

文铁铮 郭玉珍 著

轧辊制造技术新论

OVERVIEW OF ROLL NEW TECHNOLOGY
AND FUTURE DEVELOPMENT

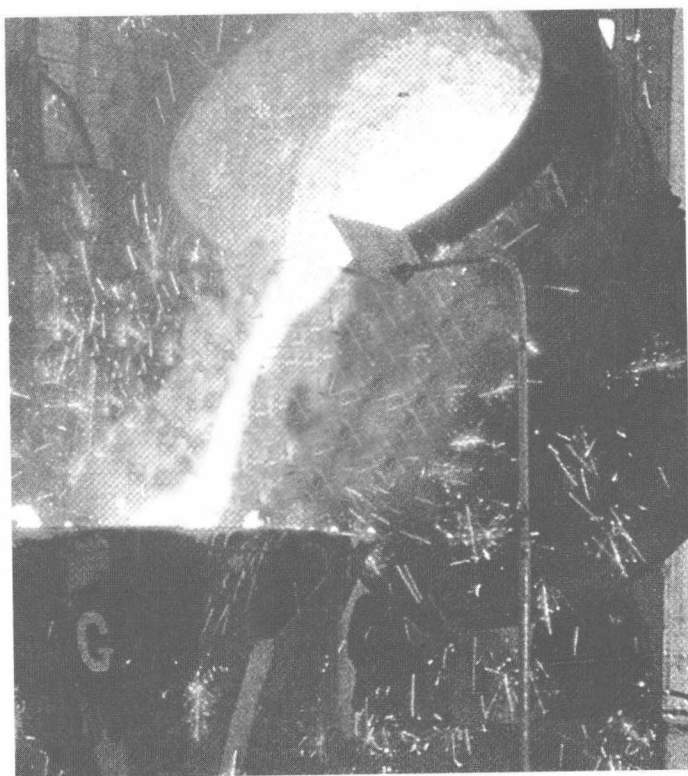


河北出版传媒集团

轧辊制造技术新论

OVERVIEW OF ROLL NEW TECHNOLOGY
AND FUTURE DEVELOPMENT

文铁铮 郭玉珍 著



河北出版传媒集团
河北科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

轧辊制造技术新论/文铁铮, 郭玉珍著. —石家庄:
河北科学技术出版社, 2014. 1

ISBN 978-7-5375-4949-3

I. ①轧… II. ①文…②郭… III. ①轧辊—制造
IV. ①TG333.17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 013832 号

轧辊制造技术新论

文铁铮 郭玉珍 著

出版发行	河北出版传媒集团 河北科学技术出版社
地 址	石家庄市友谊北大街 330 号(邮编:050061)
印 刷	河北新华第一印刷有限责任公司
开 本	787 × 1092 1/16
印 张	23.25
字 数	568 千字
版 次	2014 年 2 月第 1 版 2014 年 2 月第 1 次印刷
定 价	138.00 元

序

X U

轧辊对于钢铁工业的发展，特别是轧钢厂的发展，是非常重要的。在新中国成立以前，我国轧辊制造工业几乎处在空白状态。新中国成立后，特别是改革开放政策实施以后，我国的轧辊制造业进入了快速发展阶段，轧辊制造技术在引进国外技术的基础上突飞猛进。其中邢台冶金轧辊厂是我国重要的轧辊制造中心，在业内具有领头羊的地位。

文铁铮、郭玉珍两位是我国资深的轧辊专家。自20世纪50年代大学毕业以后，就参与了邢台轧辊厂的筹建、生产工作，并一直从事轧辊制造工艺研究、质量研究、产品开发以及扩建、技术改造等方面的专业技术工作。积累了大量的知识和丰富的经验，作出了重要贡献。他们视野宽阔并注重理论思考，注重理论联系生产实际，而且长期在生产一线反复实践验证。此次在前著《冶金轧辊技术特性概论》的基础上，进一步潜心研究并默默实干，撰写了姊妹篇——《轧辊制造技术新论》，这是他们进入退休年龄以后，孜孜以求，不断总结，实际上是反哺社会和贡献国家的心迹之反映，实属难能可贵。

