

武钢高炉长寿技术

张寿荣 于仲洁 等编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

武钢高炉长寿技术

张寿荣 于仲洁 等编著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2009

内 容 提 要

本书总结了 30 年来武钢在高炉长寿技术方面做的研究工作和实践经验,内容包括:武钢高炉长寿技术发展的回顾、武钢高炉长寿技术的开发和应用、武钢高炉长寿生产实践、高炉破损机理研究、高炉长寿技术展望等,附录对武钢高炉寿命情况进行了汇总,并节录了武钢几个高炉大修炉体破损调查报告。书中关于高炉长寿的理念、研究工作的思路和提出的技术措施,将对延长我国高炉寿命起到积极的作用。

本书可供高炉炼铁领域的生产、科研、设计、管理、教学人员阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

武钢高炉长寿技术/张寿荣等编著. —北京:冶金工业出版社, 2009. 7

ISBN 978-7-5024-4954-4

I. 武… II. 张… III. 高炉—寿命—研究—武汉市
IV. TF57

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 104852 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 刘小峰 朱华英 美术编辑 李 新 版式设计 张 青 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4954-4

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2009 年 7 月第 1 版, 2009 年 7 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 19 印张; 368 千字; 293 页; 1-2500 册

56.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号 (100711) 电话: (010)65289081

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

1958年9月13日武钢1号高炉出铁，作为武钢建设的历史性标志载入史册。20世纪60年代，武钢有3座高炉，容积分别为 1386m^3 、 1436m^3 和 1513m^3 。从那时起，武钢的高炉工作者就开始面对高炉寿命问题。1964年6月，采用全高铝砖炉缸、炉底的2号高炉发生了炉缸烧穿事故，这是由于不恰当地修改炭砖、高铝砖综合炉底设计引起的。当时国内有多座采用全黏土砖或全高铝砖炉缸、炉底的高炉发生了类似事故。炉缸烧穿事故的教训迫使我们认真思考炉缸、炉底的改进问题。1970年9月，容积 2516m^3 的武钢4号高炉投产，这是当时国内自行设计和建设的容积最大的高炉。与武钢已建的另外3座高炉不同，4号高炉在国内首次采用了全炭砖水冷薄炉底，炉底厚度从综合炉底的5.6m减少到3.2m。这种全炭砖水冷薄炉底设计，较好地解决了炉缸、炉底寿命问题。20世纪70~80年代，炉身寿命低成为困扰武钢高炉工作者的重要难题。当时炉身寿命只有3~5年，一代炉役需要经历3~4次中修。

1978年10月，1号高炉在生产20年1个月之后结束了第一代炉役。利用大修机会开展了高炉和热风炉炉体破损调查工作，总结了1号高炉的长寿经验。通过炉内观察、测量、照相和取样检验，分析了1号高炉炉体耐火材料和冷却设备破损的原因，为改进高炉设计提供了依据。30年来，武钢高炉每次大修、中修都要开展高炉炉体破损调查工作。通过多次炉体破损调查，逐渐加深了对高炉各部位耐火材料和冷却设备破损机理的认识。从20世纪80年代起，开始着手研究延长高炉寿命的有效措施，其中主要的一项工作是研制球墨铸铁冷却壁，另一项工作则是研制用于炉体不同部位的长寿耐火材料。

1991年10月，采用多项先进炼铁技术的武钢5号高炉（ 3200m^3 ）

投产。在长寿技术方面,5号高炉采用了软水密闭循环冷却系统、PW无钟炉顶、武钢自行研制的球墨铸铁冷却壁、武钢与国内耐火材料厂家合作研制的某些新型耐火材料等。2007年5月,5号高炉在生产15年8个月后结束了第一代炉役,共产生铁3550.9万t,单位炉容产铁 $11096.6\text{t}/\text{m}^3$ 。5号高炉的长寿经验在近年新建的武钢6号、7号和8号高炉及大修改造的1号和4号高炉上相继得到了推广应用。

本书总结了30年来武钢在高炉长寿技术方面做的研究工作和实践经验。第1章、第5章由张寿荣撰写,第2章由银汉、张世爵、宋木森、于仲洁撰写,第3章由尹腾、宋木森、于仲洁撰写,第4章由宋木森、于仲洁撰写,附录由尹腾、于仲洁撰写。参加资料整理和撰写的还有邹祖桥、邓棠、谢友阳、殷增沼、金凯、钟义、李英、李朝前等同志。特别需要说明的是,本书内容涉及武钢多项技术成果、技术诀窍和专利,如需采用须经武钢同意。

