

RAL · NEU 研究报告 No.0028

Ni 系超低温用钢强韧化 机理及生产技术

NI XI CHAODIWEN YONGGANG QIANGRENHUA JILI JI SHENGCHAN JISHU

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
www.cnmp.com.cn

RAL · NEU 研究报告 No. 0028

Ni 系超低温用钢强韧化 机理及生产技术

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

2018

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 Ni 系超低温用钢强韧化机理及生产技术方面的最新进展。主要包括: Ni 系低温钢的高温变形行为、相变规律及在 QT 工艺条件下工艺参数对组织性能的影响规律、组织的演变规律和物理冶金原理、TMCP-UFG-LT 工艺对 Ni 系低温钢组织及力学性能的影响规律及其强韧化机理、Ni 系低温钢的工业化技术。

本报告可供冶金、材料、能源等领域的科技人员阅读,也可供中、高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

Ni 系超低温用钢强韧化机理及生产技术/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, 2018. 7

(RAL·NEU 研究报告)

ISBN 978-7-5024-7802-5

I. ①Ni… II. ①轧… III. ①超低温—低温钢—强化机理—研究报告 ②超低温—低温钢—炼钢—研究报告 IV. ①TG142. 74

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 134968 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 yjcbbs@cnmp.com.cn

策 划 任静波 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 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7802-5

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

2018 年 7 月第 1 版, 2018 年 7 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 9.5 印张; 148 千字; 137 页

54.00 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

随着我国能源消耗量的激增，过度依赖煤炭造成了严重空气污染，大规模使用天然气等清洁能源已成为发展趋势。预计到 2020 年，我国液化天然气（LNG）需求量将达 1700 亿吨，液化石油气（LPG）需求量将达 4000 万吨以上。基于此，我国计划建设超过 200 个特大型 LNG 储罐、约 60 艘大型 LNG 海上运输船及 40 余艘 LPG 运输船，其中储运设施关键材料 Ni 系低温钢的用量将高达 60 万吨。由于 LNG 和 LPG 温度极低且具有可燃性，因此为确保安全性要求 Ni 系低温钢在超低温条件下需要具备较高的强韧性和良好的焊接性能。为了获得良好的强韧性匹配，工业上一般采用离线淬火+回火（QT）工艺生产 Ni 系低温钢。

我国 Ni 系低温钢的发展较晚，过去基本依赖进口。国外产品价格昂贵而且交货周期长，严重制约了我国能源化工行业的发展，因此实现 Ni 系低温钢的国产化非常重要。尽管近年来国内已有企业能生产 5%Ni 钢及 9%Ni 钢等镍系低温钢，但是产品的质量还不够稳定，不能完全得到用户的认可。因此，有必要对 QT 工艺条件下 Ni 系低温钢的组织性能调控原理和方法进行研究，并优化生产工艺，提高 Ni 系低温钢的力学性能，从而提升我国 Ni 系低温钢的市场竞争力。

Ni 合金占 Ni 系低温钢成本的比重较大，而且较高的 Ni 含量还会给后续炼钢、连铸及焊接等工序带来许多问题，因此研发减 Ni 化钢板对于国内 Ni 系低温钢的发展具有重要意义。但是 Ni 含量降低会导致钢板中逆转奥氏体含量下降，低温韧性恶化。尽管 QLT 工艺可以显著提高钢中逆转奥氏体含量从而提高低温韧性，但 QLT 工艺得到的钢板强度偏低，且工序复杂，很少在实际生产中使用。日本对 7%Ni 钢采用在线淬火+亚温淬火+回火（TMCP-UFC-LT）工艺，使 7%Ni 钢的综合使用性能达到 9%Ni 钢水平，可应用于大型陆

基 LNG 储罐的建造, LNG 储罐建造质量提高、造价降低。然而,我国节 Ni 型 Ni 系低温钢尚属空白,威胁着 LNG 和 LPG 储运设施的自主建设及国际竞争力的提高。因此,开展 TMCP-UFC-LT 工艺条件下 Ni 系低温钢的组织性能演变规律研究和工艺开发具有重要的理论和现实意义。

2. 研究进展与成果

我国能源消费过度依赖煤炭,造成大量温室气体和粉尘排放。清洁的天然气利用对我国能源结构调整、节能减排有重大战略意义。我国清洁能源每年以 15% 左右的增速增长,但占一次能源比例还没有达到国际平均水平的四分之一,与发达国家仍存在较大差距。为此,国家形成了“西气东输、北气南下、海气登陆”的清洁能源发展战略,需要大力发展清洁能源储运设施建设,为 Ni 系低温钢的发展提供了广阔的市场前景。

