

## 带式焙烧机酸性与碱性球团投笼试验及工业实践

乔红梅, 贾国利, 李 洋

(北京首钢股份有限公司 炼铁作业部 河北 唐山 064400)

**摘要:** 为优化带式焙烧机球团工艺的熔剂配比与原料结构,提升生球强度及成品球的高炉适应性,本文开展酸性与碱性球团系统试验,通过投笼试验确定碱性球团的最佳熔剂结构为“消石灰+石灰石粉”的混合熔剂,酸性球团采用 2.0% 膨润土的配比方案;在带式焙烧机试生产中验证两种方案球团的性能,结合扫描电镜(SEM)与能谱分析(EDS)表征其微观形貌及元素分布。结果表明:酸性球团的铁品位达 66.20%,抗压强度为 2 500 N/P,合格粒级占比为 78.24%,还原膨胀率为 11.4%,还原度指数为 62.68%;碱性球团的铁品位为 65.41%,抗压强度提升至 2 733 N/P,合格粒级占比为 76.34%,还原膨胀率稳定控制在 15% 以下,还原度指数提高至 82%。两种方案球团均满足高炉生产指标,其中碱性球团因高强度与低膨胀特性,更适用于大球比生产模式。此外,通过扫描电镜观察和能谱分析,明晰酸性、碱性球团的微观形貌及元素分布特征。本研究结果不仅可为提高球团质量提供重要依据,也可为带式焙烧机球团工艺相关设计、投产和运行提供参考。

**关键词:** 带式焙烧机; 抗压强度; 还原膨胀; 碱性球团; 微观形貌

中图分类号: TF046.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)03-0094-09

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.03.046

## Acid and alkaline pellets cage feeding test and industrial practice of belt roaster

QIAO Hongmei, JIA Guoli, LI Yang

(Ironmaking Operations Department, Beijing Shougang Co., Ltd., Tangshan 064400, Hebei, China)

**Abstract:** In order to optimize the flux ratio and raw material structure of the belt roaster pelletizing process and improve the strength of fresh pellets and the blast furnace adaptability of finished pellets, the acid and alkaline pellet system tests are carried out, and the optimal flux structure of the alkaline pellets is determined to be a mixed flux of “slaked lime + limestone powder” and the ratio scheme of 2.0% bentonite is used for the acid pellets. The performance of the pellets of the two schemes is verified in the trial production of the belt roaster, and the microscopic morphology and element distribution are characterized by scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS). The results show that the iron grade of the acid pellets is 66.20%, the compressive strength is 2 500 N/P, the proportion of qualified particle size is 78.24%, the reduction expansion rate is 11.4%, and the reduction index is 62.68%. The iron grade of the alkaline pellets is 65.41%, the compressive strength is increased to 2 733 N/P, the proportion of qualified particle size is 76.34%, the reduction expansion rate is stably controlled below 15%, and the reduction index is increased to 82%. The pellets of the two schemes meet the production indicators of the blast furnace, and the alkaline pellets are more suitable for the production mode of large pellets due to their high strength and low expansion. In addition, the microscopic morphology and element distribution characteristics of acidic and alkaline pellets are clarified by scanning electron microscopy observation and energy spectrum analysis. The results not only provide an important basis for improving pellets quality, but also provide a reference for the design, production and operation of the belt roaster pellets process.

收稿日期: 2024-06-03; 修回日期: 2024-08-01

作者简介: 乔红梅(1994—),女,工程师,从事炼铁工艺、烧结球团技术研究工作。

**Key words:** belt roaster; compressive strength; reduction expansion; alkaline pellets; microscopic topography

近年来,在“碳达峰·碳中和”战略目标背景下,钢铁行业超低排放技术改造和产业装备升级得到国家高度重视,整个行业都在积极探索低碳绿色的发展路径<sup>[1-2]</sup>。据统计,钢铁工业的CO<sub>2</sub>排放量占全国总量的15%,其中,铁前工序更是占钢铁总流程的90%。不仅如此,钢铁工业气体污染物排放量位居行业第三,其中,铁前工序排放量占钢铁总流程的70%。这表明,铁前工序的低碳绿色转型是实现钢铁流程绿色化的关键所在。当前,我国高炉炼铁主要依赖高碱度烧结矿,其渣相固结机制导致入炉矿含铁品位有限,进而使得渣铁比高,利用系数和燃料比等关键指标均不理想。为改善此状况,大力推广高品质球团矿显得尤为重要。

根据测算,当球团矿入炉比达到40%时,碱度应大于0.4,若入炉比提高至50%~100%,碱度则需要达到0.85~1.55。但链算机一回转窑—环冷机球团工艺生产的酸性球团存在还原性低、软熔温度低等缺点,且生产碱性球团时易出现回转窑结圈现象,直接影响生产效率,降低能源利用效率,并可能引发设备故障,结圈严重时还会导致球团质量下降。而带式焙烧机球团工艺具有自动化程度高、生产效率高、能源消耗低、污染物排放低等优点,在生产碱性球团时具有更好的适用性,特别是基于球团运动相对静止的特点,可有效避免结圈等不良影响,为高炉大比例球团冶炼进程的推进提供有力支持。带式焙烧机球团工艺的引进和应用,已逐渐成为行业低碳绿色转型的重要举措<sup>[3]</sup>。首钢股份作为全国钢铁企业的排头兵,积极采取措施减少污染物排放、减少能源消耗,助力国家实现能源“双控”目标及“双碳”目标<sup>[4]</sup>。该公司现有三座高炉,烧结工序现有两台360 m<sup>2</sup>烧结机,球团工序现有一条年产200万吨的链算机一回转窑—环冷机生产线和一台504 m<sup>2</sup>、年产345万吨的带式焙烧机生产线,球团矿总产能达到545万吨,达到高炉炉料结构的40%左右。该345万吨带式焙烧机球团生产线于2024年2月1日顺利投产,各项指标均达到设计要求。

