



国际制造业先进技术译丛

WILEY

不锈钢焊接冶金学 及焊接性

**Welding Metallurgy and
Weldability of Stainless Steels**

(美) John C. Lippold, Damian J. Kotecki 著
陈剑虹 译



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际制造业先进技术译丛

不锈钢焊接冶金学 及焊接性

(美) John C. Lippold 著
Damian J. Kotecki

陈剑虹 译
任家烈 审校



机械工业出版社

本书介绍了国际上不锈钢焊接冶金学及焊接性方面的最新进展。以不锈钢的成分和相组成图的开发和演变为基础,详细阐述了马氏体、铁素体、奥氏体、双相组织和析出硬化组织等五种不同显微组织的不锈钢合金系的焊接冶金和焊接性问题。有些章节还举出了实例研究,这就让读者看到如何把书中叙述的概念用于现实的焊接问题。还专门安排了一章讨论不锈钢的异种金属焊接。最后介绍了焊接性的各种试验方法。

本书可供从事不锈钢焊接的工程技术人员、科研人员及高等院校相关专业师生参考。

Copyright © 2005 John Wiley & Sons, Inc. All Rights Reserved.

This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*, ISBN: 978 - 0 - 471 - 47379 - 4, by John C. Lippold, Damian J. Kotecki, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 Wiley 授权机械工业出版社独家出版,未经出版者书面允许,本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。

版权所有,翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2007-1349 号。

图书在版编目(CIP)数据

不锈钢焊接冶金学及焊接性/(美)利波尔德
(Lippold, J. C.), (美)科特基(Kotecki, D. J) 著;
陈剑虹译. —北京:机械工业出版社, 2008. 8 (2016. 9 重印)
(国际制造业先进技术译丛)

Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels
ISBN 978 - 7 - 111 - 24624 - 4

I. 不… II. ①利…②科…③陈… III. 不锈钢-焊接冶金-研究 IV. TG457. 11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 103758 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:吕德齐 责任编辑:吕德齐

版式设计:霍永明 责任校对:姚培新

封面设计:鞠 杨 责任印制:常天培

北京京丰印刷厂印刷

2016 年 9 月第 1 版·第 2 次印刷

169mm×239mm·21.25 印张·2 插页·412 千字

3 001—6 000 册

标准书号:ISBN 978 - 7 - 111 - 24624 - 4

定价:78.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066 机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294 机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203 金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

献给我的双亲 Carl 和 Hilda (Schmieder) Lippold, 他们始终是我这一生力量、勇气和灵感的源泉。

John C. Lippold

献给 Kate(Zander) ——我 40 多年的爱人, 没有你的支持、陪伴和相爱, 我受的教育, 我的事业和我个人的生命将会黯然失色。

Damian J. Kotecki

致中国读者

焊接科学及技术和人类的其他活动一样是全球化的。在面向全球焊接工作者的友谊和精神鼓舞下，我们收集和组织了我们自己以及全球的很多同行和科学家的知识和经验写成此书。

我们感谢兰州理工大学陈剑虹教授和他的同事，他们让以汉语为母语的工程技术人员和科学工作者能更方便地获得本书的知识并丰富它，以进一步推进不锈钢焊接的科学和技术的发展。

John C. Lippold

Damian J. Kotecki

附原文

To Chinese readers

The science and technology of welding is as global as that of any other human activity. It is in a spirit of friendship towards all people in the global welding industry that we have collected and organized our personal knowledge and experience and that of many other colleagues and scientists around the globe in writing this book. We are indebted to Professor Chen Jianhong of Lanzhou University of Technology and his colleagues for making it possible for engineers, scientists and others whose native tongue is Chinese to more easily access this knowledge and build upon it to further advance the science and technology of welding stainless steels.

John C. Lippold

Damian J. Kotecki

译 丛 序 言

一、制造技术长盛永恒

先进制造技术是 20 世纪 80 年代提出的，它由机械制造技术发展而来，通常可以认为它是将机械、电子、信息、材料、能源和管理等方面的技术，进行交叉、融合和集成，综合应用于产品全生命周期的制造全过程，包括市场需求、产品设计、工艺设计、加工装配、检测、销售、使用、维修、报废处理、回收利用等，以实现优质、敏捷、高效、低耗、清洁生产，快速响应市场的需求。因此，当前的先进制造技术是以产品为中心，以光机电一体化机械制造技术为主体，以广义制造为手段，具有先进性和时代感。

