

# 不同料层高度烧结过程尾气排放规律

吴胜利 陈东峰 赵成显 张丽华 韩宏亮 薛方

北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083

**摘要** 研究了不同料层高度下烧结过程中尾气成分 ( $O_2$ 、 $CO_2$ 、 $SO_2$  和  $NO$ ) 的变化规律. 结果表明: 随着烧结历程的推进, 尾气中  $O_2$  含量降低而  $CO_2$  含量升高, 这主要是因为固体燃料燃烧量逐渐增多; 尾气中  $SO_2$ 、 $NO$  的含量亦呈升高趋势, 但幅度很小, 这主要是因为烧结料层对  $SO_2$  有吸收作用, 而燃烧带的  $CO$  气体则可以还原使部分  $NO$  分解; 在临近烧结终点时, 因料层对  $SO_2$  的吸收作用消失而使析出作用强化, 导致尾气中  $SO_2$  含量急剧升高. 另外, 随着料层高度的增加, 因固体燃料配比相应减小, 尾气中  $CO_2$ 、 $SO_2$  和  $NO$  的含量降低, 而  $O_2$  含量增加. 因此, 控制高温区宽度的厚料层烧结技术是我国开展减少烧结尾气中气体污染物 ( $CO_2$ 、 $SO_2$  和  $NO$ ) 的有效措施.

**关键词** 铁矿粉; 烧结; 料层高度; 尾气排放

**分类号** TF 046.4

## Exhaust emission law at different bed depths in sintering process

WU Sheng-li CHEN Dong-feng ZHAO Cheng-xian ZHANG Li-hua HAN Hong-liang XUE Fang

School of Metallurgical and Ecological Engineering University of Science and Technology Beijing Beijing 100083, China

**ABSTRACT** The change in exhaust composition (such as  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$  and  $NO$ ) at different bed depths in sintering process was studied. The results show that with the sintering process proceeding the quantity of combustion solid fuel increases therefore the content of  $O_2$  decreases and the content of  $CO_2$  increases. As  $SO_2$  is absorbed by the sinter bed and  $NO$  is reduced by  $CO$  in the combustion zone the contents of  $SO_2$  and  $NO$  increase slowly. Near the burning through point the absorption of  $SO_2$  by the sintering bed disappears and the decomposability of  $SO_2$  strengthens leading to the rapid increase of  $SO_2$  content. With the bed depth increasing the ratio of solid fuel declines therefore the contents of  $CO_2$ ,  $SO_2$  and  $NO$  decrease and the content of  $O_2$  increases. So controlling the width of the high temperature zone in deep-bed sintering can efficiently reduce gaseous pollutants ( $CO_2$ ,  $SO_2$  and  $NO$ ) in sintering tail gas.

**KEY WORDS** iron ores sintering bed depth exhaust emission

烧结尾气是烧结混合料点火后在高温烧结成型过程中产生的含尘尾气, 其排放的主要特点<sup>[1]</sup>是:

① 烧结尾气排放量大; ② 粉尘多; ③  $CO_2$ 、 $SO_2$  和  $NO$  等对环境有害的气体排放含量低且波动范围宽; ④ 含湿量大; ⑤ 温度波动范围大. 烧结尾气的上述情况给其治理带来了很大的困难. 目前烧结过程的环保问题主要是控制烧结尾气中的粉尘及硫氧化物和氮氧化物的含量<sup>[2]</sup>. 国内各烧结厂都配备有烧结除尘设施, 但烧结尾气中硫氧化物和氮氧化物的去除在国内各烧结厂进行得较少<sup>[3]</sup>. 以烧结尾气脱硫为例, 我国 2005 年之前还没有一台烧结机实施烟气脱硫<sup>[4]</sup>. 2005 年以后, 部分钢铁企业与脱硫公

司配合建设了一些不同流程的烧结尾气脱硫项目, 虽然取得了一定的成果和经验, 但还没有完全解决烧结尾气脱硫的技术问题, 并没有找到适合我国的烧结尾气脱硫技术<sup>[5]</sup>.

一些研究表明, 烧结尾气成分的变化是烧结过程中碳的燃烧、铁氧化物的还原和氧化、熔剂分解等反应不同程度发展的结果<sup>[6]</sup>. 本文通过石英杯烧结实验检测烧结过程中尾气的排放情况, 通过烧结过程摄像考察各料层高度的高温区的情况, 结合烧结过程中各尾气成分的生成机理, 分析得出降低烧结尾气燃料消耗和控制高温区宽度能够降低烧结过程中气态污染物的排放.

