



国防科技图书出版基金资助

Toughness and Toughening
of Weld Joint in High Strength
Steel Hull Structure

高强度钢船体 焊接接头的韧性与韧化

桂赤斌◎著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

图书在版编目(CIP)数据

高强度钢船体焊接接头的韧性与韧化 / 桂赤斌著.

—北京: 国防工业出版社, 2011. 10

ISBN 978-7-118-07236-5

I. ①高… II. ①桂… III. ①高强度钢-船体-焊接接头-研究 IV. ①U671.83

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 108720 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 7 $\frac{3}{4}$ 字数 190 千字

2011 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 38.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

此书同时获得

总装备部国防科技图书出版基金资助

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定

资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

国防科技图书出版基金 第六届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 宋家树 蔡 镭 程洪彬

秘书长 程洪彬

副秘书长 邢海鹰 贺 明

委员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟
(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 邬江兴

刘世参 芮筱亭 李言荣 李德仁

李德毅 杨 伟 肖志力 吴有生

吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠

陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起

崔尔杰 韩祖南 傅惠民 魏炳波

序

近年来,我国造船业发展迅猛,2009 年造船总量超过 4000 万载重吨,跃居世界第二位。同时,我国焊接材料的年产量也达 400 万吨,其中药芯焊丝的产量超过 41 万吨,比 1996 年增长 680 多倍。药芯焊丝产量的高速发展与我国造船业的发展密切相关。当前,为了进一步提高船舶的有效载荷及安全性(抗冲击性),船体结构正逐步向高强度钢的方向发展。这个发展趋势也对药芯焊丝的高强度化提出了更高的要求,重点是解决高强度钢焊接接头的性能匹配,特别是焊接接头的韧性及抗裂性,即要通过焊接材料的发展来进一步解决高强度钢的工艺焊接性及使用焊接性的问题。

我国虽然已经成为世界公认的焊接大国,焊接材料的生产量和应用量为世界第一,但是还不是焊接制造强国,更不是焊接材料生产的强国。我国焊接材料的年产量虽已经超过 400 万吨,但是品种少,80% 以上还都是低端产品,优质高端焊接材料仍需依靠进口。这种局面必须尽快扭转,转变焊材产品的结构,提升焊材的质量,向焊材生产强国迈进。

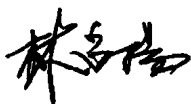
桂赤斌教授所著的《高强度钢船体焊接接头的韧性与韧化》一书,针对目前我国造船业的发展,特别是军用舰艇的船体(壳)向高强度钢发展的需求,突出强调了韧性问题(而不是以往那样更多地重视强度的匹配),抓住了发展的核心矛盾。第二次世界大战期间,美国“和平”级货轮船体的脆性断裂和 20 世纪 80 年代初挪威在北海油田上的一座半潜式平台的断裂倾覆,就是忽视接头韧性的沉痛教训。强调高强度钢焊接接头的韧性正是这本书的

特点。

焊接材料的发展,不仅是冶金问题,还必须注意电弧过程的特点和焊接电源的发展。焊接是一个非平衡、瞬态、多因素、强耦合的复杂过程,其发展需要有材料学、冶金学、电弧物理学等多学科的结合,关注多方面因素的相互影响,才能有突破性的发展与创新。正因为焊接材料的发展是一个复杂系统,不仅要解决强度,还要重视韧性;不仅要重视静态性能,还要关注动态性能;不仅要解决焊接工艺性,还要注意接头的服役性能等。这就要有多方面的理论指导,没有理论的指导是盲闯,但是仅仅有理论还不够,更需要有大量的试验和实验,才能真正解决这个复杂问题,有所创新。因此,及时总结经验和交流经验是迅速发展我国焊接材料的品种和提升焊材质量的重要手段。桂赤斌教授根据多年研发焊接材料的经验和体会,理论联系实际,撰写了这本书,希望与我国焊材界的同仁广泛交流,相互学习,接受质疑,共同推进我国焊材的发展。

