

先进结构材料 焊接接头组织与性能

薛小怀 等 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

先进结构材料焊接 接头组织与性能

薛小怀 等 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书共十章,包括低合金钢、铝合金、钛-钢复合板、C/C 复合材料与金属材料、高温合金、焊接接头的数值模拟、焊接接头的爆炸处理、振动处理和超声冲击处理等内容。本书各章内容均为本领域的专家根据多年的研究积累编写而成,内容丰富新颖。在编写过程中,每章内容务求理论与实际相结合,易于不同水平的读者理解和实践。

本书读者对象是高等院校和科研单位材料加工相关专业的高年级本科生、研究生和教师,以及从事材料工程、海洋工程、机械制造、建筑结构、石油化工、管线运输、冶金交通、航空航天以及国防与尖端武器等领域的工程技术人员。

图书在版编目(CIP)数据

先进结构材料焊接接头组织与性能/薛小怀等著. —上海:上海

交通大学出版社,2019

ISBN 978-7-313-22181-0

I. ①先… II. ①薛… III. ①结构材料—焊接工艺—高等学校—
教材 IV. ①TG44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 235765 号

先进结构材料焊接接头组织与性能

XIANJIN JIEGOU CAILIAO HANJIE JIETOU ZUZHI YU XINGNENG

著 者:薛小怀

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

印 制:江苏凤凰数码印务有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

字 数:346 千字

版 次:2019 年 12 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-22181-0

定 价:58.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:17

印 次:2019 年 12 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:025-83657309

谨以此书献给我国焊接事业的开拓者和继承者！

编写委员会

(按姓氏音序排列)

陈国锋	西门子中国研究院,研发总监,教授
陈怀宁	中国科学院金属研究所,研究员
褚巧玲	西安理工大学材料科学与工程学院,讲师
李长鹏	西门子中国研究院,首席专家
刘川	江苏科技大学材料科学与工程学院,教授
卢庆华	上海工程技术大学材料工程学院,副教授
莫春立	沈阳航空航天大学材料科学与工程学院,副教授
沈元勋	郑州机械研究所有限公司,高级工程师
苏金花	哈尔滨焊接研究院有限公司,高级工程师
徐济进	上海交通大学材料科学与工程学院,副教授
徐孟嘉	华南理工大学机械与汽车工程学院,讲师
薛小怀	上海交通大学材料科学与工程学院,副教授
杨成刚	南昌航空大学航空制造工程学院,副教授
周忠娇	西门子中国研究院,高级研究员



前言

在我刚接触科研工作的时候,老一辈人告诉我,做研究必须要有自己的研究方向,研究方向一旦确定下来,就要坚持把这个方向的工作做精做深,做一个有情怀、有责任感的焊接人。

十分有幸从西安石油大学本科开始,到西安交通大学硕士,再到中国科学院金属研究所博士,又到博士后出站留校至今在上海交通大学任教,聆听了许多焊接师长们讲授的课程,在与他们的交往中了解到他们那一代人所从事的引以为豪的焊接研究工作,使我受益匪浅。这里面包括西安石油大学张超教授的《熔焊原理》,高惠临教授的《金属学与热处理》,西安交通大学薛锦教授、贾昌申教授、张建勋教授、李长久教授等讲授的研究生学位课程,金属研究所陈晓风研究员和我的导师钱百年研究员讲授的博士学位课程。在求学期间还认识了李依依院士、周本濂院士、斯重遥研究员、唐慕尧教授、王仪康研究员、史耀武教授、于尔靖研究员、陈亮山研究员、王者昌研究员、范存淦研究员等,在上海交通大学任教期间认识了焊接专业创始人陈楚教授、王钹教授,还有楼松年教授(博士后合作教授)、汪建华教授、陈立功教授、姚舜教授等。我国的“六五”攻关、“七五”攻关、“八五”攻关、“973”计划、“863”计划以及其他科技攻关计划中都有他们的身影。

在师长们的影响和指导下,我取得了一些成绩,为此我感到很自豪。比如,王仪康研究员把我带进微合金钢领域,提供机会让我在“西气东输”项目中发挥了作用;在导师钱百年研究员的指导和国旭明教授的帮助下,在低合金高强钢焊接冶金和焊接性方面取得了一点儿成绩,尤其是解释了低合金钢焊接接头热影响区韧性显著下降的机理,这些工作获得了金属研究所师昌绪奖;与楼松年教授合作进行了东海大桥钢管桩牺牲阳极防腐工程的水下焊接工艺评定,为东海大桥的建设做出了些许贡

