

炼焦除尘灰制备球团矿的工艺优化试验

徐礼兵^{1,2}, 刘 杰², 解丹萍³, 周明顺², 张 辉², 靳 琦²

(1. 海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室, 辽宁 鞍山 114009; 2. 鞍钢集团钢铁研究院, 辽宁 鞍山 114009; 3. 鞍钢集团工程技术有限公司, 辽宁 鞍山 114021)

摘要:为实现炼焦除尘灰的资源化利用并探索其作为球团矿原料的可行性,本文系统考察在造球过程中配加炼焦除尘灰对生球、干球及成品球团矿等关键质量指标的影响,旨在确定其工业化应用的技术方案。试验以鞍钢磁铁精矿为主要原料,按不同比例掺配炼焦除尘灰进行球团制备与焙烧。结果表明:炼焦除尘灰的配入对生球和干球质量指标的影响较小,均能满足球团矿常规生产工艺要求。在除尘灰配比 $\leq 0.6\%$ 时,成品球团矿的抗压强度随配比增加而逐渐升高,满足高炉冶炼要求;但当配比超过 0.4% 时,焙烧过程中球团之间会发生黏结,且配比越高黏结情况越严重,影响正常生产。值得关注的是,炼焦除尘灰的配加显著优化了成品球团矿的冶金性能,有效改善了低温还原粉化指数并显著降低了还原膨胀率。这一积极作用可显著减少高炉炼铁过程中球团矿还原阶段产生的粉末量,有力保障高炉内料柱的透气性与高炉生产的长期稳定顺行。本文成果可为钢铁企业高效、环保地消纳炼焦除尘灰提供切实可行的技术途径与理论依据。

关键词:炼焦除尘灰; 球团; 低温还原粉化; 还原膨胀率

中图分类号: TF046.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)04-0073-08

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.04.060

Process optimization test of coking and dust removal ash preparation pellets

XU Libing^{1,2}, LIU Jie², XIE Danping³, ZHOU Mingshun², ZHANG Hui², JIN Xun²

(1. State Key Laboratory of Metal Material for Marine Equipment and Application, Anshan 114009, Liaoning, China;
2. Iron and Steel Research Institute of Ansteel Group, Anshan 114009, Liaoning, China; 3. Ansteel Engineering Technology Co., Ltd., Anshan 114021, Liaoning, China)

Abstract: In order to realize the resource utilization of coking and dust removal ash and explore its feasibility as a raw material for pellets, the effects of coking and dust removal ash on key quality indicators such as fresh pellets, dry pellets and finished pellets in the pelletizing process are systematically investigated, and the technical scheme for industrial application is determined. The test uses Ansteel's magnet concentrate as the main raw material, and mixes coking and dust removal ash in different proportions for pellets preparation and roasting. The results show that the combination of coking and dust removal ash has little effect on the quality indexes of fresh pellets and dry pellets, and could meet the requirements of the conventional production process of pellets. The compressive strength of the finished pellets gradually increases with the increase of the ratio when the dust removal ash ratio $\leq 0.6\%$, which meets the requirements of blast furnace smelting. However, when the ratio exceeds 0.4% , the roasting process will lead to bonding between pellets, and the higher the ratio, the more serious the bonding will be, affecting normal production. It is worth noting that the addition of coking and dust removal ash significantly optimizes the metallurgical performance of finished pellets, effectively improves the low-temperature reduction degradation index (RDI) and significantly reduces the reduction swelling index (RSI). This positive effect can significantly reduce the amount of powder produced in the pellets reduction stage during the blast furnace

收稿日期: 2024-08-14; 修回日期: 2024-09-09

作者简介: 徐礼兵(1988—),男,高级工程师,从事烧结球团配矿技术研究工作。

ironmaking process, effectively ensuring the breathability of the blast furnace inner column and the long-term stability and forward progress of blast furnace production. This paper can provide a practical technical approach and theoretical basis for the efficient and environmentally friendly consumption of coking and dust removal ash by iron and steel enterprises.

