

首钢高炉长寿技术的设计与实践

张福明 王颖生

(首钢总公司)

摘 要 介绍了首钢高炉长寿技术的设计与实践。为延长高炉寿命,在首钢4座高炉设计中,采用了一系列高炉长寿技术。优化炉型参数、改进炉缸内衬结构、采用热压碳砖和陶瓷杯技术;在炉腹、炉腰和炉身下部区域,采用了软水密闭循环冷却系统、第3代新型冷却壁和组合薄炉衬技术。同时还采用了炉缸内衬温度场监测、自动化在线检测和其他多项先进技术。

关键词 高炉 长寿 设计 软水冷却

DESIGN AND PRACTICE OF LONG CAMPAIGN TECHNOLOGY FOR BLAST FURNACE AT SHOUGANG CORP.

ZHANG Fuming WANG Yingsheng

(Shougang Corp.)

ABSTRACT In designing of 4 blast furnaces at Shougang Corp., a series of long campaign technology such as optimizing the furnace profile parameters, improving the structure of hearth lining, introducing hot pressed carbon brick and ceramic cup have been adopted to prolong blast furnace campaign life. Closed loop soft water cooling system, 3rd generation new type cooling stave and thinner-synthetic lining have been used in bosh, belly and lower stack. Temperature field supervision of hearth lining, automatically detecting on-line system and many other advanced technologies have been also adopted. This paper presents the design and practice of long campaign technology for blast furnace at Shougang Corp.,

KEY WORDS blast furnace, long campaign life, design, soft water cooling

1 前言

近10年来,国内外高炉炼铁技术取得了长足进步,高炉寿命大幅度延长。日本和欧洲等主要产钢国的高炉寿命已达到10~15年以上。其中日本川崎公司千叶厂6号高炉(4500 m³)寿命已达到20年9个月。我国宝钢、梅山等厂的高炉寿命也已达10年左右。“八五”期间,首钢4座大型高炉相继进行了现代化新技术改造,设计中采用多项高炉长寿新技术,如新型优质耐火材料、第3代新型冷却壁、软水密闭循环冷却技术等。生产实践表明,设计中采用的高炉长寿技术发挥了积极作用,取得了显著的效果。通过改善高炉操作、加强炉体维护、定期修补等一系列综合措施,高炉寿命有望达到8~10年,实现高炉长寿的目标。

2 新型耐火材料的设计应用

首钢4座高炉大修改造后的耐火材料应用情况见表1^[1]。

2.1 优化炉型参数

实践表明,炉型参数与高炉寿命存在着密切的关系。研究分析了首钢高炉炉缸内衬侵蚀机理,结合国内外对炉缸工作和死焦柱行为的最新研究成果^[2,3],对炉缸参数进行了优化设计,适当加大了炉缸直径、炉缸高度、死铁层深度、铁口深度等参数,为抑制炉缸蒜头状异常侵蚀创造了有利条件。适当加大了炉腰直径,减少了炉腹角和炉身角,以利于炉腹煤气顺畅上升,降低炉墙热负荷,减少煤气流对炉衬的热冲击,使炉腹、炉腰区域能够形成比较稳定的保护性渣皮。首钢高炉炉型主要参数见表2。

表 1 首钢高炉炉体耐火材料应用

Table 1 Application for refractory material of BF body at Shougang Corp.

