烧结

预造球强化难制粒精矿烧结工艺

杨永斌，唐培垚，王 林，钟 强，李 骞，姜 涛
（中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083）

摘要：随着进口铁矿石价格的增长，充分利用廉价的难处理铁矿资源成为钢铁企业降本增效的关键。本文针对难制粒精矿在烧结中利用率低的问题，在复合造块法的基础上开发了预造球工艺，显著提高了难制粒精矿的配入量，有效改善了制粒效果与烧结产、质量指标。研究表明，在难制粒精矿配比达到36%时，采用预造球制粒可以使准颗粒平均粒径提高 1.53 mm，透气性指数提高 0.17。在此基础上，垂直烧结速度提高 13.97 mm/min，利用系数提高 0.815 t/(m²·h)，转鼓强度提高 3.39%。预造球烧结中，由于难制粒精矿的分离，常规制粒料部分的制粒性能得到优化，局部碱度得到提高，形成大量的针柱状铁酸钙。在常规制粒料与球团料交界处固相固结与液相固结同时存在，铁酸钙与铁氧化物相互交织，形成球团嵌入式分布的成品矿结构，具有良好的成矿效果和强度性能。

关键词：烧结；制粒；预造球；复合造块法；难制粒精矿
中图分类号：TF046.6 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)03－0025－08
doi：10.13403/j.sjqt.2024.03.037

Process of pre-pelletizing strengthened sintering of refractory concentrates

YANG Yongbin, TANG Pieyao, WANG Lin, ZHONG Qiang, LI Qian, JIANG Tao
(School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: With the increase of imported iron ore prices, making full use of cheap refractory iron ore resources has become the key for iron and steel enterprises to reduce costs and increase efficiency. Aiming at the problem of low utilization rate of refractory concentrates in sintering, a pre-pelletizing process based on composite agglomeration process is developed, which significantly increases the dosage of refractory concentrates and effectively improves the pelletizing effect and sintering output and quality index. The results show that, when the proportion of refractory concentrates reaches 36%, the average particle size of quasi-particles can be increased by 1.53 mm and the permeability index can be increased by 0.17 by pre-pelletizing and pelletizing. On this basis, the vertical sintering speed is increased by 13.97 mm/min, the utilization coefficient is increased by 0.815 t/(m²·h), and the drum strength is increased by 3.39%. In pre-pelletizing sintering, due to the separation of refractory concentrates, the granulation performance of conventional pelletizing material part is optimized, the local alkalinity is improved, and a large number of needle-like calcium ferrite is formed. At the junction of conventional granulation and pellets material, solid-phase consolidation and liquid-phase consolidation exist at the same time, and calcium ferrite and iron oxides are intertwined to form a finished ore structure with pellet embedded distribution, which has good mineralization effect and strength performance.

Key words: sintering; granulation; pre-pelletizing; composite agglomeration process; refractory granulation concentrates

在我国超过 70% 的铁矿石在高炉冶炼之前需要通过烧结进行造块[1]。我国铁矿资源丰富，但

收稿日期：2023－01－18；**修回日期**：2023－03－27
基金项目：湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ40776)
作者简介：杨永斌(1969—)，男，教授，从事钢铁冶金、湿法冶金、资源综合利用方面的研究。
通信作者：王 林(1993—)，男，博士，从事钢铁冶金、资源综合利用方面的研究。

绝大多数都是低品位铁矿，需要通过选矿来提高铁品位。选矿处理后的铁矿石通常为粒度细、烧结性能差的难制粒精矿，在烧结中大量配入会影响制粒过程中水分的扩散，恶化制粒效果和料层透气性，进而影响烧结产、质量指标[2]，所以中国的钢铁企业需要大量进口国外的铁矿石来满足烧结生产的需求。近些年进口铁矿石价格呈现飙升态势，钢铁企业不得不将更多的难制粒精矿应用到烧结过程中来降低生产成本。因此，如何强化难制粒精矿的制粒和烧结性能成为钢铁冶金领域研究的热点问题。目前，其主要的强化方式为强化制粒过程和难制粒精矿分流处理[3]。