Ni 系低温钢是业界公认为技术含量最高、生产难度最大的钢种之一,其超低温服役环境要求其性能必须具有高的强度、良好的超低温韧性、焊接性能和抗裂纹扩展能力等。长期以来,我国 Ni 系低温钢基本依赖进口,造成清洁能源储运设施价格大幅上涨,制约了我国清洁能源战略的推行和发展。尽管近年来我国已实现了 Ni 系低温钢的国产化,但是有关 Ni 系低温钢的物理冶金原理尚不明确,造成组织结构控制目标和轧制、热处理工艺开发只能处于“知其然不知其所以然”的状态,产品质量稳定性差、剩磁高、合金成本高,降低了我国 Ni 系低温钢的市场竞争力。因此,必须对 Ni 系低温钢的组织性能调控原理和方法进行探索研究,开发具有自主知识产权的相关生产技术,实现低成本、高韧性 Ni 系低温钢的生产开发。

(1) 通过系统研究 Ni 系低温钢的高温变形行为、相变规律以及 QT 工艺条件下工艺参数对组织性能的影响规律和组织的演变规律,明确了 QT 工艺条件下 Ni 系低温钢的物理冶金学原理,开发出具有自主知识产权的 Ni 系低温钢生产技术。

1) 系统阐述了 Ni 系低温钢的奥氏体高温变形行为。3.5%Ni 钢、5%Ni 钢和 7%Ni 钢的动态再结晶激活能分别为 347.02kJ/mol、356.94kJ/mol 和 367.14kJ/mol。分析了 Ni 系低温钢高温变形抗力与变形温度、应变速率和变形量的关系,并建立了变形抗力模型。静态再结晶软化率随变形温度的升高

和道次间隔时间的延长而增加。在相同的变形温度和道次间隔时间条件下, Ni 含量最低的 3.5%Ni 钢静态再结晶软化率最高, 表明 Ni 元素抑制了静态再结晶的发生。

2) 对比研究了不同 Ni 含量的 Ni 系低温钢的相变规律。Ni 系低温钢在不同冷却速度下的组织主要为多边形铁素体、珠光体、针状铁素体、粒状贝氏体、下贝氏体、板条马氏体。在低冷却速度下 Ni 能够抑制铁素体相变, 促进贝氏体和马氏体相变; 在高冷却速度下 Ni 则会抑制贝氏体相变, 促进马氏体相变, 并会显著降低马氏体的临界冷却速度。随着冷却速度的增加, 维氏硬度逐渐增加, 当冷却速度增加到一定程度时, 维氏硬度的增速变慢。

3) 通过对 QT 热处理过程中 Ni 系低温钢组织性能变化规律和强韧化机理的研究, 得到了具有良好组织形态与综合力学性能的工艺范围。Ni 系低温钢的原奥氏体晶粒尺寸随奥氏体化温度的升高而逐渐增加, 因此奥氏体化温度不宜选择太高。随着回火温度的增加和回火时间的延长, 逆转奥氏体的含量增加且尺寸增大。但是逆转奥氏体的含量增加会使得其中富集的 C、Mn 和 Ni 元素浓度降低, 导致逆转奥氏体稳定性降低, 在低温下重新转变为马氏体, 反而恶化了钢板的低温韧性。

4) 探讨了 QT 工艺条件下 Ni 含量对 Ni 系低温钢组织的影响规律, 分析了 Ni 元素提高 Ni 系低温钢低温韧性的影响机理。随着 Ni 含量的增加, 韧脆转变温度降低, -196°C 冲击功增加。经 QT 处理后四种成分的 Ni 系低温钢组织均为回火马氏体和少量逆转奥氏体。Ni 对原奥氏体晶粒有一定的细化作用, 但是细化作用较小。随着 Ni 含量的增加, 逆转奥氏体含量增加, 尺寸增大。逆转奥氏体含量的增加是冲击韧性改善的主要原因。逆转奥氏体的韧化机理主要为: 净化基体, 消除渗碳体的析出, 提高基体的塑性变形能力; 在冲击过程中发生相变, 缓解裂纹尖端应力集中并阻碍裂纹扩展。

