

RAL · NEU 研究报告 No.0001

# 大热输入焊接用钢组织 控制技术研究与应用

DARESHURU HANJIEYONGGANG ZUZHI KONGZHI JISHU YANJIU YU 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. 0001

# 大热输入焊接用钢组织控制 技术研究与应用

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

本书首先介绍了大热输入焊接用钢的国内外研究与应用现状,指出在国内应用的重要性和急需解决的问题;然后从氧化物冶金技术的角度对包括合金元素的氧化反应和氮化反应等基础研究内容进行了详细阐述和理论分析,最后介绍了著者有关钛、镁、锆、稀土等几种典型元素添加原型钢的最新研究成果及其在工业生产中的应用,汇总了调质态原油储罐钢板、TMCP 态造船用钢板、正火态海洋平台用钢板工程实施的成功案例。

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,也可供高等院校钢铁冶金、材料科学、材料加工、热处理和焊接等专业的教师及研究生阅读、参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

大热输入焊接用钢组织控制技术研究与应用/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. 9

(RAL·NEU 研究报告)

ISBN 978-7-5024-6674-9

I. ①大… II. ①轧… III. ①钢板轧制—研究 IV. ①TG335.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 206615 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](http://www.cnmp.com.cn) 电子信箱 [yjchs@cnmp.com.cn](mailto:yjchs@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 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6674-9

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 9 月第 1 版, 2014 年 9 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 9.25 印张; 145 千字; 135 页

36.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 [tougao@cnmp.com.cn](mailto: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](http://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. 研究项目背景与立项依据

### 1.1 项目背景

近年,随着造船、海洋工程、超高层建筑、桥梁、压力容器等制造业的迅速发展,使用中厚钢板的下游企业为提高施工效率和降低成本,逐步开始采用更为高效的大热输入焊接方法。但大热输入焊接时,由于焊接热影响区高温停留时间变长,容易导致奥氏体晶粒显著粗化,且焊后冷速小,造成焊接接头的强度和韧性严重恶化,产生焊接裂纹的几率增加,影响构件整体的安全使用。

由于传统的 TMCP 工艺采用的细晶强化方式,随着钢板厚度的增大,强化效果显著减弱。所以,为了满足厚钢板的高强度,通常需要额外添加能够产生析出强化和固溶强化的元素,这些合金元素的添加都会不同程度地对焊接热影响区韧性产生不利影响。因此,利用高温稳定的氧化物粒子抑制 HAZ 区奥氏体晶粒粗化及细化焊后组织,并且活用 TMCP 来抑制脆化组织的钢材制造理念已被普遍认同。

早在二十年前,日本的新日铁、JFE、神户制钢等企业已经能够生产大热输入焊接用钢,并逐渐应用于多个领域。日本的这三家主要钢铁企业,所采用的大热输入焊接用钢的生产技术均基于“氧化物冶金”(Oxides Metallurgy)这一理念,但实际应用于生产的技术措施与生产工艺却各有不同。新日铁采用的是自己研究开发的“HTUFF”技术(Super High HAZ Toughness Technology with Fine Microstructure Impacted by Fine Particles);JFE 公司采用的是自己研发的“JFE EWEL”技术(Excellent Quality in Large Heat Input Welded Joints);神户制钢早期采用的是称为“神户超韧化技术”即“KST”技术(Kobe Super Toughness),并结合 TMCP (Thermo Mechanical Control Process)

的精确控制来生产大热输入焊接用钢,而目前采用的是在原有技术基础上又引入新手段的“低碳多方位贝氏体”技术。“氧化物冶金”这一技术的实际应用,使日本钢铁企业能够生产出焊接热输入为  $390 \sim 680 \text{ kJ/cm}$  的 EH40 系列造船用钢板,厚度为  $80 \text{ mm}$  的船板钢可实现单道次焊接,使日本的造船效率迅速提高到我国的  $4 \sim 7$  倍。日本海洋工程用的高强度钢板焊接热输入已经达到  $200 \text{ kJ/cm}$  以上,其厚度适用范围可达  $100 \text{ mm}$ ;桥梁用钢的焊接热输入可达  $350 \text{ kJ/cm}$ ;超高层建筑用钢能够承受的热输入已经超过  $1000 \text{ kJ/cm}$ ;水电、核电、原油化工等领域使用的压力容器、管线钢等也均能够实现大热输入焊接。

