

焊接手册

材料的焊接

中国机械工程学会焊接学会 编



第3版
修订本



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

焊 接 手 册

第 2 卷

材 料 的 焊 接

第 3 版 (修订本)

中国机械工程学会焊接学会 编



机 械 工 业 出 版 社

《焊接手册》是由中国机械工程学会焊接学会在全国范围内组织专家编著的一部综合性专业工具书，是学会为生产服务的具体体现。对本手册内容的不断充实、完善是学会的长期工作任务。此次的修订本是在第3版的基础上，依然保持内容选材广泛、突出手册的实践性、准确性、可靠性等特点；采纳近几年国内外焊接生产技术飞速发展的成果，新颁布的国内外标准。全套手册共计3卷（焊接方法及设备、材料的焊接、焊接结构），本书为其中的第2卷。

本卷共5篇23章，主要内容包括：材料焊接性基础、铁与钢、有色金属、异种材料、新型材料的焊接。在内容上力求实用，在表达方式上力求精练、形象。按生产的需要提供母材性能及焊接特点、焊接材料、焊接工艺、缺欠及防治，特别强调给出并分析生产实例，使手册更为实用。

本手册的读者对象是以各个工业部门中从事焊接生产的工程技术人员为主；同时这部手册对于焊接科研、设计和教学人员也是一部解决实际问题时必备的工具书。

图书在版编目(CIP)数据

焊接手册. 第2卷, 材料的焊接/中国机械工程学会焊接学会编. —3版(修订本). —北京: 机械工业出版社, 2013.12
ISBN 978-7-111-46289-7

I. ①焊… II. ①中… III. ①焊接-技术手册 IV. ①TG4-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第061616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: 何月秋 责任编辑: 何月秋 吕德齐 版式设计: 霍永明
责任校对: 刘怡丹 刘惠文 封面设计: 马精明 责任印制: 刘 岚
北京圣夫亚美印刷有限公司印刷
2014年10月第3版第1次印刷
184mm×260mm·70.5印张·2插页·2398千字
0001—3000册
标准书号: ISBN 978-7-111-46289-7
定价: 198.00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

社服务中心 : (010)88361066 教材网 : <http://www.cmpedu.com>

销售一部 : (010)68326294 机工官网 : <http://www.cmpbook.com>

销售二部 : (010)88379649 机工官博 : <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010)88379203 封面无防伪标均为盗版

策划编辑电话: (010)88379732

中国机械工程学会焊接学会 《焊接手册》第3版编委会

主任 陈 强

副主任 吴毅雄 邹增大 史耀武 王麟书

顾问 潘际盛 关 桥 徐滨士 林尚扬 吴 林 陈剑虹
单 平 田锡唐 陈丙森 宋天虎

委员 (按汉语拼音排序)

