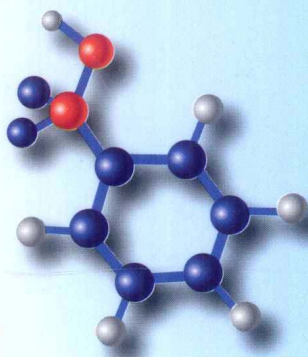




21世纪全国高等院校材料类**创新型**应用人才培养规划教材



MATERIALS

特种连接方法及工艺

主 编 李志勇 吴志生

- 内容全面：涵盖现代焊接新方法及新工艺
- 实例丰富：结合实例介绍基础理论及应用
- 适用性强：内容可满足多个专业教学需求

Materials



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国高等院校材料类创新型应用人才培养规划教材

特种连接方法及工艺

主 编 李志勇 吴志生
参 编 薛海涛 赵 贺 张英乔



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书主要介绍除电弧焊、电渣焊、气焊等常规焊接方法之外的其他特种焊接方法,内容涵盖电阻焊、其他固相焊接(摩擦焊、扩散焊、爆炸焊、超声波焊),高能焊(激光焊、电子束焊),钎焊和电子微连接方法4个方面的内容,介绍了各种焊接方法的原理、工艺、材料及设备。

本书可作为焊接专业的本科生教材,也可作为工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

特种连接方法及工艺/李志勇,吴志生主编. —北京:北京大学出版社,2012.1

(21世纪全国高等院校材料类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-19707-3

I. ①特… II. ①李…②吴 III. ①焊接工艺—高等学校—教材 IV. ①TG44

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第231602号

书 名: 特种连接方法及工艺

著作责任者: 李志勇 吴志生 主编

策 划 编 辑: 童君鑫

责 任 编 辑: 宋亚玲

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-19707-3/TG·0026

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路205号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.cn>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电 子 邮 箱: pup_6@163.com

印 刷 者: 北京富生印刷厂

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787毫米×1092毫米 16开本 23.75印张 548千字

2012年1月第1版 2012年1月第1次印刷

定 价: 45.00元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

21 世纪全国高等院校材料类创新型应用人才培养规划教材

编审指导与建设委员会

成员名单（按拼音排序）

白培康（中北大学）

崔占全（燕山大学）

杜振民（北京科技大学）

关绍康（郑州大学）

李楠（武汉科技大学）

林志东（武汉工程大学）

刘开平（长安大学）

裴坚（北京大学）

孙凤莲（哈尔滨理工大学）

万发荣（北京科技大学）

王峰（北京化工大学）

王昆林（清华大学）

伍玉娇（贵州大学）

徐鸿（华北电力大学）

张朝晖（北京理工大学）

张敏刚（太原科技大学）

张晓燕（贵州大学）

赵莉萍（内蒙古科技大学）

陈华辉（中国矿业大学）

杜彦良（石家庄铁道大学）

耿桂宏（北方民族大学）

胡志强（大连工业大学）

梁金生（河北工业大学）

刘爱民（大连理工大学）

芦笙（江苏科技大学）

时海芳（辽宁工程技术大学）

孙玉福（郑州大学）

王春青（哈尔滨工业大学）

王金淑（北京工业大学）

卫英慧（太原理工大学）

夏华（重庆理工大学）

余心宏（西北工业大学）

张海涛（安徽工程大学）

张锐（郑州航空工业管理学院）

赵惠忠（武汉科技大学）

赵玉涛（江苏大学）

前 言

焊接技术作为现代制造业的一种重要加工手段,“钢铁裁缝”的美誉已很难涵盖其应用范围。新的加工技术(如搅拌摩擦焊、水切割、激光复合焊接技术)应用于新材料(如复合材料、陶瓷、有色合金),新结构(如微加工、超大结构),极端条件(如外太空、深水焊接)等,大大拓宽了焊接技术的内涵和外延。现代焊接技术以崭新的面貌呈现给大家。

我国的焊接专业教育从早期的翻译国外的教材、学习其教学体系,到近年来的专业改革,得到了很大的发展。自2000年以来,一些陆续出版的新版专业教材,尤其是国家级系列规划教材,弥补了专业教育改革中教材建设的不足,新的教材在教学内容上也得到了更新,将近些年的新方法、新工艺写入教材,极大地推动了我国焊接专业教育的发展。这些教材既有从焊接专业出发建设的,也有从材料成型及控制工程专业出发建设的,适应了大多数高等院校的教学要求,但不少院校在教学改革中,既保留了焊接方向的主干课程特色,又按照要求拓宽了材料成型及控制工程专业基础教学的口径,形成了具有特色方向的专业教学模式,上述教材往往很难满足这些特色院校的教学要求。

由于教学目的和大纲的不同,一些高等院校在专业调整之后将弧焊之外的其他焊接方法压缩到一门课程中,这样在选取教材时一门课程往往需要两本甚至三本教材配合使用,给教学带来了很大不便。本书依据编者多年教学实践经验,将知识性和阅读性相综合,增加了学生的学习兴趣,提高了教学质量。本书内容、实例和素材丰富,表述方式通俗易懂,能很好地适应现代大学生的学习特点。