献;在和周本濂院士的交往中学习到如何让别人接受、支持并实现自己的想法。李依依院士的一句:大钱(指我的导师)搞焊接性研究是真正的焊接!让我热血沸腾,把这个研究方向一直坚持做下来,在超高强复相钢焊接性研究中发现碳含量超过阈值后会在热影响区形成孪晶马氏体,显著降低该区的韧性。

科研工作者有了激情,就能激发想象力,启发创新思维;有了情怀和责任感,就能成为对社会、对国家有贡献、有价值的人。一个研究方向的传承,就是激情、情怀和责任感的源泉。师长们为了我国的经济发展和国防事业做出了许多不为人知的贡献。周本濂院士说过一句很有名的话:我们的论文发表在蓝天上;王仪康研究员曾经说过,我们这代人是信仰的,不能说曾经做过的事情,我们可是宣过誓的;薛锦教授负责的产品在国外被同行进行研究是如何做到的;陈亮山研究员在国内开创了爆炸处理消除焊接应力技术,开发的高强钢焊接工艺储备了18年,用了该工艺的空天飞行器已经遨游于太空;陈立功教授开创了振动处理消除焊接应力;唐慕尧教授、史耀武教授、汪建华教授是国内较早利用计算机进行焊接研究的学者;钱百年研究员主攻超低温钢的焊接,把冷裂纹作为研究方向;于尔靖研究员主攻有色金属的焊接,把热裂纹作为研究方向;斯重遥研究员、张超教授把钎焊作为研究方向。师长们的研究成果在不同领域都得到了广泛的应用。

我的导师钱百年研究员在我离开金属研究所时语重心长地说:“研究工作有的人喜欢刨松土,有些人喜欢深挖,还是做精深比较好吧。不要写那么多文章,李薰老所长一生的论文没有几篇,但是国际上都认可他的研究。”工作后,我从徐祖耀先生、潘健生教授和丁文江教授的科研事迹中体会到了导师对我的殷切希望。更加坚定了把金属材料焊接性、焊接冶金、焊接质量控制作为自己毕生的研究方向的想 法,力求做一个满足国家和社会重大需求,做一个充满激情,有责任感的学者!

在焊接结构失效破坏事故中,事故原因与焊接接头质量相关的占相当大的比例,焊接接头质量不佳极易造成重大经济损失和人员伤亡,并可能产生恶劣的社会影响和政治影响。对熔化焊来说,焊接接头包括热影响区和焊缝金属,母材在焊接热源的作用下形成了热影响区,熔融的母材和焊材凝固后形成了焊缝金属。在这个过程中发生了一系列复杂的物理冶金和化学冶金反应,在接头中形成了几何、物理、化学和性能的不连续性,如:焊缝金属典型的铸态组织无法与母材的组织 and 性能相匹配,热影响区经历的最高温度超过了母材的热处理温度而致脆或软化;局部焊接加热引起的焊接残余应力峰值可能超过母材的屈服应力。因此,为了获得优质的焊接接头,师长们从不同的角度出发进行焊接接头的组织和性能研究,在经济建设和

国防建设上屡立新功,成绩卓著。

我一直想把不同研究方向的研究进展和成果以及对我国焊接事业的贡献按照材料、设备、工艺、方法等几个方面进行展示,但由于能力和水平有限,这个想法一直未能实现。健在的师长们有些仍在科研一线指导研究生,但是,斯重遥研究员、王仪康研究员、陈楚教授、王焱教授等在我工作后相继作古,尤其是今年,我的导师钱百年研究员的去世深深地触动了我。师长们为之奋斗的事业,祖国会记住他们!作为学生,更应该记住他们!2019年适逢建国70周年,我们焊接人有责任把师长们开创的事业以学术著作的形式记录和传承下来作为献礼,同时也希望把焊接事业发扬光大。当我把这个想法和师长们的弟子提出后,大家一致赞成,由我策划和统稿,共十章。第一章由薛小怀撰写,第二章由徐孟嘉撰写,第三章由杨成刚撰写,第四章由褚巧玲撰写,第五章由沈元勋撰写,第六章由周忠娇、李长鹏、陈国锋撰写,第七章由莫春立撰写,第八章由陈怀宁、苏金花撰写,第九章由徐济进、卢庆华撰写,第十章由刘川撰写。初稿由陈怀宁、易耀勇审阅并提出修改意见。参写的老师均在深入的理论研究和丰富的实践基础上进行撰写,本书的可读性和实用性都很强。若想从事某个研究方向的研究,以书中给出的研究方法和过程为基础即可很快入门;若要解决工矿企业的实际问题,书中每章都给出了实际应用的案例,可供工程技术人员参考。由于篇幅有限,本书只介绍了众多焊接研究方向中的一部分研究工作,希望条件和时机成熟时以丛书的形式展现给大家。在成书之际,衷心感谢各位老师们的辛勤付出!感谢上海交通大学出版社对本书出版的支持和付出!