本文主要概述该带式焙烧机球团生产的工艺

流程及设备特点,以及投产前期在实验室开展现有原料条件下酸性、碱性球团试验,确定最佳的熔剂结构,为生产线的顺利投产提供理论支持。在带式焙烧机球团生产线投入使用后,酸性、碱性球团质量表现良好,满足高炉入炉要求,为高炉下一步的大球比生产提供坚实的基础,同时也为带式焙烧机的设计、投产和运行提供重要的参考和依据。

## 1 工艺流程及设备特点

带式焙烧机球团生产线主要包括原料准备、配混、造球、焙烧冷却、工艺风机、成品筛分、烟气综合治理等生产工艺系统。具体工艺流程及设备特点如下。

(1) 原料准备系统。预配料室利用原烧结配料室的1<sup>#</sup>~10<sup>#</sup>铁原料料仓,仓上利用现有带式输送机运输系统,仓下利用现有给料设备,配料设备采用更新装备。预配料室单仓的有效储量约为300 t,总储量为3 000 t,满足带式焙烧机球团工艺产线6.2 h的铁精矿用量。生产线设计配料结构为70%的马城铁精矿和30%的秘鲁铁精矿。为增加物料的比表面积,改善原料的成球性能,选用一台 $\varnothing 1\ 700\ \text{mm} \times 1\ 200\ \text{mm}$ 的高压辊压机对原料进行辊压(处理能力为700 t/h)。

(2) 配混系统。配料室设多个仓,仓下采用定量给料机配料,石灰石和消石灰由熔剂制备车间通过气力输送管道进入配料室料仓,膨润土由罐车经由气力输送管道送入相应仓,环境除尘器及工艺风系统除尘器收集的除尘灰由灰槽气力输送管道进入配料室灰仓。混合室配置一台强力混合机,混合后含水量约为8.5%,混合效率 $\geq 98\%$ ,混匀后的物料通过带式输送机送往造球室。在混合料带式输送机上设置红外水分检测仪,控制混合机的加水量。

(3) 造球系统。造球室配备8台 $\varnothing 7.5\ \text{m}$ 圆盘造球机,混合料通过稳流给料装置+定量给料机送到造球盘上,造球机的转速和倾角均可手动调整。生球布料流程为往复式布料器—宽皮带—单层辊筛—带式焙烧机。

(4) 焙烧冷却系统。生球焙烧采用 1 台有效面积为 504 m<sup>2</sup> 的带式焙烧机, 布料厚度约为 450 mm, 其中, 铺底料厚度为 80 ~ 100 mm, 边料厚度为 80 ~ 100 mm。带式焙烧机分鼓风干燥段、抽风干燥段、预热段、焙烧段、均热段和一冷段、二冷段共 7 个工艺段, 通过台车顶部烟罩和底部风箱集 7 个工艺段为一体。该生产线工艺流程如图 1 所示, 台车烟罩工艺段工作面积和温度设计如表 1 和图 2 所示。带式焙烧机燃料为焦炉煤气,

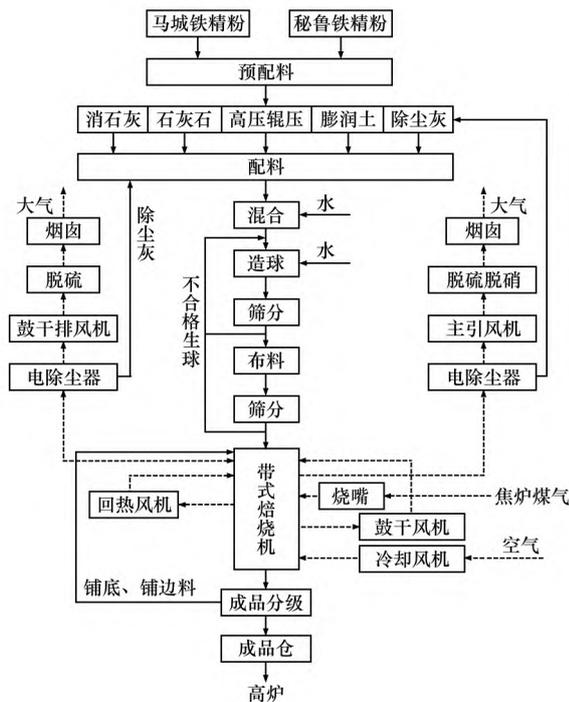


图 1 带式焙烧机球团工艺流程

Fig. 1 Pelletizing production process of belt roasting machine

表 1 带式焙烧机工艺分段及气体温度

Table 1 Process segmentation and gas temperature of belt pellet roasting machine

烟罩工艺段	风箱个数/个	面积/m <sup>2</sup>	工艺气体温度/℃
鼓风干燥段	2	48	320 ~ 330
抽风干燥段	2	48	320 ~ 330
预热段	3.5	96	330 ~ 1 200
焙烧段	3.5	96	1 200 ~ 1 250
均热段	2	48	1 150
一冷段	6	120	25
二冷段	2	48	25
总和	21	504	—

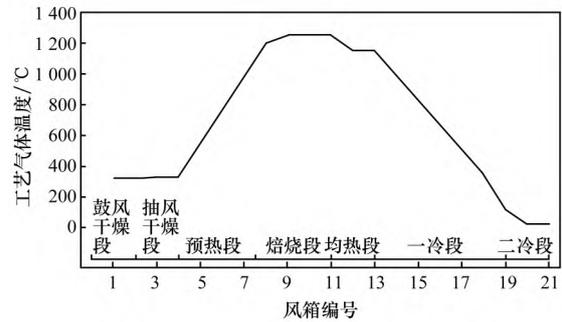


图 2 带式焙烧机各工艺段温度分布

Fig. 2 Temperature distribution in each process section of belt pellet roasting machine

配备 28 个专用焦炉煤气烧嘴(两侧对称布置)。每个烧嘴配备自动调节温度装置。

(5) 工艺风机系统。冷却鼓风机吸入环境空气鼓入一冷段和二冷段; 二冷段的热风通过鼓干鼓风机送到鼓风干燥段使用; 一冷段的热风通过上罩直接进入均热、焙烧、预热段; 均热、焙烧段及部分预热段的废气通过回热风机循环到抽风干燥段使用; 抽风干燥段、大部分预热段、鼓风干燥段排出的废气由静电除尘器净化后进入烟气综合治理系统处理后经烟囱排入大气。静电除尘器收集的灰尘由气力输送管道送至配料室除尘灰料仓用于造球。

