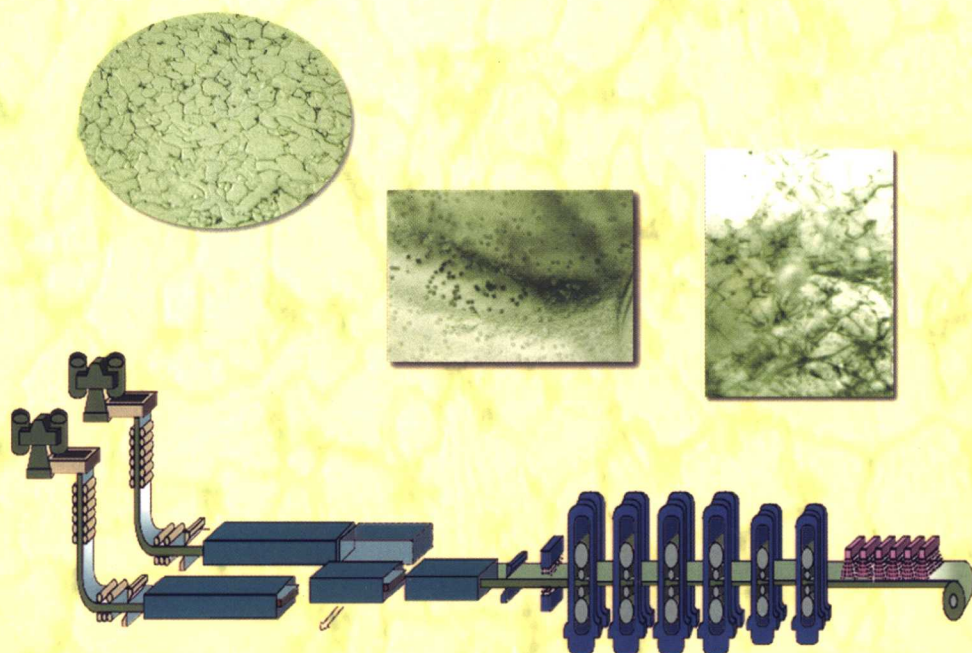


薄板坯连铸连轧 钢的组织性能控制

康永林 傅杰 柳得棣 于浩 著



冶金工业出版社

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

薄板坯连铸连轧 钢的组织性能控制

康永林 傅 杰 柳得櫓 于 浩 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2006

内 容 简 介

本书全面、系统地介绍和论述了薄板坯连铸连轧从冶炼、连铸到热轧和层流冷却的全过程以及产品组织性能的特征分析与控制。全书包括：概论，薄板坯连铸连轧钢的冶金质量控制，薄板坯连铸连轧钢的轧制工艺控制，层流冷却工艺控制与钢的组织连续冷却转变，薄板坯连铸连轧典型钢种的变形抗力及模型，薄板坯连铸连轧低碳钢的组织细化，CSP工艺低碳钢的组织及控制，薄板坯连铸连轧钢在高温区的第二相粒子析出，薄板坯连铸连轧钢中氮化物析出形态与机制，微合金元素碳、氮化物和弥散沉淀，薄板坯连铸连轧钢的强化机制，低碳高强度钢中的纳米铁碳析出物及其对钢力学性能的影响，薄板坯连铸连轧钢的组织与性能特征等。

本书可供高等院校和科研院所有关专业的师生、研究人员阅读，也可供钢铁冶金、连铸和轧钢生产企业的工程技术人员阅读和参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

薄板坯连铸连轧钢的组织性能控制/康永林等著.

