

第一章 焊接电弧

四、重点

- 电弧、电离、气体放电、刚直性、磁偏吹等一些基本概念。
- 电弧力。
- 电弧的产热机理。
- 阴极斑点的特点。
- 最小电压原理。

三、难点

- 最小电压原理
- 电弧的导电机构

二、基本概念

电弧、气体放电、电离、电子发射、阴极斑点、阳极斑点、刚直性、磁偏吹、电离能、逸出功、电离电压、逸出电压

一、基本要求

- 熟练掌握本章的基本概念。
- 理解并掌握最小电压原理、电弧力。
- 了解电弧各个区域的组成、导电机构、产热机构、交流电弧的特点以及阴极斑点的特点及其对焊接质量的影响。

§ 1-1 电弧物理基础

一、电弧的基本概念

电弧是一种**气体放电**现象，通过放电将电能转变为热能与机械能。

* 气体放电

两极间的气体被击穿而导电的过程。

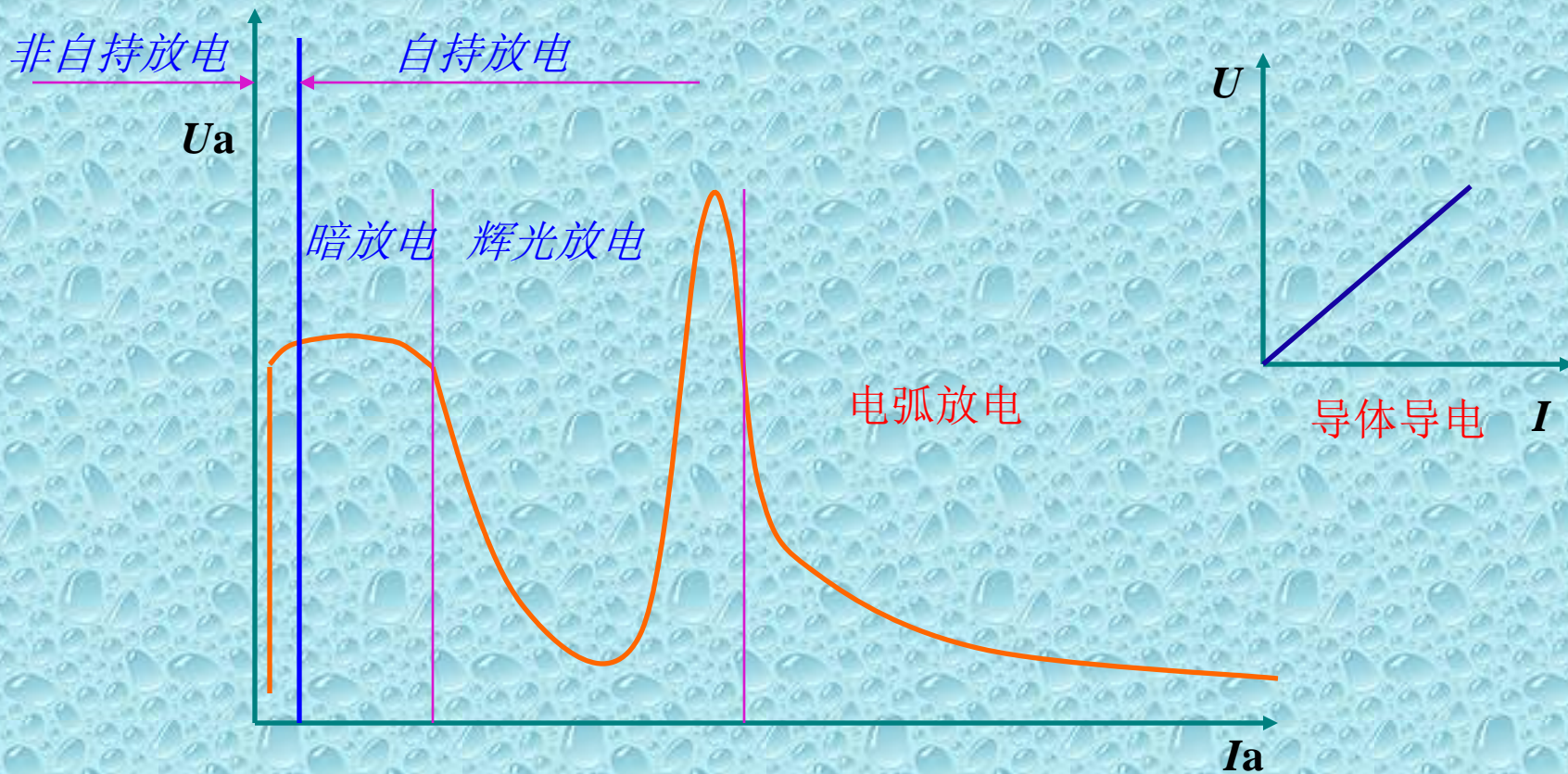
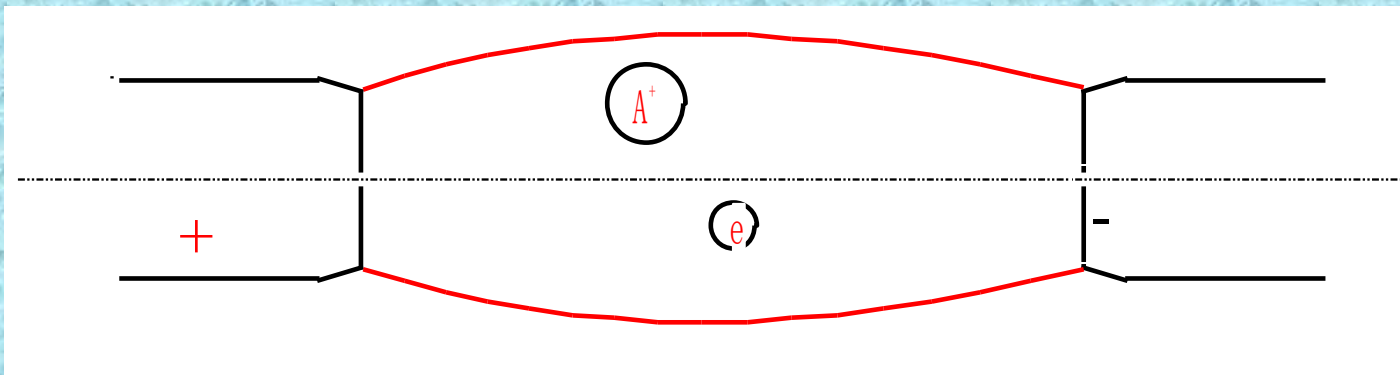
非自持放电

放电本身不能产生导电所需的带电粒子(A^+ 、 e)。

自持放电

放电本身能产生导电所需的带电粒子(A^+ 、 e)；有暗放电、辉光放电、电弧放电等三种。

电弧

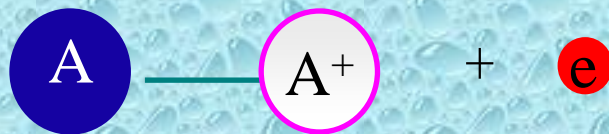


二、带电粒子的产生过程

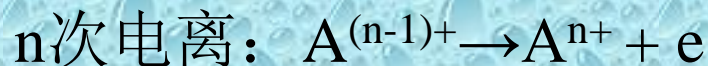
产生方式 { 电离：气体中性原子或分子(A)分离为一价正离子(A⁺)和电子(e)的过程。
 电子发射：金属表面逸出电子的现象。

(一) 电离与激励

1、电离：在一定条件下中性原子分离成A⁺及e的现象。



- 电离能：原子或分子电离所需要的能量，单位为ev 或J。
- 电子伏：一个电子被1V的电压所加速得到的能量。
- 电离电压：电离能/电子带电量。



2、激励：

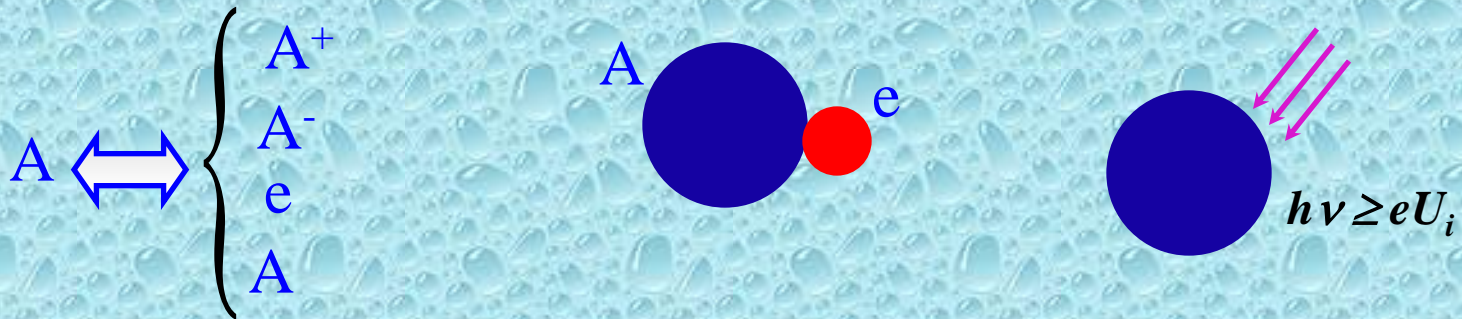
气体原子得到的一定的能量, 虽然小于 W_i , 但可使电子从低能级跃迁到高能级, 这种现象叫激励。

- 激励能：所需的最小外加能量叫激励能 W_e 。
- 激励能电压：激励能 W_e/e 。

3、能量传递方式

1) 碰撞：粒子间通过相互碰撞而交换能量。

- 弹性碰撞：仅发生动能再分配
- 非弹性碰撞：交换的能量 \rightarrow 势能，从而导致电离或激励。



2) 光幅射：在光的辐射下, 中性粒子直接吸收光量子的能量。

4、电离的分类：

1) 热电离：气体粒子受热的作用而产生电离。

实质：中性粒子通过与电子碰撞，接收电子能量而电离。

|| 电离度：电离了的粒子数量与电离前离子数量之比。

|| 热解离：在热量的作用下，多原子分子分解为原子。

|| 解离能：分子热解离所需要的能量。

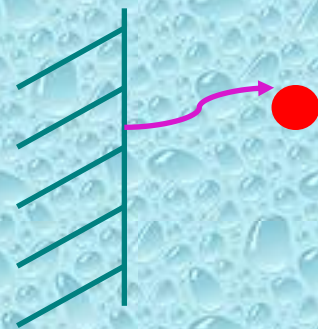
2) 电场作用下的电离： A^+ 、 e 在电场作用下被加速、与 A 碰撞使其电离的过程。

主要是 e 的作用：电子获得的能量是 A^+ 的4倍。

3) 光电离： A 直接捕捉光量子并吸收其能量而电离。

波长越小越易促进光电离，电弧波长包括红外线、紫外线可见光、可使 Al 、 K 、 Na 原子光电离。但不能使 Ar 、 He 、 Fe 等电离。

(二) 电子发射



1、基本概念

1) 电子发射：电子从金属表面逸出的现象。

(对电弧导电起作用的主要是阴极的发射)

