

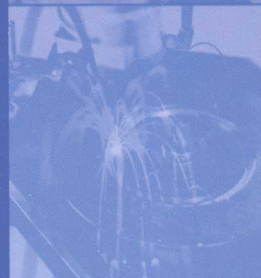
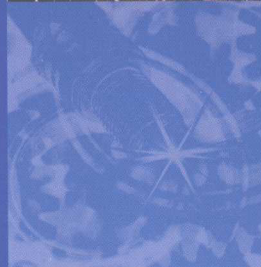
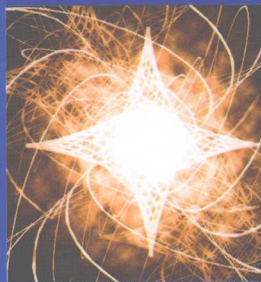


国际机械工程先进技术译丛

先进焊接方法与 技术

**Advanced Welding Processes
Technologies and
Process Control**

(英) John Norrish 著
史清宇 陈志翔 王学东 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际机械工程先进技术译丛

先进焊接方法与技术

(英) John Norrish 著

史清宇 陈志翔 王学东 译



机械工业出版社

译丛序言

一、制造技术长盛永恒

先进制造技术是20世纪80年代提出的，它由机械制造技术发展而来，通常可以认为它是将机械、电子、信息、材料、能源和管理等方面的技术，进行交叉、融合和集成，综合应用于产品全生命周期的制造全过程，包括市场需求、产品设计、工艺设计、加工装配、检测、销售、使用、维修、报废处理、回收利用等，以实现优质、敏捷、高效、低耗、清洁生产，快速响应市场的需求。因此，当前的先进制造技术是以产品为中心，以光机电一体化机械制造技术为主体，以广义制造为手段，具有先进性和时代感。

制造技术是一个永恒的主题，与社会发展密切相关，是设想、概念、科学技术物化的基础和手段，是所有工业的支柱，是国家经济与国防实力的体现，是国家工业化的关键。现代制造技术是当前世界各国研究和发展的主题，特别是在市场经济高度发展的今天，它更占有十分重要的地位。

信息技术的发展并引入到制造技术，使制造技术产生了革命性的变化，出现了制造系统和制造科学。制造系统由物质流、能量流和信息流组成，物质流是本质，能量流是动力，信息流是控制；制造技术与系统论、方法论、信息论、控制论和协同论相结合就形成了新的制造学科。

制造技术的覆盖面极广，涉及机械、电子、计算机、冶金、建筑、水利、电子、运载、农业以及化学、物理学、材料学、管理科学等领域。各个行业都需要制造业的支持，制造技术既有普遍性、基础性的一面，又有特殊性、专业性的一面；制造技术既有共性，又有个性。

我国的制造业涉及以下三个方面的领域：

- 机械、电子制造业，包括机床、专用设备、交通运输工具、机械设备、电子通信设备、仪器等；
- 资源加工工业，包括石油化工、化学纤维、橡胶、塑料等；
- 轻纺工业，包括服装、纺织、皮革、印刷等。

目前世界先进制造技术沿着全球化、绿色化、高技术化、信息化、个性化和服务化、集群化六个方向发展，在加工技术上主要有超精密加工技术、纳米加工技术、数控加工技术、极限加工技术、绿色加工技术等，在制造模式上主要有自动化、集成化、柔性化、敏捷化、虚拟化、网络化、智能化、协作化和绿色化等。

二、图书交流渊源流长

近年来,国际间的交流与合作对制造业领域的发展、技术进步及重大关键技术的突破起到了积极的促进作用,制造业科技人员需要及时了解国外相关技术领域的最新发展状况、成果取得情况及先进技术应用情况等。

必须看到,我国制造业与工业发达国家相比,仍存在较大差距。因此必须加强原始创新,在实践中继承和创新,学习国外的先进制造技术和经验、引进消化吸收创新,提高自主创新能力,形成自己的创新体系。

