



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

# 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

### 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

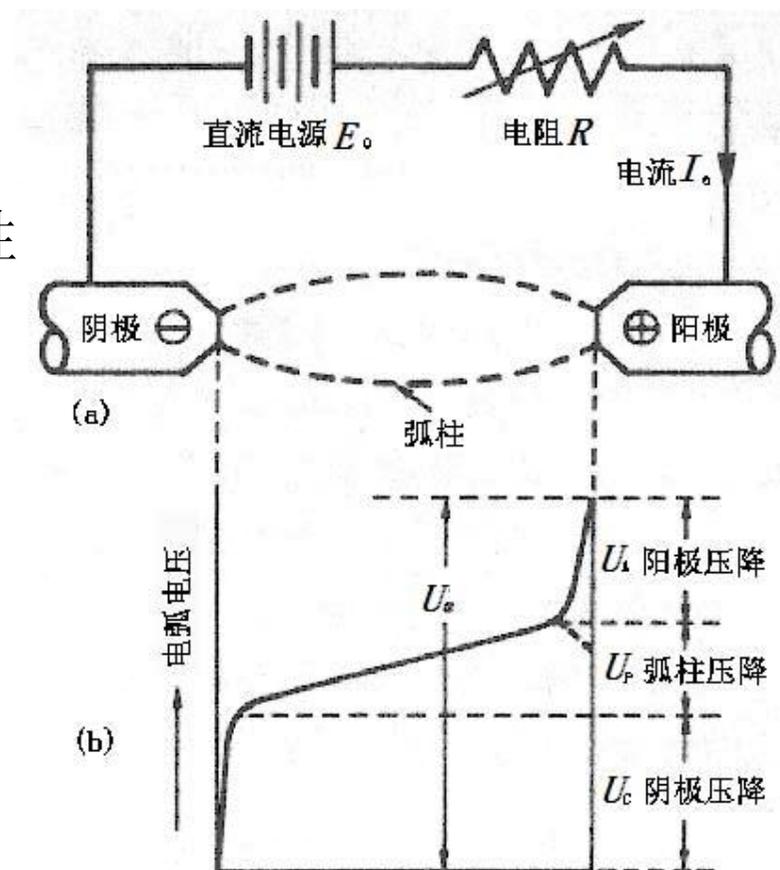
#### 2) 电弧的构造和电弧电压

(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:  $U_a$

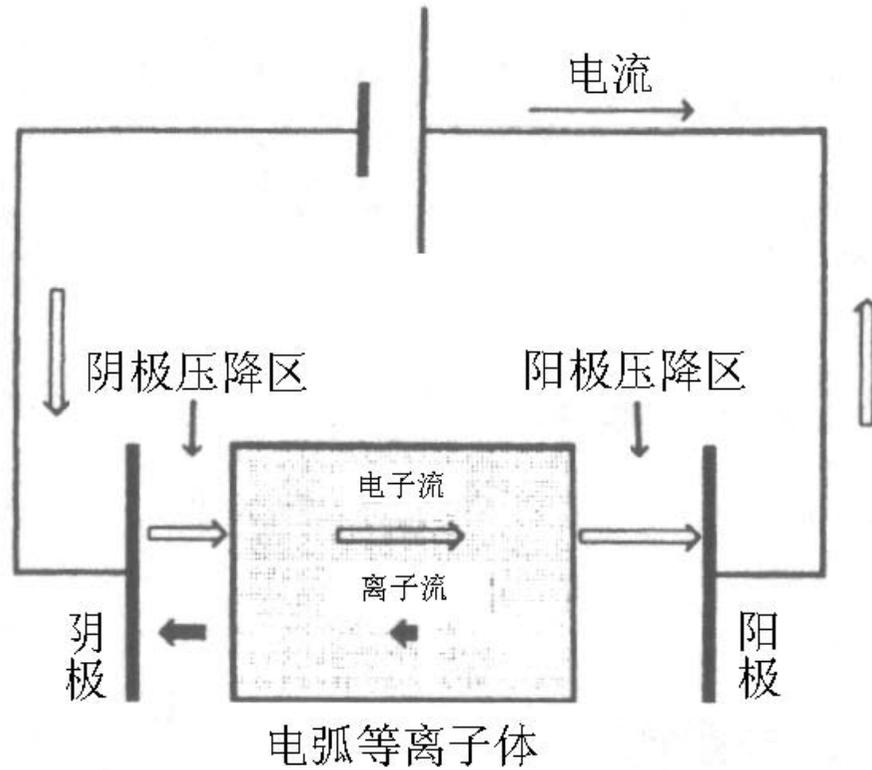
电弧弧柱电压产生维持高温等离子状态所需要的加热能量, 此产热与向周围气氛的热传导及辐射损失三者之间达到能量平衡而确定, 随电弧长度、电流的变化而变化



