO 瞬时质量浓度的变化规律相反, 随着 O<sub>2</sub> 体积分数升高, 烟气中 NO 瞬时峰值质量浓度也随之升高。当 O<sub>2</sub> 体积分数为 10% 时, 在开始试验后 573 s 到达 NO 瞬时排放峰值, 此时峰值质量浓度为 7 mg/L; 当 O<sub>2</sub> 体积分数为 21% 时, 在开始试验后 533 s 到达 NO 瞬时排放峰值, 此时峰值质量浓度为 12 mg/L, 瞬时峰值质量浓度提高约 71.4%。其原因: 随着 O<sub>2</sub> 体积分数的提高, 增大了燃料的燃烧速度及自由基质量浓度, 从而促进了 NO 形成; 并且随 O<sub>2</sub> 体积分数提高, 氧化性气氛随之增强, 不利于 NO 还原反应的发生; 同时由于反应处于扩散控制时期, 焦炭与氧的氧化反应及 NO 被焦炭表面碳氧络合物形成活性位的还原反应为竞争关系, 即 O<sub>2</sub> 体积分数提高, 一部分的 O<sub>2</sub> 被焦炭表面碳活性位利用, 削弱了焦炭与 NO 异相还原的能力。

准颗粒燃烧过程中所涉及到的各类氧化、还原反应中, CO 与 NO 还原反应的吉布斯自由能远低于 NO 生成的吉布斯自由能<sup>[19]</sup>, 所以 NO 被 CO 还原具有优良的热力学条件, 还原反应如式(3)所示。



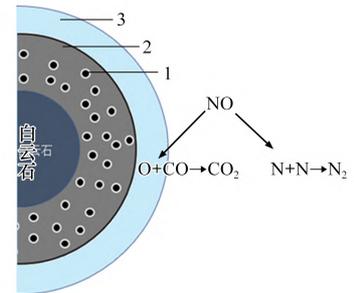
燃烧过程中涉及多重均相和非均相反应。CO

还原 NO 的简单动力学模型如式(4)、(5)所示<sup>[20-21]</sup>。



式中: “\*” 代表燃料表面活性位。

综合考虑 CO 及 NO 的排放规律, 并结合 CO 对 NO 的还原动力学模型分析可得: CO 与 NO 的还原反应程度主要取决于焦炭附近的燃烧气氛, 还原性气氛越强, NO 还原反应越剧烈。由于在 900 °C 的等温燃烧条件下, 此模型的反应活化能较低, NO 分子可以分化为 N 原子与 O 原子, O 原子结合在准颗粒的表面活性位, 同时与颗粒外围的 CO 气相边界层反应, 生成 CO<sub>2</sub> 分子; 随 O<sub>2</sub> 体积分数的增加, 燃烧时的还原气氛逐渐降低, 同时由于排放的 CO 量减少, 弱化了 NO 向 N<sub>2</sub> 的还原转化, 使得 NO 排放量增大。CO 还原 NO 过程示意如图 5 所示。



1—焦炭粉; 2—焦炭粉、金属氧化物; 3—CO 气相边界层。

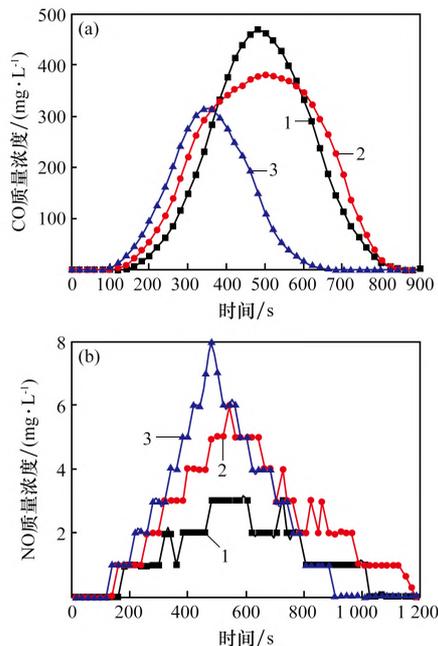
图 5 CO 还原 NO 过程示意

Fig. 5 Schematic of the CO reduction NO process

根据 CO<sub>2</sub> 气氛下失重情况可知, CO<sub>2</sub> 的存在会发生碳的气化反应, 从而影响反应时间和反应速率, 进一步研究 CO<sub>2</sub> 体积分数对反应过程 CO 和 NO 质量浓度的影响。其反应过程烟气质量浓度变化如图 6 所示。

