包钢4 150 m³高炉主沟喷涂技术的试验与应用*

曲云玉，季文东，闫 风，吴建光

（内蒙古包钢钢联股份有限公司稀土钢炼铁厂，内蒙古 包头 014010）

摘 要： 包钢4 150 m³高炉炉前主沟原设计通铁量为16万t铁水，在使用过程中发现只有射流冲击区耐火材料侵蚀严重，不能继续使用，而主沟其他部位的耐火材料基本保持完好，如果将主沟拆解会使得生铁成本大幅提高。通过喷涂材料、粒度和结合剂的改造，对主沟进行局部喷涂，喷涂后主沟通铁量达到22万t，有效降低了铁水成本。

关键词： 主沟；喷涂；通铁量；成本

中图分类号： TF576.4 **文献标识码：** B **文章编号：** 1009－5438(2019)05－0030－03

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2019.05.009

Experiment and Application on Spraying Technology for Main Channel of 4 150 m³ Blast Furnace of Baotou Steel

Qu Yun－yu, Ji Wen－dong, Yan Feng, Wu Jian－guang

(*Rare Earth Steel Iron－making Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: The originally designed iron influx for main channel before 4 150 m³ blast furnace of Baotou Steel is about 0.16 million tons. In the use process, it is found that only the refractory in jet impingement zone is eroded so seriously that cannot be used anymore, while the refractory in other parts of main channel keeps basically intact. If the main channel is disassembled, the cost of pig iron will be greatly increased. The iron influx of main channel could be up to 0.22 million tons through partial spraying with improving the spraying material, particle size and binder so that the cost of molten iron is decreased effectively.

Key words: main channel; spraying; iron influx; cost

包钢稀土钢炼铁厂共有两座4 150 m³高炉，其中，7#高炉于2014年5月27日投产，8#高炉2015年10月12日投产。7#、8#高炉是包钢目前投产的容积最大的两座高炉。7#、8#高炉的设计高径比为2.05，属于矮胖型现代化大型高炉。其配备矩形双出铁场，平坦化设计，设4个出铁口，开口机、泥炮同侧布置在主沟内侧；高炉采用全冷却壁结构、配备38个风口、采用软水密闭循环冷却；炉缸使用的为德国西格里碳砖；鼓风机使用的是瑞士Man公司的电动变频鼓风机；TRT主机由日本三井造船厂提供；配备有4座卡卢金顶燃式热风炉，呈一列式布置，不设前置炉；槽下系统分散筛分、分散称量；炉顶采用并罐无钟装料设备。7#、8#高炉无论是从工艺还是设备上来说都是十分先进的。

两座高炉炉前主沟为储铁式主沟，生产过程中主沟射流冲击区、铁线过渡区以及过渡区上方部位

* 收稿日期：2019－03－22

作者简介：曲云玉(1976－)，男，内蒙古包头市人，高级技师，现从事高炉炉前技术与管理工作。

渣铁流速快[1]，存在渣铁环流现象。因此，这些部位的沟体受冲刷、磨蚀较为严重；当通铁量达到 16 万 t后（主沟原设计通铁量为 16 万 t），射流冲击区的沟体耐火材料剩余厚度已经小于 200 mm，不能继续使用，需要解体重新浇筑[2]。此时，主沟除射流冲击区外的其他部分仍然完好，每次解体重新浇筑，都会造成不必要的浪费，增加了生铁成本。

国内主沟喷涂最早是由马鞍山钢铁公司从国外引进的喷涂料进行主沟喷涂的，半干法喷涂具备主沟在冷态、热态均可施工的特点，能够在两次出铁之间的间隙进行喷涂作业，喷涂结束快速烘烤即可投入使用，因此半干法喷涂也受到越来越多的重视。主沟喷涂技术最初只在中小型高炉上投入使用，大高炉很少使用。本文对 7#、8#高炉服役末期的主沟射流冲击区域（铁口前方 7.8 m 处）使用喷涂材料采用半干法进行喷涂，有效延长主沟射流冲击区域的使用寿命，在使用喷涂技术后主沟通铁量由原来的 16 万 t 增加到 22 万 t，最高可以达到 32 万 t，增加了近一倍，降本效果十分明显。

