

高等学校试用教材

GAODENGXUEXIAO
SHIYONGJIAOCAI



焊接及焊接结构

西南交通大学 王元良 主编 中国铁道出版社

高等学校试用教材

焊接及焊接结构

西南交通大学 王元良 主编

西南交通大学 王金诺 主审

中国铁道出版社

1986年·北京

内 容 简 介

本书主要介绍焊接方法、工艺和材料的选择；各种金属的焊接特点；焊接变形应力的分析和控制；焊接接头强度计算；焊接接头的脆断、疲劳及应力腐蚀的分析和控制，特别介绍了断裂力学在这些领域的应用等基本知识。

本书除作为高等学校有关专业的教材外，亦可供有关专业的科研和工程技术人员参考。

高等学校试用教材 焊接及焊接结构

西南交通大学 王元良 主编

西南交通大学 王金诺 主审

中国铁道出版社出版

责任编辑 吴桂萍

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经营

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092毫米 1/32 印张：12.25 字数：304千

1986年11月 第1版 第1次印刷

印数：0001—5,000册 定价：2.10元

105788

前 言

目前有很多的机械产品和建筑物采用焊接结构，如铁路机车车辆、装卸运输机械、施工及养路机械、无缝线路、桥梁结构、大型工业及厂房建筑等均已广泛使用焊接及焊接结构，世界上用于焊接结构的钢材，约占总产量的一半。除此之外，能源工程、海洋工程、造船工程、航空航天工程等部门，焊接技术也是关键技术之一。因此要求工程技术人员，都必须掌握最基本的焊接及焊接结构知识。

本书是根据“起重运输机械”、“工程机械”和“机车车辆”专业《焊接及焊接结构》教学大纲编写的，作为铁路车辆、起重与工程机械等专业“焊接及焊接结构”课程的教材；也用作铁路桥梁、工业民用建筑和其它有关各类专业的选修课教材；同时也可供从事各种产品结构设计和制造的工程技术人员参考。

全书共分十一章，内容除了论述焊接及焊接结构的基础知识外，着重讲述了焊接工艺和材料的选择、焊接变形和应力的分析、焊接裂纹的分析和控制、焊接接头强度的分析和计算。本书还增加了用断裂力学方法来分析和控制焊接结构的脆断、疲劳和应力腐蚀等内容。

本书由西南交通大学王元良主编，王金诺主审。参加编写的人员有：西南交通大学赵素洁（第一章至第四章），西南交通大学王一戎（第五、六章），西南交通大学王元良（第七章至第十一章）。

本书引用了很多著作中的有关资料，还有不少同志在本书审稿会中协助做了很多工作，在此一并致谢。

限于编者水平，错误和不足之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编 者

1985.7.

AR 21/03

目 录

第一章 常用焊接方法	1
第一节 焊接过程连接特点.....	1
第二节 常用焊接方法.....	1
第二章 电弧焊接时焊接规范的选择	8
第一节 焊接温度场.....	8
第二节 电弧对金属的加热.....	9
第三节 焊接规范的选择.....	10
第四节 焊接规范对焊缝形状的影响.....	12
第五节 焊接接头形式及坡口尺寸.....	14
第六节 提高焊接生产率的方法.....	15
第三章 电弧焊冶金过程及焊接材料的选择	17
第一节 焊接冶金过程的特点.....	17
第二节 焊接金属的氧化和氮化.....	17
第三节 气体保护焊接过程.....	19
第四节 熔渣与焊缝金属的作用.....	20
第五节 焊接材料的选择原则.....	25
第四章 焊接接头组织性能及主要金属的焊接	30
第一节 焊接热循环.....	30
第二节 焊缝结晶及其组织.....	31
第三节 热影响区组织及性能.....	32
第四节 金属材料的焊接性.....	35
第五节 碳钢的焊接.....	37
第六节 低合金结构钢的焊接.....	38
第七节 不锈钢和耐磨钢的焊接.....	38
第八节 铸铁的补焊.....	39
第九节 有色金属的焊接.....	41
第十节 堆 焊.....	44
第五章 焊接变形及应力	46
第一节 焊接变形及应力的分类.....	46
第二节 杆件均匀加热、冷却过程中的变形与应力.....	48
第三节 纵向收缩变形和应力.....	53
第四节 弯曲变形与应力.....	57
第五节 横向收缩所引起的变形和应力.....	59
第六节 角变形和波浪变形.....	64

第七节 影响焊接变形的因素及防止措施	67
第八节 焊接变形对结构的影响及矫正方法	73
第九节 焊接组织应力	77
第十节 残余应力对结构的影响及消除	79
第十一节 焊接残余应力的测定	89
第六章 焊接裂纹	94
第一节 热裂纹	94
第二节 再热裂纹	98
第三节 焊接冷裂纹	99
第四节 层状撕裂	105
第七章 焊接接头的强度计算	107
第一节 焊接接头的应力集中	107
第二节 焊接接头的应力分布	108
第三节 焊缝的静载强度计算	112
第四节 焊接联接强度计算	118
第八章 焊接结构的低温脆断	123
第一节 脆性断裂的基本概念	123
第二节 焊接结构的脆断实例分析	127
第三节 低温脆断试验	130
第四节 断裂力学应用	135
第九章 焊接结构的疲劳强度	156
第一节 疲劳的基本概念	156
第二节 焊接接头疲劳	158
第三节 疲劳裂纹形成及扩展	166
第四节 焊接接头及结构的裂纹扩展率与安全寿命估计	167
第五节 应变疲劳	171
第十章 焊接接头的应力腐蚀	175
第一节 应力腐蚀的一般概念	175
第二节 应力腐蚀的断裂力学分析	177
第三节 腐蚀疲劳	179
第四节 应力腐蚀的控制	180
第十一章 焊接接头的质量检验	182
第一节 关于质量标准	182
第二节 缺陷产生的原因	183
第三节 焊接缺陷检验及无损探伤的应用	183
参考文献	188