制造技术是一个永恒的主题，与社会发展密切相关，是设想、概念、科学技术物化的基础和手段，是所有工业的支柱，是国家经济与国防实力的体现，是国家工业化的关键。现代制造技术是当前世界各国研究和发展的主题，特别是在市场经济高度发展的今天，它更占有十分重要的地位。

信息技术的发展并引入到制造技术，使制造技术产生了革命性的变化，出现了制造系统和制造科学。制造系统由物质流、能量流和信息流组成，物质流是本质，能量流是动力，信息流是控制；制造技术与系统论、方法论、信息论、控制论和协同论相结合就形成了新的制造学科。

制造技术的覆盖面极广，涉及机械、电子、计算机、冶金、建筑、水利、电子、运载、农业以及化学、物理学、材料学、管理科学等领域。各个行业都需要制造业的支持，制造技术既有普遍性、基础性的一面，又有特殊性、专业性的一面，制造技术既具有共性，又有个性。

我国的制造业涉及以下三方面的领域：

- 机械、电子制造业，包括机床、专用设备、交通运输工具、机械设备、电子通信设备、仪器等；
- 资源加工工业，包括石油化工、化学纤维、橡胶、塑料等；
- 轻纺工业，包括服装、纺织、皮革、印刷等。

目前世界先进制造技术沿着全球化、绿色化、高技术化、信息化、个性化和服务化、集群化六个方向发展，在加工技术上主要有超精密加工技术、纳米加工技术、数控加工技术、极限加工技术、绿色加工技术等，在制造模式上主要有自动化、集成化、柔性化、敏捷化、虚拟化、网络化、智能化、

协作化和绿色化等。

二、图书交流源远流长

近年来, 国际的交流与合作对制造业领域的发展、技术进步及重大关键技术的突破起到了积极的促进作用, 制造业科技人员需要及时了解国外相关技术领域的最新发展状况、成果取得情况及先进技术应用情况等。

必须看到, 我国制造业与工业发达国家相比, 仍存在较大差距。因此必须加强原始创新, 在实践中继承和创新, 学习国外的先进制造技术和经验、引进消化吸收创新, 提高自主创新能力, 形成自己的创新体系。

国家、地区间的学术、技术交流已有很长的历史, 可以追溯到唐朝甚至更远一些, 唐玄奘去印度取经可以说是一次典型的图书交流佳话。图书资料是一种传统、永恒、有效的学术、技术交流方式, 早在 20 世纪初期, 我国清代学者严复就翻译了英国学者赫胥黎所著的《天演论》, 其后学者周建人翻译了英国学者达尔文所著的《物种起源》, 对我国自然科学的发展起到了很大的推动作用。

图书是一种信息载体, 图书是一个海洋, 虽然现在已有网络、光盘、计算机等信息传输和储存手段, 但图书更具有广泛性、适应性、系统性、持久性和经济性, 看书总比在计算机上看资料要方便习惯, 不同层次的要求可以参考不同层次的图书, 不同职业的人员可以参考不同类型的技术图书, 同时它具有比较长期的参考价值和收藏价值。当然, 技术图书的交流具有时间上的滞后性, 不够及时, 翻译的质量也是个关键问题, 需要及时、快速、高质量的出版工作支持。

机械工业出版社希望能够在先进制造技术的引进、消化、吸收、创新方面为广大读者做出贡献, 为我国的制造业科技人员引进、纳新国外先进制造技术的出版资源, 翻译出版国际上优秀的制造业先进技术著作, 从而能够提升我国制造业的自主创新能力, 引导和推进科研与实践水平的不断进步。

三、选译严谨质高面广

1) 精品重点高质。本套丛书作为我社的精品重点书, 在内容、编辑、装帧设计等方面追求高质量, 力求为读者奉献一套高品质的丛书。

2) 专家选择把关 本套丛书的选书、翻译工作均由国内相关专业的专家、教授、工程技术人员承担, 充分保证了内容的先进性、适用性和翻译质量。

3) 引纳地区广泛 主要从制造业比较发达的国家引进一系列先进制造技术图书, 组成一套“国际制造业先进技术译丛”。当然其他国家的优秀制造科技图书也在选择之内。

4) 内容先进丰富 在内容上应具有先进性、经典性、广泛性,应能代表相关专业的技术前沿,对生产实践有较强的指导、借鉴作用。本套丛书尽量涵盖制造业各行业,例如机械、材料、能源等,既包括对传统技术的改进,又包括新的设计方法、制造工艺等技术。

