

【21世纪高校材料工程类规划教材】

压焊方法及设备

吉林大学 赵熹华
哈尔滨工业大学 冯吉才 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

● ISBN 7-111-16813-5/TG·1507(课)

封面设计/电脑制作: 陈沛

ISBN 7-111-16813-5



9 787111 168133 >

定价: 27.00 元

地址: 北京市百万庄大街22号	邮政编码: 100037
联系电话: (010) 68326294	网址: http://www.cmpbook.com
E-mail: online@cmpbook.com	



21 世纪高校材料工程类规划教材

压焊方法及设备

吉 林 大 学 赵熹华
哈尔滨工业大学 冯吉才 编著



机 械 工 业 出 版 社

本书系统阐述了电阻焊、高频焊、扩散连接、摩擦焊、超声波焊、爆炸焊、变形焊等主要压焊方法的基本原理、工艺和设备,总结了其适用范围和常用金属材料、典型零件的焊接技术要点。同时,为培养高层次复合型人才需要,加强了压焊接头形成理论、焊接过程自动化及质量控制、焊接机器人及自动无损检测等新技术的相关内容。全书理论联系实际,注重思路和能力的培养,并适当反映了国内外的新成就和发展趋势,许多图表直接引自最新的国内外标准和典型企业成熟经验,可供实际生产中选用。

本书为高等工科院校材料成形与控制工程专业、材料加工工程专业主干课教材,亦可供从事焊接工艺及设备技术领域工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

压焊方法及设备/赵熹华,冯吉才编著. —北京:机械工业出版社, 2005. 8

21 世纪高校材料工程类规划教材

ISBN 7-111-16813-5

I. 压... II. ①赵... ②冯... III. ①加压焊—焊接工艺—高等学校—教材②加压焊—焊接设备—高等学校—教材 IV. TG453

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 070171 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:董连仁 版式设计:冉晓华 责任校对:张晓蓉

封面设计:陈 沛 责任印制:陶 湛

北京铭成印刷有限公司印刷

2005 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

1000mm × 1400mm B5 · 11.125 印张 · 429 千字

0001—4000 册

定价:27.00 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)68326294

封面无防伪标均为盗版

前 言

压焊是焊接科学技术的重要组成部分之一，广泛应用于汽车制造、航空、航天、原子能、信息工程等工业部门。统计资料表明，用压焊完成的焊接量，每年约占世界总焊接量的 $1/3$ ，并有继续增加的趋势。随着先进制造技术的发展，培养高层次焊接人才的迫切需要，高校材料加工工程教学指导委员会和中国焊接学会压力焊专业委员会、钎焊及特种连接专业委员会共同规划了本教材。

本教材具有体系新、综合性及工程应用性强，紧密适应专业调整和教改需要并符合社会主义市场经济发展要求等鲜明特点，是一本面向 21 世纪的新型教材。全书系统阐述了电阻焊、高频焊、扩散连接、摩擦焊、超声波焊、爆炸焊、变形焊等主要压焊方法的基本原理、工艺和设备，总结了其适用范围和常用(金属)材料、典型零件的焊接技术要点。同时，为培养高层次复合型人才需要，加强了压焊接头形成理论、焊接过程自动化及质量控制、焊接机器人及自动无损检测等新技术的相关内容。本书理论联系实际，注重思路和能力的培养，并适当反映了国内外的新成就和发展趋势，许多图表直接引自最新的国内外标准和典型企业成熟经验，可供实际生产中选用。

