



高职高专“十一五”规划教材

特种焊接技术

王洪光 主编



化学工业出版社

高职高专“十一五”规划教材

特种焊接技术

王洪光 主编

鲁海龙 程艳艳 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书内容包括摩擦焊、激光焊、电子束焊、扩散焊、冷压焊和热压焊、超声波焊、铝热剂焊、爆炸焊、高频焊和螺柱焊,并介绍焊接自动化方面的知识。从职教特点出发,本书的编写通俗易懂,对于一些较深的理论问题未做过多的论述。为了便于学生在以后的工作中应用,每种焊接方法都列举了许多实际工作实例,更有利于学习和领会。本书具有知识面广、重点突出、实用性强和容易掌握等特点。

本书主要作为高职高专焊接专业的教材,也是机械工程技术人员的技术资料,对于机械行业以外的其他行业,也有相当高的借鉴价值。

图书在版编目(CIP)数据

特种焊接技术/王洪光主编. —北京:化学工业出版社, 2009. 1

高职高专“十一五”规划教材

ISBN 978-7-122-04028-2

I. 特… II. 王… III. 焊接-技术-高等学校: 技术学校-教材 IV. TG456

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 165701 号

责任编辑:高 钰 韩庆利

文字编辑:项 激

责任校对:陈 静

装帧设计:史利平

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装:三河市延风印装有限公司

787mm×1096mm 1/16 印张 14½ 字数 370 千字 2009 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 25.00 元

版权所有 违者必究

前 言

在机械加工中，焊接的地位越来越重要了，并且已经延伸到机械行业以外的其他领域。然而随着工程材料的发展、加工技术的进步和生产形式的变化，对焊接也提出了越来越高的要求，焊接技术也向更高的技术方向发展。近年来，一些特殊的、专用性很强的焊接方法不断出现，使焊接技术的应用更加广泛，生产效率更高，质量更稳定。作为焊接专业的人员，应该掌握或者了解这些特种焊接方法，以利于科学地确定产品的生产工艺。

随着时代的发展，高职高专的学生越来越接近现场，因此，要求高职高专的学生不仅要懂得理论，还要掌握许多操作技能。根据这种形势，我们编写了这套高职高专焊接专业的教材。《特种焊接技术》是这套书中的一本重要的专业教材，主要介绍了摩擦焊、激光焊、电子束焊、扩散焊、冷压焊、热压焊、超声波焊、铝热剂焊、爆炸焊、高频焊、螺柱焊及焊接自动化等焊接技术。本教材力求通俗易懂，同时又兼顾高职高专学生理论方面的需求，将必需掌握的理论讲透，且加强了工艺过程的讲解，完全适用于高职高专院校的教学要求。

现代生产对焊接技术的要求是很高的。从完成焊接来讲，一个焊口可有多种焊接方法。焊接工作者应从诸多的焊接方法中，根据产品的材料、技术要求、批量大小及生产成本等多方面的因素，选择一个效率高、质量好、成本低、易操作的焊接方法应用于生产，以提高产品的市场竞争力。高职高专学生是将来企业生产的技术主力，这就是学习本课程的意义。

本书第一章、第三章、第八章由鲁海龙编写；第二章、第七章由程艳艳编写；第四章由曲晶编写；第十一章由潘涛编写；其余由王洪光编写。由于我们的水平有限，书中难免有些不妥之处，欢迎读者及同行指正。

编 者
2008 年 10 月

目 录

绪论	1	二、激光切割的特点	52
第一章 摩擦焊	3	三、激光切割设备	53
第一节 概述	3	四、激光切割工艺	54
一、摩擦焊原理	3	五、激光切割的应用	59
二、摩擦焊特点	3	第七节 激光安全与防护	60
三、摩擦焊的分类	5	一、激光的危害	60
第二节 摩擦焊设备	11	二、激光的安全防护	60
一、摩擦焊的设备组成	11	复习题	61
二、典型摩擦焊机的技术参数	15	第三章 电子束焊	62
第三节 摩擦焊材料	19	第一节 概述	62
一、影响材料摩擦焊接性的主要因素	19	一、电子束焊的特点	62
二、同种或异种材料的摩擦焊接性	20	二、电子束焊的分类	63
第四节 摩擦焊工艺	21	三、电子束焊的应用	65
一、接头设计与表面准备	21	第二节 电子束焊的设备与装置	66
二、摩擦焊工艺	22	一、电子束焊机的分类及组成	66
三、摩擦焊质量控制	28	二、电子束焊机的技术参数	68
四、摩擦焊的应用	32	第三节 电子束焊的焊接工艺	70
复习题	34	一、焊前准备及接头设计	70
第二章 激光焊	36	二、电子束焊的焊接工艺参数	73
第一节 概述	36	三、获得深熔焊的工艺方法	73
一、激光焊原理及分类	36	四、电子束焊接接头组织	74
二、激光焊的特点及应用	37	第四节 常用金属材料的电子束焊	74
第二节 激光焊设备及装置	39	一、钢铁材料的电子束焊	74
一、激光焊设备的组成	39	二、有色金属的电子束焊	75
二、激光焊设备选用及技术参数	40	三、难焊金属的电子束焊	78
第三节 激光焊的焊接性	40	四、异种材料的电子束焊	79
一、激光焊的焊缝形成特点	40	五、高温合金的电子束焊	82
二、金属的激光焊接性	41	第五节 电子束焊的应用实例	83
第四节 激光焊接工艺及参数	42	一、在电子和仪表工业中的应用	83
一、脉冲激光焊工艺及参数	42	二、在汽车零件中的应用	85
二、连续 CO ₂ 激光焊工艺及参数	44	三、电子束焊的应用前景	85
第五节 典型材料的激光焊	48	第六节 电子束焊的操作及注意事项	85
一、钢的激光焊	48	一、真空系统的操作及注意事项	85
二、有色金属的激光焊	49	二、焊接操作	86
三、高温合金的激光焊	50	三、安全防护	86
四、异种材料的激光焊	50	复习题	87
五、非金属材料的激光焊	51	第四章 扩散焊	88
第六节 激光切割	51	第一节 概述	88
一、激光切割的分类	51	一、扩散焊的原理	88

