钢渣热闷工艺及装备研究*[1]

许建雄[1]，范永明[1]，李泽平[1,2]，王高峰[1]，樊云槐[1]

（1. 包钢冶金渣（绿化）公司，内蒙古 包头 014010；
2. 内蒙古科技大学，内蒙古 包头 014010）

摘 要： 文章介绍了包钢钢渣热闷处理的工艺概况，分析了该技术在包钢的生产实践中遇到的技术难题，并提供了钢渣大面积板结、热闷喷爆、热闷装置使用寿命短等难题的解决方案。

关键词： 钢渣；热闷工艺；技术难题；解决方案
中图分类号： X757 **文献标识码：** B **文章编号：** 1009－5438（2019）01－0037－05
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2019.01.010

Study on Technology and Equipment of Hot Tight Covering for Steel Slag

Xu Jian－xiong[1], *Fan Yong－ming*[1], *Li Ze－ping*[1,2], *Wang Gao－feng*[1], *Fan Yun－huai*[1]

（1. *Metallurgical Slags (Virescence) Co. of Baotou Iron & Steel (Group) Co., Ltd. Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*）

Abstract: In this paper, it is introduced the general situations of hot tight covering treatment technology for steel slag of Baotou Steel, analyzed the technical problems in the production practices of Baotou Steel as well as provided the solutions to such problems as large－area hardening of steel slag, spray explosion of hot tight covering and short service life of hot tight covering device.

Key words: steel slag; hot tight covering technology; technical problem; solution

钢渣是炼钢过程中的一种副产物，其产生率为粗钢产量的 12% ～18%，我国 2017 年粗钢产量约为 8.32 亿 t[1]，按钢渣比 15% 计算，2017 年我国钢渣排放量约 1.25 亿 t。大量钢渣的堆放和闲置不仅占用大量土地，而且钢渣风化后易产生扬尘，钢渣中的重金属离子还会渗入土壤，造成环境污染。热闷工艺是目前国内钢渣处理最先进的方法，其产品可直接应用于钢渣水泥、烧结和脱硫剂的配料，也可用于路基垫层、基建回填和土地改良等方面，可实现钢渣的循环利用。

1 钢渣热闷工艺原理

1.1 热闷工艺原理

钢渣的主要矿物组成为硅酸二钙、硅酸三钙、钙镁橄榄石、钙镁蔷薇辉石、铁酸二钙、游离氧化钙（f－CaO）、RO（FeO、MgO、MnO 形成的固熔体）相等。采用钢渣热闷技术有效利用液态钢渣所含的余热，高温状态下钢渣遇冷水热激，产生不均匀冷缩使大块钢渣粉碎，由于发生了游离氧化钙水化和硅酸二钙晶形转变，钢渣粉化率一般在 60% 以上。经热

* 收稿日期：2018－11－02
作者简介：许建雄（1982－），男，陕西省神木市人，工程师，现从事钢渣处理工作。

闷处理后的钢渣，f－CaO、f－MgO和$3CaO \cdot SiO_2$通过各自反应生成稳定产物。由于f－CaO含量的降低，提高了钢渣粉的稳定性，有利于钢渣粉的综合利用[2-4]。

钢渣膨胀机理有下列两种情形[5]：

(1) 钢渣中的f－MgO发生水化反应生成$Mg(OH)_2$；f－CaO发生水化反应生成$Ca(OH)_2$。

$$MgO + H_2O \xlongequal{} Mg(OH)_2 \quad (1)$$

$$CaO + H_2O \xlongequal{} Ca(OH)_2 \quad (2)$$

式(1)、(2)反应，体积分别膨胀148%和97.8%。

(2) 钢渣中$3CaO \cdot SiO_2$冷却到1 260～1 280 ℃以下时，尤其在1 250 ℃时$3CaO \cdot SiO_2$易分解成$2CaO \cdot SiO_2$和f－CaO[6]。反应式如下：

