

烧结破碎制度对烧结矿质量影响研究与应用

熊大林 焦光武

(首钢股份迁安钢铁公司炼铁作业部烧结)

摘 要 首钢矿业公司烧结厂通过烧结杯实验了解了烧结矿热破碎制度对烧结矿质量、烧结机过程参数的影响;通过烧结矿矿相分析从烧结理论上说明了热破碎制度下烧结矿实物质量变差的机理;通过机尾不同粒度烧结矿冷却过程仿真模拟,得出提高烧结矿热破碎粒度可以改善烧结矿实物质量。首钢矿业公司烧结厂将研究成果应用于实际,烧结矿实物质量指标得到改善。

关键词 热矿破碎 烧结矿物组成 冷却过程仿真模型 单辊改造

1 前 言

首钢矿业公司烧结厂有 6 台 110 m² 小烧结机(一烧车间)和 1 台 360 m² 烧结机(二烧车间),6 台小烧结机属于机上冷却工艺,360 m² 烧结机属于环冷工艺。360 m² 烧结机于 2008 年 5 月 31 日投产,投产后烧结矿的实物质量指标明显差于一烧,主要体现在一烧烧结矿平均粒径明显高于二烧(见表 1)。为了弄清楚一、二烧烧结矿实物质量存在差异的原因,通过对一、二烧工艺、料比、操作进行了系统的对比分析后认为烧结矿热破碎制度不相同是导致一、二烧烧结矿实物质量差别大的主要原因。2012 年开始首钢矿业公司烧结厂和首钢技术研究院就热破碎制度对烧结矿实物质量的影响进行了一系列实验室研究,取得了丰富的研究成果,首钢矿业公司烧结厂将研究成果应用到二烧实际生产中,烧结矿实物质量指标得到改善。

表 1 一、二烧返矿率、平均粒径对比

项目	返矿率/%	平均粒径/mm
一烧	13.281	27.751
二烧	15.913	18.661
对比	2.632	-9.09

注:本表为 2012 年数据对比。

2 热矿破碎对烧结矿质量影响研究

2.1 试验方案和试验方法

热矿破碎制度烧结杯实验研究配料比选取一烧当时料比,每个方案料比完全一样。基准方案为正常烧结,烧结终点温度后在烧结杯内抽风冷却,然后经单辊破碎,测试烧结矿各项性能指标。方案 1~方案 3 分别在烧结终点后,在烧结杯里面冷却一段时间后,倒出烧结矿,经单辊破碎后重新倒回烧结杯冷却至终点,考察热矿破碎对烧结矿质量的影响。具体见表 2。

表 2 试验方案

方案	破碎制度	冷却制度
基准	正常烧结	抽风冷却至终点
方案 1	8 min 后单辊破碎	倒入烧结杯抽风冷却至终点
方案 2	4 min 后单辊破碎	倒入烧结杯抽风冷却至终点
方案 3	达到烧结终点后单辊破碎	倒入烧结杯抽风冷却至终点

2.2 试验原料和配比

试验所用铁矿粉、熔剂和燃料均取自一烧车间,表 3 是试验原燃料的配比。混合料水分按 6.7% 控制,烧结矿二元碱度 2.0 ± 0.5 。

2.3 烧结杯试验结果

表 4、表 5、表 6 分别为混合料水分和粒度组成表、烧结杯试验结果表以及烧结矿粒度组成表。从表 4 混合料粒度组成和混合料水分可以看出,各方案混合料水分非常稳定,均控制在 $6.7 \pm 0.2\%$ 的水平,混合料粒度组成也相对稳定,保证了试验的稳定性和精确度。

表 3 试验料比 (%)

大粉	马粉	澳粉	巴卡粉	扬地粉	高返	灰石	镁灰石	白灰	煤
10.36	18.12	14.66	10.36	6.90	21.56	2.95	5.89	4.32	4.89

表 4 混合料粒度组成和混合料水分 (%)

实验编号	>7 mm	7~3 mm	<3 mm	混合料水分
基准	15.2	36.4	48.4	6.77
方案 1	11.4	32.0	56.7	6.71
方案 2	13.7	34.8	51.4	6.82
方案 3	10.4	38.6	51.0	6.74