二、扩散焊的特点	89	三、加压机构	141
三、扩散焊的优缺点	89	四、程序控制器	141
四、扩散焊种类	90	五、超声波焊机的型号及部分国产超声 波点焊机的技术数据	142
五、扩散焊的应用	91	复习题	142
第二节 扩散焊工艺	91	第七章 铝热剂焊	143
一、接头形式	91	第一节 概述	143
二、待焊表面的制备与清理	91	一、铝热剂焊的基本原理	143
三、中间层材料的选择	92	二、铝热剂焊的特点	144
四、止焊剂的应用	93	第二节 铝热剂焊材料	145
五、焊接工艺参数	93	一、铝热焊剂	145
第三节 扩散焊设备	94	二、铸型、坩埚及浇注孔和堵片	145
一、加热系统	94	第三节 铝热剂焊工艺及应用	146
二、加压系统	94	一、铝热剂焊工艺步骤	146
三、保护系统	95	二、铝热剂焊的应用	147
四、典型扩散焊设备	95	三、电气工程中的铝热剂焊	150
第四节 常用材料的扩散焊	97	四、铝热剂焊的修复补焊	151
一、同种材料的扩散焊	97	五、铝热剂焊安全事宜	153
二、异种材料的扩散焊	100	复习题	153
三、陶瓷与金属的扩散焊	107	第八章 爆炸焊	154
复习题	114	第一节 爆炸焊的分类及特点	154
第五章 冷压焊和热压焊	115	一、爆炸焊的分类	154
第一节 冷压焊	115	二、爆炸焊的特点	155
一、冷压焊的工艺特点	115	第二节 爆炸焊原理及结合面形态	156
二、冷压焊的应用	121	一、爆炸焊的基本原理	156
第二节 热压焊	124	二、爆炸结合面形态	157
一、热压焊的分类	124	第三节 爆炸焊工艺	158
二、气压焊	124	一、接头形式与表面清理	158
三、锻焊和滚焊	126	二、爆炸焊的工艺参数	158
四、热压焊的应用	126	三、爆炸焊的工艺安装	162
五、热压焊接头性能与质量控制	130	第四节 爆炸焊的应用及缺陷检验	164
复习题	132	一、爆炸焊的适用范围	164
第六章 超声波焊	133	二、爆炸焊的常见缺陷	167
第一节 概述	133	三、爆炸焊的质量检验	168
一、超声波焊原理	133	四、爆炸焊安全事项	170
二、接头形成机理	134	复习题	171
三、超声波焊分类	134	第九章 高频焊	172
四、优缺点及其应用	135	第一节 概述	172
第二节 超声波焊接工艺	137	一、高频电流的特性	172
一、接头形式	137	二、高频焊的类型	173
二、焊件表面的准备	137	三、高频焊接过程	173
三、焊接工艺参数	138	四、高频焊的优缺点	174
四、其他工艺因素	139	五、高频焊的应用	174
第三节 超声波焊接设备	140	第二节 高频焊设备	175
一、超声波（信号）发生器	141	第三节 高频焊工艺	176
二、超声系统	141		

一、金属管纵缝连续高频焊	176	二、螺柱焊接工艺指导书	198
二、常用金属管子焊接的要点	179	三、螺柱焊接工艺评定过程	200
三、散热片与管的高频焊	180	复习题	200
四、型钢的高频电阻焊	180	第十一章 焊接自动化	201
第四节 短焊缝高频焊	181	第一节 概述	201
复习题	182	一、焊接生产机械化和自动化的必 要性	201
第十章 螺柱焊	183	二、焊接自动化的类型	201
第一节 概述	183	三、焊接自动化发展	201
第二节 电弧螺柱焊	184	第二节 焊接自动化装备的组成	202
一、焊接过程	184	一、送丝机构	202
二、电弧螺柱焊材料	185	二、焊接方向上的行走机构	203
三、电弧螺柱焊设备	186	三、摆动机构	205
四、电弧螺柱焊工艺	188	四、自动调节机构	205
第三节 电容储能螺柱焊	189	五、中心控制系统	206
一、电容储能螺柱焊的分类	189	六、送料机构	206
二、电容储能螺柱焊的设备	190	七、机械手	206
三、电容储能螺柱焊工艺	191	八、装卡机构	207
四、电容储能螺柱焊的焊接材料及 结构	193	九、焊接变位机械	207
第四节 其他螺柱焊方法	195	第三节 焊接自动机	207
一、短周期螺柱焊	195	第四节 焊接中心	209
二、埋弧螺柱焊	195	第五节 焊接生产线	212
三、电阻螺柱焊	195	第六节 焊接机器人	215
第五节 螺柱焊方法的选择与应用	196	一、焊接机器人的优点及其应用意义	215
一、各种螺柱焊方法的区别	196	二、工业机器人的构成与分类	216
二、螺柱焊方法的选择	196	三、焊接机器人的主要技术指标	217
三、螺柱焊的优点	197	四、点焊机器人	218
四、螺柱焊的应用局限性	197	五、弧焊机器人	221
第六节 螺柱焊的工艺评定与工程验收	197	复习题	224
一、螺柱焊接工程的验收	197	参考文献	225