(6) 成品筛分系统。冷却后的球团矿经带式输送机送到成品分级站的汇合斗内。斗下分为两路, 一路通过振动给料机给到铺底料筛, 另一路给到多功能三通分料器, 输送至成品仓贮存。铺底料筛分出 12.5 ~ 16.0 mm 球团作为铺底料用, <12.5 mm 和 >16 mm 部分球团直接输送至球团成品仓。成品球的质量通过自动取样装置及时掌握, 并通过采样进行化验。

(7) 烟气综合治理系统, 包括鼓干烟气脱硫和焙烧主烟气治理。其中, 鼓干烟气脱硫系统有效应对原料含硫量变化及烟气压力不匹配问题, 确保 SO<sub>2</sub> 浓度达标, 结合布袋除尘器提高粉尘捕捉能力, 实现污染物零排放; 而经静电除尘后的主引风烟气采用循环流化床脱硫 + 布袋除尘 + SCR 脱硝处理后经烟囱排入大气, 出口 SO<sub>2</sub>、颗粒物、NO<sub>x</sub> 质量浓度分别 ≤ 20、≤ 5、≤ 30 mg/Nm<sup>3</sup> (干基, O<sub>2</sub> 体积分数为 18%)。

## 2 投笼试验

### 2.1 试验原料与方法

#### 2.1.1 试验原料

由于投产时马城铁精矿未能按计划投入使用,投笼试验造球原料矿粉选择在用的秘细粉和水高粉。造球原料的化学成分如表2所示。由表2可以看出:秘细粉的铁品位较高,为70.36%, $\text{SiO}_2$ 质量分数偏低,只有1%左右,矿粉 $<0.074\text{ mm}$ 粒级占比为88.59%;水高粉的铁品位也较高,为67.95%,但其 $\text{SiO}_2$ 质量分数较高,为4.36%,矿粉 $<0.074\text{ mm}$ 粒级占比低于80%;消石灰、石灰石的 $w(\text{CaO})$ 分别为72.80%、51.50%。膨润土的物理性能指标如表3所示。由表3可知,试验用膨润土的2 h吸水率指标较好,为510.84%,膨胀指数为45.26 mL/(2 g)。

表2 造球原料主要化学成分、烧损和 $<0.074\text{ mm}$ 粒级占比(质量分数)

Table 2 Main chemical composition losses on ignition and grain size composition of  $<0.074\text{ mm}$  of pelletizing raw materials

原料名称	TFe	FeO	$\text{SiO}_2$	CaO	MgO	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	ZnO	S	烧损	$<0.074\text{mm}$ 粒级占比
秘细粉	70.36	29.41	1.07	0.25	0.39	0.22	0.037	0.081	0.015	0.200	-2.59	88.59
水高粉	67.95	28.70	4.36	0.44	0.54	0.59	0.016	0.030	0.010	0.081	-2.78	76.30
膨润土	—	—	62.48	3.22	3.26	14.62	1.170	2.770	0.009	0.062	8.72	96.77
消石灰	—	—	—	72.80	—	—	0.020	0.013	—	0.013	25.00	95.97
石灰石粉	—	—	—	51.50	—	—	0.097	0.048	—	0.018	43.00	90.02

表3 膨润土物理性能

Table 3 Physical properties of bentonite

水分(质量分数) / %	2 h 吸水率 / %	吸蓝量 / [ $\text{g} \cdot (100\text{ g})^{-1}$ ]	膨胀指数 / [ $\text{mL} \cdot (2\text{ g})^{-1}$ ]
10.56	510.84	32.86	45.26

表4 带式焙烧机球团工艺投产料比设计方案

Table 4 Design scheme of feed ratio for pelletizing process

类型	编号	配比(质量分数) / %					预测 $\text{SiO}_2$	碱度
		秘细粉	水高粉	膨润土	消石灰	石灰石		
碱性球团	1 <sup>#</sup>	90	10	1.2	2.8	—	2.00	1.10
	2 <sup>#</sup>	90	10	0.8	2.5	—	1.78	1.10
	3 <sup>#</sup>	80	20	1.2	3.2	—	2.30	1.10
	4 <sup>#</sup>	80	20	1.2	2.6	0.9	2.31	1.10
	5 <sup>#</sup>	80	20	0.8	2.9	—	2.08	1.10
	6 <sup>#</sup>	75	25	0.8	3.1	—	2.22	1.10
酸性球团	7 <sup>#</sup>	70	30	2.0	—	—	3.27	0.07
	8 <sup>#</sup>	60	40	1.8	—	—	3.08	0.09

为满足碱度要求并确保球团矿质量,需要对原料矿粉配比进行合理调整;同时,当球团矿中 $\text{SiO}_2$ 质量分数低于2.0%时还原膨胀率将升高,因此,应确保碱性球团矿的 $\text{SiO}_2$ 含量在合理的范围内。为了确保带式焙烧机的顺利投产,共设计6组不同料比的碱性球团以及2组酸性球团方案,如表4所示。由表4可见,当消石灰配比较高时,在膨润土的黏结作用下,混合料黏度增大可能导致生产时堵料库、粘仓等问题发生。因此,4<sup>#</sup>方案采用“消石灰+石灰石粉”作为碱性熔剂。

#### 2.1.2 试验方法

按照1<sup>#</sup>~8<sup>#</sup>方案进行人工配料,将原料均匀混合后投入直径为1 m的圆盘造球机造球。圆盘造球机转速控制在15 r/min,倾角为45°,造球时间控制在10 min。造球试验结束后,筛取直径为10~16 mm的生球,检测生球抗压强度、落下强

度等指标。将合适的生球置于特制的笼子内(每个笼子分3层放置150~200颗生球),每隔15s将其投入料层上层区域,以保障顺利取样。在焙烧机中经历干燥、预热、焙烧和冷却工序,得到焙烧球团矿。投笼试验的焙烧制度如表5所示。

