

高配比精矿对制粒效果及烧结过程的影响与作用机理

朱 旺¹, 周建沣¹, 杜鲲鹏¹, 王春来¹, 季志云², 吕佳铭²

(1. 北京首钢股份有限公司 河北 唐山 064400; 2. 中南大学 资源加工与生物工程学院 湖南 长沙 410083)

摘要: 我国部分处于内陆地区的钢铁企业拥有丰富的铁矿资源, 其部分自产铁精矿用于烧结生产对于降本增效具有重要意义。本文通过调整精矿和粉矿的配比进行混合、制粒, 采用烧结杯模拟工业烧结过程, 并检测垂直烧结速度、成品率、转鼓强度、利用系数等烧结指标, 研究铁精矿比对制粒效果、烧结指标的影响规律, 解析其作用机理。结果表明: 随着精矿配比从 0 提高到 100% 料层透气性指数下降。原因在于: 随着配比的不断增加, 精矿的干燥脱粉率由 7.71% 上升至 20.34%, 导致制粒时容易出现小球兼并长大, 使得制粒小球强度下降且易脱落粉碎从而影响料层透气性; 当精矿配比从 35% 提高到 50% 时, 料层透气性较好, 烧结指标处于较优水平; 提高精矿配比至 100% 时, 成品烧结矿中赤铁矿质量分数由 35.00% 下降至 22.20%, 磁铁矿质量分数由 28.40% 增加至 43.50%, 铁氧化物总量有所增加, 而铁酸钙质量分数由 29.30% 减少至 25.00%, 使得烧结矿强度降低。因此, 适宜的精矿配比范围为 35%~50%。研究结果对于铁精矿高配比应用于烧结生产具有重要指导作用。

关键词: 铁矿烧结; 精矿配比; 制粒效果; 烧结指标

中图分类号: TF046.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)03-0038-09

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.03.040

Effect and mechanism of high ratio concentrate on granulation effect and sintering process

ZHU Wang¹, ZHOU Jianfeng¹, DU Kunpeng¹, WANG Chunlai¹, JI Zhiyun², LÜ Jiaming²

(1. Beijing Shougang Co., Ltd., Tangshan 064400, Hebei, China; 2. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: Some iron and steel enterprises in Chinese inland areas have abundant iron ore resources, and some of their self-produced iron ore concentrate is used for sintering production, which is of great significance for reducing costs and increasing efficiency. In this paper, the ratio of concentrate and fine ore is adjusted for mixing and granulation, the sintering cup is used to simulate the industrial sintering process, and the sintering indexes such as vertical sintering speed, yield rate, drum strength and utilization coefficient are detected, and the influence rule of iron concentrate ratio on granulation effect and sintering index is studied and its mechanism is analyzed. The results show that with the increase of concentrate ratio from 0 to 100%, the permeability index of the material layer decreases. The reason is that with the increasing proportion of concentrate, its drying and depowdering rate is increased from 7.71% to 20.34%, which leads to the merger and growth of pellets during granulation, which makes the strength of pellets decrease and easy to fall off and crush, thus affecting the permeability of the material layer. When the concentrate ratio is increased from 35% to 50%, the permeability of the material layer is good, and the sintering index is at an excellent level. When the concentrate ratio is increased to 100%, the mass fraction of hematite in the finished sinter is decreased from 35.00% to 22.20%, the mass fraction of

收稿日期: 2024-10-03; 修回日期: 2025-01-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52274344)

作者简介: 朱旺(1988—), 男, 工程师, 从事烧结生产提质降本方面的研究工作。

通信作者: 季志云(1987—), 男, 教授, 从事钢铁冶金领域减污降碳方面的研究工作。

magnetite is increased from 28.40% to 43.50%, the total amount of iron oxide is increased, and the mass fraction of calcium ferrite is decreased from 29.30% to 25.00%, which reduces the strength of sinter. Therefore, the suitable concentrate ratio range is 35%~50%. The results have an important guiding role in the application of high ratio of iron ore concentrate in sintering.

Key words: iron ore sintering; concentrate ratio; granulation effect; sintering index

近年来,我国粗钢产量持续超过10亿吨,巨大的钢铁产量需要消耗大量的铁矿资源^[1-2]。然而,我国铁矿主要依赖于进口。随着铁矿价格的持续走高,长期依赖进口铁矿资源的现状将严重影响钢铁企业的健康发展。为解决这一问题,国家提出了“基石计划”,其中明确提出加大自产铁矿的供给率^[3]。在此背景下,国内拥有自主矿山的钢铁企业逐步加大了铁精矿的产量,以发挥自产铁精矿的资源 and 价格优势^[4]。

