



北京科技大学

University of Science and Technology Beijing

---

# 焊接原理与工艺

张 华

Email: [zhwhq@163.com](mailto:zhwhq@163.com)

Tel: 6233 4859

材料先进连接技术研究室

Lab. of Advanced Joining Technology for Materials

# 上堂课程回顾

1. 焊接的概念及四种连接机理
2. 焊接应用
3. 焊接的发展新方向
4. 我国焊接技术发展状况、存在问题

# 电弧焊技术的发展历程

- 1801年，迪威发现了电弧放电现象
- 19世纪中叶，提出利用电弧熔化金属进行材料连接的思想
- 1885年俄国人发明了碳弧焊
- 1891年俄国人提出金属电极代替碳电极
- 1907年瑞典人发明了焊条
- 1912年瑞典人开发出保护性能良好的厚涂层焊条
- 1920年，英国的全焊接船下水
- 1930年，开发了埋弧焊
- 1930年以后，气体保护钨电极电弧
- 1945年前后，电弧放电的阴极点具有去除氧化膜的作用  
出现了GMA (Gas Metal Arc )

## 介绍几种常用的电弧焊方法

电弧焊是目前应用最广的焊接技术。

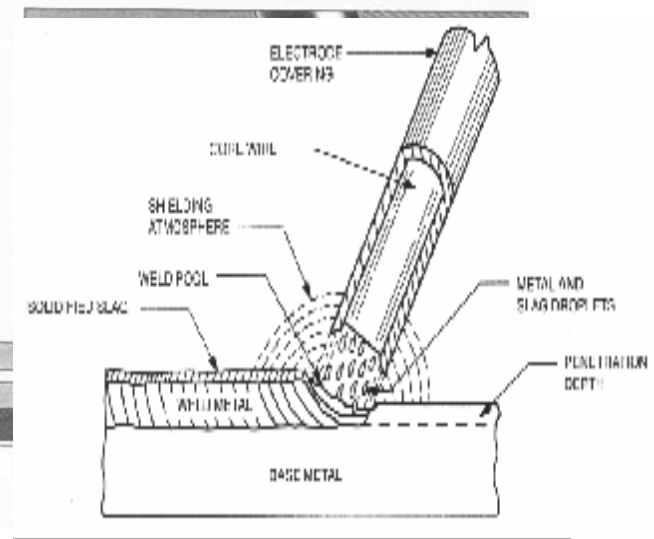
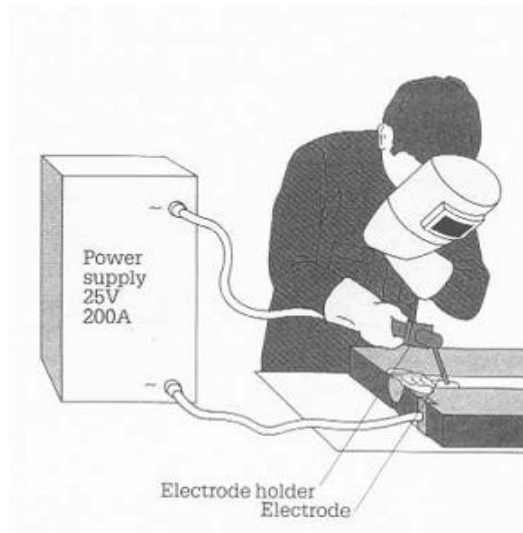
它分渣保护电弧焊和气体保护电弧焊两类。它包括焊条电弧焊、埋弧自动焊、钨极气体保护焊、熔化极气体保护焊和等离子弧焊等。

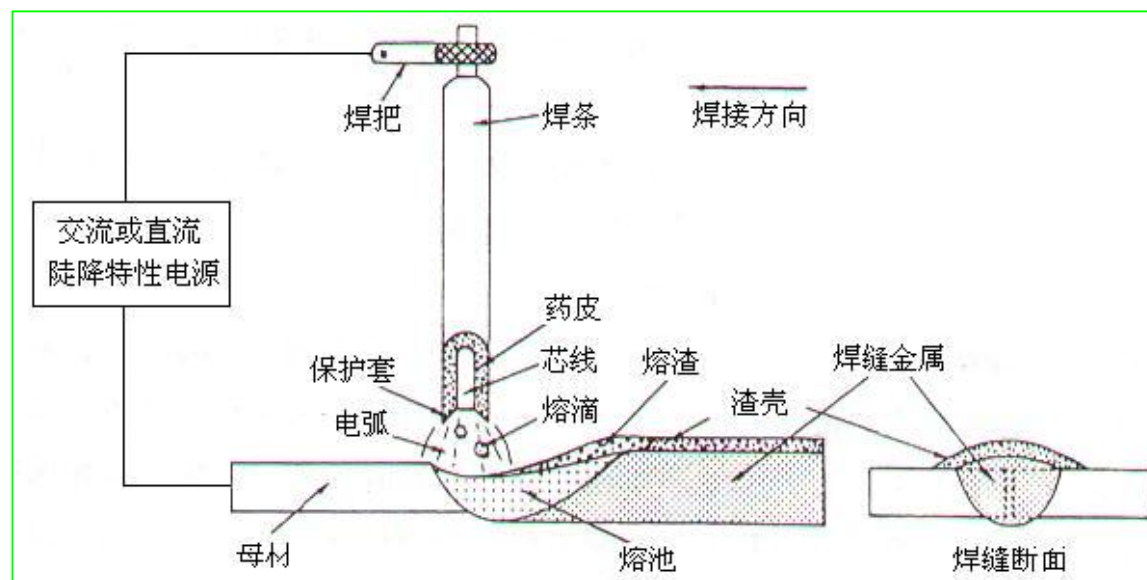
焊接电弧是一种人工制造下的小能量放电现象，它是在焊接电源支持下，在两个电极之间产生电弧放电。为了满足弧焊工艺的要求，它必须保证：一、引弧容易；二、电弧稳定；三、具有足够宽的焊接规范调节范围。

# 1) 焊条电弧焊是一种最常见的渣保护电弧焊 (Shielded Metal Arc Welding — SMAW)

焊条电弧焊是用手工操纵焊条进行焊接的电弧焊方法。焊接时，焊条末端和工件之间燃烧电弧使焊条药皮、焊芯和工件熔化，焊芯形成细小金属颗粒过渡和工件表面熔化金属熔合形成熔池。药皮熔化产生气体和熔渣使熔池和空气隔绝并发生一系列冶金反应，保证焊缝的性能。熔池液态金属冷却结晶生成焊缝。

