

RAL · NEU 研究报告 No.0004

钢中微合金元素析出及 组织性能控制

GANGZHONG WEIHEJIN YUANSU XICHU JI ZUZHI XINGNENG KONGZHI

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. 0004

钢中微合金元素析出及 组织性能控制

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

本研究报告介绍了东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室在钢中微合金元素析出理论研究及产品开发方面的最新进展。报告内容主要分为三部分,其中第1章为Nb-Ti微合金化超高强热轧带钢纳米尺度析出研究及组织性能控制技术。第2章为奥氏体中V析出物对晶内铁素体形核的影响、晶内形核铁素体在控轧控冷及焊接热循环过程中组织性能控制方面的作用。第3章和第4章为冷轧搪瓷用钢析出行为及析出物对抗鳞爆性能及成型性能的影响。报告中介绍的研究工作大部分已经在工业化生产中得到了推广作用,并产生了显著的社会经济效益。

本报告可供材料、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

钢中微合金元素析出及组织性能控制/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. 10

(RAL·NEU 研究报告)

ISBN 978-7-5024-6709-8

I. ①钢… II. ①轧… III. ①钢—合金元素—研究 ②钢—组织性能(材料)—性能控制 IV. ①TG142

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014) 第 214999 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

责任编辑 卢 敏 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 978-7-5024-6709-8

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 10 月第 1 版, 2014 年 10 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 10.5 印张; 164 千字; 151 页

40.00 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

本项研究工作的背景是课题组与企业合作的几项科研项目。这些项目包括与天津铁厂合作的超高强热轧汽车结构钢研究开发、与马钢合作的 600 ~ 700MPa 高强钢组织性能演变与控制机理研究、与唐山国丰钢铁公司合作的新型系列冷轧搪瓷用钢研究开发、与首钢合作的高强车轮用钢研究开发、与攀钢合作的钒在贝氏体钢中析出机理研究等。这些研究工作均不同程度地涉及微合金元素析出理论方面的研究内容。

低合金结构钢微合金化有两个主要目的，其一是细化晶粒，其二是沉淀强化。对于细化晶粒，铌是非常有效的微合金元素，这是由于无论铌是固溶于奥氏体中，还是在奥氏体中析出，均对奥氏体再结晶过程有强烈的阻碍作用，当与控制轧制和控制冷却工艺相结合时，就可以获得很好的晶粒细化的效果。对于沉淀强化，钒是有效的微合金元素，这是由于钒在奥氏体中的溶解度较高，而在铁素体中则可以获得细小弥散的钒的析出物，钢材因这些析出物的存在而获得很好的沉淀强化效果；同样，钛微合金化钢则可以利用铁素体中析出的纳米尺度的 TiC 而获得沉淀强化效果，这种技术近年来在 700MPa 以上级别的热轧超高强钢的开发和生产中得到了广泛的应用。这就是利用微合金化进行结构钢微观组织和力学性能控制的广为人们所接受的冶金学原理。

然而，析出过程作为钢中的一种扩散型相变，化学成分和加工工艺对其有强烈的影响，在不同的成分体系和加工工艺条件下会呈现不同的规律性，同时也会对钢材加工过程其他的相变过程产生影响。因此，本项研究工作结合课题组在钢材产品研究开发过程中涉及的析出理论问题开展研究，主要包括 Nb-Ti 微合金化钢热轧过程析出规律，含钒微合金钢奥氏体中析出对晶内

铁素体形核的影响及其应用, 低碳和超低碳冷轧搪瓷用钢析出行为及其对氢扩散行为和成型性能的影响等方面。值得一提的是, 在含钒微合金钢奥氏体中析出与晶内铁素体形核理论研究及其应用方面, 提出了利用奥氏体中 VN 析出物促进晶内铁素体形核进而改善特厚板组织均匀性的新思路, 这为解决高强韧性特厚规格钢板生产的难题提供了可能。

