

高炉高温试验研究进展

陈冠军¹ 张建良² 马金芳³ 贾军民³ 陈彬彬² 王尉平³

(1. 首钢技术研究院钢铁研究所, 北京 100043; 2. 北京科技大学冶金与生态学院, 北京 100083;

3. 迁钢公司, 河北 迁安 064404)

摘 要 结合钢铁工业节能减排形势, 说明高温的节能作用在近年炼铁生产中的重要性; 通过我国风温与国际先进风温的差距的现状, 说明首钢开展高温试验研究的重要意义。迁钢2号高炉历经2年的高温试验情况表明, 2009年连续4月均风温突破1270℃, 实现年均风温1258.7℃, 达到了高炉生产降低焦比和提高煤比等目标。通过高温试验前、2008年和2009年试验数据, 采用对比分析法总结分析了迁钢2号高炉2009年实现1280℃高温下的热风炉、高炉等操作技术, 研究了助燃空气温度、煤气预热温度、煤气热值、煤气流量和燃烧送风时间等参数对高温的影响, 提出高温随其影响参数的变化规律, 为国内外高炉高温研究提供参考。

关键词 高炉 热风炉 高温 操作

在近年“循环经济、低碳经济、清洁生产和绿色钢铁”等主题的倡导下, 中国钢铁工业的“节能减排”工作取得很大进展^[1], 如钢铁综合能耗从1999年的吨钢1240kg标煤下降到2009年的619kg标煤^[2], 2009年淘汰的落后炼钢、炼铁产能分别达1691万t和2113万t。但是, 中国钢铁工业保持了十年的正增长, 粗钢产量从1999年的1.24亿t到2009年5.68亿t^[3], 钢铁工业总能耗成上升趋势, 同时中国钢铁产能超7.5亿t, 过剩问题严重。由于炼铁工序占钢铁工业总能耗的50%~70%, 故高炉节能是钢铁工业节能的重点^[4]。高炉高温具有降低焦比、降低燃料比和降低生产成本等作用, 在近年炼铁生产中越来越受重视^[5]。近年中国重点钢铁企业的风温进步很快, 风温从1999年的1075℃提高到2009年的1158℃, 与国际先进水平风温1250℃和国际领先水平的风温1300℃比较, 尚有100~150℃的差距^[6]。

首钢高炉2007年的平均风温为1170℃, 风温较高的为近年新建投产的首秦、迁钢高炉, 其年平均风温在1200~1240℃, 为缩小与国际国内先进高炉风温水平的差距, 降低焦比和提高煤比等指标, 在首钢高炉实现1280℃以上风温, 给国内钢铁企业起示范作用, 首钢选择迁钢2号高炉(2650 m³)开展高温试验研究^[7], 并将研究成果应用于迁钢4000 m³高炉和京唐5500 m³高炉上。

1 高温试验情况

迁钢2号高炉2008年和2009年的月均风温对比如图1所示, 其中2008年10月和12月取得较大进展, 月均风温突破1250℃, 2009年在2008年试验基础上, 月均风温突破1250℃的月数越来越多, 达9个, 从2009年9月开始由于高温试验的进一步开展, 连续4月均风温突破1270℃, 其中9月和10月试验期的两月内日均风温1280℃以上风温为29天, 短时间的最高风温为1289℃, 日均最高风温为1283℃, 达到试验1280℃风温目标。迁钢2号高炉2008年和2009年风温和能耗指标对比如表1所示, 在2009年全国各高炉中风温排名第一, 处于国际先进水平, 其中2009年实现年均风温1258.7℃, 比上年提高风温18℃, 年均焦比