按照国家标准，焊条分成许多种类。焊接不同材料有不同的焊条，焊接不同的位置也有不同的焊条。现在仅国产焊条就有300多种。





药皮是由石灰石、萤石、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{SiO}_2$ 、Mn、Fe粉



电弧稳定性、焊接操作性、  
焊缝裂纹倾向性

焊条电弧焊原理

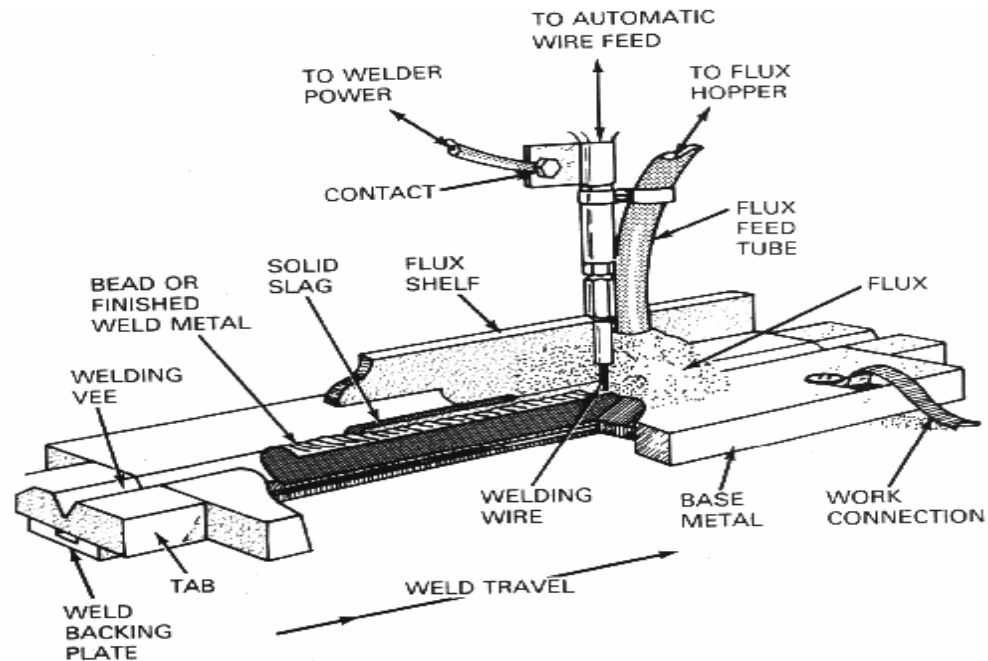
焊条药皮的作用主要有以下几项：

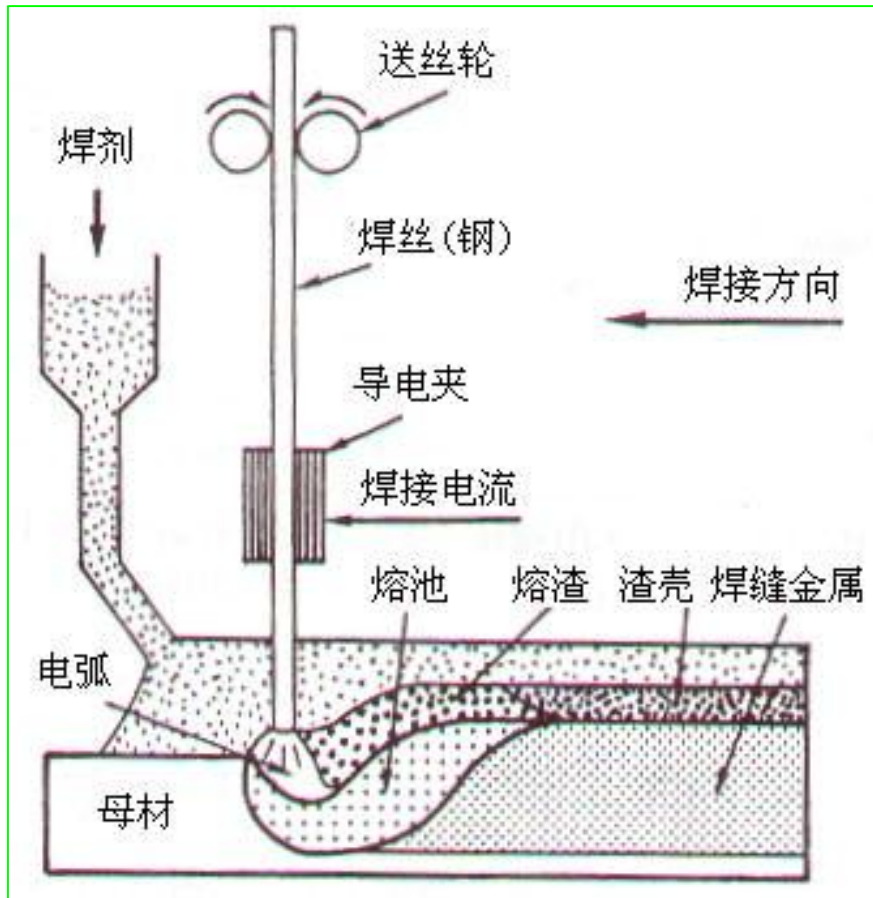
- ① 有利于电弧放电的产生，并且能提高电弧的稳定性；
- ② 产生气体和形成熔渣，隔离空气，保护电弧、熔滴及焊缝金属；
- ③ 提高熔渣—金属反应使金属还原（脱氧），精炼焊缝金属
- ④ 根据需要对焊缝金属添加合金元素；
- ⑤ 熔渣覆在焊缝金属表面，焊缝表面形状规整。

2) 埋弧焊是(Submerged Arc Welding)一种能实现机械化焊接的渣保护电弧焊，连续送进的焊丝在可溶化的颗粒状焊剂覆盖下引燃电弧，使焊丝、母材和溶剂部分熔化和蒸发构成一个空腔，电弧在空腔内稳定燃烧。

■1940年，乌克兰巴顿焊接研究所发明埋弧自动焊。它具有生产效率高；焊接质量好；改善劳动条件等优点。

■现在发展有双丝、多丝埋弧焊





埋弧焊原理

焊接电流可使用到**2000A**

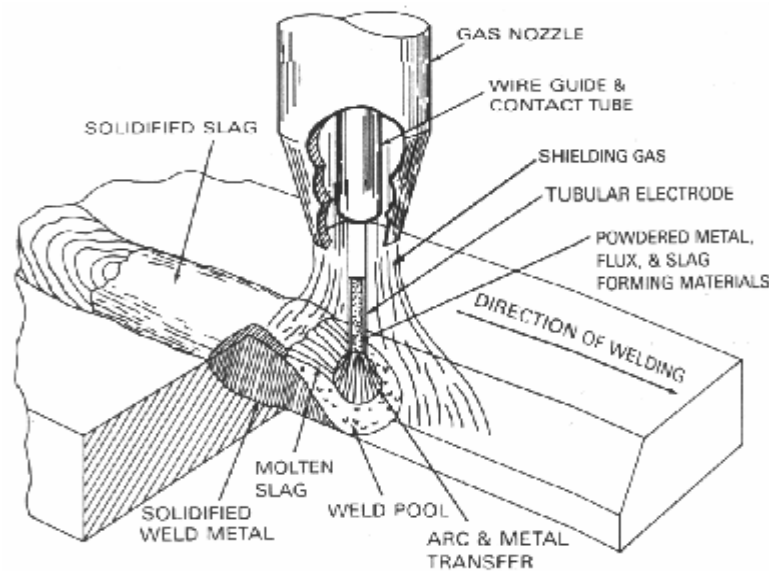
广泛应用于造船、桥梁、大型建筑、压力容器等的焊接。

不足：只适用于平焊和横焊

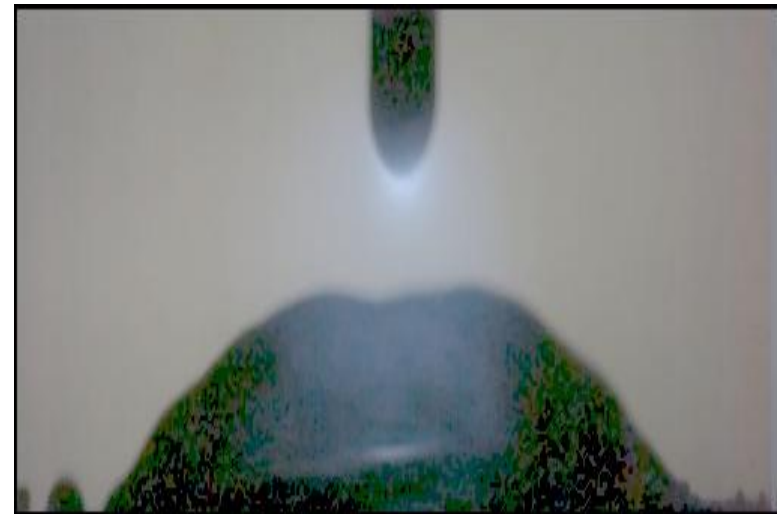


### 3) 气体保护焊是利用外加气体作为保护介质的一种电弧焊方法。

气体保护焊的优点是电弧和熔池可见性好、没有熔渣、适用于各种位置的焊接。保护气体可分为：惰性气体（氩）和活性气体（氩+CO<sub>2</sub>）气体保护焊又分为钨极氩弧焊和熔化极氩弧焊。