陈善本 陈祝年 成炳煌 都 东 杜则裕 方洪渊

冯吉才 高洪明 李晓延 刘金合 陆 皓 孙慧波

田志凌 吴爱萍 殷树言 赵海燕

秘书组 李晓延 王新洪 蔡 艳 黄彩艳

《焊接手册》第2卷第3版（修订本）编审者名单

主 编

邹增大 山东大学 教授

副主编

（按分管篇排序）

杜则裕

天津大学
教授

田志凌

北京钢铁研究总院
教授级高级工程师

冯吉才

哈尔滨工业大学
教授

吴爱萍

清华大学
教授

作 者 审 者

（按汉语拼音排序）

陈裕川

上海市焊接协会
高级工程师

杜 兵

哈尔滨焊接研究所
教授级高级工程师

韩怀月

北京钢铁研究总院
教授级高级工程师

何景山

哈尔滨工业大学
教授

何 鹏

哈尔滨工业大学
副教授

贺定勇

北京工业大学
教授

蒋建敏

北京工业大学
教授级高级工程师

康 慧

北京航空航天大学
教授

李卓然

哈尔滨工业大学
副教授

刘效方

北京航空材料研究院
研究员

毛 唯

北京航空材料研究院
研究员

蒙大桥

中国工程物理研究院
研究员

牛济泰

哈尔滨工业大学
教授

彭 云

北京钢铁研究总院
教授级高级工程师

屈朝霞

宝山钢铁股份有限公司
教授级高级工程师

任振安

吉林大学
教授

史春元

大连交通大学
教授

孙大千

吉林大学
教授

王新洪

山东大学
教授

武传松

山东大学
教授

杨德新

大连交通大学
教授

张汉谦

宝山钢铁股份有限公司
教授

张友寿

中国工程物理研究院
研究员

王昱成

哈尔滨焊接研究所
教授级高级工程师

熊第京

北京工业大学
教授

于启湛

大连交通大学
教授

张丽霞

哈尔滨工业大学
副教授

邹 勇

山东大学
教授

王者昌

中国科学院金属研究所
研究员

闫久春

哈尔滨工业大学
教授

张秉刚

哈尔滨工业大学
副教授

张显辉

中冶宝钢技术服务有限公司
教授级高级工程师

《焊接手册》第2卷第3版编审者名单

主 编

邹增大 山东大学 教授

副主编

(按分管篇排序)

杜则裕

天津大学
教授

田志凌

钢铁研究总院
教授级高级工程师

成炳煌

哈尔滨焊接研究所
教授级高级工程师

冯吉才

哈尔滨工业大学
教授

吴爱萍

清华大学
教授

作 者 审 者

(按汉语拼音排序)

陈裕川

上海市焊接协会
高级工程师

杜 兵

哈尔滨焊接研究所
教授级高级工程师

韩怀月

北京钢铁研究总院
教授级高级工程师

何景山

哈尔滨工业大学
副教授

何 鹏

哈尔滨工业大学
副教授

贺定勇

北京工业大学
副教授

蒋建敏

北京工业大学
教授级高级工程师

康 慧

北京航空航天大学
教授

李卓然

哈尔滨工业大学
副教授

刘效方

北京航空材料研究院
研究员

毛 唯

北京航空材料研究院
研究员

蒙大桥

中国工程物理研究院
研究员

牛济泰

哈尔滨工业大学
教授

潘永明

哈尔滨焊接研究所
教授级高级工程师

彭 云

北京钢铁研究总院
教授级高级工程师

屈朝霞

宝山钢铁股份有限公司
高级工程师

王新洪

山东大学
副教授

武传松

山东大学
教授

杨德新

大连交通大学
教授

张汉谦

宝山钢铁股份有限公司
教授

张友寿

中国工程物理研究院
研究员

史春元

大连交通大学
教授

王昱成

哈尔滨焊接研究所
教授级高级工程师

熊第京

北京工业大学
教授

于启湛

大连交通大学
教授

张丽霞

哈尔滨工业大学
讲师

周万盛

航天材料及工艺研究所
研究员

孙大千

吉林大学
教授

王者昌

中国科学院金属研究所
研究员

闫久春

哈尔滨工业大学
教授

张秉刚

哈尔滨工业大学
讲师

张显辉

哈尔滨焊接研究所
教授级高级工程师

周振丰

吉林大学
教授

《焊接手册》第2卷第2版编审者名单

主 编

陈剑虹 甘肃工业大学 教授

副主编

周昭伟
哈尔滨焊接研究所
教授级高级工程师

任家烈
清华大学
教授

张修智
哈尔滨工业大学
教授

作 者 审 者

(按汉语拼音排序)