在强化制粒过程的研究中，JI 等[4]发现在全精矿烧结中使用强力混合机可以促进水和生石灰的均匀分散，改善制粒效果；RAJAK 等[5]发现在制粒过程中使用90 ℃的热水可以促进生石灰的消化；ZHANG[6]采用配加褐铁矿的方式强化难制粒镜铁精矿的烧结；潘建等[7]、李孟土等[8]、王素平[9]在制粒过程中添加不同种类的黏结剂来强化精矿制粒。

其分流处理即改进难制粒精矿的制粒性能后再与常规制粒料混合制粒。HUANG 等[10]开发了预润湿技术，其在维持总水分不变的情况下将细粒精矿提前润湿；王剑[11]使用圆筒混料机预先将铁精矿制粒后再配入其他烧结料；PAN 等[12-13]使用辊压机将镜铁精矿制成一定强度的条状物，有效解决了镜铁精矿表面光滑难制粒的问题。此外，分流制粒[14]、MEBIOS[15]、涂层制粒[16]、小球烧结[17]等制粒方法针对不同性质的难制粒精矿也起到了不同程度的强化效果。

中南大学开发的复合造块法在多种难制粒精矿处理上得到应用[18]，该方法可以实现高比例难制粒精矿的配入，解决酸性炉料短缺的问题。但复合造块法中球团的粒径和质量远大于常规的烧结准颗粒，这使得球团在传统烧结布料系统中极易受到较强的落下和挤压冲击而发生破碎[19]。本文在复合造块法的基础上提出了预造球工艺，该工艺将所用球团粒径进一步减小，并采用群料落下脱粉率和干燥脱粉率评价准颗粒的强度。预造球工艺中球团粒径更接近于常规烧结的准颗粒，可以有效避免因粒径差异而产生的布料偏析；同时，由于自身质量小，球团抵抗落下冲击的能力更强，且大颗粒物料可以在烧结料层中起到支撑作用，进一步减少球团的破损。

本文以 M 精矿为主要研究对象，对比了常规制粒和预造球制粒下 M 精矿配比对制粒效果和烧结产、质量指标的影响，揭示了预造球方法对难制粒精矿的制粒过程和烧结过程的强化机理，有助于扩大资源利用范围，解决难制粒精矿利用率低的问题。

1 原料性能和研究方法

1.1 原料性能

试验使用的铁矿为混匀矿和 M 精矿，其他原料为白云石、生石灰、灰石、焦粉和膨润土，原料主要化学成分如表 1 所示。M 精矿是一种本土自产铁精矿，原料成本低，制粒性能较差，实际生产中配入量一般不能超过 15%；混匀矿是由多种进口矿石混合得到，铁品位相对较高。白云石、生石灰和灰石用作烧结中的熔剂，焦粉用作烧结的燃料，膨润土用作 M 精矿预造球的黏结剂。

M 精矿和混匀矿的粒度组成分别如表 2、表 3 所示。其中，M 精矿中 <0.074 mm 的粒级质量分数为 84.86%，粒度较细，适合采用造球的方式进行造块。混匀矿中 >3 mm 的粒级质量分数为 56.54%，粒度较粗，冷态透气性好，适合直接作为烧结原料。

两种铁矿的 XRD 检测结果如图 1 所示。由图 1 可知，混匀矿的主要成分是赤铁矿和褐铁矿，以及少量脉石；M 精矿的组成更为复杂，主要成分为磁铁矿，赤铁矿和菱铁矿，以及少量脉石。M 精矿的宏观样貌和显微结构如图 2 所示。由图 2 可看出，与粒度组成以及 XRD 结果相对应，M 精矿是一种粒度极细，成分复杂的铁精矿，铁矿物主要为粒状，排列较致密，磁铁矿边缘或沿着解理缝氧化生成较多的假象赤铁矿，同时还含有部分菱铁矿。

1.2 研究方法

预造球烧结的工艺流程如图 3 所示。造球过程在∅1 000 mm 的圆盘造球机中进行，圆盘转速为25 r/min，造球时间为15 min。向M精矿中加

表 1　原料主要化学成分(质量分数)

