锰块矿焙烧试验研究及带式焙烧机工艺探讨

胡志祥[1]，胡长松[2,3]

（1. 首钢水城钢铁（集团）有限责任公司，贵州 六盘水 553000；2. 北京首钢国际工程技术有限公司，北京 100043；3. 北京市冶金三维仿真设计工程技术研究中心，北京 100043）

摘要：我国是锰铁合金的主要进口国和消费国，但我国锰块矿品位较低，冶炼成本高，处理工艺单一。为提高锰块矿品位，降低锰合金冶炼的燃料消耗，减少生产成本，本文通过正交试验方法对锰块矿干燥、预热和焙烧的工艺制度进行研究，分析其焙烧的工艺特点及难点，研究其系统焙烧温度和 O_2 与 CO_2 分压对 $MnCO_3$ 分解反应的影响，最终找出其合理的焙烧工艺。结果表明：当锰块矿粒度为 15～40 mm、干燥温度为 400 ℃、干燥时间为3.0 min、预热 I 段（温度为 550 ℃、时间为 3.0 min）、预热 II 段（温度为 900 ℃、时间为 10 min）、焙烧温度为 1 100 ℃、焙烧时间为 10 min、均热温度为 950 ℃，均热时间为 6 min 时，锰块矿焙烧效果最佳，焙烧后锰块矿中 TMn 质量分数由 21.34% 升至 32.32%，碳脱除率达 98.94%，烧损率为 28.40%。

关键词：锰矿；碳酸锰；氧化锰；焙烧；带式焙烧机

中图分类号：TD91；TF046.4；TF792 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764（2024）03－0060－07

doi：10.13403/j.sjqt.2024.03.042

Experimental research on manganese lump ore roasting and discussion on straight grate technology

HU Zhixiang[1], HU Changsong[2,3]

（1. Shougang Shuicheng Iron & Steel（Group）Co.,Ltd.,Liupanshui 553000,Guizhou,China;2. Beijing Shougang International Engineering Technology Co.,Ltd.,Beijing 100043,China;3. Beijing Metallurgical 3D Simulation Design Engineering Technology Research Center,Beijing 100043,China）

Abstract: China is the main importer and consumer of manganeseirom with low grade of manganese lump ore, high smelting cost and single treatment process. In order to improve the grade of manganese lump ore, reduce the fuel consumption of manganeseirom smelting and its production cost, the process system of drying, preheating and roasting manganese lump ore is studied by orthogonal test method, the process characteristics and difficulties of roasting are analyzed, and the effects of the roasting temperature and the partial pressure of O_2 and CO_2 on the decomposition reaction of $MnCO_3$ are studied to finally find out its reasonable roasting technology. The results show that, when the particle size of manganese lump is 15～40 mm, the drying temperature is 400 ℃, the drying time is 3.0 min, the preheating temperature section I is 550 ℃, the time is 3.0 min, the preheating section II temperature is 900 ℃, the time is 10 min, the roasting temperature is 1 100 ℃, the roasting time is 10 min, the soaking temperature is 950 ℃, and the soaking time is 6 min, the roasting effect of manganese lump ore is the best, the TMn mass fraction in manganese lump ore is increased from 21.34% to 32.32%, the carbon removal rate is 98.94%, and the burn-off rate is 28.40%.

Key words: manganese ore; manganese carbonate; manganese oxide; roasting; straight grate

收稿日期：2023－09－04；**修回日期**：2023－10－12

作者简介：胡志祥（1980—），男，工程师，从事高炉冶炼工作。

通信作者：胡长松（1983—），男，高级工程师，从事烧结球团工艺研究及工程设计工作。

在钢铁市场增速回落，国家推进钢铁行业供给侧结构性改革的大环境下，钢铁企业（钢企）面临前所未有的生存挑战[1]。钢企要在激烈的市场竞争中求得生机，须不断满足客户需求，从“以产定销”向“以客户为中心”转变[2]。一些钢企为满足客户需求，赢得市场，开始生产一些锰铁合金、镍铁合金等材料。国内对锰铁合金需求量增加，国际优质锰矿块矿价格不断攀升，导致锰系合金生产成本居高不下[3]。我国锰矿资源总储量较为丰富，但我国碳酸锰矿石总体品位低且多呈贫、细、杂状态，而目前我国作为全球锰铁合金的最大进口国和消费国，锰资源短缺已成为制约我国钢铁工业持续发展的瓶颈。国内不少专家和学者开始关注国内锰块矿焙烧研究，去除锰块矿内大量 CO_2，以提高锰块矿的有效成分，提高锰块矿入大型矿热炉冶炼的配入比例，优化配料模式，可以降低锰铁合金生产成本，改善生产经济技术指标[4]。目前国内加工锰矿的工艺方法只有烧结工艺，存在诸多问题，如：工序能耗（折标煤）≥ 40 kg/t、固体废弃物排放量大、排放烟气处理困难、需配加固体燃料等。