本教材由赵熹华教授(吉林大学)和冯吉才教授(哈尔滨工业大学)合作编著。前者负责绪论、第 1 章~第 8 章，后者负责第 9 章~第 13 章。

向给予大力支持的高校材料加工工程教学指导委员会和中国焊接学会压力焊专业委员会、钎焊及特种连接专业委员会，向援引的参考文献作者，一并致以深切的谢意。

吉林大学曹先渝高级工程师、研究生赵贺，哈工大刘玉莉副教授代为制备了全书大部分图表，谨此致谢。

由于作者水平所限，疏漏和错误肯定存在，恳切希望使用本教材的教师和读者批评指正。

编著者

2005 年 3 月

目 录

前言

绪论 1

第 1 篇 电阻焊方法及设备

第 1 章 点焊 9

1.1 点焊基本原理 9

1.1.1 点焊接头的形成 9

1.1.2 点焊的热源及加热特点 15

1.2 点焊一般工艺 19

1.2.1 点焊方法 19

1.2.2 点焊接头设计 21

1.2.3 焊前工件表面清理 24

1.2.4 点焊焊接参数及其相互关系 25

1.3 常用金属材料的点焊 29

1.3.1 低碳钢的点焊 30

1.3.2 可淬硬钢的点焊 31

1.3.3 铝合金的点焊 32

1.3.4 不锈钢的点焊 36

1.3.5 镀层钢板的点焊 38

1.3.6 高温合金的点焊 40

1.3.7 钛合金的点焊 41

1.3.8 铜合金的点焊 42

1.3.9 镁合金的点焊 43

1.4 特殊情况的点焊工艺 44

1.4.1 不等厚度及不同材料的点焊 44

1.4.2 胶接点焊与减振

钢板点焊 47

1.4.3 微型件的点焊 50

第 2 章 凸焊 53

2.1 凸焊基本原理 53

2.1.1 凸焊基本类型 53

2.1.2 凸焊接头形成过程 54

2.1.3 凸焊接头的结合特点 56

2.2 凸焊一般工艺 56

2.2.1 凸焊工艺特点 56

2.2.2 凸点设计 57

2.2.3 凸焊焊接参数选择 58

2.3 常用金属材料的凸焊 59

2.3.1 低碳钢的凸焊 59

2.3.2 镀层钢板的凸焊 61

2.3.3 贴塑钢板的凸焊 61

2.3.4 不锈钢和高温合金的凸焊 63

第 3 章 缝焊 64

3.1 缝焊基本原理 64

3.1.1 缝焊基本类型 64

3.1.2 缝焊接头形成过程 65

3.2 缝焊一般工艺 66

3.2.1 缝焊工艺特点 66

3.2.2 缝焊接头设计 67

3.2.3 缝焊焊接参数选择 68

3.3 常用金属材料的缝焊 71

第 4 章 对焊 76

4.1 闪光对焊 77

4.1.1 闪光对焊基本原理 77

4.1.2 闪光对焊一般工艺	79	6.1.2 电阻焊过程的数值 模拟	147
4.1.3 常用金属材料的 闪光对焊	84	6.1.3 新型工业材料焊接性 研究	150
4.2 典型工件的闪光对焊	88	6.2 电阻焊质量控制技术	151
4.2.1 棒材闪光对焊	88	6.2.1 基于模糊分类理论的 点焊质量等级评判	151
4.2.2 管子闪光对焊	89	6.2.2 基于回归分析理论的点焊 质量多参数监测方法	152
4.2.3 板材闪光对焊	89	6.2.3 基于神经网络理论的点焊 质量多参量综合监测	152
4.2.4 环形件闪光对焊	90	6.2.4 基于数值计算的熔核直径 在线自适应控制	152
4.3 电阻对焊	91	6.3 电阻焊新工艺	157
第5章 电阻焊设备	94	6.3.1 随机多脉冲回火热 处理点焊	157
5.1 电阻焊设备分类 和组成	94	6.3.2 精密脉冲电阻对焊	158
5.1.1 电阻焊设备的型号 编制	94	6.3.3 导热电阻缝焊	158
5.1.2 电阻焊设备的组成	96	6.4 电阻焊新设备	159
5.2 电阻焊设备的主要技术 参数	125	6.5 新型点焊机器人	162
5.2.1 电阻焊机主要 技术要求	125	第7章 电阻焊质量管理 与检验	163
5.2.2 电阻焊机的主要技术 参数	126	7.1 电阻焊的全面质量 管理	163
5.3 电阻焊设备的电极	131	7.2 电阻焊接头的主要质量 问题	167
5.3.1 电极材料	132	7.2.1 点、缝焊接头的主要质量 问题	167
5.3.2 电极结构	134	7.2.2 对焊接头的质量问题	169
5.4 点焊机器人	140	7.3 电阻焊接头质量检验 标准	171
5.4.1 点焊工艺对机器人的 基本要求	141	7.3.1 接头力学性能方面的 规定	172
5.4.2 点焊机器人焊接系统	142	7.3.2 接头缺陷方面的规定	174
5.4.3 点焊机器人的应用	145	7.4 电阻焊接头检验方法	175
第6章 电阻焊技术新发展	146		
6.1 电阻焊接头形成理 论研究进展	146		
6.1.1 点焊熔核孕育处理	146		