—北京:冶金工业出版社, 2006. 3

ISBN 7-5024-3894-7

I. 薄… II. 康… III. ①薄板—板坯—连续铸钢
②薄板轧制: 连续轧制 IV. ①TF777.7 ②TG333.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 144255 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 张登科 美术编辑 李 心

责任校对 侯 珺 李文彦 责任印制 牛晓波

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

2006 年 3 月第 1 版, 2006 年 3 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 25 印张; 475 千字; 379 页; 1-4500 册

79.00 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

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

序

薄板坯连铸连轧是将现代电炉/转炉冶炼、精炼、连铸、连轧等工序的先进技术，以连续性-紧凑性为原则，科学地耦合起来的一项集成创新工程，是一种先进的钢铁制造流程。与钢材的常规生产流程相比，薄板坯连铸连轧流程通过动态-有序、准连续-紧凑地运行，过程物质、能量（温度）等参数在过程运行的时间轴上耦合，具有独特的变化规律（特别是凝固冷却过程中的析出规律），这些特点反映在产品特征上具有组织细化、析出强化、强韧性好等特征。

原冶金工业部和中国工程院对薄板坯连铸连轧技术在我国的发展给予了高度重视。1996年在原冶金工业部的领导下，珠钢、邯钢、包钢决定从德国 SMS 公司引进 CSP 技术。1999 年我国第一条 CSP 生产线在珠钢投产。继而，2002 年 3 月，中国工程院产业工程科技委员会成立了“薄板坯连铸连轧技术交流与开发协会”，目的是为了促进我国薄板坯连铸连轧技术的发展。目前，我国已成为世界上薄板坯连铸连轧产能最大的国家，在薄板坯连铸连轧生产线的投资、新建流程的合理性、达产速度、产量规模及运行指标等方面已达到国际先进水平，并开发了许多具有自主知识产权的创新技术。

珠钢电炉—CSP 生产线是我国第一条薄板坯连铸连轧生产线，也是我国迄今唯一一条电炉流程薄板生产线，由于我国当前废钢及电力紧缺，决定了珠钢生产线投产后必须走生产高附加值产品的道路。为此，珠钢与北京科技大学合作，产学研结合，多学科结合，开发了含碳量小于 0.06%， $\sigma_s > 400\text{MPa}$ 的集装箱板及不添加微合金元素 V、Nb、Ti 的低碳高强度（HSLC）钢板。在探讨薄板坯连铸连轧所生产的钢板强度明显较高原因的过程中，北京科技大学与珠钢合作项目组先后发现了在普通成分的低碳钢中存在大量的纳米

尺度的硫化物、氧化物、AlN 及铁碳析出物，并提出了钢的组织性能综合控制理论，即通过冶金质量控制和轧制、冷却工艺控制，实现钢的组织性能的综合强化技术——细化组织与沉淀析出的综合强化技术。发现在低碳钢中，存在着不同种类的纳米尺度析出物（包括铁碳析出物），它们对钢的沉淀强化发挥着不可忽视的重要作用，基于对 A_1 温度以下铁素体中碳析出行为的控制，研究提出了一种回火快冷提高低碳钢力学性能的方法。关于低碳钢及低合金钢中纳米尺度析出物（包括铁碳析出物）及其对钢力学性能的影响的研究值得广大冶金科技工作者关注，因为它可能导致钢铁制造领域内许多工艺的改进和对一些理论问题的再认识。

北京科技大学康永林教授、傅杰教授、柳得榕教授、于浩副教授合著的《薄板坯连铸连轧钢的组织性能控制》一书较全面、系统、深入地总结了他们在过去六年中在薄板坯连铸连轧方面所做的工作（有些资料是第一次发表），并提出了尚待深入研究的一些问题，对我国薄板坯连铸连轧技术的进一步发展，对其工艺改进及新产品的开发具有指导意义。

研究问题、做学问应该提倡刨根问底，不断追问，追求理想，一方面要学习继承现有的反映客观事物规律的理论；另一方面不能一味迷信书本，要敢做前人没有做过的事，勇于实践，并在实践中敢于否定自己，以求对问题认识的不断深入与完善。发展薄板坯连铸连轧技术是我国进入世界钢铁强国行列的一个重要的切入点，在进一步发展我国薄板坯连铸连轧技术的过程中，应该重视不断创新，特别是原创性。《薄板坯连铸连轧钢的组织性能控制》一书在这方面做了很好的工作，是一本很好的参考书，值得一读，我愿意将其推荐给有关工程技术人员及冶金、材料专业的本科生、研究生们。