随着部分钢铁企业铁精矿产量的增加,在满足球团铁精矿需求的同时,需要提高烧结原料中铁精矿的配比,这对烧结生产提出了新的挑战。研究人员^[5-6]研究了精矿比对烧结的影响,结果表明:铁精矿配比较小对制粒效果和烧结过程的影响不太明显;随着铁精矿配比的不断提升,制粒效果、烧结过程以及烧结矿产量和质量将产生显著变化。潘建等^[7]研究表明,当精矿配比(质量分数)由24%增加到42%时,烧结料层透气性阻力由857 Pa提高到1 150 Pa,垂直烧结速度由21.87 mm/min下降到18.38 mm/min,利用系数由1.14 t/(m²·h)降低到0.93 t/(m²·h),转鼓强度由67.47%下降到64.13%,固体燃料消耗(无烟煤)由6.46 kg/t提高到70.42 kg/t,烧结成品矿的还原度指数(RI)由8.31%下降到78.76%,低温还原粉化率(>3.15 mm)由70.71%下降到64.41%,烧结各项指标及烧结矿的冶金性能均出现较大幅度的恶化。何木光等^[8]研究表明,当磁铁精矿配比由46%增加到67%时,混合料的透气性指数由1.44 JPU下降至1.17 JPU,烧结速度由19.22 mm/min下降至17.00 mm/min,利用系数由1.21 t/(m²·h)下降至1.14 t/(m²·h),转鼓强度从57.73%下降至55.73%。徐礼兵等^[6]研究了配加高比例精矿对烧结过程的影响,当精矿配比由50%增加到75%时,转鼓强度由68.13%下降至64.80%,利用系数由1.35 t/(m²·h)下降至

1.10 t/(m²·h),成品率由65.34%下降至6.66%,烧结矿<5 mm粒级占比由17.05%增长至19.06%,还原度指数也呈下降趋势。

另外,由于品位高、杂质含量低,一定比例的磁铁精矿配入烧结时,其氧化过程会放出大量的热,这不仅能够改善烧结矿的质量,而且具有节约固体燃料消耗的潜力^[9]。但是,高配比精矿烧结会提高原料中的适宜水分,使得制粒过程中黏附粉增多,引起混合料中出现大量的细粒小球以及兼并长大情况,造成制粒小球的干燥脱粉率升高、烧结矿强度和料层透气性变差,最终导致烧结速度下降、烧结机利用系数下降、烧结液相生成能力减弱、铁酸钙生成量减少等^[10-13]。另外,有学者研究发现,大部分精矿的亲水性较好,成球速率较快,易形成大于>8 mm的大球和结构较致密的小球,此类球的出现并不利于烧结过程中CaO矿化反应的发生,影响液相的生成,进而影响烧结矿的产量和质量^[12-14]。

本文致力于研究精矿比对制粒效果和烧结过程的影响规律,并解析其机理;探究精矿配比从0提升至100%时,制粒效果(粒度组成、透气性、干燥脱粉率)和烧结指标(利用系数、烧结速度、成品率、转鼓强度以及烧结矿组分和显微结构)的变化,查明不同精矿配比下的适宜水分,确定适宜的精矿配比范围。本文研究结果对于充分发挥我国自产铁精矿资源优势,为钢铁企业烧结生产降本增效具有重要现实意义。

1 原料性能和研究方法

1.1 原料性能

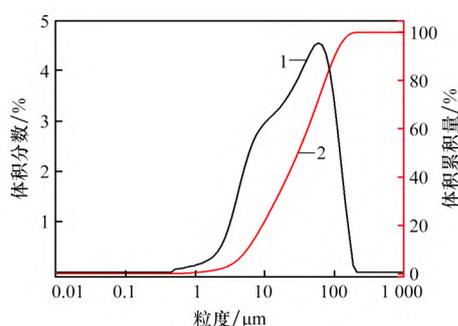
本研究以某钢铁厂的精矿和粉矿两种铁矿为主,配加少量轧皮、尾渣、瓦斯灰以及两种返矿。5种含铁原料以及燃料、熔剂和返矿的化学组成如表1所示,图1为精矿的粒度分布。由表1、图1可知:精矿为典型的高品位磁铁精粉,其TFe质

表 1 含铁原料的主要化学成分和烧损(质量分数)

Table 1 Main chemical composition and loss on ignition of ferrous material

%

原料名称	化学成分								烧损
	TFe	FeO	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	S	P	
精矿	67.200	29.660	4.240	0.230	0.450	0.710	0.054	0.007	-2.770
粉矿	56.680	0.210	8.100	0.086	0.100	1.730	0.015	0.071	6.820
轧皮	74.240	43.590	0.530	0.340	0.090	0.320	0.023	0.023	-7.990
尾渣	42.890	42.930	7.970	18.000	4.040	2.550	0.230	0.050	-1.190
瓦斯灰	43.370	5.450	4.600	4.93	0.900	2.120	0.290	0.052	23.610
生石灰	0.260	0.040	3.140	73.330	7.100	1.110	0.160	0.009	11.530
石灰石	0.600	0.330	1.690	49.330	3.200	0.940	0.034	0.014	41.960
焦粉	1.390	0.900	6.580	1.070	0.170	4.330	0.820	0.046	84.280
返矿	54.050	7.700	5.220	13.060	1.440	1.770	0.026	0.066	-0.320



1—体积分数; 2—累计体积分数。

图 1 铁精矿的粒度分布

Fig. 1 Particle size distribution of iron ore concentrate

量分数为 67.20%，且精矿的粒度较小， <0.074 mm 的粒级占比达到 81.08%，平均粒度为 0.043 mm；粉矿为赤铁矿，其 TFe 质量分数为 56.68%，其平均粒度为 4.16 mm。另外三种二次回收的含铁原料为轧皮、尾渣和瓦斯灰，其中，轧皮的 TFe、FeO 质量分数分别为 74.24%、4.59%，尾渣的 FeO、CaO 质量分数分别为 4.93%、18%，瓦斯灰的烧损为 23.61%。熔剂中，生石灰的 CaO 质量分数为 7.33%，石灰石的 CaO 质量分数、烧损分别为 49.33%、41.96%。焦粉的烧损为 84.28%；返矿的 TFe 质量分数为 54.05%。