收稿日期: 2009-04-16

作者简介: 吴胜利 (1955-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: wushengli@metall.usb.edu.cn

### 1 实验方法

实验所用的烧结含铁原料以含硫较少的富矿粉为主, 烧结原料化学组分如表 1 所示。

实验方法为将含铁原料混匀矿、高炉返矿、循环返矿、熔剂(生石灰、石灰石、白云石和蛇纹石)和焦粉等按表 2 进行配料, 加水人工混匀后, 装入  $\phi 600\text{mm} \times 1000\text{mm}$  圆筒混合机进行二次混匀, 混匀时间为 3 min, 混合料水分可控制在质量分数 8.0% 左右, 然后将混匀的烧结混合料装入直径为 165 mm 的小型石英烧结杯。采用汽油喷灯点火, 点火时间为 1.5 min, 点火负压为 8 kPa, 点火结束后调整负压到 13 kPa 开始抽风烧结, 直到烧结尾气温度

达到最高, 烧结完全后记录总烧结时间, 到烧结尾气温度下降到 200℃ 停止抽风, 倒出烧结饼, 接着对烧结饼做落下筛分实验以检测烧结矿粒度组成和成品率, 对成品烧结矿(粒度  $>10\text{mm}$ ) 做转鼓实验以测得转鼓指数。在整个烧结时间内连续检测烧结尾气成分, 烧结尾气测量仪器采用 KM9106 烟气分析仪(英国 Kane 公司), 该仪器检测精确度:  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}$  均为  $1 \times 10^{-6}$ ,  $\text{O}_2$  和  $\text{CO}_2$  均为 0.1%。烧结尾气检测实验装料高度分为三组, 每组做 2~3 次重复性烧结实验, 并采用过程摄像考察高温区宽度变化, 装料高度分别为 700, 850 和 1000 mm, 装料总量分别为 30, 35 和 40 kg。烧结实验装置的结构示意图如图 1 所示。

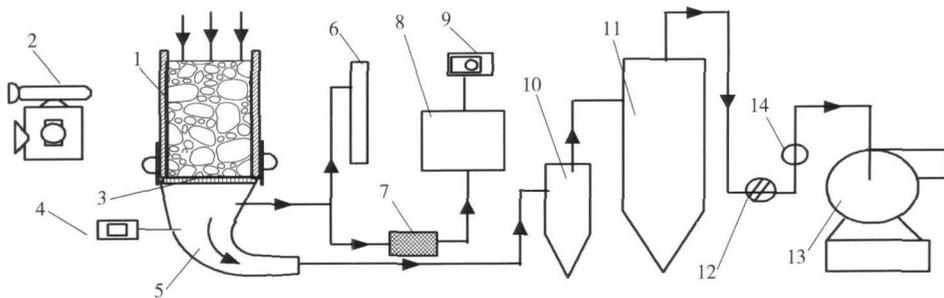
表 1 各烧结原料的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of each sintering materials							%
名称	TFe	FeO	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	S
混匀矿	61.34	1.37	3.74	1.07	1.41	0.27	0.02
生石灰	—	—	0.40	84.00	—	0.06	—
石灰石	—	—	0.69	54.18	0.41	0.23	—
白云石	—	—	1.24	30.83	0.32	20.37	—
蛇纹石	—	—	37.93	3.37	1.53	36.91	—
高炉返矿	58.02	7.79	4.87	8.89	1.98	1.69	0.01
焦炭灰分	—	—	5.93	0.23	4.20	—	—

注: 焦粉工业分析为, 固定碳 = 84.41%, 灰分 = 13.60%, 挥发分 = 1.99%, S = 0.65%。

表 2 各烧结原料的配比(质量分数)

Table 2 Ratio of each sintering materials								%
原料	混匀矿	循环返矿	生石灰	石灰石	白云石	蛇纹石	高炉返矿	焦粉
料厚 700 mm	63.34	18.00	3.20	3.76	2.28	1.52	4.00	3.90
料厚 850 mm	63.52	18.00	3.20	3.79	2.24	1.55	4.00	3.70
料厚 1000 mm	63.70	18.00	3.20	3.86	2.16	1.58	4.00	3.50



1—石英烧结杯; 2—汽油喷灯(点火用); 3—带篦条板底座; 4—测温热电偶; 5—风箱; 6—U型负压计; 7—网状除尘降温装置; 8—KM9106烟气分析仪; 9—气体成分显示器; 10—1级旋风除尘器; 11—2级旋风除尘器; 12—调压阀; 13—抽风机; 14—流量计