早在 1985 年，钟麟学者[5]就发表过用带式焙烧机处理碳酸锰块矿的文章，但由于当时我国带式焙烧机生产线较少，并没有得到工业实践。近年来，我国带式焙烧机生产线迅速发展，已建成投产 20 多条，带式焙烧机将球团干燥、预热、焙烧、冷却过程集成在一台设备上完成，具有热效率高、可靠耐用性强、原料适应性强、废气粉尘少、成品率高，保温效果好、使用寿命长、热耗低、作业率高等诸多优点。本文根据国内锰块矿的原料特点，选择典型的锰矿石，采用实验室模拟带式焙烧机工艺的试验设备，对锰块矿焙烧试验进行研究，分析其原料特性和焙烧的工艺特点，提出锰块矿焙烧使用带式焙烧机工艺的合理化建议，以期为锰块矿更好的投入生产与应用提供借鉴与指导。

1　锰块矿焙烧工艺试验研究

1.1　原料特点

研究采用国内典型的锰矿石（菱锰矿），其主要化学成分见表 1。为了更好的研究锰块矿的焙烧特点，制定合理试验研究方案，锰块矿中锰的主要赋存形态见表 2。

1.2　研究方法

锰矿石通过破碎筛分，选取 3 个粒级范围（10 ~ 15、15 ~ 25、25 ~ 40 mm）作为研究对象，堆积密度为 1.741 g/cm^3。试验采用带式焙烧机模拟试验设备（图 1）进行焙烧试验。焙烧杯尺寸：直径为 300 mm，高度为 450 mm；布料：铺底料厚为 100 mm，锰块矿厚为 350 mm。采用正交试验研究方法，对锰块矿干燥、预热和焙烧工艺制度进行研究，对试验过程中数据进行监测，进行数据分析，考察评价指标脱水率、TMn 含量、烧损率和粉化率（ <6.3 mm 含量）等，研究锰块矿焙烧的机理和特点。脱水率和烧损率的计算公式分别见式（1）和式（2）。

$$\theta = \frac{W_{干燥前} - W_{干燥后}}{W_{总含水量}} \times 100\% \tag{1}$$

$$\varepsilon = \frac{W_{焙烧前} - W_{焙烧后}}{W_{焙烧前}} \times 100\% \tag{2}$$

式中：θ 为脱水率，%；$W_{干燥前}$ 为原矿锰块矿试样质量，g；$W_{干燥后}$ 为干燥后锰块矿试样质量，g；

表 1　锰块矿主要化学成分（质量分数）

Table 1　The physical chemistry composition of the manganese lumps　　%

TMn	TFe	SiO_2	MgO	CaO	Al_2O_3	Na_2O	K_2O	S	C	P	H_2O（总）	烧损
21.34	1.31	20.37	6.54	7.48	3.93	0.76	0.41	0.33	7.58	0.04	0.42	28.40

表 2　锰块矿中锰的主要赋存形态

Table 2　The main occurrence form of manganese in manganese lump ore

项目	碳酸锰中锰	硅酸锰矿物中锰	高价氧化锰矿物中锰	水锰矿及褐锰矿中锰	硫锰矿中锰	总锰
质量分数/%	19.93	0.50	0.14	0.56	0.21	21.34
占总锰比列/%	93.39	2.34	0.66	2.62	0.98	100.00

$W_{总含水量}$为原矿锰块矿试样总含水量,%；ε 为烧损率,%；$W_{焙烧前}$ 为锰块矿干燥后试样质量，g；$W_{焙烧后}$为锰块矿焙烧后试样质量，g。

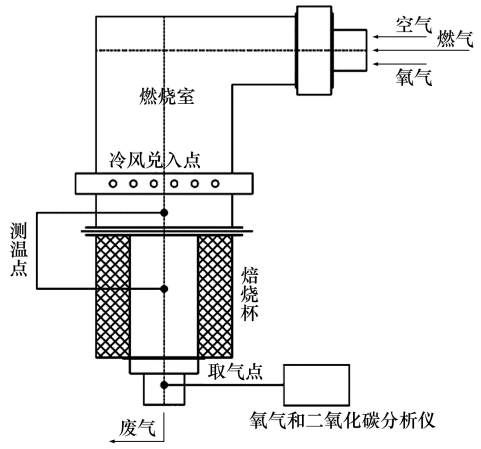


图1 带式焙烧机模拟试验原理

Fig. 1 Principle of simulation test for straight grate

1.3 锰块矿焙烧的机理研究

锰块矿中锰的赋予形态主要是 $MnCO_3$，$MnCO_3$ 焙烧过程中发生的热力学反应比较复杂，主要有以下反应[6]：

$$MnCO_3 \rightleftharpoons MnO + CO_2 \quad \Delta G^{\theta} = 102\ 774.13 - 167.879T \tag{3}$$