殷瑞钰

2006 年 1 月 8 日

序

钢铁是人类文明的基础。根据出土文物的鉴定和研究，中华民族最早使用的金属可能是黄铜（铜锌合金，仰韶文化中期初，约 5500 年前，可能得自含锌铜矿在燃烧不完全的还原气氛、温度不太高的情况下，出土于黄河下游，今陕西、山东地区的小型工具及髮针）、青铜（铜锡合金，公元前 3000 年）。在此基础上，掌握了陨铁（铁镍合金）的加工（公元前十四世纪～公元前九世纪），并在公元前九、八世纪先后发明熟铁和生铁（在伊朗 4000 年前和在古罗马曾出现过冶炼的这类废弃物）。公元前五世纪开始利用生铁条固态脱碳成钢，汉代已用于制作甲片；公元前二世纪发明用液态生铁氧化脱碳半液半固成钢，根据加工程序不同成为三十炼、五十炼、百炼钢，后者制成了曹操、孙权的利器。在发展过程中，铁钢的相继发明和应用于农业、手工业，极大地促进了生产力的发展，城市、商贸出现的繁荣和学术的活跃，为战国时期百家争鸣，继之秦汉之后有选择、以小农经济为基础的儒术独尊，辅之以道佛，使中国的政治体制、世界仅有的封建社会稳固绵延两千多年；其后在公元九、十世纪的唐宋之际，林木消耗过度，环境破坏，逐渐改用煤、焦炼铁，导致炒钢熟铁质量下降（这也是十九世纪贝塞麦转炉炼钢遭遇的困难，几乎破产，后来以加锰才得到解救）。

在欧洲，从丝绸之国到达欧洲的钢在公元三世纪已声漫罗马帝国，载入名史。公元十世纪，印度制作的优秀钢品远销非洲阿比西尼亚，却称来自支那的唐钢，可见中国钢铁技术在世界上的地位。

公元十四~十五世纪, 北欧掌握了生铁冶炼, 时当蒙古王朝。法国冶金史研究者认为北欧生铁冶炼技术源自中国, 还有待确证。前苏联考古学家曾在伏尔加河畔名城萨莱 [当年蒙古帝国中的钦察汗国首都 (1242~1480 年)] 发掘出与西欧技术不同的炼铁遗址, 似乎是生铁冶炼或铸造遗址, 若然极可能源係自中华。

生铁及利用生铁为原料冶炼熟铁和炒钢促进了北、西部欧洲经济的发展, 佐以适应航海指向、征战、向世界扩张、巩固殖民统治需要, 源自中国的“四大发明”。十九世纪中叶, 美国为制造铁板、铁壶, 用生铁炒制熟铁, 雇有至少四位中国工人的 Kelly 受到冷风吹向炉内生铁会提高其温度的启发, 尝试成功了转炉炼钢, 接着被英国贝塞麦进一步发展获得专利, 并用加锰固硫取得了最早转炉炼钢的工业应用。二十世纪中叶, 转炉利用氧气代替空气终于取代了平炉, 彻底改变了钢铁冶金的面貌; 继之以半导体、集成电路、信息技术的发展, 人类文明步入了新的纪元。

二十世纪四十年代钢液连铸试验成功, 创造了先进的连续控制钢液流程。特别是北京科技大学 (当时的北京钢铁学院) 徐宝升教授与重钢三厂密切合作, 在 1957~1958 年自行设计制造了中国第一台连铸机并顺利投产, 只花了 14 个月时间和不到 20 万美金; 接着又在 1960 年, 在世界上首创研究、设计、制作并成功投产了弧形连铸 (较国外早两年多), 这是冶金技术, 特别是钢铁冶金技术的一次重大革命, 它不仅是流程及加工过程的连续化、高效化, 它也提供了对组织性能更有效控制、改善的创新机会。

