

# 绪 论

随着科学技术的发展 焊接已成为加工金属的一门独立科学 并广泛用于航空、航天、原子能、化工、造船、海洋工程、电子、建筑、交通运输、电力、机械制造等部门。

通常 造船、海洋工程生产中金属结构的联接方法有铆接与焊接。所谓焊接 从微观上讲是两种或两种以上材料 同种或异种 通过原子或分子间结合或扩散形成永久性联接方法。

## 一、焊接方法的分类

目前生产中使用的焊接方法很多，按其基本特点可分成三大类。

### 1. 熔焊

熔焊的特点是利用局部热源加热被焊金属的连接处及填充金属（有时可不加填充金属）使其熔化、互相熔合、冷却凝固形成永久联接。电弧焊、气体保护焊、电渣焊、电子束焊、气焊等都是熔焊。

### 2. 压焊

在加热或不加热的情况下，对焊接区施加一定压力使两个分离表面的金属原子接近到晶格距离，形成金属键使两金属联为一体。接触焊、摩擦焊、爆炸焊等都是压焊。

### 3. 钎焊

熔化的钎料（熔点低于钎件的熔点）对固体钎件浸润以保证液态钎料填满钎缝，液态钎料与联结件的表面由分子或原子互相扩散结合冷凝后形成联为一体的接头。钢铁材料使用铜焊，铜使用锡焊等都是钎焊。

焊接的具体分类见下面分类表。

## 二、焊接结构的特点及其在造船业中的应用

造船业中以焊接代替铆接如同以钢材代替木材一样是造船工业的一次划时代变革。自1921年世界上出现第一艘全焊结构的船舶（载重量为500吨）以来 焊接工作者通过大量的实践与研究使船舶焊接工艺得到成功和迅速发展。现在不仅完全代替了铆接，而且形成了较完整的船舶焊接工艺系统 为船舶建造向自动化、大型化、专业化发展提供了可靠的技术保证。

造船业中，焊接所以能迅速取代铆接并成为船舶结构最主要的联接方法是由于焊接结构所具有的特点所决定。

### 1. 可节省大量金属材料

焊接结构的焊缝金属通常约为构件的（1~1.5）%，而在铆接结构中，铆钉一般为构件的（3~4）% 加上铆接处的重叠板材，焊接结构船舶比铆接结构船舶一般可节约10~25%的材料 图0-1。

焊接结构与铸钢件（大型船舶的艏艉柱）相比，可节约20~30%的材料。这主要因为焊接结构的艏、艉柱各处的尺寸可以按设计要求选取，不必像铸钢件那样因工艺的限制加大尺寸。

### 2. 可改变结构设计

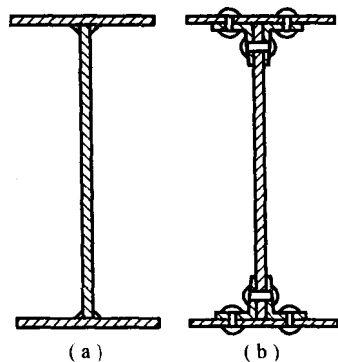
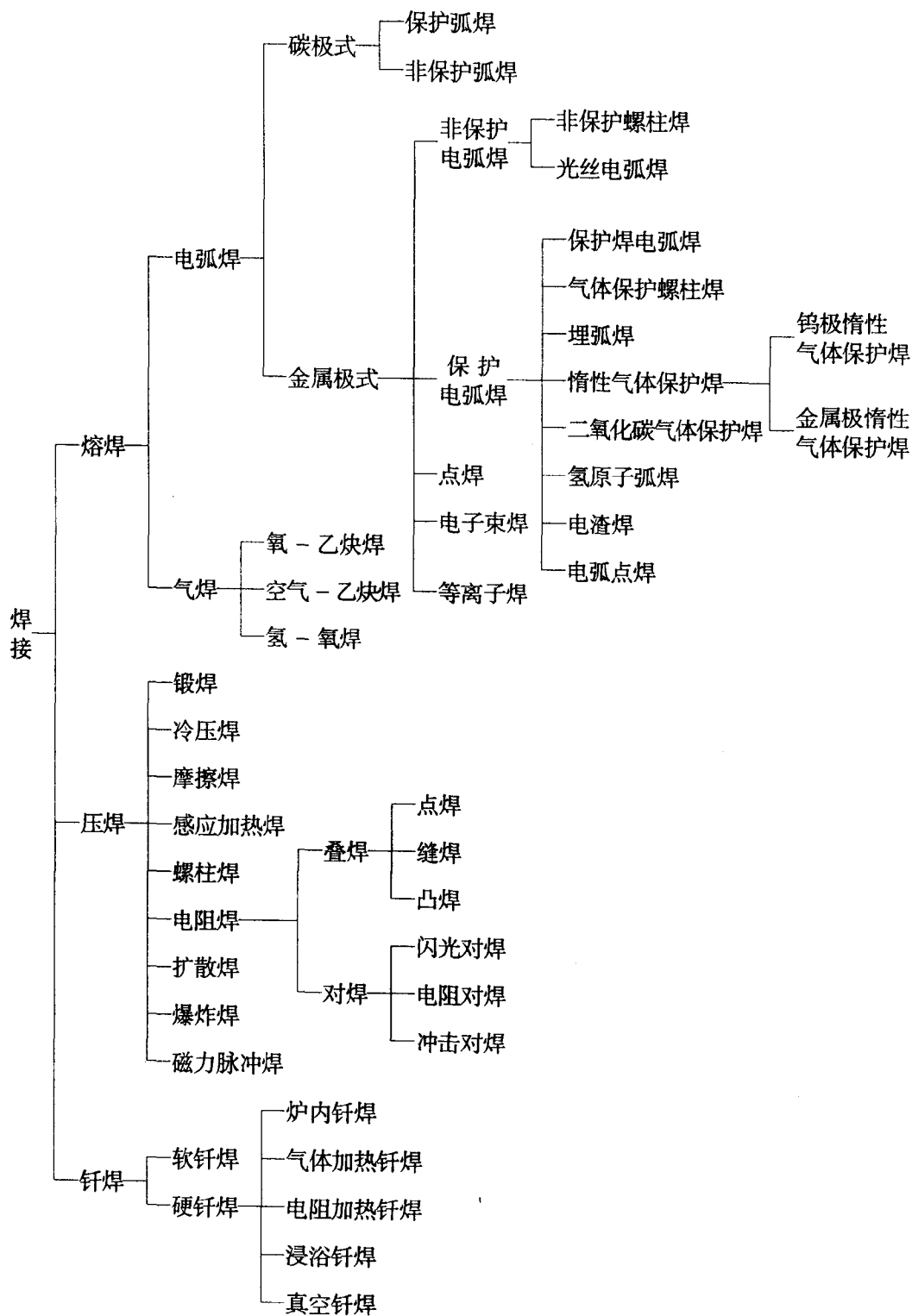