目前,我国许多企业已相继投入大量人力物力开始从事这项技术的研究开发,但实际应用业绩多限于热输入为  $100 \text{ kJ/cm}$  级的原油储罐用钢,在造船钢板、海洋工程、桥梁、高层建筑等许多急需大热输入焊接性能的品种钢目前尚无应用业绩报道。而且已经认证的原油储罐用钢在实际焊接过程中仍需要控制热输入在  $80 \text{ kJ/cm}$  左右。而其他国产结构钢的 TMCP 或正火材,只能承受  $50 \text{ kJ/cm}$  以下的焊接热输入,因此能够承受  $50 \text{ kJ/cm}$  以上热输入的大热输入焊接用钢研究开发与工业应用成为国内各钢铁企业关注的重点。目前国内多家钢厂已经开始大热输入焊接船板钢的工业试制,但尚无工业应用。鞍钢已经取得国内首家焊接热输入达  $100 \text{ kJ/cm}$  级别船板钢的船级社认证。由此可见,我国在大热输入焊接用钢的研究开发领域已经远远落后于日本。

## 1.2 立题依据

目前,国内企业开发大热输入焊接用钢时,通常采用传统的微细 TiN 作用机理,以避免焊接热影响区 (HAZ) 奥氏体晶粒的粗化。采用这种方法,在生产工艺合理的情况下,虽然钢板能够承受热输入达到  $100 \text{ kJ/cm}$  的要求。但是,当焊接热输入稍有提高或热影响区温度达到  $1400^\circ\text{C}$  左右时,绝大部分 TiN 质点将会发生溶解而失去抑制晶粒长大的作用。而且 Ti 的氧化物在钢中很容易粗化为凝聚体,若不能控制其形成微细弥散的氧化物颗粒,则会形成大尺寸夹杂物,反倒成为结构物破损的裂纹源。因此急待研究开发 TiN 以外的钉扎机制和细化热影响区晶粒组织的新技术,掌握“氧化物冶金”技术的机理及新的生产工艺关键控制技术。

既有的氧化物冶金研究结果表明, Ca、Mg、Zr 等与钢中的 O、S 具有极

强的亲和力，能够形成高熔点的氧化物或硫化物及其复合化合物，CaO、MgO、CaS 等的熔点均超过 2500℃、热稳定性良好。这类高熔点且又弥散分布的微细第二相粒子，在高温下能够有效钉扎和阻止奥氏体晶粒长大，同时，这些微细的非金属夹杂物在焊后的冷却过程中还可以充当晶内铁素体的形核点，促进有利于韧性提高的细密针状铁素体或多位相的细小贝氏体组织形成，缩小焊接部位和基材性能的差异，大幅度提高焊接热影响区的综合性能。因此，采用氧化物冶金新技术，研究开发有效利用钢中微细夹杂物或第二相粒子抑制焊接热影响区奥氏体组织粗化、并在其后的相变过程中能够促成大量针状铁素体的形成，从而大幅度提高焊接热影响区韧性。

本项目以原油储罐用钢、船板钢、正火态海工钢为载体，依托实验室先进的设备条件，研究了氧化物冶金的基础原理，以及氧化物及其复合夹杂物的形成机理及控制规律。根据大热输入焊接用钢的生产工艺特点及作用原理，从化学成分设计、冶炼工艺、轧制工艺、热处理工艺、焊接工艺等几个方面，研究影响大热输入焊接用钢的诸因素，重点研究 Ti、Mg、Zr、Ce 等元素的添加时机和添加方法，以及夹杂物的类型、数量、尺寸和分布状态的相关工艺控制技术，形成了大热输入焊接用钢的生产工艺控制新理论及新技术，并结合国内钢铁企业的宽厚板生产线，进行新工艺的实践。

