

HANJIE FANGFA YU JISHU

焊接方法与技术

赵正光 编译

江苏科学技术出版社

焊 接 方 法 与 技 术

赵正光 编 译

钱智声 校 对

周建初 审 阅

江苏科学技术出版社

内 容 提 要

本书主要根据英国剑桥大学焊接研究所所长、著名焊接专家 P·T·霍德克劳夫特所著 *Welding Process Technology* 一书,并参考多种国内外焊接专著编译而成。全书系统地介绍了各种焊接方法的原理、特点、发展、工艺参数和用途,既有科研数据,又有实践经验;内容丰富,但不繁琐。对新的焊接方法,如辐射能焊(电子束、激光等)、固相焊(压力、扩散、超声、爆炸等),作了简明而全面的介绍。书中“焊接方法的选择”和“经济考虑”两章,分析问题比较深刻,颇具特色。

本书可作为大专院校焊接专业的教学参考书,也可供焊接技术人员、焊工以及与焊接有关的企业管理、产品设计人员参考。

焊 接 方 法 与 技 术

赵正光 编译

出版: 江苏科学技术出版社

发行: 江苏省新华书店

印刷: 盐城地区印刷厂

开本 787 × 1092 毫米 1/16 印张 11.75 字数 283,000

1983年3月第1版 1983年3月第1次印刷

印数 1 - 8,500 册

书号 15198·106 定价 1.12 元

责任编辑 孙广能

编 译 前 言

焊接技术已有很长久的历史了。早在我国春秋战国时代,便已经利用热锻的方法,将两块金属联接在一起。相传在我国唐代就已开始应用钎焊(锡焊、银焊)技术,这比欧洲要早约一千年。可惜,长期的封建统治,束缚了我国生产力的发展。目前我国的焊接技术,距国际先进水平,还是有一定差距的。

为了有助于国内同行学习国外的先进焊接技术,本人以英国P·T·Houldcroft(P·T·霍德克劳夫特)的著作*Welding Process Technology*(焊接方法和技术)一书为蓝本,并参考多种国内外焊接专著,编译了本书。

霍氏为英国剑桥大学焊接研究所所长,著名的焊接专家。早在60年代,他就写过*Welding Process*(焊接方法)一书,系统地介绍了各种焊接方法的基本原理和主要特点,指出了各种可调变量之间的关系及特种技术的作用。该书获得焊接技术界的高度评价,被誉为“编辑了当代最有用的焊接技术资料”,“是当代焊接专业最优秀的著作”等。

十多年来,随着焊接方法的不断发展,象摩擦焊、电子束焊和扩散焊等技术,已不仅用于宇航工程,而且普及到当代普通工程;大功率二氧化碳激光这种新热源已经成功地用于实体结构的连续焊接;特别是有药芯焊条的钢的半自动焊,已得到广泛的应用;由于在造船工业中大量采用焊接机械化的结果,多焊丝系统埋弧焊得到稳定的进展;近年来又出现了爆炸焊。为了反映这些焊接方法的进展,霍氏在前书的基础上,增加了扩散焊、电子束焊、激光焊和爆炸焊等内容;又特别增加了三章最新的内容:焊接方法的选择、自动焊、焊接的经济考虑,将前书扩展为*Welding Process Technology*一书。

“焊接方法选择”一章,作者最早发表于1975年的《焊接日》杂志上。该章列出了在选择焊接方法时所必须考虑的检查项目明细表,并建议焊接的应用可分为:结构制件、工程部件和半成品三类。

“自动焊”的概念,首次以论文形式在1973年发表于“冶金学家协会”秋季评论会上。在该章中,介绍了自动焊接工艺中重要而复杂的方面,将自动焊接方法按用途进行分类,然后考虑焊接的操作顺序,最后分析不同类型工件和焊接装置之间相对运动的机理。

“经济考虑”一章中指出,经济性除了考虑制造成本和生产率外,还要考虑用于焊后工序的费用。单单焊接费用往往只是总生产费用中的一小部分。该章推荐了一个估算焊接成本的综合公式。“四化”建设要注重经济效益,该章内容很值得我国科技界借鉴。

“焊接名词术语”,焊接学会虽早在1969年就统一颁布,但所收词汇不够多,也未被广大作者共同采用,本书无法完全统一,只能采用在国内焊接著作中用得较普遍的名称,并用括号列出部分别名以便读者阅读。对许多外来的新的焊接词汇,则用“英汉金属材料及热加工词典(国防工业出版社1980年11月出版)的译名。

南京航空学院周建初教授,在百忙中对本书进行了仔细审阅,提了不少宝贵意见,南京工学院童宝义副教授认真地阅读了本书全文,提了一些有益的意见,特表示由衷的感谢。

插图由钱智声同志描绘。

由于水平有限，缺点错误实属难免，望广大读者批评指正。

赵正光 1982.6.