$$MnO + 1/2O_{2(g)} = MnO_2 \quad \Delta G^{\theta} = -136\ 879.47 - 109.235T \tag{4}$$

$$6MnO + O_{2(g)} = 2Mn_3O_4 \quad \Delta G^{\theta} = -42\ 035.85 - 42.035T \tag{5}$$

$$2Mn_3O_4 + 6SiO_2 = 6MnSiO_3 + O_{2(g)} \quad \Delta G^{\theta} = 315\ 478 - 263.488T \tag{6}$$

从生产角度考虑，锰块矿焙烧主要是为了获得有效成分 Mn 含量最高的 MnO，MnO 含量越高，后续越可以节省冶炼锰合金时的燃料和生产成本[7]。

从热力学角度看，反应式(3)为可逆反应，反应进行的方向取决于 $MnCO_3$ 的分解压和环境中 CO_2 的分压，而 $MnCO_3$ 的分解压又与焙烧温度成正比。从此方面看，获得优质焙烧锰块矿的重要条件是合适的焙烧温度(温度 >340 ℃)和足够的预热反应时间。但反应式(3)又表明，$MnCO_3$ 分解又受制于 CO_2 的分压，故生成的 CO_2 分压不宜太高[8]。另外，从反应式(4)、(5)、(6)可以看出，$MnCO_3$ 焙烧产生的 MnO 会与环境中 O_2 发生反应生成熔点较高、Mn 含量较低的 MnO_2 和 Mn_3O_4，对后续的冶炼造成负面影响[9]，当温度 >924.5 ℃时，反应(6)中 $\Delta G^{\theta} < 0$，Mn_3O_4 与锰块矿中 SiO_2 发生反应，生成低熔点 $MnSiO_3$ 等硅酸盐，这些对锰块矿焙烧后均热再结晶是有利的[10]。

1.4 结果与讨论

1.4.1 干燥试验

锰块矿的水分多为结晶水，且质量分数较少，仅为0.42%，故本文研究锰块矿干燥只考虑鼓风干燥，而锰块矿粒度、干燥时间、干燥温度对粉化率和脱水率的影响见表3。

表3 锰块矿粒度、干燥时间、干燥温度对粉化率和脱水率的影响

Table 3 Effects of particle size, drying time and drying temperature on the pulverization and dehydration of manganese lump ore

序号	粒度/mm	干燥时间/min	干燥温度/℃	质量分数/%	
				<6.3 mm 占比	脱水率
1	10~15	1.0	350	0.57	85.14
2	10~15	2.0	400	1.68	100.00
3	10~15	3.0	450	2.04	100.00
4	10~15	4.0	500	2.53	100.00
5	15~25	1.0	400	0.43	83.43
6	15~25	2.0	350	0.55	98.91
7	15~25	3.0	500	1.92	100.00
8	15~25	4.0	450	1.76	100.00
9	25~40	1.0	450	0.12	88.64
10	25~40	2.0	500	1.75	95.27
11	25~40	3.0	350	0.54	98.16
12	25~40	4.0	400	1.10	100.00
13	40~50	1.0	500	0.10	90.42
14	40~50	2.0	450	1.01	92.06
15	40~50	3.0	400	0.84	93.31
16	40~50	4.0	350	1.11	93.13

从表3可以看出，随着锰块矿粒度增大，粉化率减小，脱水率减小；随着干燥时间延长，粉化率增大，脱水率增高；随着干燥温度升高，粉化率增大，脱水率增高。综合考虑锰块矿的粉化率和干燥脱水率，粒度在10~15 mm锰块矿粉化率较大、粒度在40~50 mm锰块矿脱水率差。故

优化干燥方案：锰块矿粒度为 15 ~ 40 mm、干燥时间为 3 min、干燥温度为 400 ℃。

1.4.2　预热试验

固定干燥方案：粒度为 15 ~ 40 mm、干燥时间为 3 min、干燥温度为 450 ℃，进行预热试验，分为预热Ⅰ段和预热Ⅱ段，预热Ⅰ段温度固定为 550 ℃，采用正交试验设计，考察预热后锰块矿烧损率(主要是 CO_2 的逸出)和粉化率，评估预热效果，具体见表 4。