本书由中北大学李志勇教授和太原科技大学吴志生教授主编。李志勇教授编写绪论及第12、13章。第1~7章由太原科技大学吴志生教授、赵贺博士编写。第8~11章由河北工业大学薛海涛副教授编写。第14~16章由中北大学张英乔副教授编写。本书在编写过程中,得到了中北大学教务处、中北大学材料学院的大力支持与帮助;北京大学出版社为书稿的出版付出了辛苦工作,编者在此表示衷心感谢。同时向本书援引参考文献的作者表示诚恳的谢意。

由于编者水平有限,书中疏漏之处在所难免,欢迎各位专家、同学批评指正。

编 者
2011年8月

目 录

绪论	1
----------	---

第 1 章 点焊	10
----------------	----

1.1 概述	12
1.2 点焊的电阻及热平衡	13
1.2.1 接触电阻	13
1.2.2 内部电阻	14
1.2.3 总电阻 R	16
1.2.4 点焊的热平衡	17
1.3 点焊基本原理	18
1.3.1 点焊的温度场分布	18
1.3.2 点焊的循环过程	19
1.3.3 点焊接头的形成	20
1.4 点焊的工艺	22
1.4.1 点焊方法分类	22
1.4.2 点焊接头设计	23
1.4.3 点焊参数及其相互关系	26
1.5 常用金属材料的点焊	30
1.5.1 金属材料的点焊焊接性分析	30
1.5.2 低碳钢点焊	30
1.5.3 可淬硬钢点焊	31
1.5.4 不锈钢点焊	32
1.5.5 镀层钢板点焊	33
1.5.6 钛合金点焊	34
1.5.7 铝合金点焊	34
1.5.8 镁合金点焊	36

本章习题	37
------------	----

第 2 章 凸焊	38
----------------	----

2.1 概述	40
2.2 凸焊的一般工艺	40
2.2.1 凸焊方法	40

2.2.2 凸焊接头的结合特点	41
-----------------------	----

2.2.3 凸焊工艺特点	42
--------------------	----

2.2.4 凸点设计	42
------------------	----

2.2.5 凸焊焊接参数选择	43
----------------------	----

2.3 常用金属材料的凸焊	44
---------------------	----

2.3.1 低碳钢的凸焊	44
--------------------	----

2.3.2 镀层钢板的凸焊	47
---------------------	----

2.3.3 贴塑钢板的凸焊	48
---------------------	----

本章习题	49
------------	----

第 3 章 缝焊	50
----------------	----

3.1 概述	52
--------------	----

3.2 缝焊的一般工艺	52
-------------------	----

3.2.1 缝焊方法	52
------------------	----

3.2.2 缝焊工艺特点	54
--------------------	----

3.2.3 缝焊接头设计	54
--------------------	----

3.2.4 缝焊焊接参数的选择	55
-----------------------	----

3.3 常用金属材料的缝焊	58
---------------------	----

本章习题	60
------------	----

第 4 章 对焊	62
----------------	----

4.1 概述	63
--------------	----

4.2 闪光对焊	65
----------------	----

4.2.1 闪光对焊的基本原理	65
-----------------------	----

4.2.2 闪光对焊一般工艺	67
----------------------	----

4.2.3 常用金属材料的闪光对焊	71
-------------------------	----

4.2.4 典型工件的闪光对焊	74
-----------------------	----

4.3 电阻对焊	77
----------------	----

本章习题	79
------------	----

第 5 章 电阻焊设备	81
-------------------	----

5.1 概述	83
--------------	----

5.2 电阻焊设备组成	83
-------------------	----



5.2.1 机械装置	83	6.6.3 基于回归分析理论的点焊 质量多参数监测方法	131
5.2.2 供电装置	88	本章习题	131
5.2.3 控制装置	91	第7章 高频焊	133
5.3 电阻焊设备的主要技术参数	96	7.1 概述	134
5.3.1 电阻焊机的主要技术 要求	96	7.2 高频焊基本原理	135
5.3.2 电阻焊机的主要技术 参数	98	7.2.1 高频焊基本类型	135
5.4 电阻焊设备的电极	102	7.2.2 高频焊的加热特点	136
5.4.1 电极材料	103	7.2.3 挤压顶锻焊接	137
5.4.2 电极结构	104	7.3 高频焊一般工艺	137
5.5 点焊机器人	108	7.3.1 高频焊主要特点	137
5.5.1 点焊工艺对机器人的基本 要求	108	7.3.2 高频焊焊接参数及 选择	138
5.5.2 点焊机器人焊接系统	108	7.3.3 高频直缝焊管工艺	140
5.5.3 点焊机器人的应用	111	7.3.4 高频螺旋缝焊管工艺	141
本章习题	112	7.4 高频焊设备的选择	142
第6章 电阻焊技术新发展	113	7.4.1 高频发生器	142
6.1 概述	114	7.4.2 电极	143
6.2 电阻焊接头形成理论新进展	114	7.4.3 感应圈	143
6.2.1 点焊熔核孕育处理	115	7.4.4 阻抗器	145
6.2.2 电阻焊过程的数值 模拟	115	7.5 高频焊应用实例	145
6.2.3 新型工业材料焊接性 研究	118	7.5.1 螺旋翅片管高频焊	145
6.3 电阻焊新工艺	119	7.5.2 轻型H型钢高频焊 生产线	147
6.3.1 精密脉冲电阻对焊	119	本章习题	149
6.3.2 微电阻点焊	120	第8章 摩擦焊	150
6.3.3 电阻熔丝焊	120	8.1 概述	151
6.3.4 激光束-高频焊 复合焊	121	8.1.1 摩擦焊的特点和应用	152
6.3.5 激光束-电阻缝焊 复合焊	121	8.1.2 摩擦焊的分类	153
6.4 电阻焊新设备	123	8.2 传统摩擦焊	156
6.5 新型点焊机器人	127	8.2.1 摩擦焊的工作原理	156
6.6 电阻焊质量控制新技术	128	8.2.2 摩擦焊过程的不同 阶段	157
6.6.1 基于多参量综合的点焊 质量智能监控	128	8.2.3 连续驱动摩擦焊的工艺 参数	158
6.6.2 基于模糊分类理论的点焊 质量等级评判	131	8.2.4 摩擦焊接头设计	160
		8.2.5 材料摩擦焊的焊接性	163
		8.2.6 摩擦焊的设备	165

