高炉布袋灰预制粒对烧结过程的影响

赵贵清[1]，王万里[1]，宁晓钧[2]，王广伟[2]
（1. 酒钢（集团）公司 技术中心，甘肃 嘉峪关 735100；2. 北京科技大学 冶金与生态工程学院，北京 100083）

摘要：针对烧结过程添加高炉布袋灰引起烧结矿过程和有害元素含量增加的问题，本文进行了高炉布袋灰预制粒和烧结参数变化对烧结过程和 Zn、K 及 Na 元素脱除率的影响规律的研究。结果表明，对高炉布袋灰进行预制粒获得的小球，能够满足烧结配料的基本要求。随着布袋灰小球配加量增加，烧结温度升高，烧结时间延长，垂直烧结速率下降，烧结矿转鼓指数和成品率先增加而后下降，Zn、K 及 Na 元素脱除率先增加后逐渐降低。布袋灰小球与炉箅子距离的增加，对烧结矿的各项指标影响不大，但 Zn 元素的脱除率降低明显。布袋灰小球配碳量、碱度和烧结负压的变化对 Zn、K 及 Na 元素脱除率影响较小。布袋灰小球用于烧结的适宜工艺参数：碱度为 1.93，尺寸为 3.8 mm，小球配比为 4%，在料层中位置距炉箅子 100 mm，烧结负压为 10 kPa。

关键词：高炉布袋灰；预制粒；烧结；Zn；K；Na
中图分类号：TF046.4；X757 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764（2024）03－0106－08
doi：10.13403/j.sjqt.2024.03.048

Influence of blast furnace bag ash pregranulation on sintering process

ZHAO Guiqing[1], WANG Wanli[1], NING Xiaojun[2], WANG Guangwei[2]
(1. Technology Center, Jiuquan Iron and Steel (Group) Co., Ltd., Jiayuguan 735100, Gansu, China; 2. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problem of the increase of sintering process and the content of harmful elements caused by the addition of blast furnace bag ash in the sintering process, the influence of pregranulation of blast furnace bag ash and the change of sintering parameters on the sintering process and the removal rate of Zn, K and Na elements is studied. The results show that the pellets obtained by prepelletizing blast furnace bag ash can meet the basic requirements of sintering accessary. With the increase of the quantity of bag ash pellets, the sintering temperature increases, the sintering time prolongs, the vertical sintering rate decreases, the drum index and the yield of sinter increase first and then decrease, and the removal rate of Zn, K and Na elements first increases and then decreases. The increase of the distance between the bag ash pellets and the grate has little effect on the sinter indexes, but the removal rate of Zn element decreases significantly. The changes of carbon mixture, alkalinity and sintering negative pressure of bag ash pellets have little effect on the removal rate of Zn, K and Na. The suitable process parameters for sintering of bag ash pellets are as follows: the alkalinity of bag ash pellets is 1.93, the size is 3.8 mm, the proportion of small pellets is 4%, the position in the material layer is 100 mm away from the grate, and the negative pressure of sintering is 10 kPa.

Key words: blast furnace bag ash; pregranulation; sintering; Zn; K; Na

目前，我国钢铁生产工艺仍以高炉—转炉长流程为主，铁前系统的能耗和污染物排放均占整个冶炼流程的 70% 以上，实现钢铁绿色低碳生产的关键在铁前工序[1-2]。高炉工序作为铁前系统

收稿日期：2023－01－01；**修回日期**：2023－08－03
基金项目：国家自然科学基金面上资助项目（52074029）
作者简介：赵贵清（1971—）男，硕士，正高级工程师，从事高炉炼铁生产技术研究。
通信作者：王广伟（1986—），男，博士，教授，从事低碳冶金新技术研究。

的主要环节，在生产过程中会产生大量的 CO_2 以及粉尘排放。其中高炉除尘灰中因含有铁、碳、熔剂等有益成分，是钢铁企业内部重要的二次资源。但由于高炉除尘灰中富集了大量有害元素，造成高炉除尘灰的回收利用存在困难[3-6]。部分企业将高炉除尘灰作为烧结原料直接加入烧结配料系统完成循环利用，但存在有害元素在不同工序之间循环富集的问题，部分企业利用转底炉和回转窑脱除有害元素后返回钢铁流程循环利用，能够有效降低有害元素对高炉炼铁生产的危害，但处理成本较高[5,7-9]。

