预制粒强化铁精矿烧结及并料工艺构建

韩凤光[1]，杨永斌[2]，李和平[1]
（1. 宝钢股份中央研究院 梅钢技术中心，江苏 南京 210039；2. 中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083）

摘要：鉴于优质铁矿资源日益短缺，提高国内难制粒铁精矿在烧结中的配比，对烧结工业降本增效至关重要。本研究基于预制粒—烧结工艺，重点考察了预制粒料与常规制粒料并料过程的影响。结果表明：常规制粒烧结工艺中，铁精矿配比上限为 12%；而采用预制粒—烧结工艺后，其配比可提升至 28%，且所得烧结矿冶金性能良好。适宜的并料方式为在二次圆筒混合机入口处加入预制粒料，与常规制粒料混合，并料后适宜的二次混合制粒时间为 5 min。在预制粒烧结过程中，预制粒料内的磁铁矿充分氧化为赤铁矿，并依靠铁氧化物再结晶显著增强了预制粒烧结部分的机械强度。同时，基体料中形成的复合铁酸钙等低熔点液相渗透至预制粒料的孔隙中，二者形成交织熔蚀结构，共同显著提升了烧结矿的整体强度。

关键词：预制粒；精矿烧结；烧结粉尘；强化制粒；并料工艺
中图分类号：TF046.4 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764(2026)01－0128－08
doi：10.13403/j.sjqt.2026.01.010

Construction of sintering and blending processes for pre-granulated strengthened iron ore concentrate

HAN Fengguang[1], YANG Yongbin[2], LI Heping[1]
(1. Technology Center of Shanghai Meishan Iron & Steel Co., Ltd., Central Research Institute of Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Nanjing 210039, Jiangsu, China; 2. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: Given the increasing shortage of high-quality iron ore resources, increasing the proportion of domestic iron concentrate that is difficult to granulate in sintering is crucial for reducing costs and increasing efficiency in the sintering industry. Based on the pre-granulating-sintering process, this study focused on the influence of the blending process of pre-granulated materials with conventionally granulated materials. The results indicate that in the conventional granulating sintering process, the upper limit for iron concentrate proportion is 12%. However, with the pre-granulating sintering process, this proportion can be increased to 28%, and the resulting sinter has good metallurgical properties. The suitable blending method is that the pre-granulated materials are added at the inlet of the secondary drum mixer to mix with the conventionally granulated materials. The proper secondary mixing and granulating time is 5 minutes after blending. During the sintering process of the pregranualted materials, the magnetite within the pre-granulated materials are fully oxidized to hematite, and the iron oxides recrystallize to significantly enhanced the mechanical strength of the pre-granulated sintered portion. Simultaneously, low-melting-point liquid phases such as composite calcium ferrite formed in the matrix material permeate into the pores of the pre-granulated materials, the two form an interlaced fused structure, jointly and significantly improving the overall strength of the sinter.

收稿日期：2025－09－28；**修回日期**：2025－11－19
基金项目：中国宝武低碳冶金创新基金资助项目(BWLCF202301)
作者简介：韩凤光(1979—)，男，博士，高级工程师，从事铁矿石烧结新技术方面的研究。
通信作者：杨永斌(1969—)，男，教授，博士生导师，从事钢铁冶金、资源综合利用等方面的研究。

Key words：pre-granulating；sintering of concentrates；sintering dust；enhanced granulation；material blending process

在“双碳”战略背景下，中国钢铁工业面临严峻的低碳转型压力。作为高炉冶炼的核心原料，烧结矿的生产过程对资源消耗与环境排放具有重要影响[1-3]。随着优质铁矿资源日益匮乏，提高难处理铁精矿在烧结中的配比，已成为烧结工序降本增效的关键路径。然而，铁精矿普遍存在粒度细、易泥化等特性，而烧结粉尘则具有粒度超细、表面疏水等特点[4-5]。二者直接参与烧结会严重恶化制粒效果，导致料层透气性下降、烧结指标恶化。这一技术瓶颈严重制约了铁精矿和烧结粉尘的资源化利用。

为突破这一技术瓶颈，国内外学者开展了大量关于强化制粒技术的研究。目前主要技术路径包括高压辊磨预处理、强力混合、返矿镶嵌、黏结剂强化以及预制粒等。高压辊磨预处理通过减小颗粒粒度、增加润湿热与亲水性，有效提升了铁精矿表面活性[6]；强力混合技术则通过高效混合与制粒克服细粒精矿制粒难题，可使制粒小球平均粒径由 4.6 mm 增至 4.8 mm，显著提高 >3 mm 粒级占比[7]；返矿镶嵌技术通过对返矿粒度分级，使细粒级作为黏附粉包裹粗粒级核颗粒，可显著降低固体燃料消耗，提高转鼓强度与成品率[8-9]；黏结剂强化制粒则通过添加不同类型黏结剂来改善制粒效果[10-13]。

在这些技术中，预制粒技术因其独特的优势而备受关注。该技术源于复合造块工艺，通过对部分细粒物料进行预先成球，再与主流烧结料混合，从而优化整体制粒效果。胡梦杰等[14]针对红土镍矿烧结，将少量矿粉与细粒粉尘、返矿预制成 5 ~8 mm 小球后与主料混合，显著提升了混合料平均粒度和透气性；GAN 等[15]采用部分铁矿、熔剂及全部燃料造粒，构建燃料内核包裹结构，有效降低了 NO_x 排放；朱德庆等[16]采用高压辊磨和圆盘造球对镜铁矿等预制粒，降低了烧结焦粉用量、提高了利用系数；何木光等[17]则通过提升生石灰比例改善烧结矿强度及利用系数。