Table 1　Main chemical compositions of raw materials　%

原料名称	TFe	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	P	S	烧损
M 精矿	57. 55	5. 21	1. 11	2. 82	0. 97	0. 092	0. 320	6. 86
混匀矿	58. 63	5. 32	1. 76	0. 30	0. 14	0. 068	0. 057	6. 18
白云石	0. 37	2. 23	0. 59	30. 42	19. 56	0. 026	0. 007	44. 69
焦粉	1. 35	7. 10	—	1. 35	0. 20	0. 039	0. 750	83. 07
灰石	0. 50	2. 58	0. 77	51. 95	1. 15	0. 014	0. 130	38. 05
生石灰	0. 16	1. 08	0. 18	87. 57	1. 26	0. 018	0. 004	7. 80
膨润土	5. 27	54. 01	14. 96	5. 22	3. 18	0. 092	0. 260	10. 59

表 2　M 精矿的粒度组成(质量分数)

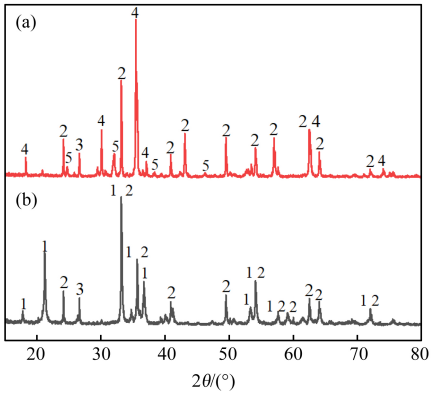
Table 2　Particle size composition of M concentrate　%

>0. 15 mm	(0. 10,0. 15] mm	(0. 074,0. 10] mm	(0. 045,0. 074] mm	≤0. 045 mm
0. 72	5. 47	8. 95	13. 01	71. 85

表 3　混匀矿的粒度组成(质量分数)

Table 3　Particle size composition of mixed ore　%

>8 mm	(5,8] mm	(3,5] mm	(1,3] mm	(0. 5,1] mm	(0. 15,0. 5] mm	≤0. 15 mm
10. 31	26. 10	20. 13	23. 42	3. 98	8. 02	8. 04

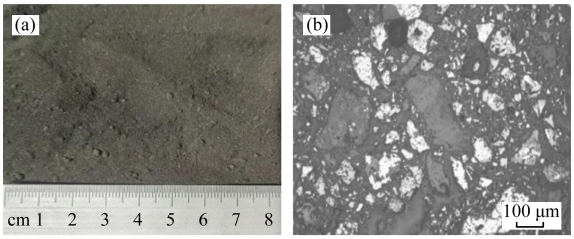


(a) 混匀矿；(b) M 精矿

1—褐铁矿；2—赤铁矿；3—石英；4—磁铁矿；5—菱铁矿。

图 1　M 精矿和混匀矿的 XRD 图像

Fig. 1　XRD images of M concentrate and mixed ore



(a) 宏观样貌；(b) 显微结构

图 2　M 精矿的宏观样貌与显微结构

Fig. 2　Macroscopic appearance and microstructure of M concentrate

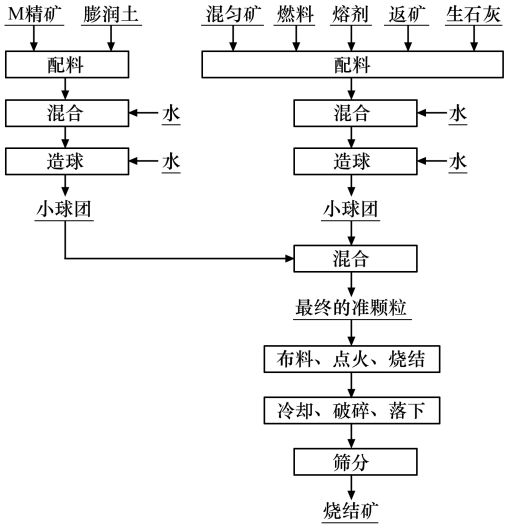


图 3　预造球烧结的工艺流程

Fig. 3　Process of pre-pelletizing sintering

入一定量的水与质量分数为 2. 0% 膨润土后充分混匀，制成粒径为 4 ~ 6 mm、生球水分为 8. 0% ~ 8. 5% 的小球团。除 M 精矿外的原料人工混匀后在圆筒混料机中制粒 5. 5 min，然后将 M 精矿生球均匀加到混料机中混匀 0. 5 min，制成最终准颗粒。将准颗粒均匀取样后进行水分、粒度、透气性以及强度指标检测。