高炉布袋灰直接加入烧结配料系统进行资源化利用的工艺由于操作简便，回收利用成本较低，已成为目前钢铁企业处理高炉布袋灰的主要技术手段。LANZERSTORGER 等[10]将高炉除尘灰作为烧结固体燃料替代物用于烧结过程，发现除尘灰中所含的碳可以有效替代焦粉作为燃料使用，细粒除尘灰的碳替代因子接近 1.0。但是由于除尘灰中 Zn、K 及 Na 等有害元素含量高，烧结配加除尘灰会对烧结矿质量产生一定的影响[11]。张鑫等[12]认为烧结配料中 K_2O 含量的增加会显著降低烧结矿的抗压强度和转鼓强度。秦立浩等[13]关于除尘灰分级利用的研究发现，在烧结过程中添加少量除尘灰会起到脱除碱金属等有害元的作用，这对于高炉除尘灰在烧结过程中的资源化应用提供了理论支撑。安钢等[14]系统分析了除尘灰提前制粒对烧结过程的影响，提出了除尘灰回收利用的新方法。李和平等[15]采用微型烧结试验装置研究了烧结过程冶金粉尘对铁矿粉高温性能的作用机制，明确了烧结除尘灰、高炉除尘灰和杂料对铁矿粉同化性及液相流动性的影响规律。先前的研究已经对除尘灰用于烧结生产进行了较为详细的报道，由于高炉布袋灰具有较小的粒度、较高的有害元素含量，烧结工序资源化利用高炉布袋灰技术还存在诸多难点尚待解决。

为了明晰烧结生产配加高炉布袋灰对烧结过程、烧结矿质量和有害元素脱除规律的影响，本文进行了高炉布袋灰预制粒配加烧结料的烧结杯试验研究，试验对高炉布袋灰进行预制粒，获得具有一定粒度的小球应用于烧结配料，探究布袋灰小球配加量对烧结过程和有害元素脱除规律的影响；通过改变布袋灰小球布料位置、配炭量、碱度和烧结负压等条件，探索不同条件下高炉布袋灰小球添加对烧结过程的影响；分析了不同烧结条件下，Zn、K 及 Na 元素的脱除规律。通过以上研究，以期掌握高炉布袋灰应用于烧结生产时对烧结矿产、质量的影响规律，为烧结生产高效消纳高炉布袋灰技术的开发提供理论指导。

1　试验原料及方法

1.1　试验原料

试验原料以酒钢烧结厂实际使用烧结原料为基础，其铁矿粉以自产精矿、公航旅矿及纽曼精矿为主，返矿主要是高返和酸返，配加少量的提铁磁珠、氧化铁粉、瓦斯灰等含铁原料，熔剂为石灰石和生石灰，烧结燃料为焦粉，布袋灰为酒钢高炉生产过程中所收集的高炉布袋灰。烧结原料及布袋灰主要化学成分如表 1 所示。由表 1 可以看出，酒钢自产精矿的铁品位较低，w(TFe)仅为 50.18%，并且有害元素含量较高，高炉布袋灰中 Na_2O、K_2O 和 ZnO 的质量分数分别达到了 0.56%、4.18%和 7.12%，造成酒钢高炉使用烧结矿的铁品位较低，高炉的有害元素负荷较高。

表 1　烧结原料及高炉布袋灰主要化学成分(质量分数)

