

第三章 母材熔化和焊缝成形

基本要求

- * 熟练掌握标征熔池及焊缝形状尺寸的几个参数。
- * 熟练掌握热输入、线能量、熔深、熔宽、成形系数、余高、熔合比等基本概念。
- * 了解作用于熔池上的力。
- * 熟练掌握焊接参数对焊缝形状尺寸的影响。
- * 了解各种焊缝缺陷形成的原因及预防措施。

重点

- 热输入、线能量、熔深、熔宽、成形系数、余高、熔合比等基本概念；
- 标征熔池及焊缝形状尺寸的参数；
- 焊接参数对焊缝形状尺寸的影响。

§3.1 电弧热与熔池形状尺寸的关系

一、电弧的热输入

(一) 热输入:

输入至工件的热功率或单位时间内输入至工件的热量。

$$q = 0.24\eta U_a I_a$$

式中 η -电弧加热工件的热效率。

(二) 电弧加热工件的热效率 η

$$\eta = \frac{\text{电弧热功率} - \text{电弧热损失}}{\text{电弧热功率}}$$

- 电弧热损失:

- 1) 幅射, 对流散热
- 2) 加热W极, 焊条头的热量
- 3) 加热焊剂, 焊条头
- 4) 飞溅热损失

- 影响 η 的因素:

- 1) 焊接方法:

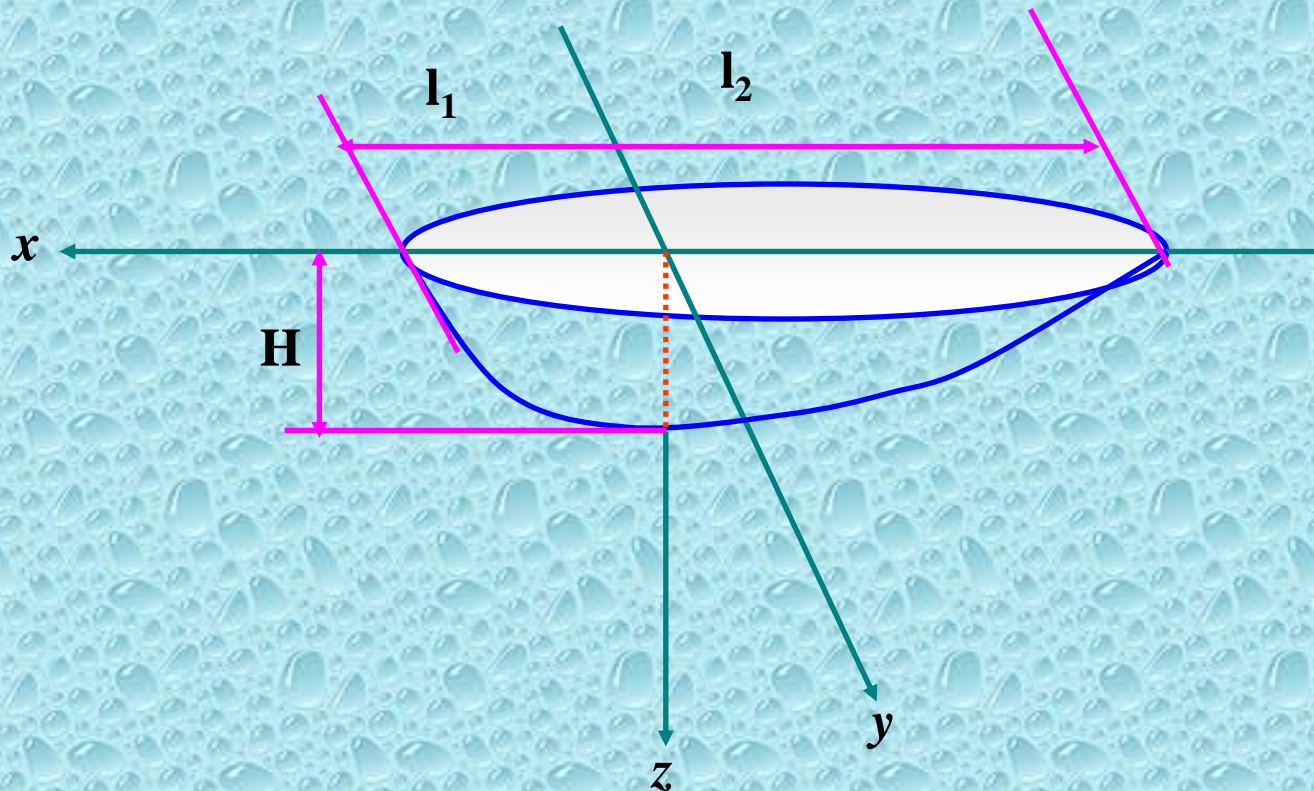
TIG、CO₂、MIGSAW的 η 不同。

- 2) 焊接规范:

(三) 熔池的形状及表征参数

1、熔池的基本概念

由母材上熔化的金属（焊丝、工件）组成的、具有一定几何形状的液态金属叫熔池。引弧后。经过一过渡期后，熔池稳定，形状不再发生变化。熔池的形状为一半椭球形。



熔池的形状尺寸

2、熔池的表征参数：

① 熔宽B； ② 熔深； ③ 前部长度 L_1 ； ④ 尾部长度 L_2

在做出一些假设的基础上，可推导出上述几个尺寸与焊速 v_s ，热输入 q 之间的关系：

$$B = 2H; \quad L_1 = \frac{a}{v_s} \ln \frac{q}{2\pi\lambda T_m};$$

$$L_2 = \frac{q}{2\pi\lambda T_m}; \quad H = \sqrt{\frac{2q}{\pi e c \rho v_s T_m}}。$$

式中： T_m ——材料的熔点；

λ ——导热系数；

a ——热扩散率；

c ——比热；

ρ ——密度。

(四) 工件上的比热流

1、基本概念

(1) 比热流：通过单位面积输入至工件的热功率。

$$q(r) = q_m e^{-kr^2}$$

式中： $q(r)$ —离中心距离为 r 的某点的比热流；

q_m —中心处的比热流；

k —电弧集中系数。

由 $q = \int q(r) ds$ 可推导出：

$$q_m = \frac{k}{\pi} q$$

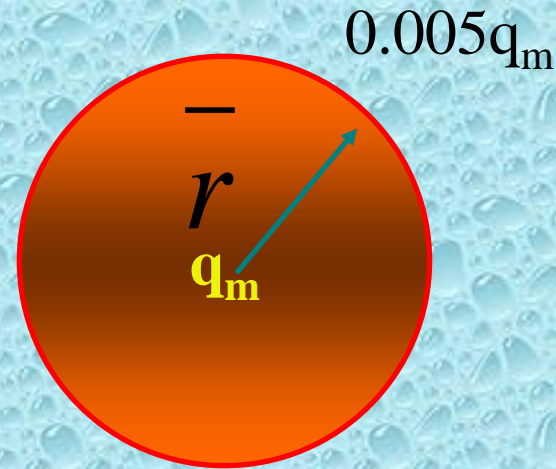
(2) 加热斑点:

热源传递给工件的热量是通过一定的面积进行的, 该面积叫加热斑点。加热斑点内的每一点处的比热流是不相同的。 $q(r)$ 在加热斑点内呈正态分布, 即:

$$q(\bar{r}) = 0.05q_m$$

式中 \bar{r} 为加热斑点的半径:

$$\bar{r} = \sqrt{\frac{3}{k}}$$



2、电弧参数对比热流的影响

1) U_a :

U_a 增大, $r \uparrow$ $k \downarrow$ $q_m \downarrow$

2) I_a :

I_a 增大, r 稍有增大, k 下降, q 增大, q_m 增大。

3) 钨极尖角及直径:

d_w 增大或 θ_w 增大, q_m 减小。

3、比热流对熔池尺寸的影响

$K \uparrow$ 则 $H \uparrow$ $B \downarrow$

$K \downarrow$ 则 $H \downarrow$ $B \downarrow$ (焊速大时)

$B \uparrow$ (焊速小时)

