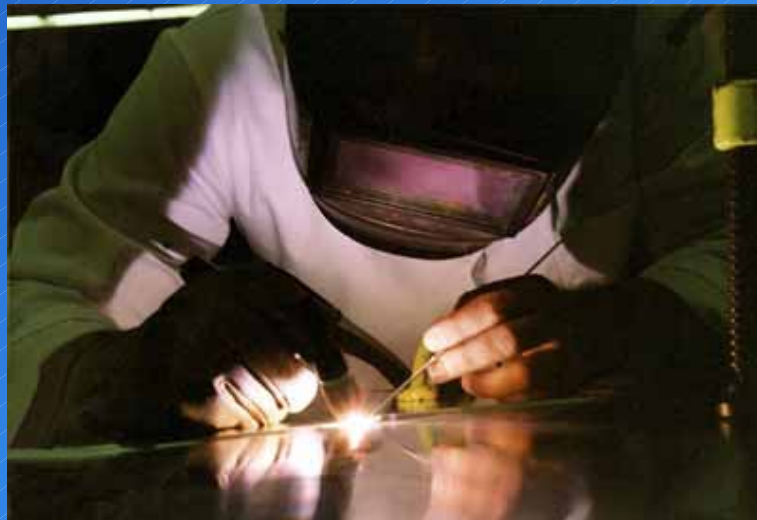


# 《焊接过程建模基础》

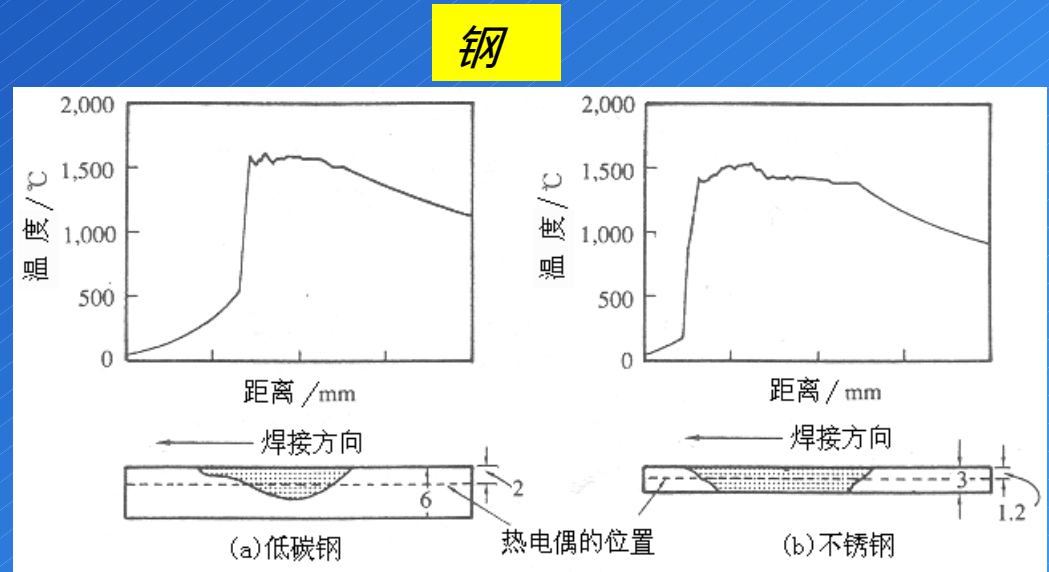
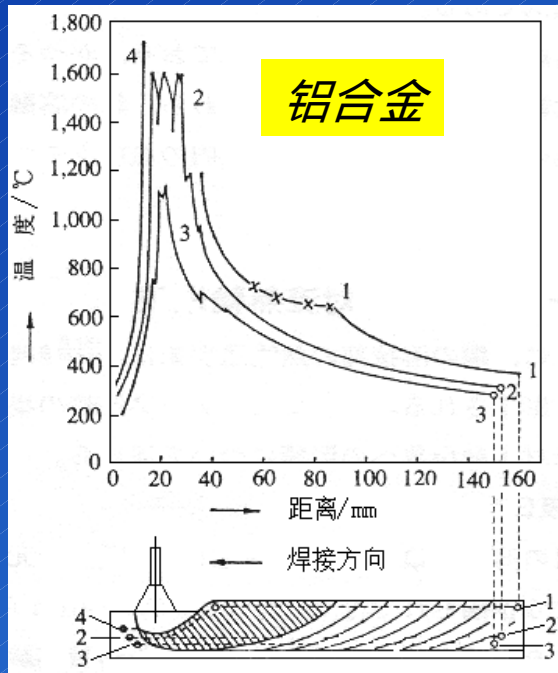
---