2. 研究进展与成果

本项研究工作最早开始于 RAL 国家重点实验室承担的国家“973”项目“新一代钢铁材料的重大基础研究——低碳钢轧制过程晶粒细化的基础研究”, 当时在王国栋院士的领导下, 课题组针对 Nb、V、Ti 三个微合金元素的析出行为及其在晶粒细化中的作用开展研究, 并且在 Ti 的析出行为及含钛微合金超高强钢的开发方面取得重要进展, 这一成果通过与天津铁厂的合作得到了最初的工业化生产和应用。以此为基础, 课题组对 Nb-Ti 微合金钢的析出行为进行了系统研究, 在纳米析出强化超高强热轧带钢的组织控制和产品开发方面取得了非常重要的研究结果。此后, 课题组在研究方向上做了适当调整, 也就是从原来单纯考虑微合金元素析出强化, 调整到在利用析出强化的同时注意利用微合金元素在奥氏体中的析出对铁素体相变的影响。按照这一思路, 课题组在钒氮微合金化晶内铁素体形核理论研究及应用上取得了重要进展。

搪瓷钢的组织性能控制是微合金元素析出应用的另一个领域, 搪瓷钢中析出物控制与热轧高强钢中析出物控制有很大的不同, 其难点在于通过析出物的控制, 既要保证搪瓷钢的抗鳞爆性能, 又要保证搪瓷钢的高成型性能。课题组通过与唐山国丰钢铁公司的合作项目, 对这一问题进行了系统研究并取得了重要进展。

以下是本项研究工作的具体研究内容和主要研究结果:

(1) 在 Nb-Ti 微合金化超高强热轧带钢析出行为及组织性能控制方面, 利用热模拟实验技术, 研究了变形、冷却速率、等温温度等因素对纳米尺度 (Nb, Ti)C 析出行为的影响规律, 分析了沉淀析出与铁素体相变、贝氏体相变之间的相互影响机制, 研究了纳米析出强化超高强钢的组织性能关系。结果表明:

1) 变形提高了纳米析出(Nb,Ti)C的形核率并细化了析出物尺寸。变形促进了空位形核,导致冷却速率小于 $5^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时在原奥氏体内亚晶界附近形成(Nb,Ti)C无析出带,无析出带的宽度随冷却速率增大而减小。

2) 冷却速率达到 $15^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时可完全抑制析出物在冷却过程中形核。等温沉淀析出受到形核驱动力和原子扩散能力的共同影响,导致(Nb,Ti)C析出峰值温度点出现在 550°C 。纳米尺度(Nb,Ti)C在 $500 \sim 660^{\circ}\text{C}$ 温度区间具有优良的热稳定性。

3) 700MPa级车厢板和780MPa级大梁钢的微观组织分别以超细铁素体和贝氏体铁素体为主,铁素体或贝氏体铁素体基体中含有大量弥散析出的尺寸在 $3 \sim 20\text{nm}$ 的近似圆形析出物(Nb,Ti)C,该尺寸范围内 10nm 以下析出物所占比例达到90%,其形核机制以位错形核为主。超高强汽车板的强化机制主要为析出强化和细晶强化,析出强化贡献量达到300MPa左右;疲劳性能实验结果表明超高强汽车板的疲劳强度比(σ_{-1}/R_m)在0.6左右,高于一般钢材,晶粒超细化、析出物的纳米化及颗粒状或短棒状碳化物是钢板具有优异抗疲劳性能的主要原因。

(2) 在含钒微合金钢奥氏体中析出对晶内铁素体形核的影响及其应用方面,系统研究了V对高Ti钢晶内形核铁素体相变以及奥氏体中VN析出相对铁素体相变的影响规律,提出了利用奥氏体中VN析出促进晶内铁素体形核改善特厚板组织均匀性和焊接粗晶区的冲击韧性的理论及控制技术,结果表明:

1) 高Ti钢加入V之后,富V的析出相在富Ti析出相表面依附形核,从而促进了晶内铁素体的形成,铁素体晶粒尺寸得到明显细化,强度与塑性大幅提高。

2) VN与铁素体具有极低的晶格错配度,两者之间的低能界面促进晶内铁素体的形核,奥氏体中形变诱导析出 20nm 尺度的VN析出作为针状铁素体的形核点,可以有效地促进针状铁素体的形核及铁素体的晶粒细化。

3) 奥氏体中VN析出促进晶内形成高密度大角度晶界的针状铁素体,减少了焊接接头贝氏体与魏氏组织,大大改善了低温冲击韧性,且针状铁素体组织强化作用显著,可避免焊接粗晶区软化。

