

2000 °C 高温下的守护者——解析高炉风口小套的损坏机制与防护技术

The Guardian under 2000 °C: Damage Mechanisms and Protection Technologies of Blast Furnace Tuyere Stocks

供稿|孙力, 李昌国 / SUN Li, LI Changguo

内
容
导
读

高炉是长流程钢铁企业核心生产环节之一, 风口小套损坏导致高炉非正常休风, 会给企业带来直接的经济损失。方大达州钢铁 5 号高炉风口小套频繁损坏, 通过调节喷煤支管位置和采用定制加厚风口小套等措施均不能有效控制风口小套的损坏; 最终通过适当提高高炉铁水硅含量, 有效地减少了风口小套烧漏的数量, 从而查明风口小套损坏的主要原因是高炉铁水硅含量过低引起的烧漏。

高炉风口小套损坏类型主要分为 2 种: 一是磨漏, 二是烧漏。其中磨漏通常由煤粉引起^[1], 烧漏的影响因素则比较多, 原因较复杂, 是目前研究的重点和难点。方大达州钢铁 5 号高炉是一座容积为 1780 m³, 具有 24 个风口的双铁口高炉。2021 年 4 月高炉进行修理后, 风口小套频繁损坏导致高炉炉况长期失常; 2022 年高炉基本进入稳定顺行期, 但风口小套损坏的情况依然频繁出现, 高炉始终无法达到理想状态, 因更换风口小套导致高炉非正常休风给企业带来了巨大的经济损失^[2]。因此寻找高炉风口小套损坏原因, 避免风口小套损坏刻不容缓。本

文主要通过调节喷煤支管位置、采用定制加厚风口小套和提高高炉铁水硅含量等方案查明了方大达州钢铁 5 号高炉风口小套损坏的具体原因。

问题描述

2021 年 4 月方大达州钢铁 5 号高炉进行修理后, 因风口小套损坏未及时更换, 导致炉缸大量进水、冻结。在高炉恢复过程中, 风口小套频繁损坏, 高炉炉况反复失常。从表 1 统计数据可见, 2021 年 5—11 月风口小套损坏数量高达 39 个, 风口小套损坏导致高炉非正常休风共计 21 次。

表 1 2021 年 5—11 月风口小套损坏及休风情况

时间	小套损坏数量/个	休风次数
5月	4	3
6月	7	3
7月	3	1
8月	17	10
9月	3	1
10月	4	2
11月	1	1
合计	39	21

原因分析

煤粉磨漏

生产过程中发现,高炉风口喷煤支管位置不合理会将煤粉喷到风口小套前端,长时间可能会导致风口小套被磨漏。为排查方大达州钢铁 5 号高炉风口小套损坏原因,自 2022 年第 3 季度起,采取调节喷煤支管位置的措施,并进行实时跟踪。从表 2 可见,第 1—2 季度风口小套损坏数量共计 10 个,因更换损坏风口小套高炉非正常休风 4 次;第 3—4 季度数量增加,损坏风口小套数量达 23 个,因更换损坏风口小套高炉非正常休风 9 次。风口小套在喷煤支管位置调节后的损坏数量相对调节前非降反升,表明煤粉磨漏并非导致高炉风口小套损坏的主要原因。

表 2 2022 年高炉风口小套烧漏及高炉休风情况

时间	小套损坏数量/个	高炉休风次数
第1季度	3	1
第2季度	7	3
第3季度	8	3
第4季度	15	6
合计	33	13

小套壁厚

为排查风口小套冷却壁厚造成的烧漏情况,2023 年 3—6 月高炉开始采用定制的加厚风口小套替代普通风口小套。该期间,入炉原料稳定高炉稳定顺行,但是风口小套损坏仍旧频繁发生。从表 3 中可见,3—6 月风口小套烧漏数量达 15 个,高炉非正常休风 5 次。结果说明壁厚不是导致方大达州钢铁 5 号高炉风口小套损坏的主要原因。

表 3 2023 年 3—9 月风口小套损坏及高炉休风统计

时间	小套损坏数量/个	高炉休风次数
3月	6	2
4月	1	1
5月	3	0
6月	5	2
7月	0	0
8月	0	0
9月	1	0

从理论角度分析,高炉风口小套热传导过程遵循傅立叶导热公式^[3]

$$q = -\lambda A(dt/d\delta) \quad (1)$$

式中: q 是沿 δ 方向传递的热流密度(单位时间的导热热量); $-$ 表示热量传递方向与温度变化率方向相反; λ 为导热系数; A 为传热面积; t 为温度; δ 为在导热面上的坐标; $dt/d\delta$ 是物体沿 δ 方向的温度变化率(与温度差成正比,与长度成反比)。在 t_1 、 t_2 不变的情况下,导热物总厚度 δ 增加,位于温度区间 dt 的组成部分 $d\delta$ 厚度也会相应增加(图 1)。

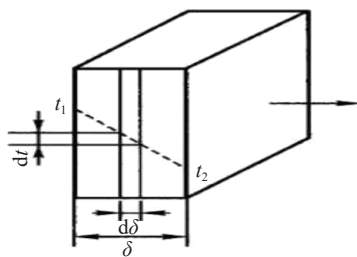


图 1 傅立叶导热定律情景^[3]

因此,在高炉炉缸温度和风口小套冷却水温度不变的情况下,当风口小套壁厚增加时,风口小套冷却壁热传递各环节的厚度均会相应增加,风口小套冷却壁处于高炉炉缸高温区域的厚度也会增加。理论分析同样证实在风口小套成份不变(即铜合金熔点^[4]固定)的情况下,增加风口小套壁厚并不能有效防止小套烧漏。

