

不同原料配比烧结混合料与制粒参数的适应性优化

王 伟, 袁亚强, 韦润培, 陈富松, 康宏毅, 左海滨
(北京科技大学 绿色低碳钢铁冶金全国重点实验室 北京 100083)

摘要: 为应对烧结原料配料多样性所带来的复杂挑战, 明确不同原料配比下如何通过对制粒参数的调节达到最佳的制粒效果至关重要。本文采用一系列制粒试验, 研究了不同制粒水分、制粒时间以及混合料碱度等参数对制粒效果的影响, 并通过负压、流速、平均粒径和透气性指数等关键性参数对制粒效果进行了综合评价。结果表明, 在恒定制粒水分下, 延长制粒时间对含有较高比例黏附性粉末及高碱度配料方案的制粒效果提升显著; 在相同制粒时间下, 适当增加制粒水分能普遍提高烧结混合料制粒效果, 尤其对含强亲水性矿粉较高的原料配比方案及低碱度原料配比方案效果显著, 而对高碱度原料配比方案改善的趋势最为明显。

关键词: 制粒参数; 制粒水分; 制粒时间; 原料配比; 透气性

中图分类号: TF046.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)01-0045-09

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.01.006

Adaptability optimization of sintering mixtures and granulation parameters with different raw material ratios

WANG Wei, YUAN Yaqiang, WEI Runpei, CHEN Fusong, KANG Hongyi, ZUO Haibin
(State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to cope with the complex challenges brought about by the diversity of sintering raw materials, it is important to clarify how to achieve the best granulation effect by adjusting the granulation parameters under different raw material ratios. A series of granulation tests are used to study the effects of different granulation moisture, granulation time and alkalinity of the mixture on the granulation effect, and the granulation effect is comprehensively evaluated by key parameters such as negative pressure, flow rate, average particle size and air permeability index. The results show that the granulation effect of the batching scheme containing a higher proportion of adhesive powder and high alkalinity is significantly improved by extending the granulation time under constant granulation moisture. Under the same granulation time, the appropriate increase of granulation moisture can generally improve the granulation effect of sintering mixture, especially for the raw material ratio scheme with high hydrophilic mineral powder and the raw material ratio scheme with low alkalinity, and the improvement trend of the raw material ratio scheme with high alkalinity is the most obvious.

Key words: granulation parameters; granulation moisture; granulation time; raw material ratio; air permeability

2023年全球粗钢产量为18.88亿t^[1], 中国粗钢产量超过10亿t, 且90%以上由高炉—转炉长流程生产^[2]。中国高炉炼铁的主要原料是烧结矿, 其在炉料结构中占比高达70%~85%^[3-4], 提高烧

结矿的质量和生产效率对于炼铁工序的降本增效至关重要。制粒是烧结生产的前序环节, 该环节将铁矿粉、燃料、熔剂, 以及返矿等烧结原料在水润湿和机械外力作用下进行造粒长大, 形成烧

收稿日期: 2024-08-08; 修回日期: 2024-09-21

基金项目: 中国宝武低碳冶金创新基金资助项目(BWLCF202104)

作者简介: 王 伟(1999—), 男, 硕士研究生, 从事低碳冶金工艺研究。

通信作者: 左海滨(1976—), 男, 博士, 教授, 从事低碳冶金工艺理论及劣质煤炭资源高值化利用研究。

结准颗粒,制粒效果主要受原料特性、制粒水分以及制粒时间等的影响^[5-6],准颗粒的粒度分布直接决定烧结料层的初始透气性,从而影响烧结速度,而混合料中化学成分和燃料分布的均匀性则会影响烧结矿质量^[7-9],因此制粒过程对于整个烧结工序极其关键。水分对原料的制粒和烧结效果有着举足轻重的影响。在制粒阶段,适量的雾化水滴会在混合料表面形成液膜,通过液桥作用使颗粒紧密结合,水分过多或过少都会影响烧结料层的透气性^[10]。MAEDA 等^[5]认为在使用低润湿性铁矿石对核颗粒进行处理时,必须提高水添加量,以改善细颗粒的造粒效果;刘周利等^[11]通过调整水的添加方式,促进了物料的润湿,制粒效果从 10.46% 提高至 34.02%,混合料平均粒径提高 0.65 mm;郗亚娜等^[12]研究了水分对富矿粉制粒的影响机制,当混合料水分超过 8.05% 后,料层的透气性指数和孔隙率的增加幅度减慢,料层的热气流冲击会导致制粒小球破损。周密等^[13]研究表明,适当延长混合料制粒时间,烧结各项指标均呈增加趋势。张思平等^[14]研究发现制粒时间过短时,混合料来不及聚集长大,造成制粒效果差;当制粒时间过长时,生产效率会下降,同时小球容易破坏。朱德庆等^[15]研究了采用圆筒制粒时制粒时间对制粒效果的影响。结果表明,随着制粒时间的增加,准颗粒中大于 3 mm 粒级占比、颗粒强度以及料层透气性指数均随之增加。

因此,为了优化烧结料层的透气性,亟需针对不同原料配比的烧结混合料,合理设定制粒参数来提升烧结料层的透气性,有效减少固体燃料的消耗,显著提高烧结矿的产量与质量。本研究深入探究了 3 种不同矿粉配比以及 3 种不同碱度的原料配比方案在不同制粒水分与制粒时间下的制粒效果,并通过负压、流速、平均粒径和透气

