烧结

铁精粉自成球特性及其改善方法

牛长胜[1]，寇明银[2]
(1. 宝山钢铁股份有限公司 制造部，上海 201900;
2. 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: 在烧结混合料中配加一定比例的铁精粉，将导致混合料中黏附粉占比大幅升高，进而恶化烧结料层透气性，最终影响烧结矿产、质量。为了避免配加精粉后料层透气性恶化，可通过优化工艺参数改善其成球性来提高烧结料层的透气性。基于此，本文通过测定铁精粉的成球性指数，并在此基础上进一步研究不同粒度精粉的特征、不同生石灰和水分配比下精粉成球性的变化规律，探究强化铁精粉成球性能的措施，最终达到改善混合料层透气性的目的。研究结果表明: 对 4 种铁精粉而言，通过改善其粒度分布特征、生石灰配比、水分配加量均能有效改善其自成球特性，其落下强度、抗压强度和爆裂温度均得到提升。改善铁精粉成球特性的方法: 当 OA 铁精粉磨矿细度小于 0.2 mm 时，适宜生石灰配比为 9.0%，水分配加量为 9.0%; 当 OB 铁精粉磨矿细度小于 0.1 mm 时，适宜生石灰配比为 10.0%，水分配加量为 9.0%; 当 OC 铁精粉磨矿细度小于 0.2 mm 时，适宜生石灰配比为 8.0%，水分配加量为 7.0%; 当 OD 铁精粉磨矿细度小于 0.2 mm 时，适宜生石灰配比为 9.0%，水分配加量为 9.0%。本文研究结果可为改善铁精粉成球性能提供技术依据。

关键词: 烧结料层; 铁精粉; 透气性; 自成球特性; 爆裂温度
中图分类号: TF046.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8764(2025)06-0001-08
doi: 10.13403/j.sjqt.2025.06.090

Self-balling characteristics of iron concentrate powder and its improvement method

NIU Changsheng[1], KOU Mingyin[2]
(1. Manufacturing Department, Baosteel, Shanghai 201900, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Adding a certain proportion of iron concentrate powder to sintering mixtures will lead to a significant increase in the proportion of adhering fines in the mixtures, thereby deteriorating the permeability of the sintering bed and ultimately affecting the output and quality of the sinter. In order to avoid the deterioration of bed permeability caused by the addition of iron concentrate powder, the balling property of the mixture can be improved by optimizing process parameters, thereby enhancing the permeability of the sintering bed. Based on this, in this paper, through determining the balling property index of iron concentrate powder and further studying the characteristics of the iron concentrate powder with different particle sizes as well as the change rule in balling property under different ratios of quicklime and water, the measures to enhance the balling property of iron concentrate powder are explored and the permeability of the mixture bed is finally improved. The study results show that for the four types of iron concentrate powder, improving their particle size distribution characteristics, adjusting the proportion of quicklime, and optimizing the water addition amount can effectively enhance their

收稿日期: 2025-02-08; **修回日期:** 2025-07-20
基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFC2902404)
作者简介: 牛长胜(1975—)，男，高级工程师，从事高炉、烧结和球团配矿及固废返生产利用等方面的研究工作。
通信作者: 寇明银(1988—)，男，教授，硕士生导师，从事低碳炼铁、智能炼铁、氢冶金等方面的研究。

中国知网 https://www.cnki.net

self-balling properties, increase their drop strength, compressive strength, and bursting temperature. Methods for improving the balling characteristics of iron concentrate powder are as follows: When the grinding fineness of OA iron concentrate powder is less than 0.2 mm, the suitable proportion of quicklime is 9.0%, and the water addition amount is 9.0%. When the grinding fineness of OB iron concentrate powder is less than 0.1 mm, the suitable proportion of quicklime is 10.0%, and the water addition amount is 9.0%. When the grinding fineness of OC iron concentrate powder is less than 0.2 mm, the suitable proportion of quicklime is 8.0%, and the water addition amount is 7.0%. When the grinding fineness of OD iron concentrate powder is less than 0.2 mm, the suitable proportion of quicklime is 9.0%, and the water addition amount is 9.0%. The findings of this paper can provide a technical basis for improving the balling performance of iron concentrate powder. The findings of this study can provide a technical basis for enhancing the balling performance of iron concentrate powder.