5) 读者层次面广 面对的读者对象主要是制造业企业、科研院所的专家、研究人员和工程技术人员,高等院校的教师和学生,可以按照不同层次和水平要求各取所需。

四、衷心感谢不吝指教

首先要感谢许多积极热心支持出版“国际制造业先进技术译丛”的专家学者,积极推荐国外相关优秀图书,仔细评审外文原版书,推荐评审和翻译的知名专家,特别要感谢承担翻译工作的译者,对各位专家学者所付出的辛勤劳动表示深切敬意,同时要感谢国外各家出版社版权工作人员的热心支持。

本套丛书希望能对广大读者的工作提供切实的帮助,欢迎广大读者不吝指教,提出宝贵意见和建议。

机械工业出版社

译 者 序

本书作者是美国焊接界颇有影响的学者和工程技术人员。他们对不锈钢的焊接，特别是不锈钢焊接材料的开发进行了大量深入的研究工作，对不锈钢焊接冶金及焊接性有深刻的理解和独到的见解，曾经做出过标志性的研究开发成果而又有丰富的工程实际经验。在此基础上写出本书，其特点是：

1) 内容覆盖了全部不锈钢焊接冶金的领域，阐述了几乎所有重要的理论问题，从广度上很好地满足了读者的需要。

2) 提供了历来和最新的研究成果，深入分析了性能和结构演变中各种现象的内在机理，从深度上可以满足读者的需要。

3) 书中有丰富的解决工程问题及材料开发的经验，并通过研究实例提供了解决实际问题的方法和思路。

总之，这是一本内容全面、理论深入，又有指导实践意义的好书，适用于广大的焊接研究工作者，工程技术人员和高校的教师、研究生、本科生。

前言

我们写这本书的动机是想为工程师、科学家和大学生提供一份参考文献，这份文献描述不锈钢焊接冶金学和焊接性方面最新的进展。在本书之前已经出版了很多有关这些命题的优秀课本和参考书，其中有美国焊接学会，美国机械工程学会（国际）出版的手册，R. J. Castro 和 J. J. de Codenet 合著的《不锈钢和耐热钢的焊接冶金学》[剑桥：剑桥大学出版社（1968）] 和 E. Folkhard 著的《不锈钢焊接冶金学》[柏林：Springer-Verlag 出版社（1984；英译本 1988；中译本，2004）]。所有上述著作都是当时的优秀参考资料，而且保持至今。然而即使从 1984 年 Folkhard 的书出版以来，不锈钢的制造工艺和技术已有很大的变化，特别是当前双相不锈钢和“超级”奥氏体，马氏体和双相不锈钢已成为发展的主流，并被广泛应用于要求焊接的工程结构，对于标准的不锈钢也进行了很多进一步的研究，据此本书作者认为需要对知识进行更新。而两位著者曾经分别、独立地对不锈钢的焊接冶金和焊接性专题进行过教学和举行过讲座，这本书就是在组合了这些教学资料的基础上出版的。

这本书从介绍不锈钢开发历史的章节开始，这些章节涉及相图和相组分图的开发和演变。其后的各章详细地阐述了马氏体钢，铁素体钢、奥氏体钢，双相钢和析出硬化钢等五种组织的不锈钢合金系的焊接冶金学和焊接性问题。每一章都有一节来简单地叙述每一种合金系的一般物理冶金和力学冶金问题，然后讨论焊接性问题。有些章还进行了“实例研究”，这就让读者看到如何把书中叙述的概念用于解决现实的焊接问题。最后本书专门安排了一章“不锈钢的异种金属焊接”。

致 谢

我们特别感谢 Richard Avery、J. M. C. Farrar 博士、John Grubb 博士、Leo van Nassau、John Vitek 博士和 Thomas Siewert 博士，他们仔细地审阅了个别章节，并提出了很多有益的建议，书稿中采纳了这些建议。我们也感谢 Mikal Balmforth，他对相组分图所做的丰富的文献综述对本书第 3 章做出了极大的贡献。我们也要感谢 Shu Shi 和 John McLane，本书引用了他们和其他作者辛勤制作的金相图片。作者也很感谢俄亥俄州立大学和林肯电气公司，他们为我们准备课程和讲座以及编写本书提供了时间和环境，使得这本书的出版得以实现。