该书遵循理论联系实践的指导思想。图文并茂，引注周详，特别是着眼于解决轧辊生产过程中的关键工艺技术问题：一方面在相当大程度上展示了我国轧辊制造技术的进展和水平；另一方面也着眼于为轧辊制造业内人士提供一系列的资料和认识观点，既有理论思考意义，又具有实践参考价值。

该书的出版，相信会对业内科技人员、有关高校师生和科研、设计单位的专业人士大有裨益，并有助于推进我国轧辊制造技术的进步。

中国工程院主席团成员
中国工程院院士

文铁铮

2013.4.25 于北京

前言

QIAN YAN

《轧辊制造技术新论》是《冶金轧辊技术特性概论》的姊妹篇，本书以“新”字为突破口，重点介绍近些年来世界、特别是中国冶金铸造轧辊材质和制造工艺技术的最新研究成果。

国内外轧钢工业技术装备的不断更新和一系列新的轧钢技术的问世，带动了冶金铸造轧辊制造工艺技术的发展和创新。特别是从20世纪末到21世纪初的十余年间，国际上开发出现代化热轧带钢连轧机精轧前段使用的高碳高速钢复合工作辊并成功应用以来，在轧辊制造业中爆发出了一场材质创新的技术大革命。与之同时，热轧带钢连轧机粗轧机架使用的半高速钢、粗轧专用高速钢复合工作辊应运而生，并且都取得了优异的使用效果和良好的经济效益。随着高碳高速钢离心复合工作辊制造和使用技术的日臻完善，又催生了以改进型（或称碳化物增强型，下同）高镍铬无限冷硬离心复合工作辊为代表的一系列改进型轧辊材质新品种，其中包括改进型高铬铸铁和改进型高铬铸钢。

本书以现代热轧宽带钢连轧机用改进型高镍铬无限冷硬离心复合工作辊为起点，依次讨论了改进型高铬铸铁离心复合工作辊、改进型高铬铸钢离心复合工作辊、高碳高速钢离心复合工作辊、半高速钢离心复合工作辊和热作模具钢热轧辊（包括热轧宽带钢连轧机和宽中厚板轧机用热作模具钢二辊粗轧辊、轨梁万能轧机用热作模具钢BD辊和热轧宽带钢连轧机热作模具钢支承辊）材质的化学成分控制、合金元素匹配原则和强化机理、相应的制造工艺技术及其操作要点，以供业内人士在生产实践中参考；与此同时，本书有意列举了不同研究者对相同问题所持的一些相左的观点，以期读者在审视问题时拓宽思路上有裨益。

与轧辊材质创新革命的同时，轧辊造型工艺技术也有了新的发展。其中，采用改性水玻璃有机酯自硬砂造型（或称新型水玻璃砂）在铸造轧辊造型操作中的推广应用，已经逐步发展成为铸造轧辊造型操作的一场绿色革命。本书已有所述及。

此外，当前国内外一批有实力的铸造轧辊制造企业已经将铸件凝固和热处理过程的宏观模拟作为提高轧辊内在质量、缩短生产周期、降低生产成本

的有效手段，本书也作了较为详细的介绍。这些资料是非常有实用价值的。

本书编著过程中，得到了国内外教授、专家、学者和广大工程技术人员的热情支持，提供了轧辊专著、大量的技术资料 and 重要的科研成果；特别应该提到的是国内多家知名铸造轧辊制造企业，创造条件协同作者完成了再认识、再实践的升华过程，最终成就此书。特此，作者表示深深的谢意。

限于知识水平和实际经验不足，书中难免出现缺点和错误，恳请批评指正。

文铁铮 郭五珍

2013年3月30日

《轧辊制造技术新论》一书酝酿良久，曾经几度提笔，也欲一蹴而就，但始终未能如愿，一直拖延至 2012 年春才开始执笔。究其原因，一是已经退休，心理状态十分复杂，口说淡定，心不能静；二是由于近年来国内外轧钢技术的飞速发展，国内大型钢铁企业伴随着国民经济的腾飞，都加速了轧钢设备现代化的技术更新改造。与之配套的铸造轧辊制造行业，共生发展，几乎是一日千里。这样一来，我深恐自身的专业知识和业务经验跟不上形势，编著本书力有不逮，几有放弃的念头。然而，对铸造轧辊专业的深厚情感派生出来的责任心和使命感澎湃于心，驱使着我要竭尽全力去完成《轧辊制造技术新论》一书的出版。