炉号	1	2	3	4
炉底、炉缸结构	热压碳砖-陶瓷杯	碳砖-高铝砖综合炉底	碳砖-高铝砖综合炉底	碳砖-高铝砖综合炉底
炉底、炉缸	国产碳砖 NMA 砖 莫来石砖棕刚玉预 制块	国产碳砖 NMA 砖 高铝砖 $w(\text{Al}_2\text{O}_3) \geq 80\%$	国产碳砖 NMA 砖 高铝砖 $w(\text{Al}_2\text{O}_3) \geq 80\%$	国产碳砖 NMA 砖 高铝砖 $w(\text{Al}_2\text{O}_3) \geq 80\%$
炉腹、炉腰	NMD 砖 粘土砖(ZGN-42)	Si_3N_4 -SiC 砖 高铝砖(GL-65)	NMD 砖 粘土砖(ZGN-42)	Si_3N_4 -SiC 砖 粘土砖(ZGN-42)
炉身下部	NMD 砖 Si_3N_4 -SiC 砖 粘土砖(ZGN-42)	Si_3N_4 -Si 砖 高铝砖(GL-65)	NMD 砖 Si_3N_4 -SiC 砖 粘土砖(ZGN-42)	Si_3N_4 -SiC 砖 粘土砖(ZGN-42)
炉身中部	粘土砖(ZGN-42)	粘土砖(GN-42)	粘土砖(GN-42)	粘土砖(GN-42)
炉身上部	高铝砖(GL-65)	高铝砖(GL-65)	高铝砖(GL-65)	高铝砖(GL-65)
铁口组合砖	碳化硅-莫来石异型砖	高铝异型砖	碳化硅-莫来石异型砖	碳化硅-莫来石异型砖
风口组合砖	碳化硅-莫来石异型砖	高铝砖	碳化硅-莫来石异型砖	碳化硅-莫来石异型砖
投产时间/(年-月)	1994-08	1991-05	1993-06	1992-05

表 2 首钢高炉炉型主要参数
Table 2 Main parameters of BF type

炉号	1	2	3	4
高炉有效容积(V_u)/ m^3	2536	1726	2536	2100
炉缸直径(d)/mm	11560	9600	11560	10400
炉腰直径(D)/mm	13000	10700	13000	11550
死铁层深度(h_0)/mm	2200	1400	2200	1600
炉缸高度(h_1)/mm	4200	3700	4200	4350
炉腹角(α)/ $^\circ$	$78^\circ 02' 36''$	$80^\circ 14' 51''$	$78^\circ 02' 36''$	$80^\circ 24' 04''$
炉身角(β)/ $^\circ$	$79^\circ 55' 09''$	$82^\circ 41' 55''$	$79^\circ 55' 09''$	$83^\circ 03' 07''$
铁口角度/ $^\circ$	10	10	10	10
铁口深度(L_t)/mm	2201	2250	2124	2116
h_0/d	0.19	0.146	0.19	0.154
L_t/R	0.38	0.47	0.37	0.41
铁口数/个	3	2	3	2
风口数/个	30	26	30	28

2.2 炉缸内衬设计

2.2.1 热压碳砖技术的应用

首钢 2、3、4 号高炉炉缸内衬设计,吸收了导热法设计体系的精华,结合首钢高炉 40 多年的生产实践和经验,在水冷碳砖-高铝砖综合炉底技术的基础上,改进炉缸、炉底内衬设计结构,在炉缸、炉底交界处至铁口平面以下,紧贴冷却壁全部砌筑热压碳砖 NMA。采用碳砖-高铝砖综合炉底,炉底总厚度 2800 mm。炉底满铺 3 层国产碳砖,其上为 4 层综合炉底结构。综合炉底第 1 层周边为国产碳砖,中间部位立砌高度 400 mm 的高铝砖($w(\text{Al}_2\text{O}_3) \geq 80\%$);第 2~4 层周边紧贴冷却壁砌筑 NMA 砖,中间部位立砌高度 350 mm 的高铝砖。第 4 层综合炉底以上至铁口平面以下(即死铁层区域),炉缸壁全部采用 NMA 砖,其上砌筑 3~4 层环形大块碳砖,炉缸壁

垂直段 NMA 砖总厚度 1257.3 mm。炉缸壁碳砖热面砌一环高铝质保护砖,形成“简易陶瓷杯”结构,以避免开炉初期对碳砖的各类破坏。图 1 是首钢 2 号高炉炉缸内衬结构图。

