基于铁精矿强化混匀的球团矿提质技术研究①

余莹[1]，李绍春[2]，杜艳清[1]，季志云[3]，范晓慧[3]，施建军[1]，甘敏[3]，王晓龙[3]，刘燚[3]，翁兴洋[2]，裴乃义[1]
(1.鞍钢集团矿业弓长岭有限公司，辽宁 辽阳 111008；2.鞍钢集团矿业有限公司，辽宁 鞍山 114000；3.中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083)

摘 要：针对多种铁精矿物化特性差异及常规干式混合难以充分消除原料波动的问题，采用矿浆湿式混匀耦合强力混合工艺，研究该工艺对混合料均匀性及球团性能的影响。结果表明，湿混时间 3 min 可显著提高混合铁精矿 TFe、FeO 及-0.074 mm 粒级含量的均匀性；湿混时间 3 min、强混时间 40 s 条件下，混合料各项均匀性指标与单独强混 60 s 基本相当。与无湿混、强混时间 40 s 相比，湿混时间 3 min、强混时间 40 s 条件下，生球抗压强度和落下强度分别提高 12.17%和 13.95%，预热球和焙烧球抗压强度分别提高 7.64%和 10.63%，同时显著降低各项性能的波动。该工艺可从源头提高多种铁精矿的均匀性，缩短强混时间，并为球团生产提质与稳定运行提供技术支撑。

关键词：球团矿；铁精矿；均匀性指数；抗压强度；提质；配矿；混矿
中图分类号：TF046　　**文献标志码**：A　　doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.04.024
文章编号：0253-6099(2026)04-0158-05

Technology for Pellet Quality Improvement Based on Intensive Mixing of Iron Concentrates

YU Ying[1], LI Shaochun[2], DU Yanqing[1], JI Zhiyun[3], FAN Xiaohui[3], SHI Jianjun[1], GAN Min[3], WANG Xiaolong[3], LIU Yi[3], WENG Xingyang[2], PEI Naiyi[1]
(1.*Ansteel Mining Gongchangling Co., Ltd., Liaoyang* 111008, *Liaoning*, *China*; 2.*Ansteel Mining Co., Ltd., Anshan* 114000, *Liaoning*, *China*; 3.*School of Minerals Processing and Bioengineering*, *Central South University*, *Changsha* 410083, *Hunan*, *China*)

Abstract: Aiming at the differences in physic-chemical properties of various iron concentrates and the difficulty in fully eliminating raw-material fluctuation by conventional dry blending, a technique of wet mixing combined with intensive mixing was adopted, and its effect on mixture homogeneity and pellet properties were investigated. The results show that wet mixing for 3 min can greatly improve the homogeneity of TFe, FeO and −0.074 mm fraction content in the mixed iron concentrates. After 3 min wet mixing and 40 s intensive mixing, the mixture has each homogeneity index basically equivalent to that after 60 s independent intensive mixing. The obtained green pellets have the compressive strength and drop strength improved by 12.17% and 13.95%, respectively, and preheated pellets and fired pellets have the compressive strength up by 7.64% and 10.63%, respectively, compared to that after raw material is just processed with 40 s intensified mixing without wet mixing. Meanwhile, the fluctuations in various pellet properties are remarkably reduced. It is concluded that this process can improve the homogeneity of various iron concentrates at the source and shorten the intensive mixing time, which provides technical support for quality improvement and stable operation in pelletization.

Key words: pellet; iron concentrate; homogeneity index; compressive strength; quality improvement; ore blending; ore mixing

我国钢铁生产流程主要采用传统的高炉-转炉长流程，炉料入炉前须经过造块处理方能满足高炉对炉料铁的要求[1]。通常采用烧结与球团两种传统造块方法处理高炉炉料，与烧结矿相比，球团矿品位高、粒

① **收稿日期**：2026-03-10
基金项目：国家自然科学基金(52274344)；湖南省科技创新计划(2023RC3042)
作者简介：余莹(1982—)，男，重庆人，正高级工程师，主要从事选矿、球团及烧结技术管理工作。E-mail:94300278@qq.com
通信作者：季志云(1987—)，男，湖北孝感人，博士，教授，主要从事低碳冶金与烟气污染物控制方面的研究工作。E-mail:zhiyunji@sina.com