二十世纪八十年代末出现的薄板坯连铸连轧技术, 避免了过去钢材成形加工时冷却—再加热—再加工—冷却过程对组织不利的影响以及热能的过多消耗, 并允许通过调整碳、氮等成分, 提高熔点, 缩小液固相区间, 阻止大型夹杂物形成, 化粗为细, 变害为利, 并使废钢得到经济有效利用。

在过去的半个多世纪中, 随着晶体中位错存在的证实及其运动的晶体学和力学理论的发展, 对金属及其化合物结构、形变等

取得了比较深入的理解,不过许多应用的公式都是在简化条件下导出的,或只适用于理想的组织,应用于对本书中观察到的微细区域和颗粒的行为,如晶粒度与强度的定量关系,疲劳强度的概念等,以及内弧、外弧面组织性能差别及不均匀性等的影响,还有待进一步的深入研究。可以期待,这一成果和本书中提供的现象观察将为进一步发展高强度、长寿命碳钢、微合金钢及其冶炼、加工、性能的理论 and 工艺研究提供新的启示和创新的园地,为将钢及合金中组织、结构、性能中不利因素转化为有利因素提供新的思路。

本书记载提供了有关 CSP 流程薄板生产的大量数据和初步分析观察结果,为进一步发展这一技术,并为我国新建的类似生产线提供了宝贵的参考资料和研究对象。

书中的研究成果和宝贵的数据是广州珠钢领导的支持、技艺纯熟的工人师傅和技术人员的亲密合作以及与北京科技大学钢铁冶金、材料加工、材料物理等多学科、跨学科师生共同勤奋努力、密切结合、辛勤劳动、生产研究相结合的成果,是理论和实践密切结合的结晶,也是对党和国家提出坚持“自主创新”,培养具有创新能力人才,培养为建设国家、促进社会和国力发展而忠诚服务人才,产学研结合的成果。珠钢发展新型薄板的经验也是引进、消化、吸收、再创新的体现。

珠钢的钢产量只占我国钢产量的一小部分,生产研究队伍有限,但在生产技术及理论研究中,在承受着巨大的经济压力和繁重的生产任务条件下,仍然投入大量人力、物力,创造条件,在线取样,提供研究,是本书研究获得宝贵数据和实验观察的根本条件,也为进一步研究、发展生产及所需新的工艺流程提供可以期待的条件,为钢铁材料工程技术及其科学的发展创新创造了有利前景;正如提供薄板坯连铸连轧设备的国外企业的负责人所赞誉的:“我们告诉你们如何用好我们的设备,而你们指导了我们如何更好地发挥这些设备的作用”。

祝愿薄板坯连铸连轧这一新流程及其设备得到进一步发展,所创造的工艺和导致的理论认识将使钢铁冶金学、金属学乃至合金强度学、钢铁疲劳理论等有更大提高。

PhD DEng hc(Birmingham)

DSc(McMaster) DUniv. (Surrey)

中国科学院院士 北京科技大学 教授

柯俊

2006年1月10日

前 言

1989年,美国印第安纳州的纽柯拉福兹维莱厂的电炉—CSP (Compact Strip Production) 生产线投产,这条生产线是世界上第一条薄板坯连铸连轧生产线,它以紧凑为特点,集中了当时的电炉冶炼、精炼、连铸、连轧最先进的技术,是一项卓越的集成创新成果,它一投产就显示出了强大的生命力。不同公司开发了不同类型的薄板坯连铸连轧技术,经过不断改进,技术日臻完善。由于CSP技术开发早,技术成熟,设备及工艺相对可靠,故投产和在建的生产线条数多,目前世界上已投产的40多条薄板坯连铸连轧生产线中,CSP生产线超过60%。