图0-1 焊接工字钢与铆接工字钢对比  
(a)焊接工字钢;(b)铆接工字钢



某空心主轴(图 0-2)可以用三种方案制造:①整锻;②两个铸钢法兰与锻造轴筒拼焊;轴筒由厚板辊弯成半筒,然后焊成一个整筒,再与铸钢法兰拼焊。

三个方案中整锻需要大钢锭,而大钢锭所需浇口、冒口也大,消耗材料最多,大约是方案消耗材料的两倍。

### 3. 结构强度高

焊缝金属的机械性能可与焊件金属的机械性能相等。

### 4. 焊接结构密性好

焊接结构是由致密的焊缝把焊件联接起来的统一体,所以其油密、水密、气密性好。即使在受力、碰撞作用发生变形时,仍能保证焊接结构的整体性、紧密性。

### 5. 成本低

节约材料是焊接结构成本低的主要因素,此外焊接设备比铆接生产所需多头钻床和加热炉等设备投资低,与铸造相比不需要制作木模和砂型,也不需要专门的熔炼和浇铸,工序简单,生产周期短。

### 6. 改善生产劳动条件

焊接不需要像铆接那样进行热加工,此外由于采用焊接工艺生产使船体建造可采用分段法建造,使 60%~70% 的船体装配、焊接工作由外场移到内场,有利于生产过程的自动化。

事物都是一分为二的,焊接结构除有上述优点外,也有其不足之处。

#### 1. 焊接结构的应力集中变化范围比铆接结构应力集中变化范围大

铆接结构的铆钉孔周围应力集中系数变化较小。焊接结构中,焊缝不但起着类似铆钉的连接构件作用而且与基本金属联结组成一个整体,在外力的作用下将一起变形。在焊缝根部焊趾处尺寸平滑过渡差,应力集中较大,应力集中对结构的脆性断裂和疲劳寿命有很大影响,应采取合理的工艺和设计控制焊接结构的应力集中,以提高其强度和寿命。

#### 2. 焊接结构有较大的焊接应力与变形

绝大多数焊接方法都是采用局部加热,加之焊接构件的刚性不可避免地产生内应力与变形。应力与变形不但能引起工艺缺陷,而且在一定条件下将影响结构的强度、刚度、受压稳定性及尺寸稳定性等。

#### 3. 焊接结构具有较大的性能不均匀性

焊接接头金属在焊接过程中经受了不同热循环、冶金过程,使焊接接头处的金属成分和组织与基本金属有差别,形成了一个不均匀结构,它的不均匀性远远超过铸件和锻件。

#### 4. 焊接接头的整体性

焊接结构是一整体,一方面油密、水密、气密性好,另一方面当一构件产生裂纹会通过焊缝扩展到另一构件,裂纹一旦开始扩展便不易制止,而铆接接头往往可以起到限制裂纹扩展的作用。

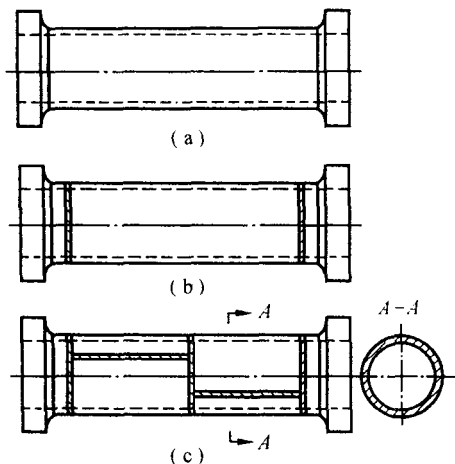


图 0-2 水轮机主轴的几种设计方案

(a)整锻;(b)铸钢法兰与锻造轴筒焊成;

(c)铸造法兰与焊接轴筒焊成

# 1 熔焊基本理论

目前造船业中采用的主要焊接方法是熔焊，手工电弧焊、埋弧焊、气体保护焊、电渣焊、电子束焊等都是熔焊。本章内容包括焊接电弧、焊丝熔化过渡、焊缝的形成、焊接冶金反应、焊接接头的金相组织与机械性能。

## 1.1 焊接电弧

焊接电弧是一种持久的、稳定的放电现象。它能产生高温将填充金属和部分被焊金属熔化，经冷却、凝固形成焊缝。

### 1.1.1 焊接电弧的产生

将焊条和焊件各接到焊接电源的一个极上，当焊条与焊件瞬间接触又拉开时，焊条端部与焊件间就会产生明亮的焊接电弧。

通常情况下，气体呈中性不导电。要使气体导电必须使气体中的中性质点（分子或原子）离解成带电的电子和正离子。使气体介质电离需要能量，这种能量称作电离功。不同的气体或元素由于原子结构不同其电离功不同，常见元素电离功见表 1-1。

表 1-1 常见元素的电离功

| 元 素       | K     | Na    | Ba    | Li    | Al             | Ca    | Cr             | V               | Ti    | Mn             | Mg    | Cu    | Fe    | Si    | W    |
|-----------|-------|-------|-------|-------|----------------|-------|----------------|-----------------|-------|----------------|-------|-------|-------|-------|------|
| 电离功<br>eV | 4.33  | 5.11  | 5.19  | 5.40  | 5.96           | 6.10  | 6.74           | 6.76            | 6.80  | 7.40           | 7.61  | 7.70  | 7.83  | 7.94  | 8.00 |
| 元 素       | S     | C     | Cl    | H     | H <sub>2</sub> | O     | O <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub> | N     | N <sub>2</sub> | Ar    | F     | Ne    | He    |      |
| 电离功<br>eV | 10.30 | 11.22 | 13.00 | 13.50 | 15.40          | 13.60 | 12.20          | 13.70           | 14.50 | 15.50          | 15.70 | 16.90 | 21.50 | 24.50 |      |

#### 一、气体介质的电离

由表 1-1 可看出各种元素电离的难易是不相同的，元素的电离功小易电离，电离功大则难电离。气体电离时可从不同来源获得能量，根据其获得能量的特点电离可分为三种。

##### 1. 撞击电离

撞击电离的能量来源于质点间的相互碰撞。电子、离子、原子和分子之间的相互碰撞与刚球碰撞有所不同，因为在它们相互接近时既有相互吸引又有相互排斥作用，但用古典力学研究它们还是相当准确的。

质点的碰撞可以是弹性和非弹性。假如撞击是弹性的，被撞质点处于静止状态，撞击质点质量为  $m_2$ 、动能为  $K_0$ 。被撞质点的质量为  $m_1$ ，被撞质点获得最大能量为  $\delta_{\max}$ 。按力学公式可得：

$$\delta_{\max} = K_0 \frac{m_1}{m_1 + m_2}$$

要使质点电离必须使  $\delta_{\max} \geq A_j$ ,  $A_j$  为该元素的电离功。从式中可以看出  $m_2$  较小则  $\delta_{\max}$  较大,  $m_2$  与  $m_1$  相比小到可忽略时  $\delta_{\max}$  最大,  $\delta_{\max} \approx K_0$  这种情况相当于电子碰撞到原子上 最易电离 否则不易电离。

