



国际制造业先进技术译丛

WILEY

焊接冶金与焊接性

Welding Metallurgy and Weldability

[美] 约翰C.利波尔德 (John C. Lippold) 著
屈朝霞 张汉谦 王东坡 译

《不锈钢焊接冶金及焊接性》原作者的又一力作

焊接失效机理及分析指南

裂纹敏感性的定量化研究与裂纹预防措施

焊接性试验方法，相关研究的新成果



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际制造业先进技术译丛

焊接冶金与焊接性

[美] 约翰 C. 利波尔德 (John C. Lippold) 著

屈朝霞 张汉谦 王东坡 译



机械工业出版社

本书从材料焊接性和焊接冶金角度,为工程师重点描述了焊接失效机理,分为与加工和与服役相关两种类型。本书在描述焊接裂纹的形成机理过程中,提供了推荐的预防措施,同时还描述了与腐蚀相关的失效、断裂,以及疲劳失效的概念。尤其珍贵的是,本书还提供了焊接失效分析指南以及多种焊接性试验方法。总之,本书既包括深入细致的理论分析基础,又展示清晰生动的实际图片,使得读者能够很好地理解和掌握相关知识。另外,该书也包含了相关研究的最新成果。

Copyright © 2015 John Wiley & Sons, Inc. All Rights Reserved.

This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled *Welding Metallurgy and Weldability*, ISBN: 978-1-118-23070-1, by John C. Lippold, 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:01-2015-5586 号。

图书在版编目(CIP)数据

焊接冶金与焊接性/(美)约翰·C.利波尔德著;屈朝霞,张汉谦,王东坡译. —北京:机械工业出版社,2016.12

(国际制造业先进技术译丛)

书名原文:Welding Metallurgy and Weldability

ISBN 978-7-111-55240-6

I. ①焊… II. ①约… ②屈… ③张… ④王… III. ①焊接冶金
IV. ①TG401

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第257530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 王彦青 责任校对:樊钟英

封面设计:鞠杨 责任印制:李洋

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2017年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm·20.25印张·407千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-55240-6

定价:98.00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

内容简介

本书谨献给国际焊接冶金界的四位巨匠前辈

Henri Granjon (法国)

Warren F. "Doc" Savage (美国)

Trevor Gooch (英国)

松田福久 (Fukuhisa Matsuda) (日本)

作者简介

Lippold 博士现任美国俄亥俄州立大学焊接工程专业教授，他是焊接与连接冶金研究团队的负责人，也是俄亥俄州立大学工程杰出教授学院的一名教授。

他在美国伦斯勒理工学院取得学士、硕士和博士学位，师从 Warren F. Savage 博士。他完成正规教育后，在加利福尼亚州 Livermore 市的圣地亚国家实验室 (Sandia National Lab) 工作了 7 年，作为一名技术人员主要从事不锈钢和高合金钢的焊接性研究。从 1985 年到 1995 年，Lippold 博士在美国爱迪生焊接研究所 (Edison Welding Institute, EWI) 工作。1995 年，他加入俄亥俄州立大学焊接工程专业教研组。

在过去的 35 年，Lippold 博士一直从事科学研究，研究项目的主要内容被确定为对工程材料的性能和焊接冶金学的深入挖掘。他的研究领域涉及基础研究和应用研究两个方面，与工业应用领域高度相关。他一直积极致力于对焊接性试验方法的技术评价，还开发了多种适用于工程应用的焊接性试验方法。基于这些研究，Lippold 博士已经发表了 300 多篇学术论文和研究报告。他是国际上公认的不锈钢和高合金钢焊接冶金学及焊接性研究领域的知名专家。自从 1995 年加入俄亥俄州立大学后，他已指导了 60 多名硕士研究生和博士研究生。2005 年，与他人合著《不锈钢焊接冶金学及焊接性》一书，2009 年又与他人合著其姊妹篇专著《镍基合金焊接冶金学及焊接性》。