性指数等关键性参数对制粒效果进行了综合评价,旨在确定各种原料配比方案下的最优制粒条件,为不同原料配比混合料制粒条件的调整提供技术指导 and 参考依据。

1 试验原料和方法

1.1 烧结原料基础特性

铁矿粉粒度分布及表面特性是影响其制粒性能的主要因素^[6]。本研究使用的原料为国内某大型钢铁厂烧结生产常用的 5 种铁矿粉,包括 1 种巴西矿(矿 A)和 3 种澳洲矿(矿 B、矿 C、矿 D)以及 1 种国产矿(矿 E)。铁矿粉的外观形貌如图 1 所示,化学成分、烧损和含水量列于表 1。



(a) 矿 A; (b) 矿 B; (c) 矿 C; (d) 矿 D; (e) 矿 E

图 1 铁矿粉的外观形貌

Fig. 1 Appearance of iron ore powder

结合图 1 与表 1 可知:矿 D 属于褐铁矿,表面较为粗糙,亲水性较强;矿 C 含有部分褐铁矿,亲水性居中;矿 A 和矿 B 为赤铁矿粉,亲水性较弱^[16-17];矿 A 的初始含水量最低,矿 B、矿 C 和矿 D 三者的初始含水量相近且位于中等水平,矿 E 为磁精粉,初始含水量最高。

试验中使用的熔剂和焦粉根据相关的国家标准进行了检测,检测结果分别见表 2 及表 3。

表 1 铁矿粉主要化学成分、烧损与含水量(质量分数)

Table 1 Main chemical composition, moisture content and losses on ignition of iron ore powder

%

铁矿粉	TFe	FeO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	S	P	Na	烧损	含水量
矿 A	62.73	0.33	0.02	4.85	1.55	0.02	0.12	0.02	0.07	0.04	3.2	2.25
矿 B	62.78	0.31	0.09	4.32	2.31	0.07	0.11	0.01	0.09	0.07	3.5	5.00
矿 C	61.64	1.18	0.07	3.73	2.33	0.01	0.10	0.02	0.09	0.07	5.7	5.00
矿 D	56.33	1.16	0.01	6.08	3.25	0.01	0.22	0.01	0.05	0.12	10.0	4.67
矿 E	64.21	26.00	0.49	7.24	0.39	0.01	0.06	0.61	0.02	0.02	0.8	7.50

表2 熔剂主要化学成分及烧损(质量分数)

Table 2 Main chemical composition and losses on ignition of flux

%

熔剂	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	Na	K	Zn	烧损
生石灰	76.20	2.71	0.54	6.67	0.073	—	—	—	12
石灰石	50.23	2.62	0.51	2.41	0.198	—	0.074	0.006	42
白云石	29.79	3.05	1.12	20.71	0.173	0.022	0.066	—	44

表3 焦粉工业分析

Table 3 Industrial analysis of coke powder

质量分数/%					热值/
挥发分	水分	灰分	固定碳	硫含量	(MJ·kg ⁻¹)
2.53	3.68	15.90	77.89	2.13	26.44

烧结混合料由多个粒级的原料组成,按照粒度大小可以将混合料中的颗粒分为核颗粒、中间颗粒和黏附粉。在制粒过程中,核颗粒居于小球中心,黏附粉以物理作用吸附在核颗粒表面,随着黏附粉的增加,制粒小球粒度和体积变大^[18-19]。通常核颗粒与黏附粉的粒度划分没有严格的界线,随原料的粒度分布不同而有所差异,当原料粒度普遍较大时,核颗粒的粒度也会随之变大。一般情况下,<0.5 mm的粉末大多为黏附粉。按照GB/T 10322.7—2016的检测方法获得了5种铁矿粉的初始粒度分布,结果如表4所示。

由表4可知,几种富矿粉的粒度较粗,粒度>5 mm质量分数较高,大粒度物料在烧结过程

中不易烧透,对烧结成矿不利。矿B中粒度<0.5 mm质量分数最高,为43.50%,其次为矿A与矿C,矿D中粒度<0.5 mm粒级质量分数较低。矿E为磁精粉,粒度<0.5 mm,可用于调节混合料中<0.5 mm粒级质量分数。

1.2 试验方案及表征方法

本文根据烧结原料的化学成分及烧结矿的成分要求,设计了5种原料配比方案,如表5所示。通过不同的矿粉配比和不同的碱度调配,获得了不同的原料特性。方案1~3是在相同的碱度条件下,降低矿A比例,同时调整矿B和矿C配比,以确保混匀矿占物料质量分数的60%;方案4和5则是在方案1的基础上通过改变烧结配料中生石灰和石灰石的比例控制碱度;所有方案中返矿的质量分数为16%,熔剂总量的质量分数为17%,其中白云石质量分数为6%,焦粉质量分数为4%。此外,烧结原料中还配加了质量分数为3%的除尘灰,它不仅能够为烧结过程提供部分热量,

表4 铁矿粉粒径分布(质量分数)

Table 4 Particle size distribution of iron ore powder

%

种类	>8.0 mm	(5.0 8.0] mm	(3.0 5.0) mm	(1.0 3.0] mm	[0.5 1.0] mm	<0.5 mm
矿A	13.21	10.75	5.11	18.98	10.89	41.07
矿B	11.07	13.63	6.36	16.72	8.73	43.50
矿C	10.64	14.24	6.48	17.69	11.82	39.14
矿D	13.40	16.56	7.73	23.21	20.30	18.80
矿E	—	—	—	—	—	100.00

表5 原料配比方案及碱度

Table 5 Ore blending scheme and alkalinity

编号	质量分数/%											碱度
	A	B	C	D	E	生石灰	石灰石	白云石	除尘灰	返矿	焦粉	
方案1	18	9	12	15	6	5	6	6	3	16	4	2.0
方案2	9	14	16	15	6							
方案3	0	18	21	15	6							
方案4	18	9	12	15	6	7	4					2.2
方案5						3	8					1.8