## 2. 光电离

原子吸收光 ( 正确地说是射线 ) 的量子能 , 可发生激发或电离。电离的条件可用下式表示。

$$h\gamma \geq 1.6 \times 10^{-12} V_j$$

其中  $h$  ——普朗克常数 ( 尔格·秒 );

$\gamma$  ——频率 ( 1/秒 );

$V_j$  ——电离势 ( V )。

从上式可见 频率高 即波长短 的射线才易引起电离。

## 3. 热电离

在高温下气体的分子或原子具有很高的动能, 它们间热运动碰撞也会产生电离, 这种电离称作热电离。热电离在 2 000K 的温度开始产生, 在弧柱的温度 5 000K~8 000K 左右就非常显著了。

印度物理学家沙格 1921 年提出在不考虑气体的分级电离和形成多价离子的条件下, 气体的热电离可由下述公式求得

$$\frac{x^2}{1-x^2} \cdot P = 3.12 \times 10^{-12} T^{2.5} e^{-\frac{A_j}{kT}}$$

其中  $x$  ——电离度 ( 已电离的分子数与全部分子数的比例 );

$P$  ——气体的压力 ( 在温度  $T$  时, Pa );

$T$  ——气体的绝对温度;

$A_j$  ——气体的电离功 ( eV );

$K$  ——波尔兹曼常数 (  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K )。

## 二、金属的电子发射

固体或液体表面的原子或分子接受了额外的能量亦能产生电离释放出自由电子到空间中去, 这种现象称作电子发射。产生发射所需能量称作逸出功, 以  $V_{\text{输出}}$  表示 单位为电子伏特, 常见元素的逸出功见表 1-2。

表 1-2 常见元素的逸出功

| 元 素       | Li        | Na        | K         | Mg        | Ca        | Ba        | Al        | Cu                |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------------|
| 逸出功<br>eV | 2.38~2.34 | 2.12~1.80 | 2.02~0.46 | 3.74~1.77 | 3.34~1.70 | 2.29~1.59 | 3.95~1.77 | 4.80~3.89         |
| 元 素       | Zn        | Fe        | Ni        | Mo        | W         | BaO       | CuO       | Cu <sub>2</sub> O |
| 逸出功<br>eV | 4.10~3.02 | 4.79~3.92 | 4.57~3.68 | 4.33~3.22 | 5.36~4.31 | 1.00      | 5.34      | 5.17              |

物质的逸出功在很大程度取决于其表面状态, 如表面有氧化物或其它杂质时都会使逸出功减少。

根据能量的来源电子发射可分以下几种。

### 1. 光电发射

物体表面接受射线能量后会从表面逸出电子称作光电发射。能使一些金属及氧化物产生发射的射线波长差不多都在紫外线范围，一般可见光谱差不多都能引起光电发射现象。

### 2. 热发射

从理论上讲，无论在什么温度下都会有某些数量的电子逸出物体表面（在没有电场存在时，逸出的电子会被失去电子而带正电荷的金属吸回去）。但在室温或比室温高得不多温度下，这种电子逸出量极少，以致几乎觉察不到。温度升高以后，平均动能增加，于是具有较高动能，可逸出的电子数目就会增加。

根据查理逊一代西门公式，热发射与温度的关系可用下式表示。

$$j_0 = AT^2 e^{-\frac{V_{\text{输出}}}{kT}}$$

其中， $j_0$  —— 单位面积在单位时间内放出的电子所带电量，即电流密度，(A/m<sup>2</sup>)；

$A$  —— 常数 (A/m<sup>2</sup>·K<sup>2</sup>)；

$T$  —— 绝对温度 K；

$V_{\text{输出}}$  —— 逸出功 (J)；

$k$  —— 波尔兹曼常数 ( $1.38 \times 10^{-23}$  J/K)。

### 3. 自发射

当两极间有较大电位降时，虽然温度不甚高亦会有显著的电子发射，这种发射称作自发射。根据计算结果得有电场存在时的电子发射公式如下。

$$j_E = j_0 e^{\frac{4.39\sqrt{EK}}{T}}$$

### 4. 碰撞发射

能量大的质点碰撞到阴极表面，将其位能  $e_0 V_j$  (电离能) 和动能  $K_E$  传给阴极。但必须是质点的总能量大于逸出功  $V_{\text{输出}}$ ，被碰撞的阴极才可能有电子逸出。

当离子碰撞阴极时，只有它被中和时才能放出能量。因此，离子碰撞发射必须是阴极最少逸出两个电子，一个电子与离子中和，一个电子作为阴极发射电子。此时应满足

$$e_0 V_j + K_E > 2V_{\text{输出}}$$

## 三、焊接电弧的产生过程

焊接电弧是通过焊条与焊件瞬间接触然后拉开形成的，这个过程实际上可分为短路—空载—燃弧三阶段。

### 1. 短路

焊接引弧时，使焊条或焊丝与焊件接触形成短路。短路时电流很大，而焊条或焊丝与焊件并非理想平面接触，仅在某些突起点处接触，见图 1-1。很大的短路电流集中在几个接触点处通过，这些地方电流密度很大瞬间就把它们加热到熔化状态，甚至变成金属蒸汽。

### 2. 空载

接触后将电极分开，这时一方面由于电极表面高温产生强烈的热发射；另一方面当两极

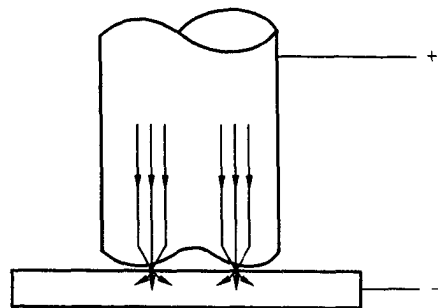


图 1-1 电极短路时之接触与电流示意图

分开距离还非常近时，在焊接电源电压作用下（手工电弧焊机空载电压：直流  $U_0 \approx 45V \sim 70V$  交流  $U_0 \approx 55V \sim 70V$  埋弧自动焊机空载电压 直流  $U_0 \approx 60V \sim 90V$  交流  $U_0 \approx 70V \sim 90V$ ）电场强度可达极其巨大程度 这样就产生了显著的自发射 加之焊极表面有杂质存在，降低了电子发射的逸出功，因此增加了电子发射。

### 3. 燃弧

由阴极发射出来的电子以很高速度射向阳极，电子通过两极间时与中性气体质点碰撞形成碰撞电离。在电弧的高温（弧柱中心  $5\,000K \sim 8\,000K$ ）作用下 中性介质气体产生强烈的热电离。

