

RAL · NEU 研究报告 No.0008

高强度低合金耐磨钢 研制开发与工业化应用

GAOQIANGDU DIHEJIN NAIMOGANG YANZHKAIFA YU GONGYEHUA YINGYONG

轧制技术及连轧自动化国家重点实验室
(东北大学)



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

RAL · NEU 研究报告 No. 0008

高强度低合金耐磨钢 研制开发与工业化应用

轧制技术及连轧自动化国家重点实验室
(东北大学)

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2014

内 容 简 介

本书共分7章,前5章系统介绍了以高级别低合金耐磨钢 NM500 为研究对象的组织性能控制及其磨损性能情况,内容包括单一马氏体型低合金耐磨钢、马氏体-铁素体双相低合金耐磨钢和马氏体-纳米析出物低合金耐磨钢的组织性能控制及磨损性能;第6章介绍了系列低合金耐磨钢的工业化应用情况;第7章为本书的结论。

本书对冶金企业、科研院所从事钢铁材料研究和开发的科技人员、工艺开发人员具有重要的参考价值,可供从事冶金、矿山、电力、建材、煤矿等领域与耐磨钢铁相关的科研和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高强度低合金耐磨钢研制开发与工业化应用/轧制技术及连轧
自动化国家重点实验室(东北大学)著. —北京:冶金工业出版社,
2014. 12

(RAL·NEU 研究报告)

ISBN 978-7-5024-6783-8

I. ①高… II. ①轧… III. ①高强度—低合金钢—耐磨钢—
研究 IV. ①TG142. 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 248411 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

策 划 任静波 责任编辑 卢 敏 李培禄 美术编辑 彭子赫

版式设计 孙跃红 责任校对 卿文春 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6783-8

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京百善印刷厂印刷

2014 年 12 月第 1 版,2014 年 12 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 14 印张; 219 千字; 206 页

50.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgy.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

研究项目概述

1. 研究项目背景与立题依据

磨损、腐蚀和断裂是材料失效的三种主要形式。尽管磨损不会像腐蚀、断裂那样直接引起金属工件失效而带来灾难性的危害，但其引起设备零件失效，导致零件维修和更换频繁，使设备工作效率降低，从而消耗大量的能源和材料，也会造成巨大的经济损失。据不完全统计，世界能源的 $1/3 \sim 1/2$ 消耗于摩擦磨损，且 80% 的机器零件失效是由磨损引起的。随着科学技术和现代工业的高速发展，机械设备的运转速度越来越高，受摩擦零件被磨损的速度也越来越快，其使用寿命越来越成为影响现代设备特别是高速运转的自动生产线生产效率的重要因素，磨损造成的机械零件失效也变得越来越突出。据中国工程院咨询研究报告统计，2006 年，我国因摩擦磨损造成的经济损失高达 9500 亿元，占全年 GDP 总量的 4.5%，而仅在钢铁、矿山和水泥行业重型装备的磨损件消耗就超过 400 亿元；2010 年，我国仅因磨损消耗的金属耐磨材料就达到 400 万吨以上。而在工业发达国家，机械设备及零件的磨损所造成的经济损失也占到国民经济总产值的 4% 左右。即使按发达国家造成损失占国民经济的 4% 计算，目前我国因摩擦磨损造成的损失也远超过 10000 亿人民币。

磨损不仅造成能源消耗、材料浪费，还造成经济上的巨大损失和社会资源的极大浪费。由于磨损，更换零部件时修理、停工所消耗的人力和物力及劳动生产率的降低造成的损失更为严重。此外，零部件的失效还会降低产品质量，甚至造成设备与人身事故，限制了工业向现代化方向的发展。随着科学技术的不断发展，机械零部件的服役工况越来越严酷，工作条件极其恶劣的工程、采矿等机械设备均要求其不但具有较高的耐磨性能，而且还能够承受强冲击和高应力，以此来延长设备的使用寿命。因此，解决磨损以此来减