图 1 烧结实验装置的结构示意图

Fig 1 Schematic diagram of the sintering test device

### 2 实验结果及分析

烧结过程借助燃料燃烧产生的高温, 使烧结料发生一系列的物理化学变化, 并产生一定数量的液

相, 当烧结料冷却时, 液相将矿粉颗粒黏结成块, 形成烧结饼, 烧结饼经破碎后筛分成粒度满足高炉需要的产品即为成品烧结矿。烧结过程同时还是烧结矿带逐渐扩大, 其他各带逐渐下移、减小最后消失的

过程. 同时, 从料面抽入的空气, 从上到下依次流经烧结料层各带 (烧结矿带—燃烧带—干燥预热带—过湿带, 初期烧结生料带存在时还会流过烧结生料带) 以后进入风箱变为烧结尾气, 在流经烧结过程各带时, 其成分、密度和温度也会发生变化, 这里为了描述方便将流经烧结料层的气体统称为烧结气体, 即从料面抽入的空气在烧结过程中经历了空气—烧结气体—烧结尾气的转变过程.

### 2.1 烧结尾气中 O<sub>2</sub> 含量变化规律

烧结气体的流速和氧含量对烧结矿的矿物组成有严重影响, 流过烧结矿层的烧结气体含氧量越高, 对磁铁矿的氧化越有利<sup>[7-8]</sup>, 烧结矿的赤铁矿含量就高, 同时氧含量高还有利于铁酸钙<sup>[9]</sup>的生成, 故一般以烧结尾气的氧含量高下来考察料层的“氧位”的高低情况. 各料层高度下烧结过程中尾气中的 O<sub>2</sub> 含量检测结果如图 2 所示. 烧结理论分析表明, 烧结气体中的氧气含量降低主要发生在两个部位: 其一在烧结矿带和燃烧带交界的高温区, 磁铁矿的氧化消耗导致烧结气体中氧含量降低; 其二在燃烧带内, 燃料燃烧消耗, 气体中的氧含量降低. 故烧结尾气中氧含量的变化规律可以反映烧结过程中以燃烧带为主体的高温区的变化.

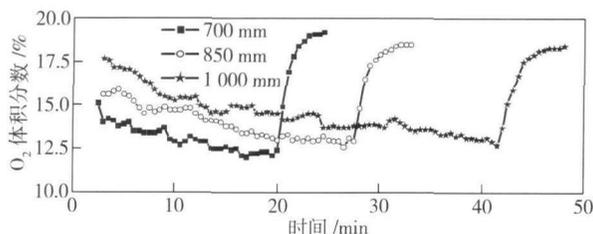


图 2 各料层高度的烧结尾气中 O<sub>2</sub> 含量随时间的变化情况

Fig 2 Variations of O<sub>2</sub> content with time in each bed depth sintering

从图 2 可以看出: 料层高度为 700, 850 和 1 000 mm 的 O<sub>2</sub> 含量曲线依次升高; 三个料层高度下烧结尾气中的 O<sub>2</sub> 含量在相当长的时间内保持小幅度下降, 直至烧结过程快要结束时才出现上升的情况, 其含量最终接近空气中 O<sub>2</sub> 的含量. 这是因为随着烧结的进行, 燃烧带宽度变宽, 单位时间内燃料的燃烧量逐渐增加, 消耗的氧量也有所增加; 当烧结到烧结料层底部时, 由于燃烧带消失, 而磁铁矿氧化消耗较少, 故其含量升高较快.

### 2.2 烧结尾气中 SO<sub>2</sub> 含量变化规律

铁矿石中的硫通常以硫化物和硫酸盐形式存在: 以硫化物形式存在的矿物有 FeS<sub>2</sub>、CuFeS<sub>2</sub>、CuS<sub>2</sub>、ZnS<sub>2</sub> 和 PbS<sub>2</sub> 等; 以硫酸盐形式存在的有 BaSO<sub>4</sub>、CaSO<sub>4</sub> 和 MgSO<sub>4</sub> 等, 而固体燃料带入的硫以单

质硫、有机硫和无机硫的形式存在<sup>[10]</sup>. 从表 1 的原料成分中可以看出, 焦粉含硫较高, 其他原料含硫较少, 因此焦粉的配比对 SO<sub>2</sub> 排放的影响较显著.