1.2 研究方法

1.2.1 混合、制粒方法

混合、制粒设备采用 $\varnothing 600$ mm \times 800 mm 的圆筒混合机，混合机转速为 15 r/min、混合时间为 3 min、制粒时间为 4 min，混合过程中同步加水。按照配料方案的要求，将铁矿石、熔剂、焦粉、

返矿等烧结物料按质量配比进行称重配料。在混合料中加入设定的水量进行人工混合，再把混合料装入圆筒混合机内混合、制粒。制粒后进行现场取样，然后分别检测混合料水分、粒度组成、透气性、干燥脱粉率等。

制粒小球的强度用干燥脱粉率(α)来表示，以经过干燥后混合料中 <1 mm 粒级小球的增加量来表征。对制粒后的混合料均匀取样 800 g，将其在温度为 250 °C、风速为 0.5 m/s 的气流中完全干燥，然后检测干燥后混合料中 <1 mm 粒级小球的增加量。

干燥脱粉率(α)的计算公式:

$$\alpha = r_{-1\text{mm}}^0 - r_{-1\text{mm}}^1 \quad (1)$$

式中: $r_{-1\text{mm}}^0$ 为干燥后混合料中 <1 mm 粒级小球的质量分数, %; $r_{-1\text{mm}}^1$ 为干燥前混合料中 <1 mm 粒级小球的质量分数, %。此外, 制粒后原始小球的脱粉率记为 0。

1.2.2 烧结杯试验

采用规格为 $\varnothing 180$ mm \times 700 mm 的烧结杯模拟工业烧结过程, 烧结杯示意如图 2 所示。试验流程包括称重配料、混合、制粒、布料、点火、烧结、冷却、落下、筛分以及烧结矿质量检测等环节。烧结指标包括垂直烧结速度、成品率、转鼓强度、利用系数等。

试验步骤: 按照配料方案进行称重配料, 将称好的烧结物料经过混匀后放入圆筒混合机中制粒, 制粒时设置转速为 15 r/min、制粒时间为 4 min; 布料前, 取 1 kg 粒度为 10 ~ 16 mm 的成品

烧结矿作为铺底料放入烧结杯底部,设置铺底料厚度约为20 mm,然后将制粒后的混合料加入烧结杯中开始点火,设置点火温度为 $(1\ 050 \pm 50)$ °C、点火时间为1.5 min、保温时间为1 min、点火及保温负压为4.5 kPa;将负压调整为9 kPa进行烧结,到达烧结终点后,立即调整负压至4.5 kPa进行冷却,设置冷却时间为3 min,然后将烧结矿倒入单齿辊破碎机中破碎,随后进行落下、筛分等操作。

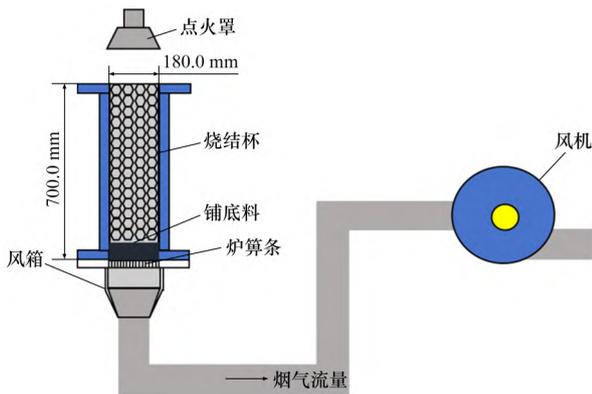


图2 烧结杯示意

Fig. 2 Schematic diagram of sintering pot

将成品烧结矿经过煮胶、磨片、抛光等工序后制成可观察的光片,在显微镜下检测矿物组成、矿相结构等。采用Leica DMRXP型光学显微镜以及Qwin图像分析软件研究烧结矿的矿相。

1.2.3 研究方案

本研究只有一种精矿和一种粉矿,即在不断提高精矿比例的同时,等比例减小粉矿配比。在

前期的探索性研究中,发现精矿配比小于35%对烧结过程的整体影响不太显著。在保持精矿配比不断提高的情况下,保持碱度为2.15、焦粉配加量为5%,外配35%返矿,按照要求设计精矿配比从0到100%的原料配比方案,如表2所示。