Table 1　Main chemical composition in sintering raw material and BFBD　　%

烧结原料	TFe	CaO	SiO_2	Na_2O	K_2O	ZnO
自产精矿	50.18	2.62	8.94	0.037	0.340	0.050
公航旅矿	62.16	0.95	6.93	—	0.169	0.021
纽曼精矿	61.28	0.17	5.27	0.006	0.020	0.012
高返	49.94	14.25	8.26	0.050	0.274	0.042
酸返	55.20	5.92	9.31	0.070	0.227	0.028
提铁磁珠	41.60	15.92	2.98	—	0.143	0.454
氧化铁粉	56.00	0.82	1.40	—	—	1.000
瓦斯灰	32.00	5.49	7.51	0.380	1.390	0.680
石灰石	1.45	51.89	2.81	0.073	0.133	0.001
生石灰	0.35	86.00	2.28	0.028	1.133	0.001
布袋灰	28.12	5.47	9.41	0.560	4.180	7.120

1.2　布袋灰小球的制备及特性

小球的制备原料以酒钢高炉布袋灰为主，熔

剂为生石灰和石灰石，黏结剂为工业有机黏结剂，采用圆盘造球机进行布袋灰小球的制备。每次称取5 kg混合料在圆盘造球机上进行造球试验(圆盘造球机直径为1 000 mm，边高为150 mm，倾角为45°，固定转速为20 r/min，造球时间为20 min)，目标粒度为3~8 mm。造球结束后对小球进行粒度筛分、落下强度、抗压强度以及磨损指数测试。

试验布袋灰小球制备条件：碱度为1.93，布袋灰、石灰石、石灰、工业有机黏结剂质量分数分别为84.34%、10.28%、4.98%和0.40%，制备的小球水分为16%，3~8 mm的小球占比达到72.3%，抗压强度达到10.7 N/P，落下强度为4次/(0.5 m)，磨损指数为86.5%。布袋灰小球原料中碳质量分数为19.43%，Zn、K及Na质量分数分别为4.474%、3.040%和0.386%。

1.3 烧结杯试验方案和方法

烧结杯试验所用混合料为原烧结混合料和布袋灰。其中烧结原混合料配料：自产精矿(43.4%)、公航旅矿(14%)、纽曼精矿(6.1%)、氧化铁粉(0.3%)、瓦斯灰(1.0%)、提铁磁珠(0.1%)以及高炉槽下返矿(8%)和酸性返矿含铁料(7%)，熔剂为石灰石(10.1%)和生石灰(5.5%)，燃料为焦粉(4.5%)。为了明确烧结过程中高炉布袋灰有害元素脱除的规律，在原混合料配料的基础上添加8%布袋灰，此时烧结原料中Zn、K及Na的质量分数分别为0.487%、0.506%和0.059%。试验时首先按照试验方案称量一定量的烧结混合料、高炉布袋灰以及布袋灰小球，烧结混合料与高炉布袋灰再次进行混匀作为烧结混合料使用，布袋灰小球按照试验方案在烧结杯不同位置进行布料。

2 试验结果及分析

2.1 布袋灰小球配比对烧结过程的影响

布袋灰加入烧结料的方式有两种：一部分布袋灰直接配入混合料，在混合料中均匀分布；另一部分布袋灰造成小球，按照特定的方式布置到烧结杯不同的位置。首先分析了布袋灰小球配加比例对烧结矿质量和有害元素脱除规律的影响，其中布袋灰小球占比分别为0、2%、4%、6%和8%(对应的试验编号分别为W-0、W-2、W-4、W-6和W-8)。布袋灰小球在混合料中的位置距离炉箅子100 mm、点火时间为2 min、点火负压为6 kPa，烧结负压为9 kPa。不同布袋灰小球配加比例情况下烧结杯试验参数和试验结果分别如表2和表3所示。

由表2可知，随着布袋灰小球配比的增加，烧结温度、烧结时间和垂直烧结速率发生明显变化。主要原因是布袋灰小球的碳含量高于混合料，随着布袋灰小球配比的增加，烧结料中碳含量升高，较高的碳含量造成烧结温度升高、烧结时间延长和垂直烧结速率增加。通过表3可以看出，烧结矿的转鼓指数、成品率和利用系数随着布袋灰小球配比的增加均出现了先增加后下降的现象，主要原因是随着布袋灰小球配加量的增加，烧结料层的透气性得到改善，对烧结矿的产、质量有一定的提升作用。但随着布袋灰小球配比的进一步增加，烧结层发生局部烧熔现象，使料层局部的透气性变差，进而影响烧结矿转鼓指数和成品率。在布袋灰小球添加量为4%，烧结矿的成品率最高达到了71.5%，同时烧结矿还具有较高的转鼓指数、利用系数和较好的粒度组成。