度更均匀,且球团法能耗低、污染小,在“双碳”战略要求背景下更适应我国炼铁行业绿色、低碳发展趋势[2-4]。因此,在发挥球团自身优势的基础上,进一步挖掘其提质技术,对整个炼铁系统降本增效具有重要现实意义。

球团生产以细粒铁精矿为主要原料,并配加适量黏结剂,物料混合均匀性在球团生产过程中至关重要。球团提质降耗强化技术包括优化配矿、原料预处理、膨润土改性、焙烧设备改造、配加复合黏结剂及制备镁质球团等[5-8]。其中,优化配矿利用不同铁精矿物化特性的互补性改善混合料成球与焙烧性能,但原料种类较多、性质波动较大时,仅通过配矿难以保证各组分均匀分布[9]。球磨、高压辊磨和强力混合等原料预处理技术可通过调控粒度组成、提高比表面积、改善黏结剂分布,强化造球和焙烧过程[10-11]。然而,这类干式预处理通常在铁精矿脱水后实施,主要改善颗粒形貌和混合料分散状态,难以从选矿产品输出端消除不同铁精矿成分、粒度波动,且部分工艺还存在设备投资和运行成本较高的问题[12-14]。因此,在常规强力混合之前增加矿浆湿式混匀工序,使多种铁精矿在水介质中充分分散并均匀重组,从源头上降低混合精矿化学成分和粒度波动;再通过强力混合进一步使水分与黏结剂均匀分布,可形成湿混与强混的协同作用。

基于此,本文构建矿浆湿式混匀耦合强力混合工艺,研究湿混时间和强混时间对混合料均匀性的影响,并评价该工艺对生球、预热球和焙烧球性能及其均匀性的强化效果,研究结果对球团厂原料均质化和球团提质具有一定指导意义。

1　原料性能与研究方法

1.1　原料性能

实验所用球团原料来自国内某球团厂。球团原料包含 5 种铁精矿,其主要化学成分见表 1。由表 1 可知,5 种铁精矿的 TFe 品位均大于 65%;铁精矿 C 的 SiO_2 含量小于 5.0%,铁精矿 B 的 SiO_2 含量最高,为 7.50%。

表 1　球团原料主要化学成分(质量分数)

Table 1　Main chemical composition of raw materials for pelletization

%

原料名称	TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	S	P	烧失
磁铁精矿	66.96	28.21	7.09	0.35	0.36	0.43	0.029	0.006	−2.72
赤铁精矿	67.61	10.48	5.57	0.29	0.64	0.71	0.036	0.008	−1.26
铁精矿 A	67.18	10.59	6.13	0.51	1.05	0.46	0.050	0.005	−1.27
铁精矿 B	66.53	27.75	7.50	0.42	0.56	0.34	0.120	0.024	−2.50
铁精矿 C	68.14	8.26	2.55	0.06	0.11	0.28	0.059	0.010	−1.06

表 2 为球团原料的物性参数。静态成球性指数 K 判定指标为:$K \geq 0.80$,优等成球性;$0.60 \leq K < 0.80$,良好成球性;$0.35 \leq K < 0.60$,中等成球性;$0.20 \leq K < 0.35$,弱成球性;$K < 0.20$,无成球性。由表 2 可知,铁精矿 A 中−74 μm 粒级占比 89.30%,铁精矿 B 和铁精矿 C 中−74 μm 粒级占比均低于 80%,磁铁精矿和铁精矿 A 具有中等成球性。

表 2　球团原料的物性参数

Table 2　Physical properties of raw materials for pelletization

原料名称	−74 μm 粒级占比/%	比表面积/($cm^2 \cdot g^{-1}$)	K
磁铁精矿	88.66	1 547	0.43
赤铁精矿	88.50	1 250	0.33
铁精矿 A	89.30	1 373	0.43
铁精矿 B	77.81	1 403	0.22
铁精矿 C	61.88	1 150	0.17

1.2　研究方法

湿混采用专门的搅拌器,以水为介质,在固液比 1∶1、转速 50 r/min、一定搅拌时间条件下做 3 组对照试验,搅拌完成后将搅拌器分区,每组取样 5 个,单个样品取 50 g 左右,检测样品 TFe 品位、FeO 品位与粒度。

