



湖北省学术著作
出版专项资金
Hubei Special Funds for
Academic Publications

湖北省学术著作出版专项资金资助项目

数字制造科学与技术前沿研究丛书

高温工业炉衬 CAE 及其长寿化技术

Furnace Lining CAE
and Longevity Technology in High Temperature Industry

孔建益 蒋国璋 王志刚 李公法 王兴东 著



武汉理工大学出版社

WUTP Wuhan University of Technology Press



湖北省学术著作出版专项资金资助项目

数字制造科学与技术前沿研究丛书

高温工业炉衬 CAE 及其长寿化技术

孔建益 蒋国璋 王志刚 著
李公法 王兴东

武汉理工大学出版社

· 武汉 ·

内 容 提 要

高温工业炉衬及其设备寿命的延长和提高保温性能是钢铁企业提升产品质量、降低成本和提升效益的重要途径。随着钢铁行业的快速发展,钢包、水口、电炉盖、混铁炉、回转窑等高温工业炉衬及其设备的设计制造、使用维护等不断优化,但仍存在高温设备生产效率较低,炉衬使用寿命较短,保温效果不够理想,设备服役时间不够长等问题。如何解决这些问题成为钢铁企业的重要研究课题。

本书以工业炉衬及其高温设备为研究对象,运用各种数值模拟与仿真技术、建模技术、优化设计分析技术,基于有限单元法,建立了各种炉衬设备的 CAD 模型、三维模型和有限元模型,并对高温条件下温度场与应力场进行仿真以及热机械应力分析,对结构、材料、工艺进行优化,对寿命进行预测、分析及评价。在此基础上,建立工业炉衬寿命评价方法,提出长寿化解决方案。

本书对高温工业炉衬设计制造、使用维护以及炉衬设备温度场与应力场和长寿化机理研究等方面具有一定的理论和应用价值。

本书可供冶金工业及相关领域的科研人员、技术人员以及高等院校的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

高温工业炉衬 CAE 及其长寿化技术/孔建益等著. —武汉:武汉理工大学出版社,2018. 1
(数字制造科学与技术前沿研究丛书)

ISBN 978-7-5629-5525-2

I. ①高… II. ①孔… III. ①炉衬寿命 IV. ①TF063

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 265777 号

项目负责人:田 高 王兆国

责任编辑:黄玲玲

责任校对:刘 凯

封面设计:兴和设计

出版发行:武汉理工大学出版社(武汉市洪山区珞狮路 122 号 邮编:430070)

<http://www.wutp.com.cn>

经 销 者:各地新华书店

印 刷 者:武汉中远印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:14.25

字 数:365 千字

版 次:2018 年 1 月第 1 版

印 次:2018 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1000 册

定 价:86.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:027-87515778 87515848 87785758 87165708(传真)

· 版权所有,盗版必究 ·

数字制造科学与技术前沿研究丛书

编审委员会

顾问：闻邦椿 徐滨士 熊有伦 赵淳生

高金吉 郭东明 雷源忠

主任委员：周祖德 丁 汉

副主任委员：黎 明 严新平 孔祥东 陈 新

王国彪 董仕节

执行副主任委员：田 高

委员（按姓氏笔画排列）：

David He	Y. Norman Zhou	丁华锋	马 辉	王德石
毛宽民	冯 定	华 林	关治洪	刘 泉
刘 强	李仁发	李学军	肖汉斌	陈德军
张 霖	范大鹏	胡业发	郝建平	陶 飞
郭顺生	蒋国璋	韩清凯	谭跃刚	蔡敢为

秘书：王汉熙

总责任编辑：王兆国

总 序

当前,中国制造 2025 和德国工业 4.0 以信息技术与制造技术深度融合为核心,以数字化、网络化、智能化为主线,将互联网+与先进制造业结合,正在兴起全球新一轮数字化制造的浪潮。发达国家特别是美、德、英、日等制造技术领先的国家,面对近年来制造业竞争力的下降,大力倡导“再工业化、再制造化”的战略,明确提出智能机器人、人工智能、3D 打印、数字孪生是实现数字化制造的关键技术,并希望通过这几大数字化制造技术的突破,打造数字化设计与制造的高地,巩固和提升制造业的主导权。近年来,随着我国制造业信息化的推广和深入,数字车间、数字企业和数字化服务等数字技术已成为企业技术进步的重要标志,同时也是提高企业核心竞争力的重要手段。由此可见,在知识经济时代的今天,随着第三次工业革命的深入开展,数字化制造作为新的制造技术和制造模式,同时作为第三次工业革命的一个重要标志性内容,已成为推动 21 世纪制造业向前发展的强大动力,数字化制造的相关技术已逐步融入制造产品的全生命周期,成为制造业产品全生命周期中不可缺少的驱动因素。