§3-2 作用于熔池上的力及力对熔池的影响

一、使熔池凹陷的作用力

1、电弧静压力及动压力：

F_p 、 F_c 均指向熔池，使之洼凹陷，热源下移，有利于增大 H 。

MIG焊时的 F_p 易于导致指状熔深。

2、细熔滴的冲击力：

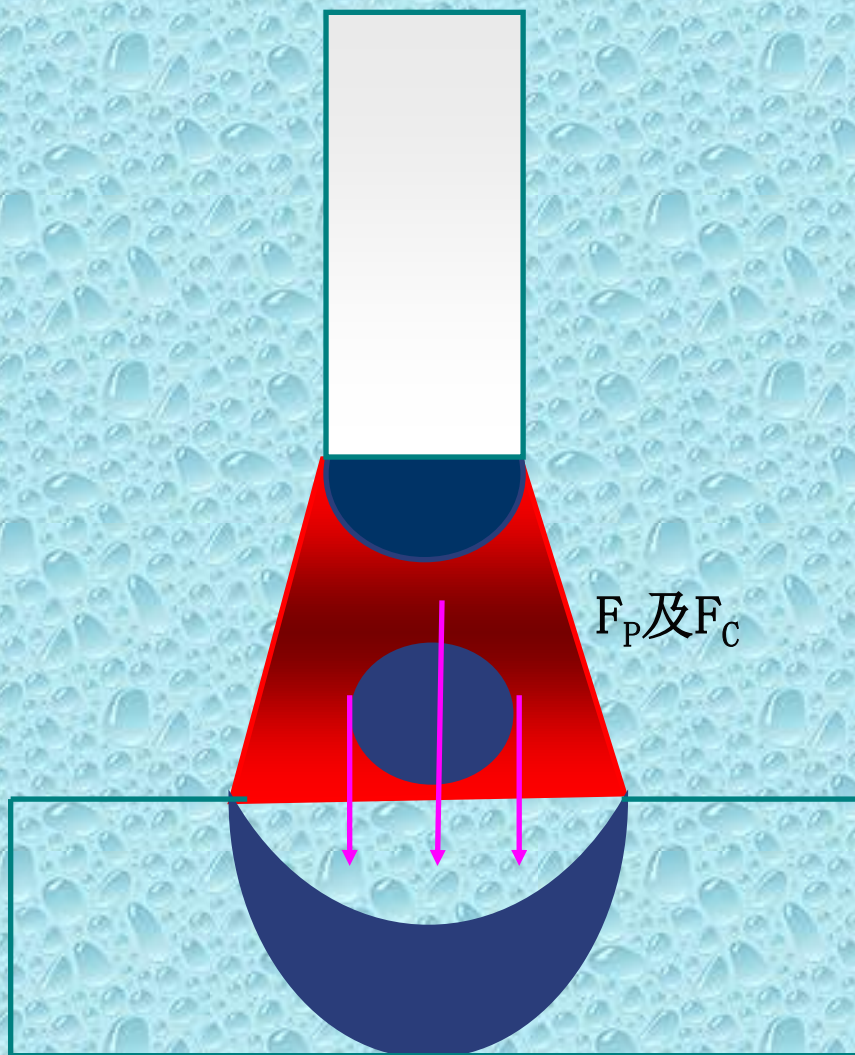
使熔凹陷，增大 H ，易于导致指状熔深

3、熔池金属的重力：

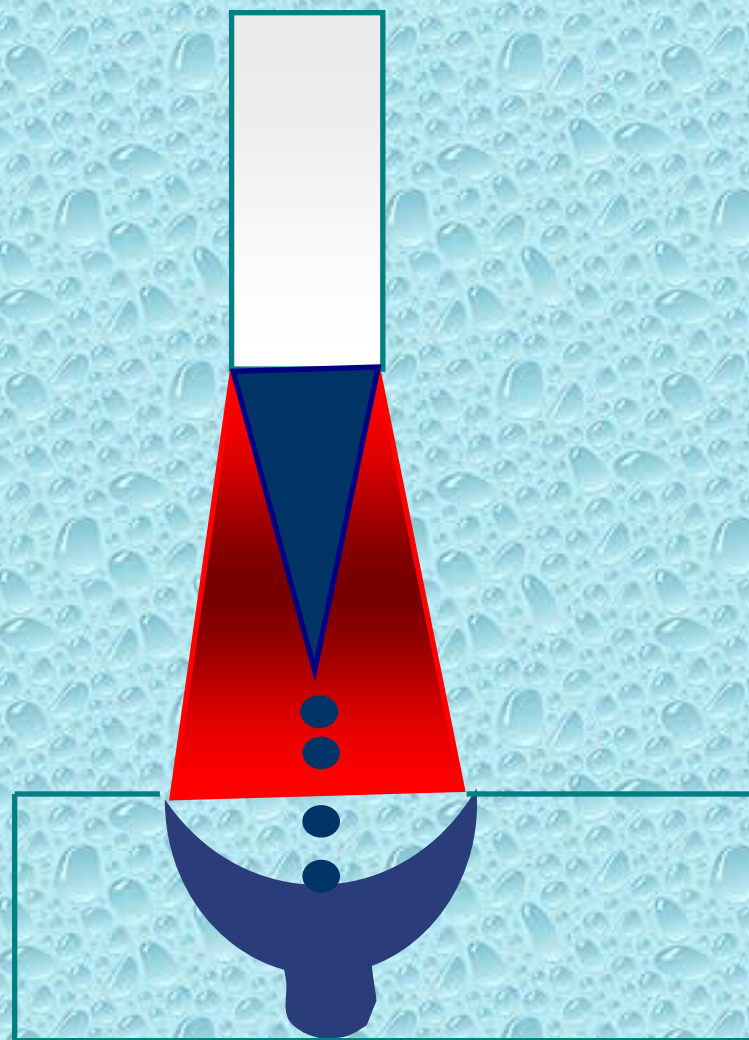
其大小正比于熔池体积，其作用与空间位置有关。

(1) 立、仰、横焊时，重力使熔池不稳，易于使熔池下坠。

(2) 平焊时，稳定



电弧力



细熔滴的冲击力

二、影响熔池对流的力

1、TIG焊时的等离子流力

等离子流挺度较小，碰到熔池后，沿着熔池向外走。

因此，

表面：从中心向四周流；

中心：从下至上；

熔池浅而宽。

2、浮力

中心：从下至上；

熔池浅而宽。

3、电磁力

熔池上形成斑点时，电流进入熔池后发散，形成向下的推力，导致涡流换热。增大熔深。

4、表面张力

在 F_{σ} 的作用下，液金从 σ 小的地方向 σ 大原地方流。

5、驱动力：体系表面自由能的减少。

影响换热及润湿角，从而影响焊缝的形状及表面轮廓。

1) 如 $\frac{d\sigma}{dr} > 0$,

则表面液态金属由中心向四周流，熔池浅而宽。

2) 如 $\frac{d\sigma}{dr} < 0$,

则表面液金从四周向中心流，使熔池深而窄。

*讨论:

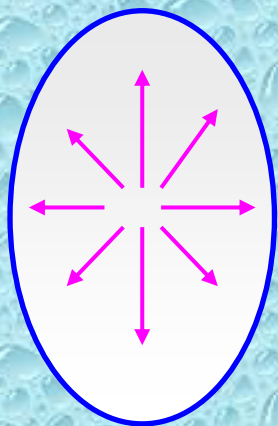
1) 不含O、S等表面活性物质： $\frac{d\sigma}{dr} > 0$