## 焊接电弧物理 Welding Arc Physics

林三宝 博士  
2006年2月20日



# 母材的熔化热和温度分布



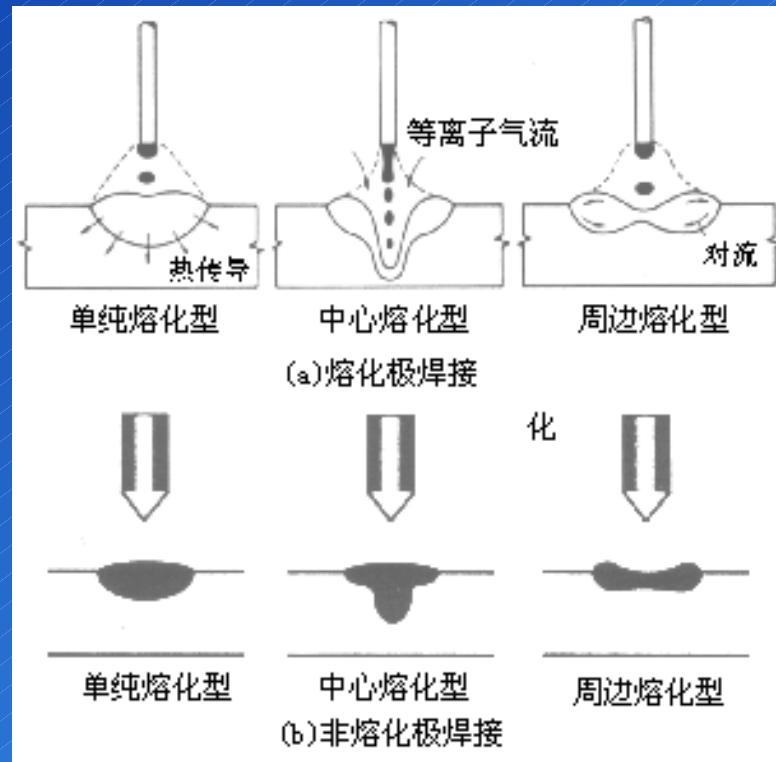
- 铝合金熔池表面的温度远高于材料的熔点；
- 钢材料熔池金属过热程度较低，温度值比较接近于熔点温度；

# 母材熔化的断面形状

---

- 母材的熔化形态由母材的热物理参数(比热、热传导率等)、母材的形状、焊接速度等决定
- 受到电弧对母材的热输入量及电弧燃烧形态的影响
- 理论计算所形成的焊缝断面形状是呈半圆形的
- 实际焊接中得到的焊缝断面形状是多种多样的，依据焊接条件(弧长、电流、速度)、焊丝直径、熔滴过渡形态等而有显著变化。

# 母材熔化的断面形状

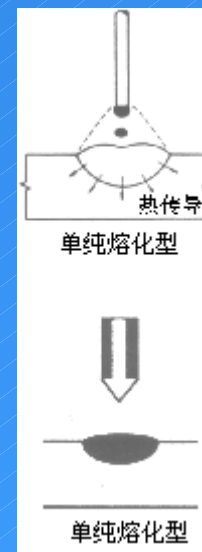


- 单纯熔化型
- 中心熔化型
- 周边熔化型

# 母材熔化的断面形状

## 单纯熔化型(热传导型熔化)

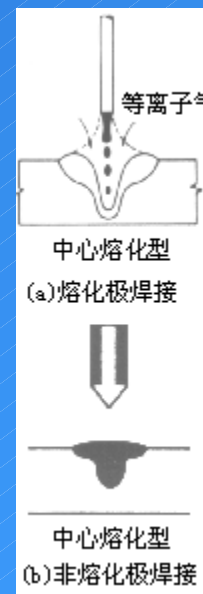
- 常见于SMAW及TIG焊中
- 在GMAW中，采用小热输入的短路过渡
- 熔池中熔化金属的对流比较自由，热量通过熔池和固体金属的界面均匀流出
- 呈现半圆形