7.4.1 破坏性检验	175	间的扩散连接	215
7.4.2 无损检验	177	9.3.2 镍基高温合金的 扩散连接	219
第2篇 其他压焊方法及设备		9.3.3 异种金属材料的 扩散连接	223
第8章 高频焊	183	9.3.4 陶瓷材料的扩散连接	227
8.1 高频焊基本原理	183	9.3.5 复合材料的扩散连接	232
8.1.1 高频焊基本类型	183	9.4 扩散连接设备	236
8.1.2 高频焊的加热特点	184	9.4.1 扩散连接设备的分类	236
8.1.3 挤压顶锻焊接	185	9.4.2 扩散连接设备的组成	237
8.2 高频焊一般工艺	185	9.4.3 典型扩散连接设备及 工作原理	238
8.2.1 高频焊主要特点	185	第10章 摩擦焊	241
8.2.2 高频焊焊接参数 及选择	186	10.1 摩擦焊原理及分类	241
8.2.3 高频直缝焊管	189	10.1.1 摩擦焊的分类	241
8.2.4 高频螺旋缝焊管	190	10.1.2 摩擦焊原理	241
8.3 高频焊设备的选择	190	10.2 连续驱动摩擦焊	246
8.4 高频焊应用实例	193	10.2.1 连续驱动摩擦焊 基本原理	246
8.4.1 螺旋翅片管高频焊	193	10.2.2 摩擦焊焊接工艺	251
8.4.2 H型钢高频焊生产线	195	10.2.3 焊接参数检测及控制	256
第9章 扩散连接	198	10.2.4 典型材料的摩擦焊	259
9.1 扩散连接机理	198	10.3 搅拌摩擦焊	266
9.1.1 固相扩散连接基本 原理	198	10.3.1 搅拌摩擦焊接过程	266
9.1.2 液相扩散连接基本 原理	203	10.3.2 搅拌摩擦焊工艺	270
9.1.3 超塑成形扩散连接 基本原理	205	10.3.3 典型材料的搅拌 摩擦焊	274
9.2 扩散连接工艺	206	10.3.4 搅拌摩擦焊新技术	279
9.2.1 扩散连接的工艺特点	206	10.4 摩擦焊设备	282
9.2.2 扩散连接工艺 参数选择	207	10.4.1 传统摩擦焊设备	282
9.3 常用材料的扩散连接	215	10.4.2 搅拌摩擦焊设备	286
9.3.1 钛合金及其钛铝金属		第11章 超声波焊	290
		11.1 超声波焊基本原理及	

接头形成	290	12.3 常用材料及典型	
11.1.1 焊接原理	290	工件的爆炸焊	323
11.1.2 接头形成机理	291	12.3.1 钛-钢复合板的爆炸	
11.2 超声波焊接工艺	292	焊接	323
11.2.1 工艺特点	292	12.3.2 铝合金-不锈钢管接头的	
11.2.2 超声波焊接头设计	297	爆炸焊接	326
11.2.3 超声波焊参数选择	298	12.3.3 其他材料的爆炸	
11.3 常用材料的超声波焊 ...	302	焊接	328
11.3.1 塑料焊接	302	12.4 爆炸焊的安全性	328
11.3.2 金属材料的焊接	304		
11.4 超声波焊设备	310	第13章 变形焊	330
11.4.1 超声波焊机的型号及		13.1 变形焊概述	330
典型结构	310	13.2 变形焊工艺	332
11.4.2 超声波焊接设备构成		13.2.1 工艺特点	332
及功能	311	13.2.2 冷压焊工艺	333
第12章 爆炸焊	315	13.2.3 热压焊工艺	338
12.1 爆炸焊基本原理	315	13.2.4 超高真空变形焊	
12.1.1 爆炸焊基本类型	315	工艺	338
12.1.2 爆炸焊原理	316	13.3 典型材料及构件	
12.2 爆炸焊工艺	318	的焊接	339
12.2.1 工艺特点	318	13.4 变形焊设备	341
12.2.2 爆炸焊工艺流程	320		
12.2.3 焊接工艺参数选择	321	参考文献	344

绪 论

压焊^①是焊接科学技术的重要组成部分之一,广泛应用于航空、航天、原子能、信息工程、汽车制造等工业部门。统计资料表明,用压焊完成的焊接量,每年约占世界总焊接量的1/3,并有继续增加的趋势。

在压焊(pressure welding)过程中,必须对焊件施加压力(加热或不加热),以完成焊接的方法。

1. 压焊的物理本质

众所周知,焊接过程的本质就是通过适当的物理—化学过程,使两个分离表面的金属原子接近到晶格距离($0.3 \sim 0.5\text{nm}$),形成金属键,从而使两金属连为一体,达到焊接的目的。这一适当的物理—化学过程,在压焊中是通过对接头施加一定的压力而实现的。压力的大小同材料的种类、所处温度、焊接环境和介质等有关,而压力的性质可以是静压力、冲击压力或爆炸力。

