

RAL · NEU 研究报告 No.0012

基于超快冷技术含 Nb 钢 组织性能控制及应用

JIYU CHAOKUAILENG JISHU HAN Nb GANG ZUZHI XINGNENG KONGZHI JI 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. 0012

基于超快冷技术含 Nb 钢 组织性能控制及应用

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

2015

内 容 简 介

本书以基于超快冷技术的新一代 TMCP 工艺为基础,以低碳含铌(Nb)钢为研究对象,针对含 Nb 钢生产中存在的问题,系统地研究了超快冷对奥氏体再结晶的影响,超快冷对相变行为的影响及超快冷条件下铌的析出特性,并建立了超快冷条件下含 Nb 钢的析出热力学和动力学数学模型,明确了基于超快冷技术含 Nb 钢的强化机理。本书所研究内容为含铌钢的低成本、降负荷、高效率生产提供了全新的思路,具有重要的理论意义和应用价值。

本书可供材料、冶金、机械、化工等部门的科技人员及高等院校有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于超快冷技术含 Nb 钢组织性能控制及应用/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, 2015. 10

(RAL·NEU 研究报告)

ISBN 978-7-5024-7012-8

I. ①基… II. ①轧… III. ①钢—组织性能(材料)—性能控制 IV. ①TG142.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 237139 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 yjcb@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 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7012-8

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2015 年 10 月第 1 版,2015 年 10 月第 1 次印刷

169mm×239mm;7.75 印张;120 千字;106 页

45.00 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 yjgycbs.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. 研究项目背景与立项依据

随着国民经济的发展，各行业对钢铁工业提出越来越高的要求。含 Nb 钢由于其广泛应用于汽车、桥梁、造船、航天等诸多领域，成为各大钢厂竞相开发的核心产品。然而近年来，由于 Nb 的广泛应用及资源的日益消耗殆尽，Nb 铁的价格越来越高，已经达到 30 万元/吨。解决该问题的途径有两个：第一，找出一种替代元素；第二，降低 Nb 元素的使用量。目前，由于 Nb 元素在钢中的固溶强化、细晶强化、析出强化等强化机制还没有任何一种元素可以完全代替，因此降低 Nb 元素的使用量是钢铁企业降低成本、缓解能源危机的唯一有效途径。

在传统控制轧制和控制冷却条件下，含 Nb 钢在生产过程中存在以下几个问题：第一，奥氏体化温度较高，且 Nb 含量越高，奥氏体化温度越高，在加热炉内保温时间越长；第二，由于含 Nb 钢轧制时如果不采用两阶段的控轧工艺，极易产生混晶组织，使钢材的强韧性大幅度恶化，因此均采用中间坯待温的控制轧制工艺，由于中间坯待温大大延长了轧制时间，降低了轧制节奏，且由于终轧温度的降低，导致轧机负荷大大增加，降低了轧辊的使用寿命；第三，由于采用中间坯待温的低温控轧工艺，贵重的 Nb 元素绝大多数在奥氏体中应变诱导析出，奥氏体中析出的 Nb(C,N) 粒子较大，其析出强化的作用受到了一定程度的限制。

东北大学王国栋院士率先提出了基于超快冷技术的新一代 TMCP 工艺，将该技术应用于含 Nb 钢的生产，可以有效降低 Nb 的使用量，并在一定程度上解决含 Nb 钢生产过程中存在的上述问题。

超快速冷却（简称“超快冷”或“UFC”）是一种冷却能力极强的控制冷却技术，3mm 厚的钢板最大冷却速度可达到 $400^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ，并且能够实现温度

和组织的均匀性控制。以超快冷技术为核心的新一代 TMCP 技术可以使 Nb 元素对强韧性的贡献发挥到极致,是生产低成本高强钢的最有效途径之一。该技术开发含 Nb 钢的中心思想是:(1) 在奥氏体区间,趁热打铁,在适于变形的温度区间完成连续大变形和应变积累,得到硬化的奥氏体;(2) 轧后立即进行超快冷,使轧件迅速通过奥氏体相区,保持轧件奥氏体硬化状态;(3) 在奥氏体向铁素体或贝氏体相变过程中终止冷却,使 Nb 元素不具备在奥氏体中析出的动力学条件,并在铁素体或贝氏体相变过程中析出;(4) 后续依照材料组织和性能的需要进行冷却路径的控制。