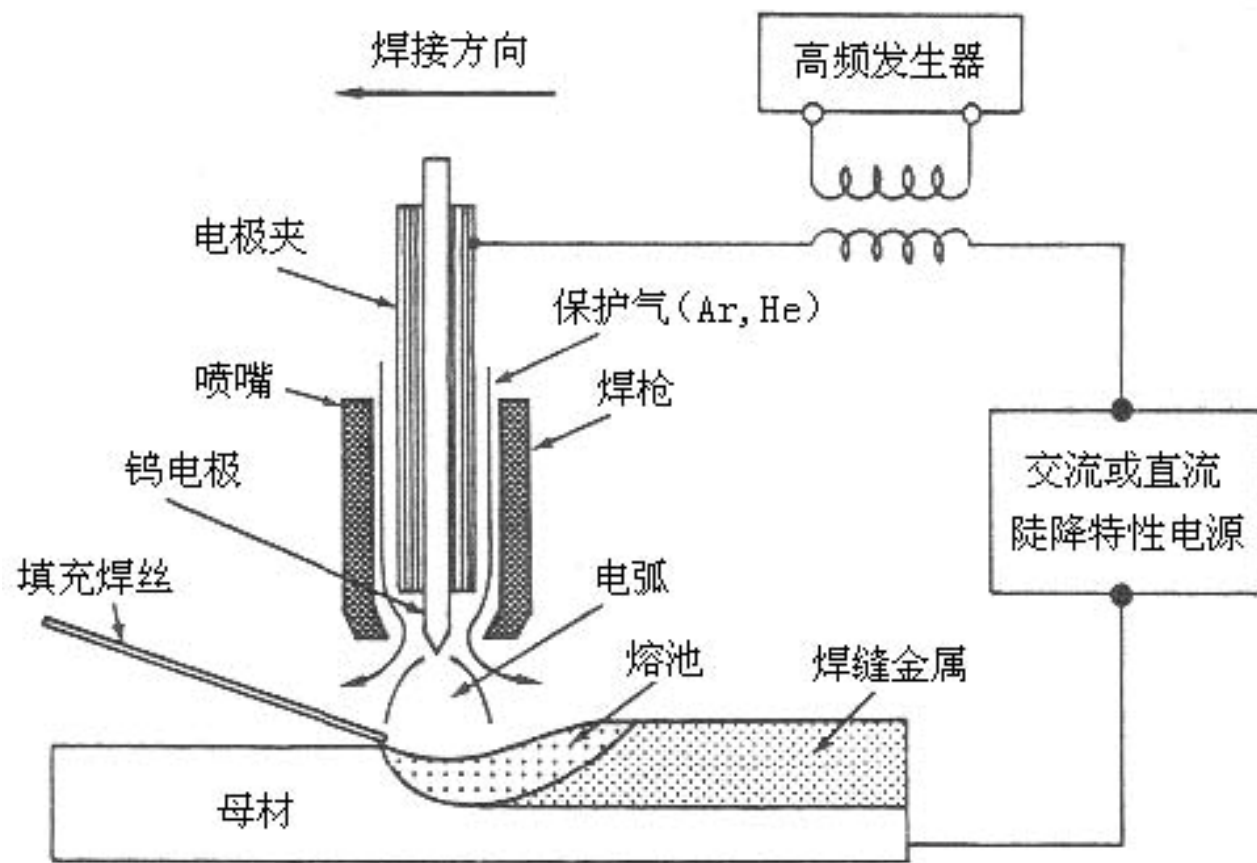


熔化极气体保护焊工作原理

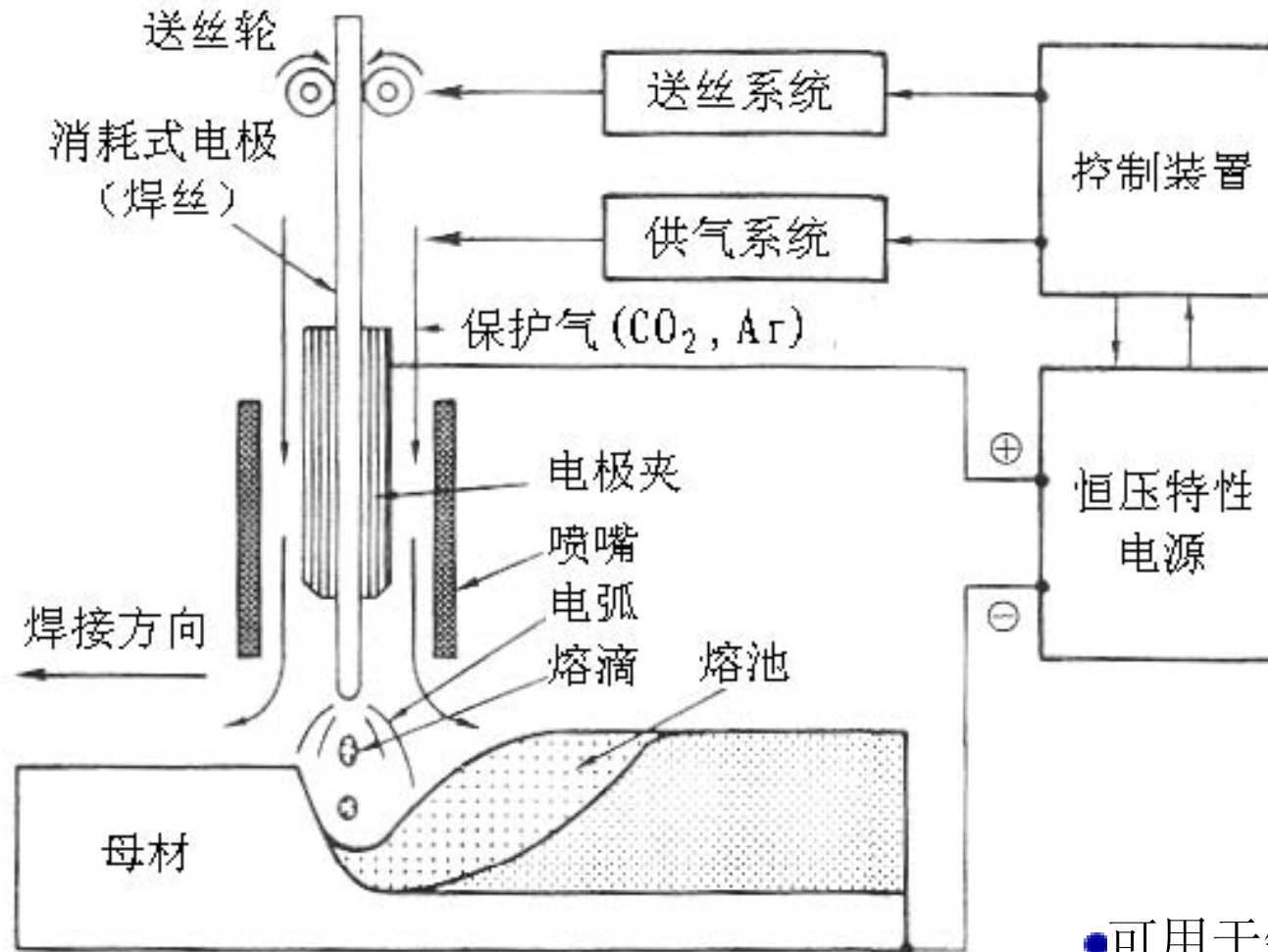


熔滴过渡动态过程





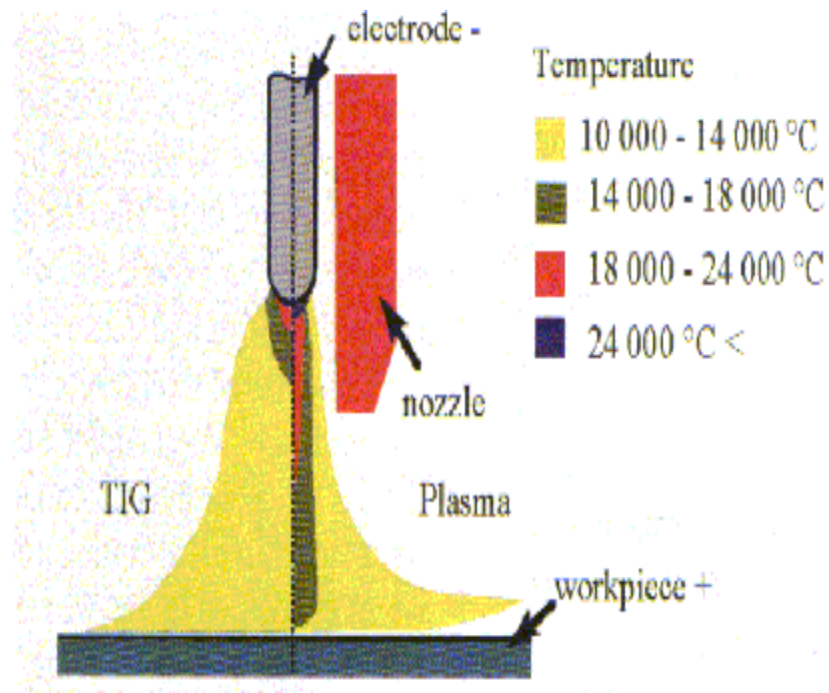
钨极氩弧焊原理



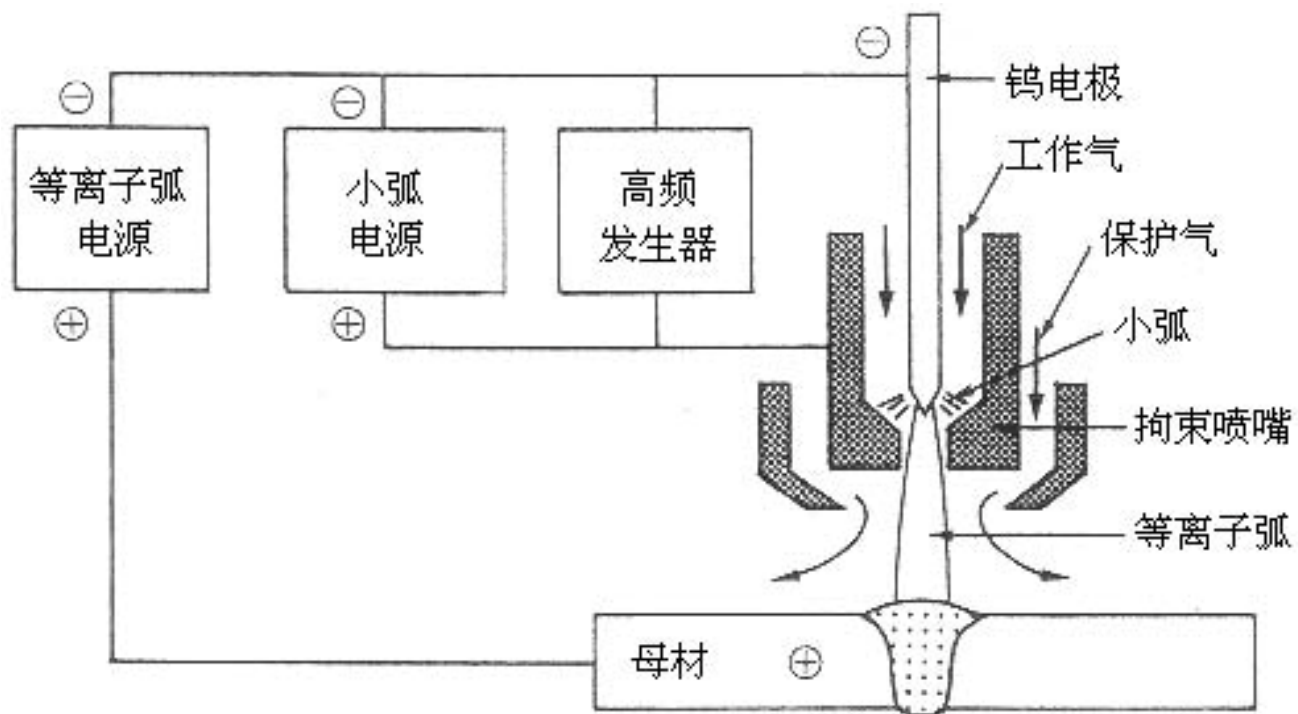
气体保护熔化极电弧焊原理

- 可用于铝、镁等非铁合金及各种金属
- 焊接质量高
- 生产效率高