2 结果与讨论

2.1 精矿对比对制粒的影响

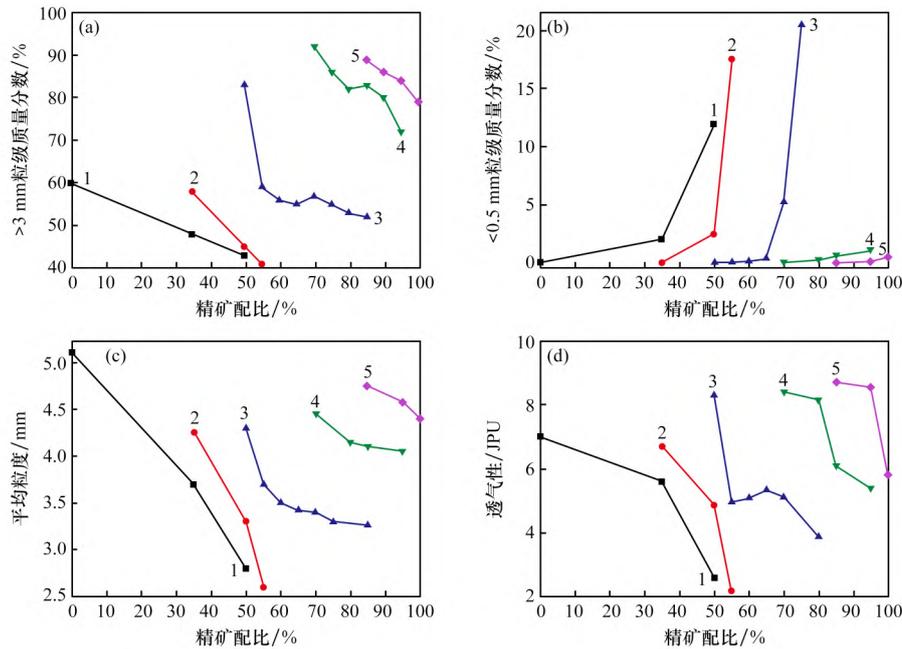
试验研究精矿对比对制粒效果的影响,结果如图3所示。由图3可知:精矿对比对制粒效果的影响非常显著。当水分质量分数为7.75%时,可以看到随着精矿配比从0增长50%, >3 mm 粒级占比从59.73%下降至41.54%,其 <0.5 mm 粒级占比从0.17%上升至1.19%,平均粒度由5.01 mm降低至2.88 mm,透气性指数也由6.96 JPU降低至2.54 JPU。在其他水分条件下也能够明显看到精矿配比的提高所带来的透气性恶化,这其中最主要原因就是随着精矿配比的增加,细粒级颗粒质量分数相应增加,混合料中颗粒与颗粒之间的空隙变少而导致透气性变差。

当配加一定比例精矿时,在一定范围内提高水分可以明显改善制粒效果。在精矿配比为85%的条件下,当配加7.75%和8.0%的水分时, >3 mm 粒级质量分数均小于40%。反观在配加8.5%及以上水分时,随着水分含量的增加, >3 mm 粒级颗粒的质量分数也在增加;当水分配加量从8.5%提高到9.25%时, >3 mm 粒级颗粒的质量分数

表2 不同精矿配比的原料配比方案(质量分数)

Table 2 Raw material ratio scheme of different concentrate ratios

方案编号	含铁原料配比		原料配比						
	精矿	粉矿	混匀铁矿	尾渣	生石灰	焦粉	瓦斯灰	轧皮	石灰石
1 [#]	0	100	69.15	1.06	13.50	5.00	1.99	1.10	8.20
2 [#]	35	65	70.00	2.10	11.50	5.00	1.91	2.58	6.91
3 [#]	50	50	71.20	3.50	11.00	5.00	2.05	1.24	6.01
4 [#]	55	45	70.50	3.60	10.60	5.00	2.50	2.00	5.80
5 [#]	65	35	71.85	3.00	9.92	5.00	2.35	2.05	5.83
6 [#]	70	30	71.55	3.66	9.57	5.00	2.42	2.20	5.60
7 [#]	80	20	71.66	3.90	9.00	5.00	2.40	2.90	5.14
8 [#]	85	15	71.78	3.92	8.67	5.00	2.50	3.12	5.00
9 [#]	95	5	72.20	3.40	8.30	5.00	2.70	3.40	5.00
10 [#]	100	0	72.45	3.66	7.35	5.00	2.70	3.74	5.10



(a) >3 mm 粒级; (b) <0.5 mm 粒级; (c) 平均粒度; (d) 透气性。
混合料水分/%: 1—7.75; 2—8.00; 3—8.50; 4—9.00; 5—9.25。

图 3 精矿比例对制粒效果的影响

Fig. 3 Influence of concentrate ratio on granulation effect

增长了 39.5%。而 <0.5 mm 粒级质量分数下降 19.86%。平均粒度增大 1.61 mm, 透气性指数由 3.76 JPU 提高至 8.77 JPU。而在其他精矿配比的条件下, 各项指标也呈现同样的趋势。但是随着水分的提高, <0.5 mm 粒级质量分数不断地减小, 致使其占比逐渐趋向于 0。这就说明在水分较高的条件下, <0.5 mm 粒级的颗粒几乎全部作为黏附粉参与制粒过程; 而继续提高混合料水分, 出现小球兼并长大的情况, 虽然透气性变好, 但是小球的强度变低, 且干燥后易脱粉。

精矿对比对适宜混合料水分的影响如图 4 所示。由图 4 可知: 当精矿配比由 0 提高至 100% 时, 适宜水分随之由 7.75% 提高至 9.25%。这是由于随着精矿配比的上升, 原料中 <0.5 mm 粒级颗粒的质量分数增加, 给制粒带来很大困难, 因此需要增加制粒水分以促进物料颗粒与水之间产生毛细力作用, 使得物料颗粒之间相互黏结, 形成具有一定粒度的小球, 从而满足烧结要求。