由图 6(a) 可知, 在反应前期, CO 的生成速率较为缓慢, 随反应进行, CO 生成速率陡增; CO<sub>2</sub> 体积分数越大, 反应过程烟气 CO 瞬时峰值质量浓度越大, 并且随 CO<sub>2</sub> 体积分数的增大, CO 生成时间和结束时间均有明显延迟。当 CO<sub>2</sub> 体积分数为 15% 时, 较 5% 的 CO 瞬时峰值质量浓度增加 39%。对比图 4(a) 氧气体积分数为 10% 的 CO 瞬时峰值质量浓度为 228 mg/L 发现: 当 CO<sub>2</sub> 体积分

数为5%时, CO 瞬时峰值质量浓度为 316 mg/L, 提高约 38%; 当 CO<sub>2</sub> 体积分数为 15% 时, CO 瞬时峰值质量浓度为 468 mg/L, 提高约 105%。这是因为 CO<sub>2</sub> 的气化反应吸收热量, 从而减缓了燃烧反应速率导致随 CO<sub>2</sub> 体积分数增大, CO 在燃烧初期的生成速率更加缓慢; 到达燃烧反应中后期, CO<sub>2</sub> 的大量存在又与焦炭反应生成 CO, 同时准颗粒中金属氧化物的催化和气化反应的进行, 进一步促进了 CO 的生成。



O<sub>2</sub>: Ar; 1—21: 79; 2—16: 84; 3—10: 90。

图6 CO<sub>2</sub> 体积分数对燃烧过程污染物排放质量浓度的影响

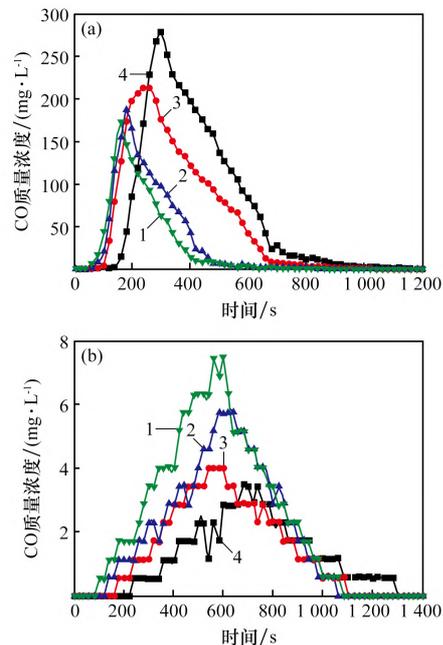
Fig. 6 Effect of CO<sub>2</sub> mass concentration on pollutant emission concentration during combustion

由图6(b)可知, 反应过程中, NO 排放情况与 CO 排放情况相反, 随着 CO<sub>2</sub> 体积分数增大, NO 瞬时峰值质量浓度逐渐变小, 由 CO<sub>2</sub> 体积分数为 5% 时的 8 mg/L 下降到 10% 时的 6 mg/L, 之后再下降到 15% 时的 3 mg/L。但反应时间与 CO 生成时间变化规律相同, NO 生成时间和结束时间都随 CO<sub>2</sub> 体积分数变大而后移。其原因: 一方面 CO 质量浓度升高, 促进 CO 与 NO 发生还原反应; 另一方面 CO 和焦粉中的 C 同时与 NO 发生还原反应, NO 质量浓度降低。

### 2.2.2 燃烧温度的影响

温度升高对准颗粒燃料燃烧有促进作用, 燃

料的燃烧速率相应增加, 并且燃烧温度的改变对准颗粒燃料燃烧过程中 CO 和 NO 的排放有显著影响。在不同温度下烟气中 CO 与 NO 质量浓度变化如图 7 所示。