第一章 常用焊接方法

第一节 焊接过程连接特点

两种或两种以上的材料（同种或异种）通过原子或分子之间的结合和扩散造成永久性连接的工艺过程叫做焊接。

焊接与其他的连接方法不同。通过焊接被连接的材料不仅在宏观上建立了永久性的联系，而且在微观上建立了组织之间的内在联系。当被连接的固体金属表面紧密接触，在表面上进行扩散、再结晶等物理化学过程，形成金属键，就可达到焊接的目的。

实现金属表面紧密接触，在焊接工艺中可采用两种措施：

第一是对被焊金属施加压力，目的是破坏连接表面上的氧化膜，使连接处发生局部塑性变形，增加有效接触面积，从而达到紧密的接触。

第二是加热被焊金属的连接处，达到塑性状态或熔化状态，目的是加速接触面氧化膜的破坏，降低金属变形的阻力，增加原子的热振动能，促进再结晶、扩散、化学反应、结晶过程的发展。

金属焊接时所需要的温度和压力之间存在一定的关系。金属加热温度越低，实现焊接所需的压力就越大。反之，金属加热温度越高，实现焊接所需的压力就越低。当金属加热温度高于金属的熔化温度时，实现焊接所需的压力为零。

焊接连接的实质，就是在连接处母材和焊缝金属形成了共同晶粒。

第二节 常用焊接方法

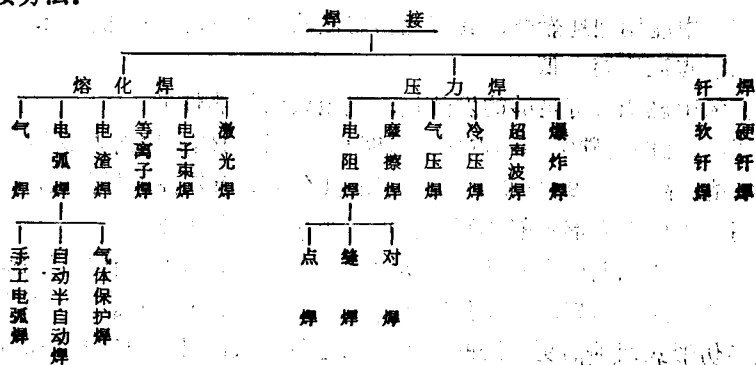
焊接方法的种类很多，按焊接过程的特点分三大类。

熔化焊 将两工件的结合处加热到熔化状态（一般常加入填充金属），并形成共同的熔池，冷却结晶后，形成牢固的接头。

压力焊 利用加压力（或同时加热）的方法，使两工件接合面紧密接触在一起，并产生一定的塑性变形，使它们的原子组成新的结晶。

钎焊 对工件和作为填充金属的钎料进行适当的加热，工件金属不熔化，但熔点低的钎料被熔化后填充到工件之间，与固态的被焊金属相互溶解和扩散，钎料凝固后，将两工件焊接在一起。

常用的焊接方法：



焊接方法达数十种之多，现将最常用的焊接方法及其焊接特点和应用，分别说明如下。

一、气焊与气割

(一) 气焊

用气体火焰作为热源把金属加热到熔化状态，然后冷却，凝固结晶而形成焊缝，这种焊接称气焊。

可燃气体与助燃气体混合燃烧形成气体火焰。可燃气体有乙炔、氢气、石油蒸汽、天然气等，但最常用的是乙炔 (C_2H_2)。助燃气体有氧气。氧气与乙炔气体混合燃烧形成的火焰温度可达 $3150^{\circ}C$ 。

气体火焰产生的过程及设备如图 1—1 所示。气焊时由于有气体火焰保护，故能用光焊条焊接；气体火焰是独立热源，不需电源，便于野外工地焊接，同时能方便地对一些难焊材料进行预热。在铸铁、有色金属、合金钢堆焊和薄钢板焊接中应用很广。但气焊时，热量分散、生产率低、焊接变形大。

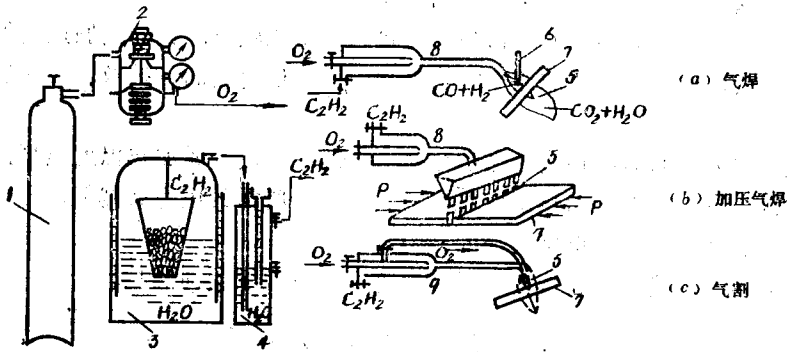


图 1—1 气焊气割设备及方法

1—氧气瓶；2—调压器；3—乙炔发生器；4—安全器；5—火焰；6—光焊条；7—工件；8—焊枪；9—割枪。

(二) 气割

氧-乙炔切割简称气割。金属气割过程，实质是金属在纯氧中的燃烧过程，而不是熔化的过程。气体火焰将被切割处的金属预热到燃烧点，然后喷射纯氧气流，使金属剧烈氧化成熔渣（氧化铁），并放出大量的热，熔渣被高速氧气流吹走，而形成割缝。

