

第4章 焊接

焊接是使相互分离的金属材料借助于原子间的结合力连接起来的一种热加工工艺方法。焊接连接性好、省工省料、结构重量轻，广泛应用于锅炉、压力容器、船舶、桥梁、化工设备等的制造。焊接方法很多，本章主要介绍各种焊接的工艺原理和方法以及常用金属材料的焊接性能和焊接结构工艺性。

4.1 概述

焊接是通过加热或加压，或者两者并用，并且用或不用填充材料，使工件达到结合的一种方法。其实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（0.3~0.5nm）形成金属键，从而使两金属连为一体。

焊接方法的种类很多，根据实现金属原子间结合的方式不同，可分为熔化焊、压力焊和钎焊三大类。以热源类型为横坐标，以两材料发生结合时的物理状态为纵坐标，用二元坐标法将焊接方法进行分类，见表 4.1.1。

焊接方法的主要特点是：

1. 节省材料，减轻重量，焊接的金属结构件可比铆接节省材料 10%~25%；采用点焊的飞行器结构重量明显减轻，降低油耗，提高运载能力。
2. 简化复杂零件和大型零件的制造过程。焊接方法灵活，可化大为小，以简拼繁，加工快，工时少，生产周期短。许多结构都以铸—焊、锻—焊形式组合，简化了加工工艺。
3. 适应性强。多样的焊接方法几乎可焊接所有的金属材料及部分非金属材料。可焊范围较广，而且连接性能较好。焊接接头可达到与工件金属等强度或相应的特殊性能。
4. 满足特殊连接要求。不同材料焊接在一起，能使零件的不同部分或不同位置具备不同的性能，达到使用要求。如防腐容器的双金属筒体焊接、钻头工作部分与柄的焊接、水轮机叶片耐磨表面堆焊等。
5. 降低劳动强度，改善劳动条件。

尽管如此，焊接加工在应用中仍存在某些不足。例如不同焊接方法的焊接性有较大差别，焊接接头的组织不均匀，焊接热过程造成的结构应力与变形以及各种裂纹问题等，都有待进一步研究和完善。

焊接方法在工业生产中主要用于：

1. 制造金属结构件 焊接方法广泛应用于各种金属结构的制造，如桥梁、船、压力容器、化工设备、机动车辆、矿山机械、发电设备及飞行器等。
2. 制造机器零件和工具 焊接件具有刚性好、改型快、周期短、成本低的优点，适合于单件或小批量生产加工各类机器零件和工具。如机床机架和床身、大型齿轮和飞轮、各种切削工具等。
3. 修复 采用焊接方法修复某些有缺陷、失去精度或有特殊要求的工件，可延长其使用寿命，提高使用性能。

近年来，焊接技术迅速发展，新的焊接方法不断出现，在应用了计算机技术后，使其功能大增。焊接的精密化和智能化必将效力无比。

表 4.1.1 焊接方法分类（二元坐标法）

| 两材料结合时状态 | 焊接过程中手段 | 电 弧 热 | | | | | | | 电 阻 热 | | | | | | 高能束 | | 化学反应热 | | | | |
|----------|---------|----------|------|----------|------|------|--------|--------|--------|------|---------|----|--------|------|----------|-------|-------|------|----------|-----|-----|
| | | 涂料（焊剂）保护 | | | | | 气体保护 | | 熔渣电阻 | 固体电阻 | | | | | | 电子束 | 激光束 | 火焰 | 热剂 | 炸药 | |
| | | | | | | | | | | 工频 | | | 高频 | | | | | | | | |
| | | 接触式 | | | 感应式 | | | 接触式 | | | 感应式 | | | | | | | | | | |
| 液相 | 熔化不加压力 | 手弧焊 | 埋弧焊 | | | | 钨极氩弧焊 | 等离子弧焊 | 熔化保护气焊 | 电渣焊 | | | | | | | 电子束焊 | 激光焊 | 气焊割及火焰堆焊 | 热剂焊 | |
| | | 手弧堆焊 | 埋弧堆焊 | 水下电焊 | 电弧点焊 | 碳弧气刨 | 钨极氩弧堆焊 | 等离子弧堆焊 | 管状电弧堆焊 | | | | | | | | | | | | |
| 固相 | 熔化加压力 | | | 电焊（电容储能） | 电焊螺柱 | | | | | 点焊 | 缝焊 | 凸焊 | 电阻感应焊 | | | | | | | | |
| | 加压力不熔化 | | | | | | | | | 电阻对焊 | 散焊（电阻扩） | | 接触高频对焊 | 电阻对焊 | 感应高频对焊 | 电阻对焊 | | | 气压焊 | | 爆炸焊 |
| 固相兼液相 | 加压力熔化 | | | | | | | | | 闪光对焊 | | | | 闪光对焊 | 闪光对焊 | | | | | | |
| | | | | | | | | | | 电阻钎焊 | | | | | 感应钎焊（高频） | 电子束钎焊 | | 火焰钎焊 | | | |
| | | | | | | | 等离子喷涂 | | | | | | | | | | | | 钎焊喷涂火焰 | | |

4.2 手工电弧焊

手工电弧焊是熔化焊中最基本的一种焊接方法。它利用电弧产生的热熔化被焊金属,使之形成永久结合。由于它所需要的设备简单、操作灵活,可以对不同焊接位置、不同接头形式的焊缝方便地进行焊接,因此是目前应用最为广泛的焊接方法。

手工电弧焊按电极材料的不同可分为熔化极手工电弧焊和非熔化极手工电弧焊。非熔化极手工电弧焊如手工钨极气体保护焊。熔化极手工电弧焊是以金属焊条作电极,电弧在焊条端部和母材表面燃烧的方法。

图 4.2.1 是手工电弧焊示意图,图中的电路是以弧焊电源为起点,通过焊接电缆、焊钳、焊条、工件、接地电缆形成回路。在有电弧存在时形成闭合回路,形成焊接过程。焊条和工件在这里既作为焊接材料,也作为导体。焊接开始后,电弧的高热瞬间熔化了焊条端部和电弧下面的工件表面,使之形成熔池,焊条端部的熔化金属以细小的熔滴状过渡到熔池中去,与母材熔化金属混合,凝固后成为焊缝。

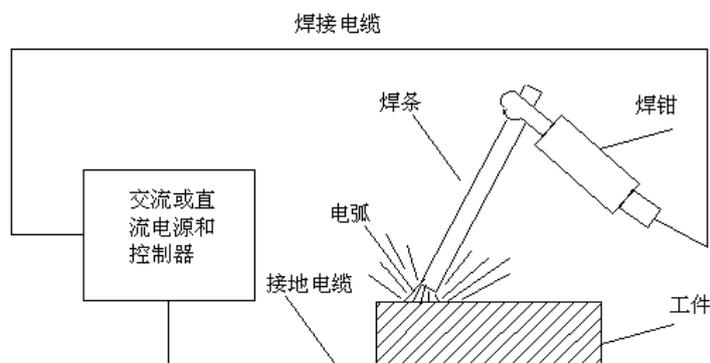


图 4.2.1 手工电弧焊示意图

手工电弧焊所用的设备需根据焊条和被焊材料选取。电源分为交流电和直流电两种。使用酸性焊条焊接低碳钢一般构件时,应优先考虑选用价格低廉、维修方便的交流弧焊机;使用碱性焊条焊接高压容器、高压管道等重要钢结构,或焊接合金钢、有色金属、铸铁时,则应选用直流弧焊机。购置能力有限而焊件材料的类型繁多时,可考虑选用通用性强的交、直流两用弧焊机。当采用某些碱性药皮焊条时,如结 507 时,必须选用直流焊接电源,而且要注意此时应将电焊机的负极接工件,正极接焊条,称为直流反接法;反之称为正接法。如图 4.2.2 所示。

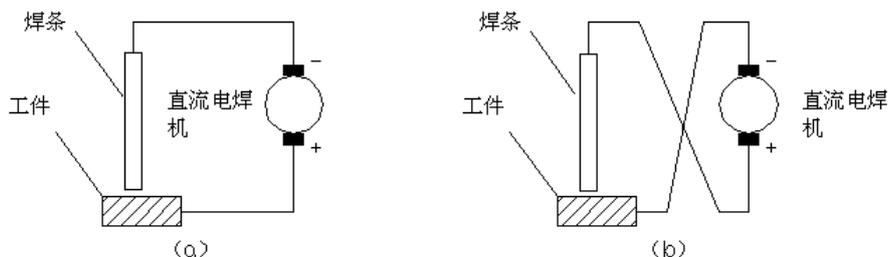


图 4.2.2 采用直流电焊接的极性接法

(a) 正接法

(b) 反接法

4.2.1 焊接电弧

焊接电弧是指发生在电极与工件之间的强烈、持久的气体放电现象。

1. 电弧的引燃

常态下的气体由中性分子或原子组成，不含带电粒子。要使气体导电，首先要有一个使其产生带电粒子的过程。产生中一般采用接触引弧。先将电极（钨棒或焊条）和焊件接触形成短路（图 4.2.3 (a)），此时在某些接触点上产生很大的短路电流，温度迅速升高，为电子的逸出和气体电离提供能量条件，而后将电极提起一定距离（ $<5\text{mm}$ 图 4.2.3 (b)）。在电场力的作用下，被加热的阴极有电子高速逸出，撞击空气中的中性分子和原子，使空气电离成阳离子、阴离子和自由电子。这些带电粒子在外电场作用下定向运动，阳离子奔向阴极，阴离子和自由电子奔向阳极。在它们的运动过程中，不断碰撞和复合，产生大量的光和热，形成电弧（图 4.2.3 (c)）。电弧的热量与焊接电流和电压的乘积成正比，电流愈大，电弧产生的总热量就愈大。

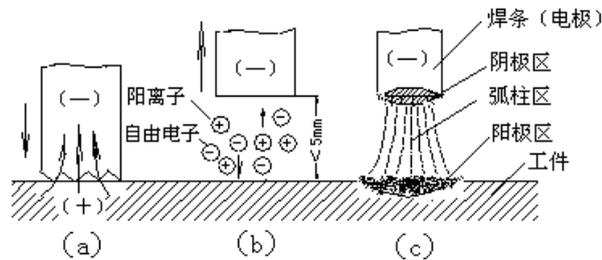


图 4.2.3 电弧的引燃

2. 电弧的组成

焊接电弧由阴极区、阳极区和弧柱区 3 部分组成（图 4.2.3 (c)）。

阴极区因发射大量电子而消耗一定能量，产生的热量较少，约占电弧热的 36%，阳极表面受高速电子的撞击，传入较多的能量，因此阳极区产生的热量较多，占电弧热的 43%。其余 21% 左右的热量在弧柱区产生。

电弧中阳极区和阴极区的温度因电极的材料（主要是电极熔点）不同而有所不同。用钢焊条焊接钢材料时，阳极区热力学温度约 2600K，阴极区热力学温度约 2400K，弧柱区热力学温度高达 5000~8000K。正接时，电弧热量主要集中在焊件（阳极）上，有利于加快焊件熔化，保证足够的熔深，适用于焊接较厚的工件。反接时，焊条接阳极，适用于焊接有色金属及薄钢板，以避免烧穿焊件。

4.2.2 焊接接头

焊缝以及其周围受不同程度加热和冷却的母材是焊缝的热影响区，总称为焊接接头。

1. 焊缝形成过程

熔焊焊缝的形成经历了局部加热熔化，使分离工件的结合部位产生共同熔池，再经凝固结晶成为一个整体的过程。

图 4.2.4 为焊缝形成示意图。在电弧高温作用下，焊条和工件同时产生局部熔化，形成熔池。熔化的填充金属呈球滴状过渡到熔池。电弧在沿焊接方向移动中，熔池前部 (②)-①-

②区)不断参与熔化,并依靠电弧吹力和电磁力的作用,将熔化金属吹向熔池后部(②-③-②区),逐步脱离电弧高温而冷却结晶。所以电弧的移动形成动态熔池,熔池前部的加热熔化与后部的顺序冷却结晶同时进行,形成完整的焊缝。

焊条药皮在电弧高温下一部分分解为气体,包围电弧空间和熔池,形成保护层。另一部分直接进入熔池,与熔池金属发生冶金反应,并形成渣而浮于焊缝表面,构成渣保护。

2. 焊接冶金过程

电弧焊时,焊接区内各种物质在高温下相互作用,产生一系列变化的过程称为冶金过程。象在小型电弧炼钢炉中炼钢一样,熔池中进行着熔化、氧化、还原、造渣、精炼和渗合金等一系列物理化学过程。焊接的冶金过程与一般的冶炼过程相比较,有以下特点:温度远高于一般冶炼温度,因此金属元素强烈蒸发,并使电弧区的气体分解成原子状态,使气体的活性大为增强,导致金属元素烧损或形成有害杂质。冷却速度快,熔池体积小,四周又是冷的金属,熔池处于液态时间很短,一般在10秒钟左右,各种化学反应难以达到平衡状态致使化学

成分不均匀,气体和杂质来不及浮出,从而产生气孔和夹渣等缺陷。

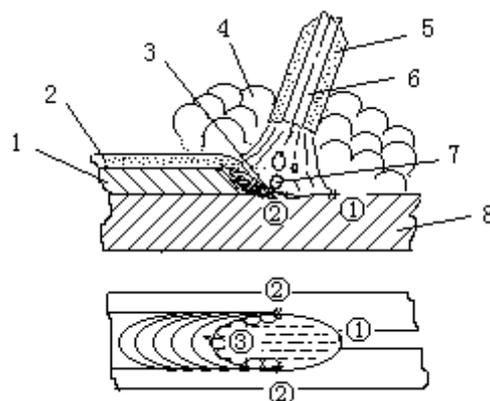


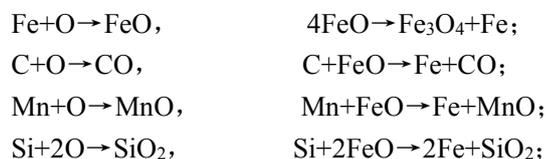
图 4.2.4 电弧焊焊缝形成示意图

1—已凝固的焊缝金属; 2—熔渣;