这本书从多个方面论述了提高焊接接头韧性的措施,例如:防止焊缝金属及母材热影响区组织粗化问题;焊接工艺参数对接头微观组织的影响;杂质元素对韧性的影响;降低焊缝金属扩散氢含量及提高抗裂性的方法等。内容既有理论又有实例,既强调了正面的作用,也指出可能出现的负面影响,并在药芯焊丝的渣系分析方面具有独特的造诣。目前,有关药芯焊丝的渣系报道并不多见,这本书对指导 TiO_2 渣系的药芯焊丝在保持工艺性能良好的基础上,提高接头韧性的途径具有重要的理论意义和实用价值。希望有更多的焊材研发人员重视总结经验,撰写更多的专著,活跃我国焊材领域的学术风气,促进焊材理论的发展。

中国工程院院士



前 言

高强度钢船体是大型的、复杂的壳体结构,熔化焊为主要建造手段。然而,自熔化焊技术引入船体建造工程以来,船体所发生的破坏事故,尤其是灾难性、颠覆性的事故,几乎都与其焊接接头的韧性差有关。

在所有对焊接接头韧性的作用因素中,冶金因素——材质因素是最主要的。即用于高强度船体建造的高强度钢及其配套焊接材料如果实现了自身的足够冶金韧化,获得高韧性的焊接接头就有了保证。

必须看到,作为国家制造业的重要组成部分,目前焊接正在向高效、低成本及节省能源的方向发展。我国正在兴起现代造船模式,高效率焊接是其重要特征之一。尤其是优质、高效自动 CO_2 气保护焊等先进焊接工艺已广泛用于各种大型船舶的建造。这些先进的焊接工艺的重要特征之一是焊接热输入量大。热输入量大将导致焊接接头高温持续时间较长,这就为接头组织粗大化进而恶化韧性提供了热力学与动力学条件。因此,实现高效率焊接条件下的焊接接头的冶金韧化更具重要性与迫切性。

本书主要讨论高强度钢船体焊接接头的韧性与冶金韧化。分析讨论高强度钢船体焊接接头的韧化冶金影响因素与冶金韧化措施是本书的重点。在内容安排上,首先结合具体材料应用于高强度钢船体建造焊接工程时的试验考核,介绍了高强度钢船体焊接接头的韧性及其考核要求。接着分别在第2章、第3章对高强度钢船体焊接接头的焊缝金属与母材焊接热影响区的韧性与冶金韧

化进行了分析。由于利用第二相粒子控制晶粒尺寸是当今高强度船体钢重要特征之一,本书采用较大篇幅(第4章)讨论了晶粒与第二相粒子对焊接热循环的响应。出于气保护药芯焊丝高效率焊接在船体建造焊接工程中日益扮演越来越重要的角色的工程实际,在第5章,结合高强度船体钢配套气保护药芯焊丝的研发,讨论了高强度钢药芯焊丝焊缝金属的冶金韧化。另外,虽然本书不专门讨论高强度船体钢焊接接头中氢的控制问题,但考虑到人们在进行焊接接头韧化努力(采取冶金措施或工艺措施)时,必须充分顾及氢的行为,以防止氢致裂纹的产生,故本书的最后一章讨论了焊接接头中氢的行为与冶金控制。

本书欲引起高强度钢与其配套焊接材料研发以及高强度钢船体建造工程领域对它所讨论的问题的兴趣,并且抛砖引玉,为我国这一领域的进步而有所为。

本书的写成得益于我国著名焊接专家、中国工程院林尚扬院士的指导,在此深表谢意!

作者感谢母校——铁道科学研究所和华中科技大学导师所给予的理论基础的指导。

本书的写成离不开以海军工程大学为首,由国家钢铁材料测试中心、广州黄埔造船厂、武汉铁锚焊接材料股份有限公司等组成的工作团队以及作者所指导的研究生的工作积累,在此一并表示感谢!