$$3CaO \cdot SiO_2 \longrightarrow 2CaO \cdot SiO_2 + f-CaO \quad (3)$$

式(3)反应过程，钢渣体积也发生膨胀。其生成的游离氧化钙又可与水发生式(2)的膨胀反应。

1.2 热闷工艺流程

钢渣热闷工艺流程，见图1。

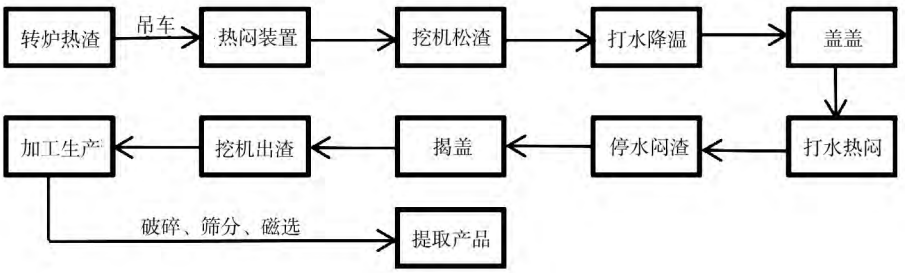


图1 钢渣热闷工艺流程图

2 热闷工艺在实践中出现的问题

热闷—磁选生产加工线经过多年的生产，按原设计工艺参数运行，热闷钢渣板结问题突出，钢渣粉化效果差，闷渣装置使用寿命短，热闷易发生喷爆，严重影响热闷生产的正常运行。针对出现的这些问题，项目组对热闷工艺进行了研究、技术改进，提出了工艺改进措施、槽式护板固定技术、热闷防喷爆技术，通过实践取得显著成效。

3 钢渣热闷工艺及装备研究

3.1 热闷工艺研究

3.1.1 热闷装渣厚度的探索

传统热闷装渣厚为至热闷装置排气孔下500 mm，装渣厚达3 m以上，在生产实践中，因水渗透不充分，造成板结问题突出，热闷粉化率差。

水通过孔隙介质均匀流动时，单位时间内通过钢渣截面积的水流量与压力差和截面积的大小成正比，而与水通过钢渣的厚度以及水的粘度成反比[7]。

$$Q = k\Delta PA/\mu L \quad (4)$$

式中：Q—— 单位时间内流体通过钢渣的流量，m^3/s；

k—— 钢渣的渗透率，常量；

ΔP—— 水通过钢渣上下表面的压差，MPa；

A—— 水通过钢渣的截面积，m^2；

μ—— 水的粘度，Pa·s；

L—— 钢渣的装渣厚度，m。

从式(4)可知，单个热闷装置中k、ΔP、A、μ不变，为常量，水的流量Q与装渣厚度L成反比，L增大Q减小，反之Q增大。

在闷渣时间为8 h，闷渣打水渣水质量比为1∶1.6的条件下，通过改变装渣厚度，每组进行20次试验，装渣厚度由2.0 m增至3.0 m，每组装渣厚度差为0.1 m，统计出不同装渣厚度下发生热闷板结池子的数量，计算出板结率。本文所述的热闷板结是指热闷处理后的钢渣，块径大于800 mm的硬质渣块。板结率是指板结的池子数量占试验池子数量的比率。实验结果见图2。

试验得出：钢渣热闷板结的主要原因是由于热渣与水接触不充分，确定合理的渣水质量比及水的渗透量是解决热闷板结的关键。通过实验验证，当钢渣装渣厚度L低于2.3 m时，水能充分渗透钢渣，钢渣板结问题可得到解决。

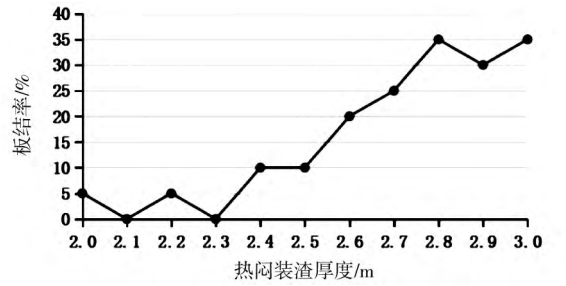


图 2　不同装渣厚度的热闷板结率

3.1.2　渣水比与打水方式的确定

(1) 渣水比的确定

单个热闷装置装渣厚度为 2.3 m 时，质量约为 180 t。供水温度约为 50 ℃，热闷前钢渣温度约 800 ℃，热闷结束后钢渣温度为 60 ℃。水的蒸发量约为 60%，设单个热闷装置用水质量为 M，根据热量计算公式(5)计算[8]。

$$Q = Cm\Delta t \tag{5}$$

$$Q_{渣} = C_{渣} m_{渣} \Delta t_{渣} = 1.2 \times 10^3 \times 180 \times 10^3 \times (800 - 60)$$

$$Q_{水} = C_{水} M\Delta t_{水} = 4.2 \times 10^3 \times M \times (100 - 50) + 2260 \times 10^3 \times M \times 60\%$$