# 母材熔化的断面形状

## 中心熔化型

- 与周围区域相比，电弧正下方产生了很深的熔化
- 产生在细丝大电流焊接中
- 源于电弧力或等离子气流对熔池的挖掘作用



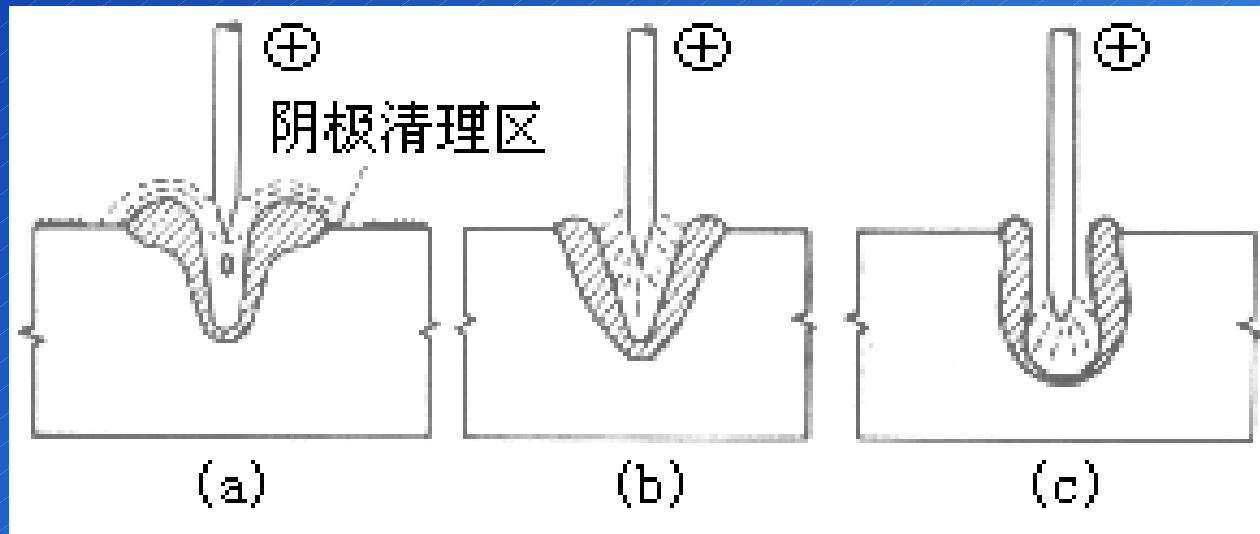
# 母材熔化的断面形状

## 周边熔化型

- 周边区的熔化比中心区深
- 熔池内金属向外侧流动(如图中箭头指示)，从电弧正下方进入的热量通过熔化金属的对流被逐渐传送到周边区，促进周边区的熔化
- 电弧较长或焊接速度较慢时



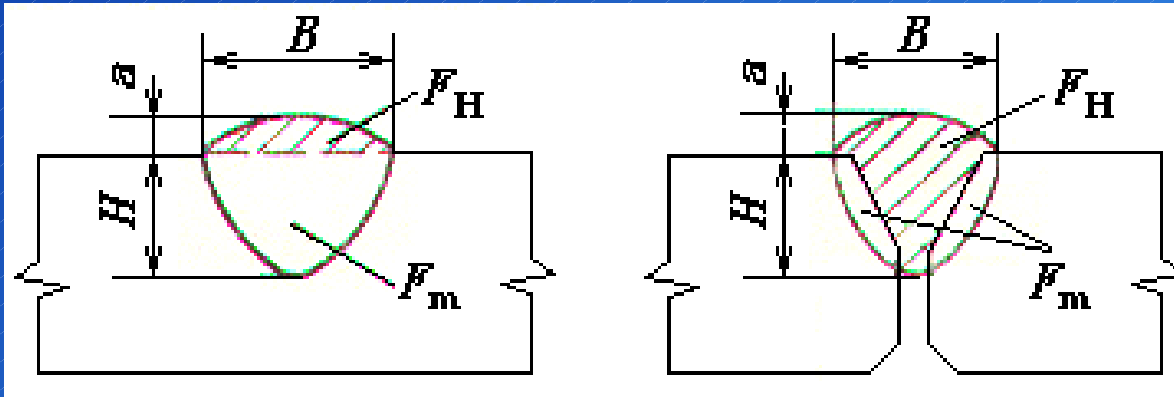
# MIG焊的熔池形状



- 指状熔深：等离子流力的挖掘作用导致
- 圆形熔深：CO<sub>2</sub>焊接，SAW焊接
- 梨形熔深：CO<sub>2</sub>

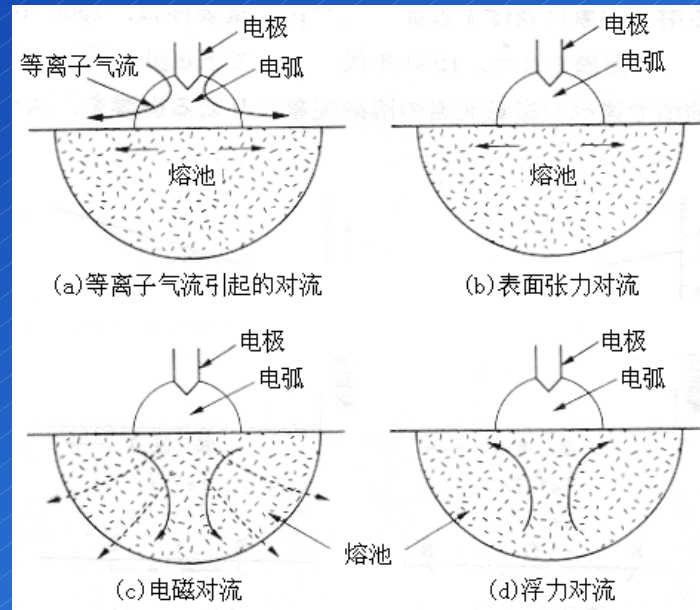


# 焊缝形状尺寸



- 成形系数
- 深宽比(Depth to width ratio)
- 余高
  - 可避免熔池金属凝固收缩时形成缺陷，也可增加焊缝承载能力
  - 余高过大将引起应力集中或降低抗疲劳强度

# 熔池金属的对流驱动力



- 等离子气流引起的对流
- 表面张力流
- 电子对流
- 浮力对流

# 熔池金属的对流驱动力

---

- 等离子气流作用下产生的熔池金属的对流
  - 等离子气流以压力的形式作用于熔池，使熔池的中心区出现凹陷
  - 从熔池的中心区向周边区流动，把熔池表面从中心区从周边区拉伸
  - 对熔池表面金属形成从熔池中心向熔池周边区流动。
- 表面张力流
  - 由于熔池表面上的表面张力差产生的对流
  - 流动的方向是从表面张力低的部分流向表面张力高的部分
  - 熔化金属的表面张力依赖于温度值
  - 温度差使得熔池表面的各部位出现了表面张力差