目 录

第一章 焊接方法的性质和分类

- 一、基本要求..... (1)
- 二、焊接过程的类型..... (2)
- 三、焊接方法的分类..... (3)
- 四、热效应..... (5)
 - 1. 吸热效应..... (7)
 - 2. 联接速率..... (9)

第二章 焊接电弧

- 一、一般特性..... (11)
- 二、焊接电弧的类型..... (12)
- 三、电弧引燃..... (13)
- 四、电弧维持..... (14)
- 五、电极的极性..... (14)
- 六、电弧的稳定性..... (15)

第三章 焊剂保护电弧焊

- 一、金属极电弧焊..... (16)
 - 1. 焊条药皮..... (16)
 - 2. 药皮类型..... (17)
 - 3. 焊条的性能和使用..... (20)
 - 4. 手工电弧焊的焊接工艺..... (22)
 - 5. 应用..... (24)
 - 6. 电弧的电源..... (25)
 - 7. 用有药皮焊条进行机械化焊接..... (27)
- 二、自动焊剂保护焊..... (28)
 - 1. 连续有药皮焊条..... (28)
 - 2. 埋弧焊..... (29)
 - 3. 管状焊丝电弧焊..... (39)
 - 4. 碳极电弧焊..... (41)
- 三、为电弧焊用的坡口加工和熔深控制..... (42)
 - 1. 坡口加工的原因..... (42)
 - 2. 衬垫工艺..... (42)
 - 3. 接头的预制..... (43)

- 4. 可控熔深的工艺..... (44)
- 四、电渣焊..... (44)
 - 1. 熔嘴电渣焊..... (48)
 - 2. 板极电渣焊..... (49)
 - 3. 应用..... (49)
- 五、电气焊..... (50)

第四章 气体保护电弧焊

- 一、历史背景..... (51)
- 二、惰性气体保护钨极电弧焊..... (53)
 - 1. 电极的极性..... (53)
 - 2. 电弧保持..... (55)
 - 3. 直流分量..... (57)
 - 4. 焊接电弧的引燃..... (58)
 - 5. 焊接工艺..... (58)
 - 6. 中断焊缝..... (59)
 - 7. 应用..... (59)
 - 8. 特殊形式的钨极电弧焊..... (60)
- 三、等离子弧焊接..... (62)
 - 1. 应用..... (63)
- 四、气体保护金属极电弧焊 (熔化极气电焊)..... (63)
 - 1. 电弧长度控制..... (64)
 - 2. 电弧特性..... (65)
 - 3. 气体保护金属极电弧焊设备的特征..... (68)
 - 4. 应用..... (69)
 - 5. 气体保护金属极电弧点焊..... (69)
 - 6. 短路和脉冲过渡工艺..... (70)
 - 7. 气体保护..... (72)

第五章 无保护短时电弧焊

- 一、储能焊..... (75)
 - 1. 电弧引燃..... (75)
 - 2. 火花放电焊..... (76)
 - 3. 电容放电焊或储能螺柱焊..... (77)
 - 4. 磁力储能焊..... (79)
- 二、电弧螺柱焊..... (79)

1. 引弧方法	(79)
2. 易熔套环法	(81)
3. 电弧螺柱焊的应用	(82)
三、磁激电弧焊(旋转电弧焊)	(82)

第六章 电阻焊(接触焊)

一、电阻点焊	(83)
1. 电极和熔核大小	(84)
2. 电阻和压力	(85)
3. 电流和时间	(86)
4. 熔核形成	(87)
5. 焊接方法和质量控制	(89)
6. 单面点焊	(93)
7. 热平衡	(94)
8. 设备的类型	(94)
9. 用途	(96)
二、滚焊(缝焊)	(96)
1. 滚焊的特殊形式	(97)
三、凸焊	(99)
1. 凸点的性能	(100)
2. 热平衡	(101)
3. 应用	(101)
四、闪光焊(闪光对焊)	(102)
1. 闪光	(102)
2. 可调变量	(103)
3. 热平衡	(104)
4. 顶锻和夹紧	(104)
5. 用途	(105)

第七章 热化学焊

一、气焊	(107)
1. 氧乙炔焰	(109)
2. 氧乙炔焊的供给源	(110)
3. 焊接工艺	(110)
4. 焊接过程的特点	(111)
5. 应用	(111)
6. 氧氢焰	(112)
二、原子氢焊	(113)
三、热剂焊	(113)
1. 工艺	(114)
2. 应用	(114)

第八章 辐射能焊

一、电弧影象焊	(115)
二、激光焊接和切割	(115)
1. 固态激光	(116)
2. 气体激光	(117)
三、电子束焊接	(119)
1. 电子枪的类型	(119)
2. 焦点直径	(121)
3. 电子束功率	(122)
4. 工作电压	(122)
5. 深熔焊	(122)
6. 真空系统	(124)
7. 真空室	(125)
8. 可调变量	(126)
9. 应用	(127)

第九章 固相焊

一、冷压焊	(129)
1. 焊缝的形成	(130)
2. 搭接焊工艺	(130)
3. 对焊工艺	(132)
4. 应用	(132)
二、热压焊接	(133)
三、火焰—压力焊接	(133)
四、感应—压力焊接	(134)
五、电阻对焊	(134)
六、扩散焊接	(135)
1. 本焊接法的特点	(136)
2. 设备	(136)
3. 扩散焊接的优点	(137)
4. 应用	(138)
七、摩擦焊	(138)
1. 连续驱动摩擦焊	(139)
2. 摩擦焊接法的特点	(140)
3. 可调变量	(142)
4. 应用	(143)
八、锻焊	(143)
九、超声波焊接	(143)
1. 特点	(144)
2. 焊接设备	(145)
3. 应用	(145)