国家、地区间的学术、技术交流已有很长的历史,可以追溯到唐朝甚至更远一些,唐玄奘去印度取经可以说是一次典型的图书交流佳话。图书资料是一种传统、永恒、有效的学术、技术交流方式,早在20世纪初期,我国清代学者严复就翻译了英国学者赫胥黎所著的《天演论》,其后学者周建人翻译了英国学者达尔文所著的《物种起源》,对我国自然科学的发展起到了很大的推动作用。

图书是一种信息载体,图书是一个海洋,虽然现在已有网络、光盘、计算机等信息传输和储存手段,但图书更具有广泛性、适应性、系统性、持久性和经济性,看书总比在计算机上看资料要方便习惯,不同层次的要求可以参考不同层次的图书,不同职业的人员可以参考不同类型的技术图书,同时它具有比较长期的参考价值和收藏价值。当然,技术图书的交流具有时间上的滞后性,不够及时,翻译的质量也是个关键问题,需要及时、快速、高质量的出版工作支持。

机械工业出版社希望能够在先进制造技术的引进、消化、吸收、创新方面为广大读者作出贡献,为我国的制造业科技人员引进、纳新国外先进制造技术的出版资源,翻译出版国际上优秀的制造业先进技术著作,从而能够提升我国制造业的自主创新能力,引导和推进科研与实践水平的不断进步。

三、选译严谨质高面广

(1) 精品重点高质 本套丛书作为我社的精品重点书,在内容、编辑、装帧设计等方面追求高质量,力求为读者奉献一套高品质的丛书。

(2) 专家选译把关 本套丛书的选书、翻译工作均由国内相关专业的专家、教授、工程技术人员承担,充分保证了内容的先进性、适用性和翻译质量。

(3) 引纳地区广泛 主要从制造业比较发达的国家引进一系列先进制造技术图书,组成一套《国际机械工程先进技术译丛》。当然其他国家的优秀制造科技图书也在选择之内。

(4) 内容先进丰富 在内容上应具有先进性、经典性、广泛性,应能代表相关专业的技术前沿,对生产实践有较强的指导、借鉴作用。本套丛书尽量涵盖制造业各行业,例如机械、材料、能源等,既包括对传统技术的改进,又包括新的设计方法、制造工艺等技术。

(5) 读者层次面广 面对的读者对象主要是制造业企业、科研院所的专家、

研究人员和工程技术人员，高等院校的教师和学生，可以按照不同层次和水平要求各取所需。

四、衷心感谢不吝指教

首先要感谢许多积极热心支持出版《国际机械工程先进技术译丛》的专家学者，积极推荐国外相关优秀图书，仔细评审外文原版书，推荐评审和翻译的知名专家，特别要感谢承担翻译工作的译者，对各位专家学者所付出的辛勤劳动表示深切敬意，同时要感谢国外各家出版社版权工作人员的热心支持。

本套丛书希望能对广大读者的工作提供切实的帮助，欢迎广大读者不吝指教，提出宝贵意见和建议。

机械工业出版社

译 者 序

焊接方法在工业生产中具有广泛的应用，但焊接过程的复杂性使得这一生产过程严重依赖于操作者的技能，这无疑影响了焊接结构的一致性和可靠性，同时生产效率低下。在我国这种现象尤为严重。

众所周知，由于不同材料和结构对制造方法多样性的需求产生了种类繁多的焊接方法，在一本书中对这些焊接方法都进行全面的阐述无疑是不现实的。

本书结合焊接领域近年来的研究成果，一方面针对现代生产中焊接的共性技术问题进行了全面的介绍，包括焊接材料，焊接保护气体，焊接电源等；另一方面，针对现代生产中的先进焊接方法开展了讨论，这些方法既包括已经得到广泛应用的钨极惰性气体保护焊和熔化极气体保护焊，也包括具有较强针对性的高能束焊接方法和窄间隙焊接方法；最后本书对焊接过程的监测与控制，焊接自动化与机器人进行了介绍。本书内容中虽然包含一些传统焊接领域的基本问题，但却以相关领域的最新进展为主，这些新进展不但对我国焊接生产中制订或改善工艺具有重要的借鉴作用，也从一个侧面反映了西方发达国家在焊接领域所从事的扎实而系统的研究，对广大焊接研究者也具有一定的参考价值。