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。

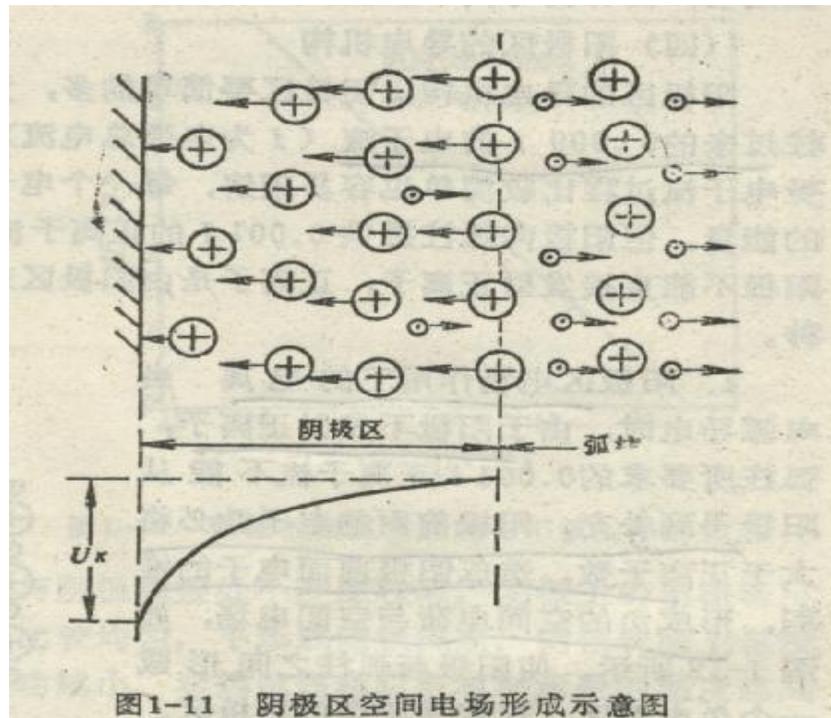


图1-11 阴极区空间电场形成示意图

### 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）。

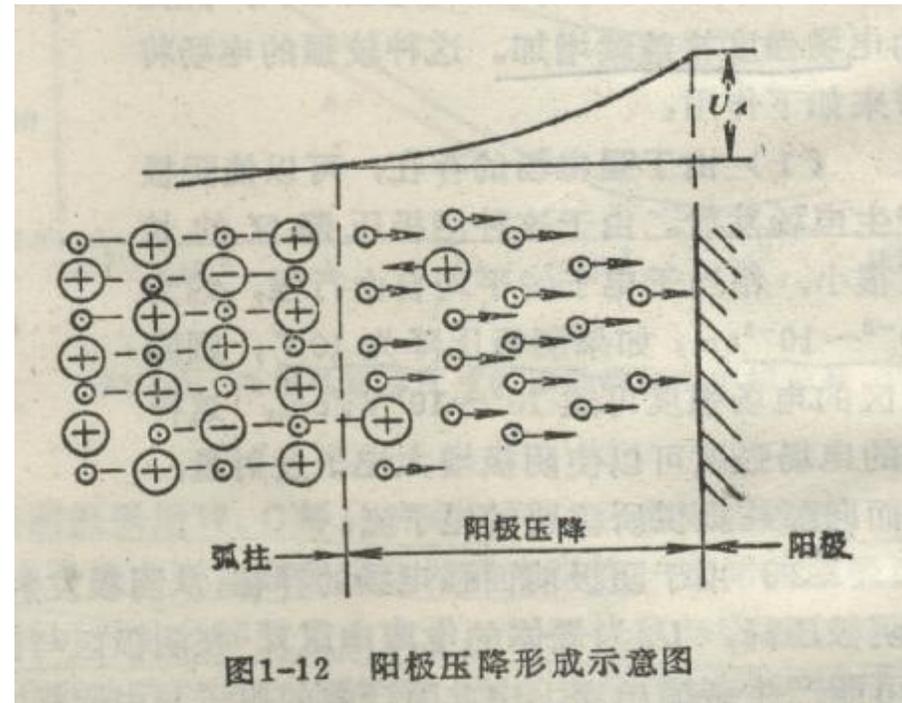
## ③ 阳极区的导电机构

### 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。



## 4. 电弧产热

### 1) 焊接电弧的产热

焊接电弧的热量来自电源提供的电能，该能量在电弧中转变为热能、光能、磁能、机械能

### 2) 焊接电弧的热效率

相对于电弧功率（电弧电压×电弧电流），向母材传送的热量所占的比例称作焊接电弧热效率  $\eta$ 。在熔化极焊接中，有效功率亦包含加热、熔化焊丝的能量。

电弧焊接效率数值与焊接方法、弧长因素、母材情况等有关

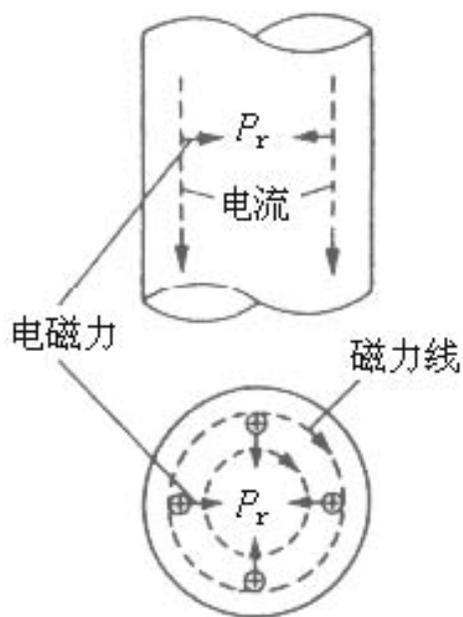
电弧焊热效率对比

焊接方法	热效率 /%
埋弧焊	90~99
MIG/MAG/ 焊条电弧焊	66~85
TIG焊	60~70
等离子弧焊（熔入型）	60~75
等离子弧焊（小孔型）	45~65

## 5. 电弧压力与等离子气流

电弧不仅仅是一个加热源，同时也是一个力源。电弧力与焊接中表现出的熔池形态、熔池尺寸、熔滴过渡、焊缝成形等有密切关系，同时也是形成不规则焊缝、产生成形缺陷、造成焊接飞溅的直接原因。主要的电弧力包括：

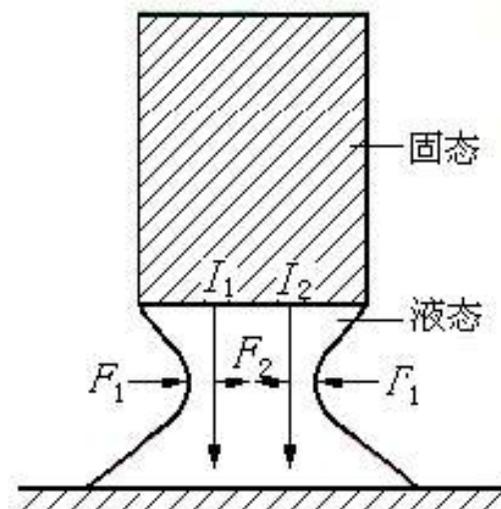
### 1) 电弧静压力（电磁收缩力）



导体内的电磁力

$$F = K \frac{I_1 I_2}{L}$$

$$K = \frac{m}{4\pi}$$



液态导体中电磁力的收缩效应

假设导体为圆柱体，电流线再导体中的分布是均匀的，则导体内部任意半径r处的电磁力值为：

$$P_r = K \frac{I^2}{\rho R^4} (R^2 - r^2)$$

导体中心轴 (r=0) 的径向压力为

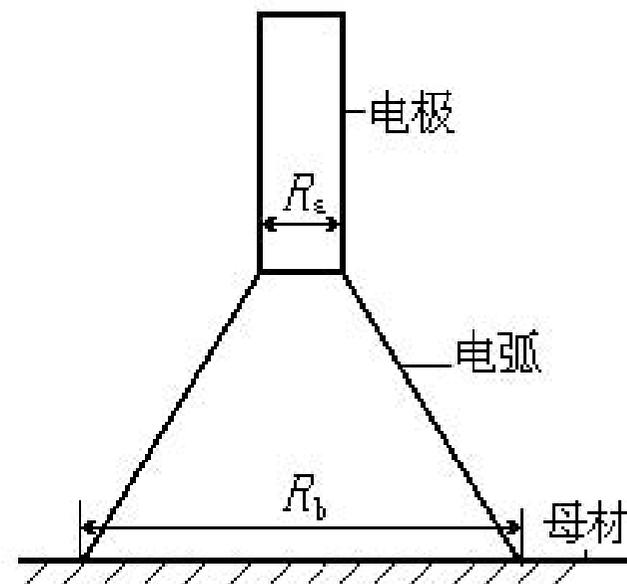
$$P_0 = K \frac{I^2}{\rho R^2} = K j l$$