薛小怀 2019年3月



第 1 章	低合金高强钢焊接接头的组织与性能	001
1.1	低合金高强钢的发展	002
1.1.1	低合金高强钢的冶金理论基础	002
1.1.2	低合金高强钢的微合金化设计	003
1.1.3	低合金高强钢的控制轧制机理	004
1.1.4	低合金高强钢的组织特征和强韧化机理	004
1.1.5	低合金高强管线钢值得注意的几个问题	005
1.2	低合金高强钢焊接热影响区的组织与性能	006
1.2.1	焊接热影响区组织与性能的研究方法	006
1.2.2	焊接热影响区的显微组织与性能特点	008
1.2.3	低合金高强钢焊接热影响区中的粒状贝氏体	009
1.2.4	微合金元素与粗晶区显微组织和性能的关系	011
1.3	低合金高强钢熔化焊焊缝的组织与性能	012
1.3.1	低合金高强钢熔化焊焊缝的组织与韧性	012
1.3.2	低合金高强钢熔化焊焊缝金属的合金化	014
1.3.3	钛和硼微合金化提高焊缝韧性的机理	015
1.3.4	复合夹杂物诱发针状铁素体形核的机理	016
1.3.5	低合金高强钢熔化焊接头的屈强比调控	016
	参考文献	017
第 2 章	固态相变对低合金钢焊接接头性能和残余应力的影响	019
2.1	低合金钢焊接过程中相变对接头性能影响的研究	019
2.1.1	焊接过程中相变对接头性能的影响	019

2.1.2	焊接过程中接头相变的有限元模拟	020
2.2	低合金钢接头中的相变	022
2.3	改进的扩散型相变模型	024
2.4	2.25Cr-1.6W 钢焊接接头固态相变对接头残余应力的影响	026
2.4.1	对接接头固态相变有限元模型的建立	026
2.4.2	对接接头焊缝和热影响区的显微组织	029
2.4.3	对接接头上焊接残余应力的分布特征	030
	参考文献	033
第3章	高性能铝合金焊接接头的组织与性能	039
3.1	铝及其合金的分类和性能	039
3.1.1	铝及其合金的分类	039
3.1.2	铝及其合金的性能	041
3.2	铝及其合金的焊接性分析	042
3.2.1	铝及其合金熔化焊接头中气孔的形成机理	043
3.2.2	铝及其合金熔化焊接头热裂纹的形成机理	046
3.2.3	铝及其合金焊接接头耐腐蚀原理及其调控	047
3.3	铝及其合金焊接接头的组织与性能	048
3.3.1	铝及其合金焊接接头热影响区的软化机制	049
3.3.2	铝及其合金焊缝金属组织晶粒的细化机理	051
	参考文献	059
第4章	钛-钢复合板焊接接头的组织与性能	063
4.1	钛与钢异种金属的焊接性	063
4.1.1	钛与钢异种金属的焊接性分析	063
4.1.2	钛与钢复合板的制备和对接焊	064
4.2	钛与钢爆炸焊复合界面特性	069
4.2.1	钛与钢爆炸焊复合板的制备	069
4.2.2	钛与钢爆炸焊界面结合机理	071
4.2.3	钛与钢爆炸焊接头力学性能	074
4.3	钛-钢复合板的板对接间接焊接头的组织与性能	076
4.3.1	板-板对接焊时的间接焊焊接工艺	077
4.3.2	板-板对接焊时间接焊接头的组织	077
4.3.3	板-板对接焊时间接焊接头的性能	078

4.4	钛-钢复合板的板对接直接焊接头的组织与性能	079
4.4.1	板-板对接焊时直接焊的焊接工艺	079
4.4.2	板-板对接焊时直接焊接头的组织	080
4.4.3	板-板对接焊时直接焊接头的性能	084
4.5	钛-钢复合板的工程应用	087
4.5.1	钛-钢复合板在电厂烟囱制造中的应用	087
4.5.2	钛-钢复合板在压力容器制造中的应用	088
	参考文献	089