本书第一、二、四、五、六章由史清宇翻译，第三、七章由王学东翻译，第八、九章由鄢东洋翻译，第十、十一章由陈志翔翻译。由于译者水平有限，书中难免有错误和不足之处，望读者批评指正。

译 者

前 言

传统上焊接更多地被认为是一种技艺而不是技术性很强的制造方法。很多传统焊接方法严重依赖于操作人员的熟练程度，还有很多传统焊接方法相对生产成本较高而且工艺重复性很差，这些加深了上述的传统观念，同时也导致焊接在国际质量标准中被列为特殊工艺。但事实上，虽然焊接过程可能是一个多物理场耦合的复杂过程，国际上仍然开展了大量的高水平研究，人们对焊接过程中的很多基本物理现象有了更深入的了解，这些研究为焊接工艺技术的飞速发展提供了科学基础。

焊接领域的早期研究主要集中在材料焊接性和焊接冶金问题方面，焊接性和冶金问题研究使得很大范围的材料可以采用焊接方法实现高质量的连接，并能够提供足够好的接头性能，从而控制了焊接接头的完整性。虽然材料焊接性研究仍有一定的需求，特别是在先进材料的高质量连接方面，但近期研究还是主要投入到更深入地理解焊接过程的基本现象，包括焊接材料、焊接设备开发以及焊接过程的控制和自动化等方面。

John Norrish
Wollongong 大学

目 录

译丛序言

译者序

前言

第1章 焊接方法简介	1
1.1 连接方法与焊接方法分类	1
1.2 传统的焊接方法	2
1.3 本章小结	13
第2章 先进工艺发展趋势	14
2.1 焊接技术的性价比	14
2.2 安全与环境因素	18
2.3 技能与培训需求	18
2.4 发展方向	19
2.5 先进焊接技术的应用趋势	19
2.6 本章小结	22
第3章 焊接电源新技术	23
3.1 引言	23
3.2 电源的基本要求	23
3.3 传统电源设计	24
3.4 电子控制电源系统	27
3.5 输出水平、顺序和功能控制	34
3.6 电子电源调节和控制的实际意义	36
3.7 本章小结	37
第4章 弧焊填充材料	38
4.1 简介	38
4.2 手工电弧焊材料	38
4.3 埋弧焊材料	39
4.4 GMAW (熔化极气体保护焊) 和 FCAW (药芯焊丝电弧焊) 用焊丝	41

4.5 本章小结	49
第5章 先进焊接方法中的气体	50
5.1 引言	50
5.2 弧焊过程中的保护气体	50
5.3 激光焊用保护气体	61
5.4 本章小结	62
第6章 先进的钨极气体保护焊	64
6.1 引言	64
6.2 钨极气体保护焊的发展	64
6.3 各种钨极气体保护焊方法	68
6.4 钨极气体保护焊的控制及相应方法	80
6.5 本章小结	86
第7章 熔化极气体保护焊	87
7.1 引言	87
7.2 熔化极气体保护焊中的熔滴过渡	87
7.3 熔滴过渡物理	95
7.4 熔滴过渡现象小结	97
7.5 传统熔化极气体保护焊控制	99
7.6 过程控制小结	103
7.7 熔化极气体保护焊方法的近期进展	103
7.8 本章小结	115
第8章 高能密度加工方法	116
8.1 引言	116
8.2 穿孔型等离子弧焊	117
8.3 激光焊	123
8.4 电子束焊	135
8.5 本章小结	141
第9章 窄间隙焊技术	142
9.1 引言	142
9.2 窄间隙焊的原理和特征	142
9.3 窄间隙焊接方法	143
9.4 本章小结	152