采用 R05 强力混合机对原料进行混合,有效容积为 40 L,水分适宜范围为 3%~10%。在转速 50 r/min、填充率 40%、一定混合时间条件下做 3 组对照试验,混合完成后将强力混合机内物料分区,各区域取样共 6 个,单个样品取 50 g 左右,测定样品的 TFe 品位、FeO 品位、水分含量与粒度。采用湿混与强混后样品检测数据进行均匀度指数计算,其计算式[15]如下:

$$M = (1 - C_V) \times 100\% \tag{1}$$

$$C_V = \frac{\sigma}{\mu} \tag{2}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(X_i - \mu)^2} \tag{3}$$

$$\mu = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i \tag{4}$$

式中:M 为各评价特性参数的均匀性指数,%;C_V 为各评价特性参数的离散系数;σ 为各评价特性参数的标准差;μ 为各评价特性参数的平均值;X_i 为各评价参数的质量分数(TFe 品位、FeO 品位、水分含量或粒度),%;n 为样品数量。

均匀性指数 M 代表混合料在不同区域内的参数波动,M 值越大,表示混合料的分布越均匀,均匀性指数 M 与评价特性参数的均匀性关系为:$M \geq 90\%$,均匀

性优;80%≤M<90%,均匀性良好;60%≤M<80%,均匀性中等;M<60%,均匀性差。

造球实验参数分别为:膨润土配比 1.2%、造球水分 6.5%、造球时间 12 min。预热焙烧实验参数为:预热温度 950 ℃、预热时间 10 min、焙烧温度 1 250 ℃、焙烧时间 12 min。

依据国家标准采用化学分析-容量法测定原料化学成分;采用激光粒度分析仪测定含铁原料的微细粒含量。

球团抗压强度检测方法:取 20 个大小均匀的球,在智能球团抗压强度试验机上检测,压力机最大压力 10 kN,取平均值作为检验指标。

2 结果与讨论

2.1 湿混对铁精矿物化特性的影响规律

湿混试验所用原料由磁铁精矿与赤铁精矿按照质量比 3∶1配制,其中赤铁精矿由铁精矿 A、铁精矿 B、铁精矿 C 按质量比 2∶1∶1混合制备。湿混时间对铁精矿物化特性的影响规律见表 3。由表 3 可见,TFe 品位、FeO 品位、-0.074 mm 粒级含量的均匀性指数随着湿混时间延长而增大;湿混时间由 3 min 延长至 5 min 时,-0.074 mm 粒级含量均匀性指数增加幅度较小,因此湿混时间选用 3 min。采用湿混工艺可让球团铁精矿原料的化学成分和粒度分布更加均匀,改善原料的物化特性,强化球团原料的混匀过程,避免后续造球时出现单区域原料成球性不佳、成分与其他区域差异过大的问题。

表 3 湿混时间对铁精矿物化特性的影响规律

Table 3 Effect of wet-mixing time on physic-chemical properties of iron concentrate

湿混时间/min	均匀性指数/%		
	TFe 品位	FeO 品位	-0.074 mm 粒级含量
1	98.45	82.76	94.12
3	99.00	97.41	98.66
5	99.33	98.24	99.31

2.2 湿混耦合强混对铁精矿物化特性的影响规律

强力混合球团原料与湿混试验所用原料相同。探究了湿混耦合强混对铁精矿物化特性的影响规律。未预先湿混时,强力混合对混合料混匀效果的影响见表 4。由表 4 可见,随着强混时间延长,混合料中 FeO 品位、水分含量与-0.074 mm粒级含量的均匀性指数均得到提升。相比之下,TFe 品位均匀性指数随着强混时间延长变化较小。强混时间 20 s 时,TFe 品位均匀性指数为 99.56%。

表 4 强混对混合料混匀效果的影响

Table 4 Effect of intensive mixing on mixture homogeneity

强混时间/s	均匀性指数/%			
	TFe 品位	FeO 品位	-0.074 mm 粒级含量	水分含量
20	99.56	83.48	93.09	91.28
40	99.63	86.42	96.88	96.66
60	99.69	99.01	98.64	97.83

