球团

高压辊磨强化铁精矿球团低温焙烧固结行为及机理

杨永斌[1]，杨忠玉[1]，王 林[1]，文小平[2]，谢路奔[2]，刘百祥[2]
(1. 中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083；2. 湖南华菱湘潭钢铁有限公司，湖南 湘潭 411101)

摘要： 高压辊磨技术作为铁精矿预处理的重要手段，能够显著改善铁矿颗粒的物理化学特性，进而强化球团矿的成球性能与焙烧固结行为。本文以国内某钢铁企业混合铁精矿为原料，系统考察高压辊磨预处理对生球性能及焙烧球团强度的影响，并揭示其强化固结的机理。结果表明：高压辊磨通过机械活化作用显著提高了铁精矿的细粒级占比(<0.074 mm 粒级质量分数从 83.70% 提升至 91.77%)和比表面积(从 2 424.07 cm^2/g 增至 3 331.60 cm^2/g)，从而增强颗粒间的黏附能力。适当地进行高压辊磨预处理(2 次)可有效提高生球强度，但过度辊磨(4 次)会因颗粒过细导致生球塑性下降，抗压强度降低。此外，适宜的辊磨给料水分(8%)和膨润土用量(1.2%)可进一步优化生球性能。在焙烧过程中，高压辊磨预处理通过降低固相反应活化能，使球团在较低温度下实现高效固结。经 2 次辊磨制备的球团在 1 110 ℃焙烧时抗压强度即可达 2 599 N/P，满足生产要求；而未处理组需 1 200 ℃(强度为 3 496 N/P)才能达到生产强度要求。然而，过高的焙烧温度(>1 200 ℃)会因过量低熔点液相的生成削弱晶桥连接，导致球团矿强度下降。高压辊磨预处理通过机械活化与颗粒表面改性，实现了球团低温高效固结(焙烧温度降低 90～100 ℃)，可为钢铁行业节能减排提供理论依据与技术支撑。

关键词： 铁精矿；球团矿；高压辊磨；膨润土；低碳冶金
中图分类号： TF046.6 **文献标志码：** A **文章编号：** 1000－8764(2025)06－0038－09
doi： 10.13403/j.sjqt.2025.06.094

Low-temperature roasting and consolidation behavior and mechanism of iron concentrate pellets driven by high-pressure roller mill

YANG Yongbin[1], YANG Zhongyu[1], WANG Lin[1], WEN Xiaoping[2], XIE Luben[2], LIU Baixiang[2]
(1. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China;
2. Hunan Valin Xiangtan Iron & Steel Co., Ltd., Xiangtan 411101, Hunan, China)

Abstract: As an important means of pretreatment of iron ore concentrate, high-pressure roller mill technology can significantly improve the physical and chemical properties of iron ore particles, and enhance the pelletizing performance and roasting consolidation behavior of pellets. In this paper, the effects of high-pressure roller mill pretreatment on the properties of fresh pellets and the strength of roasted pellets are systematically investigated using mixed iron concentrate from a domestic iron and steel enterprise, and the mechanism of strengthening consolidation is revealed. The results show that the proportion of fine particle size (<0.074 mm, the mass fraction of particle size is increased from 83.70% to 91.77%) and the specific surface area (from 2 424.07 cm^2/g to 3 331.60 cm^2/g) of iron concentrate by mechanical activation, and enhance the adhesion capacity between particles. Proper high-pressure roller mill pretreatment (2 times) can effectively improve the strength of the fresh pellet, but excessive roller mill (4 times) will reduce the plasticity of the fresh pellet and reduce the compressive strength due to the fineness of the particles. In addition, the appropriate roller mill

收稿日期： 2025－07－07；**修回日期：** 2025－08－15
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： 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(1992—)，男，博士后，从事钢铁冶金、资源综合利用方面的研究。

中国知网 https://www.cnki.net

feeding moisture (8%) and bentonite dosage (1.2%) can further optimize the fresh pellet performance. During the roasting process, the high-pressure roller mill pretreatment can reduce the activation energy of the solid-phase reaction, so that the pellets can be consolidated efficiently at a lower temperature. The compressive strength of the pellets prepared by two roller mills can reach 2 599 N/P when roasted at 1 110 ℃, which meets the production requirements. The untreated group needs 1 200 ℃ (strength 3 496 N/P) to meet the production strength requirements. However, excessive roasting temperatures (>1 200 ℃) can weaken the bridge connections due to the formation of excessive low melting point liquid phases, resulting in a decrease in pellet strength. The high-pressure roller mill pretreatment realizes the low-temperature and efficient consolidation of pellets (the roasting temperature is reduced by 90 ~ 100 ℃) through mechanical activation and particle surface modification, which can provide theoretical basis and technical support for energy conservation and emission reduction in the steel industry.