3—熔化金属(熔池) 4—焊条药皮燃烧产生的保护气体;

5—焊条药皮; 6—焊条芯; 7—金属熔滴; 8—母材

由于上述特点,所以在焊接过程中如不加以保护,空气中的氧、氮和氢等气体就会侵入焊接区,并在高温作用下分解出原子状态的氧、氮和氢,与金属元素发生一系列物理化学作用:



其结果是,钢中的一些元素被氧化,形成 $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ 、 $\text{Mn} \cdot \text{SiO}_2$ 等熔渣,使焊缝中C、Mn、Si等大量烧损。当熔池迅速冷却后,一部分氧化物熔渣残存在焊缝金属中,形成夹渣,显著降低焊缝的力学性能。

氢和氮在高温时能溶解于液态金属内,氮和铁还可以形成 Fe_4N 、 Fe_2N 。冷却后,一部分氮保留在钢的固溶体中, Fe_4N 则成片状夹杂物留存在焊缝中,使焊缝的塑性和韧性下降。氢的存在则引起氢脆性,促进冷裂纹的形成,并且易造成气孔。

综上所述,为了保证焊缝质量,焊接过程中必须采取必要的工艺措施,来限制有害气体进入焊缝区,并补充一些烧损的合金元素。手工电弧焊焊条的药皮、埋弧自动焊的焊剂等均能起到这类作用。气体保护焊的保护气体虽不能补充金属元素,但也能起到保护作用。

4.2.3 焊条

1. 焊条组成和作用

焊条由焊芯和药皮两部分组成。焊芯是金属丝,药皮是压涂在焊芯表面的涂料层。

(1) 焊芯 焊芯的作用,一是作为电极传导电流,二是熔化后作为填充金属与母材形成焊缝。焊芯的化学成分和杂质含量直接影响焊缝质量。生产中有不同用途的焊丝(焊芯),

如焊条焊芯、埋弧焊焊丝、CO₂焊焊丝、电渣焊焊丝等。

(2) 药皮 药皮的作用，一是改善焊接工艺性，如药皮中含有稳弧剂，使电弧易于引燃和保持燃烧稳定。二是对焊接区起保护作用。药皮中含有造渣剂、造气剂等，造渣后熔渣与药皮中有机物燃烧产生的气体对焊缝金属起双重保护作用。三是起有益的冶金化学作用。药皮中含有脱氧剂、合金剂、稀渣剂等，使熔化金属顺利地进行脱氧、脱硫、去氢等冶金化学反应，并补充被烧损的合金元素。

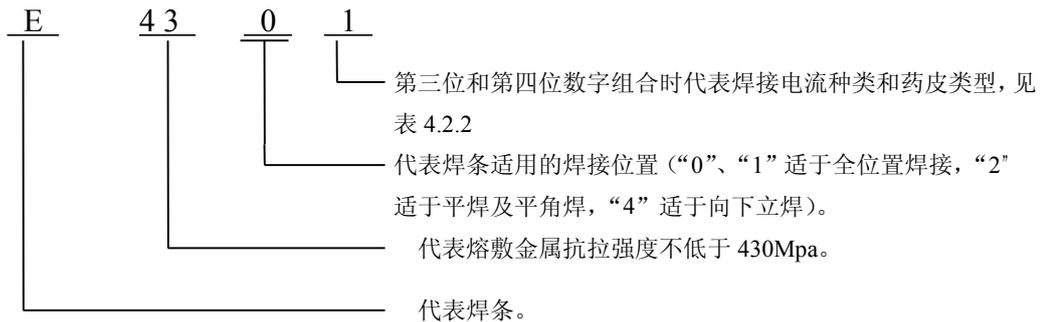
2. 焊条分类

焊条按用途不同分为十大类：结构钢焊条，钼和铬钼耐热钢焊条，低温钢焊条，不锈钢焊条，堆焊焊条，铸铁焊条，镍及镍合金焊条，铜及铜合金焊条，铝及铝合金焊条，特殊用途焊条等。其中结构钢焊条分为碳钢焊条和低合金钢焊条两部分。

结构钢焊条按药皮性质不同可分为酸性焊条和碱性焊条两种。酸性焊条的药皮中含有多量酸性氧化物（如 SiO₂、MnO₂ 等），碱性焊条药皮中含有多量碱性氧化物（如 CaO 等）和萤石（CaF₂）。由于碱性焊条药皮中不含有机物，药皮产生的保护气体中氢含量极少，所以又称为低氢焊条。

3. 焊条型号与牌号

焊条型号是国家标准中规定的焊条代号。焊接结构生产中应用最广的碳钢焊条和低合金钢焊条，相应的国家标准为 GB/T5117-1995 和 GB/T5118-1995。标准规定，碳钢焊条型号由字母“E”和四位数字组成。如“E4301”，其含义如下：



在我国已公布的碳钢焊条型号中，代表熔敷金属抗拉强度最小值的数字仅有“43”和“50”系列两种。

表 4.2.1 焊条用途类别与焊条牌号表示方法

| 名 称 | 焊条牌号 | 名 称 | 焊条牌号 |
|-----------|------|---------|-------|
| 结构钢焊条 | J××× | 铸铁焊条 | Z××× |
| 钼及铬钼耐热钢焊条 | R××× | 镍及镍合金焊条 | Ni××× |
| 低温钢焊条 | W××× | 铝及铝合金焊条 | L××× |
| 不锈钢焊条 | G××× | 铜及铜合金焊条 | T××× |
| | A××× | 特殊用途焊条 | TS××× |
| 堆焊焊条 | D××× | | |

焊条牌号是焊条生产行业统一的焊条代号。表 4.2.1 为焊条用途不同的分类与对应牌号。焊条牌号前的字母表示焊条类别，“×××”代表数字，前两位数字代表焊缝金属抗拉强度等级。末尾数字表示焊条的药皮类型和焊接电流种类（表 4.2.2）。表 4.2.3 列举出部分常用碳钢焊条型号与对应的焊条牌号及数字含义。

表 4.2.2 焊条牌号末尾数字与焊条药皮类型及焊接电流种类之间的关系

| 末尾数字 | 药皮类型 | 焊接电流种类 | 末尾数字 | 药皮类型 | 焊接电流种类 |
|------|----------|-----------|------|------|-----------|
| ××0 | 不属已规定的类型 | | ××5 | 纤维素型 | 交流或直流正、反接 |
| ××1 | 氧化钛型 | 交流或直流正、反接 | ××6 | 低氢钾型 | 交流或直流反接 |
| ××2 | 氧化钛钙型 | | ××7 | 低氢钠型 | 直流反接 |
| ××3 | 钛铁矿型 | | ××8 | 石墨型 | 交流或直流正、反接 |
| ××4 | 氧化铁型 | | ××9 | 盐基型 | 直流反接 |

表 4.2.3 部分常用碳钢焊条型号与牌号对应表

| 焊条型号 | 焊条牌号 | 熔敷金属抗拉强度数值 (≥) | | 药皮种类 | 焊条类别 | 电流种类与极性 | 用途 |
|-------|--------|---------------------|-----|--------|------|-----------|-------------|
| | | kgf/mm ² | MPa | | | | |
| E4301 | J423 | 43 | 420 | 钛铁矿型 | 酸性焊条 | 交流或直流正、反接 | 较重要的碳钢结构 |
| E5001 | J503 | 50 | 490 | | | | |
| E4303 | J422 | 43 | 420 | 钛钙型 | | 交流或直流反接 | 一般碳钢结构 |
| E5003 | J502 | 50 | 490 | | | | |
| E4311 | J425 | 43 | 420 | 高纤维素钾型 | | 交流或直流正接 | 较重要的碳钢结构 |
| E5011 | J505 | 50 | 490 | | | | |
| E4320 | J424 | 43 | 420 | 氧化铁型 | 碱性焊条 | 直流反接 | 重要碳钢、低合金钢结构 |
| E4327 | J424Fe | 43 | 420 | 铁粉氧化铁型 | | | |
| E4315 | J427 | 43 | 420 | 低氢钠型 | | 交流或直流反接 | 金钢结构 |
| E5015 | J507 | 50 | 490 | | | | |
| E4316 | J426 | 43 | 420 | 低氢钾型 | | 交流或直流反接 | 金钢结构 |
| E5016 | J506 | 50 | 490 | | | | |
| E5018 | J506Fe | 50 | 490 | 铁粉低氢钾型 | | | |

焊条型号是根据熔敷金属抗拉强度、药皮类型、焊接位置、电流种类及极性划分的，以便供用户选焊条时参考。但同一种焊条型号可能有不同性能的几种焊条牌号与之对应，如 J427 和 J427Ni 属于同一种焊条型号 E4315。

4. 焊条的选用原则：

(1) 等强度原则 焊接低碳钢和低合金钢时。一般应使焊缝金属与母材等强度，即选用与母材同强度等级的焊条。

(2) 同成分原则 焊接耐热钢、不锈钢等金属材料时，应使焊缝金属的化学成分与母材的化学成分相同或相近，即按母材化学成分选用相应成分的焊条。

(3) 抗裂缝原则 焊接刚度大、形状复杂、要承受动载荷的焊接结构时，应选用抗裂性好的碱性焊条，以免在焊接和使用过程中接头产生裂纹。

(4) 抗气孔原则 受焊接工艺条件的限制，如对焊件接头部位的油污、铁锈等清理不便，应选用抗气孔能力强的酸性焊条，以免焊接过程中气体滞留于焊缝中，形成气孔。

(5) 低成本原则 在满足使用要求的前提下，尽量选用工艺性能好、成本低和效率高的焊条。

此外，应根据焊件的厚度、焊缝位置等条件，选用不同直径的焊条。一般焊件愈厚，选用焊条的直径就愈大。

4.2.4 焊接接头的金属组织与性能

1. 焊接工件上温度的变化与分布

焊接时，电弧沿着工件逐渐移动并对工件进行局部加热。因此在焊接过程中，焊缝区的金属都是由常温状态开始被加热到较高的温度，然后再逐渐冷却到常温。但随着各点金属所在位置的不同，其最高加热温度是不同的。图 4.2.5 是焊接时焊件横截面上不同点的温度变化情况，由于各点离焊缝中心距离不同，所以各点的最高温度不同。又因热传导需要一定时间，所以各点是在不同时间达到该点最高温度的。但总的看来，在焊接过程中，焊缝受到一次冶金过程，焊缝附近区相当于受到一次不同规范的热处理，因此必然有相应的组织与性能的变化。

2. 焊接接头金属组织与性能的变化

现以低碳钢为例，来说明焊缝和焊缝附近区由于受到电弧不同加热而产生的金属组织与性能的变化。如图 4.2.6，左侧下部是焊件的横截面，上部是相应各点在焊接过程中被加热的最高温度曲线（并非某一瞬时该截面的实际温度分布曲线）。图中 1、2、3 等各段金属组织性能的变化，可从右侧所示的部分铁—碳合金状态图来对照分析。工件截面图上已示出了相应各点的金属组织变化情况。

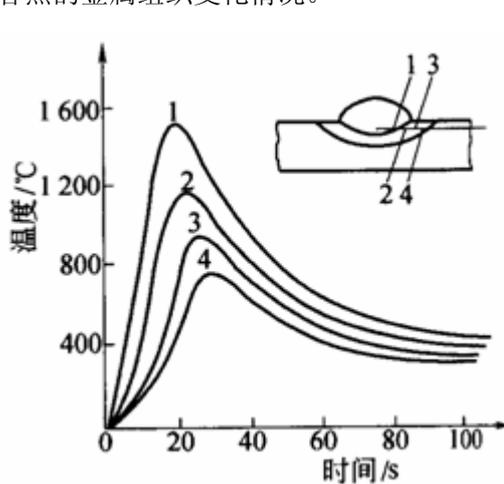


图 4.2.5 焊缝区各点温度变化示意图

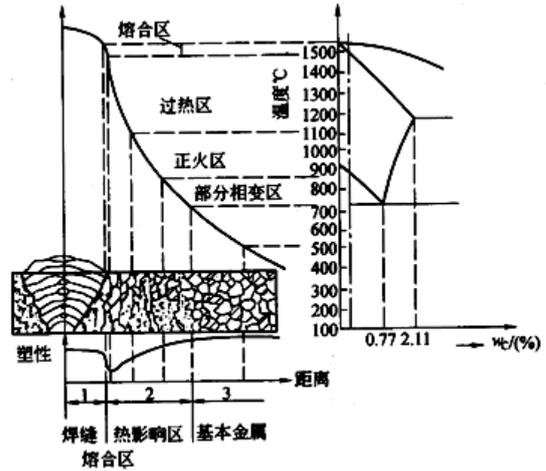


图 4.2.6 低碳钢焊接热影响区组织变化示意图

(1) 焊缝金属 焊缝金属的结晶过程，首先从熔池和母材的交界处开始，然后以联生结晶的方式，即依附于母材晶粒现成表面而形成共同晶粒的方式向熔池中心生长，形成柱状晶，如图 4.2.7 所示。因结晶时各个方向冷却速度不同，因而形成柱状的铸态组织，由铁素体和少量珠光体所组成。

因结晶是从熔池底壁的半熔化区开始逐次进行的，低熔点的硫磷杂质和氧化铁等易偏析集中在焊缝中心区，将影响焊缝的力学性能，因此对焊条或其他焊接材料应慎重选用。

焊接时，熔池金属受电弧吹力和保护气体吹动，使熔池底壁的柱状晶体成长受到干扰，因此柱状晶体呈倾斜层状，晶粒有所细化。又因焊接材料的渗合金作用，焊缝金属中锰、硅等合金元素含量可能比基本金属高，所以焊缝金属的性能可不低于基本金属。