2) 逸出功 (W_w)：电子发射所需的最小能量。

3) 逸出电压： W_w/e

①物理意义： W_w 越小，引弧越容易，电弧稳弧性越好。

②主要影响因素：

- 材料：K、Na之 W_w 较低。

- 表面状态：有氧化物时，逸出功降低

- 加入杂质：例如，钍、铯及镧等可降低 W_w 。

2、分类

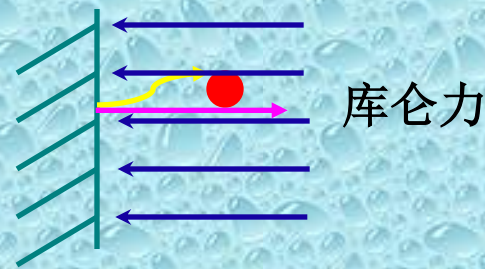
1) **热发射**: 在热量的作用下产生的发射

产生条件: 阴极温度足够高

特点: 对阴极有冷却作用, 这一点对TIG焊具有重要意义。
可提高W极的载流能力。

2) **电场发射**: 金属表面的电子在电场力的作用下逸出的现象。

特点: 对阴极的冷却作用较小。

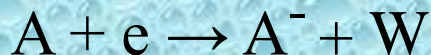


3) **光发射**: 光幅射作用下产生的发射。实际电弧中产生光发射的可能性很小。

4) **粒子碰撞发射**: 高速运动的 A^+ 碰撞到阴极上导致的发射。

(三) 负离子的产生

中性离子与电子结合的过程，是一个放热过程，所放出的热被称为电子亲和能。

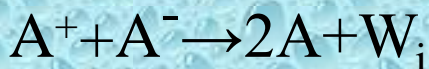
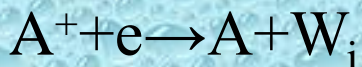


注意：

- 1) 亲和能高的原子易形成 A^- ，但高温下不利于放热反应。
- 2) 交流电弧过零时，易形成。
- 3) 易在电弧周边形成。
- 4) 不利于电弧稳定。

(四) 扩散与复合

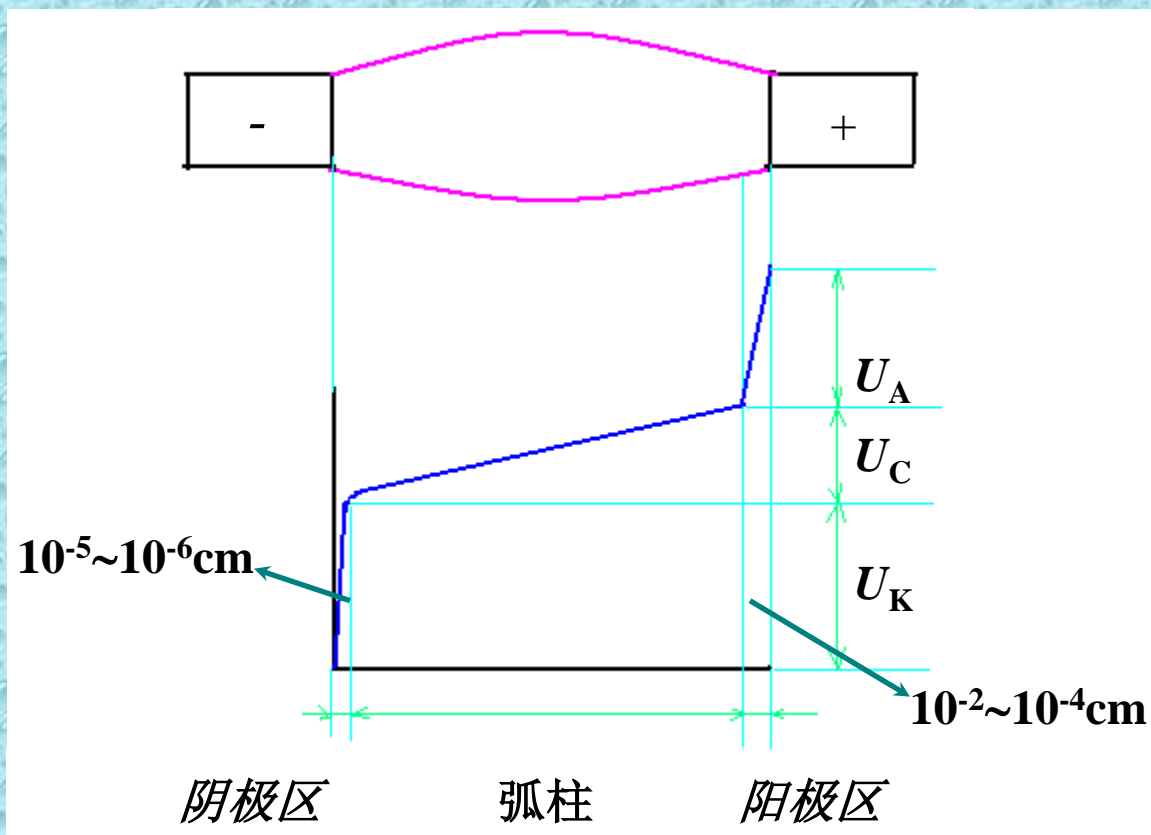
扩散：电弧中心处 A^+ 、 e 较多， e 易向周边运动。当周边电子浓度达到一定值后，在 e 吸引下， A^+ 也向周边运动，从而在周边复合。



★区域组成

由阴极区、阳极区、弧柱区三部分组成。

- 1、阴极区：长度极短、电压较大、 E （电场强度）极高
- 2、阳极区：长度也极短、电压较大、 E 极高
- 3、弧柱区：长度基本上等于电弧长度， E 较小



(一) 弧柱区的导电机构

所谓导电机构就是指带电粒子产生、运动方式。

1、带电粒子的产生

- 1) 电离：热电离 光电离 电场作用的电离
- 2) 阴极区注入的电子
- 3) 阳极区注入的正离子

2、带电离子的运动

A^+ 冲向阴极→正离子流 I_{A^+}

e 冲向阳极→电子流 I_e

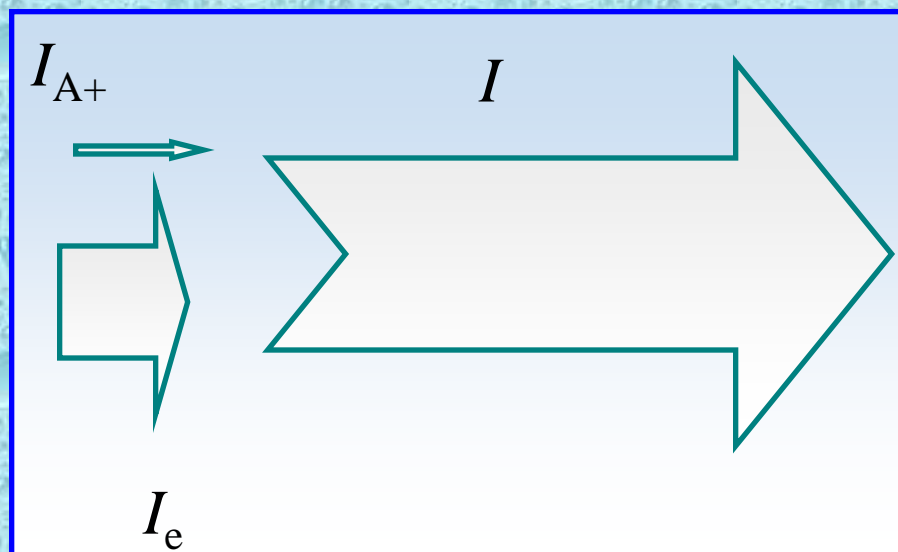
$$I = I_{A^+} + I_e$$

其中： $I_{A^+} = 0.1\%I$

$$I_e = 99.9\%I$$

3、特点：

- 1) 电中性；
- 2) E 小、 U_a 小



(二) 阴极区的导电机构

1、阴极区在导电过程中的作用

- 1) 产生弧柱区导电所需要电子流 $I_e = 0.999 I$
- 2) 接收弧柱区来的正离子流 $I_{A+} = 0.001 I$

2、热发射型

- 1) 产生条件：W、C阴极，且电流很大
- 2) 带电粒子的产生方式：热发射

热阴极：弧柱导电所需要的电子可完全由热发生来产生的阴极

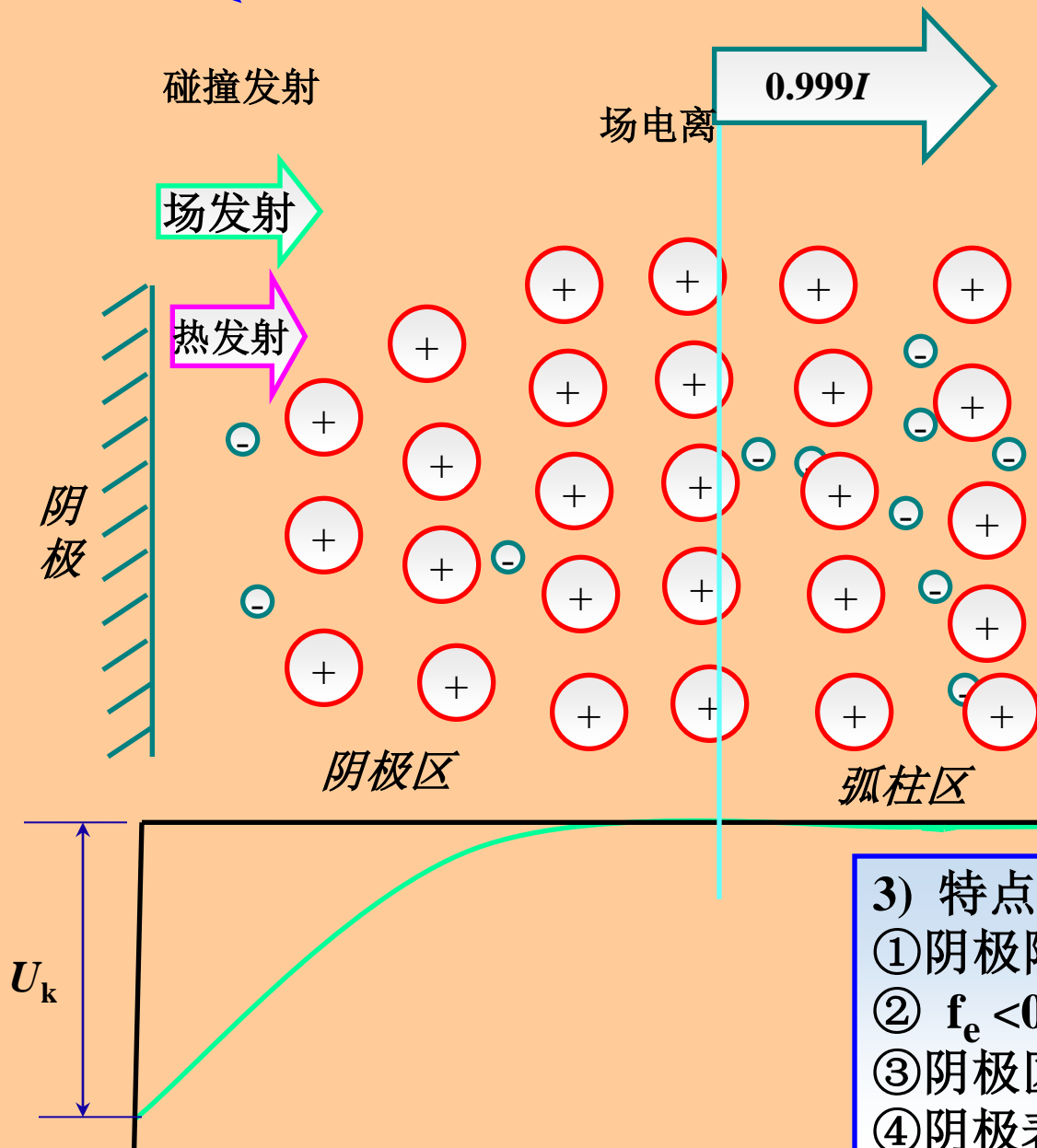
冷阴极：热发射能力不足的阴极

热阴极材料：熔点高的材料

冷阴极材料：熔点低的材料。

- 3) 特点：无阴极区、无阴极压降 V_k

3、电场发射型导电机构



1) 条件:

- ① W、C 阴极、且 I 较小
- ② Al、Fe、Cu 作阴极

2) 带电离子产生方式:

- ① 场发射
- ② 场电离
- ③ 热发射
- ④ 碰撞发射

3) 特点:

- ① 阴极附近存在一正电荷区—阴极区
- ② $f_e < 0.999I$ $f_{A+} > 0.001I$
- ③ 阴极区断面收缩
- ④ 阴极表面上产生阴极斑点

4、等离子型导电机构

(1) 条件:

① W、C阴极，且I较小或Al、Fe、Cu阴极；且

② 气压较小， $U_k < U_i$

(2) 带电粒子产生方式:

热电离

(3) 特点:

① 阴极附近存在—正电荷区—阴极区

② $f_e < 0.999I$ $f_{A+} > 0.001I$

③ 阴极区断面收缩

④ 阴极表面上产生阴极斑点

1、阳极区在导电过程中的作用

- 1) 接收弧柱区来的电子流 $I_e = 0.999 I$
- 2) 产生弧柱区所需要的正离子流 $I_{A+} = 0.001 I$

2、热电离

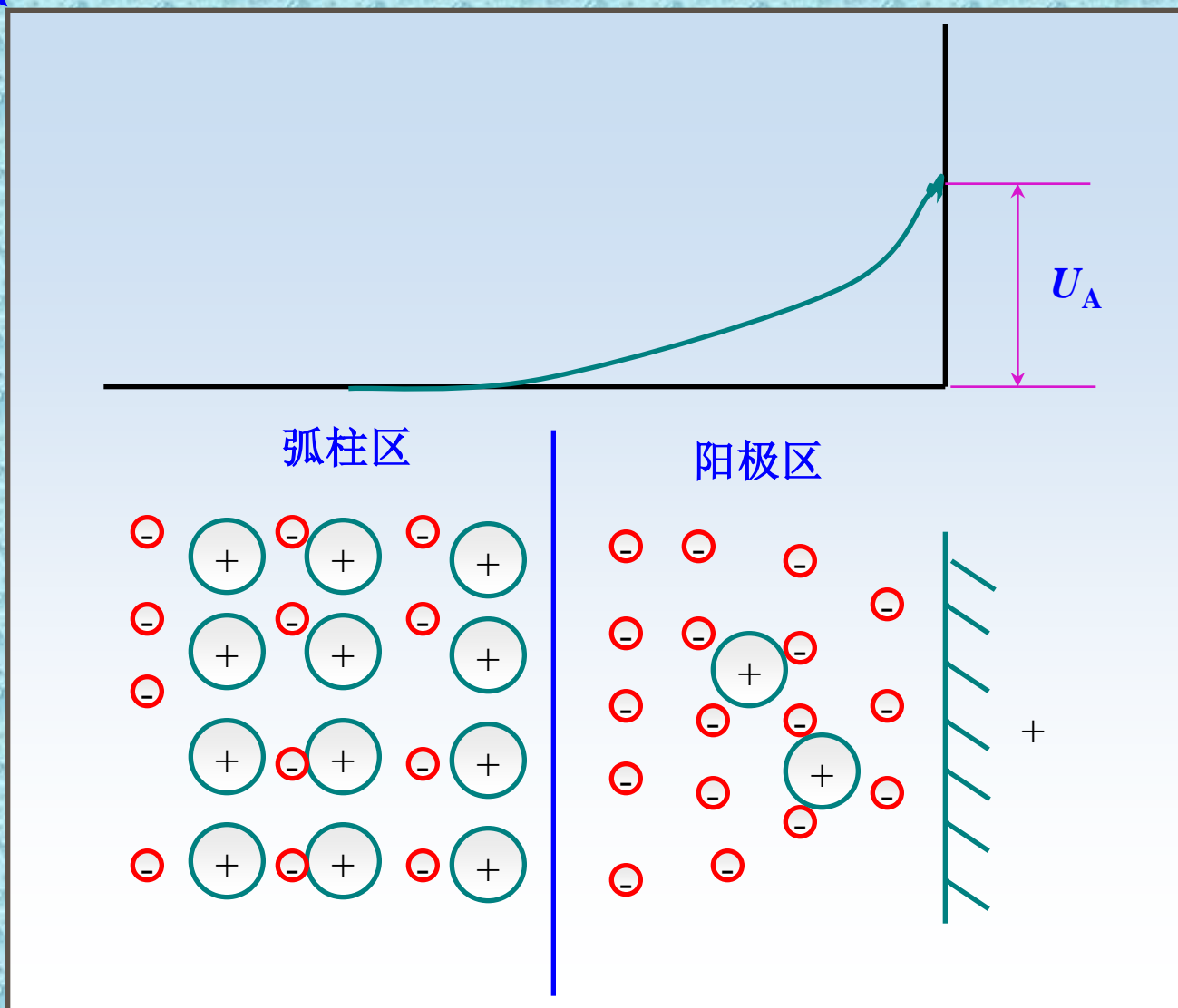
- 1) 产生条件： I 较大
- 2) 带电离子产生方式：热电离
- 3) 特点：

①阳极压降小，甚至为0 ②不存在阳极斑点。

3、电场作用下的电离

- 1) 产生条件： I 较小
- 2) 带电粒子的产生方式：热电离、场电离
- 3) 特点：

① 有阳极区，发生收缩 ② U_a 较大 ③ 有阳极斑点



阳极压降的形成

(四) 阴极斑点与阳极斑点

1、阴极斑点：

阴极上导通电流的一些灼亮的孤立点。

1) 产生条件：

- ① W、C阴极且I很小。
- ② Al、Fe、Cu作阴极。

2) 某点充当阴极斑点的条件：

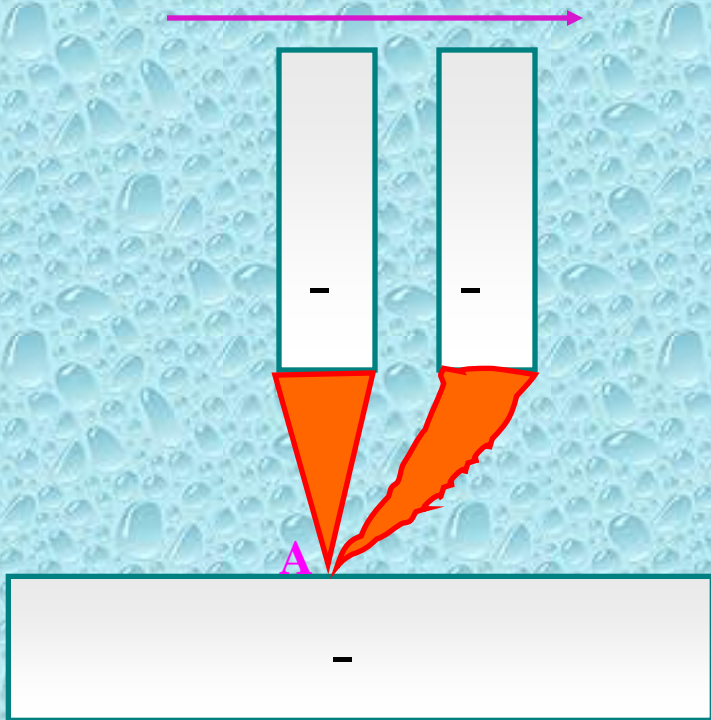
- ① 电弧通过该点时耗能最小。
- ② 该点容易发射电子。

3) 特点：

- ① 电流密度大、温度高。
- ② 跳跃性及粘着性。
- ③ 存在斑点力：蒸发反力、 A^+ 的撞击力。
- ④ 自动寻找氧化膜，该点对于铝、镁及其合金的焊接是非常重要的，见后面的阴极雾化作用。

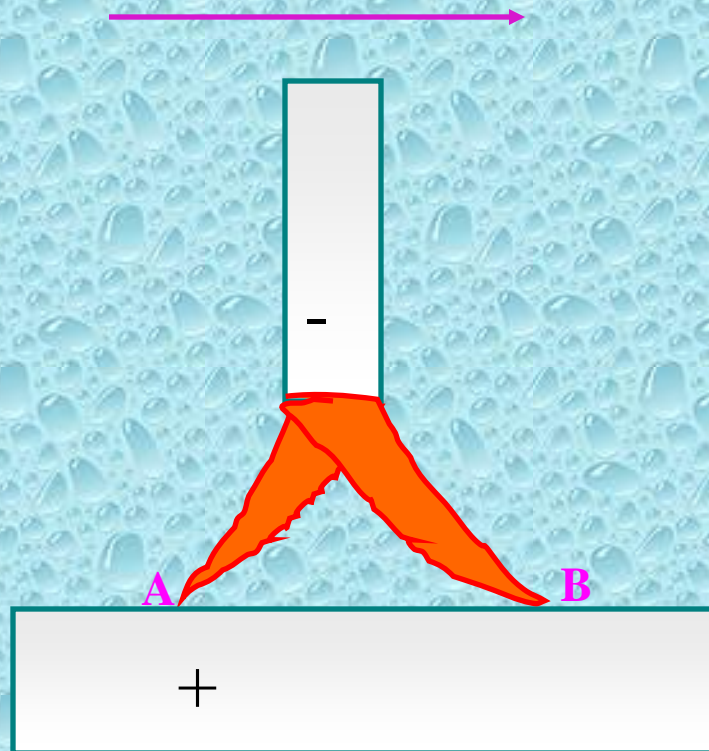
第一章

焊接方向



粘着性

焊接方向



跳跃性

2、阳极斑点

- 1) 产生条件： I 很小。
- 2) 充当阳极斑点的条件：
 - ① 通过该点导通电流时，耗能最小；
 - ② 易蒸发，产生金属蒸气。
- 3) 特点：
 - ① 电流密度大、温度高；
 - ② 粘着性、跳跃性；
 - ③ 避开氧化膜；
 - ④ 斑点力，阳极斑点力小于阴极斑点力。