燃烧温度/°C: 1—1 050; 2—900; 3—800; 4—600。

图7 燃烧温度对燃烧过程污染物排放质量浓度的影响  
Fig. 7 Effect of combustion temperature on the mass concentration of pollutants emitted during combustion

由图7(a)可知, 温度越高, 准颗粒燃料燃烧反应越快, CO 瞬时峰值质量浓度越低, 反应过程 CO 释放峰值质量浓度由 600 °C 时的 280 mg/L 下降到 1 050 °C 时的 171 mg/L, 峰值质量浓度下降 38.9%。这是因为高温致使碳氧反应接触更加充分, 氧气消耗量提升, 生成的 CO<sub>2</sub> 增多, 同时充足的氧气促进 CO 参与二次燃烧反应, 导致 CO 减少。

在图7(b), NO 排放情况则与 CO 排放情况相反。随反应温度升高, NO 瞬时峰值质量浓度有明显增加。反应过程中, NO 释放峰值质量浓度由 600 °C 时的 6 mg/L 增加到 1 050 °C 时的 14 mg/L, 峰值质量浓度增加 1.3 倍。结合 CO 的排放规律可知, 随着温度升高, CO 质量浓度降低, 从而与 NO 进行还原反应的 CO 减少, 均相还原反应减弱。同时, 与焦粉发生异相还原反应的速率增加, 但 NO 生成速率大于还原速率, NO 排放量增多。并且随着温度升高, 准颗粒反应更充分, 加快了燃烧速率, 准颗粒的氮转化率增大, 排放的 NO

瞬时峰值质量浓度增大。

### 2.3 燃烧烟气排放总量

#### 2.3.1 燃烧气氛的影响

O<sub>2</sub> 体积分数提高对反应整体的进行有促进作用, O<sub>2</sub> 体积分数对准颗粒燃烧 CO、NO 排放总量的影响如表 3 所示。由表 3 可知, CO 排放总量随 O<sub>2</sub> 体积分数提高而下降。当 O<sub>2</sub> 体积分数由 10% 分别提升至 16% 与 21% 时, CO 排放总量从 6.009 6 mg 分别降低至 3.694 7 mg 和 2.003 9 mg, 分别降低 38.5% 和 45.8%。其主要是因为 O<sub>2</sub> 体积分数增加, C 和 O 进行初次反应生成大量 CO<sub>2</sub> 和少量 CO, 氧化性气氛的存在, 导致 CO 与 O<sub>2</sub> 发生二次反应, 最终 CO 排放总量减少。

NO 排放总量随 O<sub>2</sub> 体积分数提高而上升。当 O<sub>2</sub> 体积分数由 10% 分别提升至 16% 与 21% 时, NO 排放总量从 0.320 7 mg 分别提升至 0.369 1 mg 和 0.526 1 mg, 分别提升 15.1% 和 42.5%。这主要是因为准颗粒中挥发分氮主要以 NH<sub>3</sub> 和 HCN 的形式挥发出来, 随着 O<sub>2</sub> 体积分数提高, 氧化性气氛增强, 大大提高了被氧化成 NO 的概率, 最终氧化成 NO, 增加了 NO 生成量。从准颗粒中焦粉的角度来讲, 随着 O<sub>2</sub> 体积分数提高, O<sub>2</sub> 的扩散速率、与焦粉的接触几率和反应速率都大大增加, 导致焦粉表面的氮活性位与 O<sub>2</sub> 发生反应生成 NO 的速率增加。此外, O<sub>2</sub> 体积分数升高增强了氧化性气氛, 大量的 CO 还原性气体被氧化, 削弱了 NO 还原条件。

表 3 O<sub>2</sub> 体积分数对污染物排放总量的影响

Table 3 Effect of O<sub>2</sub> volume fraction on total

| pollutant emissions |         |         | mg |
|---------------------|---------|---------|----|
| O <sub>2</sub> : Ar | CO 排放总量 | NO 排放总量 |    |
| 10: 90              | 6.009 6 | 0.320 7 |    |
| 16: 84              | 3.694 7 | 0.369 1 |    |
| 21: 79              | 2.003 9 | 0.526 1 |    |