在少数压焊过程中(点焊、缝焊等),焊接区金属熔化并同时被施加压力:加热→熔化→冶金反应→凝固→固态相变→形成接头,类似于熔焊的一般过程。但是,由于有压力的作用,提高了焊接接头的质量。

在多数压焊过程中,焊接区金属仍处于固相状态,依赖于在压力(不加热或伴有加热)作用下经过塑性变形、再结晶和扩散等过程而形成接头。这里强调了压力对形成接头的主导作用;但是,对加热可促进焊接过程的进行和更易于实现焊接,也应予以充分注意。因为加热可提高金属的塑性,降低金属变形阻力,显著减小所需压力。同时,加热又能增加金属原子的活动能力和扩散速度,促进原子间的相互作用。例如,铝在室温下其对接端面的变形度要达到60%以上才可以实现焊接(冷压焊),而当对接端面被加热至 400°C 时,则只需8%的变形度就能实现焊接(电阻对焊)。当然,此时所施加的压力亦将大为降低。压力与加热温度之间存在着一定关系,图0-1示意表明,焊接区金属加热的温度越低,实现焊接所需的压力就越大。显然,冷压焊时所需压力为最大,扩散焊时为最小,而熔焊时则不需要压力。一般来说,这种固相焊接接头的质量,主要取决于对口表面氧化膜(室温下其厚度为 $1 \sim 5\text{nm}$)和其他不洁物在焊接过程中被清除的程度,并总是与接头部位的温度、压力、变形和若干场合下的其他因素(如超声波焊接

① 引自 GB/T 3375—1994 焊接术语;本书中所有焊接名词术语除特别注明者外,均引自此国家标准。

时的摩擦、扩散焊时的真空度等)有关。

2. 压焊的分类及发展

依照“族系法”分类规则,根据主要工艺特征,将压焊分为图 0-2 所示十大类组成。然后,进一步根据其他特征(如接头形式、电源种类、加压方式、气体氛围等)又可将每一大类细分为若干小类。例如电阻焊(大类)由以下工艺方法分为:点焊、凸焊、缝焊、对焊、对接缝焊(小类,参见表 1)等;摩擦焊等其他大类方法亦然。

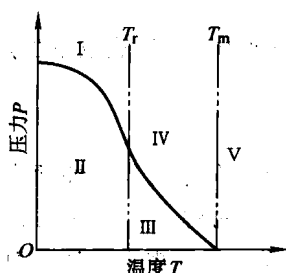


图 0-1 压力与加热温度的关系

I—冷压焊区 II—非焊接区 III—扩散焊区

IV—热压焊区 V—熔焊区 T_m —熔点

T_r —再结晶温度

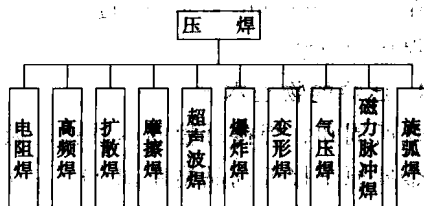


图 0-2 压焊的分类

压焊具有悠久的历史,早在春秋战国时期,我们的先人已经取得以黄泥作助焊剂,用加热锻打的方法把两块金属连接在一起,这就是锻焊——最古老的压焊方法。有明确记载的是 1885 年美国 E·汤姆逊(Elihu Thomson)教授取得的电阻对焊专利及 1886 年生产出第一台电阻对焊机,这是压焊历史的开始。1903 年德国人首先使用了闪光对焊。以后相继诞生了高频感应焊(1928 年,美国)、冷压焊(1948 年,英国)、高频电阻焊(1951 年,美国)、超声波焊(1956 年,美国)、摩擦焊(1957 年,前苏联)、爆炸焊(1963 年,美国),以及其后的旋弧焊、扩散焊、磁力脉冲焊、冰压焊和水击焊等,他们都为焊接科学技术及世界经济的发展作出贡献。

应该指出,随着经济进步和社会发展,新材料、新产品的不断涌现,一些老的压焊方法逐渐退出了焊接领域,如锻焊、冰压焊、水击焊、旋弧焊等,而一些新方法又萌生并迅速发展起来。