尽管预制粒技术在改善制粒效果方面展现出良好前景，但现有研究大多聚焦于预制粒过程本身，对预制粒料与常规制粒料在后续混合过程中的协同行为关注不足。特别是在实际生产条件下，预制粒料如何与常规制粒料有效并合，并在整体混合料中保持结构完整性、发挥优异的机械性能，仍缺乏系统研究。这其中，并料位置、并料时机及并料后混合方式、混合时间等关键参数对最终烧结性能的影响机制尚不明确，成为制约预制粒技术工业化应用的关键瓶颈。

基于此，本研究在现有预制粒技术基础上，重点探究预制粒料与常规制粒料的并料工艺过程，系统分析并料方式、并料位置选择及混合时间等关键参数对混合料制粒效果和最终烧结矿产、质量的影响规律，旨在为预制粒技术有效融入常规制粒烧结过程、实现高比例铁精矿高效利用提供可靠的技术依据和实践指导。

1　原料性能与研究方法

1.1　原料性能

本研究所用原料主要有含铁原料[包括梅山铁精矿(简称梅精矿)、混匀矿及烧结粉尘(取自梅钢烧结厂袋式除尘器)]、膨润土与生石灰，其主要化学成分及烧损如表 1 所示。由表 1 可知，梅精矿 TFe 品位为 56.98%，脉石成分和有害元素 S 含量较高。混匀矿 TFe 品位较高(60.51%)，脉石成分和有害元素 S、P 含量低。烧结粉尘 TFe 品位较低(48%)，脉石成分和有害元素 S、P 含量显著高于常规铁矿。图 1 为梅精矿和烧结粉尘的 XRD 及 SEM 分析。由图 1 可知，梅精矿主要物相为磁铁矿、菱铁矿、赤铁矿及少量脉石，由于菱铁矿相质地软、易细磨泥化导致制粒困难[4]。烧结粉尘主要物相为赤铁矿，含部分脉石。梅精矿和烧结粉尘的粒度组成如表 2 所示。由表 2 可知，梅精矿 <0.045 mm 占比为 71.85%，而烧结粉尘 <0.045 mm 占比达到 100%。

1.2　研究方法

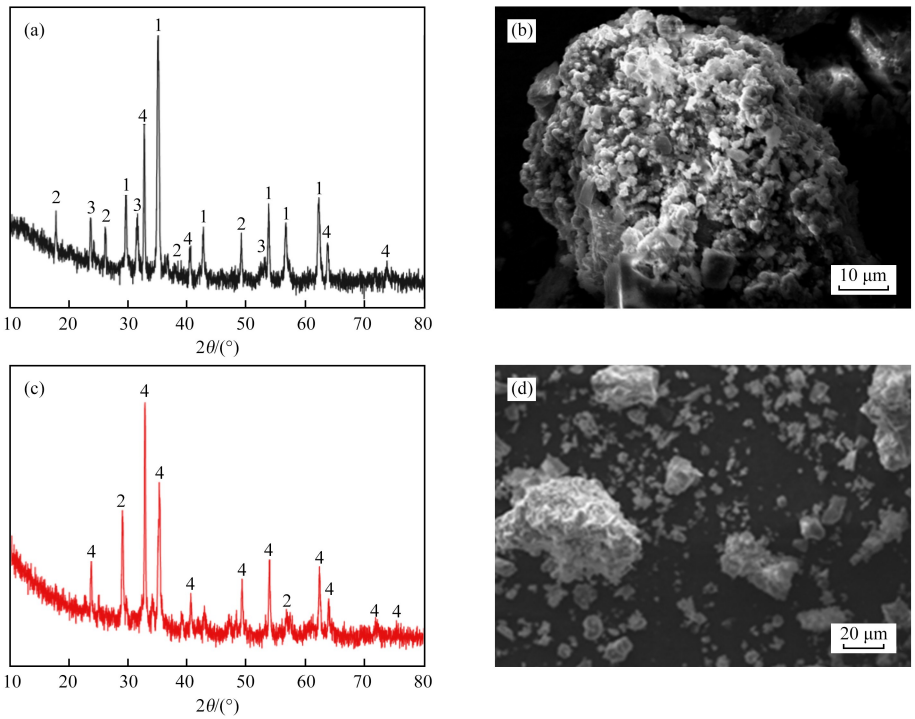
1.2.1　预制粒方法

每次称取 10 kg 梅精矿，并按试验要求添加黏结剂、水分进行人工混匀。随后在直径为 1 m、边高为 250 mm、倾角为 45°、转速为 0 ~40 r/min 的圆盘造球机上进行预制粒试验。

表 1 原料主要化学成分及烧损(质量分数)

Table 1 Main chemical composition and losses on ignition of raw materials %

原料	TFe	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	P	S	烧损
混匀矿	60.51	4.03	1.89	0.76	0.061	0.068	0.057	4.70
梅精矿	56.98	6.03	1.46	3.22	1.720	0.010	0.320	6.00
烧结粉尘	48.02	5.27	2.68	13.39	1.670	0.070	0.490	5.41
膨润土	5.27	54.01	14.96	5.22	—	—	—	—
生石灰	—	1.71	1.12	88.10	—	—	—	—