在原油储罐用钢方面，突破目前工程实施中焊接热输入控制在 100kJ/cm 以下的局面，将钢板的焊接热输入提高到 200kJ/cm 以上，能够适应 15 万立方米及以上容积的大型原油储罐钢板的焊接要求，同时可将现有的 10 万立方米原油储罐厚度大于 21mm 钢板的两道次气电立焊减少为一道次气电立焊，提高焊接效率、降低焊接成本；在船板钢方面，突破现有的 100kJ/cm 的局面，开发出建造大型船舶所需的 300kJ/cm 以上热输入的钢板以代替进口；在正火态海工钢突破现有的 50kJ/cm 的局面，在较高碳含量及碳当量的条件下，实现 100kJ/cm 以上的大热输入焊接并实现免预热。

## 2. 研究进展与成果

### 2.1 理论研究

通过计算、比较和分析合金元素与钢中氧或氮反应的 Gibbs 自由能，来

评价主要元素获得氧或氮的能力, 预测在不同氧含量、氮含量和不同温度下产生的氧化物和氮化物类型, 指导开发钢的成分设计及工艺设计。获得的结果如下:

(1) 钢中析出  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  的条件为  $\frac{[\% \text{Ti}]}{[\% \text{Al}]} > 6.27$ ; 析出  $\text{TiO}_2$  的条件为  $\frac{[\% \text{Ti}]^3}{[\% \text{Al}]^4} > 6.45 \times 10^6$ , 钛铝比至少为 19; 生成  $\text{Ti}_3\text{O}_5$  的热力学条件为  $\frac{[\% \text{Ti}]^9}{[\% \text{Al}]^{10}} > 6.859 \times 10^8$ , 钛铝比至少达到 5.03。

(2) 钢液中各合金元素获氮能力排序:  $\text{Zr} > \text{Ti} > \text{Nb} > \text{Al} > \text{B} > \text{V}$ 。钛锆竞争获氮反应中, 获得  $\text{TiN}$  的热力学条件为:  $\frac{[\% \text{Ti}]}{[\% \text{Zr}]} \geq 1.58$ 。

## 2.2 实验室基础研究

研究了 Ti、Mg、Zr、Ce 等元素的添加时机和添加方法, 以及对夹杂物的类型、数量、尺寸和分布状态的影响规律, 获得的结果如下:

(1) 采用新的冶炼工艺, 夹杂物的平均尺寸比传统钢更加细小,  $\text{TiN}$  粒子数量约为传统钢的 3~5 倍左右, 含 Ti 氧化物数量为传统钢 10 倍以上。

(2) 不同类型、尺寸的夹杂物对原奥氏体晶界组织、晶内组织有不同的影响规律, 尺寸为  $5 \sim 8 \mu\text{m}$  的这类夹杂物也具有一定的晶内铁素体形核能力, 且也能够形成具有 IAF 特征的 IGF。

(3) 形成了一套新的氧化物冶金技术控制理论及控制工艺技术, 实验室通过新工艺的实行, 已开发出焊接热输入为  $100 \sim 1000 \text{kJ/cm}$  的多种原型钢。

## 2.3 工业应用情况

将实验室研究的氧化物冶金新工艺控制技术在国内外钢铁企业的宽厚板生产线上得以顺利实现, 开发出了新型原油储罐用钢板、造船板、正火态海洋工程用钢, 其结果如下:

(1) 原油储罐用钢: 采用新工艺生产的新型原油储罐用钢的各项力学性能达到国家相关标准要求, 模拟焊接热输入可达到  $400 \text{kJ/cm}$ , 实际气电立焊可达  $228 \text{kJ/cm}$ , 经中石化第十建设公司按照 15 万立储罐的焊接技术要求进行