8.3 搅拌摩擦焊	166	10.7 爆炸焊安全	204
8.3.1 搅拌摩擦焊的工作原理	167	本章习题	205
8.3.2 搅拌摩擦焊工艺参数	168	第 11 章 超声波焊	206
8.3.3 搅拌头的材料、形状及尺寸	169	11.1 概述	207
8.3.4 搅拌摩擦焊的缺陷	171	11.1.1 超声波焊的特点	207
8.3.5 搅拌摩擦焊的接头形式	172	11.1.2 超声波焊的应用	208
8.3.6 搅拌摩擦焊设备	173	11.2 超声波焊的工作原理与分类	209
本章习题	174	11.2.1 超声波焊的工作原理	209
第 9 章 扩散焊	175	11.2.2 超声波焊的分类	210
9.1 概述	176	11.3 超声波焊的工艺	212
9.2 扩散焊的分类及扩散焊方法	177	11.3.1 接头设计	212
9.3 扩散焊的原理	179	11.3.2 焊接参数	213
9.3.1 同种金属扩散焊原理	180	11.4 常用材料的超声波焊	216
9.3.2 液相扩散焊原理	181	本章习题	218
9.3.3 异种材料扩散焊原理	182	第 12 章 激光焊	219
9.4 扩散焊的工艺	182	12.1 概述	221
9.4.1 固相扩散焊工艺	182	12.1.1 激光器的发展历史	221
9.4.2 其他扩散焊工艺	185	12.1.2 激光焊接的特点	223
9.5 常用材料的扩散焊	186	12.1.3 激光焊接的应用	224
9.5.1 钛合金的扩散焊	187	12.2 激光焊的工作原理	224
9.5.2 镍合金的扩散焊	188	12.2.1 激光与物质的作用机理	224
9.5.3 陶瓷的扩散焊	188	12.2.2 激光焊接的分类	226
9.6 扩散焊设备	190	12.2.3 激光焊接过程的几种效应	228
本章习题	191	12.3 激光焊的工艺	230
第 10 章 爆炸焊	193	12.3.1 脉冲激光焊的工艺	230
10.1 概述	194	12.3.2 连续激光焊的工艺	231
10.2 爆炸焊的工作原理	195	12.4 常用材料的激光焊	234
10.3 爆炸焊方法分类及工艺安装	197	12.4.1 钢的激光焊接	234
10.3.1 爆炸焊方法分类	197	12.4.2 有色合金的激光焊接	236
10.3.2 爆炸焊工艺安装	198	12.4.3 非金属材料激光焊接	237
10.4 爆炸焊工艺	199	12.5 激光焊的设备	238
10.4.1 爆炸焊工艺步骤	199	12.5.1 CO ₂ 气体激光器	239
10.4.2 爆炸焊参数	200	12.5.2 YAG 固体激光器	241
10.5 爆炸焊的缺陷	201		
10.6 常用材料的爆炸焊	203		



12.5.3	CO ₂ 激光器与 YAG 激光器的对比	242
12.5.4	其他激光器	242
12.6	激光焊的新技术	243
12.6.1	激光电弧复合焊技术	243
12.6.2	激光与其他焊接方法的复合	245
12.6.3	激光钎焊	246
12.6.4	激光焊接方法的改进	248
	本章习题	249

第 13 章 电子束焊

13.1	概述	252
13.1.1	电子束焊的发展历史	252
13.1.2	电子束焊的特点	252
13.1.3	电子束焊的应用	253
13.2	电子束焊的原理与分类	254
13.2.1	电子束焊的原理	254
13.2.2	电子束焊的分类	255
13.3	电子束焊的工艺	257
13.3.1	电子束焊的接头设计	257
13.3.2	典型条件下电子束焊的焊接特点	259
13.3.3	电子束焊的参数	260
13.3.4	深熔焊的工艺方法	261
13.4	典型材料的电子束焊	262
13.4.1	钢的电子束焊	262
13.4.2	有色合金的电子束焊	263
13.4.3	异种材料和复合材料的电子束焊	264
13.5	电子束焊设备	266
13.5.1	电子枪	266
13.5.2	高压电源系统	267
13.5.3	工作室及抽真空系统	268
13.5.4	控制及调整系统	268
13.5.5	工作台和辅助装置	269
13.5.6	电子束焊设备的选择与操作	269
13.6	其他电子束加工技术	270

13.6.1	电子束表面改性	270
13.6.2	电子束打孔	271
13.6.3	电子束气相沉积	272
13.6.4	电子束熔炼	272
	本章习题	273