(a)、(b) 梅精矿的 XRD 及 SEM 图;(c)、(d) 烧结粉尘的 XRD 及 SEM 图

1—磁铁矿;2—石英;3—菱铁矿;4—赤铁矿。

图 1 梅精矿和烧结粉尘的 XRD 及 SEM 分析

Fig. 1 XRD patterns and SEM micrographs of Meishan iron concentrate and sintering dust

表 2 梅精矿及烧结粉尘的粒度组成(质量分数)

Table 2 Particle size distribution of Meishan iron concentrate and sintering dust %

原料	>0.150 mm	(0.100,0.150] mm	[0.100,0.074) mm	[0.074,0.045] mm	<0.045 mm
梅精矿	0.72	5.47	8.95	13.01	71.85
烧结粉尘	0	0	0	0	100.00

1.2.2 烧结杯试验方法

烧结试验在梅钢技术中心∅300 mm × 800 mm 烧结杯上进行。常规制粒烧结中将全部原料混合,经生石灰消化后二次混匀,于圆筒混合机制粒后依次进行布料、点火、烧结、冷却及烧结矿质量检测。预制粒烧结工艺则分出部分铁精矿与粉尘,在圆盘造球机中预先制成约为 5 mm 粒径小球;其余原料按常规流程在圆筒混合机制粒,再与预制粒小球混合后进行后续工序。具体流程:采用质量配料法混合含铁原料、熔剂、焦粉、返矿,定量加水初步混匀后,于混合机中二次混合制粒 6 min;布料时,用粒径为 10 ~ 16 mm 的烧结矿作为铺底料铺设 20 mm 厚于烧结杯底部,并均匀布入混合料;烧结时,设置点火温度为(1 080 ± 50) ℃、时间为 1.5 min、保温时间为 1 min、点火负压为 8 kPa、烧结负压 为 15.5 kPa,到达烧结终点后,

维持 8 kPa 负压冷却至 150 ℃。

2　结果与讨论

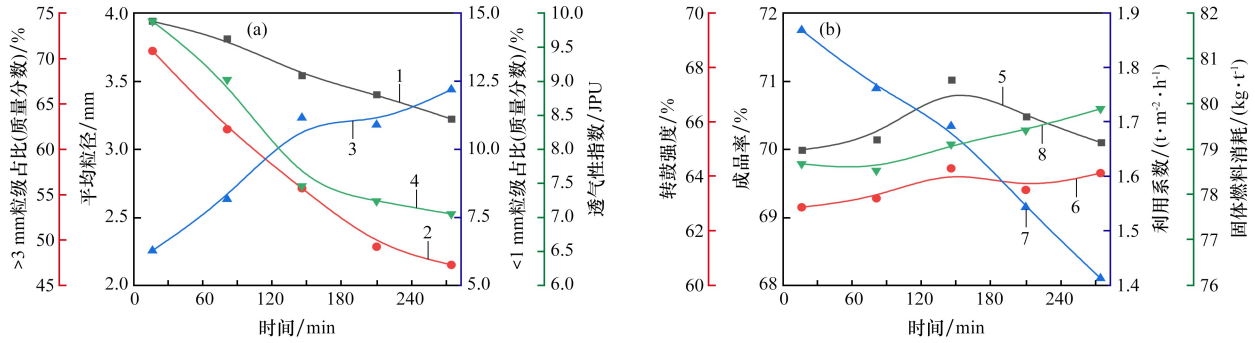
2.1　梅精矿配比对常规制粒烧结指标的影响

在固定制粒水分(6.9%)、生石灰用量(3.0%)、制粒时间(6 min)及焦粉配比(5.0%)的条件下，考察梅精矿配比对常规制粒—烧结的影响，结果如图 2 所示。由图 2 可知，提高梅精矿配比会显著恶化制粒效果及烧结指标：当配比由 12% 增至 44% 时，混合料平均粒度减小 0.72 mm，>3 mm 粒级占比降低 23.69%，透气性指数下降 2.84，烧结利用系数由 1.89 t/(m²·h)降至 1.41 t/(m²·h)，固体燃料消耗由 78.66 kg/t 升至 79.88 kg/t。因此，梅精矿配比超过 12% 将导致制粒与烧结性能明显下降，其上限应控制在 12% 以内。

进一步在固定梅精矿与粉尘总配比(28%)下研究粉尘配比的影响，结果如图 3 所示。由图 3 可知，粉尘配比由 0 增至 4.2% 时，平均粒度减小 0.15 mm，>3 mm 粒级占比降低 9.32%，透气性指数下降 0.17，利用系数降低 0.17 t/(m²·h)；尽管烧结矿成品率与转鼓强度因烧结速度减慢延长高温保持时间而维持稳定，但粉尘直接添加不利于生产稳定顺行，难以在常规制粒工艺中直接应用。

2.2　梅精矿预制粒比例对预制粒烧结指标的影响

基于先前的研究结果，采用预制粒烧结技术可以提高烧结中难制粒梅精矿配比至 28% 以上[18]。本节固定梅精矿配比为 28%，考察预制粒料配比对混合料性能及烧结矿质量的影响，结果见表3。由表3可知，提高预制粒料配比可有效