降低固体燃料消耗和污染物排放,还可以回收利用粉尘中的铁元素。

烧结混合料制粒试验: 根据表 5 中配料方案将铁矿粉、熔剂、焦粉、返矿等烧结原料按质量配比配料后,经一混(人工)混匀、加水,二混在滚筒中完成混合料的混匀制粒。方案 1~方案 5 共进行了包含 5 个制粒水分(6.0%、6.5%、7.0%、7.5%、8.0%)和 3 个制粒时间(5、10、15 min)的混合料制粒试验。首先,试验固定制粒水分质量分数为 8%,探究不同制粒时间对制粒效果的影响;然后,在制粒时间固定为 10 min 的条件下,进一步研究不同制粒水分对制粒效果的影响。

制粒效果检测方法: 按照原料配比方案将铁矿粉、熔剂、燃料进行混合,添加不同配比的水后,手动混合 10 min,然后装入圆筒混合机进行混合,达到设定的混合时间后,称取 20 kg 混合料和 2.5 kg 铺底料,将铺底料和混合料先后均匀的布到烧结杯体中压实铺平,在固定风机功率为 11 Hz 抽风制度下连续测量料层负压和管道风速,待稳定后记录参数,试验流程如图 2 所示。

利用烧结生产中常用的 E. W. Voice 基本公式^[20-21]计算料层的透气性指数(S_{PI}),具体公式见式(1)。

$$S_{PI} = \frac{Q}{A} \cdot \left(\frac{H}{\Delta p}\right)^{0.6} \quad (1)$$

式中: Q 为风量, m^3/h , 它是由检测的管道风速(v , m^3/h)和截面积($A_c = 0.005 m^2$)计算求得的($Q = v \cdot A_c$); A 为抽风面积, m^2 , 本试验中该值为 $0.038 m^2$; H 为料层高度, m , 由于各组试验均采用等质量的原料,因此料层高度基本相同,均为 $0.32 m$; Δp 为抽风负压, kPa ; S_{PI} 为透气性指数,计量单位为 $J. P. U$ 。

透气性指数检测完成后将混合料倒出,分别

用 0.5、1.0、3.0、5.0、8.0 mm 的标准筛筛分后称重,将每种粒径的重量折算成质量分数,从而得到混合料的粒度分布进而计算出混合料的 $> 3 mm$ 颗粒的质量分数和平均粒径。

2 不同原料配比方案在不同制粒时间下的制粒效果

2.1 不同矿粉配比混合料在不同制粒时间下的制粒效果

制粒时间(混合料润湿后放入混料机的滚动时间)是影响烧结原料制粒效果的重要参数之一。制粒时间过短会导致原料未充分混匀,颗粒大小分布不均;制粒时间过长会导致部分颗粒的破碎,还会影响生产的效率。本文在制粒水分质量分数为 8.0% 条件下,通过不同矿粉配比混合料在不同制粒时间下制粒效果的对比,来探究制粒时间对不同矿粉配比制粒效果的影响,不同矿粉配比方案混合料在不同制粒时间下的评价指标如图 3 所示。

由图 3(a)和 3(b)可知,随着制粒时间从 5 min 增至 15 min,各方案料层负压下降,气体流速上升,其中方案 1 变化最大,方案 3 最小。由图 3(c)和 3(d)可知,方案 1 中粒径 $> 3 mm$ 的质量分数提升 19.63%,远高于方案 2 的 13.96% 和方案 3 的 4.12%;平均粒径增长方面,方案 1 增加 0.89 mm,显著高于方案 2 的 0.40 mm 和方案 3 的 0.21 mm。利用 S_{PI} 评价制粒效果,如图 3(e)和 3(f)所示,方案 1 的 S_{PI} 值提升 226.86 $J. P. U$,远超方案 2 的 123.85 $J. P. U$ 和方案 3 的 22.87 $J. P. U$,且增长趋势与 $> 3 mm$ 粒径质量分数变化一致,验证了不同矿粉配比烧结混合料的粒度分布与料层透气性指数的相互对应关系。