表5 投笼试验焙烧制度

Table 5 Roasting system of cage-throwing experiment

预热温度/°C	焙烧温度/°C	一冷段温度/°C	二冷段温度/°C	焙烧时间/min	台车车速/(m·min <sup>-1</sup> )
1 138	1 246	750	112	36	3.5

## 2.2 试验结果与讨论

生球及焙烧球的抗压强度及冶金性能指标如表6所示。由表6可见,碱性球团方案的成球情况较好。分析原因认为,消石灰的颗粒形貌呈絮凝状,具有较好的吸水性和黏结性<sup>[5]</sup>,有利于母球的形成及长大。1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>方案生球的落下强度均可达到7~9次/(0.5m),抗压强度为10N/P以上。当膨润土配比降低至0.8%时,5<sup>#</sup>和6<sup>#</sup>方案生球的落下强度仍然超过6次/(0.5m),满足现场生产要求。添加膨润土可提高球团表面的亲水性,增强颗粒之间的毛细作用力。在冲击载荷下,颗粒沿弱界面滑动并发生塑性变形,可延缓裂纹扩展<sup>[6]</sup>。当膨润土配比从2.0%降至1.8%时,尽管表面润湿性略有下降,但残余毛细力仍维持颗粒滑动能力,使球团保持塑性变形特征<sup>[7]</sup>,最终生球的落下强度≥8次/(0.5m),满足生产要求。

此外,对于碱性球团试验,当焙烧球的SiO<sub>2</sub>质量分数为1.78%~2.31%时,含硅量偏低的方案球团的还原膨胀率相对较高。研究表明,当含

硅量较低时,球团内生成的液相不足,促进铁离子快速迁移,形成针状铁晶须,导致膨胀率升高<sup>[8]</sup>。试验结果中,4<sup>#</sup>方案的SiO<sub>2</sub>质量分数为2.31%,其还原膨胀指标较好,为13.14%;此外,所有方案碱性球团的抗压强度均为4000N/P左右,酸性球团的抗压强度为3300N/P以上,满足高炉炼铁原料的入炉要求。综合考虑生球与焙烧球性能,生产碱性、酸性球团建议选择4<sup>#</sup>、7<sup>#</sup>方案的原料结构。

## 3 工业生产实践

### 3.1 酸性球团

酸性球团工业生产实践采用7<sup>#</sup>方案,原料结构为70%秘细粉+30%水高粉+2.0%膨润土。设定带式焙烧机台车车速为2.20~2.76m/min,铺底料厚度为100mm,总料厚度为400mm;焙烧温度较低,一般为1150~1200℃。酸性球团质量指标较为稳定,如表7所示。由表7可见,焙烧球的铁品位为66.20%,SiO<sub>2</sub>质量分数为3.34%,10~16mm粒级占比达到78.24%。此外,球团的抗压强度较投笼试验结果低,仅为2515.66N/P,但仍能够满足高炉入炉要求;其还原膨胀率较低,为11.4%,还原度指数为62.68%。

对焙烧后的酸性球团进行扫描电镜观察和能谱分析,如图3、表8所示。由图3、表8可见,酸性球团的结晶效果较差,赤铁矿小颗粒分布较多,微细孔较多,其结构强度差。同时,选取某一区域进行能谱面扫,显示酸性球团的多晶形貌和元素分布情况,如图4所示。由图4可见,硅

表6 生球与焙烧球性能指标

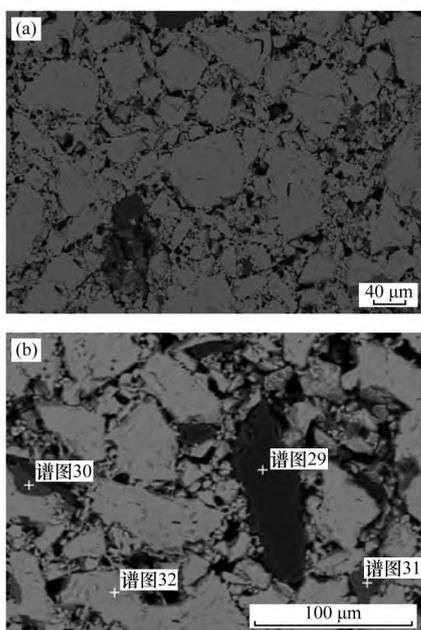
Table 6 Performance indexes of green pellets and roasted pellets

类型	编号	生球性能		焙烧球性能	
		落下强度/[次·(0.5m) <sup>-1</sup> ]	抗压强度/(N·P <sup>-1</sup> )	抗压强度/(N·P <sup>-1</sup> )	还原膨胀率/%
碱性球团	1	7.75	10.3	4 273	13.31
	2	7.14	11.2	4 195	14.10
	3	8.75	10.6	4 021	12.01
	4	7.40	11.0	4 044	13.14
	5	6.73	9.2	4 187	13.82
	6	6.45	9.7	3 987	12.15
酸性球团	7	> 10.00	13.6	3 345	14.59
	8	8.12	12.5	3 521	13.44

表 7 酸性球团的质量指标

Table 7 Quality index of acid pellets

化学成分(质量分数) / %					碱度	粒度组成(质量分数) / %					
TFe	FeO	SiO <sub>2</sub>	CaO	S		<5 mm	[5, 8) mm	[8, 10) mm	[10, 12.5) mm	[12.5, 16) mm	≥16 mm
66.20	0.22	3.34	0.38	0.005	0.11	2.13	0.86	1.14	14.12	64.12	17.63



(a) 微观形貌; (b) 能谱分析

图 3 酸性球团的微观形貌及能谱分析

Fig. 3 SEM and EDS analysis of acid pellets

元素有两种分布形式, 分别是以脉石相(石英)单独存在和以铁橄榄石的形式存在; 此外, 低熔点液相中有一部分镁铁尖晶石, 钙元素与硫元素结合形成网状结构存在于赤铁矿晶粒边缘。球团中钙通常以氧化钙(CaO)的形式存在, 硫则主要以