在热、光、碰撞作用下 加之强电场的作用 中性质点变成了电子和正离子 电子和正离子分别向两极运动，于是产生了电弧。

## 1.1.2 焊接电弧的组成及特性

### 一、焊接电弧的组成

焊接电弧由阴极区、阳极区和弧柱三部分组成，见图 1-2。

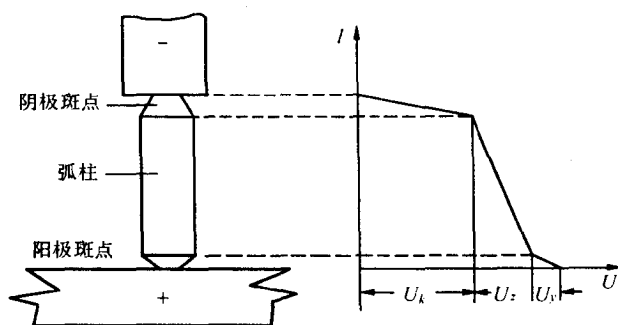


图 1-2 电弧的组成和电压降分布

### 1. 阴极区

阴极区是靠近阴极的地方，这个区域中电位降落  $U_k$ （阴极电位降 较大 大致相当所用气体介质的电离势（ $U_k = V_j$ ））阴极区沿弧长很短 大约为  $10^{-5}cm$  所以该区域内电场强度很大 可达到  $10^6V/cm$  这是能产生自发射的原因。

阴极端面上有一明亮斑点，称作阴极斑点。阴极斑点的温度很高，它随着使用的电极材料不同而异 通常  $2\,200K \sim 3\,500K$ ，最高温度接近材料的沸点。阴极区所发出的热量约占电弧的总发热量的 38%。

### 2. 阳极区

阳极区是靠近阳极的地方，其沿弧长较阴极区稍长，约为  $10^{-2}cm \sim 10^{-4}cm$  阳极端面也有一个明亮斑点 称作阳极斑点。阳极区的电压降较阴极区的电压降小 且不受电极材料和所用介质影响，一般阳极电压降约为 2.5V 左右。

电子通过电弧、阳极区 在电场的作用下加速运动 集中射在阳极斑点上 电流密度很大 故温度较阴极区稍高 通常  $2\,600K \sim 4\,200K$ 。阳极区所发出的热量约占电弧的总发热量的 42%。

### 3. 弧柱区

弧柱是阴极区和阳极区中间的一段，占弧长的绝大部分，可认为弧柱长近似等于电弧长。弧柱区充满了介质的分子和原子以及它们电离产生的电子、离子。由于弧柱区反应激烈，所以弧柱区的温度最高，通常可达  $5\,000\text{K}\sim 8\,000\text{K}$ 。弧柱区的发热量并不多，只占电弧总发热量的 20%。

弧柱区内带电质点沿其长度方向分布是均匀的，但沿其径向分布极不均匀，中心密度大，周围密度小。温度分布也是中心温度高，周围温度低。由上所述，电弧的电压降可由下式表示。

$$U_h = U_K + U_Z + U_v = a + bl_h$$

其中  $U_h$  —— 电弧电压 (V)；

$U_K$  —— 阴极电压降 (V)；

$U_Z$  —— 弧柱电压降 (V)；

$U_v$  —— 阳极电压降 (V)；

$a$  ——  $U_K + U_v$ ；

$b$  —— 单位长弧柱电压降  $20\text{V/cm}\sim 40\text{V/cm}$ ；

$l_h$  —— 电弧长度 (cm)。

### 二、焊接电弧的静特性

电流与电压在较长时间内不改变其数值称之为在稳定状态工作。在稳定状态下，电弧电流与电压之间的关系称作电弧的静特性。

电路中的负载如果是金属电阻，则负载两端的电压降与负载电流服从欧姆定律 ( $U = IR$ )，当金属电阻的温升不很高，电阻可视为常数。焊接电弧的电压与电流关系比金属电阻的电压与电流关系复杂得多，不服从欧姆定律，当焊接电流在很大范围内变化时，其静特性为 U 形见图 1-3。

电流较小时，阴极与阳极的电压降与电流无关，而弧柱的截面积和导电性随电流增大而增加，即随着电弧电流的增加，电弧的电阻下降。也就是说，电弧的电压随电流的增加而减小，电弧的静特性呈下降趋势，见图 1-3 中  $ab$  段。

当电流增加到正常焊接规范时（手工电弧焊大约  $100\text{A}\sim 150\text{A}$ ，埋弧自动焊约为  $400\text{A}\sim 900\text{A}$ ），阴极、阳极的电压降仍保持不变，弧柱面积随电流增加而增加，并随电流增加改善了电弧的电离程度，使电阻与电流成反比关系。也就是说，在这段时间中，弧柱的电压降不随电流的增大而变化，即电弧总电压保持不变，见图 1-3 中  $bc$  段。

当电流从  $c$  点继续增加时，由于电极直径不变，电流增加只能是电流密度增加。此时，在电磁力、焊剂、埋弧焊和保护气体、气体保护焊的作用下，弧柱的面积不是增大而是缩小，因而导电率有所下降。要保证有一定的电流通过，必须有较高的电压降，故此时电压与电流的关系又有所上升，见图 1-3 中  $cd$  段。

### 三、电弧的稳定性

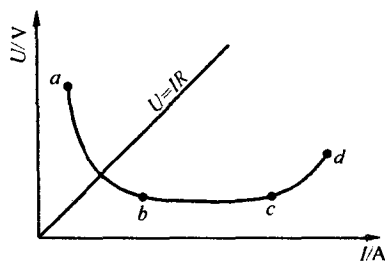


图 1-3 金属电阻与电弧的静特性

由于熔化极电弧焊的熔滴过渡，不仅使焊接过程中无法保持弧长的恒定，而且当大颗粒熔滴进入熔池时还会造成短路，使电弧电压和电流不断地变化，因此焊接电弧实际上是一个动负载。

焊接电弧的稳定性是指电弧电压和焊接电流是否能保持相对稳定及在一定弧长下不偏吹、不熄弧。影响电弧稳定性有以下几方面因素。

### 1. 焊接电源

电源的种类、空载电压、极性都会影响电弧的稳定性。采用直流电源焊接时的电弧要比采用交流电源焊接时的电弧稳定；空载电压较高的焊接电源其电弧较空载电压低的焊接电源的电弧稳定；有良好动特性的焊接电源易保证电弧稳定燃烧。

采用直流电源焊接时，电极的连接有两种方法。将焊件接到电焊机的正极，焊条或焊丝接到电焊机的负极，这种连接方法叫直流正接；将焊件接到电焊机的负极，焊条或焊丝接到电焊机的正极，这种方法叫直流反接，见图 1-4。通常要根据焊条的性质、工件的厚度、焊接材料等选用不同接法。手工电弧焊焊接钢材时，如使用碱性条则应采用直流反接，这样才能使电弧稳定燃烧。

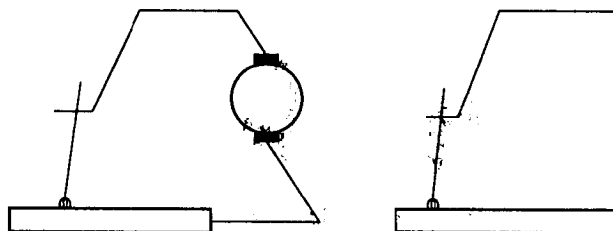


图 1-4 直流焊机的不同极性接法

### 2. 焊条药皮

当焊条药皮中含有较多低电离功的元素（如 K、Na 等）或它们的化合物时，容易保证电弧稳定燃烧。当焊条药皮中含有较多氟化物时，由于在气体电离过程氟易俘获电子，使带电质点减少，致使弧柱的导电性变差，故降低了电弧的稳定性。