制粒效果的评价指标包括：粒度组成、平均粒径、透气性指数、群料落下脱粉率和干燥脱粉

率。其中，群料落下脱粉率用来评价准颗粒抵抗落下冲击的能力，具体测定方法：每次称取500 g物料，在2 m高度处重复落下3次(模拟梭式布料器到料仓、料仓到圆辊布料器，圆辊布料器到多辊布料器的过程)。然后测量颗粒的粒度组成，落下前与落下后>3 mm粒级质量占比的减小量即为群料落下脱粉率。干燥脱粉率用来评价准颗粒在烧结过程中抵抗干燥冲击的能力，具体测定方法：每次称取100 g准颗粒，在300 ℃，气流1.4 m/s的环境中干燥3 min，将干燥前与干燥后>3 mm粒级质量占比的减小量作为干燥脱粉率。

烧结杯试验使用直径为180 mm的烧结杯，料层高度为760 mm。采用质量配料法，固定生石灰用量为4.0%，焦粉用量为5.0%，烧结矿碱度为1.8，MgO质量分数为1.4%，具体参数见表4。待试验结束后对成品矿的性能和矿相进行检测分析。烧结产、质量指标的测定主要包括垂直烧结速度、成品率、转鼓强度、焦粉燃耗以及利用系数。

表4 烧结杯试验参数

Table 4 Parameters of the sintering cup experiment

点火时间/min	点火温度/℃	点火负压/kPa	烧结负压/kPa	冷却负压/kPa	冷却时间/min
1.5	1 050	8.0	15.5	8.0	3

2 结果与分析

2.1 预造球对制粒效果的影响

在最适宜制粒条件下，M精矿配比对常规制粒和预造球制粒的影响如表5所示。由表5可知，在常规制粒条件下，当M精矿比例从12%提高到36%时，制粒效果严重恶化，准颗粒粒径与强度明显降低。而预造球制粒条件下，随M精矿配比的增加，制粒效果呈现优化的趋势。同比添加36% M精矿的常规制粒，预造球制粒下准颗粒平均粒径提高1.53 mm，透气性指数提高0.17，群料落下脱粉率下降13.30%，干燥脱粉率降低7.35%。两者准颗粒样貌如图4所示。由图4可知，在36% M精矿配比的条件下，常规制粒制成的准颗粒粒径小，且细粒级颗粒量高；预造球制粒制得的准颗粒平均粒径大，细粒级颗粒含量低，证明预造球制粒在高配比精矿的条件下更有利于制粒效果的改善。

2.2 预造球对烧结效果的影响

常规制粒与预造球制粒下M精矿配比对烧结产、质量指标的影响如图5所示。由图5可知，常规烧结中，随M精矿配比的增加，烧结产、质量指标呈现明显的恶化。其中，烧结速度和利用系数下降最为明显，当M精矿配比从12%提高到36%时，烧结速度下降11.50 mm/min，利用系数下降0.743 t/(m^2·h)。采用预造球工艺则可以避免高比例M精矿配入后烧结产、质量指标恶化的问题，当M精配比从12%提高到36%时，烧结速度从23.73 mm/min变为25.33 mm/min，利用系数从1.441 t/(m^2·h)变为1.434 t/(m^2·h)，波动较小且维持在较高水平。与36% M精矿配比条件下常规制粒烧结相比，垂直烧结速度提高13.97 mm/min，利用系数提高0.815 t/(m^2·h)，转鼓强度提高3.39%。显然，预造球工艺可以有效改善难制粒精矿的烧结特性。

表5 M精矿配比对常规制粒和预造球的影响

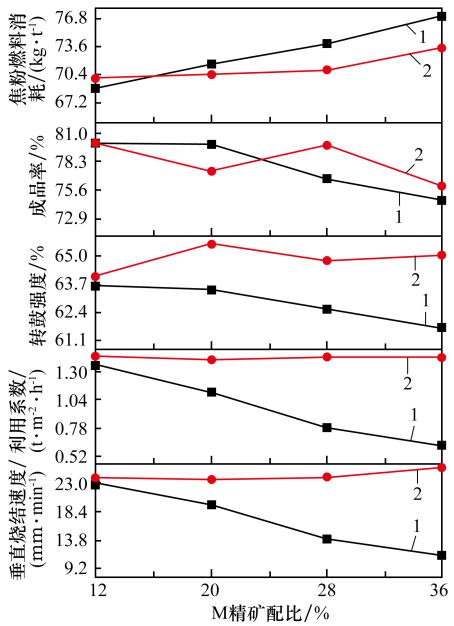
Table 5 Effect of the proportion of M concentrate on conventional granulation and pre-pelletizing