Key words: iron concentrate; pellets; high-pressure roller mill; bentonite; low-carbon metallurgy

钢铁工业作为国民经济的重要支柱产业，其高能耗、高排放的特性使其成为“碳达峰、碳中和”目标下的重点减排领域[1]。高炉炼铁是钢铁生产过程中的核心环节，而铁矿作为其主要原料，其品质与冶炼工艺的优化直接关系到能源消耗与污染物排放[2-3]。我国铁矿资源禀赋较差，普遍存在贫矿多、品位低的特点，因此，如何高效利用国内铁精矿资源，提升其冶炼性能，成为当前钢铁行业亟需解决的关键问题之一[4-5]。

球团矿作为高炉炉料的重要组成部分，相较于传统烧结矿具有显著优势。研究表明，球团矿生产能耗约为烧结工序的 50%，SO_2和 NO_x排放量分别仅为烧结工序的 1/3 和 1/5，且几乎不产生二噁英等剧毒污染物，更符合国家节能减排的绿色发展要求[6-7]。此外，球团矿具有铁品位高(普遍 >63%)、粒度均匀、冷态强度优异、热态还原性好等特点，能够显著提升高炉冶炼效率。数据表明[8-9]，高炉炉料中球团矿比例每提高 1.0%，吨钢 CO_2排放可降低 0.27% ~ 0.3%。因此，大力发展氧化球团技术是优化高炉炉料结构、实现低碳冶炼的重要途径。然而，球团矿的生产仍面临诸多挑战。一方面，我国铁精矿资源复杂多样，不同矿种的成球性能和焙烧特性差异显著，需通过优化配矿和预处理工艺改善其成球性[10-11]；另一方面，球团矿的焙烧过程需在高温下完成(磁铁矿约为 1 250 ℃，赤铁矿为 1 300 ~ 1 350 ℃)，属于高能耗环节[12-13]。若焙烧温度不足，球团内部物理化学反应驱动力不足，会导致固结不充分，机械强度下降，难以满足高炉生产需求[14]。因此，如何在保证球团质量的前提下降低焙烧温度，成为实现球团生产节能减排的关键。

近年来，高压辊磨技术因其高效的粉碎性能和节能特性，在冶金行业得到广泛应用[15]。研究表明，高压辊磨预处理可显著改善铁精矿的成球性能[16-18]：一方面，其强大的挤压作用使铁精矿粒度细化、比表面积增大，使颗粒表面产生棱角和裂纹，提高表面自由能；另一方面，机械力化学效应导致晶格畸变和微塑性变形，颗粒内部储存机械能，降低了固相反应的活化能，从而促进焙烧过程中的离子迁移和扩散。这些特性不仅能够提高生球强度、减少膨润土用量，还能增强球团在低温下的固结能力。然而，目前关于高压辊磨对球团固结行为的影响机制研究仍不够深入，尤其是机械活化与矿物晶体结构演变、低温固结动力学之间的关联缺乏系统性探讨。基于此，本文以国内某钢铁企业现有工艺流程和原料结构为基础，系统研究高压辊磨预处理对混合铁精矿颗粒特性、生球性能及焙烧球团强度的影响规律，揭示机械活化促进球团低温固结的机理。研究成果将为钢铁企业实现绿色低碳生产提供理论依据和技术支撑，助力国家“双碳”战略目标的实现。

1　原料性能和研究方法

1.1　原料性能

试验选用某钢铁企业现场球团生产的混合铁精矿为原料，以膨润土为黏结剂制备球团矿。试验原料的化学成分、含铁原料的粒度组成分别如表 1、2 所示。由表 1 可看出，该混合矿以磁铁矿为主，铁品位为 64.25%，属于中等含量铁矿。脉石成分对球团焙烧过程中的液相形成和渣相性质

中国知网　https://www.cnki.net

表 1 试验原料的主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of raw materials %

原料名称	TFe	FeO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	CaO	TiO_2	K_2O	Na_2O	S	P
混合矿	64.25	23.80	5.92	1.00	1.18	0.62	0.75	0.107	0.356	0.155	0.053
膨润土	15.27	—	51.84	3.17	17.00	2.18	—	0.193	3.45	0.055	0.076

表 2 含铁原料的粒度组成与比表面积

Table 2 Particle size distribution and specific surface area of iron-bearing raw materials

粒度组成(质量分数)/%					比表面积/($cm^2 \cdot g^{-1}$)
>0.15 mm	(0.10,0.15] mm	(0.074,0.10] mm	(0.045,0.074] mm	≤0.045 mm	
4.98	6.88	4.44	11.96	71.74	2 424.07

具有重要影响。混合矿 SiO_2 质量分数为 5.92%。粒度组成是影响铁精矿成球性能的关键因素之一。一般认为,造球原料的 <0.074 mm(200 目)质量分数需超过 80% 才能保证良好的成球动力学和生球强度。由表 2 可看出,该混合矿的 <0.074 mm 粒级质量分数为 83.70%,其粒度组成满足造球要求。

1.2 研究方法

1.2.1 高压辊磨预处理

试验采用高压辊磨机(辊径为 250 mm,辊宽为 100 mm,转速为 23 r/min)对含铁原料进行辊磨处理,压力为 0~50 kN 可调(试验采用 30 kN)。每次试验称取 50 kg(干基)原料,以确保稳定的料柱压力。辊磨后,采用四分法取样,并在 105 ℃ 下烘干至恒重,用于后续粒度、比表面积及成球性等性能表征。通过调节辊磨压力及水分含量,系统考察其对含铁原料粉碎效果的影响,设置每组实验重复 3 次以保证数据可靠性。