Key words: sintering bed; iron concentrate powder; permeability; self-balling properties; bursting temperature

目前，我国高炉炉料结构以高比例烧结矿配加少量酸性球团矿或天然块矿为主。烧结矿作为高炉的主要入炉炉料，约占炉料结构的75%左右[1-2]。在整个钢铁流程原、燃料制备环节中，烧结工序的能源消耗和污染物排放占比最高[3-4]。随着节能减排政策的日趋严格以及高炉对原料要求的不断提高，发展高质量烧结矿已成为钢铁企业绿色低碳高质量发展的重要措施之一[5-7]。

随着中国钢铁工业的快速发展，优质铁矿资源的短缺已成为制约烧结矿质量的关键因素[8-11]。铁精矿具有含铁品位高、杂质含量低的特点，尤其是磁铁精矿粉，在氧化时还能够释放出大量的热量。配加磁铁精矿不仅可以改善烧结矿质量，而且具有减少固体燃料消耗的潜力。因此，在烧结过程中配加一定比例的铁精粉是保证烧结矿质量和性能的重要措施[12-16]。铁精粉的成球性能影响烧结料层的透气性，对烧结过程有较大影响。铁矿粉以最大毛细水和最大分子水表征其成球能力，通过成球性指数(K)进行评价。铁矿粉的成球性能与其K值呈正相关，K值越高，成球性越好[17-19]。当烧结条件一定时，铁矿粉的粒度越大，烧结料层的透气性越好，此时的烧结料具有较大的垂直烧结速度；铁矿粉的粒度越小，烧结料的反应性越好，容易生成烧结液相，但颗粒过小或黏附粉占比过大将导致透气性下降。造成烧结矿产、质量指标的下降，同时也会使得气体通过料层的阻力增大，使得烧结抽风的能耗指标随之增加[20-21]。在烧结生产中，配加铁精矿是提升烧结矿产、质量的关键手段。然而，铁精矿的粒度越小、比表面积越大，会显著增加混合料中黏附粉的占比，导致料层透气性恶化，反而制约了产、质量指标的提升。因此，如何在利用铁精矿优势的同时，有效改善料层透气性，成为烧结工艺优化的核心挑战。深入研究铁精矿的自成球性能，优化其在制粒过程中的黏附行为，使其能更有效地包裹核颗粒，是解决这一矛盾、强化制粒效果、实现高产优质烧结的关键技术路径。

铁精粉自身性质如粒度组成、颗粒形貌和黏结剂、水分配加量是影响铁精矿成球性能的主要因素[22-24]。本文首先采用球磨机对4种铁矿粉进行预磨处理，探究铁矿粉粒度分布对成球性能的作用规律；其次，基于优化后的粒度参数研究生石灰配比和水分配加量对其成球性能的影响；最终获得各铁精粉最佳磨矿细度下的生石灰配比和水分配加量，阐明强化成球性能的工艺优化路径。

1 原料特性及研究方法

1.1 原料特性

本研究采用国内某烧结厂使用的4种铁精粉，其主要化学成分如表1所示。由表1可知：OA、OB和OD铁精粉的铁品位均高于65.00%，高于一般铁矿粉，SiO_2质量分数为4%~6%，Al_2O_3含量较低，皆属于中硅低铝矿；OC铁精粉的铁品位较低，SiO_2质量分数高达6.99%，Al_2O_3含量较低，属于高硅低铝矿。

OA、OC和OD铁精粉属于磁铁矿，粒度小且分布均匀，有自结块现象；OB铁精粉属于赤铁矿，颗粒表面较为光滑，无自结块现象。实验室采用分样筛对铁精粉进行粒度分级，使用式(1)所示公式计算铁矿粉平均粒度，测量结果如表2所示。

中国知网 https://www.cnki.net

表 1　铁矿粉的主要化学成分(质量分数)

Table 1　Main chemical composition of iron ores　　%

铁矿粉名称	TFe	FeO	CaO	MgO	SiO_2	Al_2O_3	S	P_2O_5
OA	67.01	24.28	0.30	0.35	5.39	0.38	0.007	0.036
OB	66.59	7.52	0.57	0.45	4.28	0.46	0.015	0.020
OC	62.97	89.58	0.23	1.51	6.99	0.54	0.940	—
OD	65.95	94.09	0.15	—	4.98	—	0.590	—

表 2　各铁矿粉的粒度组成和平均粒度

Table 2　The particle size distribution and average particle size of iron ores

铁矿粉名称	粒度组成(质量分数)/%											平均粒度/mm
	>10 mm	(8,10] mm	(5,8] mm	(3,5] mm	(2,3] mm	(1,2] mm	(0.5,1] mm	(0.25,0.50] mm	(0.125,0.250] mm	(0.063,0.125] mm	≤0.063 mm	
OA	0	0	0.80	1.27	2.23	3.39	2.60	13.60	18.06	45.72	12.33	0.37
OB	0	0	0	0	0	0.17	12.56	43.61	27.09	13.57	3.00	0.33
OC	0.69	0	3.58	3.17	0.50	0.48	6.96	3.53	25.01	24.83	31.25	0.61
OD	0	0.65	0.27	0.71	0.21	1.51	1.57	0.88	20.41	41.87	31.92	0.25

由表 2 可知：上述 4 种铁精粉 <1.0 mm 粒级占比均超过 85%，且粒度主要集中在 0.063 ~ 1.000 mm。将其用于烧结时粒度过小，增加配入量将严重影响烧结料层的透气性，恶化烧结矿产、质量指标。因此，研究其成球行为，促使铁精粉更好地黏附于核颗粒上，对提高料层透气性以改善烧结效果具有一定意义。

$$D_w = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i D_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \tag{1}$$