我国已投产和在建的CSP生产线有6条(珠钢、包钢、邯钢、马钢、涟钢、酒钢),FTSR生产线3条(唐钢、本钢、通钢),ASP生产线3条(鞍钢2条、济钢1条)。生产能力已跃居世界第一。广州珠江钢铁有限责任公司(简称珠钢)于1999年8月投产的CSP生产线,是我国第一条也是迄今唯一的一条电炉薄板坯连铸连轧生产线,继珠钢之后,我国投产和在建的其他薄板坯连铸连轧生产线均是转炉流程。

从1999年开始,北京科技大学与珠钢合作,针对我国电炉钢生产的状况、珠钢的地理位置及电炉—CSP的特征,提出不添加昂贵的微合金元素V、Nb,生产性能与400MPa级的低合金高强度钢(HSLA钢)相当的低碳高强度钢(HSLC钢),并利用废钢中微量的杂质元素Cu、Ni、Cr,生产集装箱板,开展了“薄板坯连铸连轧技术应用创新研究”及“薄板坯连铸连轧工艺基础及钢的组织性能特征研究”,取得了具有理论和技术意义的创新成果。2000年10月“薄板坯连铸连轧工艺基础及钢的组织性能特征研究”作为一个专题

列入国家重点基础研究发展规划“新一代钢铁材料的重大基础研究”项目中。2002年3月,由中国工程院产业科技委员会发起的“薄板坯连铸连轧技术交流与开发协会”在北京成立,2002年7月在广州召开了“薄板坯连铸连轧技术交流与开发协会”第一次交流会。同年12月,中国金属学会在广州召开了“第一届薄板坯连铸连轧国际研讨会”。

北京科技大学与珠钢合作开发了以氮代氩电炉底吹、低碳低氮电炉钢生产、电炉终点控制等一系列创新技术,使珠钢生产的ZJ330钢(成分与Q195钢相近)的屈服强度达到330~390MPa,比普通的Q195钢提高约一倍,伸长率为33%~39%,率先实现了400MPa级的铁素体-珠光体类型钢中HSLC钢的产业化,并研制成功了高附加值的集装箱板,珠钢成为世界上最大的集装箱板生产基地。2002~2003年,“薄板坯连铸连轧技术应用创新研究”项目获广东省科学技术进步奖一等奖、冶金科学技术奖特等奖、国家科学技术进步奖二等奖。“钢的组织性能综合控制理论及应用——薄板坯连铸连轧工艺基础及钢的组织性能特征研究”项目获教育部科学技术进步奖一等奖,并入选“2003年度中国高等学校十大科技进展”。

北京科技大学和珠钢合作项目组在大量的实验研究、理论分析和生产性试验基础上,提出了“钢的组织性能综合控制(ICMP—Integrated Control on Microstructure and Property of Steels)理论”。综合控制有两层含义,一是通过冶金质量控制(MQC)与轧制工艺控制(RPC),即对薄板坯连铸连轧流程中各工序的综合控制,实现钢的组织性能的综合控制(ICMP);二是在低碳高强度钢中,对细晶强化与沉淀强化的综合控制。具体而言,ICMP包含了钢的冶金成分优化设计,冶炼过程中的终点成分控制和洁净度控制,连铸过程中的凝固组织控制,热轧及轧后冷却过程中的组织转变、析出和相变控制等。

在分析薄板坯连铸连轧钢板强度提高的各因素时,我们如所预期观察到了在低碳高强度钢中,存在一定量的纳米级氧化物、硫化物、氮化物和碳化物,对其形成机制及其对钢组织性能的影响进行