Key words: coking and dust removal ash; pellets; low-temperature reduction degradation; reduction swelling index

当前,我国钢铁行业整体呈现经营亏损态势,全行业面临前所未有的风险和挑战。在严峻的市场环境下,最大程度降低生产成本、提高企业核心竞争力、推进绿色低碳转型已成为钢铁企业实现高质量发展的必由之路^[1]。作为典型的资源能源密集型产业,钢铁工业不仅消耗巨量铁矿、煤炭和水资源,同时产生大量固体废弃物与污染物,面临环境承载力和能源消耗的双重约束^[2-3]。在此背景下,深化固废资源化利用、构建循环经济模式,既是破解环境困局的关键举措,更是行业可持续发展的战略支点^[4]。

球团矿因其优异的冶金性能(高品位、高强度和良好还原性)及便于长距离运输的特点,自20世纪50年代工业化应用以来,已成为现代高炉不可或缺的优质炉料^[5-7]。实践表明,北美钢铁企业球团矿占铁原料消耗总量的80%~90%,而我国球团矿在高炉炉料中的占比亦呈快速上升趋势^[8-9]。应用球团矿的核心优势在于:显著降低炼铁工序燃料比、减少污染物排放,并通过改善高炉透气性提升冶炼效率^[10-13]。以鞍钢为例,球团矿在当前炉料结构中的占比约为25%,球团生产主要原料为鞍钢磁铁精矿。因此,开发低成本球团原料、拓展资源利用渠道,对降低吨铁成本具有直接经济效益。作为焦化工序典型固废,鞍钢炼焦除尘灰年产量近17万吨。现有研究对其资源化利用主要聚焦三条路径:① 填埋处置。该方法占用土地且存在重金属浸出风险。② 烧结配料。该方法利用炼焦除尘灰的固定碳(质量分数大于70%)替代部分燃料。③ 高炉喷吹。该方法将炼焦除尘灰作为辅助碳源注入风口回旋区。然而,后两种主流途径存在显著弊端:① 烧结应用缺

陷。炼焦除尘灰极细的粒度破坏烧结料层透气性,导致烧结速度下降、能源消耗上升;此外,其高碱金属含量易引发烧结矿低温还原粉化指数(RDI)恶化。② 喷吹应用瓶颈。灰分中SiO₂和Al₂O₃的比例失衡会显著升高煤粉灰熔点,导致喷枪结瘤堵塞;同时未燃尽的细颗粒将加重煤气系统粉尘负荷,影响高炉操作稳定性。

因此,亟需开发炼焦除尘灰的高效消纳路径。本文针对炼焦除尘灰在球团矿制备中的系统化应用开展研究,通过造球试验总结炼焦除尘灰对比对生球落下强度、抗压强度及干球爆裂性能的影响规律;研究不同配比下球团的微观结构演变,阐明黏结现象的临界阈值与发生机制;测试成品球团抗压强度、低温还原粉化指数及还原膨胀率(RSI),确定配比-性能定量影响关系;寻求球团矿黏结与冶金性能的平衡点,确定最优配比范围,并核算吨球团降本效益及全厂资源循环经济效益,以期为同行提供借鉴与参考。

1 试验原料与方法

1.1 炼焦除尘灰性质

本文采用的炼焦除尘灰为鞍钢炼焦总厂干熄焦除尘灰与焦炭筛分除尘灰的混合物,其化学成分如表1所示。由表1可见:该除尘灰具有较低的堆积密度,实测值为0.76 g/cm³;其固定碳质量分数高达83.82%,挥发分含量极低。基于化学成分特性可知,炼焦除尘灰作为球团矿原料时,其在焙烧过程中可通过自身燃烧释放热量,在适宜配比条件下可降低焙烧温度,从而减少能源能耗。

为系统评估炼焦除尘灰的粒度特性对造球工艺的潜在影响,依据《粒度分析激光衍射法》

表1 炼焦除尘灰的工业分析和灰的主要化学成分(质量分数)

Table 1 Industrial analysis of coking and dust removal ash and main chemical components of ash %

工业分析			灰的主要化学成分						
固定碳	灰分	挥发分	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O
83.82	14.11	1.45	1.41	6.74	0.80	0.21	3.58	0.10	0.14

(GB/T 19077—2016)对炼焦除尘灰进行粒度分布检测。检测结果显示:该除尘灰中 $<0.075\text{ mm}$ 的粒级占比为47%,关键黏结粒级($<0.045\text{ mm}$)占比仅为33%。对比“球团生产用鞍钢磁铁精矿的粒度控制标准”(要求 $<0.075\text{ mm}$ 的粒级占比 $>90\%$ 、 $<0.045\text{ mm}$ 的粒级占比 $>75\%$),可见炼焦除尘灰存在显著差异,其超细颗粒($<0.045\text{ mm}$)占比比精矿标准低42个百分点。这种粗粒度分布特征将直接影响造球过程中颗粒水膜的吸附效率与毛细力作用,具体表现为粗颗粒占比过高会削弱生球核化初期的聚集强度,并降低生球长大阶段的密实化程度,从而对生球的成球率及机械强度产生不利影响。