对于流体，其内部各点处的压力各向等值，径向压力等于轴向压力，轴向压力的合力为

$$F = \frac{K}{2} I^2$$

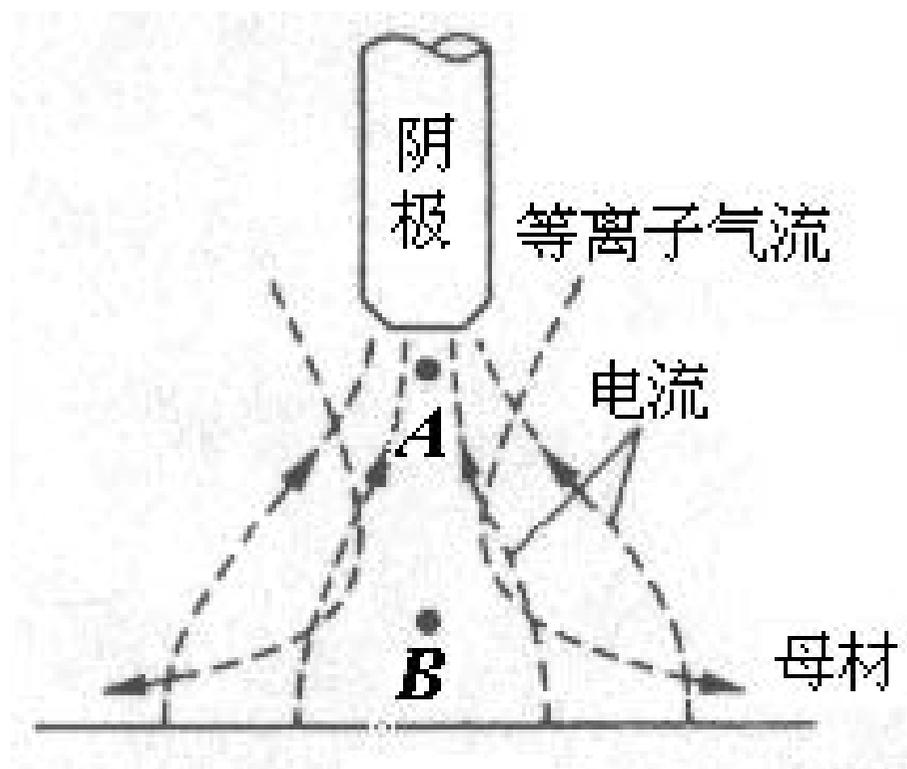
实际上，焊接电弧不是圆柱体，而是锥状，从而产生电极指向工件的推力

$$F_a = K I^2 \lg\left(\frac{R_b}{R_a}\right)$$



焊接电弧模型

## 2) 电弧动压力 (等离子流力)

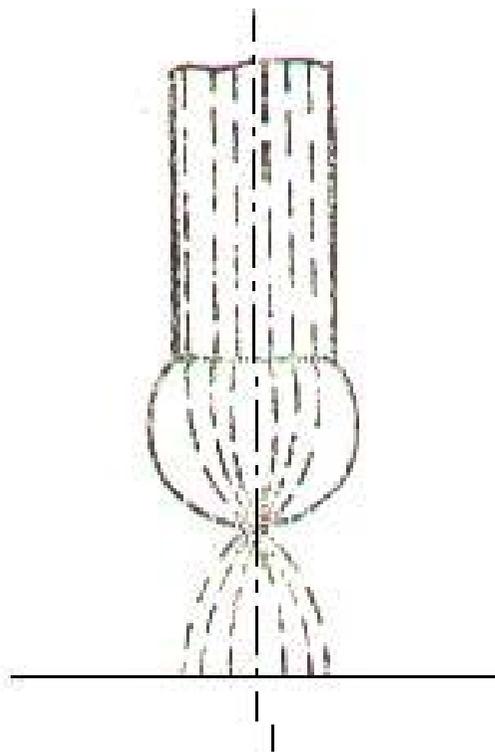


电弧中的压力差使较小截面处的高温粒子向工件方向流动，并有更小截面处的粒子补充到该截面上来，以及保护气氛不断进入电弧空间，从而形成连续不断的气流，称作等离子流力。

由于等离子流力是高温粒子高速流动形成的，也称作电弧动压力。

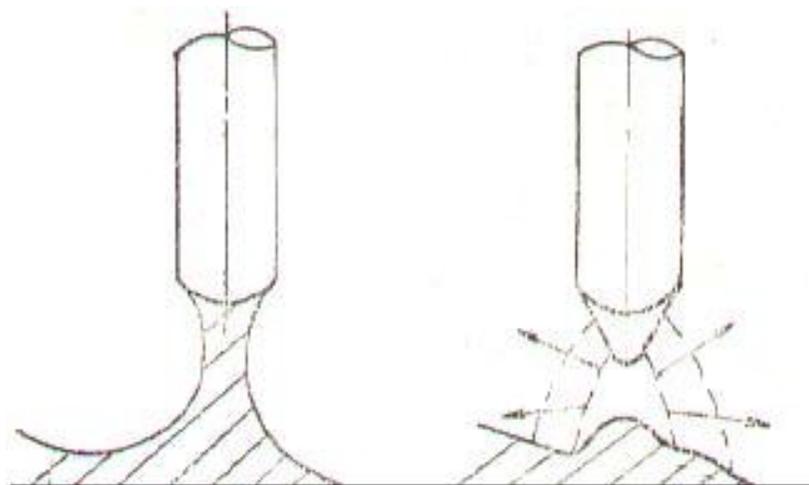
电弧等离子气流的产生

### 3) 斑点力



斑点的电磁收缩力

- 带电粒子对电极的冲击力
- 电磁收缩力
- 电极材料蒸发的反作用力



(a) 短路

(b) 爆破引弧

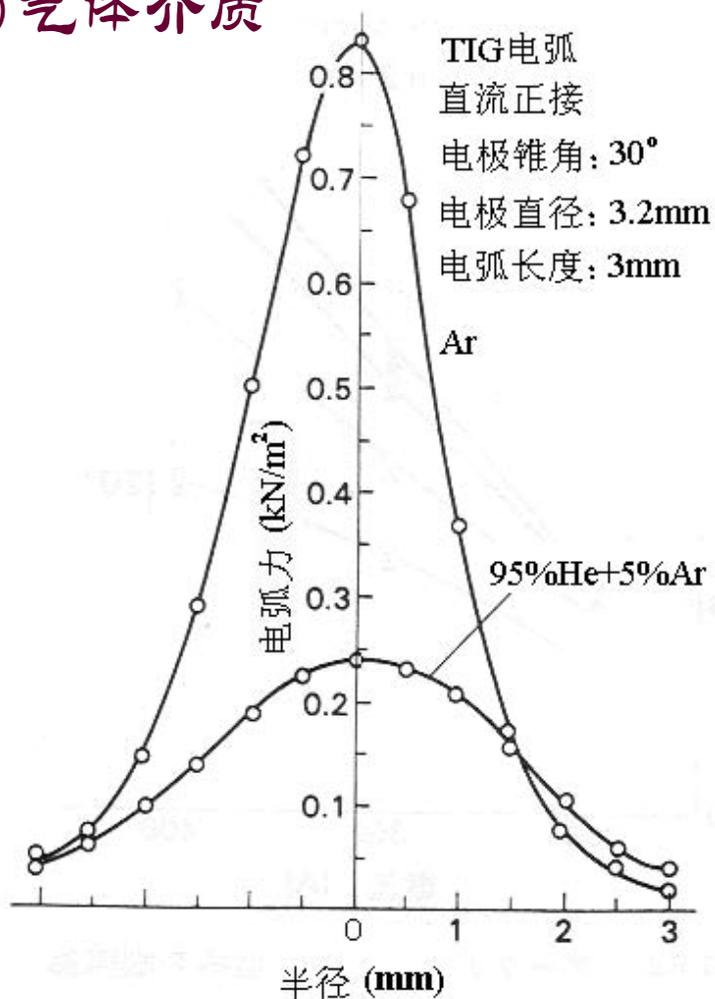
熔滴短路产生的爆破力