表面从中心向四周流；中心从下至上；熔池浅而宽。

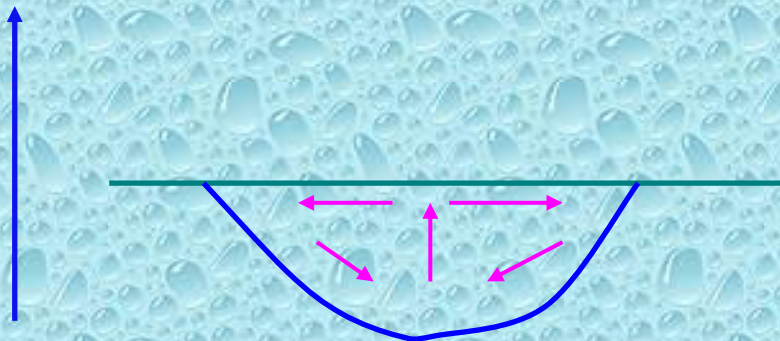
2) 含O、S、Bi

正好与前面相反

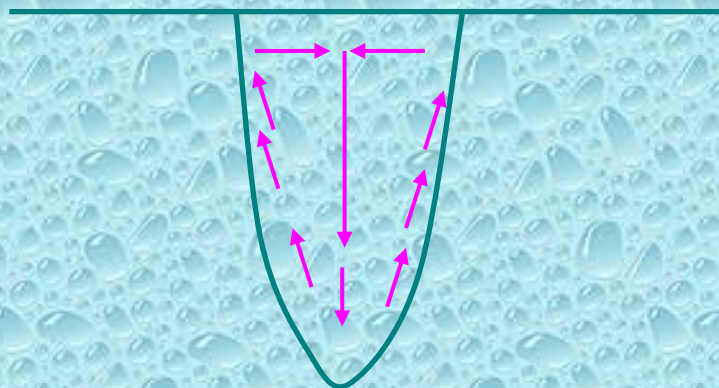
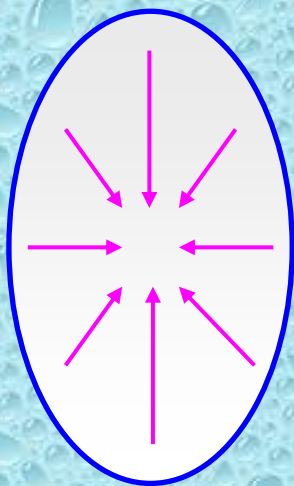
熔池表面