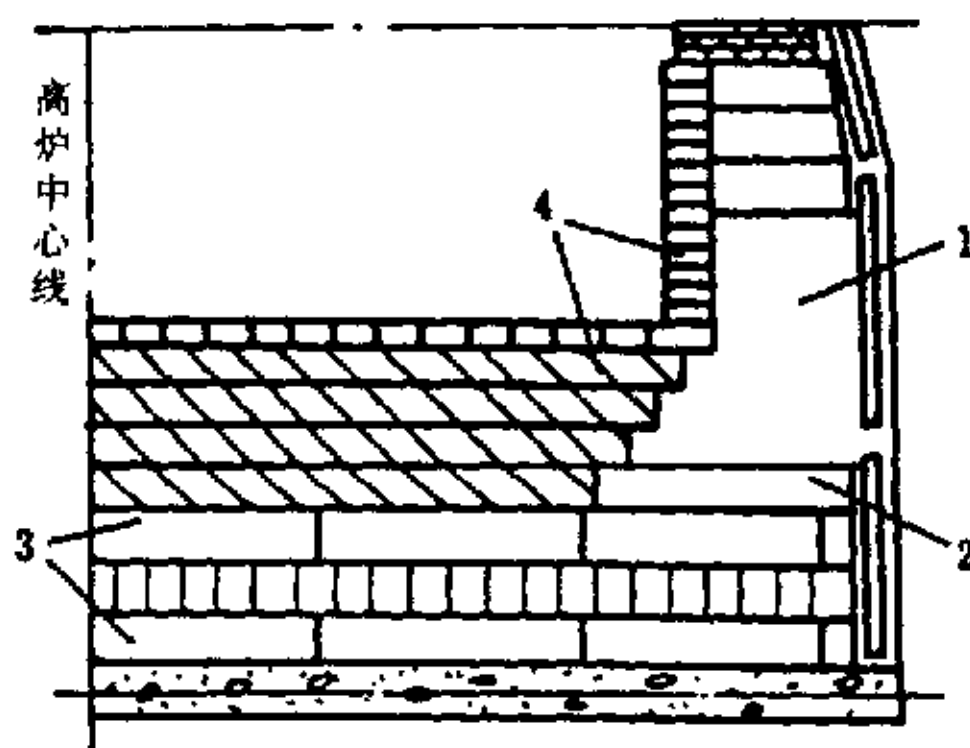


图 1 2 号高炉炉缸内衬结构图

Fig. 1 Hearth lining structure of No. 2 BF

1—NMA 砖;2—国产碳砖;3—满铺碳砖;4—高铝砖

首钢高炉未使用热压碳砖以前,一般开炉 9 个月左右就要加入含钛炉料护炉,炉缸第 2 段冷却壁改用高压水冷却,控制冷却壁热负荷在 11630 W/m^2 以下。最早采用 NMA 砖的 2 号高炉,开炉 18 个月以后才开始投入含钛炉料护炉。直至目前,2 号高炉炉缸已安全工作 8 年,累计产铁 1058.8 万 t,单位容积产铁量达到 6135 t。第 2 段冷却壁水温差平均 0.3°C ,铁口区冷却壁水温差最高 0.5°C (7 根水管),80% 以上的冷却壁水温差小于 0.3°C ,冷却壁平均热流强度 8140 W/m^2 。TiO₂ 加入量 7 kg/t,铁水中钛含量为 0.115%。创造了 80 年代以来,首钢

大型高炉炉缸工作 8 年无事故的纪录。1993 年 6 月投产的 3 号高炉,目前炉缸第 2、3 段冷却壁进出水温差稳定在 0.2、0.3℃,高炉运行 6 年尚未加入含钛炉料护炉,炉缸工作安全稳定,累计产铁 1157 万 t。

2.2.2 陶瓷杯技术的应用

1 号高炉是最后一座进行扩容大修改造的高炉。设计中总结了前 3 座高炉炉缸内衬设计经验和生产实践,经过充分论证,决定在 1 号高炉上将导热法和耐火材料法设计体系结为一体,集二者之长,相互补充,以期实现高炉长寿的目标。