数字制造科学与技术是以数字制造系统的基本理论和关键技术为主要研究内容,以信息科学和系统工程科学的方法论为主要研究方法,以制造系统的优化运行为主要研究目标的一门科学。它是一门新兴的交叉学科,是在数字科学与技术、网络信息技术及其他(如自动化技术、新材料科学、管理科学和系统科学等)跟制造科学与技术不断融合、发展和广泛交叉应用的基础上诞生的,也是制造企业、制造系统和制造过程不断实现数字化的必然结果。其研究内容涉及产品需求、产品设计与仿真、产品生产过程优化、产品生产装备的运行控制、产品质量管理、产品销售与维护、产品全生命周期的信息化与服务化等各个环节的数字化分析、设计与规划、运行与管理,以及产品全生命周期所依托的运行环境数字化实现。数字化制造的研究已经从一种技术性研究演变成为包含基础理论和系统技术的系统科学研究。

作为一门新兴学科,其科学问题与关键技术包括:制造产品的数字化描述与创新设计,加工对象的物体形位空间和旋量空间的数字表示,几何计算和几何推理、加工过程多物理场的交互作用规律及其数字表示,几何约束、物理约束和产品性能约束的相容性及混合约束问题求解,制造系统中的模糊信息、不确定信息、不完整信息以及经验与技能的形式化和数字化表示,异构制造环境下的信息融合、信息集成和信息共享,制造装备与过程

的数字化智能控制、制造能力与制造全生命周期的服务优化等。本系列丛书试图从数字制造的基本理论和关键技术、数字制造计算几何学、数字制造信息学、数字制造机械动力学、数字制造可靠性基础、数字制造智能控制理论、数字制造误差理论与数据处理、数字制造资源智能管控等多个视角构成数字制造科学的完整学科体系。在此基础上,根据数字化制造技术的特点,从不同的角度介绍数字化制造的广泛应用和学术成果,包括产品数字化协同设计、机械系统数字化建模与分析、机械装置数字监测与诊断、动力学建模与应用、基于数字样机的维修技术与方法、磁悬浮转子机电耦合动力学、汽车信息物理融合系统、动力学与振动的数值模拟、压电换能器设计原理、复杂多环耦合机构构型综合及应用、大数据时代的产品智能配置理论与方法等。

围绕上述内容,以丁汉院士为代表的一批我国制造领域的教授、专家为此系列丛书的初步形成提供了宝贵的经验和知识,付出了辛勤的劳动,在此谨表示最衷心的感谢!对于该丛书,经与闻邦椿、徐滨士、熊有伦、赵淳生、高金吉、郭东明和雷源忠等制造领域资深专家及编委会成员讨论,拟将其分为基础篇、技术篇和应用篇三个部分。上述专家和编委会成员对该系列丛书提出了许多宝贵意见,在此一并表示由衷的感谢!

数字制造科学与技术是一个内涵十分丰富、内容非常广泛的领域,而且还在不断地深化和发展之中,因此本丛书对数字制造科学的阐述只是一个初步的探索。可以预见,随着数字制造理论和方法的不断充实和发展,尤其是随着数字制造科学与技术制造企业的广泛推广和应用,本系列丛书的内容将会得到不断的充实和完善。

《数字制造科学与技术前沿研究丛书》编审委员会

前 言

高温工业炉衬及设备是冶金、电力、建材、石化等高温过程工业的核心装备,其能耗约占我国工业总能耗的 60%,热效率平均低于 30%(国际 $\geq 50\%$),且炉衬耐火材料单耗大,年耗近 3000 万吨。同时,现代工业炉的大型化和高效化,以及新工艺的发展对炉衬材料的功能和寿命提出了更高要求。高温工业炉衬 CAE 及其长寿技术研究是本书作者十余年来在对钢铁生产工艺流程、高温设备建模、温度场和应力场分析、高温工业设备长寿化研究的基础上,总结提炼而成。

高温条件下工业炉衬及设备由于结构形状、材料和工艺以及变温条件的复杂性,仅依靠传统的解析方法精确地确定温度场和应力场往往是不可能的,有限单元法则是解决这些问题的方便而有效的工具。

本书采用有限元方法建立了常见的几种高温设备(长水口、钢包、电炉盖、混铁炉、回转窑)的 CAD 模型、三维模型和有限元模型,并对高温条件下温度场与应力场进行仿真及热机械应力分析,得到各种不同条件和状态下的温度云图和应力云图。

本书将高温工业炉衬的寿命作为研究重点,同时结合保温性能的研究,提出一种适用于耐火材料寿命预测的数学模型,对钢厂精准更换工作层耐火材料具有重要的指导意义。运用热震损伤公式计算分析了钢包内衬热机械应力寿命,实际计算分析结果和实测数据对比证明了预测结果的正确性,在此基础上,提出了延长其使用寿命的方法。高温工业炉衬 CAE 及其长寿化技术研究成果在钢铁企业的运用实践证明,高温工业炉衬寿命提升的效果是明显的。

参加本书撰写工作的有孔建益、蒋国璋、王志刚、李公法、王兴东,书中还吸取了课题组其他研究人员研究工作中所取得的一些成果,他们是李楠、祝洪喜、邓承继、张美杰、白晨、韩兵强、陈荣、陈世杰、何涛、郭志清、陈义峰、高真、刘佳、程福维、常文俊等,同时,武汉科技大学机械自动化学院、材料与冶金学院等单位都给予了支持和帮助,在此一并致谢。