### 4) 爆破力

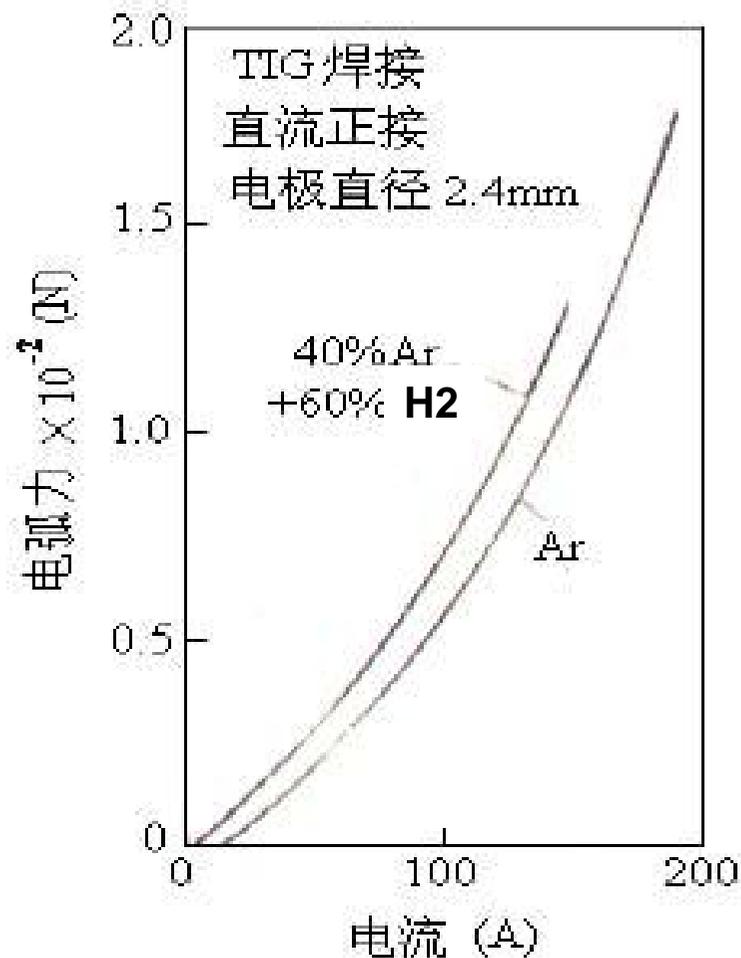
### 5) 熔滴冲击力

## 6) 电弧力的影响因素

### ① 气体介质

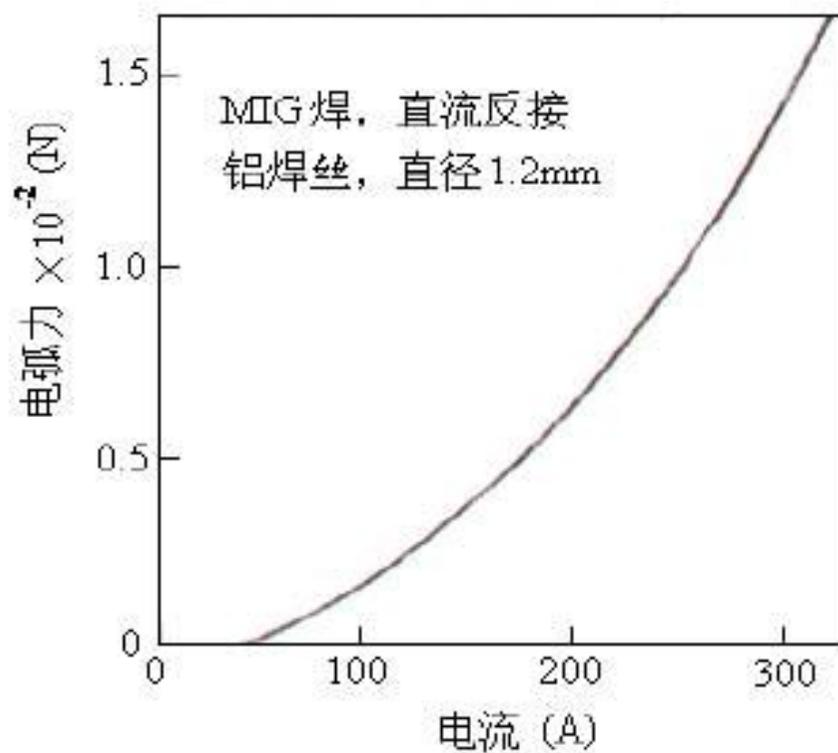


He-Ar混合气体电弧的电弧力

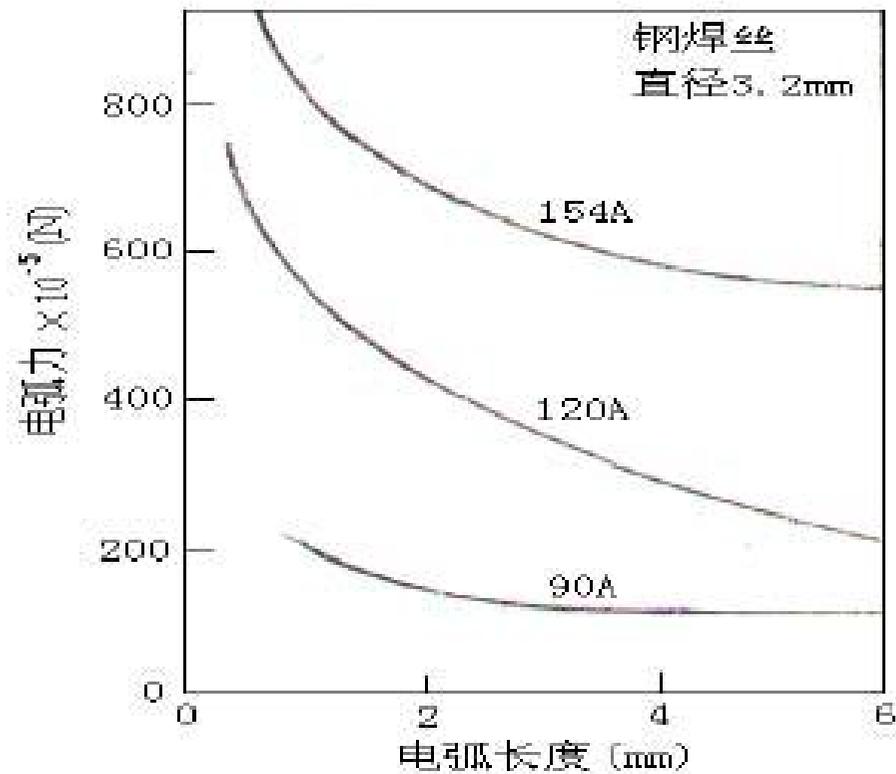


H<sub>2</sub>-Ar混合气体电弧的电弧力

## ② 电流和电压 (弧长)



MIG电弧的电弧力与电流的关系

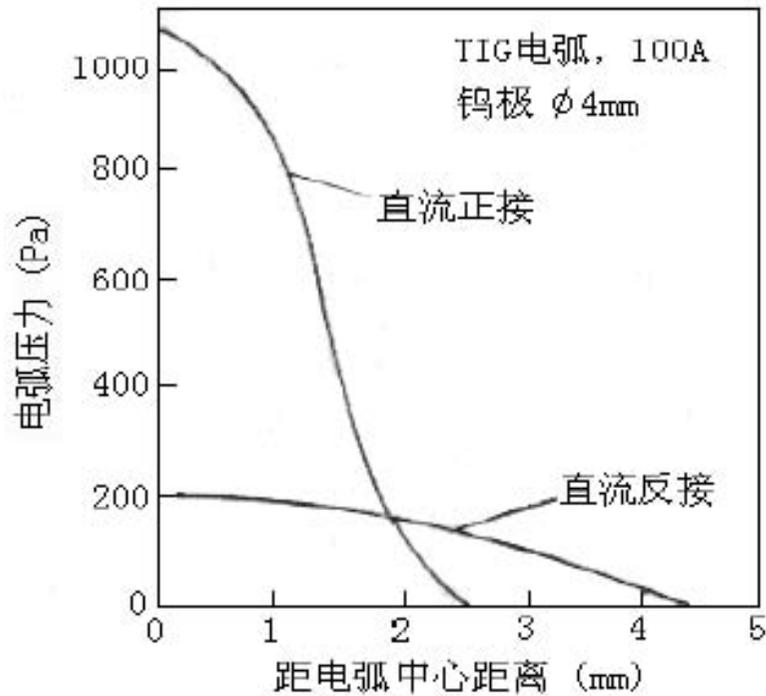


电弧力与弧长的关系

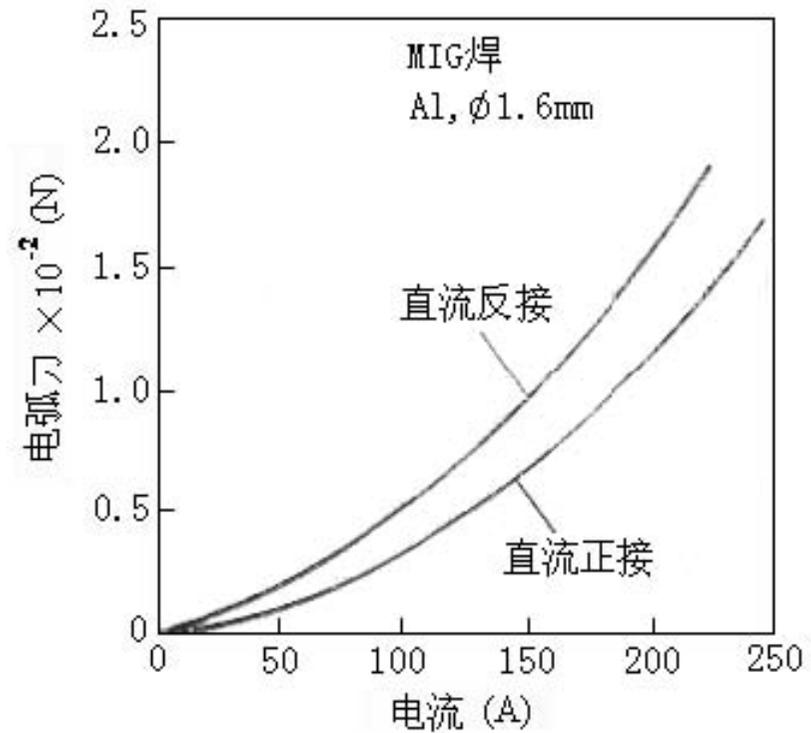
### ③ 电极（焊丝）直径

焊丝直径越细，电流密度越大，电弧呈锥形明显，等离子流力增大

### ④ 电极（焊丝）极性

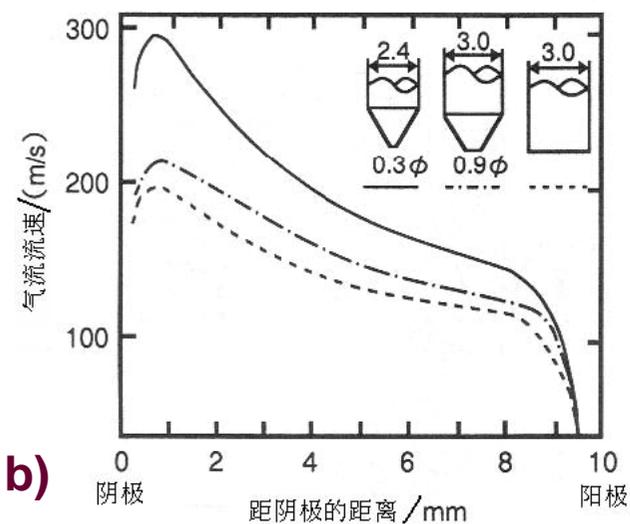
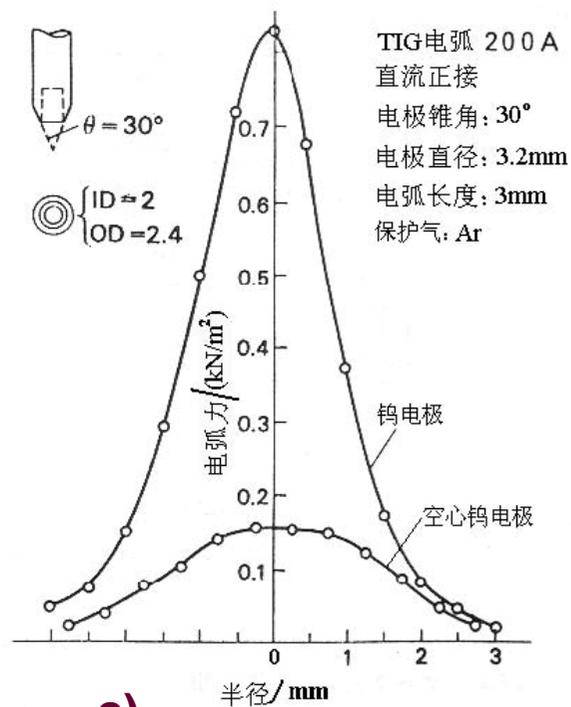
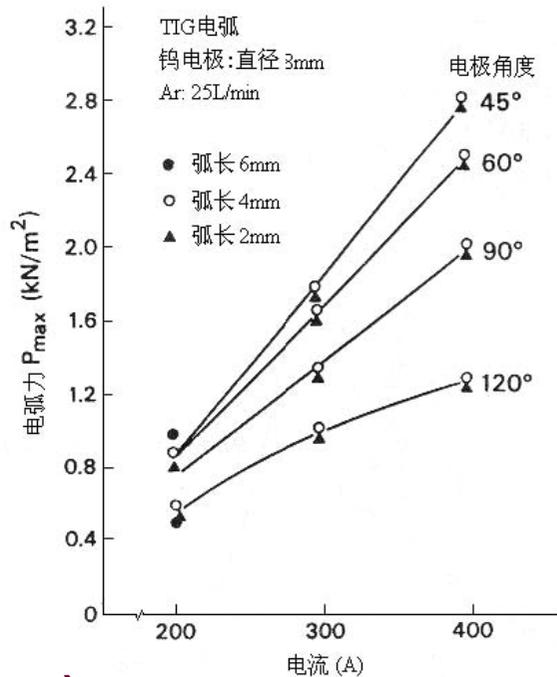
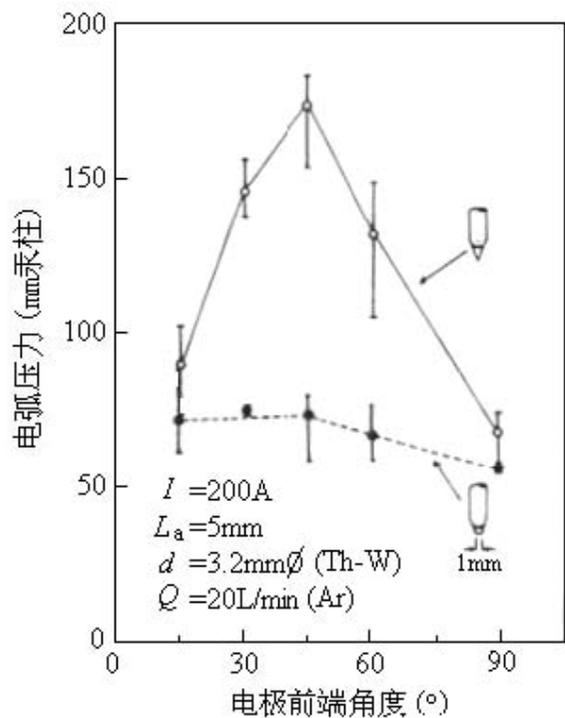