### 3. 气流

在室外焊接时，侧向风吹对电弧的稳定性有很大影响，严重时无法焊接。

### 4. 焊接处杂质

焊接处如果有金属氧化物、水、油等杂质时，一方面会妨碍焊条或焊丝与焊件间的导电性，另一方面在焊接高温条件下这些化合物分解吸热，因此会降低电弧燃烧的稳定性。

### 5. 电弧的磁偏吹

正常状态下，电弧的轴线与电极连线平行，但有时电弧会偏离中心线发生偏吹，见图 1-5 电弧偏离熔池后熔池金属的保护受到破坏，由于有害气体侵入易使焊缝产生气孔、焊偏、未焊透等缺陷。

大家知道，电流流过导体时要在其周围产生磁场，而磁场反过来对载流体产生作用力。焊接电流在电弧的两侧产生的磁力线分布不均匀，不均匀的磁场作用在电弧上的磁场力不平衡，根据电磁感应定律，电弧总是偏向磁场强度较小的一侧，这就是磁偏吹。

此外，在电弧周围有较大铁磁物质时，因靠近铁磁物质一侧大部分磁力线通过铁磁物质，该侧靠近电弧处磁场强度减弱，这种磁场强度不均匀会使电弧偏向铁磁物质

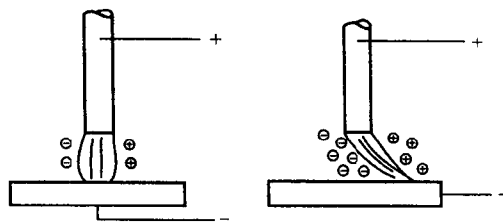


图 1-5 正常焊接电弧和电弧的磁偏吹

一方 (即磁场强度较弱的一方)。

焊接过程中,为防止或减小电弧的磁偏吹的方法是尽量使电弧周围磁场强度分布均匀,使焊条向电弧偏吹的一侧倾斜。

## 1.2 焊缝的形成

在焊接电弧的高温作用下,焊条或焊丝的端部熔化,该熔化金属在表面张力、重力、电磁力、气体的吹力和极点压力的作用下,过渡到焊件被焊着处与部分熔化了了的母材混合在一起形成了焊接熔池,熔池中的金属经冶金反应、冷凝固结晶形成焊缝。

### 1.2.1 焊接电弧的性质

单位时间内电弧产生的热量称作电弧的热功率,以下式表示。

$$q_0 = 0.24 U_h I_h$$

其中  $q_0$  ——电弧的热功率 (cal/s);

$U_h$  ——焊接电弧电压 (V);

$I_h$  ——焊接电流 (A)。

#### 一、焊接电弧的热效率

焊接电弧所发出的热量并不是全部用于加热焊条和焊件,而是有一部分热量散失到电弧周围的介质中,真正用于焊接的热量仅是电弧发热量的一部分,这一部分称作焊接电弧的有效功率  $q$  即

$$q = q_0 \eta_p$$

其中  $q$  ——单位时间内用于焊接的有效热量 (cal/s);

$\eta_p$  ——热效率。

不同焊接方法热能的损失不一样,见表 1-3 列出  $\eta_p$  数值范围。

表 1-3 不同焊接方法的热效率  $\eta_p$

| 焊接方法         | 药皮焊条手工电弧焊 | 埋弧自动焊     | CO <sub>2</sub> 气体保护焊 | 熔化极氩弧焊 (MIG) | 钨极氩弧焊 (TIG) |
|--------------|-----------|-----------|-----------------------|--------------|-------------|
| 热效率 $\eta_p$ | 0.65~0.85 | 0.80~0.90 | 0.75~0.90             | 0.70~0.80    | 0.65~0.70   |

#### 二、焊接线能量

在一定焊接规范 电弧电压、焊接电流、焊接速度 条件下 单位长度焊缝从焊接电弧中吸收的热量称作该规范的线能量,以下式表示。

$$E = 0.24 \eta_p I_h U_h / V_h$$

其中  $E$  ——焊接线能量 (cal/cm);

$\eta_p$  ——热效率;

$I_h$  ——焊接电流 (A);

$U_h$  ——电弧电压 (V);

$V_h$  ——焊接速度 cm/s)。

或

$$E = \eta_p I_h U_h / V_h$$

其中,  $E$  ——焊接线能量 J/cm)。

### 三、电弧的持续率

焊接过程中, 电弧并不是从焊接开始到焊接结束整个过程都在燃烧, 焊接过程既包括焊接电弧燃烧时间又包括为焊接而做的辅助工作(如换焊条、敲渣、清理等)时间。电弧持续率以下式表示

$$OF = \frac{\text{负载持续运行时间}}{\text{负载持续运行时间} + \text{休止时间}} \times 100\%$$

按国家标准规定负载的持续率有 35%、60%、100% 三种。手工电弧焊一般取 60% 轻便型者可取 15%、25%、35%。自动或半自动埋弧焊一般取 100% 或 60%。

## 2.2 焊条和焊丝金属的熔化过渡

熔滴过渡在焊接过程中具有重要意义, 它直接影响焊接过程的稳定性、飞溅大小、焊缝成形的好坏和产生焊接缺陷的可能性。

### 一、金属熔滴上的作用力

焊条或焊丝熔化后, 金属熔滴受到以下几种力的作用。

#### 1. 熔滴的重力

平焊时, 熔滴重力促使熔滴脱离焊条或焊丝并过渡到焊件上去。仰焊时, 重力阻碍熔滴过渡到焊件上, 成为反方向的作用力。

#### 2. 气体的吹送力

气体的吹送力是由于焊条与涂料在加热与燃烧时放出气体(如  $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{O}_2$  等)的压力产生的。通常在使用优质焊条时, 涂料的熔化总是稍微落后于焊条芯的熔化, 这样在焊条末端形成一个尚未熔化的喇叭形套管, 在加热和燃烧时产生的大量气体形成稳定的气流吹向焊件。无论在空间的位置怎样, 这种气流都将促使熔滴从焊条过渡到焊件上去。

#### 3. 表面张力

液体在无外力作用时, 表面会缩成圆形以使其表面能处于最小的稳定状态。焊接过程中表面张力使熔化金属成球形, 当附在焊条末端的熔滴与熔池表面接触, 熔池中金属表面张力的作用会将熔滴拉入熔池中。

仰焊时, 表面张力对于支持液态金属倒悬于焊件表面上起着很大作用。

#### 4. 气体的压力

焊条金属中存在一些溶解状态或游离状态的气体, 随着金属温度升高气体的温度也会升高, 高温使气体膨胀并在熔滴中爆裂, 将熔滴碎裂成小块。这时小部分熔化金属飞出电弧外造成飞溅, 而大部分熔化金属则沿电弧的中心线前进, 不论处于那种空间位置的焊接, 这种压力都使熔化金属从焊条或焊丝上过渡到焊件的熔池中。