CO<sub>2</sub> 气氛的存在使准颗粒烟气排放总量与氧气气氛下的变化情况相反。CO<sub>2</sub> 体积分数对准颗粒燃烧排放 CO、NO 总量的影响如表 4 所示。由表 4 可知, 随着 CO<sub>2</sub> 体积分数的提高, CO 排放总量逐渐升高。由 CO<sub>2</sub> 体积分数 5% 时的 8.244 3 mg 增长到 15% 时的 16.452 mg。其主要原因可能是

CO<sub>2</sub> 体积分数的升高, 促进了 CO<sub>2</sub> 与 C 反应进行, 使 CO 排放总量增加。

NO 排放总量随 CO<sub>2</sub> 体积分数的升高而减少, CO<sub>2</sub> 体积分数增加, 准颗粒的燃料氮转化率降低。其原因: 反应生成的 CO 还原了大量 NO, 且 CO<sub>2</sub> 与 C 反应的进行使 O<sub>2</sub> 与 C 反应不充分, 剩余的 O<sub>2</sub> 加速了 NO→NNH→N<sub>2</sub> 和 NO→NO<sub>2</sub> 的进行, 导致 NO 减少。

表 4 CO<sub>2</sub> 体积分数对污染物排放总量的影响

Table 4 Effect of CO<sub>2</sub> volume fraction on total

| pollutant emissions                   |         |         | mg |
|---------------------------------------|---------|---------|----|
| O <sub>2</sub> : CO <sub>2</sub> : Ar | CO 排放总量 | NO 排放总量 |    |
| 21: 5: 74                             | 8.244 3 | 0.341 6 |    |
| 21: 10: 69                            | 16.11 5 | 0.318 6 |    |
| 21: 15: 64                            | 16.45 2 | 0.158 2 |    |

#### 2.3.2 燃烧温度的影响

不同温度下 CO、NO 的排放总量如表 5 所示。由表 5 可知, CO 排放总量随温度上升而逐渐下降, 而 NO 排放总量随温度上升而上升。

表 5 温度对污染物排放总量的影响

Table 5 The effect of temperature on the total amount

| of pollutant emissions |         |         | mg |
|------------------------|---------|---------|----|
| 温度/℃                   | CO 排放总量 | NO 排放总量 |    |
| 600                    | 8.359 7 | 0.326 5 |    |
| 800                    | 6.726 7 | 0.381 4 |    |
| 900                    | 3.506 2 | 0.526 3 |    |
| 1 050                  | 2.893 5 | 0.687 6 |    |

当温度从 600 ℃ 依次上升至 800、900、1050 ℃ 时, CO 排放总量从 8.359 7 mg 依次减少至 6.726 7、3.506 2、2.893 5 mg, 依次减少 19.5%、47.9%、17.5%, 可知 800~900 ℃ 之间, 温度对 CO 排放总量影响较大。这主要是因为温度较低时, 准颗粒达到着火温度时迅速燃烧, 但此时 O<sub>2</sub> 含量不充分, CO 排放量增多。当温度较高时, 焦炭与氧气的反应更加充分, 更多的生成 CO<sub>2</sub> 而非 CO。

当温度从 600 ℃ 依次上升至 800、900、1050 ℃ 时, NO 排放总量从 0.326 5 mg 依次上升至 0.381 4、0.526 3、0.687 6 mg, 依次升高 16%、38%、30.6%, 与温度对 CO 排放总量影响相同, 在 800~900 ℃ 区间, 温度对 NO 排放总量影响较