预先湿混时间 3 min 条件下,湿混耦合强混对混合料混匀效果的影响见表 5。对比表 4 和表 5 可知,相较于未预先湿混的混合料,同样强混时间下,预先湿混的混合料各项指标(除 TFe 品位外)均匀性指数更高,表明铁精矿的预先湿混工序强化了混合料的混匀效果;预先湿混时间 3 min、强混时间 40 s 的混合料均匀性指数数值与未预先湿混、强混时间 60 s 条件下的混合料均匀性指数数值相当;预先湿混时间 3 min 时,强混时间 60 s 混合料的均匀性指数较 40 s 时有进一步提升,但增幅有限,且能耗也随之增加。因此,适宜的混匀制度为湿混时间 3 min、强混时间 40 s。与单强混工艺相比,湿混耦合强混工艺对球团混合料的混匀效果更好,所得产品为性能指标均匀的单一品种混合铁精矿,有利于简化后续球团生产配料过程。文献[16]提到球团原料的混合能力提高后,不仅可以改善混合效果,也能促进后续造球过程,提高生球质量指标及其均匀性,使球团生产过程趋于稳定,并对后续竖炉顺行、球团生产提质也有明显效果。

表 5 湿混耦合强混对混合料混匀效果的影响

Table 5 Effect of wet mixing and intensive mixing on mixture homogeneity

强混时间/s	均匀性指数/%			
	TFe 品位	FeO 品位	-0.074 mm 粒级含量	水分含量
20	99.45	98.73	98.78	93.19
40	99.54	98.52	99.32	97.67
60	99.79	99.16	99.38	98.05

2.3 湿混耦合强混对球团指标的影响

2.3.1 对生球性能指标的影响

经湿混耦合强混工艺(湿混时间 3 min、强混时间 40 s)得到的球团混合料有着更好的均匀性,在此基础上研究了该混合料造球的生球性能指标及其均匀性的影响规律,结果见表 6。其中方案 1 为强混时间 20 s;方案 2 为强混时间 40 s;方案 3 为湿混时间 3 min、强混时间 40 s;方案 4 为强混时间 60 s。由表 6 可知,随着强混时间延长,方案 1、2、4 生球的抗压强度、落下强

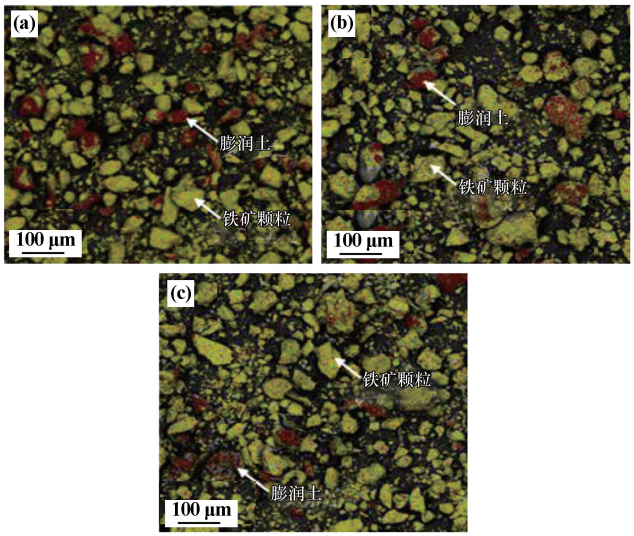
度及爆裂温度均呈上升趋势。对比同等强混时间的方案 2、3,采用湿混耦合强混工艺的方案 3 生球综合性能指标更好,相较于方案 2,方案 3 生球的抗压强度提升了 12.17%,落下强度提升了 13.95%,爆裂温度也相对更高,生球均匀程度更好。

表 6　不同混合方案下生球性能及其均匀性

Table 6　Properties and homogeneity of green pellet by different mixing schemes

方案	性能指标			均匀性指数/%	
	抗压强度/(N·P^{-1})	落下强度/[次·(0.5 m·个)$^{-1}$]	爆裂温度/℃	抗压强度	落下强度
1	10.3	3.7	420	81.50	78.93
2	11.5	4.3	485	87.35	85.14
3	12.9	4.9	535	95.37	93.50
4	13.5	4.8	540	96.01	94.33