(2) 基于新一代 TMCP 技术, 采用低温控轧工艺细化晶粒, 热轧后采用超快冷快速冷却到室温, 从而代替传统的离线淬火过程, 随后结合亚温淬火+回火工艺 (TMCP-UFC-LT) 制备了低 Ni 钢板, 并系统研究了 TMCP-UFC-LT 工艺对 Ni 系低温钢组织及力学性能的影响规律, 并对其强韧化机理进行了讨论, 为开发低成本、高韧性 Ni 系低温钢奠定工艺基础。

1) 系统研究了热轧工艺对 Ni 系低温钢轧态晶粒的影响。奥氏体再结晶



区压下率在 50% 以上, 未再结晶区压下率在 60% 以上时, 得到的奥氏体晶粒细小、均匀。终轧温度过高时容易产生混晶, 终轧温度为 820℃ 时, 得到的奥氏体晶粒较为细小。5%Ni 钢热轧后采用超快冷得到细小的淬火马氏体和少量贝氏体组织, 而空冷则得到多边形铁素体、珠光体和少量贝氏体组织。重新奥氏体化后, 超快冷工艺钢板的原奥氏体晶粒更为细小。

2) 系统研究了 TMCP-UFC-LT 工艺对 Ni 系低温钢组织性能的影响。TMCP-UFC-LT 工艺处理的实验钢组织为回火马氏体、临界铁素体和一定量的逆转奥氏体, 热稳定性良好的逆转奥氏体是 Ni 系低温钢具有良好低温韧性的主要原因。TMCP-UFC-LT 工艺条件下 3.5%Ni 钢在 -135℃ 的冲击功为 237J; 5%Ni 钢和 7%Ni 钢在 -196℃ 的冲击功分别为 185J 和 222J。相比 QT 工艺, TMCP-UFC-LT 工艺条件下 Ni 系低温钢具有更高的冲击韧性, 与 QLT 工艺相比, 工艺流程缩短且强度更高, 可见 TMCP-UFC-LT 工艺生产的钢板具有更好的综合力学性能。

3) 研究了 TMCP-UFC-LT 工艺条件下逆转奥氏体的形成机制和韧化机理。TMCP-UFC-LT 工艺条件下逆转奥氏体存在两种形态, 一种为分布在板条间的针状逆转奥氏体; 另一种为分布在原奥氏体晶界和板条束边界处的块状逆转奥氏体。细小的有效晶粒和适量稳定性高且弥散分布的针状逆转奥氏体是 TMCP-UFC-LT 工艺钢板具有优异低温韧性的主要原因。相比在大角度晶界处析出的块状逆转奥氏体, 针状逆转奥氏体分布更加弥散, 可以更有效地阻碍裂纹扩展, 提高裂纹扩展功。

(3) 在南钢炉卷轧机生产线上实现了 Ni 系低温钢的工业规模化生产, 钢板的各项力学性能达到标准和客户的要求, 其中低温韧性远高于标准要求, 可用于建造大型深冷储罐和深冷压力容器, 并已开始推广应用。

本项目所开发的 Ni 系超低温用钢生产技术, 实现了高强韧性、高稳定性控制和合金减量化, 产生了显著的经济和社会效益, 具有很强的市场竞争力。

3. 论文、专利、鉴定及获奖情况

论文:

(1) Wang M, Liu Z, Li C. Correlations of Ni contents, formation of reversed austenite and toughness for Ni-containing cryogenic steels [J]. Actametall-

lurgicasinica (English letters), 2017, 30 (3): 238~249.

(2) Wang M, Liu Z. Effects of ultra-fast cooling after hot rolling and inter-critical treatment on microstructure and cryogenic toughness of 3.5%Ni steel [J]. Journal of materials engineering and performance, 2017, 26 (7): 1~9.

(3) Wang M, Xie Z, Li C, et al. The development of Ni-containing cryogenic steels and their industrial manufacturing [C]. Energy materials 2014, 2014: 903.

(4) Liu Z, Wang M, Chen J, et al. Development and applications of new generation Ni-containing cryogenic steels in P. R. China. Energy materials 2017, 2017: 415.

(5) Xie Z, Liu Z, Wang G. Development of online heat treatment processing for 9Ni steel plates [C]. The third Baosteel biennial academic conference, 2008: 141~144.

(6) Xie Z, Liu Z, Chen J, et al. Investigation of static recrystallization behavior of 9Ni steel during thermomechanical processing [C]. Proceeding of the 10th international conference on steel rolling, 2010: 164.