造球原料颗粒的几何形貌直接决定其比表面积、颗粒间接触面积及密实嵌合度,对成球性能具有显著影响^[6]。为直观对比原料特性,采用扫描电镜(SEM)对炼焦除尘灰及鞍钢磁铁精矿进行微观形貌观察(放大倍率为 $500\times$ 和 $1\,000\times$),并辅以局部点元素分析,以探究其成球性能差异,如图1所示。由图1(a)、(b)可见,炼焦除尘灰颗粒呈表面光滑的薄片状结构,粒度偏大且分布宽泛;结构疏松多孔,棱角钝化,可供黏附的微细颗粒稀缺,阻碍球团分层长大。其化学元素以

C、O为主,含微量S、K、Na、Zn等碱金属;其薄片结构可提升传热效率,促进焙烧过程燃烧放热。由图1(c)、(d)可见,磁铁精矿颗粒呈表面粗糙的多棱角块状,粒度较小且分布均一;颗粒间接触面积大,致密且堆积性强;高表面摩擦力可增强机械啮合作用,使其成球性能优异。其化学元素以Fe、O为主,含少量Si。总之,炼焦除尘灰的薄片状结构导致其成球性显著弱于磁铁精矿,但其燃烧特性可辅助焙烧。

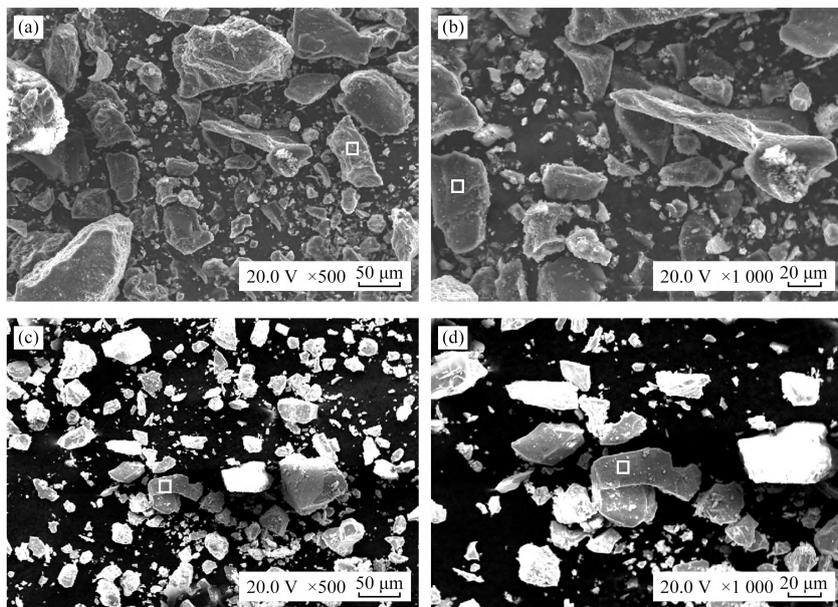
1.2 试验方案

为探索炼焦除尘灰用于球团生产的可行性,将其与磁铁精矿搭配,在实验室开展圆盘造球试验,并使用管式焙烧炉模拟带式焙烧机条件焙烧球团矿,为后续工业应用提供技术依据。在皂土等配矿参数一致的条件下,考察炼焦除尘灰对比对生球、干球及成品球指标的影响,确定其作为球团原料的适宜配比。造球试验方案如表2所示。

2 试验结果与讨论

2.1 生球、干球指标

对所制备生球的落下强度和抗压强度进行检测,并将生球烘干后测试干球的抗压强度。结果如表3所示。由表3可知,在原料中使用炼焦除尘



炼焦除尘灰:(a) $500\times$; (b) $1\,000\times$ 。鞍钢磁铁精矿:(c) $500\times$; (d) $1\,000\times$

图1 炼焦除尘灰和鞍钢磁铁精矿的微观形貌

Fig. 1 The microscopic morphology of coking and dust removal ash and Ansteel's magnet concentrate

表 2 造球试验方案(质量分数)

Table 2 Experimental scheme of pelletizing

%

项目	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]	8 [#]
炼焦除尘灰	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	2.0	3.0
鞍钢磁铁精矿	100.0	99.8	99.6	99.4	99.2	99.0	98.0	97.0

表 3 造球试验结果

Table 3 Results of pelleting test

方案 编号	生球落下强度/ [次·(0.5 m) ⁻¹]	生球抗压 强度/(N·P ⁻¹)	干球抗压 强度/(N·P ⁻¹)
1 [#]	13.5	8.1	73.2
2 [#]	13.3	8.2	74.6
3 [#]	14.1	8.1	73.5
4 [#]	15.4	8.1	72.1
5 [#]	15.1	8.0	72.8
6 [#]	10.5	8.2	68.3
7 [#]	5.0	8.0	63.4
8 [#]	3.8	8.1	66.1