# 熔池金属的对流驱动力

---

## 电磁对流

- 熔池内部流动的电流产生的电磁力所引起的对流
- 从电弧进入熔池的电流在电弧正下方有着较高的电流密度，从熔池到母材内部，电流密度是逐渐降低的。
- 电流与其自身产生的磁场之间相互作用而产生了电磁力，该电磁力指向电流发散方向，由此产生了电磁对流
- 向着电流的发散方向即从电弧正下方熔池中心区向熔池底部流动

# 熔池金属的对流驱动力

---

## 浮力流

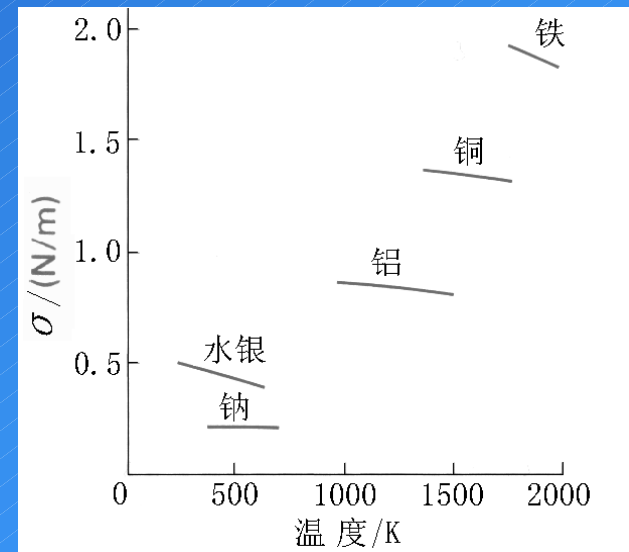
- 熔池内部熔化金属密度差引起的对流
- 熔池内部的温度是从电弧正下方的高温区向固液界面处的熔点温度变化着的，形成了熔池内部的空间温度场。
- 液态金属是温度越高密度越低，密度高的部分受到浮力的作用向着重力的反方向运动。

# 液态金属的表面张力

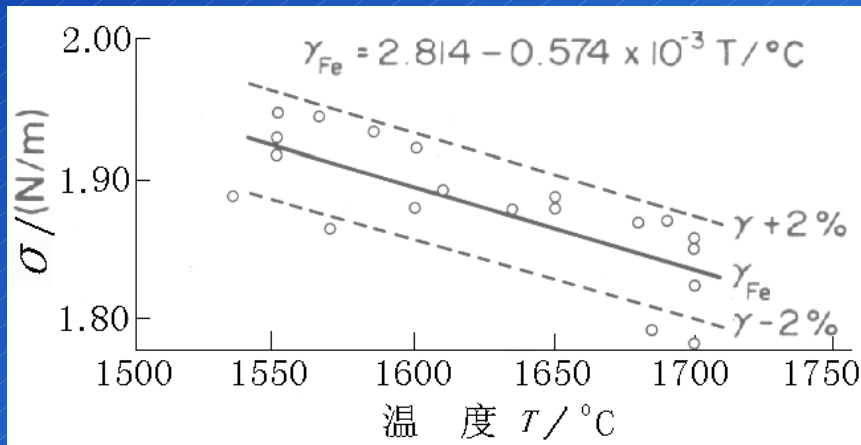
- 表面张力与熔滴过渡、熔池形成及其内部的流动都有紧密的联系
- 纯金属的表面张力及密度随温度的升高而减小
- 测定可以采用悬浮液滴法