第5章	C/C 复合材料与金属材料钎焊接头的组织与性能	092
5.1	C/C 与金属钎焊的焊接性分析	092
5.1.1	C/C 与金属钎焊的焊接性	092
5.1.2	C/C 与金属钎接界面设计	093
5.2	C/C 与铜钎焊接头组织与性能	094
5.2.1	C/C 与铜钎接机理及钎缝组织	094
5.2.2	C/C 与铜钎焊接头的力学性能	095
5.2.3	C/C 与铜钎焊接头的抗热震性	097
5.3	C/C 与高温合金钎焊接头的组织与性能	098
5.3.1	C/C 与高温合金钎接机理及钎缝组织	098
5.3.2	C/C 与高温合金钎焊接头的力学性能	102
5.3.3	C/C 与高温合金钎焊接头的断口形貌	103
	参考文献	105

第6章	高温合金选区激光熔化成型的组织与性能	108
6.1	高能束增材制造技术概述	108
6.1.1	增材制造的堆积原理	108
6.1.2	增材制造的发展历程	109
6.1.3	高能束金属增材制造	110
6.2	选区激光熔化 In718 高温合金的微观组织	113
6.2.1	选区激光熔化高温合金的成型机理及微观组织	113
6.2.2	选区激光熔化高温合金成型冶金缺陷产生机理	114
6.2.3	选区激光熔化高温合金成型的性能热处理优化	117
6.3	选区激光熔化 In718 高温合金成型的性能	120
6.3.1	激光熔化成型的强化机制	120
6.3.2	激光熔化成型的蠕变机制	123

6.3.3 激光熔化成型的疲劳机制	125
6.3.4 激光熔化成型可靠性设计	127
参考文献	130

第7章 焊接接头组织与性能的数值计算与模拟

7.1 焊接温度场的数值模拟与验证	133
7.1.1 焊接温度场数值模拟的数学模型	133
7.1.2 焊接温度场数值模拟结果与实测	135
7.2 焊接温度场与应力场的耦合模拟	138
7.2.1 焊接温度场模拟过程的实现	138
7.2.2 温度场数值模拟结果与讨论	138
7.3 铁素体不锈钢焊接 HAZ 晶粒长大的物理模拟	141
7.3.1 铁素体不锈钢焊接热模拟与焊接试验	142
7.3.2 焊接热模拟试验结果和焊接试验结果	143
7.3.3 焊接热模拟结果和焊接试验结果分析	148
7.4 铁素体不锈钢焊接 HAZ 晶粒长大过程 MC 模拟	148
7.4.1 焊接 HAZ 晶粒长大的 MC 模拟	148
7.4.2 基于试验数据的 MC 模拟结果	154
7.4.3 MC 模拟计算结果分析与讨论	157
7.5 碳钢 Q235 奥氏体化过程的物理模拟	159
7.5.1 奥氏体化过程的焊接热模拟	159
7.5.2 奥氏体化过程的热模拟结果	159
7.5.3 奥氏体化过程模拟结果分析	163
参考文献	165

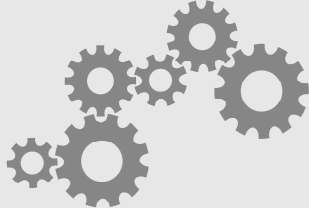
第8章 爆炸处理对焊接接头组织与性能的影响

8.1 焊接接头焊后处理及爆炸处理	167
8.1.1 焊接接头焊后处理的意义	167
8.1.2 金属材料的爆炸加工技术	169
8.2 爆炸的爆轰特性及作用机理	170
8.3 爆炸处理对焊接接头焊接残余应力的影响	171
8.3.1 爆炸消除焊接残余应力的作用机理	171
8.3.2 爆炸消除焊接残余应力的炸药设计	172
8.3.3 爆炸消除焊接残余应力的工程实践	173
8.3.4 爆炸处理对焊接结构安全性的影响	176