焊接实验,全部钢板均耐受大于  $145\text{kJ/cm}$  的大线能量焊接,满足 15 万立储罐的焊接技术要求。该钢厂采用此技术目前已实现了稳定生产与批量供货,截至 2013 年 2 月,已获销售收入 1.46 亿元。该技术获 2013 年度冶金科学技术进步奖二等奖。

(2) 造船板:采用新工艺生产的 EH40 造船钢板,力学性能符合国家标准及船级社规范要求,模拟焊接热输入能够达到  $800\text{kJ/cm}$ ,实物焊接热输入在  $430\text{kJ/cm}$  的条件下仍具有良好的强度和韧性。该钢板的大面积推广应用,将大幅度提升我国造船行业的生产效率,降低船舶舰艇的制造成本,给相关企业带来巨大的经济效益,同时对我国的国防建设将产生深远的积极影响。

(3) 正火态海洋工程用钢:采用新工艺生产的大热输入焊接用海洋平台正火钢,各项力学性能符合国家标准及各船级社规范,在 CEQ 值为 0.43、不需要预热的情况下,模拟焊接热输入为  $200\text{kJ/cm}$  时仍具有较高的富余量,实际气电立焊在热输入为  $300\text{kJ/cm}$  的条件下,仍具有合格的焊接性能。

### 3. 论文与专利

#### 论文:

(1) Shi Minghao, Zhang Pengyan, Zhu Fuxian. Toughness and microstructure of coarse grain heat affected zone with high heat input welding in Zr-bearing low carbon steel [J]. ISIJ Int, 2014, 54(1): 188 ~ 192.

(2) Shi Minghao, Zhang Pengyan, Wang Chao. Effect of high heat input on toughness and microstructure of coarse grain heat affected zone in Zr bearing low carbon steel [J]. ISIJ Int, 2014, 54(4): 932 ~ 937.

(3) 张朋彦,高彩茹,朱伏先. 超大热输入焊接用 EH40 钢的模拟熔合线组织与性能[J]. 金属学报, 2012, 48(3): 264 ~ 270.

(4) 张朋彦,高彩茹,朱伏先. 大热输入焊接用钢的组织与力学性能[J]. 东北大学学报, 2012, 33(1): 82 ~ 85.

(5) 石明浩,张朋彦,刘纪源,朱伏先. Zr 微合金钢粗晶热影响区韧性和组织分析[J]. 材料科学与工艺, 2013, 21(3): 1 ~ 5.

(6) 石明浩,段争涛,张朋彦,朱伏先. 夹杂物对 Ti, Zr 微合金钢中针



状铁素体形成的影响[J]. 东北大学学报, 2012, 33(10): 1424 ~ 1427.

(7) 张朋彦, 燕际军, 高彩茹, 朱伏先. 含 Ti 夹杂物对大热输入焊接用钢 HAZ 韧性的影响[J]. 钢铁, 2012, 47(11): 79 ~ 84.

(8) 张朋彦, 朱澍勋, 张慧云, 朱伏先. DQ-T 工艺对 12MnNiVR 钢组织性能的影响[J]. 东北大学学报, 2012, 33(12): 1715 ~ 1719.

(9) 张朋彦, 朱伏先, 王国栋. 基于氧化物冶金焊接热影响区组织控制产业化技术研究开发[J], 中国科技成果, 2013, 16: 38 ~ 41.

(10) Shi Minghao, Liu Jiyeuan, Zhu Fuxian. Effect of Ti and Zr deoxidation process on the inclusions in low carbon steel [C]. Applied Mechanics and Mater, 2013, 313: 266 ~ 269.

#### 专利:

(1) 一种超大热输入焊接用结构钢及其制造方法. CN102080193.

(2) 一种大热输入焊接用结构钢及其制造方法. CN102080189.

(3) 大热输入焊接用含硼原油储罐钢板的生产方法. CN102242309.

(4) 采用直接淬火工艺生产原油储罐钢板的方法. CN102230057.

(5) 一种提高钢板在大线能量焊接条件下热影响区韧性的方法. CN101476018.