在此之前，他已经获得多种奖项，如 1977 年、1980 年和 2005 年获 Charles H. Jennings 纪念奖；1979 年、1992 年和 2012 年获 William Spraragen 纪念奖；1993 年、1999 年、2010 年、2011 年、2012 年和 2014 年获 Warren F. Savage 纪念奖；1994 年和 2011 年获 McKay-Helm 奖；1983 年获 Lincoln 金奖；2001 年获 A. F. Davis 银奖；2011 年获 Hobart 纪念奖；2002 年获 Irrgang 奖和美国焊接学会 (AWS) 颁发的 Plummer 纪念教育讲座奖。1985 年和 1989 年他获得了国际金相学会颁发的 Buehler 技术论文杰出奖。1997 年，他出席美国焊接学会 (AWS) 在洛杉矶举行的 Comfort A. Adam 纪念大会，并做了公开演讲。2008 年他获得了 Jaeger 演讲奖；2009 年获国际焊接学会 (IIW) 的 Yoshiaki Arata 奖。Lippold 博士 1994 年成为美国金属学会的院士，1996 年成为美国焊接学会的院士。目前，他是国际焊接学会出版发行的 *Welding in the World* (《世界焊接》) 国际期刊的编辑之一。

译 丛 序

一、制造技术长盛永恒

先进制造技术是在 20 世纪 80 年代提出的,它由机械制造技术发展而来,通常可以认为它是机械、电子、信息、材料、能源和管理等方面技术的交叉、融合和集成。先进制造技术综合应用于产品全生命周期的整个制造过程,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,可实现优质、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,制造技术既有共性,又有个性。

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、集群化方向发展,在加工技术方面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,在制造模式方面主要有自动化、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,国际间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的应用情况等。

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，虽然现在已有网络通信、计算机等信息传输和储存手段，但图书仍将因其具有严谨性、系统性、广泛性、适应性、持久性和经济性的特点而长期存在。纸质图书有更好的阅读优势，可满足不同层次读者的阅读习惯，同时它具有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、吸纳国外先进制造技术的出版资源，翻译出版国际上优秀的先进制造技术著作，从而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) 专家选译把关 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，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、衷心感谢不吝赐教

首先要感谢许多热心支持“国际制造业先进技术译丛”出版工作的专家学者，他们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的敬意，同时要感谢国外各家出版社版权工作人员的热心支持。

希望本套丛书能对广大读者的学习与工作提供切实的帮助，希望广大读者不吝赐教，提出宝贵意见和建议。

译者序

本书由俄亥俄州立大学 (The Ohio State University) 的杰出教授 John C. Lippold 撰写, Lippold 教授是美国金属学会和焊接学会院士, 是国际焊接冶金界非常有影响的学者之一。

本书描述了新材料的焊接性及焊接冶金的总体原则, 以及许多冶金和焊接概念的基础知识, 所举例子涉及许多不锈钢和镍基合金的焊接冶金及焊接性。本书还介绍了焊接性试验方法的最新进展。整体性、逻辑性、实用性强是本书的主要特点。本书中文版有助于读者全面系统了解焊接性和焊接冶金的最新进展。

本书可为工程师理解焊接冶金基本概念提供必要的背景知识, 提供详细的焊接构件的失效分析方法和思路。适用于广大的焊接研究者、工程技术人员, 以及在校的教师、本科生、研究生学习和参考。

第1章主题是材料的焊接性, 综述了焊接性术语的定义及其内涵。

第2章概述了一些焊接基本原理。焊接性主要可以分为与加工制造和与服役相关的焊接接头的两种失效机制。本书所描述的失效机制与焊接构件的显微组织有关, 未对相关的非冶金缺陷进行说明。

第3~第5章重点讲述了材料制造或修复时出现的热裂纹、温(固相)裂纹和冷裂纹。这三章中的每章均重点强调了各种裂纹的形成机制, 并推荐了相应的预防措施。

第6章重点论述了与腐蚀相关的失效。

第7章讨论了与断裂和疲劳相关的问题。

第8章提供了失效分析指南, 其中包括有助于确定失效机理的扫描电子显微镜断口分析, 以及断口观察结果的大量实例。

第9章描述了多种焊接性试验方法, 可对不同种类焊接裂纹敏感性进行定量评价。

附录中列举了本书中提到的填充金属和母材金属的化学成分, 同时也给出了金相分析常用的浸蚀剂和浸蚀方法。

前 言

本书与 2005 年和 2009 年分别出版的《不锈钢焊接冶金学及焊接性》和《镍基合金焊接冶金学及焊接性》这两本书为姊妹篇。回想一下,应该先出版本书,因为本书提供了前两本书中描述的许多冶金和焊接概念的基础知识,本书涉及的内容基于 1986 年以来作者在俄亥俄州立大学焊接工程专业讲授的课程。本书内容可为工程师理解焊接冶金的基本概念提供必要的背景知识,也可用于解释焊接构件的失效。