了大量分析、研究,引起了国内外学者的很大兴趣。

本书涉及到薄板坯连铸连轧从冶炼、连铸到热轧和层流冷却、卷取的全过程以及产品的组织性能的特征分析与控制。在第1章概论中,着重分析了薄板坯连铸连轧的工艺特点、我国薄板坯连铸连轧技术发展的特征,对比了电炉薄板坯连铸连轧与转炉薄板坯连铸连轧的异同,概述了钢中纳米析出物的析出原理、作用与控制技术以及薄板坯连铸连轧产品开发及关键技术分析。第2章为钢的冶金质量控制。第3~5章为轧制工艺控制,包括轧制工艺过程和层流冷却控制技术、钢的连续冷却与组织转变、典型钢种的变形抗力及模型等。第6、7、8章分别介绍了薄板坯连铸连轧钢的组织细化机理、奥氏体组织演变规律和再结晶,钢中纳米级氧化物、硫化物的析出特征及其对钢组织细化的作用以及纳米氮化物和碳化物的析出特征及其对钢的沉淀强化作用,钢的凝固组织与带状组织控制等。第9章讨论了低碳钢中氮化物的析出形态与机制。第10章分析了低碳微合金钢中V、Nb、Ti的碳、氮化物弥散沉淀及其对钢的组织性能的影响。第11章介绍了连铸连轧钢的强化机制。第12章重点阐述了低碳高强度钢中纳米铁碳析出物及其对钢力学性能的影响。第13章介绍并分析了薄板坯连铸连轧钢的力学性能特征,特别是HSLC钢的性能特征。希望本书能对整个薄板坯连铸连轧的技术进步有所裨益。

本书共13章,傅杰教授起草了前言并撰写第1章的1.1~1.7节、1.9节,第2章和第12章;康永林教授撰写第1章的1.8节,第3、4、5章;柳得槽教授撰写第7、8、10、11章;康永林教授和于浩副教授共同撰写第6章和第13章;于浩副教授撰写第9章。

作者由衷地感谢柯俊院士、徐匡迪院长、殷瑞钰院士、张寿荣院士、陈先霖院士、干勇院士等长期以来对有关研究的热情支持与鼓励,特别是柯俊院士在碳素钢中纳米析出物的研究方面给我们做了高瞻远瞩、意义深远的具体指导;柯俊院士还和殷瑞钰院士在百忙之中仔细审阅了本书,提出了许多宝贵的修改意见,并为本书作序;中国金属学会翁宇庆教授、李文秀教授、苏天森教授和中国钢

铁工业协会兰德年教授在有关研究过程中也给予了热情关怀、支持与鼓励。作者在此一并表示衷心的感谢。

本书中的大量研究工作得到了广钢集团及珠钢的王中丙、张若生、毛新平、陈贵江、徐志如、李烈军、范胜彪等同志以及相关工程技术人员的大力支持与密切合作，没有他们的热情支持和积极有效的合作，许多研究工作的顺利进行和成果获得是不可能的。

北京科技大学的同事们以及研究生参加了有关的试验研究工作，并做出了重要贡献，这里要特别感谢的是周德光博士、许中波博士、王元立博士、王克鲁博士、霍向东博士、王琳硕士、柏明卓硕士和博士生吴华杰、刘阳春等，我们研究成果的取得是与他们的工作和贡献分不开的。

作者感谢国家自然科学基金重点项目“薄钢板连铸连轧过程组织性能控制与检测”(项目号:50334010)及国家重点基础研究发展规划项目“新一代钢铁材料的重大基础研究”(项目号:G1998061500)、国家自然科学基金项目“低碳高强钢中纳米尺寸非平衡相的析出研究”(项目号:50371009)对本书相关研究工作的资助。