铁水硅含量

根据铁水黏度与硅含量的关系可知,铁水中硅含量越高,黏度越大^[5]。在实际生产过程中,为降低铁水黏度提高产量,高炉操作者习惯性地保证铁水物理热高于铁水流动性物理热^[6]的前提下降低高炉铁水硅含量。为了查明高炉铁水硅含量对风口小

套的影响,对高炉运行期间高炉铁水硅含量变化情况进行了调研。

➤ 风口小套烧漏案例分析

2023年3—6月,方大达州钢铁5号高炉稳定运行且入炉原料稳定,风口小套烧漏共计15个,随机抽取3个案例进行分析。

案例1:2023年3月17日00:00—08:00期间高炉铁水硅含量记录情况如表4所示。该时间段高炉铁水硅含量远低于该月平均铁水硅质量分数(0.097%),05:37高炉铁水硅质量分数低至0.022%。06:00煤气检测仪显示高炉煤气中氢气含量增加,疑似风口小套损坏,于11:50检测出24#风口小套损坏。

表4 2023-03-17不同时刻高炉铁水硅质量分数 %

00:21	01:46	02:27	03:48	05:37	06:17	07:06
0.054	0.079	0.056	0.077	0.022	0.059	0.174

案例2:2023年3月24日08:00—19:00高炉铁水硅含量记录情况如表5所示,该时间段高炉铁水硅含量低于该月平均铁水硅质量分数(0.097%),特别是在09:01、18:00时刻高炉铁水硅质量分数分别低至0.024%、0.028%。18:30高炉煤气检测仪显示高炉煤气中氢气含量增加,疑似风口小套损坏,于21:30检测出1#风口小套损坏。

表5 2023-03-24不同时刻高炉铁水硅质量分数 %

08:12	09:01	10:42	12:45	14:48	16:08	17:59	18:00
0.055	0.024	0.082	0.085	0.072	0.050	0.068	0.028

案例3:从表6可见,2023年5月11日23:10高炉铁水硅质量分数为0.045%;2023年5月12日00:06高炉铁水硅质量分数为0.024%,01:44高炉铁水硅质量分数为0.035%;这3个时刻的高炉铁水硅质量分数远低于5月平均高炉铁水硅质量分数(0.109%)。5月12日02:00煤气检测仪显示高炉煤气中氢气含量增加,疑似风口小套损坏,于03:20检测出1#风口小套损坏。

表6 2023年5月11—12日不同时刻高炉铁水硅质量分数 %

5月11日			5月12日		
21:26	21:44	23:10	00:06	01:44	02:56
0.115	0.070	0.045	0.024	0.035	0.176

上述案例分析表明,风口小套频繁损坏与高炉铁水硅含量关系密切,高炉铁水硅含量过低可能会引起风口小套烧漏。

➤ 提高铁水硅含量方案及实施效果

如表7所示,2023年7—8月高炉月平均铁水硅质量分数在0.122%~0.144%,相对3—6月平均高炉铁水硅质量分数(0.097%~0.112%)有所升高。从风口小套烧漏统计数据结果来看,3—6月风口小套烧漏数量共计15个,高炉休风5次;7—8月风口小套烧漏数量降至0,高炉休风0次(表3)。表明提高高炉铁水硅含量有效消除了风口小套烧漏。

表7 2023年3—9月平均高炉铁水硅质量分数统计 %

3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月
0.097	0.089	0.109	0.112	0.122	0.144	0.121

为验证高炉铁水硅含量对风口小套烧漏的影响,9月将高炉平均铁水硅质量分数再次降低(0.121%)。表8显示,2023年9月16日17:00—24:00高炉铁水硅质量分数均低于9月平均高炉铁水硅质量分数(0.121%),其中18:06、19:02和20:25的高炉铁水硅质量分数分别低至0.038%、0.034%和0.026%,21:00高炉煤气检测仪显示高炉煤气中氢气含量增加,疑似风口小套烧漏,于17日01:00确认1#风口小套烧漏。

表8 2023-09-16不同时刻高炉铁水硅质量分数 %

17:09	18:06	19:02	20:25	20:37	23:17	23:41
0.081	0.038	0.034	0.026	0.097	0.098	0.045

综上,高炉铁水硅含量过低会导致风口小套烧漏;适当提高操作铁水硅含量,避免高炉铁水硅含量过低可有效防止风口小套烧漏。

结束语

(1) 调节喷煤支管位置及增加风口小套冷却壁厚度均不能达到防止风口小套损坏的目的,说明煤粉磨漏以及风口小套壁厚均不是导致方大达州钢铁5号高炉风口小套损坏的主要原因。

(2) 风口小套频繁损坏与高炉铁水硅含量过低关系密切,适当提高铁水硅含量,防止高炉铁水硅含量过低可有效降低风口小套烧漏情况发生。由此

确认方大达州钢铁 5 号高炉风口小套是高炉铁水硅含量过低引起的烧漏。

参考文献

- [1] 徐振庭, 郭超. 兴澄特钢 3200 m³ 高炉减少风口磨损的措施. 中国冶金, 2017, 27(12): 40
- [2] 丁洪海, 周洋. 本钢 7 号高炉炉况强化实践. 金属世界, 2023(4): 62
- [3] 周俐. 冶金传输原理. 北京: 化学工业出版社, 2009
- [4] 陈敏, 于景坤, 王楠. 耐火材料与燃料燃烧. 沈阳: 东北大学出版社, 2005
- [5] 沈峰满. 冶金物理化学. 北京: 高等教育出版社, 2017
- [6] 周传典. 高炉炼铁生产技术手册. 北京: 冶金工业出版社, 2002

作者简介: 孙力 (1988—), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向为钢铁企业生产协调和高炉冶炼。通信地址: 四川省达州市通川区西河路山水美地; E-mail: 806646855@qq.com。