4) 利用VN对铁素体非均匀形核的促进作用,通过轧制工艺和冷却工艺

的调整, VN 微合金化 + 控制轧制和控制冷却工艺可以在特厚规格钢板提高组织均匀性和强韧性方面发挥重要作用, 这将为高强韧性特厚规格钢板的生产提供一种新的途径。

(3) 在超低碳搪瓷用钢析出行为及其对氢扩散行为和成型性能的影响等方面, 研究了 $Ti_4C_2S_2$ 和 $Ti(C, N)$ 两种第二相粒子的析出演变规律, 深入探讨了 $Ti_4C_2S_2$ 和 $Ti(C, N)$ 析出粒子对超低碳冷轧搪瓷用钢组织演变和超深冲成型性能的影响, 结果表明:

1) 超低碳冷轧搪瓷用钢热轧过程中 P_s 线鼻温度附近的变形能够有效地促进 $Ti_4C_2S_2$ 在奥氏体区的迅速析出, 消耗掉大量的 C 原子, 降低了热轧板中 $Ti(C, N)$ 的体积分数, 可以显著减轻细小弥散的 $Ti(C, N)$ 析出粒子对界面迁移的钉扎作用和固溶态 C 原子的溶质拖曳效应对 γ 再结晶组织发展的负面影响, 其 γ 组织由几乎等强的 $\{111\}\langle 112\rangle$ 和 $\{111\}\langle 110\rangle$ 组成, r_m 值达到了 2.4 以上, 具有优良的超深冲成型性能。

2) 超低碳冷轧搪瓷用钢热轧板中 $Ti(C, N)$ 析出粒子随热轧板卷取温度的升高而逐渐粗化, 其体积分数也逐渐增大; 随卷取过程冷速的增大而逐渐细化。采用较高的 720°C 卷取, 缓慢冷却的实验钢退火板具有较强的 γ 再结晶组织, r_m 值在 2.2 以上; 而卷取温度低于 660°C 或高温卷取后冷速较快时, 退火板的 γ -组织较弱, r_m 值低于 1.8。不同卷取工艺的超低碳冷轧搪瓷用钢退火板的氢扩散系数 D_L 均较小, 远低于临界值。考虑到搪瓷用钢板的超深冲性能, 应当采用相对较高的热轧板卷取温度, 并且保证热轧板高温卷取后, 缓慢冷却。

3) 超低碳冷轧搪瓷用钢增加 S 含量会促进 $Ti_4C_2S_2$ 在奥氏体区的析出, 导致最终热轧板中 $Ti(C, N)$ 析出大量减少; (半) 共格的 $Ti(C, N)$ 析出粒子与铁素体基体的相界面是主要的不可逆氢陷阱位置, S 含量较低的低温退火 (低于 850°C) 板的氢扩散系数 D_L 较低; 当在高温退火 (高于 850°C) 下 $Ti(C, N)$ 析出发生回溶导致其数量降低时, $Ti_4C_2S_2$ 析出成为氢陷阱位置的主要来源; 为保证采用高温连续退火工艺生产的超低碳冷轧搪瓷用钢的抗鳞爆性能, 应适当提高 S 含量和控制热轧温度, 促进 $Ti_4C_2S_2$ 弥散析出。

3. 鉴定、论文与专利

论文:

(1) Jun Hu, Linxiu Du, Jianjun Wang. Effect of V on intragranular ferrite nucleation of high Ti bearing steel. Scripta Materialia, 2013, 68: 953 ~ 956.

(2) Jun Hu, Linxiu Du, Jianjun Wang, Cairu Gao. Effect of welding heat input on microstructures and toughness in simulated CGHAZ of V-N high strength steel. Materials Science and Engineering A, 2013, 577: 161 ~ 168.

(3) Jun Hu, Linxiu Du, Jianjun Wang. Effect of cooling procedure on microstructures and mechanical properties of hot rolled Nb-Ti bainitic high strength steel. Materials Science and Engineering A, 2012, 554: 79 ~ 85.

(4) Jun Hu, Linxiu Du, Jianjun Wang, Hui Xie, Cairu Gao, R. D. K. Misra. Structure-mechanical property relationship in low carbon microalloyed steel plate processed using controlled rolling and two-stage continuous cooling. Materials Science and Engineering A, 2013, 585: 197 ~ 204.