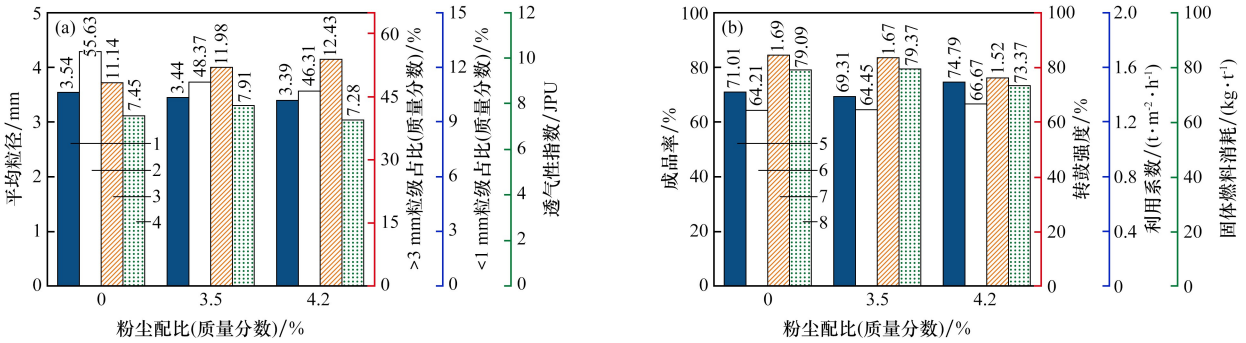


(a) 制粒指标；(b) 烧结指标

1—平均粒径；2—>3 mm 粒级占比；3—<1mm 粒级占比；4—透气性指数；5—成品率；6—转鼓强度；7—利用系数；8—固体燃料消耗。

图 2　梅精矿配比对常规制粒及烧结指标的影响

Fig. 2　Effect of Meishan iron concentrate blending ratio on conventional granulation and sintering indices



(a) 制粒指标；(b) 烧结指标

1—平均粒径；2—>3 mm 粒级占比；3—<1 mm 粒级占比；4—透气性指数；5—成品率；6—转鼓强度；7—利用系数；8—固体燃料消耗。

图 3　烧结粉尘配比对常规制粒及烧结指标的影响

Fig. 3　Effect of sinter dust blending ratio on conventional granulation and sintering indices

提高混合料粒度和料层透气性。当预制粒料配比从 0 提高到 50% 时，混合料平均粒度由 3.54 mm 增至 4.60 mm，透气性指数提升 2.79，利用系数提高 0.30 t/(m²·h)，成品率与转鼓指数均维持较高水平，显著优于传统 12% 精矿配比的制粒—烧结指标。继续提高预制粒料配比时，各项指标增幅趋缓，表明 50% 为其适宜配比。因此，采用预制粒技术可将精矿利用率从 12% 显著提升至 28%，同时保障优异烧结性能。随后固定预制粒料配比为 50%，研究粉尘配比的影响，结果如表 4 所示。由表 4 可知，当粉尘配比由 0 增加至 4.2% 时，会导致混合料平均粒径以约 0.5 mm 的降幅减小，透气性指数呈现先增后降趋势，成品率由 71.33% 降至 69.39% 后又升至 70.41%，利用系数呈现大幅降低趋势，转鼓指数则有所微升。鉴于粉尘显著降低成品率和烧结利用系数，其配比宜控制在 3.5% 以下。

2.3 并料工艺对预制粒烧结指标的影响

2.3.1 并料方式的影响

混合并料方式对制粒及烧结指标的影响如图 4 所示。由图 4 可知，添加预制粒小球后，无论采用圆筒混合还是皮带混合，与未预制粒相比，混合料平均粒径均增大、透气性显著改善、>3 mm 粒级占比明显增加，说明其可有效强化制粒效果。增加皮带混合次数对平均粒径、透气性及粗粒级占比影响甚微，表明其对制粒强化作用有限。相比之下，圆筒混合的制粒强化效果显著优于皮带

表 3 预制粒料配比对制粒及烧结指标的影响

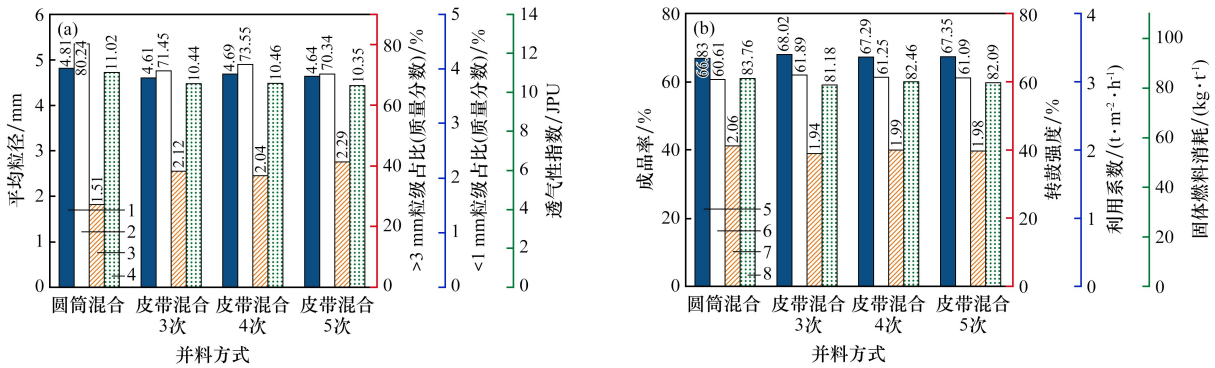
Table 3 Effect of pre-granulated feed blending ratio on granulation and sintering indices

