球团

福建三钢带式焙烧机球团工艺研究

朱德庆[1]，杨聪聪[1]，潘 建[1]，陈昭尧[2]，郭正启[1]，魏汝宋[2]，刘 真[2]
(1. 中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083；2. 三钢(集团)有限责任公司，福建 三明 365000)

摘 要： 为保证福建三钢首条国产带式焙烧机球团生产线的顺利投产和运行，基于现有原料情况(2种地方磁铁精矿(MK、XNK)和2种进口磁铁精矿(AMC、UMC))，研究配矿结构、MgO质量分数、焦化除尘灰占比、热工制度等因素对氧化球团质量的影响，并进行扩大试验。结果表明：较适宜的配矿方案为75% MK + 25% XNK或50% MK + 25% XNK + 25% AMC；采用高压辊磨预处理工艺，球团的MgO质量分数不宜高于2.0%，不宜添加焦化除尘灰；最佳焙烧条件下所得氧化球团的冷态强度和高温冶金性能完全能满足大型高炉的入炉要求。

关键词： 带式焙烧机；氧化球团；MgO；磁铁精矿；高压辊磨
中图分类号： TF046.6 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000-8764(2020)04-0027-08
doi： 10.13403/j.sjqt.2020.04.051

Research on pellets process of belt type roasting machine in Fujian Sangang

Zhu Deqing[1], Yang Congcong[1], Pan Jian[1], Chen Zhaoyao[2], Guo Zhengqi[1], Wei Rusong[2], Liu Zhen[2]
(1. *School of Minerals Processing & Bioengineering, Central South University, Changsha* 410083, *Hunan*;
2. *Fujian Sangang (Group) Co., Ltd., Sanming* 365000, *Fujian*)

Abstract To ensure smooth production and operation of the first homemade production line of belt type roasting machine pellets in Fujian Sangang, such effects as ore blending structure, mass fraction of MgO, proportion of coking dust and thermal conditions are systematically investigated, based on such existing raw materials as two domestic magnetite concentrates (MK and XNK), and two imported magnetite concentrates (AMC and UMC), while pilot tests are also conducted. The results show that ore blending scheme of 75% MK + 25% XNK or 50% MK + 25% XNK + 25% AMC exhibits better performance, and high pressure grinding rollers pretreatment needs to be applied. Moreover, the MgO content of fired pellets is better to be less than 2.0% while the addition of coking dust is not recommended. Under optimal conditions, the oxidized pellets possess good cold state strength and high-temperature metallurgical performance, which can meet the requirement of large-scale blast furnace.

Key words belt type roasting machine; oxidized pellets; MgO; magnetite concentrate; high pressure grinding

长期以来，烧结矿在我国高炉炉料中占据主导地位，球团矿入炉占比不足20%[1]。相比烧结矿，球团矿的铁品位高、粒度均一、强度高、冶金性能好，有利于增加高炉铁水产量、降低冶炼焦比；而且，球团矿生产工序能耗较烧结工序低1/3，CO_2和CO、SO_x、NO_x等烟气污染物排放量少50%以上[2-4]。随着我国生态文明建设和绿色制造的全面推行，大力发展球团矿生产、提高球团矿入炉占比是重要的发展趋势之一，这对促进钢铁工业实现节能降耗、低碳减排和调整升级有着重大的现实意义。

氧化球团矿生产工艺主要有带式焙烧机、链箅机-回转窑和竖炉3种，在世界上产能占比分别为58%、35%和6%[5]。近年来，带式

收稿日期： 2020-02-26
基金项目： 广西自治区创新驱动项目(桂科AAA18242003)
作者简介： 朱德庆(1964—)，男，教授，主要从事铁矿造块理论与新工艺、低品位矿及大宗固废综合利用等方面的研究。
通讯作者： 杨聪聪(1989—)，男，博士，讲师，主要从事铁矿石性能表征与评价、冶金固废资源化等方面的研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

焙烧机工艺在我国因对原料适应好、设备可大型化而获得快速发展，其产能占比已由2012年的4.5%提升至2018年的15%左右，今后仍将进一步增加[6]。带式焙烧机工艺中球团在台车上保持相对静止，减少了球团表面的磨损，从而不存在结圈问题[7]。因而，带式焙烧机工艺尤其适用于生产镁质球团矿，可避开镁质球团在回转窑中易粉化而造成结圈的问题[8]。包钢于2015年建成1台国内最大的624 m^2带式焙烧机；首钢京唐公司于2010、2019年分别建成3台504 m^2带式焙烧机[9]；福建三钢闽光200万t带式焙烧机球团项目，已于2019年12月26日顺利投产，各项指标均达到设计要求。三钢项目前期，针对三钢现有原料条件开展系统的球团试验，并推荐适宜的原料方案、预处理工艺及热工制度，可为带式焙烧机的设计、投产和运行提供重要参考与依据。