(5) Jun Hu, Linxiu Du, Jianjun Wang, Cairu Gao, Tongzi Yang, Anyang Wang, R. D. K. Misra. Microstructures and mechanical properties of a new as-hot-rolled high-strength DP steel subjected to different cooling schedules. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013, 44A: 4937 ~ 4947.

(6) Jun Hu, Linxiu Du, Jianjun Wang, Qingyi Sun. Cooling process and mechanical properties design of hot-rolled low carbon high strength microalloyed steel for automotive wheel usage. Materials and Design, 2014, 53: 332 ~ 337.

(7) Jun Hu, Linxiu Du, Jianjun Wang, Hui xie, Cairu Gao, R. D. K. Misra. High toughness in the intercritically reheated coarse-grained (ICRCG) heat-affected zone (HAZ) of low carbon microalloyed steel. Materials Science and Engineering A, 2014, 590: 323 ~ 328.

(8) Jun Hu, Linxiu Du, Hui Xie, Peng Yu, R. D. K. Misra. A nanograined/ultrafine-grained low-carbon microalloyed steel processed by warm rolling. Materials Science and Engineering A, 2014, 605: 186 ~ 191.

(9) Jun Hu, Linxiu Du, Hui Xie, Xiuhua Gao, R. D. K. Misra. Microstructure and mechanical properties of TMCP heavy plate microalloyed steel. *Materials Science and Engineering A*, 2014, 607: 122 ~ 131.

(10) Jun Hu, Linxiu Du, Hui Xie, Futao Dong, R. D. K. Misra. Effect of weld peak temperature on the microstructure, hardness, and transformation kinetics of simulated heat affected zone of hot rolled ultra-low carbon high strength Ti-Mo ferritic steel. *Materials and Design*, 2014, 60: 302 ~ 309.

(11) 胡军, 杜林秀, 王万慧, 李晶. 590MPa 级热轧 V-N 高强车轮钢组织性能控制. *东北大学学报*, 2013, 34(6): 820 ~ 823.

(12) Linxiu Du, Shengjie Yao, Jun Hu, Huifang Lan, Hui Xie, Guodong Wang. Fabrication and microstructural control of nano-structured bulk steels, a review. *Acta Metallurgical Sinica (English Letters)*, 2014, 27(3): 508 ~ 520.

(13) Futao Dong, Linxiu Du, Xianghua Liu, Fei Xue. Optimization of chemical compositions in low-carbon Al-killed enamel steel produced by ultra-fast continuous annealing. *Materials Characterization*, 2013, 84: 81 ~ 87.

(14) Futao Dong, Linxiu Du, Xianghua Liu, Jun Hu, Fei Xue. Effect of Ti (C,N) precipitation on texture evolution and fish-scale resistance of ultra-low carbon Ti-bearing enamel steel. *Journal of iron and steel research*, 2013, 20(4): 39 ~ 45.

(15) 董福涛, 杜林秀, 刘相华, 薛飞. 连续退火工艺对含 B 搪瓷用钢组织性能的影响. *金属学报*, 2013, 49(10): 1160 ~ 1168.

(16) 谢辉, 杜林秀, 胡军. 冷却工艺对低碳 Ti 微合金化热轧超高强钢组织性能的影响. *东北大学学报*, 2014, 35(4): 508 ~ 511.

(17) Wang X. P., Du L. X., Zhou M. and Sun G. S., Influence of soaking temperature on transformation behaviour and precipitate coarsening of new cold rolled weathering steel containing niobium and titanium, *Materials science and technology*, 2014(accepted).

(18) 衣海龙, 王晓南, 杜林秀, 王国栋. 710MPa 级热轧高强钢的组织性能. *东北大学学报 (自然科学版)*, 2009, 30(10): 1421 ~ 1424.

(19) Yi H L, Du L X, Wang G D, Liu X H. Development of a hot-rolled low carbon steel with high yield strength. *ISIJ Int.* 46(2006)754.

(20) Xiaonan Wang, Linxiu Du, Hongshuang Di, Hui Xie, Dehao Gu. Effect of Deformation on Continuous Cooling Phase Transformation Behaviors of 780MPa Nb-Ti Ultra-high Strength Steel. Steel Research International, 2011, 82 (12): 1417 ~ 1424.