M精矿配比(质量分数)/%	制粒方式	平均粒度/mm	透气性指数	>3 mm(质量分数)/%	<1 mm(质量分数)/%	群料落下脱粉率/%	干燥脱粉率/%
12	常规	4.08	0.27	65.49	2.55	15.40	8.05
	预造球	4.27	0.31	67.41	1.40	12.28	7.59
20	常规	3.76	0.21	46.79	3.91	18.93	12.19
	预造球	4.35	0.31	69.85	1.53	11.42	7.03
28	常规	3.53	0.17	37.69	8.15	19.71	13.76
	预造球	4.55	0.30	72.25	1.04	7.52	6.54
36	常规	3.25	0.15	31.66	11.28	20.58	14.02
	预造球	4.78	0.32	75.08	0.98	7.28	6.67



图 4　36%M 精矿配比下预造球制粒(左)与常规制粒(右)的准颗粒样貌

Fig. 4　Morphology of quasi particles of pre-pelletizing (L) and conventional granulation (R) at 36% M concentrate proportion



1—常规制粒烧结；2—预造球烧结。

图 5　常规制粒烧结和预造球烧结条件下 M 精矿配比对烧结产、质量指标的影响

Fig. 5　Influence of proportion of M concentrate on sintering output indexes and quality indexes of conventional granulation sintering and pre-pelletizing sintering

2.3　强化机理分析

2.3.1　制粒性能强化机理

不同原料结构下准颗粒制粒效果的对比如表 6 所示。由表 6 可知：与添加 12% M 精矿制得的准颗粒相比，M 精矿球团(以下简称 M 球团)的粒径分布和颗粒强度更好，配入后可以提高最终准颗粒的平均粒径与颗粒强度，进而改善料层透气性；此外，在高配比精矿条件下，M 球团的分离可以有效提高准颗粒平均粒径和强度。

工业混合方式对预造球制粒效果的影响如表 7 所示。其中，圆筒混料机混合即常规制粒料制粒 5.5 min 后将 M 球团配入圆筒混料机，再混匀 0.5 min；皮带混合即常规制粒料制粒 6 min 后直接在工业运料皮带上与 M 球团混合。由表 7 可以看出，在圆筒混料机中配入球团有利于促进制粒效果的改善，减少细粒物料的含量，这是因为 M 球团在加入圆筒混料机混合时可以起到核颗粒的作用，使细颗粒粘附在球团表面，从而减少准颗粒中细粒级料的含量(图 6)。当未分离造球的 M 精矿配比从 0% 提高到 7%、14% 时，圆筒混料机混合相较于皮带混合，准颗粒平均粒度分别提高 0.12、0.22、0.37 mm，<1 mm 粒级质量分数下降量分别为 2.04%、2.94% 和 3.15%，证明细粒物料含量越高，M 球团配入后作为核颗粒的作用更加明显，对制粒效果的改善更加突出。



图 6　准颗粒中 M 球团的样貌

Fig. 6　Appearance of M pellets in quasi particles

表 6　不同原料结构制粒效果的对比

Table 6　Comparison of granulation effects of different raw material structures

试验序号	制粒原料	平均粒度/mm	>3 mm(质量分数)/%	<1 mm(质量分数)/%	透气性指数	群料落下脱粉率/%	干燥脱粉率/%
1	M 球团	5.48	100.00	0.00	0.35	4.64	3.45
2	12% M 精矿 +88% 其他原料	4.08	65.49	2.55	0.27	15.40	8.05
3	28% M 精矿 +72% 其他原料	3.53	37.69	8.15	0.17	19.71	13.76
4	72% 其他原料	4.01	56.69	4.28	0.25	14.75	8.06