GTA焊接电弧力与电极极性的关系



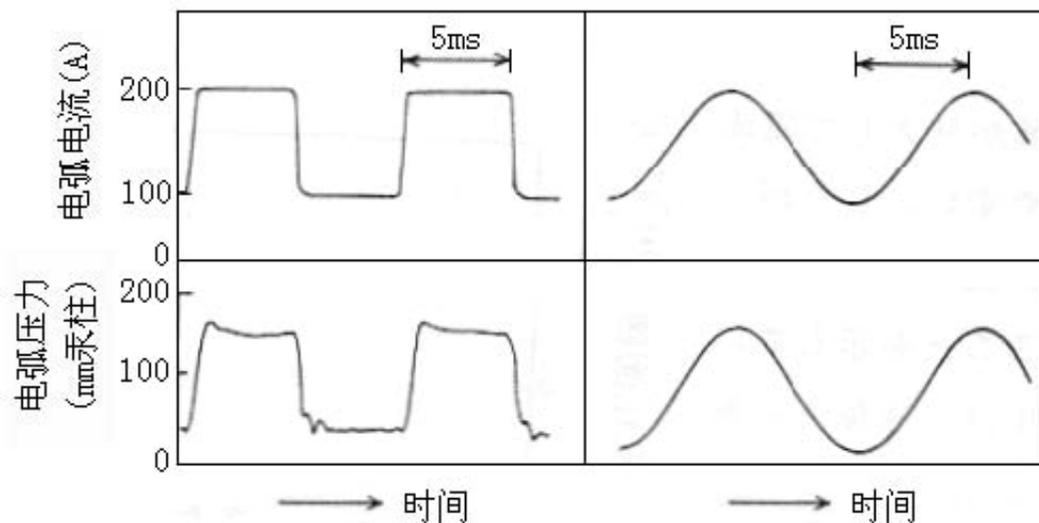
MIG焊接电弧力与电极极性的关系

## ⑤ 钨极端部几何形状

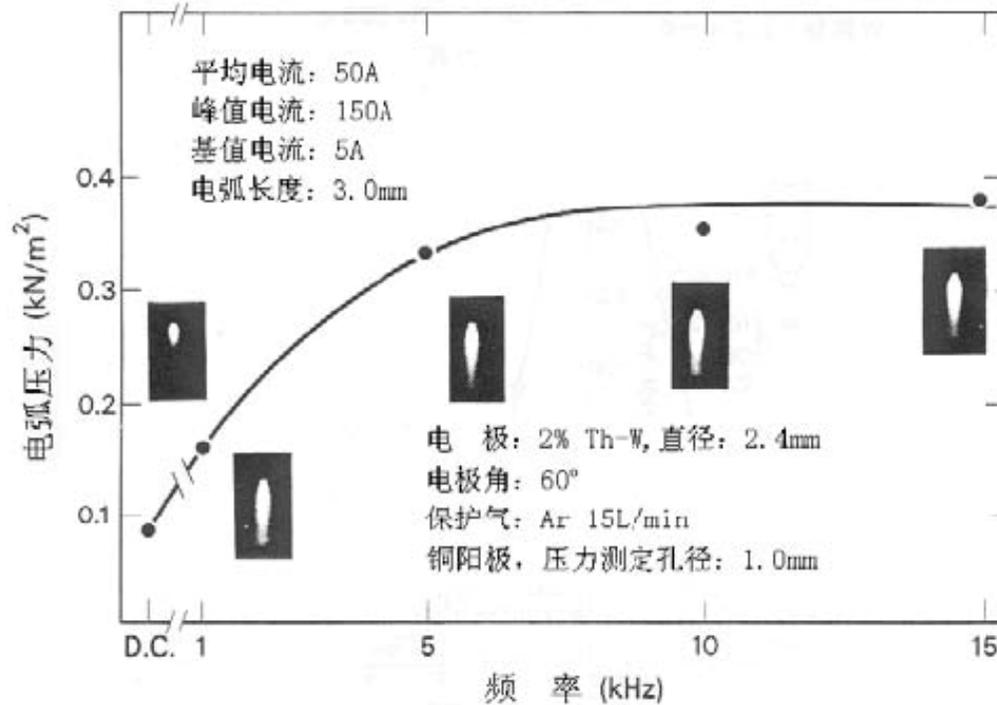


- a) 电弧力与电极端部角度的关系  
 b) 电极形状对电弧力的影响  
 c) 端部空心电极的电弧力

## ⑥ 脉动电流的影响



脉动电流下电弧力的变化

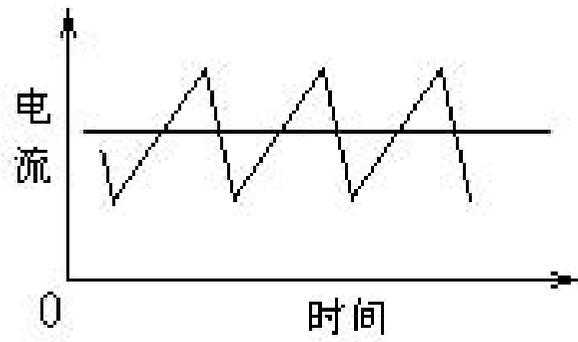
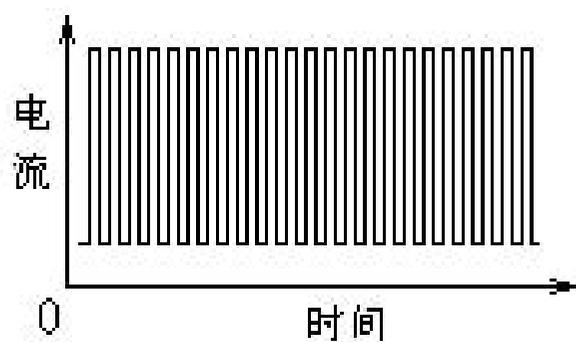
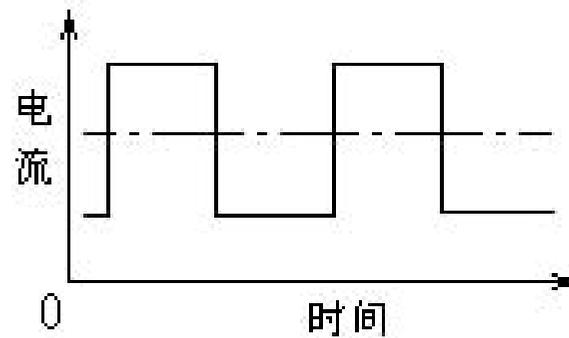