由于作者水平有限,书中难免会有不足之处,恳请读者批评指正。

作 者

2017 年 3 月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 数字化钢铁生产工艺流程的发展	(1)
1.1.1 钢铁生产基本工艺流程	(1)
1.1.2 钢铁生产工艺流程的演变	(2)
1.2 数字化钢铁生产的主要高温工业炉窑设备	(3)
1.2.1 长水口	(4)
1.2.2 传统钢包	(4)
1.2.3 电炉盖	(5)
1.2.4 混铁炉	(6)
1.2.5 回转窑	(7)
1.2.6 新型钢包	(9)
1.3 数字化钢铁工业炉衬设备长寿化中所采用的技术	(10)
1.3.1 建模技术	(10)
1.3.2 仿真技术	(13)
1.3.3 优化算法	(13)
1.3.4 多场耦合	(14)
1.3.5 优化设计方法	(15)
参考文献	(20)
2 工业炉衬热机械应力分析的有限元方法	(21)
2.1 热应力问题有限单元法的基本原理	(21)
2.1.1 热传导问题的一般方程	(21)
2.1.2 稳态温度场的有限元方法	(23)
2.1.3 瞬态温度场的有限元方法	(25)
2.1.4 应力分析数学模型	(27)
2.1.5 热应力的计算	(28)
2.2 利用有限元软件进行工程分析的一般过程	(29)
2.2.1 典型的分析过程	(29)
2.2.2 炉衬系统热机械应力分析的过程	(30)
参考文献	(30)
3 工业炉衬的长寿化技术	(32)
3.1 影响因素	(32)
3.2 长寿化方法	(33)
3.3 长寿化评价	(34)

3.3.1	微观评价技术	(34)
3.3.2	宏观测试技术	(34)
3.3.3	监测评价技术	(35)
	参考文献	(35)
4	长水口的 CAE 及其长寿化技术	(36)
4.1	计算模型	(36)
4.1.1	模型的选取	(36)
4.1.2	材料的物理性能	(37)
4.1.3	热边界条件	(37)
4.1.4	机械边界条件	(37)
4.2	热应力及其影响因素	(38)
4.2.1	热冲击时间对热应力的影响	(38)
4.2.2	预热温度对热应力的影响	(39)
4.2.3	材料热导率对热应力的影响	(39)
4.3	振动产生的机械应力	(40)
4.4	总应力	(41)
4.5	降低颈部应力的措施	(42)
4.5.1	对应力在空间分布上的影响	(42)
4.5.2	对应力在时间分布上的影响	(43)
	参考文献	(43)
5	传统钢包的 CAE 及其长寿化技术	(45)
5.1	钢包温度场和应力场随时间变化的规律	(45)
5.1.1	分析模型的选取	(45)
5.1.2	材料物性参数的选取	(45)
5.1.3	边界条件的确定	(46)
5.1.4	温度场随时间的变化规律	(46)
5.1.5	钢包温度测试实验研究	(48)
5.1.6	应力场随时间变化的规律	(50)
5.2	钢包包壁材料物性的优化选取	(52)
5.2.1	钢包热机械行为的基本规律	(52)
5.2.2	有限元分析模型	(53)
5.2.3	包壁材料物性优化选取	(54)
5.2.4	优化结果与讨论	(54)
5.3	钢包包底结构优化	(56)
5.3.1	典型包底结构	(56)
5.3.2	各种包底结构的参数化模型	(58)
5.3.3	各种包底结构的应力分布	(66)
5.3.4	包底结构优化	(68)

5.4 使用效果	(69)
参考文献	(70)
6 电炉盖的 CAE 及其长寿化技术	(73)
6.1 电炉盖 CAD/CAE 模型的建立	(74)
6.1.1 电炉盖热分析	(74)
6.1.2 电炉盖的 CAD 模型	(74)
6.1.3 电炉盖的 CAE 模型	(75)
6.2 电炉盖温度场分析	(78)
6.2.1 材料物性参数的确定	(78)
6.2.2 载荷及边界条件的确定	(79)
6.2.3 电炉盖的温度场	(82)
6.2.4 温度场分析	(84)
6.3 电炉盖应力场分析	(85)
6.3.1 载荷及边界条件的确定	(85)
6.3.2 电炉盖应力场	(85)
6.3.3 应力场分析	(91)
6.4 炉盖温度场和应力场的影响因素	(94)
6.4.1 炉盖温度场和应力场影响因素分析	(94)
6.4.2 浇铸料物性参数对温度场和应力场的影响	(95)
6.5 浇铸料物性参数的优化	(99)
6.5.1 优化模型的建立	(99)
6.5.2 优化分析	(100)
参考文献	(104)
7 混铁炉的 CAE 及其长寿化技术	(106)
7.1 混铁炉 CAD/CAE 模型的建立	(106)
7.2 混铁炉温度场和应力场分析	(107)
7.2.1 热分析的数学模型	(107)
7.2.2 热与结构耦合应力场分析的理论基础	(107)
7.2.3 热与结构耦合应力分析有限元模型的建立	(108)
7.2.4 材料物性参数	(109)
7.2.5 边界条件的确定	(110)
7.2.6 混铁炉温度场分析结果	(111)
7.2.7 混铁炉热与结构耦合应力场的计算结果	(112)
7.3 混铁炉温度场和应力场的影响因素	(113)
7.4 混铁炉长寿技术的应用	(114)
7.4.1 混铁炉内衬受损机理	(114)
7.4.2 提高混铁炉寿命的手段和方法	(114)
7.4.3 兑铁工艺的选择与设计	(115)