第 14 章 钎焊原理及材料

14.1	概述	276
14.1.1	钎焊的发展历史	276
14.1.2	钎焊的特点	277
14.1.3	钎焊的应用	277
14.2	钎焊的工作原理	277
14.2.1	液体钎料对固体母材的润湿与铺展	278
14.2.2	液体钎料与固体母材的相互作用	283
14.2.3	液体钎料的凝固及钎缝的金相组织	286
14.3	钎焊用钎料	288
14.3.1	钎料概况	288
14.3.2	软钎料	290
14.3.3	硬钎料	293
14.3.4	钎料的选择	300
14.4	钎剂	301
14.4.1	钎剂的组成	301
14.4.2	软钎剂	302
14.4.3	硬钎剂	305
14.4.4	铝用硬钎剂	307
14.4.5	气体钎剂	308
	本章习题	308

第 15 章 钎焊方法及工艺

15.1	钎焊方法及设备	311
15.1.1	常用钎焊方法及设备	311
15.1.2	特种钎焊方法及设备	319
15.2	钎焊工艺	321
15.2.1	钎焊接头的设计	322
15.2.2	钎焊前焊件的表面处理	323
15.2.3	焊件的装配与固定	325
15.2.4	钎料的放置	326

15.2.5 钎焊工艺参数的确定	326	16.1.1 微电子封装的发展 历程	348
15.2.6 钎焊后清洗	326	16.1.2 微电子器件的连接技术 应用	349
15.3 常用材料的钎焊	327	16.2 电子微连接技术	350
15.3.1 碳钢和低合金钢的 钎焊	327	16.2.1 传统连接工艺应用	350
15.3.2 工具钢和硬质合金的 钎焊	329	16.2.2 芯片焊接技术	351
15.3.3 不锈钢的钎焊	331	16.2.3 微电子封装与组装中的 焊接技术	354
15.3.4 铝及铝合金的钎焊	334	16.3 微电子封装与组装中的焊接 材料	359
15.3.5 铜及铜合金的钎焊	338	16.3.1 钎料膏	359
15.3.6 活性金属的钎焊	340	16.3.2 无铅钎料	360
15.3.7 陶瓷和金属的钎焊	342	本章习题	363
本章习题	345	参考文献	364
第 16 章 电子微连接方法及工艺	346		
16.1 概述	348		

绪论

1. 焊接方法的发展历史

焊接技术可以追溯到几千年前的青铜器时代，在人类早期工具制造中，无论是中国还是当时的埃及等古文明地区，都能看到焊接技术的雏形。古代的焊接方法主要是铸焊、钎焊和锻焊。中国商朝(公元前 1600 年—公元前 1046 年)制造的铁刃铜钺就是铁与铜的铸焊件，其表面铜与铁的熔合线蜿蜒曲折，接合良好。春秋战国时期(公元前 770 年—公元前 221 年)曾侯乙墓中的建鼓铜座上的盘龙是分段钎焊连接而成的，与现代软钎料成分相近。战国时期制造的刀剑一般是经过加热锻焊而成的。据明朝宋应星所著《天工开物》记载：中国古代将铜和铁一起入炉加热，经锻打制造刀、斧；用黄泥或筛细的陈久壁土撒在接口上，分段锻焊大型船锚。在古埃及和地中海地区，公元前 1000 年人们就已经能够通过搭接的方法制造金盒及铁质工具。到中世纪时(约公元 476 年—公元 1453 年)，在叙利亚大马士革曾用锻焊方法打造兵器。但古代焊接技术长期停留在较原始的水平，使用的热源都是炉火，温度低、能量不集中，无法用于大截面、长焊缝工件的焊接，只能用以制作装饰品、简单的工具和武器。近代真正意义上的焊接技术起源于 1880 年左右电弧焊方法的问世。表 1 列出了现代焊接史上重要方法和技术出现的时间、发明人及所属国家。

表 1 主要焊接方法的发明时间、发明人及所属国家

发明时间	方法名称	发明人	所属国家和机构
1881 年	碳弧焊	Nikolai Benardos	俄罗斯
1885 年—1900 年	电阻焊	Thomson	美国
1900 年	铝热焊(thermite welding)	Hans Goldschmidt, Goldschmidt AG	西德 (Orgotheus Inc. 美国)
1900 年	氧乙炔焊	Fouche, Picard	法国
1907 年—1910 年	手工电弧焊 coated electrode	Oscar Kjellberg	瑞典
1909 年	等离子焊接 PAW	Schonner R. M. Gage	BASF 德国美国
1908 年、1940 年、1950 年	电渣焊 ESW	N. Benardos R. K. Hopkins	Paton 焊接学会 俄罗斯、美国、乌克兰
1926 年	钨极惰性气体保护焊	M. Hobart 和 P. K. Devers	美国
1926 年	药芯焊丝 FCAW	Stoody	美国
1930 年	氢原子焊	—	—
1930 年	螺柱焊	纽约海军厂	美国



(续)