灰与磁铁精矿时,与未添加炼焦除尘灰的基准组相比,随着炼焦除尘灰配比在 0~0.8% 范围内逐渐增加,生球的落下强度呈现略微升高的趋势;而在此配比范围内,生球及干球的抗压强度则未发生明显变化。

在相同造球时间条件下,配加 1%、2%、3% 炼焦除尘灰所得生球的粒度范围分别为 14~17、13~15 mm 和 10~13 mm。这表明,由于炼焦除尘灰自身成球性较差,随着其配比的提高,生球的长大趋势减弱,粒度逐渐减小。生产实践表明,在干燥预热段的高温及高速气流冲击下,生球快速脱水。当球团内部产生的饱和蒸气压超过其表面所能承受的最大压力时,生球会发生爆裂,导致碎片飞溅^[14-16]。爆裂不仅使生球表面产生裂纹,严重时甚至导致生球破碎成粉末。这些带有裂纹或破碎的生球经焙烧后,成品球团矿的抗压强度显著下降,对球团矿的稳定生产乃至高炉的顺行极为不利^[17-18]。为评估炼焦除尘灰对球团爆裂性能的影响,采用动态介质法模拟带式焙烧机干燥段条件(温度、气流)进行试验。试验结果显示:即使在 450℃ 的高温条件下,配加炼焦除尘灰的生球也没有发生爆裂现象。这表明,炼焦除尘灰的配加对生球的爆裂性能无明显负面影响。因此,从爆裂性能角度看,配加炼焦除尘灰可以

满足球团矿的生产要求。

综合分析生球与干球的质量指标,实际生产将炼焦除尘灰作为造球原料使用时,其配比不超过 0.8% 对生球和干球的整体质量影响相对较小。

2.2 焙烧制度的确定

鉴于炼焦除尘灰富含固定碳,其影响主要用于焙烧过程的高温阶段。为系统评估炼焦除尘灰对成品球团矿质量的影响,本文开展生球焙烧试验。试验参照带式焙烧球团生产工艺,固定干燥参数(温度为 750℃、时间为 5 min)和预热温度(950℃),采用正交试验法重点优化预热时间、焙烧温度及焙烧时间三个关键参数。正交试验方案及结果如表 4 所示。

表 4 焙烧制度的正交试验方案

Table 4 The orthogonal test schema for the roasting process

方案 编号	预热 时间/ min	焙烧 温度/ ℃	焙烧 时间/ min	抗压 强度/ (kN·P ⁻¹)	化学成分(质 量分数)/%	
					TFe	FeO
1 [#]	8	1 240	10	2.806	63.52	1.44
2 [#]	8	1 260	12	4.258	63.52	0.18
3 [#]	8	1 280	14	4.008	63.38	0.18
4 [#]	10	1 260	14	3.796	63.38	0.18
5 [#]	10	1 280	10	4.352	63.38	0.18
6 [#]	10	1 240	12	3.420	63.38	0.18
7 [#]	12	1 280	12	3.596	63.38	0.18
8 [#]	12	1 240	14	4.002	63.38	0.18
9 [#]	12	1 260	10	3.794	63.38	0.18
K ₁	11.072 8	10.198 0	6.808 0	—	—	—
K ₂	11.568 0	12.612 8	11.848 8	—	—	—
K ₃	11.392 0	11.222 0	11.956 0	—	—	—
k ₁	3.69	3.40	2.27	—	—	—
k ₂	3.86	4.20	3.95	—	—	—
k ₃	3.80	3.74	3.99	—	—	—
R	0.17	0.80	1.72	—	—	—

注:K₁~K₃ 分别表示每个因素在各个水平下的指标总和;k₁~k₃ 分别为 K₁~K₃ 的平均值;R 为极差。

由表4可见:

(1) 影响因素主次排序。基于表4中的极差(R)分析,明确各因素对抗压强度影响的主次顺序:焙烧时间($R=1.72$)>焙烧温度($R=0.80$)>预热时间($R=0.17$)。这表明延长焙烧时间或适当提高焙烧温度是提升球团矿强度的关键。

(2) 抗压强度表现。试验结果显示,球团矿抗压强度在2.806 kN/P至4.352 kN/P之间波动。其中,方案5(预热10 min, 1 280 °C下焙烧10 min)获得了最高的抗压强度(4.352 kN/P),方案3(预热8 min, 1 280 °C下焙烧14 min, 4.008 kN/P)和方案8(预热12 min, 1 240 °C下焙烧14 min, 4.002 kN/P)也表现出较高水平。值得注意的是,方案5的焙烧时间仅为10 min,但其1 280 °C的高温在一定程度上弥补了焙烧时间的不足。