表2 不同布袋灰小球配比下烧结杯试验参数

Table 2 Experimental parameters of sintering cup under different BFBD pellets ratios

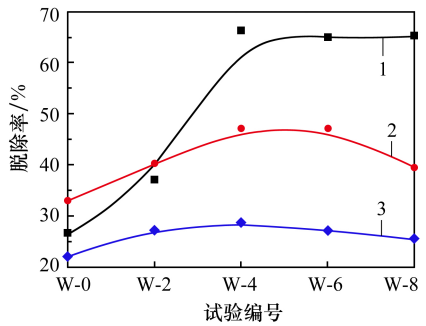
编号	混合料水分/%	小球水分/%	料层厚度/mm	点火负压/kPa	烧结负压/kPa	烧结废气最高温度/℃	烧结时间/min
W-0	10.6	16.1	505	6.1	9.0	484	20.8
W-2	10.5	16.1	505	6.1	9.2	490	21.5
W-4	10.9	16.1	505	6.2	9.0	491	22.5
W-6	11.0	16.1	505	6.0	9.1	503	23.1
W-8	10.3	16.1	505	6.3	9.0	515	24.0

表 3　不同布袋灰小球配比下烧结杯试验结果

Table 3　Results of sintering cup experiment under different BFBD pellets ratios

编号	垂直烧结速率/(mm·min^{-1})	成品率/%	转鼓指数/%	利用系数/(t·m^{-2}·h^{-1})	粒度组成(质量分数)/%				
					40 mm	25 mm	15 mm	10 mm	5 mm
W－0	24.5	70.3	68.8	1.28	7.38	15.96	21.64	20.86	9.49
W－2	23.5	69.7	68.5	1.31	12.35	10.28	19.37	17.70	10.00
W－4	22.4	71.5	70.0	1.30	9.21	15.6	18.50	19.10	9.10
W－6	22.0	65.0	72.5	1.28	8.70	13.65	17.95	17.64	7.06
W－8	21.0	63.7	70.1	1.25	7.01	14.52	15.30	18.50	8.40

不同布袋灰小球配比条件下，烧结矿 Zn、K 及 Na 元素的脱除率如图 1 所示。由图 1 可以看出，随着布袋灰小球添加量的增加，Zn、K 及 Na 元素的脱除率先增加而后降低，在布袋灰小球添加量为 4% 时，Zn、K 及 Na 元素的脱除率达到最大值，分别为 66.29%、47.03% 和 28.57%。其主要原因是随着布袋灰小球添加量的增加，烧结温度提升、透气性得到改善，同时布袋灰小球具有较高的碳含量，也有利于三种有害元素的还原和挥发。布袋灰小球有害元素含量由高到低依次为 Zn、K、Na，随着布袋灰小球添加量的增加，烧结料中有害元素 Zn 的聚集程度高于 K 和 Na，并且 Zn 元素的沸点为 907 ℃，高于 K 元素的 759 ℃和 Na 元素的 883 ℃，造成随着布袋灰小球配比的增加，烧结矿中 Zn 元素的脱除快速增加，在布袋灰小球添加量为 4% 时 Zn 元素的脱除率高于 K 和 Na 元素的脱除率。再增加布袋灰小球的配比时会引起烧结层发生局部烧熔，进而导致料层的透气性变差，不利于还原生成的有害元素蒸气随高温烟气排出，造成三种有害元素的脱除率随布袋灰小球添加量的增加而降低。