1　主沟喷涂料的选择

1.1　材质选择

本设计在材料的选择上使用 Al－SiC－C 系材料作为主沟喷涂材料，选用该系材料作为主沟喷涂材料主要基于以下两个原因。

（1）目前 7#、8#高炉主沟内衬所使用的的耐火材料大多是 Al－SiC－C 系材料，喷涂料使用 Al－SiC－C 系材料，内衬和喷涂料之间的热膨胀系数特性较为接近，可以有效避免主沟耐火材料和喷涂料之间由于热膨胀系数性能的不同而造成剥落现象。此外，由于二者化学性质近似，也可以避免两者在高温状态下发生反应，生成低熔点化合物而造成侵蚀。

（2）Al－SiC－C 系材料自身的性质决定了其对铁水和炉渣有很好的耐侵蚀性和耐熔蚀性，这些性能也使其能够满足生产过程中使用要求。

在实际生产过程中，主沟上受到渣铁冲击和侵蚀最严重需要喷涂的部位，基本上也是工作环境最恶劣的部位。根据以往主沟浇筑材料的使用经验，同时考虑到主沟抵抗渣铁冲击和侵蚀渗透的使用要求，最终选定主材料以高铝粉、刚玉和焦粉（焦粉的引入是为了提高热震稳定性）为主，配加 15% ～20% 的 SiC 料。

1.2　粒度选择

决定喷涂施工质量的关键是喷涂料的粒度组成，粒度的组成直接影响着喷涂料的附着率以及喷涂层的气孔率和致密度。当选定的粒度组成不合理时，喷涂料的回弹损失经常达到 20% 左右，严重时这一数字可以上升到 35% ～40%，损耗较为严重。确定喷涂料粒度组成的首要问题就是要确定临界颗粒，临界颗粒粒径的增大可以改善喷涂料的耐剥落性和耐侵蚀性，但临界颗粒粒径过大又会引起回弹率升高、材料浪费的问题。临界颗粒粒径过小又会导致喷涂层透气性变差，在使用过程中容易发生爆裂剥落等现象，影响喷涂质量以及主沟的通铁量。根据多次试验以及生产经验，最终确定喷涂料的临界颗粒粒径为 5 mm。

喷涂料中细粉所占比例的大小同样会对施工质量产生很大的影响，细粉比例过小会导致回弹率增加，相应的提高细粉的比例则可以提高喷涂料的附着率，但细粉比例过大会影响水分的排出，使用过程中容易出现细小的裂纹从而影响喷涂层的使用性能。为了找到最佳的粒度配比，对不同粒度组成的喷涂料进行喷涂试验。喷涂料粒度组成见表 1，试验结果见图 1。

表 1　喷涂料的粒度组成（质量分数）　%

编号	>1.25 mm	0.088 ～1.25 mm	0.44 ～0.88 mm	0 ～0.44 mm
1	30	21	6	43
2	33	19	9	42
3	37	25	7	31
4	45	28	6	21
5	52	24	4	20

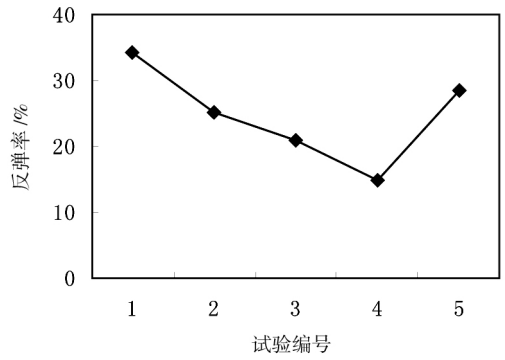


图 1　不同粒度组成喷涂料的反弹率

由图 1 可以看出，编号 4 的喷涂料反弹率最低，

只有 14.7%，因此最终确定的最佳粒级组成为：>1.25 mm的占 45%，0.088～1.25 mm 的占 28%，0.44～0.88 mm 的占 6%，0～0.44 mm 的占 20%。