由于作者水平有限,书中会有错误与不当之处,敬请读者批评指正。

作者

2011年1月

目 录

第1章 高强度钢船体焊接接头的韧性要求与考核	1
1.1 高强度钢船体焊接接头的韧性要求	2
1.2 CO ₂ 气保护 HH907FCW 药芯焊丝的韧性考核	6
参考文献	35
第2章 焊缝金属的韧性与韧化	36
2.1 引言	36
2.2 焊缝化学冶金反应	37
2.2.1 不同焊接工艺方法的焊缝化学冶金特点	37
2.2.2 有药皮、焊剂及药芯参与的焊缝化学冶金	39
2.3 焊缝转变组织与韧性	45
2.3.1 非调质钢焊缝金属转变组织与韧性	45
2.3.2 氧化物冶金对非调质钢焊缝金属转变组织 与韧性的重要意义	48
2.3.3 调质船体钢焊缝金属转变组织与韧性	51
2.4 焊缝的纯净化与韧性	54
2.4.1 非调质钢焊缝金属的脱氧与韧性	54
2.4.2 调质钢焊缝金属的脱氧与韧性	57
2.4.3 脱氮(N)与焊缝韧性	60
2.5 焊缝金属的合金成分与韧性	61
2.6 焊缝金属的冶金韧化	62
2.6.1 焊缝金属的冶金韧化设计	63
2.6.2 母材对焊缝金属的冶金韧化的影响	68

2.7 焊缝金属韧性的工艺因素	71
参考文献	72
第3章 焊接热影响区的韧性与冶金韧化	74
3.1 钢焊接热影响区的韧性分布	74
3.2 高强度船体钢焊接热影响区韧性的冶金影响 因素	75
3.2.1 晶粒尺寸的影响	75
3.2.2 组织形态的影响	76
3.2.3 第二相的影响	78
3.2.4 纯净度的影响	80
3.2.5 组织逆转变的影响	81
3.3 高强度船体钢焊接热影响区的韧性分析	85
3.3.1 模铸 12MnCrNi 非调质船体钢焊接热影响区 的韧性分析	85
3.3.2 模铸 10CrNi3MoV 调质船体钢焊接热影响区 的韧性分析	91
3.4 高强度船体钢焊接热影响区的冶金韧化	98
3.4.1 焊接热影响区的冶金净化	99
3.4.2 焊接热影响区的冶金韧化——细化晶粒	99
参考文献	102
第4章 晶粒与第二相粒子对焊接热循环的响应	103
4.1 晶粒生长对焊接热循环的响应	103
4.1.1 不含高温稳定第二相粒子的钢 HAZ 晶粒 生长	107
4.1.2 含高温稳定第二相粒子的钢 HAZ 晶粒 生长	119
4.2 焊接热循环加热速度对钢晶粒长大的影响	156
4.3 焊接热循环过程碳氮化合物粒子的析出曲线	160

4.3.1	焊接热影响区中碳氮化合物粒子析出动力学模型	161
4.3.2	碳氮化合物粒子的焊接 PTT 图的建立	163
	参考文献	168
第 5 章	高强度钢药芯焊丝焊缝金属的冶金韧化	169
5.1	引言	169
5.2	不同渣系气体保护型药芯焊丝的冶金特点	170
5.3	药芯焊丝的冶金韧化	172
5.3.1	熔敷金属的成分控制	173
5.3.2	焊缝金属的冶金韧化	180
	参考文献	196
第 6 章	焊接接头中氢的行为与冶金控制	198
6.1	引言	198
6.2	焊缝金属中的氢陷阱	200
6.3	焊缝金属中的钛氢陷阱	202
6.4	熔渣对焊缝金属氢的作用	206
6.5	焊接热循环过程中氢陷阱的热释放数值分析	210
6.5.1	焊接热循环过程中氢陷阱热释放的动力学模型	211
6.5.2	焊接热循环过程中氢陷阱热释放的数值分析	213
	参考文献	223