1 试验原料及研究方法

1.1 试验原料

试验采用100%磁铁矿为原料，包括2种地方磁铁精矿(MK和XNK)和2种进口磁铁精矿(澳精AMC、乌克兰精粉UMC)，含铁原料、熔剂等的化学成分如表1所示，含铁原料粒度组成和比表面积如表2所示。由表1可知：相较于进口磁铁精粉，地方磁铁精粉的铁品位和SiO_2质量分数均较低，而CaO和MgO质量分数较高，这对制备镁质熔剂性球团有利，并可减少外加碱性熔剂量；此外，XNK和UMC的S质量分数较高，分别为0.23%和0.11%；AMC的碱金属(K_2O+Na_2O)质量分数较高，达0.43%。因此，须对上述3种磁铁精矿的配比加以控制。由表2可知：4种铁精矿的粒度均较细，-0.045 mm粒级占比达68%以上；但就比表面积而言，铁精矿的比表面积仍未达到球团原料1 500~1 900 cm^2/g的一般要求，故需进行磨矿预处理。

轻烧白云石中CaO、MgO等有效成分的质量分数高，有害杂质少。试验中，将轻烧白云石细磨至-0.074 mm粒级占比为85%后，用于调节球团MgO质量分数。同时，考察焦化厂干熄焦(CDQ)除尘灰用于制备氧化球团矿的可行性。焦化除尘灰是一种二次资源，其成分与焦粉类似，C质量分数约为85%，S质量分数为0.46%，经细磨后，其-0.074 mm和-0.045 mm粒级占比分别为99%和81%。

此外，球团黏结剂为国产钙基膨润土(表3)，其各项性能基本满足要求。

表1 试验原料的化学成分及烧损(质量分数) %

原料名称	TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	P	S	烧损
MK	63.95	26.96	4.79	2.30	0.81	0.46	0.031	0.022	0.003	0.098	0.45
XNK	61.04	25.37	5.91	3.18	1.01	0.61	0.038	0.032	0.003	0.230	0.42
AMC	65.73	28.78	6.41	0.34	0.40	0.20	0.220	0.210	0.022	0.052	0.42
UMC	65.76	27.80	6.64	0.40	0.60	0.36	0.042	0.041	0.018	0.110	2.39
轻烧白云石	0.23	0.03	3.62	50.24	28.70	0.20	0.035	0.028	0.009	0.027	12.77
焦化除尘灰	0.57	0.73	6.06	0.94	0.32	4.05	0.092	0.120	0.037	0.460	86.28
膨润土	1.69	0.00	58.30	1.78	1.93	14.35	0.910	0.920	0.010	0.000	13.58

表2 铁精矿的粒度组成与比表面积

原料名称	粒度组成(质量分数)/%				比表面积/($cm^2 \cdot g^{-1}$)
	+0.15 mm	0.074~0.15 mm	0.045~0.074 mm	-0.045 mm	
MK	0.23	2.70	26.00	71.07	1 059
XNK	0.61	5.08	25.74	68.57	1 316
AMC	0.03	0.29	10.85	88.83	1 067
UMC	0.27	7.68	14.13	77.92	1 246

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3　膨润土的理化性能指标

胶质价 /(mL·(15 g)$^{-1}$)	膨胀率 /(mL·(2 g)$^{-1}$)	2 h 吸水率/%	吸蓝量 /(g·(100 g)$^{-1}$)	蒙脱石(质量分数)/%	pH	粒度组成(质量分数)/%	
						-0.075 mm	-0.045 mm
68.6	31.0	266	33.45	75.68	9.85	99.22	86.29

1.2　研究方法

基于三钢现有原料，共设计 5 组配矿方案：方案 1(基准)(50% MK + 50% XNK)、方案 2(75% MK + 25% AMC)、方案 3(50% MK + 25% XNK + 25% AMC)、方案 4(50% MK + 50% UMC)和方案 5(90% MK + 10% XNK)。针对方案 1，通过添加轻烧白云石或焦化除尘灰(0%~2.35%)，研究 MgO 质量分数和焦化除尘灰占比对生球及焙烧球性能的影响。

不同配矿方案的混合精矿先经高压辊磨预处理至比表面积为 1 500 ~ 1 600 cm^2/g，然后与一定量的膨润土、熔剂和燃料混匀，用于圆盘造球试验。小型试验中，每次造球试验的样品干重为 3.5 kg，圆盘造球机直径为 1 000 mm，转速为 28 r/min，倾角为 47°，生球粒度为 8 ~ 16 mm。通过优化膨润土用量、生球水分及造球时间，得到的最佳条件下的生球经检测后置于 105 ℃干燥箱中，直至完全烘干。所得干球在卧式管炉进行焙烧试验，用于优化预热、焙烧及均热工艺参数。