7.4.4 整体浇铸工艺技术研究	(115)
参考文献	(116)
8 回转窑的 CAE 及其长寿化技术	(117)
8.1 回转窑的模型	(118)
8.2 回转窑温度场和应力场的数值模拟	(118)
8.2.1 回转窑火焰温度场的模拟	(118)
8.2.2 回转窑风机速度场模拟	(126)
8.2.3 回转窑内部气流温度场分析	(128)
8.2.4 回转窑窑体温度场的计算	(134)
8.2.5 回转窑窑体热应力场的计算	(137)
8.3 回转窑温度场和应力场的影响因素及其优化	(139)
8.3.1 回转窑窑皮厚度对温度场和应力场的影响	(139)
8.3.2 回转窑内、外通风条件对回转窑温度场和应力场的影响	(141)
8.3.3 回转窑优化结果分析	(149)
参考文献	(151)
9 新型钢包的 CAE 及其长寿化技术	(153)
9.1 具有保温绝热内衬的新型钢包	(154)
9.1.1 钢包保温性能及其影响因素	(154)
9.1.2 具有保温绝热内衬的新型钢包的保温性能分析	(165)
9.1.3 具有保温绝热内衬的新型钢包应力分析	(172)
9.2 钢包热机械损毁分析及模拟	(176)
9.2.1 钢包内衬热机械应力	(176)
9.2.2 钢包内衬砖膨胀缝及其损毁	(186)
9.2.3 考虑整体砖缝的钢包内衬寿命	(193)
9.3 具有纳米保温内衬的新型钢包结构的 CAE	(196)
9.3.1 具有纳米保温内衬的新型钢包有限元模型	(196)
9.3.2 典型工况下具有纳米保温内衬的新型钢包的温度场和应力场的 数值模拟	(197)
9.3.3 具有纳米保温内衬的新型钢包的温度场和应力场的影响因素	(208)
参考文献	(214)

1 绪 论

1.1 数字化钢铁生产工艺流程的发展

1.1.1 钢铁生产基本工艺流程

钢铁工业是国民经济的重要产业,为改变钢铁企业当前的生产现状,实现钢铁企业技术结构升级,钢材产品结构改善,生产效率不断提高,同时解决生产工序的“不同步”衔接问题,在产能过剩、资源有限、运力不足等约束情况下,必须通过有序合理的生产计划与调度,统筹优化整个生产过程,实现钢铁生产工艺流程的数字化^[1-2]。

2000 年以后国内钢铁企业重点开展钢铁生产流程与工艺结构的优化,基本建立起现代化炼钢生产工艺流程,如图 1.1 所示。钢铁生产流程工序繁多,其生产工艺流程一般简要概括为烧结、炼铁、炼钢、连铸、轧制五个主要工序。

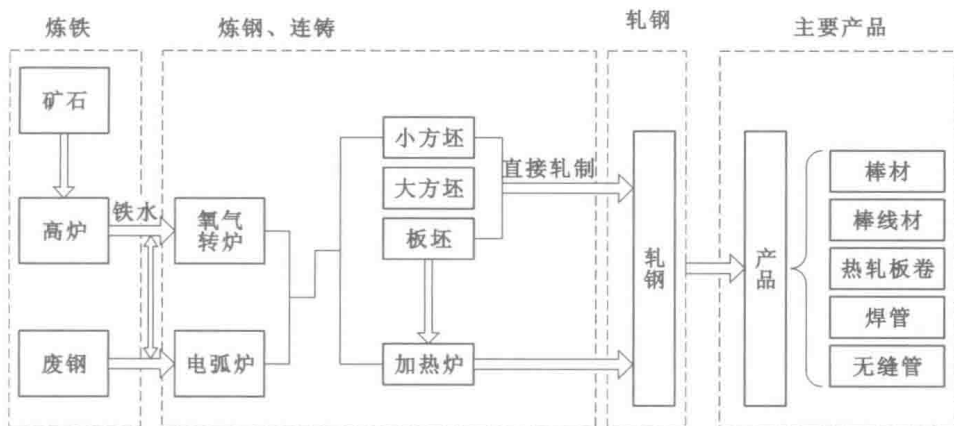


图 1.1 钢铁生产工艺流程图

(1) 烧结

铁矿粉在一定的高温作用下,部分颗粒表面发生软化和熔化,产生一定量的液相,并与其他未熔矿石颗粒作用,冷却后,液相将矿粉颗粒黏结成块,这个过程称为烧结。烧结是为高炉提供精料的一种方法,是利用铁矿粉、熔剂、燃料及返矿按一定比例制成块状冶炼原料的一个过程,烧结的目的及意义是使其致密性能更好。