8.4	爆炸处理对焊接接头性能的影响机制及效果	177
8.4.1	爆炸处理对常规力学性能的影响	178
8.4.2	爆炸处理对材料疲劳性能的影响	180
8.4.3	爆炸处理对材料断裂韧性的影响	180
8.4.4	爆炸处理后材料的示波冲击特性	182
8.5	爆炸处理改善材料焊接性的机理及效果	185
8.5.1	试验材料和方法	186
8.5.2	主要的试验结果	187
8.5.3	爆炸冲击影响材料焊接性的机理	188
8.5.4	爆炸冲击改善材料焊接性的效果	189
8.6	焊接接头爆炸处理的工业应用	189
8.6.1	爆炸处理在石化行业中的应用	190
8.6.2	爆炸处理在电站建设中的应用	191
8.6.3	爆炸处理在制铝行业中的应用	194
8.6.4	梁结构件的爆炸消除应力处理	195
8.6.5	其他焊接构件的爆炸消除应力	196
	参考文献	196

第9章	振动对焊接接头组织与性能的影响	198
9.1	振动焊接概述	198
9.1.1	振动分类及机理	198
9.1.2	振动焊接的应用	200
9.1.3	振动焊接的特点	200
9.1.4	振动工艺的选择	201
9.1.5	振动效果与评定	201
9.2	振动对焊接接头残余应力的影响	202
9.2.1	振动对焊接接头残余应力的影响机制	202
9.2.2	振动对焊接接头残余应力的作用原理	203
9.3	振动对焊接接头组织的影响机制	205
9.3.1	振动加速度对焊接接头组织的影响	205
9.3.2	振动的频率对焊接接头组织的影响	206
9.4	振动对焊接接头力学性能的影响机制	209
9.4.1	振动对焊接接头显微硬度的影响	209
9.4.2	振动对焊接接头拉伸性能的影响	211
9.4.3	振动对焊接接头断裂韧性的影响	211

9.4.4	振动对焊接接头疲劳性能的影响	212
9.5	振动焊接技术在工业中的应用	212
9.5.1	振动焊接在高炉用钢厚板电渣焊中的应用	212
9.5.2	振动焊接技术在建筑 H 型轻钢施焊时的应用	214
	参考文献	216
第 10 章	超声冲击处理对焊接接头组织与性能的影响	218
10.1	焊接接头的超声冲击处理概述	218
10.1.1	超声冲击处理原理及装置	218
10.1.2	超声冲击处理的实施效用	219
10.1.3	超声冲击处理效应及优点	220
10.1.4	超声冲击处理的实施要点	220
10.1.5	超声冲击处理的影响因素	222
10.2	接头超声冲击处理对焊接残余应力的影响机制	223
10.2.1	超声冲击处理使材料表面形成压应力	223
10.2.2	超声冲击处理对焊接残余应力的影响	225
10.3	超声冲击处理对焊接接头组织的作用机理	230
10.3.1	超声冲击处理使焊接接头表层形成纳米晶层组织	230
10.3.2	逐层超声冲击处理对多层多道焊接接头组织的影响	231
10.4	超声冲击处理对焊接接头力学性能的影响机制	233
10.4.1	超声冲击处理对焊接接头显微硬度的影响	233
10.4.2	超声冲击处理对焊接接头拉伸性能的影响	236
10.4.3	超声冲击处理对接头微区力学性能的影响	238
10.4.4	超声冲击处理对焊接接头冲击韧性的影响	241
10.4.5	超声冲击处理对焊接接头疲劳性能的影响	242
10.5	超声冲击处理在工业上的应用	248
10.5.1	超声冲击处理在高速铁路钢桥焊接上的应用	248
10.5.2	超声冲击处理在船舶和海工钢结构上的应用	249
10.5.3	超声冲击处理在桥梁补修盖板结构上的应用	249
10.5.4	超声冲击处理在高速列车焊接结构上的应用	250
10.5.5	超声冲击处理在超导电机焊接转子上的应用	250
	参考文献	251
索引		254



第 1 章 低合金高强钢焊接接头的组织与性能

冶金技术的进步使得冶炼超低碳和高洁净度的钢材成为可能,实现了微合金化、形变强化理论和材料成分、组织、性能关系研究成果的应用,成功地研制出高洁净度、高均匀度、超细晶粒的 400 MPa、800 MPa、1 500 MPa,甚至更高强度级别的低合金高强钢(high-strength low-alloy, HSLA),其研制与开发在日本、韩国、欧盟、美国、中国以及其他国家发展迅速^[1-3]。

