# 包钢6#高炉冷却系统运行实践与管理*

梁荣利,于恒亮,赵 鹏

(内蒙古包钢钢联股份有限公司炼铁厂,内蒙古 包头 014010)

**摘 要:** 文章通过介绍包钢6#高炉冷却系统的工艺流程、运行工艺状况,并结合包钢6#高炉冷却系统运行的实际情况,通过加强软水密闭冷却系统日常管理,精心维护,提高了高炉冷却制度的合理性与准确性,并提出问题和改进建议,延长高炉使用寿命。

**关键词:** 高炉; 软水密闭循环; 冷却制度管理

**中图分类号:** TF543 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2019)05-0026-04

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2019.05.008

# Operation Practices and Management for Cooling System of 6# Blast Furnace of Baotou Steel

*Liang Rong-li, Yu Heng-liang, Zhao Peng*

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

**Abstract:** In the paper, it is introduced the process flow and operation conditions for cooling system of 6# blast furnace as well as the reasonability and accuracy for cooling regime of blast furnace are improved by strengthening the daily management for closed cooling system of soft water and careful maintenance combining with the actual situations for operations of cooling system of 6# blast furnace. Moreover, the problems and improvement suggestions are put forward to prolong the service life of blast furnace.

**Key words:** blast furnace; closed circulation of soft water; management of cooling regime

包钢6#高炉的有效容积为2 500 $m^3$,于2006年12月12日投产。设有30个风口,3个铁口,炉腹至炉身下部采用5段铜冷却壁,是包钢第一座采用铜冷却壁、软水密闭循环冷却的高炉,高炉炉体采用全冷却结构。投产前,高炉冷却壁酸洗后打压过程中,发现3段和4段冷却壁各有一根冷却水管坏,高炉冷却系统在运行前对这两根冷却水管进行了穿管修复[1]。投产后在高炉经济技术指标不断提高的同时,高炉冷却系统所承受的热负荷相应增加,投产12年来,高炉冷却设备工作正常,期间没有中修,没有项休,更没有喷补造衬,实现设计使用寿命12年的目标,力争实现一代炉龄(无中修))达到15年以上,单位炉容产铁量达到12 000 t/$m^3$以上的长寿目标。

## 1 高炉冷却系统运行情况及改进

高炉冷却系统分为三个单元,一密冷却系统负

* 收稿日期:2018-03-01

作者简介:梁荣利(1967-),男,河北省唐山市人,高级技师,现从事高炉配管工作。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

责高炉本体冷却壁及炉底水冷管的冷却; 二密冷却系统负责 30 个风口中套及热风炉系统各阀的冷却; 高压净环水冷却系统负责 30 个风口小套供水冷却。

1.1　一密冷却系统设计情况

高炉本体采用全冷却结构,炉底水冷管有 44 根,材质采用 1Gr18Ni9Ti 不锈钢,每 4 根水冷管串联成一组。从下而上设置 15 段冷却壁,1 – 15 段冷却壁从下至上采用“步步高一窜到顶”直冷方式布置,采用脱盐水冷却。系统里设计包括 4 台电动水泵(2 用 2 备)和 1 台柴油机泵,10 台蒸发式空气冷却器、膨胀罐、脱气罐(见图 1),设计供水压力 0.95 MPa,供水量 4 360 $m^3$/h,最大供水量 5 600 $m^3$/h。回水系统 180 根冷却支管沿高炉圆周方向分 4 个 90°区域,每个区域设有 4 根集水管,以保证水量分布的均匀性,为检漏创造了条件。供水温度 40 ℃,回水温度 48 ℃,系统循环率 99.9%,补水量 4 $m^3$/h。

为了保证其安全用水,系统设计采用以下措施: (1) 软水密闭循环水泵采用两路独立电源供电。(2) 泵站内设有备用泵,在工作泵发生故障时可自行投入运行。(3) 泵站内每个单元设置一台快速启动柴油机泵,当两路电源同时停电时柴油机可在 15 s内投入运行。为确保柴油机水泵在需要时能及时启动并正常运转,必须经常定期进行试运转检查。(4) 高炉断电和柴油机泵无法自启时还可实现自然循环汽化冷却。