(21) Xiaonan Wang, Linxiu Du, Hongshuang Di. 700MPa Grade Steel for Heavy-duty Truck Development and Carriage Lightweight Design. Reviews on Advanced Materials Science.

(22) 王晓南, 杜林秀, 张海仑, 邸洪双. 780MPa 级重载汽车用大梁钢的工业试制. 钢铁研究学报, 2011, 23(5): 45 ~ 49.

(23) 宋勇军, 王晓南, 徐兆国, 罗继峰, 杜林秀. 700MPa 级超高强重载汽车车厢板的研制. 机械工程学报, 2011, 47(22): 69 ~ 73.

(24) 王晓南, 杜林秀, 袁晓云, 董福涛, 刘相华. 新型低碳冷轧搪瓷用钢的组织及其性能. 钢铁, 2011, 46(7): 64 ~ 69.

(25) 王晓南, 杜林秀, 张弛, 袁晓云, 焦景民. DC01EK 冷轧搪瓷用钢开发及其抗鳞爆性能研究. 钢铁研究学报, 2011. 23(8): 49 ~ 53.

(26) 王晓南, 杜林秀, 董福涛, 董学新, 焦景民. 合金元素 Ti 对 DC01EK 低碳冷轧搪瓷用钢组织性能的影响. 轧钢, 2011, 28(5): 1 ~ 3.

(27) Xiaonan Wang, Hongshuang Di, Chi Zhang, Linxiu Du, Xuexin Dong, Weldability of 780 MPa Super-High Strength Heavy-Duty Truck Crossbeam Steel, Journal of iron and steel research international, 2012, 19(6): 64 ~ 69.

(28) Xiaonan Wang, Yanfeng Zhao, Bingjie Liang, Linxiu Du and Hongshuang Di, Study on Isothermal Precipitation Behavior of Nano-Scale (Nb,Ti)C in FerriteBainite in 780 MPa Grade Ultra-High Strength Steel, Steel Research International, 2013, 84(4): 402 ~ 409.

(29) 王晓南, 杜林秀, 邸洪双. 新型热轧纳米析出强化超高强汽车板的疲劳性能研究. 机械工程学报, 2012, 48(22): 27 ~ 33.

(30) 王宁, 李毅, 杜林秀, 等. 550MPa 级低成本商用车车轮钢的工业试制及性能研究. 钢铁, 2008, 43(6): 74 ~ 77.

(31) Wang N, Li Y, Du L X, et al. Fatigue property of low cost and high strength wheel steel for commercial vehicle. Journal of Iron and steel research inter-

national, 2009, 16(4): 44 ~ 48.

(32) 王宁, 李毅, 杜林秀, 等. 高强度汽车车轮钢的研制及结构减重分析. 轧钢, 2006, 23(5): 1 ~ 4.

专利:

(1) 杜林秀, 衣海龙, 高彩茹, 王国栋, 刘相华. 一种低碳 700MPa 级复合强化超细晶粒带钢的制造方法, 2008, 中国, ZL2005100476324。

(2) 杜林秀, 衣海龙, 赵坤, 高彩茹, 王国栋, 刘相华. 一种 700MPa 级 F/B 高强带钢的制造方法, 2007, 中国, ZL2005100476339。

(3) 衣海龙, 杜林秀, 吴迪, 王晓南, 王国栋. 一种屈服强度高于 800MPa 的热轧带钢及其制备方法, 2011, 中国, ZL2009100117423。

鉴定成果:

项目名称: 新型超高强汽车板研制开发

组织鉴定单位: 天津市科学技术委员会

完成单位: 天津天铁冶金集团有限公司, 东北大学

鉴定时间: 2010 年 3 月

4. 项目完成人员

姓 名	技术职称	专 业	工作单位
杜林秀	教 授	材料加工	东北大学
胡 军	博士生	材料加工	东北大学
董福涛	博士生	材料加工	东北大学
王晓南	博士生	材料加工	苏州大学
谢 辉	博士生	材料加工	东北大学
高彩茹	副教授	材料加工	东北大学
高秀华	教 授	材料加工	东北大学
邱春林	副教授	材料加工	东北大学
吴红艳	讲 师	材料加工	东北大学
蓝慧芳	讲 师	材料加工	东北大学