任何一种新型金属结构材料都必须要考虑其焊接加工性能,即需要重视焊接加热和冷却对其组织和性能的影响。形变热处理和沉淀硬化型的钢种,由于其组织细小,具有较高的强度与塑性,在焊接热作用下,母材的组织越细小,长大的趋势越大。因此,母材受焊接加热部分,即焊接热影响区(heat affected zone, HAZ)的组织与性能会发生变化,引起组织粗化、性能降低。受焊接加热的母材随着与焊缝中心距离的增加,其所经历的焊接热循环相差较大,通常分为部分相变区、细晶区、粗晶区和熔合区,在 400℃左右还可能存在时效脆化区,如图 1-1 所示。由此可知,HAZ 是具有组织梯度和性能梯度的非均匀连续体。HAZ 中的粗晶区具有较高的强度和硬度及较低的塑性和韧性,这是由于该区处在焊缝和母材的过渡地带,不仅具有明显

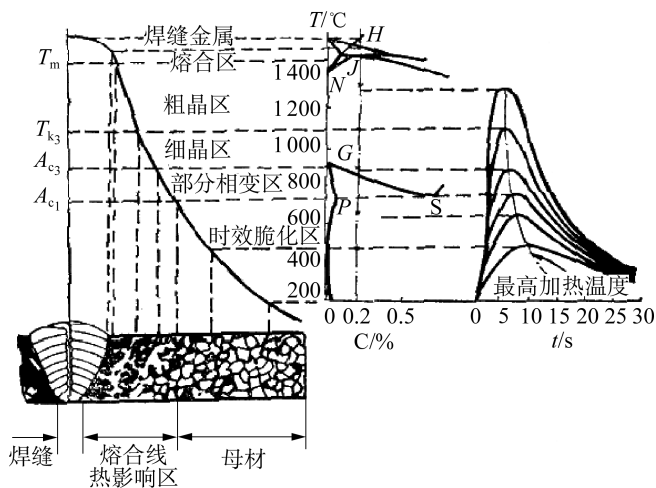


图 1-1 焊接接头分区、Fe-C 相图及 HAZ 各区最高加热温度

的物理和化学不均匀性,而且常在焊趾焊根处出现咬边和裂纹等几何不均匀性而造成应力集中,因此,粗晶区是焊接接头中最薄弱的环节,通常只要粗晶区的塑性和韧性满足性能要求,就可以认为其他各区性能没有问题。

对于常见的熔化焊焊缝来说,焊缝金属的洁净度低、组织粗大,是典型的由处于近固相线温度附近的以母材晶粒为衬底向焊缝中心联生生长的柱状晶。焊缝金属由熔化的母材和熔融的填充金属凝固后形成,因此存在组织和化学成分上的不均匀性。焊缝金属的强韧性只能通过合金化和组织控制来实现,与母材的优异性能相比,要实现与母材等强的韧性是很困难的。

由上述可知,焊接接头(焊缝和热影响区)是整个焊接结构比较薄弱的环节,为了结构的安全性、可靠性,进行焊接接头的组织与性能调控对推广和应用低合金高强度钢具有重要的意义。

1.1 低合金高强度钢的发展

高屈服强度钢(high yield strength, HY)包括 HY80、HY100 和 HY130,从 1946 年研制成功以来在美国海军用钢中得到广泛应用^[4-5]。该系列钢的强度和韧性是通过形成淬火和回火马氏体得到的。由于采用形成弥散细小的碳化物的强化机理,因此碳在该钢种中发挥了重要作用。但是,焊接冷却过程中形成的未回火马氏体组织严重降低了热影响区的韧性,也增加了氢致裂纹的敏感性。因此,焊接过程中需要严格控制焊接热输入、预热温度、层间温度、后热以及焊后热处理,从而保证能得到满意的组织和力学性能。如此复杂和严格的焊接工艺使得焊接操作难度加大而且费用昂贵。据报道,美国海军每年在焊接方面的研究费用高达 6 千万美元,这些研究涉及对焊接裂纹的认识、预测以及生产线实现技术等。为了降低舰艇制造成本,美国海军从 1980 年代开始研发替代 HY 系列钢的新钢种^[6-9]。另外,日本于 1970 年代初将针状铁素体钢投入实际工业生产,通过微合金化和控制轧制,利用晶粒细化、弥散析出相与位错亚结构的交互强化效应,使钢的屈服强度达到 650 MPa, -60℃ 下的冲击韧性达到 80 J,从而在石油天然气输送管道中得到广泛应用。为了满足开发北极和近海能源的需要,在针状铁素体钢研究的基础上又开发了超低碳贝氏体钢(ultra-low carbon bainite steel, ULCB 钢)。在保证优良低温韧性和焊接性的前提下,通过适当增加合金元素的含量、完善控轧和控冷工艺,使钢的屈服强度进一步提高至 700 MPa~800 MPa^[10]。