(2) 炼铁

炼铁实际上是把块矿和烧结矿里的铁在高炉里进行还原的过程。高炉的冶炼过程主要

目的是用铁矿石经济高效地得到温度和成分合乎要求的液态生铁。高炉冶炼的全过程可以概括为:在尽量低能耗的条件下,通过受控炉料及煤气流的逆向运动,高效率地完成还原、造渣、传热及渣铁反应等过程,得到化学成分与温度较为理想的液态金属产品。高炉炉料经各种化学还原反应生产出合格铁水后通过鱼雷罐,作为炼钢原料入转炉冶炼成钢。炉渣经水冲渣排入渣池,通过渣水分离,炉渣排走,水循环利用。

(3) 炼钢

根据相应冶炼钢种的成分、质量需求,运用氧化原理在冶炼的原料熔化过程中,加入一定量的钛合金,从而将铁水中碳、磷、硫、锰以及其他一些元素的含量控制在规定的范围之内,同时满足规定的出钢温度。炼钢广义上说就是铁水通过氧化反应脱碳、升温、合金化的过程。它的主要任务是脱碳、脱氧、升温、去除气体和非金属夹杂、合金化。转炉炼钢、电炉炼钢流程图如图 1.2 所示。

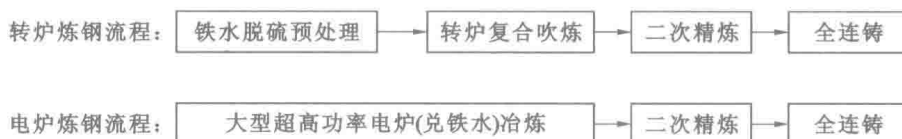


图 1.2 转炉炼钢、电炉炼钢流程图

(4) 连铸

连铸就是使钢水变成钢坯的过程,转炉中达到要求的钢水经由连铸机加工,并按照相应的参数(宽度、长度、厚度、重量和钢级)进行浇铸,形成具有一定规格的板坯。

(5) 轧制

以上道工序运送的板坯为原料,并对板坯进行加热处理,使其达到预设温度并在高压水除磷后,经过粗轧、精轧、层流冷却、卷取过程,形成生产成品,等待入库。整个轧制过程由计算机全程控制。

数字化钢铁生产工艺流程将现代数字化管理技术运用到钢铁生产工艺过程中,利用计算机、通信、网络等技术,通过统计技术量化管理对象与管理行为,实现钢铁生产工艺流程计划、组织、生产、协调、服务和管理数字化。

1.1.2 钢铁生产工艺流程的演变

1855 年,英国人贝塞麦向熔化的铁水中吹入空气,成功地冶炼出第一炉钢,结束了半固态炼钢生产史,奠定了现代化钢铁生产基础。

1856 年,英国人西门子使用了蓄热室,为平炉的构造奠定了基础^[3-4]。1864 年,法国人马丁利用有蓄热室的火焰炉,用废钢、生铁成功地炼出了钢液,从此发展了平炉炼钢法,在欧洲一些国家称平炉为西门子-马丁炉或马丁炉。平炉炼钢法即以煤气、天然气或重油等为燃料,在燃烧火焰直接加热的状态下,将生铁和废钢等原料熔化并精炼成钢液的炼钢方法。此法同空气转炉炼钢法比较有下述特点:① 可大量使用废钢,且生铁和废钢配比灵活;② 对铁水成分的要求不像转炉那样严格,可使用普通生铁;③ 能炼的钢种比转炉的多,质量较好。在 1930—1960 年的 30 年间,全世界每年冶炼出的钢中近 80% 是平炉钢。

氧气转炉、连续铸钢的问世,逐步取代了平炉、模铸开坯流程。1935 年,林德-佛林克尔制

氧法的出现使氧气炼钢成为可能^[5]。20 世纪 30 年代,罗伯特·杜勒尔在柏林大学进行了氧气炼钢的研究。1952 年在奥地利林茨城和 1953 年在多纳维茨城先后建成了 30 t 氧气转炉车间并投入生产,这一方法被称为 LD 法(美国称为 BOF 法或 BOP 法)。