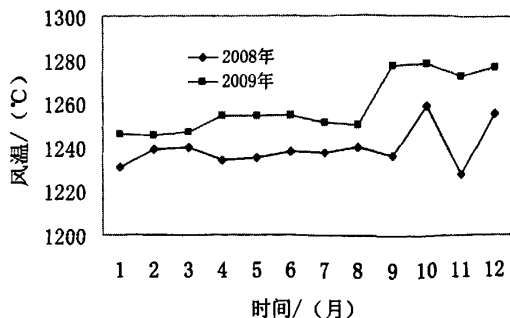


图1 迁钢2号高炉2008年和2009年的月均风温对比

实现 287kg/t，比上年降低 8kg/t，年均喷煤比实现 172kg/t，年均燃料比实现 486.8kg/t。

表 1 迁钢 2 号高炉 2008 年和 2009 年风温和能耗指标对比

时间/年	风温/℃	焦比/(kg·t ⁻¹)	煤比/(kg·t ⁻¹)	燃料比/(kg·t ⁻¹)
2008	1240.7	295	164	486.8
2009	1258.7	287	172	486.8

2 高温技术分析

首先，迁钢 2 号高炉配置 3 座霍戈文改造型高温内燃式热风炉和 2 座自主研发的新型顶燃式高温预热炉和 1 座混风炉，该技术采取的全烧高炉煤气高温空气燃烧预热技术，可以将煤气预热温度为 130~180℃，空气预热温度 1000~1100℃后与冷风混合为 520~600℃助燃空气，可以达到设计风温 1250℃^[8]。其次，高炉系统采用布袋干法除尘技术与传统的湿法除尘比较，可以减少煤气含水 5%，提高煤气温度 25~55℃，提高煤气热值 5%。上述技术为高温试验奠定了基础。

为实现高温风，重点采取无线表面温度和激光位移监测、改善原燃料条件、改进高炉和热风

炉操作等一系列高温技术措施^[7]，2009 年高温风温试验与 2008 年 10 月比较，尽管原燃料质量有所下滑，但是通过高炉、热风炉等操作，多项技术指标取得突破，特别是试验期间风温的提高和燃料比的降低。

2.1 热风炉、混风阀操作

2009 年实现 1280℃以上风温试验前后热风炉、混风操作参数对比如表 2 所示，拱顶温度从 1390℃提高到 1420℃，空气预热温度从 600℃提高到 660℃以上，燃烧期与送风期时间分别比试验前缩短 5~10min。与 2008 年比较，最高拱顶温度控制温度相同，燃烧期与送风期时间分别缩短 10~15min，最大混风阀开度由 30%降为 10%，且送风后期，混风阀全关。

表 2 试验前后热风炉、混风操作参数对比

风温/℃	最高拱顶温度/℃	空气预热温度/℃	燃烧期/min	送风期/min	混风阀开度/%
<1280	1390	600	105~110	65~70	10~30
≥1280	1420	>660	90~95	55~60	0~10

2.2 精料和高炉操作

2009 年与 2008 年比较，原燃料质量出现一定程度的下滑。为达到高炉“精料”要求^[9]，减少原燃料质量波动问题，2009 年高温试验期间，强化管理保证原燃料质量、特别是焦炭质量，提高了高炉透气性，保证了高温下高炉的顺行稳定的炉料条件。

通过调整装料、稳定送风和合理上下部调剂等手段强化高炉操作，在高温下采用喷煤和富氧等手段合理控制理论燃烧温度，提高高炉对高

风温的适应能力，从而减少未燃炭，改善了炉况顺行、提高了煤粉置换比并增加了产量。其中，提高富氧率到 3.8%，增加喷煤到 173kg/t，控制铁水含 [Si] 0.45% 以下，控制铁水温度范围为 1490~1520℃，物理热充沛。2009 年与 2008 年 10 月高温试验高炉部分生产指标对比如表 3 所示，与 2008 年试验比较，风温提高 20~21℃，燃料比下降 2~4kg/t，但是硫含量增加 0.03%~0.06%，渣比增加约 29 kg/t，生矿比、硅含量、铁水温度和富氧率均出现下降。