综上所述,在保持制粒水分不变的情况下,增



图 2 制粒试验流程

Fig. 2 Flow chart of granulation test

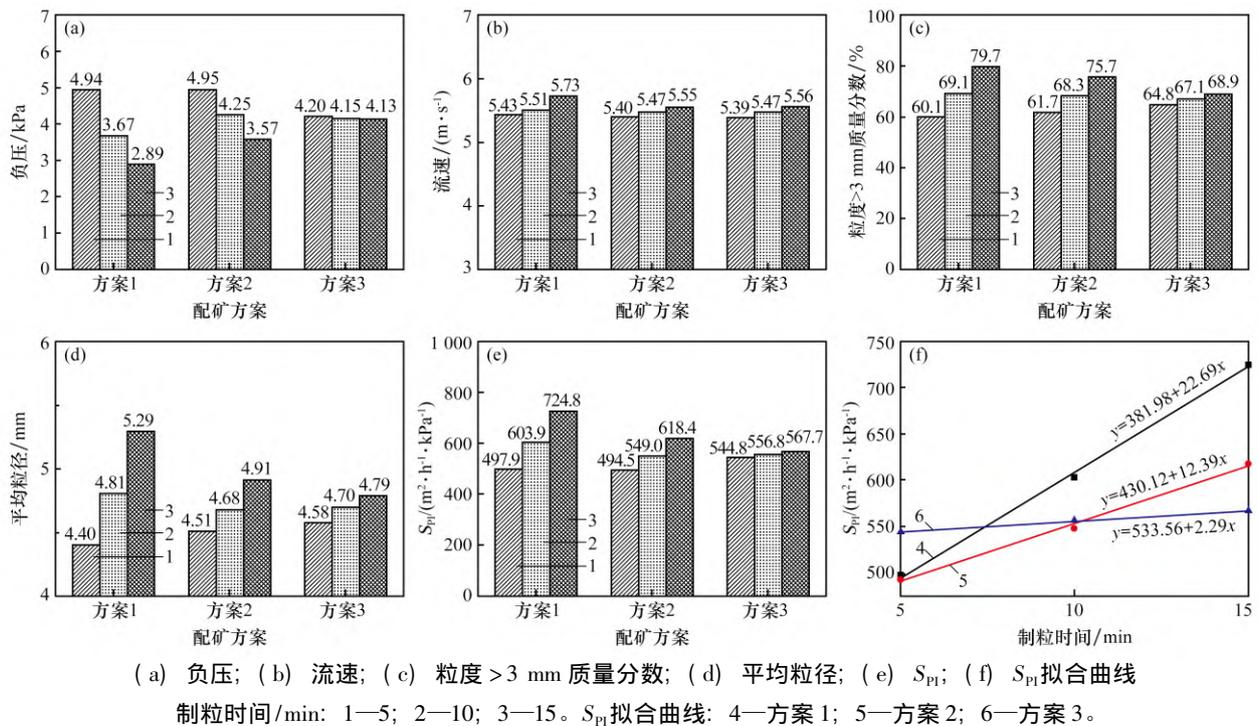


图3 不同矿粉配比混合料在不同制粒时间下的评价指标

Fig. 3 Evaluation indexes of the mixture of different ore blending schemes under different granulation time

加制粒时间对三种原料配比方案的制粒效果均有正面影响,尤其是对方案1的改善尤为突出。这是因为方案1中有更高比例<0.5 mm黏附性粉末。随着制粒时间的延长,更多黏附性粉末能够附着于颗粒表面,不仅增大了混合料的平均粒径,还优化了粒度分布,进而改善了料层的透气性。相比之下,方案3中<0.5 mm黏附性粉末含量较少。因此,即使制粒时间延长,其制粒效果的改善也不甚显著。由此可见,对于含有较高比例<0.5 mm黏附性粉末的原料配比方案,延长制粒时间能带来显著提升;而对于此类粉末含量较低的方案,延长制粒时间的效果则相对有限。

2.2 不同碱度混合料在不同制粒时间下的制粒效果

适当的制粒时间有助于让未充分消化的生石灰在制粒阶段得到改善,以防止未消化的生石灰与水、空气中 CO_2 等反应导致体积膨胀,破坏混合料的准颗粒结构。图4为不同碱度的混合料在不同制粒时间下的评价指标。

由图4(a)~4(d)可知,随着烧结混合料制粒时间增加,料层负压降低,气体流速增大。方案1混合料粒径>3 mm质量分数和平均粒径提升显著,分别为19.63%和0.89 mm,高于方案4和5,

但后两者这两项指标原本就较高,>3 mm质量分数高于70%且平均粒径>5 mm。由图4(e)和(f)可知,随着制粒时间的延长,方案5的 S_{PI} 提升幅度最小为87.78 J. P. U,但始终都保持在800 J. P. U以上,高于方案1和4。方案4的 S_{PI} 值因加水量多而略高于方案1,两者增长趋势明显。尽管方案5提升幅度小,其初始和最终 S_{PI} 值均较高;方案4和1的 S_{PI} 值增长更为显著。

由以上分析可知,在保持制粒水分一致的情况下,延长制粒时间对同碱度水平的混合料制粒效果均有正面影响。具体而言,对于碱度较高的方案4和方案1的混合料,制粒效果的改善尤为显著;而对于碱度较低的方案5混合料,其改善幅度则相对较小。通过对比不同碱度原料配比方案的表现可知,在相同的制粒水分条件下,增加生石灰配比以提升混合料碱度会导致制粒效果恶化。然而,通过延长制粒时间,可以明显改善混合料的制粒效果。这主要是因为随着生石灰添加量的增多,未消化的生石灰数量增加,进而破坏了准颗粒结构,使得制粒效果下降。而延长制粒时间则有助于减少未消化的生石灰量,从而优化了制粒效果。因此,针对目前烧结所使用高碱度