平炉被取代的最主要原因是:被熔化的固体废钢热传导面积积极小,一次能源的利用率很低(而此时电能利用率高)。由于氧气转炉反应速度快、热效率高、含氮量也低,还可使用近 30% 的废钢,可使冶炼时间几乎缩短到传统平炉炼钢法所需时间的 20%,从而大大提高了冶炼效率,而所需的建设费用却未增加,因此,平炉从 20 世纪 60 年代起逐渐失去其主力地位,逐步被取代。快速发展的日本钢铁工业很快采用了 LD 炼钢技术,到 1965 年,其钢产量的一半以上是用 LD 法生产的。日本于 1976 年、西德于 1982 年关闭了最后一座平炉。在 20 世纪 50 年代前,美国的钢铁行业是一个价格垄断的行业,几乎没有竞争,因此,各种成本上升因素比较容易被转移到价格上,从而造成钢铁业对企业合理化改造、新技术的采用积极性不高。在氧气转炉问世之时,美国新增的炼钢生产能力仍以大型平炉为主,转炉钢占有量比较低。这一投资战略的失误进而又影响到连铸技术、电子计算机管理的采用,加之美国强大的工会使劳动力成本连连升高,这样拉大了它同日本等主要产钢国间的差距,直到 1985 年美国才关闭最后一座平炉。2001 年中国关闭最后一座平炉——包钢 500 t 1 号平炉,这标志着我国在钢铁冶炼技术方面跨入世界先进行列。

20 世纪末,由于电炉强化冶炼技术、炉外精炼技术的发展和成熟,电炉冶炼周期缩短,使之与连铸匹配成为可能,让电弧炉短流程与转炉长流程竞争、并存、部分取代成为事实。1879 年,威廉姆斯、西门子制造出世界上第一台电弧炉。二战期间及战后,由于对合金钢和高质量钢材的需求增加,电炉的产量大幅度增加,推动了电炉大型化和氧气的使用。20 世纪 60 年代中期,美国人施瓦贝等人提出的电炉超高功率作业,70 年代日本 LF 钢包精炼炉的诞生,再加上和连铸技术的配合,电炉工艺装备技术得到飞速发展。百年来,电炉发展经历了传统电炉、现代电炉两个冶炼工艺技术时期。前者用电炉来生产成品钢,后者必须电炉与炉外精炼相结合才能生产出成品钢液,电炉只是一个高效熔化器和氧化精炼器,还原期任务在炉外精炼过程中完成。

短流程的兴起除与钢铁生产工艺装备技术进步、电力资源的充裕等有关外,更与美国的钢铁工业发展战略密不可分。美国在战后 30 年里钢铁工业现代化滞后,跟不上技术进步步伐,在钢材品种和质量上与日、德等主要产钢国间存在很大差距。1960 年前后,在平炉被淘汰的过程中,出现了将电炉(当时用于生产少量特殊钢)与连铸等新技术结合起来的简单高效小钢厂,即短流程钢厂。鉴于这种局面,到 20 世纪 80 年代中期,美国钢铁工业对其结构进行现代化改造和调整优化,决定把大量的投资投向新建的电炉小钢厂,使小钢厂的生产能力得到迅速增加。同时削弱能耗高、原材料消耗高、操作环节多、污染环境、劳动密集型生产工序的投资,甚至把初级冶金产品和炼钢的原料生产放到国外。

随着 20 世纪 80 年代初薄板坯连铸技术的出现,曾被广泛认为超出小钢厂生产范围的扁平材在小钢厂生产中具有了竞争性,打破了高炉-转炉流程生产板材一统天下的局面。

1.2 数字化钢铁生产的主要高温工业炉窑设备

金属与耐火材料复合炉衬构件是高温装备中的核心关键部件,广泛应用于冶金、航空航

天、国防等领域。炉衬直接与高温介质接触,是高温装备中最为薄弱的环节。我国是炉衬材料第一生产和消耗大国,年消耗量约 3000 万吨,每年因炉衬损毁造成的消耗量占总消耗量的 50%~60%。进行高温工业炉窑设备一系列研究,实现减排降耗是《国家中长期科学和技术发展规划纲要》、国家《工业转型升级规划》重要内容。

1.2.1 长水口

近年来,为了提高连铸坯的质量,采取了许多技术措施。其中,在连续铸钢方面,主要采用了无氧化浇铸技术,防止钢水的二次氧化,减少钢中夹杂物,提高钢水的纯净度和铸坯质量。在无氧化浇铸技术中,重要的一环是保护钢包至中间包的钢液不被二次氧化。在这个过程中,常常是通过使用长水口密封浇铸来实现的。长水口如图 1.3 所示。

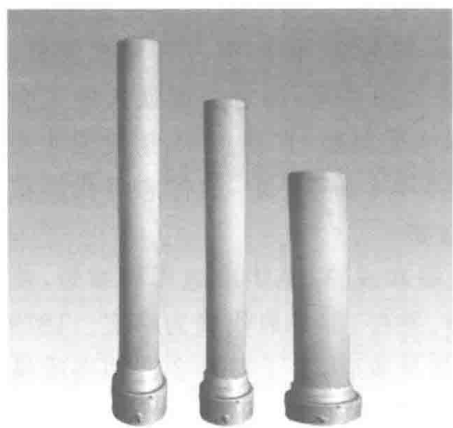


图 1.3 长水口实物图

在连铸浇钢过程中,钢水从钢包下水口注入中间包的导流管称为长水口。长水口的作用是防止钢水的二次氧化和飞溅,减少钢中易氧化元素的氧化产物在水口内壁沉积,延长水口使用寿命,提高钢水的浇铸质量。长水口为圆筒形,上端与钢包滑动水口的下水口下端相接,下端浸没在钢水液面之下。浇铸时,筒壁外侧与空气直接接触,中间导流钢水。