目 录

译丛序言

译者序

致中国读者

前言

第 1 章 引言	1
1.1 不锈钢的定义	1
1.2 不锈钢的发展史	2
1.3 不锈钢的种类及其应用	3
1.4 不锈钢的耐腐蚀性能	4
1.5 不锈钢的生产	5
参考文献	6
第 2 章 相图	7
2.1 铁-铬系	7
2.2 铁-铬-碳系	8
2.3 铁-铬-镍系	11
2.4 特殊合金系的相图	13
参考文献	17
第 3 章 合金元素和相组分图	18
3.1 不锈钢中的合金元素	18
3.1.1 铬	18
3.1.2 镍	19
3.1.3 锰	19
3.1.4 硅	20
3.1.5 钼	20
3.1.6 碳化物形成元素	21
3.1.7 析出硬化元素	21
3.1.8 间隙元素：碳和氮	21
3.1.9 其他元素	22
3.2 铁素体形成元素与奥氏体形成元素	22
3.3 相组分图	23
3.3.1 奥氏体-铁素体合金系：早期的相组分图和当量关系式	23
3.3.2 Schaeffler 相组分图	25

3.3.3 DeLong 相组分图	30
3.3.4 其他相组分图	33
3.3.5 WRC-1988 和 WRC-1992 相组分图	38
3.4 奥氏体-马氏体合金系	40
3.5 铁素体-马氏体合金系	44
3.6 神经网络预测铁素体含量	48
参考文献	49
第4章 马氏体不锈钢	53
4.1 标准合金种类和焊接材料	53
4.2 物理冶金和力学冶金	55
4.3 焊接冶金	59
4.3.1 熔化区	59
4.3.2 热影响区	61
4.3.3 相变	65
4.3.4 焊后热处理	66
4.3.5 预热, 层间温度和焊后热处理的指导意见	68
4.4 焊件的力学性能	71
4.5 焊接性	71
4.5.1 凝固裂纹和液化裂纹	73
4.5.2 再热裂纹	73
4.5.3 氢致裂纹	73
4.6 超级马氏体不锈钢	74
4.7 实例研究: 马氏体不锈钢 M_s 温度的计算	77
参考文献	79
第5章 铁素体不锈钢	81
5.1 标准合金种类和焊接材料	81
5.2 物理冶金和力学冶金	85
5.2.1 添加合金元素对组织的影响	87
5.2.2 马氏体的影响	88
5.2.3 脆化现象	89
5.2.3.1 475℃脆化	89
5.2.3.2 σ 相和 χ 相脆化	90
5.2.3.3 高温脆化	90
5.2.3.4 缺口敏感性	94
5.2.4 力学性能	94
5.3 焊接冶金	96
5.3.1 熔化区	96
5.3.1.1 凝固和相变顺序	96

5.3.1.2 析出行为	100
5.3.1.3 微观组织的预测	101
5.3.2 热影响区	102
5.3.3 固相焊焊缝	104
5.4 焊件的力学性能	105
5.4.1 低铬铁素体不锈钢	105
5.4.2 中铬铁素体不锈钢	106
5.4.3 高铬铁素体不锈钢	109
5.5 焊接性	112
5.5.1 焊缝凝固裂纹	112
5.5.2 高温脆化	113
5.5.3 氢致裂纹	115
5.6 耐腐蚀性能	115
5.7 焊后热处理	118
5.8 填充金属的选择	120
5.9 实例研究: 436 型不锈钢热影响区在冷变形时产生的裂纹	121
5.10 实例研究: 430 型不锈钢热影响区产生的晶间应力腐蚀裂纹	124
参考文献	126
第 6 章 奥氏体不锈钢	129
6.1 标准合金种类和焊接材料	130
6.2 物理冶金和力学冶金	134
6.2.1 物理冶金	134
6.2.2 力学性能	139
6.3 焊接冶金	140
6.3.1 熔化区微观组织的演变	140
6.3.1.1 A 模式凝固: 全奥氏体凝固	141
6.3.1.2 AF 模式凝固	141
6.3.1.3 FA 模式凝固	144
6.3.1.4 F 模式凝固	146
6.3.2 单相奥氏体不锈钢焊缝金属中的界面	149
6.3.2.1 凝固亚晶界	149
6.3.2.2 凝固晶粒边界	150
6.3.2.3 迁移晶粒边界	150
6.3.3 热影响区	151
6.3.3.1 晶粒长大	151
6.3.3.2 铁素体的形成	151
6.3.3.3 析出反应	152
6.3.3.4 晶界液化	152