#### 5. 电磁力

沿着焊条流过的电流在导体周围形成强大磁场, 这种磁场与流过导体的电流发生压缩作用使导体横截面积减小, 压缩作用的大小与电流的平方成正比。

在固体焊条或焊丝金属上, 由于压缩力有限该压缩不起什么影响, 但在液体金属熔滴上

这种作用力就显得极为重要。研究与计算结果表明,对于直径 5mm 焊条 当电流为 200A 时,压缩作用力就会大大超过金属熔滴的平均重量。

## 6. 带电质点的撞击力

除上述作用力外,阴极斑点和阳极斑点上还有一个重要作用力即弧柱中带电质点到达斑点表面时因撞击产生的力。正接熔滴受到离子撞击 反接熔滴受到电子撞击 这种作用力的作用方向总是阻碍熔滴脱离焊条或焊丝 使它难于过渡到熔池中 只是在正接时撞击上去的带电质点是质量大的离子,因而产生的力量也较大;反接时撞击上去的带电质点是质量小的电子,因而产生的力也较小。由于这种原因,焊接时采用的极性对熔滴的过渡有很大影响。

## 二、熔滴的过渡形式

根据熔滴过渡的形式和特征可分为四种方式。

### 1. 短路过渡

短弧焊时,熔滴的长大受到电弧空间的限制,熔滴还没长到其最大尺寸就与熔池发生接触形成短路 见图 1-6。因系统要力图减少表面自由能,溶滴在表面张力和电磁力的作用下开始沿熔池表面流散并在熔滴和熔池间迅速形成细颈,细颈中电流密度急剧上升,熔滴被强烈过热而炸开,于是熔滴便脱离焊条或焊丝而过渡到熔池中。

### 2. 颗粒状过渡

当电弧超过某一长度时,熔滴依靠表面张力可以在焊条或焊丝端自由长大,甚至熔滴的下落力(重力、电磁力等)大于表面张力时 熔滴就会脱离焊条或焊丝端面落入熔池 此时不发生短路 见图 1-6。

颗粒状过渡时,电流、电压波动比短路过渡时小,减小焊丝直径或增大电流可使熔滴细化。此外,熔滴过渡还与电流极性、保护气体、焊剂和药皮的成分有关。

### 3. 射流过渡

射流过渡的特点是熔滴细,过渡频率高,熔滴沿焊丝轴向以高速向熔池过渡。该过渡飞溅小、过程稳定、熔深大、焊缝成形美观、焊丝端部变尖、电弧活性斑点遍及焊丝端部锥面 见图 1-6。

### 4. 旋转射流过渡

在惰性气体保护焊和熔化极等离子焊时,获得射流过渡后继续增加电流到某临界值会产生一种新过渡形式即旋转射流过渡。其特点是熔滴作高速螺旋运动,过渡频率高达每秒 3 000 多滴 熔滴极细 熔敷速度很高。

## 三、焊条的熔化系数

焊条或焊丝在焊缝金属中约占 30%~80% ,因此焊条或焊丝熔化速度反映着焊接生产率的高低。焊条或焊丝的熔化速度可用熔化系数  $\alpha_p$ 、熔敷系数  $\alpha_H$  和损失系数  $\psi$  表示。

### 1. 熔化系数

熔化系数是指在 1 小时内每 1 安培电流所熔化的焊芯或焊丝重量。

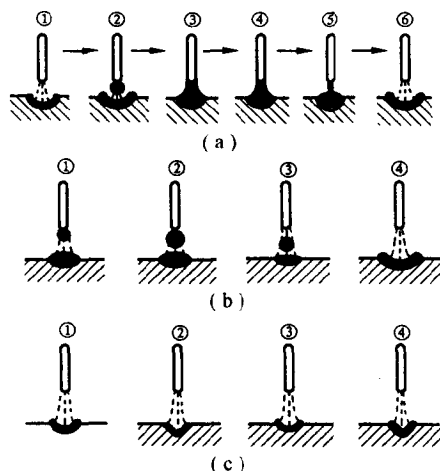


图 1-6 熔滴过渡的情况

(a)短路过渡 (b)滴状过渡 (c)射流过渡

$$\alpha_P = \frac{G_P}{I_h t} \times 3600 \quad (\text{g/A} \cdot \text{h})$$

其中,  $G_P$ ——在  $t$  时间内焊芯或焊丝金属熔化重量 (g);

$I_h$  ——焊接电流 (A);

$t$  ——焊芯或焊丝熔化时间 (s)。

影响焊芯或焊丝的熔化系数主要与电弧电压, 直流焊接中的极性和焊条药皮成分有关。

## 2. 熔敷系数

焊芯或焊丝熔化的金属并非全部进入熔池, 其中一部分飞溅损失了。实际熔入熔池中的焊芯或焊丝金属量用熔敷系数  $\alpha_H$  表示。

$$\alpha_H = \frac{G_H}{I_h t} \times 3600 \quad (\text{g/A} \cdot \text{h})$$

其中,  $G_H$ ——在  $t$  时间内实际过渡到焊缝的焊芯或焊丝金属量 (g);

$I_h$  ——焊接电流 (A);

$t$  ——焊芯或焊丝熔化时间 (s)。

## 3. 损失系数

损失系数表示焊芯或焊丝飞溅损失程度, 以下式表示。

$$\psi = \frac{G_P - G_H}{G_P} \times 100\%$$

三者之间的关系为

$$\alpha_H = \alpha_P (1 - \psi)$$

表 1-4 几种焊条熔化、熔敷、损失系数

| 焊条牌号  | 熔化系数 $\alpha_P$<br>g/A·h | 熔敷系数 $\alpha_H$<br>g/A·h | 损失系数<br>% |
|-------|--------------------------|--------------------------|-----------|
| E4303 | 9.16                     | 8.25                     | 3.91      |
| E4301 | 10.1                     | 9.7                      | 4.0       |
| E4322 | 9.1                      | 8.2                      | 9.9       |
| E5015 | 9.06                     | 8.49                     | 2.6       |

## 四、焊缝形成

焊接熔池是由焊芯或焊丝熔滴金属和部分熔化了母材金属组成。随着焊接电弧的移动, 焊接熔池不断形成、结晶, 从而形成了焊缝。

### 1. 熔池尺寸

焊接开始经过一段过渡时间后, 就进入了准稳定时期。这时熔池的形状、尺寸和质量不再变化, 只取决于被焊材质与焊接规范, 并随热源作同步运动。电弧焊时熔池形状如图 1-7, 其轮廓为金属熔点的等温面。目前描述熔池的数