对于质量为  $m$  的液滴，其表面张力  $\sigma$  与自身固有频率  $\omega$  之间有下列关系：

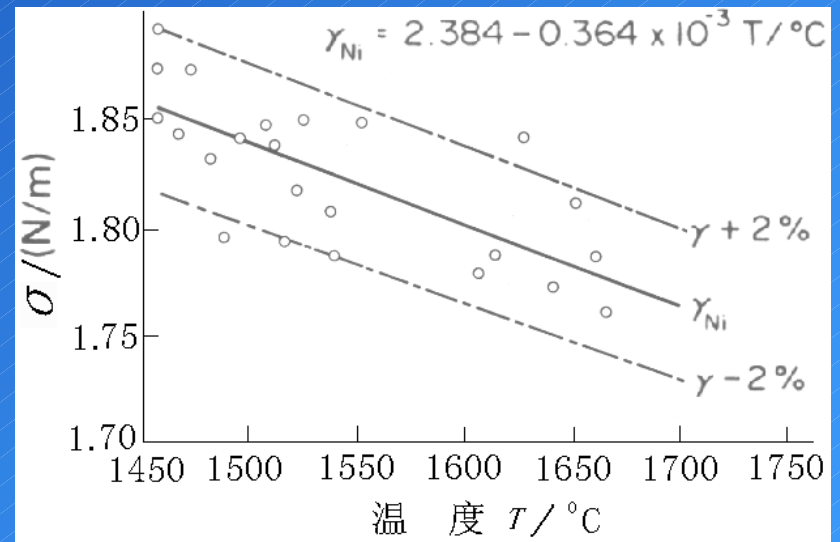
$$\sigma = \frac{3}{8} \pi m \omega^2$$



# 液态金属的表面张力



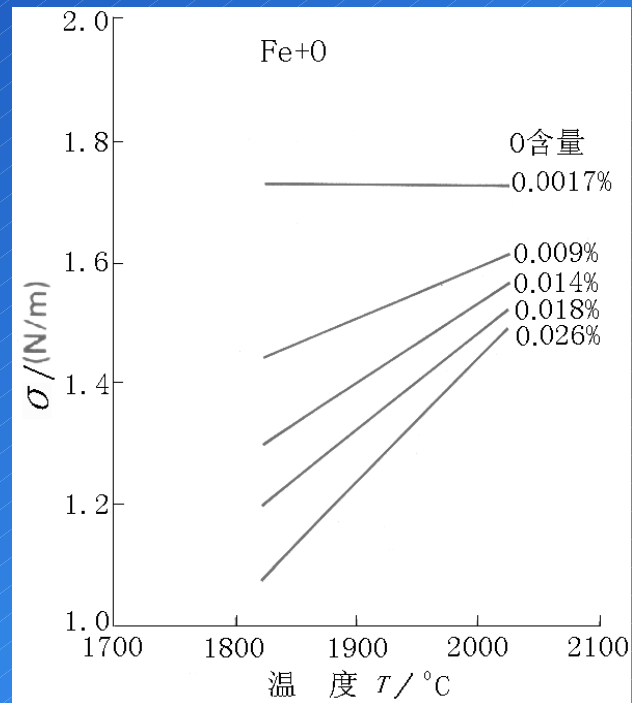
纯铁



纯镍

# 微量元素对表面张力的影响

- 有表面活性元素存在时，表面张力的温度系数却会变为正值
- O S等





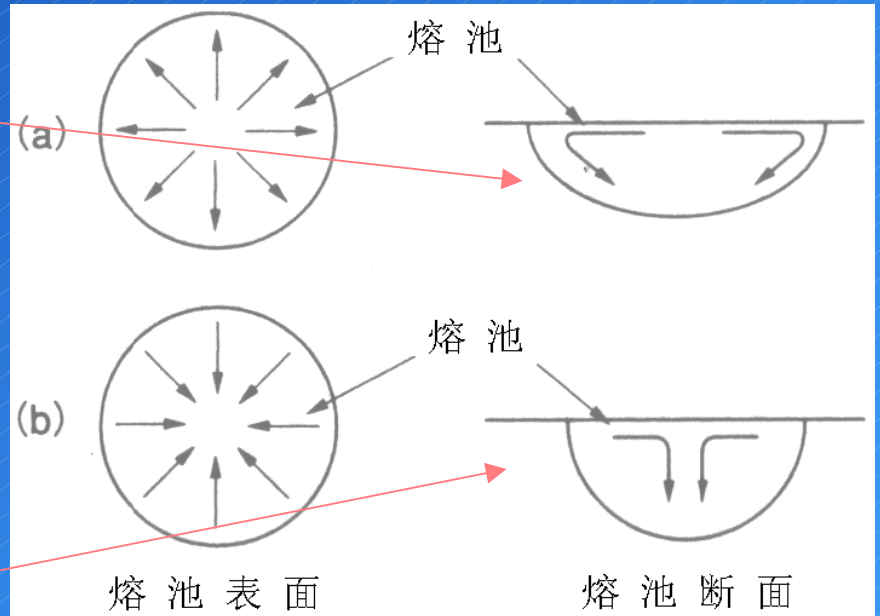
# 微量元素对熔池现象的影响

---

- 表现在TIG焊接中，在熔化极电弧焊中未发现上述现象。
- 母材中微量元素的差异对电弧焊中母材的熔化现象构成影响
- 当氧、硫等第Ⅵ族的元素及卤族元素存在时可以增加熔深
- 在奥氏体不锈钢中加入硫、硒(Se)、碲(Te)、氧、铈(Ce)元素，其中硫、硒、碲、氧含量的增加，能够减少熔宽 / 熔深比，即熔深增加