十、爆炸焊接	(146)
1. 结合的性能	(147)
2. 可调变量	(147)
3. 应用	(148)
十一、电磁冲击焊接	(148)

第十章 焊接方法的选择

一、产品的类型	(150)
1. 结构制件	(150)
2. 工程部件	(150)
3. 半成品件	(150)
二、生产设备	(151)
三、金属厚度	(151)
四、材料	(152)
1. 开裂	(153)
2. 气孔	(154)
3. 焊缝和热影响区的韧性	(154)
4. 腐蚀和别的热影响区现象	(155)
五、接头类型和位置	(155)
六、亚结构(子结构)的使用	(156)
七、检验项目提要	(157)

第十一章 自动焊

一、定义	(158)
二、机械化的相对运动	(159)
1. 移动焊接机头系统	(160)
2. 移动工件系统	(160)
3. 移动机头系统	(160)
4. 固定的焊接机头; 移动的工件	(166)
三、焊接过程控制	(169)
四、自动焊接中所用的附件	(169)
五、应用自动焊的优点和问题	(170)

第十二章 经济考虑

一、焊接成本	(172)
1. 材料的预制	(172)
2. 装配	(173)
3. 预热	(173)
4. 焊接	(173)
二、生产率	(176)
三、焊后工序	(179)
四、成本计算	(179)

第一章 焊接方法的性质和分类

相互分离着的固体材料（金属或塑料、陶瓷等非金属），借助于原子或分子的结合而联成一个整体的工艺过程，称为焊接。

各种类型的焊接工艺方法都是为适应生产的需要而发展起来的。随着现代科学技术的发展，将继续不断地出现新的焊接工艺方法，现有的方法也将取得新的改进和应用。

一、基本要求

理想焊缝是这样的一种焊缝，在焊缝所联接的各部分之间完全连续，而且接头的每个部分都无法与构成焊接接头的那部分金属区分开来。尽管实际上这种理想根本无法实现，但却可以通过多种焊接方法获得满足工作要求的焊缝。每种焊接方法并不都能适合于所有的金属、接头类型和用途，故焊接工程师的主要工作，在于判明每种具体焊缝所必须满足的基本要求，并选择合适的焊接方法。

每种焊接方法都必须满足许多条件。最重要的条件就是必须供给接头某种形式的能量（通常是热量），从而通过熔融使焊件联接在一起。热量可由火焰、电弧、电流通过电阻、辐射能或一些机械方法而产生。只有有限的几种方法（例如压焊），不需熔化就能将焊件联接起来，此时能量只是消耗在迫使焊件联接。通常认为熔融（Fusion）与熔化（melting）是同义的，但在焊接范畴内，却应将这两个词汇区分开。按一般的提法，熔融是指随后立即构成联接的熔化。

两个表面只有在不存在氧化物或其他污染的情况下，才能令人满意地结合在一起。虽然在焊接之前进行清洁是有益的，但往往是不够的，而每种焊接方法的特点是使污染表层熔解或消散。这可由焊剂的化学反应、电弧飞溅或机械方式（如破裂和磨损）来完成。必须从表面清除这样三种污染物质：有机薄膜层、吸附的气体和母材的化合物（通常为氧化物）。由于利用热量可将有机薄膜和吸附的气体有效地清除掉，从而对于利用热量的大多数焊接方法而言，去除剩下的氧化物是最重要的事。

一旦将污染物质去除后，在焊接过程中，必须避免再形成表面膜（特别是氮化物）。因而，几乎在任何焊接过程中，都必须采取某种方法来排除周围的空气。如果用焊剂来清洁接头的熔融面，就能起保护作用；如果不用焊剂，也可以用惰性气体或不会与母材形成难熔化合物的气体，形成覆盖层来起保护作用。通过使焊接表面紧密联接在一起而进行焊接，也能机械地将空气排除；而通过完全排除空气在真空中焊接，就能获得没有空气的最佳保护情况。如果通过控制加热快速地进行焊接，则在那里来不及充分地氧化，也就不需要进行保护。可以用一些方法，在构成接头前，将受污染的液态金属排出或向熔池加放合金添加剂，来改善焊缝金属的性能。

在焊接过程中产生的接头应有良好的冶金特性，这是一个远为重要的要求。需要熔化接头某些部分的某些焊接方法，如同在铸造中所进行的一样，经常需要加入脱氧剂或合金添加

剂。通常必须控制被焊材料的成分。某些合金（确切地说，少数几种合金），几乎用任何方法都无法焊接，但大部分合金，只有将它们的成分控制在一定的范围内时，才能进行焊接。这些考虑就是焊接冶金学的基础。因其不属于本书范围，故对它不进一步详加讨论。

总而言之，每种焊接方法都必须满足下列四个要求：

- （1）提供能量，用熔融或压力实现结合。
- （2）能从联接面清除表面污染。
- （3）避免空气污染或受它的影响。
- （4）控制焊接冶金。

二、焊接过程的类型

若能将两个焊件预制成具有原子精度的配合表面，则对这样的焊件进行焊接的过程将是最简单的。如果能在真空中将这样的表面聚集在一起，从而使原子所共用的电子横越界面，那么就能得到理想的焊缝。但这在目前是办不到的。