表 4　预热温度、预热时间对锰块矿烧损率和粉化率的影响

Table 4　Effects of preheating temperature and preheating time on burning loss and pulverization rate of manganese lump ore

序号	预热Ⅰ段时间/min	预热Ⅱ段指标(质量分数)/%		预热温度/℃	预热时间/min
		<6.3 mm 占比	烧损		
1	2.0	800	8.0	0.43	17.36
2	2.0	850	10.0	0.73	21.56
3	2.0	900	12.0	2.37	26.34
4	2.0	950	14.0	2.40	25.42
5	3.0	800	10.0	1.64	24.51
6	3.0	850	8.0	1.43	21.43
7	3.0	900	14.0	2.43	25.32
8	3.0	950	12.0	1.83	26.63
9	4.0	800	12.0	1.76	19.81
10	4.0	850	14.0	2.13	25.13
11	4.0	900	8.0	1.75	26.84
12	4.0	950	10.0	2.54	27.15
13	5.0	800	14.0	1.51	21.64
14	5.0	850	12.0	1.53	26.47
15	5.0	900	10.0	2.10	25.13
16	5.0	950	8.0	1.96	25.24

从表 4 可以看出，随着预热Ⅰ段时间延长，锰块矿粉化率和烧损率均先增大后减小；随着预热Ⅱ段温度升高，锰块矿粉化率和烧损率均增大；随着预热Ⅱ段时间延长，锰块矿粉化率增大，烧损率先增大后减小。综合考虑锰块矿的粉化率和预热烧损率，优化预热方案：预热Ⅰ段温度为 550 ℃、时间为 3.0 min，预热Ⅱ段温度为 900 ℃、时间为 10 min。

1.4.3　焙烧试验

确定干燥和预热试验工艺参数后，进行焙烧试验。干燥、预热完成后，迅速调节温度，进行焙烧、均热及冷却试验。整个焙烧过程在一个设备中连续进行，直至完成。均热温度固定为950 ℃，考察焙烧温度、时间和均热时间对锰块矿烧损率、粉化率的影响，同时监测锰块矿焙烧过程中 O_2 和 CO_2 含量的变化，相关数据分别见表 5 和图 2。

表 5　焙烧温度、焙烧时间、均热时间对锰块矿烧损率和粉化率的影响

Table 5　Effects of roasting temperature, roasting time and soaking time on the burning loss rate and pulverization rate of manganese lump ore

序号	焙烧温度/℃	焙烧时间/min	均热时间/min	质量分数/%	
				<6.3 mm 占比	烧损
1	1 000	8.0	4.0	6.59	17.85
2	1 000	10.0	6.0	4.57	19.46
3	1 000	12.0	8.0	2.04	22.47
4	1 000	14.0	10.0	2.54	23.86
5	1 050	8.0	6.0	4.67	19.42
6	1 050	10.0	4.0	3.64	23.14
7	1 050	12.0	10.0	3.23	24.31
8	1 050	14.0	8.0	4.78	24.01
9	1 100	8.0	8.0	3.37	23.17
10	1 100	10.0	10.0	4.31	24.51
11	1 100	12.0	4.0	5.48	25.41
12	1 100	14.0	6.0	3.58	26.24
13	1 150	8.0	10.0	2.12	22.69
14	1 150	10.0	8.0	4.21	25.21
15	1 150	12.0	6.0	5.98	25.62
16	1 150	14.0	4.0	6.12	26.43

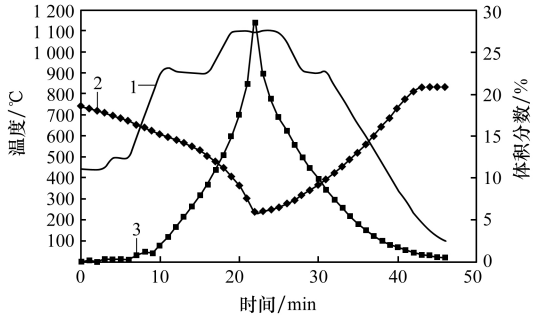
从表 5 可以看出，随着焙烧温度的升高，锰块矿粉化率增大，烧损率增大，这主要是因为 $MnCO_3$ 随着温度升高分解加速，产生的 CO_2 量增大；随着焙烧时间的延长，锰块矿粉化率变化不明显，烧损率增大，但增速由大变小，这主要是因为焙烧时间达到 10 min 时，$MnCO_3$ 分解接近结束；随着均热时间的延长，锰块矿粉化率迅速减小，烧损率变化不明显，这主要是因为 $MnCO_3$ 分解结束，没有了 CO_2 溢出，焙烧过程中产生 Mn_3O_4