表 3 高炉热制度及部分生产指标对比

时间/年、月	铁水温度/℃	[S]/%	[Si]/%	渣比/(kg·t ⁻¹)	生矿比/%	富氧率/%	风温/℃	燃料比/(kg·t ⁻¹)
2008.10	1508	0.021	0.43	301	13.5	3.96	1257	493.9
2009.09	1507	0.027	0.41	330.7	12.1	3.58	1277.2	489.8
2009.10	1504	0.024	0.40	330.4	9.88	3.80	1278.1	491.4

3 高温风影响因素研究

实现高温风,热风炉提供的风温是高炉高温风的基础,为此,针对迁钢2号高炉配备的霍戈文热风炉的燃烧、换热过程应用能量守恒定律建立热平衡方程。

高炉煤气与助燃空气混合燃烧:

$$V_g Q_{dw} + Q_g + Q_a = Q_y + Q_{a1} \quad (1)$$

高温烟气与格子砖换热过程:

$$Q_y = Q_z + Q_{a2} \quad (2)$$

格子砖与冷风换热过程:

$$Q_z = Q_f + Q_{a3} \quad (3)$$

$$\text{故: } Q_y = V_g Q_{dw} + Q_g + Q_a - Q_{a1} \quad (4)$$

$$\text{由: } Q_y = C_y V_y T_y \quad (5)$$

高温烟气温度为:

$$T_y = \frac{V_g Q_{dw} + Q_g + Q_a - Q_{a1}}{C_y V_y} \quad (6)$$

忽略 Q_{a1} 即为理论燃烧温度计算式。

由式 (1), (2), (3) 得

$$Q_f = V_g Q_{dw} + Q_g + Q_a - Q_{a1} - Q_{a2} - Q_{a3} \quad (7)$$

$$\text{由: } Q_g = C_g V_g T_g \quad (8)$$

$$Q_a = C_a V_a T_a \quad (9)$$

$$Q_f = C_f V_f T_f \quad (10)$$

取 $k = V_a/V_g$, $Q_a = Q_{a1} + Q_{a2} + Q_{a3}$, 将 (8), (9),

(10) 代入式 (7) 得:

$$T_f = \frac{V_g (Q_{dw} + C_g T_g + k C_a T_a) - Q_{a1}}{C_f V_f} \quad (11)$$

式中 Q_{dw} ——高炉煤气的低发热值, $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$;

Q_g ——高炉煤气的物理热, kJ ;

Q_a ——助燃空气的物理热, kJ ;

Q_y ——高温烟气热焓, kJ ;

Q_{a1} ——燃烧热损失, kJ ;

Q_z ——格子砖蓄热量, kJ ;

Q_{a2} ——高温烟气与格子砖热交换的热损失 (包括排烟热损失), kJ ;

Q_f ——热风热焓, kJ ;

Q_{a3} ——格子砖与冷风热交换的热损失, kJ ;

C_y ——高温烟气热容, $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$;

V_y ——高温烟气体积, m^3 ;

T_y ——高温烟气温度, $^\circ\text{C}$;

C_g ——高炉煤气热容, $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$;

V_g ——高炉煤气体积, m^3 ;

T_g ——高炉煤气温度, $^\circ\text{C}$;

C_a ——助燃空气热容, $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$;

V_a ——助燃空气体积, m^3 ;

T_a ——助燃空气温度, $^\circ\text{C}$;

C_f ——热风热容, $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$;

V_f ——热风体积, m^3 ;

T_f ——热风温度, $^\circ\text{C}$;

k ——空燃比;

Q_{a1} ——热风炉的各项热损失, kJ 。

由式 (6) 和 (11) 可知, 提高高炉煤气热值、增加高炉煤气流量、空气预热温度和煤气预热温度和减少热损失 (包括排烟热损失) 等方法均可有效提高高温风。

预热炉燃烧换热计算与 (11) 相同, 针对助燃空气预热过程, 由于冷风和煤气温度为常温, 高炉煤气热值变化幅度较小, 故增加高炉煤气流量是提高助燃空气温度的主要因素, 也是热风炉预热系统提高高温风的基本原理。