包芳涵
清华大学
教授

陈晓风
中国科学院金属研究所
研究员

陈裕川
上海市焊接协会
副秘书长、高级工程师

成炳煌
哈尔滨焊接研究所
教授级高级工程师

邓 键
上海斯米克焊材有限公司
教授级高级工程师

杜 兵
哈尔滨焊接研究所
教授级高级工程师

董祖珏
哈尔滨焊接研究所
教授级高级工程师

冯吉才
哈尔滨工业大学
教授

胡永明
浙江大学高聚物工程公司
高级工程师

康 慧
北京航空航天大学
教授

刘效方
北京航空材料研究院
研究员

牛济泰
哈尔滨工业大学
教授

钱百年
中国科学院金属研究所
研究员

钱乙余
哈尔滨工业大学
教授

孙大千
吉林工业大学
教授

施雨湘
武汉大学动力与机械学院材料工程系
教授

谭长瑛
哈尔滨焊接研究所
教授级高级工程师

王昱成
哈尔滨焊接研究所
高级工程师

王 铤

上海交通大学
教授

王者昌

中国科学院金属研究所
研究员

武传松

山东大学材料连接技术研究所
教授

熊第京

北京工业大学材料学院
教授

益小苏

北京航空材料研究院
教授

张显辉

哈尔滨焊接研究所
教授级高级工程师

张修智

哈尔滨工业大学
教授

章应霖

武汉水利电力大学
教授

张友寿

中国工程物理研究院
副研究员

张文钺

天津大学材料学院
教授

周万盛

航天材料及工艺研究所
研究员

周 宣

华中科技大学
副教授

周振丰

吉林工业大学
教授

《焊接手册》第2卷第1版编审者名单

主 编

斯重遥 中国科学院金属研究所 研究员

副主编

周振丰 吉林工业大学 教授

钱百年 中国科学院金属研究所 副研究员

作 者 审 者

(按汉语拼音排序)

包芳涵

清华大学
教授

陈伯鑫

清华大学
教授

陈沛生

机电部第12研究所
高级工程师

陈晓风

中国科学院金属研究所
研究员

陈裕川

机电部哈尔滨锅炉厂
高级工程师

陈忠孝

大连铁道学院
教授

段世驹

航空航天部621研究所
研究员级高级工程师

郝世海

中国有色新金属公司
高级工程师

何康生

核工业部二院
高级工程师

黄文哲

机电部哈尔滨焊接研究所
教授级高级工程师

金恒昀

劳动人事部锅炉压力容器检测中心
高级工程师

刘云平

机电部第12研究所
高级工程师

刘世胄

广州有色金属研究院
教授级高级工程师

彭高峨

重庆大学
教授

彭日辉

装甲兵工程学院
教授

钱乙余

哈尔滨工业大学
教授

任家烈

清华大学
教授

谭长瑛

机电部哈尔滨焊接研究所
教授级高级工程师

王 钹
上海交通大学
教授

王者昌
中国科学院金属研究所
副研究员

信英华
吉林工业大学
副教授

益小苏
浙江大学
教授

于尔靖
中国科学院金属研究所
研究员

雅文萃
航天材料及工艺研究所
高级工程师

郑恩贵
大连铁道学院
教授

郑笔康
中国科学院金属研究所
副研究员

张文钺
天津大学
教授

张修智
哈尔滨工业大学
教授

张志明
哈尔滨工业大学
教授

周昭伟
机电部哈尔滨焊接研究所
教授级高级工程师

修订本出版说明

《焊接手册》是由中国机械工程学会焊接学会组织国内两百余名焊接界专家学者编写的一部综合性大型专业工具书。全套手册共3卷700多万字。该手册自1992年出版以来，历经3次修订再版，凝聚了几代焊接人的集体智慧和丰硕成果，成为了焊接学会当之无愧的经典传承著作。长期以来，她承载着传承、指导和培育一代代中国焊接科技工作者的使命和责任，并成为了焊接行业的权威出版物和重要工具书。

《焊接手册》第3版于2008年1月出版，至今已有5年多了，这期间出现了一些新材料、新技术、新设备、新标准，广大读者也陆续提出了一些宝贵意见，给予了热情的鼓励和帮助。为了保持《焊接手册》的先进性和权威性，满足读者的需求，焊接学会和机械工业出版社商定出版《焊接手册》第3版修订本，以便及时反映焊接技术新成果，并更正手册中的不当之处。鉴于总体上焊接技术没有大的变化，本次修订基本保持了第3版的章节结构。在广大读者所提宝贵意见的基础上，焊接学会组织各章作者对手册内容，包括文字、技术、数据、符号、单位、图、表等进行了全面审读修订。在修订过程中，全面贯彻了现行的最新技术标准，将手册中相应的名词术语、引用内容、图表和数据按新标准进行了改写；对陈旧、淘汰的技术内容进行删改，增补了相关焊接新技术内容。