二战名将巴顿将军有句名言“战争是我的全部所需”。制造轧辊于我们也是如此，步入社会伊始，就与之结下了不解之缘。1958 年，我大学尚未结业，被抽调到冶金工业部钢铁司，同时，后来成为我夫人的郭玉珍也从北京钢铁研究院调往冶金工业部，并一道参加邢台轧辊配件厂（1981 年再度更名为邢台冶金机械轧辊厂，以下简称邢台轧辊厂）的筹建工作，我们在冶金部邢台冶金机械轧辊厂筹建工作组中分别承担了该项工程铸钢、铸铁轧辊车间工艺布置图和冶炼非标设备的设计和绘图工作；冶金部工作组与本溪筑炉公司部分工程技术人员、东北工学院派出的 30 余名师生组成了邢台轧辊厂工程设计室；随后，冶金工业部武昌钢铁工业学校分配来邢台轧辊厂一批毕业同学，大伙齐心协力、全身心地投入企业的工程设计工作。邢台轧辊厂的开工建设是在 20 世纪 50 年代末那个“边设计、边施工，大干快上”的特殊年代，一切都必须打破常规，我们这批年轻人，成了企业工艺流程和非标设备设计的主要技术人员。以鞍钢轧辊厂为模板，冶金工业部北京钢铁设计院孙德和总工程师、第一机械工业部第一设计研究院孙云鸾总工程师、冶金工业部阮智成和时钟哲工程师等一批老前辈的亲自指导下，才顺利完成了设计任务。遥想当年，亲聆几位老前辈的教诲，受益匪浅。他们的知识造诣和敬业精神，一直是我们的楷模，十分感念几位恩师把我们带入铸造轧辊制造的前沿队伍行列。

1975 年下半年，日本日立金属株式会社胜田工场，向中国派出了以吉

田公隆和竹崎安刚先生为首的轧辊技术访问团。冶金工业部钢铁司决定,由邢台轧辊厂、鞍钢轧辊厂、武钢轧辊厂、北京钢铁设计院、北京钢铁研究院和沈阳重型机器厂等单位的专业技术人员组成了中方接待组,指派邢台轧辊厂铸铁车间副主任郭玉珍以武汉钢铁公司铸造工程师的身份为首席谈判代表。期间,日方介绍了发达国家现代化热轧宽带钢连轧机使用的轧辊新材质、新的检测仪器和以离心复合轧辊的制造工艺为重点的新技术。而后,冶金工业部钢铁司举办了全国冶金轧辊生产工艺技术研讨会。这是我国铸造轧辊界开始摒弃“与世隔绝”旧式观念,面向世界,面向未来,接受新事物的滥觞。

20世纪70年代末,武钢从日本引进了我国第一套1700现代化宽带钢热连轧机,设计年产量为306万t,1978年投产。当时,为这套连轧机提供国产优质铸造轧辊的任务,迫在眉睫地摆在了我们面前。尽快承制这批现代化的大型优质铸造轧辊是邢台轧辊厂责无旁贷的历史责任。然而,邢台轧辊厂当时的状况,无论是工艺技术,还是装备水平都十分落后。关键时刻,冶金工业部钢铁司果断确定了加强科研和出国调研并举的方针,并指导企业全力贯彻执行。一方面调集国内专家学者,开展宽带钢热连轧机粗轧和精轧前段需要的合金半钢轧辊和精轧后段需要的离心复合铸铁工作辊的研制;另一方面多次组织专业队伍走出国门,前往发达国家具有国际先进水平的冶金轧辊制造企业,进行技术考察和洽谈技术合作项目。历时四年时间,通过多次调研和反复比对,经国家批准,最终与德国刚特门—派泼(GP)轧辊有限公司签订了现代化宽带钢热连轧机所需要的大型优质铸造轧辊的全套工艺技术和关键工艺装备的转让合同;并指派北京钢铁设计院负责配套的工程施工设计。自这项工程竣工投产以后,邢台轧辊厂致力于不间断的更新改造,为企业后续发展奠定了坚实的基础。企业接连登上新台阶,并整体改制为邢台冶金机械轧辊股份有限公司乃至邢台机械轧辊(集团)有限公司,成为国内现代冶金轧辊制造工艺技术不断创新的领军企业。为推动我国轧钢工业的健康发展,功不可没。