1.2.2 铁矿球团制备

铁矿球团制备过程包括辊磨、造球、球团预热与焙烧。试验采用圆盘造球机制备生球,具体方法:首先称取 3 kg 磁铁精矿,按比例添加黏结剂并混合均匀,调节水分至设定值。造球试验采用∅1 000 mm 圆盘造球机,设定转速为 20 r/min、边高为 250 mm、倾角为 45°。造球完成后,人工筛分获得 10~15 mm 合格生球,取样测定其抗压强度(GB/T 14201—1993)、落下强度(GB/T 14202—1993)、爆裂温度(ISO 11256:2015)及水分含量(GB/T 14202—1993)。其余生球经 105 ℃ 烘干后用于后续焙烧试验。采用双温区管式炉进行球团焙烧试验。通过控制预热和焙烧温度,研究不同热工制度对球团固结强度的影响。

1.2.3 球团强度检测及结果表征

试验依据 ISO 4700 标准测定球团矿抗压强度。采用智能球团抗压试验机,选取 10~16 mm 球团样品,以 50 个随机样为一组,测定其抗压强度,取结果的算术平均值作为最终抗压强度值,以确保数据的代表性和可靠性。

采用扫描电子显微镜(SEM)分析颗粒形貌及其内部结构。经热镶、切割、冷镶、研磨及抛光处理样品后,利用背散射电子衍射(BSE)模式观察其微观形貌及表面特征,以评估颗粒的尺寸、形状及分布情况。

2 结果与讨论

2.1 高压辊磨对铁精矿生球强度的影响

2.1.1 高压辊磨次数

对混合铁精矿进行不同次数的高压辊磨预处理,固定原料入辊水分为 8.0%、膨润土用量为 1.2%,使用预处理后的铁矿原料制备生球,并检测生球强度,研究高压辊磨预处理次数对混合矿生球强度的影响。结果如表 3 所示。由表 3 可知,高压辊磨预处理可以有效对铁矿颗粒进行破碎,提高细粒铁矿颗粒占比和原料比表面积。当不进行高压辊磨预处理时,混合铁矿 <0.074 mm 粒级占比为 83.70%,比表面积为 2 424.07 cm^2/g;当对混合铁矿进行 2 次高压辊磨预处理时,铁矿原料 <0.074 mm 粒级占比提高到 91.77%,比表面积提高到 3 331.60 cm^2/g;继续提高高压辊磨次数,铁矿颗粒细粒级占比以及比表面积提高幅度降低。

中国知网 https://www.cnki.net

表 3　高压辊磨次数对混合矿原料性能和生球强度的影响

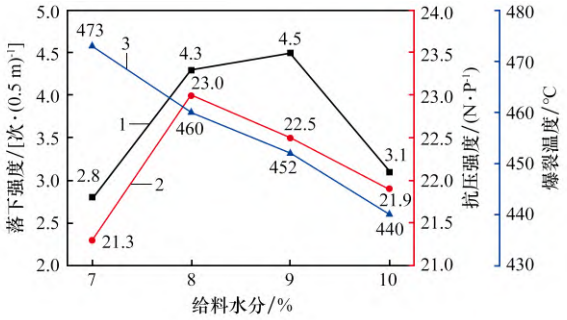
Table 3　Effect of high-pressure roll grinding (HPRG) on the properties of mixed iron ore and the strength of green pellets

辊磨次数	<0.074 mm 粒级占比/%	比表面积/($cm^2 \cdot g^{-1}$)	落下强度/[次·(0.5 m)$^{-1}$]	抗压强度/(N·P^{-1})	爆裂温度/℃
0	83.70	2 424.07	2.9	14.0	550
2	91.77	3 331.60	4.3	23.0	460
4	96.51	3 609.79	5.6	21.6	395

对于生球强度，适当提高高压辊磨预处理次数可有效提高生球强度，当高压辊磨预处理次数由 0 提高到 2 次时，生球落下强度由 2.9 次/(0.5 m) 提高到 4.3 次/(0.5 m)，生球抗压强度由 14.0 N/P 提高到 23.0 N/P，这是因为高压辊磨有效提高了混合矿中细颗粒占比，增大了混合矿的比表面积，强化了混合铁矿颗粒的黏附性能，提高了生球内部致密度，从而使生球强度提高；继续提高高压辊磨预处理次数至 4 次时，生球落下强度小幅提高到 5.6 次/(0.5 m)，生球抗压强度降低到21.6 N/P，这可能主要归因于铁矿颗粒过细，导致制备的生球塑性过强，使生球抗压强度下降。此外，高压辊磨预处理会导致生球爆裂温度降低。当高压辊磨次数由 0 提高到 4 次时，生球爆裂温度从550 ℃降低到 395 ℃，这是因为高压辊磨提高了铁矿微细粒占比，降低了制备的生球孔隙率，导致生球受热后水分扩散困难，形成更高的内部压力，从而导致球团更容易爆裂[19-20]。