1—Zn；2—K；3—Na。

图 1　不同布袋灰小球配比下烧结过程中 Zn、K 及 Na 脱除率

Fig. 1　Removal rate of Zn，K and Na under different BFBD pellets ratios

2.2　布袋灰小球布料位置的影响

为明确布袋灰小球在烧结料层的布料位置对有害元素脱除率的影响，进行了布袋灰小球在距炉箅子分别为 100、200、300 和 400 mm 的烧结杯试验(对应的试验编号分别为 WH－1、WH－2、WH－3 和 WH－4)。试验过程中布袋灰小球的配比为 4%，烧结其它工艺参数不变，试验结果如表 4 所示。由表 4 可以看出，布袋灰小球在不同高度上布料时，垂直烧结速率在 21.3～22.4 mm/min，烧结矿的成品率为 70.5%～71.8%，转鼓指数为 66.5%～70.3%，利用系数为 1.29～1.31 t/(m^2·h)，布袋灰小球的布料位置对烧结矿的各项性能指标影响较小。

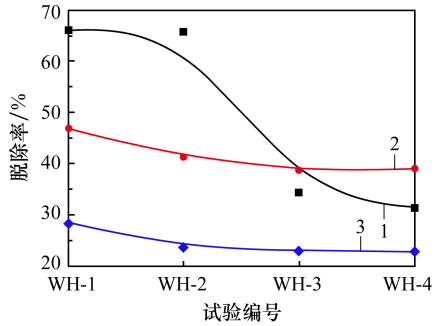
布袋灰小球的布料位置变化后，烧结矿中 Zn、K 及 Na 元素的脱除率如图 2 所示。由图 2 可以看出，随着布袋灰小球在烧结料层内位置的下移，烧结矿中 Zn、K 及 Na 元素的脱除率逐渐增加，在距离炉箅子 100 mm 时，Zn、K 及 Na 的脱除率分别为 66.29%、47.03%、28.57%。其主要原因是布袋灰小球中有害元素的含量占混合料中全部有害元素含量的比例较高，其中 Zn 元素达到了 46.9%，K 和 Na 元素也分别达到了 27.4% 和 28.1%，随着布袋灰小球布料位置的下移，造成 Zn、K 及 Na 元素在烧结料层内逐渐向下层偏析，还原生成的 Zn、K 及 Na 蒸气随烟气下降过程中被下层烧结料吸附的量减少，造成有害元素脱除率增加。同时还可以看出，布袋灰小球布料位置的变化对 Zn 元素的脱除率影响更为明显，而对于 K 和 Na 脱除率影响较小。分析其主要原因是烧结料层上部温度低，还原性气氛弱，Zn、K 及 Na 元素

表 4 布袋灰小球不同布料位置的烧结杯试验结果

Table 4 Results of sintering cup experiment under different BFBD pellets position

编号	垂直烧结速率/(mm·min^{-1})	成品率/%	转鼓指数/%	利用系数/(t·m^{-2}·h^{-1})	粒度组成(质量分数)/%				
					40 mm	25 mm	15 mm	10 mm	5 mm
WH-1	22.4	71.5	70.3	1.30	9.21	15.60	18.50	19.1	9.10
WH-2	21.3	70.8	68.2	1.29	8.62	15.95	17.05	21.21	7.95
WH-3	22.1	70.5	68.0	1.28	5.13	18.75	17.13	20.75	8.75
WH-4	22.0	71.8	66.5	1.31	12.97	11.58	17.02	21.30	9.62

的脱除率都较低；随着布袋灰小球布料位置下移，由于料层自蓄热作用而使得烧结温度升高，具有较高沸点的 Zn 元素可以更多的进入烟气而被大量脱除。



1—Zn；2—K；3—Na。

图 2 布袋灰小球不同位置下烧结矿中 Zn、K 及 Na 脱除率

Fig. 2 Removal rate of Zn, K and Na during sintering at different positions of BFBD pellets

