气体喷吹偏析布料技术研究与应用

肖俊军[1]，周康军[2]，聂慧远[2]
（1. 宝钢股份研究院梅钢技术中心，江苏 南京 210039；2. 上海梅山钢铁股份有限公司，江苏 南京 210039）

摘要：针对梅钢 5 号烧结机混合料布料偏析效果不佳导致固体燃料消耗增大的问题，本文设计实验室模拟布料装置并进行烧结杯试验，研究不同气体喷吹速度对混合料粒度和燃料分布的影响；开发烧结混合料气体喷吹装置进行工业应用试验，确定适宜的喷吹介质，分析气体喷吹对混合料温度、粒度和燃料分布的影响，以及对烧结技术指标改善的效果。试验结果表明：随着气体喷吹速度的提高，混合料粒度和燃料分布的偏析程度增加；采用 50 m/s 流速的气体喷吹混合料后进行烧结杯试验，烧结机利用系数提高 0.024 t/(m²·h)，烧结矿成品率提高 0.93 个百分点，固体燃料消耗降低 0.8 kg/t。工业应用结果表明：气体喷吹采用压缩空气为宜，喷吹后混合料温度降低 0.9 ~ 1.3 ℃，混合料的粒度偏析指数从 0.77%/m 提高至 1.66%/m，燃料偏析指数从 -0.156%/m 提高至 0.382%/m，烧结矿成品率提高 1.62 个百分点，燃料消耗降低 2.26 kg/t。气体喷吹偏析布料技术占用空间小、成本低，能够显著改善混合料的粒度和燃料分布，提高烧结矿的成品率。

关键词：烧结；混合料；偏析布料；偏析指数；粒度；燃料分布
中图分类号：TF046.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1000 - 8764(2024)05 - 0130 - 07
doi：10.13403/j.sjqt.2024.05.085

Research and application of gas injection segregation distribution technology

XIAO Junjun[1], ZHOU Kangjun[2], NIE Huiyuan[2]
(1. Meigang Technology Center of Baosteel Research Institute, Nanjing 210039, Jiangsu, China;
2. Shanghai Meishan Iron and Steel Co., Ltd., Nanjing 210039, Jiangsu, China)

Abstract: In order to solve the problem of increasing solid fuel consumption caused by the poor segregation effect of the mixture distribution of Meigang No. 5 sintering machine, the laboratory simulation distribution device and the sintering cup test are designed to study the influence of different gas injection speeds on the particle size and fuel distribution of the mixture. The sintering mixture gas injection device is developed for industrial application test, the suitable injection medium is determined, and the influence of gas injection on the temperature, particle size and fuel distribution of the mixture is analyzed, as well as the effect on sintering technical index is improved. The results show that, with the increase of gas injection speed, the segregation degree of mixture particle size and fuel distribution increases. After using the gas injection mixture with a flow rate of 50 m/s, the sintering cup test is carried out, and the utilization coefficient of the sintering machine is increased by 0.024 t/(m²·h), the sinter yield is increased by 0.93%, and the solid fuel consumption is reduced by 0.8 kg/t. The results of industrial application show that compressed air is suitable for gas injection, the temperature of the mixture is reduced by 0.9 ~ 1.3 ℃, the particle size segregation index of the mixture is increased from 0.77%/m to 1.66%/m, the fuel segregation index is increased from -0.156%/m to 0.382%/m, the sinter yield is increased by 1.62%, and the fuel consumption is reduced by 2.26 kg/t. Gas injection segregation distribution technology has a small space occupation and low cost, which can significantly improve the particle size and fuel distribution of the

收稿日期：2023 - 12 - 21；**修回日期**：2024 - 09 - 14
作者简介：肖俊军(1986—)，男，工程师，从事铁矿烧结及低碳炼铁技术方面的研究工作。

mixture，and increase the yield of sinter.