#### 4. 项目完成人员

| 姓 名 | 职 称     | 完 成 单 位          |
|-----|---------|------------------|
| 张朋彦 | 讲 师     | 东北大学 RAL 国家重点实验室 |
| 朱伏先 | 教 授     | 东北大学 RAL 国家重点实验室 |
| 王国栋 | 教授 (院士) | 东北大学 RAL 国家重点实验室 |

#### 5. 报告执笔人

报告执笔人: 张朋彦

#### 6. 致谢

本研究是在东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室王国栋院士

的悉心指导下，以及课题组成员朱伏先、张朋彦、石明浩、朱澍勋、陈光勇、卢杰等的精诚合作下完成的。项目完成过程中，实验室完善的装备条件和先进的检测手段，为本研究创造了良好的研究环境，衷心感谢实验室各位领导、相关老师和工程技术人员所给予的热情帮助和大力支持。

本研究成果能够在工业生产线上成功地得以实现，衷心感谢湖南华菱湘潭钢铁集团有限公司曹志强、杨云清、肖大恒、谭小斌、吴进、杨勇、李玲玲、孙小平、于青、高海亮等人员的大力支持；衷心感谢南京钢铁集团有限公司吴年春、崔强、邓伟等人员的大力支持；衷心感谢所有对本项目给予帮助和做出贡献的相关人员。

# 目 录

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 摘要 .....                  | 1   |
| 1 绪论 .....                | 3   |
| 1.1 研究背景 .....            | 3   |
| 1.2 国内外开发情况 .....         | 5   |
| 1.2.1 国外开发情况 .....        | 5   |
| 1.2.2 国内开发情况 .....        | 20  |
| 1.3 大热输入焊接用钢开发的技术措施 ..... | 23  |
| 2 大热输入焊接用钢生产技术的基础研究 ..... | 25  |
| 2.1 氧化物冶金技术 .....         | 25  |
| 2.2 钢中氧、氮化物析出的热力学 .....   | 27  |
| 2.2.1 合金元素的氧化反应 .....     | 28  |
| 2.2.2 合金元素的氮化反应 .....     | 39  |
| 2.2.3 小结 .....            | 43  |
| 2.3 实验室基础研究 .....         | 43  |
| 2.3.1 钛添加钢的基础研究 .....     | 45  |
| 2.3.2 镁添加钢的基础研究 .....     | 61  |
| 2.3.3 锆添加钢的基础研究 .....     | 83  |
| 2.3.4 稀土添加钢的基础研究 .....    | 105 |
| 3 大热输入焊接用钢的研发及工业应用 .....  | 112 |
| 3.1 原油储罐用钢板 .....         | 112 |
| 3.1.1 试制钢坯料化学成分 .....     | 112 |

|       |                 |     |
|-------|-----------------|-----|
| 3.1.2 | 生产线热处理结果 .....  | 113 |
| 3.1.3 | 焊接热模拟试验结果 ..... | 113 |
| 3.1.4 | 气电立焊实验结果 .....  | 115 |
| 3.1.5 | 夹杂物分析 .....     | 117 |
| 3.1.6 | 小结 .....        | 117 |
| 3.2   | 造船用钢板 .....     | 118 |
| 3.2.1 | 试制钢坯料化学成分 ..... | 118 |
| 3.2.2 | 钢板力学性能 .....    | 119 |
| 3.2.3 | 大热输入焊接结果 .....  | 119 |
| 3.2.4 | 小结 .....        | 122 |
| 3.3   | 海洋平台用钢板 .....   | 122 |
| 3.3.1 | 试制钢坯料化学成分 ..... | 123 |
| 3.3.2 | 钢板力学性能 .....    | 123 |
| 3.3.3 | 大热输入焊接结果 .....  | 124 |
| 3.3.4 | 小结 .....        | 126 |
| 4     | 结论 .....        | 128 |
|       | 参考文献 .....      | 129 |