5. 报告执笔人

杜林秀、胡军、董福涛、王晓南、谢辉。

6. 致谢

在本项研究工作的进行过程中，除了课题组成员的努力工作之外，还得到了实验室领导、同事，以及合作企业的相关领导和工程技术人员的帮助与支持，这些帮助与支持对于相关的科研项目的顺利完成和在析出理论研究上取得一定程度的进展是非常重要的。

轧制技术及连轧自动化国家重点实验室王国栋院士对于我们的研究工作从方向的把握到具体的实验均给予了细致周到的关心与指导，而且王院士还非常关心课题组年轻研究人员的成长，对于年轻同志特别是优秀博士生在研究工作中取得的进展和个人的进步给予了充分的肯定和热情的鼓励，使年轻的同志们既感到了温暖又增强了自信。这次从具体的科研项目中提出对析出问题进行提炼和归纳整理，也是在王院士的特别指导下完成的。

实验室主任吴迪教授对于我们的研究工作给予了多方面的帮助与支持，对于我们在基础理论研究上取得的进展给予了充分的肯定，课题组进行的一些探索性的研究工作还得到了国家重点实验室科研业务费的支持。实验室与本团队有着长期合作关系的赵德文教授和邸洪双教授为本项研究工作提出了很多非常重要的建议，在此对二位教授表示衷心的感谢。

我们要特别感谢合作企业的相关领导和工程技术人员。天津铁厂热轧公司总经理宋勇军、总工程师徐兆国，马钢技术中心常务副主任张建博士、副主任杨兴亮博士、高强钢所副所长胡学文以及张宜高级工程师，首钢技术研究院副院长朱启建博士、薄板所副所长崔阳博士、薄板所肖宝亮博士及张大伟工程师等，这些领导和工程技术人员在纳米析出强化 Nb-Ti 复合微合金化超高强钢开发和析出理论研究上给予了我们十分重要的帮助与支持；攀钢技术研究院副院长程兴德、高级工程师杨雄飞，湖南省宏元稀有金属材料有限公司副总经理刘海泉等在钒析出理论研究及应用方面为我们提供了重要的支持与帮助；唐山国丰钢铁公司总工程师焦景民博士在冷轧搪瓷用钢产品开发和析出理论研究上为我们提供了重要的支持与帮助。此外，我们在析出理论

研究上取得的进展还与莱芜钢铁公司、五矿营口中板有限责任公司进行了交流，莱钢宽厚板事业部副总经理周平博士和五矿营口中板有限公司杨海峰技术总监就进一步完善析出理论研究以及如何将理论研究成果应用于生产实际等方面向我们提出了非常有价值的建议。所以我们要向上述合作企业的领导和工程技术人员表示我们由衷的感谢之意！

最后，我们还要感谢实验室的老师：崔光洙、李成刚、田浩、王佳夫、薛文颖、张维娜、高翔宇、赵文柱，办公室张颖、李钊、杨子琴、沈馨、孟丽娟等对本项研究工作及本团队多年来的帮助与支持！

目 录

摘要	1
1 Nb-Ti 微合金化超高强热轧带钢析出研究及组织性能控制	4
1.1 引言	4
1.1.1 热轧微合金超高强钢的研究现状	4
1.1.2 含 Ti 微合金钢析出行为研究现状	7
1.2 奥氏体冷却过程相变行为研究	11
1.2.1 实验材料及方法	11
1.2.2 连续冷却过程相变实验结果	13
1.2.3 讨论	17
1.2.4 小结	26
1.3 (Nb,Ti)C 的析出行为及热稳定性研究	26
1.3.1 实验材料及方法	27
1.3.2 连续冷却过程(Nb,Ti)C 析出行为的实验结果与分析	29
1.3.3 等温过程(Nb,Ti)C 析出行为的实验结果与分析	34
1.3.4 (Nb,Ti)C 热稳定性的实验结果与分析	45
1.3.5 小结	50
1.4 超高强汽车板控轧控冷实验及组织性能分析	50
1.4.1 实验材料及实验方法	50
1.4.2 实验结果及讨论	52
1.4.3 小结	59
参考文献	60
2 奥氏体中 V 析出物对晶内铁素体形核的影响及组织性能控制	66
2.1 前言	66