少磨损带来的损失，一直是工业界人士在设计、制造和使用各种机械设备时所需要考虑的首要问题。由此可见，研究开发新型高性能耐磨钢铁材料，以及广泛、深入地开展钢材磨损机理的研究，以此来提高耐磨钢的质量，降低由磨损造成的损失，对于国民经济的建设和发展是一件具有重要意义的工作。

低合金耐磨钢由于合金含量低、综合性能良好、生产灵活方便等优点而被广泛应用于工作条件恶劣，要求强度高、耐磨性好的工程、采矿、建筑、农业、水泥、港口、电力以及冶金等机械产品上，如推土机、装载机、挖掘机、自卸车、球磨机及各种矿山机械、抓斗、堆取料机、输料弯曲结构等。在 2007 年以前，我国仅个别企业可生产低级别的低合金耐磨钢板，如 NM360 和 NM400，且加入了较多的稀土等贵重合金元素，致使生产的钢板出现成本高、内应力大、冷弯成型性差等缺点。而高级别的低合金耐磨钢板，如 NM450 ~ NM600 等，则一直被国外钢铁公司如瑞典 SSAB、日本 JFE、德国 Dillingen 等所垄断，致使该类钢板的价格极高，且供货周期长。因此，我国在制造一些重大装备，如大型隧道盾构机、水泥制造球磨机、大型选矿机等耐磨部件时，只能选用进口耐磨钢板。而其他普通装备，只是在关键部位部分使用国产的耐磨钢板，这样不但降低了设备的整体使用寿命，而且还增加了停机检修次数，加大了工人的劳动强度。

在这样的背景下，轧制技术及连轧自动化国家重点实验室（以下简称 RAL）进行了低合金耐磨钢的研制开发工作，研究在降低成本的同时，开发级别更高、韧塑性及耐磨性能更好的低合金耐磨钢板，以满足国内制造业的需求，为提高我国相关装备的寿命水平作出贡献。

2. 研究进展与成果

低合金耐磨钢主要用于工程机械、矿山机械、冶金机械及水泥化工等设备的生产制造。随着社会的不断进步，该类设备不断向着大型化、长寿化和轻量化的方向发展，对材料也提出了更高的要求，强度、硬度、韧性、塑性及耐磨性和成本控制等都是在该类材料在研制开发过程中需要考虑的重要问题。

RAL 从 2007 年起开始进行低合金耐磨钢的研制开发工作，并于 2009 年率先在首钢推广应用。到目前为止，RAL 研制的低合金耐磨钢板已经从最初研究的低级别耐磨钢 NM360 发展到现在的最高级别耐磨钢 NM600，从当初的

单纯追求硬度来增加耐磨性能发展到现在的通过组织协同控制和微合金析出物控制来同时提高硬度和韧性，并增强耐磨性能。研发的耐磨钢大幅度降低了生产成本和提高了耐磨性能，变“贵族钢板”为“大众钢板”。研制的类型包括了低成本型、高韧性型和高耐磨性型等，不但满足了常规机械制造的需求，还满足了严寒等特许工况条件下机械制造的需求。

在生产成本和更高级别低合金耐磨钢板的研制开发上，RAL 针对研发初期国内仅有武汉钢铁公司和舞阳钢铁公司生产低级别耐磨钢 NM360、NM400 和添加较多合金元素的现状，研制出在普碳钢 Q345 的基础上添加少量的 Ti、Cr 和 B 的低成本 NM360、NM400，以及更高级别的低合金耐磨钢板 NM450、NM500、NM550 和 NM600，大幅度地降低了生产成本，满足了工程机械、矿山机械、冶金机械和水泥化工等装备制造的需求。