只有符合下列条件的金属材料才能顺利地进行气割：

1. 金属在氧中能剧烈地燃烧，其氧化物熔渣的熔点应比金属熔点低，且流动性好；
2. 金属的燃点应比熔点低；
3. 金属在氧中燃烧时有足够的发热量，且金属的导热性低。

含碳量大于 0.7% 的高碳钢，燃点比熔点略高；铸铁的燃点比熔点高得多；不锈钢的氧化物 (Cr_2O_3) 熔点高 (约 $1990^{\circ}C$)；铜、铝及其合金具有较高的导热性，生成的氧化物熔点比金属熔点高；因此它们都不能气割。但可以采用等离子弧切割。

手工气割灵活方便，但生产率低，劳动强度大，割口质量与操作者技能有关。采用机械气割设备进行气割，生产率高、劳动强度低、割口质量高、成本低。我国定型生产的机械气割机有小车式和仿形式两种。更先进的设备有光电跟踪气割机、数字程序控制气割机。

二、电弧焊

电弧焊的热源是电弧热。电弧实质上是在一定条件下，在两电极间气体中的电子发射和气体电离现象，或者说是一种气体放电现象。借助这种特殊的气体放电过程，使电能转换为热能进行焊接，见图1—2。

电弧弧柱温度可达6000K左右，比气体火焰温度高，而且热量集中，因此焊接生产率高。

(一) 手工电弧焊

焊条与工件间产生电弧用以熔化焊条及工件。焊条向下送进及电弧移动由焊工手工操作完成，叫手工电弧焊，如图1—2所示。

手工电弧焊灵活方便，可焊接空间各种位置（平、立、横、仰）的焊缝，也可以焊不规则焊缝，短焊缝，但焊工劳动强度大，生产率比自动焊低。

(二) 埋弧自动焊及半自动焊

电弧在焊剂层（相当于焊条药皮的作用）下燃烧，没有电弧弧光露出来，叫埋弧焊。焊条（又叫焊丝）是光的，连续送入电弧中，送进焊条和电弧移动均由机械自动完成的，因此叫自动焊，见图1—3。焊剂由漏斗7流出后，均匀地敷在装配好的焊件10上，堆敷高度一般为40~60mm。焊丝4由焊丝送给机构送给，经导电咀6送往焊接电弧区。焊接电源两极分别接在导电咀和焊件上。焊丝送给机构、焊丝盘、焊剂斗和操纵盘等全部装在焊接行走小车上。启动焊接按钮，焊接过程便可自动进行。

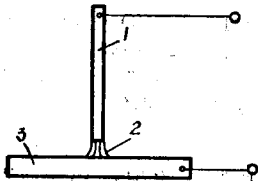


图1—2 手工电弧焊
1——焊条；2——电弧；3——工件。

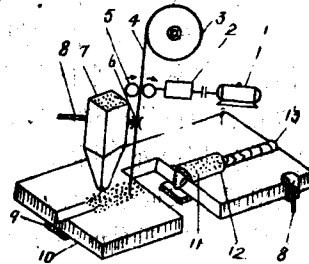


图1—3 埋弧自动焊焊接过程
1——送丝马达；2——变速箱；3——焊丝盘；4——焊丝；5——送丝轮；6——导电咀；7——焊剂斗；8——电缆；9——垫板；10——焊件；11——未熔焊剂；12——熔渣层；13——焊缝。

埋弧自动焊的优点：

1. 生产率高 埋弧焊时，焊丝从导电咀伸出的长度较短，这样就可以使用较大的焊接电流，使单位时间内焊丝的熔化量显著增加；从而使焊接生产率显著提高。

2. 焊缝质量好 由于焊剂对电弧有可靠的保护作用，防止了空气的侵入，减少了空气对焊接熔池的不良影响。并且埋弧焊时焊接规范稳定，焊缝的化学成分和性能比较均匀。

3. 节省焊接材料和电能 对于较厚的材料，可以不开坡口进行焊接，节省了由于加工坡口而消耗掉的金属；同时，由于焊剂的保护，金属的烧损和飞溅显著减少；也完全消除了手工焊中焊条头的损失。由于埋弧焊的电弧热量得到充分利用，所以单位长度焊缝上所消耗的电能也大为降低。

4. 焊接变形小 埋弧焊的热量集中，焊接速度又快，故焊缝的热影响区较小，这样焊

件的变形就小。

5. 改善了劳动条件 采用自动焊使焊工的劳动强度大为降低。电弧在焊剂下燃烧, 没有弧光露出; 同时焊接时放出的有害气体较少, 从而也改善了焊工的劳动条件。

埋弧半自动焊过程与埋弧自动焊基本相同, 所不同的是移动电弧由手工操作, 焊丝由软管中送进, 因此其直径细 (不大于2mm), 它能焊任何曲线焊缝和短焊缝。而埋弧自动焊适合于焊长直的平焊缝和一定直径的圆弧焊缝、环焊缝。