(2) 焊接热影响区 是指焊缝两侧因焊接热作用而发生组织性能变化的区域。由于焊缝

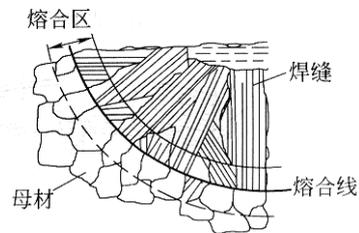


图 4.2.7 焊缝的柱状晶

附近各点受热情况不同，热影响区可分为熔合区、过热区、正火区和部分相变区等。

① 熔合区 是焊缝和基本金属的交界区，相当于加热到固相线和液相线之间，焊接过程中母材部分熔化，所以也称为半熔化区。熔化的金属凝固成铸态组织，未熔化金属因加热温度过高而成为过热粗晶。在低碳钢焊接接头中，熔合区虽然很窄（约 0.1~1mm），但因强度、塑性和韧性都下降，而此处接头断面变化，引起应力集中，在很大程度上决定着焊接接头的性能。

② 过热区 被加热到 A_{c3} 以上 100~200° C 至固相线温度区间，奥氏体晶粒急剧长大，形成过热组织，因而过热区的塑性及韧性降低。对于易淬火硬化钢材，此区脆性更大。

③ 正火区 被加热到 A_{c3} 至 A_{c3} 以上 100~200° C 区间，金属发生重结晶，冷却后得到均匀而细小的铁素体和珠光体组织，其机械性能优于母材。

④ 部分相变区 相当于加热到 A_{c1} ~ A_{c3} 温度区间。珠光体和部分铁素体发生重结晶，使晶粒细化；部分铁素体来不及转变，冷却后晶粒大小不匀，因此力学性能稍差。

从图 4.2.6 所示的性能变化曲线可以看出，在焊接热影响区中，熔合区和过热区的性能最差，产生裂缝和局部破坏的倾向性也最大，应使之尽可能减小。

4.2.5 焊接应力与变形

金属构件在焊接以后，总要发生变形和产生焊接应力，且二者是彼此伴生的。

焊接应力的存在，对构件质量、使用性能和焊后机械加工精度都有很大影响，甚至导致整个构件断裂；焊接变形不仅给装配工作带来很大困难，还会影响构件的工作性能。变形量超过允许数值时必须进行矫正，矫正无效时只能报废。因此，在设计和制造焊接结构时，应尽量减小焊接应力和变形。

(1) 焊接应力与变形的产生原因：焊接过程中，对焊接件进行不均匀加热和冷却，是产生焊接应力和变形的根本原因。

(2) 焊接变形的基本形式：常见的焊接变形有收缩变形、角变形、弯曲变形、波浪变形和扭曲变形等五种形式（图 4.2.8）。

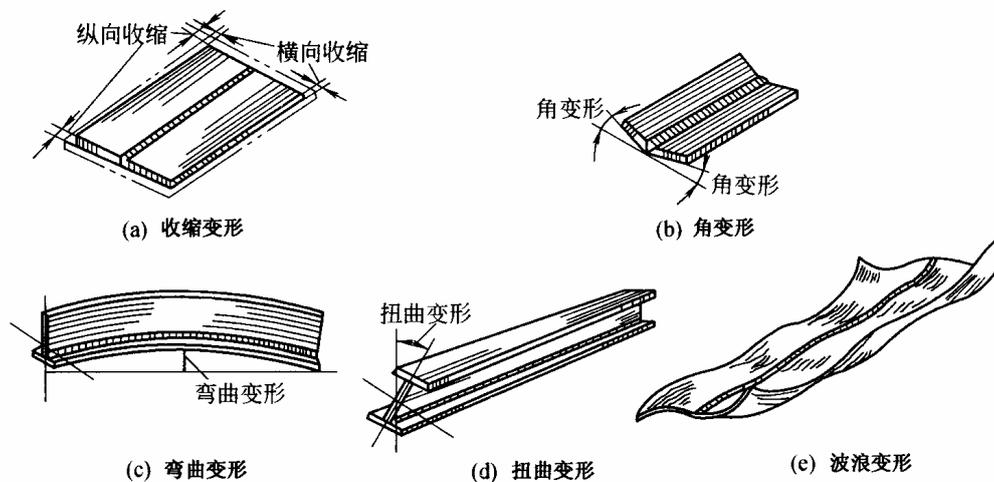


图 4.2.8 焊接变形的基本形式

a) 收缩变形 b) 角变形 c) 弯曲变形 d) 扭曲变形 e) 波浪变形

收缩变形是由于焊缝金属沿纵向和横向的焊后收缩而引起的；角变形是由于焊缝截面上下不对称，焊后沿横向上下收缩不均匀而引起的；弯曲变形是由于焊缝布置不对称，焊缝较集中的一侧纵向收缩较大而引起的；扭曲变形常常是由于焊接顺序不合理而引起的；波浪变形则是由于薄板焊接后焊缝收缩时，产生较大的收缩应力，使焊件丧失稳定性而引起的。

(3) 减少焊接应力与变形的措施：除了设计时应考虑之外，可采取一定的工艺措施，有预留变形量、反变形法、刚性固定法、锤击焊缝法、加热“减应区”法等。重要的是，选择合理的焊接顺序，尽量使焊缝自由收缩。焊前预热和焊后缓冷也很有效。详细可参阅有关资料。

4.3 其它焊接方法

4.3.1 埋弧自动焊

埋弧焊（SAW）又称焊剂层下电弧焊。它是通过保持在光焊丝和工件之间的电弧将金属加热，使被焊件之间形成刚性连接。按自动化程度的不同，埋弧焊分为半自动焊（移动电弧由手工操作）和自动焊。这里所指的埋弧焊都是指埋弧自动焊，半自动焊已基本由气体保护焊代替。

1. 埋弧自动焊的焊接过程

如图 4.3.1 所示，埋弧自动焊时，焊剂由给送焊剂管流出，均匀地堆敷在装配好的焊件（母材）表面。焊丝由自动送丝机构自动送进，经导电嘴进入电弧区。焊接电源分别接在导电嘴和焊件上，以便产生电弧。给送焊剂管、自动送丝机构及控制盘等通常都装在一台电动小车上。小车可以按调定的速度沿着焊缝自动行走。

插入颗粒状焊剂层下的焊丝末端与母材之间产生电弧，电弧热使邻近的母材、焊丝和焊剂熔化，并有部分被蒸发。焊剂蒸气将熔化的焊剂（熔渣）排开，形成一个与外部空气隔绝的封闭空间，这个封闭空间不仅很好地隔绝了空气与电弧和熔池的接触，而且可完全阻挡有

碍操作的电弧光的辐射。电弧在这里继续燃烧，焊丝便不断地熔化，呈滴状进入熔池与母材熔化的金属和焊剂提供的合金化元素混合。熔化的焊丝不断地被补充，送入到电弧中，同时不断地添加焊剂。随着焊接过程的进行，电弧向前移动，焊接熔池随之冷却而凝固，形成焊缝。密度较小的熔化焊剂浮在焊缝表面形成熔渣层。未熔化的焊剂可回收再用。

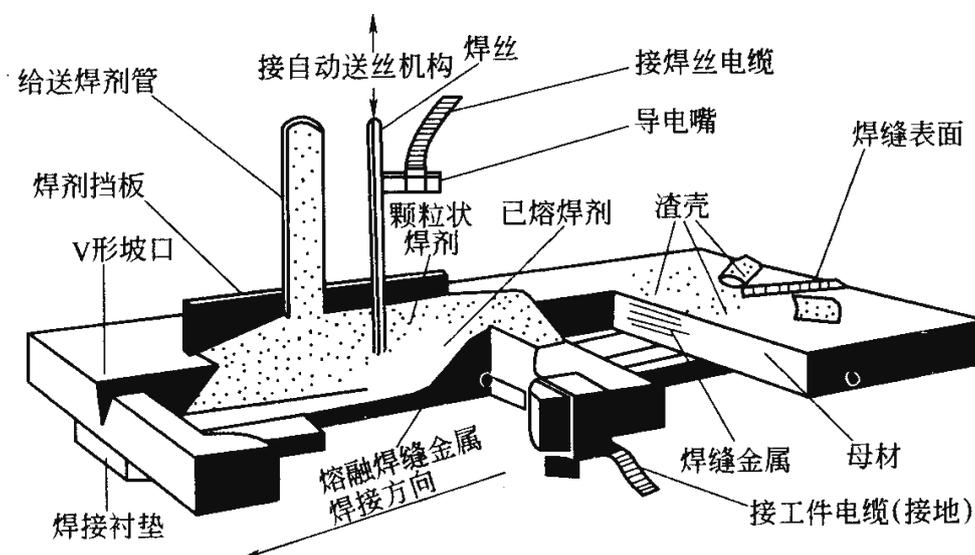


图 4.3.1 埋弧自动焊方法

2. 埋弧自动焊的特点及应用

(1) 焊接质量好 焊接过程能够自动控制。各项工艺参数可以调节到最佳数值。焊缝的化学成分比较均匀稳定。焊缝光洁平整，有害气体难以侵入，熔池金属冶金反应充分，焊接缺陷较少。

(2) 生产率高 焊丝从导电嘴伸出长度较短，可用较大的焊接电流，而且连续施焊的时间较长，这样就能提高焊接速度。同时，焊件厚度在 14mm 以内的对接焊缝可不开坡口，不留间隙，一次焊成，故其生产率高。

(3) 节省焊接材料 焊件可以不开坡口或开小坡口，可减少焊缝中焊丝的填充量，也可减少因加工坡口而消耗掉的焊件材料。同时，焊接时金属飞溅小，又没有焊条头的损失，所以可节省焊接材料。

(4) 易实现自动化，劳动条件好，劳动强度低，操作简单。

埋弧自动焊的缺点是：适应性差，通常只适用于水平位置焊接直缝和环缝，不能焊接空间焊缝和不规则焊缝，对坡口的加工、清理和装配质量要求较高。

埋弧自动焊通常用于碳钢、低合金结构钢、不锈钢和耐热钢等中厚板结构的长直缝、直径大于 300mm 环缝的平焊。此外，它还用于耐磨、耐腐蚀合金的堆焊、大型球墨铸铁曲轴以及镍合金、铜合金等材料的焊接。

4.3.2 气体保护电弧焊

气体保护焊是指用外加气体作为电弧介质并保护电弧和焊接区的电弧焊。

气体保护焊是明弧焊接，焊接时便于监视焊接过程，故操作方便，可实现全位置自动焊接，焊后还不用清渣，可节省大量辅助时间，大大提高了生产率。另外，由于保护气流对电

弧有冷却压缩作用，电弧热量集中，因而焊接热影响区窄，工件变形小，特别适合于薄板焊接。

1. 氩弧焊

氩弧焊是以氩(Ar)气作为保护气体的气体保护电弧焊。氩气是一种惰性气体，在高温下，它不与金属和其他任何元素起化学反应，也不溶于金属，因此保护效果良好，所焊接头质量高。

按使用的电极不同，氩弧焊可分为不熔化极氩弧焊即钨极氩弧焊（TIG 焊）和熔化极氩弧焊（MIG）两种，如图 4.3.2 所示。

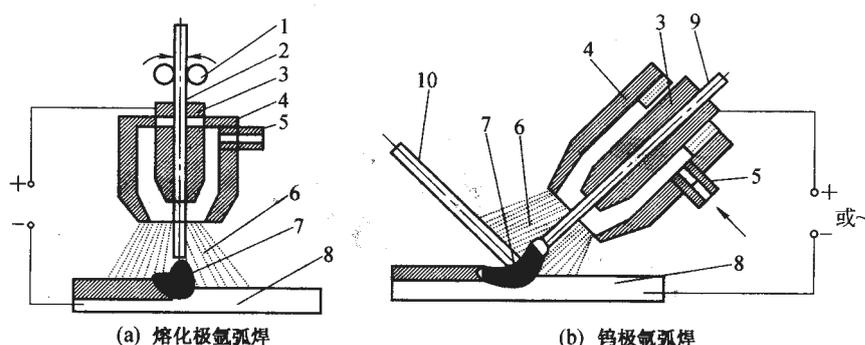


图 4.3.2 氩弧焊示意图

(a) 熔化极氩弧焊；(b) 钨极氩弧焊

1—送丝轮；2—焊丝；3—导电嘴；4—喷嘴；5—进气管；
6—氩气流；7—电弧；8—工件；9—钨极；10—填充焊丝

(1) 钨极氩弧焊（TIG 焊） 常采用熔点较高的钍钨棒或铈钨棒作为电极，焊接过程中电极本身不熔化，故属不熔化极电弧焊。钨极氩弧焊又分为手工焊和自动焊两种。焊接时填充焊丝在钨极前方添加。当焊接薄板时，一般不需开坡口和加填充焊丝。

钨极氩弧焊的电流种类与极性的选择原则是：焊接铝、镁及其合金时，采用交流电；焊其他金属（低合金钢、不锈钢、耐热钢、钛及钛合金、铜及铜合金等）采用直流正接。由于钨极的载流能力有限，其电功率受到限制，所以钨极氩弧焊一般只适于焊接厚度小于 6mm 的工件。

(2) 熔化极氩弧焊（MIG） 熔化极氩弧焊是以连续送进的焊丝作为电极，电弧产生在焊丝与工件之间，焊丝不断送进，并熔化过渡到焊缝中去，因而焊接电流可大大提高。

熔化极氩弧焊可分为半自动焊和自动焊两种，一般采用直流反接法。

与 TIG 焊相比，MIG 焊可采用高密度电流，母材熔深大，填充金属熔敷速度快，生产率高。

MIG 焊和 TIG 焊一样，几乎可焊接所有的金属，尤其适合于焊接铝及铝合金、铜及铜合金以及不锈钢等材料。主要用于中、厚板的焊接。目前采用熔化极脉冲氩弧焊可以焊接薄板，进行全位置焊接、实现单面焊双面成型以及封底焊。

2. CO₂ 气体保护焊

CO₂ 气体保护焊是利用廉价的 CO₂ 气体作为保护气体的电弧焊。CO₂ 保护焊的焊接装置如图 4.3.3 所示。它是利用焊丝作电极，焊丝由送丝机构通过软管经导电嘴送出。电弧在焊丝与工件之间发生。CO₂ 气体从喷嘴中以一定的流量喷出，包围电弧和熔池，从而防止空气对液体金属的有害作用。CO₂ 保护焊可分为自动焊和半自动焊。目前应用较多的是半自动焊。