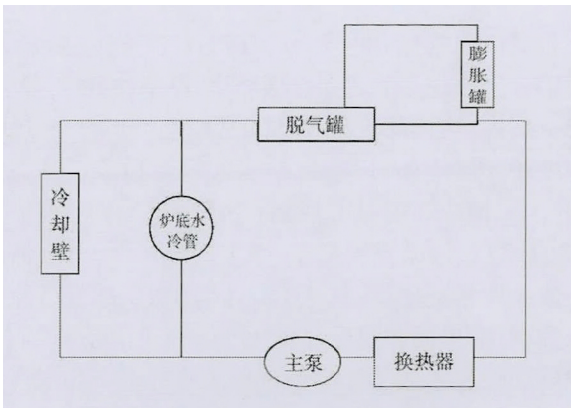



图 1　一密系统冷却工艺示意图

1.2　一密冷却系统投产运行及改进情况

6#高炉开炉投产时,一密冷却系统运行按设计要求,供水量 4 360 $m^3$/h,冷却壁单管流量 22 $m^3$/h,炉底水冷管供水量 400 $m^3$/h,供水温度 40 ℃。由于高炉炉况波动频繁,导致水温差波动,当水温差大于等于 8 ℃时,由于蒸发式空气冷却器,降温能力不足,供水温度最高达到 62 ℃,为了防止冷却壁产生“气塞”,将一密冷却系统供水量调至最大量 5 600 $m^3$/h。随着蒸发式空气冷却器管束外表面结垢,空气冷却器降温能力逐渐的降低,投产 6 个月后一密系统 10 台蒸发式空气冷却器降温能力只有 6 ℃,满足不了高炉对供水温度要求,2008 年 4 月又增加 4 台蒸发式空气冷却器投入运行,降温能力达到 8 ℃,2012 年 6 月又将二密冷却系统系统一台空冷器并网到一密冷却系统,一密冷却系统蒸发式空气冷却器增加到 15 台运行,并且每年对空冷器进行清洗,可是当水温差大于等于 8 ℃时,还是满足不了高炉对供水温度的要求。供水温度调节满足不了高炉生产时,只能调节到最大供水量。当水温差小于 2 ℃ 时,两台水泵同时运行时,供水量减至 4 000 $m^3$/h以下时,回水管道振动较大。为了安全供水,将一密冷却系统其中的两台水泵进行了改造,使每台水泵供水量比原来降低 400 $m^3$/h,一密冷却系统供水电泵就形成了两台大泵和两台小泵组合运行,并对水泵运行条件进行了如下规定: 正常生产时,采用一大一小组合运行; 当供水量小于 4 000 $m^3$/h时,启用两台小泵运行; 当供水量大于 5 100 $m^3$/h时,启用两台大泵运行。

1.3　二密冷却系统设计运行及改进情况

二密冷却系统采用脱盐水冷却,系统里同样设计包括 4 台电动水泵(2 用 2 备)和 1 台柴油机泵,4 台蒸发式空气冷却器、膨胀罐、脱气罐,设计供水压力 0.85 MPa,系统总循环量 1 650 $m^3$/h,系统循环率 99.95%,供水温度 40 ℃,回水 48 ℃。二密冷却系统负责 30 个风口中套及热风炉系统各阀的冷却(见图 2)。

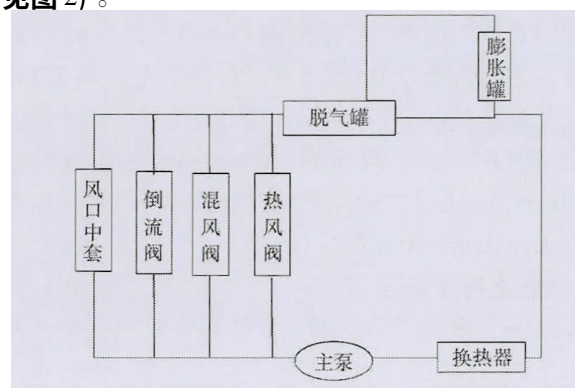



图 2　二密系统冷却工艺示意图

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

冷却水量分配如下: 每个风口中套冷却水量25 $m^3/h$,每个热风阀冷却水量150 $m^3/h$,倒流阀和混风阀各120 $m^3/h$,二密冷却系统水温差稳定只有2 ℃,把一台空冷器又并网到一密冷却系统运行; 由于热风炉助燃风机冷却水采用净环水冷却,水管结垢,导致冷却效果差,后来把两台助燃风机冷却水改为软水密闭循环冷却,每台冷却水量30 $m^3/h$。二密冷却系统供水温度常年稳定在40 ℃,热风阀、倒流阀和混风阀自投产运行从来没有更换过,至今还在使用,已经超出了设计使用寿命。