本研究的意义主要体现在:(1) 超快冷的应用容易实现细晶强化和相变强化,同时使 Nb 元素的析出强化作用发挥到极致,提高钢材的力学性能,降低微合金元素 Nb 的使用量,降低生产成本,实现成本减量化,为我国资源的可持续发展作出重要贡献;(2) 由于 Nb 含量的降低,钢材的固溶温度降低,可以降低钢材在加热炉中的加热温度或缩短钢材在加热炉内的保温时间,降低热能消耗;(3) 由于 Nb 元素使用量的降低,降低了混晶现象发生的几率;(4) 终轧温度的提高降低了轧机负荷,提高了工业生产的轧制节奏,提高了生产效率;(5) 超快冷条件下含 Nb 钢的再结晶行为、相变行为以及低温析出行为的研究有利于指导低成本含 Nb 钢的开发;(6) 所建立数学模型为基于超快冷技术的柔性化组织-性能预测提供了必要补充。

基于以上分析,在王国栋院士学术思想的指导下,在国家自然科学基金青年基金项目“超快冷条件下含 Nb 钢析出行为机理及模型研究”和中央高校基本科研业务费项目“超快冷条件下高钢级管线钢析出与相变交互作用机理研究”的支持下,针对含 Nb 钢生产中存在的问题,系统研究了超快冷对奥氏体再结晶、相变和析出的影响规律和机理并建立了相应的数学模型,明确了基于超快冷技术含 Nb 钢的强化机理,在一定程度上解决了含 Nb 钢生产中存在的合金成本高、轧机负荷大、生产效率低等问题。

2. 研究进展与成果

本研究报告以低 C 含 Nb 钢为研究对象,采用热模拟实验和热轧实验研究了超快冷条件下含 Nb 钢的组织性能演变机理,并应用于现场,取得了显著的效益,主要研究进展及成果如下:

(1) 研究了实验钢的动态软化行为并建立了高精度的数学模型；确定了不同道次间隔时间条件下的未再结晶温度 T_{nr} ，并给出了其随道次间隔时间的变化规律：对于同一成分的钢，在道次应变量、应变速率恒定时，道次间隔时间越长， T_{nr} 越低。为实验钢在未再结晶区的轧制工艺制定提供了理论依据。

(2) Nb 在奥氏体中析出的开始时间和析出结束时间随着变形温度的降低，先缩短后变长，在 910℃ 左右变形时，实验钢的析出开始时间最短。

(3) 较大的冷却速率（超快冷）可以将变形后的硬化奥氏体保留至相变前，从而能够为铁素体相变提供更多的形核位置，起到细化相变后晶粒的作用。

(4) 确定了实验钢的 CCT 曲线，实验钢变形后分别模拟超快冷（40℃/s）和层流冷却（10℃/s），在 680℃ 保温时，随保温时间的延长，多边形铁素体含量均增多，但二者增速不同，冷却速率为 40℃/s 冷却时，多边形铁素体含量增加较快；在 600℃ 保温时，40℃/s 冷速下获得的组织为针状铁素体和贝氏体，而 10℃/s 冷速下为多边形铁素体、针状铁素体和贝氏体；表明大冷速抑制了多边形铁素体相变，有利于低温相变组织的获得。

(5) 实验钢变形后采用两段式冷却，当前段冷速达到 30℃/s 时，继续增大冷速，对最终相变组织影响不大。

(6) 在高温（910℃）变形时，应变诱导 Nb（C，N）析出需要一定的孕育时间，可以采用超快冷在变形后迅速冷却到相变区，抑制 Nb（C，N）在奥氏体中的析出。当等温时间延长到 30s 时，析出粒子数量增多，平均晶粒尺寸增大为 12.9nm。

(7) 超快冷至铁素体相区保温 1s、10s 和 30s 时，析出相粒子的密度分别为 $201\mu\text{m}^{-2}$ 、 $311\mu\text{m}^{-2}$ 和 $373\mu\text{m}^{-2}$ ，平均尺寸分别为 5.5nm、6.9nm 和 8.1nm；超快冷至贝氏体相区保温 1s、10s 和 30s 时，析出粒子的密度分别为 $100\mu\text{m}^{-2}$ 、 $178\mu\text{m}^{-2}$ 和 $204\mu\text{m}^{-2}$ ，平均尺寸分别为 4.8nm、6.6nm 和 7.1nm。