2.2 精矿对比对烧结指标的影响

在焦粉配比为 5%、制粒时间为 5 min 以及适宜的混合料水分条件下, 试验得到精矿对比对烧结指标的影响如图 5 所示。由图 5 可知, 当精矿

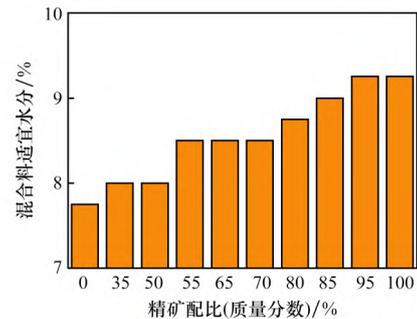
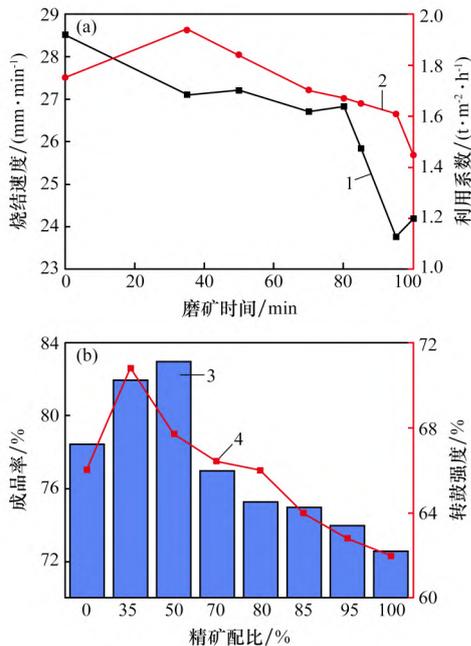


图 4 精矿对比对适宜混合料水分的影响

Fig. 4 Effect of concentrate ratio on moisture of suitable mixture

配比从 0 升高到 50% 时, 烧结速度由 28.50% 下降至 27.05%, 利用系数、成品率以及转鼓强度均小幅上升。利用系数在精矿配比为 35% 时达到最大值 $1.9 \text{ t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 同时转鼓强度也达到最大值 79.12%, 成品率在精矿配比为 50% 时达到最大值 83.35%。随着精矿配比从 50% 提高到 100%, 垂直烧结速度由 27.25 mm/min 降低至 24.29 mm/min, 利用系数由 $1.85 \text{ t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 降低至 $1.44 \text{ t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 成品率由 83.35% 下降至 72.22%, 转鼓强度由 79.12% 降低至 62.15%。这是由于提高精矿对比导致混合料中细粒物料增多, 使得制粒效果恶化,

同时使制粒小球强度下降、干燥过程中制粒小球易破损粉化,从而使料层透气性下降、烧结时间延长、烧结过程中高温保持时间也延长,影响烧结过程传质与传热,使得烧结矿产量与质量下降。因此,综合各项烧结指标后,确定铁精矿适宜配比范围为35%~50%。



(a) 烧结速率和利用系数; (b) 成品率和转鼓强度

1—烧结速度; 2—利用系数; 3—成品率; 4—转鼓强度。

图5 精矿比对烧结指标的影响

Fig. 5 Influence of concentrate ratio on sintering index

2.3 作用机理

2.3.1 制粒小球强度

在适宜混合料水分条件下,不同精矿配比下制粒小球强度的变化如图6所示。由图6可知,随着精矿配比的不断提高,其干燥脱粉率持续提升,当精矿配比由0上升至35%时,制粒小球的干燥脱粉率由7.71%上升至12.52%;在精矿配比由35%到50%时,其干燥脱粉率变化幅度较小;在精矿配比由50%提升到100%,其干燥脱粉率由13.95%提升到20.34%,表明在高配比精矿条件下制粒所得的小球在干燥过程中更容易破损,这会降低料层干燥预热带透气性。这是因为随着精矿配比的提高,原料中黏附粉($< 0.5 \text{ mm}$)的含量增多,而在制粒过程中混合料中绝大部分黏附颗粒($< 0.5 \text{ mm}$)主要依靠水分的毛细力作用,以类似于滚雪球式的成层方式黏附在核颗

粒表面长大。在干燥过程中水分被蒸发导致黏附颗粒脱落,制粒小球的干燥脱粉率自然上升。

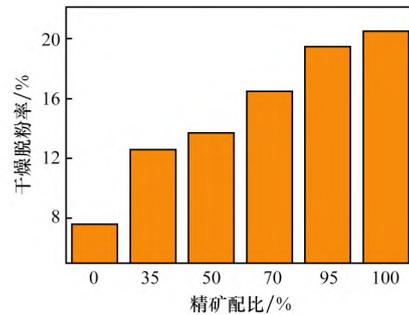
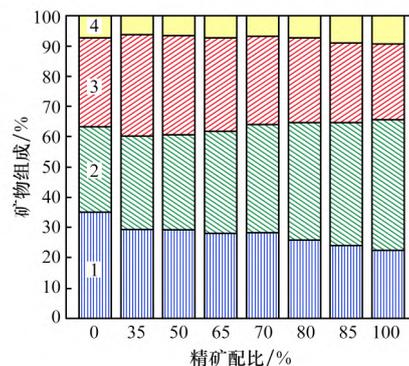