高炉长寿问题在我国从技术上已经解决。作为世界第一产铁大国,中国应当引领高炉长寿技术发展潮流。但从全国总体上看,我国高炉寿命与国际先进水平相比还有相当大的差距,不同企业的高炉寿命参差不齐,近年高炉寿命事故也时有发生。可以认为,我国有的钢铁企业的高炉寿命问题还没有真正解决。问题在于,成功的技术没有得到应用、推广。我们坚信,本书中关于高炉长寿的理念、研究工作的思路和提出的技术措施将对延长我国高炉寿命起到积极的作用。我们希望本书的问世对我国高炉长寿技术的进步和延长高炉寿命有所裨益。因水平和时间所限,书中不妥之处,敬请读者指正。

编著者

2009年2月

目 录

1 武钢高炉长寿技术发展的回顾	1
1.1 问题出现	1
1.2 寻求长寿技术措施	1
1.3 对高炉长寿问题认识的深化	2
1.4 高炉长寿技术的实践——武钢 3200m ³ 高炉的建设	4
参考文献.....	6
2 武钢高炉长寿技术的开发和应用	7
2.1 武钢高炉结构的演变和发展	7
2.1.1 炉喉钢砖	8
2.1.2 炉腹以上炉墙结构	9
2.1.3 炉缸、炉底结构.....	11
2.2 高炉冷却技术.....	14
2.2.1 高炉冷却系统设计的进步.....	14
2.2.2 冷却水质的进步.....	17
2.2.3 球墨铸铁冷却壁的研究开发和应用.....	18
2.2.4 铸铜冷却壁的研制和应用.....	24
2.3 生产操作与维护技术.....	26
2.3.1 精料是高炉长寿的基本条件.....	27
2.3.2 高炉冷却制度.....	28
2.3.3 高炉装料制度和送风制度.....	30
2.3.4 含钛矿护炉技术.....	33
2.4 长寿耐火材料的研究开发和应用.....	36
2.4.1 半石墨炭砖.....	36
2.4.2 高炉用微孔炭砖.....	40
2.4.3 超微孔炭砖.....	47
2.4.4 高热导率微孔模压炭砖.....	53
2.4.5 高炉用石墨砖.....	56
2.4.6 磷酸浸渍黏土砖.....	59

2.4.7 烧成微孔铝炭砖·····	61
2.4.8 微孔刚玉砖·····	63
2.4.9 高炉用炭素捣打料的改进和应用·····	70
2.5 耐火材料试验方法研究及标准制定·····	73
2.5.1 问题的提出·····	73
2.5.2 高炉耐火材料使用性能及其试验方法介绍·····	74
2.5.3 高炉耐火材料试验方法的应用情况·····	83
参考文献·····	85
3 武钢高炉长寿生产实践·····	86
3.1 4号高炉第三代·····	86
3.1.1 炉体结构设计及作业情况·····	87
3.1.2 高炉操作维护经验·····	90
3.1.3 炉体破损情况·····	92
3.1.4 高炉寿命问题讨论·····	95
3.2 5号高炉第一代·····	111
3.2.1 生产概况·····	111
3.2.2 高炉的设计和施工·····	112
3.2.3 高炉操作维护经验·····	118
3.2.4 大修破损调查情况·····	133
3.2.5 高炉寿命问题讨论·····	141
3.3 1号高炉第三代·····	156
3.3.1 设计和生产概况·····	156
3.3.2 铜冷却壁薄炉衬高炉的操作实践·····	157
3.3.3 高炉长寿生产的维护管理·····	162
3.4 6号高炉第一代·····	164
3.4.1 设计概况·····	164
3.4.2 高炉强化冶炼操作·····	167
3.4.3 高炉长寿的维护(高炉冷却制度制理)·····	171
3.4.4 对损坏冷却壁的修复·····	173
3.4.5 炉前作业的管理·····	173
3.5 7号高炉第一代·····	174
3.5.1 7号高炉的长寿设计·····	174
3.5.2 高炉强化冶炼操作·····	177
3.5.3 高炉长寿生产的管理·····	182

