

高炉开炉初期悬料与风量 调控关系探析

Exploration of the Relationship between Hanging and Blast Airflow during Early Blast Furnace Startup

供稿|唐漪¹, 孙力² / TANG Shi¹, SUN Li²

内 容 导 读

本文通过随机案例证明高炉开炉初期发生悬料的普遍性,结合基础理论和前人研究,分析出高炉开炉初期悬料的主要原因为粘黏层过厚和粘黏层横切面过大,分别对应燃烧带温度过低和矿石布料跨度过大。通过2座不同高炉、2座相同高炉的开炉实践,验证了相应措施的适用性和可靠性——开炉初期应尽量减少布料跨度,并维持风量于高炉当时所能承受的上限,以降低悬料概率。此外,理论分析了开炉初期悬料和正常生产悬料的差异,再通过多个案例证明:高炉开炉初期减风处理悬料后,应尽快将风量恢复至上限,以防止重复悬料。

高炉开炉实践发现开炉点火至喷煤期间(本文简称开炉初期)均出现不同程度的需减风处理的悬料现象^[1]。结合文献调研,发现高炉开炉初期发生悬料问题具有一定普遍性,但由于单纯基于技术工艺的经验总结对一座高炉适用,对另一座高炉未必适用,因此目前该领域系统性的研究较少。目前关于悬料的相关权威研究,仅存在一个推论:东北工学院于1954年公布的高炉内熔融状态二氧化硅(SiO_2)会将炉料粘在一起,并可能粘附在炉墙上,从而造成悬料^[2]。本文为提升研究严谨性,通过控制变量法对开炉初期的加湿、风温、布料均仅作简要分析,主要聚焦于探索开炉初期悬料与风量之间的关系,从而减少变量保证研究结果的可靠性和适用性。

高炉开炉初期悬料的普遍性

以下随机选择2座高炉的开炉案例,以说明高炉开炉初期出现悬料的普遍性。

某 2000 m³ 高炉开炉案例

某 2000 m³ 高炉于 2016 年 3 月 1 日 21:16 堵 7 个风口(共 27 个风口)点火开炉。开炉前装入原料,由下往上逐步由焦炭过渡至 $\text{C}_8^{25^\circ} \text{O}_8^{20^\circ} \text{O}_{10}^{23^\circ}$ (注:C—焦炭,O—矿石;上标代表原料从高炉料罐放入高炉炉内时布料溜槽与竖直方向所成角度;下标代表原料从高炉料罐放入高炉炉内时布料溜槽与竖直方向所成角度对应的旋转圈数)最终过渡至 $\text{C}_2^{47^\circ} \text{O}_3^{45^\circ} \text{C}_3^{42.5^\circ} \text{O}_2^{37^\circ} \text{C}_3^{30^\circ} \text{O}_4^{47^\circ} \text{C}_3^{45^\circ} \text{O}_3^{42.5^\circ} \text{C}_2^{40^\circ} \text{O}_1^{37^\circ}$;开炉约 2 h 后,出现连续悬料现象^[3]。如图 1 所示为该高炉开

作者单位:1. 成都博物馆,四川 成都 611700;2. 达州钢铁集团有限责任公司,四川 达州 635735

炉 120 h 内的风量变化,其中风量取值为对应小时风量最大值。通过图 1 可知:高炉虽然连续悬料,但每次减风处理后,风量迅速回风到高炉当时承受上限。高炉于 3 月 2 日 14:15 送煤气,3 月 3 日 1:58 第一次开铁口,3 月 9 日 14:20 全开风口。通过矿石原料放入高炉内布料溜槽与竖直方向所成角度个数可知,开炉前矿石布料跨度大(正常 2000 m³ 高炉开炉初始矿石布料个数为 2~3),是导致开炉初期连续悬料的主要原因。

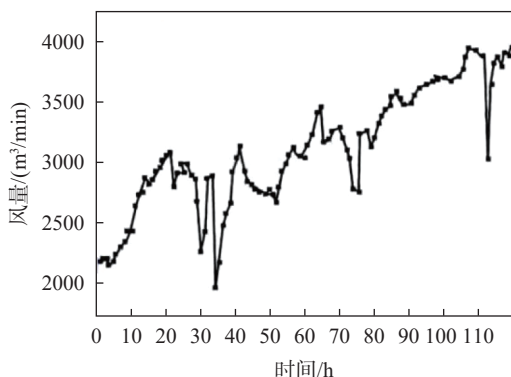


图 1 某 2000 m³ 高炉开炉 120 h 风量^[4]