第 10 章 焊接过程监视与控制	153
10.1 引言	153
10.2 人工控制技术	154
10.3 监控	160
10.4 自动化控制技术	173
10.5 本章小结	183
第 11 章 焊接自动化及机器人技术	184
11.1 引言	184
11.2 自动化方式	185
11.3 简单的机械化	185
11.4 专用及特殊用途的自动化装备	188
11.5 机器人焊接	190
11.6 模块自动化	199
11.7 可编程控制	199
11.8 远控和自动化系统	200
11.9 焊接自动化的进展	201
11.10 自动化焊接的评估和判断	204
11.11 本章小结	208
附录	209
附录 1 焊接方法分类	209
附录 2 手工电弧焊 (SMAW) 焊条分类	210
附录 3 熔化特性	213
附录 4 美国、澳大利亚和欧洲药芯焊丝分类系统	215
附录 5 用于耐磨堆焊的药芯焊丝	217
附录 6 等离子穿透孔焊接参数	218
附录 7 钛的等离子穿透孔焊接	219
参考文献	220

第 1 章 焊接方法简介

1.1 连接方法与焊接方法分类

对于很多不同种类的工程部件制造，焊接和连接技术的作用非常重要，这些不同种类的工程部件的种类从特大型结构（如船舶和桥梁）到非常复杂的结构（如飞机发动机），还包括精密结构（如微电子行业中应用的微小部件）。

1.1.1 连接方法

基本的连接方法可以分为以下几类：机械连接、胶接、钎焊、焊接。

可供选择的连接技术种类繁多，特别是近年来，连接技术取得了长足的进步，尤其是在胶接和焊接领域，一方面已有的焊接工艺得到了改进，同时还产生了新的连接方法。上述进步导致了大量新技术的激增，而新技术的激增有时使得具体工艺方法的选择变得困难，这在某些条件下又会限制新方法和新工艺的选择及应用。本书目的在于对近年来焊接方法和工艺领域内的最新进展给予客观的评价，以便于在给定应用条件下选择最合适的焊接方法。

本章将介绍工艺选择过程中需要考虑的一些基本概念，并重点论述传统焊接方法的一些特点。

1.1.2 焊接方法的分类

焊接目前采用几个不同方法的定义，例如定义为：两部分金属通过加热或加压或两者同时作用，以塑性或液态形式连接在一起的过程。焊接时可以使用或不使用填充金属，如果使用，填充金属应具有与母材相当的熔化温度^[1]。

焊接也可以定义为：金属或非金属可以使用或不使用填充材料，通过将其在加压或不加压条件下加热到焊接温度，或者仅施加压力，最终实现局部的连接^[2]。

目前已经有很多焊接方法，但为简化起见，这些方法可以划分为两大类：熔化焊接和压力焊接，如图 1.1 所示。图中列出了一些重要的焊接方法，更多的焊接方法及其名称列于附录 1 中^[1]。