在这个发展历程中,我有幸全面参加了武钢1700配套项目,包括从科研、考察、项目洽谈直至签约的全过程,并在项目设计中,与北京钢铁设计院王振刚主任同为项目技术负责人。在邢台轧辊厂和改制后的邢台冶金机械轧辊股份有限公司(邢台机械轧辊(集团)有限公司)担任总工程师职务的岁月里,有苦有乐,经历过无数次的困扰与奋进。我竭尽全力站立在科研与生产的最前线,努力为企业技术进步和安全生产殚精竭虑,直至退休为止。那一份年华与心血的奉献及事业带给我的快乐与满足与历史同在。迄今

为止，我浸淫轧辊制造领域五十余载，乐在其中，甘之如饴。至此，请允许我套用巴顿将军的那句名言“轧辊是我的全部所需”。

在我任总工程师的时候，鞍钢轧辊厂的王应先总工程师和北京钢铁研究院的邵素云教授联络我，共同商议成立冶金轧辊学术组织。后经中国金属学会轧钢学会批准，指定我们筹建“冶金轧辊学术小组”，王应先后任组长。学术小组而后升级为轧钢学会下属的“冶金轧辊学术委员会”，王应先总工程师当选为首届主任委员。学术委员会挂靠在鞍钢轧辊厂。王应先总工程师、邵素云教授做了大量的工作。王总仙逝后，论技术水平和工作能力，我都不如邵素云教授，缘于我是企业的总工程师，就接任了委员会主任委员，被推举成为当时国内同行的学术领跑人。那些年，有大家的鼎力支持，学术气氛活跃，行业同仁共同努力，为尽快缩短我国冶金轧辊事业与国际水平的差距，作出了贡献。特别是邵素云教授和宝钢费祎若教授级高级工程师，颇具前瞻性，在推广应用国际先进水平的新材质轧辊，提高国内冶金轧辊综合水平方面，贡献卓著。

追溯往日，也有憾事萦怀。1993年前后，发达国家轧钢企业在热轧宽带钢连轧机精轧机组，推广应用高速钢工作辊，呈现出异乎寻常的发展速度；然而，我当时对此反应欠敏，未能充分发挥学术委员会的技术导向和组织推动作用。至今，国内铸造轧辊企业，尚未开创出具有独立知识产权、世界知名品牌的高碳高速钢工作辊。

从2003年初开始，我们进行了新一轮的学习和思考。同时辗转多家国内外轧钢和轧辊制造企业，利用各种机会和多种渠道，收集到了包括美国、英国、奥地利、比利时、西班牙和日本等发达国家出版的轧辊专著，以及以高碳高速钢复合工作辊为重点的冶金铸造轧辊制造工艺技术的论文400余篇。一边学习，消化吸收；一边借助国内知名冶金轧辊制造企业的现有条件，反复实践。这几年是我增长新知识、积累新经验的重要阶段。2006~2008年，一个偶然的机会，我与美国国民轧辊公司高级副总裁 David B. Collins 先生，同时被一家冶金轧辊制造企业聘任为公司高级技术顾问。David B. Collins 先生，在瑞典 AKERS 轧辊公司曾担任过技术领导职务，也是英国出版的《2000年轧辊》一书的编著者之一。共事期间，通过相互切磋技术，使我受益颇多；由于地域文化差异，以及国情的不同，我们也时有争议，事后思量，其实“讨论和争执”本身就蕴含着启迪。

我们沉浸在冶金铸造轧辊事业的半个多世纪，亲历了我国现代冶金铸造轧辊制造工艺技术飞速发展，创造出前所未有的辉煌成就，不单是见证者，更是依随时代成长的幸运儿。凡此种各种原因，时时激励所致，退而难休，须

再次奋起。窃以为己任，有必要将所掌握的成熟技术和几十年沉淀的经验，去粗取精，整理成文，再辅之当前国内外先进工艺技术和理论知识，编著成《轧辊制造技术新论》一书，供读者参考。

竞争永远是推动技术进步的力量之源。企业之间的竞争，应当在行业共性之上，突出自身的独特点，重点放在产品质量、不断开发最佳性价比的新产品和适时的用户服务上。因此，加强行业间基本工艺技术和基础理论的相互探讨，显得十分重要。作者希望《轧辊制造技术新论》一书，能作为加强相互联系的纽带，为提高国内铸造轧辊行业整体水平，推进我国冶金轧辊制造事业，奉上一块垫脚石。