表 5 烧结杯试验结果

实验编号	转鼓指数/%	成品率/%	利用系数/ $t \cdot m^2 \cdot h^{-1}$	垂烧速度/ $mm \cdot min^{-1}$	固体燃耗/ $kg \cdot t^{-1}$	返矿率/%	烧结终点温度/ $^{\circ}C$
基准	64.13	73.44	1.20	21.90	70.16	26.18	398
方案 1	65.07	72.31	1.02	18.49	70.23	26.72	383
方案 2	64.40	73.99	1.09	19.37	68.83	25.81	422
方案 3	63.60	72.76	1.02	18.31	69.77	27.54	398

表 6 烧结矿粒度组成

实验编号	粒级含量/%						平均粒径/mm
	>40 mm	40~25 mm	25~16 mm	16~10 mm	10~5 mm	<5 mm	
基准	4.5	22.6	19.6	18.2	14.1	21.0	17.46
方案 1	3.3	24.8	18.7	17.8	14.2	21.1	17.36
方案 2	3.8	21.2	19.9	19.5	15.1	20.5	16.95
方案 3	3.1	19.2	19.1	20.8	16.2	21.6	16.07

图 1 为基准方案、方案 1 至方案 3 四个方案的烧结抽风负压和烧结废气温度曲线，基准方案烧结矿在烧结杯中冷却至冷却终点倒出破碎，方案 1 和方案 2 烧结矿分别在烧结杯中冷却 8 min 和 4 min 后倒出破碎，方案 3 烧结矿在达到烧结终点后（离烧结终点约 12 min）直接倒