绪 论

在诸多焊接方法中，应用最普遍的是熔焊，如焊条电弧焊、埋弧自动焊、各种气电焊及电渣焊。压焊中，电阻焊的应用也比较普遍，如汽车生产中的点焊和缝焊，以及机械零件生产中的对焊和闪光对焊。钎焊在生产中应用也比较广泛，本书所介绍的特种焊接不包括以上这些焊接方法。

什么是特种焊接呢？本书所介绍的特种焊接其原理仍在这三类焊接方法之中，不过是专门用于某些特殊场合的焊接方法，这些焊接方法专用性强，生产效率较高，自动化程度也较高。

属于熔焊的特种焊接方法有：

(1) 激光焊 激光是一种能量极其集中的能源，在电子工业上的光刻技术、军事上的激光瞄准、信息技术上的激光扫描，这些都是小能量激光的应用。在机械加工上，激光打孔、激光热处理和激光焊接则需要大能量的激光源。利用激光这个能量高度集中的能源，加之自动化的焊接辅助设备构成的激光焊，是更高效、更优质的熔焊技术。

(2) 电子束焊 通过大量的电子轰击金属表面会产生大量的热，这种物理现象早已被物理学所证实。然而使大量的电子集中轰击一点，则是一个能量高度集中的焊接能源。用这种能源熔化金属进行焊接就是电子束焊。它有效率高、质量好、可焊的金属种类多的优点。

(3) 铝热剂焊 铝是一种化学性质很活泼的金属。在剧烈氧化时会产生大量的热，利用这个热量也能完成焊接，这就是铝热剂焊。

(4) 螺柱焊 螺柱焊是电弧焊的一个延伸。在生产实践中，人们发现将螺柱栽到金属上的操作较多，而用通用的焊接方法焊接螺柱，效率低且质量不稳定。但通过改造焊机，再特制一个焊枪和与焊枪能够密切吻合的焊钉，则可在瞬间将焊钉焊在钢板上，其效率之高、质量之好是传统的电弧焊方法所不能比拟的。但螺柱焊是熔焊还是压焊还有待于研究，它既有熔化又有加压，不过所加的压力不大。

属于压焊的方法有：

(1) 摩擦焊 通过机械设备使被焊金属的焊接部位剧烈摩擦，使金属达到红软状态，再加以适当的压力就能使两块金属连接到一起，这就是摩擦焊。用摩擦焊对接圆管或圆棒效率高，质量又好。

(2) 扩散焊 在一定的温度下，金属内部的原子能够扩散，对于合金来说，扩散能使成分逐渐均匀。在两块金属的界面上，如果能够紧密接触，在一定的温度下，界面上的金属也能相互扩散，通过一定的时间，扩散将会使两块金属合二而一，这就是扩散焊。扩散焊不仅能焊接同种金属，也能焊接异种金属，还能焊接金属与非金属。

(3) 超声波焊 超声波的能量不是很大，但在金属中的传播能力则很强。利用超声波的能量进行焊接就是超声波焊。这种焊接方法不仅能焊接金属，还能焊接塑料等非金属。

(4) 爆炸焊 炸药的爆炸能量是巨大的，利用炸药爆炸的能量进行焊接，这就是爆炸焊。不过爆炸焊的炸药用量需要科学地计算。利用爆炸焊能焊接面积很大的焊缝，当然不是普通的对接焊缝了。

(5) 高频焊 高频焊是电阻焊的一个延伸，电阻焊是电流通过两焊件时，在接触点上产

生大量的热用以完成焊接，这个热量来自于电流通过接触电阻做的功。如果用高频电流进行电阻焊，便可以焊接长直的对接焊缝。比较典型的就高频焊管。

特种焊接方法是焊接技术发展的重要阶段。这些焊接方法有的采用了新的能源，如激光焊是以激光作为焊接能源，电子束焊是以聚焦的电子束作为能源，超声波焊则是以超声波为能源；有的则采用了新的技术，如螺柱焊的焊机上应用了现代的电子程序开关。有的则是在原有焊接原理上的发展，如扩散焊是通过创造更有利于金属界面扩散的条件，使其充分扩散以完成焊接；冷压焊则是通过研究发现，只要施加足够的压力，许多金属都能只靠加压即可焊在一起。经过认真分析各种材料的特性，并进行大量的实验，得出了多种金属冷压焊时所需的压力，形成了冷压焊的技术和理论。其实增加了压力也是提供了金属界面充分扩散的条件。

第一章 摩 擦 焊

第一节 概 述

摩擦焊 (friction welding) 是在轴向压力与转矩作用下, 利用焊接接触面之间的相对运动及塑性流动所产生的摩擦热及塑性变形热, 使被焊接面的金属达到热塑化状态, 通过两侧材料间的相互扩散和动态再结晶实现连接的一种焊接方法。

早在 1956 年, 人类就发明了摩擦焊, 随着现代工业的发展, 新材料的大量出现, 摩擦焊得到了广泛的发展及前所未有的关注。自 1991 年英国焊接研究所 (the welding institute, TWI) 发明了搅拌摩擦焊 (friction stir welding, FSW) 以来, 摩擦焊技术在以往的连续驱动摩擦焊、惯性摩擦焊等的基础上又前进了一步, 已经在航空航天、石油钻探、切削刀具、汽车制造、核能开发等高新技术领域及产业部门得到广泛的应用。

一、摩擦焊原理

在相对摩擦的条件下, 结合面的氧化膜或其他污染层首先被破坏, 同时摩擦产生的摩擦热及塑性变形热使得结合面很快形成热塑化层, 然后, 在轴向压力和摩擦转矩作用下, 已破碎的氧化物和部分塑化层被挤出结合面而形成飞边, 最后剩余的热塑化金属构成焊缝金属, 在一段时间的顶锻压力作用下使焊缝金属获得进一步锻造, 形成了质量良好的焊接接头。