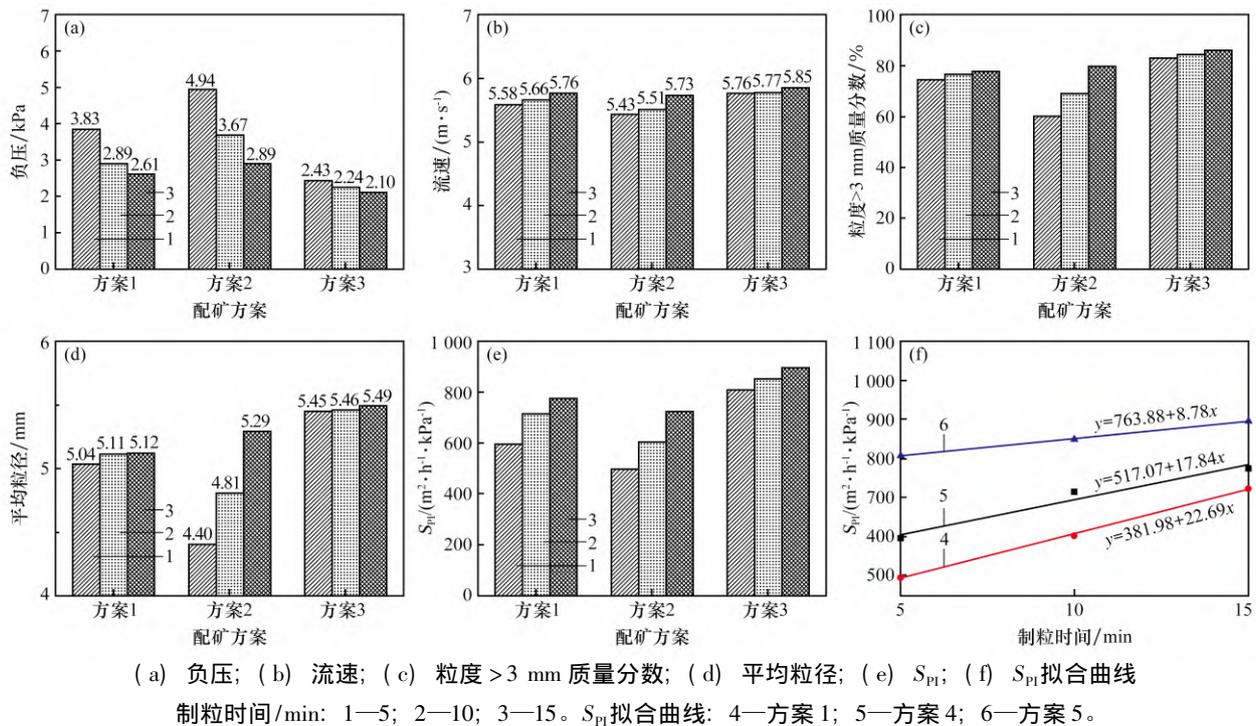


图 4 不同碱度的烧结混合料在不同制粒时间下的评价指标

Fig. 4 Evaluation indexes of sintering mixtures with different alkalinity under different mixing time

的混合料,应考虑通过增加制粒时间来进一步提升其制粒效果。

3 不同原料配比方案在不同制粒水分下的制粒效果

3.1 不同矿粉配比混合料在不同制粒水分下的制粒效果

水分对烧结原料制粒及烧结过程至关重要。当水分不足时,混合料中的小颗粒难以有效聚结长大,导致料层透气性下降。但是当水分过量时,混合料会聚结形成较大的畸形团聚体,并且水分被挤压至准颗粒表面形成“过湿”现象,导致透气性降低^[9]。本文在制粒时间为 10 min 条件下,研究了不同制粒水分对不同矿粉配比混合料制粒效果的影响,结果见图 5。

由图 5(a)~5(d)可知,随着制粒水分从 6.0% 增至 8.0%: 烧结料层负压降低,气体流速增大,方案 2 变化较小,方案 1 和 3 在 6.5%~7.0% 水分时改善显著,且方案 3 变化最大。方案 1~3 混合料中 > 3 mm 颗粒质量分数均从约 50% 增至 60% 以上,分别提升了 10.99%、11.89% 和 14.8%,方案 3 提升最大;方案 1~3 混合料的平

均粒径也增大了 0.7 mm 以上,方案 3 > 3 mm 颗粒质量分数和平均粒径均明显大于方案 2,方案 1 最小。由图 5(e)可知, S_{PI} 值随制粒水分的提高而增大,方案 2 在 6.0%~7.5% 水分时,其 S_{PI} 值最高,7.5% 时达 422.06 J. P. U; 方案 3 在 8.0% 水分时, S_{PI} 值最大,为 544.78 J. P. U,高于方案 1 的 497.90 J. P. U 和方案 2 的 494.55 J. P. U。结合图 5(f) 拟合曲线,方案 1 和 3 的 S_{PI} 值增长趋势明显大于方案 2。

试验结果表明,在固定制粒时间条件下,增加制粒水分能普遍提升各方案的制粒成效。这一提升主要归因于水分增加提高了矿粉颗粒间的黏结力,增大了烧结混合料的粒度,进而优化了料层的初始透气性;针对不同配比方案,提高制粒水分对方案 3 制粒效果改善最为突出,这是因为方案 1 和方案 2 中矿 A 含量较高,而矿 A 为赤铁矿,其亲水性相对较弱。值得注意的是,方案 2 在制粒水分位于 6.0%~7.5% 区间时, S_{PI} 值达到最大,这与其相对较低的矿 A 含量有关。对于不含矿 A 的方案 3,其制粒效果在水分增加后表现出显著的改善。因此,提高制粒水分对于亲水性较强的矿粉配比方案有着明显的正面效应,而适