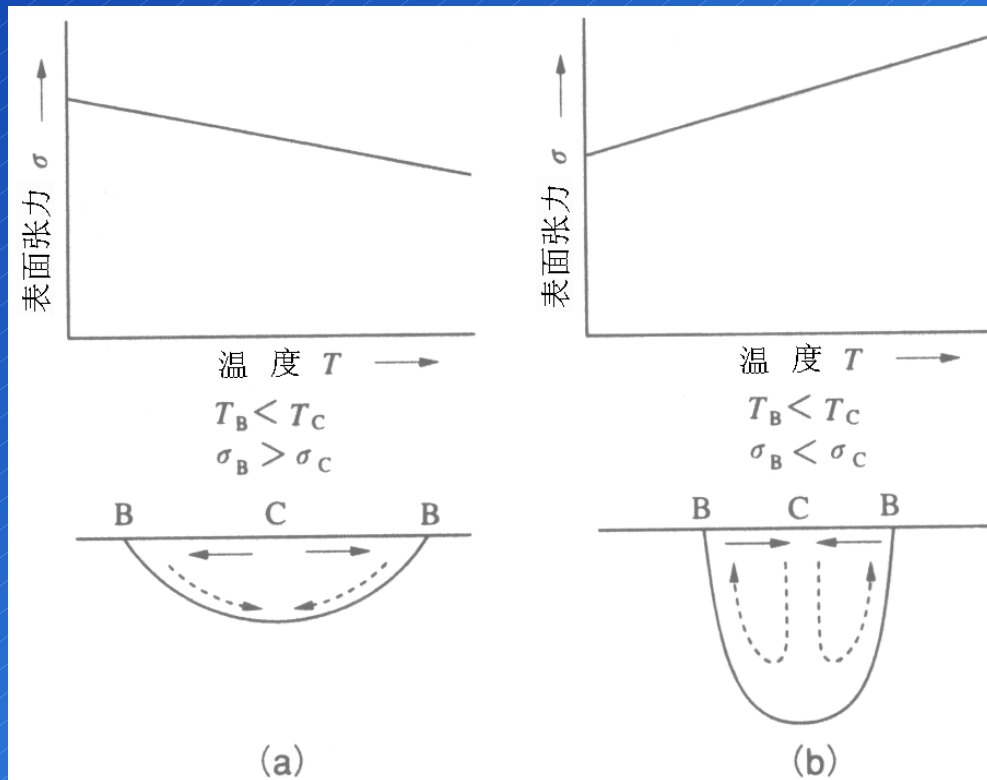
# 焊接熔池表面张力流的研究

当熔池表面流从熔池中心区向周边区流动时，得到的熔深较浅



是熔池表面流从熔池周边向中心区流动，这种情况下得到的熔深较深

# 焊接熔池表面张力流的研究

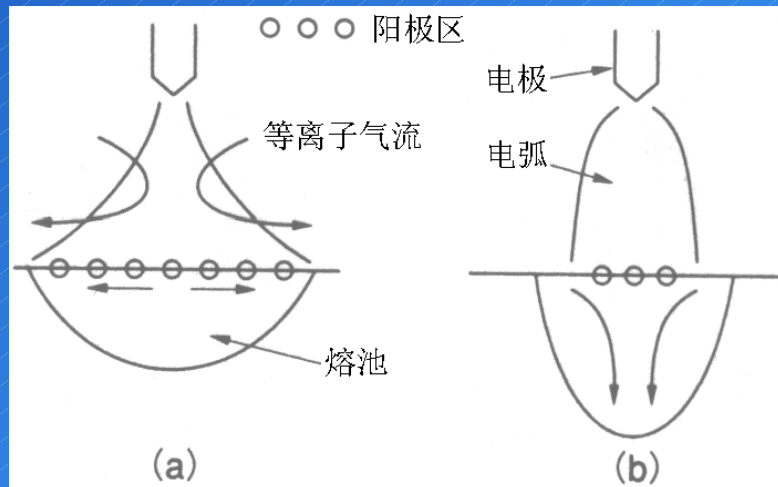


这也是A-TIG焊接不锈钢的作用机理

# 等离子流及电磁对流对熔化现象影响

- 等离子气流使熔池表面金属产生向着周边的流动
- 电磁对流产生向着熔池中心的流动
- 流动的强度依赖于电弧的形态

等离子气流增强，而熔池内的电流密度下降，从而使电磁对流相对减弱



电磁对流的影响增强

# 焊接参数与工艺对焊缝成形的影响

---

- 焊接电流
- 电弧电压
- 焊接速度
- 电流的种类和极性
- 钨极端部形状、焊丝直径和伸出长度的影响
- 焊接工艺因素对焊缝尺寸的影响

# 焊接电流

- 焊接电流增大时，焊缝的熔深和余高增加，而熔宽略有增加
- 熔深与焊接电流近于成正比关系

各种电弧焊方法及规范（焊钢）时的熔深系数

| 电弧焊方法             | 电极直径<br>/mm | 焊接电流<br>/A | 电弧电压<br>/V | 焊接速度<br>/(m·h <sup>-1</sup> ) | 熔深系数 Km<br>/(mm/100A) |
|-------------------|-------------|------------|------------|-------------------------------|-----------------------|
| 埋弧焊               | 2           | 200~700    | 32~40      | 15~100                        | 1.0~1.7               |
|                   | 5           | 450~1200   | 34~44      | 30~60                         | 0.7~1.3               |
| TIG 焊             | 3.2         | 100~350    | 10~16      | 6~18                          | 0.8~1.8               |
| MIG 焊             | 1.2~2.4     | 210~550    | 24~42      | 40~120                        | 1.5~1.8               |
| CO <sub>2</sub> 焊 | 2~4         | 500~900    | 35~45      | 40~80                         | 1.1~1.6               |
|                   | 0.8~1.6     | 70~300     | 16~23      | 30~150                        | 0.8~1.2               |
| 等离子弧焊             | 1.6(喷嘴孔径)   | 50~100     | 20~26      | 10~60                         | 1.2~2.0               |
|                   | 3.4(喷嘴孔径)   | 220~300    | 28~36      | 18~30                         | 1.5~2.4               |