通常可以采取下列两种方法中的一种，来解决在焊件之间达到原子接触的问题。一种方法是采用压力，以便使贴合面发生塑性变形，使所需相接触的密切程度至少如〔图1，(a)〕中所示的凹凸不平处一样。变形也有助于使薄膜破裂而满足清洁的要求。韧性金属在冷的状态下就能完成塑性变形，但对韧性较差的金属，就要先将它加热变软后，才能完成。另一种方法是用熔化呈液态的金属来桥联焊接表面。由于熔化金属凝固，从而实现所需的外形和结构。〔图1，(b)〕。大多数焊接过程都采用后一种方法。通常可采用多种办法，对金属局部加热以实现熔化。

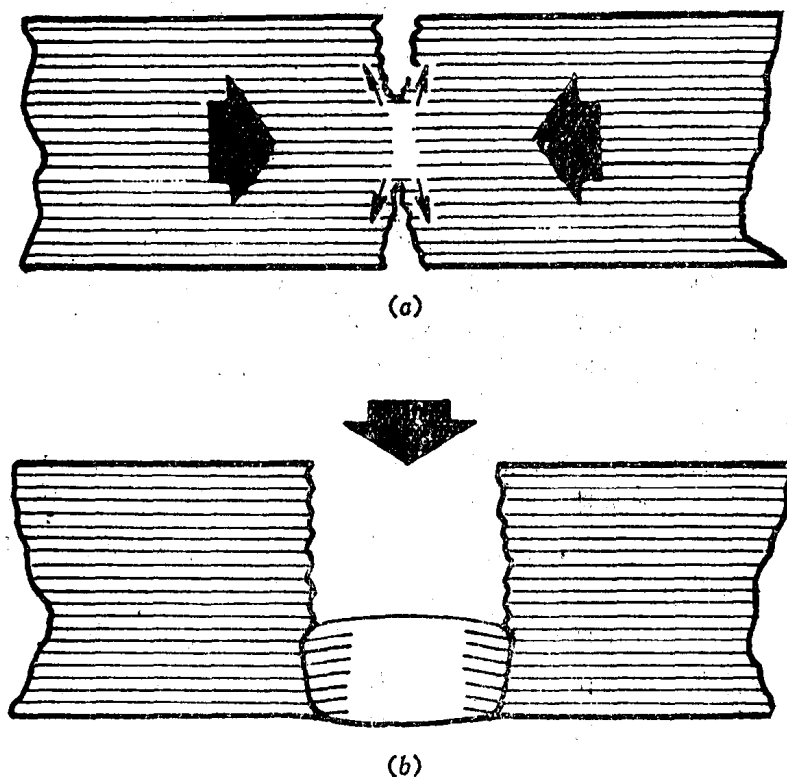


图1 焊接的基本机理

(a) 通过塑性变形而接合 (b) 通过熔化金属桥联而接合

上述两种焊接过程基本上是不同的。根据它们之间的差异，对焊接过程进行初步分类。那些应用压力使贴合面塑性变形的焊接方法，称为“固相法”。对于那些利用液态金属而接合的方法，还没有一个确切的名称，也许可称之为“液相法”。

多年来习惯于将焊接方法分为“压焊”和“熔焊”两种（如在英国标准BS 499中所见）。在焊接过程的某个阶段需要

应用压力的焊接方法称为压焊，根据这种分类法它既包括了所有确实能归入“固相法”的焊接方法，还包括一些其中能发生熔融的方法。这就是在焊接领域中使用“fusion”（“熔融”）一词时，要特别注意的第二个原因。

钎焊和扩散焊通常不能归入上述两种焊接方法中。钎焊时，在两个焊件间的间隙中填充比母材熔点为低的液态金属，使两个焊件联接起来。常应用下列两种不同的钎焊工艺：在第一种钎焊工艺中，使焊件间保持狭窄间隙，并将熔化的填充金属加入其中，从而使两焊件由于表面张力作用而拉紧。这样的钎焊过程很容易理解。第二种称为“钎焊接”的工艺，它与通常应用的普通焊接方法相似，由气体、电弧等提供热量，而不利用表面张力作用。这种工艺与焊接的区别在于，它只应用比母材熔点显著低的填充金属。

扩散焊是一种特殊的固相联接方法。其中，最简单的扩散焊为：在真空中，在适当的压力下，把被联接部分加热至容易发生界面扩散的温度。为了加速焊接过程，可将能迅速扩散到母材中去的其他中间合金薄膜插入联接界面处。这种过程与压焊有许多相同之处，关于压焊我们将在后面加以讨论。

三、焊接方法的分类

对焊接方法可按照满足前述的四个（特别是前三个）基本要求加以分类。由于几乎都是以热的形式来提供焊接能量，所以就可以按照局部产生热量的方法来进行分类。现将这些方法解释如下：