CO₂ 气体保护焊除具有前述的气体保护焊的那些优点外，还有焊缝含氢量低，抗裂性能好；CO₂ 气体价格便宜、来源广泛，生产成本低等优点。

由于 CO₂ 气体是氧化性气体，高温时可分解成 CO 和氧原子，易造成合金元素烧损、焊缝吸氧，导致电弧稳定性差、飞溅较多、弧光强烈、焊缝表面成形不够美观等缺点。若控制或操作不当，还容易产生气孔。为保证焊缝的合金元素，须采用含锰、硅较高的焊接钢丝或含有相应合金元素的合金钢焊丝。

常用的 CO₂ 焊焊丝是 H08Mn2SiA，适于焊接低碳钢和普通低合金钢结构钢 ($\sigma_b < 600\text{MPa}$)。还可使用 Ar 和 CO₂ 气体混合保护，焊接强度级别较高的普通低合金结构钢。为了稳定电弧，减少飞溅，CO₂ 焊采用直流反接。

由于 CO₂ 保护焊的优点较多，目前已广泛应用于机械制造业各部门中。

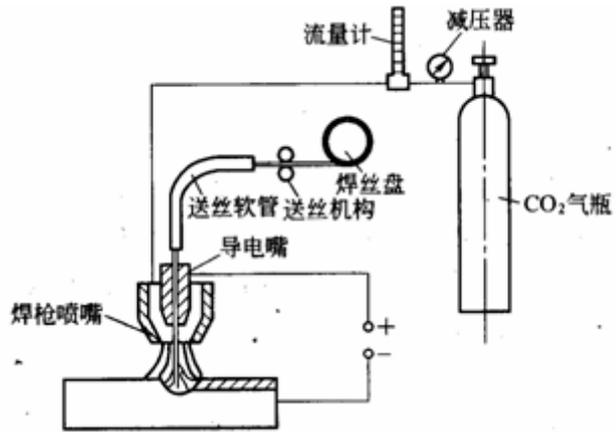


图 4.3.3 CO₂ 焊示意图

4.3.3 气焊和气割

1. 气焊

气焊是利用气体火焰作热源的焊接方法。最常用的是氧—乙炔焊，利用氧—乙炔焰进行焊接。

乙炔(C₂H₂)为可燃气，氧气为助燃气。乙炔和氧气在焊炬中混合均匀后从焊嘴喷出燃烧，将焊件和焊丝熔化形成熔池，冷却凝固后形成焊缝，如图 4.3.4 所示。气焊时气体燃烧，产生大量的 CO₂、CO、H₂ 气体笼罩熔池，起到保护作用。气焊使用不带药皮的光焊丝作填充金属。

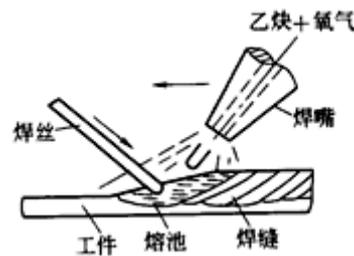


图 4.3.4 气焊示意图

气焊设备简单、操作灵活方便、不需电源，但气焊火焰温度较低（最高约 3150°），且热量较分散，生产率低，工件变形大，所以应用不如电弧焊广泛。主要用于焊接厚度在 3mm 以下的薄钢板，铜、铝等有色金属及其合金，低熔点材料以及铸铁焊补等。气焊设备由氧气瓶、乙炔瓶、减压器、回火保险器及焊炬等组成。如图 4.3.5、图 4.3.6 所示。

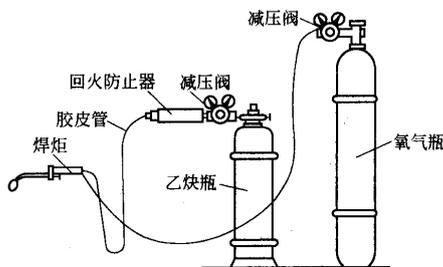


图 4.3.5 气焊设备及其连接

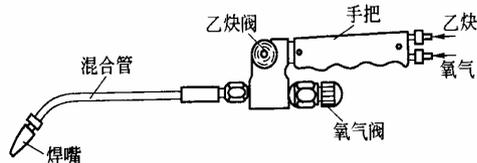


图 4.3.6 焊炬

(1) 气焊火焰的种类及应用。气焊时通过调节氧气阀和乙炔阀，可以改变氧气和乙炔

的混合比例，从而得到三种不同的气焊火焰：中性焰、碳化焰和氧化焰，如图 4.3.7 所示。

① 中性焰（正常焰） 中性焰是指在一次燃烧区内既无过量氧又无游离碳的火焰（最高温度 3100~3200℃），中性焰中氧和乙炔的比例为 1~1.2。其火焰由焰芯、内焰、外焰三部分组成。焰芯呈亮白色清晰明亮的圆锥形，内焰的颜色呈淡桔红色，外焰为橙黄色不甚明亮。由于内焰温度高（约 3150℃），又具有还原性（含有一氧化碳和氧气），故最适宜气焊工作。中性焰使用较多，如焊接低碳钢、中碳钢、低合金钢、紫铜、铝合金等。

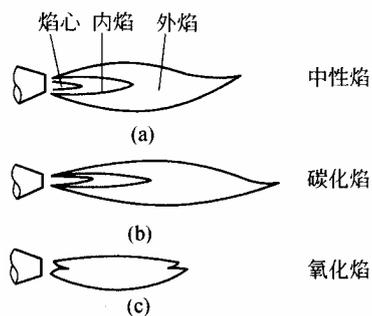


图 4.3.7 气焊火焰

② 碳化焰 当氧气和乙炔的比例小于 1 时，得到的火焰是碳化焰。向火焰中提供的氧量不足而乙炔过剩，使火焰焰芯拉长，白炽的碳层加厚呈羽翅状延伸入内焰区中。整个火焰燃烧软弱无力，冒有黑烟。用此种火焰焊接金属能使金属增碳，通常用于焊接高碳钢、高速钢、铸铁及硬质合金等。

③ 氧化焰 当氧气和乙炔的比例大于 1.2 时，得到的火焰是氧化焰。火焰中有过量的氧，焰芯变短变尖，内焰区消失，整个火焰长度变短，燃烧有力并发出响声。用此种火焰焊接金属能使熔池氧化沸腾，钢性能变脆，故除焊接黄铜之外，一般很少使用。

(2) 接头形式和焊接准备 气焊可以进行平、立、横、仰等各种空间位置的焊接。其接头型式也有对接、搭接、角接和 T 型接头等。在气焊前，必须彻底清除焊丝和焊件接头处表面的油污、油漆、铁锈以及水分等，否则不能进行焊接。

(3) 焊丝与焊剂 在焊接时，气焊的焊丝作为填充金属，与熔化的母材一起形成焊缝，因此焊丝质量对焊件性能有很大的影响。焊接时常根据焊件材料选择相应的焊丝。

焊剂的作用是保护熔池金属，去除焊接过程中形成的氧化物，增加液态金属的流动性。焊接低碳钢时，由于中性焰本身具有相当的保护作用，可不用焊剂。我国气焊焊剂的主要牌号有 CJ101（用于焊接不锈钢、耐热钢）、CJ201（用于焊接铸铁）、CJ301（用于焊接铜合金）、CJ401（用于焊接铝合金）。焊剂的主要成分有硼酸、硼砂、碳酸钠等。

2. 气割

气割是利用高温的金属在纯氧中燃烧而将工件分离的加工方法。气割使用的气体和供气装置可与气焊通用。

气割时，先用氧-乙炔焰将金属加热到燃点，然后打开切割氧阀门，放出一股纯氧气流，使高温金属燃烧。燃烧后生成的液体熔渣，被高压氧流吹走，形成切口，如图 4.3.8 所示。金属燃烧放出大量的热，又预热了待切割的金属。所以气割过程是预热→燃烧→吹渣形成切口不断重复进行的过程。气割所用的割炬与焊炬有所不同，多了一个切割氧气管和切割氧阀门。

符合下列条件的金属才能进行气割。

(1) 金属的燃点应低于本身的熔点，否则变为熔割，使切割质量降低，甚至不能切割。

(2) 金属氧化物的熔点应低于金属本身的熔点。否则高熔点的氧化物会阻碍着下层金属

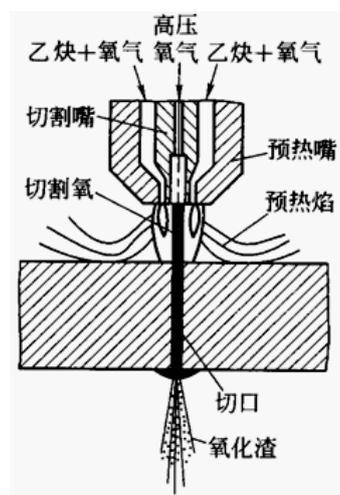


图 4.3.8 气割

与氧气流接触，使气割无法继续进行。另外，气割时所产生的氧化物应易于流动。

(3) 金属的导热性不能太高，否则使气割处的热量不足，造成气割困难。

(4) 金属在燃烧时所产生的大量热能应能维持气割的进行。

碳素钢和低合金结构钢具有很好的气割性能，因钢中主要成分的铁，其燃烧时生成 FeO 、 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 放出大量的热。并且熔点低流动性好，故切口光洁整齐而质量好。但气割铸铁时，因其燃点高于熔点，且渣中有大量的粘稠的 SiO_2 妨碍切割进行。气割铝和不锈钢，因存在高熔点 Al_2O_3 和 Cr_2O_3 膜，故亦不能用一般气割方法切割。

4.3.4 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熔化母材和填充金属进行焊接的方法。它与电弧焊不同，除引弧外，焊接过程中不产生电弧。

电渣焊一般在立焊位置进行，焊前将边缘经过清理、侧面经过加工的焊件装配成相距 20~40mm 的接头如图 4.3.9 所示。焊接过程如图 4.3.10 所示。

焊件与填充焊丝接电源两极，在接头底部焊有引弧板，顶部装有引出板。在接头两侧还装有强制成形装置即冷却滑块(一般用铜板制成、并通水冷却)，以利熔池冷却结晶。焊接时将焊剂装在引弧板、冷却滑块围成的盒状空间里。送丝机构送入焊丝，同引弧板接触后引燃电弧。电弧高温使焊剂熔化，形成液态熔渣池。当渣池液面升高淹没焊丝末端后，电弧自行熄灭，电流通过熔渣，进入电渣焊过程。由于液态熔渣具有较大电阻，电流通过时产生的电阻热将使熔渣温度升高达 $1700\sim 2000^\circ\text{C}$ ，使与之接触的那部分焊件边缘及焊丝末端熔化。熔化的金属在下沉过程中，同熔渣进行一系列冶金反应，最后沉集于渣池底部、形成金属熔池。以后随着焊丝不断送进与熔化，金属熔池不断升高并将渣池上推，冷却滑块也同步上移，渣池底部则逐渐冷却凝固成焊缝，将两焊件连接起来。比重轻的渣池浮在上面既作为热源，又隔离空气，保护熔池金属不受侵害。

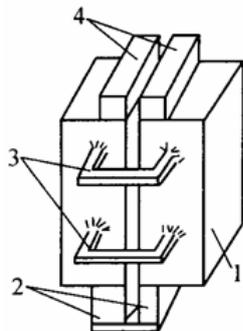


图 4.3.9 电渣焊工件装配图

1—工件；2—引弧板；
3—门形板；4—引出板。

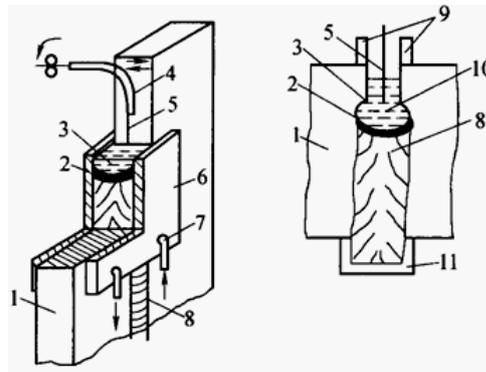


图 4.3.10 丝极电渣焊示意图

1—工件；2—金属熔池；3—熔渣；4—导丝管；
5—焊丝；6—强制成形装置；7—冷却水管；
8—焊缝；9—引出板；10—金属熔滴；11—引弧板

电渣焊的特点：

(1) 对于厚大截面的焊件可一次焊成，生产率高。工件不开坡口，焊接同等厚度的工件，焊剂消耗量只是埋弧自动焊的 $1/50\sim 1/20$ 。电能消耗量是埋弧焊的 $1/3\sim 1/2$ 、焊条电弧焊的 $1/2$ ，因此，电渣焊的经济效果好，成本低。

(2) 由于熔渣对熔池保护严密，避免了空气对金属熔池的有害影响，而且熔池金属保持

液态时间长,有利于冶金反应充分,焊缝化学成分均匀和气体杂质上浮排除。因此焊缝金属比较纯净,质量较好。

(3) 焊接速度慢,焊件冷却慢,因此焊接应力小。但焊接热影响区却比其他焊接方法的宽,造成接头晶粒粗大,力学性能下降。所以电渣焊后,焊件要进行正火处理,以细化晶粒。

电渣焊主要用于焊接厚度大于 30mm 的厚大工件。由于焊接应力小,它不仅适合低碳钢的焊接,还适合于中碳钢和合金结构钢的焊接。目前电渣焊是制造大型铸—焊、锻—焊复合结构,如水压机、水轮机和轧钢机上大型零件的重要工艺方法。

4.3.5 等离子弧焊

等离子弧的产生原理如图 4.3.11 所示。钨极与工件之间加一高压,经高频振荡器的激发,使气体电离形成电弧,电弧通过细孔喷嘴时,弧柱截面缩小,产生机械压缩效应;向喷嘴内通入高速保护气流(如氩气、氮气等),此冷气流均匀地包围着电弧,使弧柱外围受到强烈冷却,于是弧柱截面进一步缩小、产生了热压缩效应。