熔池表面及内部



$$\frac{d\sigma}{dr} > 0$$



$$\frac{d\sigma}{dr} < 0$$

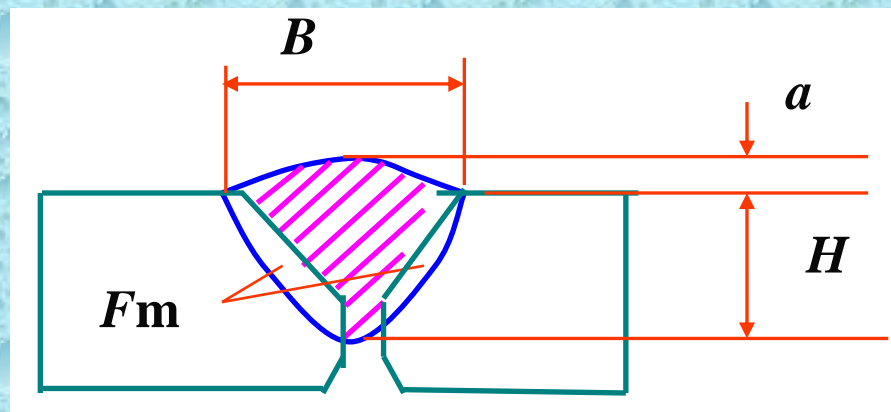
§3-3 焊缝形状参数及工艺因素对它的影响

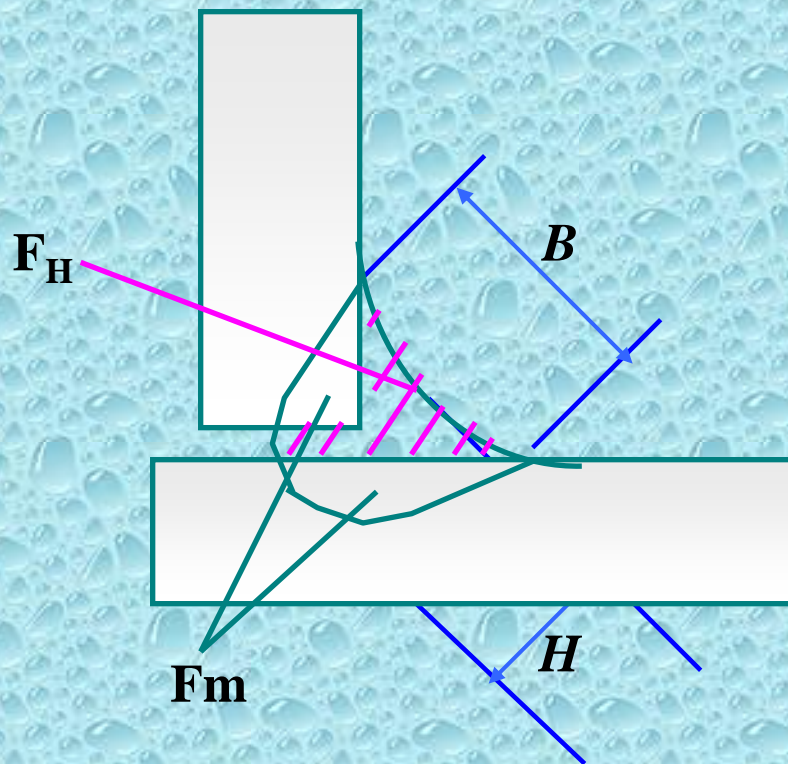
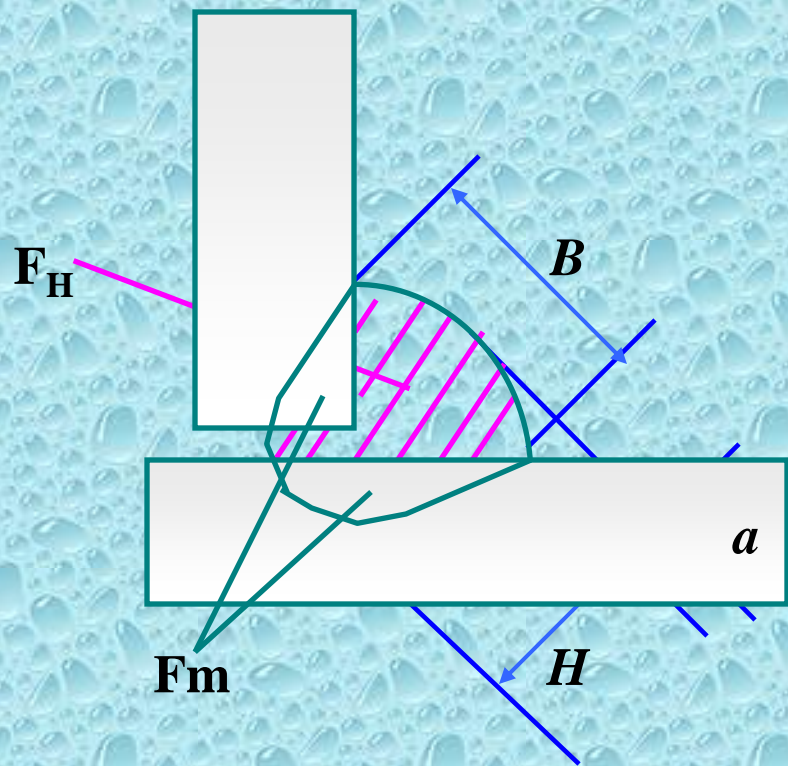
一、焊缝形状参数及其与焊缝质量的关系

(一) 基本参数：H、B、a

1、熔深H： $H_{\text{weld}}=H_{\text{pool}}$ ，直接影响承载能力。

2、熔宽B： $B_{\text{weld}}=B_{\text{pool}}$





3、 $\phi = B/H$ ，被称为焊缝成形系数。 ϕ 意义：

1) 影响气孔敏感性

2) 影响结晶方向

3) 影响中心偏析

ϕ 大时较有利，一般应大于1.25

4、余高a：一般规定： $a=0\sim 3\text{mm}$ 或 $B/a>4\sim 8$

1) 防止因凝固收缩而造成的缺陷

2) 增大承受静载的能力

3) 造成应力集中

4) 疲劳寿命下降

5、熔合比：母材金属在焊缝中的含量

$$\gamma = \frac{F_M}{F_M + F_H}$$

调整熔合比可调整焊缝化学成分，改善性能。
一般通过开坡口来实现。

二、影响焊缝形状尺寸的因素

(一) 焊接电流 I_a

I_a 增大， H 增大， a 增大， B 基本不变