（a）机械方法：热量由于碰撞、摩擦产生，或由于金属弹塑性变形而释放出来。

（b）热化学方法：热量由于放热反应、焊接火焰和电弧等离子体而产生。为何将等离子体与氧气燃料火焰归为同一类，需要加以说明：虽然在等离子体中不能发生化学反应，但热量传递到工件的方法，却和利用燃烧气体外层进行热传递的方法完全一样。这对于工件不成为电弧电路一部分的所有焊接方法都适用。非过渡电弧产生等离子体火焰，而过渡电弧是收缩电弧，属于电弧焊一类。

（c）电阻方法：热量或由直接输入被焊金属的电流而产生，或由在母材中所感应的涡流而产生。

（d）电弧方法：应用熔化电极和不熔化电极的交流电弧与直流电弧。

（e）辐射能方法：这类方法包括一些新方法（如激光焊、电子束焊以及其他可能发展的焊接方法）。辐射能方法的基本特征是能量集中到工件上，并且热量只产生在集聚光束被遮阻处。

完全按照热能源来定义所有的焊接方法，是不可能的。尤其对电弧焊的许多变型更是如此。通常是参照这种焊接方法的过程来完善这个定义的。该过程满足于控制空气的条件。对所有的焊接方法，都可以按照同样的方式来检查：如图2所示，沿水平轴线方向将获得热源的方法填入表格中，同时沿与它垂直的另一个轴线方向，将避免空气污染的方法填入。从而就可以将本图表划分成许多包括基本相似焊接方法的区域。按照焊接方法，可以划分出下列七个这样的区域：①固相焊，②热化学焊，③电阻焊，④无保护电弧焊，⑤焊剂保护电弧焊，⑥气体保护电弧焊，⑦辐射能焊。

可将图表中某些区域（例如不能在真空中应用火焰焊接的区域），作为不存在焊接方法

焊接方法分类									
热源		保护方法							
		真空	惰性气体	气体	焊剂	无保护	机械隔离		
无热或被传导的热		冷压焊	热压焊				预热压力焊 冷压焊		
机械的		爆炸焊		1		爆炸焊	摩擦焊 超声波焊		
热化学的	火焰 等离子		等离子焊	原子氢焊	气焊		锻焊	压力对焊	
	放热反应			2	热剂焊				
电阻	感应				3	高频感应焊	感应对焊		
	直接				电流焊	闪光对焊 高频电阻焊 凸焊	点焊 滚焊	电阻对焊	
电弧	熔化电极		惰性气体 金属极电弧焊	CO ₂ 金属极电弧焊 气/焊剂保护 金属极电弧焊	用有药皮焊条的电弧焊 埋弧焊	光焊丝焊 柱钉焊 光花放电极 储能焊			
	不熔化电极		惰性气体 钨极电弧焊	6	5	4 碳弧焊			
辐射能	电磁	7				激光焊			
	粒子	电子束焊							

图 2 按照热源和保护方法对焊接方法的分类

的区域标志出来。

这种对焊接方法进行分类的方式,虽然没有族谱法(the family-tree method)那样严格,但却能够说明某些异常现象。例如,电阻对焊通常包括在电阻焊这类中,而且确实是固相焊。在图2中,通过绘出这组固相法(图中标号“1”)的边界而表明,在这种固相法的区域内包括电阻对焊,而不包括其他的电阻焊。同样,虽然也可将电渣焊和它派生的焊接法正确地安放在接触电阻热源那个框格中,但是它们也可以与焊剂保护电弧焊相联系,因为电渣焊与焊剂保护电弧焊有许多共同之处。

现在对于焊接方法还没有统一的命名法。虽然许多焊接方法都是根据热源或保护方式来命名的,但某些特殊焊接方法却按照所加工的接头类型来命名。螺柱焊、点焊和对焊的命名,就是这样的实例。总的分类法不能考虑到这点,因为同一类型的接头可能由多种不同的焊接方法产生。例如螺柱接头可能由电弧焊或凸焊来完成,点接头可能由电阻焊、电弧焊或电子束焊来完成,对接接头可能由电阻焊、闪光焊或许多其他方法中的一种完成。虽然通常在应用中,许多焊接法都用缩体字来代表,而全名称却总按照这样的型式来表示:第一部分,说明保护方式(在提到这部分时);第二部分,说明热量或能源的类型;第三部分,说明接头类型(这点特别重要),参看表1。

表 1

惰 性 气 体	钨 极 电 弧 焊	点 焊
(无 保 护)	电 弧 焊	螺 柱 焊
—	电 阻 焊	对 焊
—	(电 阻 焊)	凸 焊
(真 空)	电 子 束 焊	—
焊 条 造 渣 型	金 属 极 电 弧 焊	—
—	摩 擦 焊	(对 焊)

当涉及叙述所采用方法的过程时,常需要了解操作是手工还是自动的。焊接的实际操作可分为三个主要部分:

(a) 控制焊接规范,特别是电弧长度、焊条或焊丝的送进速度和时间。

(b) 对焊条、焊炬或焊接机头沿焊缝方向的导向和移动。

(c) 将工件运输或取出进行焊接。

将焊接方法分成手工、半自动和全自动,主要取决于在上述的几个操作步骤中,应用手动的程度如何。通常将手工焊接理解为:在焊接过程中焊接规范始终由操作者控制,而且焊接工具也掌握在操作者手中。半自动焊是指在焊接过程中,对焊接规范(如电弧长度、焊丝送进速度和焊接时间)进行自动控制,而对焊条、焊炬和焊接机头的导向和移动,则由手工来控制。在自动焊中,至少操作中的(a)和(b)必须由焊机来执行。