在《轧辊制造技术新论》一书中提出的一些新观点和轧辊制造技术发展新动向，尚待时间来审视；更殷切盼望业内人士再次进行深入研究和实践，以期作出最终判定。

文铁铮

2013年3月30日

目 录

M U L U

第一篇 现代冶金轧辊铸造工艺理论基础

第一章 现代冶金轧辊铸态组织的形成过程	(2)
第一节 概述	(2)
第二节 整体铸造大型热轧辊的凝固过程	(4)
第三节 离心复合工作辊和复合辊环的凝固过程	(7)
第四节 影响宏观组织形成的因素	(10)
第二章 现代冶金轧辊铸造工艺设计原则	(13)
第一节 概述	(13)
第二节 熔炼工艺设计思路	(13)
第三节 球化、孕育和变质处理机理	(16)
第四节 铸造工装内容及其设计程序	(22)
第五节 铸造工装设计经验参数的确定	(24)

第二篇 现代冶金轧辊造型和热处理工艺

第一章 铸造轧辊造型材料	(32)
第一节 概述	(32)
第二节 铸造轧辊造型用型砂	(33)
第三节 铸造轧辊造型用粉状材料	(37)
第四节 铸造轧辊造型用黏结剂及其附加物	(38)
第二章 铸造轧辊工装设计	(48)
第一节 概述	(48)
第二节 冷型设计	(49)
第三节 卧式离心浇注芯部铁水专用漏斗设计	(52)
第四节 铸造轧辊工装设计与制造中的公差确定原则	(54)
第三章 现代冶金铸造轧辊造型工艺	(56)
第一节 概述	(56)
第二节 金属型冷型喷涂料	(56)
第三节 底座箱和冒口箱采用传统黏土石英砂造型	(67)
第四节 铸造轧辊采用改性水玻璃有机酯自硬砂造型	(69)

第五节 离心冷型端盖采用耐火浇注料造型	(82)
第四章 数值模拟技术在冶金轧辊铸造工艺中的应用	(91)
第一节 概述	(91)
第二节 凝固过程的宏观模拟在铸造轧辊生产中应用	(92)
第五章 热处理工艺设计共性问题的讨论	(102)
第一节 概述	(102)
第二节 铸造轧辊热处理的主要工艺要素	(102)
第三节 第一类回火脆性	(104)
第四节 热应力低温脆性或冷脆	(105)
第五节 铸造轧辊热处理时容易被轻视的操作细节	(108)
第六节 对轧辊淬火前预冷的再认识	(112)
第七节 宏观模拟在轧辊热处理中的应用	(114)

第三篇 现代冶金铸造轧辊制造工艺技术

第一章 热轧工艺装备技术现状及发展趋势	(122)
第一节 概述	(122)
第二节 我国热轧 H 型钢、轨梁应用现状及发展趋势	(123)
第三节 我国钢轨应用现状及发展趋势	(126)
第四节 我国热轧宽带钢应用现状及发展趋势	(129)
第五节 我国宽中厚板应用现状及发展趋势	(136)
第二章 改进型高镍铬无限冷硬离心复合铸铁工作辊	(141)
第一节 概述	(141)
第二节 改进型无限冷硬离心复合铸铁工作辊的冠名	(142)
第三节 改进型高镍铬无限冷硬离心复合铸铁工作辊的技术特性	(143)
第四节 工艺因素对改进型高镍铬无限冷硬离心复合铸铁工作辊性能的影响	(154)
第五节 对影响改进型高镍铬无限冷硬离心复合铸铁工作辊基体组织和性能机理的探讨	(166)
第六节 改进型高镍铬无限冷硬离心复合铸铁工作辊工序操作要点	(171)
第三章 改进型和常规高铬复合铸铁工作辊	(179)
第一节 概述	(179)
第二节 强碳化物形成元素对改进型或常规高铬铸铁轧辊性能的影响	(181)
第三节 氮在改进型或常规高铬铸铁轧辊中的行为及影响机理	(184)
第四节 对改进型高铬铸铁轧辊辊身表面斑带缺陷的讨论	(188)
第五节 热带连轧机精轧前段高铬铸铁工作辊离心复合工艺讨论	(192)
第六节 辊身工作层中残余奥氏体含量的控制	(199)
第七节 改进型高铬铸铁离心复合工作辊工序操作要点	(201)