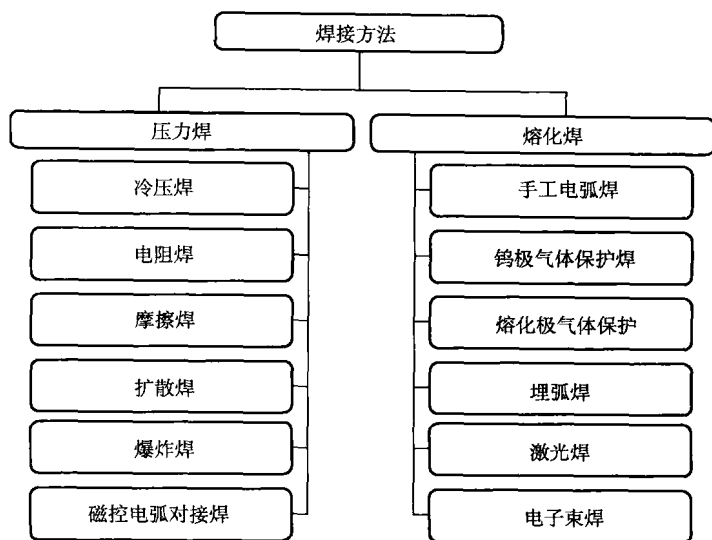


图 1.1 一些重要的焊接方法

1.2 传统的焊接方法

本节将对最常用的焊接方法，以及它们的应用范围及其局限性进行简要介绍，更先进的方法及其发展将在其他章节中给予较详尽的介绍。

在国际标准 ISO 4063^[3]中通过不同的数字和字符定义了不同的焊接方法，第一位数字表示其所属焊接方法的主要种类，第二和第三位分别表示不同的子类。焊接方法的主要种类以及一些子类的例子列于表 1.1 中。在章节 1.2.1 和 1.2.2 中，有些焊接方法的种类也在其名称后面的大括号 {} 中列出。

表 1.1 ISO 4063 标准中数字含义举例

主 类	次 类	子 类
{1} 弧焊	{12} 焊条电弧焊	{111} 手工电弧焊
	{13} 熔化极气体保护焊	{131} 熔化极惰性气体保护焊
	{15} 等离子弧焊	{141} 钨极惰性气体保护焊
{2} 电阻焊	{21} 电阻点焊	{222} 压平缝焊
	{22} “缝”焊	{291} 高频电阻焊
	{23} 凸焊	
{3} 气焊	{31} 氧燃料气焊	{311} 氧乙炔气焊

(续)

主 类	次 类	子 类
{4} 压焊	{42} 摩擦焊 {48} 冷压焊	{441} 爆炸焊
{5} 高能束焊接	{51} 电子束焊 {52} 激光焊	{511} 真空电子束焊 {521} 固体激光焊 {522} 气体激光焊
{7} 其他焊接方法	{71} 铝热焊 {75} 光辐射焊	{753} 红外辐射焊
{8} 切割	{81} 火焰切割 {82} 电弧切割 {83} 等离子弧切割 {84} 激光切割	{821} 空气弧切割
{9} 钎焊	{91} 硬钎焊 {94} 软钎焊	{912} 火焰钎焊 {944} 浸沾钎焊

1.2.1 压焊

1. 电阻焊 {2}

电阻焊过程中虽然会在被连接材料的界面处产生熔化现象，但其仍然被定义为压焊，电阻点焊 {21}、电阻缝焊 {22} 及电阻凸焊 {23} 都基于相同的原理实现焊接：需要连接的材料被夹持在两个电极之间，然后施加大电流，如图 1.2 所示，接触表面的电阻热会导致局部的加热和熔化。电阻焊过程中一般施加短时