图 1 为不同强力混合条件下球团原料 SEM 图像。由图 1 可知,随着强混时间延长,球团原料内部膨润土由局部团聚状态逐步转变为均匀分布。膨润土均匀分布有利于生球表层受应力时强度分布均匀,避免了生球某点强度较高或较低导致测量结果与实际存在差异的问题,提高了生球的质量指标。



(a) 强混 20 s; (b) 强混 40 s; (c) 强混 60 s

图 1　不同强力混合条件下球团原料 SEM 图像

Fig. 1　SEM images of raw materials by different intensive mixing schemes for pelletization

2.3.2　对预热球与焙烧球性能指标的影响

不同混合方案下预热球和焙烧球性能及其均匀性见表 7。由表 7 可知,随着强混时间延长,方案 1、2、4 预热球与焙烧球的抗压强度总体呈现上升的趋势。相较于方案 2,方案 3 预热球、焙烧球的抗压强度分别提升了 7.64%和 10.63%,湿混耦合强混能有效提高球团指标的均匀性。在相同的热工制度下,表层 Fe_3O_4 分布较均匀的生球会被充分氧化,转变为 Fe_2O_3,其强度更高;原料粒度分布不均匀所制得的生球表层存有较大颗粒,在预热时会存在未完全氧化的 Fe_3O_4,且焙烧时球团内部化学成分若存在差异,会导致生成的钙铁橄榄石颗粒大小不一,反射色多样,影响球团强度[17]。

表 7　不同混合方案下预热球和焙烧球性能及其均匀性

Table 7　Properties and homogeneity of preheated and fired pellets by different mixing schemes

方案	性能指标/(N·P^{-1})		均匀性指数/%	
	预热球抗压强度	焙烧球抗压强度	预热球抗压强度	焙烧球抗压强度
1	387	2 268	73.30	75.17
2	445	2 475	79.55	80.23
3	479	2 738	89.69	90.35
4	488	2 762	90.10	91.42

3　结论

1) 湿混可以提高球团铁精矿原料的化学成分及粒度分布均匀性、强化球团原料混匀过程,有效避免后续造球时出现单区域原料成球性不佳、各区域原料差异性过大的问题。

2) 与单一强混工艺相比,湿混耦合强混工艺球团原料的混匀效果更好,得到的产品为性能指标均匀的单一品种混合铁精矿,有利于简化后续球团生产配料过程。

3) 湿混耦合强混工艺能降低生球、预热球与焙烧球性能的波动程度,提高产出球团的均匀性,且与单一强混工艺相比,相同强混时间条件下,耦合 3 min 湿混工艺生产的生球抗压强度提升 12.17%,落下强度提升 13.95%,预热球抗压强度提升 7.64%,焙烧球抗压强度提升 10.63%。采用湿混耦合强混工艺能改善球团各项性能指标的均匀性,对球团生产提质起到关键作用。

参考文献(References):

[1] 张福明. 炼铁系统低碳技术发展前景与途径[J]. 钢铁, 2022, 57(9):11-25.
Zhang Fuming. Development prospects and methods on low-carbon technology in ironmaking system[J]. Iron and Steel, 2022,57(9):11-25.

[2] 曹风,甘敏,范晓慧,等. 带式机镁质球团热工制度仿真及优化[J]. 钢铁研究学报, 2021,33(4):284-292.
Cao Feng, Gan Min, Fan Xiaohui, et al. Simulation and optimization of thermal engineering system for magnesium pellets of straight