由于本书所涉及的面较宽，加之作者水平所限，书中不足之处，恳请读者指正。

作 者

2005年11月21日

目 录

1 概论	1
1.1 薄板坯连铸连轧的工程背景	1
1.1.1 电炉冶炼与炉外精炼	1
1.1.2 连铸	2
1.1.3 连轧	2
1.2 世界薄板坯连铸连轧技术的发展及现状	3
1.3 我国薄板坯连铸连轧技术的发展	5
1.4 转炉流程与电炉流程的共性 & 差异	10
1.4.1 转炉流程与电炉流程的共性	10
1.4.2 转炉流程与电炉流程的差异	13
1.5 薄板坯连铸连轧的工艺特点	13
1.6 钢中纳米析出物的析出原理、作用与控制技术	16
1.6.1 钢中纳米相析出的原理	16
1.6.2 钢中纳米析出物的作用	19
1.6.3 钢中纳米析出物的控制	20
1.7 薄板坯连铸连轧钢的冶金质量控制 MQC 关键技术	20
1.7.1 低氮钢生产关键技术	20
1.7.2 以氮代氩底吹技术	21
1.7.3 终点碳控制技术	22
1.7.4 高效化冶炼技术	22
1.7.5 强化精炼过程技术	23
1.7.6 铸态组织控制技术	23
1.8 薄板坯连铸连轧钢的轧制工艺控制 RPC 关键技术	24
1.8.1 RPC 的关键技术	24
1.8.2 薄板坯连铸连轧生产冷轧基板的技术分析	24
1.8.3 薄板坯连铸连轧生产高性能、高附加值产品的技术探讨	29
1.9 我国薄板坯连铸连轧的发展方向	30
参考文献	31

2 薄板坯连铸连轧钢的冶金质量控制	33
2.1 冶金材料问题的研究思路及冶金质量控制.....	33
2.1.1 成分控制.....	33
2.1.2 纯洁度控制.....	34
2.1.3 铸态组织控制.....	36
2.2 低碳钢薄板坯连铸连轧的成分控制.....	36
2.2.1 碳的控制.....	36
2.2.2 铝的控制.....	38
2.3 低碳钢薄板坯连铸连轧的纯洁度控制.....	41
2.3.1 氧的控制.....	41
2.3.2 硫的控制.....	43
2.3.3 氮的控制.....	48
2.4 低碳钢薄板坯连铸连轧的铸态组织控制.....	56
2.4.1 CSP 工艺生产低碳钢的凝固与铸态组织	56
2.4.2 凝固组织的特点与厚板坯的比较.....	57
参考文献	59
3 薄板坯连铸连轧钢的轧制工艺控制	61
3.1 薄板坯连铸连轧工艺与传统工艺的比较.....	61
3.1.1 轧制工艺特点及板坯热历史比较.....	61
3.1.2 第二相粒子的析出行为不同.....	63
3.1.3 板带在辊道上的传输速度不同.....	63
3.1.4 高效除鳞技术.....	63
3.2 薄板坯连铸连轧的轧机配置及板形板厚控制技术.....	64
3.2.1 高刚度大压下轧制的优化负荷分配.....	64
3.2.2 采用轧制润滑技术.....	65
3.2.3 采用先进的板形板厚控制系统保证高精度的板材质量.....	65
3.2.4 机架间水冷装置与自动活套控制系统.....	66
3.3 薄板坯连铸连轧半无头轧制工艺.....	66
3.3.1 无头轧制的目的.....	66
3.3.2 无头轧制的效果.....	68
3.3.3 薄板坯连铸连轧半无头轧制工艺.....	69
3.4 超薄规格轧制.....	70
3.5 铁素体区轧制.....	71
3.6 柔性轧制工艺控制技术.....	72
参考文献	74