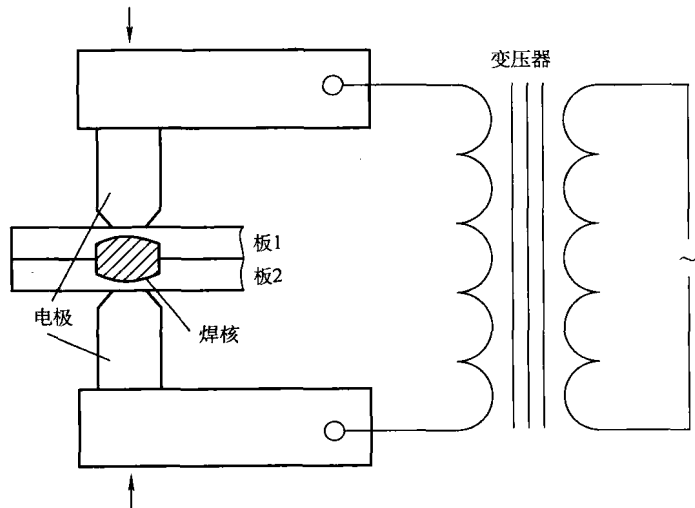


图 1.2 电阻焊系统

大电流（典型的为 10000 安培数量级），一般通电之前即施加压力并在电流撤销后仍保持片刻。

为确保获得稳定的焊接质量，通常需要精确控制电流峰值、电压和焊接时间，但即使这样，焊接质量也仍可能会因材料接触电阻的变化、电极磨损、磁路损失、电流通过已完成的焊点等原因出现变化。这些在焊接操作过程中不可预见的变化导致生产中比设计要求增加焊点数量，为可能出现的个别焊点质量低下提供某种意义的预防护。为改善这种状况，电阻焊过程的监测和控制得到了明显的发展，这些进展提高了电阻焊过程的应用效率，部分相关技术将在第 10 章中介绍。

基本的电阻焊方法的特点包括：

- 1) 该方法需要的设备相对简单。
- 2) 该方法容易实现自动化并且一般采用自动化操作。
- 3) 一旦建立焊接参数，基本可以在一个相对较长的生产周期中使用并重复性生产。

电阻焊方法主要应用于汽车工业以及大型家电工业中钢板的连接。

2. 冷压焊 {48}

如果对洁净的、装配界面良好的材料施加足够大的压力，并产生相应的塑性变形，材料表面层将被破坏，并在界面间形成金属键合，这样就形成了冷压焊接头^[4]。冷压焊的主要特征是：

- 1) 设备简单，成本低廉。
- 2) 有效避免材料的热损伤。
- 3) 最适宜于强度低（软）材料。

压力与材料变形可以通过滚压、预置凹凸槽施压、对接、拉拔及施加切应变等方法实现。一般情况下金属的延性越好就越容易实现焊接。

这一方法已经应用在电力工业中小直径铜、铝导线间的连接，通过对接或预置凹凸槽施压方法实现。滚压连接用于生产双金属板，如炊具中的铜/铝双金属板、铝/锌印刷板以及电子产品中的贵金属接触弹簧等。

3. 摩擦焊 {42}

摩擦焊过程中，接触表面间的相对运动导致接头处高温，当表面材料温度升高并软化后，施加顶锻力并同时停止接触面间的相对运动，如图 1.3 所示。摩擦焊过程中材料可能被从接头处挤出并形成飞边。