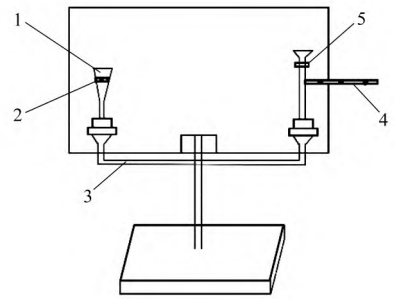
式中：D_w 为颗粒的平均粒度，mm；D_i 为单个颗粒 i 的粒度，mm；n 为颗粒总数(质量)；w_i 为权重因子(占比)，%。

1.2　研究方法

(1) 最大分子水。本文采用压滤法测定最大分子水：取一定量 <0.074 mm 粒级铁精粉置于培养皿，加水至饱和状态后静止 2.0 h；将 5 g 样品放入压模内的滤纸中间，将压模放入液压机，以 10 MPa 的机械压力压出试样中的重力水与毛细水(保留在铁矿粉试样中的水就是最大分子水)，试验后取出试样称重得 G_1(g)；然后将试样于(110 ±5) ℃温度下烘干至恒重得 G_2(g)。重复进行三次试验，测定误差不超过 0.5%，取三次试验的平均值为所得试样的最大分子水(W_1,%)。其计算方法如式(2)所示。

$$W_1 = \frac{G_1 - G_2}{G_1} \times 100\% \tag{2}$$

(2) 最大毛细水(W_2,%)。采用如图 1 所示毛细吸水法装置进行铁矿粉毛细水测量，用以考察细粒级铁矿粉的吸水性。该方法以粒度处于同一水平的多个细颗粒集合而成的颗粒群作为研究对象，以自然吸水率来表征细粒级铁矿粉的吸水性。



1—肖氏漏斗；2—多层孔垫；3—连通器；4—毛细管；5—旋塞。

图 1　毛细吸水法装置示意

Fig. 1　Schematic diagram of capillary water absorption method device

(3) 成球性指数。铁矿粉试样的成球性指数(K,%)的计算方法如式(3)所示。

$$K = \frac{W_1}{W_2 - W_1} \times 100\% \tag{3}$$

(4) 铁矿粉成球性能。试验原料由 <0.25 mm 粒级铁矿粉、生石灰及 4 mm 刚玉球核颗粒构成，

中国知网　https://www.cnki.net

其中刚玉球与黏附粉(铁矿粉+生石灰)按1∶1质量比配制。试验过程采用两段式制粒工艺:第一阶段将原料置入混料机进行2 min干混,第二阶段进行8 min湿混(母球生成2 min,母球长大4 min,生球紧密2 min)。经筛分选取5~8 mm合格生球进行落下强度、抗压强度测试。采用抗压强度测定仪对10个样本开展单球抗压试验,以测试生球抗压强度;令10个样本从1.0 m高度自由落体至钢板以测试落下强度。这两项测试均采用剔除极值后的算术平均值作为最终性能指标。

2 铁精粉的成球特性及其改善方法

2.1 铁精粉自成球特性

散粒物料聚集现象是颗粒间联结力与排斥力共同作用的结果,通常起作用的排斥力是重力。重力越大,颗粒间相互分离的倾向越大。而颗粒间联结力有多种,包括引力、液体作用力、固体联结力、氢键联结力或形状因素等。其中,液体作用力和固体联结力是烧结生料聚结成球的主要作用力,能在比表面积较大的细粉制粒中抵消排斥力而表现出较大的聚结能力[25]。

铁矿粉的成球性指数是评价其自成球性能的重要指标。各铁精粉的表面性质如表3所示。根据表3结果,4种铁精粉的成球性指数大小:OA > OC > OD > OB。OB铁精粉颗粒表面光滑呈片状、结构致密、成球性较差,使得其自身难以成球也难以黏附于其它矿物颗粒表面。此外,OB铁精粉的最大分子水和最大毛细水均远低于其余三种铁精粉,成球性指数仅为0.052,属于无成球性铁矿粉;其余三种铁精粉的成球性指数均大于0.8,属于优等成球性铁矿粉[26-27]。

表3 各铁精粉的表面性质

Table 3 The surface properties of each iron concentrate powder

铁矿粉名称	最大分子水/%	最大毛细水/%	成球性指数
OA	8.3	16.7	0.987
OB	0.5	10.4	0.052
OC	7.2	16.0	0.917
OD	8.0	16.7	0.825

基于上述各铁精粉的成球性指数,进一步研究强化铁精粉成球性能的最佳工艺操作。对铁精粉进行预磨处理,研究不同粒度条件铁精粉成球性能的变化规律。在此基础上,研究生石灰配比、水分配加量对铁精粉成球性能的影响。