发明时间	方法名称	发明人	所属国家和机构
1930 年、1948 年	熔化极惰性气体保护焊	H. M. Hobart 和 P. K. Devers	美国
1935 年	埋弧焊 SAW	Robinoff	地下铁道公司美国
1941 年	GTAW	Meredith	美国
1950 年	喷射过渡 GMAW	Muller, Gibson	美国
1950 年	电渣焊首次工业应用	—	苏联
1953 年	活性气体保护电弧焊	Lyubavskii 和 Novoshilov	苏联
1954 年	自保护药芯焊丝	—	—
1956 年	摩擦焊	—	俄罗斯
1956 年	超声波焊	—	—
1957 年	CO ₂ 气体保护焊	—	美国、英国、俄罗斯
1959 年	爆炸焊	—	—
1950 年末	真空扩散焊	—	—
1960 年	脉冲熔化极气体保护焊	Airco	美国
1961 年	电子束焊	Stohr	法国
1962 年	电气焊专利(Electrogas)	Arcos	比利时
1964 年	热丝和协同控制 GMAW	Manz	美国
1966 年	激光切割	Peter Houldcroft	TWI 英国
1970 年	逆变电源	—	世界各国
1970 年	激光焊接 LBW	Martin Adams	英国
1991 年	搅拌摩擦焊 FSW	Wayne Thomas	TWI 英国

注：表中的发明时间以焊接方法首次具有工业实现意义为起点，而非该方法的原理初次被发现。如电阻焊的原理早在 1856 年就被发现，但直到 1885 年才发明了第一台具有工业应用前景的变压器，并在随后几年发明了点焊、对焊等具体的电阻焊方法。

纵观现代焊接方法和技术发展史，其与工业革命的发展息息相关，可根据方法的起源时间，将其归纳为两个重要的发展阶段。

(1) 起源于 19 世纪 70 年代的第二次工业革命，这一阶段的重要标志是电力的发展和应用。工业应用最为广泛的电弧焊、电阻焊方法正是起源于这一阶段。虽然目前工业上使用的这两类焊接方法已有了很大进步，但不容置疑的是这一阶段奠定了焊接技术发展的第一块基石。

在 1881 年的巴黎“首届世界电器展”上，法国 Cabot 实验室的学生，俄罗斯人 Nikolai Benardos 在碳极和工件间引弧，填充金属棒使其熔化，首次展示了电弧焊方法。1890 年，Benardos 用金属棒代替碳棒作为电极并获得专利。但瑞典人 Oscar Kjellberg 在使用该方法修理船上的蒸汽锅炉时注意到，焊接金属上到处都是气孔和小缝，焊缝不能隔绝空气，根本不可能让焊缝防水。为了改善这种方法，他发明了涂层焊条，于 1907 年 6 月 29

日获得专利(瑞典专利号 27152),大大改善了焊接质量,使手工电弧焊进入实用阶段。随后,美国的诺布尔利用电弧电压控制焊条送给速度,制成自动电弧焊机,从而成为焊接机械化、自动化的开端。在电弧焊的基础上,能产生更集中、更炙热能源的等离子焊接也被发明,利用它可以提高焊接速度,减少线能量。在随后的发展中,电弧焊方法得到不断创新和改进。1930 年美国的罗宾诺夫发明使用焊丝和焊剂的埋弧焊,焊接机械化得到进一步发展。20 世纪 40 年代,在第二次世界大战期间,为适应航空业铝、镁合金和合金钢焊接的需要,钨极和熔化极惰性气体保护焊相继问世。1953 年,苏联的 Lyubavskii 和 Novoshilov 发明二氧化碳气体保护焊,促进了气体保护焊的应用和发展。随后如混合气体保护焊、药芯焊丝气保焊和自保护焊等也相继诞生。

首例电阻焊要追溯到 1856 年。James Joule 成功用电阻加热法对一捆铜丝进行了熔化焊接。1887 年,美国的汤普森发明电阻焊,并用于薄板的点焊和缝焊;缝焊是压焊中最早的半机械化焊接方法,随着缝焊过程的进行,工件被两滚轮推送前进;20 世纪 20 年代开始使用闪光对焊方法焊接棒材和链条,至此电阻焊进入实用阶段。1964 年,Unimation 生产的首批用于电阻点焊的机器人在通用汽车公司使用。

在此阶段,人们还发明了氧炔焊和铝热焊,作为早期电力技术不成熟时重要的焊接方法,目前上述方法在特定场合仍得到应用和发展。大约在 1900 年,Edmund Fouche 和 Charles Picard 造出了第一支焊炬,其火焰温度在 3100°C 以上,成为焊接、切割钢的重要工具。1900 年又出现了铝热焊,目前仍在铁路轨道等的焊接上得到应用。

(2) 第二个重要发展阶段出现在 20 世纪四五十年代的第三次工业革命,这阶段在能源、微电子技术、航天技术等领域取得重大突破,推动了焊接技术的发展,1950 年后成为又一次焊接方法迅速发展的时期,在这个阶段各个国家的焊接工作者开发了不少崭新的焊接方法。

1951 年苏联的巴顿电焊研究所发明电渣焊,成为大厚度工件的高效焊接方法。1957 年美国的盖奇发明等离子弧焊;20 世纪 40 年代德国和法国科学家发明的电子束焊,也在 20 世纪 50 年代得到实用和进一步发展;20 世纪 60 年代又出现激光焊。等离子、电子束和激光焊接方法的出现,标志着高能量密度熔焊的新发展,大大改善了材料的焊接性,使许多难以用其他方法焊接的材料和结构得以焊接。1956 年,美国的琼斯发明超声波焊;苏联的丘季科夫发明摩擦焊;1959 年,美国斯坦福研究所成功研究出爆炸焊;20 世纪 50 年代末苏联又制成真空扩散焊设备。