### 1.4 高压净环水冷却系统设计运行改进情况

系统设计3台电动水泵(2用1备),和1台柴油机泵,供水压力1.75 MPa,总循环量1 300 $m^3/h$,每个风口小套冷却水量40 $m^3/h$,剩余100 $m^3/h$给其它附属冷却设备使用,供水温度不高于35 ℃。2016年初,由于高压净环水系统已经运行了近10年,考虑到该系统管网已经老化,为了该系统安全稳定运行,将高压泵进行了改进,将该系统供水压力降至1.5 MPa以下,总循环量1 100 $m^3/h$,每个风口小套冷却水量33~34 $m^3/h$。

## 2 高炉冷却制度日常管理

合理的高炉冷却制度,是高炉稳定顺行的保障。为了更好的发挥软水密闭循环系统的效果,还要加强对软水冷却系统运行的管理,冷却制定管理的目标是将高炉热负荷和水温差控制在一个合适的范围内,以确保冷却系统的冷却强度处于合理的范围之内,从而既保证冷却设备不因冷却强度过低而烧坏,也保证炉衬不因冷却强度过大而结厚。因此,在日常的生产冷却制度管理中,要做好如下几个方面的工作。

### 2.1 水质稳定管理

高炉长寿与冷却水的水质有着密切的关系,因为水质差,冷却器及管道内易于结垢,降低了冷却强度,高炉冶炼过程中所产生的热量不能及时有效地被冷却水带出,使换热效果差而导致冷却器破损,进而影响高炉使用寿命。6#高炉投产初期,冷却水水质指标不稳定,通过安装腐蚀监测挂片,掌握系统腐蚀速率,定期水质置换和改善化学处理药剂,来控制水质指标,达到高炉冷却水质要求(见表1)。

表1 6#高炉软水水质指标控制一览表

| 项目 | pH值 | 悬浮物/(mg·$L^{-1}$) | 硬度/(mg·$L^{-1}$) | 全铁/(mg·$L^{-1}$) | 铜/(mg·$L^{-1}$) | $Cl^-$/(mg·$L^{-1}$) | 电导率/(μs·$cm^{-1}$) | 腐蚀率/(mm·$a^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 要求值 | 8~11 | ≤20 | ≤20 | ≤3 | ≤0.5 | <30 | 600~1 000 | ≤0.03 |
| 实际值 | 9 | 10 | 10 | ≤1 | 0.5 | 10 | 900 | <0.02 |

### 2.2 水温差管理

冷却水的水量与水压分配对高炉冷却效果和高炉长寿十分重要。高炉严格控制合理冷却参数变化情况,6#高炉正常生产时,软水密闭冷却系统供水压力控制在0.8~0.95 MPa,一密系统供水量控制4 500~5 100 $m^3/h$,水速控制在2.0~2.2 m/s,水温差合理范围为3.0~5.5 ℃,在这个范围内,渣皮的厚度是合适的,既不粘结又能保护炉衬,高炉炉况稳定顺行。二密系统供水量控制在1 650~1 750 $m^3/h$,风口二套水速大于6.5 m/s; 风口小套平均水速大于9.0 m/s。

### 2.3 热流强度管理

控制合理的冷却强度,尽量不采取减少炉体冷却水量的方法控制炉体热流强度。热流强度与水温差是对应的指标(见表2)。通过生产实践摸索,6#高炉一密冷却系统进水温度严格控制在38~42 ℃的范围内,热负荷控制80 000~120 000 MJ/h,进水温度还要保持相对稳定,不能大幅度地波动。一般情况下,铜冷却壁温度控制在45~150 ℃的范围内(见图3)。如果温度低于45 ℃,则表明边缘气流变弱或出现粘结现象; 高于150 ℃,则表明边缘气流过分发展; 如果局部温度温度大于180 ℃,则表明渣皮脱落。炉身中上部球墨铸铁镶砖冷却壁工作温度控制在400 ℃以下,因为球墨铸铁温度在400 ℃以下,性能保持不变,温度再升高,抗拉强度迅速下降,伸长率也在400 ℃开始产生变化,使冷却壁变形,内应力发现变化,反复发生,产生热疲劳,致使冷却壁破损[2]。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　6#高炉水温差及热流强度控制

| 项目 | 炉底 | 炉缸 | 风口区 | 炉腹/炉腰 | 炉身下部 | 炉身中部 | 炉身上部 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 水温差/℃ | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.5 | 2.0 | 1.5 | 1.0 |
| 热流强度/(kW·m$^{-2}$) | 6 | 12 | 24 | 46 | 65 | 34 | 20 |