参考文献	185
4 高炉破损机理研究	186
4.1 高炉各部位炉衬的使用寿命和破损原因	186
4.1.1 炉腹以上区域	186
4.1.2 炉缸、炉底区域	195
4.2 铸铁冷却壁破损研究	210
4.2.1 灰铸铁冷却壁	210
4.2.2 球墨铸铁冷却壁	215
4.2.3 用好球墨铸铁冷却壁的几点认识	221
4.3 高炉耐火材料和冷却器的选择	222
4.3.1 炉身中上部	222
4.3.2 炉身下部到炉腹	223
4.3.3 炉缸风口区域	223
4.3.4 炉缸、炉底异常侵蚀区	224
参考文献	226
5 高炉长寿技术展望	227
5.1 高炉长寿的含义	227
5.2 21 世纪钢铁工业发展趋向	228
5.3 我国高炉炼铁的前景	230
参考文献	231
附 录	232
附录 1 武钢高炉寿命情况汇总表	232
附录 2 武钢 3 号高炉第一代大修炉体破损调查报告 (节录)	236
附录 3 武钢 1 号高炉第一代大修炉体破损调查报告 (节录)	243
附录 4 武钢 2 号高炉第二代大修炉体破损调查报告 (节录)	252
附录 5 武钢 4 号高炉第一代大修炉体破损调查报告 (节录)	271

1 武钢高炉长寿技术发展的回顾

1.1 问题出现^[1]

武汉钢铁公司是新中国成立后我国兴建的第一家大型钢铁联合企业，属于“一五”期间苏联援建的156项工业项目之一。钢厂部分由苏联列宁格勒黑色冶金设计院（Гипромец）提供设计。武钢1号高炉于1957年开始施工，1958年9月13日点火投产。1号高炉容积1386m³，是我国第一座1000m³以上的大型高炉。当时我国没有大型高炉的操作经验，是全面学习苏联的高炉技术。武钢1号高炉的投产总的来看是成功的。1959年7月，武钢2号高炉投产。1961年下半年，1号高炉炉腹冷却板（铸钢）出现烧坏漏水现象。1962年以后，冷却板烧坏块数增多。1964年6月，武钢2号高炉发生了炉缸烧穿事故，不得已在1965年大修。那一时期，高炉的炉体寿命问题成为武钢高炉工作者面临的重大问题之一。

2号高炉烧穿的主要原因是当时对高炉设计的修改不当。武钢高炉的原设计是炭砖、高铝砖综合炉缸、炉底，炉底厚度5.6m，底部采用通风冷却。这一结构是苏联在总结分析库钢（库兹涅茨克钢铁公司）高炉炉缸烧穿教训的基础上提出的，在当时属于较好的设计方案。武钢1号高炉按照此设计建设，未出现问题。武钢2号高炉的设计，却将炭砖、高铝砖综合炉底，改成了全高铝砖炉缸、炉底。修改设计是为了节省投资，因为当时炭砖的价格高出高铝砖数倍。当时已知道这一修改在技术上是倒退，但上级决定后下级只能服从。2号高炉炉缸烧穿后，对大型高炉炉缸、炉底不能采用全高铝砖的认识得以明确。1965年，2号高炉进行大修，全部按照苏联原设计施工。

1号高炉炉身冷却板开始烧坏后，只是被动地加强检查，防止大量漏水，并采取炉壳加强喷水冷却等措施，没有主动地分析原因，采取对策，只是处于被动应付的状态。1966年“文化大革命”后，武钢高炉长期停产、封炉和低冶炼强度操作，炉身冷却设备烧坏的问题被掩盖了。当时的主要矛盾是钢厂如何求得正常生产，高炉寿命问题顾不上研究。“文革”期间建设了武钢3号高炉，全部按照苏联设计的1513m³高炉施工，主要设备是苏联按照1513m³高炉标准设计提供的。

1.2 寻求长寿技术措施^[2]

1970年，国家提出要结束钢铁工业十年徘徊，湖北省领导提出要在武钢建

设当时最大的 2500m³ 级高炉。20 世纪 50 ~ 70 年代前期, 是 20 世纪世界钢铁工业的第一个高速增长期。高炉大型化发展迅速, 在高炉设计、结构方面出现许多新进展。在 2500m³ 级 4 号高炉的建设过程中, 武钢希望能借鉴国外经验, 延长高炉寿命。4 号高炉建设中采取了两项较大的技术措施: 高炉炉底采用炭砖薄炉底和高炉炉腹以上全部采用汽化冷却。2 号高炉发生炉缸烧穿事故后, 对大型高炉炉底、炉缸必须采用炭砖, 在武钢已取得共识。苏联设计的炭砖、高铝砖综合炉底采用的是局部风冷系统。炉底减薄后, 为保持炉底炭砖表面温度低于 1150℃, 风冷的冷却强度显然是不够的, 必须采用水冷, 以保持较高的冷却强度。为此, 在冷却水管的布置和结构方面, 采取了保证措施。武钢 4 号高炉是我国第一座采用全炭砖水冷薄炉底的大型高炉。在 4 号高炉建设以前, 大型高炉的炉底厚度为 5.6m。4 号高炉的炉底厚度为 3.1m, 比原设计减薄 2.5m。继 4 号高炉之后, 武钢新建的 3200m³ 高炉及老高炉大修时全部将炉底改为全炭砖水冷薄炉底。最近几年, 炉底厚度进一步减薄至 2.8m。这项技术已在全国推广。