搅拌摩擦焊(friction stir welding, FSW)是英国焊接研究所(TWI, UK)1991 年发明的一种新型摩擦焊技术,其原理是利用一种非耗损的特殊搅拌头在待焊界面处搅拌摩擦而形成可靠连接,如图 0-3 所示。FSW 被公认为是 21 世纪最具革命性、突破性的连接新技术。

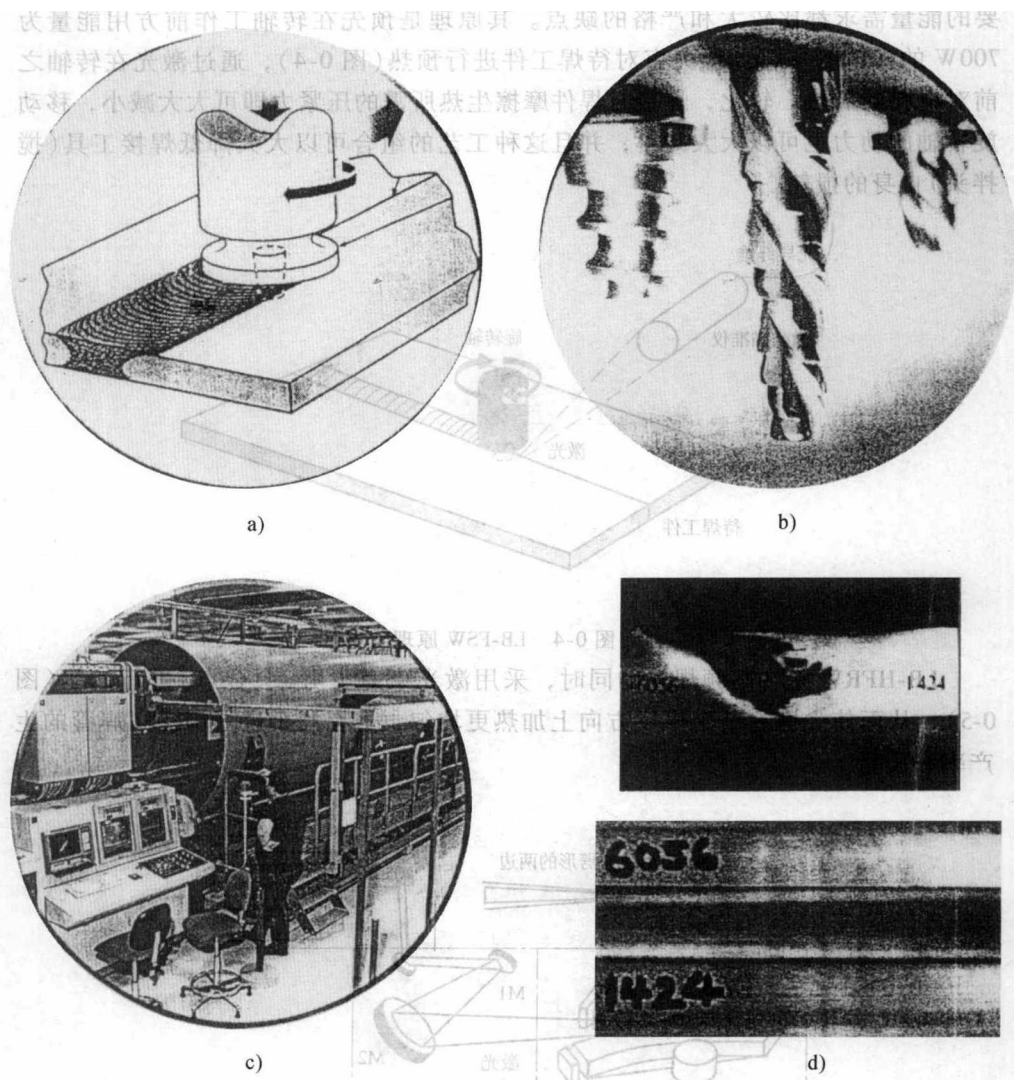


图 0-3 搅拌摩擦焊原理及应用

a) 原理 b) 搅拌头 c) 生产现场 d) AA6056/AA1424(美国)FSW 接头

众所周知,焊接科学技术几乎利用了世上已知的所有热源,同时也在努力寻找提供焊接热源的新方法及更有效、更充分利用热源的方法。20 世纪中期,焊接工作者尝试将各种热源混合应用于同一焊接过程,并在熔焊领域获得成功,其中主要是激光—电弧复合,产生了 LB-TIG、LB-MIG、LB-PAW 等复合焊接工艺。在压焊领域里亦有激光辅助搅拌摩擦焊(LB-FSW)和激光—高频焊(LB-HFRW)等复合焊接工艺。