四、最小电压原理

电流一定、周围条件一定时，稳定燃烧的电弧各导电区的半径（温度）应使电弧电场强度最小，即电弧电压最小。

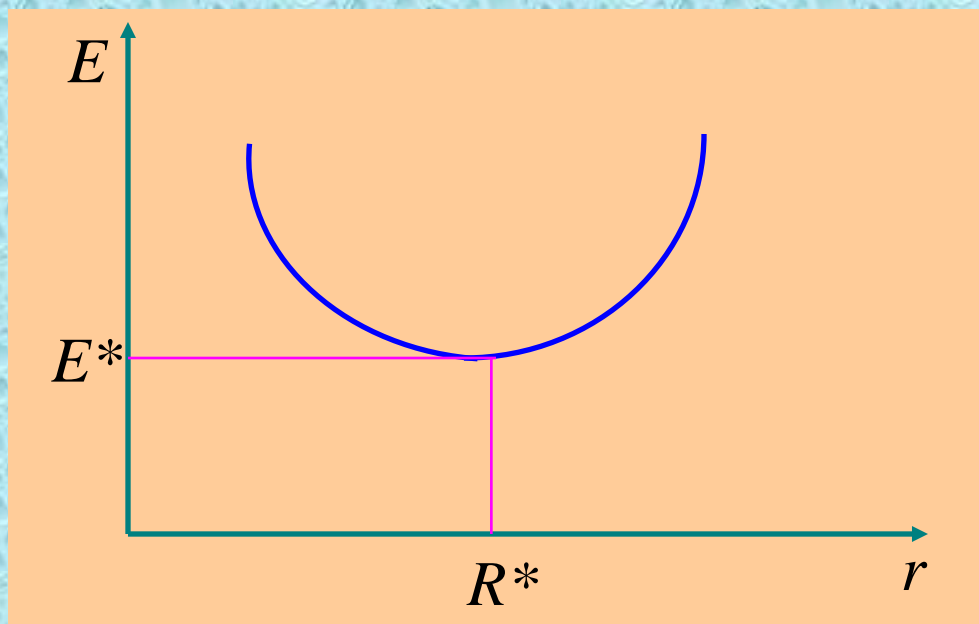
该原理有两个方面的含义：

1、电场强度是温度或电弧断面半径的函数

$$E = f(T)$$

$$E = f(r)$$

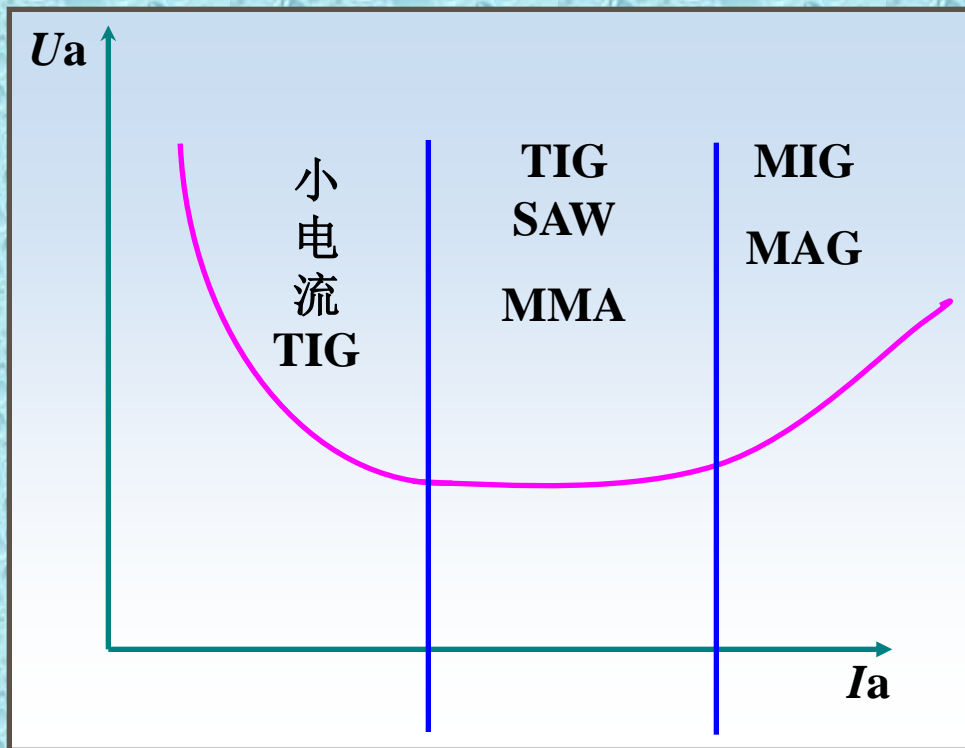
2、电弧半径稳定值 r^* 由 E 的最小值 E^* 确定



五、电弧的静特性

电弧稳定燃烧时， U_a 与 I_a 的关系称为电弧静特性。

- 下降区（负阻特性区）：电流密度不变
- 平特性区： E 不变
- 上升特性区：



影响因素：

- ①弧长
- ②气体介质、导热性、热分解性能
- ③气体介质的压力

§ 1-2 焊接电弧的产热及温度分布

一、焊接电弧的产热机构

(一) 弧柱的产热机构：电能→热能、机械能、光能

1、本质： A^+ 、 e 在电场作用下被加速、使其动能增大的过程。其宏观表现即为温度上升→产热
由于运动速度，自由程度不同， A^+ 、 e 得到的能量不同， T_{A^+} 、 T_e 、 T_A 有可能不同。

2、电子动能：
|| 定向运动动能— I_e
|| 散乱运动动能—热运动，表现为热能。

3、产热量： $P_c = I_a \times U_a$

主要用于散热损失—对流、幅射、传导。

4、影响因素：不仅取决于电流。

凡是影响 U_a 的因素均影响弧柱的产热。

1、本质：

产生电子、接受正离子的过程中有能量变化，这些能量的平衡结果就是产热，由三部分组成：①电子逸出阴极时消耗能量($-I \times U_w$)；②电子进入弧柱前被电场(E_k)加速得到一部分能量($+I a \times U_k$)；③电子进入弧柱时带走的能量($-I \times U_T$ ，温度等效电压)。

2、产热公式： $P_k = I \times (U_k - U_w - U_T)$

3、作用： 用于加热阴极。

(三) 阳极区的产热机构

1、本质：

接受电子、产生 A^+ 过程中伴随的能量转换，由三部分组成：① e 被 U_A 加速所得到的能量($+e U_A$)；②电子带来的逸出功($+I \times U_w$)；③电子带来的相当于弧柱温度那部分能量($+I \times U_w$)。

2、产热公式： $P_A = I \times (U_A + U_w + U_T)$

3、作用： 用于加热阳极。

二、焊接电弧的热效率及能量密度

(一) 电弧总产热:

$$P_a = P_C + P_A + P_K = I \times (U_C + U_K + U_A) = I_a \times U_a$$

(二) 有效功率、热效率系数:

1、有效功率: 用于加热工件和焊丝的功率 Q_E

2、热效率系数: $\eta = Q_E / P_a$

3、影响的因素:

①焊接方法: TIG焊低、MIG、SAW高

②焊接规范:

③外部条件:

(三) 能量密度:

1、单位有效加热面积上的热功率, 单位为 w/cm^2 。

2、功率密度越高 H/B 越大, 焊接变形及HAZ越小。

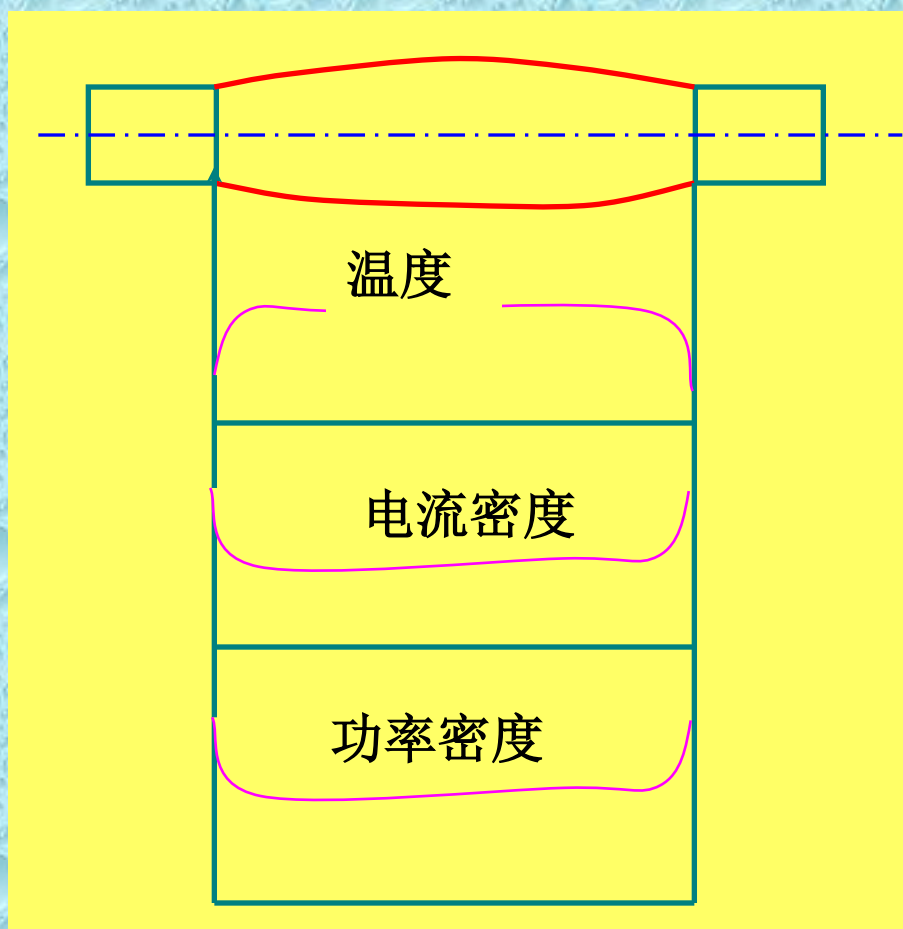
气焊	电弧焊	激光	电子束
1-10	10^2-10^4	10^6-10^7	10^6-10^8

三、电弧的温度分布

(一) 电弧的轴向温度分布:

影响温度分布的因素:

- ①功率密度; ②电极材料; ③高熔点氧化物

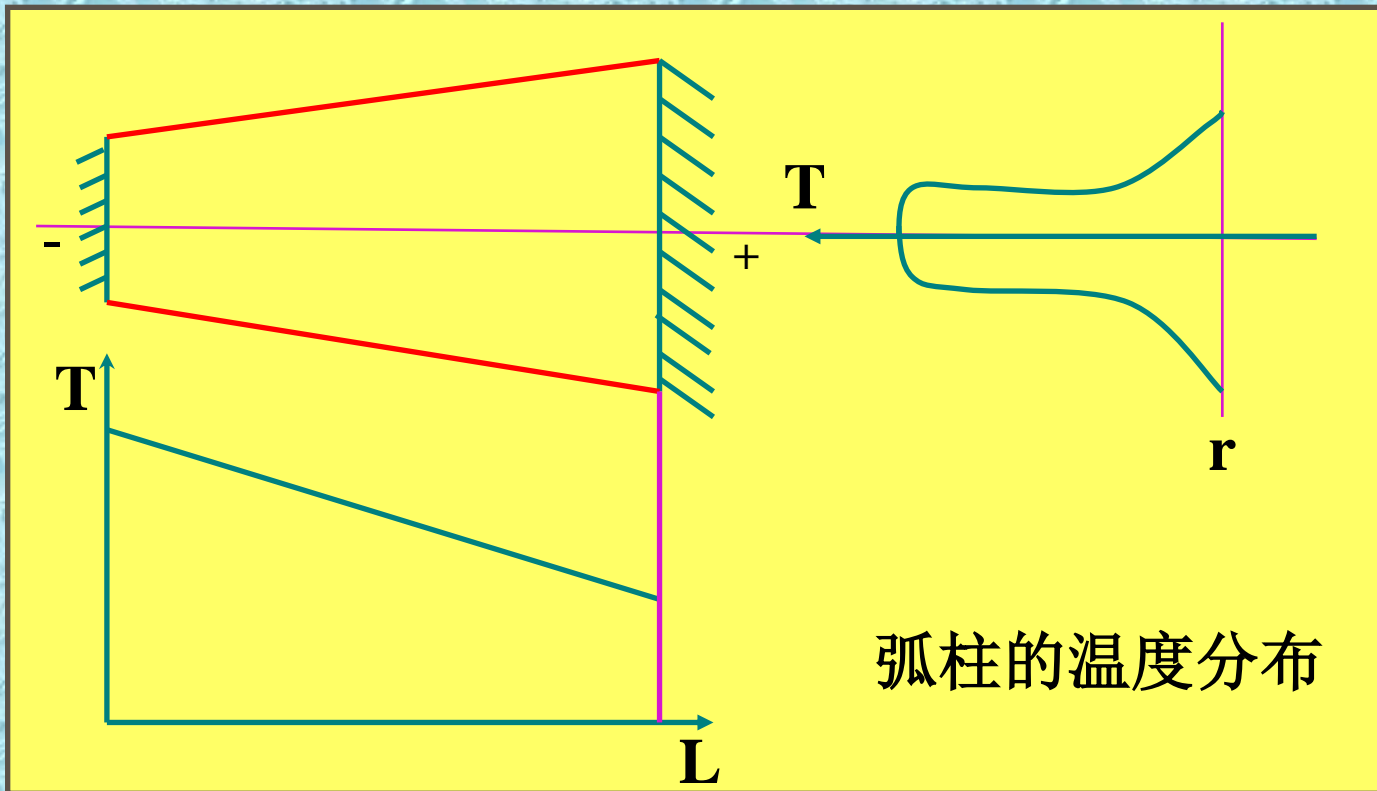


(二) 弧柱温度分布

1、轴向:

- 1) 二电极尺寸相等时, 轴向温度分布均匀;
- 2) 二电极尺寸不等, 轴向温度分布不均匀, 靠近尺寸较小的一端, 温度较高。

2、径向: 中心轴附近温度高, 周边低。



(三) 影响弧柱温度的因素

- 1、电流： $I_a \uparrow$ $T \uparrow$
- 2、气体介质：导热系数 \uparrow ，热解离 \uparrow $T \uparrow$
- 3、电极材料：
- 4、拘束度：越大，电弧温度越高

§ 1-3 电弧力及其影响因素

一、电弧力

1、电磁收缩力:

通过电弧（熔滴）的电流线之间的相互吸引力，对电弧或熔滴起着压缩作用，该力被称为电磁收缩力。

1) 圆柱形电弧:

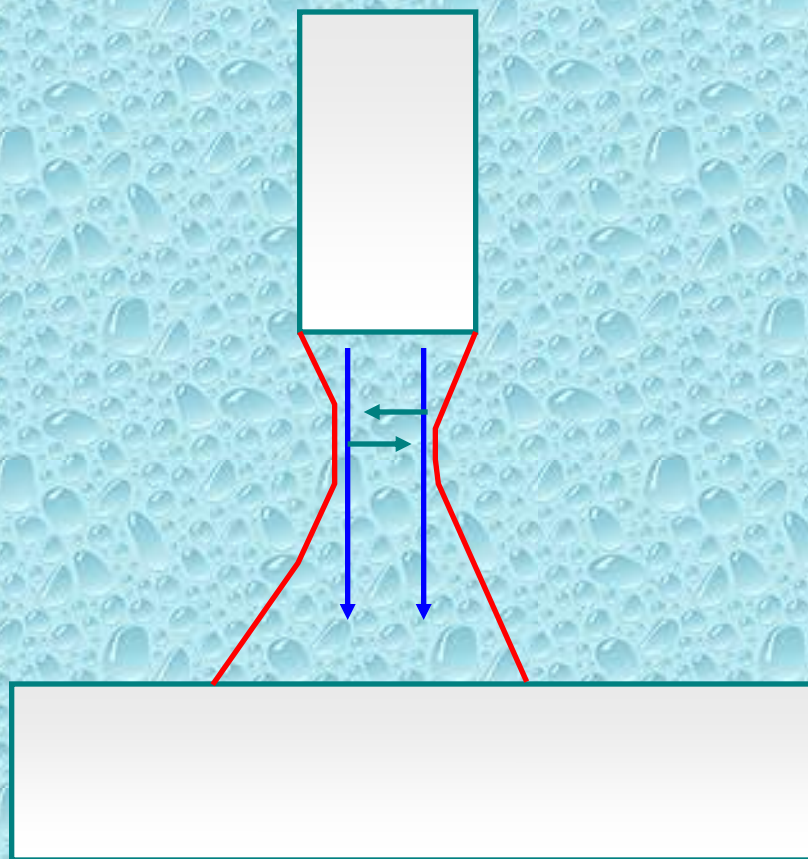
$$\text{电弧压力 } P_r = k \frac{I^2}{\pi R^4} (R^2 - r^2) \quad \text{电弧推力 } F = \frac{k}{2} I^2$$

式中： I -电流， R -电弧半径， k -系数

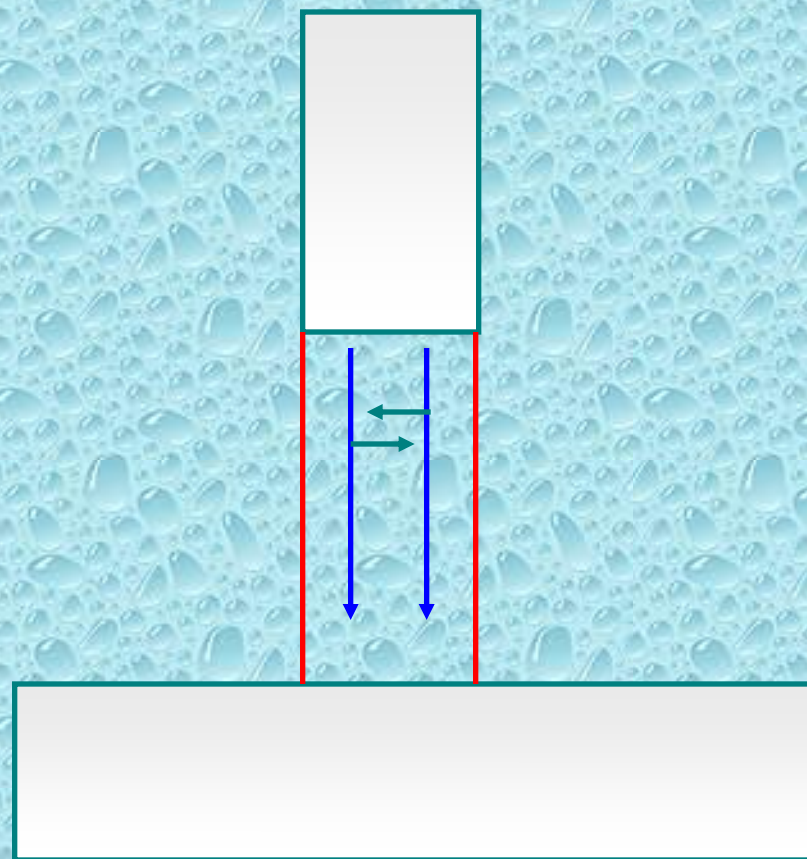
流体中压力各个方向相同，因此作用于焊条及工作上的轴向力为：

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

第一章



流态导体中电磁收缩力的影响



柱形导体中的电磁收缩力

2) 锥形电弧:

$$压力 p = \frac{2I^2}{\pi L^2 (1 - \cos \theta^2)} \log\left(\frac{\cos \varphi / 2}{\cos \theta / 2}\right)$$

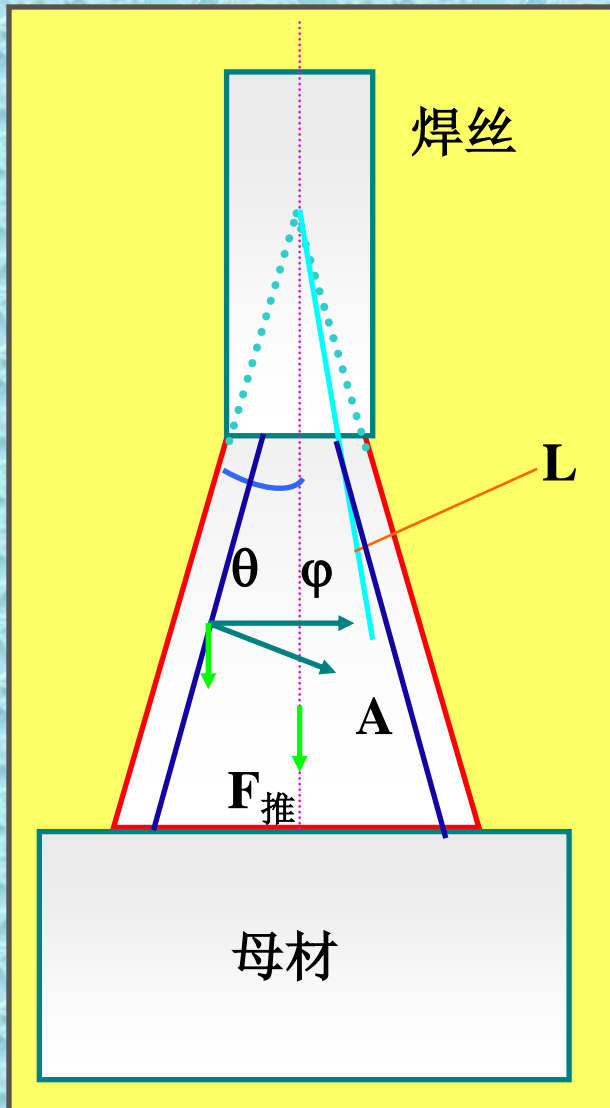
锥形电弧中沿轴向存在压力差，导致一轴向推力：

$$F_{推} = KI^2 \log\left(\frac{R_b}{R_a}\right)$$

式中： I -电流；

R_b -锥形弧柱下底面半径；

R_a -锥形弧柱上底面半径。



2、等离子流力

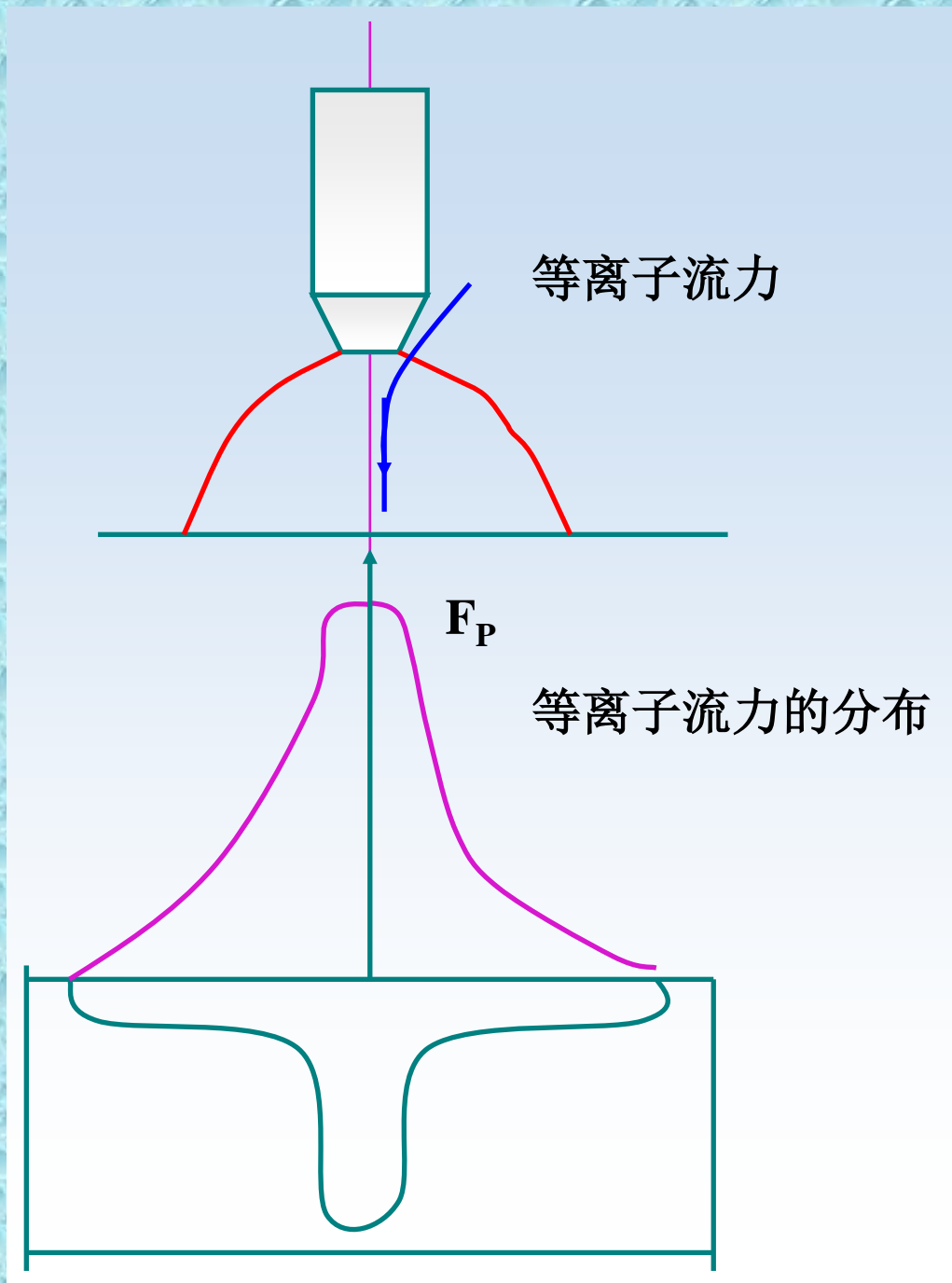
$F_{推}$ 引起的高温气体流(等离子流)所形成的力叫等离子流力。

- 作用:

- 1) 促进熔滴过渡;
- 2) 导致指状熔深。

- 分布:

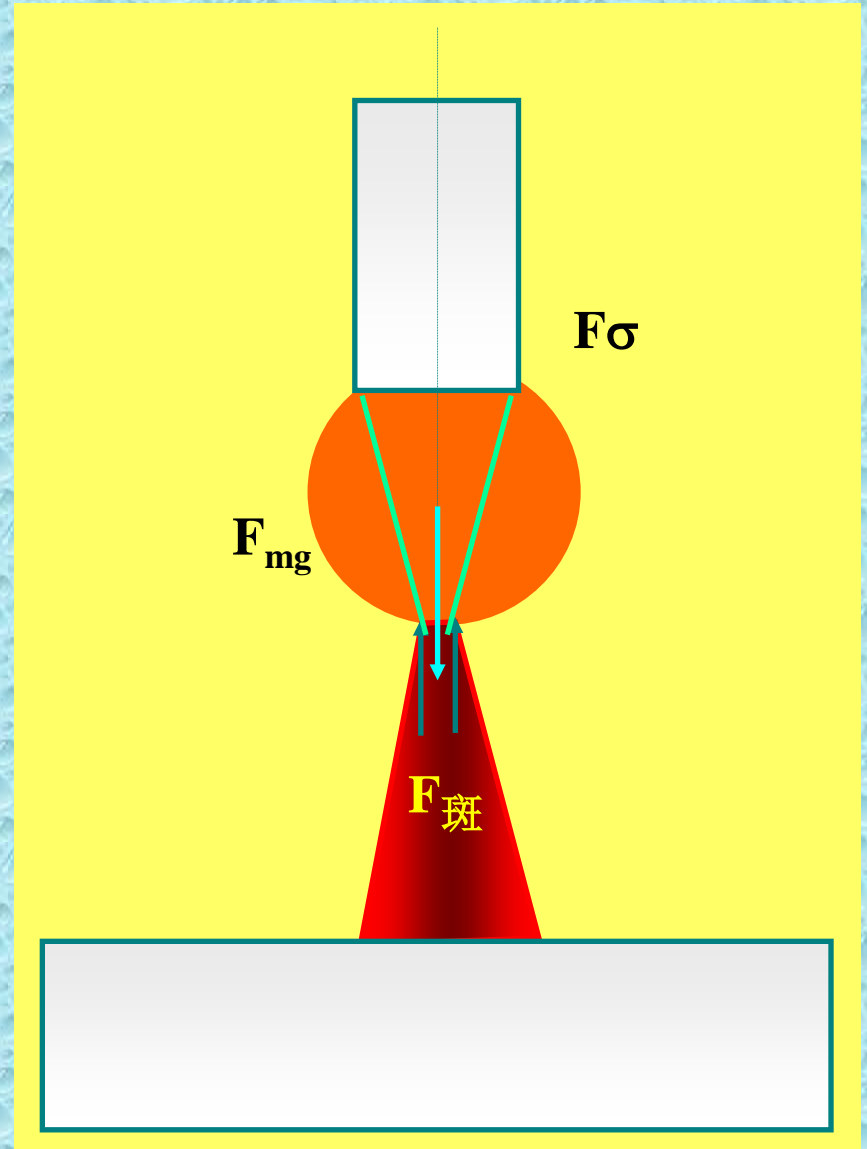
轴线处大, 周边小



3、斑点力

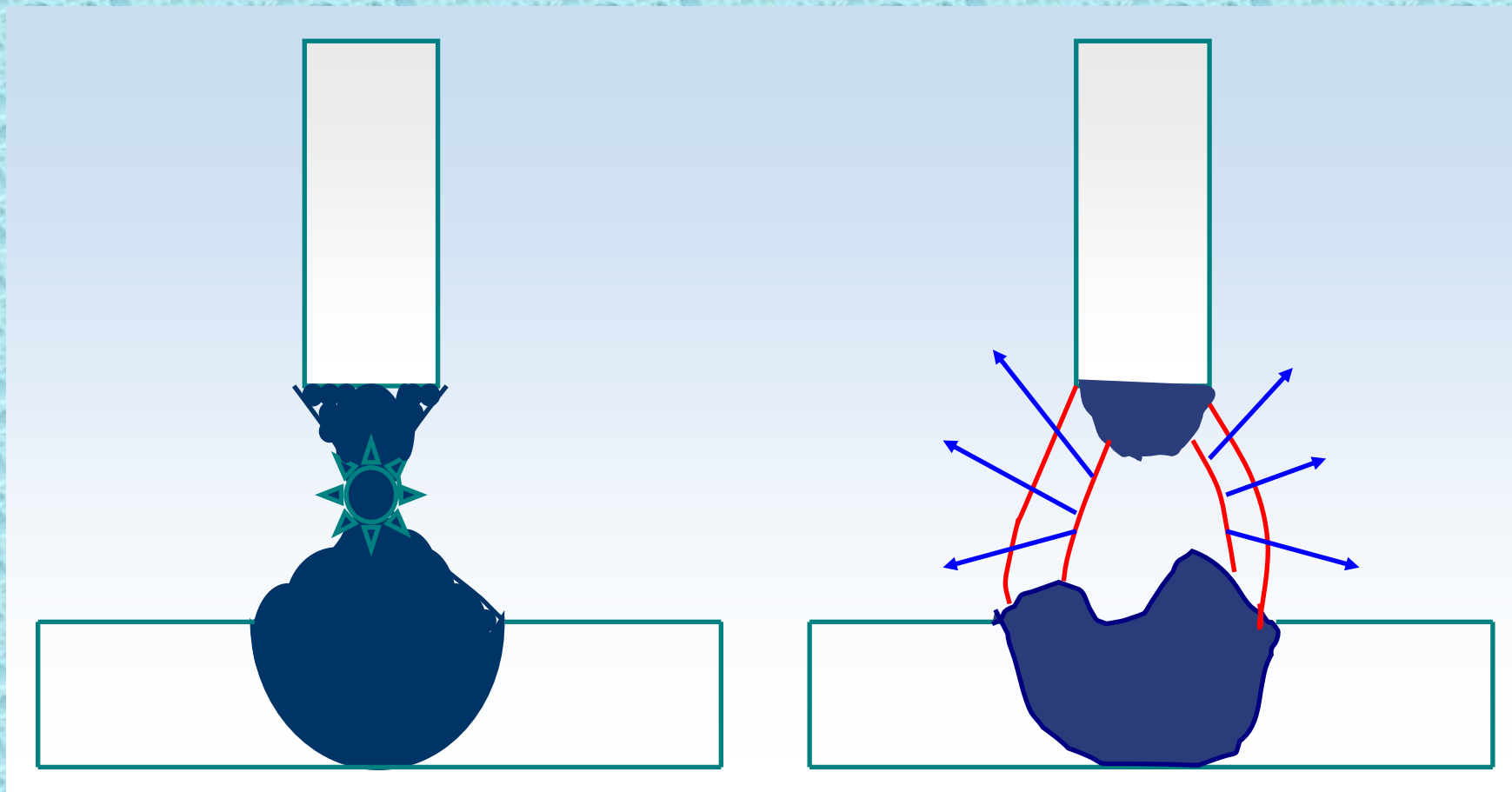
由以下三部分组成, 阴极斑点力大于阳极斑点力。

- 1) 带电粒子撞击力:
阴: A^+ 撞击, 大
阳: e 撞击, 小
- 2) 蒸发反力:
阴: T 高, 力大
阳: T 低力小
- 3) 电磁收缩力:
阴: 大
阳: 小



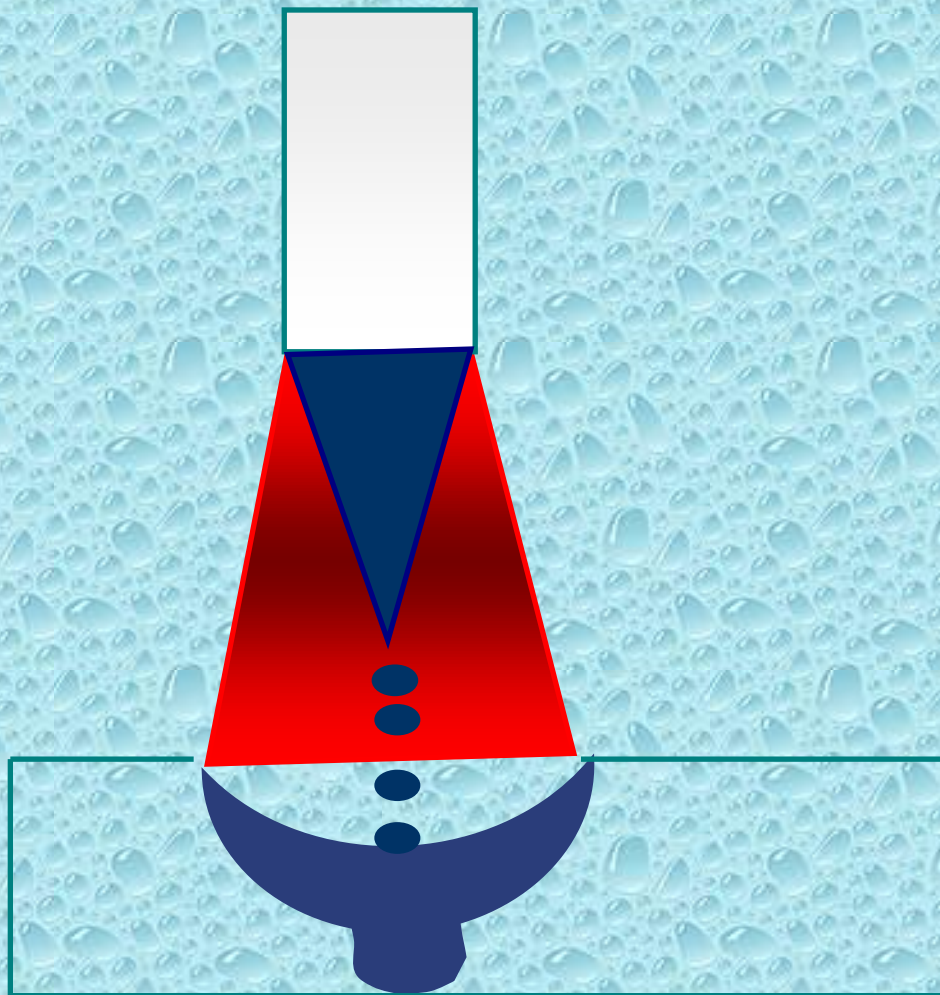
4、爆破力

仅产生于短路过渡中，短路小桥汽化爆断所产生的力。



5、细熔滴的冲击力

仅产生于MIG焊射流过渡，熔滴以很大的加速度冲击熔池，形成冲击力。



二、影响因素

1、气体介质：

导热好，易解离的气体，电弧力，特别是斑点力较大。

2、电弧电流及电压：

电流增大，电弧力增大；
电压增大，电弧力减小。

3、W极或焊丝直径：

直径越小，力越大

4、极性：

TIG焊时，DCSP大；而MIG焊正好相反。

§ 1-4 交流电弧的特点

一、交流电弧：

电流为50Hz正弧波的电弧被称为交流电弧。
方波交流电弧。

1、特点：

- 1) 周期性地过0点；
- 2) 再引燃。

(再引燃电压 U_r ：再引燃所需的电压。小于引燃电压。)