(3) 化学成分分析。分析表4中成品球团矿的化学成分发现,全铁(TFe)质量分数稳定在63.38%~63.52%,基本满足要求。氧化亚铁(FeO)含量是影响冶金性能的关键指标。当焙烧温度不低于1 260 °C且焙烧时间为12 min或14 min时,FeO质量分数均显著降低至0.18%。相比之下,在较低焙烧温度和较短时间组合下(方案1:预热8 min, 1 240 °C下焙烧10 min),FeO质量分数高达1.44%。这表明足够的焙烧温度($\geq 1\ 260\ ^\circ\text{C}$)和焙烧时间($\geq 12\ \text{min}$)对于有效降低FeO含量、满足球团矿工业生产要求至关重要。

综合比较9组试验方案的抗压强度结果与FeO含量指标(核心质量与冶金性能要求),并充分考虑极差分析揭示的参数影响规律,虽然方案5(1 280 °C/10 min)强度最高,但其高温条件会增加能源消耗。方案4(预热10 min, 1 260 °C下焙烧14 min)在保证极低FeO质量分数(0.18%)的同时,提供了较高的抗压强度(3.796 kN/P)。该组合(预热10 min, 1 260 °C下焙烧14 min)充分利用了对强度影响最大的焙烧时间因素(14 min),并确保了有效降低FeO质量分数所需的足够温度(1 260 °C)和时间(14 min>12 min)。预热时间(10 min)虽影响最小,但也处于较优水平(参考 k 值)。

因此,最终确定预热时间为10 min、焙烧温

度为1 260 °C、焙烧时间为14 min(即表4中的方案4)为最优焙烧制度组合。

2.3 成品球团矿的抗压强度

鉴于炼焦除尘灰富含固定碳,其在焙烧过程中碳燃烧释放的额外热量可能影响成品球团矿质量。本文采用前述正交试验确定的最优焙烧制度(预热10 min, 1 260 °C下焙烧14 min),在不同炼焦除尘灰配比条件下进行球团焙烧试验,分析成品球团矿抗压强度并观察黏结情况。结果如表5所示。

由表5可知:当炼焦除尘灰配比 $\leq 0.6\%$ 时,成品球团矿抗压强度随配比增加呈上升趋势,从未添加时的3.341 kN/P提升至0.6%配比下的3.684 kN/P,完全满足高炉冶炼要求。然而,当配比超过0.6%后,抗压强度急剧下降。观察发现,当配比超过0.4%时,成品球团矿内部颗粒之间开始出现不同程度黏结。黏结程度随配比增加而加剧,当配比超过2%时甚至出现孔洞。上述黏结现象及孔洞的形成,导致高配比($> 0.6\%$)条件下球团矿抗压强度显著劣化。因此,在以磁铁精矿为主要原料的球团生产体系中,炼焦除尘灰的配比宜严格控制在0.4%以内。超过此限值,焙烧过程中产生的黏结将严重影响球团矿的正常生产和产品质量。

表5 配加炼焦除尘灰后成品球团矿的抗压强度

Table 5 Compressive strength of finished pellets adding coking and dust removal

试验方案编号	炼焦除尘灰配比/%	成品球抗压强度/(kN·P ⁻¹)	球团焙烧后黏结情况
1 [#]	0	3.341	无黏结
2 [#]	0.2	3.542	无黏结
3 [#]	0.4	3.684	无黏结
4 [#]	0.6	3.671	少部分轻微黏结
5 [#]	0.8	2.020	多部分轻微黏结
6 [#]	1.0	0.638	严重黏结
7 [#]	2.0	—	严重黏结(出现大孔洞)
8 [#]	3.0	—	严重黏结(出现大孔洞)

2.4 球团矿冶金性能

低温还原粉化性是评价铁矿冶金性能的关键指标之一。在高炉冶炼过程中,炉料在炉身上部

低温区(通常 400 ~ 600 ℃)若发生严重粉化,将显著恶化料柱透气性。因此,改善铁矿(尤其是球团矿)的低温还原粉化性能,对于保障高炉上部透气性、维持高炉稳定顺行至关重要^[19]。此外,球团矿在高炉中温区(800 ~ 1 000 ℃)还原时会发生体积膨胀。过度的膨胀会导致球团产生裂纹甚至破碎,同样会影响料柱的透气性。因此,高炉冶炼对球团矿的还原膨胀性能也提出了严格要求^[20]。