grate[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2021,33(4):284-292.
[3] 张淑会,王宝勇,兰臣臣,等. 球团矿化学成分控制现状及展望[J]. 钢铁, 2020,55(8):19-26.
Zhang Shuhui, Wang Baoyong, Lan Chenchen, et al. Prospects and present status of pellets chemical composition control[J]. Iron & Steel, 2020,55(8):19-26.
[4] 王新东,金永龙. “双碳”背景下高炉使用高比例球团的展望[J]. 过程工程学报, 2022,22(10):1379-1389.
Wang Xindong, Jin Yonglong. Prospect on high ratio pellet utilized in blast furnace under the background of carbon peaking and carbon neutrality[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2022,22(10):1379-1389.
[5] 王莹,何志军,陈妍,等. 氢基竖炉直接还原工艺发展现状及思考[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):212-216.
Wang Ying, He Zhijun, Chen Yan, et al. Development status of hydrogen-based direct reduction process in shaft furnace and related thoughts[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(4):212-216.
[6] 张辉,夏铁玉,宫作岩,等. 带式焙烧机球团生产提质降耗措施[J]. 烧结球团, 2021,46(3):59-64.
Zhang Hui, Xia Tieyu, Gong Zuoyan, et al. The measures of improving quality and reducing consumption in pellets production of belt type roasting machine[J]. Sintering and Pelletizing, 2021,46(3):59-64.
[7] 陆启财. 低品质膨润土改性提质及其球团应用研究[D]. 武汉:武汉科技大学, 2021:46.
Lu Qicai. Research on modification and quality improvement of low-quality bentonite and its pellets application[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2021:46.
[8] 唐国成,黄细聪,路漫漫,等. 低质含镁原料制备碱性球团试验研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):217-222.
Tang Guocheng, Huang Xicong, Lu Manman, et al. Experimental study on preparation of alkaline pellets with low-quality magnesium-containing raw materials[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(4):217-222.
[9] 张辉,李志斌,刘沛江,等. 鞍钢带式机球团生产中优化配矿的研究与应用[J]. 矿冶工程, 2021,41(3):103-106.
Zhang Hui, Li Zhibin, Liu Peijiang, et al. Research and application of ore-proportioning optimization in ansteel pelletizing production with straight grate roasting machine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(3):103-106.
[10] 刘山平,马磊,宋云锋,等. 带式焙烧机球团原料预处理工艺优化[J]. 钢铁, 2023,58(6):36-44.
Liu Shanping, Ma Lei, Song Yunfeng, et al. Optimization of pretreatment process of pelletizing raw materials in belt roasters[J]. Iron and Steel, 2023,58(6):36-44.
[11] 许宝科,胡文祥,易安南,等. 高压辊磨机边料循环工艺在球团生产中的应用[J]. 中国冶金, 2021,31(8):49-53.
Xu Baoke, Hu Wenxiang, Yi Annan, et al. Application of high pressure grinding roller edge recycle process in pellet production[J]. China Metallurgy, 2021,31(8):49-53.
[12] 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.
[13] 姜涛. 烧结球团生产技术手册[M]. 北京:冶金工业出版社, 2014.
Jiang Tao. Technical manual of sintered pellet production[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2014.
[14] 范晓慧,张一雄,季志云,等. 强力混合对高比例精矿烧结的影响及机制[J]. 钢铁研究学报, 2021,33(1):25-31.
Fan Xiaohui, Zhang Yixiong, Ji Zhiyun, et al. Effect and mechanism of intensive mixing on sintering with high proportion iron ore concentrate[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2021,33(1):25-31.
[15] 陈有庆,赵吉祥. Φ1600×3500 强力混合机的研制及应用效果[J]. 烧结球团, 1996,21(5):57-59.
Chen Youqing, Zhao Jixiang. Development and application effect of Φ1600 × 3500 intensive mixer[J]. Sintering and Pelletizing, 1996,21(5):57-59.
[16] 董宝利. 竖炉球团混合料强力混合机研制及应用[J]. 山东冶金, 1999,21(增刊1):58-60.
Dong Baoli. Development and application of forcing mixer used in shaft furnace pellet mixture[J]. Shandong Metallurgy, 1999,21(S1):58-60.
[17] 杨雪峰. 混合铁精矿生产氧化球团的基础与应用研究[D]. 长沙:中南大学, 2011:101-103.
Yang Xuefeng. Fundamental and applied studies on preparing oxidized pellets from mixed iron ore concentrates[D]. Changsha: Central South University, 2011:101-103.

引用本文:余莹,李绍春,杜艳清,等. 基于铁精矿强化混匀的球团矿提质技术研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(4):158-162.
Yu Ying, Li Shaochun, Du Yanqing, et al. Technology for pellet quality improvement based on intensive mixing of iron concentrates[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(4):158-162.