南方某 2500 m³ 高炉开炉案例

南方某 2500 m³ 高炉于 2023 年 1 月 8 日 18:06 堵 12 个风口(共 30 个风口)点火开炉。开炉 1 h 后将风量加到 2850 m³/min 并保持稳定,开炉 6 h 准备送煤气时,因煤气系统设备故障而进行减风处理,开炉 8 h 13 min 送煤气,11 h 第一次出铁,36 h 4 min 开始喷煤。如图 2 所示为该高炉开炉 50 h 相关参数,通过图 2 可知:在开炉 17、20 h 各减风处理悬料一次。该高炉开炉过程表明:开炉初期风量应尽量保持在高炉当时承受上限。

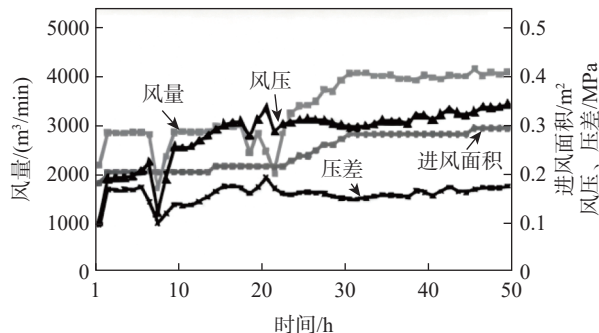


图 2 南方某 2500 m³ 高炉开炉 50 h 相关参数^[5]

粘黏层过厚导致悬料

高炉开炉点火后,炉内为高温高压密闭环境,因此难以直接证明开炉初期悬料是由熔融状态 SiO₂ 引起。但考虑到固态原料本身不具备粘附能力,且液态铁水和熔渣也难以有效粘附原料,所以推测高炉内部原料从炉顶料面到铁、渣完全形成过程中,存在某种起粘附作用的物质。下文将此类物质所在的区域称为“粘黏层”。

粘黏层厚度计算公式

根据傅立叶导热公式^[6],推导出高炉内粘黏层厚度计算公式为:

$$h = H \cdot \frac{t_1 - t_2}{t_{th} - t_r} \quad (1)$$

式中: h 为高炉内粘黏层厚度, m; H 为高炉风口中心线到炉顶料面厚度, m; t_{th} 为高炉风口回旋区理论燃烧温度(下文简称高炉内燃烧带温度), °C; t_r 为高炉炉顶煤气温度, °C; t_1 为炉内粘黏层消失温度, °C; t_2 为炉内粘黏层形成温度, °C。

当高炉与原料确定时,式(1)中 H 、 t_2 、 t_1 均可视为确定值。同时,正常情况下炉顶煤气温度 t_r 的波动主要受高炉内燃烧带温度 t_{th} 影响,所以高炉内粘黏层厚度主要取决于高炉内燃烧带温度。

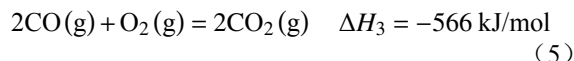
高炉正常生产时悬料

宝钢某高炉正常生产时高炉内燃烧带温度计算公式为^[7]:

$$t_{th} = 1559 + 0.839t_3 + 4.972W_y - 6.033W_s - 3.150W_m \quad (2)$$

式中: t_3 为热风温度, °C; W_y 为富氧量, m³/min; W_s 为鼓风湿分, g/m³; W_m 为每小时喷吹燃料量, kg/h。

高炉开炉初期,热风与高炉内燃料的化学反应为^[8]:



由于本文研究重点为高炉开炉初期悬料,所以仅对高炉正常生产时的悬料机理作简要分析。

热悬料机理：喷煤量超过当前炉况消耗能力时，炉内主要发生反应(4)。结合式(1)~(2)可知：此时高炉内燃烧带温度降低、粘黏层厚度增加（表现为高炉透气性差，渣、铁物理热不特别高；但渣、铁从铁口排出后，碳平衡改变导致富碳铁渣与空气迅速发生反应(3)，炉前渣、铁物理热未见明显降低）。当粘黏层厚度增至临界值时，高炉发生热悬料。热悬料发生后，采取停氧（基于考虑安全以减缓反应速率）、停煤并观察的措施，热风进入高炉内主要发生反应(3)和(5)，此时铁水物理热迅速升高。

冷悬料机理：喷煤量低于当前炉况消耗能力时，炉内主要发生反应(3)。结合式(1)~(2)可知：此时高炉内燃烧带温度升高、粘黏层厚度变薄（表现为高炉透气性好，渣、铁物理热无明显降低）。此时，过量的热风导致焦炭过度消耗，引发滑料现象，致使未充分预热的原料进入高炉下部，进而导

致高炉内燃烧带温度下降、粘黏层厚度增加。当粘黏层厚度增至临界值时，高炉发生冷悬料。

综上，高炉正常生产期间出现悬料时，在未查明并消除悬料原因（如原料品质变差，渣碱度、渣镁铝比不合理，高炉内部冷却设备漏水严重，铁口直径不合理等）之前，不宜将风量提升至上限，否则易导致悬料反复发生。

高炉开炉初期燃烧带温度计算公式

如图3所示为北方某2500 m³高炉开炉前炉内装料情况，通过图3可知：高炉开炉初期，高炉内部主要为燃料。高炉开炉初期可分为送煤气前、送煤气后2个阶段：送煤气前，高炉内燃烧带温度只需确保高炉冷却设备逐步受热，从而保证耐火材料使用寿命；送煤气后，还需考虑高炉内燃烧带温度过高可能导致炉顶煤气温度超过报警设定值（通常为250~260℃）。

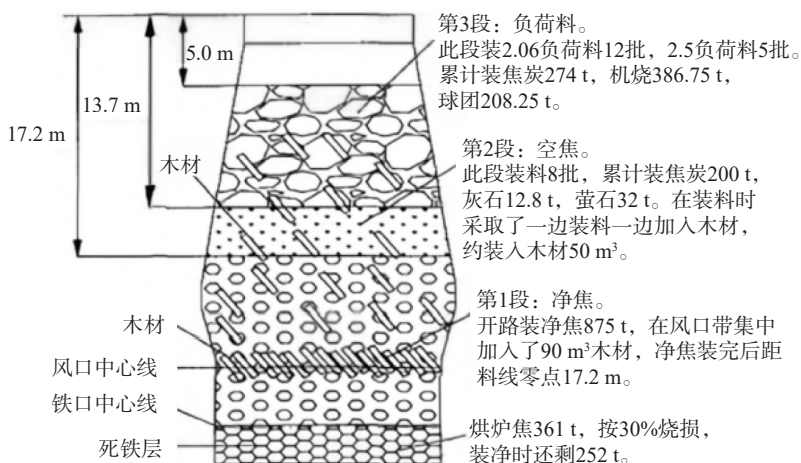


图3 北方某2500 m³高炉开炉前炉内装料情况^[9]

高炉开炉初期，高炉内部主要为燃料，此时热风相对燃料极少，推导出此时高炉内燃烧带温度计算公式为：

$$t_{th} = K + K_1 t_3 + K_2 W_f - K_3 W_s \quad (6)$$

式中： K 、 K_1 、 K_2 、 K_3 为常数， W_f 为风量，m³/min。

根据式(6)可知：高炉开炉初期，高炉内燃烧带温度、热风温度一定时，鼓风湿分增加，风量增加，开炉进度加快；高炉内燃烧带温度、鼓风湿分一定，热风温度越高，风量上限越低，热风温度过

低会导致反应速率减慢。因此，热风温度的选择需兼顾反应速率和风量上限。

综上，高炉开炉初期悬料的主要原因为粘黏层过厚，即对应高炉内燃烧带温度过低。

高炉开炉初期应对悬料的操作误区

某些高炉开炉初期出现悬料时，参考高炉正常生产时的处理方法，采取减风处理并在之后保持较低风量运行，待高炉情况好转后再逐步加风。根据式(1)和(6)可知：此时若长期维持低风量运行，会导致高炉内燃烧带温度下降，粘黏层厚度增厚，从