4) 等离子弧(Plasma Arc Welding—PAW)是利用等离子枪将阴极与阳极之间的自由电弧压缩成高温、高电离度、高能量密度及高焰流速度的等离子弧。它可以用于焊接、喷涂、堆焊及切割。



等离子弧 温度分布图



等离子弧焊原理

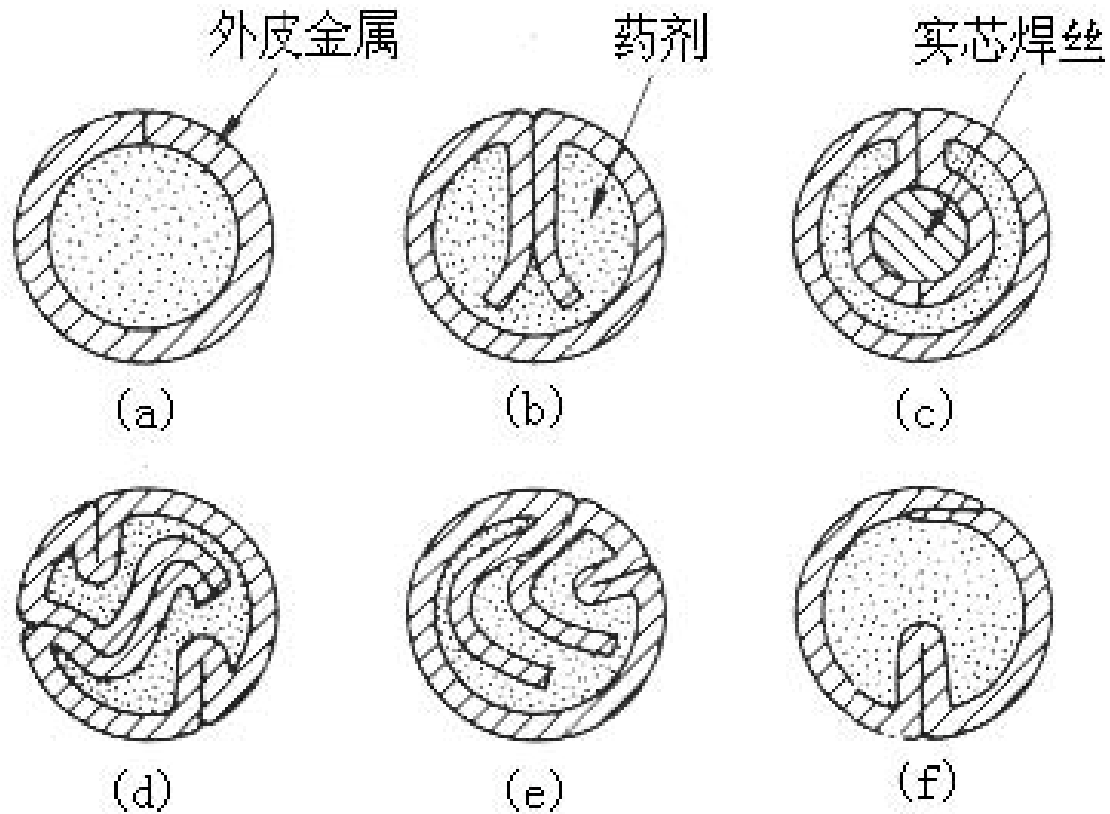
等离子弧焊通常采用下面两种方法进行焊接：

- ① 小电流等离子弧焊接法：能够实现电流1A以下
- ② 小孔焊接法：能量密度高，离子流集中

## 5) 自保护电弧焊方法

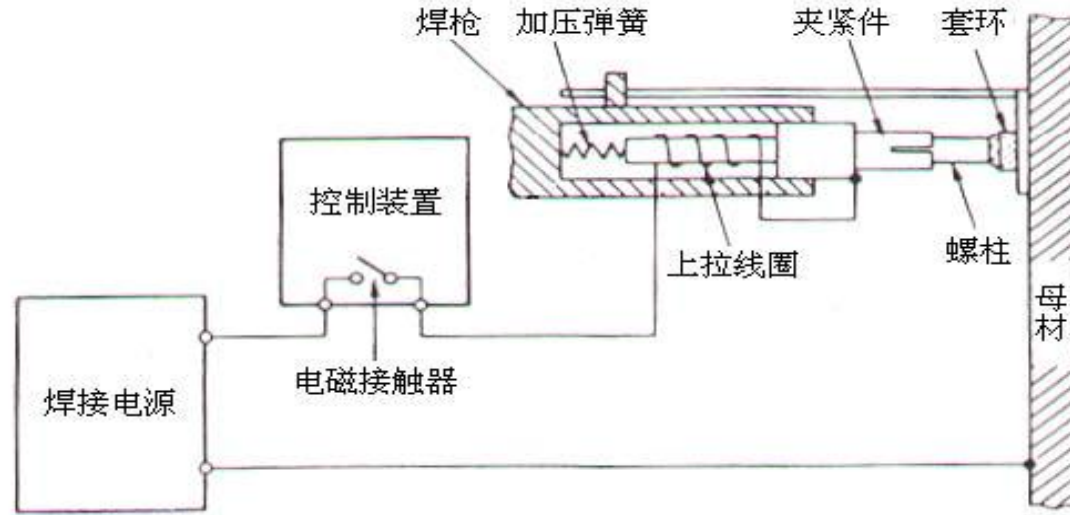
采用焊剂—焊丝一体的药芯焊丝 (flux-cored wire)