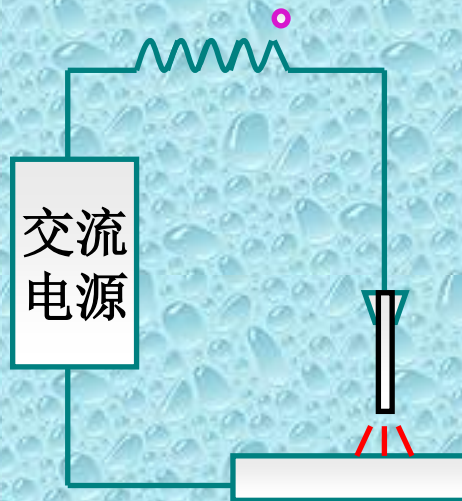
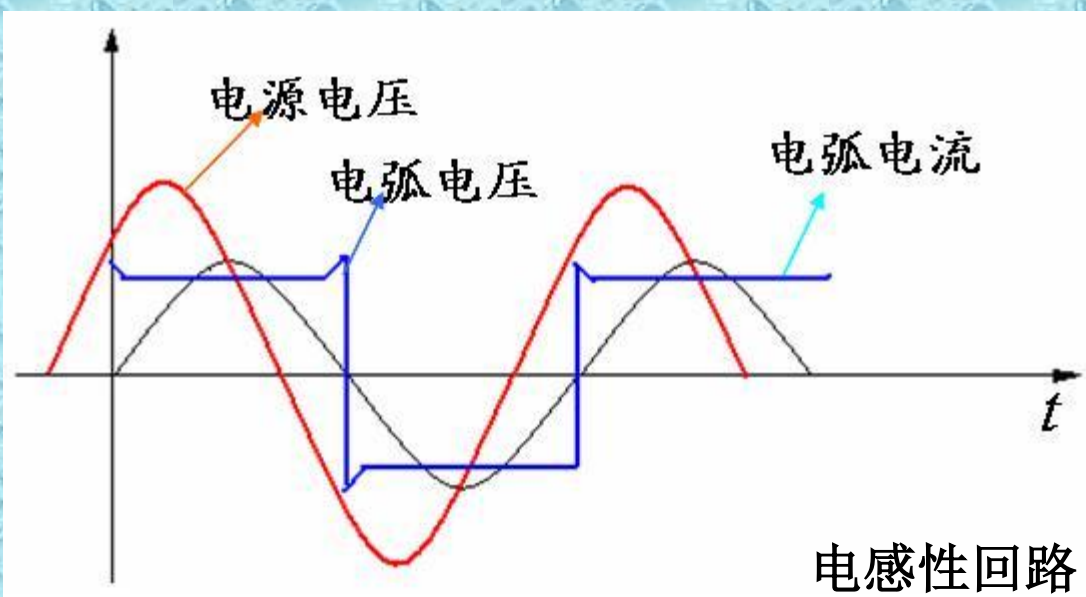
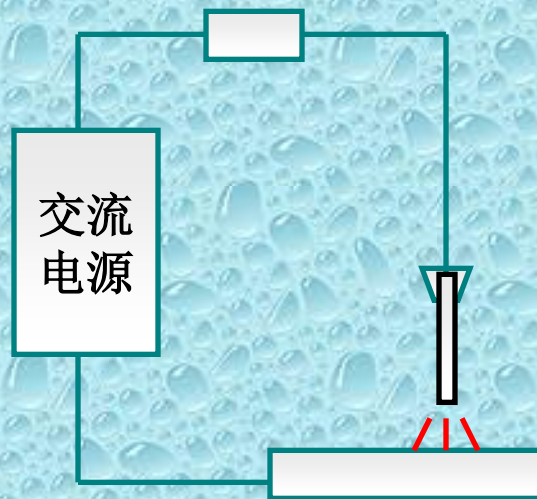
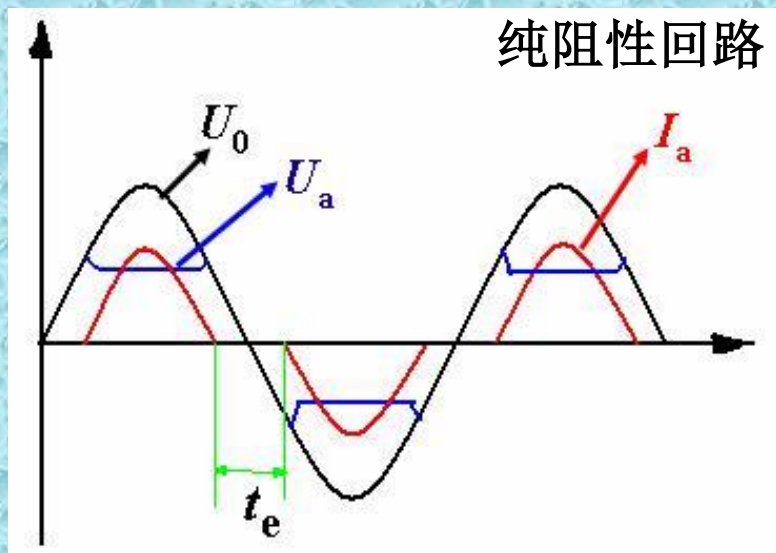
2、交流电弧的燃烧过程：

- 1) 纯阻性回路：电弧—阻性元件，因此 μ_a 、 i_a 同相位，
有熄弧时间 t_e ，当 t_e 较大时，难以引燃。
- 2) 感性回路：利用电感的续流，蓄能作用，可将 t_e 降为0。

3、交流电弧稳定燃烧的条件：

在回路中串一合适的电感。

第一章



二、交流电弧的加热及力的特点

1、加热

P_a 不断变化，对工件的加热效果用有效热功率表示。

$$W_a = \delta U_a I_a$$

δ -波形修正系数 U_a 、 I_a - 电压及电流有效值

2、电弧力的特点

介于DCSP与DCRP之间，不易导致指状熔深。

3、保护

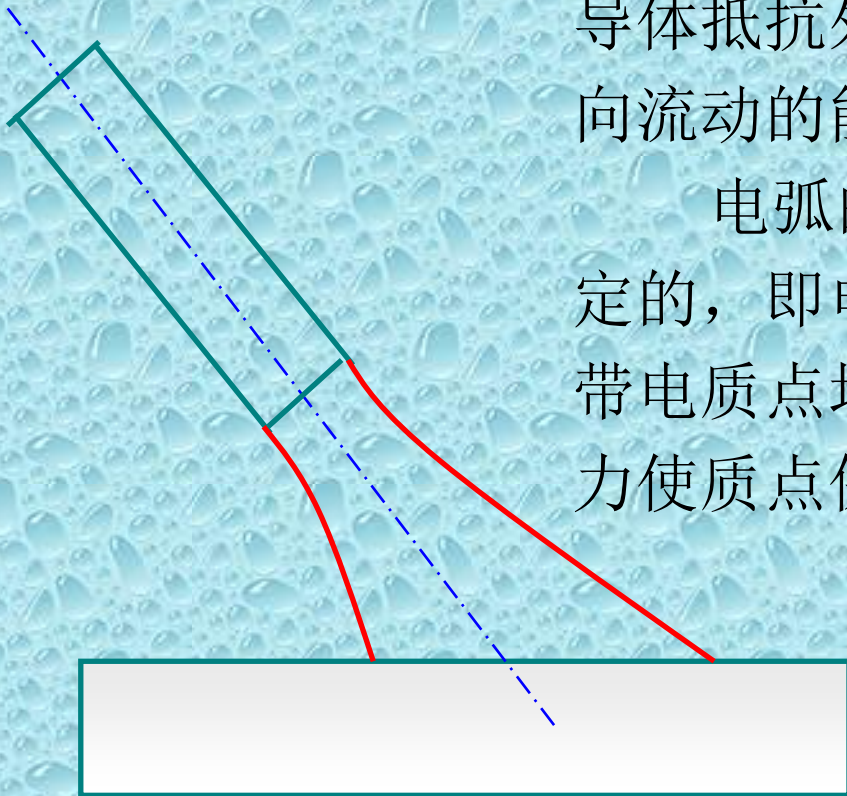
在相同的条件下，保护效果较差。

§ 1-5 刚直性及磁偏吹

一、刚直性

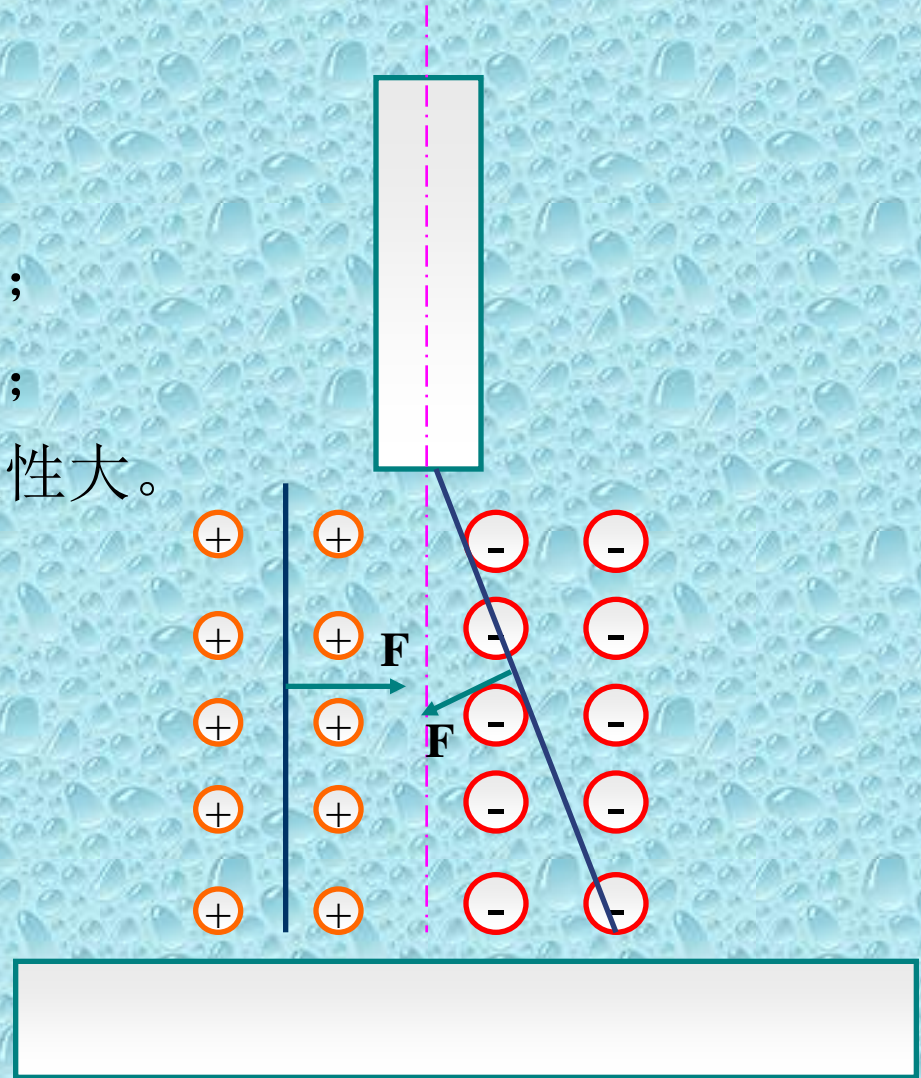
所谓刚直性是指电弧作为一柔软的导体抵抗外界干扰，力求保持电流沿轴向流动的能力。

电弧的刚直性是由电弧的电磁场决定的，即电磁收缩力决定的。各运动的带电质点均受到指向焊条中心的力，该力使质点保持沿轴线流动。



* 影响刚直性的因素:

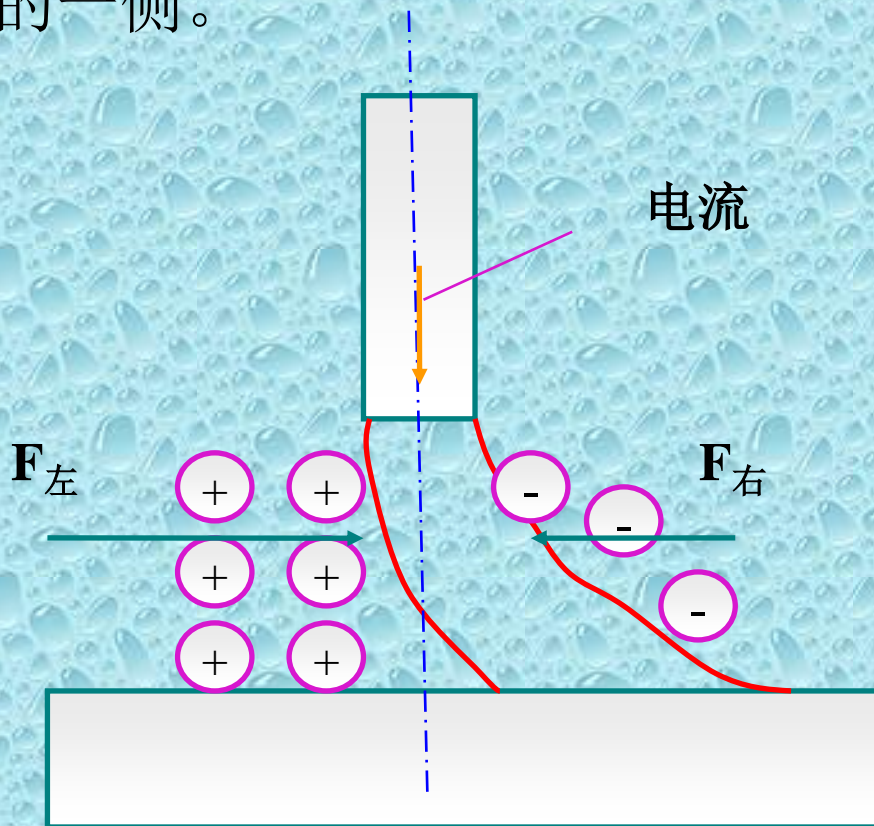
- ① 电流越大，刚直性越大；
- ② 拘束度越大，刚直性大；
- ③ 热解离导热性大 刚直性大。



自身磁场对刚直性的影响

二、磁偏吹

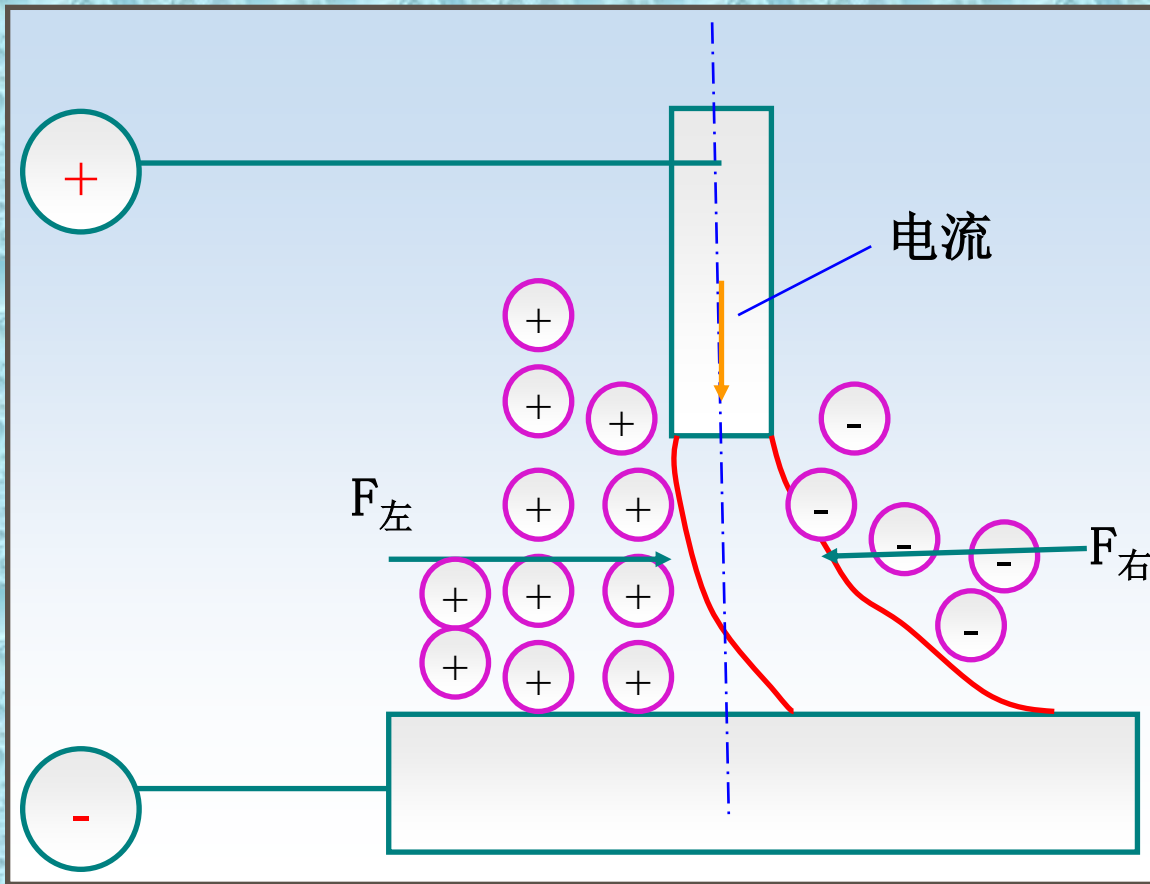
- 1、偏吹：电弧因周围磁力线不对称而偏向一侧的现象。
偏向：磁力线疏的一侧。



磁偏吹

2、引起磁偏吹的原因：

- 1) 导线接法不合适
- 2) 铁磁性物质
- 3) 交流电弧的磁偏吹较较小



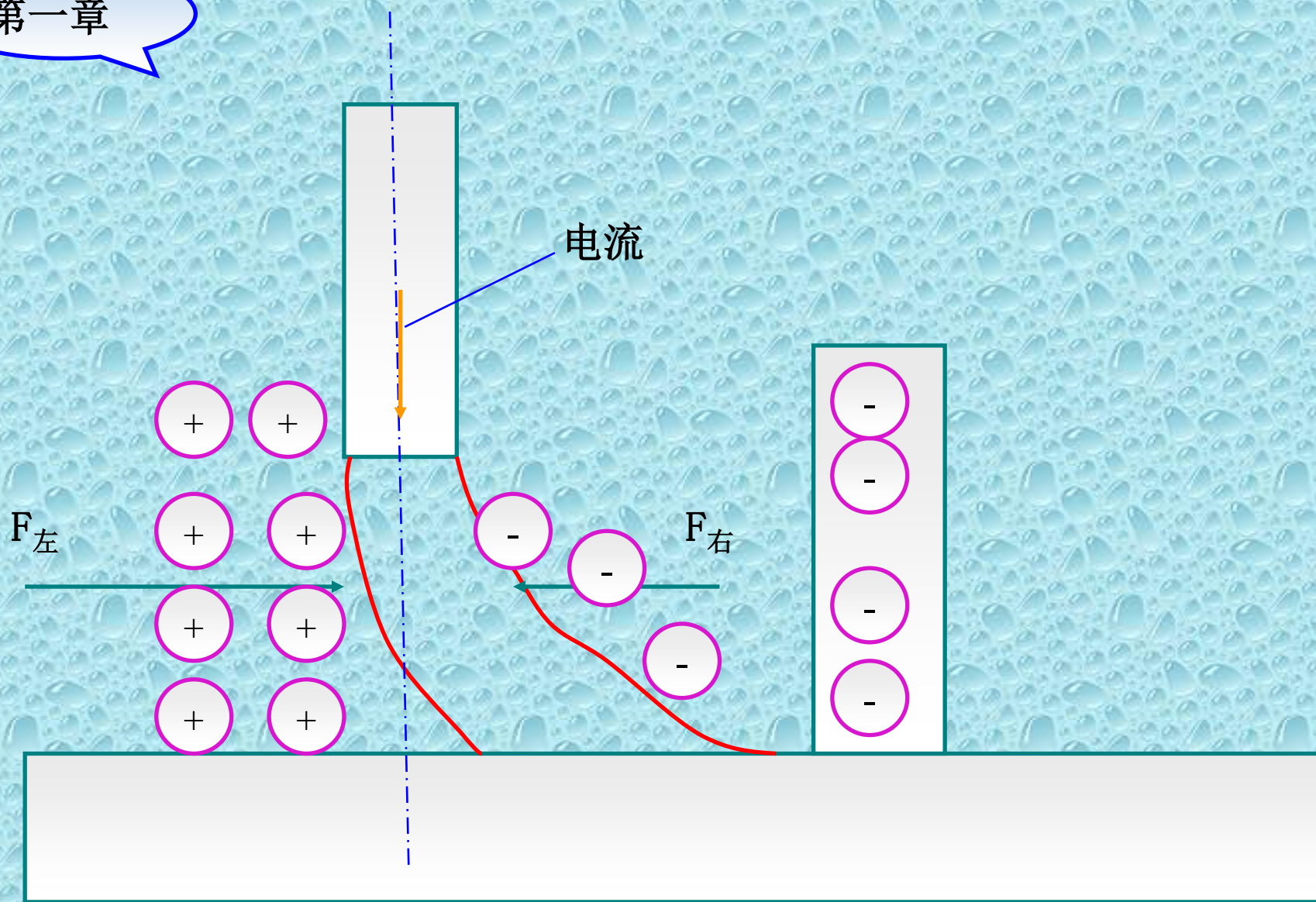
接线位置引起的磁偏吹

原因：

(1) 涡流，
涡流磁场抵消
原磁场。

(2) 电弧偏
吹运动为机械
运动，而交流
电弧的不均匀
磁场以50Hz的
频率变化。

第一章



磁性物质引起的磁偏吹