而增加高炉重复悬料的概率。以下选择2座高炉的开炉案例进行说明。

某1080 m³高炉于2023年3月11日18:18堵6个风口（共20个风口）点火开炉。开炉初期布料角度为C₃^{33°} 3₃^{30.5°} 2₂^{28°} 2₂^{25.5°} 2₂^{20°} O₃^{30°} 4₄^{28°} 3₃^{26°}，开炉后1 h 44 min引煤气，10 h第一次出铁，11 h开始喷煤，12.5 h富氧，2.5 d达产^[10]。如表1所示为该高炉开炉28 h相关参数，通过表1可知：11日22:00减风处理悬料后，高炉持续低风量运行；12日6:00风量逐步提升，高炉情况随之好转。

表1 某1080 m³高炉开炉28 h相关参数

时刻	风量/ (m ³ /min)	热风温度/ ℃	热风压力/ kPa	炉顶压力/ kPa
11日19:00	1082	794	122	3.8
11日20:00	1343	827	135	5.9
11日21:00	1339	930	167	50
11日22:00	692	756	150	40
11日23:00	731	758	148	42
12日00:00	918	734	168	47
12日02:00	719	754	102	32
12日06:00	1320	744	257	132
12日10:00	1740	1032	327	170
12日14:00	1850	1107	343	195
12日18:00	1790	1118	329	196
12日22:00	1840	1106	327	195

注：风量取值为对应小时风量最大值。

某3200 m³高炉于2019年3月26日18:36堵20个风口（共32个风口）点火开炉，27日10:15第一次出铁，10:40富氧。如图4所示为该高炉开炉29 h相关参数，通过图4可知：26日21:10减风处理悬料后，高炉持续低风量运行；26日22:40风量逐步提升，高炉情况随之好转。

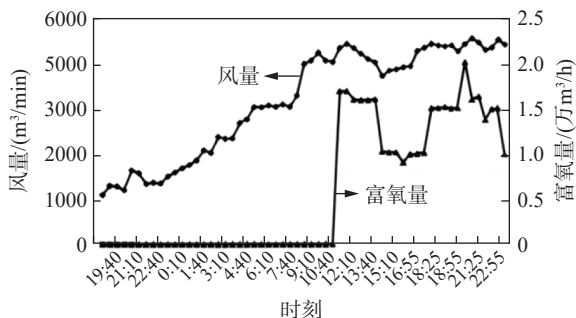


图4 某3200 m³高炉开炉29 h相关参数^[11]

综上，高炉开炉初期悬料与正常生产时的悬料存在差异。由于高炉开炉初期渣、铁产生量少且冷却设备为新产品，可以排除其他因素影响。因此，减风处理悬料后，应适时恢复风量，以避免高炉内燃烧带温度过低，从而防止重复悬料的发生。

高炉开炉初期降低悬料发生概率

基于2座不同高炉、2座相同高炉开炉初期的参数进行分析。

两座不同高炉开炉初期

国内某1080 m³高炉于2018年5月8日11:18采用风口全开、单环布料方式开炉。全开风口开炉优点是开炉快，缺点是送煤气后炉顶煤气温度可能超过报警设定值，此时如果通过其他手段无法控制顶温，只能减风以降顶温。减风会降低风速，若长时间风速过低，易导致开炉后中心气流未能充分打开，最终导致正常生产后，高炉产量和燃料比始终达不到理想状态。该炉开炉4 h 54 min送煤气，24 h开始喷煤。如图5所示为该炉开炉12 h相关参数，通过图5可知：开炉6 h左右出现减风处理悬料。

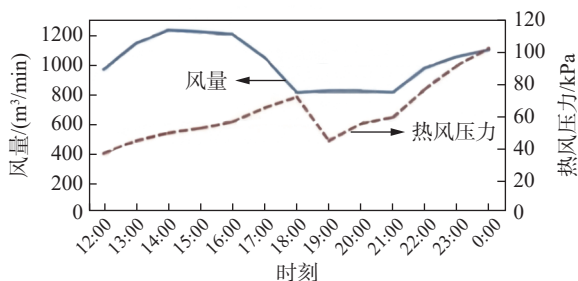


图5 某1080 m³高炉开炉12 h相关参数^[12]