基于小型试验各配矿方案的适宜造球、焙烧工艺条件，在自行设计的带式焙烧机模拟装置上进行扩大试验。模拟装置主要由热风炉、烧嘴、焙烧杯、阀门、风机等构成。其中：焙烧杯尺寸为∅300 mm × 600 mm，球团料层高度可在 0 ~ 450 mm 之间调整，试验固定铺底料厚度为 40 mm，生球装料量约为 35 kg。通过温度、风向、风速的调节，装置可模拟球团在带式焙烧机上鼓风干燥、抽风干燥、预热、焙烧、均热和冷却的全过程，因此其提供的工艺参数可直接为带式焙烧机设计提供依据。

不同配矿方案扩大试验所得焙烧球团的机械强度及冶金性能根据 ISO 4700、GB/T 24531、GB/T 13241、GB/T 13242、GB 13240 等相关标准测定。将不同配矿方案的焙烧球团制备光片后，在透、反两用光学显微镜(Leica-DM RXE)下观察其显微结构及矿相。

2　结果与讨论

2.1　造球试验

在适宜造球水分为 7.1% ~ 7.4%、造球时间为 14 min 的条件下，研究膨润土用量、MgO 质量分数和焦化除尘灰占比对混合精矿造球性能的影响，结果如图 1 所示。

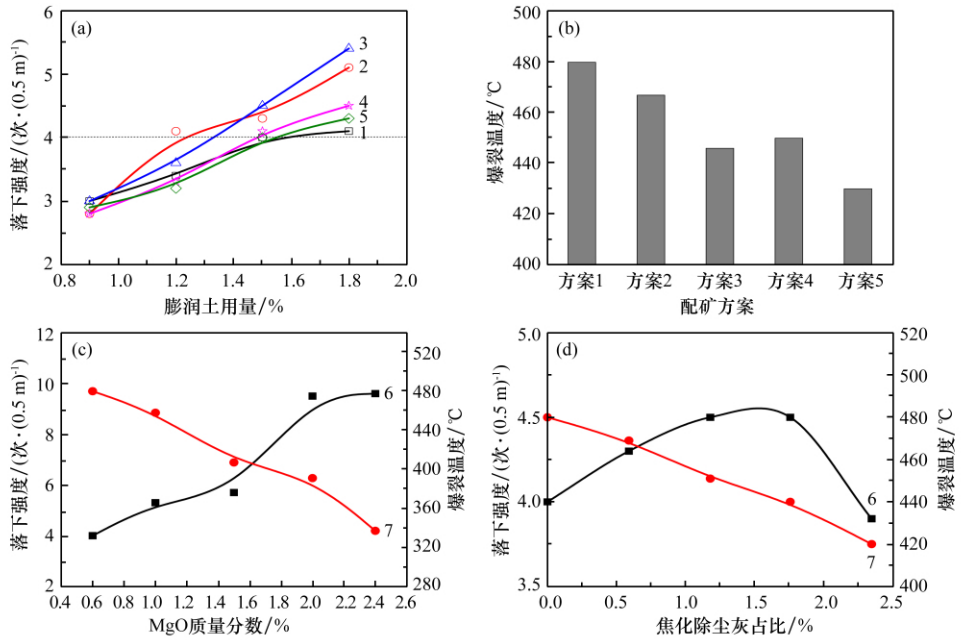
由图 1(a)可知，不同配矿方案生球的落下强度均随膨润土用量的增加而明显提高，当膨润土用量为 1.5% 时，各方案的生球落下强度达到 4 次/(0.5 m)以上。由图 1(b)可知，相同造球条件下，各配矿方案的生球爆裂温度在 430 ~ 480 ℃之间，其中方案 1 最高、方案 5 最低，均可满足生产要求。由图 1(c)可知，当方案 1 球团的 MgO 质量分数由 0.6%(自然 MgO 质量分数)增加到 2.4% 时(细磨轻烧白云石的添加量需相应增加至 6.0%)，生球的落下强度由4 次/(0.5 m)提高到 9.5 次/(0.5 m)左右，但生球的热稳定性明显恶化，爆裂温度由 480 ℃降至337 ℃。由图 1(d)可知，在自然 MgO 质量分数条件下，随着焦化除尘灰占比由 0% 增加至 2.35%，生球落下强度先从4 次/(0.5 m)轻微增加 4.5 次/(0.5 m)，后又降低到 3.9 次/(0.5 m)；同时，生球的爆裂温度由 480 ℃持续降低至 420 ℃。总体而言，在一定范围内，提高 MgO 质量分数和焦化除尘灰占比均能制备出合格生球，但适宜的 MgO 质量分数和焦化除尘灰占比需根据最终的球团焙烧性能及产品的冶金性能综合确定。