表 7 混合方式对预造球制粒效果的影响

Table 7 Influence of mixing methods on granulating effect of pre-pelletizing

制粒原料	混合方式	平均粒度/mm	>3 mm(质量分数)/%	<1 mm(质量分数)/%
28% M 球团 +72% 其他原料	圆筒混料机	4.51	71.86	1.04
	皮带	4.39	68.82	3.08
21% M 球团 +7% M 精矿 +72% 其他原料	圆筒混料机	4.42	69.48	1.17
	皮带	4.20	64.31	4.11
14% M 球团 +14% M 精矿 +72% 其他原料	圆筒混料机	4.34	68.28	2.37
	皮带	3.97	59.08	5.52

综上，预造球强化难制粒精矿制粒的原理如图 7 所示。由图 7 分析可知，常规制粒中，在难制粒精矿配比较低时，核颗粒占比高，原料平均粒度大，水分扩散相对容易，未参与制粒的细小颗粒较少；在难制粒精矿配比较高时，核颗粒的占比降低，更多的细粒物料无法粘附在核颗粒上，使得未参与制粒的细小颗粒含量增加，且颗粒之间难以形成液相连接桥，使得准颗粒结构松散，强度变差。预造球可以避免精矿配入后带来的不利影响，精矿分离后常规制粒料制粒效果得到优化，而 M 球团相较于常规准颗粒粒径更大，强度更好，且在混合过程中可以起到核颗粒的作用，可通过促进细颗粒的粘附来降低细粒物料占比。

2.3.2 烧结性能强化机理

常规制粒条件下配入 28% M 精矿的烧结矿微观结构如图 8(a)、(b)所示。由图 8(a)、(b)可以看出，高配比 M 精矿条件下烧结矿内部形成大孔薄壁结构。这是由于 M 精矿中存在一定比例的菱铁矿，菱铁矿中的碳酸盐在高温下发生分解，导致烧结料层局部的爆裂和严重的收缩，影响烧结矿的成品率以及转鼓强度。同时，黏结相中铁酸钙含量少，且大多分布在孔洞周围，钙铁橄榄石、硅酸钙含量相对较多，这是成品烧结矿强度较差的主要原因。

28% M 精矿预制粒条件下的成品烧结矿的微观结构分别如图 8(c)、(d)、(e)、(f)所示。通常来说，烧结碱度要维持在 1.8 ~ 2.2 以保证黏结相中生成更多的铁酸钙，从而保证烧结矿具有良好的机械强度。将 M 精矿分离造球后，制成准颗粒的总碱度不变，但常规制粒料的局部碱度得到提升，这使得黏结相中钙铁橄榄石、硅酸钙含量减少，铁酸钙含量显著提高，形成大量针状铁酸钙与磁铁矿交织的结构[图 8(c)、(d)]所示，提高了成品烧结矿的强度。同时，预造球使得 M 精矿致密化，堆密度提高，抑制了料层收缩空间，进而减少了烧结矿中的薄壁大孔结构。