1991 年,TWI 获得搅拌摩擦焊专利权。这种焊接法对轻合金很适用,不用熔化就能接合并形成高质量焊缝。该工艺不使用耗材,能源消耗少,是 20 世纪最重要的焊接创新之一。到此为止,目前使用的大多数焊接工艺都已发明。

2. 我国焊接行业的发展及现状

我国焊接技术的真正发展开始于解放后,1955 年左右,在当时苏联专家的帮助下,经过第一批留苏人员的艰苦努力,我国开始建立自己的焊接专业,培养焊接人才,这标志着我国焊接事业的真正起步。而我国焊接专业的快速发展,还是改革开放后,在经济腾飞和工业发展的巨大推动力下获得的。目前,经过焊接工作者的努力,基本掌握了各项先进的焊接生产技术,并将其应用于工业生产中,极大地推动了我国经济的快速发展。

1) 焊接技术在国民工业上的应用及技术水平现状

我国在实行改革开放政策以来,在大型焊接钢结构的开发与应用方面创造了 1949 年以来的



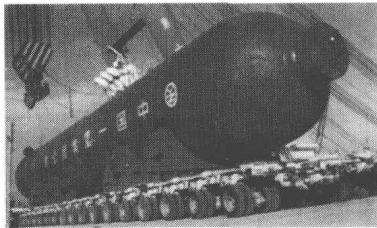
最高水平,有的已成为世界第一。例如国家大剧院、大吨位原油船舶、核电站反应器、神舟飞船的返回舱、长江大桥等(图1)。世界关注的长江三峡水利工程,其水电站的水轮机转轮[图1(e)]直径10.7m,高5.4m,重达440t,为世界最大、最重的不锈钢焊接转轮。这些焊接技术在国民工业的成功应用,也说明了我国焊接制造技术已经得到很大发展,得到世界的瞩目。



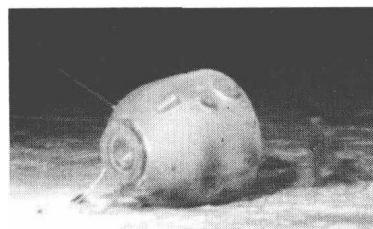
(a) 国家大剧院



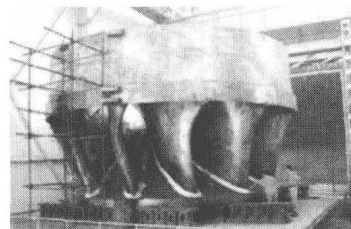
(b) 30万吨原油船



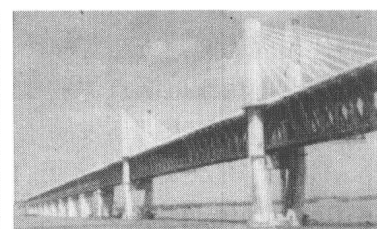
(c) 千吨级加氢反应器



(d) “神舟”4号返回舱



(e) 三峡水轮机转轮



(f) 芜湖长江大桥

图1 焊接在各行业的应用

大量先进技术在我国航空航天、电子工业、交通运输、大型工程及设备等行业的应用,使我国的焊接技术得到突飞猛进的发展。为了完成诸多的重要焊接任务,我国先后自行研制、开发和引进了一些先进的焊接设备、技术和材料。目前国际上在生产中已经采用的成熟焊接方法与装备在我国也都有所应用。我国制造企业通过消化吸收,已经掌握了先进的焊接技术和焊接方法(其中不乏一些特种焊接技术),并在应用的过程中创新发展,诸如搅拌摩擦焊、电子束焊接、激光焊接、激光钎焊和激光切割、激光与电弧复合热源焊接、水射流切割、单丝或双丝窄间隙埋弧焊、4丝高速埋弧焊、双丝脉冲气体保护焊、等离子焊接、精细等离子切割、数控切割系统、机器人焊接系统、焊接柔性生产线、STT焊接电源、变极性焊接电源和全数字化焊接电源等先进的焊接技术和设备。

虽然我国焊接工作者积极努力追赶国际先进水平,但是也应认识到,我国在焊接方法和工艺的原始创新上,要赶上世界先进水平还有一段很长的路要走。因此,需要加强新的焊接共性技术的研究与开发。在新焊接技术的研发与推广应用、新型热源在焊接方法上的应用、高效优质自动化焊接技术、焊接生产与质量管理的信息化等方面,应加快研究与应用开发。

2) 我国焊接专业教育的发展和现状

我国早期焊接专业教学模式起源于前苏联,当时我国第一批焊接专家编写了第一套自己的焊接专业教材,并在随后的使用中不断改善、更新,满足了当时的教学要求。但应该注意到,我国从1998年开始,高等院校取消各单独的热加工专业,合并成材料加工工程专业,实行了通才教育。自2000年开始,我国开始进行较大范围的教学改革和教材建设工作,一批适应专业改革的教材逐渐走向大学生的课堂,新的焊接教材体系对教学内容进行了更新,一些新方法、新技术被编入教材,大大改善了我国焊接专业教材建设滞后的问题。