出烧结杯进行破碎。因此，方案 3 烧结杯底部热矿所占的比例最高，方案 2 和方案 1 次之，基准烧结矿冷却最充分，热矿比例也最低。

综上，基准方案至方案 3 热矿破碎所占比例由高到低次序为：方案 3 > 方案 2 > 方案 1 > 基准。

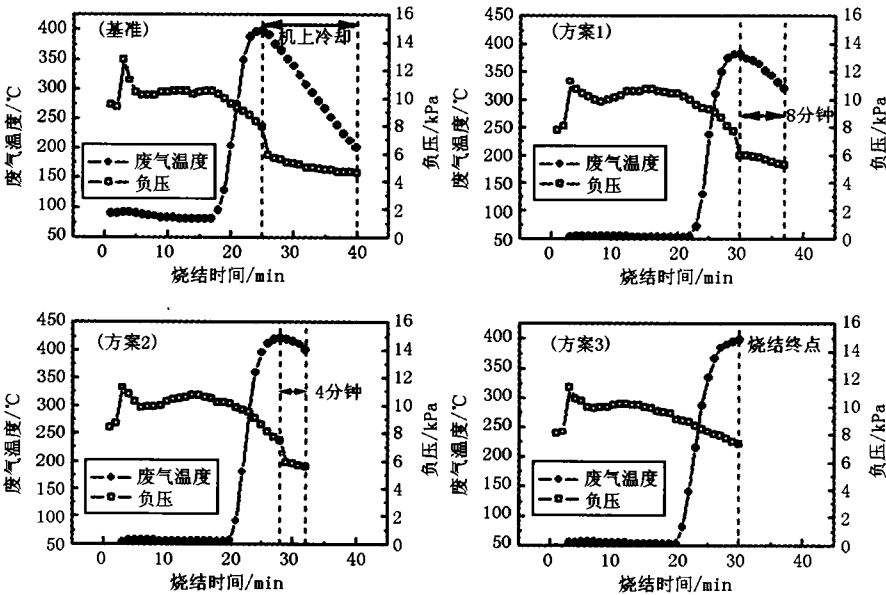


图 1 基准方案、方案 1 至方案 3 烧结抽风负压和烧结废气温度曲线

从表 4 烧结矿质量和烧结指标来看，热矿破碎对烧结矿转鼓强度、成品率等指标的影响无明显规律可循。

从表 5 烧结矿粒度组成来看，随着热矿比例的升高，烧结矿中 < 10 mm 粒级比例呈上升趋势，烧结矿平均粒径随之下降，如图 2 所示。对于基准方案，当达到烧结终点后烧结矿在烧结杯中继续抽风冷却，一方面受烧结料层透气阻力影响，冷却强度相对较小，另外冷却风自上而下冷却过程中被上方成品烧结矿不断加热，也降低了其冷却强度；另一方面整个烧结料层对于刚烧成的红矿也起到了保温作用，因此基准方案烧结矿的冷却速度较慢，可以保证烧结液相具有充足的时间缓慢冷却释放内应力，同时使液相中的各组分有序析出，长大结晶；而方案 1 ~ 方案 3 进入单辊的热烧结矿比例逐渐增加，烧结矿中有相当一部分红矿存在，甚至存在一定量的烧结液相，经过热矿破碎后的高温烧结矿完全暴露于环境空气中，冷却速度快，刚生成的液相经过急冷后其中的原子仍保持了原有的无序状态，内应力也没有得到释放，同时形成强度低，易碎的玻璃相组织。因此，随着机尾热矿比例的提高，烧结矿中小粒级比例增加，烧结矿平均粒径降低。

从以上试验结论可以推断，烧结矿在烧结机尾单辊破碎时由于红矿强度低和玻璃相含量升高产生更多粉末，导致烧结矿粒度降低是环冷工艺烧结矿粒度偏碎的主要原因之一。

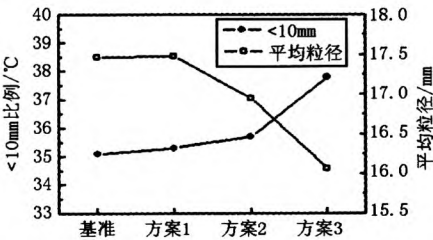


图 2 烧结矿 < 10 mm 比例和平均粒径的关系

2.4 烧结矿矿物组成和显微结构观察

对各方案烧结矿进行了矿相分析，结果见表 7。根据基准 ~ 方案 3 烧结矿矿物组成分析数据来看，随着热矿比例的提高，烧结矿中赤铁矿含量降低、磁铁矿含量相应升高，主要是由于热矿破碎过程中烧结矿急冷使得磁铁矿没有

足够的时间再氧化为再生磁铁矿，同时部分液相在急冷过程中无法释放内应力，导致玻璃相含量增加，如图 3 所示。玻璃相含量的上升将使得烧结矿易碎、产生更多的粉末，导致小粒级烧结矿比例上升，这一结论很好的验证了上述烧结杯试验的结果。

表 7 烧结矿矿物组成定量分析表 (%)

样品名称	赤铁矿	磁铁矿	铁酸钙	玻璃相	其它
基准	16.51	38.58	40.88	3.84	0.19
方案 1	14.70	44.14	37.22	3.95	0.00
方案 2	7.52	46.50	39.21	6.58	0.19
方案 3	3.51	50.00	39.43	7.05	0.00

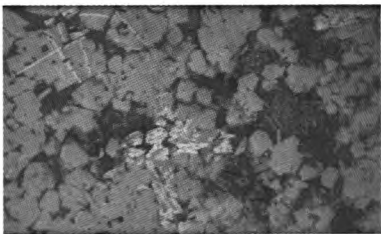


图 3 烧结矿矿相照片

注：图中深灰色部分为玻璃相，土黄色部分为磁铁矿，白色部分为赤铁矿。

3 机尾不同粒度烧结矿冷却过程仿真模拟

3.1 模拟情况描述

模型旨在了解单个烧结矿（1200 ℃）在初始环境温度为 400 ℃ 情况下温度的变化情况，烧结矿从单辊位置到环冷机入口时间约为 20 s，因此采用非稳态计算 20 s 的单个烧结矿温度变化情况。

3.2 模拟用模型

模拟了四种粒度的烧结矿，分别为 25 mm、40 mm、60 mm、和 120 mm。

3.2.1 主要初边界条件

表 8 是模拟采用的主要初边界条件。

表 8 模拟用主要初边界条件

项 目	数 值
烧结矿密度	3 t/m ³
烧结矿粒度	40 mm, 60 mm
烧结矿热传导系数	1 W/(m k)
烧结矿热熔	0.674 kJ/(kg K)
烧结矿温度	1 200 ℃
总时间	20 s