2.2　管炉焙烧试验

2.2.1　热工制度的优化

在自然 MgO 质量分数且不配加焦化除尘灰，焙烧温度为1 250 ℃，焙烧时间为15 min，

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

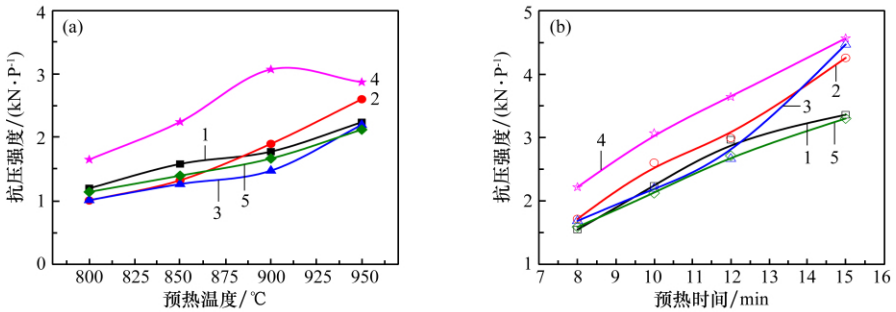


(a) 膨润土用量；(b) 不同配矿方案；(c) MgO 质量分数；(e) 焦化除尘灰占比

1—方案 1；2—方案 2；3—方案 3；4—方案 4；5—方案 5；6—落下强度；7—爆裂温度。

图 1 膨润土用量、MgO 质量分数和焦化除尘灰占比对混合精矿造球性能的影响

均热温度为 950 ℃，均热时间为 5 min 条件下，分别研究预热温度和预热时间对不同配矿方案焙烧球团抗压强度的影响，结果如图 2 所示。由图 2(a) 可知，固定预热时间为 10 min，当预热温度由 800 ℃提高至 950 ℃时，各方案焙烧球团抗压强度均随之改善，其中方案 4 的焙烧球抗压强度最佳。由图 2(b) 可知，在预热温度为 950 ℃条件下，当预热时间由 8 min 延长至 15 min，各方案焙烧球的抗压强度均大幅提高。由此可见，对以磁铁矿为主制备的球团，确保其在预热段充分氧化，对避免球团高温焙烧时产生裂纹和双层结构，促进球团固结至关重要。综合分析，适宜的预热温度为 850～950 ℃，预热时间不少于 12 min。



(a) 预热温度(固定预热时间为 10 min)；(b) 预热时间(固定预热温度为 950 ℃)

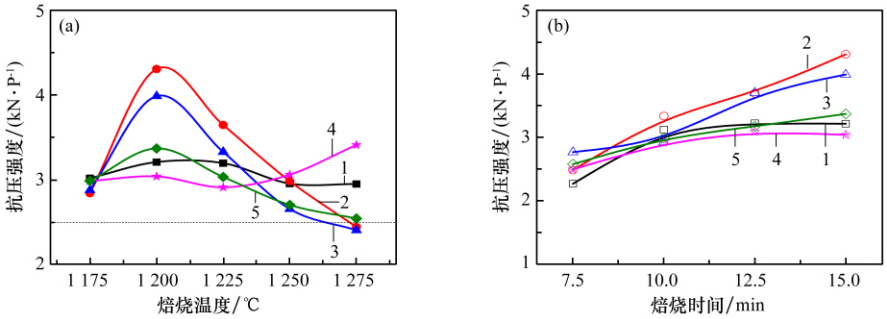
1—方案 1；2—方案 2；3—方案 3；4—方案 4；5—方案 5。

图 2 预热工艺参数对不同配矿方案焙烧球冷态抗压强度的影响

在自然 MgO 质量分数且不添加焦化除尘灰，预热温度为 950 ℃，预热时间为 12 min，均热温度为 950 ℃，均热时间为 5 min 条件下，分别研究焙烧温度和焙烧时间对不同配矿方案焙烧球抗压强度的影响，如图 3 所示。当固定焙烧时间为 15 min，将焙烧温度由 1 175 ℃提高到 1 275 ℃时(图 3(a))，除方案 4 焙烧球团的抗压强度随温度升高而增加外，其余 4 个配矿方案均呈先升高后降低的趋势，并在 1 200 ℃时达到最大值。这是因为温度过高时，球团表面磁铁矿快速氧化形成了较致密的赤铁矿外壳，同时在 1 200 ℃以上时液相开始生成并填充孔