LB-FSW(2002 年发明)是为了克服 FSW 时对工件夹紧压力和搅拌头转轴需

要的能量需求都比较大和严格的缺点。其原理是预先在转轴工作前方用能量为 700W 的多模 Nd:YAG 激光束对待焊工件进行预热(图 0-4), 通过激光在转轴之前对材料的加热、软化, 焊接时焊件摩擦生热所需的压紧力即可大大减小, 移动旋转轴的动力也可以大大减小, 并且这种工艺的组合可以大大降低焊接工具(搅拌头)自身的损耗。

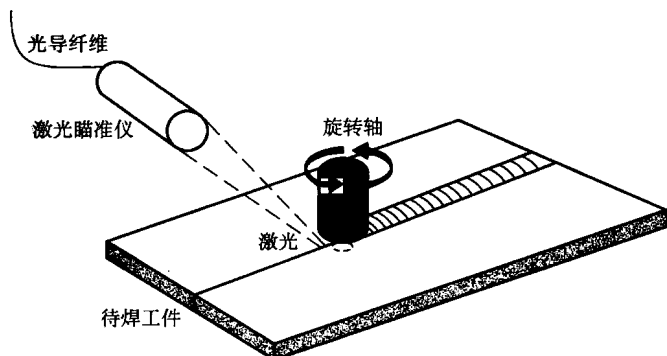


图 0-4 LB-FSW 原理

LB-HFRW 是在高频焊管的同时, 采用激光束对尖劈(会合点)进行加热(图 0-5), 从而使尖劈在整个厚度方向上加热更均匀, 这有利于进一步提高焊管的生产率和质量。

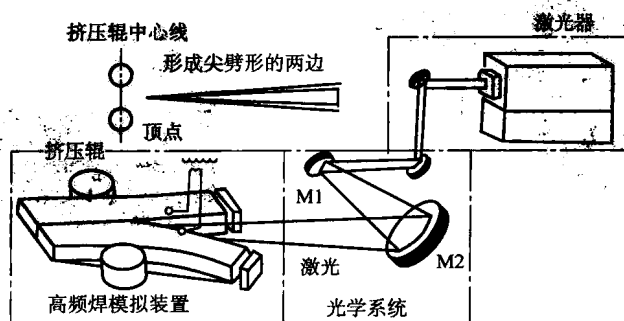


图 0-5 LB-HFRW 示意图

目前, 压焊设备发展很快, 计算机控制的机电一体化高精产品在市场上很容易购置, 这就为压焊技术在工业中的应用创造了良好条件。图 0-6 为用于电阻点焊的国产焊接机器人(沈阳新松机器人自动化股份有限公司生产)。

同时, 由大量焊接机器人(以点焊机器人为主)和计算机控制的自动化焊装设备构成的焊装生产线(图 0-7)代表了汽车车身制造技术的最高水平, 可实现生产方式的多品种、大批量混流生产, 人们所期望的无人化车间, 无人化工厂的时