1 号高炉炉缸内衬主要由 6 部分组成(图 2)^[4]:①炉底 4 层国产满铺大块碳砖;②炉底 3 层陶瓷垫(第 1 层为国产莫来石砖,第 2、3 层为 SAVOIE 公司的莫来石砖 MS₄);③炉缸壁内侧 5 层陶瓷壁(全部为 SAVOIE 公司的棕刚玉预制块 MONOCORAL);④炉缸壁外侧铁口中心线以下至炉缸炉底交界处(即蒜头状侵蚀区),紧贴冷却壁共砌筑 26 层热压碳砖 NMA;⑤炉缸壁外侧铁口中心线以上,共砌筑 6 层国产环形大块碳砖;⑥炉缸环形碳砖和陶瓷壁以上、风口组合砖以下,砌筑高铝砖($w(\text{Al}_2\text{O}_3) \geq 80\%$)。

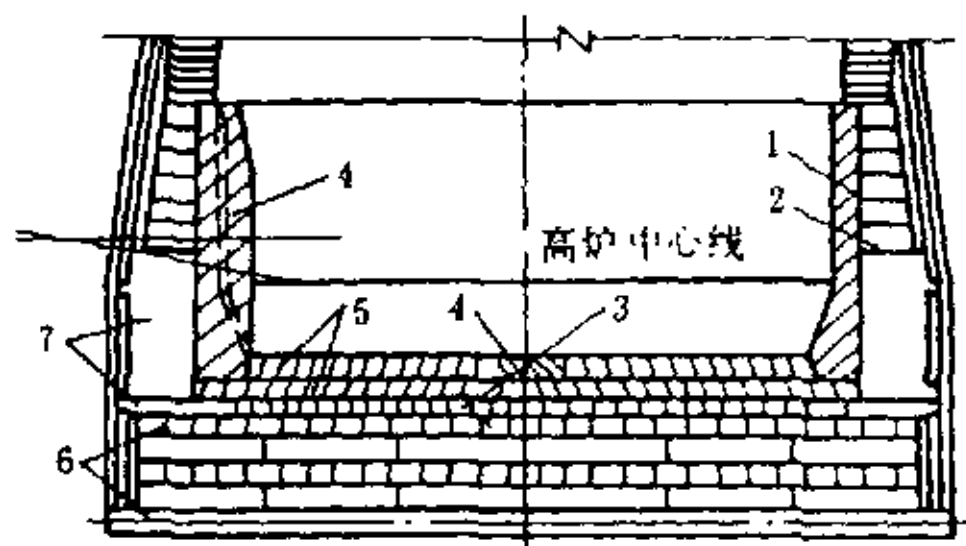


图 2 1 号高炉热压碳砖-陶瓷杯内衬结构图

Fig. 2 Structure of hot press carbon brick-ceramic cup hearth lining at No. 1 BF

- 1—捣料;2—国产碳砖;3—国产莫来石刚玉砖;
4—棕刚玉预制块 MONOCORAL;5—莫来石砖 MS₄;
6—国产碳砖;7—热压碳砖 NMA

1 号高炉至今已生产 4 年 9 个月,累计产铁 892 万 t。高炉投产以来,对炉缸内衬的工作状况进行了长期的测试,热电偶月平均温度变化为 $\pm(0 \sim 10)$ ℃,平均温升速率仅为 0.7~1.5℃/月。目前,炉缸壁 4 层热电偶的平均温度分别为 67、94、132、127℃,第 4 层铁口区热电偶平均温度 186℃。炉缸第 2、3 段冷却壁 85% 的水温差稳定在 0.2、0.3℃以

下,铁口区冷却壁水温差 0.4℃。该高炉投产至今未加含钛炉料护炉。近 5 年的生产实践表明,1 号高炉炉缸热量充沛,炉缸工作均匀活跃,炉况稳定顺行。而且有利于降低燃料消耗和冶炼低硫低硅生铁,提高铁水温度。目前,1 号高炉月平均利用系数 2.25 t/(m³·d),焦比 350 kg/t,煤比 140 kg/t,风温 1080℃,焦炭负荷 4.33 t/t,取得了 90 年代以来首钢高炉生产的最佳技术指标。