6.3.4 预热, 层间温度和焊后热处理	153
6.4 焊件的力学性能	155
6.5 焊接性	158
6.5.1 焊缝凝固裂纹	159
6.5.1.1 铁素体作为凝固初始相的有利作用	161
6.5.1.2 裂纹敏感性预测图的应用	162
6.5.1.3 杂质元素的影响	164
6.5.1.4 铁素体含量的测量	166
6.5.1.5 快速凝固的影响	167
6.5.1.6 凝固裂纹的断口形貌	172
6.5.1.7 焊缝凝固裂纹的防止	174
6.5.2 热影响区液化裂纹	174
6.5.3 焊缝金属液化裂纹	175
6.5.4 失延裂纹	178
6.5.5 再热裂纹	180
6.5.6 铜污染裂纹	183
6.5.7 锌污染裂纹	184
6.5.8 氮致裂纹	184
6.6 耐蚀性	185
6.6.1 晶间腐蚀	185
6.6.1.1 敏化的防止	188
6.6.1.2 刀状腐蚀	189
6.6.1.3 低温敏化	189
6.6.2 应力腐蚀裂纹	190
6.6.3 点蚀和缝隙腐蚀	192
6.6.4 微生物引起的腐蚀	192
6.6.5 选择性铁素体侵蚀	194
6.7 特殊合金	194
6.7.1 耐热合金	195
6.7.2 高氮合金	197
6.8 实例研究: 选择正确的填充金属	202
6.9 实例研究: 我的游泳池怎么了?	205
6.10 实例研究: 热影响区中的裂纹	205
参考文献	206
第7章 双相不锈钢	211
7.1 标准合金种类和焊接材料	212
7.2 物理冶金	213
7.2.1 奥氏体-铁素体相平衡	213

7.2.2 析出反应	216
7.3 力学性能	217
7.4 焊接冶金	217
7.4.1 凝固模式	217
7.4.2 氮的作用	219
7.4.3 二次奥氏体	223
7.4.4 热影响区	225
7.5 控制铁素体-奥氏体的平衡	229
7.5.1 热输入的影响	229
7.5.2 冷却速度的影响	230
7.5.3 铁素体含量的预测和实际测定	231
7.6 焊接性	232
7.6.1 焊缝凝固裂纹	232
7.6.2 氢致裂纹	233
7.6.3 中温脆化	233
7.6.3.1 α' 相脆化	233
7.6.3.2 σ 相脆化	235
7.7 焊缝力学性能	236
7.8 耐腐蚀性能	238
7.8.1 应力腐蚀裂纹	238
7.8.2 点蚀	238
参考文献	239
第8章 析出硬化不锈钢	241
8.1 标准合金种类和焊接材料	242
8.2 物理冶金和力学冶金	245
8.2.1 马氏体析出硬化不锈钢	246
8.2.2 半奥氏体析出硬化不锈钢	251
8.2.3 奥氏体析出硬化不锈钢	253
8.3 焊接冶金	253
8.3.1 微观组织的演变	254
8.3.2 焊后热处理	255
8.4 焊件的力学性能	256
8.5 焊接性	257
8.6 耐腐蚀性能	261
参考文献	261
第9章 不锈钢的异种金属焊接	263
9.1 异种金属焊接的应用	263
9.2 碳钢或低合金钢与不锈钢的焊接	264

9.2.1	焊缝金属成分的确定	264
9.2.2	熔合边界的过渡区	266
9.2.3	Ⅱ型边界的性质	269
9.3	焊接性	271
9.3.1	凝固裂纹	271
9.3.2	熔敷层剥离	273
9.3.3	碳钢或低合金钢热影响区中的蠕变破坏	274
9.4	其他异种金属组合	276
9.4.1	名义上是奥氏体钢而其熔化区预期会含有一些铁素体或以铁素体 为初析相凝固的不锈钢之间的焊接	276
9.4.2	名义上是奥氏体而其熔化区预期会含有一些铁素体的 不锈钢和全奥氏体不锈钢的焊接	276
9.4.3	奥氏体不锈钢和双相不锈钢的焊接	277
9.4.4	奥氏体不锈钢和铁素体不锈钢的焊接	277
9.4.5	奥氏体不锈钢和马氏体不锈钢的焊接	277
9.4.6	马氏体不锈钢和铁素体不锈钢的焊接	277
9.4.7	用于难于焊接的钢的不锈钢填充金属	278
9.4.8	铜基合金和不锈钢的焊接	280
9.4.9	镍基合金和不锈钢的焊接	281
	参考文献	282
第 10 章 焊接性试验		284
10.1	引言	284
10.1.1	焊接性试验方法	284
10.1.2	焊接性试验技术	285
10.2	可变拘束度试验	285
10.2.1	焊缝凝固裂纹定量化试验技术	286
10.2.2	热影响区液化裂纹定量化试验技术	289
10.3	热延性试验	293
10.4	微裂纹弯曲试验	296
10.5	应变—断裂试验	300
10.6	其他焊接性试验	302
	参考文献	302
附录		304
附录 A	不锈钢名义成分	304
附录 B	不锈钢焊缝的金相腐蚀技术	320
	参考文献	322