熔覆速度快，熔深浅，多用于角焊缝焊接



自保护电弧使用的药芯焊丝

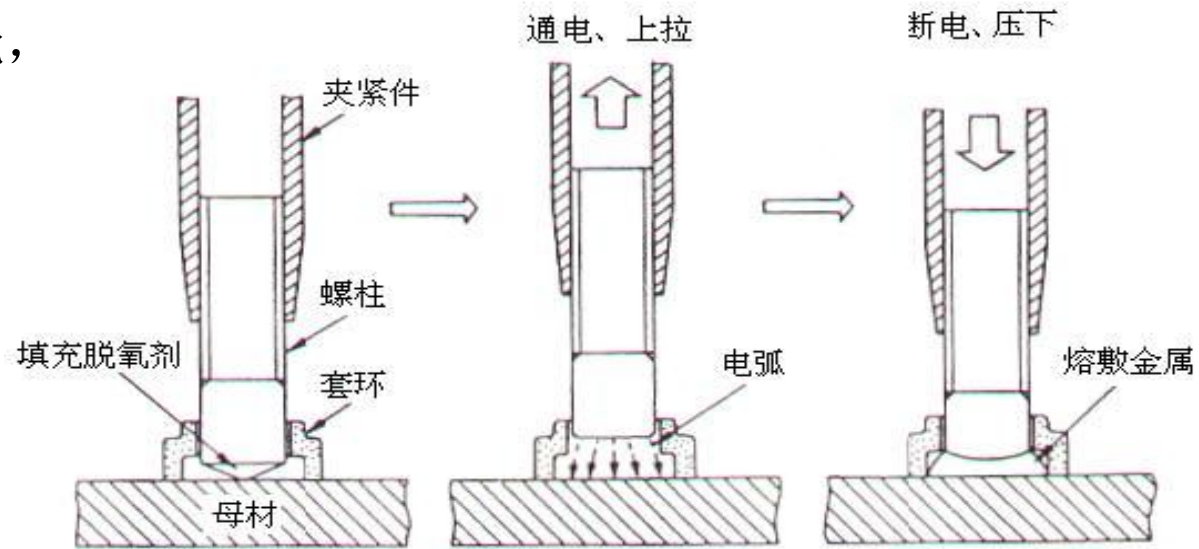
## 6) 螺柱焊方法



(a) 焊接装置

焊接装置设置了螺柱  
动作、电弧定时功能，  
实现自动化焊接

需几秒钟



(b) 焊接过程

螺柱焊原理



# 研究焊接电弧的意义

- 埋弧焊的机理的误解：认为不是电弧是电阻热
- 巴顿研究所受启发：发明电渣焊
- 对电弧机理的研究，改进钨极材料
- 活化性TIG焊
- 阴极斑点自动破碎氧化膜的作用
- 电弧静特性的研究
- CO<sub>2</sub>电弧焊的应用
- 焊接自动化、焊接质量的要求

# 第一章 焊接电弧

## 1.1 电弧的物理基础

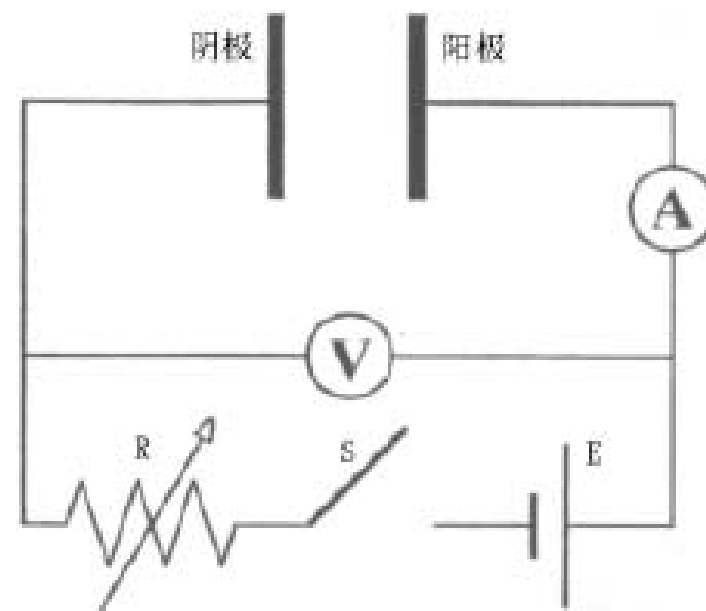
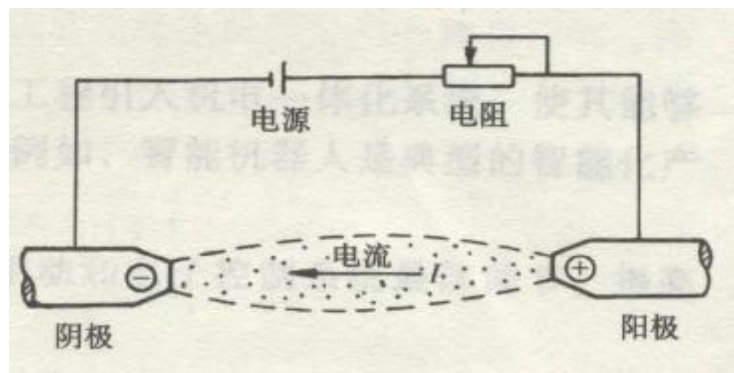
- 气体放电与焊接电弧
- 电弧中带电粒子的产生
- 电弧各区域的导电特点
- 电弧产热及温度分布
- 电弧压力与等离子气流
- 直流电弧与交流电弧