2.2 铁精粉粒度对其成球性能的影响

采用行星式球磨机改变全粒级铁精粉的粒度分布,研究粒度对其成球性能的影响规律。不同球磨时间下铁精粉的平均粒度和成球性指数如表4所示。由表4可见:经0.5 h球磨处理后,铁精粉的平均粒度较初始值显著降低,降幅超44.8%;当球磨时间延长至1.0 h时,粒度降幅减小至6.5%;继续增加球磨时间至2.0 h,各铁精粉的平均粒度波动范围在3.0%左右,此时OB铁精粉的磨矿细度小于0.1 mm,成球性指数提升至0.247,达到弱成球性。在成球过程中,粗颗粒占比较高时,易形成颗粒间较大孔隙,导致薄膜水分布不均及毛细作用力弱化,直接影响生球的密实度。通过预处理增加细颗粒占比,可有效填充生球内部孔隙结构,提升薄膜水分布的均匀性,进而增强颗粒间毛细作用力,显著提高生球机械强度[28]。综上,随着球磨时间的增加,铁精粉成球性指数呈上升趋势。针对磨矿设备以及时间对

表4 球磨时间对铁精粉平均粒度及成球性指数的影响

Table 4 The influence of balling time on the average particle size and balling index of iron concentrate powder

球磨时间/h	不同铁精粉的平均粒度/mm				不同铁精粉的成球性指数			
	OA	OB	OC	OD	OA	OB	OC	OD
0	0.370	0.330	0.620	0.250	0.987	0.052	0.917	0.825
0.5	0.089	0.138	0.101	0.098	1.117	0.149	0.965	0.912
1.0	0.075	0.129	0.092	0.076	1.159	0.137	0.201	0.247
1.5	0.068	0.124	0.088	0.073	1.196	0.201	1.146	1.097
2.0	0.066	0.121	0.084	0.065	1.207	0.247	1.167	1.149

中国知网 https://www.cnki.net

铁矿粉粒度分布影响的不确定性，认为 OA、OC 和 OD 铁精粉的磨矿细度小于 0.2 mm，OB 铁精粉的磨矿细度小于 0.1 mm 时能较大程度上改善其成球性能。

在此基础上，研究 8% 生石灰配比、8% 水分配加量条件下，不同球磨时间对铁精矿细粉自成球性能的影响。结果如表 5 所示。由表 5 可见：随着球磨时间的增加，生球的平均落下强度和抗压强度整体均呈现升高的趋势，对于 OA、OC、OD 和 OB 铁精粉，在球磨时间分别为 1.0 h 和 2.0 h，即铁矿粉细度分别小于 0.2 mm 和 0.1 mm 时，上述指标基本达到最大值，这与铁精粉成球性指数结果较为吻合。随着球磨时间的增加，矿粉的比表面积增加，颗粒之间的相互作用力增大，同时其表面活化能也增大，进而使得其落下强度和抗压强度都相应提高[29-31]。

2.3　生石灰配比对铁精粉成球性能的影响

基于上述内容，当 OA、OC、OD 铁精粉的磨矿细度小于 0.2 mm，OB 铁精粉的磨矿细度小于 0.1 mm，水分配加量为 8% 时，分别研究生石灰配比为 7.0%、8.0%、9.0%、10.0% 下铁精粉成球性能的变化。结果如表 6 所示。由表 6 可见，OA 铁精粉的落下强度和抗压强度随生石灰配比的增加呈先升后降的趋势，当生石灰配比为 9.0% 时达到峰值，分别为 3.6 次/(1.0 m) 和 7.82 N/P；OB 铁精粉的落下强度和抗压强度随着生石灰配比的增加逐渐增大，在生石灰配比为 10.0% 时达到最大值，分别为 1.7 次/(1.0 m) 和 1.82 N/P；OC 和 OD 铁精粉的落下强度和抗压强度皆随生石灰配比的增加呈先上升后降低的趋势，上述指标分别在生石灰配比为 8.0% 和 9.0% 时达到最大值。这主要是因为生石灰作为黏结剂，在制粒过程中与水反应生成消石灰 [$Ca(OH)_2$]，有助于粒度较小的铁精矿颗粒黏结，形成具有一定强度和形状的颗粒团，但随着生石灰配比的增加，其消化过程的放热量增大，导致生球内应力大于外应力，最终使得其落下强度和抗压强度都降低。此外，随着其配比的升高，需要消化的水分增多，导致高温下消石灰分解产生水，最终可能影响烧结料层的透气性。

综上，生石灰配比时能够有效提升并改善上述铁精粉的自成球性能，适宜的操作参数：当 OA 铁精粉的磨矿细度小于 0.2 mm 时，生石灰配比为 9.0%；当 OB 铁精粉的磨矿细度小于 0.1 mm 时，生石灰配比为 10.0%；当 OC 铁精粉的磨矿细度小于 0.2 mm 时，生石灰配比为 8.0%；当 OD 铁精粉磨矿细度小于 0.2 mm 时，生石灰配比为 9.0%。