电弧力随电流频率的变化

## 6. 直流电弧与交流电弧

### 1) 直流电弧

是指电弧极性不发生变化的电弧，稳定性好，根据电流形式的不同，可以有恒定电流下的直流电弧和变动电流下的直流电弧。



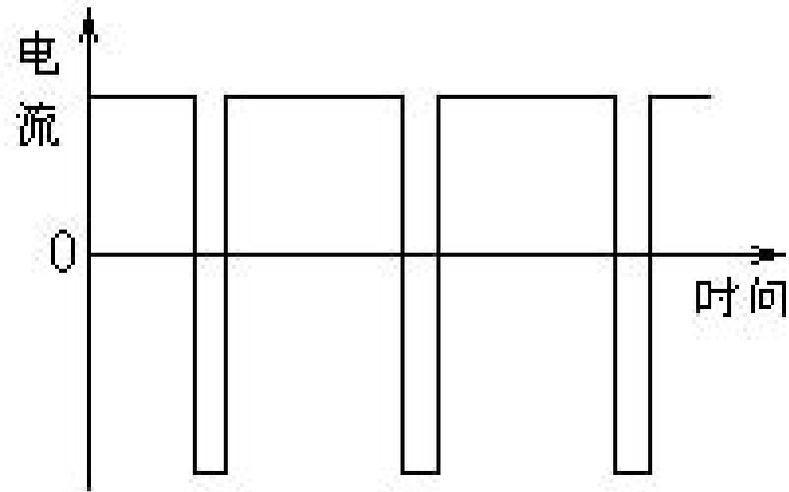
直流电弧的变动电流形式示例

## 2) 交流电弧

指电弧（电极）极性随时间交替变化的电弧，也就是焊接电流方向按照一定的时间间隔变化，一般用在TIG焊接、等离子弧焊接和焊条电弧焊中。

### ① 交流电弧燃烧特点

需要对交流电弧采取稳弧或再引燃措施



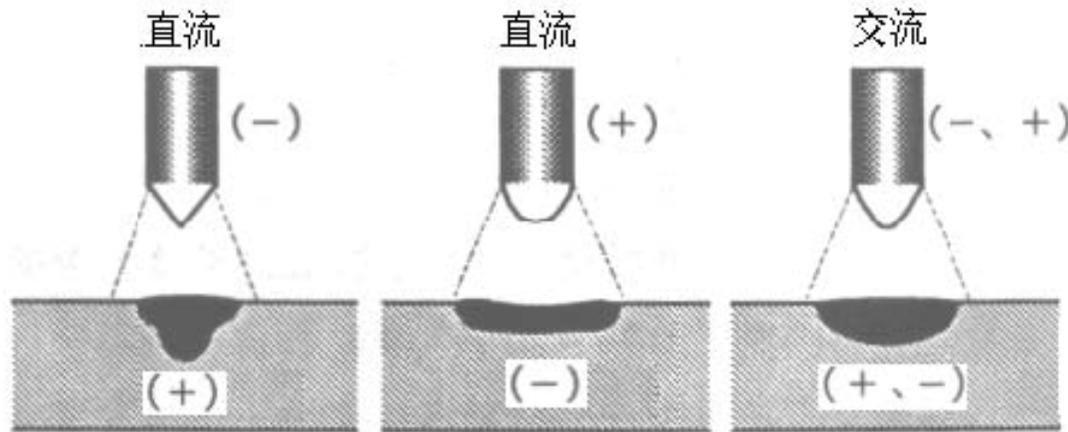
铝合金焊接使用的方波交流电流

## ② 电弧产热与电弧力特性

居于直流正接和直流反接两者之间，电极的产热特殊

直流和交流TIG电弧的性质

极性	母材的熔化		电极的消耗（熔化）	最大使用电流 (电极直径3.2mm)	清理作用
	熔深	熔宽			
电极负（正极性）	大	小	小	大(400A)	无
交流	中	中	中	中(210A)	一半
电极正（反极性）	小	大	大	小(40A)	有

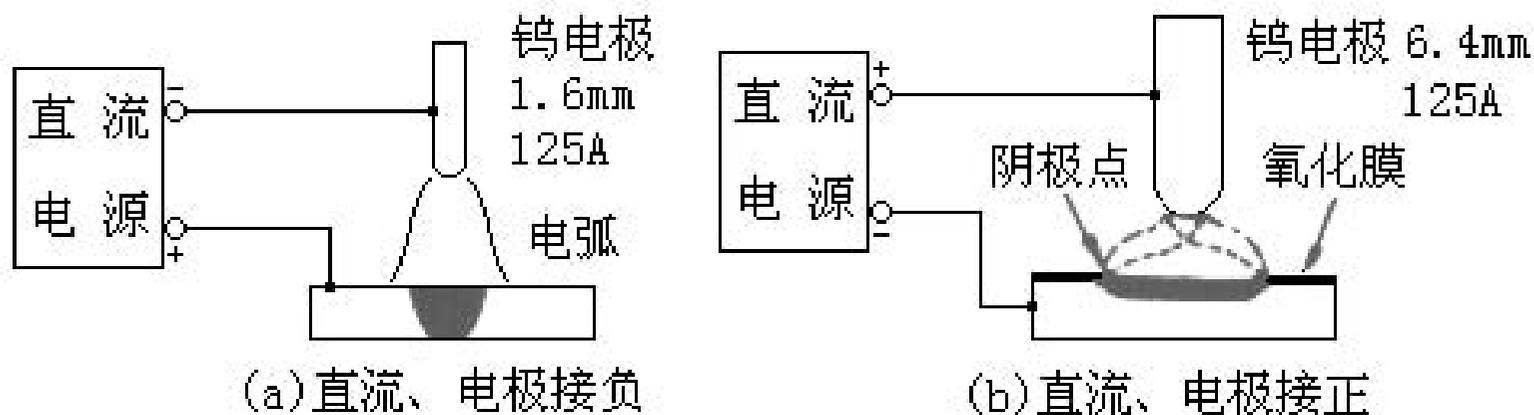


极性TIG焊熔深的影响

### ③ 交流电弧的应用

为平衡氧化膜清理、电极烧损与母材熔化之间的矛盾而使用交流焊接  
钨极为负、母材为正的半波，对工件有较大的热输入，并且钨极可以得到一定的冷却；

在钨极为正、母材为负的半波，电弧具有对母材表面的清理作用。



交流TIG焊氧化膜清理与母材熔化

## 1.2 焊接电弧特性

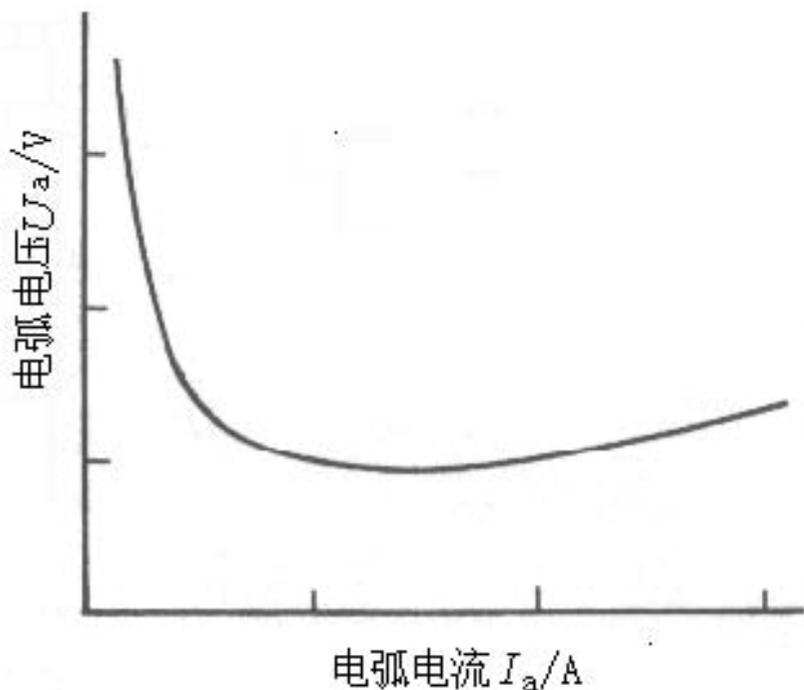
电弧特性是指电弧在导电行为方面表现出的一些特征，其中的电弧电特性与电弧热平衡、电弧稳定性等有很深的联系，是很重要的事项。