四、热 效 应

对于利用热能的焊接方法,能量转换成热能的类型和焊接后接着发生的热量消散,就成

为影响焊接方法选用和接头性能的主要因素。在不同的焊接方法中,能量转换效率差别很大,象电弧焊这样一些焊接方法的总转换效率最高,而激光焊这样一些焊接方法,总转换效率最低。然而,输入能量(例如电功率)的转换效率,通常在焊接中并不是最重要的。更重要的则是热传导效率、能量水平和能量强度,因为这些都是影响焊接速度和工件热影响区大小的因素。热传导效率具有经济意义,而能量水平和能量强度过大时,就会使工件产生变形,并常使接头性能变差。

在气焊时,热量产生在工件的外部,并且需要经过表面传递热量,随后传遍整个接头。

气焊的传输效率最低,只有30%,显然是一种低效率的焊接法。它与高频电阻焊很不相同,例如高频电阻焊的热量仅在需要之处产生。高频电阻焊的特点是焊接速度高和焊缝狭窄。激光焊接在从初级能(电源电能)转变为焊接所应用的能(相干光)过程中,效率是低的,而且由于相干光发生反射,所以相干光的利用效率也是低的。无论如何,总可以获得高能密度,以便在10毫秒时间内形成沸腾的熔池,而同时传到工件上的热量又最少。在激光焊接中,它的低的总效率又在每个低频脉冲产生有限尺寸的焊缝中降低一部分。

并不是所有到达工件的热量都能用于熔化。一些热量必然用于建立温度梯度,而且还存在一个取决于工作厚度和导热系数的极限热输入,在极限热输入之下,由于热输入不能超过损耗,就决不会发生熔化。在热输入很大的情况下,允许进行高速焊接,从而在工件内的热损耗就降到最小,但决不会降到可用总热量的一半以下。低效率焊接过程或采用相当低速度进行焊接的过程,会使热损耗比上述这种情况时增加3~4倍。在二维热流情况下,对热量利用效率的测量,可以由韦尔斯(Wells)所设计的焊接特性值得出。对于熔焊而言,这个特性值是一个无因次项 $Vd/4\alpha$, (这里 V 是焊接速度, d 是熔化宽度, α 是导温系数)。对于点焊而言,与之相应的特性值为 $d^2/4\alpha t$,此处 d 是焊点直径, t 是焊接时间。由于在焊缝中热输入速率很高,并能有效地利用热量,从而 $Vd/4\alpha$ 值将超过1。在热输入速率低时,就会有较大的热传播损耗,从而焊接特性值就会低于0.1。大多数情况下,焊接特性值在0.25~1之间。对于移动的热源,热输入常以“焦耳/毫米”(焊缝)来表示,对于固定热源,则用焦耳/秒来表示。

韦尔斯简化罗生萨(Rosenthal)方程式得出热流和焊接参数之间的关系式:

$$Q = 8KT_m \left(\frac{Vd}{4\alpha} + \frac{1}{5} \right) \quad (1)$$

这里 Q 是热输入〔卡/秒/毫米(板厚)〕, K 是导热系数, T_m 是高于周围介质的板的熔化温度, α 是导温系数,而且 $\alpha = K/\rho C$,此处 ρ 是密度, C 是比热。

罗伯茨(Roberts)和韦尔斯(于1954年对上式简化,推导出求焊缝上的点,由 T_m 冷却到 T_1 的时间 t 的关系式,这里 T_1 是平衡温度,或则说是在周围介质之上的、有限尺寸介质板最终达到的温度。按下式得出焊接时间:

$$t = \frac{d^2}{\pi \alpha} \left[\left(\frac{T_m}{T_1} \right)^2 - 1 \right] \frac{5(Vd/4\alpha) + 2}{5(Vd/4\alpha)} \quad (2)$$

根据上述的计算,韦尔斯于1961年推导出求焊缝线上的点由 T_m 冷却到 T_1 的间歇时间 t (分别对于单道焊内全熔透焊缝的二维情况以及在板上多层焊缝的三维情况而言);

二维情况时:

$$t = \frac{d}{V} \frac{5(Vd/4\alpha) + 2}{4} \left[\left(\frac{T_m}{T_1} \right)^2 - \left(\frac{T_m}{T_2} \right)^2 \right] \quad (3)$$

三维情况时,

$$t = \frac{d}{V} \frac{5(Vd/4\alpha) + 2}{8} \left[\frac{T_m}{T_1} - \frac{T_m}{T_0} \right] \quad (4)$$

广泛应用热流方程式的主要困难在于, 不常知道物理常数随温度而变化的情况, 而且某些金属的熔化潜热很大。在熔池内部吸收潜热, 以及随后凝固时在熔池尾端能量释出, 是使运动的熔池周围的实际等温线, 要比计算所得的等温线伸长一些的一个原因。对铁来说, 按韦尔斯公式计算出的数值与实际值很相符; 但对于潜热高的金属, 则可用按下式修正的比热值, 使公式变得更为精确: (经校正的) $C = C \left(1 + \frac{L}{CT_m} \right)$ 卡/克/度 (5)