1、 $I_a \uparrow$ ， $F_a \uparrow \rightarrow$ 热源下移 $\rightarrow H \uparrow$

$$q = \eta IU \uparrow \rightarrow H \uparrow$$

$$H = k_m I$$

2、 I_a 增大，电弧分布半径 增大但潜入工件深度大，限制 r 有效增大， B 基本不变。 γ 减小。

3、 $I_a \uparrow$ ，焊丝熔化量增加， B 不变， $a \uparrow$ 。

(二) 电弧电压

$U_a \uparrow$ ， q 增加不多， \bar{r} 增大， q_m 减小，因此， B 、 γ 增大， H 、 a 减小。

通常， I_a 选定后， U_a 也基本上定下来了。总是根据板厚选 I_a ，再由 I_a 选定 U_a 。

(三) 焊接速度

将 q/v_w 定义为线能量，即单位长度的焊缝上输入的热量。

v_w 增大时， q/v_w 减小， H 、 B 、 a 等均减小

为了促进生产率，应提高 v_w ，但为了保证焊透，应同时提高 I_a ，即采用大电流高速焊，这种方法易引起咬边。通常采用双弧焊或多弧焊来提高焊接速度。

(四) 电流的种类及极性

$$\text{TIG: } P_A > P_K, \quad B_{\text{DCSP}} > B_{\text{AC}} > B_{\text{DCRP}} \\ H_{\text{DCSP}} > H_{\text{AC}} > H_{\text{DCRP}}$$