2.1.2　高压辊磨给料水分

固定高压辊磨次数为 2 次、膨润土的配比为 1.2%，研究高压辊磨给料水分对制备的生球性能的影响。结果如图 1 所示。由图 1 可见，适当地提高高压辊磨给料水分可有效提高生球强度，但过高的给料水分又会降低生球强度。当给料水分从 7% 提高到 8% 时，生球的落下强度和抗压强度分别从 2.8 次/(0.5 m) 和 21.3 N/P 提高到4.3 次/(0.5 m) 和 23 N/P。这是因为适宜的水分可以在颗粒表面形成水膜并填满颗粒间的部分空隙，增强了原料颗粒间的毛细作用力，形成了更致密的料层堆积结构，有利于辊面压力对混合矿物料的作用及其在料层中的传递，进而强化了辊磨作用效果，提高了生球强度。继续提高给料水分，生球的抗压强度开始降低，同时当给料水分提高到 9% 以后，生球落下强度也开始降低。这是因为颗粒间的水分过饱和，填满了料层中颗粒间的空隙，使得辊磨过程中混合物料更易发生相对滑动，降低了料层的可压缩性，使得高压辊磨作用效果变差，从而导致生球强度降低。此外，提高高压辊磨水分会降低生球的爆裂温度，这是因为生球内部水分含量的提高会引起高温下生球内部水蒸气压强提高，进而提高球团内部应力，导致球团更易破裂。



1—落下强度；2—抗压强度；3—爆裂温度。

图 1　高压辊磨给料水分对生球性能的影响

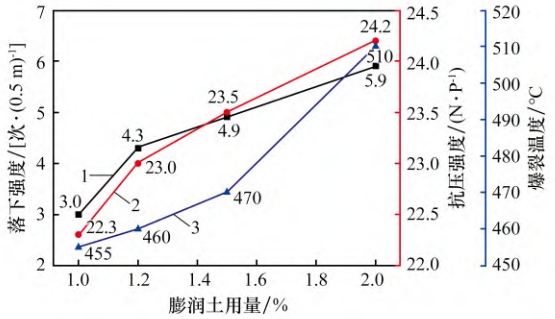
Fig. 1　Effect of feed moisture of high-pressure roll grinding (HPRG) on properties of greenpellets

2.1.3　黏结剂用量

固定高压辊磨次数为 2 次、入料水分为 8.0%，进一步研究膨润土用量对制备生球性能的影响。结果如图 2 所示。由图 2 可见，提高膨润土用量可有效提高生球强度，并提高生球爆裂温度。当膨润土用量从 1.0% 提高到 2.0% 时，生球落下强度和抗压强度分别从 3.0 次/(0.5 m) 和 22.3 N/P 提高到 5.9 次/(0.5 m) 和 24.2 N/P，生球爆裂温度从 455 ℃提高到 510 ℃。这主要归因于膨润土遇水发生水化作用，蒙脱石片层在外界机械力作用下，滑动形成纤维结构黏附于颗粒表面，降低了颗粒表面粗糙度，并将颗粒紧密黏结在一起，

中国知网　https://www.cnki.net

从而提高了生球强度。此外，膨润土吸水性能优异，蒙脱石片层将大量自由水转化为层间结合水，从而降低生球干燥过程中水分蒸发速率，显著提高了生球爆裂温度[10]。但膨润土用量过高会降低成品球团矿铁品位，因此，在生球强度满足生产要求的前提下，应尽量降低膨润土用量，本文所研究的混合矿最适宜的膨润土用量为 1.2%。



1—落下强度；2—抗压强度；3—爆裂温度。

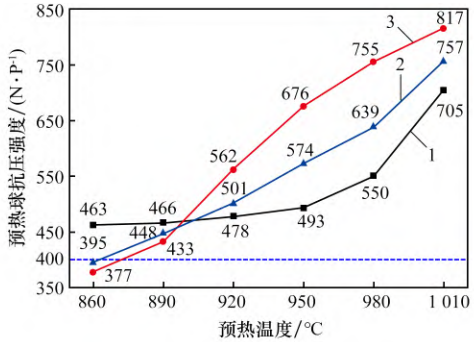
图 2 膨润土用量对生球性能的影响

Fig. 2 Effect of bentonite dosage on properties of green pellets

2.2 高压辊磨对铁精矿球团预热焙烧性能的影响

2.2.1 预热温度对预热球强度的影响

固定预热时间为 10 min，在预热温度为 860～1 010 ℃的条件下，研究高压辊磨对混合物料制备的预热球抗压强度的影响。结果如图 3 所示。由图 3 可见，提高预热温度可有效提高混合矿制备的预热球强度。在不进行高压辊磨预处理的情况下，当预热温度从 860 ℃提高到 1 010 ℃时，铁精矿预热球强度从 463 N/P 提高到 705 N/P。在不同的预热温度下，高压辊磨预处理对预热球强度的影响不同，当预热温度为 860～890 ℃时，高压辊磨预处理会导致预热球强度降低。这主要是因为球团在较低预热温度下的氧化固结受氧气扩散控制，高压辊磨后的铁矿原料颗粒更细，制备的生球内部结构更为致密，不利于氧气向球团内部扩散，限制了球团进一步的氧化和固结，从而导致低温预热球强度降低[16-17]。当预热温度高于 890 ℃时，高压辊磨预处理可有效提高预热球强度。这是因为在较高的预热温度下，球团内部氧气的扩散速率较快，球团的氧化固结速率主要受氧化反应控制，高压辊磨后的铁矿原料颗粒发生机械活化，晶格结构被破坏，形成更多晶格缺陷和表面活性位点，降低了矿物晶格中的质点进行位移所必需的活化能，从而加速了氧化反应速率，使得氧化反应更彻底，形成的 Fe_2O_3 晶桥更均匀，从而增强球团强度[18-20]。试验所用的混合矿最适宜的预热温度为 890～920 ℃。