## 摘 要

低合金高强度钢板广泛应用于船舶、桥梁、海洋平台、高层建筑、管线、压力容器、大型石油储罐等大型结构中,使用这类钢板的企业为提高施工效率和降低成本,越来越多地采用大热输入焊接方法。目前我国仅有大型石油储罐和造船板这两个钢种能够实现  $100\text{kJ/cm}$  的大热输入焊接,其焊接热输入量水平远远落后于日本等钢铁技术发达国家,而在其他工业领域应用的大热输入焊接用钢的生产仍是空白。开发大热输入焊接用钢是我国钢铁工业科学与技术发展的重点目标之一。鉴于国外对此技术的严密封锁,本书对大热输入焊接用钢的生产工艺控制技术进行了详细研究。从化学成分设计、冶炼、轧制、热处理、焊接等多个方面,研究分析影响钢板大热输入焊接性能的因素,形成了比较完整的生产大热输入焊接用钢的工艺控制技术。主要研究工作和成果如下:

(1) 以提高钢板的大热输入焊接性能为出发点,研究了主要化学元素在冶炼过程中其氧、氮化物析出的热力学;合金元素与氧、氮反应的 Gibbs 自由能;钢中氧、氮化物析出的能力强弱、析出顺序及影响因素,合理地确定出各元素的比例,设计出大热输入焊接用钢的化学成分。

(2) 在基本化学成分相同的情况下,通过调整冶炼工艺,控制合金的添加顺序和添加时机,使开发钢的小尺寸夹杂物数量为传统钢的数倍至十余倍,大尺寸夹杂物数量少于传统钢。开发钢在经历大热输入焊接热循环时,原奥氏体晶粒长大受到强烈抑制且形成大量晶内针状铁素体,焊接热影响区的冲击韧性远高于传统钢,形成了新型氧化物冶金控制技术。

(3) 研究了采用新工艺向钢中添加钛、镁、锆、稀土四种主要元素对钢板大热输入焊接性能的影响规律;新型冶炼工艺对钢中夹杂物类型、数量、尺寸、分布的影响;焊接热输入对 HAZ 组织和性能的影响;热影响区温度对夹杂物的溶解与再析出的影响;晶内针状铁素体的形核机理以及感生形核的

二次针状铁素体对组织性能的影响。研究结果表明:采用新工艺添加的这四种元素,钢板均具有良好的大热输入焊接性能,最高焊接热输入达到  $1000\text{kJ}/\text{cm}$  ( $t_{8/5}=818\text{s}$ ,  $\text{PT}=1400^\circ\text{C}$ , 保温  $60\text{s}$ ) 时,  $-20^\circ\text{C}$  的冲击功值仍高于  $100\text{J}$ 。

(4) 研究了试验钢中不同类型、尺寸的夹杂物对 HAZ 区域原奥氏体晶粒尺寸、晶界组织和晶内组织的影响规律。结果表明:在焊接热影响区温度为  $1400^\circ\text{C}$  及以上温度区域内,  $\text{TiN}$  的作用减弱,熔点高、热稳定性好的一定类型的氧化物复合夹杂物能够有效提高焊接热影响区韧性;熔合线附近部位的原奥氏体晶界处的晶界铁素体 (GBF) 晶粒细小且形态以多边形块状为主,呈链状沿奥氏体晶界分布,不会形成传统钢的片膜状 GBF;形成晶内针状铁素体 (IAF) 的有效夹杂物多为含高熔点、热稳定性好的氧化物的复合夹杂物,且尺寸多为  $0.5\sim 5\mu\text{m}$ ;尺寸为  $5\sim 8\mu\text{m}$  的这类夹杂物也具有一定的晶内铁素体 (IGF) 形核能力,且也能够形成 IAF。试验钢在大热输入焊接及超大热输入焊接条件下,显微组织主要由块状的晶界铁素体、晶内多边形铁素体 (IPF) 和晶内针状铁素体组成,且 IAF 面积分数占  $50\%$  以上,无板条贝氏体和粒状贝氏体组织,具有良好的冲击韧性。