烧结气体中 SO<sub>2</sub> 在烧结料层中经历了析出、被吸收和再析出的复杂物理化学过程, 呈现出烧结工艺特有的 SO<sub>2</sub> 及其硫化物的分布特性<sup>[11]</sup>. SO<sub>2</sub> 扩散析出区对应于烧结矿区, 在该区域不存在生成 SO<sub>2</sub> 的化学反应, 主要是烧结矿中已生成的 SO<sub>2</sub> 向烟气中扩散. SO<sub>2</sub> 燃烧析出区是产生 SO<sub>2</sub> 气体的主要区域, 它与干燥预热带和燃烧熔融带相对应. 在干燥预热带焦粉中有机硫以 H<sub>2</sub>S 和 CS<sub>2</sub> 析出, 以无机硫和硫酸盐形式存在的硫在燃烧带发生燃烧和分解反应, 以 SO<sub>2</sub> 的形式释放. SO<sub>2</sub> 吸收区与料层中的过湿带相对应, 在该区域由于烧结料中的碱性物质和液态水, 大部分 SO<sub>2</sub> 被吸收.

从图 3 可以看出: 料层高度为 700, 850 和 1 000 mm 的 SO<sub>2</sub> 含量曲线依次降低; 三个高度的烧结尾气中 SO<sub>2</sub> 含量曲线均为从烧结开始时有相对较大幅度上升, 烧结过程中整体含量趋于稳定, 烧结过程快要结束时, 其含量急剧上升, 达到最高值后迅速回落, 直至烧结过程结束. 产生上述现象的主要原因是: 刚开始烧结时固体燃料中的含硫物质在燃烧过程中释放 SO<sub>2</sub>, 这时过湿带尚未充分形成, 对 SO<sub>2</sub> 的吸收能力相对较弱, 随后的烧结过程中下部过湿带形成, 有利于吸收烧结尾气中 SO<sub>2</sub> 生成 CaSO<sub>3</sub> 或者 CaSO<sub>4</sub>, 所以 SO<sub>2</sub> 含量变化不大; 到接近烧结终了, 由于过湿带逐渐消失, 其对 SO<sub>2</sub> 的吸收作用也随之消失, 同时料层中以 CaSO<sub>3</sub> 或者 CaSO<sub>4</sub> 形式富集的 SO<sub>2</sub> 开始大量分解, 形成 SO<sub>2</sub> 含量峰值.

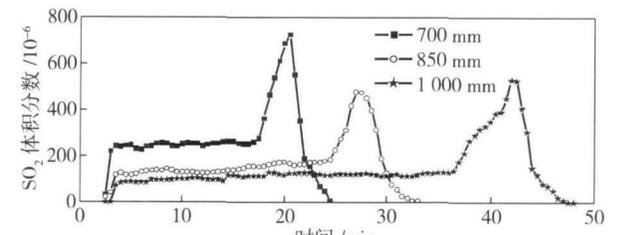


图 3 各料层高度的烧结尾气中 SO<sub>2</sub> 含量随烧结时间的变化情况

Fig 3 Variations of SO<sub>2</sub> content with time in each bed depth sintering

具体而言, 700 mm 与 850 mm 料层高度下尾气中的 SO<sub>2</sub> 含量峰值相比, 虽然后者的过湿带较宽且料层底部最高温度较高, 但其固体燃料配比减少的作用占主导地位, 从而使得 850 mm 料层高度下尾气中的 SO<sub>2</sub> 含量峰值下降. 另外, 1 000 mm 与 850 mm 料

层高度下尾气的  $\text{SO}_2$  含量峰值相比, 虽然前者的固体燃料配比降低, 但由于其过湿带相对宽、料层底部温度更高, 故所富集的硫酸盐量较多, 硫酸盐的分解量也大, 造成其尾气中的  $\text{SO}_2$  含量峰值要高于 850 mm 料层。

### 2.3 烧结尾气中 $\text{CO}_2$ 含量变化规律

烧结尾气中的  $\text{CO}_2$  气体主要由两部分构成: 一部分是烧结混合料中的碳酸盐 (主要来自石灰石、白云石等熔剂) 在干燥预热带分解产生; 另一部分是燃料中固定碳和挥发分在燃烧带中燃烧产生。在烧结过程中,  $\text{CO}_2$  气体体积分数的变化除了受到燃料质量配比和碳酸盐的质量配比的影响外, 还受到燃烧带宽度、干燥预热带宽度、进入燃烧带的气体中氧含量等的影响。因此, 研究烧结过程中  $\text{CO}_2$  的含量变化, 可以把握烧结过程燃烧带和干燥预热带的变化情况。对各料层高度烧结过程中产生的烧结尾气中的  $\text{CO}_2$  的检测结果如图 4 所示。