3.1 助燃空气、煤气预热温度和煤气热值对热风炉风温的影响

在全烧高炉煤气情况下, 由于煤气热值较低, 其理论燃烧温度限制了热风炉风温, 故通过提高助燃空气、煤气预热温度均可有效提高理论燃烧温度和提高热风炉风温。同时, 高炉煤气热值的升高有助于提高高温风。2008 年高温风试验以来, 由于煤气预热温度最高为 200°C , 目前已达 $170 \sim 180^\circ\text{C}$, 预热潜力很小, 助燃空气预热温度试验前为 600°C (最高为 700°C), 尚有提高高温风潜力, 为此重点提高助燃空气预热温度。2009 年 9 ~ 10 月试验期间的助燃空气温度与风温关系如图 2 所示, 助燃空气温度从 668°C 提高至 683°C , 风温从 1280°C 提高到 1288°C , 提高高温风 8°C 。风温与煤气热值关系如图 3 所示, 与 2008 年 10 月高温风试验相比, 助燃空气温度约提高 15°C , 煤气热值约升高 160 kJ/m^3 (与试验前比较, 煤气热值依然下降)。

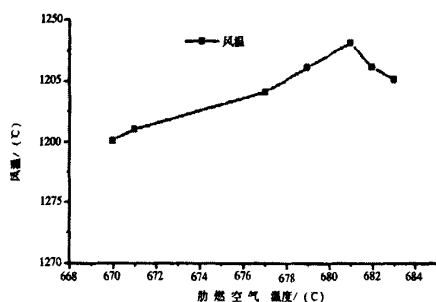


图2 助燃空气温度与风温关系

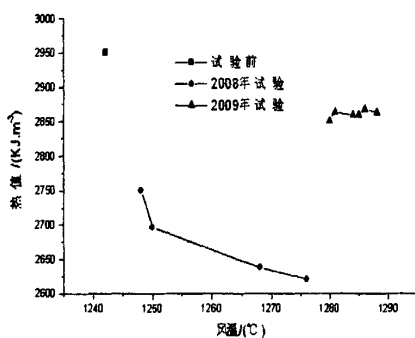


图3 风温与煤气热值关系

3.2 煤气流量对风温的影响

以日均风温与日均煤气流量数据为依据, 试验期间, 风温随煤气流量变化及其线性拟合曲线如图4所示。由图4可知, 煤气流量在风温提高的情况下呈上升趋势, 拟合计算表明, 风温约提高 18°C , 日均煤气流量约增加 $6\text{万 m}^3/\text{d}$ 。与2008年高温试验比较, 2009年试验由于煤气热值下降幅度减小, 故煤气流量增幅减小。

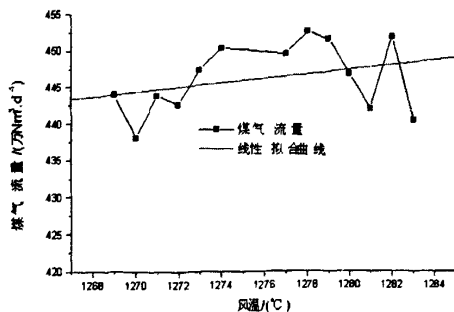


图4 风温随煤气流量变化及其线性拟合曲线

3.3 拱顶温度、烟道温度对风温的影响

以2009年高温试验期间9月27日的数据为基础, 时间为燃烧期和送风期交替, 热风炉烟道温度随时间变化如图5所示, 烟道温度最高控制为 400°C , 最低控制为 195°C ; 对应的拱顶温度和风温随时间变化如图6所示, 拱顶温度变化为 $1330\sim 1420^{\circ}\text{C}$, 风温为 1280°C 左右, 风温波动范围为 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。在热风炉燃烧期, 烟道温度由低逐步升高, 其拱顶温度也随着升高, 风温随之略有上升, 期间受换炉影响其拱顶温度和风温均出现上下波动, 其中拱顶温度波动幅度较大, 而到送风期, 烟道温度开始下滑, 对应其拱顶温度下降, 风温略有下滑。可见提高热风炉拱顶温度可以进一步提高风温, 为有效控制热风炉系统的超温和防止炉顶晶间应力腐蚀问题, 必须控制其最高拱顶温度。同时, 适当缩短燃烧时间与送风时间, 可以减少拱顶温度的波动幅度, 有助于阻止热风炉送风后期风温的下降, 从而减少风温波动范围, 达到稳定和提高风温的目标。可见, 进一步提高和稳定风温可采取适当缩短燃烧时间与送风时间的方法。与试验前比较, 热风炉最高拱顶温度提高 30°C , 燃烧与送风时间分别缩短 $10\sim 15\text{min}$ 。