预制粒料配比/%	平均粒径/mm	透气性指数/JPU	>3 mm 占比/%	<1 mm 占比/%	利用系数/(t·m⁻²·h⁻¹)	固体燃料消耗/(kg·t⁻¹)	成品率/%	转鼓强度/%
0	3.54	7.45	55.63	11.14	1.691	79.09	71.01	64.27
25	4.12	8.76	66.18	5.71	1.894	76.94	72.18	65.10
50	4.60	10.24	76.89	1.99	1.992	77.82	71.33	62.32
75	4.55	10.64	81.01	3.02	1.909	81.84	68.49	62.22

表 4 粉尘配比对预制粒及烧结指标的影响

Table 4 Effect of dust blending ratio on the indices of pre-granulation and sintering

预制粒料配比/%	粉尘配比/%	平均粒径/mm	透气性指数/JPU	>3 mm 占比/%	<1 mm 占比/%	利用系数/(t·m⁻²·h⁻¹)	固体燃料消耗/(kg·t⁻¹)	成品率/%	转鼓强度/%
50	0	4.60	10.24	76.89	1.99	1.992	77.82	71.33	62.32
50	3.5	4.52	10.37	73.22	2.21	1.917	78.27	69.39	62.93
50	4.2	4.55	10.14	71.18	2.56	1.661	78.87	70.41	63.10



(a) 制粒指标；(b) 烧结指标

1—平均粒径；2—>3 mm 粒级占比(质量分数)；3—<1 mm 粒级占比(质量分数)；4—透气性指数；5—成品率；6—转鼓强度；7—利用系数；8—固体燃料消耗。

图 4 混合并料方式对制粒及烧结指标的影响

Fig. 4 Effect of mixing and charging method on granulation and sintering indices

混合，主要归因于前者物料运行更平稳均匀，利于预制粒小球黏附更多粉料[19]。添加梅精矿预制粒小球后，烧结时间与成品率降低，烧结利用系数及固体燃料消耗上升。这源于透气性改善加速了垂直烧结速度，提高了利用系数；但过快的烧结速度缩短了高温区持续时间，导致燃料燃烧不充分，进而增加固体燃料消耗并降低成品率及转鼓强度。与皮带混合相比，圆筒混合所得混合料的利用系数更高，固体燃料消耗虽略有增加，但成品率及转鼓强度基本相当。因此，从优化制粒效果角度，铁精矿预制粒小球与常规制粒料宜采用圆筒混合机并料。

2.3.2　二混并料加料点的影响

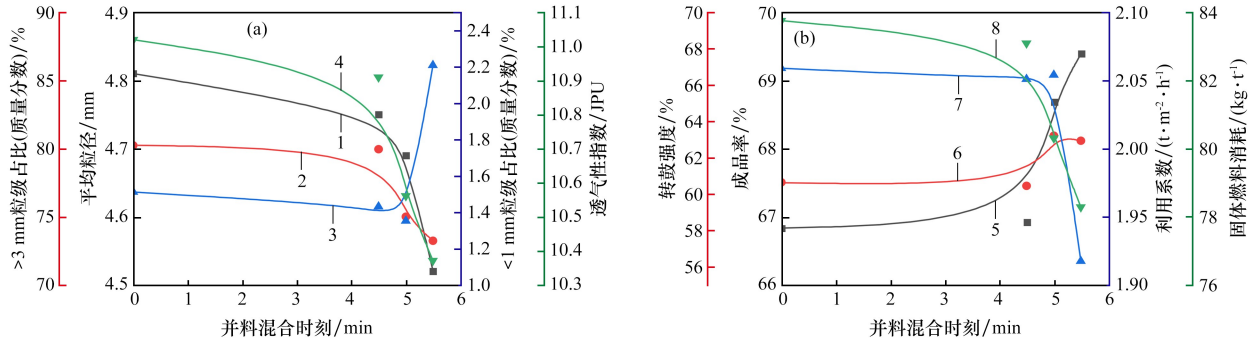
二混并料加料点对制粒及烧结指标的影响如图 5 所示。由图 5(a)可知，随着预制粒料加入二混时间的延迟，混合料粒径、透气性指数及粗粒级含量均呈下降趋势，说明预制粒料加入越早，整体制粒效果越好。这主要归因于预制粒料与常规料并料后的混合时间延长，促进了制粒过程。图 5(b)进一步显示，预制粒料提前加入可提高烧结利用系数，但会导致固体燃耗小幅上升及成品率降低。此现象源于混合时间延长后制粒效果改善，垂直烧结速度加快，从而增加了固体燃料需求。综合可见，过长的并料混合时间虽可提升部分指标，却会降低成品率。因此，推荐预制粒小球与常规制粒料在二混起始点(0 min)同步加入，此即最佳并料时机。