辊磨次数/次：1—0；2—2；3—4。

图 3 高压辊磨次数对铁精矿球团预热性能的影响

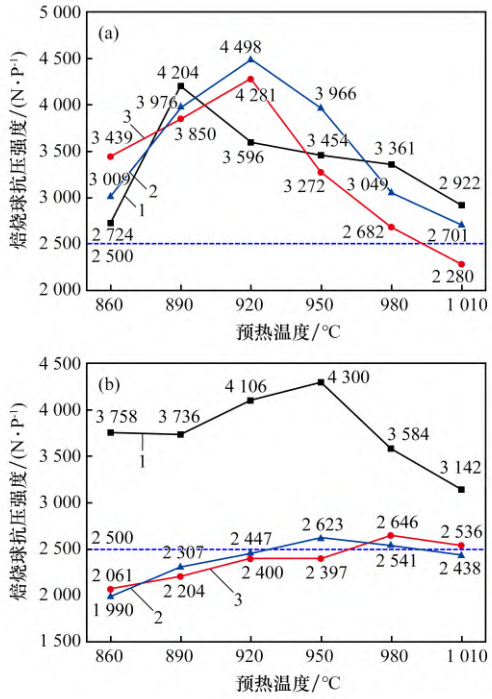
Fig. 3 Effect of high pressure roller grinding times on preheating performance of iron concentrate pellets

2.2.2 预热温度对焙烧球强度的影响

固定预热时间为 10 min、焙烧时间为 20 min、均热时间为 5 min，在预热温度为 860～1 010 ℃的条件下，研究不同高压辊磨次数下预热温度对焙烧球强度的影响。结果如图 4 所示。由图 4 可看出，当焙烧温度为 1 200 ℃时，适当地提高预热温度和进行高压辊磨预处理可有效提高焙烧球强度，但过高的预热温度和过度高压辊磨又会导致焙烧球强度大幅降低。这主要是因为微细颗粒的过度烧结可能形成局部过密区域，而未充分反应的区域则残留大量孔隙，使得球团整体结构不均匀，抗压强度降低。因此，对于 1 200 ℃的焙烧温度，混合矿球团适宜的预热温度为 860～950 ℃，高压辊磨在此段预热温度下可在一定程度上提高焙烧球强度。当焙烧温度为 1 250 ℃时，适当地提高预热温度可有效提高焙烧球强度，但过高的预热温度会导致焙烧球强度大幅降低，同时，高压辊磨预处理不利于焙烧球团强度的提高。对于未进行高压辊磨预处理，当预热温度为 860 ℃时，焙烧球强度为 3 758 N/P；提高预热温度到 950 ℃时，焙烧球强度提高到 4 300 N/P；继续提高预热温度会降低焙烧球强度。对于 2 次和 4 次高压辊磨预处理混合矿，焙烧球强度较不进行高压辊磨预处理时低。这主要是因为高压辊磨预处理会大幅降

中国知网 https://www.cnki.net

低混合矿的整体颗粒粒径，使得制备的生球内部致密度提高，在 1 250 ℃较高的焙烧温度下球团内部结构应力加大，从而导致焙烧球强度降低。



焙烧温度/℃：(a) 1 200；(b) 1 250

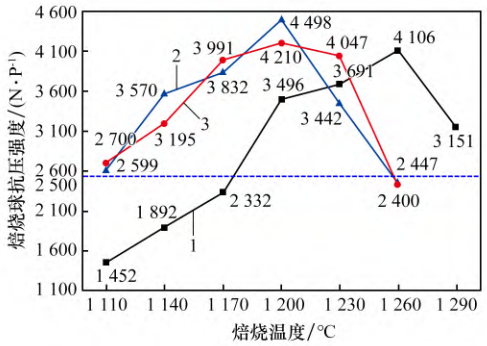
辊磨次数/次：1—0；2—2；3—4。

图 4　不同高压辊磨次数下预热温度对焙烧球团强度的影响

Fig. 4　Effect of preheating temperature on the strength of roasted pellets under different high-pressure roller grinding times