4 号高炉第一代炉身汽化冷却系统基本上是照搬前苏联的形式。前苏联高炉最早采用汽化冷却技术, 当时已发表了许多文章, 并已向西方国家转让汽化冷却技术。当时我国的研究工作做得很少, 仅仅是照搬、照抄前苏联的做法。4 号高炉投产之初的两年, 汽化冷却系统运行正常。3 年之后, 汽化冷却的冷却壁出现烧坏现象。汽化冷却系统出现漏水后, 因检漏困难, 对高炉操作影响很大。随着时间的推移, 冷却系统漏水日趋严重, 4 号高炉不得已将汽化冷却改为全部工业水冷却。高炉汽化冷却技术以失败告终。

20 世纪 70 ~ 80 年代, 武钢高炉虽然在冷却结构方面及风口以上耐火材料材质方面进行过改进试验工作, 但未取得显著效果。从 70 年代末期起, 开始对高炉炉体侵蚀进行系统的研究, 期望通过对侵蚀机理的了解, 找出延长高炉寿命的途径。

1.3 对高炉长寿问题认识的深化^[3]

1978 年 10 月 16 日, 于 1958 年 9 月 13 日开炉的武钢 1 号高炉停炉大修。按日历时间计算, 高炉大修周期超过 20 年。实际上由于 3 年困难时期减产和“文革”中的减产、停产, 高炉一代工作时间为 18 年 1 个月。这一代中间, 经过 3 次中修。当时武钢 1 号高炉属于国内一代大修炉龄最长的大型高炉。为了解高炉和热风炉炉体破损状况, 利用大修机会对高炉、热风炉剩余的炉衬、残留的渣铁、冷却设备、炉体结构进行详细的测量、取样和检验。1 号高炉大修破损调查使武钢的炼铁工程技术人员开始认识到碱金属和煤气的碳沉积作用对高炉炉衬破坏的严重性, 铁水侵入炭砖的危害以及高炉炉体结构和冷却系统存在的严重缺陷。对热风炉结构的缺陷也有了明确的认识。对当时使用的耐火材料的性能以及

存在的缺陷,同时有了较为清晰的理解。1978年武钢1号高炉大修的炉体破损调查,为武钢开展高炉炉体侵蚀机理研究打下了基础,为高炉长寿寻找方向提供了支撑。

武钢1号高炉破损调查取得的成果,使武钢的炼铁工程技术人员认识到高炉炉体破损调查的重要性。其后,凡高炉大修或中修,都要组织炉体破损调查,并对调查结果进行分析研究。

多次炉体破损的调查研究使武钢的炼铁工程技术人员认识到,没有哪一项独立技术能够确保高炉实现长寿。高炉长寿的必要条件包括:(1)合理的炉体结构,包括冷却形式、结构等,属于设计问题;(2)耐火材料质量、结构和冷却设备质量;(3)建设时工程施工的质量;(4)高炉操作对炉体的维护状况。只有以上各方面的必要条件具备,高炉才能真正实现长寿。在实践中体会到,对高炉寿命的定义也应当加以明确。长期以来把包括炉底、炉缸的全部更换作为大修,而把保留炉底和风口以下炉衬的各种规模的修理均作为中修。炉底、炉缸炉衬更换的工作量往往是比较小的,而炉底、炉缸炉衬更换以外的工作量往往大得多。20世纪90年代以来,技术进步使高炉炉身寿命得以延长。国际钢铁界普遍的概念中高炉一代寿命往往指一代(炉身不中修)的高炉炉衬的寿命。高炉长寿的目标,应当是高炉一代不中修达到的寿命周期。以此来衡量,我国高炉一代寿命与国际先进水平差距很大。钢铁工业要走向可持续发展,实现高炉长寿是高炉炼铁走向可持续发展的第一步。高炉大修不仅停产损失铁和钢的年产量,而且大修要消耗大量耐火材料和备品备件,并产生大量废弃物。那种认为高炉仅追求高容积利用系数,不怕高炉寿命短的观点是错误的。武钢高炉炼铁应当做到高炉一代炉龄(不中修)达到10年以上,应努力争取一代炉龄(不中修)12~15年。在多次高炉炉体侵蚀机理研究的基础上,认为高炉要获得长寿,必须在以下几方面取得实质性进展:

(1)高炉结构合理化。首先是冷却结构的合理化,使高炉在一代寿命中操作炉型保持稳定。高炉操作炉型稳定是高炉一代保持高产、优质、低耗和长寿的基础。武钢采取的是从炉底到炉喉全冷却壁形式,对冷却壁的结构、材质和制造工艺进行优化和改进,提升其可靠性。

(2)用软水密闭循环冷却系统取代工业水冷却系统。实践已充分证明,工业水冷却系统不能保证高炉长寿。4号高炉建设时汽化冷却系统采用了软水,但当时对汽化冷却的理解十分肤浅,不恰当地对待热量回收,采取自然循环系统。对软水处理不完备,使高炉汽化冷却以失败而告终。从失败的教训中武钢的炼铁工程技术人员认识到,高炉的冷却系统必须是强制循环系统,而且在循环系统中必须防止气泡的产生。在此认识的基础上,借鉴了PW公司的技术,采用软水密闭循环冷却系统。

(3) 提升高炉耐火材料的质量。高炉不同部位的工作条件不同, 炉衬侵蚀的机理不同, 对耐火材料质量的要求也不同。为此, 武钢与耐火材料制造厂家联合开发出高热导率的微孔炭砖、微孔刚玉砖、微孔铝炭砖及可塑性耐火材料。武钢的高炉不仅炉底砖衬厚度由 5.6m 减薄至 2.8m, 炉缸砖衬厚度也减至 1.0m 左右。炉身在镶砖冷却壁之内已不再砌砖衬, 镶砖冷却壁所镶砌的砖也提高了质量等级。提升耐火材料质量的目的是尽量在整个炉役中使耐火材料的侵蚀减少到最低限度。

(4) 提升高炉操作的灵活性。高炉操作直接影响高炉一代炉役寿命, 关键因素是高炉内煤气流调节和炉温及造渣制度控制。武钢高炉炉顶装料设备原来采用马基式双钟炉顶, 调节灵活性差。20 世纪 90 年代开始用无料钟炉顶取代马基式双钟炉顶, 使高炉内煤气流处于可控状态。与此同时, 完善了高炉的监测计器、仪表, 除砖衬和冷却壁温度外, 还增加了炉体热负荷监测, 使高炉炉体侵蚀处于受控状态。

这些认识都是在长期实践中逐渐形成的。如前所述, 任何一项独立技术都不可能解决高炉长寿问题。必须把这些技术集成在一座高炉上, 才能形成完整的高炉长寿技术。

1.4 高炉长寿技术的实践——武钢 3200m³ 高炉的建设^[4]

1986 年, 武钢实现了钢、铁年产量超过 400 万 t 的目标, “一米七” 系统超过了设计能力。政府决定, 将武钢的生产能力由年产钢、铁各 400 万 t 扩大到钢、铁各 700 万 t。为此要扩大炼铁生产能力, 新建大型高炉 1 座。利用这一机会, 武钢决定新建 3200m³ 大型高炉 1 座, 引进和采用当时国际一流的先进炼铁技术, 自主集成, 将上述高炉长寿技术集成在一座高炉上, 使高炉在无中修的前提下, 一代炉役寿命 12 年以上, 成为我国最长寿的高炉。为满足建设这座高炉要求, 武钢自主组织球墨铸铁冷却壁的制造工艺、高热导率炭砖的制造等技术开发工作。当时该高炉采用的先进技术有:

(1) PW 式无料钟炉顶。在该高炉建设之前, 我国高炉大都采用双钟式炉顶 (原为马基式炉顶)。宝钢引进日本技术, 采用以钟式炉顶为基础的钟阀式炉顶。为提升炉顶布料调节煤气流的灵活性, 3200m³ 高炉采用 PW 式无料钟炉顶。当时引进的新一代无料钟炉顶, 炉顶压力可以提高到 0.25MPa, 齿轮箱采用水冷代替氮气冷却, 是国际上最先进的。

(2) 引进霍戈文陶瓷燃烧器, 建成我国第一组 (4 座) 1200℃ 高风温热风炉。

(3) 建成当时国内最大的煤粉喷吹系统, 小时喷吹量 32t/h。

(4) 采用武钢式水冷炭砖薄炉底, 炉底总厚度 3200mm。

(5) 采用自立式冷却壁炉身结构。炉身球墨铸铁冷却壁是武钢自主开发的, 平均抗拉强度 395MPa, 平均伸长率为 22%。炉身砖衬减薄至 375mm 的一层砖。