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

隙，限制了 O_2 向球内扩散和磁铁矿的进一步氧化，不利于球团固结，导致球团强度明显下降。从另一方面看，较低的焙烧温度有利于提高带式焙烧机耐热件、耐火材料的使用寿命，降低运行费用。而当固定焙烧温度为 1 200 ℃，焙烧时间由 7.5 min 延长到 15 min 时(图 3(b))，所有配矿方案的焙烧球团强度均随之提高，说明延长焙烧时间有利于促进赤铁矿晶粒再结晶，改善球团固结。因此，适宜的焙烧温度为 1 175 ~ 1 200 ℃，焙烧时间不少于 10 min。



(a) 焙烧温度(固定焙烧时间为 15 min)；(b) 焙烧时间(固定焙烧温度为 1 200 ℃)

1—方案 1；2—方案 2；3—方案 3；4—方案 4；5—方案 5。

图 3　焙烧工艺参数对不同配矿方案焙烧球冷态抗压强度的影响

2.2.2　球团 MgO 质量分数的影响

相较于普通酸性球团，镁质球团具有还原膨胀率低、软熔性能好等优点。前期研究发现[10]，高炉使用镁质球团将有助于改善料柱透气性、降低焦比、提高铁水产量。因此，针对基准方案，在不配加焦化除尘灰，预热温度为 950 ℃，预热时间为 12 min，焙烧温度为 1 200 ℃，焙烧时间为 10 min，均热温度为 950 ℃，均热时间为 5 min 的条件下，研究 MgO 质量分数对焙烧球抗压强度的影响。结果如图 4 所示。由图 4 可知，当 MgO 质量分数由 0.6%(自然 MgO 质量分数)提高至 2.4% 时，即使球团碱度相应地由0.21增加到0.67，焙烧球强度仍然由 3 127 N/P 大幅降低至 2 298 N/P。这是因为熔剂带入的 Mg^{2+} 易替换磁铁矿中的 Fe^{2+} 形成尖晶石型固熔体，晶格趋于稳定，从而抑制磁铁矿氧化、赤铁矿再结晶和液相的生成。为保证焙烧球团有足够强度，球团的 MgO 质量分数宜在 2.0% 以下。

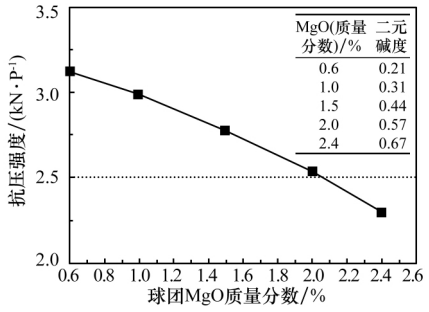


图 4　球团 MgO 质量分数对方案 1 焙烧球冷态抗压强度的影响

2.2.3　焦化除尘灰添加占比的影响

焦化除尘灰是一种二次资源，主要含碳，其资源化利用问题日益受到关注[10]。前期研究[11-12]发现，以赤铁矿为原料生产氧化球团时，内配碳可以降低焙烧温度，提高球团矿强度和孔隙率，改善球团矿冶金性能，但针对磁铁矿球团的相关研究较少。

针对方案 1，在自然 MgO 质量分数，预热温度为 950 ℃，预热时间为 12 min，焙烧温度为 1 200 ℃，焙烧时间为 10 min，均热温度为 950 ℃，均热时间为 5 min 的条件下，研究焦化除尘灰添加占比对焙烧球抗压强度的影响，结果如图 5 所示。由图 5 可知，添加焦化除尘灰后，焙烧球团的抗压强度急剧恶化，其原因在于：磁铁矿球团的固结严重依赖于磁铁矿的氧化及新生赤铁矿的再结晶。当焦化除尘灰占比增加时，球团内部氧势降低，磁铁矿氧化速率减缓，甚至被过还原，从而削弱了赤铁矿的再结晶固结，造成抗压强度的降低。因此，当以磁铁矿为主制备球团时，不建议配加焦化除尘灰等含 C 物料，但当以赤铁矿为主要原料时，配 C 量及其粒度和品种有待另行研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