Key words：sintering；mixture；segregation distribution；segregation index；particle size；fuel distribution

由于料层自动蓄热作用，厚料层烧结工艺料层内高温保持时间的增长促进了各种物理化学反应的充分进行，有利于黏结相的生成和结晶，提高烧结矿产、质量[1-2]。然而，厚料层烧结工艺也面临沿料层厚度方向热量分布不均匀的问题，导致料层上部欠烧、下部过熔等现象，而偏析布料是实现厚料层均质均热烧结的一种有效方法[3-4]。目前行业内主要采用梭式小车、泥辊、反射板或多辊布料器等设备实现偏析布料，这些方法使得混合料沿台车横向的边沿位置粒度分布较小，沿台车纵向由上至下呈现粒度逐渐变粗、燃料逐渐变少的特征[5-8]。随着厚料层烧结技术的发展，国内如宝钢、首钢京唐等企业的料层厚度均突破了 900 mm[9-10]。老旧烧结机原有设计的料层厚度约在 700 mm 左右，通过梯形布料可以提高料层厚度至 800 mm 左右[11]，但随之而来的问题是多辊布料器与料面的空间不足，导致多辊布料器的倾角偏小，其中 1 ~ 2 根辊子无法被充分利用，使得混合料在下落过程中的水平速度偏小，造成布料偏析效果不理想。

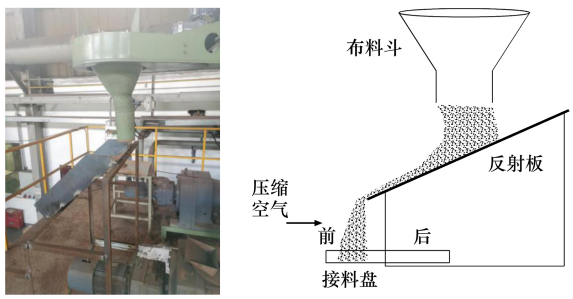
针对厚料层烧结面临的布料偏析效果变差的问题，气体喷吹偏析布料方法可以在较小空间内显著改善混合料和燃料的偏析效果。该方法通过气体介质喷吹下落过程的混合料，利用气体的动能改变颗粒在台车上的堆积状态。一方面，它能够增加料层的孔隙率，提高透气性；另一方面，含有较多固体燃料的细颗粒混合料受到气流吹动易分布在料层上部，而粗颗粒料则分布在料层下部，从而达到燃料上层分布多、下层分布偏少的合理分布状态[12]。祁腾飞等[13]研究表明，气流速度和方向的变化对物料堆积形状有明显影响。日本新日铁采用喷嘴将气流吹向反射板下端与台车料层表面之间的混合料，使台车料层上部分布较多 0.5 ~ 2.0 mm 粒度的物料，而较粗的物料则分布在料层的下部，该方法使烧结机生产效率提高了 2 %，点火用重油消耗量降低 10%[14]。中南大学常亮亮等[15]、许斌等[16]对该技术进行了理论分析和气流布料试验研究，结果表明：在喷吹角度为 10°的条件下，当气流速度达到 34 m/s 时，物料开始发生有效偏析；当气流速度达到 50 m/s 时，偏析效果最优；与普通布料相比，采用气流偏析布料时烧结矿的转鼓强度基本一致，垂直烧结速度及利用系数分别提高了 7.1% 和 11.2%，固体燃料消耗降低了 4.11 kg/t。

为此，本文在实验室模拟烧结机布料过程，通过烧结杯试验研究气体喷吹对混合料偏析分布的影响，然后在现场进行工业验证，分析气体喷吹前后混合料粒度、燃料分布及烧结机技术指标的变化，验证其在改善混合料偏析分布和提高烧结机生产效率方面的显著作用，以期为同行提供借鉴与参考。

1　试验装置与方法

1.1　试验装置

气体喷吹偏析布料烧结杯试验装置如图 1 所示。由图 1 可见：将混合料装入烧结杯的布料斗，在布料斗的下方设置一套自制的反射板装置，在反射板下方设置接料盘收集混合料；当布料斗旋转布料时，在混合料下落过程中，操作人员在反射板下方 100 mm 处喷吹压缩空气（由空压机提供），通过控制减压阀出口压力控制压缩空气的流速，来模拟不同工况下的布料偏析效果。



（a）实物装置；（b）示意图

图 1　烧结杯偏析布料示意

Fig. 1　Schematic diagram of segregation distribution sintering cup

1.2　试验方法

布料和烧结杯试验均选用钢铁厂常用的原（燃）料及配比，按照固定比例进行混合，料层厚

度保持 680 mm，碱度控制在 1.9，原(燃)料的配比及主要化学成分如表 1 所示。

表 1 烧结杯试验原(燃)料主要化学成分及配比(质量分数)