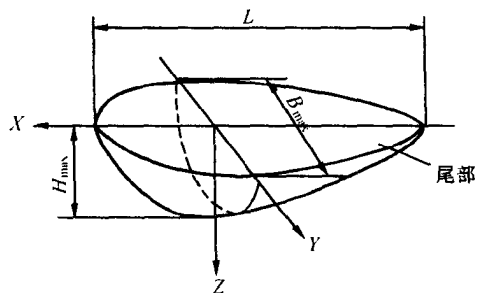


图 1-7 焊接熔池形状

学模型尚不完善 仍用经验公式或实测。一般情况下 随焊接电流增加 熔池最大深度增加, 熔池的最大宽度相对减小; 而随焊接电压升高, 最大熔深减小, 最大熔宽增加。

## 2. 熔池的质量与存在时间

实验证明熔池质量与  $q^2/v$  成正比, 手工电弧焊时熔池的质量一般为  $0.6\text{g} \sim 16\text{g}$  多数情况为  $5\text{g}$  以下 埋弧自动焊焊接低碳钢时 即使电流很大熔池的质量也不超过  $100\text{g}$ 。

由于熔池的体积和质量很小, 所以熔池存在时间很短, 一般为几秒至几十秒。熔池存在的最大时间  $t_{\max}$  与熔池的长度  $L$  和焊接速度  $v$  的关系如下。

$$t_{\max} = \frac{L}{v}$$

## 3. 熔池的温度

影响熔池的温度因素很多, 准确计算熔池温度是很困难的。实验得出熔池的平均温度主要取决于焊接材料及其周围的散热情况, 对于低碳钢而言, 熔池平均温度为  $(1770 \pm 100)$  熔滴平均温度为  $(2300 \pm 200)^\circ\text{C}$  熔渣平均温度为  $(1550 \pm 100)^\circ\text{C}$ 。

## 4. 焊缝的形成

焊接熔池是由焊条或焊丝熔滴金属与部分融化了的母材金属组成。随着电弧的移动, 焊接熔池不断形成, 结晶, 以致形成焊缝。

熔池中的液态金属以熔池边缘上处于半熔化状态的母材晶粒为核心, 成长为束状晶体, 这种结晶称作胞状结晶。从横剖面看焊缝金属的结晶垂直于熔合线, 最后以树枝状结晶汇集于焊缝中心, 这是由于焊接熔池液态金属冷却散热的方向与熔合线垂直的缘故。

金属熔点较高 冷却时较早结晶 杂质熔点较低 结晶较晚, 一般分布在金属枝晶间或焊缝金属最后结晶处。

## 5. 焊缝的几何参数

焊缝的横剖面如图 1-8 所示。熔深  $H$  熔宽  $B$  和余高  $e$  这些尺寸与焊接规范、焊接质量有密切关系。熔宽与熔深之比称作焊缝的成形系数  $\varphi$  关系式如下。

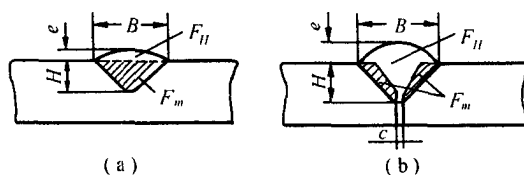


图 1-8 焊缝的横截面

$$\varphi = \frac{B}{H}$$

$\varphi$  较大时说明焊缝熔宽大而熔深浅, 低熔点杂质易浮到焊缝上面。 $\varphi$  较小时说明焊缝窄而深, 低熔点杂质不易浮到焊缝表面, 易集中到焊缝中心, 这时焊缝往往易出现夹渣、裂纹等缺陷。手工电弧焊、埋弧自动焊较适宜的成形系数为  $1.3 \sim 2$ 。

熔宽与余高之比称作焊缝的增高数  $\psi$  关系式如下。

$$\psi = \frac{B}{e}$$

$\psi$  较大时说明焊缝增高小 焊缝外形尺寸过渡较平缓 焊趾处应力集中较小。反之 则应力集中较大。手工电弧焊、埋弧自动焊较适宜的增高数为  $4 \sim 8$ 。

## 1.3 焊接冶金反应

与普通冶金过程不同，焊接冶金分区域或阶段连续进行，各区域的反应条件有很大差异，这些差异直接影响反应进行的可能性、反应方向、速度和限度。

### 1.3.1 冶金反应区

不同的焊接方法有不同的反应区。手工电弧焊有三个反应区：药皮反应区、熔滴反应区和熔池反应区；熔化极气体保护焊有二个反应区：熔滴反应区和熔池反应区；无填充金属气焊、钨极氩弧焊和电子束焊只有熔池反应区。以下介绍手工电弧焊冶金反应区。

#### 一、药皮反应区

药皮反应区温度从 100 至药皮熔点（对于钢材使用的焊条大约 1 200℃）。

##### 1. 脱水

药皮加热时其吸附的水分开始蒸发，加热温度超过 100℃ 吸附的水分全部蒸发，加热温度超过 200℃ ~ 400℃ 药皮中某些组成物如白泥、云母中的结晶水被排除。

##### 2. 有机物和碳酸盐分解

药皮加热到一定温度，其中有机物（如木粉、纤维素和淀粉等）开始分解和燃烧，形成  $H_2$ 、 $CO_2$ 、 $CO$  等气体。某些药皮中菱苦土（ $MgCO_3$ ）、大理石及白垩（ $CaCO_3$ ）、白云石（ $CaCO_3 + MgCO_3$ ）和高价氧化物的赤铁矿（ $Fe_2O_3$ ）等会发生分解，形成  $CO_2$ 、 $O_2$  等。

#### 二、熔滴反应区

从熔滴形成、长大到过渡到熔池中都属于熔滴反应区，该区有以下特点。

##### 1. 反应温度高

熔滴的活性斑点处的温度接近材料的沸点，对电弧焊焊接钢材而言约 2 800℃。根据不同的焊接规范熔滴的温度在 1 800℃ ~ 2 400 范围内变化，这样熔滴金属的过热度达 300℃ ~ 900℃。

##### 2. 熔滴金属与气体或熔渣的接触面积大

正常情况下，熔滴的比表面积可达  $1\,000\text{cm}^2/\text{kg}$  ~  $10\,000\text{cm}^2/\text{kg}$ ，是炼钢比表面积的 1 000 倍。

##### 3. 各相之间反应时间短

熔滴的焊条末端停留时间仅 0.01s ~ 0.1s，熔滴向熔池过渡的速度可达 2.5m/s ~ 10m/s，其经过弧柱区的时间只有  $10^{-4}\text{s}$  ~  $10^{-3}\text{s}$ 。

#### 三、熔池反应区

熔滴和熔渣落入熔池后，同熔化的母材相混合，同时各相间进一步发生化学反应，直至金属凝固形成焊缝。

熔化反应区的条件与熔滴反应区的条件不同，其平均温度约为 1 600℃ ~ 1 900℃，比表面积约为  $3\text{cm}^2/\text{kg}$  ~  $130\text{cm}^2/\text{kg}$ ，反应时间较长但不超过几十秒，如手工电弧焊通常 3s ~ 8s，埋弧自动焊 6s ~ 25s。