(三) 气体保护电弧焊

气体保护电弧焊是利用气体作为保护介质的一种电弧焊。焊接过程中, 它直接依靠氩、氦或二氧化碳气体, 在电弧周围造成局部的气体保护层, 防止有害于熔池的气体 (空气中的氧、氮侵入, 从而获得质量好的焊缝)。图1—4是二氧化碳气体保护焊示意图。焊接时弧光外露, 属明弧焊, 其方法有两种, 分述如下。

1. 不熔化电极气体保护电弧焊 一般用钨棒作电极, 起产生电弧作用, 用光焊丝作填充金属。氩弧焊常属此种。氩气是惰性气体, 不与液态金属起物理、化学反应, 焊缝质量高, 几乎可用于所有钢材、有色金属及合金的焊接, 但氩气成本高。

2. 熔化电极气体保护电弧焊 用光焊丝作电极, 它除了可以产生电弧外, 还能熔化作填充金属。用二氧化碳气体保护焊, 二氧化碳气体成本低、生产率高。半自动二氧化碳气体保护焊可以进行全位置焊接, 可焊接曲线焊缝及短焊缝, 目前国内外应用很广。

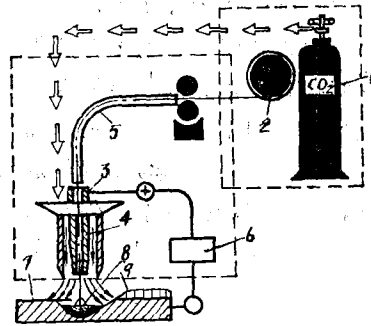


图1—4 CO₂气体保护焊
1—CO₂气瓶; 2—焊丝盘; 3—焊枪; 4—导电咀; 5—软管; 6—电源; 7—工件; 8—熔池; 9—焊缝。

三、电阻焊 (又叫接触焊)

电阻焊是利用电流通过焊件接触处产生的电阻热作为热源, 将焊件局部加热到塑性或熔化状态, 在压力下形成焊接接头的焊接方法。

电阻焊可分为点焊、缝焊、对焊, 见图1—5。

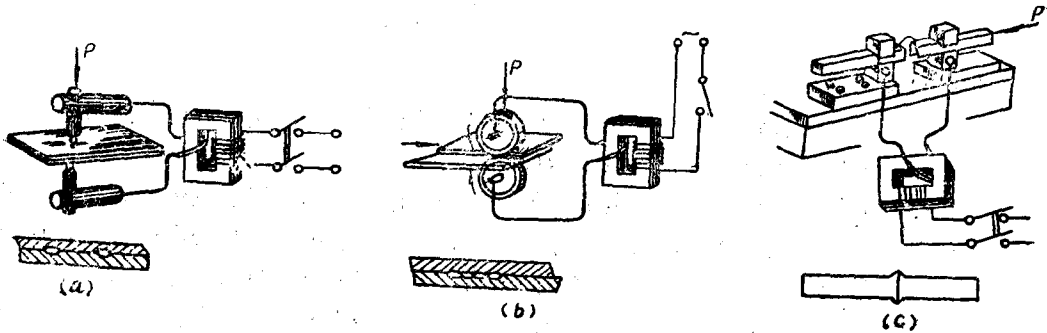


图1—5 电阻焊示意图

(一) 点焊见图1—5(a)

202706

是利用柱状电极，在两块搭接工件接触面之间形成焊点，而将工件焊在一起的焊接方法。

点焊时，先加压使两工件紧密接触，然后通电，两工件接触面处发出的热量则使该处温度急速升高，该处金属熔化形成熔核，然后断电，继续保持或稍加大压力，使熔核在压力下凝固结晶，形成焊点。依次再焊第二、三……个焊点，从而将焊件连接起来。

点焊主要适用于焊接各种薄板，如汽车、车辆、飞机等薄板结构。

(二) 缝焊见图 1—5(b)

过程与点焊相似，只是用旋转的盘状滚动电极代替了柱状电极。焊接时滚盘压紧焊件并转动（也带动焊件向前移动），形成连续焊缝。若断续通电，即为断续焊缝。

缝焊主要用于油箱、水箱等要求密封的薄壁结构。

(三) 对焊见图 1—5(c)

对焊是利用电阻热使两个工件在整个断面上焊接起来的一种方法。根据焊接过程不同，又可分为电阻对焊和闪光对焊。

1. 电阻对焊 工件端面清理干净后，夹紧在电极内，先加一定的初压力，使两工件端面压紧，通电加热到塑性状态，再向两工件施加较大的顶锻压力，同时断电，使焊件产生塑性变形在压力下焊接起来。

电阻对焊一般用于焊接直径小于 20mm、受力不大、形状简单的同类金属，如钢筋、钢管。

2. 闪光对焊 工件夹紧在电极内，使两工件轻微接触后就通电，这时接触金属迅速熔化飞溅出来。同时不断使工件靠近，使接触点不断熔化飞溅，到端面普遍熔化并有一定加热深度时，再断电并加以顶锻压力使工件焊接起来。

闪光对焊对工件端面准备要求不高，而焊接质量好，因此适用于大截面工件、复杂工件、钢轨、轴类零件等的焊接，还可以焊接不同类金属。

四、电渣焊

电渣焊是利用电流通过液态熔渣时所产生的电阻热，作为热源来熔化电极和焊件而实现焊接的一种熔化焊法。依电极形式的不同，有丝极、熔咀和板极电渣焊三种。图 1—6 为丝极电渣焊示意图。