2.4　水分配加量对铁精粉成球性能的影响

在上述磨矿细度和生石灰配比的基础上，分别研究水分配加量为 6%、7%、8%、9% 时铁精粉的成球性能变化。结果如表 7 所示。由表 7 可见，生石灰作为黏结剂在制粒过程中会优先夺取铁矿粉中的水分以完成消化反应。当配加水量满足生石灰的湿容量需求时，生石灰吸水对制粒的负面影响可有效消除，使得剩余水分充分分布于颗粒间隙，增强毛细联结力，从而提升生球强度。OA、OB、OD 铁精粉在水分配加量为 9.0% 时达到性能峰值，表明该加水量既能满足生石灰的消化需求，又能维持颗粒间水膜的均匀分布。而对于 OC 铁精粉，随着加水量的不断增加，其上述指标先增加后减小，在加水量为7.0% 时达到最

表 5　球磨时间对不同铁精粉球团落下强度和抗压强度的影响

Table 5　The influence of balling time on the falling strength and compressive strength of iron concentrate powder

球磨时间/h	落下强度/[次·(1.0 mm)$^{-1}$]				抗压强度/[N·P^{-1}]			
	OA	OB	OC	OD	OA	OB	OC	OD
0	2.9	0	1.9	1.6	4.66	0	1.04	1.08
0.5	3.1	0	2.1	1.8	5.07	0	1.19	1.22
1.0	3.3	0	2.3	1.9	5.62	0	1.94	1.79
1.5	3.3	0	2.1	2.0	5.79	0	1.93	1.83
2.0	3.5	1.1	2.4	2.1	5.88	1.42	2.32	2.12

中国知网　https://www.cnki.net

表6 生石灰配比对不同铁精粉球团落下强度和抗压强度的影响

Table 6 Effect of quicklime ratio on falling strength and compressive strength of iron concentrate powder

生石灰配比/%	落下强度/[次·(1.0 mm)$^{-1}$]				抗压强度/[N·P^{-1}]			
	OA	OB	OC	OD	OA	OB	OC	OD
7	2.8	1.0	2.1	1.6	4.77	1.29	3.79	3.33
8	3.3	1.1	2.6	1.9	5.62	1.42	3.94	2.79
9	3.6	1.4	2.3	2.4	7.82	1.76	4.01	4.34
10	2.9	1.7	1.9	2.0	6.43	1.82	3.92	3.01

表7 水分配加量对铁精粉落下强度和抗压强度的影响

Table 7 The influence of water distribution on the falling strength and compressive strength of iron concentrate powder

水分配加量/%	落下强度/[次·(1.0 mm)$^{-1}$]				抗压强度/[N·P^{-1}]			
	OA	OB	OC	OD	OA	OB	OC	OD
6	2.9	1.2	2.4	1.9	7.21	1.42	4.14	4.01
7	3.1	1.6	3.1	2.1	7.08	1.47	4.62	4.42
8	3.6	1.7	2.6	2.4	7.82	1.82	3.94	4.34
9	4.2	1.9	0	2.7	11.15	1.93	0	6.79

大值，分别为3.1次/(1.0 m)和4.62 N/P。当加水量超过7.0%时，生石灰的吸水作用未能完全消耗多余水分，剩余自由水在颗粒表面形成过厚水膜，使得大量的生球黏附在圆筒制粒机内壁，聚集形成较大的畸形团聚体。这一现象与吴胜利等[32]提出的“湿容量平衡”理论一致，过量水分超出黏结剂消化能力时，毛细力主导的颗粒联结机制被破坏，进而恶化透气性。

爆裂温度是指生球在干燥过程中抵抗破裂的最高温度，较高的爆裂温度意味着生球在烧结过程中更不容易破裂，从而保持料层的透气性，有利于烧结过程的顺利进行[33]。在上述结论的基础上，对工艺参数优化后的混合料进行制粒并测量其爆裂温度，如表8所示。由表8可见，优化工艺参数(球磨时间、生石灰配比、水分配加量)可显著提高生球的爆裂温度，从而改善烧结效果。

表8 工艺参数优化前后制粒小球爆裂温度

Table 8 Decrepitation temperature of pelletizing ball before and after optimization of process parameters ℃

项目	OA	OB	OC	OD
优化前	461	342	429	513
优化后	512	401	479	576

综上，上述铁精粉的自成球性能改善条件下，适宜的操作参数：OA铁精粉的磨矿细度小于0.2 mm时，生石灰配比为9.0%，水分配加量为9.0%；OB铁精粉的磨矿细度小于0.1 mm时，生石灰配比为10.0%，水分配加量为9.0%；OC铁精粉的磨矿细度小于0.2 mm时，生石灰配比为8.0%，水分配加量为7.0%；OD铁精粉的磨矿细度小于0.2 mm时，生石灰配比为9.0%，水分配加量为9.0%。