根据热量平衡可知 $Q_{渣} = Q_{水}$，可求出用水质量 M:

$$M = \frac{1.2 \times 10^3 \times 180 \times 10^3 \times 740}{4.2 \times 10^3 \times 50 + 2\,260 \times 10^3 \times 0.6} = 1.02 \times 10^5 \text{ kg}$$

式中: $C_{渣}$，$C_{水}$ —— 钢渣，水的比热容，J/(kg·℃)；

$m_{渣}$，M—— 钢渣，水的质量，kg;

$\Delta t_{渣}$，$\Delta t_{水}$ — 钢渣，水的起始温差，℃。

以上计算结果为钢渣由 800 ℃降温至 60 ℃的最低理论水量，在实际生产中因水渗透不均匀、管道连接密封漏水、水的蒸发量因渣温不同有一定差异等，实际用水量大于理论用水量。为了确定合理的打水量，经过试验，在装渣厚度为 2.3 m，即装渣质量为 180 t，闷渣 8 h 的条件下，打水量为 210 m^3 时，钢渣粉化率达 90% 以上，此时的渣水质量比为 1∶1.6。

(2) 打水方式的确定

根据钢渣热闷的粉化机理，高温状态下钢渣遇冷水热激，产生不均匀冷缩使大块钢渣粉碎; f－CaO 水化和 $2CaO \cdot SiO_2$ 晶形转变，体积增大; 钢渣中的 $3CaO \cdot SiO_2$ 在一定温度下易发生水化，反应生成 f－CaO 和 $2CaO \cdot SiO_2$，如果急冷会很快跨过 $3CaO \cdot SiO_2$ 的分解温度，能有效降低 $3CaO \cdot SiO_2$ 的分解。因此，钢渣热闷的打水方式应为大水量急打，通过实验测试，当装渣质量为 180 t 时，热闷打水方式见表 1，可达到较好的钢渣粉化效果。

表 1　改进后的热闷打水方式

时间/h	打水量/(t·h^{-1})	时间/h	打水量/(t·h^{-1})
0～1	60	2.5～3.0	60
1～2	60	3～4	60
2.0～2.5	0(闷渣)	4～8	0(闷渣)

其中热闷至第 2～2.5 h 和第 4～8 h 期间停止打水，为热闷渗水时间，保证装置内的水可渗入渣内，充分与钢渣接触。

通过实验测定，热闷打水量为钢渣的 1.6 倍时，打水方式为急剧打水，可使高温钢渣充分粉化，粉化率达 90% 以上。

3.1.3　热闷时间对钢渣稳定性的影响

钢渣的稳定性主要取决于钢渣中 f－CaO 的含量，f－CaO 含量高则钢渣稳定性差，反之则稳定性好。在渣水质量比为 1∶1.6 的条件下，项目组通过改变热闷时间，分别对装渣厚度为 2.3 m 和 2.8 m 的热闷原渣中 f－CaO 的含量进行检测，结果如图 3 所示。

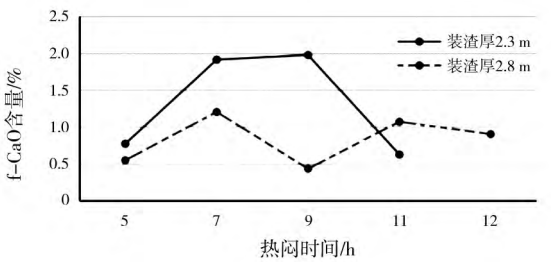


图 3　不同热闷时间原渣中 f－CaO 的含量

试验表明，装渣厚度为 2.3 m，热闷时间为 5 h 时，f－CaO 含量低，且热闷粉化率高。当热闷时间低于 5 h 时，热闷打水无法完全渗漏，热闷装置内易造成积水。

实验结论: 热闷 5 h 与热闷 11 h 以上的原渣中 f－CaO的含量大致相同。热闷时间为 5 h 时，急冷时间快，$3CaO \cdot SiO_2$ 可快速跨过水化温度区，$3CaO \cdot SiO_2$ 水化量少; 热闷时间超过 11 h，