最后，向对手册修订提出宝贵意见的广大读者表示衷心的感谢！

《焊接手册》第3版序

继1992年初版、2001年2版之后，很高兴《焊接手册》第3版以崭新的面貌与广大读者见面了。

《焊接手册》是新中国成立以来中国机械工程学会焊接学会组织编写的第一部综合性大型骨干工具书。书中涵盖了焊接理论基础、焊接方法与设备、焊接自动化、各种材料的焊接、焊接结构的设计、生产、检验、安全评定、劳动安全与卫生等各个领域，为广大焊接生产工程技术人员以及从事焊接科研、设计和教学人员提供了必要的参考，为推动我国焊接事业的进步起到了不可忽视的作用。

随着时代的发展、知识的更新以及焊接技术的不断进步，对《焊接手册》（第2版）进行查缺补漏，完善焊接知识体系与内容，是时代赋予学会的重要任务，亦是广大焊接专家、学者刻不容缓的社会责任。在这样的社会背景下，在广大焊接同仁的大力支持下，《焊接手册》第3版问世了。

新版《焊接手册》沿袭前两版风格，仍分3卷编写，依次为：焊接方法及设备、材料的焊接、焊接结构；在内容上继承了前版布局科学、内容翔实、数据可靠、图文并茂、生动活泼等特点，又增加了国内外近年来焊接理论基础、焊接方法与设备、焊接材料、焊接结构等领域的最新发展情况。相信《焊接手册》第3版能够满足广大焊接工作者日常查询、参考的需要，成为广大焊接工作者的良师益友。

来自清华大学、哈尔滨工业大学、山东大学、兰州理工大学、上海交通大学、西安交通大学、天津大学、北京工业大学、装甲兵工程学院、南京航空航天大学、北京航空航天大学、吉林大学、航空制造工程研究所、铁道部科学研究院、北京钢铁研究总院、哈尔滨焊接研究所、哈尔滨焊接技术培训中心、中科院金属研究所、中国工程物理研究院、宝山钢铁股份有限公司、济南第二机床厂、哈尔滨锅炉厂、南车集团四方机车车辆股份有限公司、黑龙江省齐齐哈尔铁路车辆集团有限公司、上海江南造船厂、东方汽轮机厂、东方电机股份有限公司、大连船用柴油机厂、山推工程机械股份有限公司、上海大众汽车有限公司、上海航天设备制造总厂、北车集团大同电力机车有限责任公司等国内高等院校、科研院所及企、事业单位的两百余位专家、学者参与了《焊接手册》第3版的编写与审校工作。在此，本人代表焊接学会向各位作者的辛勤付出表示衷心的感谢！

本书的编纂得到了中国科学院潘际銮院士、中国工程院关桥院士、林尚扬院士、徐滨士院士、哈尔滨工业大学吴林教授、兰州理工大学陈剑虹教授、清华大学陈丙森教授、中国机械工程学会宋天虎研究员的关怀与指导；焊接学会第七届编辑出版委员会主任、本手册第1卷主编吴毅雄教授、第2卷主编邹增大教授、第3卷主编史耀武教授以及编委会的各位成员、各章的编、审者为本书的编纂耗费了大量心血，在此一并表示真诚的谢意！

机械工业出版社多年来一直支持学会焊接系列书籍的出版，在此表示深深的感谢！

本手册涉及的内容广泛、参与编撰的人员队伍庞大，编写过程中难免出现差错，希望广大读者批评指正。

中国机械工程学会
焊接学会理事长



《焊接手册》第2卷第3版前言

在中国机械工程学会焊接学会的组织领导和机械工业出版社的支持协助下，《焊接手册》第2卷材料的焊接第3版与广大读者见面了。

本次修订的指导思想是在第1版、第2版的基础上，尽量反映进入21世纪后，材料的焊接技术的新发展、新成果及材料焊接的新标准，为更好地指导生产实践提供材料、工艺、技术和相关资料。本卷以第2版为基础，在保留了原手册的框架和优秀内容的基础上进行了修订，总体结构仍为5篇23章，第4篇由原异种材料的焊接改为难熔材料及异种金属的焊接。本卷在修订内容上强调了实践性和先进性，特别是编入了新颁布的国内外标准和材料焊接领域相应的新技术。全卷修订约为第2版内容的1/3。