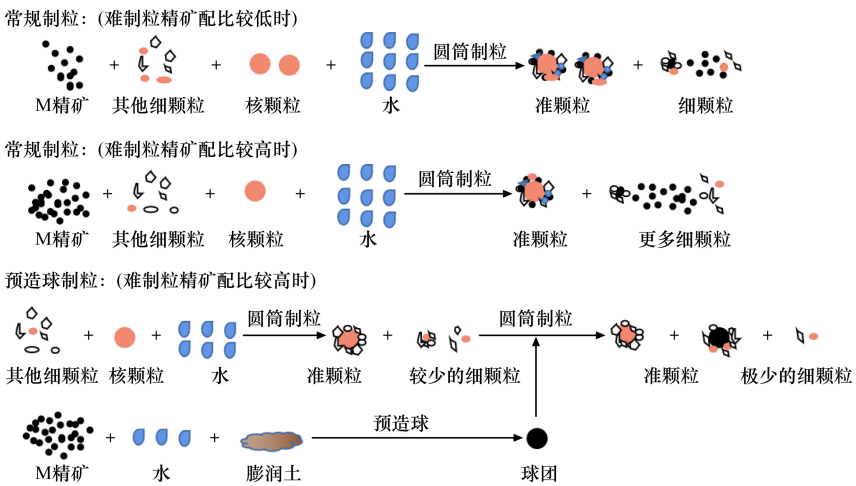
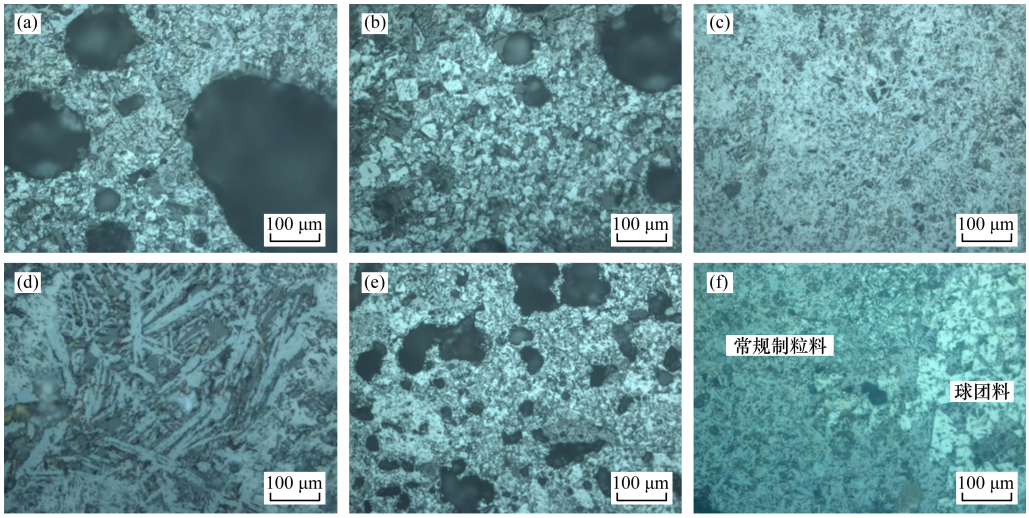


图 7 预造球强化烧结制粒机理示意

Fig. 7 Mechanism diagram of strengthening sintering granulation with pre-pelletizing



（a）、（b）常规制粒烧结；（c）、（d）预造球烧结常规制粒料部分；（e）预造球烧结球团料部分；（f）预造球烧结常规制粒料与球团料连接处

Fe_2O_3—白色互联状；Fe_3O_4—灰黑色；钙铁橄榄石—灰白色菱形；铁酸钙—淡蓝色针柱状；硅酸钙—浅灰色；孔洞—黑色不规则状。

图 8　常规制粒烧结与预造球烧结成品烧结矿微观结构

Fig. 8　Microstructure of finished sintered ore produced by conventional granulation sintering and pre-pelletizing sintering

此外，M 精球团的固结方式为赤铁矿再结晶固相固结，且赤铁矿晶粒尺寸大，边缘润滑，结晶状况良好[图 8(e)]。同时发现，成品烧结矿在常规制粒料与球团料的交界处，固相固结与液相固结同时存在，铁酸钙与赤铁矿相互交结[图 8(f)]，形成 M 精矿球团嵌入常规制粒料的结构，具有良好的成矿效果和强度性能。

3　结　论

（1）预造球可以有效解决高比例 M 精矿配入后出现的制粒效果恶化和烧结产、质量指标恶化的问题。相较于常规制粒，在 36% M 精矿配比的条件下，预造球制粒使准颗粒平均粒径提高 1.53 mm，透气性指数提高 0.17，群料落下脱粉率下降 13.30%，干燥脱粉率降低 7.35%，垂直烧结速度提高 13.97 mm/min，利用系数提高 0.815 t/(m^2·h)，转鼓强度提高 3.39%。

（2）将 M 精矿分离后，其他物料的制粒效果得到改善。同时，预造球制备的球团相较于常规准颗粒而言，粒径更大且强度更好，在混合过程中可以发挥核颗粒的作用，粘附未制粒的细小颗粒，进一步改善制粒效果。

（3）预造球烧结可以有效减少高配比 M 精矿下烧结矿内部薄壁大孔结构的产生，提高常规制粒料的局部碱度，使得黏结相中针状铁酸钙含量明显提高。球团与常规制粒料呈现嵌入式分布的成品烧结矿结构，具有良好的强度性能，使得烧结产、质量指标显著提高。

参考文献：

[1] 叶匡吾. 高炉炉料结构与精料[J]. 烧结球团,2001,26(3):6－7.
YE Kuangwu. BF burden composition and burden materials preparation [J]. Sintering and Pelletizing, 2001,26(3):6－7.