本书的主题是材料的“焊接性”。正如第 1 章中所述,关于焊接性这一术语的定义和其所涉及的内涵,还存在着相当大的分歧。本书旨在描述与加工制造或与服役相关的焊接接头的失效机制。此外,所描述的失效机制与焊接构件的显微组织有关,而对相关的非冶金缺陷未做说明,如未熔合、气孔、设计缺陷或其他与设计、工艺相关的问题。在第 2 章中概述了一些基本原理,将有助于对焊接冶金不是十分熟悉的读者理解后续章节中出现的概念。

焊接性问题分为与加工制造和与服役相关的失效。第 3~第 5 章重点讲述了材料在最初加工制造或修复时出现的热裂纹、温(固相)裂纹和冷裂纹,重点强调了基本的裂纹形成机制,并推荐了相应的防止措施。第 6 章重点论述了与腐蚀相关的失效。第 7 章讨论了与断裂和疲劳相关的一些总体概念。第 8 章提供了失效分析指南,其中包括有助于确定失效机理的扫描电子显微镜断口分析,以及断口分析结果的大量实例。第 9 章描述了多种焊接性试验方法,这些方法用于对不同种类焊接裂纹的敏感性进行定量化的评价。附录中包括了书中提到的填充金属和母材金属的化学成分,以列表形式给出,同时附录中也给出了金相分析常用的浸蚀剂和浸蚀方法。

本书奉献给国际焊接冶金界的四位“巨匠”。Henri Granjon 是法国焊接研究所焊接学院的院长,那些年,他提出了许多早期的焊接冶金学概念,尤其是关于钢铁焊接冶金方面。大家一致认为,他开发了用于评价氢致裂纹的插销试验方法,这种试验方法至今仍在使用。本人虽未有幸与 Henri Granjon 先生谋面,但他的工作成就和声望一直激励着我。

英国焊接研究所(TWI)的 Trevor Gooch 先生是一位冶金学的天才,同时,他对腐蚀和氢脆也十分精通。我与 Trevor 先生的第一次接触是在 1978 年美国焊接学会(AWS)的学术年会上。当时我参加了一个分会场会议,在那次会议上,一个身材高大、戴着眼镜的男人在会议室后面站起来向论文发布者提问,说“我是英国焊接研究所的 Gooch”。他开始对论文发布者提出许多问题,让其回答。从此以后,如果我预想到 Gooch 博士可能会出现在我发布论文的会场时,我就会格外警

觉,并做好充分的准备。后来几年里,我逐渐与 Trevor 先生熟悉,并意识到他是一位谦卑和温柔的绅士,他喜爱美国的传统乡村音乐,对焊接冶金学有着让人难以置信的热情。

Warren F. “Doc” Savage 可以认为是现代焊接冶金学之父。从 20 世纪 50 年代到 70 年代,他和他的学生们定义了焊接冶金领域,并建立了当今仍在沿用的许多焊接冶金学原理。当我在美国伦斯勒理工学院 (Rensselaer Polytechnic Institute, RPI) 读本科时,认识了 “Doc” Savage 先生,通过我的运作,他愿意指导我,我顺利成为他的研究生,我们之间有了终生的师生关系。他作为我的导师和良师益友,教给我许多处世技巧,包括喝苏格兰威士忌所增添的乐趣。我采纳了他放手指导研究生的风格,鼓励学生创造性地思维,“Doc” Savage 先生对我的职业生涯产生了极其重要的影响。

松田福久 (Fukuhisa Matsuda) 是日本大阪大学 (Osaka University) 的一名终身教授,他曾在美国伦斯勒理工学院焊接冶金试验室待了一年时间。通过利用焊接性试验方法和先进的表征技术,他拓展了 Savage 提出的一些基本概念。他的最大成就之一就是发展了焊接凝固裂纹的基础理论,该理论至今仍被广泛接受。他的研究成果给人印象深刻,极大地影响了我的思维。他的研究成果在本书中多处被引用。

也感谢许多上过我这门课程的学生,当时的教案就是本书的蓝本。作为课堂教学的一部分,要求学生准备以焊接性为主题的各种专题综述报告。这些综述报告是我写作本书过程中非常有价值的资料,我衷心地感谢这些勤奋的学生们。

我也衷心感谢我的许多研究生和博士后,他们帮助我准备书稿,尤其是提供了一些微观照片和其他图表,用于说明焊接冶金和焊接性原理。在此特别感谢 Xiuli Feng (冯秀丽)、Xin Yue (岳鑫)、Adam Hope 以及 David Tung。