(8) 针对 Fe-Nb-C-N 系统，充分考虑 Nb 在铁素体相区的固溶度积和扩散系数，建立了全新的超快冷条件下含 Nb 钢的析出动力学数学模型，模型精度较高。超快冷条件下，Nb（C，N）在铁素体中析出时最大形核率温度为 620℃，最快沉淀析出温度为 700℃。

(9) 实验船板钢轧后采用层流冷却，最终组织为多边形铁素体和珠光

体;采用超快冷技术以后,实验钢组织中出现了低温相变组织针状铁素体、贝氏体。超快冷技术可以充分利用细晶强化、相变强化、位错强化等强化手段,提高钢材的强韧性。

(10) 对于 X70 级管线钢,超快冷使晶界取向差大于 15° 的有效晶粒尺寸得到了细化,采用超快冷工艺生产的低成本无 Mo 管线钢强韧性略高于传统工艺生产的含 Mo 管线钢。

(11) 工业化生产结果表明,超快冷实现了含 Nb 船板钢 AH32 升级 AH36;实现了含 Nb 高钢级管线钢无/少 Mo 的成分设计,降低了生产成本;实现了含 Nb 汽车大梁钢的高温、低负荷、高效率轧制。

(12) 研究成果的评价如下:

2012 年 12 月 9 日,湖南省科学技术厅在北京组织召开了由湖南华菱涟源钢铁有限公司和东北大学共同完成的“高品质节约型热轧钢材生产技术与装备的研发及应用”项目科技成果鉴定会。鉴定委员会专家一致认为,该项目技术总体达到“国际先进水平”,该鉴定项目中的节约型管线钢是依据本研究的基本理论开发的。该项目 2014 年获得湖南省科技进步一等奖。

2013 年 6 月 20 日,受辽宁省科技厅委托,鞍山市科技局在辽宁省鞍山市主持召开了“鞍钢节约型高性能中厚板 UFC-TMCP 工艺技术开发及应用”省级科技成果鉴定会。经过质询和认真讨论,对项目的工作给予高度评价,认为项目达到了“国际领先水平”。本鉴定项目中的减量化船板钢的开发也是基于本研究开发的。

3. 论文与专利

论文:

(1) 周晓光,刘振宇,吴迪,王国栋. 控制冷却对 C-Mn 钢力学性能的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010, 31(3):362~365.

(2) Min Lu, Xiaoguang Zhou, Zhenyu Liu, Guodong Wang. Effect of ultra fast cooling after rolling on yield ratio of X80 pipeline steel[C]. Proceeding of the 10th international conference on steel rolling, 2010, 389~393, Beijing.

(3) Bin Wang, Xiaoguang Zhou, Zhenyu Liu, Guodong Wang. Improvements

of mechanical properties of medium carbon steels by ultra fast cooling[C]. Proceeding of the 10th international conference on steel rolling. 2010, 774 ~ 778, Beijing.

(4) 王斌, 周晓光, 刘振宇, 王国栋. 超快速冷却对中碳钢组织和性能的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2011, 32(1):48 ~ 51.

(5) 卢敏, 周晓光, 刘振宇, 王国栋, 狄国标. 冷却工艺对 X80 级抗大变形管线钢组织性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(7):83 ~ 88.

(6) 周晓光, 卢敏, 刘振宇, 王国栋. 超快冷对 X80 管线钢屈强比的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012, 33(2):199 ~ 202.

(7) 王斌, 刘振宇, 周晓光, 王国栋. 轧后冷却路径对中碳钢扩孔性能的影响[J]. 金属学报, 2012, 48(4):435 ~ 440.

(8) Hao Yang, Xiaoguang Zhou, Zhenyu Liu, Guodong Wang. Effect of ultra-fast cooling process on microstructure and mechanical properties for 36kg high strength ship plate[C]. Asia steel international conference 2012, 2012, Z088-1. Beijing.

(9) Bin Wang, Zhenyu Liu, Xiaoguang Zhou, Guodong Wang. Microstructure control for spheroidization of medium carbon steels with high hole-expansion property by ultra fast cooling[C]. Asia steel international conference 2012, 2012, Z097-10. Beijing.

(10) 周晓光, 刘振宇, 吴迪, 王国栋. 超快速冷却终止温度对 X80 管线钢组织和性能的影响[J]. 机械工程材料, 2012, 36(10):5 ~ 7.

(11) 王斌, 刘振宇, 周晓光, 王国栋. 超快速冷却条件下亚共析钢中纳米级渗碳体析出的相变驱动力计算[J]. 金属学报, 2013, 49(1):26 ~ 34.