在压力作用下, 被焊界面通过相对运动进行摩擦时, 机械能转变为动能, 所产生的摩擦加热功率 (N) 为:

$$N = \mu k P V \quad (1-1)$$

式中 μ ——摩擦因数;

k ——系数;

P ——摩擦压力;

V ——摩擦相对运动速度。

对于给定的材料, 在足够的摩擦压力和摩擦相对运动速度条件下, 伴随着摩擦过程的进行, 被焊材质温度不断上升, 工件亦产生一定的变形量, 在适当的时刻, 停止工件间相对运动, 同时施加较大的顶锻力并维持一定的时间, 即可实现材质间的连接。

二、摩擦焊特点

1. 摩擦焊优点

(1) 接头质量高 摩擦焊属于固态焊接, 正常情况下, 材料间焊接界面不发生熔化, 焊合区金属为锻造组织, 不产生与材料熔化和凝固相关的焊接缺陷, 如气孔、夹杂和合金偏析等; 被焊材料在热、压力与转矩的综合力学作用下获得的冶金效应使得晶粒细化、组织致密、夹杂物弥散分布。摩擦焊不仅连接质量高, 而且性能好。图 1-1 所示为典型的摩擦焊接头。

(2) 适于各类同种或异种材质的连接 摩擦焊不仅可以焊接同种钢, 还可以焊接常温和高温力学、物理性能差别很大的异种钢和异种合金, 甚至可以将金属和非金属焊接起来, 如

铝和陶瓷的焊接。

对于通常认为不可组合的金属材料,如铝-钢、铝-铜、钛-铜以及镍合金和钢材料等都可进行焊接。一般来说,凡是可以进行锻造的金属材料都可以进行摩擦焊接,包括汽车用的阀门合金材料、马氏体时效钢、工具钢、合金钢以及钛合金。

此外很多铸造材料、粉末金属材料以及金属基复合材料都具有摩擦焊接性,图 1-2 所示的即为用摩擦焊连接的铜-铝电器接插件。

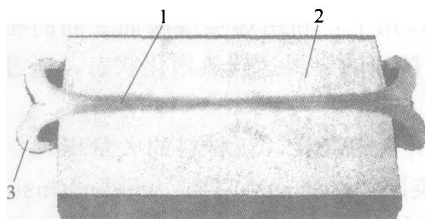


图 1-1 典型的摩擦焊接头
1—摩擦焊缝；2—热影响区；3—焊瘤（飞边）

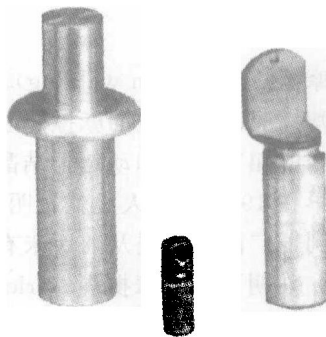


图 1-2 摩擦焊连接的铜-铝电器接插件

(3) 生产效率高 摩擦焊控制参数少,焊接过程简单,生产效率高(通常比其他焊接方法快 1~100 倍),非常适合批量化工业产品的生产。

此外,摩擦焊工艺对工件的焊接面要求较低,通常机械加工、锯割甚至剪切的表面也能够满足焊接需要,可减少焊前工件的准备时间。

(4) 焊接尺寸精度高、成本低 摩擦焊可以实现高精度的焊接,例如,用摩擦焊生产的柴油发动机预燃烧室,全长误差 $\pm 0.1\text{mm}$;专用机可保证焊后的长度公差为 $\pm 0.2\text{mm}$,偏心度为 0.2mm 。摩擦焊接不需要填充材料和保护气体(除钛合金外),工件焊接余量小,焊前不需特殊清理,焊接接头有时不需去飞边,与电弧焊相比,成本可降低 30% 左右。

(5) 设备易于机械化、自动化,操作简单 摩擦焊接过程中往往需要对焊接接头施加较大的焊接压力,难以实现手工焊接,因此只有采用机械化设备施加压力才能满足要求;此外,摩擦焊机具有较强的通用性,可以焊接不同形状、不同材质和不同尺寸的工件,较易实现自动化。

摩擦焊过程一般由机器控制,操作人员只需设定工艺参数即可,因此避免了人为因素造成的焊接缺陷,而且焊接质量不依赖于操作人员的专业技术水平。

(6) 节能、环保 摩擦焊设备多数采用三相交流电,其耗电量仅为闪光焊机的 8%~10%,电能节约 5~10 倍以上,功率消耗仅为传统焊接工艺的 20%。另外,摩擦焊不需要填充金属和保护气体(钛合金除外),因此焊接时不产生烟雾、弧光及其他有害气体,对人体伤害小,无环境污染。