大。这主要是因为气相扩散成为动力学限制因素。随着温度升高,气体运动剧烈, $O_2$ 不能顺利地进入到焦炭的内孔中而是主要在焦炭表面发生氧化反应,从而降低了 $O_2$ 与焦炭的反应机率。另外,在焦炭表面生成的NO一部分沿着焦炭孔隙向内扩散,在低氧的焦炭内部发生还原反应生成 $N_2$ ,另一部分则直接与焦炭表面的C活性位进行还原。温度的升高使焦炭与NO异相还原反应速率与焦炭的氧化反应速率均增加,但NO在焦炭表面的异相还原反应速率超过焦炭氮被氧化的反应速率,使燃料在燃烧过程中NO的还原量增加,所以在高温下NO的排放总量减少。

### 3 结论

(1) 准颗粒在高温、高 $O_2$ 体积分数、低 $CO_2$ 体积分数的情况下燃烧的更充分、质量转化率提升的速率更快、燃烧反应的总时长更短。

(2) CO瞬时峰值质量浓度和排放总量与温度、 $O_2$ 体积分数呈正比,与 $CO_2$ 体积分数呈反比。当 $O_2$ 体积分数由10%提升至21%时,CO瞬时峰值质量浓度与排放总量分别下降30.1%、66.7%;当 $CO_2$ 体积分数由5%提升至15%时,CO瞬时峰值质量浓度与排放总量分别上升39%、99.6%;当温度由600℃提升至1050℃时,CO瞬时峰值质量浓度与排放总量分别下降38.9%、65.4%。

(3) NO瞬时峰值质量浓度和排放总量与 $CO_2$ 体积分数呈正比,与温度、 $O_2$ 体积分数呈反比。当 $O_2$ 体积分数由10%提升至21%时,NO瞬时峰值质量浓度与排放总量分别上升71.4%、64%;当 $CO_2$ 体积分数由5%提升至15%时,NO瞬时峰值质量浓度与排放总量分别下降62.5%、53.7%;当温度由600℃提升至1050℃时,NO瞬时峰值质量浓度与排放总量分别上升133%、111%。

### 参考文献:

[1] 王海风,平晓东,周继程,等.中国钢铁工业绿色发展回顾及展望[J].钢铁,2023,58(2):8-18.  
WANG Haifeng, PING Xiaodong, ZHOU Jicheng, et al. Review and prospect of green development for Chinese steel industry[J]. Iron & Steel, 2023, 58(2): 8-18.

[2] 王锋,张俊,郗俊懋,等.烧结机风箱中烟气排放规律及分析[J].钢铁,2019,54(6):96-102.  
WANG Feng, ZHANG Jun, QIE Junmao, et al. Emission law and analysis of flue gas in sinter wind boxes[J]. Iron & Steel, 2019, 54(6): 96-102.

[3] 阮志勇.柳钢烧结烟气氨法脱硫体系脱硝机理[J].中国冶金,2018,28(1):61-65.  
RUAN Zhiyong. Denitration mechanism of ammonia desulfurization process for sintering flue gas in Liusteel [J]. China Metallurgy, 2018, 28(1): 61-65.

[4] ZHOU H, MA P N, ZHOU M X, et al. Experimental investigation on the conversion of fuel-N to  $NO_x$  of quasi-particle in flue gas recirculation sintering process[J]. Journal of the Energy Institute, 2019, 92(5): 1476-1486.

[5] 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 Zunqian, et al. Progress and exploration of  $NO_x$  emission reduction in sintering flue gas[J]. Iron & Steel, 2022, 57(11): 175-189.

[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: Formation mechanism and emission law[J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(2): 1-7.

[7] 于勇,朱廷钰,刘霄龙.中国钢铁行业重点工序烟气超低排放技术进展[J].钢铁,2019,54(9):1-11.  
YU Yong, ZHU Tingyu, LIU Xiaolong. Progress of ultra-low emission technology for key processes of iron and steel industry in China[J]. Iron & Steel, 2019, 54(9): 1-11.

[8] HIDA Y, SASAKI M, ENOKIDO T, et al. Effect of the existing state of coke breeze in quasi-particles of raw mix on coke combustion in the sintering process[J]. Tetsu-to-Hagane, 1982, 68(3): 400-409.