此外,带电离子在弧柱中的运动可看成是无数根平行的通电“导体”,其自身磁场所产生的电磁力使这些“导体”互相吸引靠拢,电弧受到进一步压缩,这种作用称为电磁压缩效应。这三种压缩效应作用在弧柱上,使弧柱被压缩得很细,电流密度极大提高,能量高度集中,弧柱区内的气体完全电离、从而获得等离子弧。这种等离子弧的温度可高达 15000~16000K,能够用于焊接和切割。

利用等离子弧作为热源的焊接方法称为等离子弧焊。焊接时,在等离子弧周围还要喷射保护气体以保护熔池,一般保护气体和等离子气体相同,通常为氩气。

按焊接电流大小,等离子弧焊分为微束等离子弧焊和大电流等离子弧焊两种。微束等离子弧的电流一般为 0.1~30A,可用于厚度为 0.025~2.5mm 箔材和薄板的焊接。大电流等离子弧主要用于焊接厚度大于 2.5mm 的焊件。

等离子弧焊具有能量集中,穿透能力强,电弧稳定等优点。因此,焊接 12mm 厚的工件可不开坡口,能一次单面焊透双面成型;其焊接热影响区小,焊件变形小;而且焊接速度快,生产率高。但等离子弧焊设备复杂,气体消耗大,焊接成本较高,并且只适宜于室内焊接,因此应用范围受到一定限制。

现在等离子弧焊已广泛应用于化工、原子能、精密仪器仪表及尖端技术领域的不锈钢、耐热钢、铜合金、铝合金、钛合金及钨、钼、钴、铬、镍、钛的焊接。

此外,利用高温高速的等离子弧还可以切割任何金属和非金属材料,包括氧—乙炔焰不能切割材料,而且切口窄而光滑,切割效率比氧—乙炔焰切割提高 1~3 倍。

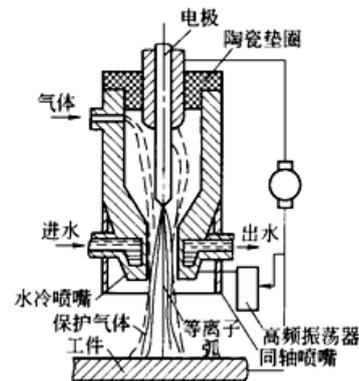


图 4.3.11 等离子弧焊原理图

4.3.6 压焊与钎焊

1. 压焊

利用加压(或同时加热)的方法使两工件的结合面紧密接触并产生一定的塑性变形,借用原子之间的结合力将它们牢固地连接起来。这类焊接方法称为压力焊。根据加热加压的方式不同,压力焊可分为电阻焊、摩擦焊、超声波焊、扩散焊和爆炸焊等。

(1) 电阻焊 电阻焊是利用电流通过焊件及其接触面产生的电阻热作热源,将焊件局部加热到塑性或熔融状态,然后在压力下形成焊接接头的一种焊接方法。

根据焦耳—楞次定律电阻焊在焊接过程中产生的热量为 $Q=0.24I^2Rt$ (J)

由于电阻 R (包括工件本身电阻和工件间接触电阻)有限,为使工件在极短的时间($t=0.01$ 秒至几秒)内迅速加热到焊接温度,以减少散热损失,必须采用很大的焊接电流($I=10^3\sim 10^4A$),因此电阻焊设备的特点就是低电压、大功率。

电阻焊分为点焊、缝焊、对焊三种形式,其示意图如图 4.3.12 所示。

与其他焊接方法相比,电阻焊具有生产率高、焊件变形小、劳动条件好、不需填充材料和易于实现自动化等特点。但设备较一般熔化焊复杂,耗电量大,适用的接头形式和可焊工件厚度受到一定限制,且焊前清理要求高。

1) 点焊 如图 4.3.12 a) 所示,点焊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。

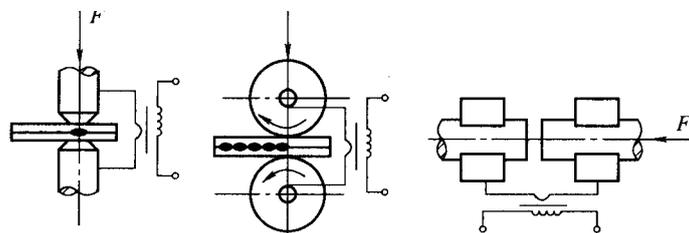
点焊的焊接过程分预压、通电加热和断电冷却几个阶段。

① 预压 将表面已清理好的工件叠合起来,置于两电极之间预压夹紧,使工件欲焊处紧密接触。

② 通电加热 由于电极内部通水,电极与被焊工件之间所产生的电阻热被冷却水带走,故热量主要集中在两工件接触处,将该处金属迅速加热到熔融状态而形成熔核,熔核周围的金属被加热塑性状态,在压力作用下发生较大塑性变形。

③ 断电冷却 当塑性变形量达到一定程度后,切断电源,并保持压力一段时间,使熔核在压力作用下冷却结晶,形成焊点。

焊完一点后,移动工件焊第二点,这时候有一部分电流流经已焊好的焊点,这种现象称为分流。分流会使第二点处电流减小,影响焊接质量,因而两点间应有一定距离。被焊材料的



a) 点焊

b) 缝焊

c) 对焊

图 4.3.12 电阻焊示意图

点焊主要用于薄板结构,板厚一般在 4mm 以下,特殊情况下可达 10mm。这种焊接方法广泛用来制造汽车车箱、飞机外壳等轻型结构。

2) 缝焊 缝焊过程与点焊基本相似。缝焊焊缝是由许多焊点相互依次重叠而形成的连续焊缝。由于缝焊机的电极是两个可以旋转的盘状电极,所以缝焊又称滚焊。

如图 4.3.12 b)所示,当两工件的搭接处被两个圆盘电极以一定的压力夹紧并反向转动时,自动开关按一定的时间间隔断续送电,两工件接触面间就形成许多连续而彼此重叠的焊点,这样就获得了缝焊焊缝,焊点相互重叠率在 50%以上。

缝焊在焊接过程中分流现象严重。因此缝焊只适于焊接了 3mm 以下的薄板焊件。

缝焊焊缝表面光滑美观,气密性好。缝焊已广泛应用于家用电器(如电冰箱壳体)、交通运输(如汽车、拖拉机油箱)及航空航天(如火箭燃料贮箱)等工业部门中要求密封的焊件的焊接。

3) 对焊 对焊是利用电阻热将两工件端部对接起来的一种压力焊方法。根据焊接过程不同,对焊又可分为电阻对焊和闪光对焊。

① 电阻对焊 把工件装在对焊机的两个电极夹具上对正、夹紧,并施加预压力,使两工件的端面挤紧,然后通电。由于两工件接触处实际接触面积较小,因而电阻较大,当电流通过时,就会在此产生大量的电阻热,使接触面附近金属迅速加热到塑性状态,然后增大压力,切断电源,使接触处产生一定的塑性变形而形成接头。

电阻对焊具有接头光滑、毛刺小、焊接过程简单等优点,但接头的机械性能较低。焊前必须对焊件端面进行除锈、修整,否则焊接质量难以保证。电阻对焊主要用于截面尺寸小且截面形状简单(如圆形、方形等)的金属型材的焊接。

② 闪光对焊 闪光对焊时,将工件在电极夹头上夹紧,先接通电源,然后逐渐靠拢。由于接头端面比较粗糙,开始只有少数几个点接触,当强大的电流通过接触面积很小的几点时,就会产生大量的电阻热,使接触点处的金属迅即熔化甚至气化,熔化金属在电磁力和气体爆炸力作用下连同表面的氧化物一起向四周喷射,产生火花四溅的闪光现象。继续推进焊件,闪光现象便在新的接触点处产生,待两工件的整个接触端面有一薄层金属熔化时,迅速加压并断电,两工件便在压力作用下冷却凝固而焊接在一起。

闪光对焊对工件端面的平整度要求不高,接头质量也较电阻对焊的好,但操作比较复杂,对环境也会造成一定污染。

2. 摩擦焊

摩擦焊是利用两工件焊接端面之间相互摩擦而产生的热量将工件接合端加热到塑性状态后,在压力作用下使它们连接起来的一种压力焊方法。

(1) 摩擦焊过程 如图 4.3.13 所示,将工件 I、II 分别夹持在焊机的旋转夹头和移动夹头上,加上预压力使两工件紧密接触。然后使工件 I 高速旋转,工件 II 在一定的轴向压力作用下不断向工件 I 方向缓缓移动。于是两工件接触端面强烈摩擦而发出大量的热并被加热到塑性状态,同时在轴向压力作用下逐步发生塑性变形。变形的结果使覆盖在端面上的氧化物和杂质迅速破碎并被挤出焊接区,露出纯净的金属表面。

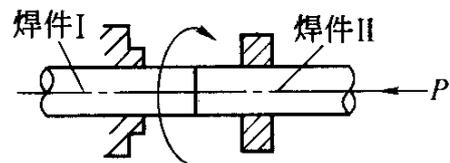


图 4.3.13 摩擦焊工作原理

随着焊接区金属塑性变形的增加,接触端部很快被加热到焊接温度。这时、立即刹车,停止工件 I 的旋转并加大轴向压力,使两工件在高温高压下焊接起来。

(2) 摩擦焊特点:

1) 焊接接头质量高且稳定。由于工件接触表面强烈摩擦,使工件接触表面的氧化膜和杂质挤出焊缝之外,因而接头质量好,焊件尺寸精度高。

2) 不仅可以实现同种金属的焊接,还可实现异种金属的焊接,如高速钢与 45 钢焊接,铜合金与铝合金焊接等。

3) 生产率高。焊好一个接头所需时间一般不超过 1min,与闪光焊相比,生产率可提高几倍甚至几十倍。

4) 摩擦焊操作技术简单,容易实现自动控制,且没有火花和弧光,劳动条件好。

5) 焊机所需功率小,省电。与闪光焊相比,可节约电能 5~10 倍以上。

(3) 摩擦焊的接头形式 摩擦焊接头一般是等截面的,也可以是不等截面的。

摩擦焊作为一门新技术,在国内外已得到很大发展,世界各国投入使用的摩擦焊机逐年

增多。我国目前已能焊接直径 168mm 的大型石油钻杆，并对摩擦焊机实现了微机控制。改善了接头质量，提高了产品合格率。随着研究的深入和生产的发展，摩擦焊将会得到更广泛应用。

2. 钎焊

钎焊是通过加热，使被焊工件接头处温度升高，但不熔化，同时使熔点较低的钎料熔化并渗入到被焊工件的间隙之中，通过原子扩散相互相溶解，冷却凝固后将两工件连接起来的一类焊接方法。

与一般焊接方法相比，钎焊的加热温度较低，焊件的应力和变形较小。对材料的组织和性能影响很小，易于保证焊件尺寸。钎焊还能实现异种金属甚至金属与非金属的连接。因此钎焊在电工、仪表、航空相机机械制造业中得到广泛应用。

(1) 钎料 按熔点不同，钎料可分为易熔钎料和难熔钎料两大类。

1) 易熔钎料 熔点在 450℃ 以下，又称软钎料，常用的软钎料有锡基和铅基钎料。这种钎料的焊缝强度较低，用于强度要求低或无强度要求的焊件，如电子产品和仪表中线路的焊接。

2) 难熔钎料 熔点高于 450℃，又称硬钎料。常用的硬钎料有银基和铜基钎料。这种钎料的接头强度较高，常用于受力较大或工作温度较高的工件焊接，如车刀上硬质合金刀头与刀杆的焊接。

(2) 钎焊方法：

1) 焊件去膜 大气中的金属表面都覆盖着一层氧化膜。氧化膜的存在会使液态钎料不能浸润工件而难于焊接，因此必须设法清除。常用的去膜法有钎剂去膜法(如锡焊时采用松香、铜焊时采用硼酸或硼砂)和机械去膜法(如利用器械刮除)。

2) 接头形式 钎焊接头的强度往往低于钎焊金属的强度，因此钎焊常采用搭接接头形式。依靠增大搭接面积，可以在接头强度低于钎焊金属强度的条件下，达到接头与焊件具有相等的承载能力的目的。另外，它的装配要求也比较简单。

(3) 加热方法：

1) 烙铁加热 利用烙铁头积聚的热量来熔化钎料并加热工件钎焊部位。烙铁钎焊只适用于软钎料焊接薄件和小件，多用于电工、仪表等线路连接。烙铁钎焊一般采用钎剂去膜。

2) 火焰加热 利用可燃性气体或液体燃料燃烧所形成的火焰来加热焊件和熔化钎料。这种加热方法常用于银基和铜基钎料，钎焊碳钢、低合金钢、不锈钢、铜及铜合金的薄壁和小型焊件。火焰钎焊主要由手工操作，对工人的技术水平要求较高。

3) 电阻加热 依靠电阻热加热焊件和熔化钎料，并在压力作用下完成焊接过程。电阻钎焊加热迅速、生产率高，易于实现自动化，但接头尺寸不能太大。目前主要用于钎焊刀具、带锯、导线端、各种电触点，以及集成电路块和晶体管等元件的焊接。

4) 感应加热 将工件的钎焊部分置于交变磁场中，通过工件在磁场中产生的感应电流的电阻热来实现钎焊焊接。感应加热的速度快，生产率高，便于实现自动化。特别适用于管件套接、管子和法兰、轴和轴套之类接头的焊接。

4.4 常用金属材料的焊接

4.4.1 碳钢的焊接

1. 低碳钢的焊接

低碳钢的含碳量小于 0.25%，碳当量数值小于 0.40%，所以这类钢的焊接性良好，焊接时一般不需要采取特殊的工艺措施，用各种焊接方法都能获得优质焊接接头。只有厚大结构件在低温下焊接时，才应考虑焊前预热，如 20mm 以下板厚、温度低于零下 10℃或板厚大于 50mm、温度低于 0℃，应预热 100℃~150℃。

低碳钢结构件焊条电弧焊时，根据母材强度等级，一般选用酸性焊条 E4303 (J422)、E4320 (J424) 等；承受动载荷、结构复杂的厚大焊件，选用抗裂性好的碱性焊条 E4215 (J427)、E4316 (J426) 等。埋弧焊时，一般选用焊丝 H08A 或 H08MnA 配合焊剂 HJ431。采用电渣焊时，焊后应进行正火处理。