$3CaO \cdot SiO_2$的水化产物 f－CaO 又发生水化，生成 $Ca(OH)_2$，钢渣的稳定也较好。

3.2 热闷防喷爆技术

高温钢渣与 H_2O 接触，在 800～1 000 ℃的条件下可生成可燃气体 H_2 和 CO，在实际生产中，存在可燃气体燃爆危险。项目组通过分析热闷的喷爆原因，认为钢渣热闷喷爆可分为“渣包水”式喷爆和可燃气体燃爆两种。“渣包水”是指大量熔融钢渣短时间内覆盖到液态水表面，液态水瞬间气化，体积迅速膨胀，造成“渣包水”式喷爆。H_2 燃爆极限是 4.0%～75.6%，CO 燃爆极限是 12.5%～74.2%，H_2 和 CO 的燃爆极限区间范围广，导致热闷过程中易引起气体聚集而发生喷爆。

$$H_2O + C \xlongequal{} H_2 + CO \quad (6)$$

$$2H_2O + C \xlongequal{} 2H_2 + CO_2 \quad (7)$$

式(6)、(7)分别为 H_2O 和 C 反应的主反应和副反应。

为消除热闷喷爆的安全隐患，保障操作人员人身安全和设备设施安全，项目组采取了以下几项措施。

(1)热闷装渣时，保证热闷装置内、水封槽内及热闷作业周围无积水，杜绝熔融钢渣覆盖到水表面的情况发生。

(2)热闷装置盖安全阀保持常开状态。因 H_2 和 CO 的密度小于水蒸气和空气，易浮于上层，常开安全阀可使可燃气体消散。

(3)单个热闷装置排气烟囱独立设置。热闷装置间排气连通易造成可燃气体互窜，装渣作业时易点燃其他热闷中的可燃气体，引起装置内喷爆。

(4)打通排水与罩车排气通廊。排水通廊内因通风不良，易于聚集可燃气体，多次在倾翻第一罐钢渣时排水通廊内发生喷爆，车间通过分析现场实际，打通排水与废弃的罩车排气通廊，罩车排气通廊上方设有大型通风设施，可及时排出排水通廊内的可燃气体。消除安全隐患的同时，节约了重建排水通廊通风设施费用。

3.3 热闷装备改进

3.3.1 热闷装置侧板槽式护板固定技术

热闷装置原设计侧板固定方式为圆钢横梁支撑固定(见图4)，因热闷装置内温差大，温度变化频繁，圆钢易发生退火，在短期内强度降低严重，挖掘机在作业时易磕碰热闷装置，造成圆钢短期内固定失效，热闷装置侧板壁易倒塌。

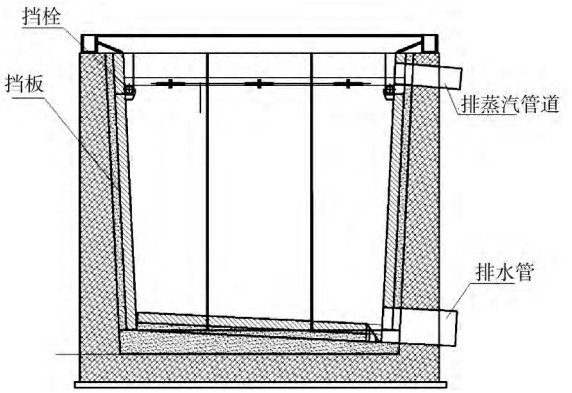


图4 原热闷装置左视图

项目组通过多种改造方案试验，得到较好的改造方案。将原有的挡栓去除，利用端部做整体平衡设计，挡板底部由底护板插接固定，侧板互相咬合支撑，顶部安装焊接 50 mm 厚钢板，做整体顶盖设计，起到支撑和固定的作用(见图5)，溜渣板制作成整体焊接式，与顶盖固定为一体。由此既可以将整个池体护板固定为一体，同时钢渣无法进入护板与墙体之间，起到固定与密封的作用。