[2] ZHOU Mingxi, ZHOU Hao, O'DEA D P, et al. Characterization of granule structure and packed bed properties of iron ore sinter feeds that contain concentrate [J]. ISIJ International,2017,57(6):1004－1011.

[3] 周文涛,胡俊鸽,郭艳玲. 国外烧结球团突破性技术研究进展[J]. 烧结球团,2015,40(2):1－6.
ZHOU Wentao, HU Junge, GUO Yanling. Research progress about foreign breakthrough sintering & pelletizing technologies [J]. Sintering and Pelletizing, 2015,40(2):1－6.

[4] JI Zhiyun, ZHANG Yixiong, GAN Min, et al. Importance of intensive mixing on sintering with fine-grained iron ore

materials: characterization and function mechanism[J]. Journal of materials research and technology, 2020, 9(6): 14443 – 14453.

[5] RAJAK D K, SINGHAI M, SAHU R, et al. Effect of mixing pre-heated water on granulation and iron ore sinter properties[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2021, 74(7): 1611 – 1622.

[6] ZHANG Feng, ZHU Deqing, PAN Jian, et al. Improving the sintering performance of blends containing Canadian specularite concentrate by modifying the binding medium [J]. International Journal of Minerals, 2018, 26(6): 598 – 608.

[7] 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.

[8] 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. Journal of Iron and Steel Research[J]. 2018, 30(1): 14 – 20.

[9] 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 environment protection in iron ore sintering process [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.

[10] HUANG Xiaobo, LÜ Xuewei, BAI Chenguang, et al. Effect of pre-wetting treatment on the granulation behavior of iron ore fines[J]. ISIJ International, 2014, 54(12): 2721 – 2727.

[11] 王剑. 预制粒强化细粒铁精矿烧结的技术研究[D]. 长沙:中南大学,2014.
WANG Jian. Improving sintering performance of fine iron ore concentrate by pre-granulation technology[D]. Changsha: Central South University, 2014.

[12] PAN Jian, ZHU Deqing, HAMILTON P, et al. Improving granulating and sintering performance by pretreating specularite concentrates through mechanical activation [J]. ISIJ International, 2013, 53(12): 2013 – 2017.

[13] ZHU Deqing, SHI Benjing, PAN Jian, et al. Effect of pre-briquetting on the granulation of sinter mixture containing high proportion of specularite concentrate [J]. Powder Technology, 2018, 331: 250 – 257.

[14] 王兆才,周志安,何国强,等. 基于返矿分流的烧结强化制粒技术研究[J]. 烧结球团,2018,43(4):12 – 16.
WANG Zhaocai, ZHOU Zhian, HE Guoqiang, et al. Study on process of strengthing granulation based on sinter returns and BF returns shunting [J]. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(4): 12 – 16.

[15] YAMAGUCHI Y, KAMIJIO C, MATSUMURA M, et al. Improvement of permeability of sintering bed by adding dry particles to granulated raw materials[J]. ISIJ International, 2013, 53(9): 1538 – 1544.

[16] KAMIJO C, HARA M, YAMAGUCHI Y, et al. Technology for productivity improvement of sintering based on designing of composite granulation and bed structure of sinter mixture[J]. ISIJ International, 2013, 53(9): 1497 – 1502.

[17] KUMARS, JAISWAL A, SIDDARAJU M, et al. A novel sintering process for porous iron ore sintering with enhanced productivity[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2022, 39(2): 863 – 874.

[18] 张元波,杜明辉,李光辉,等. 复合造块法在难处理含铁资源中的应用新进展[J]. 烧结球团,2016,41(4):39 – 44.
ZHANG Yuanbo, DU Minghui, LI Guanghui, et al. New advances on application of composite agglomeration process in hard-to-treat iron-bearing mineral resources [J]. Sintering and Pelleting, 2016, 41(4): 39 – 44.

[19] 赵彬. 包钢复合造块的布料试验研究[J]. 包钢科技,2009,35(2):21 – 23.
ZHAO Bin. Experimental research on the distribution process of hybrid sinter-pellet[J]. Science & Technology of Baotou Steel, 2009, 35(2), 21 – 23.