表 8 酸性球团 EDS 元素分析(质量分数)

Table 8 Elements analysis by EDS in acid pellets %

谱图编号	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
29	47.55	—	—	—	51.45	—	—	1.00
30	38.34	2.05	0.65	12.94	21.81	0.68	6.46	17.07
31	34.67	—	7.51	—	25.27	—	0.56	31.99
32	23.26	—	—	—	—	—	—	76.74

硫化物(如 FeS、FeS<sub>2</sub>) 或硫酸盐的形式存在<sup>[9-11]</sup>。在焙烧过程中, 硫被氧化成气态二氧化硫(SO<sub>2</sub>), CaO 与 SO<sub>2</sub> 反应生成硫酸钙(CaSO<sub>4</sub>)<sup>[12-13]</sup>。结合生产现场情况, 带式焙烧机开机生产时, 岗位操作工对流程不熟悉导致工艺热风循环不佳, 焙烧效果差, 且现场停机较多影响生产稳定性。为提高酸性球团制备的效率与质量, 针对现有问题, 应着重优化原料粒度及焙烧制度两方面。通过引入高压辊磨工序, 提升矿粉颗粒的微细粒级, 增大长径比(柱形物体, 其长度与直径的比值)并促进产生不规则形态及微裂纹, 从而增强混合效果与矿粉比表面积, 为后续工艺提供优质原料基础<sup>[14]</sup>; 同时, 提高焙烧温度, 促进次生赤铁矿的再结晶过程, 有效减少微细孔洞, 使酸性球团的结晶度提高、结构强度增强。

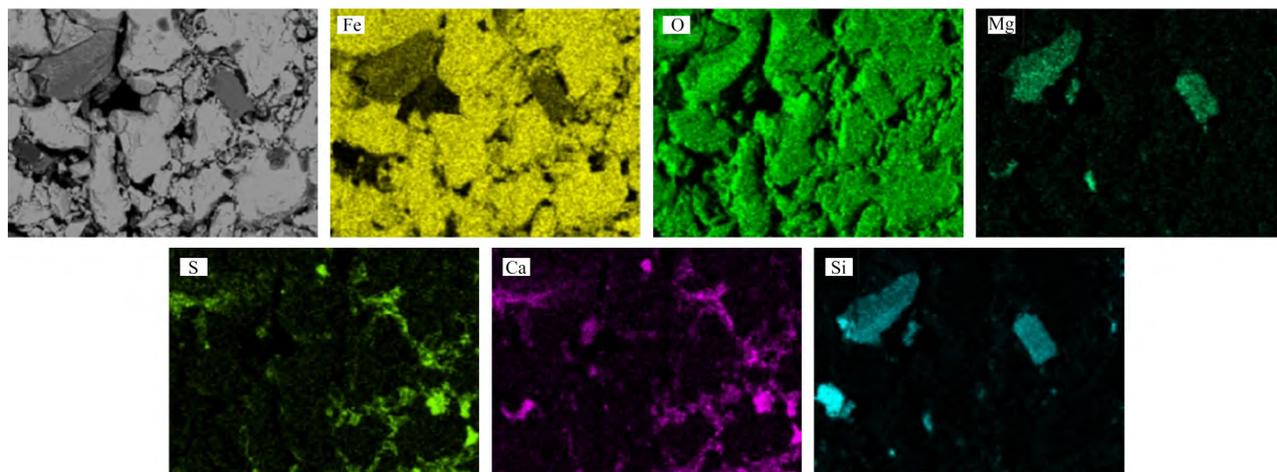


图 4 酸性球团的能谱面扫结果

Fig. 4 EDS element mapping of acid pellets

### 3.2 碱性球团

考虑到消石灰配比高带来的粘仓、粘料问题,该生产线按照 4<sup>#</sup> 方案生产碱度为 1.1 的碱性球团,原料结构为 80% 秘细粉 + 20% 水高粉 + 1.2% 膨润土 + 2.6% 消石灰 + 0.9% 石灰石。设定带式焙烧机台车机速为 3.3 ~ 3.7 m/min,铺底料厚度为 90 mm,总料层厚度为 440 mm。为控制液相生成量,碱性球团的焙烧温度为 1 250 ℃。转产后一段时间内碱性球团质量检测结果如表 9 所示。由表 9 可见,由于碱度不足,刚开始生产时球团的还原膨胀率升高至 21.39%。经过及时调整熔剂的下料量,将碱度控制在 1.1 ± 0.05 后,成功将还原膨胀率降低至 14.28%,稳定在 15% 以下<sup>[15]</sup>。碱性球团的铁品位为 65.41%, SiO<sub>2</sub> 质量分数为 2.58%, 10 ~ 16 mm 粒级球团的平均占比为 76.34%, 平均抗压

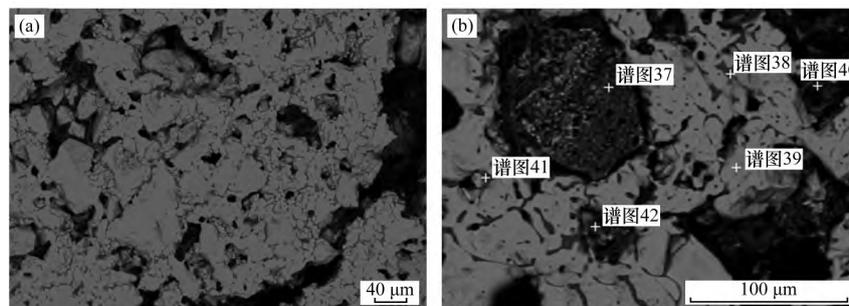
强度为 2 733 N/P,还原度指数为 82% 左右,能够满足高炉入炉要求。其中,焙烧球中含硅量较投笼试验值高的原因:造球矿粉中杂物多,比表面积较低,成球性差,生球的落下强度较低,再加上高压辊磨设备投入使用的时间较长,导致生产时膨润土配比实际为 1.8%,配加量比预期的 1.2% 高出 0.6%,因此焙烧球的含硅量升高。实际生产时,采取固定石灰石粉配比,提高消石灰配比至 3.4% 的方式来调整球团碱度。