与锰块矿中的 SiO_2 反应生成低熔点 $MnSiO_3$，$MnSiO_3$ 再结晶时固结一部分粉末。综合考虑锰块矿的粉化率和焙烧烧损率，优化焙烧方案：焙烧温度为 1 100 ℃，焙烧时间为 10 min，均热时间为 6 min。

从图 2 可以看出，随着试验时间的进行，系统中温度按控制梯度升高时，氧体积分数迅速减少，二氧化碳体积分数迅速增加，约在 22 min，温度为 1 100 ℃时，氧体积分数达到最小值，二氧化碳达到峰值，此时 $V(O_2):V(CO_2)\approx1:5$。时间超过22 min 后，氧体积分数逐渐增加，二氧化碳体积分数迅速减少，说明锰块矿中 $MnCO_3$ 的分解反应开始逆向进行[11]。

1.4.4 焙烧优化试验

根据锰块矿工艺试验研究结果，确定焙烧工艺制度，进行优化重现性试验，确定最佳工艺焙烧制度：锰块矿粒度为 15 ~ 40 mm、干燥温度为 400 ℃、干燥时间为 3.0 min、预热Ⅰ段温度为 550 ℃、时间为 3.0 min、预热Ⅱ段温度为 900 ℃、时间为 10 min、焙烧温度为 1 100 ℃、焙烧时间为 10 min、均热温度为 950 ℃，均热时间为 6 min。锰块矿焙烧后外貌形态有点呈现棕褐色，有的呈现黑色，见图 3，其显微镜图像见图 4。



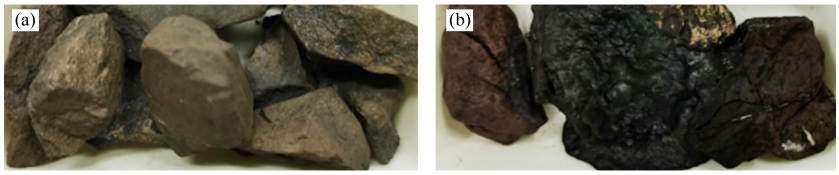
1—焙烧温度；2—O_2 体积分数；3—CO_2 体积分数。

图 2 锰块矿焙烧过程中温度、O_2 体积分数和 CO_2 体积分数随时间的变化

Fig. 2 Changes of temperature, oxygen volume fractionand carbon dioxide volume fraction with time during the roasting process of manganese lump ore

从图 3、4 可以看出，锰块矿焙烧后内部因碳酸盐分解和 CO_2 溢出产生了许多孔洞，呈现棕褐色的锰块矿内液相较多。

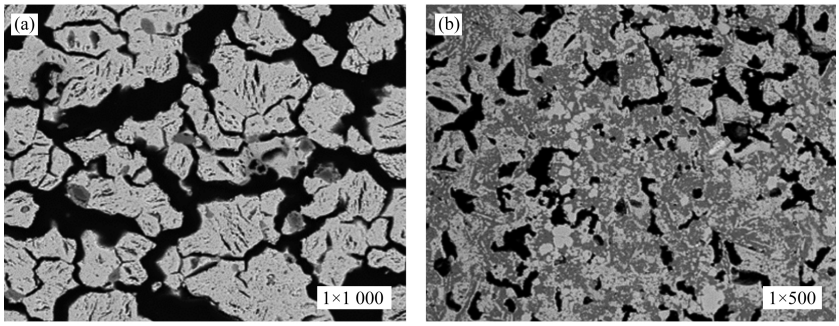
锰块矿焙烧后主要评价指标见表 6。由表 6 可以看出：焙烧后锰块矿 TMn 质量分数由 21.34% 升高至 32.32%，SiO_2、MgO、CaO、Al_2O_3 等质量分数均升高，碳脱除率为 98.94%，烧损率为 28.40%。



（a）预热 900 ℃，焙烧 1 100 ℃，棕褐色块矿；（b）预热 900 ℃，焙烧 1 100 ℃，黑色块矿

图 3 锰块矿焙烧后外貌形态

Fig. 3 Macroscopical morphology of manganese ore lump after roasting



（a）棕褐色块矿；（b）黑色块矿

图 4 锰块矿焙烧显微结构

Fig. 4 Microscope image of the manganese lump ore after roasting

表 6　锰块矿焙烧后的主要化学成分(质量分数)

Table 6　Chemical composition of roasted manganese ores　　%

TMn	TFe	SiO_2	MgO	CaO	Al_2O_3	Na_2O	K_2O	S	C	P	烧损
32.32	2.23	27.5	6.99	8.64	4.79	0.76	0.57	0.29	0.08	0.048	28.40