# 电弧电压

---

- 电弧电压增大后，
  - 电弧功率加大，工件热输入有所增大。
  - 由于电弧电压的增加是以增加电弧长度实现的，使得电弧热源半径增大，工件热输入能量密度减小，因此熔深略有减小而熔宽增大。
  - 由于焊接电流不变，焊丝送进速度和焊丝熔化量没有改变，使得焊缝余高减小。

# 焊接速度

---

- 焊速提高时焊接线能量( $q/v$ )减少，熔宽和熔深都减小，余高也减小。
- 因为单位焊缝长度上的焊丝金属熔敷量与焊速 $v$ 成反比，而熔宽则近似于与 $v^{1/2}$ 成反比。
- 从提高焊接生产率考虑，在提高焊接速度时要相应提高焊接电流和电弧电压，这三个量是相互联系的。
- 但在大功率下高速焊接，有可能在工件熔化及凝固中形成焊接缺陷，比如裂纹、咬边等，所以对焊速的提高一般需要加以限制



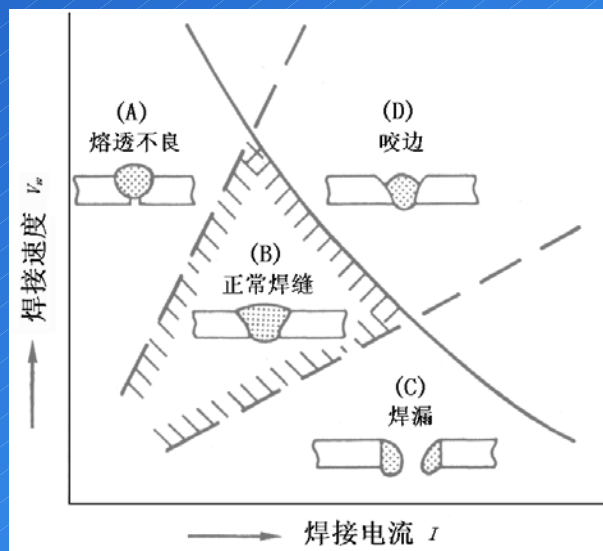
# 焊接工艺因素对焊缝尺寸的影响

---

- 焊接工艺因素对焊缝成形也有影响，如坡口形式、尺寸、间隙的大小，电极与工件间的倾角，接头的空间位置及焊接方式等。
- 总之，影响焊缝成形的因素很多，要获得良好的焊缝成形，需要根据工件的材料、厚度、接头的形式及焊缝的空间位置，以及对接头性能和焊缝尺寸方面的要求，选择适宜的焊接方法、焊接规范和焊接工艺。

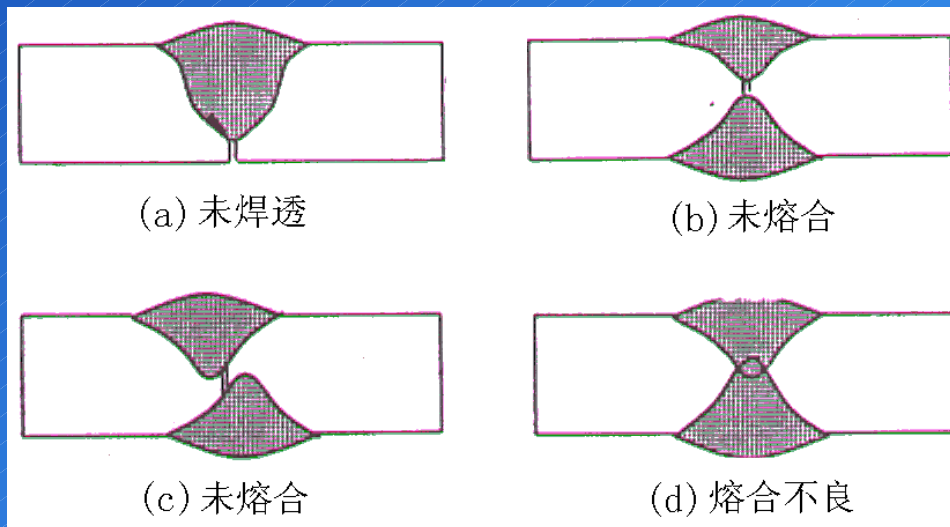
# 焊缝成形缺陷及形成原因

- 焊接缺陷有多种
  - 内部缺陷和外部缺陷
  - 微观组织缺陷和宏观缺陷 等
  - 气孔、夹渣、裂纹缺陷除于焊接规范和工艺有关外，更主要的是受到焊缝冶金因素和焊接热循环的影响
- 焊缝成形方面所表现出的明显缺陷



# 未焊透和未熔合

- 未焊透
  - 单面焊接时，接头根部未完全焊透的现象
- 未熔合
  - 单层焊、多层焊或双面焊时，焊道与母材之间、焊道与焊道之间未能完全结合的部分称作



# 未焊透和未熔合

---

- 未焊透、未熔合有相同的产生原因，
  - 主要是焊接电流小、焊速过高，
  - 或者是坡口尺寸不合适，
  - 以及电弧中心线偏离焊缝、电弧产生偏吹等，
  - 细丝短路过渡CO<sub>2</sub>焊接，由于工件热输入量少，容易产生这种缺陷。
  - 薄板焊接中，如果夹具对焊件背面的散热程度大，也会出现未焊透，或背面一部分焊透、一部分未焊透的成形不均现象。