# 1. 气体放电与焊接电弧

电弧是在一定条件下电荷通过两电极间气体空间的一种导电过程，即是一种气体放电现象。

电能  $\longrightarrow$  热能、机械能、光能

焊接即是利用该过程的热能和机械能来完成连接金属的目的。

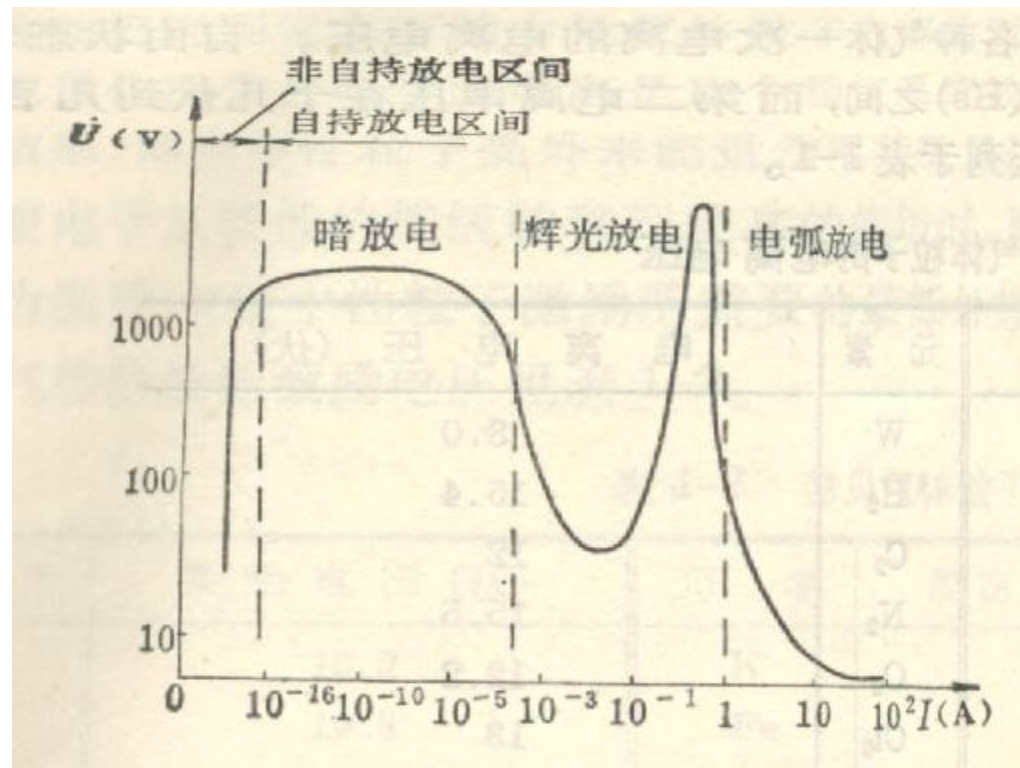


电弧导电原理图

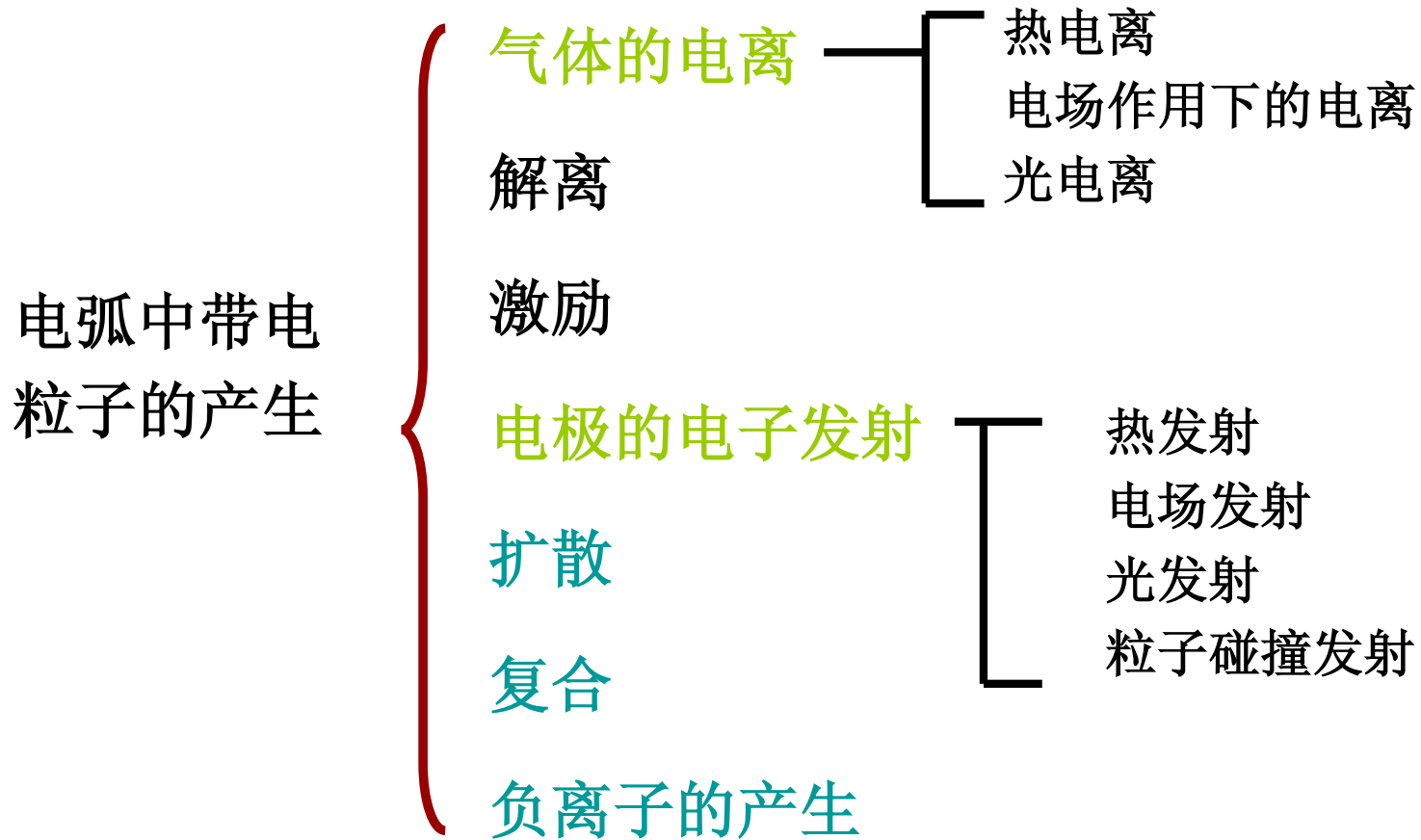
气体放电 { 非自持放电  
 { 自持放电 { 暗放电  
 { 辉光放电  
 { 电弧放电

电弧放电：

电压最低、电流最大、 温度最高、 发光最强



## 2. 电弧中带电离子的产生



## 1) 电离与激励

**电离** 在一定条件下中性气体分子或原子分离为正离子和电子的现象。

**激励** 当中性粒子受外来能量作用其能量还不足以使电子完全脱离气体分子或者原子，但可能使电子从较低的能级转移到较高的能级时，中性粒子内部的稳定状态也被破坏，这种状态称为激励。

**解离** 电弧中的多原子气体由于热的作用分解为原子，称为解离。

### 外界能量传递方式

**碰撞**（非弹性碰撞改变气体粒子内部结构产生电离）

电弧中的高温、电场提高粒子动能；实际电弧过程中，通过粒子间的碰撞将能量传给中性粒子并使之电离，是电弧本身制造带电粒子维持其导电的最主要途径。

**光辐射**： $h\nu \geq W_e = eU_e$

常见气体粒子的电离电压（括号内分别为二次、三次等电离电压）

元素	电离电压 (V)	元素	电离电压 (V)
H	13.5	W	8.0
He	24.5(54.2)	H <sub>2</sub>	15.4
Li	5.4(85.3, 122)	C <sub>2</sub>	12
C	11.3(24.4, 48, 65.4)	N <sub>2</sub>	12.5
N	14.5(19.5, 47, 73, 97)	O <sub>2</sub>	12.2
O	13.5(35, 55, 77)	Cl <sub>2</sub>	13
F	17.4(35, 63, 87, 114)	CO	14.1
Na	5.1(47, 50, 72)	NO	9.5
Cl	13(22.5, 40, 47, 68)	OH	13.8
Ar	15.7(28, 41)	H <sub>2</sub> O	12.6
K	4.3(32, 47)	CO <sub>2</sub>	13.7
Ca	6.1(12, 51, 67)	NO <sub>2</sub>	11
Ni	7.6(18)	Al	5.96
Cr	7.7(20, 30)	Mg	7.61
Mo	7.4	Ti	6.81
Cs	3.9(33, 35, 51, 58)	Cu	7.68
Fe	7.9(16, 30)		

## 常见气体粒子的最低激励电压

元素	电离电压 (V)	元素	电离电压 (V)
<b>H</b>	<b>10.2</b>	<b>K</b>	<b>1.6</b>
<b>He</b>	<b>19.8</b>	<b>Fe</b>	<b>4.43</b>
<b>Ne</b>	<b>16.6</b>	<b>Cu</b>	<b>1.4</b>
<b>Ar</b>	<b>11.6</b>	<b>H<sub>2</sub></b>	<b>7.0 (4.4)</b>
<b>N</b>	<b>2.4</b>	<b>N<sub>2</sub></b>	<b>6.3 (9.1)</b>
<b>O</b>	<b>2.0</b>	<b>O<sub>2</sub></b>	<b>7.9 (5.1)</b>
<b>H<sub>2</sub>O</b>	<b>7.6 (4.7)</b>	<b>CO</b>	<b>6.2 (10.0)</b>
<b>Cs</b>	<b>1.4</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>3.0 (5.5)</b>
<b>Ca</b>	<b>1.9</b>		

注：括号内为解离电压



## 2) 电离的种类

■ **热电离**：气体粒子受热的作用而产生的电离。其实质是粒子之间的碰撞产生的一种电离过程。

弧柱的温度一般在5000~30000K，所以热电离是弧柱部分产生带电粒子的最主要途径

热解离：吸热，CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>，电弧温度高

■ **电场作用下的电离**：在电场的作用下，带电离子的动能增加与中性粒子碰撞，使之电离

弧柱电场弱；阴极压降区和阳极压降区电场作用下的电离作用显著

■ **光电离**：中性离子接受光辐射的作用而产生的电离

### 3) 阴极电子发射

- 电子发射 阳极或阴极表面接受一定外加能量作用时，电极中的电子可能冲破金属电极表面的约束而飞到电弧空间，称为电子发射。但只有阴极发射的电子在电场的作用下参加导电过程。