沸腾钢脱氧不完全，含氧量较高，S、P 等杂质分布不均匀，局部区域 S、P 含量可能超出规定范围，焊接时裂纹倾向大，不宜作为焊接结构件，应改用镇静钢。

2. 中、高碳钢焊接

中碳钢焊接时，热影响区组织淬硬倾向增大，较易出现裂纹和气孔，为此要采取一定的工艺措施。如 35、45 钢焊接时，焊前应预热 150℃~250℃。根据母材强度级别，选用焊条 E5015 (J507)、E5016 (J506)、E5515-× (J557)、E5516-× (J556) 等 (×代表后缀字母，表示熔敷金属化学成分分类的代号)。为避免母材过量熔入焊缝中导致碳含量升高，要开坡口并采用细焊条，小电流，多层焊等工艺。焊后缓冷，并进行 600~650℃回火，以消除应力。

高碳钢碳当量数值在 0.60%以上，淬硬倾向大，易出现各种裂纹和气孔，焊接性差，一般不用来制作焊接结构，只用于破损工件的焊补。焊补时通常采用焊条电弧焊或气焊，焊条选用 E6015-× (J607)、E7015-× (J707) 等，预热 250℃~350℃，焊后缓冷，并立即进行 650℃以上高温回火，以消除应力。

中、高碳钢焊条电弧焊时，若焊件无法预热，应选用奥氏体不锈钢焊条进行焊接。

4.4.2 低合金结构钢的焊接

低合金结构钢在焊接生产中应用很广。焊接中这种钢可分为两大类：强度用钢和特殊性能钢。强度用钢按照屈服点数值分为三类： $\sigma_s=294\sim 490\text{Mpa}$ 的热轧及正火钢 (焊前为热轧及正火状态)， $\sigma_s=441\sim 980\text{Mpa}$ 的低碳调质钢 ($W_c<0.25\%$ ，焊前为调质状态) 和 $\sigma_s=880\sim 1176\text{Mpa}$ 的中碳调质钢 ($W_c=0.25\%\sim 0.45\%$ ，焊前为调质状态)。特殊性能钢包括低温钢、耐热钢和耐蚀钢。

1. 强度用钢焊接

热轧及正火钢焊接：表 4.4.1 列出 6 种常用的热轧及正火钢焊接工艺特点。焊前预热温度取决于焊件厚度和现场温度，以 16Mn 为例，其预热温度见表 4.4.2。

低、中碳调质钢的碳当量数值在 0.45%以上，焊接时热影响区产生淬硬组织倾向较大，易产生冷裂纹，且钢的强度级别越高，冷裂倾向越大。因此，焊接前应预热，表 4.4.3 列出两种低碳调质钢的预热温度。由于中碳调质钢的焊接性比低碳调质钢差，所以预热温度应更高，约为 200℃~350℃。

焊接强度用钢的常用方法有焊条电弧焊、埋弧焊和 CO_2 焊等。钨极氩弧焊可用于要求全焊透的管形工件的打底焊。焊接厚板工件如厚壁压力容器，可采用电渣焊。

2. 专用钢焊接

珠光体耐热钢是以 Cr, Mo 为基础的低、中合金钢, 如 12 CrMo, 20 Cr3 MoWV 等。其碳当量数值约为 0.45%~0.90%, 裂纹倾向较大, 焊接性较差。焊条电弧焊时, 要选用与母材成分相近的焊条, 预热温度 150℃~400℃, 焊后应及时进行高温回火处理。如果焊前不能预热, 应选用 Ni, Cr 含量较高的奥氏体不锈钢焊条。

低温钢中含 Ni 量较高的 5Ni, 9Ni 钢等, 焊前不需预热, 焊条成分要与母材匹配, 焊接时能量输入要小, 焊后回火注意避开“回火脆性区”。

耐蚀钢中除 P 含量较高的钢以外, 其他耐蚀钢焊接性较好, 不需预热或焊后热处理等。但要选择与母材相匹配的耐蚀焊条。

表 4.4.1 五种常用强度用钢焊接工艺特点

| 钢号 | 09Mn2 | 16Mn | 15MnV | | 15MnVN | 14MnMoV |
|--------------------------|--------------------------|--|---|----------------------|---|--|
| 碳当量值 | 0.36 | 0.39 | 0.40 | | 0.43 | 0.50 |
| 屈服点 σ_s (Mpa) | 294 | 343 | 392 | | 441 | 491 |
| 抗拉强度 σ_b (Mpa) | ≈420 | ≈490 | ≈540 | | ≈590 | ≈690 |
| 预热温度(℃) | 不预热 (板厚 h ≤16mm) | 100~150 (h ≥30mm) | 100~150 (h ≥28mm) | | 100~150 (h ≥25mm) | ≥200 |
| 焊条型号 | E4303 E4315 | E5003 E5015 E5016 | E5003 E5015 E5016 E5515 | | E5515 E6015 | E6015 |
| 埋弧焊焊丝 | H08A H08MnA | H08A(不开坡口) H08MnA(不开坡口) H10Mn2(开坡口) | H08MnA(不开坡口) H08Mn2SiA H10Mn2 (中板开坡口) HJ431 | H08MnMoA (厚板开深坡口) | H08MnMoA H04MnVTiA | H08Mn2MoA |
| 埋弧焊焊剂 | HJ431 | HJ431 | | HJ350 HJ250 | HJ431 HJ350 | HJ350 |
| CO ₂ 焊焊丝 | H08Mn2Si、H08Mn2SiA | | | | | H06Mn2SiMoA |
| 焊后热处理规范 | 电弧焊、电渣焊: 不热处理 | 电弧焊: 600~650℃回火 电渣焊: 900~930℃正火 600~650℃回火 | 电弧焊: 550℃或600℃回火 电渣焊: 950~980℃正火 550℃或600℃回火 | | 电弧焊: 550℃或600℃回火 电渣焊: 950℃正火 650℃回火 | 电弧焊: 550℃或600℃回火 电渣焊: 950~980℃正火 550℃或600℃回火 |

表 4.4.2 不同环境温度下焊接 16Mn 钢的预热温度

| 板厚 (mm) | 不同气温下的预热温度 |
|---------|--------------------------------|
| 16 以下 | 不低于-10℃不预热, -10℃以下预热 100℃~150℃ |
| 16~24 | 不低于-5℃不预热, -5℃以下预热 100℃~150℃ |
| 25~40 | 不低于 0℃不预热, 0℃以下预热 100℃~150℃ |
| 40 以上 | 均预热 100℃~150℃ |

表 4.4.3 低碳调质钢的预热温度

| | 板厚(mm) |
|--|--------|
| | |

| 钢号 | <13 | 13~16 | 16~22 | 22~35 |
|-----------|---------|---------|---------|---------|
| | 温度 (°C) | | | |
| 14MnMoVN | 不预热 | 50~100 | 100~150 | 150~200 |
| 14MnMoNbB | 不预热 | 100~150 | 150~200 | 200~250 |

4.4.3 不锈钢焊接

奥氏体型不锈钢如 0Cr18Ni9 等, 虽然 Cr, Ni 元素含量较高, 但 C 含量低, 焊接性良好, 焊接时一般不需要采取工艺措施, 因此它在不锈钢焊接中应用最广。焊条电弧焊、埋弧焊、钨极氩弧焊时, 焊条、焊丝和焊剂的选用应保证焊缝金属与母材成分类型相同。焊接时采用小电流、快速不摆动焊, 焊后加大冷速, 接触腐蚀介质的表面应最后施焊。

铁素体型不锈钢如 1Cr17 等, 焊接时热影响区中的铁素体晶粒易过热粗化, 使焊接接头的塑、韧性急剧下降甚至开裂。因此, 焊前预热温度应在 150°C 以下, 并采用小电流、快速焊等工艺, 以降低晶粒粗大倾向。

马氏体型不锈钢焊接时, 因空冷条件下焊缝就可转变为马氏体组织, 所以焊后淬倾向大, 易出现冷裂纹。如果碳含量较高, 淬硬倾向和冷裂纹现象更严重。因此, 焊前预热温度 200°C~400°C, 焊后要进行热处理。如果不能实施预热或热处理, 应选用奥氏体不锈钢焊条。

铁素体型不锈钢和马氏体型不锈钢焊接的常用方法是焊条电弧焊和氩弧焊。

4.4.4 铸铁的焊补

铸铁中 C、Si、Mn、S、P 的含量比碳钢高, 焊接性能差, 不能作为焊接结构件, 但对铸铁件的局部缺陷进行焊补很有经济价值。

铸铁焊补的主要问题有两个: 一是焊接接头易生成白口组织和淬硬组织, 难以机加工; 二是焊接接头易出现裂纹。

根据焊前预热温度, 将铸铁焊补分为不预热焊法和热焊法两种。

1. 不预热焊法

焊前工件不预热 (或局部预热至 300°C~400°C, 称半热焊), 焊后缓冷。常用的焊补方法是焊条电弧焊。焊条的选择根据如何保证焊缝中碳、硅含量合适而不致生成白口组织或使焊缝组织为塑性好的非铸铁型组织, 并保证焊后工件的加工性能和使用性能来选定。

铸铁件裂纹的不预热焊法: 先将裂纹处清理干净, 并在裂纹两端钻止裂孔, 防止裂纹扩展。焊接时采用与焊条种类相适应的工艺, 焊后采用缓冷和锤击焊缝等方法, 防止白口组织生成, 减少焊接应力。

铸铁焊补的焊条有多种, 如镍基铸铁焊条、纯铁芯和低碳钢芯铸铁焊条和铁基铸铁焊条等。镍基铸铁焊条的焊缝金属有良好的抗裂性和加工性, 但价格较贵, 主要用于重要铸铁件, 如机床导轨面的不预热焊法。纯铁芯和低碳钢芯铸铁焊条与铁基铸铁焊条的熔合区和焊缝区易出现白口组织和裂纹, 适于非加工面或刚度小的小型薄壁件的焊补。

不预热焊法生产率高, 劳动条件好, 工件焊补成本低, 应尽量多用。

2. 热焊法

焊前把工件预热至 600°C~700°C, 并在此温度下施焊, 焊后缓冷或在 600°C~700°C 保温消除应力。常用的焊补方法是焊条电弧焊和气焊。焊条电弧焊适于中等厚度以上

(>10mm) 的铸铁件, 选用铁基铸铁焊条或低碳钢芯铸铁焊条。10mm 以下薄件为防止烧穿, 采用气焊, 用气焊火焰预热和缓冷焊件, 选用铁基铸铁焊丝并配合焊剂使用。

热焊法劳动条件差, 一般用于焊补后还需机械加工的复杂、重要铸铁件, 如汽车的缸体、缸盖和机床导轨等。

4.4.5 非铁金属的焊接

常用的非铁金属有铝、铜、钛及其合金等。由于非铁金属具有许多特殊性能，在工业中应用越来越广，其焊接技术也越来越重要。

1. 铝及铝合金的焊接

铝及铝合金焊接的主要问题是：

(1) 极易氧化 铝极易生成难熔的 Al_2O_3 薄膜（熔点为 $2050^\circ C$ ），覆盖在金属表面，阻碍母材熔合。薄膜比重大，易进入焊缝造成夹杂而脆化。

(2) 易生成气孔 氢在液态铝合金中的溶解度比固态高 20 多倍，所以熔池凝固时氢气来不及完全逸出，造成焊缝气孔。另外 Al_2O_3 薄膜易吸附水分，使焊缝出现气孔的倾向增大。

(3) 熔融状态难控制 铝及铝合金从固态转化为液态时无颜色的明显变化，令操作者难以识别，不易控制熔融时间和温度，有可能出现烧穿等缺陷。

采用氩弧焊焊接铝及铝合金，由于有“阴极破碎”作用可解决氧化问题，随性气体保护等措施可以解决气孔问题，所以在氩弧焊条件下，纯铝、防锈铝合金、少部分铸造铝硅合金焊接性较好。

目前，氩弧焊是焊接铝及铝合金最理想的熔焊方法。为保证焊接质量，焊前要严格清洗焊件、焊丝，并一定要干燥后再焊，否则焊缝中易出现气孔。焊接时尽量选用与母材化学成分相近的专用焊丝。若没有专用焊丝也可从母材上切下窄条替代焊丝（钨极氩弧焊和气焊时）。还可使用电阻焊、钎焊方法焊接铝材，但焊前必须清除焊件表面的氧化膜，电阻焊时要采用气焊，气焊时需使用焊剂去除氧化物，但焊剂同时也使工件焊后的耐腐蚀性下降，且气焊生产率低，工件变形大。

2. 铜及铜合金的焊接

铜及铜合金分为紫铜、黄铜和青铜等。焊接结构件常用的是紫铜和黄铜，铜及铜合金焊接的主要问题是：

(1) 难熔合及易变形 由于铜的导热性很强，约为钢的 6 倍，焊接时热量极易散失，不易达到焊接所需的温度，出现填充金属与母材金属难熔合、工件未焊透、焊缝成形差等缺陷。铜的线膨胀系数和凝固时的收缩率都大，导热性强还使热影响区范围宽，结果焊接应力大，易变形。

(2) 热裂纹倾向大 铜和铜合金中一般含有 S, P, Bi 等杂质，铜在液态时氧化形成 Cu_2O ，硫化形成 Cu_2S 。 Cu_2O , Cu_2S , P, Bi 都能与铜形成低熔点共晶体存在于晶界上，易引起热裂纹。

(3) 易产生气孔 氢在液态铜中的溶解度比固态铜中高数倍，焊缝凝固时氢来不及完全析出；另外氢还与熔池中的 Cu_2O 反应生成水蒸汽，造成焊缝中易出现氢气和在水蒸汽气孔。

由于上述原因，铜及铜合金焊接接头的塑性和韧性下降明显，为此采用焊接强热源设备和焊前预热（ $150^\circ C \sim 550^\circ C$ ）来防止难熔合、未焊透现象并减少焊接应力与变形；严格限制杂质含量，加入脱氧剂，控制氢来源，降低溶池冷速等防止裂纹、气孔缺陷；焊后采用退火处理以消除应力等措施。