本卷的修订工作邀请了近40位作者和审者，他们都是国内材料焊接界具有很高的理论水平和丰富工程实践经验的教授、高级工程师和专家。多数编审者肩负繁忙的本职工作，利用业余时间做修订工作；部分已离退休的老先生仍发挥余热，克服种种困难、认真负责、无私奉献，为本卷《焊接手册》的修订付出了辛勤劳动。五位副主编：杜则裕教授、田志凌教授级高级工程师、成炳煌教授级高级工程师、冯吉才教授、吴爱萍教授除了参加具体章节的编写之外，还分别为本卷第1、2、3、4、5篇的组织协调工作付出了辛勤劳动，在此表示谢意。

《焊接手册》第2卷第3版的修订工作是在第1版和第2版作者的劳动成果的基础上进行的。由于年事已高等原因，第2卷第1版和第2版的作者已近2/3不再担任本卷修订工作，他们为本卷的编写和我国焊接事业做出过突出贡献，我们特向本卷第1版主编斯重遥研究员、副主编周振丰教授、钱百年研究员及第2版主编陈剑虹教授、副主编周昭伟教授级高级工程师、任家烈教授、张修智教授及各位编审者表示诚挚的敬意和感谢。

在此也对机械工业出版社相关人员认真负责的工作表示致谢。

由于我们的水平和种种主客观原因，本卷第3版一定存在许多不足之处，恳请广大读者提出批评建议，使下一版《焊接手册》的修订更加完善。

主编

邵增夫

目 录

修订本出版说明

《焊接手册》第3版序

《焊接手册》第2卷第3版前言

第1篇 材料的焊接性基础

第1章 焊接热过程	1	2.2.3 焊缝金属的显微组织与性能	61
1.1 焊接热过程的特点	1	2.2.4 焊接熔合区及其特性	69
1.2 焊接热源	1	参考文献	71
1.2.1 焊接热源的种类及其特点	1	第3章 焊接热影响区组织及性能	73
1.2.2 焊接热效率	2	3.1 概述	73
1.2.3 焊件上的热量分布模式	3	3.1.1 焊接热影响区的形成	73
1.3 焊接温度场	6	3.1.2 影响焊接热影响区的主要因素	73
1.3.1 焊接传热的基本定律	6	3.2 固态无相变材料的焊接热影响区组织和性能特点	73
1.3.2 焊接热传导问题的数学描述	6	3.3 固态有相变材料的焊接热影响区组织和性能特点	75
1.3.3 典型的焊接温度场	8	3.3.1 有同素异构转变的纯金属和单相合金的焊接热影响区组织和性能特点	76
1.3.4 影响焊接温度场的主要因素	12	3.3.2 有同素异构转变的多相合金的焊接热影响区组织和性能特点	77
1.4 焊接热循环	14	3.3.3 无同素异构转变的多相合金的焊接热影响区组织和性能特点	92
1.4.1 焊接热循环的主要参数	15	3.4 异种材料焊接时热影响区的组织和性能特点	96
1.4.2 多层焊接热循环的特点	20	参考文献	99
1.4.3 脉冲焊接热循环的特点	22	第4章 焊接缺欠	100
1.5 焊接热传导的数值模拟	23	4.1 概述	100
1.5.1 数值模拟的基本概念	23	4.1.1 焊接缺欠与焊接缺陷的定义	100
1.5.2 焊接热传导的有限差分计算	23	4.1.2 焊接缺欠的分类	100
1.5.3 焊接热传导的有限单元法计算	23	4.2 焊缝金属中的偏析和夹杂物	100
1.6 焊接熔池形态的数值模拟	26	4.2.1 焊缝中的偏析	100
1.6.1 焊接熔池中的流体流动	26	4.2.2 焊缝中的夹杂物	101
1.6.2 焊接熔池形态的控制方程组	27	4.3 焊缝中的气孔	101
1.6.3 熔池流体流动对焊接质量的影响	28	4.3.1 焊缝中气孔的分类	101
参考文献	29	4.3.2 焊缝中气孔形成的机理	102
第2章 焊接冶金	31	4.3.3 影响焊缝形成气孔的因素	103
2.1 焊接化学冶金	31	4.3.4 防止焊缝形成气孔的措施	104
2.1.1 焊接化学冶金的特殊性	31	4.4 焊接裂纹	106
2.1.2 焊接区内的气体和焊接熔渣	33	4.4.1 焊接裂纹的分类	106
2.1.3 焊接区内金属、气体与熔渣三相间的相互作用	39		
2.1.4 焊缝金属的合金化及其成分控制	48		
2.2 焊接熔池的凝固及焊缝相变组织	52		
2.2.1 焊接熔池凝固过程的特点	52		
2.2.2 焊缝金属的结晶形态	53		