我也衷心感谢我现在和以前的学生们,他们在忙碌的工作之余,花时间检查本书中的每一个章节。他们是 Adam Hope 和 David Tung (两位均为俄亥俄州立大学的博士生)、Jeff Sowards (在 NIST 工作)、Jeremy Caron (在 Haynes 国际公司工作)、Seth Norton (在 BP 公司工作)、Xin Yue (岳鑫) (在 Exxonmobil 公司工作)、Morgan Gallagher (在 Shell 公司工作),以及 Mikal Balmforth (在 LLC 材料和工程集团工作),他们周全和偶尔苛刻的意见和建议,让本书增色不少。

最后,我衷心感谢俄亥俄州立大学 (The Ohio State University) 提供的机会,并支持我撰写本书。本书的绝大部分工作是在专业学术假期 (即公休假) 期间完成。对一个大学的终身教授,每 7 年可享用一次专业学术假期。如若没有这样的机会,在正常的教学和科研期间,难以完成本书的写作。我尤其要衷心感谢我的系主任 Rudy Buchheit,因为他的长期支持,让我在学术上更加努力地工作。

目 录

作者简介

译丛序

译者序

前言

第1章 绪论	1
1.1 与加工制造相关的缺陷	3
1.2 与服役相关的缺陷	4
1.3 缺陷的防止与控制	5
参考文献	5
第2章 焊接冶金原理	6
2.1 引言	6
2.2 熔焊接头的区域划分	7
2.3 熔化区	9
2.3.1 金属的凝固	10
2.3.2 焊缝凝固的宏观描述	17
2.3.3 焊缝凝固的微观描述	21
2.3.4 溶质再分配	24
2.3.5 熔化区的显微组织举例	29
2.3.6 过渡区	30
2.4 未混合区	32
2.5 部分熔化区	34
2.5.1 渗透机制	35
2.5.2 偏析机制	38
2.5.3 部分熔化区形成举例	42
2.6 热影响区	44
2.6.1 再结晶和晶粒长大	45
2.6.2 同素异构转变	47
2.6.3 析出反应	50
2.6.4 热影响区显微组织举例	51
2.7 固态焊接	52
2.7.1 摩擦搅拌焊	53
2.7.2 扩散焊	56
2.7.3 爆炸焊	57
2.7.4 超声波焊	58

参考文献	59
第 3 章 热裂纹	62
3.1 引言	62
3.2 焊缝凝固裂纹	62
3.2.1 焊缝凝固裂纹理论	63
3.2.2 元素影响的预测	69
3.2.3 脆性温度范围和凝固裂纹温度范围	71
3.2.4 焊缝凝固裂纹的影响因素	75
3.2.5 焊缝凝固裂纹的判定	82
3.2.6 焊缝凝固裂纹的防止措施	86
3.3 液化裂纹	87
3.3.1 热影响区的液化裂纹	87
3.3.2 焊缝金属的液化裂纹	89
3.3.3 液化裂纹敏感性的影响因素	90
3.3.4 热影响区和焊缝金属的液化裂纹判定	92
3.3.5 液化裂纹的防止措施	93
参考文献	93
第 4 章 固态裂纹	96
4.1 引言	96
4.2 失塑裂纹	96
4.2.1 已提出的形成机制	98
4.2.2 失塑裂纹的影响因素小结	102
4.2.3 失塑裂纹的定量化评价	105
4.2.4 失塑裂纹的判定	106
4.2.5 失塑裂纹的防止措施	107
4.3 再热裂纹	109
4.3.1 低合金钢中的再热裂纹	110
4.3.2 不锈钢中的再热裂纹	114
4.3.3 堆覆焊道下裂纹	117
4.3.4 松弛裂纹	118
4.3.5 再热裂纹的判定	119
4.3.6 再热裂纹敏感性的定量化评价	121
4.3.7 再热裂纹的防止措施	123
4.4 应变时效裂纹	125
4.4.1 应变时效裂纹的形成机制	127
4.4.2 应变时效裂纹敏感性的影响因素	133
4.4.3 应变时效裂纹敏感性的定量化评价	137
4.4.4 应变时效裂纹的判定	142
4.4.5 应变时效裂纹的防止措施	143