(6) 采用 PW 式的软水密闭循环冷却系统。该系统由三部分组成: 炉体冷却壁密闭循环冷却系统, 水压 0.78MPa; 风口 (包括二套) 及热风炉热风阀密闭循环冷却系统, 水压 1.03MPa; 炉底水冷管密闭循环冷却系统, 水压 0.43MPa。与冷却系统配套, 设有炉体、炉底温度监测和冷却壁热负荷监测系统。

(7) 采用环形出铁场, 4 个铁口均匀分布, 有利于保护炉缸和改善炉前工作环境。

(8) 采用 INBA 炉渣粒化装置。

(9) 炉前出铁场采用静电除尘器, 改善工作环境。

(10) 高炉炉顶煤气采用 TRT, 利用余压发电。

3200m³ 高炉于 1991 年 10 月 19 日送风投产。投产后的实践表明, 高炉长寿技术的集成是成功的。高炉炉体冷却系统运行正常, 没有出现以往高炉发生的损坏现象。1996 年 4 号高炉大修, 采用了 3200m³ 高炉的长寿技术, 使 4 号高炉出现了新面貌。2000 年 1 号高炉大修, 将高炉容积由 1386m³ 扩大到 2200m³, 采用已有的长寿技术并有所改进, 炉身下部和炉腰用铜冷却壁替代球墨铸铁冷却壁, 炉身取消了砖衬, 软水密闭循环系统改为串联式的两个系统。2004 年投产的 3200m³ 级 6 号高炉全部移植了 1 号高炉的长寿技术, 投产后情况正常。2006 年投产的 7 号高炉在 6 号高炉长寿技术的基础上, 炉缸采用铸铜冷却壁, 将炉缸炭砖减薄至 1000 ~ 1100mm, 炉底厚度减薄至 2800mm。这两座高炉开炉后一周左右日产量就达到设计指标, 月平均利用系数达到 2.6 ~ 2.8t/(m³ · d), 炉体砖衬及冷却设备运行正常。6 号高炉、7 号高炉的实践表明, 两座高炉采用的长寿技术经得起高炉强化冶炼的考验。2007 年 5 号高炉大修, 全部采用 7 号高炉已应用的长寿技术, 也取得了良好效果。5 号高炉大修后的日产水平, 比大修前提高 1000t 以上。

高炉长寿是高炉本身设计、建设、运行、管理的最终结果的集中表现之一。从更广泛的范围看, 是钢铁厂炼铁系统综合水平最重要表现之一。高炉是否长寿不是哪一个工序所能决定的, 也不是哪一项独立技术所能决定的。高炉长寿是事关钢铁厂炼铁系统全局的系统工程。只有把高炉长寿当作一个系统来对待, 才能使高炉实现长寿^[5]。高炉长寿技术是诸多有关高炉长寿综合技术的集成。钢铁工业要实现可持续发展, 高炉长寿是钢铁工业迈向绿色化的起点。

参 考 文 献

- [1] 彭承系, 刘海欣. 高炉炉缸维护调查研究报告[J]. 武钢技术, 1965, (1) .
- [2] 武钢炼铁厂研究室. 4 号高炉炉底剩余厚度的计算[J]. 武钢技术, 1975, (2) .
- [3] 彭承系. 1 号高炉第一代大修破损调查及长寿原因分析[J]. 武钢技术, 1979, (增刊).
- [4] 张寿荣. 武钢新 3 号高炉的建设及所采用的新技术 [J] . 炼铁, 1993, (5) .
- [5] Zhang Shourong. A Study concerning blast furnace life and erosion of furnace lining at Wuhan Iron and Steel Co. [A]. McMaster Symposium [C], 1982.

2 武钢高炉长寿技术的开发和应用

2.1 武钢高炉结构的演变和发展

20 世纪 60 年代以前建设的武钢 1 号、2 号、3 号高炉 ($1386 \sim 1513\text{m}^3$)，都采用苏联的高炉设计，其基本特征是：炉喉采用横列式块形钢砖；有炉缸支柱和炉腰托圈；托圈以上有 4 层扁水箱，其上为支梁式水箱；炉腹用镶砖冷却壁配合黏土砖薄炉墙；炉缸、炉底冷却用光面的铸铁冷却壁；所有的冷却壁、扁水箱和支梁式水箱用直排的工业水冷却；炉底结构有全高铝砖炉底和炭砖、高铝砖综合炉底两种；炉底死铁层深度较浅等^[1]。当时高炉寿命存在的主要问题是，炉身寿命短，一代炉役中需要几次中修；炉缸、炉底经常发生水温差异常升高，给高炉安全生产带来威胁。以武钢 1 号高炉第一代为例，在 1958 ~ 1978 年的 20 年炉役中曾经历 3 次中修，一代炉役单位炉容产铁 $6804\text{t}/\text{m}^3$ 。在炉役后期，该高炉就发生过炉缸、炉底冷却壁水温差升高异常的问题（参看附录 3）。