### 1.3.2 焊接冶金

焊接冶金既有符合普通冶金反应的一方面，又有其特殊的一方面（反应温度高、熔滴金

属与气体和熔渣接触面积大、各相反应时间短 筹。

### 一、熔渣

焊接时熔化了焊条药皮或焊剂形成一种浮在液体金属面上的金属和非金属氧化物称作熔渣。

#### 1. 熔渣的作用

##### (1)机械保护

保护焊接熔池金属在熔化、凝固时不受空气影响，使熔池金属冷却缓慢以利于焊缝中气体排除。

##### (2)稳定电弧

在焊条药皮或焊剂中加入一些电离功小的元素，有利于电弧的稳定燃烧。

##### (3)改变焊缝成分

熔渣中的  $\text{SiO}_2$  可与液态金属中的  $\text{FeO}$  形成不溶于液态金属的复合物  $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$  可通过冶金反应去掉或减少焊缝金属中的有害杂质 如硫、磷等 )

#### 2. 对熔渣的要求

##### (1)熔渣不溶于金属。

(2)液态熔渣的比重小于液态金属的比重。熔渣中含  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$  较多时 熔渣比重较小称作轻渣，焊接时熔渣易浮到液态金属上面不易形成夹渣；熔渣中  $\text{MnO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}$  较多时 熔渣比重大称作重渣 焊接时易形成夹渣。

##### (3)合适的流动性和透气性

熔渣的粘性越小流动性越大，冶金反应加快，但对金属的覆盖不好失去保护作用 熔渣粘度太大冶金反应不好 熔渣集中于焊缝上面中央对焊缝保护也不好。焊接时要获得良好的保护和冶金反应 熔渣的粘度要合适 见图 1-8。

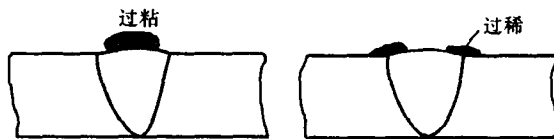


图 1-8 不同粘度的熔渣对焊缝的保护情况

##### (4) 固态熔渣应具有良好的脱渣性

脱渣不好的焊条药皮或焊剂会影响生产效率和焊接质量。

##### (5)合适的熔点

熔渣的熔点过低会失去保护作用，熔点过高焊条药皮会成块脱落影响焊缝成形。熔渣的熔点要与焊芯或焊丝相配合，一般药皮或焊剂的熔点应低于焊芯或焊丝的熔点  $100^\circ\text{C} \sim 250^\circ\text{C}$ 。

多数氧化物熔点较高 但以一定比例配合就可达到要求 如  $\text{CaO}$  熔点  $2480^\circ\text{C}$ 、 $\text{SiO}_2$  熔点  $1770^\circ\text{C}$ 、 $\text{TiO}_2$  熔点  $1830^\circ\text{C}$  但 20%~30% 的  $\text{CaO}$ 、18%~60% 的  $\text{TiO}_2$ 、18%~46% 的  $\text{SiO}_2$  相配合熔渣的熔点约为  $1318^\circ\text{C} \sim 1382^\circ\text{C}$ 。

#### 3. 熔渣的成分和分类

根据所含成分的性质熔渣可分为三类。

##### (1)盐型熔渣

这类熔渣主要由金属的氟酸盐、氯酸盐和不含氧的化合物组成，属于这种渣系的有： $\text{CaF}_2 - \text{NaF}$ 、 $\text{CaF}_2 - \text{BaCl}_2 - \text{NaF}$ 、 $\text{KCl} - \text{NaCl} - \text{Na}_3\text{AlF}_6$  等。盐型熔渣氧化性小 主要用于焊

接铝、钛和其它化学活性金属及其合金。

### (2) 盐-氧化物型熔渣

这类熔渣主要由氟化物和强金属氧化物组成，常用的有： $\text{CaF}_2 - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaF}_2 - \text{CaO} - \text{SiO}_2$ 、 $\text{CaF}_2 - \text{CaO} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  等。盐-氧化物熔渣氧化性小，主要用于焊接高合金钢及合金。

### (3) 氧化物型熔渣

它主要由各种金属氧化物组成，如  $\text{MnO} - \text{SiO}_2$ 、 $\text{FeO} - \text{MnO} - \text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO} - \text{TiO}_2 - \text{SiO}_2$  等。根据熔渣中氧化物性质可分：酸性氧化物（ $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{V}_2\text{O}_5$  等）、碱性氧化物（ $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{MnO}$  等）和中性氧化物（ $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$  等）。

氧化物型熔渣主要用于焊接低碳钢或低合金钢。酸性氧化物熔渣焊条通常可交直流两用，成本低廉，对杂质油、水、锈不敏感；碱性熔渣的焊条通常限直流焊，对杂质敏感，但其渗合金可靠，焊缝机械性能好。

## 二、氧对金属的作用与控制措施

氧在焊缝金属中以溶解状态和氧化物夹杂两种形式存在。一般溶解在钢中的氧很少，在室温下  $\alpha - \text{Fe}$  中氧的溶解量小于 0.00016%，绝大部分氧是以夹杂物的形式存在，夹杂物在焊缝中呈不规则的点状分布或沿晶界呈网状分布。

氧在焊缝中不论以何种形式存在对材料的性能都有很大影响，随着含氧量的增加，其硬度、强度、塑性明显下降，尤其是低温冲击韧性急剧下降，见图 1-9。此外，由于氧的存在还会引起红脆、冷脆和时效硬化。氧存在于焊缝金属中是一种有害元素，焊接时应消除或减少其含量。

### 1. 纯化焊接材料和控制焊接规范

在焊接某些要求较高的合金钢、合金、活性金属时，应尽量选用不含氧或含氧少的焊接材料。

焊接规范对焊缝金属中的含氧量有密切关系，采用短弧焊可增加对焊接熔池的保护，因而减少了焊缝金属中氧的含量。

### 2. 减少氧的含量

无论怎样控制焊接规范和纯化焊接材料，焊缝金属中仍不可避免存在一定数量的氧，对存在的氧可采用化学反应方法减少其含量。

#### (1) 先期脱氧

在焊条药皮加热阶段，固态药皮中进行脱氧反应称作先期脱氧，先期脱氧阶段脱氧产物与熔滴不发生关系。含有脱氧剂的药皮被加热时，高价氧化物或碳酸盐分解出氧和二氧化碳与脱氧剂发生反应：

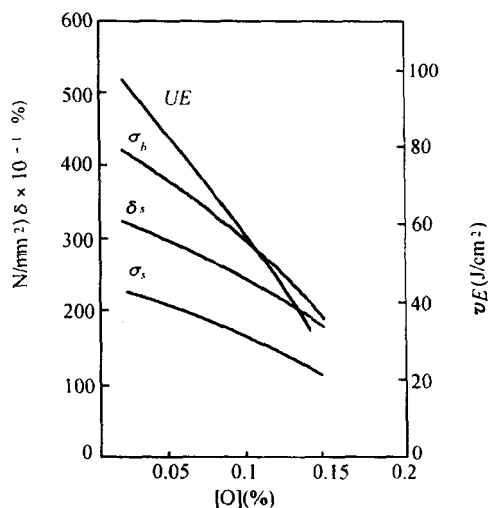
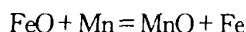
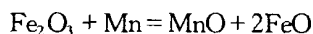


图 1-9 氧以  $\text{FeO}$  形式存在对低碳钢常温机械性能的影响