该高炉开炉初期送煤气后，高炉内燃烧带温度过高导致炉顶煤气温度超标，当采取其他手段（如降低风温、热风加湿、炉喉开蒸汽、炉顶打水）后，炉顶煤气温度依然高于报警设定值，高炉只能减风以降低炉顶煤气温度，减风导致高炉内燃烧带温度下降，粘黏层厚度增加，高炉出现悬料。

该高炉开炉案例证明，开炉初期减风可能导致悬料，故风量应保持在高炉此时承受上限，从而降低悬料概率。

某2200 m³高炉于2023年1月15日00:08堵8个风口（共28个风口）点火开炉。开炉前炉内

装料布料情况由下往上逐步由 $C_8^{18.5^\circ \frac{13^\circ}{2}}$ 过渡到 $C_5^{26^\circ \frac{32.5^\circ}{2} \frac{20^\circ}{1} \frac{13^\circ}{4}} O_3^{23.5^\circ \frac{20^\circ}{2}}$ ，最终过渡到 $C_3^{40^\circ \frac{38^\circ}{3} \frac{35.5^\circ}{2} \frac{33^\circ}{4}} O_2^{40^\circ \frac{38^\circ}{3} \frac{35^\circ}{3} \frac{33^\circ}{2}}$ ；开炉后 6 h 25 min 送煤气，13 h 43 min 第一次开口，22 h 43 min 开始喷煤，65 h 30 min 全开风口，达到正常生产标准^[13]。如图 6 所示为该高炉开炉 24 h 风量，通过图 6 可知：在开炉 2 h 左右减风处理悬料一次。此次悬料主要原因是开炉前装矿石布料跨度过大。

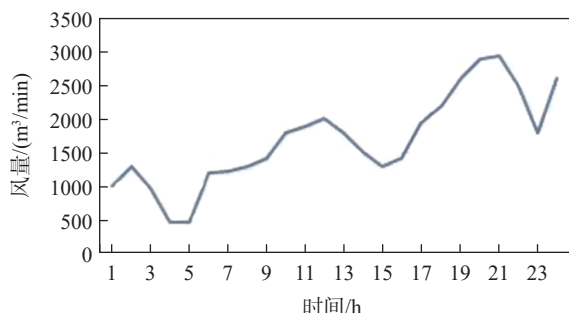


图 6 某 2200 m³ 高炉开炉 24 h 风量^[13]

两座相同高炉开炉初期

国内某钢铁厂 2 座高炉（简称 1#高炉、2#高炉）设计参数相同（均为 24 个风口），开炉前装入的矿石、燃料、辅料量均相同。1#高炉于 2023 年 12 月 15 日 16:16 点火开炉，2#高炉于 2023 年 12 月 27 日 16:16 点火开炉（均堵 6 个风口）。

1#高炉开炉 2 h 后频繁减风处理悬料，直到开炉 16 h，为保证煤气系统稳定，高炉不再频繁减风（新建钢铁厂运行的第一座高炉），除非出现顽固悬料（炉顶料面长时间无动作），否则不得减风；同时减风处理悬料后，尽快将风量恢复至高炉承受上限，高炉逐步好转。2#高炉开炉后尽量减少矿石布料跨度，同时开炉初期尽量保证风量维持在高炉承受上限附近。

如图 7 所示为 2 座高炉开炉 24 h 风量趋势图，通过图 7 可知：开炉初期 24 h 内，2#高炉风量基本高于 1#高炉。

表 2 所示为 2 座高炉开炉第一批料（即开炉前最后装入料）的布料参数，通过表 2 可知：2 座高炉焦炭布料一致，但 1#高炉矿石布料跨度明显大于 2#高炉。

开炉情况：1#高炉开炉 2~16 h 连续悬料，开炉 18 h 54 min 送煤气，39 h 22 min 喷煤，115 h 46 min

全开风口，达到正常生产标准；2#高炉开炉初期悬料 2 次，开炉 9 h 50 min 送煤气，32 h 喷煤，50 h 24 min 全开风口，达到正常生产标准。