韧塑性问题是低合金耐磨钢研制开发过程中涉及的重要问题。耐磨性能与硬度的关系最为密切，得到良好的耐磨性必须使材料具有较高的硬度。而高硬度与韧塑性是一对矛盾，如何解决高硬度下的韧塑性问题，一直是该类钢研制的难点。同时，良好的韧塑性不但能够使所制造的机械设备具有更高的安全性，而且还能满足部分特殊工况条件如严寒地带的用户需求。部分研究表明，在同等硬度的条件下，提高材料的韧塑性对耐磨性也是有利的。在本研究中，采用轧制和两相区离线热处理相结合的方法，通过对实验钢的成分和工艺参数的控制，探索了合金成分和工艺参数对两相区热处理前铁素体的形态、比例分数的影响规律，分析了两相区热处理前的组织变化对两相区热处理后组织和性能的影响，研究了两相区热处理过程对实验钢中铁素体的形态、比例分数的影响规律，并对其三体冲击磨料磨损行为进行了分析，最终得到韧性较高、耐磨性优良的高级别低合金马氏体-铁素体双相耐磨钢。得到铁素体的体积分数在 3% ~ 6% 之间、-40℃ 冲击韧性大于 50J、耐磨性高于单一马氏体型的马氏体-铁素体双相耐磨钢，满足了严寒地带的需求并达到了提高耐磨性能的目的。

此外，研究一种在不增加或少增加碳含量的情况下同时提高材料硬度和耐磨性的钢种，一直是近年来耐磨材料研究工作者追求的目标。马氏体、马氏体-铁素体低合金耐磨钢增强耐磨性的机理主要是通过马氏体基体的高硬度和板条马氏体、马氏体-铁素体的韧性配合来实现的。然而，提高马氏体硬度

时,不可避免地会增加碳含量,碳含量的增加会对钢的韧塑性、焊接性和机械加工性能等带来不利影响;提高马氏体-铁素体双相钢中铁素体的比例可以显著增加钢的韧塑性能,但是,当其比例过高时会较大幅度地降低钢的硬度,从而会给耐磨性带来不利影响。在本研究中,我们还探索了以“马氏体强韧基体+纳米 TiC (或 (Ti, Mo) C) 硬质颗粒”为组织研究目标,通过对工艺过程的控制,最终得到具有较高硬度的板条马氏体基体上分布大量纳米级碳化钛(钼)的析出粒子,以此来进一步增强耐磨性能。最终得到的马氏体-纳米析出物高耐磨性型的相对耐磨性能是低马氏体成本型耐磨钢 NGNM500 的 1.23 倍、JFE-EH500 的 1.28 倍、DILLIDUR500V 的 1.72 倍。显示出极高的耐磨性能。

到目前为止,RAL 研究开发出级别从低到高,类型涵盖低成本型、高韧性型和超级耐磨型三种类型的低合金耐磨钢板 NM360 ~ NM600,并推广应用至国内首钢、南钢、涟钢、湘钢以及武钢等大型钢铁企业。生产的钢板被应用于工程机械、矿山机械及冶金机械等设备部件的制造,并出口到英国、澳大利亚等十余个国家和地区,取得了良好的社会效益和经济效益。

本研究在实施过程中,获得了省部级一等奖一项、国家重点新产品两项(共三个级别);同时,研究成果作为部分研究内容还获得了中国机械工业科学技术奖一等奖。

获得的科研奖励:

(1) 高强度低合金系列耐磨钢板关键生产技术与应用,2011 年获得江苏省科学技术一等奖,获奖人:张逊、王昭东、黄一新、邓想涛、洪光涛、姜在伟、田勇、霍松波、曹艺、王道远、侯中华。

(2) 多功能中厚板辊式淬火机成套装备及高等级钢板热处理工艺开发,2013 年获得中国机械工业科学技术奖一等奖,获奖人:王昭东、袁国、沈永耀、王国栋、王洪、王道远、刘建华、曹世海、付天亮、李勇、王超、李志恩、龙家林、霍松波、汪宏兵。

获得的国家重点新产品:

(1) 高强度淬火耐磨钢板 NM400/NM450, 2011。

(2) NM500 高级别耐磨钢板, 2013。

项目推广应用情况:

(1) 首钢总公司: 低成本高性能耐磨钢 NM360 ~ NM500 研制与开发。

(2) 南京钢铁股份有限公司: 高强耐磨钢板及高强结构钢板的调质工艺研究。

(3) 南京钢铁股份有限公司: 工程机械用高强度低合金耐磨钢板 NM450/NM500 产品的研制开发。

(4) 湖南华菱湘潭钢铁有限公司: 新型耐磨钢板 NM400、NM500 产品开发。

(5) 湖南华菱涟源钢铁有限公司: 工程机械用高强度耐磨钢板 NM450 研究开发。

(6) 山西太钢不锈钢股份有限公司: 高强度耐磨板高平直度淬火冷却模型及调质工艺开发。

(7) 南京钢铁股份有限公司: 工程机械用高强度耐磨钢板 NM550 研究与开发。

(8) 南京钢铁股份有限公司: 高等级耐磨钢板 NM600 研制开发。

(9) 武汉钢铁股份有限公司: 低成本工程机械用耐磨钢研制与开发。

3. 论文与专利

论文:

(1) Deng Xiangtao, Wang Zhaodong, Tian Yong, Fu Tianliang, Wang Guodong. An investigation of mechanical property and three-body impact abrasive wear behavior of a 0.27% C dual phase steel[J]. Materials and Design, 2013, 49: 220 ~ 225.

(2) Deng X, Wang Z, Misra R D K, Li Y, Wang G. Transformation and precipitation behaviour of Ti-Mo bearing high strength medium-carbon steel[J]. Materials Science and Technology, 2013, 29(9): 1112 ~ 1117.

(3) Deng Xiangtao, Wang Zhaodong, Han Yi, Zhao Hui, Wang Guodong.

Microstructure and abrasive wear behavior of medium carbon low alloy martensitic abrasion resistant steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2014, 21(1):98 ~ 102.

(4) Cao Yi, Wang Zhaodong, Wu Di, et al. Effects of tempering temperature and Mo/Ni on microstructures and properties of lath martensitic wear-resistant steels[J]. Journal of Iron and Steel Research, International. 2013, 20(4): 70 ~ 75.

(5) Cao Yi, Wang Zhaodong, Wu Di, et al. Development and production of HSLA wear-resistant steel[C]. The 6th International Conference on High Strength Low Alloy Steels. Beijing, 2011.

(6) Deng Xiangtao, Wang Zhaodong, Misra R D K, Han Jie, Wang Guodong. Mechanical properties and precipitation behavior of Ti-Mo microalloyed medium-carbon steel during ultrafast cooling process[C]. THERMEC' 2013. Las Vegas, USA, 2013.

(7) Wang Zhaodong, Deng Xiangtao, Wang Bingxing, Tian Yong, Wang Guodong. New generation TMCP technology and its application to 960MPa high strength structural steel plates[C]. THERMEC' 2013. Las Vegas, USA, 2013.

(8) 邓想涛, 王昭东, 王国栋. 工艺参数对 NM500 耐磨钢力学性能和三体冲击磨料磨损性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2012, 33(9):75 ~ 79.

(9) 邓想涛, 王昭东, 袁国, 王国栋. HB450 低合金超高强耐磨钢组织与性能[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010, 31(7):942 ~ 946.

(10) 邓想涛, 王昭东, 张逊, 袁国, 付天亮, 王国栋. HB450 低合金超高强耐磨钢回火过程中的组织性能演变[J]. 钢铁, 2011, 46(5):60 ~ 63.

(11) 王昭东, 邓想涛, 曹艺, 袁国, 王国栋, 顾林豪, 宋增强. 新型低成本超高强低合金耐磨钢研究及其工业化应用[J]. 钢铁, 2010, 45(8): 60 ~ 64.

(12) 王日清, 邓想涛, 王昭东, 袁国, 王国栋. 含 Ti 低合金超高强耐磨钢的连续冷却相变行为[J]. 钢铁研究学报, 2011, 23(5):55 ~ 58.