长水口的使用为间歇式操作。由于使用次数较多,并且每次使用都要经过加热—冷却过程,这对耐火材料而言,使用条件是非常苛刻的,容易产生较大的热应力,影响其使用寿命。耐火材料的损坏一般基于两种原因,一是化学侵蚀,二是热机械应力。目前,长水口存在的主要问题是使用过程中颈部断裂和抗侵蚀性、抗冲刷性差,不能满足多炉连铸的要求,制约了连铸工艺的发展。长水口使用寿命较短,热机械应力过大是其被破坏的主要原因。因此,研究长水口工作状态下的热机械应力分布状况对提高其使用寿命具有重要的指导意义。

长水口的颈部断裂是由于颈部应力过大造成的。颈部应力由两部分组成,一部分是浇钢过程中温度不均匀产生的热应力,另一部分是由于长水口的振动产生的机械应力。

长水口一般须经预热后才能使用。但由于预热温度较低,浇钢时长水口受到较强的热冲击,在颈部产生很大的热应力。

另外,在工作过程中,长水口上部固定,下部处于自由状态。由于滑动水口节流时钢水发生偏流,使长水口内侧面受到钢水的冲击或内孔中的钢液面受到钢水湍流冲击,导致长水口以上部为支点振动,在其颈部产生较大的机械应力。

1.2.2 传统钢包

钢包是冶金工业的重要容器件,起着储存、转运钢水的作用。随着现代冶金技术的进步,连铸比不断提高,钢包的作用日益突出。同时,人们对钢水的质量要求逐渐提高,钢包的作用和形态也有了重要变化,原来单纯的储存、转运钢水的钢包逐渐成为能进行二次炉外精炼的精炼炉。

钢包分为钢包壳和由耐火内衬砌筑或浇铸而成的包衬两个部分,如图 1.4 所示。钢包壳本体又可分为包底、包壁、耳轴、支座等,另外还有安装于其上的滑动水口及其驱动装置、钢包倾翻机构等。包衬分为包底工作层、包底永久层、包壁工作层及包壁永久层四个部分。钢包的工作衬可分为整体式和砌筑式两种。

钢包在使用过程中,最常见的损坏是其耐火材料内衬的破裂、蚀损,造成钢水的渗透。耐火材料内衬的损坏原因包括化学侵蚀、机械磨损和热应力。其中热应力的损坏是造成耐火材料内衬开裂破坏的直接原因。



图 1.4 钢包实物图

1.2.3 电炉盖

电弧炉炼钢是利用电极电弧产生的高温熔炼矿石和金属的现代大规模炼钢方法之一。

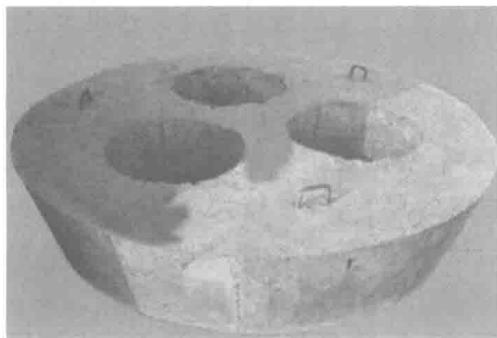


图 1.5 电炉盖实物图

电炉盖是电弧炉炉衬的重要组成部分,炉盖寿命的长短及其保温性能的好坏,与钢的产量、质量、消耗等技术经济指标有着非常密切的关系。电炉盖实物图如图 1.5 所示。国内外学者采取过许多措施来降低电炉盖生产成本、增强其抗热稳定性,如改进炉盖材质、提高砖中氧化铝含量、加大砌砖炉盖的拱度和炉盖中心到熔池面的高度、改进操作、采用全水冷炉盖等。这些措施虽然取得了一定的效果,但仍未能解决耐火砖炉盖的安装困难、使用寿命短、不能满足电弧炉向大容量超高功率发展的需求和全水冷炉盖热

损失大的问题。因此电炉盖的安装工期、隔热保温性能和使用寿命就成了制约钢厂效益的主要因素,对钢铁企业的生产率和经济效益有着至关重要的影响。

电炉盖多数是采用高铝质耐火材料高铝砖砌筑而成,具有较高的热震稳定性和热塑性,能够适应工作温度达 1700°C 的电炉炼钢操作条件,因此采用高铝砖砌筑电炉盖的方法自从电弧炉炼钢技术出现以来一直被国内外许多国家所采用。