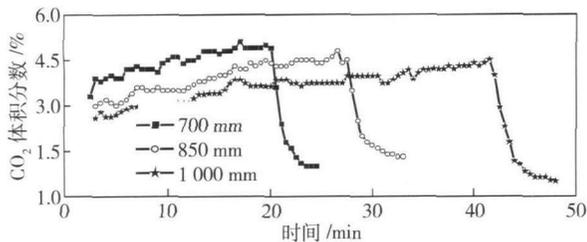


图 4 各料层高度的烧结尾气中的  $\text{CO}_2$  含量随时间的变化情况  
Fig. 4 Variations of  $\text{CO}_2$  content with time in each bed depth sintering

从图 4 可知: 料层高度 700、850 和 1000 mm 的  $\text{CO}_2$  含量曲线依次降低; 三个料层高度下烧结尾气中  $\text{CO}_2$  含量从烧结开始相对较长的时间内有小幅度的稳定上升, 到烧结过程快结束时达到最高值, 接着迅速下降, 但整个过程中没有出现含量急剧上升的情况。这是因为随着烧结的进行, 燃烧带慢慢变宽, 因而碳燃烧量增多, 致使产生的  $\text{CO}_2$  量也逐渐升高, 当燃烧到烧结料层底部时, 燃烧带最宽,  $\text{CO}_2$  量最高。

### 2.4 烧结尾气中 $\text{NO}$ 含量变化规律

在燃烧过程中所排放出的氮氧化物主要是  $\text{NO}$  和  $\text{NO}_2$ , 通常把这两种氮氧化物通称为  $\text{NO}_x$ <sup>[12]</sup>。 $\text{NO}_x$  可分为三种类型, 即燃料型  $\text{NO}_x$ 、热力型  $\text{NO}_x$  和快速型  $\text{NO}_x$ 。

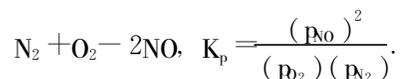
燃料型  $\text{NO}_x$  是指燃料在燃烧过程中产生的  $\text{NO}_x$ , 其中 90% 以上是  $\text{NO}$ , 有少量的  $\text{NO}_2$ , 在通常的烧结温度下燃料燃烧所生成的  $\text{NO}_x$  几乎全部为  $\text{NO}$ , 故本文所述的  $\text{NO}_x$  生成机理主要针对  $\text{NO}$  而

言。因此, 燃料型  $\text{NO}$  的生成量主要取决于燃料中的有机氮含量和燃料的配加量, 燃料中的含氮量越高, 燃料的配加量越多, 生成的  $\text{NO}$  越多。

快速型  $\text{NO}_x$  是在燃料着火燃烧阶段, 空气中的氮分子与燃料燃烧的中间产物烃 ( $\text{CH}_i$ ) 等发生撞击, 生成中间产物  $\text{HCN}$  和  $\text{CN}$  等, 这些中间产物经氧化后生成  $\text{NO}_x$ , 其转化率取决于空气过剩条件和温度水平。在烧结气氛下, 快速型  $\text{NO}_x$  以生成  $\text{NO}$  为主。

热力型  $\text{NO}_x$  是指空气中的氮气在高温下氧化所产生的氮氧化物, 同样以  $\text{NO}$  为主。热力型  $\text{NO}$  的生成机理是由前苏联科学家泽尔多维奇提出的, 因而称为泽尔多维奇机理<sup>[11-12]</sup>。在没有考虑其他物质对  $\text{N}_2$  和  $\text{O}_2$  反应催化的情况下, 根据泽尔多维奇化学反应计算得出, 生成  $\text{NO}$  速度最快的最低温度在 1500°C 左右, 而在燃烧带内产生的  $\text{CO}$  会抑制热力型  $\text{NO}$  的生成, 并还原所生成的  $\text{NO}$ , 故一些文献<sup>[11]</sup>认为烧结过程中产生的  $\text{NO}$  主要为燃料型  $\text{NO}$ , 热力型  $\text{NO}$  很少。但是, 泽尔多维奇在描述生成热力型  $\text{NO}$  的速率时也指出氧含量和反应时间对热力型  $\text{NO}$  的生成有重大的影响, 同时水蒸气的存在会促进热力型  $\text{NO}$  的产生, 这是其他一些文献<sup>[12]</sup>指出  $\text{NO}$  含量达到  $10^{-3}$  数量级的最低温度在 1300°C 的原因, 即烧结过程中会产生热力型  $\text{NO}$ 。