2　锰块矿带式焙烧工艺探讨

2.1　锰块矿带式焙烧工艺设计

国内带式焙烧机工艺经过十几年的发展，逐渐成熟，本文结合锰块矿工艺试验研究结果，考虑国家环保政策，设计锰块矿带式焙烧工艺，创新设计风流系统，其系统流程见图 5。

图 5 中，冷却鼓风机吸入环境冷空气，对焙烧后锰块矿进行冷却，冷却Ⅰ段热风通过大烟罩直接进入焙烧段和预热段助燃使用；冷却Ⅱ段热风因 O_2 含量较高，通过循环风机引流到预热前端烧嘴区域，稀释大烟罩内 CO_2 浓度，提高大烟罩内 O_2 含量，保证烧嘴系统正常运行。

预热段尾段、焙烧段、均热段是锰块矿焙烧过程中的主要反应区域，会产生大量 CO_2，系统中 O_2、CO_2 和 N_2 的体积比约为 1∶5∶13，按此估算，回热风机的额定风量设计值应比常规球团用设计值大三分之一。因回热风机出口热风二氧化碳含量高，不能循环进入系统，故出口热风引流至鼓风干燥段作为干燥热源，干燥后废气经过除尘后排入大气。

锰块矿自由水和结晶水含量较低，带式焙烧机工艺干燥段只设置鼓风干燥段，采用回热风机出口热风作为热源，因热风中含有大量 CO_2，干燥完成后应及时除尘后排出，故鼓干排风机额定风量应提高一个规格。

2.2　锰块矿带式焙烧工艺难点分析

$MnCO_3$ 分解反应为可逆反应，因此锰块矿在焙烧过程中要控制好 $MnCO_3$ 分解压、分解温度和 CO_2 分压，将产生 CO_2 及时排出。$MnCO_3$ 分解反应进行时，要控制好系统 O_2 含量，O_2 含量高，MnO 会氧化成熔点较高、Mn 含量较低的 MnO_2 和 Mn_3O_4。

锰块矿焙烧要控制好温度梯度，预热温度要 >450 ℃，焙烧温度要 ≤1 130 ℃，均热温度要 >924.5 ℃，均热时间 ≥6 min，这是得到 Mn 含量高、粉化率低等优质焙烧锰块矿的重要条件。

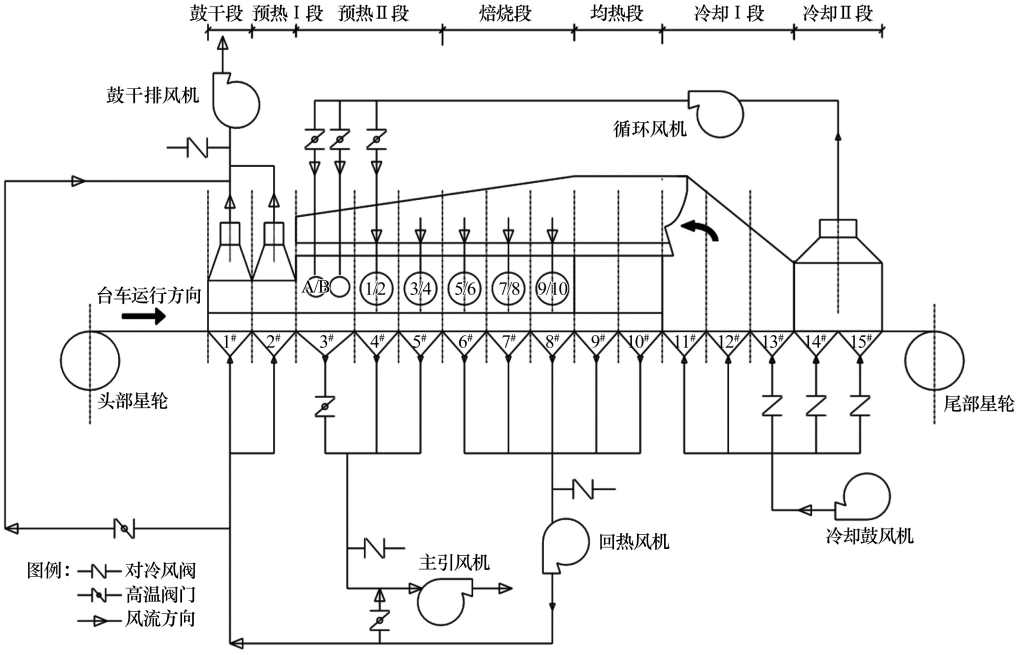


图 5　锰块矿带式焙烧工艺系统

Fig. 5　Technological system of grate roaster for manganese lump ore roasting manganese block ore belt roasting process system