在模拟中考虑了烧结矿内部之间的导热、烧结矿与环境之间的传热以及辐射换热，其中辐射换热采用 P1 模型，其优点是不用输入过多的计算参数。

3.2.2 主要结果

(1) 25 mm

表 9 是粒度为 25 mm 时计算得到的不同时间烧结矿的最高温度、最低温度和平均温度值。

图 4 中 (a)、(b)、(c) 分别为烧结矿最

高温、最低温度和平均温度在每秒的温度值及降温速率。

表 9 烧结矿 (25 mm) 温度值随时间变化情况

时间/s	最高温度/℃	最低温度/℃	平均温度/℃
0	1 200	1 200	1 200
5	1 199.998 8	801.986 5	1 060.873 7
10	1 198.942 6	725.654 66	976.888
15	1 188.653 8	679.536 8	911.691 4
20	1 161.837 8	646.199 22	857.721 6

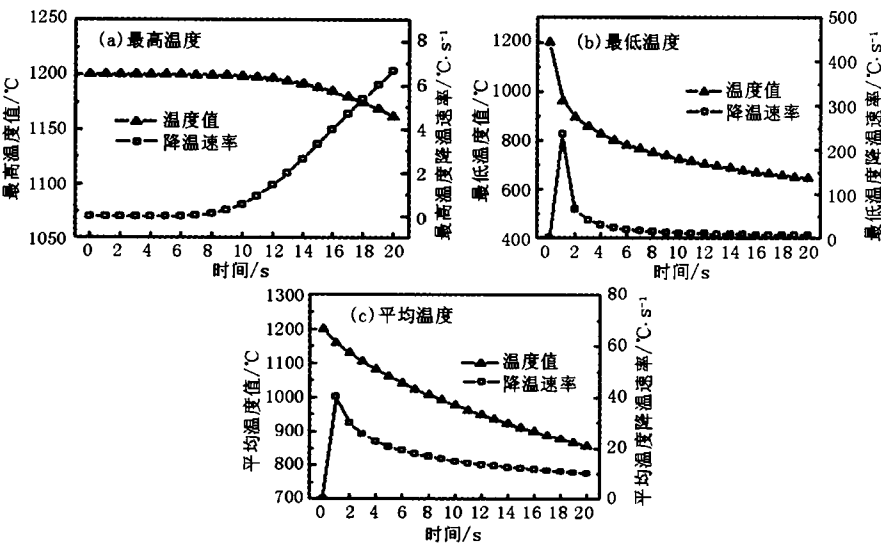


图 4 25 mm 烧结矿温度值及降温速率随时间变化曲线

(2) 40 mm

表 10 是粒度为 40 mm 时计算得到的不同时间烧结矿的最高温度、最低温度和平均温度值。

表 10 烧结矿 (40 mm) 温度值随时间变化情况

时间/s	最高温度/℃	最低温度/℃	平均温度/℃
0	1 200	1 200	1 200
5	1 200	813.763 9	1 111.457 7
10	1 200	743.354 9	1 055.989 8
15	1 199.992 8	701.721 74	1 011.615
20	1 199.842 9	672.178 22	973.798 4

图 5 中 (a)、(b)、(c) 分别为烧结矿最高温度、最低温度和平均温度在每秒的温度值及降温速率。

(3) 60 mm

表 11 是粒度为 60 mm 时计算得到的不同时间烧结矿的最高温度、最低温度和平均温度值。

图 6 中 (a)、(b)、(c) 分别为烧结矿最高温度、最低温度和平均温度在每秒的温度值

及降温速率。

表 11 烧结矿 (60 mm) 温度值随时间变化情况

时间/s	最高温度/℃	最低温度/℃	平均温度/℃
0	1 200	1 200	1 200
5	1 200	852.220 1	1 144.973
10	1 200	783.259	1 108.432 9
15	1 200	743.204	1 078.712 2
20	1 200	714.978 33	1 053.011

(4) 120 mm

表 12 是粒度为 120 mm 时计算得到的不同时间烧结矿的最高温度、最低温度和平均温度值。

表 12 烧结矿 (120 mm) 温度值随时间变化情况

时间/s	最高温度/℃	最低温度/℃	平均温度/℃
0	1 200	1 200	1 200
5	1 200	882.623 7	1 173.846 8
10	1 200	819.673 8	1 155.371 8
15	1 200	780.597 8	1 140.086 4
20	1 200	752.887 9	1 126.713 5