2.3 布袋灰小球配碳量的影响

为了研究布袋灰小球配碳量对烧结矿质量和有害元素脱除率的影响，采用不同配碳量(基准、1.05 倍、1.10 倍、1.15 倍和 1.20 倍)制备的布袋灰小球(对应的试验编号分别为 WC-0、WC-1、WC-2、WC-3 和 WC-4)进行烧结杯试验。试验过程中固定布袋灰小球配比 4%，距炉算子距离100 mm，烧结过程其它参数不变，试验结果如表 5 所示。由表 5 可以看出，增加布袋灰小球配碳量，垂直烧结速度先降低而后升高，成品率逐渐降低，由 WC-1 的 70.2% 降低到 WC-4 的 65.6%，而转鼓指数变化不明显。其主要原因是随配碳量的增加烧结温度逐渐升高，过高的烧结温度会造成烧结层发生局部烧熔现象，使得料层局部的透气性变差，造成烧结矿成品率降低。同时布袋灰小球配加量仅有 4%，烧结过程对周边铁矿粉的黏结作用影响较小，对烧结矿的转鼓强度影响较小。

烧结矿中 Zn、K 及 Na 元素的脱除率如图 3 所示。由图 3 可知，随着布袋灰小球中配碳量的增加，三种有害元素的脱除率稍有增加，但变化幅度较小，说明布袋灰小球配碳量为 19.43% 时已经能够满足高温烧结过程中有害元素脱除所需要的热量和局部还原性气氛，无需通过进一步增加配炭量来改善有害元素的脱除效果。

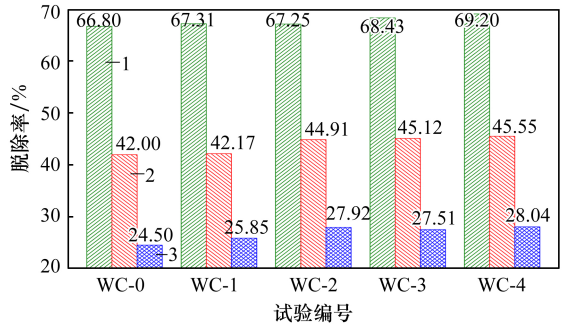
2.4 布袋灰小球碱度的影响

为了探究布袋灰小球碱度对烧结矿质量和有害元素脱除率的影响，采用不同碱度(1.83、1.88、1.93、1.98)条件下制备的布袋灰小球(对应的试验编号分别为 WR-1、WR-2、WR-3 和 WR-4)进行烧结杯试验。试验过程中固定布袋灰小球配比4%，距炉算子距离100mm，烧结过程

表 5 不同布袋灰小球配炭量烧结杯试验结果

Table 5 Results of sintering cup experiment under BFBD pellets with different carbon content

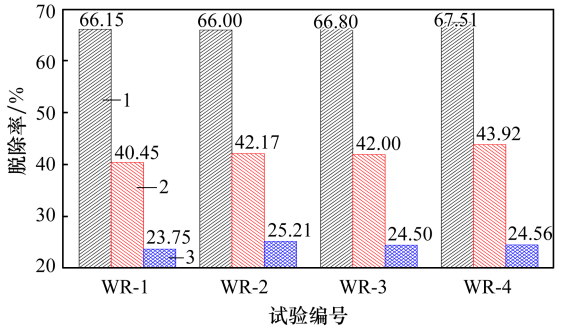
编号	垂直烧结速率/(mm·min^{-1})	成品率/%	转鼓指数/%	利用系数/(t·m^{-2}·h^{-1})	粒度组成(质量分数)/%				
					40 mm	25 mm	15 mm	10 mm	5 mm
WC-1	22.0	70.2	68.5	1.29	9.84	20.21	22.0	12.35	5.80
WC-2	21.0	70.5	70.1	1.31	7.25	23.40	20.90	12.15	7.25
WC-3	21.8	68.4	69.0	1.29	14.00	18.30	15.41	8.20	12.50
WC-4	22.1	65.6	71.5	1.27	10.50	18.52	17.40	8.98	10.20



1—Zn；2—K；3—Na。

图 3　布袋灰小球不同配碳量下 Zn、K 及 Na 脱除率

Fig. 3　Removal rate of Zn，K and Na during sintering at different carbon content of BFBD pellets



1—Zn；2—K；3—Na。

图 4　布袋灰小球不同碱度下烧结过程中 Zn、K 及 Na 脱除率

Fig. 4　Removal rate of Zn，K and Na during sintering by BFBD pellets with different basicities