2.2.3　焙烧温度对焙烧球强度的影响

固定预热温度为 920 ℃、预热时间为 10 min、焙烧时间为 20 min、均热时间为 5 min，在焙烧温度为 1 110～1 250 ℃条件下，研究不同高压辊磨次数下焙烧温度对焙烧球团强度的影响。结果如图 5 所示。由图 5 可看出：适当地提高焙烧温度可有效提高焙烧球强度，但过高的焙烧温度又会导致焙烧球强度降低；同时，高压辊磨预处理可在较低的焙烧温度下大幅提高焙烧球强度，同时降低生产所需的最低焙烧温度。当不进行高压辊磨预处理时，在 1 200 ℃的焙烧温度下混合矿球团强度才能满足生产需要，此时，球团强度为 3 496 N/P；提高焙烧温度到 1 260 ℃时，球团矿强度提高到 4 106 N/P；继续提高焙烧温度，球团矿强度开始降低。当进行 2 次高压辊磨预处理时，在 1 110 ℃的焙烧温度下混合矿球团强度就已满足生产需要，强度为 2 599 N/P；提高焙烧温度到 1 200 ℃，球团强度提高到 4 498 N/P，大幅高于未高压辊磨预处理制备的球团矿强度；继续提高焙烧温度，球团强度开始降低。高压辊磨预处理后铁精矿颗粒的表面活性高、晶格缺陷多，使得固相反应(如 Fe_2O_3 再结晶与晶桥形成)在较低焙烧温度下即可充分进行，形成均匀的赤铁矿联晶结构。但当焙烧温度过高时，铁氧化物可能进一步与脉石成分(如 SiO_2、Al_2O_3)反应生成过量低熔点液相(如铁橄榄石 $2FeO·SiO_2$ 或钙铁榴石 $CaO·Fe_2O_3·SiO_2$)。这些液相虽能促进颗粒黏结，但过量液相会削弱晶桥连接的刚性，导致球团结构疏松，降低抗压强度。对于 4 次高压辊磨预处理，相较于 2 次高压辊磨预处理，其对球团焙烧温度的降低作用有限。因此，对混合矿进行 2 次高压辊磨预处理可大幅降低混合矿球团焙烧温度(降低 90～100 ℃)，实现球团低温高效固结。



辊磨次数/次：1—0；2—2；3—4。

图 5　不同高压辊磨次数下焙烧温度对焙烧球团强度的影响

Fig. 5　Effect of roasting temperature on the strength of roasted pellets under different high-pressure roller grinding times

3　高压辊磨强化铁矿球团固结机理

3.1　高压辊磨对铁矿颗粒表面的活化作用

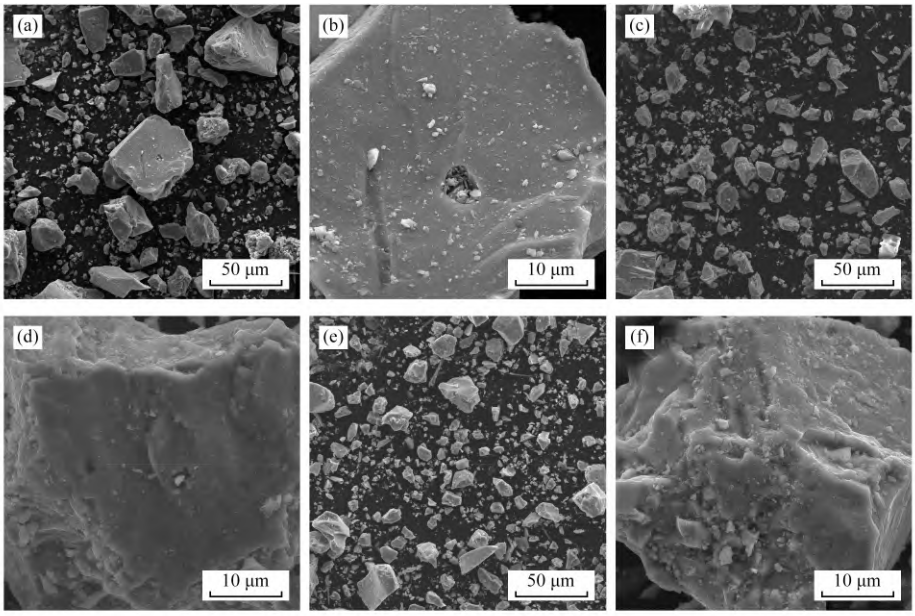
在固定辊磨参数，且入料水分为 8.0% 的条件下，研究高压辊磨次数对混合铁矿粉微观形貌的影响。结果如图 6 所示。由图 6 可知，高压辊磨预处理可有效破碎铁矿颗粒，降低原料粒度。当不进行高压辊磨预处理时，铁矿原料中存在粒度较粗的颗粒，且颗粒表面较为光滑；进行 2 次高

中国知网　https://www.cnki.net

压辊磨预处理后，铁矿原料中的粗颗粒占比明显降低，且颗粒表面变得粗糙且形成裂纹，这有利于提高铁矿原料的成球性能以及氧化固结性能。当继续提高高压辊磨次数到 4 次时，高压辊磨的破碎效果以及对颗粒表面活化作用的提高幅度有限。

3.2 高压辊磨对球团矿内部微观结构的改善作用

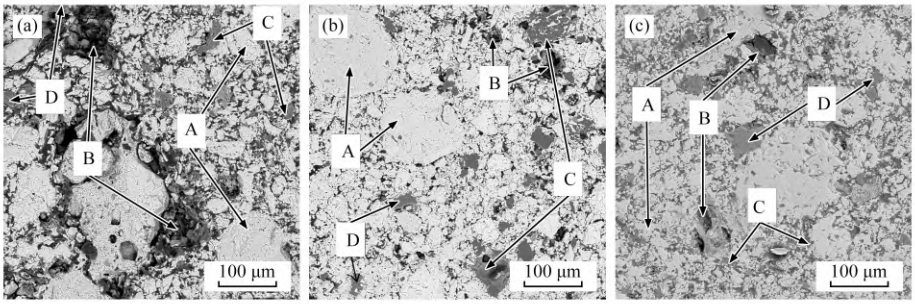
在相同的制备条件下，使用不同高压辊磨预处理次数的铁矿原料制备球团矿，对不同球团矿样品进行扫描电镜(SEM)分析，研究高压辊磨预处理次数对球团矿内部矿相结构的影响。结果如图 7 所示。由图 7 可知，当不进行高压辊磨预处理时，球团矿内部存在较多较大的孔洞，相邻赤铁矿晶粒之间的孔隙较大，石英、低熔点共晶物相与赤铁矿相之间连结不紧密，这是由于混合铁精矿存在较粗的铁矿颗粒，制备的生球内存在较多的孔隙和裂缝。当进行 2 次高压辊磨预处理时，球团矿内部赤铁矿再结晶互连情况良好，孔洞数量减少，物相间的孔隙变小，镶嵌更加致密。继续提高高压辊磨次数至 4 次时，球团矿内部生成的低熔点共晶物相增多。在球团焙烧过程中，这些液相虽能促进颗粒黏结，但过量液相会削弱晶桥连接的刚性，导致球团结构疏松，抗压强度下