为系统研究炼焦除尘灰配比对上述两项球团矿关键冶金性能(低温还原粉化指数和还原膨胀率)的影响,本文依据《铁矿石 低温粉化试验 静态还原后使用冷转鼓的方法》(GB/T 13242—2017)、《高炉用铁球团矿 自由膨胀指数的测定》(GB/T 13240—2018)分别测定球团矿的低温还原粉化指数和还原膨胀率,结果如表 6 所示。由表 6 可知:与未配加炼焦除尘灰的基准样相比,随着炼焦除尘灰配比的提高,成品球团矿的低温还原粉化指数(RDI_{+3.15 mm})呈现上升趋势,由 96.40% 提高至 97.65%。这表明球团矿的抗低温还原粉化的能力增强。同时,球团矿的还原膨胀率显著下降,从基准样的 13.93% 降低至 6.56%。这表明球团矿在还原过程中的体积膨胀得到有效抑制。综合以上结果,炼焦除尘灰的配加能够有效改善球团矿的低温还原粉化性和还原膨胀性能,从而提升其在高炉内的冶金性能。

表 6 成品球团矿冶金性能(质量分数)

Table 6 Metallurgical properties of finished pellets %

方案 编号	炼焦除尘 灰配比	低温还原粉化指数			还原 膨胀率
		>6.3 mm	>3.15 mm	<0.5 mm	
1 [#]	0	94.21	96.40	2.16	13.93
2 [#]	0.2	94.63	96.86	2.03	9.27
3 [#]	0.4	95.01	97.13	1.92	8.32
4 [#]	0.6	95.68	97.65	1.76	6.89
5 [#]	0.8	94.86	96.01	2.19	6.56

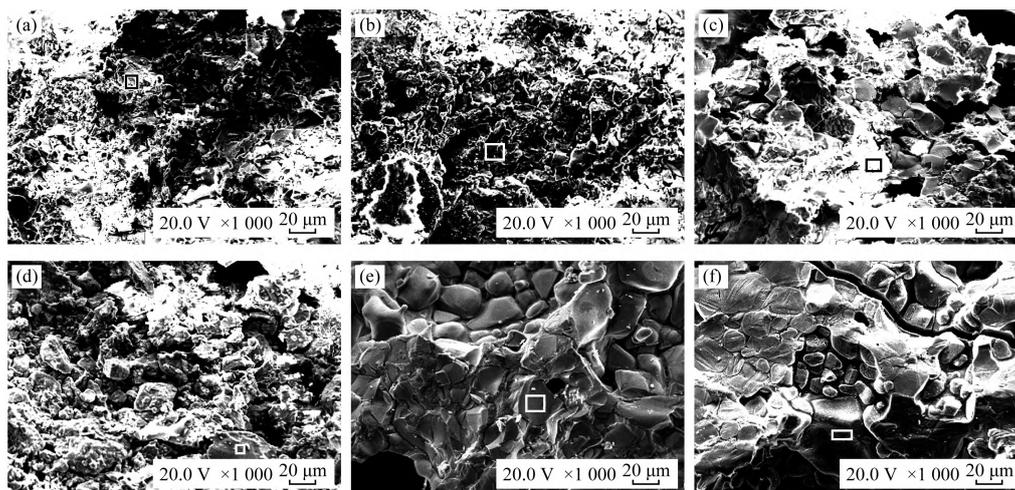
这种改善效应主要归因于:配入的炼焦除尘灰在高温焙烧过程中发生挥发和燃烧分解,在球团矿内部形成了大量分布均匀且细小的孔隙结构。这些孔隙在后续还原阶段起到了“缓冲”作用,有效吸收和抵消了铁氧化物还原时因晶格转变(如 Fe₂O₃→Fe₃O₄→FeO)所产生的体积膨胀和内应力,从而减缓了因膨胀应力导致球团产生裂纹和发生

破碎的倾向。炼焦除尘灰配加所带来的低温还原粉化指数提高和还原膨胀率降低,意味着球团矿在高炉还原过程中产生的粉末量减少、结构完整性更好。这有助于显著缓解因粉末堵塞和料柱结构破坏导致的高炉透气性恶化问题,为高炉的稳定、高效、顺行冶炼创造更有利的条件。