Table 1 Main composition and proportions of raw materials for sintering test %

原料名称	化学成分						配比
	TFe	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	P	
K 矿粉	64.68	2.28	0.05	0.05	1.37	0.074	12.5
T 矿粉	63.39	6.38	0.11	0.05	0.73	0.049	13.5
Y 矿粉	57.97	4.73	0.12	0.05	1.56	0.052	11.5
西皮矿	60.50	4.76	0.05	0.05	2.13	0.128	10.0
PB 粉	61.37	3.71	0.06	0.10	1.94	0.087	10.0
FMG 粉	58.14	5.81	0.05	0.05	2.47	0.081	14.0
返矿	56.73	5.28	9.73	1.58	1.90	0.100	33.0
云屑	0	1.62	30.91	20.49	0.49	0.001	4.0
生石灰	0	3.11	84.74	3.46	1.21	0.011	4.5
灰石	0	3.58	50.58	1.51	1.28	0.009	5.2
焦粉	0.88	6.29	0.59	0.11	4.43	0.060	4.8

按照表 1 所示的原(燃)料配比进行烧结配料，经一、二混制粒后，得到所需混合料进行烧结杯试验。基准试验：通过图 1 所示的烧结杯布料斗，将混合料偏析落入接料盘，使用隔板将落入接料盘的混合料分为两部分(图 2)，用铲子将接料盘前面的混合料布到烧结杯下部，后面的混合料布到烧结杯上面。气体喷吹对比试验：同样使用烧结杯布料斗将混合料经过偏析装置落入接料盘，只是在布料过程中，使用压缩空气对落料过程进行喷吹，然后将接料盘内前面的混合料布到烧结杯下部，后面的混合料布到烧结杯上面。气体喷吹造成后面部分混合料中细颗粒增加，这样使得混合料在杯体中的分布与基准不同。

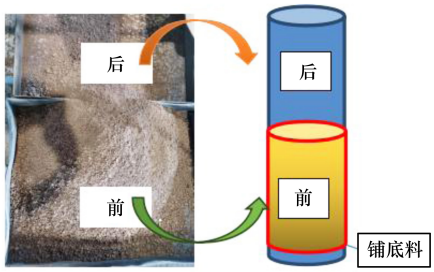


图 2 烧结杯偏析布料示意

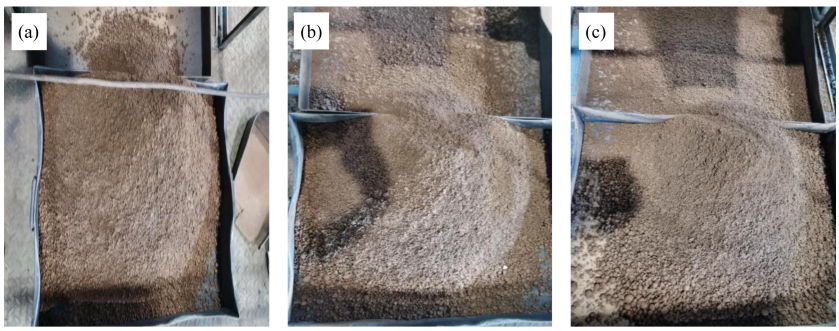
Fig. 2 Schematic diagram of segregation distribution in sintering cup

每次试验对接料盘中的混合料分前、后两部分进行取样，分别取 1 kg 样品烘干制样分析化学成分，取 5 kg 混合料分析粒度(液氮法)，通过粒度和化学成分变化来评估不同喷吹条件对混合料偏析程度的影响。

2 试验结果与讨论

2.1 气体喷吹对混合料粒度、成分偏析的影响

保持相同气体喷吹位置，进行气体喷吹速度对混合料偏析效果的影响试验，得到喷吹后接料盘中混合料状态如图 3 所示。由图 3 可以观察到，在不进行压缩空气喷吹的条件下，混合料通过反射板自由下落至接料盘后，堆积形状呈现“三角形”分布。在自然落料状态下，混合料的分布较为集中且偏向于重力作用方向。当气体喷吹速度设定为 35 m/s 时，部分细粒物料受到气流的影响被吹向接料盘的后部区域，表现出一定程度的偏析效果。随着气体流速进一步提高至 50 m/s，可以看到喷出的细粒混合料的数量显著增加，表明更强的气流有助于将更大量的细颗粒物料推向接料盘的后部。



喷吹速度/($m \cdot s^{-1}$)：(a) 0；(b) 35；(c) 50

图 3 不同喷吹速度对混合料偏析分布的影响

Fig. 3 Effect of different blowing speeds on the segregation distribution of the mixture

