

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目



先进焊接制造技术丛书

中国焊接学会 组编



先进连接方法

李志远 钱乙余 张九海 等编著



机械工业出版社
China Machine Press

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

先进焊接制造技术丛书

中国焊接学会 组编

先进连接方法

李志远 钱乙余 张九海等 编著



机械工业出版社

本书是由中国焊接学会组织编写的先进焊接制造技术丛书之一。本书反映了当代重要冶金连接技术的前沿及发展动向。全书主要介绍适应高新技术和新型材料发展需要的高能束焊接、固态连接技术和微电子技术所需的微连接技术；同时对传统焊接方法的新发展也作了简要的介绍。本书主要内容有：激光焊、电子束焊、扩散连接技术、摩擦焊接技术、微连接技术及传统焊接工艺的发展动态与进展。书中既阐述了主要连接技术的基本原理，也介绍了其实际应用。

本书可供从事焊接科研和生产的科技工程技术人员、大学以上焊接专业师生及相关领域的科技工作者阅读和参考。

图书在版编目（CIP）数据

先进连接方法：机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目 / 李志远等编著；中国焊接学会组编. —北京：机械工业出版社，2000.5

（先进焊接制造技术丛书）

ISBN 7-111-08067-X

I. 先… II. ①李… ②中… III. 焊接 IV. TG44

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2000）第 08714 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

责任编辑：何月秋 武江 封面设计：姚毅

责任印制：何全君

中国农业出版社印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2000 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

850mm×1168mm/32·10 印张·255 千字

0 001—4 000 册

定价：20.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
本社购书热线电话（010）68993821、68326677—2527

先进焊接制造技术丛书

编委会名单

顾问委员会成员

潘际奎 关 桥 徐滨士 林尚扬

斯重遥 田锡唐 周振丰

主 任 陈剑虹

副主任 邹增大 单 平 崔树森

委 员 王其隆 任家烈 史耀武 霍立兴

黄石生 李志远 汪建华 蒋力培

秘 书 康 龙 武 江

序

焊接作为制造业的基础工艺与技术，在 20 世纪为工业经济的发展作出了重要的贡献。在人类引以为自豪的各个领域，如航空航天、核能利用、电子信息、海洋钻探、高层建筑等，都利用了焊接技术的优秀成果。

在今天，焊接作为一种传统技术又面临着 21 世纪的挑战。一方面，材料作为 21 世纪的支柱已显示出五个方面的变化趋势，即从黑色金属向有色金属变化；从金属材料向非金属材料变化；从结构材料向功能材料变化；从多维材料向低维材料变化；从单一材料向复合材料变化。新材料的连接对焊接技术提出了更高的要求。

另一方面，先进制造技术的蓬勃发展，正从信息化、集成化、系统化、柔性化等几个方面对焊接技术的发展提出了越来越的高要求。

为了充分反映 20 世纪焊接技术的发展成果和 21 世纪对焊接技术提出的新的挑战，中国焊接学会组织了焊接行业最重要的 10 个领域中卓有成就的知名学者编写、出版了“先进焊接制造技术丛书”。同时邀请了焊接界德高望重的著名专家作为丛书编写顾问。

本丛书旨在全面介绍国内外先进焊接技术的发展现状和趋势，对我国焊接制造技术的发展起引导作用。

本丛书是高层次的普及型丛书，以知识性为主，深层次地介绍相关领域的高新技术内容和基本规律，面向广大的焊接工作者、研究人员、高等院校师生及相关领域专家。

本丛书的特点是突出“高、新”二字，有较宽的知识覆盖面，注意相关学科的渗透，有较高的收藏价值。

中国焊接学会在世纪之交以这套丛书奉献给广大的焊接工作

者，是对焊接界为祖国经济腾飞及 20 世纪焊接技术的发展所作贡献的回眸，也是焊接界对迎接 21 世纪新技术挑战的期盼。

原机械工业部技术发展基金委员会（97JA0401）及机械工业出版社对本丛书的编辑出版提供了经济支持，在此一并表示深切的感谢。

丛书编委会主任

陈 剑 虹

前 言

人类即将迈入 21 世纪，世界经济发展有一个突出的趋势，这就是知识经济化，科技进步在经济发展中越来越表现出强大的作用，高科技向现实生产力的转化越来越快，科技革命推动着世界经济的增长，这是从工业经济进入知识经济的主要标志。

