

Welding and Adhesive Bonding
of Aerospace Materials

航空航天材料的
焊接与胶接

主编 牛济泰

参编 孟令辉 张杰 何鹏



国防工业出版社

National Defense Industry Press

航空航天材料的 焊接与胶接

Welding and Adhesive Bonding of Aerospace Materials

主编 牛济泰

参编 孟令辉 张杰 何鹏

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

航空航天材料的焊接与胶接 / 牛济泰主编. —北京:
国防工业出版社, 2012. 1

ISBN 978 - 7 - 118 - 07732 - 2

I. ①航... II. ①牛... III. ①航空材料 - 焊接
②航空材料 - 胶接③航天材料 - 焊接④航天材料 - 胶接
IV. ①V261.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 234661 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 960 1/16 印张 21½ 字数 378 千字

2012 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 78.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

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 第五届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 张又栋

秘 书 长 张又栋

副 秘 书 长 彭华良 蔡 锺

委 员 于景元 王小谟 甘茂治 刘世参 杨星豪
(按姓氏笔画排序)

李德毅 吴有生 何新贵 佟玉民 宋家树

张立同 张鸿元 陈冀胜 周一宇 赵凤起

侯正明 常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民

舒长胜

序

航空航天科技是集多种学科和技术为一体的综合性高新技术,而材料及其加工工艺是所有高新技术的物质基础和先导。世界进入 21 世纪以来,面对各国在空天领域的激烈竞争,我国在航空航天领域实施的重大工程或武器装备,对新材料和新工艺提出了更高、更苛刻的要求。

任何新材料只有被加工成结构件才真正具有使用价值,而焊接与胶接是形成结构件最重要的工艺方法之一,有时甚至是唯一的加工手段。由于航空航天材料大多包含复杂的成分与组织,导致其焊接性较差,难以形成性能优良的接头,往往成为航空航天器结构制造的障碍或“瓶颈”技术难题,因此,加强航空航天焊接技术的研究受到工程界和材料界普遍的关心和重视。

本书作者都是从事多年航空航天材料焊接或胶接教学与科研的工作者,理论功底较深厚,并具有一定的实际生产经验。本书从理论与实践的结合上,较系统地阐述了常用航空航天结构材料焊接与胶接的基本理论和实用工艺,扼要而深入地讲述了其焊接性、焊接工艺特点及其焊接产品在航空航天领域的应用实例,同时展望了航空航天领域焊接技术的发展前景,信息丰富,图文并茂,可读性强,内容具有新颖性、科学性和实用性。相信本书的出版,会受到航空航天部门和材料界的广大科技工作者、工程技术人员以及高校师生的欢迎。

前中国焊接学会理事长

现代焊接生产技术国家重点实验室主任



2011 年 10 月

前 言

发展航空航天事业,材料是重要的物质基础,工艺是高新技术的主体。近年来,伴随军备和高科技的竞争,新型武器装备的涌现,各种新型航空航天材料应运而生,但其二次加工技术却显得相对滞后。任何先进材料只有被加工成零部件才真正具有使用价值,而焊接和胶接往往是形成结构件最重要有时甚至是唯一的加工手段。由于航空航天领域的新材料都具有独特的化学成分、组织结构和性能,而这种特性多数是通过极端条件,综合多学科最新成就,利用高技术获得的,因此其焊接性通常都比较差。连接技术跟不上,往往成为新材料在航空航天领域推广应用的重要障碍,有时甚至是瓶颈难题。因此,国家有关部门在制订“十二五”工艺规划时,都把开发航空航天新材料的连接技术提到十分显著的高度。

2002年,国防工业出版社出版了由国内材料界著名院士、专家编著的《航空航天材料》一书,这是国内首次出现的综合阐述航空航天新材料的专著,受到了广大读者的欢迎。同时,广大科技工作者很希望继续出版与之配套的有关航空航天材料二次加工技术的书籍,特别是关于连接新技术方面的专著。

鉴于此,本书作者在国防科技图书出版基金的资助下,依据多年来在新材料连接方面所承担的国防科研课题、国家自然科学基金课题以及“863”、“973”等项目的研究成果与工程实践基础上,结合近几年与国外航空航天技术先进国家的交流以及出国考察中收集到的资料,并在航空材料研究院、航天材料工艺研究所等单位同行们的大力支持与配合下,承担了编写此书的重任。