(a)、(b) 未辊磨；(c)、(d) 2 次辊磨；(e)、(f) 4 次辊磨

图 6 高压辊磨预处理对铁精矿颗粒形貌的影响

Fig. 6 Effect of high-pressure roller grinding pretreatment on particle morphology of iron concentrate



(a) 未辊磨；(b) 2 次辊磨；(c) 4 次辊磨

A—Fe_2O_3；B—孔洞；C—低熔点共晶物；D—石英。

图 7 不同高压辊磨预处理次数下制备的球团矿内部矿相结构

Fig. 7 Internal mineral phase structure of pellets prepared under different pretreatment times of high-pressure roller grinding

(注：预热温度为 920 ℃，焙烧温度为 1 140 ℃)

中国知网 https://www.cnki.net

降。这与前述高压辊磨预处理次数对焙烧球强度的影响结果一致。

综上所述，适当地进行高压辊磨预处理可有效降低铁矿原料颗粒粒度，强化球团内部铁矿颗粒的氧化固结，提高赤铁矿晶体的连晶程度，并减少球团矿内部孔洞和裂缝，从而提高球团矿强度；但过度高压辊磨又会增加球团内部低熔点共晶物相生成量，削弱晶桥连接的刚性，导致球团矿结构疏松，抗压强度下降。

4　结　论

(1) 高压辊磨通过机械活化作用显著提高了铁精矿的细粒级占比(<0.074 mm 粒级质量分数从 83.70% 提升至 91.77%) 和比表面积(从 2 424.07 cm^2/g 增至 3 331.60 cm^2/g)，从而增强颗粒间的黏附能力。当高压辊磨次数为 2 次时，生球抗压强度达到 23.0 N/P，较未处理组(14.0 N/P) 提高 64.3%；但过度辊磨(4 次) 会因颗粒过细导致生球塑性下降，抗压强度降低至 21.6 N/P。此外，适宜的辊磨给料水分(8%) 和膨润土用量(1.2%) 可进一步优化生球性能。

(2) 在焙烧过程中，高压辊磨预处理通过降低固相反应活化能，使球团在较低温度下实现高效固结。经 2 次辊磨的球团在 1 110 ℃焙烧时抗压强度即可达 2 599 N/P，满足生产要求；而未处理组需 1 200 ℃才能达到生产的强度要求(3 496 N/P)。然而，过高的焙烧温度(>1 200 ℃) 会因过量低熔点液相(如铁橄榄石) 的生成削弱晶桥连接，导致强度下降。

(3) 微观结构分析表明，适度辊磨(2 次) 可促进球团矿内部赤铁矿(Fe_2O_3) 再结晶连晶，减少孔洞并使物相镶嵌更致密；而过度辊磨(4 次) 则增加球团矿内部低熔点共晶物相，恶化球团结构。

(4) 高压辊磨预处理通过机械活化与颗粒表面改性，实现了球团低温高效固结(焙烧温度降低 90～100 ℃)，为钢铁行业节能减排提供了理论依据与技术支撑。本文获得的混合铁精矿优化参数：辊磨 2 次、给料水分为 8%、膨润土用量为 1.2%、预热温度为 890～920 ℃、焙烧温度为 1 110～1 200 ℃。

参考文献：

[1] 王新东，上官方钦，邢奕，等. “双碳”目标下钢铁企业低碳发展的技术路径[J]. 工程科学学报，2023，45(5)：853－862.
WANG Xindong，SHANGGUAN Fangqin，XING Yi，et al. Research on the low-carbon development technology route of iron and steel enterprises under the “double carbon” target[J]. Chinese Journal of Engineering，2023，45(5)：853－862.

[2] WANG L，YANG Y B，OU Y，et al. In-depth study on the synergistic conversion mechanism of iron ore with waste biochar for co-producing directly reduced iron (DRI) and syngas[J]. Energy，2024，290：130250.

[3] WANG L，YANG Y B，OU Y，et al. Synergistic conversion of iron ore sintering dust and waste biochar to produce direct reduction iron and syngas：Gasification，reduction behavior and thermodynamic analysis[J]. Journal of Cleaner Production，2024，434：139996.

[4] 刘梦飞，刘育明. “基石计划”对我国铁矿石资源开发格局的影响分析[J]. 中国矿山工程，2022，51(5)：6－10.
LIU Mengfei，LIU Yuming. Effect analysis of “foundation plan” on China’s iron ore resources development pattern[J]. China Mine Engineering，2022，51(5)：6－10.