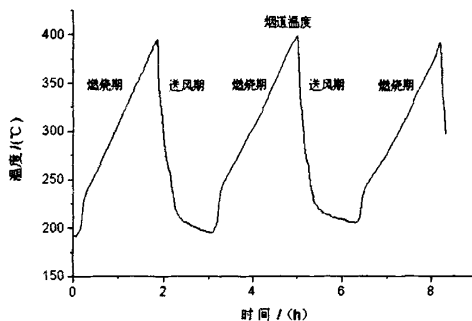


图5 烟道温度随时间变化

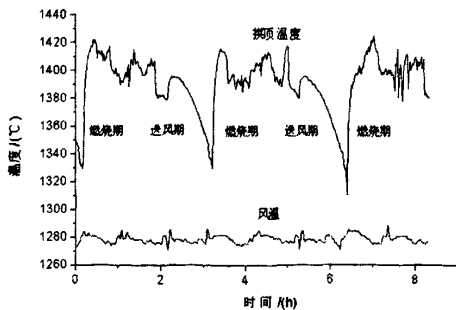


图6 拱顶温度和风温随时间变化

4 结论

1) 在钢铁工业节能减排形势下, 高风温的节能作用在近年炼铁生产中越来越受重视; 为缩小与国际国内先进高炉风温水平的差距, 首钢开展 1280℃ 以上高风温试验研究。

2) 高风温试验表明, 迁钢 2 号高炉 2009 年实现年均风温 1258.7℃, 年均焦比实现 287 kg/t, 多项指标处于国内领先水平。

3) 高风温技术分析表明, 全烧高炉煤气高温空气燃烧预热技术和干法除尘技术为高风温试验奠定基础, 2009 年克服原燃料质量下滑的问题, 在高风温技术措施的实施下, 通过热风炉、高炉等操作实现 1280℃ 以上高风温。

4) 高风温影响因素研究表明, 高风温受助燃空气温度、煤气预热温度、煤气热值和煤气流量等参数的影响, 同时, 适当缩短燃烧时间、送风时间和提高最高拱顶温度等措施有助于风温的稳定和提高。

参考文献

- [1] 徐匡迪. 低碳经济与钢铁工业 [J]. 钢铁, 2010, 45 (3): 1
- [2] 蔡九菊. 钢铁企业能耗分析与未来节能对策研究 [J]. 鞍钢技术, 2009 (2): 1
- [3] worldsteel association. 世界钢铁统计 [J]. worldsteel.org, 2009
- [4] 陈冠军. 迁钢 2 号高炉热风炉系统高风温技术研究 [J]. 炼铁, 2008 (6): 10
- [5] 王维兴. 高风温对高炉炼铁的重要作用 [J]. 金属世界, 2004 (6): 29
- [6] 王维兴. 2009 年中国炼铁技术评述. 中国钢铁企业网讯, 2010 (3)
- [7] 陈冠军, 竺维春, 胡雄光, 等. 迁钢 2 号高炉高风温研究 [J]. 钢铁, 2010, 45 (3): 92
- [8] 陈冠军. 迁钢霍戈文热风炉高风温试验 [J]. 冶金能源, 2009, 28 (5): 29
- [9] 孔令坛. 我国炼铁原料技术的进步和展望 [J]. 炼铁, 2002 (10): 20

作者简介: 陈冠军 硕士 高级工程师 现从事冶金热能科研工作。