第四章 改进型和常规高铬铸钢复合热轧工作辊	(208)
第一节 概述	(208)
第二节 强碳化物形成元素对改进型高铬铸钢粗轧工作辊组织和性能的影响	(211)
第三节 改进型高铬铸钢粗轧工作辊化学成分设计	(217)
第四节 热处理工艺对高铬铸钢轧辊组织和性能的影响	(220)
第五节 稀土变质对高铬铸钢轧辊组织和性能的影响	(225)
第六节 高铬铸钢离心复合粗轧工作辊工序操作要点	(227)
第五章 高碳高速钢离心复合工作辊	(231)
第一节 概述	(231)
第二节 关于离心铸造高速钢轧辊统一称谓的商榷	(239)
第三节 化学成分对高碳高速钢离心复合工作辊组织和性能的影响	(240)
第四节 变质处理对高碳高速钢离心复合工作辊组织和性能的影响	(254)
第五节 高碳高速钢碳化物特性、形状及其分布特征	(267)
第六节 热处理对高碳高速钢组织和性能的影响	(272)
第七节 高碳高速钢离心复合工作辊工序操作要点	(291)
第六章 半高速钢离心复合工作辊	(295)
第一节 概述	(295)
第二节 热带钢连轧四辊粗轧机对半高速钢离心复合粗轧工作辊的性能要求	(296)
第三节 关于半高速钢粗轧工作辊材质耐热疲劳和抗热裂性能研究	(298)
第四节 粗轧用半高速钢轧辊材料中碳化物的氧化行为	(300)
第五节 化学成分对半高速钢离心复合粗轧工作辊组织和性能的影响	(305)
第六节 半高速钢离心复合轧辊工序操作要点	(310)
第七章 热作模具钢轧辊	(312)
第一节 概述	(312)
第二节 化学成分对热作模具钢轧辊组织和性能的影响	(313)
第三节 热处理对热作模具钢轧辊组织和性能的影响	(320)
第四节 热作模具钢铸造轧辊生产工艺要素的讨论	(329)
参考文献	(343)

第一篇

现代冶金轧辊铸造 工艺理论基础

轧
辊
制
造
技
术
新
论

第一章

现代冶金轧辊铸态组织的形成过程

第一节 概 述

现代冶金铸造轧辊和辊环种类繁多,如“前言”中所提到的,本章节仅讨论包括现代化热轧宽带钢连轧机、宽中厚板轧机需要的不同材质的离心复合工作辊、各类整体和复合铸钢支承辊以及热轧 H 型钢、轨梁万能轧机需要的各类整体铸造轧辊和离心复合辊环铸态组织的形成过程。

铸造轧辊和辊环由液态(钢液或铁液)转变为固态,形成铸件的状态变化和常规合金相同,称为一次结晶或凝固。文献^[1]指出:“一次结晶”和“凝固”这两个术语虽然指的是同一状态的变化过程,但是它们在含义上是有区别的。前者主要是从物理化学的观点出发,研究液态金属的生核、成长和结晶组织的形成规律;后者是从传热学的观点出发,研究铸件与铸型的传热过程、铸件断面上凝固区域的大小、凝固方式与轧辊铸件质量的关系以及铸件的凝固时间等。

国内目前制造现代大型冶金铸造轧辊的工艺大同小异,其中,热轧宽带钢连轧机需要的高镍铬无限冷硬铸铁、高铬铸铁、高铬铸钢、高碳高速钢工作辊,宽中厚板轧机需要的高镍铬无限冷硬铸铁、高铬铸铁工作辊都是采用离心复合铸造工艺,而离心复合铸造工艺中包括立式和卧式两种方式。用卧式离心复合铸造工艺生产的工作辊,辊身部位最多存在两种(工作层和芯部)或三种材质(工作层、中间层和芯部)的组合;各类铸钢支承辊和不同用途的热轧辊,除采用包括底注、顶注和无流浇注等整体铸造工艺以外,尚采用冲洗复合铸造工艺;对于热轧 H 型钢、轨梁万能轧机使用的离心复合辊环,至目前为止,国内大型轧辊制造企业,通常同时利用盘式和卧式离心浇注机生产。除高铬铸铁材质的辊环以外,其余各类材质的复合辊环,几乎都是采用两种材质(工作层和芯部)的复合铸造工艺。而生产高铬铸铁复合辊环时,间或采用三种材质(工作层、中间层和芯部)的复合铸造工艺,也有少数轧辊制造企业采用单一材质、分批出铁、进行成分微调、多次浇注的复合铸造工艺。