其它参数不变，试验结果如表 6 所示。由表 6 可以看出，不同碱度的布袋灰小球对烧结矿的各项指标影响不显著，成品率和转鼓指数均在 70% 左右，没有明显的规律性，主要原因是布袋灰小球的配比较低，对烧结过程黏结相的生成量和性能影响不明显。

烧结矿中 Zn、K 及 Na 元素的脱除率如图 4 所示。由图 4 可知，随着布袋灰小球中碱度的增大，Zn、K 和 Na 元素的脱除率变化不明显。其主要原因是碱度的增加有利于铁酸钙等优质黏结相的生成，可以改善烧结料层的透气性，促进有害元素的脱除。然而由于布袋灰小球添加量仅有4%，透气性改善对 Zn、K 和 Na 元素脱除的效果影响较小，导致布袋灰小球碱度变化时三种有害元素的脱除率变化幅度较小。

2.5　烧结负压条件的影响

为了研究不同烧结负压条件对烧结矿质量和有害元素脱除率的变化规律，进行了固定布袋灰小球配比为 4%，距炉箅子距离为 100 mm，烧结负压分别设定为 8、9、10 和 110 kPa(对应的试验编号分别为 WP－1、WP－2、WP－3 和 WP－4)的烧结杯试验，试验结果如表 7 所示。由表 7 可以看出，随着烧结负压的增加，对应烧结矿的成品率和转鼓指数均出现先增大再降低的趋势，适

表 6　不同布袋灰小球碱度烧结杯试验结果

Table 6　Results of sintering cup experiment under BFBD pellets with different basicity

编号	垂直烧结速率/($mm \cdot min^{-1}$)	成品率/%	转鼓指数/%	利用系数/($t \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)	粒度组成(质量分数)/%				
					40 mm	25 mm	15 mm	10 mm	5 mm
WR－1	22.6	69.4	67.5	1.26	9.50	11.72	13.52	20.28	14.42
WR－2	24.0	70.0	68.7	1.25	7.20	13.50	20.81	20.00	8.49
WR－3	22.4	71.5	70.0	1.30	9.21	15.60	18.50	19.10	9.10
WR－4	24.6	68.9	72.0	1.28	5.95	16.01	15.22	13.89	14.83

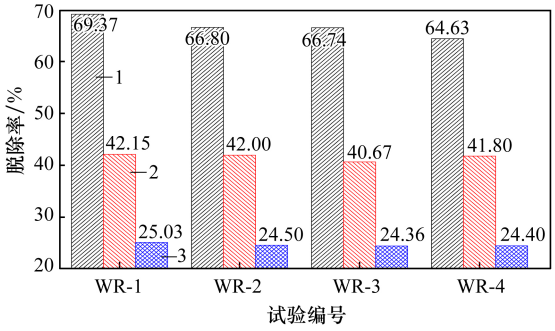
表 7　不同烧结负压烧结杯试验结果

Table 7　Results of sintering cup experiment under different sintering vacuum

编号	垂直烧结速率/($mm \cdot min^{-1}$)	成品率/%	转鼓指数/%	利用系数/($t \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)	粒度组成(质量分数)/%				
					40 mm	25 mm	15 mm	10 mm	5 mm
WP－1	20.1	70.7	68.5	1.42	7.40	16.42	19.0	20.57	7.31
WP－2	22.4	71.5	70.0	1.30	9.21	15.60	18.50	19.10	9.10
WP－3	24.5	80.0	73.1	1.35	12.00	20.15	22.10	15.39	10.50
WP－4	25.3	72.3	70.2	1.29	13.00	18.58	16.82	17.50	6.40

宜的烧结负压为 10 kPa，过高或过低的烧结负压均不利于烧结矿质量的改善和产量的提高。

烧结矿中 Zn、K 及 Na 元素的脱除率如图 5 所示。由图 5 可知，随着负压的增加，烧结矿中 Zn、K 及 Na 元素的脱除率呈现下降趋势，其主要原因是随着烧结负压增加，烧结温度下降和烧结时间缩短，不利于有害元素的还原和脱除。