知识经济的首要特征是创新。只有不断创新，才能生产出新颖的技术和富于独创性的知识产品。在知识经济的时代，不断涌现出新的知识产品。世界首富比尔·盖茨在短时间内个人资产达到 139 亿美元的奇迹，就是高智力开发软件知识产品而创造出来的。但是制造业也是绝不能忽视的。20 世纪 80 年代末期美国根据经济发展的竞争形势，对其制造业存在的问题进行深刻反省。为了增强其制造业的竞争力和促进国民经济的增长。首先提出了“先进制造技术计划”（AMT）和“制造技术中心计划”（MTC）。“先进制造技术”这一新名词一经提出，立即获得欧洲各国、日本、韩国等国家的响应，纷纷制定了各种发展计划，以支持先进制造技术的发展，使制造技术的发展达到了一个新的历史阶段。以电子信息、自动化、人工智能、新材料为核心的工程技术，正在不断创新，带动了先进制造技术的迅速发展。先进制造技术是创造社会财富的重要手段，是国家经济发展的主要技术支柱。

我国政府对先进制造技术的发展给予了高度重视。1995 年 5 月《中共中央国务院关于加速科技进步的决定》中提出：为提高国民经济增长的质量和效益，要重点开发、推广电子信息技术，先进制造技术，节能降耗技术，清洁生产和环保技术等共性技术。各有关部委也制定规划和采取有力措施推动先进制造技术。

先进连接技术是先进制造技术的重要组成部分。连接技术这一概念涉及相当广泛，包括冶金连接、机械连接、化学连接（胶接）等。冶金连接在连接技术中占主导地位，应用最广泛。本书

只对冶金连接中的部分最新发展动向进行介绍。连接技术在制造业中起着越来越重要的作用，并且在高新技术的推动下和市场不断提出需求的带动下向前发展。优质、高效、低耗、清洁、灵活生产是连接技术发展的方向，取得更高的技术经济效果是连接技术追求的目标。

先进连接技术的发展总是不断地从新科技的成果中获得新的起点。在 20 世纪初，将 19 世纪发现的电弧应用于焊接，产生了电弧焊，大大扩展了连接技术的应用领域。在造船、桥梁、汽车、化工机械、航空、航天工业，创造出了许多大型的焊接结构，使焊接成为一种重要的制造技术和材料科学的一个重要专业学科，开创了连接技术的崭新篇章。

20 世纪中期，物理学中有不少重大发现，新的高精密度热源电子束、等离子束、激光束相继问世，其功率密度达到 $10^5 \sim 10^{13} \text{W/cm}^2$ ，比电弧高出几个数量级。

高能密度束连接技术应运而生。真空电子束焊可以一次焊透 200mm 的金属。焊缝的深宽比可达 20~60。激光束具有可以在大气中进行焊接的优点，聚焦后的光斑只有 0.2~2mm，既可以深熔焊，又可以完成微型精密连接，焊接过程热输入小，结构变形小，接头质量好。高能束连接技术的初步应用，如航空发动机电子束焊接、汽车车身桥板的激光焊，立即创造出了明显的经济效益和社会效益，完全符合优质、高效、低耗、清洁、灵活生产的技术发展方向。

新材料的出现对焊接技术提出了新的课题，成为焊接技术发展的重要推动力。许多新材料，如耐热合金、钛合金、陶瓷等的连接。特别是异种材料之间的连接，采用通常的焊接方法已经无法完成，固态连接的优越性日益显现，扩散焊与摩擦焊已成为焊接界关注的热点之一。近年来，扩散焊中钛合金超塑成形扩散连接技术在飞机上钛合金蜂窝结构的成功运用，金属与陶瓷已经能够进行扩散连接，摩擦焊已在焊接发动机转子部件上得到认可，