2.3 炉腹至炉身下部内衬设计

炉腹至炉身下部是高炉内衬最薄弱的环节,用于该区域的耐火材料应具有较高的抗热震性、导热性和优良的抗化学侵蚀性、抗机械磨蚀性。

2、4 号高炉在炉腹至炉身下部,紧贴冷却壁砌筑了 Si₃N₄-SiC 砖,热面砌一环高密度粘土砖(2 号高炉用高铝砖),采用薄壁组合炉衬,砖衬厚度 460 mm。实践表明, Si₃N₄-SiC 砖应用效果与高铝质耐火材料相比,具有明显的优势。4 号高炉生产 4 年以后,1996 年 5 月炉衬热喷补时观测发现,该区域冷却壁凸台前的大部分砖衬已被侵蚀,砖衬平均残余厚度为 200~250 mm(至冷却壁热面),平均侵蚀速度约 5 mm/月。

为更好地解决砖衬热震破损的问题,1、3 号高炉设计中,炉腹至炉身下部紧贴第 6~10 段冷却壁砌筑了热压半石墨碳砖 NMD,热面砌一环高密度粘土砖,砖衬厚度 475 mm,目前 1、3 号高炉冷却壁凸台前的砖衬大部分已被侵蚀,侵蚀速率和 Si₃N₄-SiC 砖相近,NMD 砖的使用效果还有待于生产实践的长期检验。

3 第 3 代新型冷却壁

炉腹至炉身下部区域,设计采用第 3 代新型冷却壁,以提高冷却强度和冷却效率。冷却壁高度 1400~1900 mm,宽度 800~1000 mm,厚度 340 mm。凸台位于壁体中上部,凸台长度 590 mm,厚度 380 mm。冷却壁热面采用燕尾型沟槽,镶填 SiC 捣料(2、4 号高炉)和 RP-20 碳质捣料(1、3 号高炉),镶填面积与冷却壁热面面积比为 0.4。设计 4 根前排管为直通式结构,2 根后排管为水平蛇形管,凸台管为 2 根水平管。加强了边角部位的冷却,减小水管的弯曲半径和水管至冷却壁边缘的距离,消除冷却死区。冷却壁材质为铁素体基球墨铸铁 QT400-20,冷却壁结构见图 3。