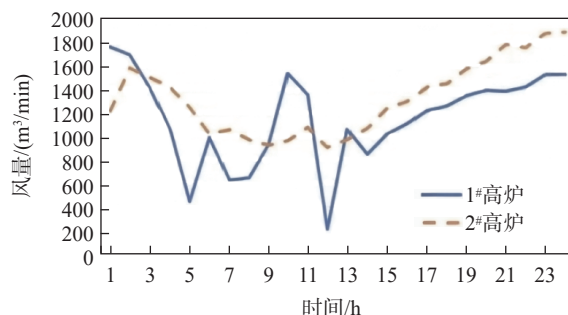


图 7 2 座高炉开炉 24 h 风量趋势图

表 2 2 座高炉开炉第一批料布料

1#高炉						2#高炉					
$C_3^{36^\circ}$	$C_3^{33^\circ}$	$C_3^{30^\circ}$	$C_3^{27^\circ}$	$O_3^{23^\circ}$	$O_3^{30^\circ}$	$C_3^{30^\circ}$	$C_3^{27^\circ}$	$C_3^{24^\circ}$	$C_3^{21^\circ}$	$C_3^{16^\circ}$	$O_3^{25^\circ}$
3	3	2	2	4	3	3	3	2	2	2	5

综上，高炉开炉前、开炉初期装矿石尽量减小布料跨度，高炉开炉初期尽量增大风量到当时承受上限，可有效降低开炉初期悬料。

结束语

高炉开炉初期悬料的主要原因为粘黏层过厚和粘黏层横切面过大，即对应燃烧带温度过低和矿石布料跨度过大。降低高炉开炉初期悬料概率的方法如下：（1）高炉开炉前、开炉初期装料尽量减小矿石布料跨度；（2）高炉开炉初期，风量尽量保持在高炉承受上限；（3）高炉开炉初期，减风处理悬料后，尽快将风量恢复到当时高炉承受上限，从而防止高炉重复悬料。

参考文献

- [1] 周传典, 刘万山, 王筱留, 等. 高炉炼铁生产技术手册. 北京: 冶金工业出版社, 2002
- [2] 东北工学院冶金系炼铁教研组. 高炉悬料的一个原因. 钢铁, 1955(6): 19
- [3] 陈俊. 宣钢 3# 2000 m³ 高炉中修开炉达产实践. 山东工业技术, 2016(20): 37
- [4] 韩涛, 王中华, 李兵. 宣钢 3# 高炉中修开炉达产实践. 河北冶金, 2016(8): 47
- [5] 张波, 李晓东, 李森, 等. 昆钢 1 号高炉快速开炉达产实践. 四川冶金, 2024, 46(4): 35

- [6] 周俐. 冶金传输原理. 北京: 化学工业出版社, 2009
- [7] 叶才彦. 理论燃烧温度与高炉燃料比. 炼铁, 1984, 3(1): 65
- [8] 沈峰满. 冶金物理化学. 北京: 高等教育出版社, 2017
- [9] 纪恒, 马登榜, 向守义. 承钢新3号高炉开炉达产实践. 炼铁, 2010, 29(3): 20
- [10] 任可飘, 刘燕军, 余雪峰, 等. 德龙2号高炉开炉经验. 炼铁, 2023, 42(1): 47
- [11] 强农厂, 李向伟. 武钢有限7号高炉开炉实践. 冶金与材料, 2023, 43(2): 29
- [12] 赵金龙, 朱晨睿. 安徽长江钢铁1080 m³高炉开炉快速达产实践. 安徽冶金科技职业学院学报, 2020, 30(4): 23

- [13] 彭建, 刘圣乾, 罗俊涛. 涟钢6号高炉中修停炉及开炉操作. 炼铁, 2024, 43(1): 39

作者简介: 唐源(1991—), 男, 四川省成都人, 通信地址: 成都市青羊区小河街1号; E-mail: 271499759@qq.com。

孙力(1988—), 男, 四川省达州人, 现任达州钢铁集团有限责任公司生产指挥中心调度员, 2012年毕业于东北大学冶金工程专业, 主要研究方向: 钢铁企业生产协调和高炉生产。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。