4.5 层状撕裂	144
4.5.1 层状撕裂的形成机制	144
4.5.2 层状撕裂的定量化评价	146
4.5.3 层状撕裂的判定	149
4.5.4 层状撕裂的防止措施	150
4.6 铜污染裂纹	152
4.6.1 铜污染裂纹的形成机制	152
4.6.2 铜污染裂纹的定量化评价	154
4.6.3 铜污染裂纹的判定	155
4.6.4 铜污染裂纹的防止措施	156
参考文献	157
第5章 氢致裂纹	164
5.1 引言	164
5.2 氢脆理论	164
5.2.1 平面压力理论	166
5.2.2 表面吸附理论	166
5.2.3 分离理论	166
5.2.4 氢富集局部塑性理论	167
5.2.5 Beachem 的应力强度模型	167
5.3 氢致裂纹的影响因素	169
5.3.1 焊接接头中的氢	169
5.3.2 显微组织的影响	172
5.3.3 拘束度	176
5.3.4 温度	176
5.4 氢致裂纹敏感性的定量化评价	177
5.4.1 Jominy 端部淬火试验法	177
5.4.2 CTS 试验	179
5.4.3 斜 Y 坡口 (小铁研) 试验	180
5.4.4 带间隙的平板堆焊试验	182
5.4.5 插销试验	183
5.4.6 拉伸拘束裂纹试验	186
5.4.7 增强应变裂纹试验	188
5.5 氢致裂纹的判定	189
5.6 氢致裂纹的防止措施	191
5.6.1 碳当量法	193
5.6.2 美国焊接学会法	195
参考文献	199
第6章 腐蚀	204
6.1 引言	204

6.2 腐蚀形式	204
6.2.1 全面腐蚀	205
6.2.2 电化学腐蚀	205
6.2.3 缝隙腐蚀	207
6.2.4 选择腐蚀	207
6.2.5 磨损腐蚀	208
6.2.6 点蚀	208
6.2.7 晶间腐蚀	211
6.2.8 应力腐蚀裂纹	214
6.2.9 微生物诱导腐蚀	216
6.3 腐蚀试验	218
6.3.1 大气腐蚀试验	218
6.3.2 浸泡试验	218
6.3.3 电化学试验	220
参考文献	222
第7章 断裂和疲劳	223
7.1 引言	223
7.2 断裂	224
7.3 断裂韧性的定量化评价	227
7.4 疲劳	230
7.5 疲劳行为的定量化评价	235
7.6 疲劳裂纹的判定	236
7.6.1 贝壳纹花样	237
7.6.2 河流花样	237
7.6.3 疲劳辉纹	237
7.7 疲劳失效的防止措施	239
参考文献	239
第8章 失效分析	241
8.1 引言	241
8.2 断口金相学	241
8.2.1 断口金相学的历史	242
8.2.2 扫描电子显微镜	243
8.2.3 断裂模式	244
8.2.4 焊接接头失效的断口金相学	247
8.3 工程师失效分析指南	257
8.3.1 现场勘察	258
8.3.2 收集背景资料	259
8.3.3 取样和试验方案	260
8.3.4 试样的截取、清理和保存	260

8.3.5	化学分析	261
8.3.6	宏观分析	262
8.3.7	微观分析试样的选择	262
8.3.8	失效分析方法的选择	262
8.3.9	力学试验	263
8.3.10	模拟试验	264
8.3.11	无损评价方法	264
8.3.12	结构完整性评估	264
8.3.13	咨询专家	264
8.3.14	最终报告	265
8.3.15	支持诉讼的专家证词	265
	参考文献	266
第9章	焊接性试验	268
9.1	引言	268
9.2	焊接性试验方法的类型	269
9.3	可变拘束试验	269
9.3.1	焊缝凝固裂纹的定量化评价方法	271
9.3.2	热影响区液化裂纹的定量化评价方法	274
9.4	铸销撕裂试验	276
9.5	热塑性试验	279
9.6	应变致断裂试验	282
9.7	再热裂纹试验	283
9.8	热影响区氢致裂纹的插销试验	285
9.9	焊缝金属氢致裂纹的带间隙的平板堆焊试验	286
9.10	其他焊接性试验方法	288
	参考文献	288
附录		290
附录 A		290
附录 B		291
附录 C		298
附录 D		303
	参考文献	309

第 1 章 绪 论

本书重点关注焊接冶金和焊接性这两个主题。因为材料的焊接性和其微观组织密切相关，因此，焊接冶金和焊接性这两个主题密不可分、相互交织在一起。焊接冶金这一术语已被公认为物理冶金原理的一个分支，而焊接性这一术语则被赋予了更广泛的定义和内涵。从广义上讲，焊接性这一术语考虑了设计、加工、使用等多个方面，有时还包括焊接修复。焊接性的广泛性主要反映在美国焊接学会（American Welding Society, AWS）和国际标准 ISO 581: 1980 对焊接性的定义。所以，焊接性可用来描述两种能力，一种是采用焊接方法成功制造构件的能力，另一种是该构件在给定服役环境下可恰当地实现其功能的能力。