这一过程根据提供能量的方法可以分为几种不同的操作模式：

(1) 连续驱动 这种模式下相对运动是通过与能量源直接耦合获得的，加热过程中驱动相对运动的机构保持稳定的速度。

(2) 储能式 相对运动是由飞轮储能释放实现的，加热过程中飞轮与驱动

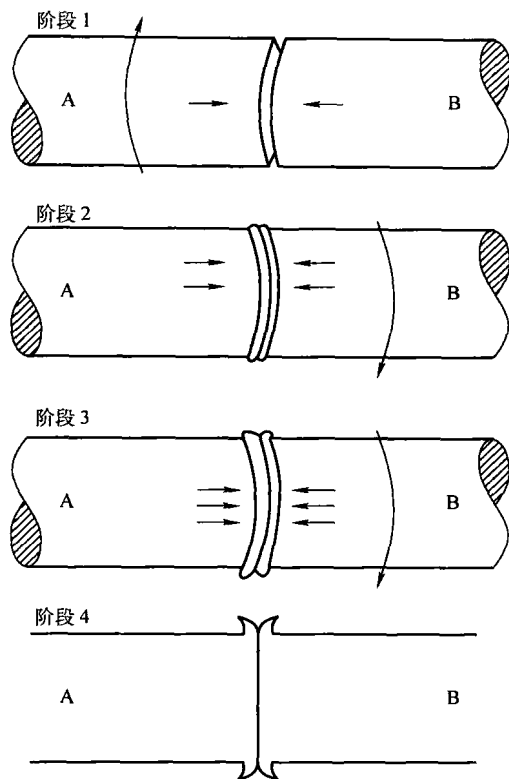


图 1.3 摩擦焊接

阶段 1: A 固定, B 旋转并向 A 移动并产生接触 阶段 2: A 固定, B 旋转并施加压力, 界面被加热
阶段 3: A 固定, 施加顶锻力 阶段 4: 相对运动停止, 焊接接头形成

机构间的连接被断开。

旋转运动是摩擦焊接中最常见的接触面相对运动, 主要应用于相对角度关系要求不苛刻的两个回转体的焊接 (如图 1.4), 如果需要两个被连接的部件间保持特定的相对角度关系, 可以采用一定角度范围内往复旋转的方式实现焊接, 而对于非回转体的焊接, 可以通过在固定轨道上线性往复运动的方法实现。摩擦焊的特点包括:

1) 一次性过程完成对接接头。

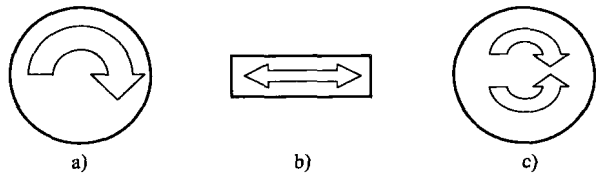


图 1.4 摩擦焊种类

a) 常规旋转摩擦焊 b) 线性摩擦焊 c) 角摆动摩擦焊

- 2) 适用于异种材料的连接。
- 3) 完成周期短。
- 4) 特别适用于回转体。
- 5) 可能需要价格昂贵的大型精密设备。

摩擦焊方法通常用于截面轴对称结构的焊接，特别是钢材，但也适用于异种材料接头例如铝与钢，甚至陶瓷与金属。该方法早期应用于汽车短轴的焊接，同时也应用于高质量飞机发动机部件的制造^[5]、海洋工程中双相不锈钢管道的制造^[6]及核设施部件的制造^[7]。

摩擦焊近年来的研究工作包括金属与陶瓷的连接^[8]、常规环境及水下的螺柱焊接以及将该方法应用于表面工程^[9]。最近，线性摩擦焊被成功应用于钛合金的焊接，接头区域的面积为 250mm^2 ，频率为 25kHz ，轴向压力为 100MPa ，往复运动的幅值为 $\pm 2\text{mm}$ 。

4. 扩散焊 {45}

扩散连接过程中母材表面经过清理后在惰性气氛中被加热，对接头施加压力后，扩散现象伴随着局部塑性变形而发生，并使得表面间隙消失^[11]，最终实现了焊接。扩散焊的特点包括：

- 1) 适用于连接的材料范围很广。
- 2) 一次性过程完成连接。
- 3) 可以连接复杂截面。
- 4) 需要真空或保护性气氛。
- 5) 完成一个焊接周期可能需要较长的时间。

扩散焊接也可用于多处焊缝需要同时完成的复杂结构的连接。

5. 爆炸焊 {46}

爆炸焊中界面变形所需要的力来自于爆炸能量的释放。在最常见的爆炸焊中，两块平板被连接在一起形成双金属板结构，爆炸产生能量的释放，驱动复板（置于上面的板）向基板（置于下面的板材）高速撞击，撞击面会产生局部塑性变形，而后塑性变形以类似于平行波的形式推进到全部撞击面，完成板材的连接，如图 1.5 所示。对于大