(12) 杨浩, 周晓光, 刘振宇, 王国栋. Nb 在超快冷条件下的低温析出行为[J]. 钢铁, 2013, 48(1):75 ~ 81.

(13) Bin Wang, Zhenyu Liu, Xiaoguang Zhou, Guodong Wang, R. D. K. Misra. Precipitation behavior of nanoscale cementite in hypoeutectoid steels during ultra fast cooling (UFC) and their strengthening effects[J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 575: 189 ~ 198.

(14) 刘振宇, 唐帅, 周晓光, 衣海龙, 王国栋. 新一代 TMCP 工艺下热轧钢材显微组织的基本原理[J]. 中国冶金, 2013, 23(4):10 ~ 16.

(15) Bin Wang, Zhenyu Liu, Xiaoguang Zhou, Guodong Wang, R. D. K. Misra.

Precipitation behavior of nanoscale cementite in 0.17% carbon steel during ultra fast cooling (UFC) and thermomechanical treatment (TMT)[J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 588: 167 ~ 174.

(16) Bin Wang, Zhenyu Liu, Xiaoguang Zhou, Guodong Wang. Improvement of hole-expansion property for medium carbon steels by ultra fast cooling after hot strip rolling[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2013, 20(6):25 ~ 32.

(17) 周晓光, 王猛, 刘振宇, 吴迪, 王国栋. 超快冷对 X70 管线钢组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(9):80 ~ 84.

(18) Xiaoguang Zhou, Zhenyu Liu, Shengyong Song, Di Wu, Guodong Wang. Upgrade rolling based on ultra fast cooling technology for C-Mn Steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2014, 21(1):86 ~ 90.

(19) 周晓光, 曾才有, 杨浩, 刘振宇, 吴迪, 王国栋. 超快冷条件下 X80 管线钢的组织性能[J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2014, 45(9): 2972 ~ 2976.

(20) 周晓光, 王猛, 刘振宇, 杨浩, 吴迪, 王国栋. 超快冷条件下含 Nb 钢铁素体相变区析出及模型研究[J]. 材料工程, 2014, 9: 1 ~ 7.

(21) 周晓光, 曾才有, 徐少华, 杨浩, 刘振宇, 吴迪, 王国栋. 控制冷却对含 Nb 钢组织性能的影响研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(22):57 ~ 62.

(22) 王斌, 刘振宇, 冯杰, 周晓光, 王国栋. 超快速冷却条件下碳素钢中纳米渗碳体的析出行为和强化作用[J]. 金属学报, 2014, 50(6):652 ~ 658.

(23) 王斌, 刘振宇, 冯杰, 周晓光, 王国栋. 超快冷对碳素钢中渗碳体析出强化行为的影响[J]. 材料研究学报, 2014, 28(5):346 ~ 352.

专利:

(1) 刘振宇, 周晓光, 卢敏, 王国栋, 吴迪. 一种低屈强比 X80 级管线钢及其制造方法, 2011-09-21, 中国, ZL201010101105.8.

(2) 周明伟, 王国栋, 廖志, 陈建新, 袁国, 胡大, 刘建华, 王慎德, 周晓光, 龙明建, 汪净, 肖尊湖, 温德智, 刘振宇, 李海军. 一种 X70 管线

钢热轧钢卷的生产方法，2014-05-28，中国，ZL201210138675.3。

(3) 刘振宇，王斌，周晓光，王国栋：一种利用纳米渗碳析出提高中低碳钢强度的方法，2015-01-07，中国，ZL201310289495.X。

4. 项目完成人员

主要完成人员	职 称	单 位
王国栋	中国工程院院士、教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
刘振宇	教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
周晓光	副教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
王猛	博士生	东北大学 RAL 国家重点实验室
杨浩	博士生	东北大学 RAL 国家重点实验室
徐少华	硕士生	东北大学 RAL 国家重点实验室
王斌	博士后	东北大学 RAL 国家重点实验室
曾才有	硕士生	东北大学 RAL 国家重点实验室

5. 报告执笔人

周晓光、王猛、杨浩、徐少华。

6. 致谢

本研究报告是在王国栋院士，刘振宇教授的指导下完成的。两位教授从基本理论的提出、实验方案的设计等方面给予了无私的帮助，在这里表示衷心的感谢！

感谢国家自然科学基金青年基金项目“超快冷条件下含 Nb 钢析出行为机理及模型研究”和中央高校基本科研业务费项目“超快冷条件下高钢级管线钢析出与相变交互作用机理研究”对本工作给予的资助！感谢课题组的邱以清副教授、蔡晓辉副教授、衣海龙副教授、贾涛副教授、曹光明副教授、刘海涛副教授、唐帅副教授、李成刚老师、叶其斌博士后等的大力支持与帮助。