锰块矿在焙烧过程中结晶水和大量 CO_2 溢出，容易爆裂，甚至产生粉末，因此原料锰块矿粒度不宜太小，一般在 15 ~ 40 mm 为宜，同时风系统要加强除尘。

锰块矿焙烧过程中 $MnCO_3$ 分解产生大量 CO_2，对烧嘴系统燃烧不利，因此，锰块矿带式焙烧工艺要通过风流设计为烧嘴区域环境提供足够氧，保证烧嘴系统正常运行。

3 结 论

（1）获得优质焙烧锰块矿的重要条件是合适的焙烧温度和足够的预热反应时间；锰块矿在焙烧过程中要控制好 $MnCO_3$ 分解压、分解温度和 CO_2 分压。

（2）锰块矿工艺试验研究表明：锰块矿最佳的焙烧工艺制度：锰块矿粒度为 15 ~ 40 mm、干燥温度为 400 ~ 450 ℃、干燥时间为 2 ~ 3 min、预热Ⅰ段温度为 550 ℃、时间为 3.0 min、预热Ⅱ段温度为 900 ℃、时间为 10 min、焙烧温度为 1 100 ℃，焙烧时间为 10 min，均热时间 6 min。

（3）当温度为 1 100 ℃时，$V(O_2):V(CO_2)\approx 1:5$时，锰块矿中 $MnCO_3$ 的分解反应开始逆向进行。

（4）锰块矿带式焙烧设计工艺与常规球团带式焙烧不同，回热风机额定风量应比常规球团大三分之一，且回热风机出口热风 CO_2 含量较高，应及时排出。

（5）锰块矿带式焙烧工艺均热时间要足够，一般6 min 为宜，以促使产生的低熔点硅酸盐再结晶，减少锰块矿焙烧的粉化率。

参考文献：

[1] 张辉，宋达，王泽江，等. 菱锰矿开发利用及其制备硫酸锰工艺研究进展[J]. 盐科学与化工，2023，52(2)：13 - 16.
ZHANG Hui, SONG Da, WANG Zejiang, et al. The research process of the development and utilization of the rhodochrosite and the preparation of manganese sulfate [J]. Journal of Salt Science and Chemical Industry, 2023, 52(2): 13 - 16.

[2] 袁久柱，陈兆阳，周磊. 钢铁行业信息化建设现状及前景展望[J]. 河北冶金，2017(7)：81 - 86.
YUAN Jiuzhu, CHEN Zhaoyang, ZHOU Lei. Present situation and prospect of informatization const ruction in steel industry[J]. Hebei Metallurgy, 2017(7): 81 - 86.

[3] 王若枫，袁帅，刘应志，等. 全球锰矿资源现状及选矿技术进展[J]. 矿产保护与利用，2023(1)：14 - 23.
WANG Ruofeng, YUAN Shuai, LIU Yingzhi, et al. Current status of manganese ore resources in the world and progress in mineral processing technology[J]. Protection and Utilization of Mineral Resources, 2023 (1): 14 - 23.

[4] 任辉，刘敏，王自国，等. 我国锰矿资源及产业链安全保障问题研究[J]. 中国工程科学，2022，24(3)：20 - 28.
REN Hui, LIU Min, WANG Ziguo, et al. Security of manganese resources and industrial chain in China[J]. Engineering Science in China, 2022, 24(3): 20 - 28.

[5] 钟麟. 用带式焙烧机焙烧碳酸锰块矿[J]. 烧结球团，1985(3)：72 - 75.
ZHONG Lin. The manganese carbonate lump ore is roasted by belt roaster[J]. Sintering and Pelletizing, 1985(3): 72 - 75.

[6] 朴海善，杨勇，唐云，等. 低品位碳酸锰矿工艺矿物学研究[J]. 矿物学报，2023，43(2)：191 - 200.
PU Haishan, YANG Yong, TANG Yun, et al. Process mineralogy of the low-grade manganese carbonate ore[J]. 2023, 43(2): 191 - 200.

[7] 王成刚，朱军，韩景智，等. 碳酸锰热解过程的动力学[J]. 中国有色金属学报，2000(1)：113 - 116.
WANG Chenggang, ZHU Jun, HAN Jingzhi, et al. Kinetics of pyrolysis of manganese carbonate[J]. Chinese Journal of Non-ferrous Metal, 2000(1): 113 - 116.