(5) 工业试制的石油储罐钢板在热输入为  $400\text{kJ}/\text{cm}$ , 峰值温度为  $1400^\circ\text{C}$  的条件下,  $-20^\circ\text{C}$  冲击功大于  $150\text{J}$ , 试制钢在焊接热输入为  $200\text{kJ}/\text{cm}$  的气电立焊条件下,熔合线处  $-20^\circ\text{C}$  冲击功大于  $90\text{J}$ ,能够取代进口钢板满足容积为  $15$  万立方米及以上原油储罐的建造要求,且在原认证钢合金成本的基础上能够节约  $300$  元/吨左右,其综合性能指标已居国内同类产品的领先水平,大热输入焊接性能已经超过日本进口 SPV490Q 钢板的实物水平,现已实现批量供货;工业试制的 TMCP 态造船钢板的模拟大热输入焊接性能可达到  $800\text{kJ}/\text{cm}$ , 实物气电立焊热输入可达  $430\text{kJ}/\text{cm}$ , 达到国际先进水平;工业试制的较高 C 含量的正火态海洋平台用钢,在  $C_{\text{eq}}=0.44$  的情况下,模拟焊接热输入能够达到  $200\text{kJ}/\text{cm}$ , 实际气电立焊在热输入为  $300\text{kJ}/\text{cm}$  的条件下,仍具有合格的性能。研究结果,形成了完整的大热输入焊接用钢产业化共性技术,为大热输入焊接用钢的国产化奠定了技术基础。

**关键词:** 大热输入焊接;焊接热影响区;冶炼工艺;微观组织;夹杂物;晶内针状铁素体;力学性能;低温韧性

# 1 绪 论

## 1.1 研究背景

近年来,我国钢铁业进入了前所未有的高速发展时期,2012年全国粗钢产量为71654万吨,在粗钢产能方面居于世界首位。我国在成为钢铁大国的同时,也正向钢铁强国迈进。在国内钢铁材料研究者和生产者们不断努力工作中,国产钢结构材料在力学性能如强度、韧性和成型性方面也有了卓越的提高。然而在不断追求钢材更高力学性能的同时,我们更希望国产钢材在结构实体服役过程中具备完整性和可靠性,这就要求钢材的焊接部位与母材具有相似的力学性能。

随着低碳低合金高强度结构钢厚钢板在船舶、桥梁、海洋平台、高层建筑、管线、压力容器、大型石油储罐等大型结构物的使用日益广泛,这些使用低合金高强钢的企业为提高焊接施工效率和降低成本,高效的多丝埋弧自动焊、气电立焊、电渣焊等大热输入焊接方法成为最为实用的焊接方式。在此背景下,适用于大热输入焊接的不同规格不同强度级别宽厚板的研究备受关注。

焊接热输入量的计算方法是:

$$E = \frac{IU}{v} \quad (1-1)$$

式中  $E$ ——焊接热输入量,  $\text{kJ/cm}$ ;

$I$ ——焊接电流,  $\text{A}$ ;

$U$ ——焊接电压,  $\text{V}$ ;

$v$ ——焊接速度,  $\text{cm/s}$ 。

一般地,将焊接热输入大于  $50\text{kJ/cm}$ ,称为大热输入焊接。而传统的钢板在较高热输入下焊接时,特别是在热输入大于  $50\text{kJ/cm}$  情况下,焊接接头

的力学性能会发生严重下降,甚至会低于母材钢板的力学性能。所以,目前我国的部分钢种在考察焊接性能时,其评价焊接热输入的指标多限定在 $\leq 50\text{kJ/cm}$ ,如船板钢、桥梁钢等。由于焊接热输入的增大,焊接热影响区的高温停留时间变长,奥氏体晶粒严重粗化,并且由于焊后冷却速度缓慢,在焊接热影响区容易形成粗大的侧板条铁素体、魏氏组织、上贝氏体等异常组织,M-A岛数量增加且粗大,使焊接热影响区强度和韧性下降较大,并容易产生裂纹等缺陷,影响整体结构件的安全使用性能,导致其不能满足服役要求,甚至在使用过程中发生恶性事故。因而,在中厚板的焊接过程中,通常只能采用较低热输入多道次焊接以保证热影响区的力学性能,但是这种焊接方法效率较低、生产成本相对较高,与现代经济发展所要求的低成本、高效率和减量化生产是相违背的。因此,研究开发出满足大热输入焊接用低合金高强度用钢是解决焊接热影响区低温韧性恶化的有效途径。为此,国内外竞相开发多种用途的大热输入焊接用钢板,分别应用于各种领域。