2. 摩擦焊的缺点与局限性

① 旋转摩擦焊仅适合焊接高强度回转体构件,焊件必须依靠旋转摩擦进行焊接,接头形式和工件断面形式受限,对非圆形截面零件、盘状工件和薄壁管件焊接较困难。

受摩擦焊机功率和压力的限制,旋转摩擦焊不能焊接断面较大的工件,目前可焊接工件的最大断面为 200cm^2 。

搅拌摩擦焊仅适合轻合金（铝、镁合金等）材料的对接和搭接，对于高强度材料如钢钛合金以及粉末冶金材料的焊接则较困难。

② 对于盘状薄零件、薄管件和筒形件，不易装夹，较难施焊，因此对工装夹具要求较高；有时焊接接头的飞边是多余和有害的，要求增加清理工序，增加了成本。

此外，摩擦焊设备相对较为复杂，焊机的一次性投资较大，只有大批量生产时才能降低成本。

三、摩擦焊的分类

根据被焊工件的相对运动和工艺特点，摩擦焊可以分为以下几类（图 1-3）。

1. 连续驱动摩擦焊

连续驱动摩擦焊是现代工业制造中常用的一种焊接方法。焊接过程一般由旋转、摩擦、焊接、顶锻、维持等程序组成。

如图 1-4 所示，在连续驱动摩擦焊接过程中，其中一个工件被固定在直接驱动的旋转夹具内，另外一个工件在移动夹具内，工件被夹紧后，移动夹具向被焊工件旋转端移动，移动至一定距离后，旋转夹具内的工件在驱动电动机的带动下以设定的转速旋转，工件相互接触后开始摩擦生热；达到设定时间或者缩短量后，旋转驱动停止，施加制动力或者通过焊件本身摩擦阻力使工件停止旋转，同时施加顶锻压力并维持一定时间；然后旋转夹具松开，被焊工件与移动夹具一起后退，到达焊接起始位置时移动夹具松开，取出工件，检查合格后结束焊接。图 1-5 为焊接接头的金属流变结构。

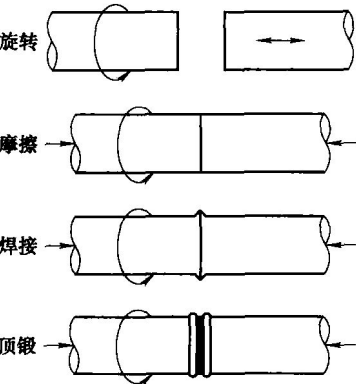


图 1-4 连续驱动摩擦焊

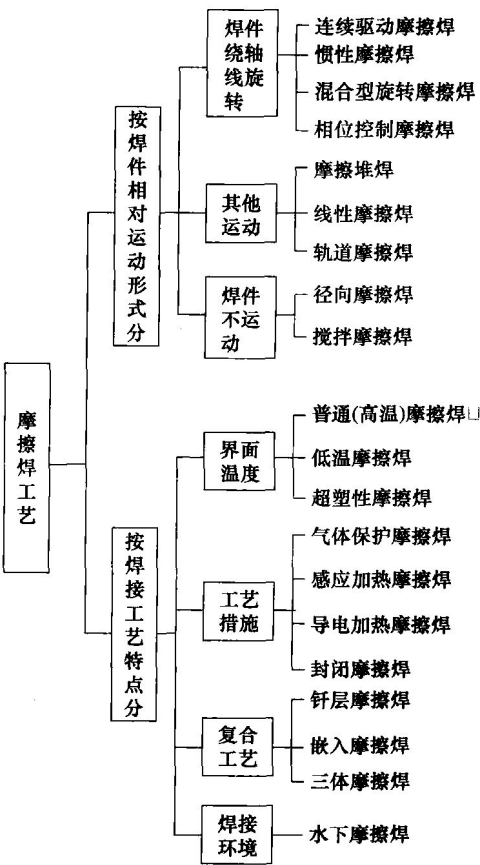


图 1-3 摩擦焊的分类



图 1-5 连续驱动摩擦焊接头金属流变结构

连续驱动摩擦焊按其操作方法不同又可分为以下几种形式。

(1) 普通型 [图 1-6 (a)] 一个焊件旋转而另一焊件保持不动，是最常见的一种。

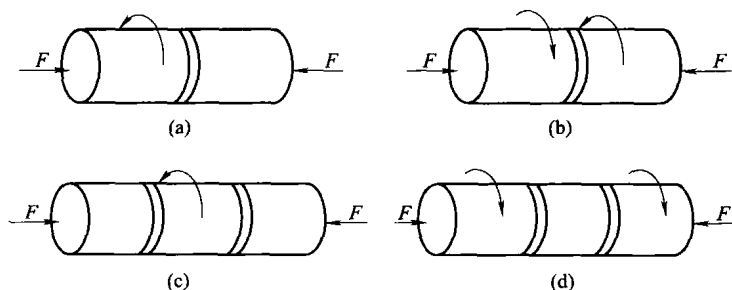


图 1-6 连续驱动摩擦焊的不同形式

(2) 两焊件异向旋转型 [图 1-6 (b)] 两焊件都旋转，但方向相反，此法是为了提高工件摩擦焊接的相对转速，适用于焊接小直径焊件，这种小直径焊件焊接需要很高的相对转速。

(3) 中间件旋转型 [图 1-6 (c)] 在两个不旋转的焊件之间，镶入一个焊接时可旋转的中间短件。此法适用于焊接两根很长的焊件或焊件的形状难于或不可能旋转的场合。

(4) 焊件在中间件两头同向旋转型 [图 1-6 (d)] 两旋转的焊件顶在静止的中间焊件上，中间焊件可能是长焊件或不能旋转的焊件。

连续驱动摩擦焊与其他旋转摩擦焊相比较具有以下优点：

① 焊接实心工件时所需要的焊接力较小，可以在相同顶锻压力的设备上焊接尺寸更大的零件。

② 焊接实心工件时可以采用较低的转速。

③ 如果在焊接循环结束时使用制动器（刹车装置），则可以减小焊接转矩，从而降低对夹具的要求。

④ 焊接长度控制和角度控制精确，能够实现定位（相位）焊接。

⑤ 焊接不同零件时不需更换飞轮等。

2. 惯性摩擦焊

惯性摩擦焊是摩擦焊工艺中较典型的一种，其焊接时所需要的能源主要由焊机飞轮储存的旋转动能提供。惯性摩擦焊的焊接过程如图 1-7 所示，由飞轮旋转储能、工件摩擦加热、顶锻焊接等程序组成。