感谢博士后王斌，博士研究生杨浩、王猛，硕士研究生徐少华、曾才有、

蒋小冬、马良宇等同学在本研究中所做的大量的具体工作！感谢涟钢刘旭辉博士、李会首席，鞍钢陈军平高工等提供的耐心指导。

最后再次感谢东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室各位老师以及所有给予支持、关心和帮助的老师、同学和朋友们！

目 录

摘要	1
1 绪论	3
1.1 微合金化钢发展的现状	3
1.1.1 微合金化钢的概念	3
1.1.2 微合金化钢的强韧化理论	4
1.2 Nb 微合金化钢	6
1.2.1 Nb 对奥氏体再结晶的影响	6
1.2.2 Nb 对钢组织和性能的影响	8
1.3 控制轧制与控制冷却	9
1.3.1 控制轧制与控制冷却的发展	9
1.3.2 控制轧制和控制冷却技术的特征	9
1.3.3 含 Nb 钢控制轧制和控制冷却存在的问题	11
1.4 新一代控制轧制和控制冷却	11
1.5 报告的研究内容	13
2 超快冷对含 Nb 钢奥氏体形态控制研究	15
2.1 引言	15
2.2 实验材料及方法	15
2.2.1 实验材料	15
2.2.2 实验方法	16
2.3 实验结果及分析	19
2.3.1 单次压缩应力-应变曲线	19
2.3.2 变形温度对动态再结晶的影响	21

2.3.3	变形速率对动态再结晶的影响	21
2.3.4	变形量对动态再结晶的影响	22
2.3.5	含 Nb 实验钢动态再结晶模型的建立	24
2.3.6	奥氏体未再结晶温度 T_{nr} 的确定	26
2.3.7	含 Nb 钢最易析出温度的确定	30
2.3.8	相变前冷却速度对奥氏体形态的影响	30
2.4	本章小结	33
3	超快冷条件下含 Nb 钢相变规律研究	34
3.1	引言	34
3.2	实验材料和实验方案	34
3.2.1	实验材料	34
3.2.2	实验方案	35
3.3	实验钢连续冷却相变研究	38
3.3.1	相变温度点的确定	38
3.3.2	动态 CCT 曲线的绘制	39
3.3.3	冷却速率对奥氏体相变组织的影响	41
3.3.4	冷却速率对铁素体相变开始温度及晶粒尺寸的影响	42
3.4	相变区保温淬火实验	44
3.5	两段式冷却过程模拟实验	49
3.5.1	金相组织分析	50
3.5.2	维氏硬度分析	52
3.6	本章小结	54
4	超快冷条件下含 Nb 钢在铁素体/贝氏体相变区中的析出行为研究	55
4.1	引言	55
4.2	实验材料	55
4.3	实验方法及结果分析	55
4.3.1	相变区间的确定	55
4.3.2	Nb 在奥氏体相区的析出	59

4.3.3 Nb 在铁素体/贝氏体相变区中的析出	60
4.3.4 超快冷至不同相变区析出情况对比	67
4.4 本章小结	69
5 超快冷条件下 Nb 的析出模型研究	70
5.1 引言	70
5.2 Nb(C,N)在奥氏体中的应变诱导析出模型	70
5.2.1 临界形核自由能	72
5.2.2 形核速率	73
5.2.3 长大速率	73
5.2.4 析出开始时间的计算	74
5.2.5 析出结束时间的计算	74
5.2.6 计算结果与讨论	75
5.3 Nb(C,N)在铁素体中析出的数学模型	77
5.4 本章小结	83
6 含 Nb 钢实验室热轧实验研究	84
6.1 引言	84
6.2 基于超快冷工艺 315MPa 级含 Nb 船板钢轧制	84
6.2.1 实验材料及实验设备	84
6.2.2 实验方案	85
6.2.3 实验结果与分析	85
6.3 基于超快冷工艺 X70 级含 Nb 管线钢轧制	92
6.3.1 试验材料和方法	92
6.3.2 试验结果及分析	93
6.4 本章小结	97
7 该研究结果在工业现场的应用简介	99
7.1 超快冷应用之性能升级 (含 Nb 船板)	99
7.2 超快冷应用之成本减量化 (含 Nb 管线钢)	100