随着新教改的推行和实践,在肯定其优点的同时,教育者也认识到教育的层次和目标的不同,带来对高等教育需求的差异。高等院校应有不同的层次,有以培养科研人才为主,也有以培养广大企业需要的工程技术人才为主,两者的培养方法和教学内容要各具特色。工科的高等教育应重点培养能适合在现代企业工作的工程师。这是人数最多,对发展焊接制造有深远影响的群体。焊接专业的教育现状对教学模式、培养方案、教材体系的建设提出更高要求。对企业来说,需要能尽快承担专业工作的“专才”,要求我国的高等教育体系应能适应不同层次的社会需求。

3. 焊接方法的分类

焊接是通过加热或加压,或两者并用,添加或不添加填充金属,使两工件产生原子间结合的加工方法。焊接应用广泛,既可用于金属,也可用于非金属。几乎所有的产品,从几十万吨巨轮到不足 1g 的微电子元件,在生产中都不同程度地依赖焊接技术。由焊接定义可以看出,只要能实现原子间结合这一本质要求,可采用不同工艺措施及其组合。因此,焊接方法种类繁多,通常按照其焊接过程特点、热源种类、保护气体形式等进行分类。采用比较多的有族系法、一元坐标法、二元坐标法等。

族系法具有分类层次灵活、主次关系明确等优点,应用最多。但由于采用明确的划界分类,一些焊接方法不易归类,如扩散钎焊具有扩散焊和钎焊各自的特征。另外,国内外的归类方法也稍有差异,如国内采用压力焊作为单独大类,而国外更多采用固相焊作为大类来对应熔化焊,这就造成个别方法大类区分的不同,如电阻点焊在国内的归类方法中是典型的压焊方法,但在国外归类中更多归于熔化焊,因为它会形成明确的熔化熔核。

一元坐标法将焊接过程中的两个特征作为归类准则,如保护方法和热源,根据每种焊接方法的特征,将其归入表中的某一位置,这种方法为“开放性”归类,适应性强,任何一种新方法都可以根据特征在表中归类。但一元坐标法由于选取两种固定的特征作为分类标准,这可能并不是某种焊接方法的主要特征,造成分类不明确。

二元坐标法是我国学者在总结了上述两种归类法的优缺点后发展的一种新的归类方法。它先以一元坐标法方式在横(热源)纵(结合方式)坐标上列出一级特征,再进一步往下像族系法那样分类。这种方法具备两种分类方法的优点,但二元坐标法稍偏复杂,适合对焊接方法特征有一定基础的从业者。

在这里给大家介绍族系法这种使用最多的分类方法,它简单方便、主次关系明确,适合初学者对焊接方法有一个总体的认识。图 2 给出了族系法的分类示意图,由图中可以看出,焊接方法被分为 3 个基本大类:熔化焊、压力焊、钎焊,在 3 个大类下又逐级分出各个小类和具体焊接方法。

1) 熔化焊接

熔化焊接是通过被连接的构件表面局部加热熔化成液体(通常不施加压力),然后冷却结晶成一体的焊接方法。按照热源形式不同,熔化焊接方法分为:气焊(以氧乙炔或其他可燃气体燃烧火焰为热源),铝热焊(以铝热剂放热反应热为热源),电弧焊(以气体导电时产生的热为热源),电渣焊(以熔渣导电时的电阻热为热源),电子束焊(以高速运动的电子束流为热源),激光焊(以单色光子束流为热源)等若干种。熔化焊接方法中最重要的电弧焊方法还可按保护方法进一步分为埋弧焊、气保护焊等很多种;按电极特征分为熔化电极和非熔化电极两大类。

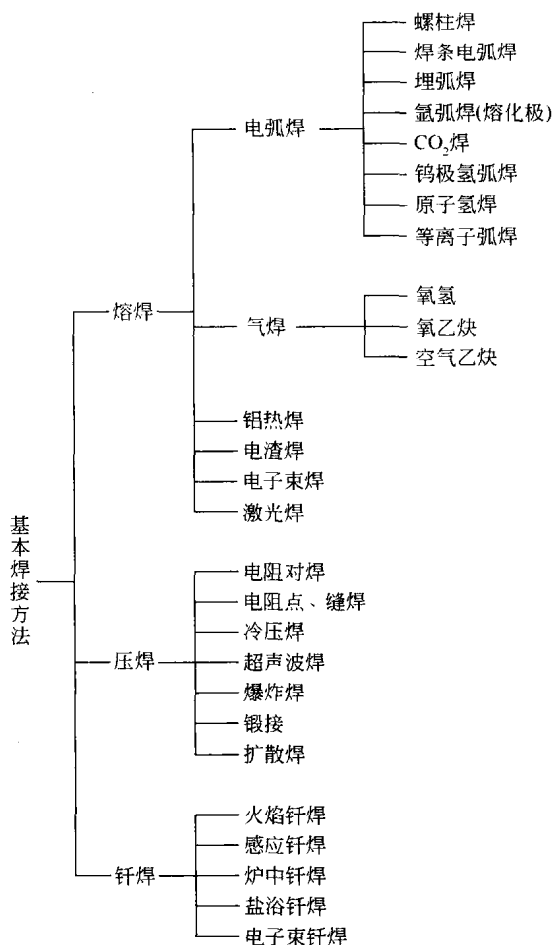


图 2 焊接方法的族系分类图

2) 压力焊接

压力焊接(简称压力焊)是指在焊接过程中需要施加压力(加热或不加热),实现焊接的方法。这里有必要说明一下固相焊接与压力焊接的区别,固相焊接是指焊接时被焊金属不熔化,利用摩擦、扩散和加压等物理作用克服两个连接表面的不平度,除去(挤走)氧化膜及其他污染物,使两个连接表面上的原子相互接近到晶格距离,从而在固态条件下实现连接的方法。由此可见,二者进行分类所采用的标准不同。我国分类中多以压力焊作为族系的分类。国外分类中较多采用固相焊接作为分类。其中,电阻点焊比较特殊,焊接过程中需要施加压力,我国通常将其分在压力焊接方法中。但其有明显的熔核形成,具有熔化焊接的特点,不属于固相连接。