#### 电子发射根据外加能量形式不同，可分为四种

- 热发射：金属表面承受热作用而产生电子发射现象
- 电场发射：当金属表面空间存在一定强度的正电场时，金属内的电子受此电场静库仑力的作用，此力达到一定程度时，电子可以飞出金属表面
- 光发射：当金属表面接受光辐射时，可使金属表面自由电子能量增加，冲破金属表面的制约飞到金属外面
- 粒子的碰撞发射：高速运动的粒子（电子或离子）碰撞金属表面时，将能量传给金属表面的电子，使其能量增加跑出金属表面

**4) 负离子的产生** 中性原子或分子能吸收一个电子而形成负离子。

电子是电弧中导电的主要因素，因为负离子质量比电子大的多，所以如果电弧中有大量的负离子产生，将引起电弧导电困难，以致电弧稳定性降低。

**5) 带电粒子的扩散和复合**

电弧的导电是靠电弧空间带电粒子的运动来实现，电弧的稳定燃烧是带电粒子产生、运动和消失的动态平衡过程。带电粒子在电弧空间的消失过程主要有扩散与复合两种形式。

带电粒子从弧柱中心扩散到电弧周边，不但使弧柱带电粒子减少，并且带走部分热量。

电弧周边温度较低，动能较小易产生复合；

交流电弧电流过零时瞬时电弧熄灭，电弧空间温度显著降低，将大量产生复合现象。有时电弧再点燃发生困难，即是复合所致。

为提高电子发射能力和改善工艺性能，在钨极中常加入Th、Cs等成分，这可以提高钨极电流容量和改善引弧性能。

表1-5 几种金属及其氧化物的逸出功

金属种类		W	Fe	Al	Cu	K	Ca	Mg
逸出功 (eV)	纯金属	4.54	4.48	4.25	4.36	2.02	2.12	3.78
	金属氧化物		3.92	3.9	3.85	0.46	1.8	3.31

表1-6 钨及其合金钨极的逸出功

钨极成分	W	W-Cs	W-Ba	W-Th	W-Zr
逸出功(eV)	4.54	1.36	1.56	2.63	3.14

热发射时，电子发射从金属表面带走热量而对金属表面有冷却作用。

粒子碰撞发射中，当正离子碰撞阴极时，因为从阴极中发射的电子首先要和正离子中和，所以要使阴极发射一个电子，必须对电极表面施加2倍的逸出功。

### 3. 电弧导电机构

#### 1) 维持电弧放电的条件

- ① 放电气隙内带电粒子的生成;
- ② 保持阴极、阳极与电弧间电的连续性

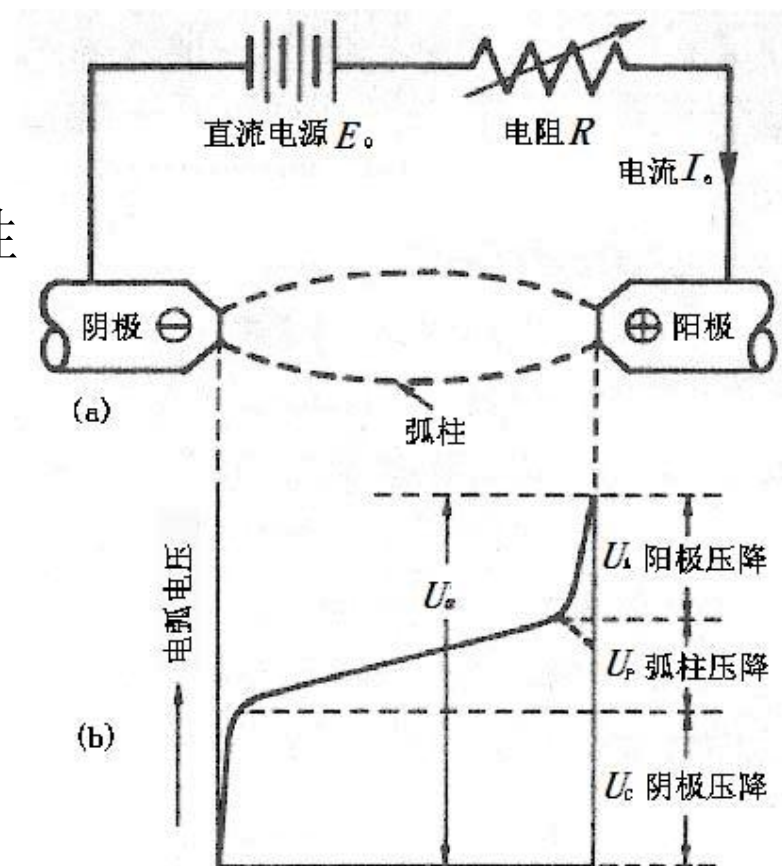
#### 2) 电弧的构造和电弧电压

(a)图为电弧的基本模式

(b)图为电弧放电的电压分布模式

阴极压降:  $U_C$   
阳极压降:  $U_A$   
弧柱压降:  $U_P$   
电弧电压:  $U_a$

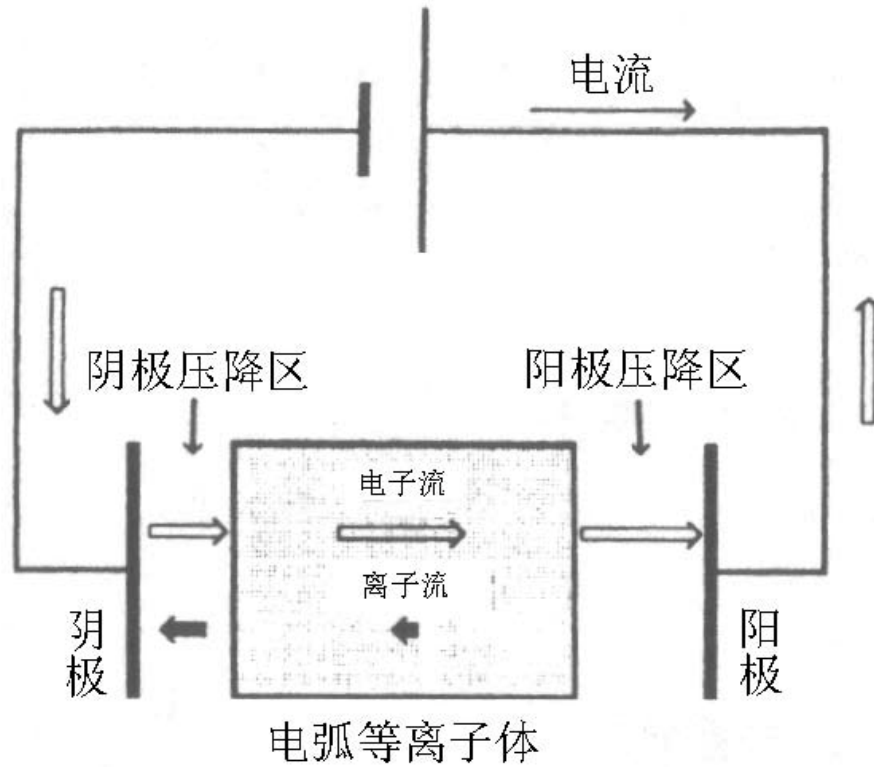
电弧弧柱电压产生维持高温等离子状态所需要的加热能量, 此产热与向周围气氛的热传导及辐射损失三者之间达到能量平衡而确定, 随电弧长度、电流的变化而变化