美国焊接学会对焊接性的定义

在给定的制造条件下，把材料焊接成一个特定的、具有恰当设计结构的能力，以及在给定服役环境条件下，该结构圆满实现其功能的能力。

1946 年发表在美国《焊接杂志》（Welding Journal）上一篇题为“这是一个难以捉摸的特征，称为焊接性”一文中，来自美国沃特顿兵工厂（Watertown Arsenal）的 W. L. Warren 写道，“焊接性这个词在现代焊接应用中的地位和重要性已日渐提高。焊接性这个词一直隐含着各种不同的含义，并且现在仍在使用着这些不同的含义，以至于人们可以得出这样一个正确的结论：焊接性具有如同变色龙一样可变性的涵义。”^[1]

国际标准 ISO 581: 1980 对焊接性的定义

采用相应的焊接工艺方法焊接金属构件，所得接头的焊接质量和焊接对构件的影响可以满足技术条件要求，且金属构件的完整性得以实现时，就可以认为在给定焊接工艺以及给定用途条件下，金属材料对焊接具有一定程度的敏感性。

Henri Granjon（见图 1.1）在他的著作《焊接冶金基础》一书中把焊接性定义为：“……，在焊接和服役期间，焊接接头和包含这些焊接接头的结构的性能。”^[2] R. D. Stout 在《钢的焊接性》一书中表述为：“焊接性这一术语还没有一个被广泛接受的含义和解释，根据每个人的观点，该术语可根据不同的应用场合做出完全不同的解释。”^[3] 在 1988 年英国焊接研究所（TWI）举行的主题为“焊接性的量化评价”（Quantifying Weldability）的研讨会上^[4]，来自英国焊接研究所的 Trevor Gooch（见图 1.2）曾表述“……材料焊接性的概念复杂”。在这次会议上，来自

英国气体公司的 A. D. Battein 这样表述：“……焊接性的定义仍然是一个有争议的热门话题，因此，对焊接性进行定义不合适。”来自 BP 国际公司的 W. G. Welland 说道，“对大多数焊接加工制作的操作者和焊接结构的用户来说，他们对焊接性的概念几乎没有兴趣。”尽管来自美国伦斯勒理工学院的 Warren F. Savage 教授（见图 1.3）和他的学生们，以及大阪大学的松田福久教授（见图 1.4）和他的学生们已发表了多篇这方面的论文，但都没有给出焊接性的定义（也许有充分的理由）。



图 1.1 Henri Granjon, 法国焊接研究所 (Institut de Soudure)



图 1.2 Trevor Gooch, 英国焊接研究所 (The Welding Institute), 1992 年

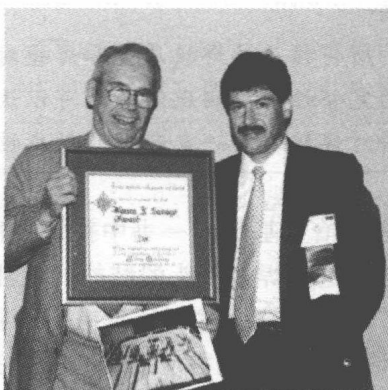


图 1.3 Warren F. "Doc" Savage, 美国伦斯勒理工学院 (Rensselaer Polytechnic Institute), 1986 年

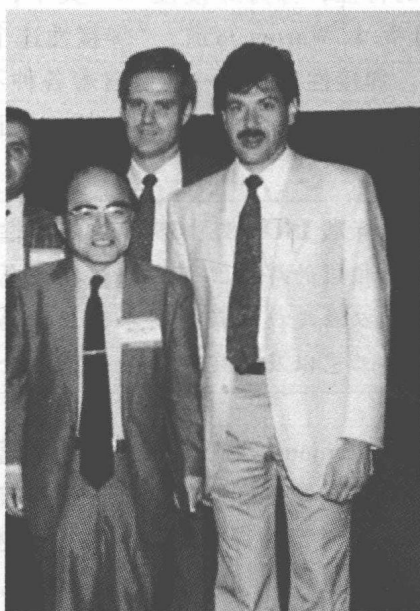


图 1.4 松田福久 (Fukuhisa Matsuda), 日本大阪大学 (Osaka University), 1988 年 (后排为 W. A. "Bud" Baeslack III)