为了进一步分析气体喷吹对混合料偏析的具体影响，将接料盘内的混合料按照前后位置划分为两部分(如图 2 所示)，并对这两部分的混合料分别进行取样，进行粒度分析和化学成分检测，结果如表 2 所示。由表 2 可知，在使用气体喷吹的情况下，前后位置混合料的平均粒度差值从未喷吹时的 0.17 mm 增加到喷吹后的 0.29、0.58 mm，这种差值随着气流速度的增加而逐渐增大，说明气流速度对混合料的粒度分布影响显著。随着气体喷吹速度的提升，接料盘后部混合料的细颗粒数量增多，导致其平均粒度减小。同时，化学成分分析显示，后部区域混合料中的游离碳质量分数从原来的 2.18% 提高到 2.33%，表明使用更高速度的气体喷吹有助于在接料盘后部富集更多的细颗粒燃料，从而优化燃料偏析效果。

表 2　气体喷吹对混合料粒度偏析的影响

Table 2　Effect of gas injection on particle segregation of mixture

气体流速/($m \cdot s^{-1}$)	混合料位置	平均粒度/mm	游离碳质量分数/%	平均粒度差值/mm
0	前	4.38	2.58	0.17
	后	4.21	2.18	
35	前	4.66	2.58	0.29
	后	4.37	2.25	
50	前	4.82	2.49	0.58
	后	4.24	2.33	

2.2　气体喷吹偏析布料对烧结技术指标的影响

布料试验完成后，对剩余混合料按照烧结杯偏析布料试验方法进行试验验证，不同试验方案重复 2 次，取平均值进行比较，烧结技术指标如表 3 所示。由表 3 可见：喷吹后烧结机利用系数提高了 0.024 t/($m^2 \cdot h$)，成品率提高了 0.93 个百分点，固体燃料消耗下降了 0.8 kg/t，转鼓强度下降了 0.5 个百分点，烧结矿 FeO 质量分数变化不大。试验结果表明，气体喷吹增强了偏析布料效果，这对改善烧结指标具有一定的提升，能够提高产量并降低燃料消耗。

3　工业应用

3.1　喷吹装置与喷吹介质

2022 年 8 月开始在 5 号机开展气体喷吹偏析布料技术应用。现场可用作喷吹介质的有压缩空气和低压蒸汽，对两种气体喷吹后发现：采用低压蒸汽喷吹时虽然能提高混合料温度，但会造成混合料水分增加，对烧结过程不利，而压缩空气不存在这一问题，最终选择压缩空气(压力为 0.4 MPa)作为喷吹介质。

按照 5 号烧结机大小，设置喷吹装置长度为 5 m，在直径为 160 mm 的管道上面排布 58 个针孔状喷嘴，将其安装在九辊下料口附近。现场安装示意如图 4 所示。当喷嘴出口气体流速为 25 ~ 50 m/s 时，观察发现混合料被吹动较为明显；当喷吹速度大于 40 m/s 时，细粒混合料容易被吹到台车外面，故最终将气体喷吹速度设置为 35 m/s 左右。

3.2　喷吹后混合料温度变化

由于压缩空气温度与环境温度相当，而混合料温度为 50 ~ 60 ℃，喷吹气体势必会对混合料温度有一定的影响。采用红外摄像测温仪对喷吹前后台车左边、中间、右边的混合料进行温度测量，结果如表4所示。由表4可知：在不进行气体喷

表 3　气体喷吹偏析布料对烧结技术指标的影响

Table 3　Influence of gas injection on sintering technical index

试验方案	垂直烧结速度/($mm \cdot min^{-1}$)	利用系数/($t \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)	成品率/%	固体燃料消耗/($kg \cdot t^{-1}$)	转鼓强度/%	FeO 质量分数/%
基准 1	33.33	2.204	67.39	69.27	58.93	10.07
基准 2	31.81	2.122	67.88	69.13	62.13	10.19
基准平均	32.57	2.163	67.64	69.20	60.50	10.13
气体喷吹 1	32.80	2.188	68.96	67.86	60.27	10.06
气体喷吹 2	33.06	2.186	68.19	68.94	59.73	10.12
喷吹平均	32.93	2.187	68.57	68.40	60.00	10.09