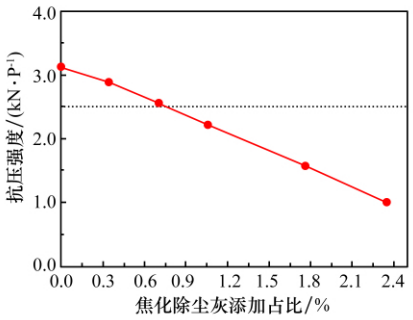


图 5 焦化除尘灰添加占比对基准方案焙烧球冷态抗压强度的影响

2.3 模拟带式焙烧机扩大试验

2.3.1 不同配矿方案焙烧球的化学成分及冶金性能

针对 5 个配矿方案，共设置 6 组模拟带式焙烧机扩大试验，在管炉焙烧试验推荐的热工制度基础上，进一步优化鼓风干燥、抽风干燥、预热、焙烧、均热及料层高度等工艺参数，得到的最佳工艺制度：鼓风干燥温度为 240 ~ 300 ℃，干燥时间为 6 min，风速为 1.2 m/s；抽风干燥温度为 200 ~ 240 ℃，干燥时间为 8 min，风速为 1.2 m/s；预热温度为 850 ℃，预热时间为 18 min，风速为 2.2 m/s；焙烧温度为 1 150 ℃，焙烧时间为 18 min，风速为 2.2 m/s；均热温度为 950 ℃，均热时间为 5 min，风速为 1.8 m/s。各配矿方案焙烧球的化学成分、冷态强度及高温冶金性能如表 4、5 所示。

表 4 不同配矿方案焙烧球团的化学成分、冷态强度及高温冶金性能

试验编号	配矿方案	设定 MgO 质量分数	焙烧球团化学成分(质量分数)/%							
			TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	P	S
1#	方案 1(基准)	自然	62.31	3.21	6.60	1.59	0.59	0.65	0.011	0.003
2#	方案 1(基准)	1.5	61.00	1.14	7.05	3.21	1.37	0.64	0.014	0.005
3#	方案 2	自然	62.32	2.91	6.72	2.02	0.69	0.66	0.009	0.003
4#	方案 3	自然	61.15	4.66	6.84	2.25	0.74	0.69	0.011	0.008
5#	方案 4	自然	62.16	2.80	6.75	2.10	0.71	0.72	0.008	0.008
6#	方案 5	自然	61.55	0.78	6.50	2.81	0.83	0.64	0.006	0.005

表 5 不同配矿方案焙烧球团冷态强度及高温冶金性能

试验编号	冷态强度			高温冶金性能							
	CCS/(N·P⁻¹)	*TI*/%	*AI*/%	$RDI_{+3.15\ mm}$/%	*RSI*/%	*RI*/%	T_a/℃	T_s/℃	T_m/℃	ΔT_{sa}/℃	ΔT_{ma}/℃
1#	2 867	97.44	2.09	99.63	3.6	59.4	1 109	1 145	1 216	36	107
2#	2 612	95.32	2.89	99.05	10.9	68.6	1 107	1 187	1 268	80	161
3#	2 684	97.15	1.24	99.35	7.7	51.7	1 144	1 232	1 264	86	150
4#	2 522	96.55	2.20	99.20	5.2	65.1	1 149	1 225	1 282	76	133
5#	2 555	95.59	4.28	99.18	9.9	55.9	1 119	1 204	1 260	85	141
6#	3 935	96.55	3.33	99.61	5.8	59.7	1 129	1 218	1 269	89	140

注：*CCS* 为冷态抗压强度，N/P；*TI* 为转鼓指数(+6.3 mm)，%；*AI* 为耐磨指数(−0.5 mm)，%；$RDI_{+3.15\ mm}$ 为还原粉化指数，%；*RSI* 为还原膨胀指数，%；*RI* 为还原度，%；T_a 为软化开始温度，℃；T_s 为软化终了温度，℃；T_m 为滴落温度，℃；ΔT_{sa} 为软化温度区间，℃；ΔT_{ma} 为软熔温度区间，℃。