4 软水密闭循环冷却技术

采用软水密闭循环冷却技术是延长高炉寿命的有效措施。1、2、4 号高炉在炉腹以上区域,3 号高炉

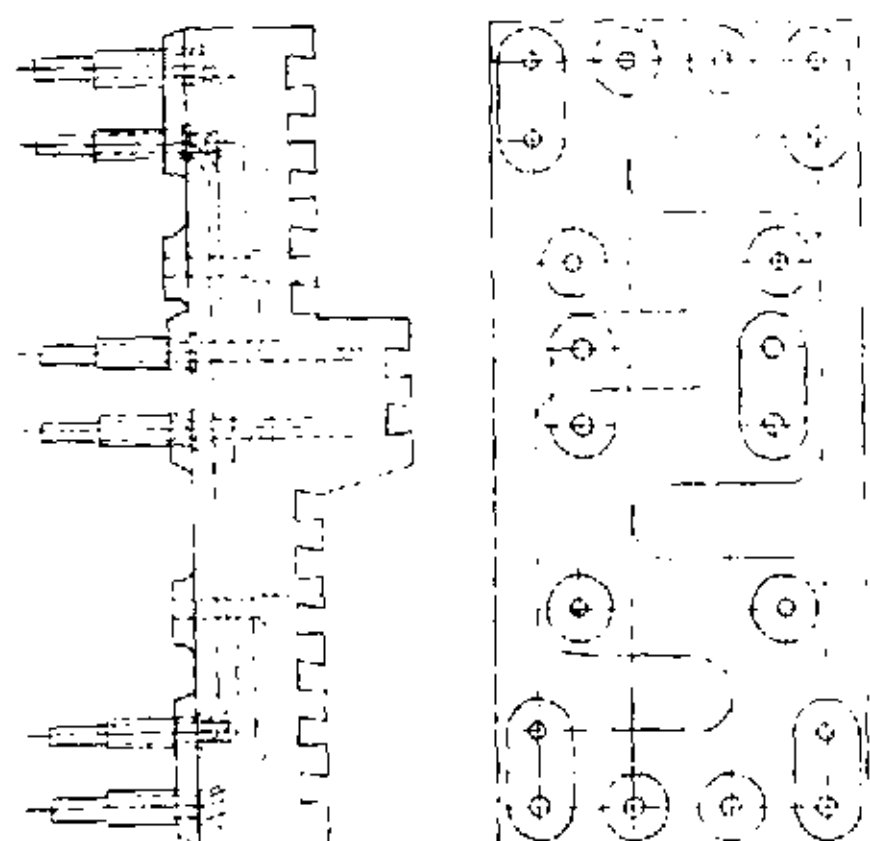


图 3 新型冷却壁结构图

Fig. 3 Structure of new cooling stove

在炉身中、上部均采用软水密闭循环冷却。设计中根据炉体热负荷确定冷却水量,冷却壁凸台管、前排管、后排管的水速分别达到 2.0、1.6、1.0 m/s。设计软水进水温度 55℃,回水温度 57℃(炉役末期 59℃),水压 0.7 MPa,系统阻损 0.15 MPa。设计中将冷却壁凸台管、前排管、后排管分为 3 个冷却子系统,强化凸台管和前排管的冷却。采用双路供、回水设计,优化供、回水环管和支管的管路布置,使圆周方向水量分配均匀。排气是系统稳定运行的关键,在回水支管、环管、总管上均设有排气装置。回水管路上设有脱气罐(置于炉顶平台)和膨胀罐(位于软水泵站内)。系统供、回水管路上设有流量、压力、温度检测。在圆周方向共设有 32 个支管进、出水温度及流量检测,以监测炉体冷却壁的平均热负荷,为软水检漏提供有效信息。图 4 为 1 号高炉软水冷却工艺流程图。

软水密闭循环冷却技术在首钢高炉上的应用,是在不断探索中发展的。4 座高炉由于诸多因素的影响,该系统运行的效果也不尽相同。直至目前,运行较为成功的是 1、4 号高炉,冷却壁仅有凸台管损坏,见表 3。

表 3 1、4 号高炉冷却壁破损状况

Table 3 Damaged cooling stove of No. 1 and No. 4 BF's

冷却壁段号	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	合计
1 号高炉损坏水管/根				1			6	2	3	1	13
4 号高炉损坏水管/根		9	9	9	2						29

注:至 1999 年 5 月,损坏水管均为凸台管。

5 自动化检测系统

炉缸炉底区域设计了温度检测系统,通过实测温度和有限元传热模型,计算分析炉缸、炉底温度场分布和炉衬侵蚀状态。炉腹以上区域设有 10~12 层温度检测,检测砖衬及冷却壁温度,控制边缘煤气流分布,使高炉操作稳定顺行。对软水密闭循环冷却系统的水量、进出水温度、水压等参数进行在线监测,及时监测炉体热负荷的变化,为系统的稳定运行提供可靠保障。高炉投产后,又安装了 QHCl 型炉墙在线测厚系统,可在线监测炉衬厚度,以控制边缘煤气流过分发展,防止冷却壁侵蚀,延长高炉寿命。