# 焊穿

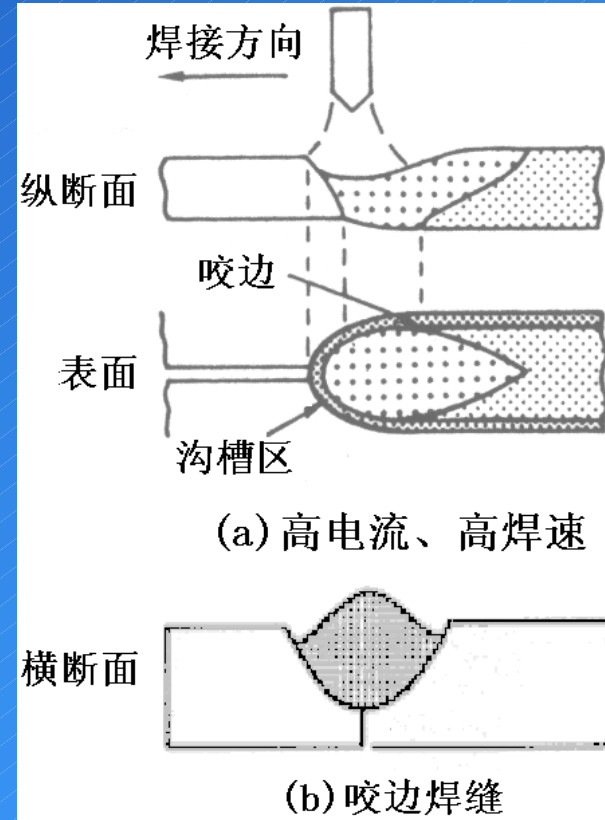
---

- 焊穿
  - 焊接时熔化金属自焊缝背面流出并脱离焊道形成穿孔的现象
- 原因：
  - 焊接电流过大、焊速过小都可能出现这种缺陷。
  - 厚板焊接时，熔池过大，固态金属对熔化金属的表面张力不足以承受熔池重力和电弧力的作用，从而形成熔池脱落。
  - 在薄板焊接时，如果电弧力过于集中，或者对缝间隙过大也会出现焊穿。

# 咬边和凹坑

- 咬边和凹坑的形成受到熔池形态的影响

对应于高速焊接的电弧和熔池，由于焊速很快，焊缝两侧的金属没有被很好熔化，同时熔化金属受表面张力的作用容易聚集在一起而对焊趾部位的润湿性不好，容易形成固液态剥离，凝固后出现咬边



# 焊瘤

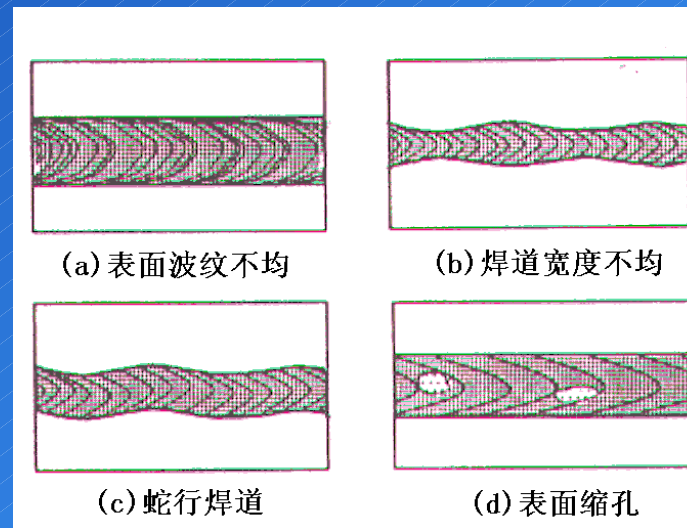
---

- 表现形态

- 熔化金属流淌到焊缝区以外未熔化母材上聚集成金属瘤，这是由于填充金属过多引起的，或熔池重力作用的结果；
- 直接在焊缝上聚集成大的金属瘤，多数情况是由于不稳定的熔滴过渡造成。

# 其它焊缝成形缺陷

- 大电流MIG焊接当电弧阴极斑点的清理作用消失、阴极斑点进入熔池内部时，电弧力集中到熔池底部，对熔池金属有激烈的搅动作用，将出现类似大象皮肤的不良焊缝，称作起皱焊缝。





# 缺陷的抑制

---

- 可以采取多种办法：
- 使电弧作用区分散开来、减小电弧力、采用粗径焊丝、给焊丝一个前倾角使电弧吹向前方、采用下坡焊等措施，
- 埋弧焊有合适的焊剂层厚度，合适的焊丝伸出长度，
- 二氧化碳电弧焊中采用小电流区下的短路过渡方式，在大电流区采用潜弧方式焊接，以及增加保护效果，稳定熔滴过渡等。