[8] 张福明，张卫华，青格勒，等. 大型带式焙烧机球团技术装备设计与应用[J]. 烧结球团，2021，46(1)：66 - 74.
ZHANG Fuming, ZHANG Weihua, QING Gele, et al. Design and application on pelletizing technologies and equipments in largescale belt type roasting machine[J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(1): 66 - 74.

[9] 柏森，薛金柱，王洪涛，等. 探讨锰矿焙烧工艺在锰硅合金生产中的应用[J]. 铁合金，2020(6)：1 - 4.
BO Sen, XUE Jinzhu, WANG Hongtao, et al. Discussion on the application of manganese ore roasting process in the production of ferromanganese-silicon[J]. Ferro-Alloys, 2020(6): 1 - 4.

（下转第 96 页）

WANG Jiechao. Investigation on preparing oxidized pellet with converter sludge [D]. Changsha: Central South University, 2009: 27 – 28.

[15] 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,1996:38;130 – 135.
FU Juyin, JIANG Tao, ZHU Deqin. Sintering and Pelletizing[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1996: 38; 130 – 135.

[16] 姜涛,范晓慧,李光辉. 铁矿造块学[M]. 长沙:中南大学出版社,2016:205 – 226.
JIANG Tao, FAN Xiaohui, LI Guanghui. Iron ore blocking [M]. Changsha: Central South University Press, 2016: 205 – 226.

[17] 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/OL]. 钢铁,2024:1 – 16[2024 – 03 – 13]. https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn0449 – 749x.20230559.
WEN Baoliang, FAN Zihao, LI Jiaxin et al. Solidification behaviour and reduction characteristics of high silica ultrafine iron ore concentrates with fusible pellets[J/OL]. Steel, 2024: 1 – 16[2024 – 03 – 13].

[18] 李小明,王翀,邢相栋,等. 不锈钢酸洗污泥对铁矿粉烧结液相生成的影响[J]. 烧结球团,2018,43(5):12 – 19.
LI Xiaoming, WANG Chong, XING Xiangdong, et al. Effect of stainless steel pickling sludge on sintered liquid phase generation of iron ore fines [J]. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(5): 12 – 19.

[19] 王永斌,彭军,罗果萍,等. MgO、F、碱金属对球团矿相组织的影响[J]. 钢铁,2022,57(4):34 – 42.
WANG Yongbin, PENG Jun, LUO Guoping, et al. Influence of MgO, F and alkali metals on the phase organisation of pellet ores [J]. Iron and Steel, 2022, 57(4): 34 – 42.

[20] 刘竹林,蒋友源. 炼铁原料:第2版[M]. 北京:化学工业出版社,2013:159 – 170.
LIU Zhulin, JIANG Youyuan. Raw materials for ironmaking: 2nd edition[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013: 159 – 170.

[21] 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 iron ore sintering pellets and blast furnace smelting[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2021, 33(10): 1095 – 1108.

[22] 王振阳,邢相栋,张建良,等. 氧化铝对球团矿抗压强度的影响及其机理分析[C]//中国金属学会. 第九届中国钢铁年会论文集. 北京:冶金工业出版社,2013:382 – 387.
WANG Zhenyang, XING Xiangdong, ZHANG Jianliang, et al. The effect of alumina on the compressive strength of pellet ores and its mechanism analysis [C]//China Society for Metals. Proceedings of the Ninth Annual Conference of China Iron and Steel. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013: 382 – 387.

[23] 唐珏,储满生,欧聪,等. 钛、钒、铬对氧化球团三维显微矿相结构的影响[C]//中国金属学会. 第十二届中国钢铁年会论文集——1. 炼铁与原料. 北京:冶金工业出版社,2019:475 – 479.
TANG Jue, CU Mansheng, OU Cong, et al. Influence of titanium, vanadium and chromium on the three-dimensional micro-mineral phase structure of oxidised pellets[C]//Chinese Society for Metals. Proceedings of the 12th China Iron and Steel Annual Conference-1. Ironmaking and Raw Materials. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2019: 475 – 479.

(上接第66页)

[10] 胡平,蒋赟. 软锰矿中频还原焙烧炉结构改进试验研究[J]. 管理及其他,2019(7):262 – 263;265.
HU Ping, JIANG Yun. Experimental study on structure improvement of pyrolusite medium frequency reduction roaster[J]. Management and Other, 2019(7): 262 – 263;265.

[11] 吕子虎,李成禄,赵登魁,等. 菱锰矿选冶技术研究现状[J]. 中国矿业,2023(7):105 – 111.
LÜ Zihu, LI Chenglu, ZHAO Dengkui, et al. Research status of dressing-metallurgy technology of rhodochrosite ore[J]. China Mining Magazine, 2023(7): 105 – 111.