由表 3 可知, 影响烧结过程中热力型  $\text{NO}$  含量的因素有反应平衡常数  $K_p$  及  $\text{N}_2$  和  $\text{O}_2$  的含量,  $\text{N}_2$  含量变化不明显, 因此  $\text{O}_2$  含量直接影响  $\text{NO}$  的生成量, 氧含量水平越高,  $\text{NO}$  的生成量就会越多, 同时  $\text{N}_2$  与  $\text{O}_2$  的反应平衡常数  $K_p$  随着温度的升高而升高。烧结过程中的氮氧化物 ( $\text{NO}_x$ ) 主要产生于高温的烧结矿带和燃烧带, 在燃烧带刚刚移出的烧结矿带, 由于其温度和氧含量高, 易于产生热力型  $\text{NO}_x$ ; 在燃烧带则以燃料型  $\text{NO}_x$  为主, 并且有少量的快速型  $\text{NO}_x$  生成。但是, 由于固体燃料燃烧产生的  $\text{CO}$  会对生成的  $\text{NO}_x$  起还原作用<sup>[13-14]</sup>, 烧结料层燃烧带以上部分产生的  $\text{NO}_x$  将会被部分还原成氮气, 这一作用显然与烧结固体燃料配加量有关。



从图 5 可以看出: 料层高度为 700、850 和 1000 mm 的  $\text{NO}$  含量曲线依次降低; 各料层高度下烧结尾气中  $\text{NO}$  含量在刚开始时急剧上升, 接下来比较长的时间内处于小幅度波动上升阶段, 在烧结过程快要结束时达到最高值, 然后迅速下降。这是由于初期点火的目的为了形成燃烧带, 故初期燃烧带

从无到有急剧变宽,其后随着烧结的进行,燃烧带小幅度波动变宽,燃烧的焦粉量增加,燃料型 NO 量增加,同时高温区逐渐变宽,烧结料层最高温度升高, N<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 结合生成热力型 NO 的能力增强, NO 含量

缓慢上升. 三个高度的含量曲线存在差异的原因在于,随着料层高度的增加,焦粉配加量减少,料层中烧结气体的氧含量升高,可以减弱燃烧带 CO 气体对 NO 的还原.

表 3 N<sub>2</sub> 与 O<sub>2</sub> 生成 NO 的平衡常数 K<sub>p</sub>

Table 3 Equilibrium constant K<sub>p</sub> of the reaction between N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>

T/K	300	1000	1200	1500	2000
K <sub>p</sub>	$7.0 \times 10^{-31}$	$7.5 \times 10^{-9}$	$2.8 \times 10^{-7}$	$1.1 \times 10^{-5}$	$4.1 \times 10^{-4}$

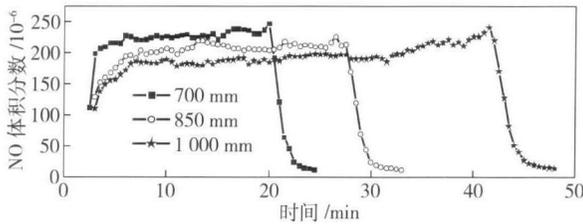


图 5 各料层高度的烧结尾气中 NO 含量随时间的变化情况

Fig. 5 Variations of NO content with time in each bed depth sintering

### 2.5 烧结过程高温区宽度变化规律

由于烧结料是混合物,不能保证每次实验的水分含量和烧结料的粒度分布完全一致,故同一高度

下重复性烧结实验结果会有偏差,但偏差不太大. 鉴于上述特点,不能用平均值进行计算. 本文选用其中较好的一组来说明料层高度增加对烧结气体成分流量的影响. 所选数据的实验条件是:料层高度为 700, 850 和 1000 mm 的烧结时间分别为 25, 33 和 47 min, 气体流量分别为 2.82, 2.66 和 2.59 m<sup>3</sup> · m<sup>-1</sup>. 根据平均尾气流量、烧结尾气含量曲线和烧结时间计算所得的各气体成分的总流量,具体见表 4

为了便于分析烧结料层中高温区对烧结尾气成分的变化影响,对石英杯烧结进行过程摄像得到三个料层高度下高温区宽度随烧结时间的变化情况,具体如图 6 所示.