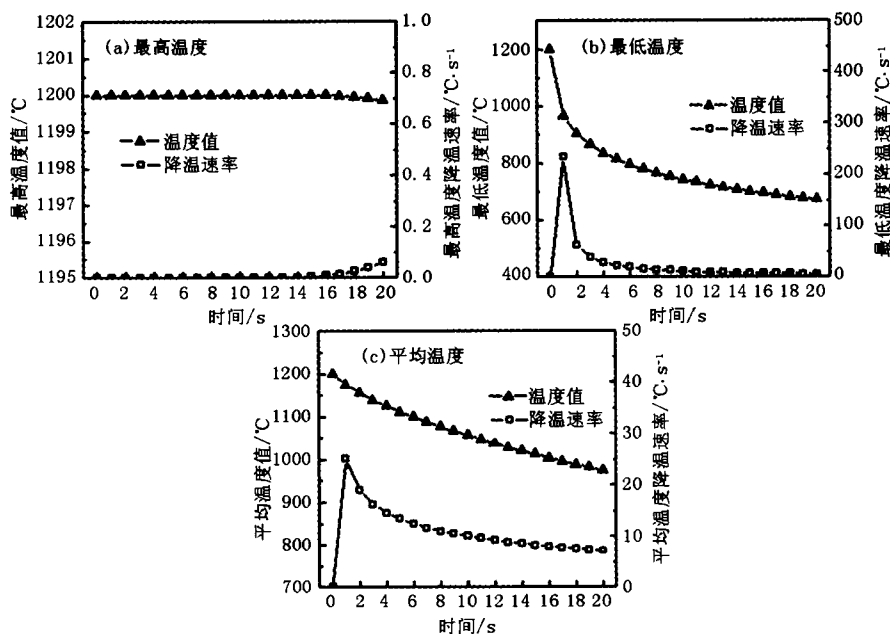


图5 40 mm 烧结矿温度值及降温速率随时间变化曲线

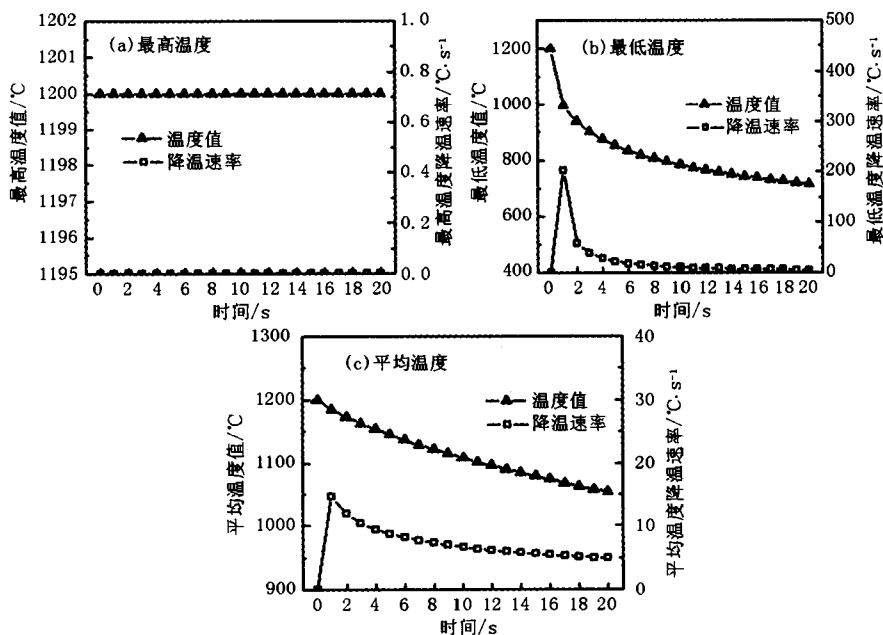


图6 60 mm 烧结矿温度值及降温速率随时间变化曲线

图7中(a)、(b)、(c)分别为烧结矿最高温度、最低温度和平均温度在每秒的温度值及降温速率。

3.2.3 分析与讨论

图8、图9和图10分别是烧结矿平均温度、最高温度、最低温度及其降温速率随时间的变化情况。

1) 烧结矿平均温度

各粒级烧结矿平均温度的降温速率均呈现先升高后降低的变化规律，而降温速率的绝对值相差较大，如图8所示。随着烧结矿粒级的增大，降温速率随之趋缓，25 mm 粒级烧结矿的最高降温速率超过了 $40\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ，而120 mm 粒级烧结矿平均温度的最高降温速率为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 左