图6 精矿比对制粒小球强度的影响

Fig. 6 Influence of concentrate ratio on pellet strength

2.3.2 矿物组成

采用光学显微镜和XRD对不同精矿配比条件下烧结矿中各种矿物及其含量进行统计分析,结果如图7、8所示。由图7可知:烧结矿中主要矿物为赤铁矿、磁铁矿、铁酸钙和硅酸盐。随着精矿配比由0提高到35%,烧结矿中赤铁矿质量分数由35.00%下降至29.30%,磁铁矿质量分数由28.40%增长到31.00%,此时烧结矿中的铁酸钙质量分数由29.30%增长到33.50%,黏结相总量有所增加;在铁精矿配比由35%提高到50%时,烧结矿中的组分变化不大;随着铁精矿配比由50%提高至100%,赤铁矿质量分数下降了7%,磁铁矿质量分数增长了12%,铁酸钙质量分数下降了8%,硅酸盐质量分数增长了3%,此时黏结相总量有所降低。由图8可知,随着精矿配比的提高,赤铁矿含量呈下降趋势,磁铁矿含量呈上



1—赤铁矿; 2—磁铁矿; 3—铁酸钙; 4—硅酸盐。

图7 精矿比对烧结矿矿物组成的影响

Fig. 7 Influence of concentrate ratio on mineral composition of sinter

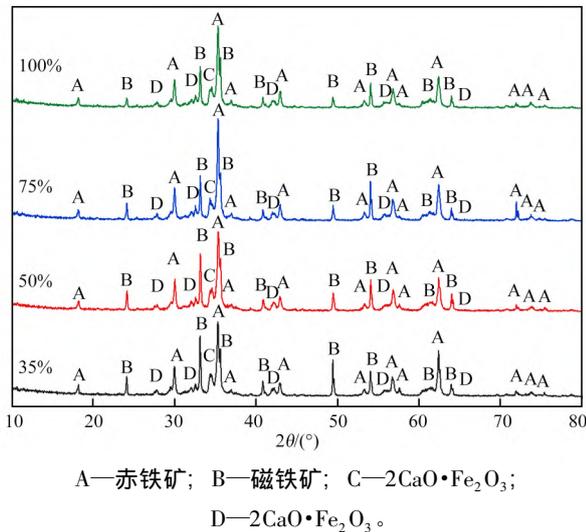


图 8 不同精矿配比下烧结矿矿物的 XRD 图谱
Fig. 8 XRD pattern of sinter minerals at different concentrate ratios

升趋势,且相较于基准组,提高精矿配比,其 $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 黏结相含量有所下降,与光学显微镜所示结果基本吻合。

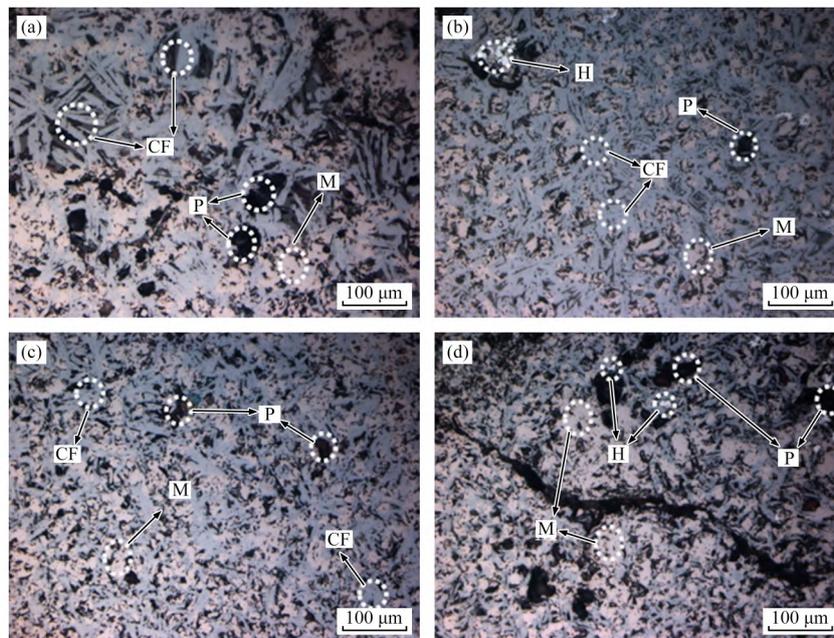
2.3.3 矿相结构

精矿比对烧结矿结构的影响如图 9 所示。由图 9 可知,当精矿配比为 35% 时,烧结矿熔融区存在较多针状、柱状铁酸钙,磁铁矿与铁酸钙

形成交织的熔融结构,且烧结矿熔融区的孔隙相对较少,这使烧结矿具有良好的强度;当精矿配比提高到 50% 时,烧结矿熔融区为磁铁矿与铁酸钙形成交织的熔融结构,针状铁酸钙含量降低,铁酸钙含量略有下降。当精矿配比提高到 75% 时,烧结矿熔融区为磁铁矿与铁酸钙形成交织的熔融结构,铁酸钙与磁铁矿的相对含量与精矿配比为 35%~50% 时有所降低,局部区域出现磁铁矿再结晶,这使得烧结矿强度有所降低;当精矿配比提高至 100% 时,磁铁矿含量明显增多,铁酸钙含量进一步减少,特别是针柱状铁酸钙,烧结矿熔融区仍由铁酸钙和磁铁矿构成,且铁酸钙针状、柱状结构并不明显,同时烧结矿中孔隙、裂纹相对增多,使得烧结矿强度进一步降低。