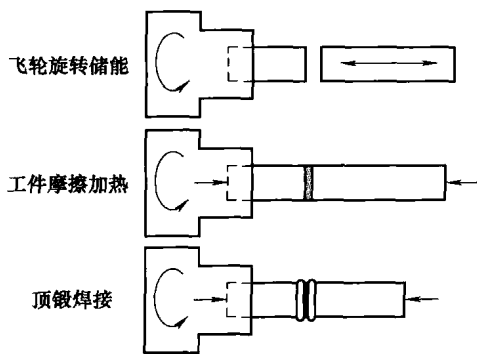


图 1-7 惯性摩擦焊的焊接过程

惯性摩擦焊开始前，将被焊工件分别装入焊机的飞轮旋转端和固定滑移端；焊接开始时，将飞轮和旋转工件加速到预定速度，然后飞轮与动力源（一般为主驱动电动机或液压马达）脱开，滑移端工件向前移动，当工件接触后，两焊接端面开始摩擦加热；随着飞轮转速逐渐降低，当转速到达一定时，开始对被焊接工件实施顶锻，并保持一定时间后，飞轮夹持端松开，滑移端后退并松开工件，焊接过程结束。

惯性摩擦焊优点（与其他摩擦焊方法比较）：

① 惯性摩擦焊接头热影响区较窄。

② 焊接时间相对较短。

③ 在惯性摩擦焊的焊接循环结束时，焊缝承受的巨大转矩使焊缝产生的螺旋形变和热扩散作用（摩擦焊接头螺旋形变流线见图 1-8）有助于提高焊缝强度。

④ 惯性摩擦焊只有两个控制参数：焊接能量（飞轮转速）和焊接压力，而且飞轮转速可以在发出焊接开始信号前加以监控，因此在实际焊接过程中只需要监控一个参数，容易实现精确控制。

⑤ 对于大多数焊接材料及几何形状来说，参数可以预先计算，而且这种焊接工艺参数可以进行数学比例放大（即利用小样件来研制大型结构件）。

⑥ 惯性摩擦焊不需要离合器和制动器，可以制造出超大型惯性摩擦焊设备。目前世界上顶锻力最大设备为美国MTI公司制造的2250t惯性摩擦焊机。

⑦ 由于焊接能量几乎全部消耗在焊缝界面上，所以可以通过测量主轴转速的变化率来间接测量出摩擦焊接转矩。



图 1-8 典型的惯性摩擦焊接头螺旋形变流线

3. 混合型旋转摩擦焊

混合型旋转摩擦焊是连续驱动摩擦焊和惯性摩擦焊的组合，这种焊接方法的特点是动力源采用直流或交流变速驱动，焊接时将部分动能储存在飞轮内，焊接过程配有比例液压伺服控制，通过控制减速时间和顶锻压力上升时间，使焊接压力平稳地上升或下降，可以得到近似于惯性摩擦焊、连续驱动摩擦焊以及介于惯性摩擦焊和传统连续驱动摩擦焊之间的焊接接头。

对于混合型旋转摩擦焊，可以用同一吨位的焊机焊接更大的工件，对于不同的工件也不需要频繁地更换储能飞轮。

4. 相位控制摩擦焊

相位控制摩擦焊也称相位摩擦焊。普通摩擦焊在停车顶锻以后，两个焊件的焊接相位是不能控制的。但是对于一些有相位配合要求的焊接工件，如六方钢、八方钢和汽车操纵杆等，焊后要求棱边对齐、方向对正或相位满足设计要求。因此，在摩擦焊推广过程中研究出了相位摩擦焊。实际应用的主要有三种类型：机械同步相位摩擦焊、插销配合相位摩擦焊和同步驱动相位摩擦焊。

(1) 机械同步相位摩擦焊 图 1-9 为机械同步相位摩擦焊机的结构，其主要焊接程序为：焊接之前压紧校正凸轮→夹持工件→调整两工件相位→对静止主轴制动→松开校正凸轮→焊接开始→摩擦焊接→断电并对驱动主轴制动→在主轴接近停止转动前松开制动器→主轴局部回转→立即压紧校正凸轮，工件间的相位得到保证→顶锻→完成焊接。