采用扫描电镜和能谱分析对焙烧后的碱性球团进行微观形貌观察,如图 5、6 和表 10 所示。由图 5 可知,焙烧后碱性球团展现出显著的组织结构变化,其内部呈现出孔隙丰富、发达的微观结构,裂纹较长且纵横交错。这一特征不仅增加了碱性球团的比表面积,还为其在反应过程中提

表 9 碱性球团质量指标

Table 9 Quality index of alkali pellets

编号	化学成分 / %					碱度	粒度组成(质量分数) / %						抗压强度 / (N·P <sup>-1</sup> )	还原膨胀率 / %	还原度指数 / %
	TFe	FeO	SiO <sub>2</sub>	CaO	S		<5 mm	[5, 8] mm	[8, 10] mm	[10, 12.5] mm	[12.5, 16] mm	≥16 mm			
1 <sup>#</sup>	65.85	0.29	2.8	1.33	0.015	0.48	3.12	1.08	1.39	17.83	63.05	13.53	2 361	21.39	66.35
2 <sup>#</sup>	65.61	0.29	2.58	2.07	0.020	0.80	2.50	1.50	1.84	14.84	58.24	21.08	2 624	18.90	—
3 <sup>#</sup>	65.64	0.36	2.50	2.41	0.027	0.96	1.73	1.19	1.47	11.46	54.43	29.72	2 618	16.24	76.97
4 <sup>#</sup>	65.42	0.29	2.42	2.56	0.026	1.06	1.65	1.19	1.58	17.44	59.53	18.61	2 771	16.83	—
5 <sup>#</sup>	65.26	0.25	2.41	2.72	0.031	1.13	2.02	1.22	1.58	18.17	59.80	17.21	2 568	15.31	78.11
6 <sup>#</sup>	65.05	0.29	2.45	2.71	0.040	1.11	2.05	1.34	2.01	22.64	53.48	18.48	2 727	15.15	—
7 <sup>#</sup>	65.19	0.25	2.46	2.75	0.040	1.12	1.94	1.09	1.68	15.68	58.08	21.53	2 718	14.62	85.51
8 <sup>#</sup>	65.33	0.33	2.47	2.74	0.038	1.11	0.94	0.96	1.53	17.30	60.24	19.03	2 894	14.93	—
9 <sup>#</sup>	65.26	0.29	2.42	2.73	0.039	1.13	0.90	1.10	1.71	18.73	61.01	16.55	2 982	14.28	81.73
10 <sup>#</sup>	65.33	0.32	2.50	2.73	0.037	1.09	0.98	1.37	1.63	17.60	58.57	19.85	2 907	14.75	—
11 <sup>#</sup>	65.30	0.36	2.49	2.78	0.035	1.12	0.52	1.22	1.91	21.95	59.63	14.77	2 890	14.41	83.02



(a) 微观形貌; (b) 能谱分析

图 5 碱性球团 ( $R^2 = 1.1$ ) 的微观形貌及能谱分析

Fig. 5 SEM and EDS analysis of alkali pellets ( $R^2 = 1.1$ )

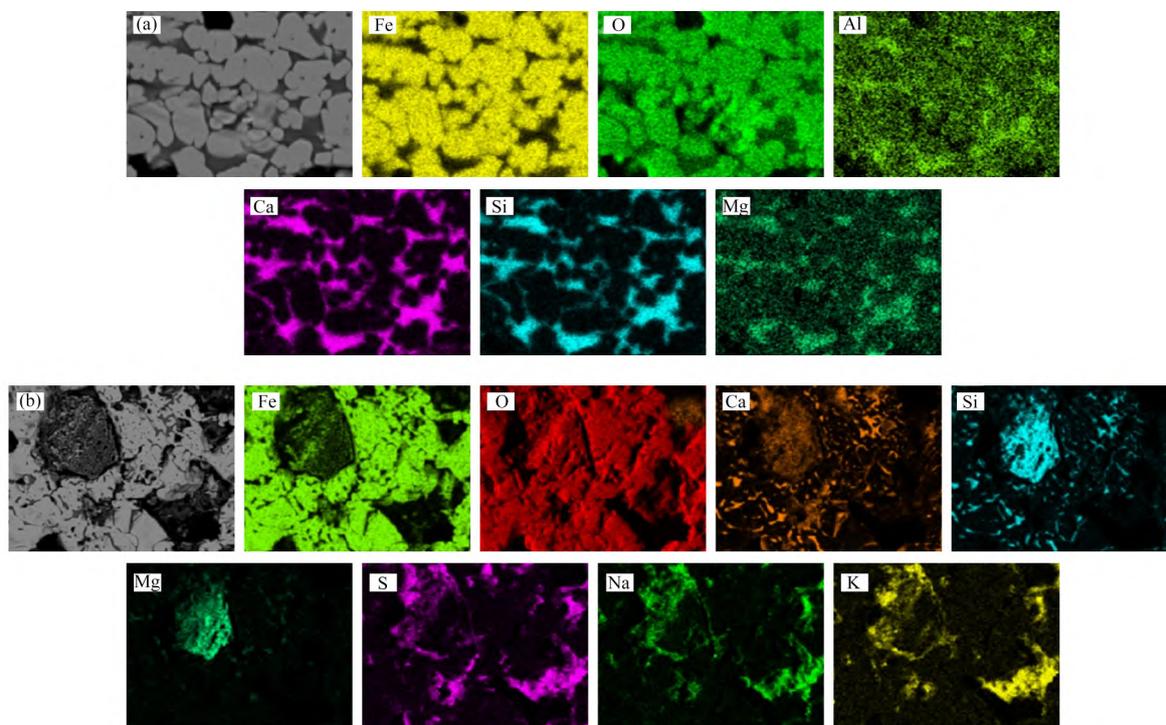
(a) 1<sup>#</sup>位置; (b) 2<sup>#</sup>位置

图 6 碱性球团的能谱面扫结果

Fig. 6 EDS element mapping of alkali pellets

表 10 碱性球团 EDS 元素分析(质量分数)