[9] 马鹏楠,程明,周明熙,等.铁矿石烧结过程中不同类型准颗粒的燃烧特性[J].工程科学学报,2019,41(3):316-324.  
MA Pengnan, CHENG Ming, ZHOU Mingxi, et al. Combustion characteristics of different types of quasi-particles in iron ore sintering process[J]. Chinese

- Journal of Engineering, 2019, 41(3): 316 - 324.
- [10] 单长冬, 张建良, 刘征建, 等. 铁矿粉烧结基础特性之同化性研究进展[J]. 中国冶金, 2022, 32(12): 1 - 6.  
SHAN Changdong, ZHANG Jianliang, LIU Zhengjian, et al. Research progress on assimilation property in basic sintering characteristics of iron ore powder [J]. China Metallurgy, 2022, 32(12): 1 - 6.
- [11] 吕学伟, 郭家宝, 游洋, 等. 铁矿粉烧结制粒过程颗粒行为研究综述[J]. 钢铁研究学报, 2021, 33(10): 1084 - 1094.  
LÜ Xuewei, GUO Jiabao, YOU Yang, et al. Particles behavior of iron ore fine during granulation process: A review[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2021, 33(10): 1084 - 1094.
- [12] 毛晓明, 熊林. 烧结过程中焦粉的行为研究[C]//2017 年全国高炉炼铁学术年会论文集(下). 上海: 宝山钢铁股份有限公司研究院, 2017: 336 - 344.  
MAO Xiaoming, XIONG Lin. Study on the behavior of coke powder in the sintering process[C]//Proceedings of the 2017 National Academic Conference on Blast Furnace Ironmaking (Part II). Shanghai: Baosteel Research Institute, 2017: 336 - 344.
- [13] 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 & Steel, 2015, 50(7): 8 - 14.
- [14] 张俊, 郭兴敏, 黄学军. 铁矿石烧结中碱性熔剂对燃料燃烧的影响[J]. 钢铁研究学报, 2012, 24(8): 7 - 11.  
ZHANG Jun, GUO Xingmin, HUANG Xuejun. Effect of flux for iron ores sintering on fuel combustion[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2012, 24(8): 7 - 11.
- [15] 周明顺, 赵东明, 李建军, 等. 焦粉粒度分布对铁矿石烧结指标的影响[J]. 中国冶金, 2018, 28(2): 11 - 16.  
ZHOU Mingshun, ZHAO Dongming, LI Jianjun, et al. Effects of size distribution of coke breeze on sintering process[J]. China Metallurgy, 2018, 28(2): 11 - 16.
- [16] 胡长庆, 李炳军, 韩涛. 铁矿粉烧结过程 CO 与 NO 协同控制技术研究现状[J]. 河北冶金, 2021(4): 1 - 5.  
HU Changqing, LI Bingjun, HAN Tao. Research status of co and no cooperative control technology during iron ore sintering process[J]. Hebei Metallurgy, 2021(4): 1 - 5.
- [17] WANG M C, WEI G S, ZHU R, et al. Effect of CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> oxidizing atmospheres on the combustion characteristics of metallurgical coke and anthracite[J]. Journal of CO<sub>2</sub> Utilization, 2021, 52: 101665.
- [18] 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-particles[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2020, 32(5): 386 - 392.
- [19] ZHOU H, ZHOU M X, LIU Z H, et al. Modeling NO<sub>x</sub> emission of coke combustion in iron ore sintering process and its experimental validation [J]. Fuel, 2016, 179: 322 - 331.
- [20] BERGER A, ROTZOLL G. Kinetics of NO reduction by CO on quartz glass surfaces [J]. Fuel, 1995, 74(3): 452 - 455.
- [21] FUJITANI T, NAKAMURA I, TAKAHASHI A, et al. Kinetics and mechanism of NO reduction with CO on Ir surfaces[J]. Journal of Catalysis, 2008, 253(1): 139 - 147.

### 本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、万方数据电子出版社、重庆维普资讯有限公司、超星学术期刊“域出版”、学术中国-知识产权服务平台等第三方平台在其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费(相关著作权许可使用费与审稿费相抵,不再另行支付),对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明,如有异议请来稿说明,本刊将作适当处理。