由上述研究结果分析可得:

(1) 随着精矿配比的提高,原料中黏附颗粒($<0.5\text{ mm}$)比例上升,核颗粒($1\sim3\text{ mm}$)比例下降,导致制粒过程中物料缺少核颗粒难以长大成球。因此,制粒后混合料中粗颗粒含量减少,微细颗粒含量增多,粗颗粒之间的空隙被大量微细颗粒填满,使气流通过料层时受到阻力增大,原始料带的透气性变差。



精矿配比/%: (a) 35; (b) 50; (c) 75; (d) 100

CF—铁酸钙; H—赤铁矿; M—磁铁矿; P—孔洞。

图 9 精矿比对烧结矿矿相结构的影响

Fig. 9 Influence of concentrate ratio on sinter mineralogical structure

采用精矿烧结时,大部分制粒小球由黏附颗粒与单个核颗粒构成,但随着精矿配比的提高,“单核+黏附颗粒”结构的小球占比降低;由于缺乏起成核作用的颗粒以及水分分布不均匀,单纯黏附颗粒黏结形成的无核小球占比提高;由于精矿的亲水性良好,制粒小球间易发生兼并长大,“多核+黏附颗粒”结构的小球占比也有所提高。后两种制粒小球主要依靠水的毛细力作用而形成。在干燥过程中水分被蒸发,小球被还原为原始的 $<0.5\text{ mm}$ 粒级颗粒,导致干燥预热带透气性下降。

受上述两者的共同影响下,随精矿配比的提高,烧结过程整体透气性下降,烧结时间变长,垂直烧结速度变慢,利用系数降低,同时对传质和传热过程也产生不利影响,降低了烧结矿质量。

(2) 烧结矿是依靠烧结过程中生成的液相将未熔化的铁矿颗粒润湿黏结,冷却后形成具有一定强度的多孔块状产物,因此液相生成量对于烧结矿质量有较大影响。随着精矿配比的提高,液相开始生成温度和完全生成温度上升,生成量减少,不利于颗粒间的黏结,还会使细小不规则的孔洞增多,导致烧结矿强度下降。

铁酸钙是高碱度熔剂性烧结矿中最主要的黏结相,起到黏结氧化铁和硅酸盐相的作用,而且针状、柱状铁酸钙黏结形成的烧结矿具有强度高、还原能力好等特点。随着精矿配比的提高,铁酸钙的生成量降低,特别是强度好的针状、柱状铁酸钙含量的降低,从而使烧结矿的成品率和转鼓强度降低。

3 结论

(1) 精矿配比的提高会增加混合料细粒级颗粒的含量,参与制粒的细粒级颗粒随着精矿配比的提升而降低,使得制粒小球 $>3\text{ mm}$ 粒级颗粒减少, $<0.5\text{ mm}$ 粒级颗粒增加,平均粒度与透气性指数降低;而过多的细粒级颗粒主要依靠水分的毛细力作用,在核颗粒的表面成层长大,使得干燥过程中水分蒸发进而导致干燥脱粉率明显提高。

(2) 随着精矿配比由0提高至35%,烧结矿中的赤铁矿含量降低,磁铁矿含量增加,铁酸钙

质量分数增加了4.2%,黏结相的总含量增加,此时烧结矿的强度较好;在精矿配比为35%~50%时,烧结矿中的组分含量波动不大;在精矿配比由50%提升到100%时,铁酸钙质量分数减小了12%,硅酸盐质量分数有小幅度增加,黏结相总量有所降低,同时烧结矿中孔隙、裂纹相对增多,烧结矿的强度降低。

(3) 精矿配比过高不仅会恶化制粒效果,而且会直接影响成品烧结矿的质量和产量,其范围不宜超过50%。

参考文献:

- [1] 王淑丽. 我国铁矿资源评估与可供性研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京) 2010.
WANG Shuli. Assessment and availability of china's iron ore resources [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) 2010.
- [2] 张亮 杨卉芃 冯安生 等. 全球铁矿资源开发利用现状及供需分析[J]. 矿产保护与利用, 2016, 36(6): 57-63.
ZHANG Liang, YANG Huipeng, FENG Ansheng, et al. Study on utilization and analysis of supply and demand of global iron ore resources [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources 2016, 36(6): 57-63.
- [3] 骆铁军. 推动“基石计划”,提升我国钢铁行业资源保障能力[N]. 中国冶金报, 2022-03-01(1).
LUO Tiejun. Promote the “cornerstone plan” to enhance the resource support capacity of China's iron and steel industry [N]. China Metallurgy News 2022-03-01(1).
- [4] HAN H L, LU L M. Recent advances in sintering with high proportions of magnetite concentrates [J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2018, 39(4): 217-230.
- [5] 甘勤, 何木光, 何群. 攀钢高品位精矿烧结试验研究及生产实践[J]. 钢铁, 2009, 44(12): 21-26.
GAN Qin, HE Muguang, HE Qun. Experimental study and productive practice on sintering of high grade Panzhihua concentrate at pangang company [J]. Iron & Steel 2009, 44(12): 21-26.
- [6] 徐礼兵, 周明顺, 翟立委 等. 鞍钢炼铁总厂烧结提高精矿配比试验研究[C]//第十届中国钢铁年会暨第六届宝钢学术年会. 上海: 中国金属学会, 2015: 110-115.