[5] 王新东. 适应高比例球团冶炼的高炉系统设计与生产实践[J]. 钢铁，2022，57(12)：23－31.
WANG Xindong. Design and production practice of blast furnace system for high proportion pellet smelting[J]. Iron and Steel，2022，57(12)：23－31.

[6] 杨永斌，段倩倩，李骞，等. 铁矿球团膨润土黏结剂提质改性研究进展[J]. 钢铁研究学报，2022，34(2)：101－110.
YANG Yongbin，DUAN Qianqian，LI Qian，et al. Research progress on upgrading modification of iron ore pellet bentonite binder[J]. Journal of Iron and Steel Research，2022，34(2)：101－110.

[7] 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.

[8] 李骞，马永和，唐银华，等. 铁矿球团用有机黏结剂研究进展[J]. 钢铁，2022，57(11)：11－21.

中国知网　https://www.cnki.net

LI Qian, MA Yonghe, TANG Yinhua, et al. Research progress of organic binder for iron ore pellets [J]. Iron and Steel, 2022, 57(11): 11 – 21.

[9] 李磊,豆远波,王宇,等. 大比例球团矿在包钢2 200 m³高炉的生产实践 [J]. 包钢科技,2022,48(4):13 – 17.
LI Lei, DOU Yuanbo, WANG Yu, et al. Production practices on large proportion of pellet in 2 200 m³ blast furnace of Baotou steel [J]. Science & Technology of Baotou Steel, 2022, 48(4): 13 – 17.

[10] XING Z X, CHENG G J, GAO Z X, et al. Optimization of experimental conditions on preparation of oxidized pellets with New Zealand sea sand ore [J]. Metallurgical Research & Technology, 2020, 117(4): 411.

[11] CHEN P, ZHOU X L. A study on the influence of drying and preheating parameters on the roasting properties of limonite pellets [J]. Minerals, 2024, 14(2): 166.

[12] 韩凤光,杨涛,赵贺喜,等. 复合黏结剂对球团高温固结的影响及机理 [J]. 工程科学学报,2023,45(9):1450 – 1458.
HAN Fengguang, YANG Tao, ZHAO Hexi, et al. Effects and mechanism of composite binder on high-temperature consolidation of pellets [J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(9): 1450 – 1458.

[13] 刘卫星,肖洪,化泽一,等. 焙烧制度对熔剂性球团强度及冶金性能的影响 [J]. 河北冶金,2023(5):7 – 12; 31.
LIU Weixing, XIAO Hong, HUA Zeyi, et al. Effect of roasting system on flux pellet strength and metallurgical properties [J]. Hebei Metallurgy, 2023(5): 7 – 12; 31.

[14] 杨锐. 钒钛磁铁矿氧化球团制备研究 [J]. 四川冶金,2025,47(1):42 – 46.
YANG Rui. Preparation of oxidized pellet from vanadium-titanium magnetite [J]. Sichuan Metallurgy, 2025, 47(1): 42 – 46.

[15] 葛新建. 高压辊磨工艺在我国冶金矿山的应用现状 [J]. 现代矿业,2009,25(9):1 – 5.
GE Xinjian. Application state of high pressure rolling process in metallurgic mines in China [J]. Modern Mining, 2009, 25(9): 1 – 5.

[16] 吕浩,甘敏,文小平,等. 高压辊磨强化粗粒铁矿粉制备高品质球团的规律 [J]. 中国冶金,2024,34(5):89 – 97.
LÜ Hao, GAN Min, WEN Xiaoping, et al. Regularities of high-pressure roll grinding strengthening for high-quality pellets preparation from coarse iron ore powder [J]. China Metallurgy, 2024, 34(5): 89 – 97.

[17] 王昌安,熊守安,朱德庆. 高压辊磨预处理铁精粉对生球性能的影响 [J]. 烧结球团,2002,27(6):12 – 15.
WANG Chang'an, XIONG Shouan, ZHU Deqing. Effect of high pressure roller mill pre-treating concentrates on greenball properties [J]. Sintering and Pelletizing, 2002, 27(6): 12 – 15.

[18] 李亚飞,杨涛,刘在春,等. 高压辊磨对含硫酸渣超细铁精粉生球性能的影响 [J]. 钢铁研究学报,2022,34(7):639 – 647.
LI Yafei, YANG Tao, LIU Zaichun, et al. Effect of high pressure roller grinding on green pellets properties of ultra-fine iron concentrate containing pyrite cinder [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2022, 34(7): 639 – 647.

[19] 温宝良,范子豪,李家新,等. 高硅超细铁精矿熔剂性球团矿固结行为及还原特性 [J]. 钢铁,2024,59(5):33 – 44.
WEN Baoliang, FAN Zihao, LI Jiaxin, et al. Consolidification behavior and reduction characteristics of high-silicon ultrafine magnetite concentrate fluxed pellets [J]. Iron and Steel, 2024, 59(5): 33 – 44.

[20] 刘卓奇. 磁铁矿球团合理氧化程度及氧化 – 固结动力学研究 [D]. 长沙:中南大学,2023.
LIU Zhuoqi. Study of reasonable oxidation degree and oxidation-Induration kinetics of magnetite pellets [D]. Changsha: Central South University, 2023.

中国知网 https://www.cnki.net