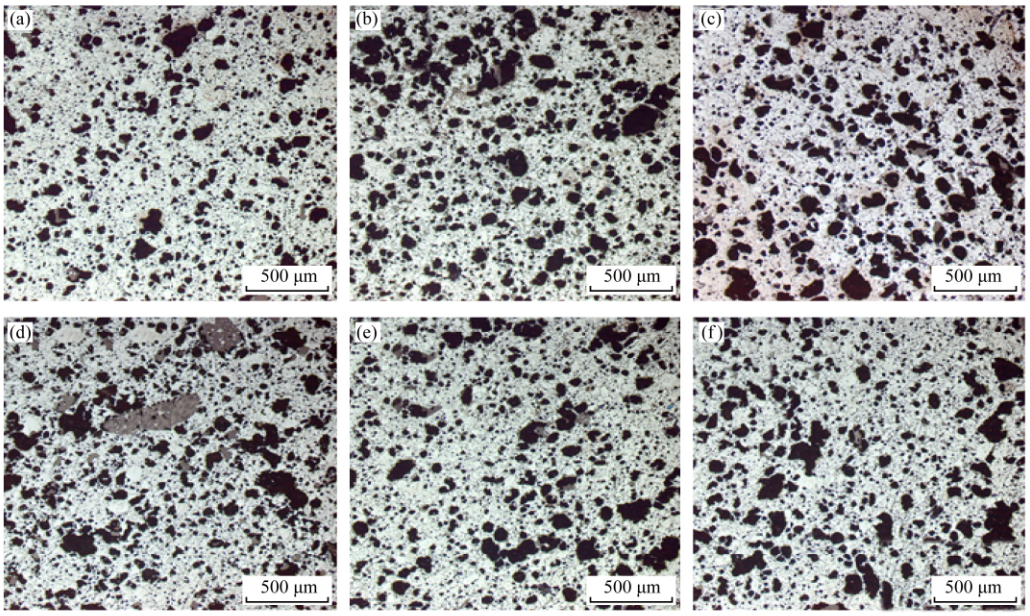
由表 4、5 可知：焙烧球团的 w(TFe) 为 61%~62.5%，SiO_2 质量分数在 6.5%~7.1% 之间，FeO 质量分数偏高，这可能与原料及焙烧杯中温度不均匀等因素有关；此外，Al_2O_3、P、S 等的质量分数均较低，对后续高炉冶炼有利；6 组方案的焙烧球强度均可满足高炉冶炼要求；6 组成品球团矿的低温还原粉化性良好，还原膨胀率均小于 15%，但由于球团矿的成分及显微结构不同，还原度呈现明显差异，其中方案 1(基准)(MgO 质量分数为 1.5%) 和方案 3 的成品球还原性较好，还原度指数高于 65%；另外，各球团矿的软化温度合理，软化及软融

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

区间均较窄，有利于改善高炉料柱透气性。考虑到现有配矿方案在多数情况下不能兼顾冷态强度和冶金性能，建议后续进一步增加原料种类，优化球团原料方案。

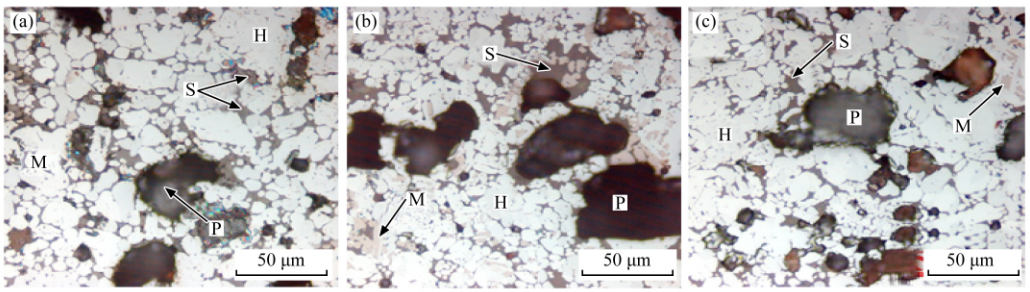
2.3.2　焙烧球团的微观结构

上述 6 组试验焙烧球团的微观结构如图 6 所示，同时对比了还原性较好的 2#、4#焙烧球团与还原性最差的 3#焙烧球团的主要物相，如图 7 所示。



(a) 1#；(b) 2#；(c) 3#；(c) 4#；(c) 5#；(c) 6#

图 6　不同配矿方案焙烧球团的微观结构



(a) 2#；(b) 3#；(c) 4#

H—赤铁矿；M—磁铁矿；S—渣相；P—孔洞。

图 7　焙烧球团的主要物相对比

由图 6 可见：各焙烧球团的连晶均较好、固结紧密，其中 1#、5#和 6#焙烧球团孔隙半径较小、孔隙率较低，2#焙烧球团因为 MgO 质量分数较高，孔隙率有所增加；所有焙烧球团均可见一定量未被氧化完全的磁铁矿，尤其是 3#焙烧球团。焙烧球团致密、残余磁铁矿质量分数高是导致其还原度低的重要原因，但另一方面，球团还原性差往往有利于减少球团低温还原粉化、降低还原膨胀率。由图 7 可见：2#、3#、4#的 3 组焙烧球团均存在赤铁矿、磁铁矿和渣相等主要物相，固结形式主要依靠赤铁矿再结晶的固相固结为主，渣相固结为辅。其中，渣相占比接近 10%，其对促进赤铁矿再结晶和球团致密化有重要作用，但也可能对球团焙烧过程中磁铁矿的氧化、焙烧球团的还原产生不利影响。

3　结　论

(1) 磁铁精矿的比表面积较低，需经高压

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

辊磨进行预处理。在膨润土用量仅为1.5%的条件下，不同配矿方案均可制备出强度高、热稳定性好的合格生球。在一定范围内，配加细磨轻烧白云石和焦化除尘灰均能改善生球落下强度，但会导致生球爆裂温度降低。