3 结 论

(1) OB铁精粉的成球性指数为0.052，属于无成球性的铁矿粉。通过球磨预处理调整其粒度分布，增加细颗粒占比，成球性指数提升为0.247，具有弱成球性。

(2) 通过球磨预处理、生石灰-水分协同调控强化烧结制粒，有效提升准颗粒落下强度、抗压强度。在最佳磨矿细度的基础上，改善OA、OB、OC、OD铁精粉成球特性的具体方法：当生石灰配比分别为9.0%(OA铁精粉的磨矿细度小于0.2 mm)、10.0%(OB铁精粉的磨矿细度小于0.1 mm)、8.0%(OC铁精粉的磨矿细度小于0.2 mm)、9.0%(OD铁精粉的磨矿细度小于0.2 mm)，水分配加量分别为9.0%、9.0%、7.0%、9.0%。参数优化后爆裂温度较优化前分别上升51、59、50、63 ℃，生球热稳定性显著增强。

(3) 在实际工业生产中，应构建“参数优化-工艺改造”协同体系，在原料预处理阶段增设可调

中国知网 https://www.cnki.net

式球磨机组，配置粒度在线监测与反馈控制系统，针对铁矿粉特征进行预磨以优化粒度分布；其次是基于力学性能指标和爆裂温度，构建最佳黏结剂－水分预测模型，实现配比参数智能优化；最终通过双重调控机制减少准颗粒在烧结生产过程中产生粉末，改善烧结料层传热、传质条件，达到降低烧结工序能耗，提高烧结矿质量的目的。

参考文献:

[1] 李雅龙，刘卫东，马春元．铁精粉通过掺煤提高还原性的研究[J]．粉末冶金工业，2023，33(3)：125－129.
LI Yalong，LIU Weidong，MA Chunyuan. Study on improving reducibility of iron concentrate powder by adding coal [J]. Powder Metallurgy Industry，2023，33(3)：125－129.

[2] 王代军．巴西赤铁精矿成球性能试验[J]．金属矿山，2014(1)：50－55.
WANG Daijun. Pelletizing properties of hematite concentrate from Brazil [J]. Metal Mine，2014(1)：50－55.

[3] 胡长松．首钢高炉新炉料结构下球团技术的探索与应用[J]．中国冶金，2021，31(6)：54－60.
HU Changsong. Exploration and application of pelletizing technology under new burden structure of blast furnace in Shougang [J]. China Metallurgy，2021，31(6)：54－60.

[4] 蔡九菊．钢铁工业的空气消耗与废气排放[J]．钢铁，2019，54(4)：1－11.
CAI Jiuju. Air consumption and waste gas emission of steel industry [J]. Iron and Steel，2019，54(4)：1－11.

[5] 孙敏敏，宁晓钧，张建良，等．炼铁系统节能减排技术的现状和发展[J]．中国冶金，2018，28(3)：1－8.
SUN Minmin，NING Xiaojun，ZHANG Jianliang，et al. Research status and progress of energy saving and emission reduction technology for ironmaking [J]. China Metallurgy，2018，28(3)：1－8.

[6] 张盟，刘文权．铁前系统超低排放技术创新及应用[J]．炼铁，2019，38(3)：1－7.
ZHANG Meng，LIU Wenquan. Innovation and application of ultra-low emission technology before ironmaking system [J]. Ironmaking，2019，38(3)：1－7.

[7] 陆亚男，霍红艳，高远，等．邯钢高炉低烧比炉料结构的优化[J]．中国冶金，2020，30(11)：66－71.
LU Yanan，HUO Hongyan，GAO Yuan，et al. Optimization for BF burden with low-proportion sinter of Hansteel [J]. China Metallurgy，2020，30(11)：66－71.

[8] 王金龙，刘晓明，魏琼花，等．低烧比条件下的高炉炉料结构优化研究[J]．河南冶金，2023，31(5)：1－3；53.
WANG Jinlong，LIU Xiaoming，WEI Qionghua，et al. Optimization study of blast furnace burden structure under low sinter ratio [J]. Henan Metallurgy，2023，31(5)：1－3；53.

[9] 金永龙，何志军，王川．不同炉料结构高炉实现低碳排放的解析[J]．钢铁，2019，54(7)：8－16.
JIN Yonglong，HE Zhijun，WANG Chuan. Analysis on low carbon emission of blast furnace with different raw materials structure [J]. Iron and Steel，2019，54(7)：8－16.

[10] 张寿荣，姜曦．中国大型高炉生产现状分析及展望[J]．钢铁，2017，52(2)：1－4.
ZHANG Shourong，JIANG Xi. Production and development of large blast furnaces in China [J]. Iron and Steel，2017，52(2)：1－4.

[11] KON T，SUKENAGA S，UEDA S. Dynamic wettability of liquids on gasified metallurgical cokes [J]. ISIJ International，2017，57(7)：1166－1172.