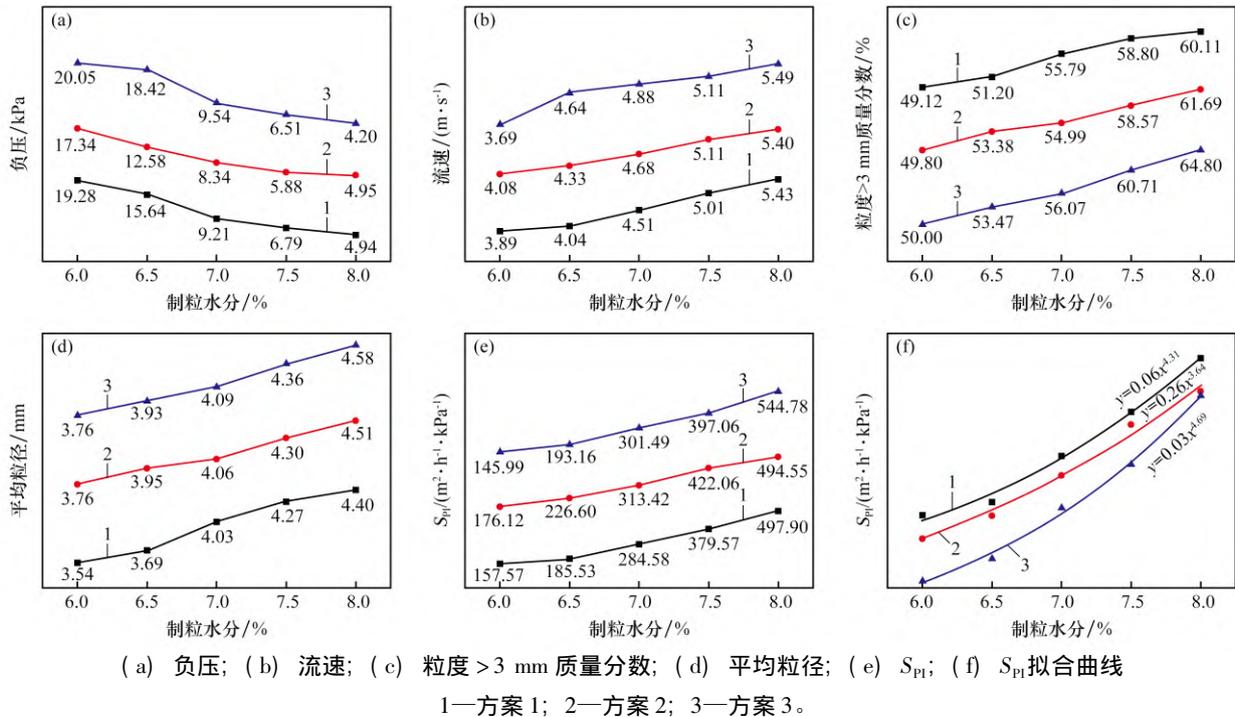


图5 不同矿粉配比方案的烧结混合料在不同制粒水分下的评价指标

Fig. 5 Evaluation indexes of sintering mixture with different ore blending scheme under different water addition amount

量添加亲水性较弱的矿粉制粒效果也相当。然而,当亲水性弱的矿粉比例过高时,增加制粒水分对制粒效果的提升作用则不再显著。

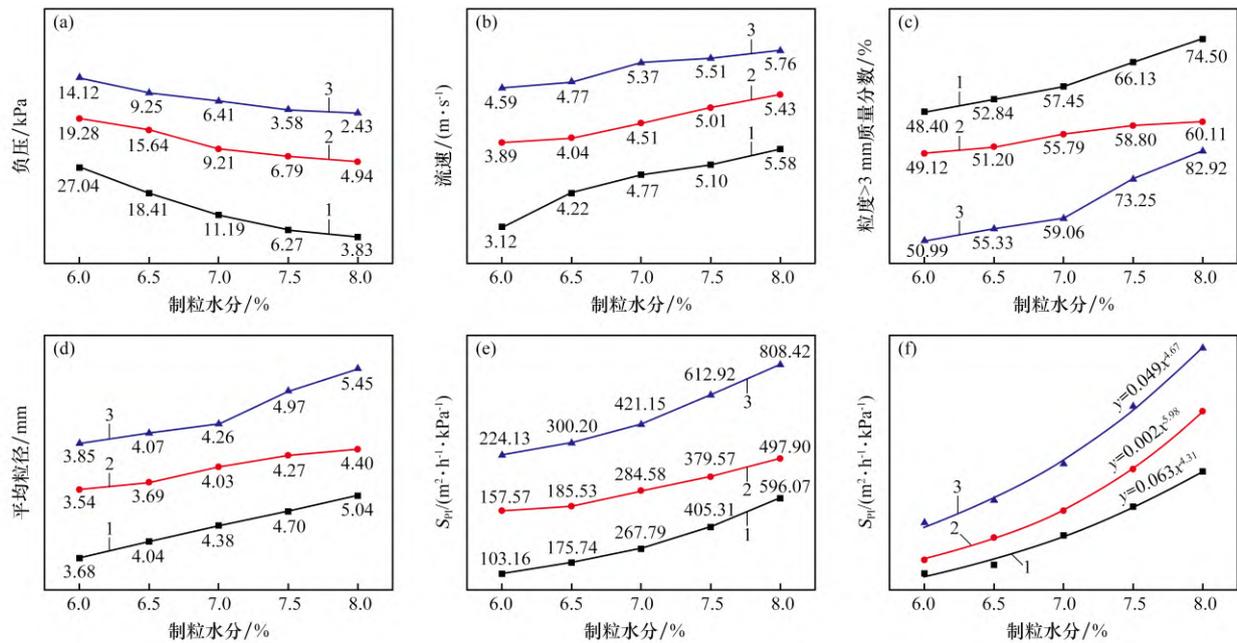
3.2 不同碱度混合料在不同制粒水分下的制粒效果

碱度的调节主要依赖于调整生石灰的添加量。生石灰对制粒过程的影响核心在于其消化反应,即游离态的CaO与水反应生成Ca(OH)₂。此过程中,生石灰会吸收铁矿粉中的水分,进而影响制粒效果。只有当制粒水分达到并满足生石灰的湿容量需求,从而有效抵消生石灰吸水对制粒造成的不利影响时,制粒效果才能得到显著改善。图6为不同碱度的烧结混合料在不同制粒水分下的评价指标。

由图6(a)~6(d)可知,随着制粒水分的增加,在3种不同碱度的原料配比方案中,方案4的负压降幅和流速增幅最为显著,但方案5在不同水分条件下表现出最小的负压和最快的流速,同时其粒径大于3 mm的质量分数和平均粒径均明显优于其他方案,尤其在制粒水分为8.0%时,方案5的制粒效果最佳,粒径>3 mm质量分数高达82.92%,平均粒径达到5.45 mm。结合图6(e)和6(f)可知, S_{PI} 值也随制粒水分的提高而逐渐增大,

其中方案5的 S_{PI} 值最高,达到808.42 J·P·U,而方案4虽然在低水分时 S_{PI} 值较低,但随着水分增加,其 S_{PI} 值提升显著,增长趋势最为明显。