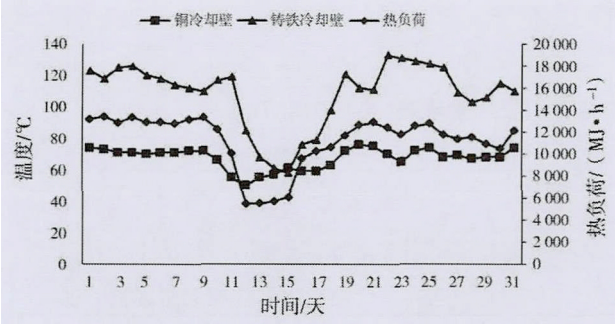



图 3　6#高炉 30 天热负荷铜冷却壁铸铁冷却壁温度变化趋势

投产后,2010 年之前铸铁冷却壁主要集中在炉身最上部 15 段冷却壁破损(17 根管),随后炉身中上部铸铁冷却壁陆续破损。到目前为止,6#高炉铸铁冷却壁总计破损 75 根管。除了 15 段冷却壁损坏堵死了 25 根冷却水管外,15 段冷却壁以下破损的 51 根管全部修复(包括开炉前坏 2 根),没有一块冷却壁失去冷却功能(见表 3)。

表 3　2007 – 2017 年 6#高炉冷却壁破损情况及经济技术指标

| 项目 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 合计 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 破损(根) | 5 | 8 | 4 | 4 | 3 | 7 | 7 | 7 | 13 | 8 | 5 | 4 | 75 |
| 修复(根) | 3 | 0 | 0 | 4 | 3 | 7 | 6 | 5 | 9 | 7 | 3 | 4 | 51 |
| 系数/(t·m$^{-3}$·d$^{-1}$) | 1.99 | 2.21 | 2.09 | 1.99 | 2.07 | 2.18 | 2.23 | 2.05 | 2.21 | 2.10 | 2.14 | 2.12 | |
| 焦比/(kg·t$^{-1}$) | 377 | 388 | 398 | 404 | 399 | 374 | 366 | 397 | 386 | 421 | 412 | 403 | |
| 年产量/(万 t) | 179.7 | 199.8 | 187.1 | 179.9 | 187.7 | 194.9 | 202.3 | 185.9 | 200.9 | 195.7 | 193.7 | 192.3 | 2300 |

## 3　高炉冷却作业管理

高炉配管工要精心维护高炉冷却系统,按标准化作业,确保冷却器有合适、稳定的水压、水量、水速。

(1) 每班对高炉冷却系统,高炉冷却壁进行检查,发现问题及时处理。

(2) 做到每班对高炉软水系统的每条管道、每根支管和脱气罐、膨胀罐进行人工排气,防止产生“气塞”现象。

(3) 在高炉生产中一定要重视并加强对于冷却壁的查漏和维护工作,延长冷却设备寿命。密切注意补水曲线趋势,若发现补水曲线趋势加快,立即查明原因。若是因为冷却设备损坏补水曲线趋势加快,立刻组织人员冷却设备打压,防止冷却器向炉内漏水,影响炉况顺行。

## 4　存在的问题及建议

(1) 蒸发式空气冷却器降温能力满足不了高炉对供水温度要求,蒸发式空气冷却器由于喷淋水硬度高,空冷器管束表面易结垢,导致换热效果差,实现不了冬季只用空气换热效果,一年四季都是喷淋水加风机组合运行,降温能力有限,起不到节能作用。进水温度难以控制在 38 ℃以下。以后采用蒸发式空气冷却器降温,必须改善喷淋水水质,或采用水 – 水板式换热器降温。