4 层流冷却工艺控制与钢的组织连续冷却转变	75
4.1 层流冷却工艺.....	75
4.2 不同冷却控制方式的冷却速率.....	76
4.2.1 不同冷却方式下厚度为 2.0mm 钢板的冷却速率	76
4.2.2 不同冷却方式下厚度为 4.0mm 钢板的冷却速率	77
4.3 终轧温度对冷却速率的影响.....	77
4.4 卷取温度对冷却速率的影响.....	78
4.5 厚度规格对冷却速率的影响.....	78
4.5.1 头部连续冷却方式对不同厚度实验用钢冷却速率的影响.....	78
4.5.2 头部间断冷却方式对不同厚度规格实验用钢冷却速率的影响.....	80
4.5.3 尾部连续冷却方式对不同厚度规格实验用钢冷却速率的影响.....	80
4.6 低碳钢板在不同冷却条件下的力学性能及组织.....	81
4.6.1 低碳钢板在不同层流冷却条件下的力学性能.....	81
4.6.2 不同冷却方式下厚度为 4.0mm 钢板的组织	82
4.6.3 不同冷却方式下厚度 2.0mm 钢板的组织	83
4.6.4 终轧温度对钢板组织的影响.....	85
4.6.5 卷取温度对钢板组织的影响.....	87
4.7 典型钢种变形奥氏体组织的连续冷却转变.....	89
4.7.1 低碳钢 ZJ330、ZJ400 的动态 CCT 曲线及连续冷却转变温度.....	89
4.7.2 低碳锰钢(16Mn)的动态 CCT 曲线及连续冷却转变温度.....	92
4.7.3 800MPa 级 TRIP 钢的动态 CCT 曲线及连续冷却转变温度	95
4.7.4 400MPa 级耐候钢的动态 CCT 曲线及连续冷却转变温度	98
参考文献	99
5 薄板坯连铸连轧典型钢种的变形抗力及模型	101
5.1 金属变形抗力的概念及研究方法	101
5.1.1 金属变形抗力概念	101
5.1.2 金属变形抗力的研究方法	101
5.2 低碳钢 SS330(Q195 成分)的变形抗力及模型.....	104
5.2.1 低碳钢 SS330 的变形抗力实验结果	104
5.2.2 低碳钢 SS330 的变形抗力模型	106
5.3 低碳钢 SS400(Q235 成分)的变形抗力及模型.....	108
5.3.1 低碳钢 SS400 的变形抗力实验结果	108

5.3.2 低碳钢 SS400 的变形抗力模型	110
5.4 低碳-锰钢(510L)的变形抗力及模型	112
5.4.1 低碳-锰钢(510L)的变形抗力实验结果	112
5.4.2 低碳-锰钢(510L)的变形抗力模型	116
5.5 集装箱用耐候钢的变形抗力及模型	118
5.5.1 集装箱用耐候钢的变形抗力实验结果	118
5.5.2 集装箱用耐候钢的变形抗力模型	120
5.6 600MPa 级(屈服)微合金低碳贝氏体钢的变形抗力及模型	121
5.6.1 600MPa 级微合金低碳贝氏体钢的变形抗力实验结果	121
5.6.2 600MPa 级微合金低碳贝氏体钢的变形抗力模型	128
5.7 700MPa 级低碳微合金高强钢的变形抗力及模型	131
5.7.1 实验用钢的化学成分及实验方法	131
5.7.2 700MPa 级低碳微合金高强钢的变形抗力实验结果	132
5.7.3 700MPa 级低碳微合金钢与 600MPa 级工业钢变形抗力 比较	136
5.7.4 700MPa 级低碳微合金钢变形工艺讨论	138
5.7.5 700MPa 级低碳微合金钢变形抗力模型	139
参考文献	142
6 薄板坯连铸连轧低碳钢的组织细化	144
6.1 钢的组织细化机理	144
6.1.1 快速凝固	144
6.1.2 溶质拖曳	145
6.1.3 第二相粒子的阻碍作用	145
6.1.4 形变细化	147
6.1.5 相变细化	147
6.2 CSP 热连轧过程中的组织细化过程	148
6.2.1 热连轧 6 道次轧卡件取样及试样制备	148
6.2.2 组织观察结果与分析	149
6.3 CSP 热轧低碳钢再结晶规律的热模拟实验	155
6.3.1 ZJ330 钢的动态再结晶	156
6.3.2 ZJ330 钢的静态再结晶	160
6.3.3 ZJ330 钢的再结晶终止温度	161
6.4 低碳钢热连轧过程中的奥氏体组织演变模型	164
6.4.1 动态再结晶过程	164
6.4.2 静态再结晶过程	165