1.3 结合剂的选择

喷涂料中经常选择的结合剂主要有磷酸盐、硅酸钠、水泥等几类。根据实际生产经验以及出于降低成本两方面考虑，选择水泥作为结合剂。此外以水泥作为结合剂的的喷涂料在附着率和耐用性方面也具有很大优势。喷涂料的性能随着水泥加入量的多少而变化，水泥加入比例过高，随着喷涂料中 CaO 含量的逐渐增加，在高温使用条件下喷涂料的耐渣铁冲刷能力下降，若水泥的加入比例过少，则不能保证喷涂料的前期强度并影响其附着率，因此选择合适的加入量是十分重要的。经过多次调整，最终选定的水泥加入比例为 3.2%。

1.4 添加剂的选择

由于配料中瘠性料占大多数，在施工过程中会存在颗粒料偏析的现象，会使得回弹率升高。为提高喷涂料的粘结性能，以确保在正常施工条件下达到最佳的喷涂效果，需要提高喷涂料的塑性。提高喷涂料塑性的主要方法是向喷涂料中加入增塑剂和有机纤维。在实际生产过程中加入的增塑剂主要是无机增塑剂和有机增塑剂两种，增塑剂的加入可以提高喷涂料的塑性。另外在喷涂料中加入有机纤维又可以进一步增加其附着率同时又能够防止爆裂、脱落。其原理是有机纤维在高温条件下熔化会形成许多细小的孔隙，这些孔隙为水蒸汽的排出提供了通道，避免了喷涂料的爆裂和脱落，但有机纤维的加入量需要严格控制，加入量过多会导致喷涂料气孔率增加，其抗渣能力就会降低。最终确定有机纤维的加入量在 0.1% 左右，长度控制在 5～7 mm 左右。

2 喷涂料性能

喷涂料主要以高铝粉、刚玉和焦粉为主要原料，加入 15%～20% 的 SiC，同时配入适量的结合剂和复合添加剂，主要成分以及部分性能如表 2 所示。该喷涂料的主要特点是附着率高、粘接强度大、耐侵蚀、热震稳定性好。

表 2 喷涂料的主要成分与性能

Al_2O_3 /%	SiO_2 + C /%	体积密度 /(g·cm^{-3})	烧后线变化 /%	耐压强度/%		抗折强度/%	
				110 ℃×24 h	1 450 ℃×24 h	110 ℃×24 h	1 450 ℃×24 h
62.36	16.21	2.62	0.35	24.6	38.1	5.2	8.7

3 设备的选择

喷涂设备目前主要分为干式喷浆机与湿式喷浆机。干式喷浆机与湿式喷浆机的不同点主要在于喷浆模式的不同。干式喷浆机因为加入的是干的喷涂料，所以在喷射时，喷头需要加水，才能保证喷射效果，湿式喷浆机则是利用水充分搅拌混凝土或水泥，然后进行喷射，且喷头处无需加水。为了适应高炉现场的使用条件及出铁沟热态喷涂的工况条件，选用干式喷浆机进行施工，目前使用的喷浆机型号为 PZ－6F 型，该设备配有功率为 7.5 kW 的电机，料斗下料结构采用振动电机方式，动力更强劲、转速快、生产力强、出料也更均匀、节省橡胶板、设备轻巧便于移动。干式喷浆机工作原理为：搅拌混匀好的干物料由配料搅拌机卸料口经过振动筛网供入喷浆机，由拨料器拨动注入转子总成的料腔中，料腔随转子体旋转到出料口处，在这里从气路系统通入压缩空气，把物料吹入出料弯头，由旋流器引入另一股烟气，呈多头旋流状把物料吹散、加速，并使其旋转、浮游，进入输料软管，到达喷头再添加适量补充水分后喷射到受喷面上。