电渣焊时，焊件相距 20~30mm，处于垂直位置，两边装有焊缝成型滑块。开焊时，引弧板上撒上焊剂，使焊丝与引弧板之间产生电弧，利用电弧热使焊剂熔化，被熔化的焊剂变成液态熔渣，待液态熔渣达到一定的深度即形成渣池后，随即将焊丝送至渣池中，此时电弧过程转为电渣过程。焊丝和焊件被渣池加热熔化而形成熔池，温度可保持在 1700~2000℃。焊接过程中，焊丝不断送进并被熔化，渣池逐渐上升，下面的液态金属在焊缝成型滑块的强制冷却下凝固，形成焊缝。为保证质量，焊缝收尾应引出焊件。

电渣焊适合大厚度焊件的焊接，其生产率高，变形小，焊缝的化学成分比较容易控制，

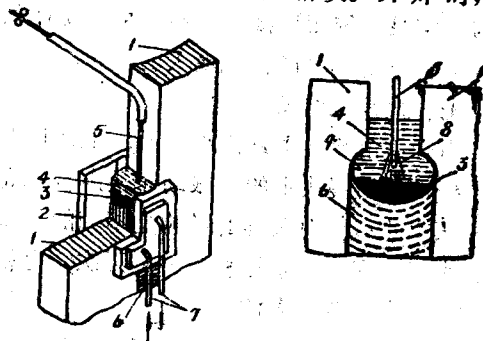


图 1—6 丝极电渣焊

1—焊件；2—冷却滑块；3—金属熔池；
4—渣池；5—电极；6—焊缝；7—冷却水管；8—熔滴；9—焊件熔化金属。

367201

而且很少发生夹渣和气孔。但焊后焊件需正火热处理。

五、等离子弧焊接

所谓等离子是物质存在的一种形态，它是继物质的固态、液态、气态之后的第四态。等离子弧是在柱状钨极与水冷铜导电咀两个电极间，并在外加冷却气体（如氩、氮、二氧化碳等）中的电弧放电作用下形成的（图1—7）。

电弧通过水冷铜咀时，受到外部不断送来的冷气流（如氩、氮、二氧化碳等）及导热性很好的水冷喷嘴孔道壁的冷却作用，弧柱外围气体的温度降低，导电截面缩小，这就是热收缩效应。如果要在已变小的截面上通过与原来同样大小的电流，单位截面上的电流值就提高了，也就使温度升高。又由于电弧是导体，当同一方向的电流流过电弧时，把电弧弧柱看成是一束平行的导线，导线力图互相靠紧，即弧柱截面要缩小，这叫磁收缩效应。在热收缩效应和磁收缩效应的同时作用下，弧柱截面更为缩小，弧柱电流密度更高，气体充分电离，达到正负离子浓度相等的等离子态，形成弧柱温度高达15000~30000K的高温等离子弧。用此等离子弧可以作为热源，进行焊接、切割和喷镀。它可以焊接高合金钢、高强度钢、铜合金、钛合金、钨、钼等合金。可以切割用氧-乙炔火焰不能切割的材料，如不锈钢、铜、铸铁、钨、钼及陶瓷等。在磨损堆焊修复中也得到广泛的应用，如修复各种内燃机车零件，汽车修理中用以堆焊进排气门。

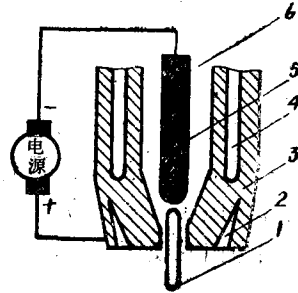


图1—7 等离子枪原理
1——等离子弧；2——保护气；3——喷嘴；4——冷却水；5——钨极；6——工作气体。

六、电子束焊接

真空电子束焊接：利用阴极发射出来的电子，经高压（电压达20~100kV，电流为10~100mA）电场加速，使电子获得很高的能量，并被静电场与磁场聚焦成电子束，这种高能电子束在0.0133Pa真空度下轰击焊件，使电子巨大动能变为热能，熔化焊接金属。特别适宜焊接高熔点金属、活泼金属和高纯度金属。

目前各国已开始应用半真空或非真空电子束焊，就是把电子束从抽成真空的发射室里引到大气中来，电子束从发射室通过一系列的缓冲室而到达暴露在大气中的工件。这些缓冲室都与真空泵系统相连接。这样就可以使体积大的工件（例如飞机的机翼）进行电子束焊。因为实际上真空室不可能做成庞大的容积。

七、超声波焊接

声音是由物体振动产生声源，推动周围空气引起波动，传到人的耳膜。声音的高低是由物体振动的快慢决定的。振动越快声音越高，反之则低。声源每秒钟振动的次数，称作频率。频率的高低对人耳的影响是不同的，太低和太高的频率，都不能使人耳引起感觉。人耳听到声音频率范围是每秒16~2万次，每秒超过2万次振动所产生的声波叫超声波，每秒低于16次的声波叫次声波。

目前超声波已应用于焊接中，在熔焊时加上超声波可细化晶粒，排除气体，排除夹渣，加强渗合金作用，帮助合金扩散，改善热影响区组织。在钎焊中可以加上超声波去除氧化物薄膜，使钎焊易于进行。在接触焊中用超声波产生机械振动来缩短加压下的工件的原子间距，帮助金属扩散以达到焊接结合。