因此,在恒定的制粒时间条件下,增加制粒水分含量能显著提升同碱度的制粒效果。针对不同碱度的方案而言,相较于其他方案,随制粒水分的增加,水分与碱度均较低的方案5展现出最为显著的制粒效果增强。而对于碱度较高的方案4,其制粒效果的改善趋势则最为突出。这是因为在制粒过程中,生石灰会与添加的水分发生消化反应,生成的Ca(OH)₂颗粒的比表面积较大,呈胶体粒子状态存在,黏结性能较好,在制粒过程中均匀分布在混合料中,可以促进混合料的制粒。但混合料中如有未消化的生石灰继续消化,放出大量热量使得原料表面的水分蒸发,将导致混合料颗粒爆裂或不正常的膨胀现象,破坏原有的烧结准颗粒结构。在未采取措施加强生石灰消化的前提下,只提高碱度会在制粒过程中影响烧结原料成球,降低混合料的粒度,进而恶化料层透气性。因此,实际生产中应在添加适量制粒水分的基础上提前消化生石灰再用于烧结配料。



(a) 负压; (b) 流速; (c) 粒度 > 3 mm 质量分数; (d) 平均粒径; (e) S_{PI}; (f) S_{PI}拟合曲线
1—方案4; 2—方案1; 3—方案5。

图 6 不同碱度的烧结混合料在不同制粒水分下的评价指标

Fig. 6 Evaluation indexes of sintering mixture with different alkalinity under different water content

4 结 论

(1) 恒定制粒水分条件下, 对同一矿粉配比混合料, 延长制粒时间让混合料充分接触, 小颗粒成长为大颗粒, 透气性得到改善; 进一步分析不同矿粉配比混合料的制粒效果, 制粒时间的增加对含高比例黏附性粉末的原料配比方案的制粒效果尤为显著, 在负压、流速、平均粒径以及透气性指数等关键性评价指标上, 均优于其它配料方案。此外, 对不同碱度的混合料而言, 延长制粒时间对于高碱度原料配比方案的制粒效果具有明显的促进作用。

(2) 恒定制粒时间条件下, 增加制粒水分, 水在颗粒间形成的黏结力, 不仅促进了混合料粒度的增大, 还优化了料层的透气性; 对不含亲水性较弱矿粉的配料方案, 其制粒效果评价指标优于含有此类矿粉的配料方案; 同时, 适量掺入亲水性较弱的矿粉亦能展现出良好的制粒效果, 当亲水性弱矿粉的比例过高时, 增加制粒水分对制粒效果的提升则相对有限。

(3) 恒定制粒时间条件下, 水与游离的 CaO 反应生成高比表面积的 Ca(OH)₂, 利于混合料制

粒; 低碱度配料方案在制粒水分增加条件下, 其制粒效果的增强最为显著; 而高碱度配料方案虽展现出较大的改善趋势, 但其中未充分消化的生石灰会导致混合料颗粒破碎, 进而恶化料层的透气性。因此, 实际生产中应在添加适量制粒水分的基础上, 生石灰提前消化后再用于烧结混合料制粒。

参考文献:

- [1] 刘军 王泽培 曹志众 等. 钢渣在碳捕集领域的研究进展[J]. 烧结球团 2024 49(6): 11-20.
LIU Jun, WANG Zepei, CAO Zhizhong, et al. Research progress of steel slag in carbon capture [J]. Sintering and Pelletizing 2024 49(6): 11-20.
- [2] ZHU L Y, HE F. A multi-stage malmquist-luenberger index to measure environmental productivity in China's iron and steel industry [J]. Applied Mathematical Modelling 2022, 103: 162-175.
- [3] 邓睿 苏鸿 韩基祥 等. 高球比炉料结构下镁质球团的冶金性能研究[J]. 烧结球团 2020 45(2): 31-35.
DENG Rui, SU Hong, HAN Jixiang, et al. Study on metallurgical properties of magnesium pellet under the burden structure of high pellet ratio [J]. Sintering and Pelletizing 2020 45(2): 31-35.