(2) 针对上述生球，适宜的热工制度：鼓风干燥温度为240～300 ℃，干燥时间为6 min，风速为1.2 m/s；抽风干燥温度为200～240 ℃，干燥时间为8 min，风速为1.2 m/s；预热温度为850～950 ℃，预热时间不少于12 min，风速为2.2 m/s；焙烧温度为1 150～1 200 ℃，焙烧时间不少于10 min，风速为2.2 m/s；均热温度为950～1 000 ℃，均热时间为3～5 min，风速为1.8 m/s。在此条件下，焙烧球团强度达到大型高炉冶炼要求，结合其冶金性能，推荐75% MK+25% XNK或50% MK+25% XNK+25% AMC两个配矿方案。提高MgO质量分数和焦化除尘灰占比均对成品球团强度不利，因此MgO质量分数应小于2.0%，不建议添加焦化除尘灰。

(3) 考虑到现有配矿方案在多数情况下不能很好地兼顾冷态强度和冶金性能，建议后续进一步增加原料种类，优化球团原料结构，改善产品质量，充分发挥球团矿产品强化高炉冶炼的优势。

参考文献

[1] Zhu Deqing. Improving the pelletization of Brazilian hematite by HPGR [C]//3rd Symposium on Iron Ore Pelletizing. Quebec: COREM,2013.

[2] 王维新. 提高高炉炉料中球团矿配比、促进节能减排[J]. 冶金管理,2018,355(9):55－60.

[3] 杨晓东,张丁辰,刘锟,等. 球团替代烧结——铁前节能低碳污染减排的重要途径[J]. 工程研究－跨学科视野中的工程,2017,9(1):44－52.

[4] 许满兴. 论我国高炉炉料结构的未来与高品质球团矿生产[N]. 世界金属导报,2019－12－03(B08).

[5] Oja K. Straight grate vs rotary kiln [C]//3rd Symposium on Iron Ore Pelletizing. Quebec: COREM,2013.

[6] 朱德庆,黄伟群,杨聪聪,等. 铁矿球团技术进展[J]. 烧结球团,2017,42(3):42－49.

[7] 韩志国. 大型带式焙烧机球团技术的研究与应用[N]. 世界金属导报,2013－08－27(B16).

[8] 潘建,王硕,甘牧原,等. 带式焙烧机制备镁质球团的工艺及机理研究[J]. 烧结球团,2019,44(3):27－33.

[9] 任伟,韩基祥. 带式焙烧机球团技术开发与应用[N]. 世界金属导报,2017－06－20(B07).

[10] 马成伟,郑朋超,陈艳波. 首钢京唐焦化除尘灰的回收利用[J]. 河北冶金,2015(10):79－82.

[11] 李晓芹. 内配碳在赤铁矿氧化球团制备中的行为研究[D]. 长沙:中南大学,2009.

[12] 沈文俊. 燃料与熔剂在巴西赤铁矿氧化球团中的行为及机理研究[D]. 长沙:中南大学,2011.

(上接第21页)

[4] Fan X H,Jiang L J,Chen X L. Air leakage online monitoring and diagnosis model for sintering [C]//3rd International Symposium on High－Temperature Metallurgical Processing. New Jersey: John Wiley & Sons,Inc.,2012.

[5] 吴颖,金永龙. 烧结机本体漏风率在线测量技术及应用[J]. 烧结球团,2008,33(4):9－12.

[6] 高彦,么占坤,孙长征,等. 烧结机漏风治理技术方案[J]. 烧结球团,2004,29(1):38－42.

[7] 金永龙,徐南平,邬士英,等. 烧结机分区段漏风测试技术研究及应用[J]. 钢铁,2003,38(3):1－3.

[8] 刘波,叶恒棣,卢兴福,等. 烧结机低漏风综合密封技术及其在宝钢湛江的应用[J]. 烧结球团,2018,43(2):48－53.

[9] 王涛,王勇. 浅谈料面风速法则漏风的原理与方法[J]. 酒钢科技,2004(2):36－40.

[10] 王素平,李军. 采用新型料面风速法测定烧结系统漏风率[C]//中国计量协会冶金分会2014年会暨能源计量与绿色冶金论坛. 宜昌:中国计量协会冶金分会,2014.

[11] 夏建芳,封溢,刘继佼,等. 烧结机漏风率测点布局方案研究[J]. 计算机仿真,2014(7):212－215.

[12] 国家环境保护局. 固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法[M]. 北京:中国环境科学出版社,1996.

[13] 方景林,王燕,张国德. 烧结混合料水分测量方法的研究[J]. 传感器与微系统,2000,19(1):36－38.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net