(7) 王猛, 刘振宇, 李成刚. 轧后超快冷及亚温淬火对 5%Ni 微观组织与低温韧性的影响机理 [J]. 金属学报, 2017, 53 (8): 947~956.

(8) 王猛, 孙明雪, 李成刚, 刘振宇. 冷却速度对 5Ni 钢组织和相变温度的影响 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2014, 35 (2): 223~227.

(9) 王猛, 孙明雪, 李成刚, 刘振宇. 淬火和回火工艺对 3.5Ni 钢组织和力学性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2015, 36 (3): 83~89.

(10) 谢章龙, 刘振宇, 王国栋. 低碳 9Ni 钢的动态再结晶数学模型 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2010, 31 (1): 51~55.

(11) 谢章龙, 刘振宇, 王国栋. 热处理工艺对 9Ni 钢组织与性能的影响 [J]. 金属热处理, 2010, 35 (6): 37~42.

(12) 谢章龙, 陈俊, 刘振宇, 王国栋. 直接双相区热处理工艺参数对 9Ni 钢组织性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2011, 32 (5): 68~73.

(13) 谢章龙, 刘振宇, 陈俊, 徐蓉, 王国栋. 9Ni 钢薄板的奥氏体化温度及强韧化因素分析 [J]. 钢铁研究学报, 2011, 23 (9): 37~41.



(14) 谢章龙, 刘振宇, 陈俊, 王国栋. 双相区保温温度对 9Ni 钢组织性能的影响及增韧机理 [J]. 材料热处理学报, 2013, 34 (5): 51~57.

(15) 谢章龙, 刘振宇. 9Ni 钢组织演变、合金元素配分及增韧机理的研究 [J]. 材料科学与工艺, 2013, 21 (2): 6~13.

专利:

(1) 刘振宇, 谢章龙, 杨哲, 王国栋. 一种低碳 9Ni 钢的厚板的制造方法 [P]. 辽宁: CN101215668A, 2008-07-09.

(2) 刘振宇, 王猛, 李成刚, 王国栋. 一种高韧性 3.5Ni 钢板的制备方法 [P]. 辽宁: CN105177445A, 2015-12-23.

(3) 刘振宇, 王猛, 李成刚, 王国栋. 一种液化天然气储罐用 7Ni 钢板的制备方法 [P]. 辽宁: CN105543694A, 2016-05-04.

成果鉴定:

液化天然气储运用镍系超低温钢关键技术开发与应用 (2016 年山西省科技成果鉴定): 近三年项目完成单位生产的镍系超低温钢板建造 16 万立方米以上特大型 LNG 储罐 20 座、大型 LNG 和 LPG 罐船 26 艘 (其中出口 23 艘), 打破了国外对镍系超低温钢的垄断, 全面取代了进口, 对我国天然气发展战略安全具有重要意义, 经济、社会效益显著。综上所述, 项目总体技术达到国际先进水平。

成果获奖:

(1) 南京市科技进步一等奖 (LNG 专用 9%Ni 钢中厚板关键技术开发及产品应用, 2014 年)

(2) 江苏省科技进步二等奖 (LNG 专用 9%Ni 钢中厚板关键技术开发及产品应用, 2014 年)

4. 项目完成人员

主要完成人	职 称	单 位
刘振宇	教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
李成刚	工程师	东北大学 RAL 国家重点实验室
陈俊	讲师	东北大学 RAL 国家重点实验室
曹光明	副教授	东北大学 RAL 国家重点实验室

续表

主要完成人	职 称	单 位
唐帅	副教授	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
张维娜	副研究员	东北大学 RAL 国家重点实验室
陈其源	博士研究生	东北大学 RAL 国家重点实验室
任家宽	博士研究生	东北大学 RAL 国家重点实验室

5. 报告执笔人

刘振宇、王猛、陈其源、李成刚、陈俊、曹光明等

6. 致谢

在本项研究工作过程中，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，以及各合作企业的相关领导和工程技术专家的帮助和支持，这对于项目的顺利实施和完成起到重要的推动作用。

轧制技术及连轧自动化国家重点实验室王国栋院士对项目的研究工作从宏观方向的把握和具体实验的开展都给予了耐心的指导和悉心的帮助，王院士还特别关心课题组年轻人成长，在实验和现场试制的关键时刻始终给予了充分的肯定和热情的鼓励，使我们这些弄潮儿克服了一个又一个困难，进入了科研的海洋。