由于现代大型冶金铸造轧辊,不单产品本身属于特厚、特大型铸件,而且新型铸造轧辊材料的发展日新月异,日趋朝多元化、高合金化和微量合金化方向发展,工艺技术难度进一步加大。20 世纪 80 年代以前较长一个阶段,国内外铸造轧辊制造企业在实际生产中,受试验技术和试验条件的限制,只局限于测定轧辊材质的液相线和固相线温度,以及采用反复试验的方法来分析缺陷产生的原因,以推理的方式改进工艺设计,调

整铸造工装和浇注条件对轧辊凝固过程的影响,来消除缺陷。因此试制周期偏长,生产过程中的一次性合格率低、生产成本增高。

据了解,除日立金属株式会社胜田工场以吉田公隆和竹崎安刚先生为首的日本轧辊技术来华访问团 1975 年下半年向中国展示了一张辊身长达 3m 以上的宽厚板工作辊的低倍组织照片、作者于 20 世纪 70 年代末赴日本日立金属株式会社胜田工场考察时亲眼目睹了宽厚板工作辊的低倍组织检测试样以来,迄今为止,还没有发现国内外有关铸造轧辊制造企业和研究院所发表过类似的大型铸造轧辊及离心复合辊环凝固过程的热分析试验研究和实物低倍检测工作的文献资料。至于对冶金铸造轧辊材质的结晶潜热、导温系数、铸型的导温系数和轧辊温度场的实际测定,均未见有人涉足的痕迹。

不容忽视的是,从 20 世纪 60 年代以来^[28],随着计算机技术、数值模拟技术、计算力学和计算传热传质学的迅速发展,工业发达国家非常注意将最新的三传(传热、传质和动量传输)理论应用于工程设计,铸造领域也不例外。从 60 年代开始凝固过程数值模拟,80 年代开始充型过程数值模拟和铸件应力应变数值模拟,到 90 年代兴起铸件微观组织数值模拟的研究,数值模拟技术已渗入到铸件形成过程的各个方面。CAD/CAE/CAM/CIMS 技术、并行技术(Current Technology)、快速原型制作技术(Rapid Prototype Manufacturing)等高新技术不断被采用和集成,使铸件从设计到完成制作的周期越来越短。

经过几十年的发展和完善,铸造成形工艺模拟和工艺 CAD 技术已发展成为一种先进制造技术。随着在异型铸件生产上的推广应用,1997 年我国鞍钢机械制造有限公司铸钢厂在沈阳铸造研究所和哈尔滨工业大学协同下,选择鞍钢机械制造有限公司铸钢厂的 $\phi 1200\text{mm}$ 轧辊作为生产验证的典型范例,成功开展了“大型铸钢轧辊三维充型与凝固过程数值模拟”的应用研究,此研究为我国首创。

2003 年,第一重型集团公司与中国科学院沈阳金属研究所合作,选择 $\phi 1500\text{mm} \times 6140\text{mm}$ 大型铸钢支承辊为对象,应用 View Cast 软件模拟实际铸钢支承辊的凝固过程,进行了“大型铸钢支承辊充型和凝固过程数值模拟”,发现原始工艺易导致缺陷残留在上下辊颈中。根据计算机模拟结果改进原工艺设计,调整冷型壁厚,达到良好效果。通过对原工艺和改进工艺进行模拟对比,模拟结果显示改进工艺可以使辊身与下辊颈快速凝固,整个铸件顺序凝固,从而使缩孔、宏观偏析最重的位置集中在冒口部位。采用底注式切线型内浇道的浇注系统,金属液充型过程平稳。