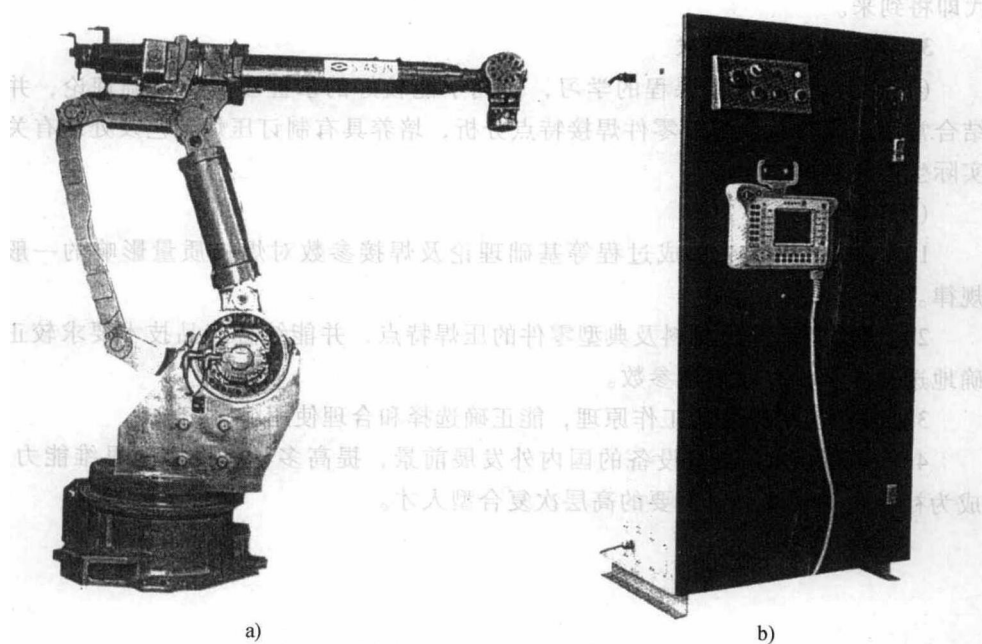


图 0-6 RD120 点焊机器人(未安装点焊钳)

a) 机器人本体 b) 机器人控制器(SIASUN-GRC)

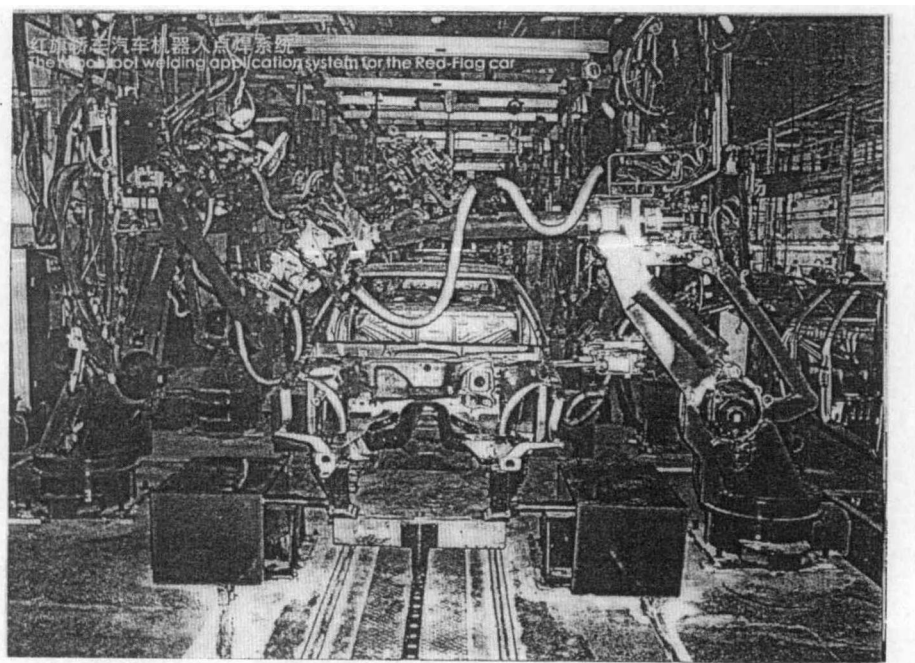


图 0-7 红旗轿车车身焊装生产线

代即将到来。

3. 课程的目的及要求

(1) 目的 通过本课程的学习,使同学能较好的掌握压焊的基础理论,并结合常用金属材料及典型零件焊接特点分析,培养具有制订压焊工艺及处理有关实际生产问题的能力。

(2) 要求

1) 掌握压焊接头形成过程等基础理论及焊接参数对焊接质量影响的一般规律。

2) 了解常用金属材料及典型零件的压焊特点,并能结合产品技术要求较正确地选择压焊设备及焊接参数。

3) 熟悉压焊设备的工作原理,能正确选择和合理使用。

4) 了解压焊方法及设备的国内外发展前景,提高多学科融合的思维能力,成为社会主义市场经济需要的高层次复合型人才。

第1篇 电阻焊方法及设备

电阻焊(resistance welding)，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。

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。电阻焊是一种焊接质量稳定，生产效率高，易于实现机械化、自动化的连接方法，广泛应用于汽车、航空航天、电子、家用电器等领域。据统计，目前电阻焊方法已占整个焊接工作量的1/4左右，并有继续增加的趋势。

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，相关内容见第8章)，其方法原理如图1所示。按焊件的接头形式、工艺方法和采用电源种类的不同，电阻焊可分为多种具体形式，见表1。

表1 电阻焊分类

工 艺 方 法 电 源 种 类		接 头 形 式		搭 接			对 接	
		点焊	凸焊	缝焊	对 焊		对接 缝焊	
					电阻对焊	闪光对焊		
阻焊变压器 一次交变供电	工频(50或60Hz)	●	●	●	●	●	●	
	中频(100~600Hz)			●		● ^①		
	高频(10~500kHz)							●
	低频(3~10Hz)	●	●	●		●		
	二次整流(50或60Hz)	●	●	●	●	●		
	逆变式(600~1600Hz)	●	●	●	●	●		
阻焊变压器 一次单向 供电	电容放电	●	●	●	●	● ^②		
	直流冲击波	●		●				