Table 10 Elements analysis by EDS in alkali pellets

%

谱图编号	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe
37	39.40	—	10.16	0.86	23.86	—	0.74	14.72	10.26
38	35.09	0.74	3.42	1.57	15.45	0.99	—	27.21	15.53
39	24.70	—	—	—	—	—	—	—	75.30
40	37.61	13.58	—	—	—	20.25	18.89	3.43	6.24
41	31.48	—	0.96	—	18.86	0.82	—	38.56	9.32
42	30.04	8.33	—	—	1.01	8.37	4.38	5.98	41.89

供了更多的活性位点,是碱性球团还原性提升的关键因素之一。同时,赤铁矿晶粒发育均较为充分,可以看到大片的连晶,呈现出浅白色的互联状,这表明晶粒之间有着良好的连接性和支撑性,有利于提高碱性球团的强度和稳定性。由图 6(a)可见,碱性球团中的 Ca、Si、Mg、Al 这 4 种元素呈现出一致的分布特征,这些元素主要以铁酸钙、硅酸钙、铁橄榄石等形式存在于液相中,当碱度超过 0.8 后,液相中也包含少量的铁酸镁<sup>[16]</sup>。此外,由图 6(b)能够清晰地观察到,S 与 Na、K 等碱金属形成了具有网状结构的化合物,这些化合物共存于赤铁矿晶粒的边缘。这是由于秘细粉与

钠化膨润土中碱金属含量高,在球团的焙烧过程中,碱金属元素与烟气中的 SO<sub>2</sub> 反应生成了相关的硫酸盐(Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)<sup>[13]</sup>,将硫元素重新固定在球团中。

#### 4 结论

(1) 通过合理调整原料矿粉配比和试验,确定碱性熔剂为消石灰+石灰石粉的混合熔剂。其中,碱性球团采用原料结构为 80% 秘细粉+20% 水高粉+2.6% 消石灰+0.9% 石灰石的 4<sup>#</sup>方案,酸性球团采用原料结构为 70% 秘细粉+30% 水高粉+2.0% 膨润土的 7<sup>#</sup>方案,均表现出较好的生球

落下强度和抗压强度,满足高炉生产要求。

(2) 带式焙烧机球团生产线在试生产阶段取得了良好效果。酸性球团质量指标较为稳定,铁品位为 66.20%、 $\text{SiO}_2$  质量分数为 3.34%、合格粒级占比达到 78.24%、抗压强度为 2 500 N/P、还原膨胀指数为 11.4%、还原度指数为 62.68%。生产线转产碱度为 1.1 的碱性球团后,生产出铁品位为 65.41%、 $\text{SiO}_2$  质量分数为 2.58%、10~16 mm 粒级占比为 76.34%、平均抗压强度为 2 733 N/P、还原度指数为 82% 左右的合格碱性球团,还原膨胀率可稳定在 15% 以内,可为高炉的大球比生产奠定坚实的基础。

(3) 通过扫描电镜观察和能谱分析明确了酸性、碱性球团中元素的分布特征:酸性球团中硅元素一部分以脉石相(石英)单独存在,一部分以硅酸盐的形式存在。钙元素与硫元素结合形成网状结构的硫酸钙存在于赤铁矿晶粒边缘;碱性球团经过焙烧后呈现出孔隙发达、裂纹较长的微观形貌特征,赤铁矿晶粒发育均较为充分,同时在能谱面扫中观察到 S 与 Na、K 等碱金属形成了具有网状结构的硫酸盐。

### 参考文献:

[1] 江梅,郭敏,程华,等. 烧结烟气超低排放全过程控制优化技术探讨[J]. 烧结球团, 2023, 48(2): 115-121.  
JIANG Mei, GUO Min, CHENG Hua, et al. Discussion on optimization technology of whole process control of ultra-low emission of sintering flue gas[J]. Sintering and Pelletizing, 2023, 48(2): 115-121.

[2] 张柏林,洪华,王天球,等. 钢铁工业烟气脱硝技术应用进展及前景[J]. 工程科学学报, 2023, 45(9): 1602-1612.  
ZHANG Bolin, HONG Hua, WANG Tianqiu, et al. Progress and prospects of flue gas de  $\text{NO}_x$  technology for the iron and steel industry [J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(9): 1602-1612.

[3] 田筠清,孙大为,李明,等. 基于熔剂分布均质化概念的碱性球团配矿新模式[J]. 中国冶金, 2023, 33(7): 73-80.  
TIAN Yunqing, SUN Dawei, LI Ming, et al. Alkaline pellet new ore blending mode based on concept of flux distribution homogenization[J]. China Metallurgy, 2023,

33(7): 73-80.

- [4] 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.
- [5] 青格勒,黄文斌,安钢,等. 低硅碱性球团矿制备技术研究[J]. 烧结球团, 2022, 47(1): 119-126.  
QING Gele, HUANG Wenbin, AN Gang, et al. Research on preparation technology of low-silica alkaline pellets [J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(1): 119-126.
- [6] 岳志玲,杨大兵,胡明欣,等. 复合黏结剂对铁精矿球团质量的影响[J]. 烧结球团, 2024, 49(2): 31-37.  
YUE Zhiling, YANG Dabing, HU Mingxin, et al. Effect of composite binder on quality of iron concentrate pellets [J]. Sintering and Pelletizing, 2024, 49(2): 31-37.
- [7] 王永刚,杨大兵. 黏结剂对程潮铁精矿球团质量的影响[J]. 烧结球团, 2011, 36(4): 20-22; 27.  
WANG Yonggang, YANG Dabing. Influence of binder on quality of Chengchao iron concentrate pellet [J]. Sintering and Pelletizing, 2011, 36(4): 20-22; 27.
- [8] 赵路遥,田筠清,赵满祥,等. 球团矿还原膨胀率影响因素分析[J]. 中国冶金, 2023, 33(10): 60-64.  
ZHAO Luyao, TIAN Yunqing, ZHAO Manxiang, et al. Analysis on influencing factors of reduction swelling index of pellets [J]. China Metallurgy, 2023, 33(10): 60-64.
- [9] 张建超. 高硫铁精矿反浮选脱硫试验[J]. 现代矿业, 2020, 36(7): 125-127.  
ZHANG Jianchao. Test of high sulfur iron concentrate desulfurization by reverse flotation [J]. Modern Mining, 2020, 36(7): 125-127.
- [10] 沈茂森,吕志义,康文革,等. 白云鄂博铁球团矿异常还原膨胀的机理[J]. 中国冶金, 2021, 31(3): 17-21; 29.  
SHEN Maosen, LÜ Zhiyi, KANG Wenge, et al. Abnormal reduction swelling mechanisms of pellets from Bayan Obo iron ore [J]. China Metallurgy, 2021, 31(3): 17-21; 29.
- [11] 杨大兵,张攀,李乾坤,等. 内蒙古某高硫高碱度磁铁精矿球团焙烧脱硫机理研究[J]. 烧结球团, 2016, 41(2): 41-46.  
YANG Dabing, ZHANG Pan, LI Qiankun, et al. Study on pellet induration desulphurization mechanism of high sulphur and high basicity magnetite concentrate from Inner Mongolia [J]. Sintering and Pelletizing, 2016, 41(2): 41-46.