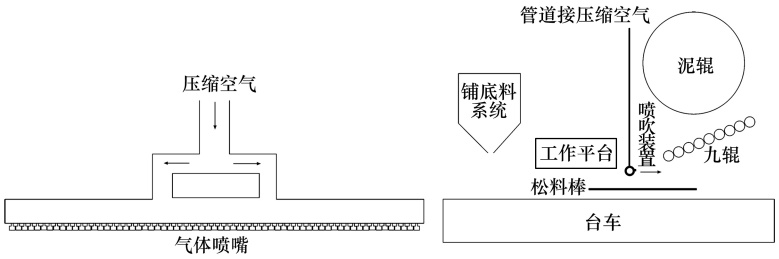


图4 喷吹装置及现场应用示意

Fig. 4 Schematic diagram of injection device and field application

吹时，铺底料温度较高，其对混合料有加热作用，导致混合料从九辊落入台车后的温度上升0.5～1.6 ℃；气体喷吹后台车左边混合料温度升高幅度降低至0.5 ℃，中部和右边混合料温度下降0.3～0.4 ℃，说明气体喷吹对混合料温度有一定影响，但幅度很小，降低约0.9～1.3 ℃，这种程度的温度下降在生产上可以被接受。

表4 气体喷吹对混合料温度的影响

Table 4 Effect of gas injection on the material temperature ℃

混合料位置	喷吹装置关闭			喷吹装置开启		
	喷吹装置前	喷吹装置后	差值	喷吹装置前	喷吹装置后	差值
左边	51.8	53.4	+1.6	50.7	51.2	+0.5
中间	52.3	53.3	+1.0	48.8	48.5	−0.3
右边	51.0	51.5	+0.5	50.7	50.3	−0.4

3.3 喷吹后混合料粒度、含碳量变化

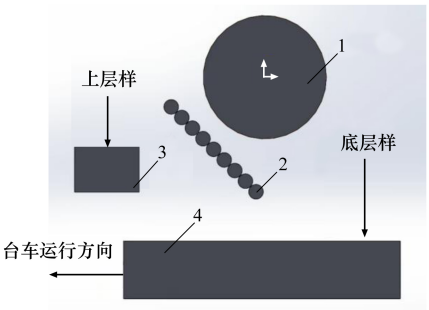
该技术应用于生产面临的一个问题是如何评价试验前、后混合料的偏析程度，从而论证气体喷吹与生产指标的关联性。本文采用偏析指数来评估烧结生产中混合料的偏析程度，具体如(1)所示。

$$\alpha = \frac{w_{上}(C) - w_{下}(C)}{h} \quad (1)$$

式中：α 为混合料偏析指数,%/m；$w_{上}(C)$为上层混合料含碳量,%；$w_{下}$(C)为底层混合料含碳量,%；h 为料层厚度，m。

取样点示意如图5所示，取样工具为自制的提料铲。下部混合料在泥辊后面铺底料上取到，上部混合料在泥辊前面平台处取得。对取到的上层与对应底层混合料进行粒度或化学成分分析，即可计算得到混合料的偏析指数。

采用偏析指数方法评价混合料的偏析程度，沿台车宽度方向取5个样，并混合为1个样品，



1—泥辊；2—九辊；3—泥辊平台；4—台车。

图5 烧结机取样点示意

Fig. 5 Schematic diagram of sampling points of sinterstrand

对样品进行粒度和成分分析，结果如表5所示。由表5可见：应用气体喷吹后，表层混合料<1 mm粒级占比由9.22%提高至10.62%，平均粒度由3.38 mm降低至3.28 mm；底层>5 mm粒级占比由36.07 %提高至53.26 %，平均粒度由3.96 mm提高至4.53 mm，粒度分布发生明显变化。经计算，混合料粒度偏析指数由0.77%/m提高至1.66%/m，明显改善。固体燃料偏析情况也有明显改善，未喷吹前底层游离碳质量分数比表层高，导致下部热量严重过剩，热量未能充分利用；喷吹后，底层游离碳质量分数下降，固体燃料偏析指数由−0.156%/m提高至0.382%/m，料层上部热量增多，料层蓄热作用得到合理利用。

3.4 生产应用效果

该技术应用两个月后，由于烧结料层厚度从680 mm提至720 mm，原来喷吹混合料下落过程变为喷吹混合料堆面，影响了喷吹效果。为此进行了两处改进：将装置整体抬高100 mm，将喷吹方向由水平喷吹改为向上10°进行喷吹，基本消除了料面抬高的不利影响。设备应用期间，主要生产及烧结技术指标的变化如表6所示。