(13) 付天亮, 邓想涛, 王昭东, 王国栋. 超快速冷却工艺对中碳钢组织性能的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010, 31(3):370 ~ 373.

(14) 邓想涛, 王昭东, 王日清, 袁国, 郭朝海, 王国栋. 低合金超高强耐磨钢在线热处理工艺研究[C]. 高品质热轧板带材控轧控冷与在线、离线热处理生产技术交流研讨会. 江苏, 宜兴, 2009.

(15) 曹艺, 王昭东, 吴迪, 等. NM400 高强度低合金耐磨钢的组织与性能[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2011, 32(2):241~244.

(16) 曹艺, 王昭东, 吴迪, 等. Mo 和 Ni 对低合金耐磨钢连续冷却转变的影响[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(5):74~78.

(17) 曹艺, 王昭东, 姜在伟, 等. 高强韧性低合金耐磨钢的开发及性能[J]. 轧钢, 2011, 27(6):3~7.

(18) 曹艺, 王昭东, 吴迪, 等. 变形及合金元素对 NM400 连续冷却转变的影响[J]. 热加工工艺, 2011, 40(22):1~4.

(19) 曹艺, 王昭东, 邓想涛, 等. 热处理对低合金耐磨钢 K400 组织性能的影响[J]. 钢铁研究, 2011, 39(5):35~38.

(20) 曹艺, 王昭东, 吴迪, 等. 高强低合金 NM400 耐磨钢板的轧制及热处理工艺实验研究[C]. 2009 年全国高质量热轧板带材控轧控冷与在线、离线热处理生产技术交流研讨会. 江苏, 宜兴, 2009.

(21) 张逖, 曹艺, 王昭东, 等. 奥氏体化温度对微硼耐磨钢组织性能的影响[J]. 材料与冶金学报, 2013, 12(1):62~66.

专利:

(1) 王昭东, 曹艺, 吴迪, 王国栋. 一种高强度低合金耐磨钢板及其制造方法, 2011, 中国, ZL200910013569.0.

(2) 王昭东, 曹艺, 吴迪, 张逖, 梁江民. 一种高强度高韧性低合金耐磨钢及其制造方法, 中国, ZL201010200002.7.

(3) 王昭东, 邓想涛, 袁国, 王国栋. 高韧性超高强度耐磨钢板及其生产方法, 申请号 CN101638755A.

(4) 姜在伟, 张逖, 王新, 王昭东, 邓想涛. 一种 HB500 级低锰耐磨钢板的制造方法, 中国, ZL201110347184.5.

(5) 王昭东, 顾林豪, 刘印良, 刘春明, 姜中行, 王文军, 邓想涛, 宋增强. 一种低成本高强度耐磨钢板及其生产方法, 申请号 CN101928891A.

4. 项目完成人员

本报告主要是在王国栋院士和王昭东教授的指导下完成的，具体的完成人员介绍如下。

主要完成人员	职 称	单 位
王国栋	教授（院士）	东北大学 RAL 国家重点实验室
王昭东	教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
邓想涛	博士	东北大学 RAL 国家重点实验室
曹 艺	博士	东北大学 RAL 国家重点实验室
韩 杰	硕士	东北大学 RAL 国家重点实验室
郭秀斌	硕士	东北大学 RAL 国家重点实验室
黄 龙	硕士	东北大学 RAL 国家重点实验室
张雨佳	硕士	东北大学 RAL 国家重点实验室

5. 报告执笔人

邓想涛、王昭东、王国栋。

6. 致谢

磨损每年给我国经济造成巨大的损失。研究磨损，开发高性能的耐磨钢铁材料，以此减少磨损造成的损失、提高装备的使用寿命是一个永久性的课题，需要大量研究工作者长期不懈的努力。