1. 吸热效应

达到工件的热量不仅受输入到焊缝中热量的影响, 而且还受工件的几何形状和材料的影响。通常把工件吸收掉对焊接有用热量的能力当作工件的吸热效应。

需要有一些方法来表示吸热效应的特征, 这样就能对冷却率进行计算。冷却率是影响高碳钢或高合金钢内发生氢致开裂的因素之一。钢对氢致开裂的敏感性随着钢的淬硬性增大而增加, 也随着熔敷金属中氢含量和冷却率的增加而增加。冷却率取决于热输入和吸热效应, 而热输入则由形成焊缝的速率来确定。关于这个课题, 在英国剑桥大学焊接研究所出版的 *Welding steel Without hydrogen cracking* (无氢致开裂焊接钢材) 一书中进行了充分的讨论。

在上述的计算中, 以前曾应用了一个“热烈度” (thermal severity number) 概念, 将“热烈度”定义为通过它能使热量从焊缝流散开的板的总厚度。现在常用以毫米数表示的总厚度来表示“热烈度”。总厚度是指热量能够沿之传导的所有通道厚度总和。图3中示出二通道、三通道和四通道热流的实例。

上述方法不适用于复杂形状或需要考虑夹具影响时。根据罗伯茨和韦尔斯关于边界效应的计算, 可以应用两种方法中的一种来进行评价。这项工作表明, 在半宽为 $10d$ 的板中 (d 是熔化宽度), 对于焊接特性值在 $0.25 \sim 1$ 之间的单层焊道而言, 在这样的板上进行的热循环, 实际就同在一块无限宽的板上所进行的热循环一样。这些观察引起了这样一种想法: 在考虑接头的吸热效应时, 所有离热源比 Sd 为远的金属都可忽略不计, 此处 S 是按照有关的热循环部分而选择的系数。

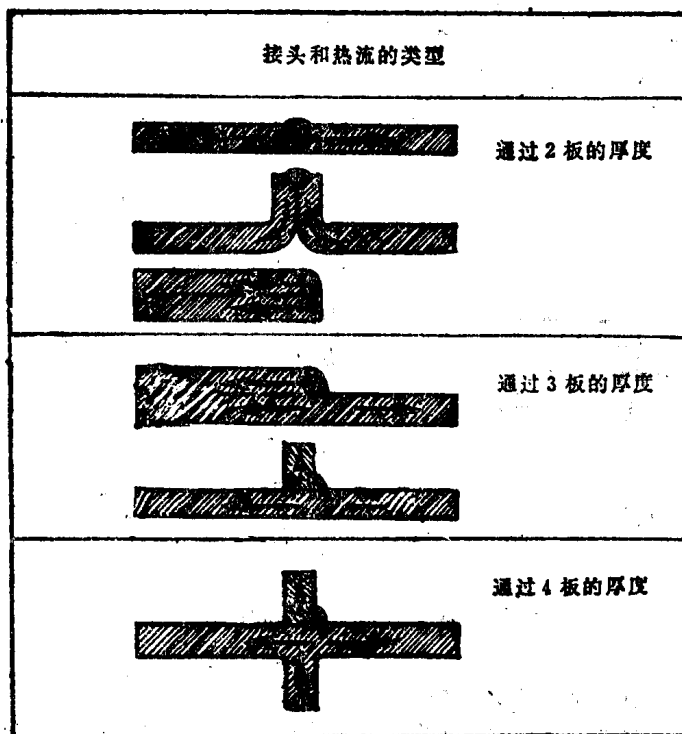


图3 以传热总厚度表示的吸热特性

因为靠近热源的金属比距离热源远的同样物质所起的作用更大，所以吸热效应必然与物质 $\times (Sd-l)$ 的乘积有关，此处 l 是物质与热源的距离。考虑到接头的横截面积，则吸热效应可用各个单独面积和它们与热源的有效距离乘积的总和来表示：

$$H_s = \sum A (Sd-l) \quad (6)$$

S 可用有关的温度范围来表示：

$$H_s = \sum A [3.2 (T_m/T) d - l] \quad (7)$$

S 值已先选定，因而将式(7)应用于单焊道对接焊缝的二维热流极端情况和在无限厚板上多层焊缝的三维情况时，在式(3)和(4)所确定的 $T_m \sim T$ 的范围内，吸热指数比值与冷却速度的比值相近。由于是在起始温度之上测定温度的，所以应在式(7)中考虑预热。

图4中举了一个怎样才能应用吸热指数的例子。假定对接头(a)和接头(b)进行比较那个易于焊接，〔在接头(b)处加工有坡口，打算将焊接规范规定得和同厚度对焊时相似。〕这里有关的温度是熔点等温线，从而 $T_m/T = 1$ ，而 $S = 3.2$ 。在图4(a)的左边，对于0.5厘米厚板 $d = 1$ 厘米的吸热额定值为：

$$H_s = a \times A_1 A = 2.5$$

此处 a 是面积， A 是该面积的中心。同样，对于图4(a)的右边：

$$H_s = b \times b_1 B + c \times C_1 C = 2.56 + 7.96 = 10.52$$

对于图4(b)的右边：

$$H_s = q \times Q_1 Q + r \times R_1 R + t \times T_1 T = 2.56 + 1.13 + 0.01 = 3.7$$