(下转第 113 页)

- 32(5):94-97.
- [10] 张高杰,毕克俊. 河南某赤褐铁矿石选矿工艺比较试验[J]. 现代矿业 2020, 36(7):168-170;203.  
ZHANG Gaojie ,BI Kejun. Comparative test of a hematite and limonite ore processing technology in Henan[J]. Modern Mining 2020, 36(7):168-170;203.
- [11] 赵阳,刘泽伟. 新疆某难选赤褐铁矿石物理提纯工艺研究[J]. 现代矿业 2020, 36(1):156-158.  
ZHAO Yang ,LIU Zewei. Experimental study on physical mineral processing and purification of hematite and limonite in a place in Xinjiang[J]. Modern Mining , 2020, 36(1):156-158.
- [12] 黄武胜,袁启东,林小凤,等. 国外某赤褐铁矿选矿试验研究[J]. 现代矿业 2021, 37(11):125-129.  
HUANG Wusheng ,YUAN Qidong ,LIN Xiaofeng ,et al. Experimental study on beneficiation of a foreign hematite ore [J]. Modern Mining 2021, 37(11):125-129.
- [13] 王普蓉,徐国印. 云南某低品位难选鲕状赤铁矿选矿工艺研究[J]. 矿业研究与开发 2023, 43(6):197-201.  
WANG Purong ,XU Guoyin. Study on beneficiation process of a low-grade refractory oolitic hematite ore in Yunnan[J]. Mining Research and Development ,2023 , 43(6):197-201.
- [14] 王荣林,李明军,常鲁平,等. 国外某赤铁矿选矿工艺研究[J]. 现代矿业 2023, 39(1):172-175.  
WANG Ronglin ,LI Mingjun ,CHANG Luping ,et al. Study on beneficiation technology of a hematite abroad [J]. Modern Mining 2023, 39(1):172-175.
- [15] 祁忠旭,韩远燕,孙大勇,等. 提高云南某超贫微细赤铁矿选矿回收率的研究[J]. 烧结球团 2020, 45(5):59-62.  
QI Zhongxu ,HAN Yuanyan ,SUN Dayong ,et al. Research on increasing the recovery ratio of an ultra-low-grade fine hematite in Yunnan [J]. Sintering and Pelletizing 2020 , 45(5):59-62.
- [16] 朱海龙,张铃,伍红强. 海南某选厂磁-赤褐铁矿选矿工艺试验研究[J]. 现代矿业 2022, 38(7):115-118.  
ZHU Hailong , ZHANG Ling , WU Hongqiang. Experimental study on beneficiation process of magnetic-hematite ore dressing in a processing plant in Hainan [J]. Modern Mining 2022, 38(7):115-118.
- [17] 潘建,马雯卓,朱德庆,等.  $Al_2O_3$  对铁矿烧结球团及高炉冶炼的影响[J]. 钢铁研究学报 2021, 33(10):1095-1108.  
PAN Jian ,MA Wenzhuo ,ZHU Deqing ,et al. Effect of  $Al_2O_3$  on sintering ,pelletizing and blast furnace smelting [J]. Journal of Iron and Steel Research 2021, 33(10):1095-1108.
- 
- (上接第 102 页)
- [12] 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 & Steel 2018, 53(5):11-17.
- [13] 王飞,毛瑞,许源,等. 球团链磨机回转窑工艺中氯和硫元素迁移规律[J]. 钢铁研究学报 2022, 34(4):326-333.  
WANG Fei ,MAO Rui ,XU Yuan ,et al. Migration rule of chlorine and sulfur in grate-kiln process of pellet production [J]. Journal of Iron and Steel Research 2022 , 34(4):326-333.
- [14] 范建军,杨礼元. 高压辊磨预处理对超细粒度磁铁精矿粉球团性能的影响[J]. 钢铁 2012, 47(9):19-24.  
FAN Jianjun ,YANG Liyuan. Effect of high pressure roll grinding on pellet property of super-fine magnetite concentrate [J]. Iron & Steel 2012, 47(9):19-24.
- [15] 王聪渊,张洪海,李炜玺,等. 唐钢带式焙烧机熔剂性球团矿生产实践[J]. 河南冶金 2023, 31(5):36-40.  
WANG Congyuan ,ZHANG Honghai ,LI Weixi ,et al. Production practice of fluxed pellet ore in belt sintering machine of Tangsteel [J]. Henan Metallurgy ,2023 , 31(5):36-40.
- [16] 刘卫星,李杰,杨爱民,等. 碱度对镁质熔剂性球团矿强度的影响机理[J]. 钢铁 2021, 56(1):28-36.  
LIU Weixing ,LI Jie ,YANG Aimin , et al. Influence mechanism of basicity on strength of magnesium fluxed pellets [J]. Iron & Steel 2021, 56(1):28-36.