本项研究能够得以顺利实施和较大范围的推广应用，离不开王国栋院士和王昭东教授的细心指导、亲切关怀和大力推广，研究过程中的每一份成就都凝结着二位老师的心血和智慧。

本项研究还得到许多企业工作人员的帮助和支持，如秦皇岛首秦金属材料有限公司刘印良部长、宋增强工程师，首钢技术研究院姜中行所长、王全礼副院长、顾林豪工程师，南京钢铁股份有限公司张逖副部长、刘丽华副部长、霍松波副主任、姜在伟、刘涛、陈林恒、王新等工程师，涟源钢铁股份有限公司成小军总工、肖爱达首席、钱钧、汪宏斌工程师，太钢临汾钢铁有限公司李志恩主任、陆淑娟、王高田、段双霞工程师，湘潭钢铁股份有限公

司刘建兵主任、郑健工程师，武汉钢铁股份有限公司罗明厂长、习天辉首席、胡伟东科长、胡唐国、周佩工程师等，在此对他们表示衷心的感谢。

在研究和报告的撰写过程中，还有许多专家参与了讨论并提供了建设性的意见，美国路易斯安那大学拉斐特分校 Misra 教授、北京科技大学傅杰教授、北京矿冶研究总院于月光副院长、钢铁研究总院雍岐龙教授等都为报告提出了十分有价值的意见与建议，在此向他们致以诚挚的谢意。

本研究还得到了首钢集团秦皇岛金属材料有限公司、南京钢铁股份有限公司、湖南华菱涟源钢铁有限公司、湘潭钢铁股份有限公司、太钢集团临汾钢铁有限公司和武汉钢铁股份有限公司与“973”项目“第三代高强高韧低合金钢精细组织的研究”经费上的资助，在此对提供支持的单位和研究机构表示诚挚的感谢。

本研究在实施的过程中还得到了课题组李勇老师、田勇老师、袁国老师、付天亮老师、王丙兴老师、韩毅老师、李家栋老师以及王超博士等在实验及推广过程中提出的建设性意见和建议，在此对他们表示衷心的感谢。

感谢所有为高强度低合金耐磨钢研制开发和推广应用做出贡献的人。

目 录

摘要	1
1 绪论	4
1.1 引言	4
1.2 低合金耐磨钢概述	5
1.3 低合金耐磨钢对性能的要求	6
1.3.1 硬度要求	6
1.3.2 韧性和塑性要求	8
1.3.3 国内外企业及我国国标的性能要求	11
1.4 国内外低合金耐磨钢研究现状	14
1.4.1 贝氏体耐磨钢	15
1.4.2 马氏体耐磨钢	16
1.4.3 双相耐磨钢	18
1.5 磨料磨损及其主要影响因素	20
1.5.1 磨料磨损	20
1.5.2 磨料磨损的影响因素	22
1.6 目前存在的主要问题	23
1.7 研究的目的、意义及主要内容	24
1.7.1 研究目的及意义	24
1.7.2 主要研究内容	24
2 成分、组织设计及连续冷却相变行为研究	26
2.1 引言	26
2.2 成分设计	26

2.2.1	成分设计依据	26
2.2.2	NM500 对性能的要求	27
2.2.3	NM500 对成分的要求	28
2.2.4	合金元素的作用	29
2.2.5	成分设计结果	31
2.3	组织设计	32
2.3.1	组织设计依据	32
2.3.2	组织设计结果	34
2.4	实验钢连续冷却相变行为研究	34
2.4.1	实验方法	34
2.4.2	实验结果及分析	35
2.5	本章小结	44
3	马氏体耐磨钢组织性能控制及磨损机理	46
3.1	引言	46
3.2	实验钢成分及其实验方法	47
3.2.1	实验钢成分	47
3.2.2	实验方法	47
3.3	实验结果及其分析	52
3.3.1	轧制及轧后冷却工艺对实验钢离线热处理组织性能的影响	52
3.3.2	热处理过程组织性能控制	58
3.3.3	热处理过程中的三体冲击磨料磨损性能研究	76
3.4	本章小结	84
4	马氏体-铁素体双相耐磨钢组织性能控制及磨损机理	86
4.1	引言	86
4.2	实验材料及方法	87
4.2.1	实验材料	87