[12] 孙正汉，黄晓丽，丁跃华，等．B_2O_3对含钛高炉渣中钙钛矿相及渣铁分离的影响[J]．钢铁，2018，53(2)：73－77.
SUN Zhenghan，HUANG Xiaoli，DING Yuehua，et al. Effect of B_2O_3 on separation of perovskite and slag in Ti-bearing blast furnace slag [J]. Iron and Steel，2018，53(2)：73－77.

[13] 周明顺，王义栋，赵东明，等．高硫铁精矿配比对球团工艺参数及性能的影响[J]．钢铁，2018，53(5)：11－17.
ZHOU Mingshun，WANG Yidong，ZHAO Dongming，et al. Effects of adding high-sulfur magnetite concentrate on pelletizing parameters and performance [J]. Iron and Steel，2018，53(5)：11－17.

[14] 史先菊，李光强，刘畅，等．烧结用铁矿粉制粒性能影响因素的试验研究[J]．烧结球团，2023，48(4)：30－37；80.
SHI Xianju，LI Guangqiang，LIU Chang，et al. Experimental research on factors influencing granulation performance of iron ore powder for sintering [J]. Sintering and Pelletizing，2023，48(4)：30－37；80.

中国知网　https://www.cnki.net

[15] 朱德庆,宋刘刚,杨聪聪,等. 磁铁精矿性质对铁矿粉烧结特性的影响机理分析[J]. 钢铁,2024,59(10):20-31.
ZHU Deqing, SONG Liugang, YANG Congcong, et al. Mechanism analysis of effect of magnetite concentrate properties on sintering characteristics of iron ore fines [J]. Iron and Steel,2024,59(10):20-31.

[16] JEON J W,KIM S W,JUNG S M. Utilization of magnetite concentrate as an additive in adhering fines of quasi-particle and its effect on assimilation behavior [J]. ISIJ International,2015,55(3):513-520.

[17] CORES A,MUÑIZ M,FERREIRA S,et al. Relationship between sinter properties and iron ore granulation index [J]. Ironmaking & Steelmaking,2012,39(2):85-94.

[18] DEBRINCAT D,LOO C E,HUTCHENS M F. Effect of iron ore particle assimilation on sinter structure [J]. ISIJ International,2004,44(8):1308-1317.

[19] 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.

[20] 蔡皓宇,青格勒,张卫东,等. 细磨对矿粉特性和造球性能的影响[J]. 钢铁,2015,50(8):16-23.
CAI Haoyu, QING Gele, ZHANG Weidong, et al. Influence of milling on property and ballability of iron concentrate [J]. Iron and Steel,2015,50(8):16-23.

[21] 白亚楠,张建良,苏步新,等. 铁矿粉吸水性能研究[J]. 烧结球团,2013,38(1):1-5;17.
BAI Yanan,ZHANG Jianliang,SU Buxin,et al. Study on water absorption performance of iron ore fines [J]. Sintering and Pelletizing,2013,38(1):1-5;17.

[22] 郝亚娜,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.

[23] 甘敏,刘卓奇,季志云,等. 基于粒度组成调控的高品质球团制备技术[J]. 钢铁研究学报,2024,36(8):1001-1010.
GAN Min, LIU Zhuoqi, JI Zhiyun, et al. High quality pellet preparation technology based on particle size distribution regulation [J]. Journal of Iron and Steel Research,2024,36(8):1001-1010.

[24] 范晓慧,袁晓丽,姜涛,等. 铁精矿粒度对球团强度的影响[J]. 中国有色金属学报,2006,16(11):1965-1970.
FAN Xiaohui, YUAN Xiaoli, JIANG Tao, et al. Effect of particle size distribution of concentrate on palletizing quality [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006,16(11):1965-1970.

[25] 王筱留. 钢铁冶金学:炼铁部分[M]. 2版. 北京:冶金工业出版社,2000.
WANG Xiaoliu. Iron and steel metallurgy: Ironmaking section [M]. 2nd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press,2000.

[26] 傅菊英. 含铁矿物成球性指数 K 的研究[J]. 烧结球团,1992,17(4):4-7.
FU Juying. Study on the ballability index K of iron ores [J]. Sintering and Pelletizing,1992,17(4):4-7.

[27] 彭志伟,李光辉,唐兆坤,等. 改善铁精矿成球性能的研究[J]. 钢铁,2008,43(12):7-12.
PENG Zhiwei, LI Guanghui, TANG Zhaokun, et al. Research on ballability of iron concentrates [J]. Iron and Steel,2008,43(12):7-12.

[28] 刘曙,路漫漫,付金涛,等. <0.025 mm 粒级含量对磁铁精矿成球性的影响[J]. 烧结球团,2014,39(5):31-34.
LIU Shu, LU Manman, FU Jintao, et al. Influences of content of iron materials with particle size of <0.025 mm on ballability of magnetite concentrates [J]. Sintering and Pelletizing,2014,39(5):31-34.