右,二者相差达8倍。

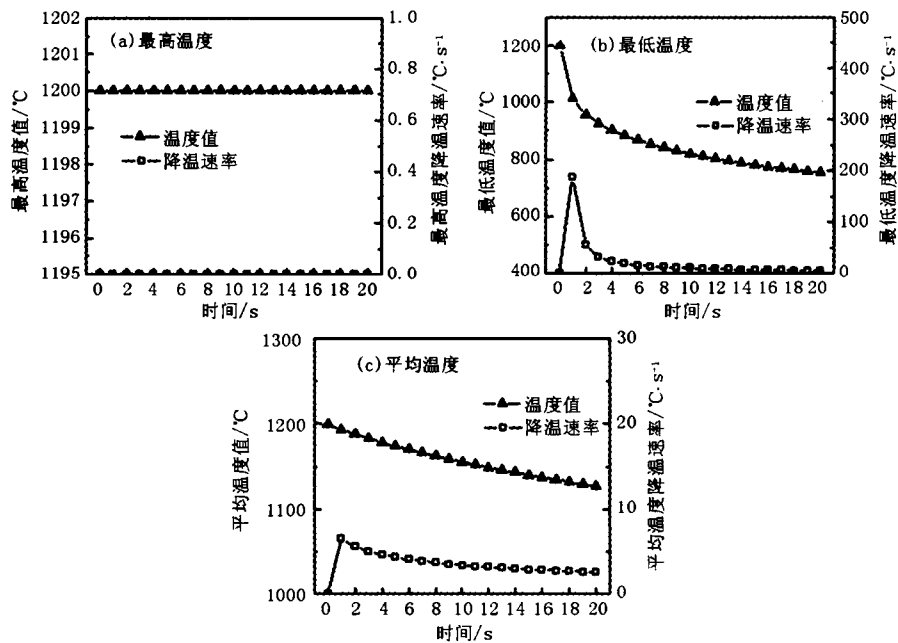


图7 120 mm 烧结矿温度值及降温速率随时间变化曲线

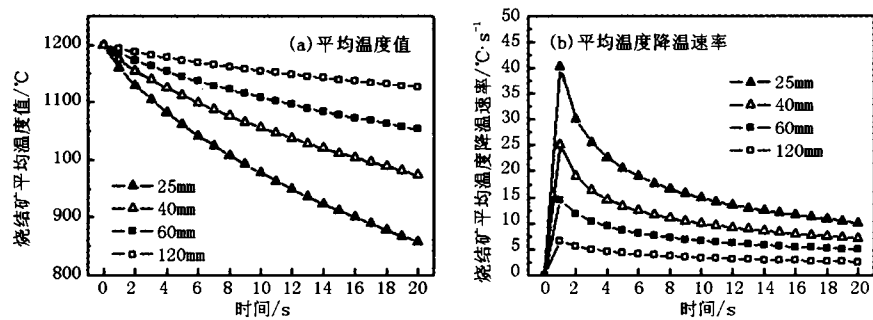


图8 烧结矿平均温度 (a) 及降温速率 (b) 随时间的变化

2) 烧结矿最高温度

由图9可以看出,除25 mm 粒级烧结矿外,

其他粒级烧结矿中心最高点温度均保持不变。

25 mm 粒级烧结矿中心温度小幅降低。

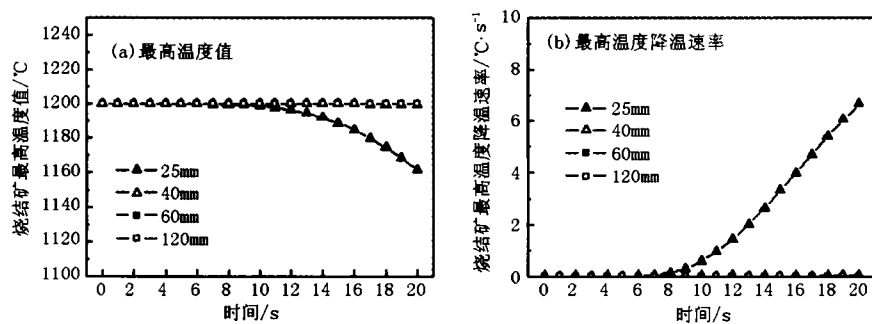


图9 烧结矿最高温度 (a) 及降温速率 (b) 随时间的变化

3) 烧结矿最低温度

由于边界条件一致, 烧结矿最外层最低温

度的降温速率基本一致, 如图 10 所示。

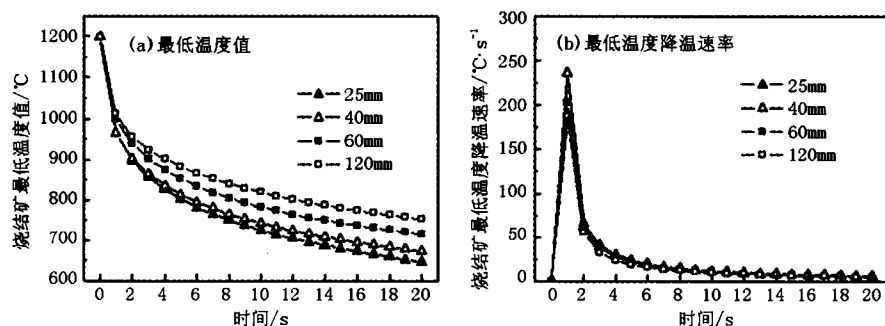


图 10 烧结矿最低温度 (a) 及降温速率 (b) 随时间的变化

根据模拟结果, 增大机尾热矿的破碎粒度可大幅度减缓机尾红矿的冷却速度, 释放烧结内应力, 改善烧结矿粒度组成。

4 工业应用

根据实验结论可知烧结机尾热矿破碎是造成烧结矿粒度偏碎的主要原因之一, 如能延长烧结矿在机上的冷却时间即可大幅度减少机尾热矿比例, 改善烧结矿质量, 但会影响烧结机利用系数和烧结产能, 因此该方案不可行。根据仿真计算结果, 扩大机尾单辊齿距, 增大破碎粒度是减少热矿破碎对烧结矿质量影响的另

一有效措施。

2012 年 7 月, 利用 360 m² 烧结机大修实施烧结机尾单辊改造: 单辊锤头由每排 16 个减少到 15 个, 篦板由 17 根减少为 16 根, 篦板间隙由原来的 150 mm 调整到 170 ± 5 mm。另外, 开发了烧结机尾缓冲料槽, 减少机尾烧结矿落下减粒, 目前该装置已申请使用新型专利。