八、激光焊接

激光是利用激光束聚焦后所获得的能量高、方向性好的光束，调焦在工件需要的焊接部位，使光能转换为热能，以熔化金属而达到焊接目的。激光焊接能量集中，焊接过程迅速，使工件热影响区和焊接变形较小，并且金属不易氧化，可在大气中进行焊接，不需要真空和惰性气体保护，因此便于生产使用。由于激光束能利用反射面将其向任何方向弯曲或聚焦，所以特别适合于焊接极复杂的零件。

激光焊接可进行同种金属和异种金属的焊接，其中包括铝、铜、银、不锈钢及某些高熔点金属钨、钨等，甚至还可以焊接玻璃钢等非金属。但目前由于激光器功率有限，故焊接厚度受到了限制。

激光不只可用于焊接，也可用于对金属或某些非金属的切割和打孔。

九、摩擦焊

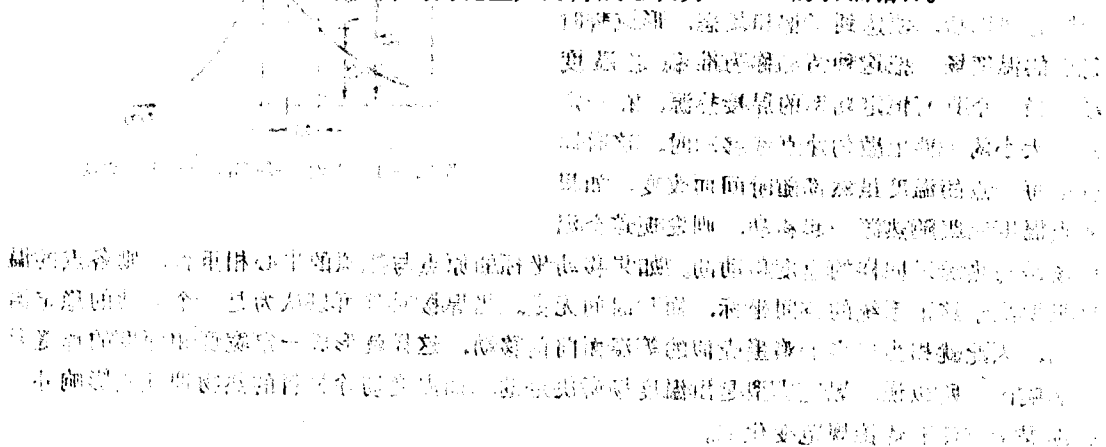
摩擦焊是利用工件接触面摩擦产生的热量为热源，将工件端面加热到塑性状态，然后在压力下进行焊接的一种焊接方法。

摩擦焊的焊接过程 先将待焊的两焊件（一般为圆形工件及管子的对接）夹在焊机中，加一定压力使两焊件紧密接触，然后使一焊件作旋转运动，另一焊件固定，使两焊件接触面相对摩擦而产生热量，待工件端面加热成塑性状态时，利用刹车装置急速使旋转的焊件停止旋转，并在另一焊件的端面加大压力，使两焊件产生塑性变形而焊接起来。

摩擦焊的特点

1. 可焊接的金属范围广，特别适合于焊接异种金属（如高速钢-45号钢、铜-不锈钢、铝-铜、铝-不锈钢等），甚至还能焊接金属和非金属；
2. 焊接接头组织细密，不易产生气孔、夹渣等缺陷。这是因为在摩擦焊过程中，焊件表面的氧化膜及杂质被清除了，表面不易氧化。因此接头质量高；
3. 焊接操作简单，容易实现自动控制，生产率高；
4. 设备简单，电能消耗少（只有闪光对焊的 $\frac{1}{10} \sim \frac{1}{15}$ ）。但要求刹车及加压装置控制灵敏。

目前摩擦焊已得到广泛应用，可焊实心焊件的直径为2~10mm，管子外径可达几百mm。国外已成功地将0.75mm的铝丝焊到陶瓷上，并焊成直径为168mm的石油钻杆。



第二章 电弧焊接时焊接规范的选择

第一节 焊接温度场

电弧焊是以一集中的移动热源加热和熔化金属的，因此工件上温度分布是不均匀、不稳定的。焊接时，工件中各点的温度每一瞬时都在变化，但这种变化是有规律的。某一瞬时工件上各点温度的分布称为温度场，可以用数学关系把它表示出来，即

$$T = f(x, y, z, t)$$

式中 T —— 工件上某点在某一瞬时的温度；

x, y, z —— 工件上某点的空间坐标；

t —— 时间坐标。

温度场的分布情况可以用等温线或等温面来研究，等温线或等温面就是把工件上瞬时温度相同的各点连接在一起成为一条线或一个面。各个等温线或等温面不能彼此相交，而它们彼此之间存在着温度差，这个温差的大小可以用温度梯度来表示。见图 2—1。

由图 2—1 可以看出，与 x 轴线相交的各个等温线彼此温度不同，如沿法线方向两相邻的温度为 T_1 和 T_2 ，而温度梯度为 $(T_1 - T_2) / \Delta S$ 。

当工件上温度场各点的温度不随时间而变动时，则称它为稳定温度场；随时间而变动的温度场称为不稳定温度场。在绝大多数情况下，工件上的温度是随时间而变动的，因而工件上的温度场是属不稳定温度场。