- 焊接电弧静特性
- 焊接电弧动特性
- 阴极斑点和阳极斑点
- 电弧的阴极清理作用
- 最小电压原理
- 电弧的挺直性与磁偏吹

# 1. 焊接电弧静特性

## 1) 电弧静特性曲线变化特征（与金属电阻对应理解）

左图概念性示出稳定状态下焊接电弧的电流·电压特性，称作电弧静特性曲线。



电弧的电流·电压特性

静特性曲线是在①某一电弧长度数值下，在②稳定的保护气流量和③电极条件下（还应包括其他稳定条件），改变电弧电流数值，在电弧达到稳定燃烧状态时所对应的电弧电压曲线。

### 呈现3个区段的变化特点

下降特性区（负阻特性区）

平特性区

上升特性区

3个特性区域的特点是由于电弧自身性质所确定的，主要和电弧自身形态、所处环境、电弧产热与散热平衡等有关

**在小电流区：**电弧电压随电流的增大而减小，呈现负阻特性。原因如下：

电流小时，电弧热量低，导电性差，需要较高的电场推导电荷运动；

电弧极区（特别是阴极区），温度低，提供电子能力差，会形成较强的极区电场；

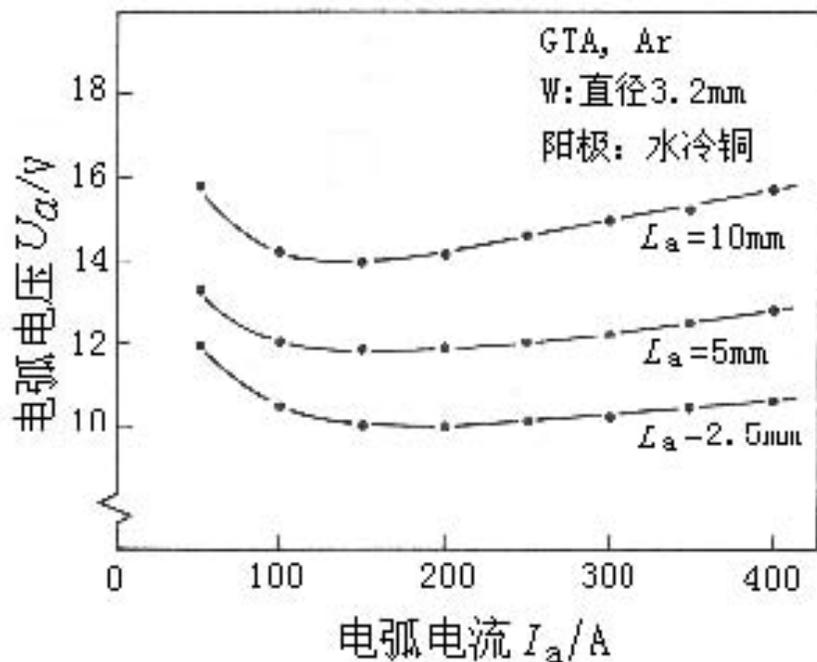
电流增大：电弧中产生和运动等量的电荷不再需要更高的电场；

电弧自身性质具有保持热量动态平衡的能力

**当电流稍大时：**焊条金属将产生金属蒸气的发射和粒子流。

消耗能量，故E不用降低

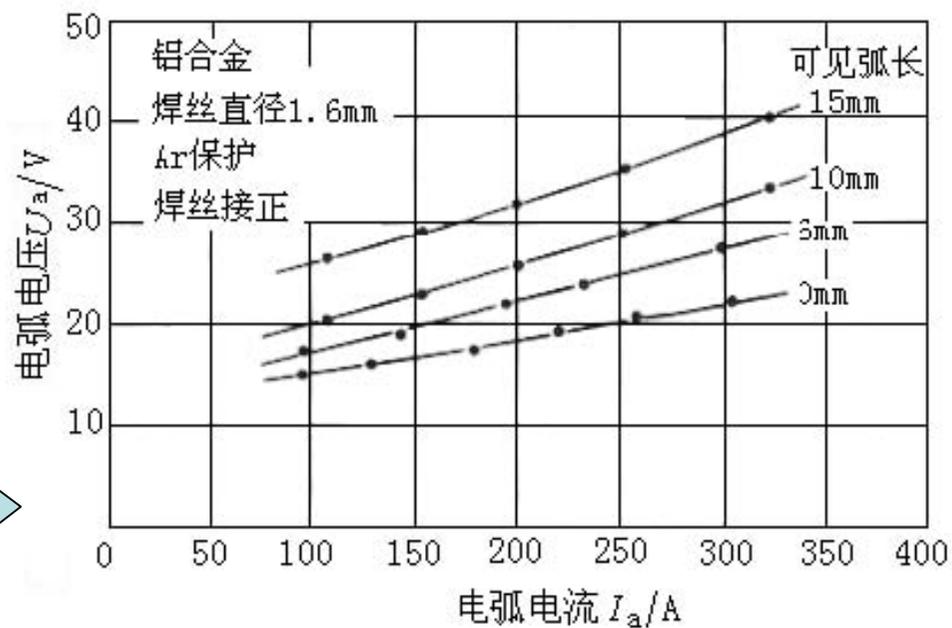
**当电流进一步增大时，**金属蒸气的发射和等离子流的冷却作用进一步增强，同时由于电磁收缩力的作用，电弧断面不能随电流的增加而成比例的增加，电弧电压降升高，电弧静特性呈正特性。



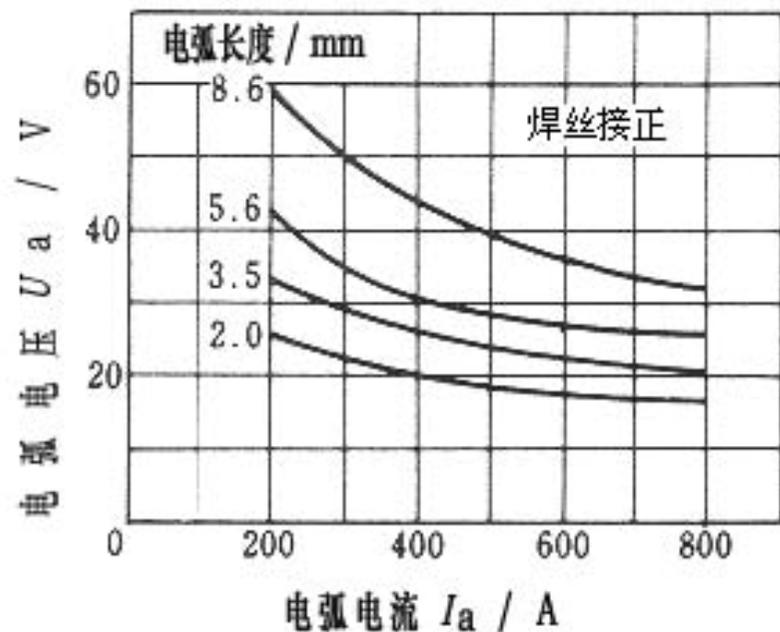
GTA焊接电弧静特性曲线

其特征是在小电流区几乎看不到负阻性，在可用电流以上区域都呈现正特性。

GMA通常采用较细的焊丝，可使用的电流在中等数值以上，电弧形态多呈圆锥状，等离子气流作用强烈。



铝合金MIG电弧静特性曲线



埋弧焊电弧静特性曲线

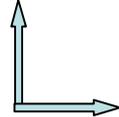
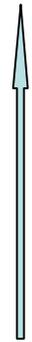
埋弧焊电弧的散热损失小，且电弧中基本没有GTA、GMA那样的等离子流存在，采用粗焊丝大电流，电弧特性呈下降趋势。