线性摩擦焊、搅拌摩擦焊等新技术的应用，解决了某些用熔焊方法无法焊接的材料连接问题，固态连接是 21 世纪将有重大发展的连接技术。

新产品、新构件和新器件也对连接技术提出了新的要求，促使连接技术的创新，以适应产业发展的要求。近年来微电子器件突飞猛进地发展，于是微连接技术逐渐成为一门新兴的焊接技术，它并不是脱离传统连接技术之外的连接方法，而是利用原有的连接技术，如钎焊、热压焊加以改造和发展，以适应微小精细的微电子器件体积更小、信号引出端更多、大批量高自动化生产的要求。

传统的熔焊和压焊也在不断创新，生产实践发展往往要求对传统方法进行改进，长期在平焊位置施焊的等离子弧焊，在立焊位置进行施焊时，表现出它的优势，同时也出现了新问题，解决这些问题就创造出穿孔型等离子弧立焊的新焊接方法。CO₂ 气体保护焊的飞溅问题一直困扰着焊接工作者，多年的努力终于出现了低飞溅 CO₂ 气体保护焊。不久就会将普通使用的 CO₂ 气体保护焊机逐步淘汰。加活性助焊剂就使 TIG 焊的熔深有明显增加，区区的改进可带来良好的经济效益。汽车制造业中点焊已大规模地使用，但镀锌板用于车身建造给电阻点焊带来不少问题，电极修磨周期内焊点减少，电极寿命缩短。焊接工作者，从电极材料及点焊工艺分段设置等多方面解决了这一问题，逐步在汽车行业推广。

冶金连接技术日益创新，新的冶金连接方法层出不穷，本书中只能就主要的新型连接方法做一些简要的介绍，希望能对广大焊接工作者有些帮助。本书第 1 章由熊建钢、胡乾午、李志远编写；第 2 章由王亚军编写；第 3 章由张九海编写；第 4 章由杜随更编写；第 5 章由钱乙余编写；第 6 章由吕卫文、刘顺洪编写。全书由李志远主持编著，关桥审稿。在本书的编写过程中，张伟给予了很大的帮助，在此谨致谢意。由于编者水平有限，书中肯定会有不少缺点和错误，欢迎读者批评指正。



李志远 河北永年人，1960年毕业于原苏联乌拉尔工学院，现为华中理工大学材料科学与工程学院教授、博士生导师，全国焊接学会常务理事。主要研究方向：材料的激光加工与计算机模拟；新型焊接材料——药芯焊丝。

主持完成了三项国家和省自然科学基金项目；获湖北省科技进步三等奖一项；完成了发动机缸体激光淬火热处理生产线及汽车车桥焊缝自动超声波探伤机的研制等课题。已发表论文70余篇，先后参加了焊接手册等三部专著的编审工作。

目 录

序 前言

第 1 章 激光焊及其他激光加工方法	1
1.1 激光的产生与激光束	1
1.1.1 受激辐射及粒子集居数反转	1
1.1.2 激光的产生过程与激光特性	4
1.1.3 激光的模式	6
1.2 激光加工设备	8
1.2.1 激光器的分类与组成	8
1.2.2 YAG 激光器	9
1.2.3 CO ₂ 激光器	10
1.2.4 典型的激光加工设备	14
1.3 激光焊焊接工艺及应用	17
1.3.1 材料对激光的吸收	17
1.3.2 激光焊机理	21
1.3.3 材料激光焊的焊接性	27
1.3.4 激光焊焊接工艺及参数	33
1.3.5 典型材料的激光焊	46
1.3.6 激光焊在工业中的应用	52
1.4 激光焊焊接质量的实时监测与控制	57
1.4.1 测量信号	57
1.4.2 激光焊焊接缺陷的诊断方法	62
1.5 激光切割	64
1.5.1 激光切割的特点	65
1.5.2 激光切割方法及机理	66
1.5.3 激光切割的工艺参数及其对切割质量的影响	67