恒定热功率的热源作用在焊件上时，开始的一段时间内，温度场是变化的，但经过相当一段时间以后，便达到了饱和状态，形成暂时稳定的温度场。把这种情况称为准稳定温度场。当一个具有恒定功率的焊接热源，在一定尺寸大小的工件上做匀速直线移动时，这时焊件上每一点的温度虽然都随时间而改变，如果各点温度能跟随热源一起移动，则发现这个温度场是与热源以同样的速度移动的。如果移动坐标的原点与热源的中心相重合，则各点的温度只取决于这个系统的空间坐标，而与时间无关。当焊接时就可以认为是一个移动的稳定温度场，因此就相当于半个鸡蛋壳似的等温面向前移动，这样就形成一定宽度和深度的焊缝及热影响区。所以说，焊缝成型是由温度场所决定的，而温度场除材料的热物理性质影响外，是随焊接方法和焊接规范变化的。

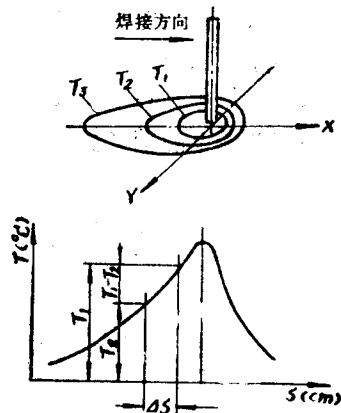


图 2—1 温度场中的等温线和温度梯度

第二节 电弧对金属的加热

一、电弧焊时电弧热能的利用

在焊接过程中由电弧所产生的热量并不是全部被利用，而有一部分热量损失于周围介质和飞溅，也就是说焊件吸收到的热量要少于电弧所提供的热量。

电弧的热能由电能转换而来，电弧功率可由下式表示

$$q = UI(\text{J/s})$$

式中 q —— 电弧功率，即电弧在单位时间内所析出的热能量 (J/s)；

U —— 电弧电压 (V)；

I —— 焊接电流 (A)。

由于电弧的热能量不是完全用于加热焊件和焊条，而是有一部分为加热弧柱气体、辐射及金属飞溅所损失，因此实际用于焊接的热功率称为有效热功率，用 q_e 表示。

$$q_e = \eta_e UI(\text{J/s})$$

式中 η_e —— 电弧热效率。

在一定条件下 η_e 是常数，它主要决定于焊接方法、焊接规范和焊接材料的种类(焊条、焊剂、保护气体等)，一般情况下 η_e 值大小如下：碳弧焊为 0.5~0.65，厚药皮焊条手工电弧焊为 0.77~0.87，埋弧自动焊为 0.77~0.99，钨极氩弧焊为 0.68~0.85 (用交流电源) 和 0.78~0.85 (用直流电源)，熔化极氩弧焊为 0.66~0.69 (焊钢时) 和 0.70~0.85 (焊铝时)。此外，电流极性、焊接速度、以及焊接位置等对电弧热效率 η_e 值也都有一定的影响，但并不显著，故在一般情况下可以忽略不计。

电弧焊时热量平衡及分配如图 2-2 所示。

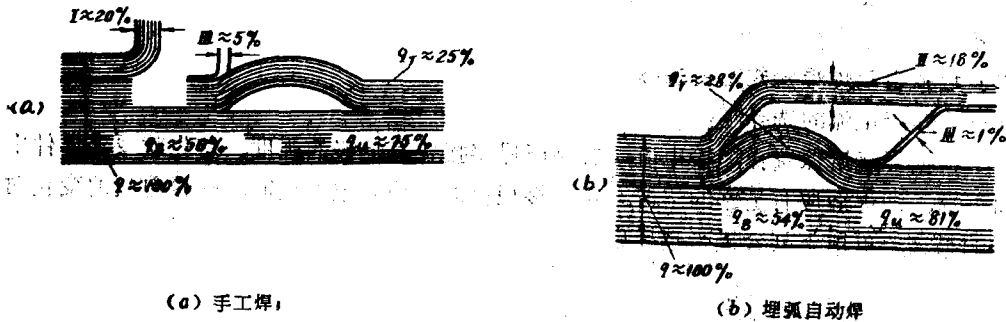


图 2-2 电弧焊时热量分配

q —— 总热功率； q_e —— 有效热功率； q_b —— 母材吸收热功率； q_r —— 熔滴过渡热功率； I —— 损失于介质中； II —— 熔化焊剂损失； III —— 飞溅损失。

图 (a) 手工焊时， $I = 150 \sim 250\text{A}$ 、 $U = 35\text{V}$ ；图 (b) 埋弧自动焊时， $I = 1000\text{A}$ 、 $U = 36\text{V}$ 、 $V_H = 36\text{m/h}$ 。

二、焊接线能量 q_l

焊接时，焊接电流 I ，电弧电压 U ，焊接速度 V_H ，进条速度 V_T 的数值大小，称为焊接规范。焊接线能量是焊接规范的一个综合指标，它表示单位长度焊缝上投入的有效热量，用 q_l 表示。

$$q_l = \frac{q_u}{V_H} = \frac{\eta UI}{V_H} \text{ (J/cm)}$$

式中 V_H —— 焊接速度 (cm/s), $V_H = \frac{l}{t}$

l —— 焊缝长度 (cm)

t —— 焊接时间 (s)

q_l 对焊接质量和生产率有很大影响。 q_l 大, 生产率高, 但焊接变形大, 焊合金钢时 q_l 还是影响焊缝及热影响区组织的重要因素。

第三节 焊接规范的选择

在本章第一节中提到焊缝成型与焊接温度场有关, 而温度场又与焊接规范有关, 怎样选择焊接规范才能保证有良好的焊缝成型, 从而保证焊缝的质量呢? 下面详细介绍焊接规范的选择。