1.1.1 低合金高强度钢的冶金理论基础

早在 20 世纪 60 年代就已经发现,当钢中的 C 含量接近零时,钢的连续冷却转变曲线中的贝氏体“鼻子”就会左移,在很宽范围的冷却速率下形成贝氏体组织,而且在该条件下马氏体和贝氏体两者之间的强度差异小到可以忽略。由于缺少 C 的

强化作用,可以通过固溶强化获得超过 690 MPa 的高屈服强度。钢的洁净度同超低碳一样能改善轧制钢板的韧性。实际上,去掉间隙元素能消除钢铁材料冲击转变温度(韧性)对晶粒尺寸的依赖性^[11-13]。

虽然很早就认识到超低碳贝氏体钢的重要性,然而由于当时冶炼超低碳钢($w_C < 0.03\%$)在冶炼工艺上存在许多困难,对这种钢进行真正意义上的研究直到 20 世纪 80 年代初才由日本新日铁公司首先开始。目前冶炼技术的发展已为工业生产超低碳贝氏体钢提供了可能。

1.1.2 低合金高强度钢的微合金化设计

低合金高强度钢在成分设计上选择 C、Mn、Mo、Cu、B、Ti、Nb、V 的最佳配合,在较大冷却速率范围内都能形成完全的贝氏体组织,其中 Mn 和 Mo 是作为强化元素加入的。考虑到冶金技术、经济性和钢材性能的要求,钢中还经常以 Ni、Cu、Cr 作为 Mo 的补充元素。这类元素的作用类似于 Mn 和 Mo 的固溶强化作用,其中 Cu 还能降低钢的腐蚀速率,是在腐蚀环境下服役的钢材的常加元素。Mn、Ni、Cr、Mo 元素可以单独加入或者联合加入,主要取决于板材的厚度和所需要的强度。

钢材的组织必须是低碳贝氏体组织,为了获得高的强度可加入成本比较低的 B 元素来增加钢的淬硬性。这种合金设计思想充分利用了 B 元素在相变动力学上的重要特性,加入微量 B 元素可明显抑制铁素体在奥氏体晶界上的形核,使铁素体转变曲线明显右移,同时使贝氏体转变曲线变得扁平,从而在超低碳和较大的冷却速率范围内都能得到贝氏体组织。这种超低碳贝氏体组织的钢特别适用于高强、厚壁管线,且能适应极寒地带管线铺设时的现场环焊缝焊接和供酸性环境使用^[10,14]。

为了保证 B 元素的作用,必须添加合金元素 Ti 来固定杂质元素 N,避免 B 与 N 发生化合而烧损。实践证明,在钢中加入微合金化元素 Ti,不仅可以保证 B 不被烧损,还能形成高熔点 N、O 化物,在加热过程中不易熔化和分解,能阻碍晶粒的长大,从而对细化晶粒十分有效,尤其在焊接过程中抑制粗晶区的晶粒粗化效果十分显著。该技术首先由日本提出并且成功得到应用。在贝氏体板条基体上弥散分布的 Ti 的高熔点析出相阻碍位错运动,从而使钢的强度显著提高。

低合金高强度钢中微合金元素 Nb 和 V 的作用之一是在控轧过程中阻止奥氏体晶粒长大,另一作用是可以延迟奥氏体再结晶,从而可以在较高的温度下进行轧制。Nb 具有显著的晶粒细化作用和中等的沉淀强化作用,在增加强度的同时还能降低韧脆转变温度。V 具有较弱的细化晶粒作用和较强的沉淀强化作用,但是含 V 钢的韧脆转变温度比含 Nb 钢和含 Ti 钢都高,在管线钢设计中都不单独使用 V 元素。

低合金高强度钢还有一个优点是碳当量相当低,这也是近海和极地用钢的要求。具有低的碳当量的钢材在恶劣环境下的焊接不用预热,也不必进行焊后热处理和保证接头的低硬度,即可避免因硫化物应力腐蚀而开裂。

低合金高强度钢是高度的洁净钢,现代冶炼技术已经能够确保杂质元素和杂质气