2.5 球团矿内部微观结构

为深入揭示配加炼焦除尘灰对成品球团矿微观结构的影响机制,本文采用扫描电子显微镜(SEM)对不同配比条件下成品球团矿的微观结构进行观察,典型形貌如图 2 所示(放大倍率为 1 000 ×)。由图 2 可见:基准样[未添加炼焦除尘灰,图 2(a)]内部矿物颗粒相对细小且分布较为均匀,主要呈现典型的固相固结结构特征;随着炼焦除尘灰配比的增加,低配比区间[≤0.6%,图 2(b)、(c)、(d)]的矿物颗粒显著增大,但分布依然保持均匀,整体结构更为致密。这种致密、均匀的微观结构演变,为之前观察到的现象(当炼焦除尘灰配比不超过 0.6% 时,成品球团矿抗压强度随配比的增加而提高,从未添加时的 3.341 kN/P 提升至 0.6% 配比下的 3.684 kN/P)提供了直接的微观解释。致密的结构能更有效地抵抗外力。当配比超过 0.6% 后,高配比区间[>0.6%,图 2(e)、(f)]矿物颗粒的尺寸均匀性被破坏,变得大小不一。颗粒间的结合方式发生改变,结构趋于分散和疏松。尤为关键的是,当配比达到或超过 0.8% [图 2(e)、(f)]时,微观结构中出现明显的液相黏结相,同时,微裂纹和异常孔隙(孔洞)的数量显著增加。这些微观缺陷(液相黏结导致的结构不均、裂纹和孔洞)极大地削弱了球团矿的整体结构完整性。

上述微观结构的演变,特别是高配比下出现的液相黏结、裂纹和孔洞,正是导致成品球团矿抗压强度在炼焦除尘灰配比超过 0.6% 后急剧下降的根本原因。这些缺陷构成了应力集中点,降低了材料抵抗破坏的能力。因此,球团微观观察结果及宏观抗压强度性能与外观观察结果(黏结、孔洞)高度吻合,共同解释了当炼焦除尘灰配比超过一定阈值(0.6%,结构劣化起点;0.8%,液相明显出现)后球团矿质量恶化的内在机理。



炼焦除尘灰配比/%: (a) 0; (b) 0.2%; (c) 0.4%; (d) 0.6%; (e) 0.8%; (f) 1%

图2 球团矿内部微观结构

Fig. 2 Internal microstructure of pellets

3 经济性分析

以某200万吨带式焙烧机球团生产线为例,按190万吨球团矿实际年产量计算配加0.4%炼焦除尘灰替代鞍钢磁铁精矿的直接经济效益:配加炼焦除尘灰可降低焙烧温度约15℃,相应减少煤气消耗,使煤气单耗降低0.03 GJ/t。由于炼焦除尘灰在高温焙烧过程中固定碳和挥发分的损失,生产球团矿的铁精矿单耗增加0.0006 t/t。综合节约煤气与消耗铁精矿增加的成本影响,经测算,每年可降低生产成本近300万元。

此外,配加炼焦除尘灰生产球团矿可改善成品球团矿的低温还原粉化指数和还原膨胀率,这有助于减少高炉冶炼过程中粉末的生成,从而促进高炉的稳定顺行,间接提升了生产效益。

4 结论

(1) 炼焦除尘灰具有较高的固定碳含量,在适宜配比下可替代部分鞍钢磁铁精矿,并有望降低焙烧温度,节约焙烧能源消耗;但其粒度相对较大,对球团生产存在一定负面影响。

(2) 当炼焦除尘灰配比 $\leq 0.8\%$ 时,其对生球落下强度、抗压强度及干球抗压强度影响不显著,生球爆裂性能亦不受影响。在炼焦除尘灰配比 $\leq 0.6\%$ 时,成品球抗压强度随配比的增加而提高,且可满足高炉冶炼要求;当配比 $> 0.4\%$ 时,焙烧

过程出现球团间黏结现象,且黏结程度随配比的增加而加剧;当配比 $> 0.6\%$ 后,抗压强度急剧下降。配加炼焦除尘灰可改善成品球团矿的低温还原粉化指数和还原膨胀率,有助于减少高炉内粉末生成,改善料柱透气性。

(3) 研究表明,炼焦除尘灰可在适宜配比范围内($\leq 0.4\%$,兼顾强度与避免黏结)部分替代铁精矿用于制备满足高炉冶炼要求的球团矿。以某200万吨带式焙烧机球团生产线为例,配加0.4%炼焦除尘灰替代磁铁精矿,经测算每年可降低生产成本近300万元,具备显著的经济效益和推广价值。

参考文献:

- [1] 周维富. 我国钢铁工业未来发展面临的挑战及对策[J]. 中国经贸导刊,2007(17):24-25.
ZHOU Weifu. Challenges and countermeasures for the future development of China's iron and steel industry [J]. China Economic & Trade Herald,2007(17):24-25.
- [2] 李晶,殷瑞钰. 钢铁工业发展循环经济的有效模式与途径[J]. 新材料产业,2008(7):6-8.
LI Jing, YIN Ruiyu. Effective models and approaches for the development of circular economy in the steel industry [J]. New Material Industry,2008(7):6-8.
- [3] 岑可法,邱坤赞,朱燕群. 中国能源与环境可持续发展问题的探讨(一)[J]. 发电设备,2004,18(5):245-250.