2009 年,中钢集团邢台机械轧辊有限公司与北京科技大学材料科学与工程学院合作,选择 $\phi 1550\text{mm} \times 1700\text{mm}$ 大型复合铸钢支承辊为对象,开展了“复合铸钢支承辊淬火过程温度场数值模拟与实验验证”的研究。为我国计算机、数值模拟技术在大型铸造轧辊热处理方面的应用,又掀开了新的一页。

至此,电子计算机对冶金轧辊生产技术进步的影响,远不止于实现自动化。计算机技术已经使冶金轧辊生产工艺技术从凭经验进行生产的落后状态,朝着正确预测工艺结果的基础上实施精确控制的方向飞跃。工艺数学模型和计算机模拟技术在铸造轧辊制造上的全面推广应用,已成为我们必须应对的历史转折点。

由于计算机模拟技术计算量庞大,有些软件大部分需要在工作站上运行,只有简单

的工装设计、工艺设计和温度场计算才能在常规计算机上运行。尽管上述软件在欧美发达国家铸造企业中获得了较广泛的应用,取得了很好的经济效益,但日本铸造企业在软件的使用上落后于美国。据了解,日本全国 1500 家铸造企业中,只有 150 家应用凝固模拟软件优化浇注系统,部分软件虽然也已进入中国大型企业和科研院所,如 PRO-CAST、JS-CAST、NOVACAST 等。应当指出的是,运行上述软件时,对轧辊生产数据的准确度要求很高。长期以来,国内主要冶金轧辊制造企业始终不注重生产过程数据的积累和分类运用,这一弊端已经成为企业生产技术管理中的软肋;加上工程模拟软件价格普遍较高,都在几万美元以上,因此目前国内有能力使用上述软件的冶金轧辊铸造厂家还不是很多。

综上所述,对于现代大型冶金铸造轧辊和辊环的凝固过程,本书不可能以计算机模拟技术为基础进行分类分析。为了使问题简化,只能借助于已经面世的常规大型铸件的基础理论,以及结合近年来业内取得的科研成果和成熟经验,包括工程模拟技术等来进行讨论。

第二节 整体铸造大型热轧辊的凝固过程

目前,国内外生产整体铸造的支承辊和不同用途的热轧辊除少数企业采用无流浇注(图 2)和顶注工艺(图 3)以外,几乎无一例外地采用图 1 所示的底注工艺。

一、底注工艺生产整体铸造轧辊的凝固过程

采用图 1 所示的底注工艺,仍是目前国内外生产大型整体铸造支承辊和不同用途热轧辊的典型铸造工艺技术。成品钢水(或铁水)沿直型浇注砖管,通过切线或双切线内浇管(图 2)进入型腔。由于配置有一定高度的直浇管系统,它对钢水(或铁水)起到组织的静压头以及借助调整钢水(或铁水)流股至漏斗之间的距离所产生的动压头的叠加效应,促使钢水(或铁水)以高速旋转的方式进入型腔;随之,仍保持高速旋转的方式上升,直至冒口内的规定的高度。其优点是:有助于将随钢水(或铁水)一并进入型腔内的浮渣和气体,顺利上浮;同时可以调整浇注系统相关尺寸和进口方式,提高钢水(或铁水)的压力和旋转力,实现快的浇注速度,减小轧辊上下温度差,促使钢水(或铁水)在型腔内形成一个顺序凝固的温度场,保证轧辊内部宏观组织的致密性。

铸造轧辊底注工艺的缺点是,当浇注系统设计不合理、浇注速度控制不当,一方面极易造成轧辊下部温度偏高,在辊身与下辊颈相接部位形成一个“热节”区和在辊身与上辊颈相接部位形成“V”偏析,使强度降低;另一方面,由于轧辊上部

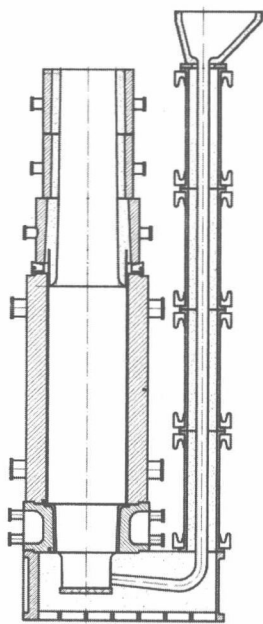


图 1 大型整体铸钢轧辊底注浇注工艺