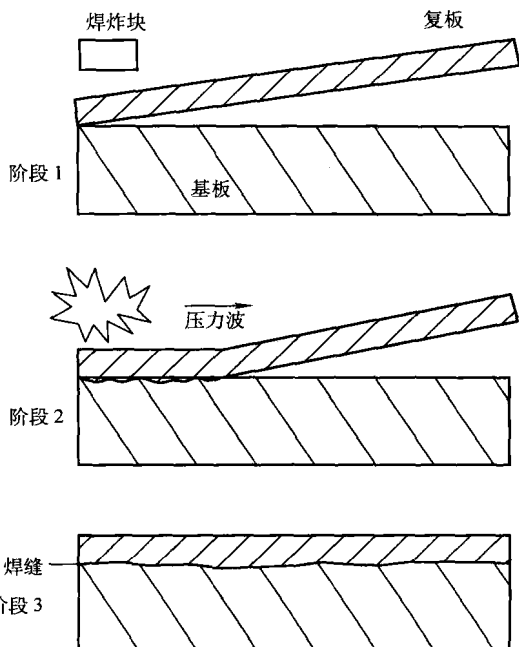


图 1.5 爆炸焊

型工件，爆炸焊会伴随相当大的力，因此需特别加以关注，以确保焊接过程的安全操作。这一方法的特点包括：

- 1) 一次性过程完成连接。
- 2) 焊接时间短。
- 3) 适于大表面积的连接。
- 4) 适于不同厚度和材料的金属的连接。
- 5) 大型工件焊接时需要精心的焊前准备。
- 6) 安全性是一个重要问题。

爆炸焊也可用于换热器中管与板的焊接，或用于封堵多余管路或损坏管路的焊接。

6. 磁控旋弧焊 {185}

在磁控旋弧焊中，电磁场驱动电弧在接头表面移动，如图 1.6 所示^[12]，然后对接头施加压力完成焊接。虽然这种方法产生的接头与摩擦焊相似，但可以在更短的时间内完成焊接，并且也可避免被连接部件间的相互位置变动。该过程的特点包括：

- 1) 一次性过程完成连接。
- 2) 适用于复杂截面的对接焊。
- 3) 比摩擦焊所需的焊接周期短。

磁控旋弧焊已经广泛应用于汽车工业中制造轴类零件及碰撞吸能装置的管类零件，零件的直径范围在 10 ~ 300mm 间，管类零件的厚度范围在 0.7 ~ 13mm 间^[13]。该方法还用于传输管线的连接，特别是小直径薄壁管的连接。

1.2.2 熔焊

1. 钨极气体保护焊 {141}

在钨极气体保护焊（在大部分欧洲国家也被称为钨极惰性气体保护焊，在德国称为 wolfram inert gas，并且在有些国家也按照其原始商标名称为氩弧焊，氦弧焊）过程中，热量是由电弧产生的，电弧稳定地维持于工件和一个不熔化的钨电极间，用于熔化连接区的金属。电弧燃烧于惰性气体的氛围内，惰性气体主要用于保护熔池和电极免于空气污染，如图 1.7 所示。钨极气体保护焊的特点包括：

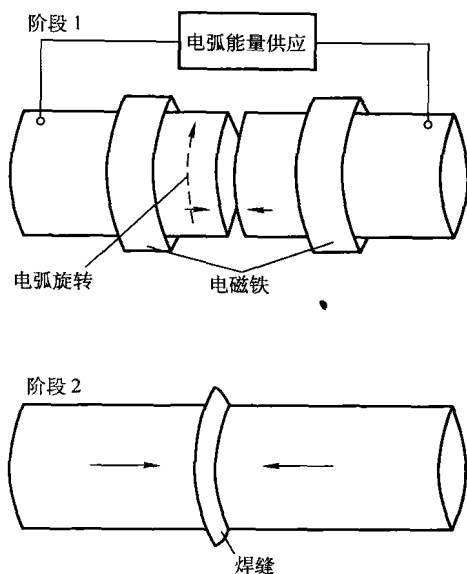


图 1.6 磁控旋弧焊
阶段 1：旋转电弧加热端面
阶段 2：施加顶锻力