一、手工电弧焊时焊接规范的选择

手工电弧焊时, 送进焊条、电弧的移动都是由焊工自行掌握的, 因此进条速度, 焊接速度就不必选择了。焊接时电弧电压的变化范围也不大, 一般为 20~25V。焊条是由电弧热及电流通过焊条的电阻热来加热熔化的。电阻热起限制电流的作用, 焊条温度应在 400°C 以下, 温度过高了焊条药皮会剥落。又因为手工焊焊条导电长度长, 导电时间长, 因而电流就不能过大。故要根据所用的焊条直径来选择焊接电流。其经验公式为

$$I = Kd \text{ (A)}$$

式中 I —— 焊接电流 (A);

K —— 系数 (一般为 30~60);

d —— 焊条直径 (mm)。

二、埋弧自动焊焊接规范的选择

(一) 焊接电流的选择

1. 根据焊缝熔深选择焊接电流, 要保证焊接接头有足够的强度, 首先就要求焊件沿厚度方向焊透, 即焊缝应有足够的熔深, 当焊接规范的其他参数不变时, 焊接电流的变化对熔深的影响很大。可用下列公式来选择电流

$$h = KI \text{ (mm)}$$

式中 h —— 焊缝熔深 (mm);

I —— 焊接电流 (A);

K —— 系数。

系数 K 与电源的种类、极性有关, 当直流正联时, 一般取 $K = \frac{1}{100}$; 当直流反联和交流电时, 一般取 $K = \frac{1.1}{100}$ 。

2. 与焊条直径相配合, 选择焊接电流, 用下列公式来选择

$$I = 110d + 10d^2 \pm 100$$

式中 I —— 焊接电流 (A)

d —— 焊丝直径 (mm)

对于焊丝直径为1.6~2mm的埋弧半自动焊及自动焊时电流可在150~600A 范围内选择。由此看出，一定焊条直径的焊接电流可在一定范围内选择，这就适应了生产需要，通过调整电流获得需要的焊缝熔深。

(二) 进条速度 V_T 的选择

在自动焊或半自动焊时，必须使进条速度等于焊条熔化速度，电弧才不断稳定燃烧。就是说焊丝送进多长，就得熔化掉多长，这样才能保持弧长不变，电弧电压不变，电弧稳定燃烧。因为电弧太长会使电弧熄灭，弧长太短使焊缝变窄，焊缝成型不好。

焊条熔化生产率，即单位时间里熔化焊条的重量，用 g_T 表示，则

$$g_T = \alpha_T I \quad (\text{g/h})$$

式中 α_T —— 熔化系数 ($\text{g/A} \cdot \text{h}$)；

I —— 焊接电流 (A)。

焊条的进条率，即单位时间里送进焊条的重量，用 g'_T 表示，则

$$g'_T = F_T \cdot \gamma \cdot V_T \quad (\text{g/h})$$

式中 F_T —— 焊条截面积 (cm^2)；

γ —— 焊条比重 (g/cm^3)；

V_T —— 进条速度 (cm/h)。

只有当 $g_T = g'_T$ 的时候，电弧才能稳定燃烧。故

$$\alpha_T I = F_T \cdot \gamma \cdot V_T$$

所以

$$V_T = \frac{\alpha_T \cdot I}{F_T \cdot \gamma} \quad (\text{cm/h})$$

对于手工焊，一般焊条 $\alpha_T = 7 \sim 9 (\text{g/A} \cdot \text{h})$ ，若用铁锰型焊条 $\alpha_T = 12 (\text{g/A} \cdot \text{h})$ 。但在自动焊时，特别是在细焊丝自动焊时，由于电阻热的充分利用，使 α_T 增加，电流越大， α_T 增加越多，见图 2-3。

(三) 焊接速度 V_H 的选择 (即电弧移动速度选择)

焊条是以熔滴的形式转移到熔池与熔化的基体金属共同组成熔池，结晶以后就是焊缝，但在转移过程中有飞溅烧失，实际上转移到焊件的比熔化的焊条量少，在单位时间内转移到基体上的金属是以堆焊率 g_H 来表示的。则

$$g_H = \alpha_H I \quad (\text{g/h})$$

式中 α_H —— 堆焊系数 ($\text{g/A} \cdot \text{h}$)；

I —— 焊接电流 (A)。

即为单位时间里堆焊金属的重量。上式还可以写成

$$g_H = F_H \cdot \gamma \cdot V_H \quad (\text{g/h})$$

式中 F_H —— 堆焊金属截面积 (cm^2)；

γ —— 金属比重 (g/cm^3)；

V_H —— 焊接速度 (cm/h)。

故

$$\alpha_H I = F_H \cdot \gamma \cdot V_H$$

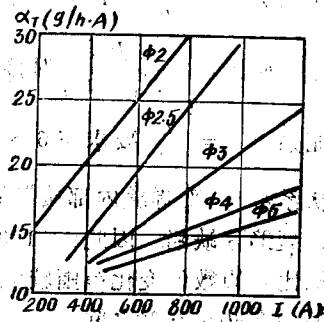


图 2-3 自动焊时 d 、 I 与 α_T 的关系