[29] 刘承鑫,余俊杰,张泽强,等. 润磨对人工磁铁精矿球团性能的影响[J]. 钢铁,2018,53(1):17-23.
LIU Chengxin, YU Junjie, ZHANG Zeqiang, et al. Influence of damp milling on properties of artificial magnetite pellets [J]. Iron and Steel, 2018, 53(1): 17-23.

[30] 席玉明. 润磨预处理改善赤铁矿粉球团矿性能的研究[J]. 矿冶工程,2012,32(4):73-76.
XI Yuming. Improvement of hematite pellets properties by damp milling pretreatment [J]. Mining and Metallurgical Engineering,2012,32(4):73-76.

(下转第24页)

中国知网 https://www.cnki.net

LI Guoliang, LI Qiankun, ZHOU Xiaodong, et al. Production practice on reducing energy consumption of sintering machine process with multi-technique [J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(1): 55 – 59; 75.

[12] 赵军凯,侯健,姜林. 邯钢烧结机冷却系统改造与余热发电效果提升 [J]. 中国冶金, 2020, 30(4): 69 – 73.
ZHAO Junkai, HOU Jian, JIANG Lin. Improvement of cooling system and waste heat power generation effect of sintering in Handan Iron and Steel [J]. China Metallurgy, 2020, 30(4): 69 – 73.

[13] 叶竹,张云贺. 烧结机烟气余热的有机朗肯循环发电 [J]. 材料与冶金学报, 2022, 21(5): 371 – 375.
YE Zhu, ZHANG Yunhe. Power generation from low-temperature waste heat of sintering flue gas by using organic Rankine cycle [J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2022, 21(5): 371 – 375.

[14] 包涛. 安钢3号烧结机烟气循环工艺改造与应用实践 [J]. 山西冶金, 2025, 48(2): 161 – 162; 165.
BAO Tao. Transformation and application practice of gas circulation process for angang No. 3 sintering machine [J]. Shanxi Metallurgy, 2025, 48(2): 161 – 162, 165.

[15] 温胜坤. 烧结烟气循环技术应用及系统设计要点分析 [J]. 中国设备工程, 2025(6): 210 – 212.
WEN Shengkun. Analysis of application and system design points of sintering flue gas circulation technology [J]. China Plant Engineering, 2025(6): 210 – 212.

[16] 丁成义,常仁德,郭胜兰,等. 烧结过程智能控制及烧结矿冶金性能预测研究现状 [J]. 钢铁, 2024, 59(4): 42 – 56.
DING Chengyi, CHANG Rende, GUO Shenglan, et al. Research status of intelligent control of sintering process and prediction of metallurgical properties of sinter [J]. Iron and Steel, 2024, 59(4): 42 – 56.

[17] 廖继勇,郑浩翔,甘敏,等. 烧结烟气CO的产生及治理途径:源头及过程控制技术 [J]. 烧结球团, 2021, 46(2): 8 – 16.
LIAO Jiyong, ZHENG Haoxiang, GAN Min, et al. Generation and governance way of CO in sintering flue gas: Source and process control technology [J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(2): 8 – 16.

[18] 吴宏亮,罗云飞,周江虹,等. 富氧协同烟气循环对烧结矿质量指标和CO排放的影响 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(4): 1179 – 1188.
WU Hongliang, LUO Yunfei, ZHOU Jianghong, et al. Influence of oxygen enrichment and flue gas circulation on quality index of sinter and CO emissions [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(4): 1179 – 1188.

[19] 陈宇,刘臣,王兆才,等. 基于烟气循环烧结的CO过程控制优化工艺与技术 [J]. 烧结球团, 2024, 49(6): 129 – 136.
CHEN Yu, LIU Chen, WANG Zhaocai, et al. CO process control optimization technology and technique based on gas circulation sintering [J]. Sintering and Pelletizing, 2024, 49(6): 129 – 136.

(上接第8页)

[31] 卢建光,刘小杰,吕庆. PMC精矿粉造球参数的优化研究 [J]. 烧结球团, 2020, 45(6): 54 – 60.
LU Jianguang, LIU Xiaojie, LÜ Qing. Research on optimization of balling parameters of PMC concentrate powder [J]. Sintering and Pelletizing, 2020, 45(6): 54 – 60.

[32] 吴胜利,樊佳欣,朱娟,等. 基于生石灰吸水性的适宜烧结制粒水分 [J]. 钢铁研究学报, 2015, 27(1): 27 – 34.
WU Shengli, FAN Jiaxin, ZHU Juan, et al. Proper water addition for sintering granulation based on the water absorbing characteristics of quicklime [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2015, 27(1): 27 – 34.

[33] 朱梦飞,周罕龙,陆启财,等. 高钛澳精粉成球特性研究和生产应用 [J]. 金属材料与冶金工程, 2023, 51(6): 38 – 44.
ZHU Mengfei, ZHOU Hanlong, LU Qicai, et al. Research on spherical characteristics and production application of high titanium Australian refined powder [J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2023, 51(6): 38 – 44.

中国知网 https://www.cnki.net