1—Zn；2—K；3—Na。

图 5 不同烧结负压条件下 Zn、K 及 Na 脱除率

Fig. 5 Removal rate of Zn, K and Na under different sintering negative pressure

3 结 论

（1）布袋灰制备成小球配加到烧结料中对烧结矿的成品率和转鼓指数的影响规律为先增大而后减小，在布袋灰小球配加量为 4% 时，各项指标最好，Zn、K 及 Na 元素的脱除率也达到最大值，分别为 66.29%、47.03% 和 28.57%。

（2）布袋灰小球布料位置对 Zn 元素的脱除率有明显的影响，将 Zn 含量高的布袋灰小球布置到烧结料层的下部有利于烧结矿中 Zn 元素的脱除。布袋灰小球配炭量和碱度变化对有害元素脱除率影响不明显，烧结负压的增加不利于有害元素的脱除。

（3）高炉布袋灰小球用于烧结的适宜工艺参数：布袋灰小球碱度为 1.93，尺寸为 3.8 mm，小球配比为 4%，距离炉箅子 100 mm，烧结负压为 10 kPa。

参考文献：

[1] 李建军,邵雁,熊劲,等. 烧结工序节能减排技术研究综述[J]. 烧结球团,2022,47(5):95 – 100.
LI Jianjun, SHAO Yan, XIONG Jin, et al. Research review on energy saving and emission reduction technology in sintering process[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(5):95 – 100.

[2] 刘然,张智峰,刘小杰,等. 低碳绿色炼铁技术发展动态及展望[J]. 钢铁,2022,57(5):1 – 10.
LIU Ran, ZHANG Zhifeng, LIU Xiaojie, et al. Development trend and prospect of low – carbon green ironmaking technology[J]. Iron and Steel,2022,57(5):1 – 10.

[3] 段毅,包向军,徐俊超,等. 不同级数电场除尘灰的理化特性分析[J]. 烧结球团,2022,47(2):96 – 100.
DUAN Yi,BAO Xiangjun,XU Junchao,et al. Analysis on physicochemical properties of sintered electric field fly ash with different stages[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(2):96 – 100.

[4] 尚海霞,李海铭,魏汝飞,等. 钢铁尘泥的利用技术现状及展望[J]. 钢铁,2019,54(3):9 – 17.
SHANG Haixia, LI Haiming, WEI Rufei, et al. Present situation and prospect of iron and steel dust and sludge utilization technology[J]. Iron and Steel,2019,54(3):9 – 17.

[5] 刘超,张玉柱,王峰,等. 多源冶金粉尘资源化研究现状及展望[J]. 中国冶金,2022,32(10):38 – 44.
LIU Chao,ZHANG Yuzhu,WANG Feng,et al. Research status and prospect of muti – source metallurgical dust recycling[J]. China Metallurgy,2022,32(10):38 – 44.

[6] 王刚,徐坤,王广伟,等. 高炉喷吹煤配加供料系统除尘灰可行性分析[J]. 中国冶金,2022,32(11):88 – 96.
WANG Gang, XU Kun, WANG Guangwei, et al. Feasibility analysis on adding bag dust of material feeding system to coal injected into blast furnace[J]. China Metallurgy,2022,32(11):88 – 96.

[7] 杨春善,任明欣. 日照钢铁固废尘泥处理实践[J]. 钢铁,2019,54(4):83 – 91.
YANG Chunshan, REN Mingxin. Practice of waste dust mud treatment in Rizhao Steel[J]. Iron and Steel,2019,54(4):83 – 91.

[8] 王广伟,刘嘉雯,李仁国,等. 回转窑处理固体废弃物的研究进展[J]. 中国冶金,2023,33(10):7 – 16.
WANG Guangwei, LIU Jiawen, LI Renguo, et al. Research progress of solid waste treatment in rotary kilns[J]. China Metallurgy,2023,33(10):7 – 16.

[9] 马贵生,夏秋雨,张树华,等. 钢厂高炉 Zn 负荷控制与含铁尘泥利用研究[J],烧结球团,2020,45(5):77 – 82.

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.