(2) 6#高炉在炉腹,炉腰至炉身下部区域采用铜冷却壁,此区域历来是冷却壁破损最严重的部位,由于受到炉内强烈的煤气流冲刷,剧烈热流冲击和炉料的机械磨损,铜冷却壁渣皮频繁脱落,渣皮不能长期稳定保护铜冷却壁导致热负荷波动大,目前在冷却制度上没有有效解决,需继续摸索,加强对铜冷却壁使用温度的关注和检测。改善铜冷却壁的设计

(下转第 88 页)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$\Delta l = \frac{F_N L}{EA}$$

式中：$\Delta l$—— 盲板力引起的拉杆伸长量，mm；

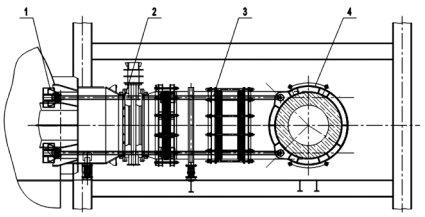
$E$—— 材料弹性模量，210 GPa；

$L$—— 拉杆固定点之间的距离，m。

单根拉杆长度设计为 5 220 mm，经计算 $\Delta l$ = 1.2 mm，拉杆的变形量与原长度相比甚小，为小变形，确保了杆件安装的可靠安全性。

## 3 拉紧装置的布置

根据计算结果，热风支管拉杆采用 4 根 Φ150 mm实心圆钢，结构形式为整体焊接的双头螺栓。拉杆分两段布置，一端与热风炉炉体支座相连，另外一端与热风主管包箍相连，连接方式为销连接，分段的拉杆连接方式为双向螺母连接，见图1。




1－热风炉体端杆座；2－热风支管拉杆1；
3－热风支管拉杆2；4－热风主管端连接箱

图1 热风支管大拉杆安装示意图

## 4 结束语

通过热风支管段大拉杆的设置，有效补偿管壳热膨胀产生的位移，使其整个热风管系成为刚性。减轻了管道最薄弱部位热风出口处所承受的温度缩涨力，保证管道内耐火材料砌体的完整性和严密性，实现热风管系正常稳定工作。

### 参 考 文 献

[1] 郝志忠，贾西明，李公平，等. 包钢4 150 $m^3$ 高炉热风管道波纹补偿器破损状况分析[J]. 中国钢铁业，2016，(12)：29－30.

[2] 唐耀，赵瑞海，罗志红，等. 高风温热风炉热风管系设计理念的探讨[J]. 炼铁，2016，35(4)：30－33.

[3] 唐永进. 压力管道应力分析[M]. 北京：中国石化出版社，2009.

[4] 成大先. 机械设计手册(第一卷)[M]. 北京：化学工业出版社，2007.

[5] 方治华. 工程力学[M]. 呼和浩特：内蒙古大学出版社，2007.

(上接第29页)

工艺，主要包括改善冷却壁的尺寸和材质、水管的形状和材质、燕尾槽的尺寸、镶砖材质等提高铜冷却壁渣皮稳定性。

(3) 严把冷却壁制造质量，确保各项技术指标符合设计要求。由于冷却壁每段之间进出水管道采用刚性连接方式，因而容易在较大热应力下被剪断，致使冷却壁破损。建议炉腹以上冷却壁段与段之间连接管采用软连接。

(4) 一密冷却系统“一窜到顶”直冷方式，水量分段不能控制和调节，11－15段冷却壁进出水管之间没有安装阀门，冷却壁漏水查漏困难，工作量较大，时间长。

## 5 结论

(1) 冷却水水质及稳定性，对冷却设备的传热效果及高炉长寿起着重要的作用，稳定软水水质是维护冷却壁的基本条件。

(2) 完善高炉操作管理制度，调整气流分布，提高铜冷却壁渣皮稳定性，在冷却参数确定的情况下，使铜冷却壁温度小于150 ℃，水温差不大于6 ℃。

(3) 高炉生产实践证明，高炉长寿离不开冷却设备和冷却水的管理。在生产中选择合理的冷却参数，是延长冷却设备使用寿命的重要措施之一。

### 参 考 文 献

[1] 席军，梁荣利，姬跃峰. 包钢6#铁口冷却壁修复技术[J]. 包钢科技，2008，34(5)：23－25.

[2] 陈令坤，宋木森. 武钢4#高炉冷却壁破损的原因[J]. 炼铁，2008，27(5)：13－16.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net