2006年中国金属学会和中国钢铁工业协会联合发布了《2006~2020年中国钢铁工业科学与技术发展指南》,提出了今后15年的钢材发展目标,其中2006~2010年的钢材发展主要目标有:

- (1) 20%普碳钢材在韧性基本不变的情况下,强度提高1倍。
- (2) 稳定生产高强度、高韧性、低屈强比的各类钢板,如屈服强度400~800MPa,抗拉强度600~1400MPa级高强度高韧性板材,X80管线板等。
- (3) 稳定生产优质耐火、耐候、抗震钢板,以及抗拉强度大于1000~1400MPa级超洁净、超高强度新钢种。
- (4) 细晶和超细晶、高洁净度、高均匀性钢材覆盖面不小于10%。
- (5) 全面建成具有中国特色、国际化的冶金新材料体系,包括火电、水电、核电设备用新钢材,造船用焊接不预热和大热输入焊接用钢, $-160^{\circ}\text{C}$ 低温钢,汽车用600~800MPa级高强度钢板,高速火车用各种钢材,石油和海洋工程用新钢材,制造业用各类冶金新材料等。

这里明确了大热输入焊接用钢是我国钢铁行业重点发展的目标之一。在当前所倡导的建立节约型经济背景下,有必要通过我们钢种开发者的工作,突破大热输入焊接热影响区(HAZ)韧性恶化的瓶颈,实现大热输入焊接用钢的国产化目标。



## 1.2 国内外开发情况

### 1.2.1 国外开发情况

#### 1.2.1.1 大热输入焊接技术

大热输入焊接用钢一直以来都为世界钢铁工业发达国家竞相追逐的先进技术之一,其中日本在大热输入焊接用钢的理论研究和生产技术上都走在世界前列。特别是日本几家著名的钢铁公司如新日铁、JFE 制铁和神户制钢等企业已成功在生产线上实现  $100 \sim 1000 \text{ kJ/cm}$  大热输入用中厚板的商品化生产,其钢种已覆盖造船、桥梁、高层建筑、海洋结构、管线、压力容器等多个领域,并积极将其产品推向世界市场,赢得了厚板应用商的广泛认同,成为日本钢铁业占据厚板市场的拳头产品。

目前,新日铁、JFE 和神户制钢等三家主要钢铁企业,所采用的大热输入焊接用钢的生产技术均基于“氧化物冶金”(Oxides Metallurgy)这一理念,但实际应用于生产的技术措施却各有不同。新日铁采用的是自己研究开发的“HTUFF”技术(Super High HAZ Toughness Technology with Fine Microstructure Impacted by Fine Particles);JFE 公司采用的是自己研发的“JFE EWEL”技术(Excellent Quality in Large Heat Input Welded Joints);神户制钢早期采用的是称为“神户超韧化技术”即“KST”技术(Kobe Super Toughness),并结合 TMCP (Thermo Mechanical Control Process) 的精确控制来生产大热输入焊接用钢,而目前采用的是在原有技术基础上又引入新手段的“低碳多方位贝氏体”技术。以下分别详细说明。

#### A 新日铁公司

新日铁公司长期致力于大热输入焊接用钢的研究,特别是焊接热影响区 HAZ (Heat Affected Zone) 的金属组织控制的研究。20 世纪 70 年代研究了各种添加元素对微观组织的影响。研究结果表明:利用 TiN 细粒状弥散分布的粒子可以抑制焊接时奥氏体的晶粒粗大,以减轻大热输入焊接时热影响区脆化的效果最好。90 年代利用超高温下氧化物和硫化物很难融化的特点,可