由表 13 中数据可以看出, 单辊以及机尾缓冲料槽改造后烧结矿粒度组成改善, 表现为烧结矿中 <5 mm 粒级减少 0.13%, 烧结矿平均粒径增加 0.6 mm。

表 13 烧结矿粒度组成 (停皮带人工取样)

日期	粒级/%						平均粒径/mm
	>40 mm	25 ~ 40 mm	16 ~ 20 mm	10 ~ 16 mm	5 ~ 10 mm	<5 mm	
6 月 14 日	4.37	20.54	21.08	27.25	21.44	5.32	17.94
6 月 14 日	4.50	19.22	22.52	25.78	22.61	5.38	17.73
改造前平均	4.44	19.88	21.80	26.52	22.03	5.35	17.84
7 月 14 日	6.05	19.85	19.85	26.83	22.08	5.33	18.33
7 月 15 日	5.35	18.51	21.35	26.21	23.33	5.26	17.82
7 月 16 日	6.47	21.77	25.65	18.02	22.50	5.60	19.10
7 月 17 日	5.38	21.33	21.18	25.36	22.08	4.67	18.50
改造后平均	5.81	20.37	22.01	24.11	22.50	5.22	18.44

5 结 语

1) 根据试验结论可以推断, 环冷工艺烧结矿粒度偏碎的主要原因是烧结矿在烧结机尾单辊破碎时由于红矿强度低和玻璃相含量升高产生更多粉末, 导致烧结矿粒度降低。

2) 随着热矿破碎比例的升高, 烧结矿中玻璃相含量增加, 导致烧结矿中 <10 mm 粒级比

例呈上升趋势, 烧结矿平均粒径随之降低; 因此, 调整烧结机尾热矿破碎制度, 可以减少热矿破碎对烧结矿粒度的影响。

3) 首钢矿业公司烧结厂单辊、机尾缓冲料槽改造后烧结矿粒度组成改善, 表现为烧结矿中 <5 mm 粒级减少了约 0.13%, 烧结矿平均粒径增加约 0.6 mm。