焊接铜和铜合金常用的焊接方法有氩弧焊、气焊、埋弧焊和钎焊。氩弧焊是焊接铜和铜合金应用最广的熔焊方法。厚度小于 3mm 的工件采用 TIG 焊，可不开坡口不加焊丝；厚度 3~12 mm 的工件采用填丝 TIG 焊或 MIG 焊；厚度大于 12mm 的工件一般采用 MIG 焊。选用焊丝除满足一般工艺、冶金要求外，应注意控制其杂质含量和提高脱氧能力。气焊黄铜采用弱氧化焰，其他均采用中性焰，由于温度较低，除薄件外，焊前应将工件预热至 $400^\circ C$ 以上，焊后应进行退火或锤击处理。埋弧焊适用于中、厚板长焊缝的焊接，厚度 20mm 以上的工件焊前应预热，单面焊时背面应加成形垫板。铜及铜合金的钎焊性优良，硬钎焊时采用铜基钎料、银基钎料，配合硼砂、硼酸混合物等作为钎剂；软钎焊时可用锡铅钎料，配合松香、焊锡膏

作为钎剂。

3. 钛及钛合金的焊接

钛（熔点 1725℃，密度为 4.5g/cm³）及钛合金具有高强度、低密度、强抗腐蚀性和好的低温韧性，是航天工业的理想材料，因此焊接该种材料成为在尖端技术领域中之必然要遇到的问题。

由于钛及钛合金化学性质非常活泼，极易出现多种焊接缺陷，焊接性差，所以主要采用氩弧焊，此外还可采用等离子弧焊、真空电子束焊和钎焊等。

钛及钛合金极易吸收各种气体，使焊缝出现气孔。过热区晶粒粗化或钛马氏体生成以及氢、氧、氮与母材金属的激烈反应，都使焊接接头脆化，产生裂纹。氢是使钛及钛合金焊接出现延迟裂纹的主要原因。

3mm 以下薄板钛合金的钨极氩弧焊焊接工艺比较成熟，但焊前的清理工作，焊接中工艺参数的选定和焊后热处理工艺都要严格控制。

4.5 焊接结构工艺设计

4.5.1 焊接结构生产工艺过程概述

各种焊接结构，其主要的生产工艺过程为：备料→装配→焊接→焊接变形矫正→质量检验→表面处理（油漆、喷塑或热喷涂等）。

备料 包括型材选择，型材外形矫正，按比例放样、划线，下料切割，边缘加工，成形加工（折边、弯曲、冲压、钻孔等）。

装配 利用专用卡具或其他紧固件装置将加工好的零件或部件组装成一体，进行定位焊，准备焊接。

焊接 根据焊件材质、尺寸、使用性能要求、生产批量及现场设备情况选择焊接方法，确定焊接工艺参数，按合理顺序施焊。

4.5.2 焊接结构工艺设计

焊接结构件种类各式各样，在其材料确定以后，对焊接结构件进行工艺设计主要包括三方面内容：焊缝布置、焊接方法选择和焊接接头设计等。

1. 焊缝布置

焊缝布置是否合理，直接影响结构件的焊接质量和生产率。因此，设计焊缝位置时应考虑下列原则：

(1) 焊缝应尽量处于平焊位置 各种位置的焊缝，其操作难度不同。以焊条电弧焊焊缝为例，其中平焊操作最方便，易于保证焊接质量，是焊缝位置设计中的首选方案，立焊、横焊位置次之，仰焊位置施焊难度最大，不易保证焊接质量。

(2) 焊缝要布置在便于施焊的位置 焊条电弧焊时，焊条要能伸到焊缝位置，如图 4.5.1 所示。点焊、缝焊时，电极要能伸到待焊位置，如图 4.5.2 所示。埋弧焊时，要考虑焊缝所处的位置能否存放焊剂。设计时若忽略了这些问题，无法施焊。

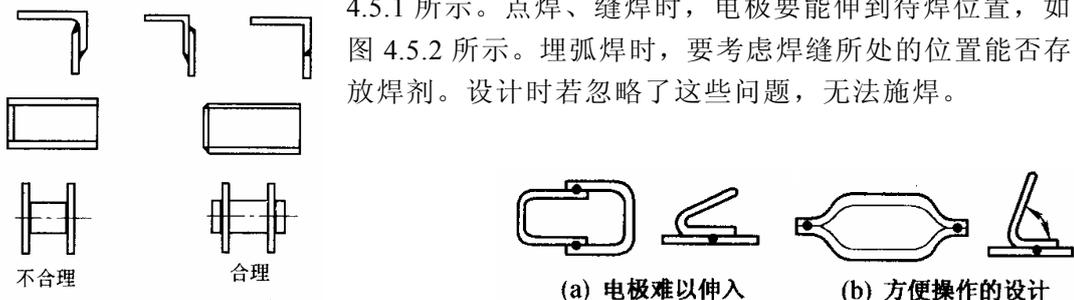


图 4.5.2 点焊、缝焊焊缝位置

图 4.5.1 焊条电弧焊焊缝位置

(a) 电极难以伸入；(b) 方便操作的设计

(3) 焊缝布置要有利于减少焊接应力与变形

1) 尽量减少焊缝数量及长度,缩小不必要的焊缝截面尺寸 设计焊件结构时,可通过选取不同形状的型材、冲压件来减少焊缝数量。如图 4.5.3 所示的箱式结构,若用平板拼焊需四条焊缝,若改用槽钢拼焊需两条焊缝,焊缝数量的下降,既可减少焊接应力和变形,又可提高生产率。

焊缝截面尺寸的增大会使焊接变形量随之加大,但过小的焊缝截面尺寸,又可能降低焊件结构强度,且截面过小焊缝冷速过快易产生缺陷,因此在满足焊件使用性能前提下,应尽量减少不必要的焊缝截面尺寸。

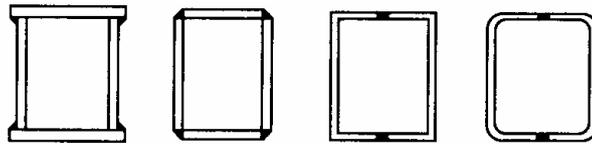


图 4.5.3 减少焊缝数量示例

2) 焊缝布置应避免密集或交叉 焊缝密集或交叉,会使接头处严重过热,导致焊接应力与变形增大,甚至开裂。因此两条焊缝之间应隔开一定距离,一般要求大于三倍的板材厚度,且不小于 100mm,如图 4.5.4 所示。处于同一平面焊缝转角的尖角处相当于焊缝交叉,易产生应力集中,应尽量避免,改为平滑过渡结构。即使不同一平面的焊缝,若密集堆垛或排布在一列都会降低焊件的承载能力。

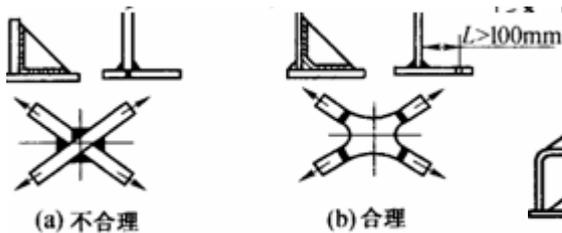


图 4.5.4 焊缝布置应避免密集和交叉

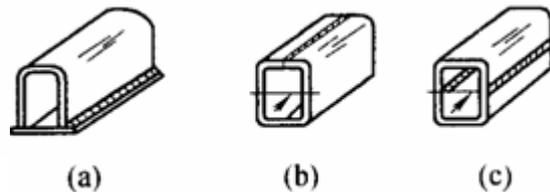


图 4.5.5 焊缝布置应对称

3) 焊缝布置应尽量对称 当焊缝布置对称于焊件截面中心轴或接近中心轴时,可使焊接中产生的变形相互抵消而减少焊后总变形量。焊缝位置对称分布在梁、柱、箱体等结构的设计中尤其重要,如图 4.5.5 所示,图 a 中焊缝布置在焊件的非对称位置,会产生较大弯曲变形,不合理;图 b、图 c 将焊缝对称布置,均可减少弯曲变形。

4) 焊缝布置应尽量避免最大应力位置或应力集中位置 尽管优质的焊接接头能与母材等强度,但焊接时难免出现程度不同的焊接缺陷,使结构的承载能力下降。所以在设计受力的焊接结构时,最大应力和应力集中的位置不应布置焊缝。在图 4.5.6a 中,大跨度钢梁的最大应力处在钢梁中间,若整个钢梁结构由两段型材焊成,焊缝正布置在最大应力处,整个结

构的承载能力下降；若改用 b 图结构，钢梁由三段型材焊成，虽增加了一条焊缝，但焊缝避开了最大应力处，提高了钢梁的承载能力。压力容器结构设计，为使焊缝避开应力集中的转角处，不应采用图 4.5.6c 所示的无折边封头结构，应采用 d 图所示有折边封头结构。

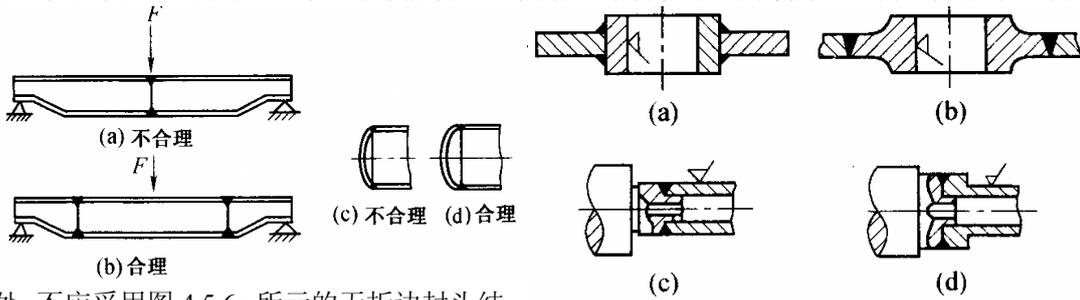


图 4.5.6 焊缝应避开应力集中处的布置

图 4.5.7 焊缝布置应避开机加工表面

(5) 焊缝布置应避开机械加工表面 有些焊件某些部位需切削加工，如采用焊接结构制造的零件如轮毂等，如图 4.5.7 所示。为机加工方便，先车削内孔后焊接轮辐，为避免内孔加工精度受焊接变形影响，必须采用图 b 结构，焊缝布置离加工面远些。对机加工表面要求高的零件，由于焊后接头处的硬化组织，影响加工质量，焊缝布置应避开机加工表面，如图 4.5.7d 所示结构比 c 合理。

2. 焊接方法的选择

各种焊接方法都有其各自特点及适用范围，选择焊接方法时要根据焊件的结构形状及材质、焊接质量要求、生产批量和现场设备等，在综合分析焊件质量、经济性和工艺可能性之后，确定最适宜的焊接方法。

常用焊接方法的特点及适用范围见表 4.5.1。

选择焊接方法时应依据下列原则：

(1) 焊接接头使用性能及质量要符合结构技术要求 选择焊接方法时既要考虑焊件能否达到力学性能要求，又要考虑接头质量是否符合技术要求。如点焊、缝焊都适于薄板轻型结构焊接，缝焊才能焊出有密封要求的焊缝。又如氩弧焊和气焊虽都能焊接铝材容器，但接头质量要求高时，应采用氩弧焊。又如焊接低碳钢薄板，若要求焊接变形小时，应选用 CO_2 焊或点（缝）焊，而不宜选用气焊。

(2) 提高生产率，降低成本 若板材为中等厚度时，选择焊条电弧焊、埋弧焊和气体保护焊均可，如果是平焊长直焊缝或大直径环焊缝，批量生产，应选用埋弧焊。如果是位于不同空间位置的短曲焊缝，单件或小批量生产，采用焊条电弧焊为好。氩弧焊几乎可以焊接各种的金属及合金，但成本较高，所以主要用于焊接铝、镁、钛合金结构及不锈钢等重要焊接结构。焊接铝合金工件，板厚 $>10\text{mm}$ 采用熔化极氩弧焊为好，板厚 $<6\text{mm}$ 采用钨极氩弧焊适宜。若是板厚 $>40\text{mm}$ 钢材直立焊缝，采用电渣焊最适宜。

(3) 焊接现场设备条件及工艺可能性 选择焊接方法时，要考虑现场是否具有相应的焊接设备，野外施工有没有电源等。此外，要考虑拟定的焊接工艺能否实现。例如，无法采用双面焊工艺又要求焊透的工件，采用单面焊工艺时，若先用钨极氩弧焊（甚至钨极脉冲氩弧焊）打底焊接，更易于保证焊接质量。

3. 焊接接头设计

焊接接头设计包括焊接接头形式设计和坡口形式设计。设计接头形式主要考虑焊件的结构形状和板厚、接头使用性能要求等因素。设计坡口形式主要考虑焊缝能否焊透、

坡口加工难易程度、生产率、焊条消耗量、焊后变形大小等因素。

(1) 焊接接头形式设计 焊接接头按其结合形式分为对接接头、盖板接头、搭接接头、T形接头、十字形接头、角接接头和卷边接头等，如图 4.5.8 所示。其中常见的焊接接头形式有对接接头、搭接接头、角接接头和 T 形接头。