2.3.3　二混制粒时间的影响

鉴于预制粒小球与常规料在二混阶段共混效果最佳，且预制粒小球自身强度优异无需二次制粒，探究缩短二混制粒时间以优化工艺的可行性。为此，系统考察二混制粒时间对混合料制粒效果及烧结矿产、质量指标的影响，结果如图 6 所示。由图 6 可知，缩短制粒时间将显著劣化制粒效果，各项指标均呈下降趋势。虽然缩短时间可小幅提升烧结矿成品率与转鼓强度，但烧结利用系数与固体燃料消耗随之下降。具体而言，当制粒时间由 5 min 缩短至 4.5 min 时，利用系数由 2.058 t/(m^2·h)降至 1.949 t/(m^2·h)，转鼓强度由 63.38% 降至 62.97%。综合考虑制粒效果与烧结指标，推荐维持二混制粒时间为 5 min。

2.4　成品烧结矿矿相结构对比

基于上述研究，对比了添加 28% 梅精矿常规制粒烧结(方案 1)、添加 14% 梅精矿常规制粒外加 14% 梅精矿复合 3.5% 粉尘预制粒烧结(方案 2)成品烧结矿的矿相结构，结果如图 7 所示。由图 7 可知，方案 1 中，烧结矿固相区扩大导致复合铁配钙(SFCA)结合相减少，同时熔融区内针状与柱状 SFCA 含量降低削弱了结合强度[20]，致使精矿配比增至 28% 时烧结矿质量下降。方案 2 的偏光显微结构表明：其基质由磁铁矿、赤铁矿及 SFCA 组成，其中赤铁矿嵌于磁铁矿内，层状 SFCA 与磁铁矿交织；预造粒颗粒区主体为赤铁矿，含少量磁铁矿与微孔，精矿完全氧化形成致密嵌合结构，其赤铁矿再结晶显著提升了颗粒强度；基质与颗粒界限分明，烧结过程中低熔点 SFCA 渗入颗粒间隙实现牢固结合，且SFCA相仅分布于基

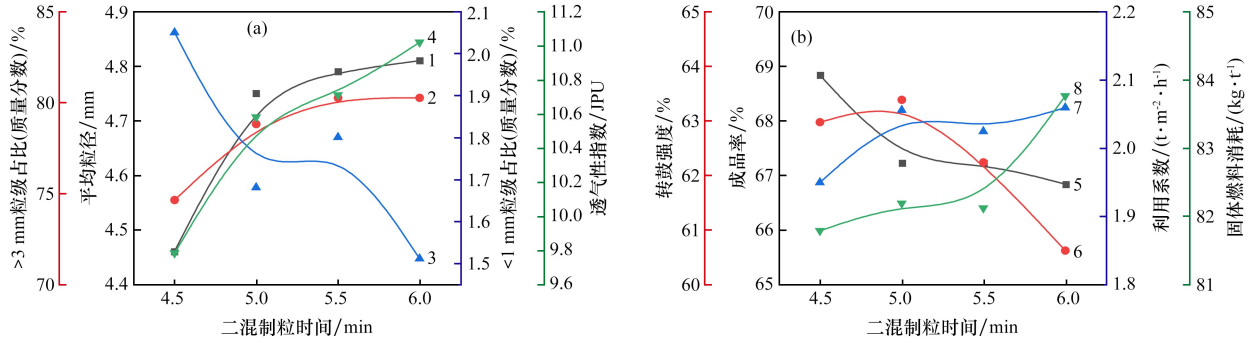


(a) 制粒指标；(b) 烧结指标

1—平均粒径；2—>3 mm 粒级占比；3—<1 mm 粒级占比；4—透气性指数；5—成品率；6—转鼓强度；7—利用系数；8—固体燃料消耗。

图 5　二混并料加料点对制粒及烧结指标的影响

Fig. 5　Effect of the feeding point in secondary mixing and charging on granulation and sintering indices

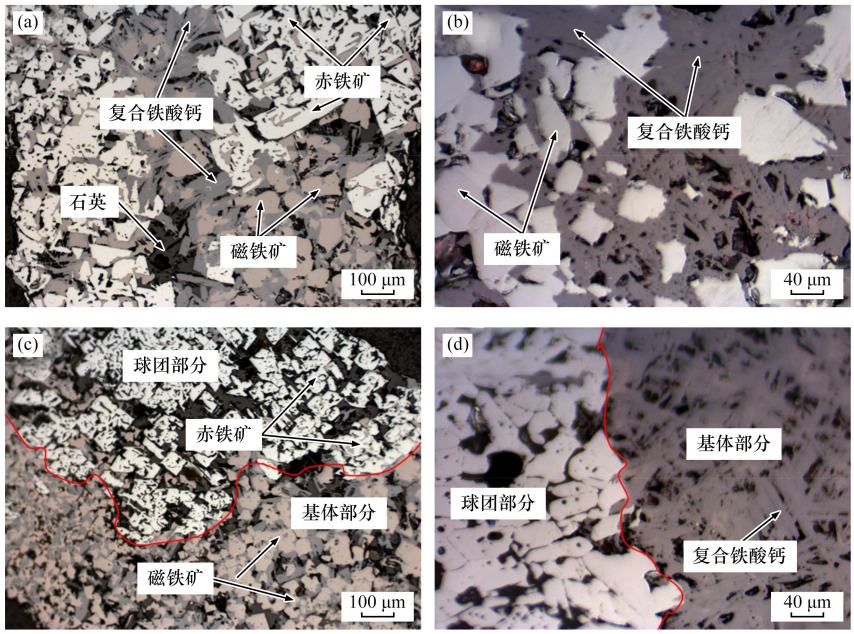


（a）制粒指标；（b）烧结指标

1—平均粒径；2—>3 mm 粒级占比；3—<1 mm 粒级占比；4—透气性指数；5—成品率；6—转鼓强度；7—利用系数；8—固体燃料消耗。

图 6 二混制粒时间对制粒及烧结指标的影响

Fig. 6 Effect of granulation time in secondary mixing on granulation and sintering indices