1.5.4 激光切割的应用	69
1.6 其他激光加工方法	70
1.6.1 激光表面处理技术	70
1.6.2 激光气相沉积	78
1.6.3 激光冲击波对材料的强化	79
1.6.4 激光切削	80
1.6.5 激光打孔	82
1.6.6 激光快速成形	85
参考文献	88
第2章 电子束焊及其他加工技术	91
2.1 概述	91
2.2 电子束焊的基本原理	92
2.2.1 电子束的产生	92
2.2.2 电子束束流特性的测定	93
2.2.3 电子束深熔焊机理	95
2.3 电子束焊的特点	99
2.4 电子束焊的焊接设备	99
2.4.1 电子枪	100
2.4.2 高压电源及控制系统	101
2.4.3 控制及调整系统	102
2.4.4 工作室及抽真空系统	102
2.4.5 工业应用的电子束焊机现状	103
2.5 电子束焊的焊接工艺	105
2.5.1 电子束焊的焊接参数	105
2.5.2 获得深熔焊的工艺方法	107
2.6 电子束焊的应用实例	108
2.6.1 大厚件的电子束焊	108
2.6.2 电子束焊在航空工业中的应用	111
2.6.3 电子束焊在电子和仪表工业中的应用	113

2.6.4	非真空电子束焊在汽车零件生产中的应用	118
2.7	电子束焊的焊接技术现状与发展前景	118
2.7.1	国外电子束焊的焊接技术现状与发展前景	118
2.7.2	我国电子束焊焊接技术的现状	121
2.7.3	电子束焊应用前景	123
2.8	其他电子束加工技术	124
2.8.1	电子束打孔	124
2.8.2	电子束表面改性	126
2.8.3	电子束物理气相沉积 (EB-PVD)	128
	参考文献	131
第 3 章	扩散连接技术	132
3.1	扩散连接的特点及原理	132
3.1.1	扩散连接的特点	132
3.1.2	扩散连接的原理	133
3.1.3	扩散连接的设备	135
3.2	扩散连接时材料间的相互作用	140
3.2.1	材料界面的吸附与活化作用	140
3.2.2	固体中的扩散	141
3.3	材料的扩散连接工艺	150
3.3.1	耐热合金的扩散连接	150
3.3.2	铝合金与其他金属的扩散连接	167
3.3.3	钛合金的扩散连接	176
3.3.4	钛合金超塑成形扩散连接	178
3.4	陶瓷材料的扩散连接	180
	参考文献	189
第 4 章	摩擦焊技术	192
4.1	摩擦焊原理及技术优势	192
4.1.1	摩擦焊的原理	192
4.1.2	摩擦焊的技术优势	195

4.2 摩擦焊工艺及其新发展	198
4.2.1 连续驱动摩擦焊 (continues drive friction welding)	199
4.2.2 惯性摩擦焊 (inertia friction welding)	199
4.2.3 线性摩擦焊 (linear friction welding)	200
4.2.4 搅拌摩擦焊 (friction stir welding)	202
4.2.5 嵌入摩擦焊 (friction plunge welding)	203
4.2.6 第三体摩擦焊 (third-body friction joining)	204
4.2.7 相位控制摩擦焊 (phasing control friction welding)	205
4.2.8 径向摩擦焊 (radial friction welding)	206
4.2.9 摩擦堆焊 (friction surfacing)	207
4.2.10 超塑性摩擦焊工艺	209
4.3 摩擦焊设备	210
4.3.1 摩擦焊设备的基本构成	210
4.3.2 常用摩擦焊机的控制系统	211
4.3.3 国内外典型摩擦焊设备及厂家简介	214
4.4 材料摩擦焊的焊接性及接头设计	215
4.4.1 材料摩擦焊的焊接性	215
4.4.2 摩擦焊接头的设计	216
4.5 摩擦焊的应用领域及典型产品	217
4.5.1 摩擦焊的应用领域	217
4.5.2 摩擦焊的典型产品	219
4.6 摩擦焊接头的缺陷及无损检测	224
4.6.1 摩擦接头中的缺陷	224
4.6.2 摩擦焊接头的无损检测	225
4.7 摩擦焊的相关标准	227
参考文献	228
第5章 微连接技术	230
5.1 概述	230
5.1.1 定义和分类	230