不同的电炉生产能力,其炉盖尺寸也不一样,所需耐火砖从 1000~4000 块不等,砖块数太多,工人拼砌麻烦且费工费时,效率低;炉盖本身是弧形结构,再加上 3 个电极孔和加料孔等,工人的劳动强度大,因而其安装周期和砖砌质量均难以保证。经常会出现砖缝处遭到侵蚀损坏而导致砖松动的情况,使用中会出现“抽签”掉砖,加快炉盖损毁;在砖缝过小的部位,由于热应力的作用,砖互相挤压出现裂纹甚至断裂掉块,降低炉盖寿命,有时还出现炉盖水冷圈被挤压胀裂漏水的情况,造成事故,影响正常生产。耐火砖砌筑炉盖主要存在以下不足:

(1) 施工难度大、砌筑时间长。

(2) 砖的厚度大,烧不透,造成生产过程中砖砌拱顶往下塌,变形严重。砌筑炉盖的高强轻质砖的厚度为 250 mm,平均宽度为 115 mm,长度为 152~520 mm,再加上各种原因,造成这类砖的质量很难得到保证,在投入生产后会产生收缩。

(3) 高强轻质砖热稳定性差、接触火焰部位剥落严重。

(4) 隔热性能有限,散热严重。每块耐火砖的材质都是一样的,而焙烧温度高达 1280°C ,炉盖的外壁温度达 $160\sim 200^{\circ}\text{C}$,造成大量的热量散失,增加了能耗。

随着电炉炼钢新技术的发展,高功率、超高功率电弧炉比例逐年增加,电炉采取强化冶炼,炼钢节奏加快,熔炼温度提高,周期缩短,急冷急热频繁,电炉盖受到更大强度的热辐射、热震和更多高温熔渣飞溅物的损害,炉衬损耗加快,烧成高铝砖电炉盖的缺点越来越显著地暴露出来。电炉盖使用寿命明显降低,已成为炼钢生产的瓶颈。

国内外有关专家采取了许多措施,主要可分为两个大类:一是采用烧成 MgO 砖和 $\text{MgO-Cr}_2\text{O}_3$ 砖修砌电炉盖。烧成 MgO 砖和 $\text{MgO-Cr}_2\text{O}_3$ 砖对含有氧化铁和氧化钙的碱性渣有良好的抵抗性,但镁质材料热膨胀系数大、弹性模量高、热震稳定性差,且容易导致其结构剥落;另外烧成 MgO 砖和 $\text{MgO-Cr}_2\text{O}_3$ 砖比重大,增加了炉盖的重量,加大了机械负荷,应用不是特别普遍。二是采用优质特级高铝矾土熟料,高压成型和高温烧成,提高电炉盖高铝砖的质量,以延长炉盖的使用寿命。

以上两种措施虽然能改善炉盖的抗热稳定性,对延长炉盖的寿命起到了有益的作用,但仅限于对材质本身的改进,炉盖的制作工艺并未得到显著改善,工人的劳动强度依然很大,且对延长炉盖使用寿命的作用也很有限。

在这种情况下,祝洪喜教授等提出了制作电炉盖预制块的设想。经初步试验表明,高铝质预制块炉盖缓冲热应力的作用强、抗热震性和抗剥落性好,在延长炉盖寿命、降低工人劳动强度、提高经济效益等方面都具有明显的优势,但由于炉盖的尺寸、质量较大,整块电炉盖预制块的制作和运输难度均较大,因此结合浇筑的工艺特点,依照“拼积木”的原理,按照每个电炉盖的大小、厚薄和形状,浇筑成炉盖预制块,结合运输和吊装能力,运到钢厂直接组装使用。

由于预制块炉盖采取拼装组合的工艺,因此安装方便、迅速,能显著缩短电炉盖的安装周期;同时由于采用浇筑成型方法,消除了剥落掉片或掉砖塌顶等不安全因素,能明显降低生产成本。但高铝质预制块炉盖能否取代高铝砖炉盖,关键在于预制块炉盖隔热保温性能的好坏及使用寿命的长短,因此需要从热力学角度对高铝砖炉盖和预制块炉盖的温度和应力水平进行分析和比较。

1.2.4 混铁炉

混铁炉是高炉和转炉之间的炼钢辅助设备,主要用于调节和均衡高炉和转炉之间铁水供求。混铁炉一般分为 300 t、600 t、900 t 和 1300 t,它具有铁水储存、保温、混匀等功能。传统混铁炉传动机构为齿轮齿条式结构,其结构庞大,占地空间较大,相应的设备和土建投资大。混铁炉实物图如图 1.6 所示。

传统混铁炉的前端传动机构主要由电机、高速端联轴器、制动器、减速机、低速端联轴器和传动轴组成。通过对其结构进行分析,可以发现传统混铁炉传动机构的设计制造存在以下问题:① 炉前前端传动机构庞大,占地面积大,投资成本高。② 齿轮、齿条为大型非标锻件结构且加工难度大,铜套材料为特殊材料,价格高,其整体投资成本较大。③ 尾端传动装置设置铜套来保证齿轮和齿条的啮合,滑动铜套与齿条间存在滑动摩擦,需设置润滑装置,增加了维护成本,降低了传动效率。④ 齿轮、齿条的安装难度大,齿轮、齿条若出现一个齿磨损或断齿,则必须更换整个齿条,更换难度大,维修成本高。