衷心感谢实验室主任王昭东教授、副主任李建平教授、张殿华教授、赵宪明教授、丛广宇老师等领导给予的帮助和支持。

我们也特别感谢合作企业南钢、太钢的相关领导和工程技术人员。衷心感谢南钢股份有限公司的黄一新、祝瑞荣、楚觉非及霍松波、谢章龙、李翔、孙超等领导专家的大力支持；衷心感谢太钢集团的王一德、李建民、王立新、崔天燮、田晓青、刘东风、孟传峰等领导专家的大力支持；向所有对本项目给予帮助和支持的领导和工程技术人员表示由衷的感谢！

最后，我们还要感谢实验室所有为本项成果曾付出辛劳和奉献的老师多年来的帮助与支持！

目 录

摘要	1
1 Ni 系低温钢概述	3
1.1 引言	3
1.2 Ni 系低温钢	3
1.2.1 常用 Ni 系低温钢的类型	3
1.2.2 Ni 系低温钢的发展	3
1.2.3 Ni 系低温钢的成分体系	5
1.2.4 Ni 系低温钢的生产工艺	7
2 Ni 系低温钢的高温变形规律	8
2.1 引言	8
2.2 实验材料及方法	8
2.2.1 实验材料	8
2.2.2 单道次压缩实验	9
2.2.3 双道次压缩实验	9
2.3 高温奥氏体动态再结晶行为	10
2.3.1 应力-应变曲线	10
2.3.2 动态再结晶数学模型	13
2.4 Ni 系低温钢变形抗力分析	18
2.4.1 变形温度对变形抗力的影响	18
2.4.2 应变速率对变形抗力的影响	19
2.4.3 变形程度对变形抗力的影响	19
2.4.4 变形抗力模型	20



2.5 高温奥氏体静态再结晶行为	22
2.5.1 软化率的变化规律	22
2.5.2 静态再结晶激活能确定	24
2.5.3 静态再结晶动力学	25
3 Ni 系低温钢的相变规律	28
3.1 引言	28
3.2 实验材料及方案	28
3.2.1 实验材料	28
3.2.2 实验方案	28
3.3 实验结果及讨论	30
3.3.1 连续冷却过程中的组织转变	30
3.3.2 连续冷却相变行为	38
3.3.3 维氏硬度分析	40
3.3.4 合金元素的配分	40
4 QT 工艺条件下 Ni 系低温钢的强韧化	43
4.1 引言	43
4.2 QT 工艺对 Ni 系低温钢组织性能的影响	43
4.2.1 实验材料及方法	43
4.2.2 3.5%Ni 钢组织演变与力学性能	45
4.2.3 5%Ni 钢组织演变与力学性能	52
4.2.4 7%Ni 钢组织演变与力学性能	60
4.2.5 9%Ni 钢组织演变与力学性能	64
4.3 Ni 含量对 Ni 系低温钢强韧化的影响机理	67
4.3.1 Ni 对低温韧性的影响	69
4.3.2 Ni 对显微组织的影响	69
4.3.3 韧化机理分析	75
5 Ni 系低温钢的 TMCP-UFC-LT 工艺开发	81
5.1 引言	81



5.2 热轧工艺对 Ni 系低温钢轧态晶粒的影响	82
5.2.1 实验材料及方案	82
5.2.2 压下率分配对轧态晶粒的影响	83
5.2.3 终轧温度对轧态晶粒的影响	85
5.2.4 冷却方式对组织的影响	86
5.3 TMCP-UFG-LT 工艺对 Ni 系低温钢组织性能的影响	87
5.3.1 实验材料及方法	87
5.3.2 实验结果及分析	88
5.3.3 讨论	102
5.4 逆转奥氏体的形成机制	120
6 Ni 系低温钢的工业化应用	124
6.1 引言	124
6.2 Ni 系低温钢工业生产	124
参考文献	131

摘 要

随着我国工业的发展和国民生活水平的提高,能源消耗量大幅度增加。但是,在我国能源消费中,煤占一次能源消费的比重在60%以上,造成大量温室气体和粉尘排放。雾霾天气和PM2.5超标已极为严重,对居民的工作生活和身体健康造成了严重的危害。近几年我国碳排放年增量几乎占了全世界的70%,面临着极大的能源转型和碳排放压力。增加天然气等清洁能源在我国一次能源消费中的比重是解决我国所面临的能源与环境问题的主要措施之一。