1970 年 9 月投产的武钢 4 号高炉 (2516m^3)，是我国自行设计和建设，利用苏联 1513m^3 高炉的设备建成的。这座大型高炉首次在国内采用大框架自立式结构，取消炉缸支柱和炉腰托圈；高炉炉喉采用纵列式条形钢砖取代横列式块形钢砖；炉身冷却壁采用汽化冷却；炉底采用全炭砖水冷薄炉底，炉底总厚度为 3.1m。4 号高炉第一代生产 13 年 10 个月，经历了 3 次中修，一代炉役单位炉容产铁 $5141\text{t}/\text{m}^3$ 。武钢 4 号高炉第一代的生产实践，肯定了条形钢砖、全炭砖水冷薄炉底的优点，全炭砖水冷薄炉底结构和条形钢砖在武钢高炉上得到普遍推广。此外，4 号高炉的生产实践还宣告了汽化冷却用于高炉炉身冷却壁的失败（参看附录 5）。这一结论与 20 世纪 70 年代末日本、澳大利亚和西欧的高炉将汽化冷却改为水冷（软水或纯水密闭循环）的趋势是一致的。只是受当时条件所限，取消汽化冷却后 4 号高炉的冷却壁仍采用工业水直排冷却，冷却效果并未得到明显改进，仍未缩短与工业发达国家高炉的技术差距。

从 20 世纪 70 年代开始，武钢高炉结构设计和改进进入自主发展阶段。特别是，通过对多座大修、中修高炉进行系统的炉体破损调查，深化了对高炉破损机理的认识，明确了改进高炉结构的方向。随着高炉的大型化、长寿化和强化冶炼的技术进步，武钢高炉结构设计彻底摆脱了前苏联高炉的模式，发生了重大的变化。以 1991 年投产的 5 号高炉 (3200m^3) 为标志，武钢高炉炉体结构主要具有

以下特点：炉体冷却采用全冷却壁，取消炉身上中部的支梁式冷却箱和炉腰的扁水箱；冷却水由工业水直排改为软水密闭循环；炉身内衬由厚壁型改为薄壁型等。80 年代以前，武钢高炉一代炉役中有 3~4 次中修，一代炉役单位炉容产铁低于 $7000\text{t}/\text{m}^3$ 。5 号高炉的设计寿命预计为 10~12 年，第一代实际生产 15 年零 8 个月，产铁总量为 35509161t，一代炉役内不中修、不喷补，一代炉役单位炉容产铁达到 $11096.6\text{t}/\text{m}^3$ 的国际先进水平。

进入 21 世纪以来，武钢 1 号高炉、4 号高炉和 5 号高炉进行了大修，新建了 6 号、7 号和 8 号高炉。2006 年以来大修或新建的 4 号、5 号、6 号、7 号和 8 号高炉，设计寿命为 15~20 年，预计一代炉役单位炉容产铁将达 $15000\text{t}/\text{m}^3$ 左右。在延长高炉寿命方面采取的主要措施包括：炉腹、炉腰和炉身下部等高热负荷区采用铜冷却壁，在炉缸、炉底采用高热导率、抗铁水渗透性好的微孔炭砖，以强化冷却效果和减少对炉衬的侵蚀。下面分别介绍武钢高炉各部位结构的演变和改进情况。

2.1.1 炉喉钢砖

20 世纪 70 年代以前，武钢 1 号、2 号、3 号高炉炉喉均采用横列式块形钢砖，如图 2-1b 所示。在高炉生产中，块形钢砖易受高温煤气流和炉料的撞击作用，钢砖吊挂板与钢砖之间的连接螺栓容易产生变形扭曲，引起钢砖的错位与脱落，导致钢砖的布料功能失控，严重影响高炉布料。块形钢砖的使用寿命一般只有 3~5 年，钢砖损坏后高炉布料功能变差，进一步影响炉身内衬的寿命，成为当时武钢炉身寿命短的重要原因之一。

根据 1 号高炉、3 号高炉破损调查的分析研究，用纵列式条形钢砖取代了块形钢砖（图 2-1a）。1970 年投产的 4 号高炉首次使用条形钢砖，取得很好的效果，此后武钢各高炉先后推广应用。2004 年以后新建、大修的武钢高炉进一步