表 5　气体喷吹应用前后混合料粒度及含碳量

Table 5　Particle size of mixture before and after gas injection application

取样位置	粒度组成/%				平均粒度/mm	游离碳质量分数/%	偏析指数/(%·m^{-1})	
	>5 mm	(3,5] mm	(1,3] mm	≤1 mm			粒度	游离碳
喷吹前表层	19.38	35.08	36.32	9.22	3.38	2.64	0.77	−0.156
喷吹前底层	36.07	28.96	28.19	6.78	3.96	2.75		
喷吹后表层	17.53	34.61	37.24	10.62	3.28	2.55	1.66	0.382
喷吹后底层	53.26	23.21	16.48	7.05	4.53	2.28		

表 6　气体喷吹装置应用后主要指标变化

Table 6　Main index changes after the application of gas injection device

时间(2022 年)	燃料配比/%	w(FeO)控制/%	料层厚度/mm	台车机速/(m·min^{-1})	大烟道温度/℃	垂直烧结速度/(mm·min^{-1})	利用系数/(t·m^{-2}·h^{-1})	成品率/%	固体燃料消耗/(kg·t^{-1})	转鼓强度/%
1 月—7 月	5.1	9.0±1.0	731	2.17	147	17.94	1.219	76.76	53.47	82.50
8 月—12 月	5.1	9.0±1.0	709	2.02	138	17.73	1.201	78.38	51.21	82.44
差值	0	0	−22	−0.15	−9	−0.21	−0.018	+1.62	−2.26	−0.04

在生产应用期间，燃料配比和 FeO 控制水平保持稳定。料层厚度和台车机速小幅下降影响了烧结矿产量，烧结机利用系数下降 0.018 t/(m^2·h)，转鼓强度基本保持不变。喷吹前后主要变化是成品率由 76.76% 提高至 78.38%，固体燃料消耗由 53.47 kg/t 下降至 51.21 kg/t。与试验前预想不一致的是，喷吹前后烧结矿 FeO 质量分数变化不大，而生产是以 FeO 质量分数确定配碳量，故不能直接降低焦粉配比。固体燃料消耗指标下降的主要原因是成品率的提高，喷吹后细粒焦粉被吹到料层表面，一方面提高了上层混合料的成品率，另一方面烧结热量分布更为合理，下层热量过剩情况有所改善，被烟气带走的热量降低，从试验中大烟道废气温度下降 9 ℃可以证明该结论。经测算应用该装置耗气量约为 112 m^3/h，费用为 20 元/h，折合费用为 0.04 元/t，成本较低。

4　结　论

（1）气体喷吹偏析布料技术占用空间小、费用低，适用于布料空间小的烧结机。根据料层的变化该技术可以设计为高度可调的喷吹装置，避免因料层上升而挡料。

（2）实验室研究和生产应用实践表明，气体喷吹偏析布料技术的主要作用是改善粒度分布和燃料分布。小颗粒混合料被吹到表层，下层混合料平均粒度的增加有利于提高料层孔隙率从而改善透气性；细粒焦粉被吹到表层，使得烧结热量分布更为合理，下层热量过剩情况有所改善，对提高烧结矿成品率有利。

（3）使用偏析指数对料层偏析程度进行评价，应用气体喷吹偏析布料后，混合料粒度偏析指数由 0.77%/m 提高至 1.66%/m，固体燃料偏析指数由 −0.156%/m 提高至 0.382%/m，布料偏析效果改善明显。

参考文献：

[1] 张波. 改善 900 mm 厚料层烧结透气性的措施[J]. 烧结球团,2014,39(1):15−20.
ZHANG Bo. Measures for improving 900 mm deep bed sintering permeability [J]. Sintering and Pelletizing, 2014,39(1):15−20.

[2] 刘佳文,陈铁军,周仙霖,等. 烧结料层透气性影响因素及其改善措施解析[J]. 钢铁研究学报,2024,36(7):817−826.
LIU Jiawen,CHEN Tiejun,ZHOU Xianlin,et al. Analysis of sintering material layer permeability influence factors and improvement measures[J]. Journal of iron and steel research,2024,4(7):817−826.

[3] WANG Y Z,ZHANG J L,LIU Z J,et al. Recent advances and research status in energy conservation of iron ore sintering in China[J]. JOM,2017,69(11):2404.