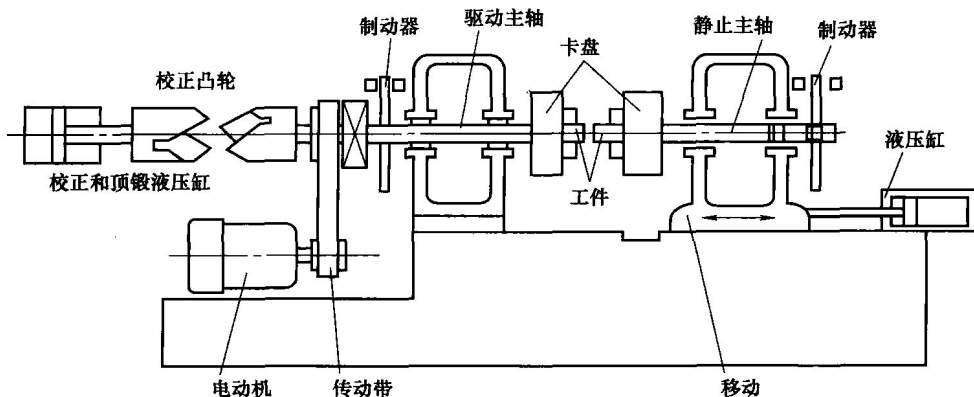


图 1-9 机械同步相位摩擦焊机的结构

(2) 插销配合相位摩擦焊 图 1-10 是插销配合相位摩擦焊工作原理图, 其相位控制机构由插销、插销孔和相位控制系统组成。

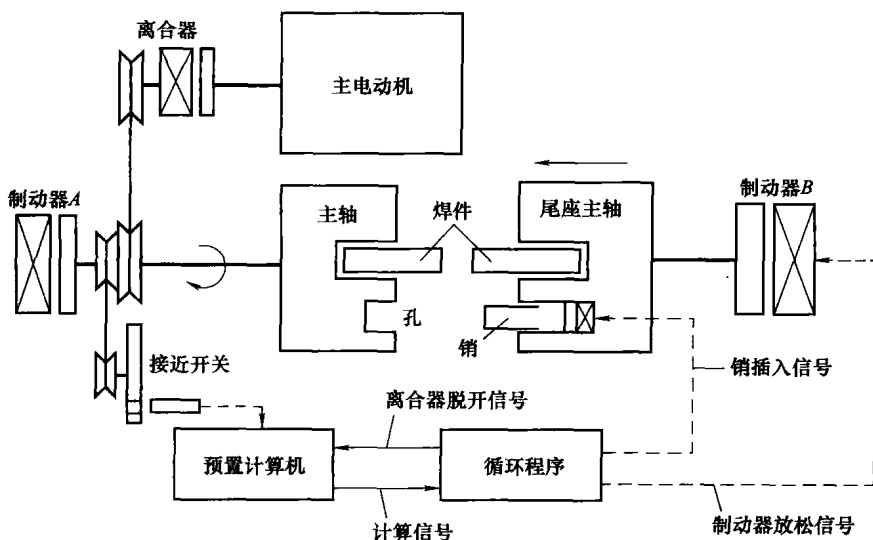


图 1-10 插销配合相位摩擦焊的工作原理图

插销位于尾座主轴上, 尾座主轴可自由转动, 摩擦加热过程中, 制动器将其固定, 加热过程结束时, 制动主轴, 控制系统检测到主轴进入最后一转时, 给出信号, 使插销进入插销孔, 与此同时, 松开尾座主轴的制动器, 使尾座主轴能与主轴一起转动, 这样既可保证相位, 又可防止插销进入插销孔时引起冲击, 从而实现相位控制摩擦焊。

(3) 同步驱动相位摩擦焊 图 1-11 为同步驱动相位摩擦焊工作原理图。焊接过程中, 为了保证轴管两端旋转轴间的相位关系, 两旋转主轴夹头通过齿轮、同步连杆做同步旋转运动, 在整个焊接过程中两旋转轴的相位关系一直保持不变。

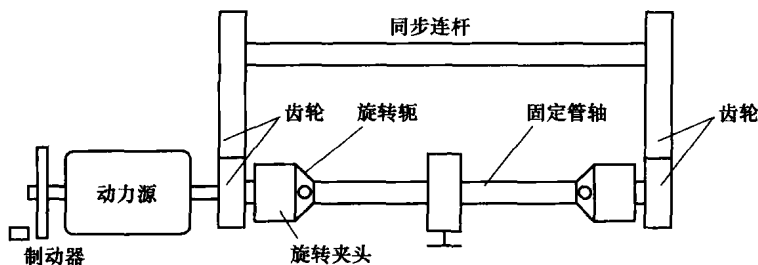


图 1-11 同步驱动相位摩擦焊工作原理图

5. 径向摩擦焊

径向摩擦焊主要应用对象为厚壁板管件现场装配对接, 其工作原理如图 1-12 所示, 焊接时将被焊两管件端部开坡口, 相互对好并夹牢, 然后在接头坡口中放入一个成分与管件相似的整体圆环, 该圆环有内锥面, 焊前应使内锥面与坡口底部首先接触, 焊接时, 焊件静止, 圆环高速旋转并向两管端加径向摩擦压力。当摩擦加热结束, 停止转动圆环, 并向圆环施加顶锻压力而与两管端焊牢。径向摩擦焊接时, 被焊管本身不转动, 管子内部由于有芯棒支撑, 不产生飞边。

6. 摩擦堆焊

摩擦堆焊主要应用在圆形零件表面实现特性材料堆焊, 其工作原理如图 1-13 所示。

堆焊时，堆焊零件（被焊接件）在压力的作用下以高速旋转，堆焊零件（母材）也同时以焊接速度旋转，在压力的作用下，圆棒和被焊接零件摩擦生热，使堆焊圆棒材料热塑化，并且过渡到堆焊零件上形成堆焊焊缝。

7. 线性摩擦焊

线性摩擦焊的原理是两个工件相对线性摩擦使工件表面热塑化，结合工件间的相互挤压锻造，在热和压力的联合作用下形成固相连接接头。

图 1-14 为线性摩擦焊原理示意图。线性摩擦焊的主要优点是不论工件是否对称，只要待焊接面相互接触，就可以进行线性摩擦焊接。

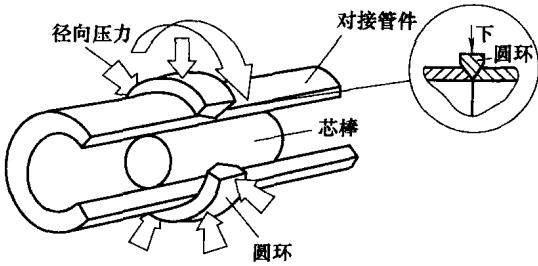


图 1-12 径向摩擦焊工作原理图

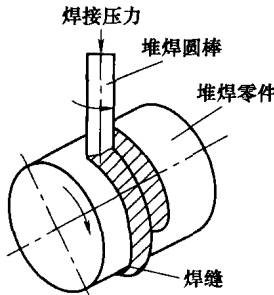


图 1-13 摩擦堆焊工作原理图

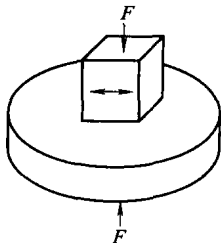


图 1-14 线性摩擦焊原理示意图

8. 轨道摩擦焊

轨道摩擦焊的原理为两个待焊工件在压力的作用下，沿着一定的轨迹做摩擦运动，当焊接时间或缩短量达到预定值时，两工件在顶锻压力作用下实现焊接。

图 1-15 是轨道摩擦焊示意图，其中，图 (a)~(d) 依次表示两工件沿圆形轨迹摩擦运动的过程示意，焊接过程中两个工件都不旋转，仅其中一个工件绕另一个工件转动，轨道摩擦焊主要应用于有相位控制要求的非圆截面工件的焊接。