（a）、（b）方案 1；（c）、（d）方案 2

图 7 方案 1 与方案 2 烧结矿矿相结构

Fig. 7 Mineral phase structure of sinter under scheme 1 and scheme 2

质[21]；预造粒工艺改善了 SFCA 结晶度，使其呈现交织的片状与针状形态，有效填充孔隙并增强结合强度。此提升源于预造粒颗粒提供的结构支撑优化了物料透气性，进而强化了烧结过程。

3 结 论

（1）由于梅精矿粒度细且易泥化，常规制粒烧结过程中，其配比不宜超过 12%，否则会导致制粒效果严重恶化，料层透气性和烧结矿产、质量指标下降；粉尘因粒度超细且表面疏水，不宜直接添加在烧结中。

（2）预制粒工艺能够显著强化梅精矿和粉尘的制粒效果，采用预制粒工艺后，能够将梅精矿配比由 12% 增至 28%，粉尘配比由 0 增至 3.5%，且所得烧结矿产、质量指标优异。

（3）预制粒料与常规制粒料在二次圆筒混合机入口同步加入后保持 5 min 混合时间的并料方式可有效提升混合料粒度与透气性，可兼顾烧结利用系数与成品率，实现最佳协同效果。

（4）采用预制粒烧结工艺后，预制粒料区域中磁精矿几乎完全氧化形成致密的赤铁矿，赤铁矿再结晶连接显著提升了预制粒颗粒强度，同时

基体料中产生的低熔点复合铁酸钙液相熔蚀渗入颗粒间隙实现牢固结合，显著提高了烧结矿强度。

参考文献：

[1] LIN Y C, YANG H H, MA L W, et al. Low-carbon development for the iron and steel industry in China and the world:Status quo, future vision, and key actions[J]. Sustainability, 2021, 13(22): 12548.

[2] REN L, ZHOU S, PENG T D, et al. A review of CO_2 emissions reduction technologies and low-carbon development in the iron and steel industry focusing on China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 143: 110846.

[3] 王广，张宏强，苏步新，等. 我国钢铁工业碳排放现状与降碳展望[J]. 化工矿物与加工，2021，50(12)：55－64.
WANG Guang, ZHANG Hongqiang, SU Buxin, et al. The current situation of carbon emission and carbon reduction in Chinese steel industry[J]. Industrial Minerals & Processing, 2021, 50(12): 55－64.

[4] ZHANG C, LI L X, YUAN Z T, et al. Probing the effect of particle imperfections on the sliming of siderite in carbonate-bearing iron ore[J]. Minerals Engineering, 2019, 143: 106014.

[5] 李海英，薛海瑞，李国良，等. 烧结烟气粉尘特性分析[J]. 烧结球团，2025，50(2)：95－102.
LI Haiying, XUE Hairui, LI Guoliang, et al. Analysis on characteristics of sintering gas dust[J]. Sintering and Pelletizing, 2025, 50(2): 95－102.

[6] 朱德庆，王志远，潘建，等. 润磨强化镜铁精粉烧结特性的研究[J]. 钢铁，2007，42(1)：12－16.
ZHU Deqing, WANG Zhiyuan, PAN Jian, et al. Improvement of sintering behaviors of Brazilian specularite concentrate by damp milling[J]. Iron & Steel, 2007, 42(1): 12－16.

[7] HSIEH L H. Effect of iron ore concentrate on sintering properties[J]. ISIJ International, 2017, 57(11): 1937－1946.

[8] SUN C F, MA P S, DENG J Y, et al. Intensive reduction of fuel consumption in the sintering process of double-layered fuel segregation with return fines embedding[J]. Fuel, 2023, 332: 125955.

[9] KAWAGUCHI T, USUI T. Summarized achievements of the porous meso-mosaic texture sinter research project[J]. ISIJ International, 2005, 45(4): 414－426.

[10] 潘建，栾福垒，朱德庆，等. 黏结剂强化高配比镜铁精矿烧结研究[J]. 烧结球团，2016，41(2)：6－11.
PAN Jian, LUAN Fulei, ZHU Deqing, et al. Study on strengthening the high specularite concentrate ratio sintering by adding binding agent[J]. Sintering and Pelletizing, 2016, 41(2): 6－11.

[11] 李孟土，李晓波，朱德庆，等. 高配比镜铁矿粉混合料烧结性能改善[J]. 钢铁研究学报，2018，30(1)：14－20.
LI Mengtu, LI Xiaobo, ZHU Deqing, et al. Improvement of sintering performance of sinter mixtures containing high ratio of specularite fines[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2018, 30(1): 14－20.

[12] 王素平. 铁矿石烧结节能与环保的研究[D]. 武汉：武汉科技大学，2013.
WANG Suping. Study on energy saving and environmental protection in iron ore sintering process[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2013.