2001~2015年间,我国天然气消费以每年15.9%的速度增长,占一次能源比例上升到5.9%,但距国际平均水平的23.8%仍然差距较大。引进液化天然气(LNG)是我国进口天然气的主要形式之一。2012年我国液化天然气进口量达1470万吨,2008年以来年均增长38%,预期到2020年进口量将达到3000万吨。自90年代以来,我国液化石油气(LPG)消费量的年均增长达14.9%,但是国内石油资源贫乏,使得LPG的产量远远不能满足国内日益增长的需求,因此需要大量进口LPG。2011年我国液化石油气消费量约为2419万吨,预计到2020年我国LPG的需求量将增加到4000万~5000万吨。清洁的LNG与LPG的利用对我国能源结构调整、节能减排、保护生态环境有重大战略意义。

由于LNG与LPG的超低温性和可燃性,因此要求其储罐具有良好的耐低温性能。LNG与LPG储罐具有体积大、服役温度低、服役时间长及安全要求高等特点,这要求其内胆结构材料具有高强度、超低温韧性、抗低温裂纹扩展性能、良好的焊接性能与工艺适应性。相对于奥氏体不锈钢,Ni系低温合金化成本更低且强度更高,相对于铝合金,Ni系低温钢拥有较高的强度和较好的焊接性能。因此,一般选用Ni系低温钢作为LNG和LPG等液化气体储存和运输设备的内胆结构材料。

为了解决进口LNG和LPG的储运瓶颈问题,到2030年,国家计划在沿

海 20 余个城市建设超过 200 个特大型 LNG 储罐,建造约 60 艘大型 LNG 海上运输船及 40 余艘 LPG 运输船来满足增长的 LNG 及 LPG 储运要求。这将需要大量的 Ni 系低温钢,为 Ni 系低温钢的发展提供了很好的机遇。我国 Ni 系低温钢的发展较晚,过去基本依赖进口。国外产品价格昂贵而且交货周期长,严重制约了我国能源化工行业的发展,因此实现 Ni 系低温钢的国产化非常重要。

近年来,我国开展了 Ni 系低温钢的研制工作,并取得了较大的进展,但是生产中还存在产品质量稳定性差、剩磁高等问题,而且钢中添加合金元素较多导致成本较高。为了进一步提升我国 Ni 系低温钢的市场竞争力,对 Ni 系低温钢的组织性能调控原理和方法进行了大量探索研究,摸清了热处理过程中组织性能之间的关系和 Ni 元素的强韧化机理,通过优化工艺,改善 Ni 系低温钢的力学性能,实现了低成本、高韧性 Ni 系低温钢的生产开发。

本研究报告的目的是较为系统地介绍 Ni 系低温钢的强韧化机理和组织性能调控基本规律。主要研究内容如下:

(1) 介绍 Ni 系低温钢的生产技术,叙述了 Ni 系低温钢的成分体系、生产工艺及发展;

(2) 介绍 Ni 系低温钢的高温变形规律,建立了 Ni 系低温钢的动态再结晶和静态再结晶数学模型和变形抗力模型;

(3) 介绍 Ni 系低温钢的相变规律,分析了 Ni 系低温钢在连续冷却过程中的显微组织变化及相变行为,同时探讨了 Ni 含量对 Ni 系低温钢相变行为的影响;

(4) 介绍 QT 工艺条件下 Ni 含量对 Ni 系低温钢组织性能的影响规律,分析了 Ni 含量对 Ni 系低温钢强韧性的影响机理;

(5) 介绍提高低 Ni 钢逆转奥氏体含量的 TMCP-UFC-LT 工艺,研究了控制轧制和超快速冷却对 Ni 系低温钢组织的影响规律,分析了 TMCP-UFC-LT 工艺的强韧化机理;

(6) 最后介绍了 Ni 系低温钢的工业化生产技术。

关键词: Ni 系低温钢,显微组织,逆转奥氏体,热处理,控制轧制,超快速冷却,低温韧性

1 Ni 系低温钢概述

1.1 引言

随着我国能源需求的增加和石油化工行业的发展，需要大量的 Ni 系低温钢来制造各种液化气体储罐和运输船。由于液化气体温度极低且具有可燃性，为确保安全性要求 Ni 系低温钢在超低温条件下具有较高的强韧性和良好的焊接性能。目前液化天然气（LNG）和液化石油气（LPG）等液化气储罐和船逐渐向大型化发展，对 Ni 系低温钢的强度和低温韧性提出了更高的要求。我国 Ni 系低温钢的发展较晚，目前生产中还存在许多问题，特别是关于 Ni 含量对组织演变规律的影响和强韧化机理方面尚需深入研究。