4 喷补效果

在经过多次试验确定喷涂料成分、粒度、结合剂以及添加剂后，于 2018 年 6 月 29 日在 8#高炉 1#主沟射流冲击区处进行第一次试验。1#主沟处于服役末期，射流冲击区沟体两侧耐火材料剩余厚度为 207 mm，如果不进行喷涂将马上面临解体。首次试验 1#主沟射流冲击区沟体两侧使用材料 2 t，喷涂厚度约为 100 mm，快速烘烤后继续投入使用，5 天后发现喷涂料仅有少量残留，通铁量提高了约 2 万 t。2018 年 7 月 9 日在 8#高炉 3#主沟进行了第二次试验，3#主沟同样处于服役末期，射流冲击区沟体两侧耐火材料剩余厚度为 194 mm，本次喷涂使用喷涂料料 5 t，射流冲击区喷涂厚度约 200 mm，本次喷涂回

（下转第 44 页）

3 结论

(1) 在本工艺条件下的中碳合金试验钢，随着终冷温度的降低，硬度增加，韧性变差，显微组织由“铁素体+珠光体”逐渐转变为“铁素体+马氏体”。

(2) 研究发现，本试验钢终冷温度320 ℃时，开始出现马氏体组织转变，终冷温度100 ℃时，试验钢为铁素体与马氏体等双相组织。

(3) 应市场需求，终冷温度设定为320 ℃时，试验钢的显微组织为铁素体+马氏体+贝氏体组织，表面布氏硬度均值346HB，拉伸试验屈服强度970 MPa，抗拉强度1 043 MPa，延伸率12%，在保证能够满足下游工序一定冷弯变形性(45°弯曲合格)的同时，表面硬度达到了标准要求的300HB以上，使该试验钢板具有一定的耐磨性能。

参 考 文 献

[1] 陈希原，沈长安. 38CrMoAl主驱动齿轮低真空变压气体渗氮[J]. 热处理技术与装备，2012，33(3)：30－34.

[2] 陈立奇，颜培庆，姬俊祥. 42CrMo钢零件的气体渗氮[J]. 热处理，2016，31(2)：33－36.

[3] 周贤良，许武波，华小珍，等. 渗氮时间对38CrMoAl钢液相等离子体渗氮层组织及性能影响[J]. 材料热处理学报，2014，35(8)：176－181.

[4] 李坤茂，刘静，杨峰，等. 38CrMoAl和42CrMo合金钢碳氮复合渗工艺[J]. 铸造技术，2017，38(8)：1848－1851.

[5] 鲁修宇，刘静，贾涓，等. 回火温度对高强度低碳贝氏体钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理，2012，37(1)：72－76.

[6] 王权，孙婷婷，白雅琼. 冷却速度对超低碳微合金钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理，2015，40(2)，148－151.

(上接第32页)

弹率低，粘接性强，强度高，无塌落现象，主沟通铁量由16万t提高到22万t。

经过不断的优化喷涂料的组成成分以及根据现场实际生产情况调整施工工艺参数，目前该喷涂技术已经在7#、8#高炉全面推广使用，喷涂后的7#、8#高炉主沟的最大通铁量已经达到32万t，达到了行业的先进水平。

5 结论

(1) 喷涂料的材质以高铝粉、刚玉和焦粉为主要原料，SiC的加入量在15%～20%之间，配以适量的结合剂和复合添加剂可以显著提高喷涂料的附着率、粘接强度、耐侵蚀性能和热震稳定性。

(2) 喷补料的粒度组成：粒度＞1.25 mm的占45%，0.088～1.25 mm的占28%，0.44～0.88 mm的占6%，0～0.44 mm的占20%。

(3) 采用喷涂技术后，主沟通铁量可由原来的16万t提高到22万t，最高可达32万t，有效降低了生铁成本。

参 考 文 献

[1] 傅燕乐. 高炉操作[M]. 北京：冶金工业出版社，2006.

[2] 张世爵，吴忠发. 武钢高炉炉前技术的革新和发展[J]. 炼铁，2001，(S1)：58.

[3] 武杏荣，曹枫，周磊，等. 高炉出铁沟喷补料试验室研制[J]. 耐火材料，2001，35(3)：172－173.