本书共分10章,由牛济泰教授主持编著并统稿。其中第5章由何鹏教授执笔,第6章由牛济泰和闫久春教授共同执笔,第7章由张杰研究员执笔,第8章由孟令辉教授执笔,其余各章由牛济泰教授执笔。原航空二集团石家庄飞机制造厂工程师陈永同志参与了第2章的部分编写工作,航天科技集团航天材料工艺研究所刘志华研究员为第3章提供了部分资料。

本书在叙述目前常用的及有潜在应用价值的航空航天新材料焊接和胶接技术的基本理论与最新工艺的基础上,加大了对复合材料、金属间化合物、陶瓷材

料及有机非金属材料的比重。内容涵盖航空航天材料连接的主要前沿领域,全面系统地介绍近几年来国内外出现的新的焊接和胶接技术,特别是针对国防领域航空航天产品制造而出现的材料连接新方法与新工艺。本书力求达到内容的新颖性、实用性及国防针对性,并且特意增设了空间焊接技术一章。由于本书涉及许多高新技术和学科前沿,加之作者水平所限,书中不足甚至错误之处在所难免,敬请广大读者批评指正。对本书参考文献中被引用资料的作者们表示衷心的感谢。

本书作者感谢中国机械工程学会常务副理事长、前机械工业部哈尔滨焊接研究所所长、中国焊接终身成就奖获得者宋天虎研究员,以及前中国焊接学会理事长、现代焊接生产技术国家重点实验室主任、中国焊接终身成就奖获得者、国务院学位委员会委员及学科评议组成员吴林教授对本书的关心、指导和支持。

本书写作历时三年,特别感谢国防科技图书出版基金评审委员会的大力支持,以及唐应恒、程邦仁等责任编辑的辛勤工作。但愿本书的出版,能为我国航空航天事业的发展做出一点微薄的贡献。

牛济泰

2011年3月于哈尔滨工业大学

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 航空航天环境及其对材料相容性的要求	1
1.1.1 航空环境	1
1.1.2 航天环境	2
1.1.3 航空航天环境对材料相容性的要求	3
1.2 航空航天常用结构材料	5
1.3 航空航天连接技术的发展概况	5
1.3.1 焊接技术的发展概况	6
1.3.2 胶接技术发展概况	7
参考文献	8
第 2 章 超高强钢的焊接	10
2.1 低合金超高强钢的焊接性	10
2.2 中合金、高合金超高强钢的焊接性	12
2.3 超高强钢焊接工艺要点	13
参考文献	15
第 3 章 轻合金的焊接	16
3.1 铝合金的焊接	16
3.1.1 高强铝合金的焊接性分析	16
3.1.2 铝合金的焊接工艺要点	24
3.1.3 铝合金的某些先进焊接技术	39
3.2 镁合金的焊接	46
3.2.1 镁合金的焊接性分析	46
3.2.2 镁合金的焊接工艺	49
3.3 钛合金的焊接	54

3.3.1 钛合金的焊接性分析	54
3.3.2 钛合金的焊接工艺	58
3.4 钹合金的焊接	63
3.4.1 钹合金的焊接性分析	63
3.4.2 钹合金的焊接工艺	65
参考文献	68
第4章 不锈钢、高合金耐热钢、高温合金及难熔金属的焊接	69
4.1 不锈钢及高合金耐热钢的焊接	69
4.1.1 Cr-Ni 奥氏体钢的焊接性分析	70
4.1.2 不锈钢及高合金耐热钢的焊接工艺要点	79
4.2 高温合金的焊接	81
4.2.1 高温合金的焊接性	82
4.2.2 高温合金的焊接工艺	83
4.3 难熔金属及其合金的焊接	95
4.3.1 钨及钨合金的焊接	95
4.3.2 其他难熔金属的焊接	96
参考文献	97
第5章 金属间化合物的焊接	98
5.1 金属间化合物的类型和特征	98
5.1.1 金属间化合物概述	98
5.1.2 Ni-Al 系金属间化合物	99
5.1.3 Ti-Al 系金属间化合物	100
5.1.4 Fe-Al 系金属间化合物	101
5.2 Ni-Al 系金属间化合物的连接	102
5.2.1 Ni_3Al 金属间化合物的连接	102
5.2.2 NiAl 金属间化合物的连接	107
5.3 Ti-Al 系金属间化合物的连接	109
5.3.1 Ti_3Al 金属间化合物的连接	109
5.3.2 TiAl 金属间化合物的连接	113
5.4 Fe-Al 系金属间化合物的连接	149
参考文献	152