[13] 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 and Steel, 2020, 55(5): 1－9.

[14] 胡梦杰，陈铁军，潘料庭，等. 分流制粒协同燃料分加强化红土镍矿烧结试验[J]. 钢铁，2022，57(6)：12－21.
HU Mengjie, CHEN Tiejun, PAN Liaoting, et al. Experiment on strengthening sintering performance of laterite nickel ore by separated granulating and separate fuel adding[J]. Iron and Steel, 2022, 57(6): 12－21.

[15] GAN M, FAN X H, LÜ W, et al. Fuel pre-granulation for reducing NO_x emissions from the iron ore sintering process[J]. Powder Technology, 2016, 301: 478－485.

[16] 朱德庆，钟洋，潘建. 分流预成型强化制粒改善镜铁矿粉烧结性能[J]. 工程科学学报，2015，37(8)：984－993.
ZHU Deqing, ZHONG Yang, PAN Jian. Improving the sintering performance of specularite bearing mixtures by separated pre-agglomeration-sintering processes[J]. Chinese Journal of Engineering, 2015, 37(8): 984－993.

（下转第 203 页）

Status of energy consumption and prospect of consumption reduction technology in blast furnace[J]. Journal of Iron and Steel Research,2023,35(1):1 – 10.

[10] 袁喻兴,闫天一,那洪明,等. 炼铁系统能耗和成本的集成优化及分析[J]. 中国冶金,2022,32(1):97 – 103.
YUAN Yuxing, YAN Tianyi, NA Hongming, et al. Integrated optimization and analysis of energy consumption and cost in ironmaking system[J]. China Metallurgy,2022,32(1):97 – 103.

[11] 生态环境部办公厅. 关于印发《企业温室气体排放核算与报告指南 钢铁行业(CETS—AG—03.01—V01—2024)》等 2 项全国碳排放权交易市场技术规范的通知[EB/OL]. (2025 – 01 – 24)[2026 – 01 – 09]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202501/t20250124_1101316.html.
General Office of the Ministry of Ecology and Environment. Notice on Printing and Distributing Two Technical Specifications for the National Carbon Emissions Trading Market, Including the Guidelines for Accounting and Reporting of Greenhouse Gas Emissions of Enterprises-Iron and Steel Industry (CETS-AG-03.01-V01-2024)[EB/OL]. (2025 – 01 – 24)[2026 – 01 – 09]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202501/t20250124_1101316.html.

[12] 《中国钢铁工业年鉴》编辑委员会. 中国钢铁工业年鉴 2024[M]. 北京:冶金工业出版社,2024.
Editorial committee of China iron and steel industry yearbook. China iron and steel industry yearbook 2024[M]. Beijing:Metallurgical Industry Press,2024.

[13] 陈德荣,张建良,李克江. 绿色低碳钢铁概论——中国钢铁碳中和之路[M]. 北京:冶金工业出版社,2025.
CHEN Derong, ZHANG Jianliang, LI Kejiang. Introduction to green and low-carbon steel:China's steel industry path to carbon neutrality[M]. Beijing:Metallurgical Industry Press,2025.

[14] 范筱玥. 高炉软熔带渣相形成及演变基础研究[D]. 北京:北京科技大学,2022.
FAN Xiaoyue. Study on the formation and evolution of the slag phase in the cohesive zone of blast furnace[D]. Beijing:University of Science and Technology Beijing,2022.

[15] 杜学强,周继程,上官方钦,等. 基于碳素流分析铁前系统 CO_2 排放及减排措施[J]. 烧结球团,2022,47(1):24 – 28.
DU Xueqiang, ZHOU Jicheng, SHANGGUAN Fangqin, et al. CO_2 emission and reduction measures of pre-iron system based on carbon flow analysis[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(1):24 – 28.

(上接第 135 页)

[17] 何木光,张义贤,宋剑,等. 钒钛磁铁精矿预制粒烧结研究[J]. 中国冶金,2012,22(11):35 – 38.
HE Muguang,ZHANG Yixian,SONG Jian,et al. Sintering of V-Ti magnetite concentrate particles prefabricated[J]. China Metallurgy,2012,22(11):35 – 38.

[18] 杨永斌,唐培垚,王林,等. 预造球强化难制粒精矿烧结工艺[J]. 烧结球团,2024,49(3):25 – 32.
YANG Yongbin,TANG Pieyao,WANG Lin,et al. Process of pre-pelletizing strengthened sintering of refractory concentrates[J]. Sintering and Pelletizing,2024,49(3):25 – 32.

[19] 朱德庆,丑建磊,潘建,等. 圆筒混合机粘料机理研究[J]. 烧结球团,2020,45(5):14 – 18.
ZHU Deqing,CHOU Jianlei,PAN Jian,et al. Mechanism research of material bonding on the drum mixer[J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(5):14 – 18.

[20] JIANG T,XU L P,ZHONG Q,et al. Efficient preparation of blast furnace burdens from titanomagnetite concentrate by composite agglomeration process[J]. JOM, 2021,73(1):326 – 333.

[21] JIANG T,YU Z W,PENG Z W,et al. Preparation of BF burden from titanomagnetite concentrate by composite agglomeration process (CAP)[J]. ISIJ International,2015,55(8):1599 – 1607.