- XU Libing, ZHOU Mingshun, ZHAI Liwei, et al. Experimental study on improving the ratio of concentrate insintering of Ansteel iron-making plant [C]//The 10th China Iron and Steel Annual Conference and the 6th Baosteel Academic Annual Conference. Shanghai: Chinese Society of Metals 2015: 110 - 115.
- [7] 潘建, 师本敬, 朱德庆, 等. 加拿大某铁矿高配比烧结特性[J]. 钢铁 2014 49(9): 21 - 28.
PAN Jian, SHI Benjing, ZHU Deqing, et al. High proportion sintering performance of Canadian iron concentrate [J]. Iron & Steel 2014 49(9): 21 - 28.
- [8] 何木光, 蒋大军, 陈许玲. 提高钒钛磁铁精矿配比对烧结的影响[J]. 钢铁研究 2014 42(2): 1 - 4.
HE Muguang, JIANG Dajun, CHEN Xuling. Effect of increasing the ratio of vanadium titanium magnetite on sintering process [J]. Research on Iron and Steel 2014, 42(2): 1 - 4.
- [9] 周明顺, 王义栋, 赵东明, 等. 高配比磁铁精矿烧结技术的研究进展[J]. 钢铁 2020 55(5): 1 - 9.
ZHOU Mingshun, WANG Yidong, ZHAO Dongming, et al. Development on sintering technologies with high proportion of magnetite concentrates [J]. Iron & Steel, 2020 55(5): 1 - 9.
- [10] 刘晓明, 王金龙, 郭兰芬, 等. 铁矿粉粒度组成对混匀料制粒效果的分析与探讨[J]. 河南冶金, 2017, 25(2): 23 - 25.
- LIU Xiaoming, WANG Jinlong, GUO Lanfen, et al. Analysis and discussion on the effect of particle size composition of iron ore on the granulation of mixture [J]. Henan Metallurgy 2017 25(2): 23 - 25.
- [11] 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.
- [12] 贺淑珍, 冯焕林, 甘敏, 等. 超细铁精矿粉特性对烧结的影响[J]. 钢铁研究学报 2015 27(4): 6 - 12.
HE Shuzhen, FENG Huanlin, GAN Min, et al. Effects of characters of ultra fine iron ore concentrate on sinter [J]. Journal of Iron and Steel Research 2015 27(4): 6 - 12.
- [13] 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; 112.
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; 112.
- [14] 宋鹤锴, 吴胜利, 阙志刚, 等. 赤铁精粉配比对烧结矿强度的影响[J]. 钢铁 2019 54(1): 8 - 13.
SONG Hekai, WU Shengli, QUE Zhigang, et al. Effect of ratio of hematite concentrate on strength of sinter [J]. Iron & Steel 2019 54(1): 8 - 13.

广 告 目 次

封面	湖南中冶长天重工科技有限公司	前彩 18 - 19	湖南中冶长天重工科技有限公司
封二	襄阳中和机电技术有限公司	前彩 20 - 21	北京顺泰克科技有限公司
封三	第二十三届中国国际冶金工业展览会	前彩 22 - 23	唐山助纳炉料有限公司
封底	河北同业冶金科技有限责任公司	前彩 24	焦作市迈科冶金机械有限公司
前彩 1	湖南宏德陶瓷科技有限公司	前彩 25	成都利君实业股份有限公司
前彩 2 - 3	鞍山市昱昊机械设备有限公司	前彩 26 - 27	湖南中冶长天节能环保技术有限公司
前彩 4 - 5	湖南德尚源耐磨工业有限公司	前彩 28 - 29	北京金都泰拓冶金技术研究有限公司
前彩 6	秦皇岛秦冶重工有限公司	前彩 30	沈阳华泽单齿辊破碎机制造有限公司
前彩 7	秦冶工程技术(北京)有限责任公司	前彩 31	江阴市创裕机械有限公司
前彩 8	长沙天为华信环保装备有限公司	前彩 32	江苏鑫华能环保工程股份有限公司
前彩 9	罗迪格(北京)机械设备有限公司	前彩 33	厦门川亿机械设备有限公司
前彩 10 - 11	中冶长天(长沙)智能科技有限公司	前彩 34	湖南长重机器股份有限公司
前彩 12 - 13	朝阳重型机器有限公司	后彩 1	中冶长天炉窑工程技术公司
前彩 14 - 15	北京艾瑞机械有限公司	后彩 2	爱立许集团(中国)有限公司
前彩 16	南京三埃工控有限公司	后彩 3	鞍山市明阳金属材料有限公司
前彩 17	平罗县国宁活性炭有限公司	后彩 4	湖北中船气体有限公司