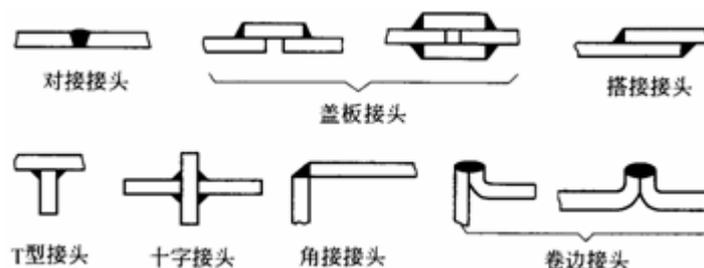


图 4.5.8 焊接接头形式

表 4.5.1 常用焊接方法的特点及适用范围

| 焊接方法 | 焊接热源 | 可焊空间位置 | 适用钢板厚度 (mm) | 焊缝成形性 | 生产率 | 设备费用 | 可焊材料 | 适用范围及特点 |
|-------------------|---------------|--------|----------------------|-------|-----|-------|------------------------|--|
| 气焊 | 氧-乙炔气体或其他可燃气体 | 全位置 | 1~3 | 较差 | 低 | 低 | 碳钢、低合金钢、铸铁、铝及铝合金、铜及铜合金 | 薄板、薄管焊件，灰铸铁补焊，铝、铜及其合金薄板结构件的焊接、补焊。但焊件变形大，焊接质量较差 |
| 焊条电弧焊 | 电弧 | 全位置 | >1 常用 2~10 | 较好 | 中等 | 较低 | 碳钢、低合金钢、不锈钢、铸铁等 | 成本较低，适应性强，可焊各种空间位置的短、曲焊缝 |
| 埋弧焊 | 电弧 | 平焊 | ≥3 常用 4~60 | 好 | 高 | 较高 | 碳钢、低合金钢等 | 成批生产、中厚板长直焊缝和直径>250 mm 环焊缝 |
| 氩弧焊 | 电弧 | 全位置 | 0.5~25 | 好 | 中等 | 较高 | 铝、铜、钛、镁及其合金、不锈钢、耐热钢 | 焊接质量好，成本高 |
| CO ₂ 焊 | 电弧 | 全位置 | 0.8~50 常用于薄板 | 较好 | 高 | 较高 | 碳钢、低合金钢 | 生产率高，无渣壳，成本低，宜焊薄板，也可焊中厚板，长直或短曲焊缝 |
| 电渣焊 | 电阻热 | 立焊 | 25~1000 常用 40~450 | 好 | 高 | 高 | 碳钢、低合金钢、铸铁 | 较厚工件立焊缝 |
| 点焊 | 电阻热 | 全位置 | 常用 0.5~6 | 好 | 很高 | 较低~较高 | 碳钢、低合金钢、铝及铝合金 | 焊接薄板，接头为搭接 |
| 缝焊 | | 平焊 | <3 | | | 较高 | | 焊接有密封要求的薄板容器和管道，接头为搭接 |
| 对焊 | | | — | | | 高 | | 较低~较高 |

| | | | | | | | |
|----|------------------|------|---|---|---|---------|---|
| 钎焊 | 各种热源(常用烙铁和氧-乙炔焰) | 平、立焊 | — | 好 | 高 | 一般为金属材料 | 常用于电子元件、仪器、仪表及精密机械零件的焊接,还可完成其他焊接方法难以完成的异种金属间焊接。但接头强度较低,接头多为搭接 |
|----|------------------|------|---|---|---|---------|---|

对接接头应力分布均匀,节省材料,易于保证质量,是焊接结构中应用较多的一种,但对下料尺寸和焊前定位装配尺寸要求精度高。锅炉、压力容器等焊件常采用对接接头。搭接接头不在同一平面,接头处部分相叠,应力分布不均匀,会产生附加弯曲力,降低了疲劳强度,多耗费材料,但对下料尺寸和焊前定位装配尺寸要求精度不高,且接头结合面大,增加承载能力,所以薄板、细杆焊件如厂房金属屋架、桥梁、起重机吊臂等桁架结构常用搭接接头。点焊、缝焊工件的接头为搭接,钎焊也多采用搭接接头,以增加结合面。角接头和 T 形接头根部易出现未焊透,引起应力集中,因此接头处常开坡口,以保证焊接质量,角接头多用于箱式结构。对于 1~2mm 薄板,气焊或钨极氩弧焊时为避免接头烧穿又节省填充焊丝,可采用卷边接头。

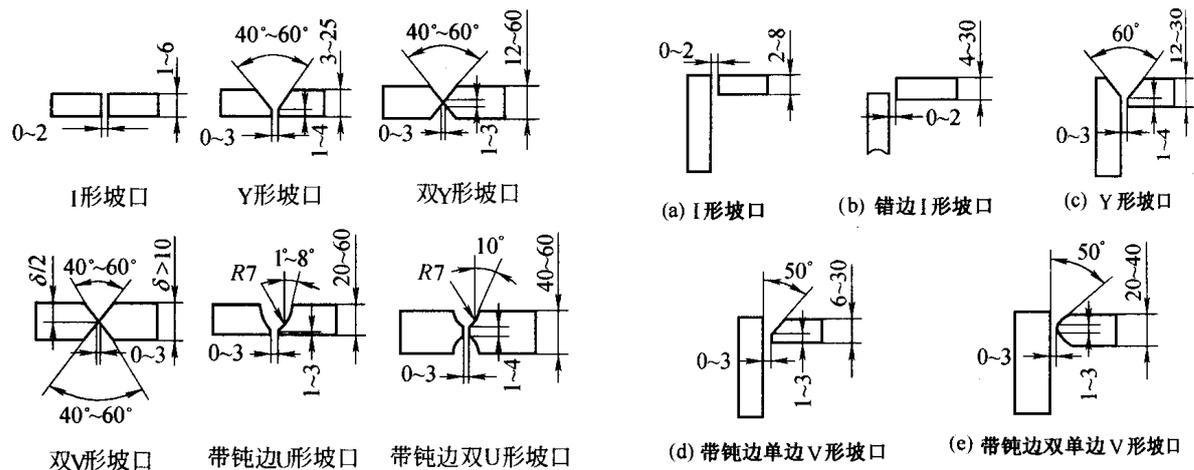
(2) 焊接接头坡口形式设计 开坡口的根本目的是为使接头根部焊透,同时也使焊缝成型美观,此外通过控制坡口大小,能调节焊缝中母材金属与填充金属的比例,使焊缝金属达到所需的化学成分。坡口的常用加工方法有气割、切削加工(车或刨)和碳弧气刨等。

焊条电弧焊的对接接头、角接头和 T 形接头中有各种形式的坡口,其选择主要取决于焊件板材厚度。

1) 对接接头坡口形式设计 对接接头的坡口基本形式有 I 形坡口、Y 形坡口、双 Y 形坡口、带钝边 U 形坡口、带钝边双 U 形坡口、单边 V 形坡口、双单边 V 形坡口、带钝边 J 形坡口、带钝边双 J 形坡口等,图 4.5.9 中列出其中六种坡口形式。此外,还有带垫板的 I 形坡口等。

2) 角接头坡口形式设计 角接头的坡口基本形式有 I 形坡口、错边 I 形坡口、Y 形坡口、带钝边单边 V 形坡口、带钝边双单边 V 形坡口等。如图 4.5.10 所示。

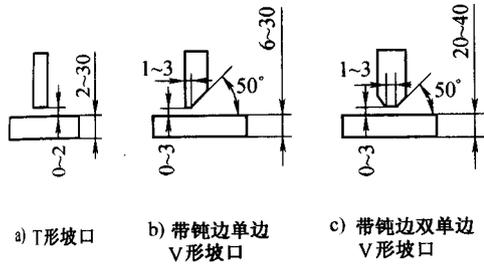
3) T 形接头坡口形式设计 T 形接头的坡口基本形式有: I 形坡口、带钝边单边 V



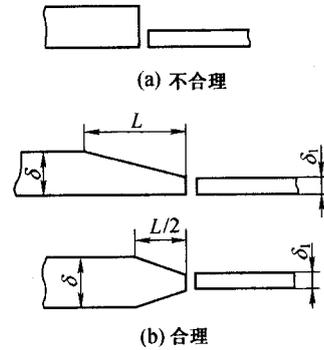
形坡口、带钝边双单边 V 形坡口等,见图 4.5.11 所示。

焊条电弧焊板厚 < 6mm 时,一般采用 I 形坡口;但重要结构件板厚 > 3mm 就需开坡口,以保证焊接质量。板厚在 6~26mm 之间可采用 Y 形坡口,这种坡口加工简单,但焊后角变形大。板厚在 12~60mm 之间可采用双 Y 形坡口;同等板厚情况下,双 Y 形坡口比 Y 形坡口需要的填充金属量约少 1/2,且焊后角变形小,但需双面焊。

图 4.5.9 几种对接接头坡口形式图



4.5.10 几种角接头坡口形式



带钝边 U 形坡口比 Y 形坡口省焊条，省焊接工时，但坡口加工麻烦，需切削加工。

埋弧焊焊接较厚板采用 I 形坡口时，为使焊剂与焊件贴合，接缝处可留一定间隙。

坡口形式的选择既取决于板材厚度，也要考虑加工方法和焊接工艺性。如要求焊透的受力焊缝，能双面焊尽量采用双面焊，以保证接头焊透，变形小，但生产率下降。若不能双面焊时才开单面坡口焊接。

对于不同厚度的板材，为保证焊接接头两侧加热均匀，接头两侧板厚截面应尽量相同或相近，如图 4.5.12 所示。不同厚度钢板对接时允许厚度差见表 4.5.2。

图 4.5.11 三种 T 形接头坡口形式图

图 4.5.12 不同板厚对接

表 4.5.2 不同厚度钢板对接允许厚度差 (mm)

| 较薄板的厚度 δ_1 | >2~5 | >5~9 | >9~12 | >12 |
|-------------------|------|------|-------|-----|
| 允许厚度差 δ | 1 | 2 | 3 | 4 |

4.5.3 焊接结构工艺设计实例

例题 图 4.5.13a 所示低压贮气罐，壁厚 8mm，压力为 1.0Mpa，温度为常温，介质为压缩空气，大批量生产。

焊接结构工艺设计要求如下：

(1) 图 4.5.13b 所示为低压贮气罐装配焊接图，筒节、封头 I、封头 II 焊合成筒体，贮气罐由筒体及四个法兰管座焊合而成。

(2) 选择母材材料 根据技术参数，考虑到封头拉深、筒节卷圆、焊接工艺及成本，筒节、封头及法兰选用塑性和焊接性好的普通碳素结构钢 Q235-A，短管选用优质碳素结构钢 10。

(3) 设计焊缝位置及焊接接头、坡口形式 筒节的纵焊缝和筒节与封头相连处的两条环焊缝均采用对接 I 形坡口双面焊，法兰与短管焊合采用不开坡口角焊缝，法兰管座与筒体焊合采用开坡口角焊缝。

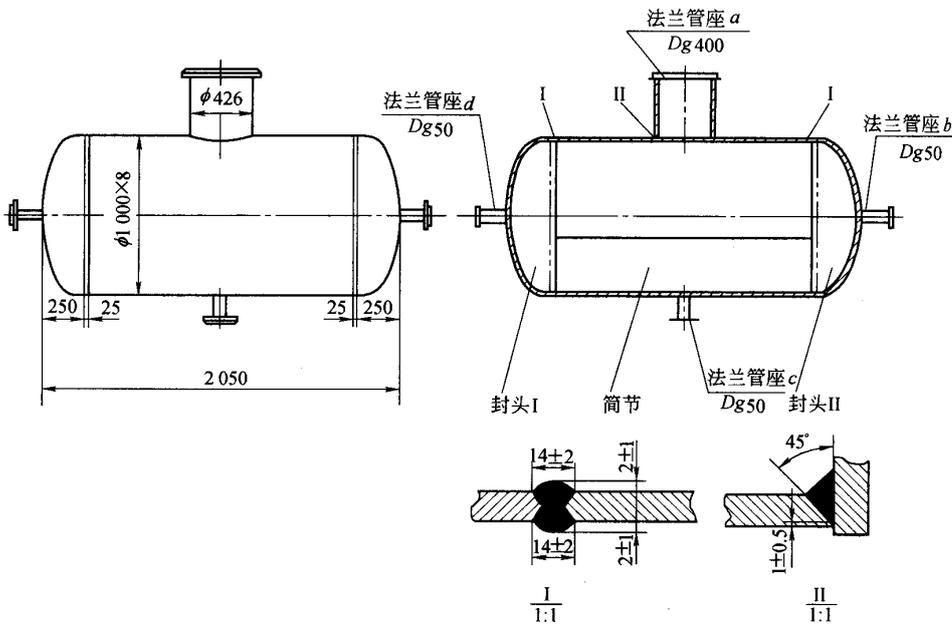
(4) 选择焊接方法和焊接材料 由于各条角焊缝长度均较短，且大部分焊缝在弧面上，故采用焊条电弧焊方法，焊条选用 E4303 (J422)，选用弧焊变压器 (因用酸性焊条)。焊接三条纵、环焊缝，为保证质量，提高生产率，采用埋弧焊方法，焊丝选用 H08A，配合焊剂 HJ431。

(5) 主要工艺流程如下：

筒体：

(封头)：气割下料→接深→切边→开管座孔 b、d

(筒节)：剪切下料→卷圆→焊接内纵缝→焊接外纵缝→筒节与封头 I、II 组对→开管座孔 a、c→焊接内环缝→焊接外环缝→射线探伤→法兰、短管、筒体装配与焊接→清理→水压



(a) 设计图

(b) 装配图

试
验→气
密性试
验。

法
兰管
座：

(法
兰)：下
料→切
削加工
→钻孔

(短
管)：下
料

图 4.5.13 低压贮气罐设计、装配示意图

复习题与思考题

- 4—1 焊接电弧是如何产生的？电弧中各区的温度有多高？用直流或交流电焊接效果一样吗？
- 4—2 焊接时为什么要进行保护？说明各电弧焊方法中的保护方式和保护效果有什么不同？
- 4—3 焊芯的作用是什么？其化学成分有何特点？焊条药皮有哪些作用？
- 4—5 何谓焊接热影响区？低碳钢焊接时各有哪些区段？各区段组织性能变化如何？对接头性能有何影响？
- 4—6 如何防止焊接变形？减少焊接应力的工艺措施有哪些？
- 4—7 你所了解的其它焊接方法有哪些？各有什么特点？
- 4—8 低碳钢焊接有何特点？普通低合金钢焊接的主要问题是什么？焊接时应采取哪些措施？
- 4—9 奥氏体不锈钢焊接的主要问题是什么？
- 4—10 铝、铜及其合金焊接常用哪些方法？优先采用哪一种为好？为什么？