电弧特性反应了电弧的导电性能和变化特征，电弧种发生的许多现象都与静特性有关，也可以用于对比解释各种电弧焊方法的差别

## 2) 影响电弧静特性及电弧电压的因素 (金属: 长度、材料、横截面积等)

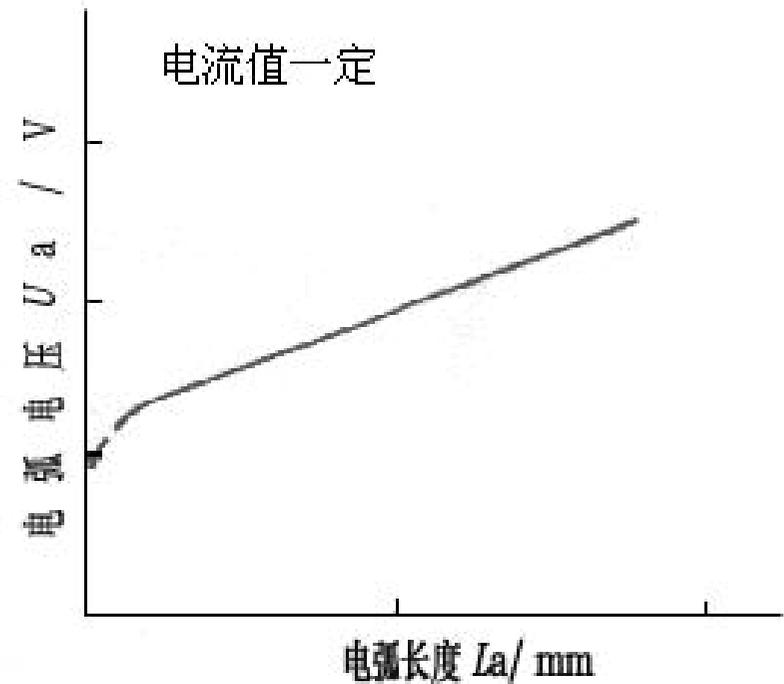
### ① 电弧长度

$$U_a = U_{ao} + EL$$



弧柱单位长度上的电压降, 称作弧柱电位梯度

是在焊接电流、电极材料、保护气氛等条件相同的情况下, 不随弧长变化的值。可以看作是 $U_C$ 与 $U_A$ 之和。



电弧长度对电弧电压的影响

## ② 保护气成分

各种气体气氛中弧柱电位梯度值的比较（空气=1.0）

气体	氩气	空气	氮气	二氧化碳气	氧气	水蒸气	氢气
电位梯度比	0.5	1.0	1.1	1.5	2.0	4.0	10

保护气的差别对电弧电位梯度的影响有多项原因：

- ① 对电弧散热程度的不同；
- ② 分子电离前先分解；
- ③ 气体的电离能不同。

母材熔化形成大量蒸发，由于金属元素的电离能普遍低于气体介质的电离能，电弧电压会降低，药皮、焊剂中的电弧稳定剂就起这样的作用。

电位梯度还受到周围气氛对电弧冷却作用的影响

### ③ 电极条件

非熔化电极情况下，电极成分对电弧电压会有一定程度的影响

### ④ 母材情况

母材热导率影响所形成的熔池大小以及母材热输入量中散失热量的快慢，对电流产生间接的冷却作用。

### ⑤ 保护气流量、环境温度、焊接电流的形式

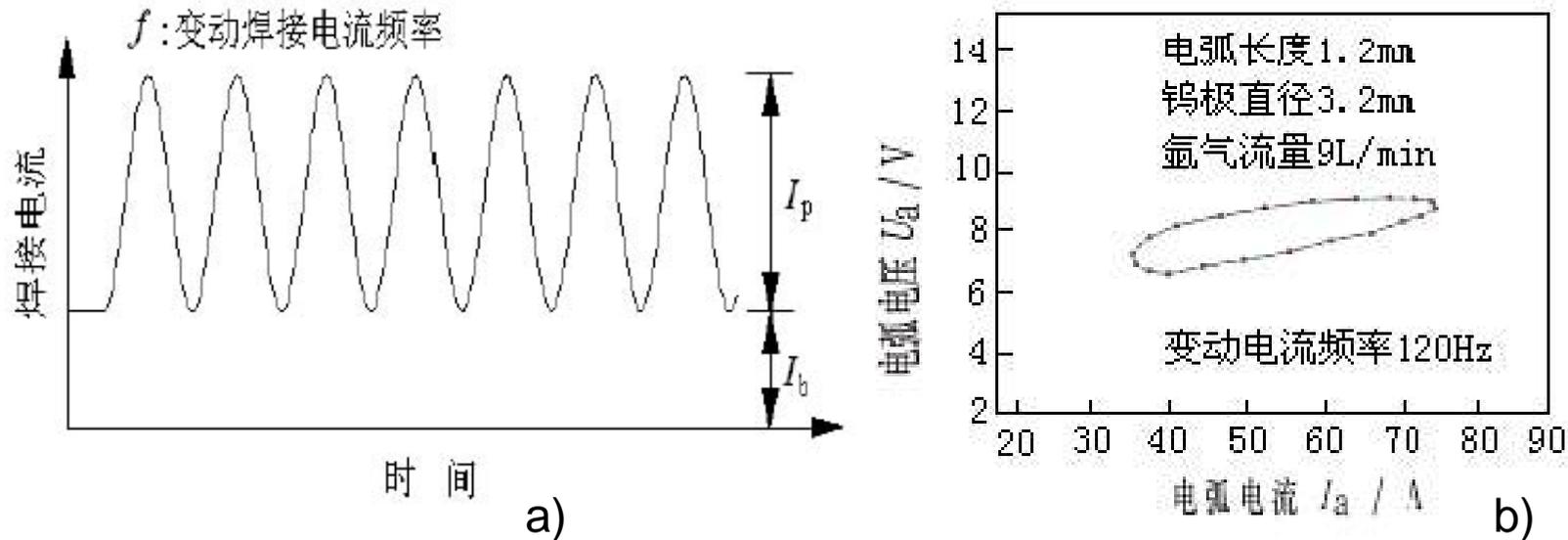
对电弧燃烧构成影响的调节，都将对电弧电压产生影响。

## 2. 焊接电弧动特性

电弧动特性是指焊接电流随时间以一定形式变化时电弧电压的表现，反应的是电弧导电性能对电流变化的响应能力。

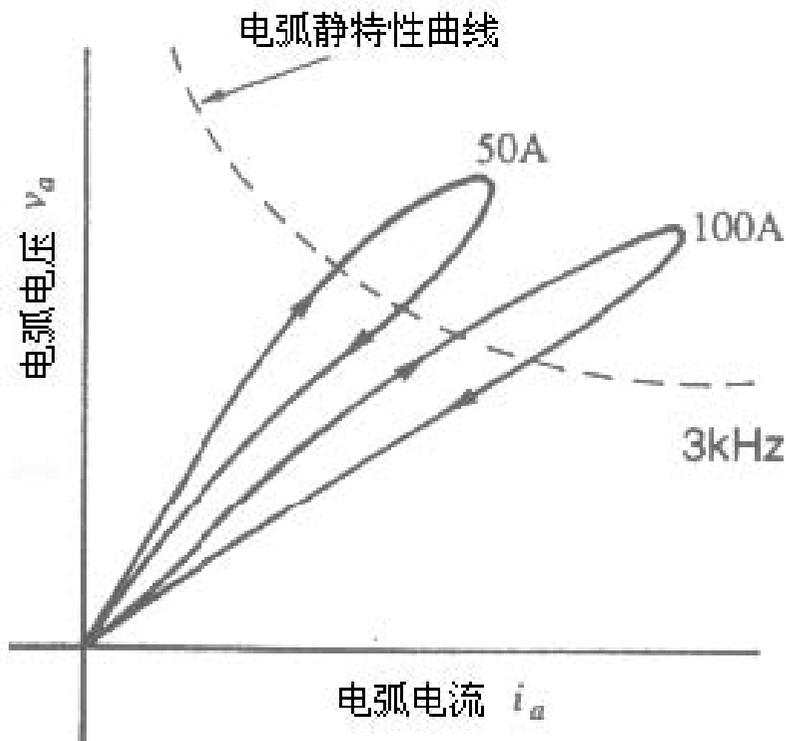
### 1) 直流电弧的动特性

直流电弧的动特性是采用一定形式的变动电流进行焊接时的电流-电压关系曲线，恒定直流电弧没有动特性问题。变动电流的形式是多种多样的，比如脉冲电流、高频电流、脉动电流等。



直流变动电弧的动特性示例：a) 直流变动焊接电流；b) 电弧动特性

对于频率1kHz以上的直流电弧，近似于电阻特性。电流、电压非单值对应关系，是由于电弧等离子体的热惯效应在发挥作用。



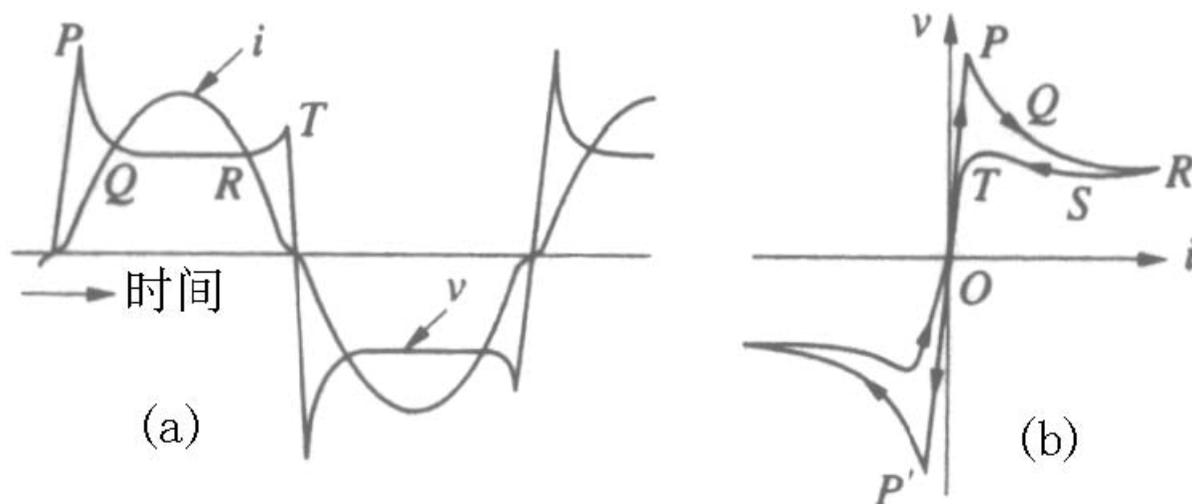
直流高频电弧动特性

电弧先前处于相对低温状态，电流的增加需要较高的电场驱动，表现出电压增加；在电流下降的过程，电弧处于高温，电弧等离子体的热惯性不能马上对电流的降低做出反应，导电性很强，从而形成回线状的电弧动特性。

如果电弧电流变化很快，与电弧等离子体的形成、消失的时间常数相比，等离子体的状态跟随不上电流的变化，与电流相位无关，而维持一定的状态，呈现近阻特性。

高频电弧的维护电流可以达到零值，电弧仍能维持燃烧

## 2) 交流电弧的动特性



交流焊条电弧焊电流、电压之间的关系

交流电弧情况下，电弧的状态亦即等离子体的温度、导电率、阴极压降的状态等时刻在变化着，在极性转换时，电弧电流一旦达到零值，必须使转换前的阳极表面迅速形成阴极。

P所对应的为再点弧电压