[4] 程峥明,宁文欣,潘文,等. 超厚料层均质烧结技术的研究与应用[J]. 烧结球团,2019,44(4):7 – 12.
CHENG Zhengming, NING Wenxin, PAN Wen, et al. Research and application of ultra-deepbed homogeneous sintering technology[J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(4):7 – 12.

[5] 何斌. 改善攀钢6号烧结机横向烧结均匀性的措施[J]. 烧结球团,2008,33(6):49 – 52.
HE Bin. About the improvement of sintering uniformity along pallet transverse on Pangang No. 6 sintering machine[J]. Sintering and Pelletizing, 2008, 33(6): 49 – 52.

[6] 徐扬. 烧结布料过程颗粒的偏析行为及燃烧过程的数值模拟[D]. 重庆:重庆大学,2018.
XU Yang. Numerical simulation of segregation behavior and combustion process of sintered cloth particles[D]. Chongqing: Chongqing University,2018.

[7] 田儒来,熊玮,孙瑞,等. 料仓粘料对烧结混合料横向分布均匀性的影响[J]. 烧结球团,2018,43(3):1 – 5.
TIAN Rulai, XIONG Wei, SUN Rui, et al. Effect of material sticking in sintering mixture bin on the horizontal distribution uniformity[J]. Sintering and Pelletizing,2018,43(3):1 – 5.

[8] 高居安,王剑锋,李立新,等. 烧结新型布料技术在400 m^2 烧结机上的应用[J]. 中国冶金,2007(8):14 – 16.
GAO Juan, WANG Jianfeng, LI Lixin, et al. Sintering fabric technology in the application of 400 m^2 sintering machine[J]. China metallurgical,2007(8):14 – 16.

[9] 李明,赵利明,匡朝辉. 湛钢1#550 m^2 烧结机厚料层生产实践[J]. 冶金管理,2023(14):83 – 86.
LI Ming, ZHAO Liming, KUANG Chaohui. Production practice of thick bed of 1# 550 m^2 sintering machine in Zhangang[J]. China Steel Focus,2023(14):83 – 86.

[10] 张建良,阚永海,张士军. 等. 全活性石灰强化烧结技术在超厚料层中的应用[J]. 钢铁,2020,55(8):56 – 61.
ZHANG J L, KAN Y H, ZHANG S J, et al. Application of full active lime intensified sintering technology in ultra-thick layer[J]. Iron & Steel,2020,55(8):56 – 61.

[11] 陈灿,祁锦波,李长军. 提高400 m^2 烧结机烧结料层厚度的生产实践[J]. 河北冶金,2018(2):33 – 34.
CHEN Can, QI Jinbo, LI Changjun. Production practice of improving the thickness of sintering bed of 400 m^2 sintering machine[J]. Hebei Metallurgy, 2018(2): 33 – 34.

[12] 常亮亮. 烧结气流布料的流体力学基础及技术开发[D]. 长沙:中南大学,2007:10 – 11.
CHANG Liangliang. Investigation on fluid mechanices and technology of air-blow feeding for sintering of iron ores[D]. Changsha: Central South University, 2007: 10 – 11.

[13] 祁腾飞,黄军,孙俊杰,等. 布料方式对竖冷炉内烧结矿偏析及气流分布的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版),2022,43(10):1422 – 1429.
QI Tengfei, HUANG Jun, SUN Junjie, et al. Effect of distribution method on segregation and airflow distribution of sinter in vertical cooling furnace[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2022,43(10):1422 – 1429.

[14] 王涣梁. 日本烧结偏析布料技术研究[J]. 国外钢铁,1996(2):6 – 11.
WANG Huanliang. Research on sintering segregation fabric technology in Japan[J]. Foreign steel,1996(2): 6 – 11.

[15] 常亮亮,许斌,姜涛. 烧结气流布料工艺研究[J]. 矿冶工程,2007,27(2):54 – 57.
CHANG Liangliang, XU Bin, JIANG Tao. Research of air-flow feeding in sinter[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2007,27(2):54 – 57.

[16] 许斌,王介超,姜涛,等. 烧结气流布料的力学原理[J]. 中南大学学报(自然科学版),2010,41(3):825 – 830.
XU Bin, WANG Jiechao, JIANG Tao, et al. Dynamic theory of air-injection feeding[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, 41(3):825 – 830.