1.2 Ni 系低温钢

1.2.1 常用 Ni 系低温钢的类型

表 1-1 示出了常用 Ni 系低温钢的类型及使用温度范围^[1~3]。可以看到，Ni 系低温钢 Ni 质量分数从 0.5%~9%，随着 Ni 含量的增加，最低使用温度降低，9%Ni 钢的最低使用温度可达-196℃。本研究报告中研究的 Ni 系低温钢中 Ni 的质量分数在 3.5%~9%之间。

表 1-1 Ni 系低温钢类型及使用温度范围

钢 种	0.5%Ni	2.5%Ni	3.5%Ni	5%Ni	9%Ni
最低使用温度/℃	-60	-70	-110	-130	-196

1.2.2 Ni 系低温钢的发展

1932 年美国发明了 2.25%Ni 低温钢，之后又开发了 3.5%Ni 钢，广泛应



用于 LPG、空分制氧设备、化肥和合成氨设备中的甲醇洗涤塔等低温容器设备的制造,并于 1940 年在 ASTM 标准体系中纳入 3.5%Ni 钢^[4,5]。随后德国、法国、比利时和日本等国家也开发了 3.5%Ni 钢。美国 INCO 公司在 20 世纪 40 年代开发了 9%Ni 钢,并在 1948 年推向市场,用于建造天然气提取液氮反应塔及液氧储罐内壳,在 1956 年纳入 ASTM 标准。日本和欧洲于 60 年代也开始研制 Ni 系低温钢并开发了 5%Ni 低温钢。目前国际上形成了 ASTM、JIS 和 EN 三大低温钢标准体系。1960 年美国 CBI、INCO 和 US Steel 三家公司在对超低温结构的安全性研究中发现即使不进行焊后消除应力热处理,9%Ni 钢制 LNG 储罐亦可安全使用,从此 9%Ni 钢开始广泛应用于 LNG 储罐的制造^[6]。

为了提高安全系数和减少焊缝,Ni 系低温钢开始向更宽、更厚的方向发展。日本在 1993 年开发了 40~45mm 厚的 9%Ni 钢板,力学性能完全符合 JIS 标准要求,焊接接头处-196℃的冲击功大于 80J^[7]。1999 年日本进一步研发了 50mm 厚的 9%Ni 钢宽厚板,用于制造 20 万立方米的 LNG 储罐。通过降低 Si 含量和添加适量的 Nb,提高了焊接热影响区的低温韧性而不损失钢板的强度^[8]。

由于 Ni 是贵金属,为了降低成本,日本和欧美等先进工业国家研制了 5%~6%Ni 钢,用于替代 9%Ni 钢。Kim 等^[9]采用淬火+亚温淬火+回火(QLT)三步热处理工艺制备了 5.5%Ni 钢,-196℃的冲击功高于 160J,达到了 9%Ni 钢的水平。对于 Ni 含量更低的 3.5%Ni 钢,NKK 钢铁公司采用 QLL'T 工艺进行了热处理,韧性也达到了 9%Ni 水平。日本住友金属通过降低 Si 含量和在线热处理工艺生产的 7%Ni 钢已经成功替代 9%Ni 钢应用于日本仙北一期 LNG 工程 5 号储罐的建设。2013 年 7%Ni 钢板已被编入 JIS 标准,牌号为 SL7N590^[10]。

国内低温钢的研究发展起步较晚,在 60 年代为了节省资源,按照节镍铬和以锰代镍的主导思想,开发出服役于-70~-90℃及更低温度的低温钢,如 09Mn2V、09MnTiCuRe、06MnNb、06MnVTi、06AlNbCuN、06AlCu 等,但是实际应用很少。在 80 年代针对石化行业中生产及储运所用低温钢的国产化问题,国家相关部门组织研究机构和相关钢厂对 Ni 系低温钢进行研制。已经研制的 Ni 系低温钢有:0.5%Ni 钢、1.5%Ni 钢、3.5%Ni 钢、5%Ni 钢和 9%Ni