第6章 金属基复合材料的焊接	157
6.1 金属基复合材料的焊接性分析	157
6.2 金属基复合材料的焊接工艺	158
6.2.1 金属基复合材料的钎焊	158
6.2.2 金属基复合材料的扩散焊	164
6.2.3 金属基复合材料的电阻焊	167
6.2.4 金属基复合材料的摩擦焊	169
6.2.5 金属基复合材料的熔化焊	170
6.3 在航天产品中金属基复合材料焊接实例	178
参考文献	179
第7章 陶瓷及其与金属的连接	182
7.1 陶瓷连接技术的发展	183
7.2 陶瓷连接方法述评	184
7.2.1 机械连接、有机和无机粘接技术	184
7.2.2 电场辅助阳极连接	186
7.2.3 摩擦连接	188
7.2.4 微波连接	189
7.2.5 使用功能梯度材料连接	190
7.2.6 陶瓷先驱体反应连接	193
7.2.7 部分瞬时液相连接方法	196
7.2.8 混合氧化物玻璃连接	202
7.2.9 扩散连接	204
7.2.10 钎焊	215
7.3 陶瓷连接件在航空航天及国防工业中的应用	228
参考文献	233
第8章 航空航天材料的胶接	239
8.1 概述	239
8.1.1 胶黏剂的选择原则	240
8.1.2 胶黏剂品种介绍	241
8.1.3 航空航天材料胶接的特点	242
8.2 无机非金属材料的胶接	244

8.2.1 碳材料的胶接	244
8.2.2 陶瓷材料的胶接	249
8.3 复合材料的胶接	253
8.3.1 复合材料胶接概述	253
8.3.2 飞机复合材料的胶接修理	257
8.3.3 复合材料补片胶接修理技术	262
8.3.4 复合材料胶接修理新技术及相关设备	267
8.3.5 玻璃钢材料的胶接	269
8.4 金属材料的胶接	270
8.4.1 钛合金的胶接	270
8.4.2 铝合金的胶接	274
8.4.3 钢铁材料的胶接	282
8.4.4 金属与陶瓷的胶接	284
8.4.5 金属与橡胶的胶接	285
8.5 其他材料及特殊构件的胶接	288
8.5.1 火药与推进剂的胶接	288
8.5.2 半导体芯片的胶接	291
8.5.3 铁氧体磁芯的胶接	291
8.5.4 低温超导磁体的胶接	292
8.5.5 光学仪器结构件的胶接	294
8.5.6 胶接技术在炮射导弹上的应用	294
8.5.7 聚四氟乙烯材料的胶接	295
参考文献	296

第9章 航空航天异种材料的焊接 300

9.1 异种材料焊接概述	300
9.1.1 异种材料焊接时存在的问题	300
9.1.2 获得优质异种材料焊接接头应采取的措施	301
9.2 铝与钛的焊接	302
9.2.1 铝与钛的焊接特点及焊接时的主要问题	302
9.2.2 铝与钛的焊接工艺	303
9.3 钢与铝的焊接	305
9.3.1 钢与铝的焊接特点及焊接时的主要问题	305
9.3.2 钢与铝的焊接工艺	306

9.4 钢与钛的焊接	308
9.4.1 钢与钛的焊接特点及焊接时的主要问题	308
9.4.2 钢与钛的焊接工艺	308
9.5 金属与陶瓷的焊接	311
参考文献	313
第 10 章 空间焊接技术	314
10.1 空间焊接技术的发展概况	314
10.2 近地空间环境及其对焊接技术的要求	317
10.3 空间焊接方法	321
参考文献	325