注：●—表示采用；

①—指矩形波闪光对焊；

②—指冲击闪光焊。

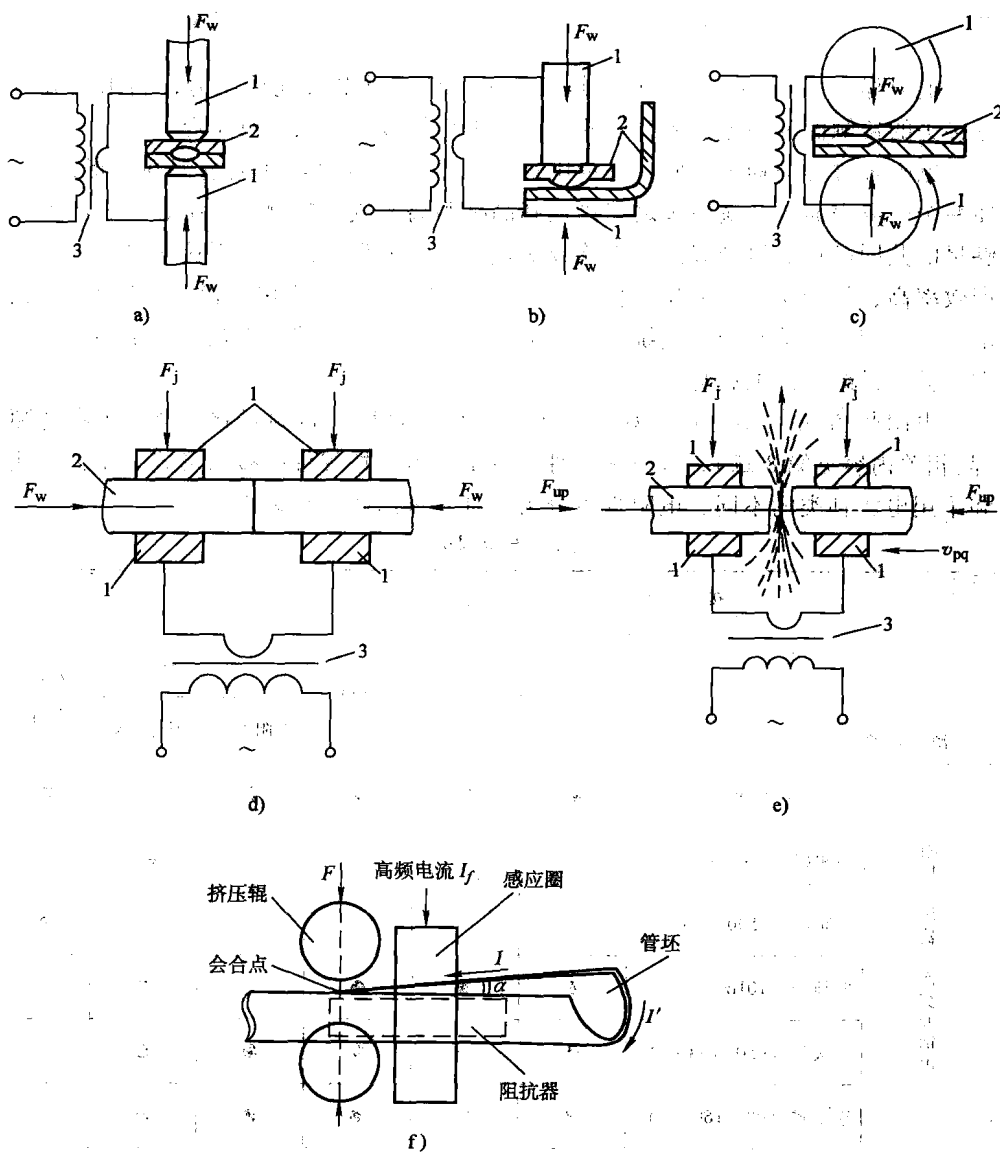


图1 电阻焊方法示意图

a) 点焊 b) 凸焊 c) 缝焊 d) 电阻对焊 e) 闪光对焊 f) 高频对接缝焊(高频感应焊)

1—电极 2—工件 3—阻焊变压器