7.3 超快冷应用之低负荷快节奏轧制 (含 Nb 汽车大梁钢)	101
7.4 本章小结	102
8 结论	103
参考文献	105

摘 要

含 Nb 钢由于其广泛应用于汽车、桥梁、造船、航天等诸多领域,成为各大钢厂和科研院所竞相研发的热门产品。近年来,由于 Nb 的广泛应用, Nb 铁的价格越来越高,同时含 Nb 钢轧制过程中出现的奥氏体化温度高、轧机负荷大、轧制效率低、易发生混晶等问题越来越显著。以超快冷为核心的新一代 TMCP 技术可以更好地发挥 Nb 元素对强韧性的贡献,是解决含 Nb 钢轧制过程中所遇上述问题的有效途径之一。本研究报告结合生产实际并以国家自然科学基金项目“超快冷条件下含 Nb 钢析出行为机理及模型研究”和中央高校基本科研业务费项目“超快冷条件下高钢级管线钢析出与相变交互作用机理研究”为研究背景,研究了超快冷条件下含 Nb 钢的奥氏体再结晶行为、相变行为和微合金析出行为,建立了相应的数学模型。给出了可充分发挥 Nb 的细晶强化、相变强化和析出强化效果的最优轧制和超快冷工艺制度。本研究报告取得了如下研究结果:

(1) 研究了实验钢的动态软化行为并建立的高精度的数学模型;确定了不同道次间隔时间条件下的未再结晶温度 T_{nr} , 并给出了其随道次间隔时间的变化规律, Nb 在奥氏体中析出的开始时间和析出结束时间随着变形温度的降低,先缩短后变长,在 910℃ 左右变形时,实验钢的析出开始时间最短。

(2) 较大的冷却速率(超快冷)可以将变形后的硬化奥氏体保留至相变前,从而能够为铁素体相变提供更多的形核位置,起到细化相变后晶粒的作用。

(3) 确定了实验钢的 CCT 曲线,实验钢变形后分别模拟超快冷(40℃/s)和层流冷却(10℃/s),在 680℃ 保温时,随保温时间的延长,多边形铁素体含量均增多,但以 40℃/s 冷却时多边形铁素体含量增加较快;在 600℃ 保温时,40℃/s 冷速下获得的组织为针状铁素体和贝氏体,而 10℃/s 冷速下为多边形铁素体、针状铁素体和贝氏体;表明:大冷速抑制了多边形铁素体



相变,有利于低温相变组织的获得。实验钢变形后采用两段式冷却,当前段冷速达到 $30^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,继续增大冷速,对最终相变组织影响不大。

(4) 超快冷可抑制 Nb 在奥氏体中析出;超快冷至铁素体或贝氏体相区,随着保温时间的延长,析出相粒子密度增加,体积分数增多,析出粒子尺寸增大;随着超快冷终冷温度的降低,析出粒子密度先增加后减小,析出体积分数逐渐减小,析出物尺寸逐渐减小。

(5) 针对 Fe-Nb-C-N 系统,充分考虑 Nb 在铁素体相区的固溶度积和扩散系数,建立了全新的超快冷条件下含 Nb 钢的析出动力学数学模型,模型精度较高。超快冷条件下, Nb(C,N) 在铁素体中析出时最大形核率温度为 620°C ,最快沉淀析出温度为 700°C 。

(6) 实验船板钢轧后采用层流冷却,最终组织为多边形铁素体和珠光体;采用超快冷技术以后,实验钢组织中出现了低温相变组织针状铁素体、贝氏体。超快冷技术可以充分利用细晶强化、相变强化、位错强化等强化手段,提高钢材的强韧性。

(7) 对于 X70 级管线钢,超快冷使晶界取向差大于 15° 的有效晶粒尺寸得到了细化,采用超快冷工艺生产的低成本无 Mo 管线钢强韧性略高于传统工艺生产的含 Mo 管线钢。

(8) 该研究成果在工业现场实现了应用。实现了含 Nb 船板钢 AH32 升级 AH36;实现了含 Nb 高钢级管线钢无/少 Mo 的成分设计,降低了生产成本;实现了含 Nb 汽车大梁钢的高温、低负荷、高效率轧制。

关键词: 含 Nb 钢;超快冷;再结晶;相变;析出;强化;数学模型