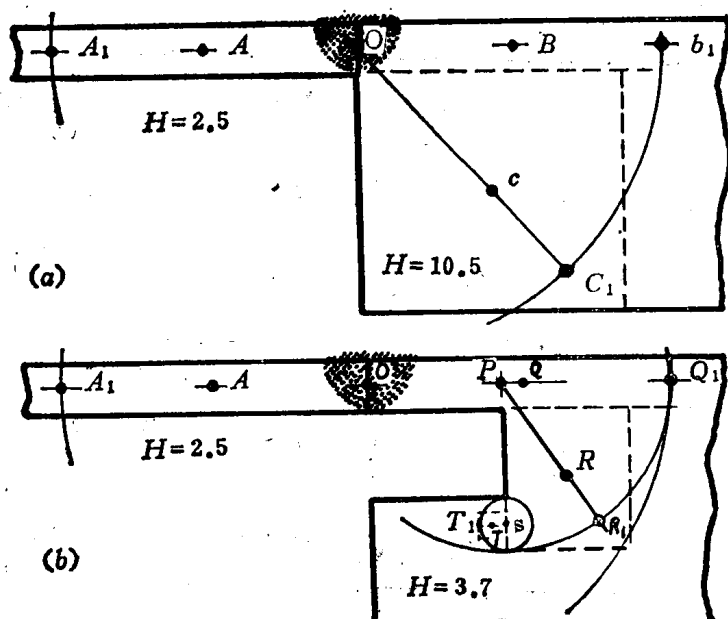


图4 吸热指数的应用

把OPR看作面积 r 的热流迹(heat Path)，并把OPST看作面积 t 的热流迹。接头预制坡口，能使吸热效应显著下降，再通过改进焊接工艺，就不难减少50%的热损失。

众所周知，工件的物理性质对于吸热起主要作用，虽然常常将导热系数作为重要的参数，实际上导温系数却能更精确地表明热量传导和吸收的相对能力。表2中列出了一些常用工业材料的导温系数。对于导温系数高的金属(如铜)，热量以显著地低于钛的温度梯度迅速传播到工件中去，钛的导温系数低。

在几何形状或导温系数不同的工件之间的焊缝内，焊道优先沿着最小散热方向前进。如果有严重不均匀的热输入，则熔融不可能在高吸热边发生，因为那里的热输入不能满足最低要求。若增加总的热输入(例如增加电弧电流)，则只能使低吸热边发生过度熔化。为消除

表2 某些金属的导温系数(近似值)

金 属 名 称	厘米·克·秒制单位
银	1.7
铜	1.1
铝	0.9
镍	0.14
钢	0.11
钛	0.06
尼 孟 克 镍 铬 合 金	0.035

这种情况,特采取下列措施:(a)预热高吸热边;(b)加工厚度大的一边,以减少金属厚度;(c)在低吸热边应用散热器,以加速当时当地的冷却,同时增加总热输入来补偿所增加的总热消耗;(d)改变焊接方法。

在一些焊接方法(例如电子束、激光和在较小程度上等离子弧焊等)中,采用强烈的热源,这样就能熔融热影响区内具有陡峭温度梯度的焊缝,也就是说,焊接特性值 $V_d/4\alpha$ 很高。若热影响区压缩得更小,则焊缝对任何原因引起的吸热不均匀,都很不敏感。使用高能脉冲焊接工艺[例如脉冲钨极电弧焊或电容放电(脉冲)电阻焊],也能获得类似的好处。

2. 联接速率

建议将单位时间内联接金属的总横截面积,作为对焊接方法及其性能进行比较的有效参数。对于在板材上的焊缝,这是非常简单的,只需要将焊接速度(毫米/秒)乘以金属厚度(毫米)即可。对于角焊缝,是焊接速度乘以焊脚长度;对于点焊缝,则是界面处的熔核面积除以时间;对于多道焊缝,确定速度则根据完成联接用的电弧时间。每种焊接方法和联接类型似乎都有一个在较大程度上与厚度无关的联接速率特性值。表3中列出了许多焊接方法的典型速率。显然,热输入速率高的方法通常具有高的联接速率。

对于已知焊接方法和接头结构的联接速率,薄材料往往从平均值以下开始,当厚度增加时,联接速率就上升,而当厚度变得(对操作而言)太大时,联接速率就降了下来。根据这点,就能确定最佳焊接规范。对联接速率的计算,常能揭示出一种焊接方法是否已发挥了它的最大能力,并能从一系列结果中很容易就发现反常的结果。对输入能量(焦耳/毫米)进行补充计算,也是有益的,因为这样就能对不同焊接方法的效率加以比较。

表3 典型联接速率

	毫米 ² /秒
氧乙炔焊, 钢	1.6~5.4
金属极手工电弧焊, 厚达12.5毫米钢	17~27
手工电弧焊, 厚度超过20毫米钢	6.5~9.7
手工电弧焊, 立焊缝, 钢	3.2~14