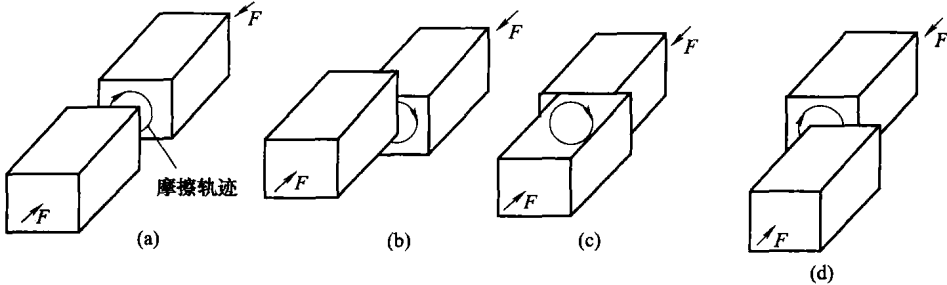


图 1-15 轨道摩擦焊示意图

9. 搅拌摩擦焊

搅拌摩擦焊接是由英国焊接研究所针对铝合金、镁合金等轻质有色金属开发的一种新型固相连接技术，具有焊接变形小，无裂纹、气孔、夹渣等常见焊接缺陷，使得以往通过传统熔焊方法无法实现焊接的材料通过搅拌摩擦焊技术得以实现连接。

搅拌摩擦焊不需要填充材料和保护气体，能耗低，对环境无污染，是一种理想的绿色连接技术。与熔焊相比，具有一系列的优点：焊接变形小；焊缝金属力学性能好；工作环境好；搅拌头属于非消耗性材料；操作简便；氧化皮可以自动去除；设备结构简单，易于实现自动焊接和机器人焊接；可用于焊接裂纹敏感性较高的合金材料。

搅拌摩擦焊主要是利用一个非耗损的搅拌头旋转着插入被焊接工件，当搅拌头的肩部和被焊接工件的表面接触时，由于搅拌针和搅拌肩与被焊接材料的摩擦生热，使搅拌针附近的材料热塑化，热塑化的金属在搅拌头的旋转、摩擦作用下，逐渐由前部向后部转移，当搅拌头向前移动时，在搅拌头轴肩的挤压、锻造作用下，形成致密的固相扩散连接接头。

搅拌摩擦焊原理如图 1-16 所示。搅拌摩擦焊使用的搅拌头一般由搅拌针、搅拌肩和夹持轴组成，搅拌针带有特殊设计的形状和螺纹，其作用主要是通过摩擦使被焊接材料热塑化，并且促使热塑化金属合理转移和过渡；搅拌肩的主要作用是对塑化后的金属施加拘束和锻造，并向焊缝提供部分摩擦热。

10. 嵌入摩擦焊

嵌入摩擦焊的原理是将较硬的材料旋转着嵌入到较软的材料中，通过二者相对运动产生的摩擦热使较软材料热塑化，较软材料的高温塑性层在压力的作用下填入预先加工好的较硬材料的凹区中，从而形成接头。

图 1-17 为嵌入摩擦焊的原理图，这种连接方法多用于电力、真空、低温等领域的过渡接头。

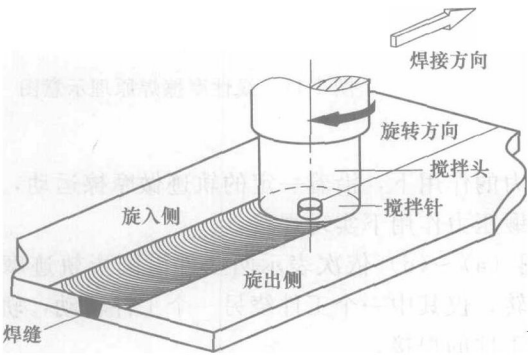


图 1-16 搅拌摩擦焊原理图

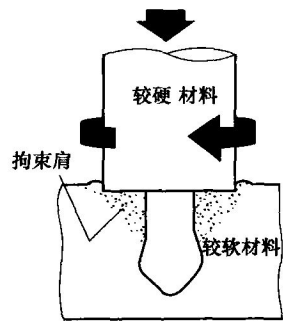


图 1-17 嵌入摩擦焊的原理图

11. 三体摩擦焊

对于难以焊接的材料组合，如陶瓷-陶瓷、金属-陶瓷、热固性塑料-热塑性塑料基复合材料等，可以利用三体摩擦焊方法形成高强度接头。三体摩擦焊的原理如图 1-18 所示。低熔点的第三种物质在轴向压力和转矩作用下，在被连接部件之间的间隙中摩擦生热并产生塑性变形。相对摩擦运动可以产生足够的清理效果，因而不需要焊剂和保护气氛。冷却后，第三体材料固化，从而把两个部件锁定形成可靠接头。

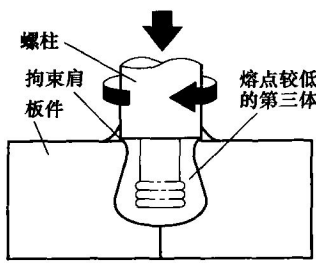


图 1-18 三体摩擦焊的原理图

12. 其他摩擦焊方法

(1) 封闭摩擦焊 封闭摩擦焊主要用于高温机械强度差异大的异种金属，如铜-不锈钢、高速钢-45 钢的连接。为了防止高温时低强度材料的变形流失，同时，为了有利于提高摩擦压力和加热功率，往往在高温强度低的材料一面附加一