CONTENTS

Chapter 1	Toughness requirements and assessment of weld joint in high strength steel hull structure	1
1. 1	Toughness requirements of weld joint in high strength steel hull structure	2
1. 2	Toughness assessment of the joint welded with HH907FCW CO ₂ gas-shielded flux cored wire	6
	References	35
Chapter 2	Toughness and toughening of weld metal	36
2. 1	Introduction	36
2. 2	Chemical metallurgical reaction in weld pool	37
2. 2. 1	Characteristics of chemical metallurgy in different welding process	37
2. 2. 2	Chemical metallurgy involved by coated and cored flux in welding process	39
2. 3	Weld metal transformation microstructure and its toughness	45
2. 3. 1	Transformation microstructure and toughness of the weld metal of non-quenched and tempered steel	45
2. 3. 2	Important role of oxide metallurgy in transformation microstructure and toughness of the weld metal	

	of non-quenched and tempered steel	48
2.3.3	Transformation microstructure and toughness of the weld metal of quenched and tempered steel	51
2.4	Weld metal purity and toughness	54
2.4.1	Deoxidization and toughness of weld metal of non-quenched and tempered steel	54
2.4.2	Deoxidization and toughness of weld metal of quenched and tempered steel	57
2.4.3	Denitrogenation and toughness of weld metal ...	60
2.5	Alloy composition and toughness of weld metal	61
2.6	Metallurgical toughening of weld metal	62
2.6.1	Metallurgical design for weld metal for toughening	63
2.6.2	Affect of base metal on metallurgical toughening of weld metal	68
2.7	Affect of welding process on weld metal toughness	71
	References	72

Chapter 3 Toughness and Metallurgical toughening of HAZ

		74
3.1	Toughness distribution of HAZ	74
3.2	Effects of metallurgical factors on welding HAZ toughness of high strength ship structural steel	75
3.2.1	Grain size	75
3.2.2	Transformation microstructure	76
3.2.3	Second phase	78
3.2.4	Steel purity	80
3.2.5	Inverse transformation of welding HAZ	

microstructure	81
3.3 Toughness analysis of welding HAZ in high-strength ship structural steel	85
3.3.1 HAZ toughness analysis of 12MnCrNi non-quenched and tempered ship structural steel	85
3.3.2 HAZ toughness analysis of 10CrNi3MoV quenched and tempered ship structural steel	91
3.4 HAZ metallurgical toughening for high-strength ship structural steel	98
3.4.1 HAZ metallurgical purification for toughening ...	99
3.4.2 Grain refinement to tough the welding HAZ	99
References	102
Chapter 4 Response of grain and second phase particles on welding thermal cycle	103
4.1 The response of grain growth on welding thermal cycle	103
4.1.1 HAZ grain growth in steel non-containing high-temperature stable particles	107
4.1.2 HAZ grain growth in steel containing high-temperature stable particles	119
4.2 Effect of thermal cycle heating rate on HAZ grain growth	156
4.3 Carbonitride particle precipitation start temperature (PPT curve) in welding thermal cycles	160
4.3.1 Particle precipitation dynamics model in HAZ	161
4.3.2 Creation of carbonitride particle precipitation start temperature curve	163
References	168

Chapter 5	Metallurgical toughening with the gas-shielded flux cored wire for high-strength ship structural steel	169
5.1	Introduction	169
5.2	Metallurgical characteristics of different slag system of flux cored wire	170
5.3	Metallurgical toughening with the gas-shielded flux cored wire	172
5.3.1	Composition controlling of the deposited metal with gas-shielded flux cored wire	173
5.3.2	Metallurgical toughening of weld metal with gas-shielded flux cored wire	180
References		196
Chapter 6	Behavior of hydrogen in welded joints and metallurgical control	198
6.1	Introduction	198
6.2	Hydrogen trap in weld metal	200
6.3	Titanium hydrogen trap in weld metal	202
6.4	The effect of slag on hydrogen in weld metal	206
6.5	Numerical analysis of hydrogen heat release from trap in welding thermal cycle	210
6.5.1	Dynamics model of hydrogen heat release from trap in welding thermal cycle	211
6.5.2	Numerical analysis of hydrogen heat release from trap in welding thermal cycle	213
References		213