2.2 Ti-V 热轧带钢中的晶内铁素体形核行为	66
2.2.1 研究背景	66
2.2.2 试验材料及试验方法	67
2.2.3 试验结果	68
2.2.4 讨论	71
2.2.5 小结	72
2.3 V-N 钢中厚板 VN 析出对组织性能的影响	73
2.3.1 研究背景	73
2.3.2 试验材料及试验方法	74
2.3.3 试验结果与讨论	76
2.3.4 小结	83
2.4 VN 析出物对焊接粗晶热影响区组织性能的影响	83
2.4.1 研究背景	83
2.4.2 试验材料及试验方法	85
2.4.3 试验结果	87
2.4.4 讨论	95
2.4.5 小结	96
2.5 VN 析出物对多道次焊接临界再加热粗晶热影响区 组织性能的影响	97
2.5.1 研究背景	97
2.5.2 试验材料及试验方法	98
2.5.3 试验结果与讨论	100
2.5.4 小结	106
参考文献	106
3 低碳冷轧搪瓷用钢中析出物的研究	114
3.1 引言	114
3.2 实验材料及方法	115
3.2.1 化学成分和生产工艺模拟	115
3.2.2 组织性能检测分析	116

3.3 实验结果及讨论	119
3.3.1 热轧板组织和第二相析出粒子	119
3.3.2 冷轧退火板组织和第二相析出粒子	120
3.3.3 冷轧退火板的力学性能	123
3.3.4 冷轧退火板 H 渗透行为的影响	125
3.4 小结	127
参考文献	128
4 超低碳冷轧搪瓷用钢中析出物的研究	130
4.1 引言	130
4.2 实验材料及方法	131
4.2.1 化学成分和生产工艺模拟	131
4.2.2 组织性能检测分析	133
4.3 实验结果及讨论	134
4.3.1 热轧卷取温度对连续退火生产的超低碳冷轧搪瓷用 钢组织性能的影响	134
4.3.2 热轧卷取冷却条件对罩式退火超低碳冷轧搪瓷用 钢组织性能的影响	141
4.4 小结	149
参考文献	150

摘 要

低合金结构钢微合金化有两个主要目的：其一是细化晶粒，其二是沉淀强化。对于细化晶粒，铌是非常有效的微合金元素，这是由于无论铌是固溶于奥氏体中，还是在奥氏体中析出，均对奥氏体再结晶过程有强烈的阻碍作用，当与控制轧制和控制冷却工艺相结合时，就可以获得很好的晶粒细化的效果。对于沉淀强化，钒是有效的微合金元素，这是由于钒在奥氏体中的溶解度较高，而在铁素体中则可以获得细小弥散的钒的析出物，钢材因这些析出物的存在而获得很好的沉淀强化效果；同样，钛微合金化钢则可以利用铁素体中析出的纳米尺度的 TiC 而获得沉淀强化效果，这种技术近年来在 700MPa 以上级别的热轧超高强钢的开发和生产中得到了广泛的应用。这就是利用微合金化进行结构钢微观组织和力学性能控制的广为接受的冶金学原理。

然而，析出过程作为钢中的一种扩散型相变，化学成分和加工工艺对其有强烈的影响，在不同的成分体系和加工工艺条件下会呈现不同的规律性，同时也会对钢材加工过程中其他的相变过程产生影响。因此，本项研究工作结合课题组在钢材产品研究开发过程中涉及的析出理论问题开展研究，主要包括 Nb-Ti 微合金化钢热轧过程析出规律，含钒微合金钢奥氏体中析出对晶内铁素体形核的影响及其应用，低碳和超低碳冷轧搪瓷用钢析出行为及其对氢扩散行为和成型性能的影响等方面。值得一提的是，在含钒微合金钢奥氏体中析出与晶内铁素体形核理论研究及其应用方面，提出了利用奥氏体中 VN 析出物促进晶内铁素体形核进而改善特厚板组织均匀性的新思路，这使解决高强韧性特厚规格钢板生产的难题成为可能。具体研究内容和主要结果如下：

(1) 在 Nb-Ti 微合金化超高强热轧带钢析出行为及组织性能控制方面，利用热模拟实验技术，研究了变形、冷却速率、等温温度对纳米尺度 (Nb, Ti)C 析出行为的影响规律，分析了沉淀析出与铁素体相变、贝氏体相变之间的相互影响机制，研究了纳米析出强化超高强钢的组织性能关系。结果