表 4 各气体成分的总流量

Table 4 Gas flow of each composition

料层厚度 /mm	O <sub>2</sub> 计算总流量 /m <sup>3</sup>	CO <sub>2</sub> 计算总流量 /m <sup>3</sup>	SO <sub>2</sub> 计算总流量 /m <sup>3</sup>	NO 计算总流量 /m <sup>3</sup>
700	9.67	2.71	0.0195	0.0116
850	12.62	3.09	0.0182	0.0151
1000	17.92	4.02	0.0174	0.0209

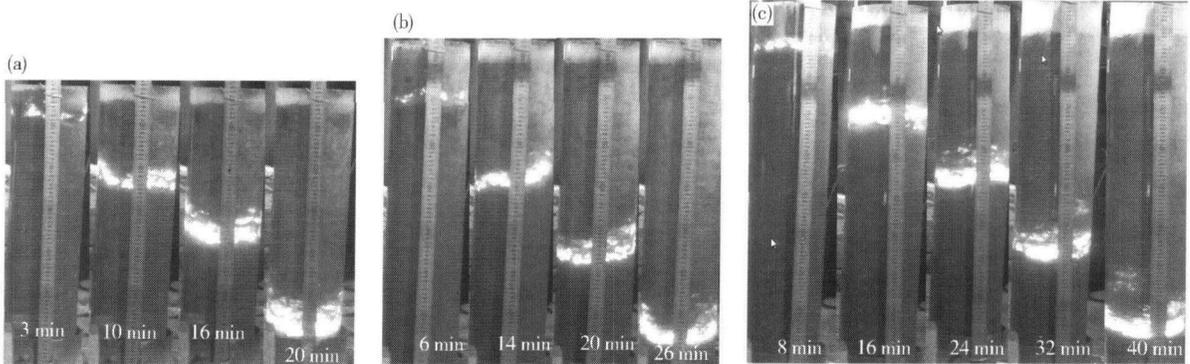


图 6 各料层高度的高温区宽度在烧结过程中的变化照片. (a) 料层高度 700mm; (b) 料层高度 850mm; (c) 料层高度 1000mm

Fig. 6 Variations in width of the high temperature zone in different bed depths. (a) bed depth 700mm; (b) bed depth 850mm; (c) bed depth 1000mm

从图 6(a)~(c)中可以较为清晰地看出,在各料层高度的高温区在烧结过程中逐渐变宽,这与上文所述的根据烧结尾气成分判断烧结过程高温区宽度的变化结果较为一致. 高温区宽度产生上述变化

的原因有三个. 其一,由于烧结过程是将平均温度较低的烧结料变成平均温度较高的烧结矿的过程,故随着烧结的进行,高温烧结矿层越来越厚;其二,由于高温烧结矿层的厚度增加,烧结气体受热时间

延长, 体积膨胀率增加, 导致进入燃烧带的烧结气体流速减慢和单位体积氧的分子数量减少, 导致燃烧带的燃烧速度减慢, 料层内大部分焦粉颗粒燃尽的时间延长, 燃烧带变宽; 其三, 由于烧结气体流速减慢, 单位时间烧结气体携带的热量减少, 故料层内蓄积热量较多, 高温区变宽. 结合上述各料层高度烧结尾气各成分的含量曲线分析可知, 增加料层高度可以有效地减少烧结尾气中气体污染物 ( $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}$ ) 的含量, 随着烧结的进行, 高温区宽度增加, 气体污染物 ( $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}$ ) 的含量逐渐升高. 因此, 加快烧结过程后期燃料燃烧速度能够抑制燃烧带变宽, 提高下部料层的透气性使高温区变窄, 将会减少烧结尾气中气体污染物 ( $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}$ ) 的含量.

### 3 结论

(1) 随着烧结过程的进行, 固体燃料的燃烧量增多, 烧结尾气中  $\text{O}_2$  含量下降; 增加料层高度, 因强化自动蓄热作用, 固体燃料配比减小, 料层中氧位升高, 烧结尾气  $\text{O}_2$  含量呈现上升态势.

(2) 烧结过程的固体燃料燃烧是影响尾气中  $\text{CO}_2$  含量的主要因素, 随着燃烧反应的加速, 烧结尾气中  $\text{CO}_2$  含量升高; 随着料层高度的增加, 因减少了固体燃料配比量, 烧结尾气  $\text{CO}_2$  含量整体下降.

(3) 在烧结过程中, 尾气中  $\text{SO}_2$  含量呈现小幅升高态势, 临近烧结终点时则出现大幅度升高, 这主要与其经历生成、被吸收和再析出的过程有关; 增加料层高度, 因固体燃料配比减小, 尾气中  $\text{SO}_2$  含量明显下降.