- [4] 张国成,罗果萍,宋巍,等. 不同类型进口铁矿粉的烧结基础性能分析[J]. 烧结球团, 2021, 46(4): 7-13.
ZHANG Guocheng, LUO Guoping, SONG Wei, et al. Analysis on basic sintering properties of different types of imported iron ore powder [J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(4): 7-13.
- [5] MAEDA T, FUKUMOTO C, MATSUMURA T, et al. Effect of adding moisture and wettability on granulation of iron ore [J]. ISIJ International, 2005, 45(4): 477-484.
- [6] 吴胜利,王跃飞,朱娟. 铁矿粉颗粒特性对其烧结制粒性的影响[J]. 钢铁, 2015, 50(5): 19-25.
WU Shengli, WANG Yuefei, ZHU Juan. Influence of particle characteristics on the granulation of iron ores in sintering process [J]. Iron & Steel, 2015, 50(5): 19-25.
- [7] FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ D, RUIZ-BUSTINZA I, MOCHÓN J, et al. Iron ore sintering: Raw materials and granulation [J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2017, 38(1): 36-46.
- [8] IVESON S M, LITSTER J D, HAPGOOD K, et al. Nucleation, growth and breakage phenomena in agitated wet granulation processes: A review [J]. Powder Technology, 2001, 117(1/2): 3-39.
- [9] 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.
- [10] 黄小波. 铁矿粉制粒过程颗粒粒径演变规律与工艺优化[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
HUANG Xiaobo. Evolution of particle size grading and process optimization in granulation of iron ore fines [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [11] 刘周利,张娜,梁海全,等. 500 m² 烧结机强化混匀技术研究与应用[J]. 烧结球团, 2024, 49(3): 33-39.
LIU Zhouli, ZHANG Na, LIANG Haiquan, et al. Research and application of enhanced mixing technology of 500 m² sintering machine [J]. Sintering and Pelletizing, 2024, 49(3): 33-39.
- [12] 郗亚娜,王相龙,蒋孟欣,等. 水分对富矿粉烧结制粒的影响机制[J]. 钢铁研究学报, 2023, 35(5): 532-540.
QIE Yana, WANG Xianglong, JIANG Mengxin, et al. Influence mechanism of moisture on sintering granulation of ore-rich powder [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2023, 35(5): 532-540.
- [13] 周密,杨松陶,姜涛,等. 强化制粒对含铬型钒钛混合料烧结的影响[J]. 钢铁, 2015, 50(3): 39-43.
ZHOU Mi, YANG Songtao, JIANG Tao, et al. Effect of enhanced granulation on Cr-bearing vanadium and titanium magnetite sintering [J]. Iron & Steel, 2015, 50(3): 39-43.
- [14] 张思平,王兆才,胡梦杰,等. 强化红土镍矿烧结料层透气性工艺研究[J]. 烧结球团, 2022, 47(2): 52-60.
ZHANG Siping, WANG Zhaocai, HU Mengjie, et al. Research on technology of strengthening permeability of laterites sinter bed [J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(2): 52-60.
- [15] 朱德庆,王志远,潘建,等. 巴西某镜铁精粉的烧结特性及强化工艺[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2006, 37(5): 878-883.
ZHU Deqing, WANG Zhiyuan, PAN Jian, et al. Sintering behaviors of Brazilian hematite concentrate and its improvements [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2006, 37(5): 878-883.
- [16] 刘在春. 高配比超细铁精粉球团制备实验研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2020.
LIU Zaichun. Experimental study on preparation of ultra-fine iron concentrate pellets with high ratio [D]. Ma'anshan: Anhui University of Technology, 2020.
- [17] 唐珏,王茗玉,储满生,等. 国内外烧结优化配矿研究进展[J]. 钢铁, 2024, 59(9): 102-113.
TANG Jue, WANG Mingyu, CHU Mansheng, et al. Process of ore blending optimization in sintering at home and abroad [J]. Iron & Steel, 2024, 59(9): 102-113.
- [18] DAI F L, FAN X H, HUANG X X, et al. Prediction of suitable water content in granulation of sintering mixture based on Litster's model [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2024, 31(3): 552-560.
- [19] 周卫,朱德庆,杨聪聪,等. 高配比磁铁精粉制粒和烧结性能优化[J]. 烧结球团, 2024, 49(1): 56-64.
ZHOU Wei, ZHU Deqing, YANG Congcong, et al. Optimization of granulation and sintering performance of high-ratio magnet concentrate [J]. Sintering and Pelletizing, 2024, 49(1): 56-64.

(下转第77页)

- pellets in No.7 BF of Anyang Steel[J]. China Metallurgy 2015 25(5):43-46.
- [18] 刘东辉, 王晓哲, 张建良, 等. 高炉护炉用含钛物料应用现状及调研分析[J]. 中国冶金, 2018, 28(2): 1-5.
- LIU Donghui, WANG Xiaozhe, ZHANG Jianliang, et al. Application status and investigation of titanium-containing materials in blast furnace protection process [J]. China Metallurgy 2018 28(2): 1-5.
- [19] 欧杨, 孙永升, 余建文, 等. 钒钛磁铁矿加工利用研究现状及发展趋势[J]. 钢铁研究学报, 2021, 33(4): 267-278.
- OU Yang, SUN Yongsheng, YU Jianwen, et al. Research status and development prospect of utilization of vanadium-titanium magnetite [J]. Journal of Iron and Steel Research 2021 33(4): 267-278.
- [20] 吴建, 周峰. 钛铁矿制备含钛球团试验研究[J]. 矿业工程, 2024, 22(2): 41-44.
- WU Jian, ZHOU Feng. Experimental study of preparation of titanium-containing pellets from ilmenite [J]. Mining Engineering 2024 22(2): 41-44.
- [21] 廖鑫. 钛铁矿氧化球团制备及其冶炼钛渣工艺研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.
- LIAO Xin. Preparation of ilmenite oxide pellets and research of titanium slags melting technology [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology 2019.
- [22] 罗杰, 郑魁, 黄云, 等. 氧气体积分数对钒钛磁铁矿球团氧化过程的影响[J]. 烧结球团, 2024, 49(4): 49-56.
- LUO Jie, ZHENG Kui, HUANG Yun, et al. Effect of oxygen volume fraction on the oxidation process of vanadium-titanium magnetite pellets [J]. Sinter and Pelletizing 2024 49(4): 49-56.
- [23] YANG A M, ZHUANSUN Y X. Prediction of compressive strength based on visualization of pellet microstructure data [J]. Journal of Iron and Steel Research International 2021 28(6): 651-660.
- [24] HAN Y, WANG L J, WANG W, et al. Improved SVM model for predicting pellet metallurgical properties based on textural characteristics [J]. Metals 2022 12: 1662.
-
- (上接第 53 页)
- [20] 范晓慧, 甘敏, 李文琦, 等. 烧结混合料适宜制粒水分的预测[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(4): 373-377.
- FAN Xiaohui, GAN Min, LI Wenqi, et al. Prediction of suitable water content on the granulation of a sintering mixture [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing 2012 34(4): 373-377.
- [21] 姜涛. 烧结球团生产技术手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2014.
- JIANG Tao. Technical manual for sintering and pelletizing production [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2014.