4.4.2 焊接热裂纹	108	5.3.1 工艺焊接性的间接评定法	132
4.4.3 焊接冷裂纹	114	5.3.2 工艺焊接性的直接试验法	137
4.4.4 层状撕裂	120	5.4 使用焊接性试验方法	148
4.4.5 再热裂纹	123	5.4.1 焊接接头力学性能试验	148
4.4.6 应力腐蚀裂纹	126	5.4.2 焊接接头抗脆断性能试验	149
参考文献	128	5.4.3 焊接接头疲劳与动载性能试验	150
第5章 金属焊接性及其试验方法	130	5.4.4 焊接接头耐蚀性试验	150
5.1 金属焊接性	130	5.4.5 焊接接头高温性能试验	153
5.1.1 金属焊接性定义	130	5.5 焊接热、应力、应变模拟试验方法	154
5.1.2 金属焊接性的影响因素	131	5.5.1 焊接热、应力、应变模拟试验	
5.2 金属焊接性试验	131	原理	154
5.2.1 金属焊接性试验方法与分类	131	5.5.2 焊接热、应力、应变模拟试验	
5.2.2 工艺焊接性试验	131	装置	154
5.2.3 使用焊接性试验	132	参考文献	155
5.3 工艺焊接性试验方法	132		

第2篇 铁与钢的焊接

第6章 碳钢的焊接	157	6.7.1 高碳钢焊接性分析	203
6.1 碳钢的种类、标准与性能	157	6.7.2 高碳钢焊接工艺要点	203
6.1.1 概述	157	6.7.3 典型高碳钢的焊接	203
6.1.2 碳素结构钢	157	参考文献	204
6.1.3 优质碳素结构钢	157	第7章 低合金钢的焊接	205
6.1.4 专用碳素结构钢	162	7.1 低合金钢的种类、标准与性能	205
6.1.5 铸造碳钢	174	7.1.1 概述	205
6.2 碳钢用焊接材料	175	7.1.2 分类	205
6.2.1 焊条	175	7.2 低合金钢用焊接材料	205
6.2.2 气体保护电弧焊用碳钢实心焊丝	185	7.2.1 焊条	205
6.2.3 碳钢用药芯焊丝	186	7.2.2 气体保护电弧焊用实心焊丝	213
6.2.4 埋弧焊用碳钢焊丝和焊剂	191	7.2.3 低合金钢用药芯焊丝	216
6.3 碳钢焊接性的影响因素	196	7.2.4 焊接用保护气体	223
6.3.1 碳当量	196	7.2.5 埋弧焊和电渣焊用焊丝和焊剂的	
6.3.2 显微组织	197	配合	224
6.3.3 拘束度和氢	197	7.2.6 低合金钢用焊接材料的选用原则	229
6.3.4 碳钢中杂质元素的影响	197	7.3 低合金高强度钢的焊接	229
6.3.5 碳钢交货状态的影响	198	7.3.1 低合金高强度钢的种类、用途、	
6.3.6 匹配焊接材料的影响	198	标准和性能	229
6.4 碳钢常用焊接方法和焊接工艺	199	7.3.2 低合金高强度钢的焊接性	234
6.5 低碳钢的焊接	199	7.3.3 低合金高强度钢的焊接工艺	241
6.5.1 低碳钢焊接性分析	199	7.3.4 典型钢种的焊接及实例	246
6.5.2 低碳钢焊接工艺要点	200	7.4 调质钢的焊接	248
6.6 中碳钢的焊接	202	7.4.1 调质钢的种类、用途、标准和	
6.6.1 中碳钢的焊接性分析	202	性能	248
6.6.2 中碳钢的焊接工艺要点	202	7.4.2 调质钢的焊接性	255
6.6.3 典型中碳钢的焊接	203	7.4.3 调质钢的焊接工艺	258
6.7 高碳钢的焊接	203	7.4.4 典型钢种的焊接及实例	264