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Aerospace Environment and Its Requirements on Materials	
Consistency	1
1.1.1 Aero environment	1
1.1.2 Space environment	2
1.1.3 Requirements on materials consistency in aerospace environment	3
1.2 Structure Materials Used in Aerospace Industry	5
1.3 Development of Joining Technologies in Aerospace Industry	5
1.3.1 Development of welding technologies	6
1.3.2 Development of adhesion technologies	7
References	8
Chapter 2 Welding of Ultrahigh – strength Steels	10
2.1 Weldability of Low Alloy Ultrahigh – strength Steels	10
2.2 Weldability of Medium and High Alloy Ultrahigh – strength Steels ...	12
2.3 Key Points of Welding Technologies of Ultrahigh – strength Steels ...	13
References	15
Chapter 3 Welding of Light Alloys	16
3.1 Welding of Aluminum Alloys	16
3.1.1 Weldability of high – strength aluminum alloys	16
3.1.2 Key points of welding technologies of aluminum alloys	24
3.1.3 Advanced welding technologies for aluminum alloys	39
3.2 Welding of Magnesium Alloys	46
3.2.1 Weldability of magnesium alloys	46

3.2.2	Welding technologies of magnesium alloys	49
3.3	Welding of Titanium Alloys	54
3.3.1	Weldability of titanium alloys	54
3.3.2	Welding technologies of titanium alloys	58
3.4	Welding of Beryllium Alloys	63
3.4.1	Weldability of beryllium alloys	63
3.4.2	Welding technologies of beryllium alloys	65
References		68
Chapter 4	Welding of Stainless Steels, High Alloy Heat – resistant Steels, SuperAlloy and Refractory Metals	69
4.1	Welding Stainless Steel and High Alloy Heat – resistant Steels	69
4.1.1	Weldability of Cr – Ni austenitic steels	70
4.1.2	Key points of welding technologies of stainless steels and high alloy heat – resistant steels	79
4.2	Welding of Superalloys	81
4.2.1	Weldability of superalloys	82
4.2.2	Welding technologies of superalloys	83
4.3	Welding of Refractory Metals and Alloys	95
4.3.1	Welding of niobium alloys	95
4.3.2	Welding of other refractory metals	96
References		97
Chapter 5	Joining of Intermetallic Compounds	98
5.1	Classification and Characteristic of Intermetallic Compounds	98
5.1.1	Introduction of intermetallic compounds	98
5.1.2	Ni – Al intermetallic compounds	99
5.1.3	Ti – Al intermetallic compounds	100
5.1.4	Fe – Al intermetallic compounds	101
5.2	Joining of Ni – Al Intermetallic Compounds	102
5.2.1	Joining of Ni ₃ Al intermetallic compounds	102
5.2.2	Joining of NiAl intermetallic compounds	107
5.3	Joining of Ti – Al Intermetallic Compounds	109
5.3.1	Joining of Ti ₃ Al intermetallic compounds	109

5.3.2	Joining of TiAl intermetallic compounds	113
5.4	Joining of Fe – Al Intermetallic Compounds	149
	References	152
Chapter 6	Welding of Metals Matrix Composites (MMC)	157
6.1	Analysis on Weldability of MMC	157
6.2	Welding Technologies of MMC	158
6.2.1	Brazing of MMC	158
6.2.2	Diffusion welding of MMC	164
6.2.3	Resistance welding of MMC	167
6.2.4	Friction welding of MMC	169
6.2.5	Fusion welding of MMC	170
6.3	Welding Examples of MMC in Aerospace Industry	178
	References	179
Chapter 7	Joining of Ceramics and Metals	182
7.1	Development of Joining Technologies of Ceramics	183
7.2	Joining Methods of Ceramics	184
7.2.1	Mechanical joining and adhesion	184
7.2.2	Electric field – assisted anodic bonding	186
7.2.3	Friction joining	188
7.2.4	Microwave joining	189
7.2.5	Joining with the aid of functional – gradient materials	190
7.2.6	Reaction – joining with ceramic forerunner	193
7.2.7	Part transient liquid phase diffusion bonding	196
7.2.8	Joining with oxide glasses	202
7.2.9	Diffusion bonding	204
7.2.10	Brazing	215
7.3	Application of Ceramic Joints in Aerospace	228
	References	233
Chapter 8	Adhesion of Aerospace Materials	239
8.1	Introduction	239
8.1.1	Criteria on Selection of Adhesives	240