5.1.2	发展概况	231
5.2	微电子器件内引线连接中的微连接技术	232
5.2.1	丝材键合 (wire bonding)	233
5.2.2	梁式引线技术 (beam-lead bonding)	236
5.2.3	倒装芯片法 (flip-chip bonding)	236
5.2.4	载带自动键合技术 (tape automatic bonding)	238
5.3	印制电路板组装中的微连接技术	240
5.3.1	微连接中的软钎焊工艺	240
5.3.2	微连接中的软钎焊材料	247
5.4	“绿色”微连接技术——导电胶粘结	255
5.5	微连接焊点的可靠性	257
5.5.1	内引线键合焊点的可靠性	257
5.5.2	印制电路板组装中微连接焊点的可靠性	258
5.5.3	失效机制	259
5.5.4	改善途径	260
5.5.5	导电胶接头的可靠性	261
5.6	发展前景	261
5.6.1	发展的原动力	261
5.6.2	理想的微连接技术	262
	参考文献	263
第 6 章	传统焊接工艺的进展	266
6.1	铝合金穿孔型等离子弧立焊	266
6.1.1	概述	266
6.1.2	等离子弧行为	267
6.1.3	穿孔熔池液态金属的流动行为	271
6.1.4	反映穿孔熔池行为的特征信号——小孔直径的获取	273
6.1.5	变极性等离子弧焊焊缝稳定成形的闭环控制	278
6.2	低飞溅 CO ₂ 气体保护焊	280
6.2.1	概述	280

6.2.2	短路过渡飞溅现象及机理	281
6.2.3	先进低飞溅 CO ₂ 气体保护焊	284
6.3	活性助焊剂-TIG 焊 (activating flux-TIG or A-TIG)	288
6.3.1	概述	288
6.3.2	A-TIG 焊机理	290
6.3.3	应用现状和研究趋势	294
6.4	镀锌钢板的点焊	295
6.4.1	概述	295
6.4.2	电极磨损的产生机制	295
6.4.3	电极磨损的影响因素	296
6.4.4	电极磨损的改善措施及途径	301
	参考文献	303

第 1 章 激光焊及其他激光加工方法

激光焊是利用高能量密度的激光束作为热源的一种高效精密焊接方法。激光焊作为现代高新科技的产物，同时又成为现代工业发展必不可少的手段。随着航空航天、汽车、微电子、轻工业、医疗及核工业等的迅猛发展，产品零件结构形状越来越复杂，对材料性能要求越来越高，对加工精度和表面完整性的要求也越来越高，人们对加工方法的生产效率、工作环境的要求也越来越高，传统的焊接方法难以满足要求，以激光束为代表的高能束流焊接方法，日益得到广泛应用。激光焊接具有高能量密度、可聚焦、深穿透、高效率、高精度、适应性强等优点而受到各发达国家的重视，并已应用于航空航天、汽车制造、电子轻工等领域。

1.1 激光的产生与激光束

激光(laser)是英文“Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”的缩写，意为“通过受激辐射实现光的放大”。激光的出现，是人们长期对量子物理、波谱学、光学和电子学等综合研究的结果。激光和无线电波、微波一样，都是电磁波，具有波粒二象性。但激光的产生机理与普通光不同，因此决定它具有一系列比普通光优异的特征。

1.1.1 受激辐射及粒子集居数反转

按照 1913 年丹麦物理学家玻尔提出的氢原子理论，原子系统具有一系列不连续的能量状态，在这些状态中，电子虽然作加速运动但不辐射电磁能量，这些状态称之为原子的稳定状态（亦称之为能级）。原子系统的电子可以通过与外界的能量交换改变