电弧电压分布

电弧构造与电弧电压分布

### 3) 电弧各区域导电特点



流经电弧的全电流

$$I = I_e + I_i$$

电流成分对电弧各区是不同的

电弧各区域中的带电离子构成

## ① 阴极区的导电机构

阴极斑点：阴极上电流集中，电流密度很高，并发出烁亮的光辉的点。

### 1 热发射型阴极区导电机构

当阴极采用W、C等高熔点材料（热阴极材料），且电流较大时

由于温度很高，阴极通过热发射可提供足够数量的电子，则弧柱区与阴极之间不存在阴极压降区。同时也不存在阴极斑点。

如大电流钨极氩弧焊即主要靠热发射来提供电子，阴极压降区较小。

### 2 电场发射型阴极区导电机构

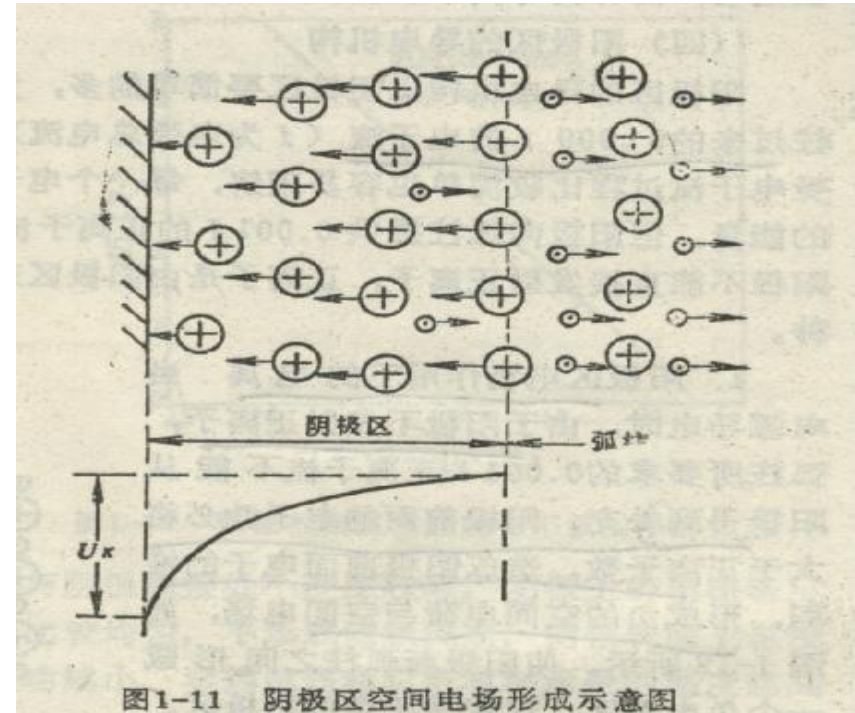
当阴极材料为W、C且电流较小时，或阴极为熔点较低的Al、Cu、Fe（冷阴极材料）时，温度不能升的很高，只是在阴极的局部区域具有导电的有利条件，因此，阴极的导电面积显著减小，形成阴极斑点。



当单靠阴极热发射不能提供足够的电子时，在阴极附近，过剩的正电荷堆积，形成阴极压降区，电场强度越来越大，以致产生电场发射。

### 3 等离子型阴极区导电机构

当为小电流或冷阴极时，在阴极区前面形成高温区，产生热电离。





## ② 弧柱区的导电机构

弧柱的温度较高，约为5000—50000K，以热电离为主。弧柱区的总电流由电子流和正离子流两部分组成，但由于电子质量较小，在带电量相同的情况下，电子流约占99.9%，为主要部分。

由于有正离子流的存在，使整个弧柱区空间保持中性，所以电子流和正离子流通过弧柱时不受周围空间电荷电场的排斥，阻力较小，而使电弧放电具有小电压降，大电流的特点（电压降仅为几伏，电流可达上千安培）。

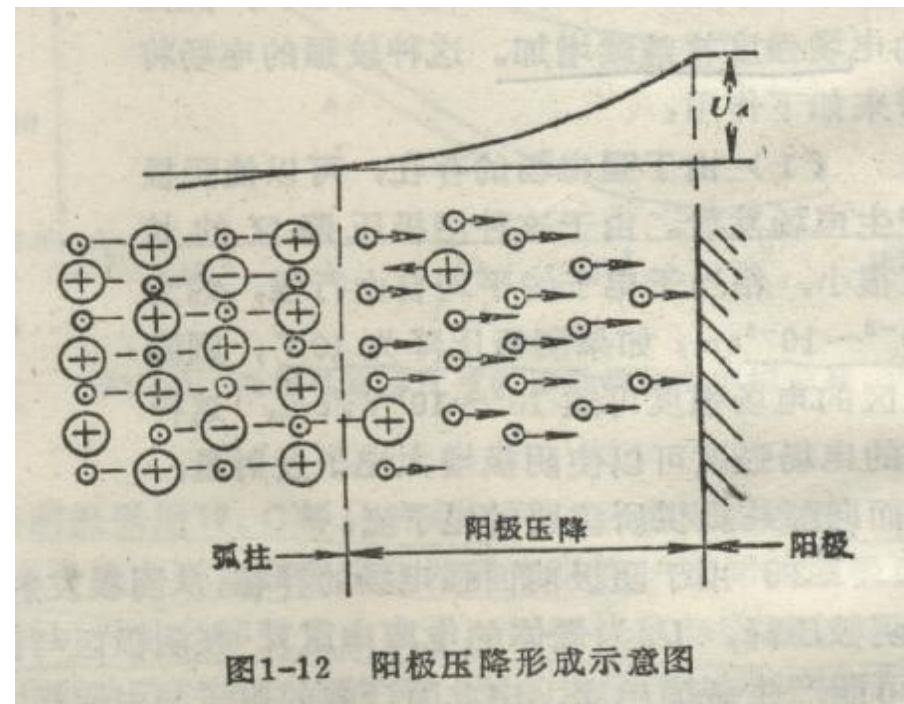
### ③ 阳极区的导电机构

#### 1 阳极区电场作用下的电离

因为阳极不能发射正离子，阳极前面的电子数必大于正离子数，造成负的空间电荷和电场。该电场逐渐增加并加速弧柱来的电子，使其动能增大，在阳极区内与中性粒子碰撞产生电离，直至生成足够满足弧柱要求的正离子。

#### 2 阳极区的热电离

当电流较大时，阳极区温度较高，产生热电离。



# 焊接材料

## 焊接材料生产现状（一）

年份	焊条	MAG 焊丝	药芯 焊丝	埋弧 焊丝	年总 消耗量	自动化率 (%)
1996	55.0 (87%)	5.6	0.06 0.65	2.3	62.96	19.6
1997	72.5 (89%)	5.6	0.13 0.87	3.6	81.83	18.4
1998	87.0 (88%)	7.0	0.20 0.99	5.0	99.20	21.1
1999	90.0 (85%)	10.6	0.36 0.95	5.0	105.96	24.6
2000	90.0 (83%)	11.7	0.70 1.12	6.0	108.40	27.2
2001	100.0 (82%)	14.0	1.20 1.31	7.0	122.20	29.2
2002	110.0 (76%)	25.0	1.90 1.76	8.0	144.90	40.1

表中紫色数据为进口焊材量，红色数据为该焊材所占比例(单位：万吨)

# 焊接材料

## 焊接材料存在的问题（一）

我国焊材生产中手工焊条的比重居高不下，使得我国焊材生产总量与钢材生产总量之比偏高

工业发达国家的比例一般在0.3-0.5%之间，而发展中国家在0.5-0.8%之间

国家或地区	焊条	实心焊丝	药芯焊丝	埋弧焊丝	焊材总量	钢总产量(亿吨)	焊材/钢产量比例 (%)
中国 大陆	90 (85.5%)	10 (9.5%)	0.3 (0.3%)	5 (4.7%)	105.3	1.2	<b>0.88</b>
中国 台湾	2.7 (54)	1.35 (27)	0.45 (9)	0.5 (10)	5	0.14	0.36
日本	5.4 (19.4)	11.3 (38.4)	8.5 (29.3)	3.5 (12.2)	28.7	1.04	0.28
美国	10.8 (26.9)	12.4 (30.8)	12.8 (31.8)	4.2 (10.5)	40.2	0.975	0.41
西欧	16.2 (26.7)	33.6 (55.5)	4.2 (6.9)	6.6 (10.9)	60.6	1.34	0.45



# 哈尔滨工业大学焊接科学与工程系

毕业设计

生产实习

课程设计

试验设计

《单片机原理与应用》

《电阻焊》

《焊接电弧与弧焊方法》

《焊接结构力学》

《连接技术新进展讲座》

《塑料及复合材料连接》

《特种连接技术》

《无损检测》

《新材料连接技术讲座》

《焊接工程缺陷分析》

《材料熔化基础及焊接性》

《表面工程》

《焊接设备机电一体化设计》

《Internet信息获取与发布技术》

《微型计算机原理及工程应用基础》

《微电子封装与组装》

《试验设计与数据处理》

《钎焊》

《焊接自动化基础》

《焊接设备原理及设计》