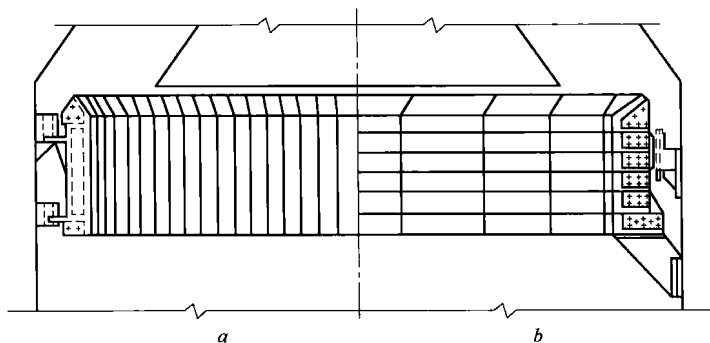


图 2-1 条形钢砖和块形钢砖的结构

a—条形钢砖；b—块形钢砖

改进钢砖设计, 采用了水冷条形炉喉钢砖 (图 2-2)。这使炉喉条形钢砖的使用寿命进一步延长, 基本实现与高炉炉役同步。

2.1.2 炉腹以上炉墙结构

20 世纪 70 年代以前, 武钢高炉风口以上炉腹到炉身的炉墙采用厚壁结构, 耐火砖衬靠扁水箱和支梁式水箱支撑。长期的高炉生产实践表明, 这种厚壁炉墙配合支梁式冷却水箱的结构, 不能保持炉衬稳定存在, 导致炉腹到炉身寿命很低。经过多年的改进, 传统的冷却壁前砌砖的厚壁砖衬结构, 已逐步演变为衬砖镶入冷却壁内, 突出壁面 150mm 的薄壁结构。2001 年 5 月大修后投产的武钢 1 号高炉在国内首次采用了这种设计, 如图 2-3 所示。

2.1.2.1 炉身上部

建设 5 号高炉以前, 武钢 1~4 号高炉炉身上部内衬不冷却, 砌筑厚度 920mm 的黏土砖炉衬。炉身上部砖衬

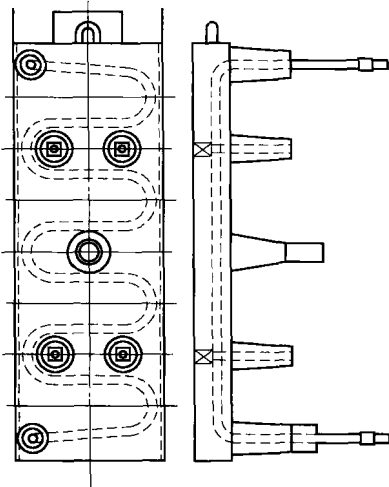


图 2-2 水冷条形炉喉钢砖结构

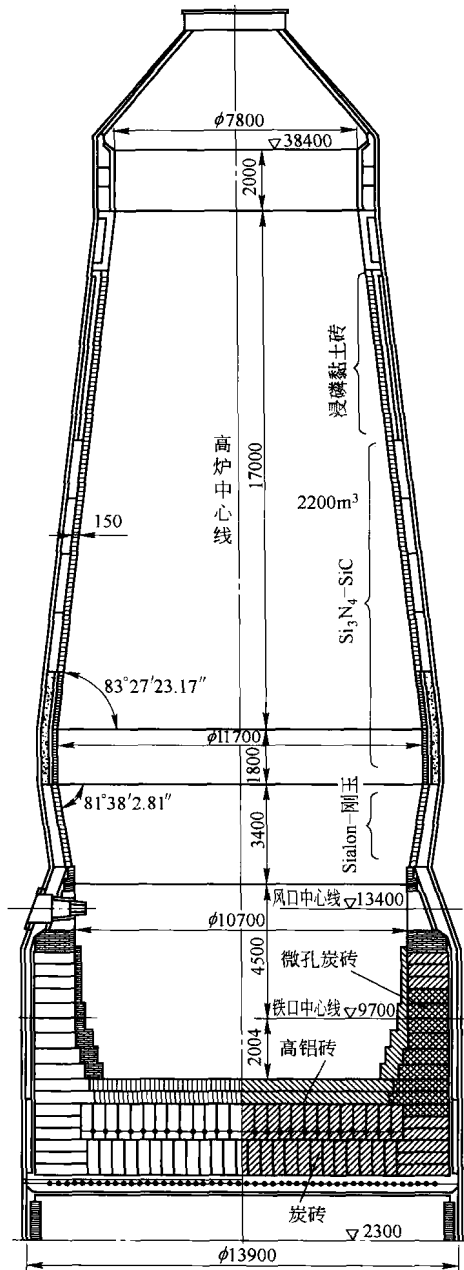


图 2-3 采用薄衬结构的
武钢 1 号高炉 (第三代)