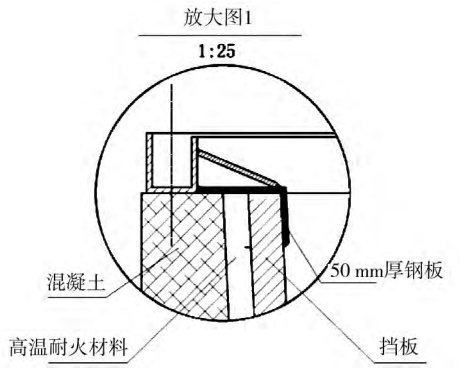


图5 改后护板顶部截面图

5 结论

(1)钢渣热闷板结的主要原因为热渣与水接触不充分，而水渗入钢渣量主要取决于装渣厚度。当热闷打水质量为钢渣质量的 1.6 倍，钢渣装渣厚度低于 2.3 m 时，钢渣板结问题可有效解决。

(2)热闷 5 h 与热闷 11 h 以上的钢渣原渣中 f－CaO的含量大致相同，f－CaO 的含量会随时间的变化有所波动，符合热闷机理中的 $3CaO \cdot SiO_2$ 的水化反应趋势，热闷 5 h 时，达到效益最大化。

(3)热闷喷爆分为“渣包水”式和可燃气体燃爆两类，“渣包水”式喷爆的防范主要是保证装渣区域

内无积水; 可燃气体燃爆的防范主要是保证可燃气体疏散或区域内无明火。

(4) 热闷装置长期在温差较大的环境中使用，传统设计方式使用寿命短，应重点考虑侧板上端的密闭性和稳定性，可增加装置的使用周期。

参 考 文 献

[1] 中华人民共和国国家统计局. 2017 年经济运行稳中向好、好于预期 [EB]. 国家统计局，2018 - 01 - 18.

[2] 谷金生，薛军. 钢渣热闷技术及再利用分析 [J]. 鞍钢技术，2010，(5): 56 - 58.

[3] 陈砚生，靳志刚. 谈热闷渣法钢渣处理技术及钢渣微粉生产工艺的设计实践 [A]. 东南十省水泥发展论坛会刊 [C]. 威海: 山东省科学技术协会，2007. 101 - 104.

[4] 高维安，杨斯馥，梁富智. 钢渣热闷工艺的推广前景 [J]. 环境工程，1992，10(06): 34 - 36.

[5] 柴轶凡，彭军，安胜利. 钢渣综合利用及钢渣热闷技术概述 [J]. 内蒙古科技大学学报，2012，31(3): 250 - 253.

[6] 张春丽. C_3S 的制备及其水化产物抗碳化腐蚀性能研究 [D]. 济南: 济南大学，2016.

[7] 刘希圣，黄醒汉，王治同，等. 石油技术辞典 [M]. 北京: 石油工业出版社，1994.

[8] 于明兴，郭玉安，刘敬东，等. 钢渣热焖技术在生产中的应用 [J]. 河南冶金，2011，19(2): 45 - 47.

信息

马钢首次成功试轧桥梁结构用新钢种耐候热轧 H 型钢

近日，具有高附加值的低合金新钢种 Q420qENHH600 mm × 200 mm 桥梁结构用耐候热轧 H 型钢样件在马钢长材事业部大 H 型钢生产线首次试轧获得成功。该钢种问世对马钢拓宽产品结构、增加高附加值产品比例、深入前沿技术研究具有深远意义。

桥梁结构用耐候热轧 H 型钢在桥梁建设领域中具有广阔的市场前景，可以满足任何桥梁结构建设所需，特别是在高寒地区的桥梁建设中不可或缺，具有良好的支撑性能。它不仅可以耐大气腐蚀，还具有良好的低温韧性，可以承受零下 40 ℃的低温冲击，其它钢种难以替代。此次，马钢自主研发的新钢种是在市场营销部深入市场精确调研的基础上，并结合马钢现行产品结构特点，深思熟虑后而果断研发的。该钢种冶炼难度极大，轧制环节也困难重重。由于该钢种连铸坯质地内部很容易产生裂纹，在轧制环节稍有疏忽便产生废品而功亏一篑。为此，长材事业部工程技术人员根据钢种性质事先制定轧钢工艺，特别是在关键的加热环节预先通知到每个班组，确保人人知晓加热工艺并严格执行工艺纪律，有效杜绝热裂纹的产生。此外，工程技术人员还事先组织人员在万能轧机的进出口处制作安装吹扫装置，为试轧再加一道保险，最终保证了试轧任务一次性成功。

来源《世界金属导报》2019 年 1 月 29 日第四版