3) 钎焊

钎焊是一种较特殊的焊接形式,其形成的接头不需要母材熔化,它是用比母材熔点低的金属材料作为钎料,用液态钎料润湿母材和填充工件接口间隙并使其与母材相互扩散的焊接方法。严格意义上讲,钎焊与其他焊接方法是连接原理不同的方法,因此,在英文里采用 soldering(软钎焊)、brazing(硬钎焊)来命名,与焊接(welding)是不同的词汇。钎焊变形小,接头光滑美观,适合于焊接精密、复杂和由不同材料组成的构件,如蜂窝结构板、透平叶片、硬质合金刀具和印刷电路板等。

4. 本书的主要内容

本书主要讲解除电弧焊、电渣焊、气焊等常规焊接方法之外的其他特种焊接方法,包括电阻焊,其他固相焊接(摩擦焊、扩散焊、爆炸焊、超声波焊),高能焊(激光焊、电子束焊),钎焊和电子微连接4方面的内容,介绍各种焊接方法的原理、工艺、材料及设备。

1) 电阻焊

其主要内容包括电阻焊各方法:点焊、凸焊、缝焊、对焊、高频缝焊等的原理及特点,各种焊接方法的工艺和应用,焊接设备和电阻焊机器人的发展现状等。

电阻焊(resistance welding, RW)是工件组合后通过电极施加压力,利用电流通过接头的接触面及邻近区域产生的电阻热进行焊接的方法,属压焊。

➤ Resistance welding is one of the oldest types of welding. Heat is generated by the passage of an electric current through the resistance formed by the contact between two metal surfaces.

电阻焊过程的物理本质是利用焊接区本身的电阻热和大量塑性变形能量,使两个分离表面的金属原子之间接近到晶格距离形成金属键,在结合面上产生足够量的共同晶粒而得到焊点、焊缝或对接接头。

电阻焊方法主要有点焊、凸焊、缝焊、对焊、高频对接缝焊(又称高频焊),方法的原理如图3所示;完成各方法所用主要电阻焊设备(电源)的电流波形如图4所示。电阻焊按焊件的接头形式、工艺方法和采用电源种类的不同,又可分为多种具体形式,见表2。

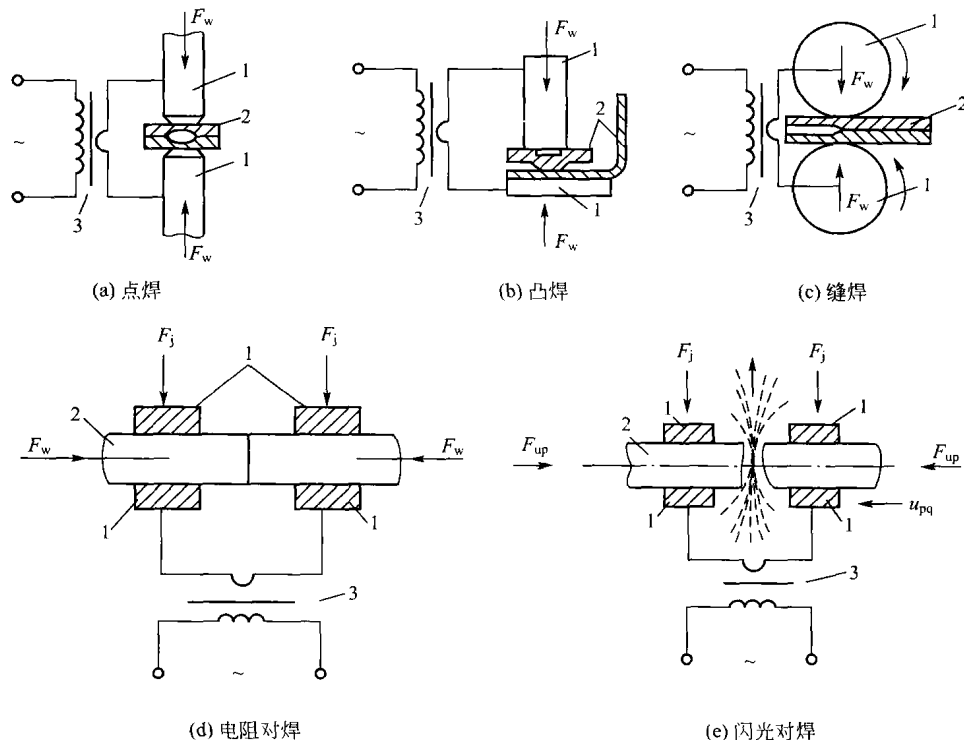


图3 电阻焊方法示意图