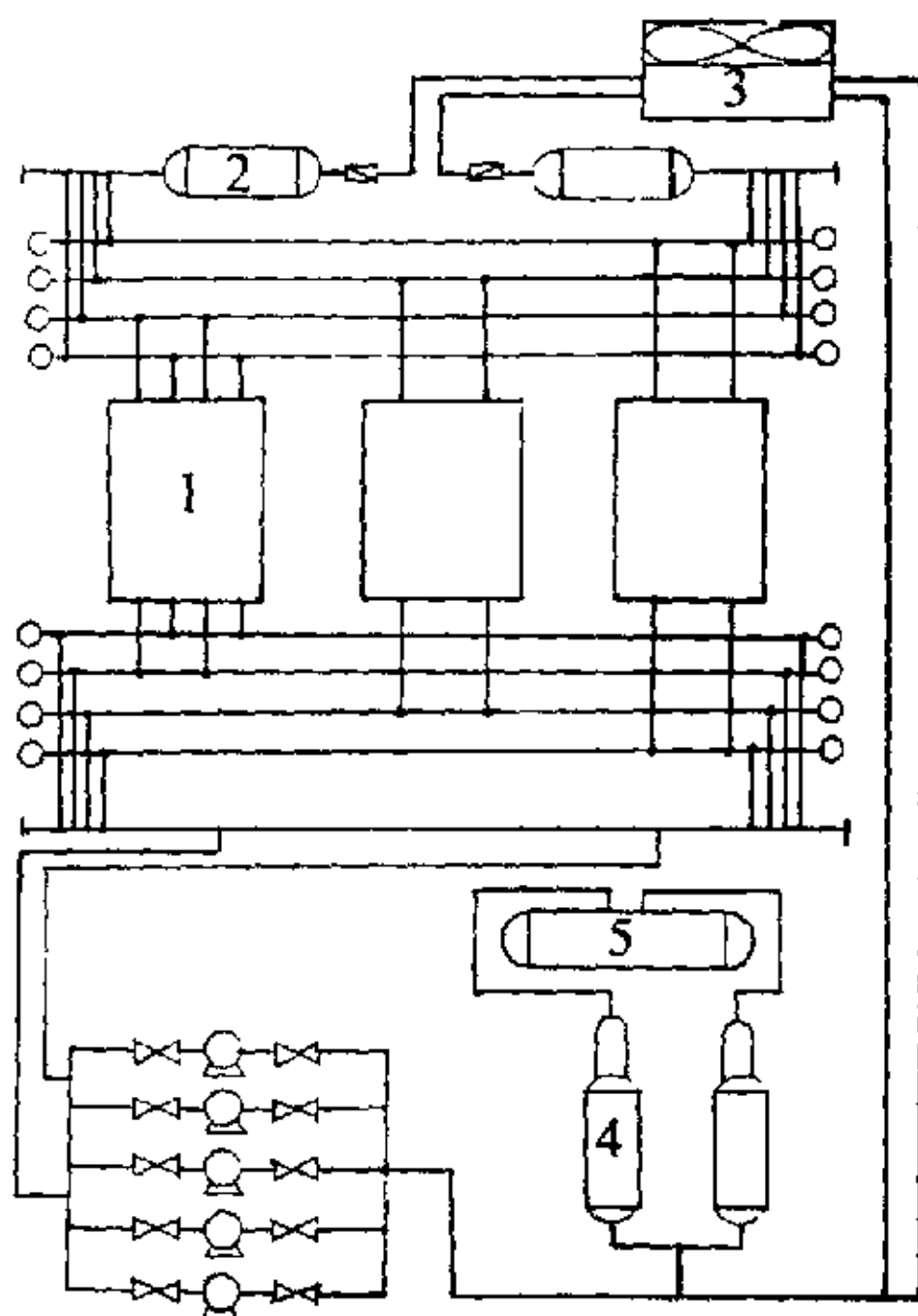


图 4 1 号高炉软水密闭循环冷却工艺流程图

Fig. 4 Soft water cooling process with closed-circuit at No. 1 BF

1—第 6~15 段冷却壁;2—脱气罐;3—空冷器;
4—膨胀罐;5—稳压罐

6 结语

高炉长寿是一项系统工程,新建或大修改造的高炉都应积极采用长寿新技术,延长高炉寿命。实践表明,新型优质耐火材料、新型炉缸内衬结构、第 3 代冷却壁和软水密闭循环冷却等高炉长寿技术在首钢高炉上已取得初步成功。首钢现役的几座大型高炉,在生产实践中应继续加强炉体监测和维护,精心操作,努力实现一代炉龄 8~10 年(不用中修)的目标。

(下转第 181 页)