(4) 随着烧结历程的推进, 尾气中  $\text{NO}$  含量平稳上升, 与  $\text{SO}_2$  含量变化曲线不同, 没有在临近烧结终点时出现含量急剧升高的现象, 这是因为料层局部的还原气氛可以分解部分  $\text{NO}$  以及  $\text{NO}$  在料层中无蓄积的缘故; 随着料层高度增加, 由于燃料型  $\text{NO}$  生成量减少的幅度更大, 故  $\text{NO}$  含量呈现降低态势.

(5) 由于涉及气体污染物的生成反应大部分在烧结料层高温区内发生, 加快烧结燃料的燃烧速度和提高下部料层的透气性是抑制烧结料层的高温区变宽的主要措施, 能够减弱烧结过程中尾气中的  $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}$  含量的升高速度, 减少烧结尾气中气体污染物的排放.

### 参 考 文 献

[1] Zhu T Y. Sintering Gas Purification Technology. Beijing: Chemi-

cal Industry Press, 2009.

(朱廷钰. 烧结烟气净化技术. 北京: 化学工业出版社, 2009)

- [2] Feng J. Practice of energy saving in Shougang sintering plant. Sinter Pelletiz, 2004, 29(1): 53  
(冯娟. 首钢烧结节能的实践. 烧结球团, 2004, 29(1): 53)
- [3] Huang D S, Wang R E, Tang C G. About FGD technology in sintering process. Sinter Pelletiz, 2008, 33(3): 6  
(黄东生, 王荣恩, 汤楚贵. 烧结烟气脱硫技术探讨. 烧结球团, 2008, 33(3): 6)
- [4] Gao X. Situation of sintering and pelletizing processes desulfuration in our country and count measures to decrease  $\text{SO}_2$  emission. Sinter Pelletiz, 2008, 33(3): 3  
(郝学. 我国烧结球团行业脱硫现状及减排对策. 烧结球团, 2008, 33(3): 3)
- [5] Li G Q, Zhu C Y. Energy Saving and Environmental Protection in Ferrous Metallurgical Process. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006: 30  
(李光强, 朱诚意. 钢铁冶金的环保与节能. 北京: 冶金工业出版社, 2006: 30)
- [6] Yang Z X, Du J H. Judge of sintering process parameters by waste gas composition. Sinter Pelletiz, 1990, 15(2): 9  
(杨兆祥, 杜继红. 利用烧结废气成分分析判断烧结过程. 烧结球团, 1990, 15(2): 9)
- [7] Kinuma H S, Endo S J, Yajima K H, et al. Effect of oxygen partial pressure on liquids for the  $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{FeO}_x$  system at 1573 K. ISIJ Int, 2004, 44(12): 2041
- [8] Yang X D, Zhang L. Greenhouse gas emission from iron and steel industry and its reduction. Iron Steel, 2003, 38(7): 65  
(杨晓东, 张玲. 钢铁工业温室气体排放与减排. 钢铁, 2003, 38(7): 65)
- [9] Li H, Sieh H, Whiteman J A. Effect of oxygen potential on mineral formation in lime-fluxed iron ore sinter. ISIJ Int, 1989, 29(8): 627
- [10] Zhang X, Guo Z C. Energy consumption and atmospheric pollutants of China's iron and steel industry. Iron Steel, 2000, 35(2): 63  
(张夏, 郭占成. 我国钢铁工业能耗与大气污染物排放量. 钢铁, 2000, 35(2): 63)
- [11] Ma G D. Air Pollution Control Engineering, 2nd Ed. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 2003: 76  
(马广大. 大气污染控制工程. 2版. 北京: 中国环境科学出版社, 2003: 76)
- [12] Wu B J. The composing mechanism of  $\text{NO}_x$  in combustion. Power Environ Prot, 2003, 19(4): 9  
(吴碧君. 燃烧过程中氮氧化物的生成机理. 电力环境保护, 2003, 19(4): 9)
- [13] Kasai E K, Wu S L, Sugiyama T S, et al. Numerical modeling of  $\text{NO}$  formation during packed-bed combustion of coke granules. Tetsu-to-Hagane, 1992, 78(7): 1005
- [14] Wu S L, Sugiyama T S, Morioka K C, et al. Elimination reaction of  $\text{NO}$  gas generated from coke combustion in iron ore sinter bed. Tetsu-to-Hagane, 1994, 80(4): 227