- CEN Kefa, QIU Kunzan, ZHU Yanqun. On the possibility of continuous development of energy sources as well as of the environment in China [J]. *Power Equipment*, 2004, 18(5):245-250.
- [4] 王邦鲲. 我国能源消费产生的环境问题研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
WANG Bangkun. Research on environmental issues caused by energy consumption in China[D]. Changchun: Jilin University, 2010.
- [5] 王筱留. 钢铁冶金学(炼铁部分)[M]. 3版. 北京: 冶金工业出版社, 2013.
WANG Xiaoliu. Iron and steel metallurgy (Ironmaking Section)[M]. 3rd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013.
- [6] 傅菊英, 姜涛, 朱德庆. 烧结球团学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1995:281-309.
FU Juying, JIANG Tao, ZHU Deqing. Study of sintering and pelletizing[M]. Changsha: Central south university of technology press, 1995:281-309.
- [7] 傅菊英, 朱德庆. 铁矿氧化球团基本原理、工艺及设备[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005:2-5.
FU Juying, ZHU Deqing. Basic principle, technology and equipment of iron ore oxidized pellet[M]. Changsha: Central South University Press, 2005:2-5.
- [8] 布林佐 J S. 北美的铁矿石和热压块市场[J]. 国外金属矿山, 2000, 25(5):58-63.
BRINZA J S. North American iron ore and briquette market [J]. *Foreign Metal Mining Magazine*, 2000, 25(5):58-63.
- [9] SGOURIS E E, KENNETH C O. Pelletizing and pellet quality at cleveland-cliffs operation [J]. *Iron and Steel Technology*, 2008, 5(3):58-66.
- [10] 王海风, 裴元东, 张春霞, 等. 中国钢铁工业烧结/球团工序绿色发展工程科技战略及对策[J]. 钢铁, 2016, 51(1):1-7.
WANG Haifeng, PEI Yuandong, ZHANG Chunxia, et al. Green development of sintering/pellet procedure in China iron and steel industry [J]. *Iron and Steel*, 2016, 51(1):1-7.
- [11] 胡启晨. 传统高炉炼铁流程面临的问题和应对策略[J]. 河北冶金, 2017(12):28-32.
HU Qichen. Problems and countermeasures for the traditional blast furnace ironmaking process [J]. *Hebei Metallurgy*, 2017(12):28-32.
- [12] 邢奕, 张文伯, 苏伟, 等. 中国钢铁行业超低排放之路[J]. 工程科学学报, 2021, 43(1):1-9.
XING Yi, ZHANG Wenbo, SU Wei, et al. Research of ultra-low emission technologies of the iron and steel industry in China [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2021, 43(1):1-9.
- [13] 许满兴. 论新世纪球团矿的质量进步[J]. 烧结球团, 2000, 25(6):1-4.
XU Manxing. Statement of quality improvement of iron ore pellets in new century [J]. *Sintering and Pelletizing*, 2000, 25(6):1-4.
- [14] HIDAY, SASAKI M, ENOKIDO T, et al. Technologies for use of low-quality iron ores [J]. *Tetsu-to-Hangane*, 1995, 81(4):263-271.
- [15] 高强健, 魏国, 姜鑫, 等. 轻烧菱镁石对生球爆裂温度的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(4):542-544;550.
GAO Qiangjian, WEI Guo, JIANG Xin, et al. Effect of calcinated magnesite on burst temperature of green pellet [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2013, 34(4):542-544;550.
- [16] SAKAMOTO N, NODA H, KUMASAKA A, et al. Experimental evaluation of new iron ore agglomeration process based on permeability and heat transfer characteristics in the bed [J]. *Tetsu-to-Hagane*, 1989, 75(1):50-57.
- [17] 刘麟瑞, 王丕珍. 冶金炉料手册[M]. 2版. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
LIU Linrui, WANG Pizhen. Metallurgical charge manual [M]. 2nd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000.
- [18] 许满兴. 膨润土对生球爆裂温度的影响及其测定方法的探讨[J]. 烧结球团, 1984, 9(3):43-49.
XU Manxing. Influence of bentonite on bursting temperature of green pellets and discussion on its determination method [J]. *Sintering and Pelletizing*, 1984, 9(3):43-49.
- [19] 李朝晖. 论提高球团矿品位与经济效益[J]. 烧结球团, 1998, 23(6):10-13.
LI Zhaohui. On increasing grade of pellets and comprehensive economic results [J]. *Sintering and Pelletizing*, 1998, 23(6):10-13.
- [20] 徐矩良. 我国高炉合理炉料结构探讨[J]. 炼铁, 2004, 23(4):25-26.
XU Juliang. Study on rational burden structure of blast furnaces in China [J]. *Iron Making*, 2004, 23(4):25-26.