4.2.2 实验方法	88
4.3 实验结果及分析	90
4.3.1 两相区热处理前的组织性能控制及其对热处理后组织性能的影响	90
4.3.2 两相区热处理过程中的组织性能控制及其磨损性能	103
4.4 讨论	118
4.4.1 铁素体形态对力学性能及三体冲击磨损性能的影响	118
4.4.2 铁素体的体积分数对实验钢力学性能和三体冲击磨损性能的影响	122
4.5 本章小结	125
5 基于纳米析出物控制的耐磨钢研究及磨损机理研究	128
5.1 引言	128
5.2 实验材料及方法	129
5.2.1 实验材料	129
5.2.2 实验方法	129
5.3 实验结果及分析	133
5.3.1 连续冷却相变过程中的析出行为研究	133
5.3.2 轧后冷却过程中的析出及组织性能控制	141
5.3.3 轧后冷却过程中的析出控制对离线热处理后组织性能的影响	151
5.3.4 热处理过程中的析出及组织性能控制	160
5.3.5 三体冲击磨料磨损行为研究	170
5.4 本章小结	183
6 系列低合金耐磨钢的工业推广应用	186
6.1 化学成分及工艺控制路线	186
6.2 轧制及轧后冷却过程工艺控制	187
6.3 热处理工艺控制	188

6.4 显微组织和力学性能分析	189
6.5 三体冲击磨料磨损性能研究	191
6.6 本章小结	193
7 结论	194
参考文献	197

摘 要

磨损是材料失效的主要形式之一。据统计,80%以上的机械材料消耗于磨损,50%以上的装备恶性事故起因于过度的磨损和润滑失效。因此,开发高性能的耐磨钢铁材料,对减少材料磨损过程中的损失、提高机械装备的使用寿命有着至关重要的意义。低合金耐磨钢作为一种重要的耐磨钢铁材料,因合金含量低、综合性能良好、生产灵活方便及价格便宜等特点,被广泛地应用于工程机械、矿山机械及冶金机械等设备的生产制造。本研究首先以高级别的低合金耐磨钢 NM500 为研究对象,对其成分、组织进行设计,研究所设计成分体系下的马氏体、马氏体-铁素体和马氏体-纳米碳化物的控制情况,并分析了其控制工艺过程与组织、力学性能和三体冲击磨料磨损性能的关系,为开发出马氏体型低成本、马氏体-铁素体型高韧性和马氏体-纳米碳化物型高耐磨性的低合金耐磨钢板提供参考。然后将研究 NM500 得到的规律应用于其他各级别耐磨钢板如 NM360 ~ NM600 的研制开发,分析了工业生产得到各级别耐磨钢的组织 and 性能,并对其耐磨性进行评价。本研究的主要内容和创新如下:

(1) 针对传统低合金耐磨钢中添加较多 Ni、Mo 等贵重合金甚至是稀土元素成本较高的缺点,首次采用在普通 C-Mn 钢的基础上加入少量 Cr 和 B 元素的低成本成分体系,开发出系列低合金耐磨钢板,其耐磨性能高于国外同等级别耐磨钢水平。

研究了该类钢的连续冷却相变行为、热处理前的热变形及热变形后的冷却工艺、热处理过程中的淬火和回火工艺对实验钢的强韧性控制单元如原始奥氏体晶粒尺寸、Block 尺寸、Lath 尺寸和析出物的影响规律,并分析了其与实验钢的力学性能和三体冲击磨料磨损性能的关系。结果表明,较低温度的控制轧制后控制冷却至贝氏体区间,然后在 880 ~ 900℃ 淬火和 170 ~ 190℃ 回火可得到极高的硬度和良好的韧性配合,此时其耐磨性能最高。

分析了低温回火过程碳化物的析出情况与三体冲击磨料磨损的关系。结