MIG、 CO_2 、SAW等：

$$P_A < P_K, \quad B_{\text{DCSP}} < B_{\text{AC}} < B_{\text{DCRP}} \\ H_{\text{DCSP}} < H_{\text{AC}} < H_{\text{DCRP}}$$

(五)电极形状、尺寸、伸出长度

MIG焊: d_s 减小 $\rightarrow q_m \uparrow$ 、 $H \uparrow$ 、 $a \uparrow$ 、 $B \downarrow$

L_s 减小 $\rightarrow q_m \uparrow$ 、 $H \uparrow$ 、 $a \downarrow$

TIG焊: $d_w \downarrow \rightarrow q_m \uparrow$ 、 $H \uparrow$

$\theta_w \downarrow \rightarrow q_m \uparrow$ 、 B 变化不大

(六)坡口、间隙

1、用于增大 H ，调整熔合比 γ ，改善结晶条件。

2、坡口、间隙越大， $a \downarrow \gamma \downarrow$ 。

(七)电极倾角

1、前倾：电弧下液态金属厚，电弧潜入深度小，所以 $H \downarrow B \uparrow a \downarrow$ 。

2、后倾：相反。

(八)工件倾角

1、下坡焊：重力阻止液金后排，电弧潜入深度减小， $H \downarrow a \downarrow B \uparrow$ 易于导致满溢，未焊透等。

2、上坡焊：相反。 A 过大、咬边等缺陷。

(九) 工件材料

1、比热容 C : $C\uparrow$, $V_m\downarrow$, 则 H 及 $B\uparrow$

2、密度 ρ : $\rho\uparrow$ 则 $H\downarrow$

3、板厚: 当 $H < 0.6\delta$ 时, $\delta\uparrow$ 则 $H\downarrow$

当 $H > 0.6\delta$ 时, δ 无影响

(十) 焊剂、药皮及气体

焊剂: 稳弧性差 $\rightarrow E\uparrow \rightarrow B\downarrow H\uparrow$

ρ 大 \rightarrow 压力大 $\rightarrow E\uparrow \rightarrow H\uparrow$

颗粒度小 \rightarrow 压力大 $\rightarrow E\uparrow \rightarrow H\uparrow$

气体: 导热性高、解离严重 \rightarrow 弧柱收缩 $\rightarrow E\uparrow \rightarrow H\uparrow$

§ 3-4 焊缝缺陷

主要有：气孔、裂纹、夹渣、未焊透、未熔合、烧穿、咬边、焊瘤。

一、未焊透

熔焊时，接头根部未完全焊透的现象。最易发生在短路过渡CO₂焊中。

原因：①I_a太小；②v_w太大；③坡口尺寸不合适。

二、未熔合

熔焊时，焊道与焊道间或焊道与母材间未完全熔化结合的部分叫未熔合。

原因：①高速大电流焊；②上坡焊。

三、烧穿

熔焊时熔化金属自焊缝背面流出，形成穿孔的现象叫烧穿。

原因：①I_a过大；②焊接速度过小；③坡口尺寸过大。

四、咬边

沿焊趾的母材部位烧熔成凹陷或沟槽的现象叫咬边。

原因：①大电流高速焊；②角焊缝、焊脚过大或 U_a 过大。

五、焊瘤

熔焊时熔化金属流淌到焊缝以外未熔合的母材上形成金属瘤的现象叫焊瘤。

原因：①坡口尺寸小；② U_a 过小；③干伸长度太大。

六、凹坑

焊缝表面低于母材表面的部分叫凹坑。

原因：① I_a 太大；②坡口尺寸太大。

七、塌陷

焊缝表面塌陷，背面凸起的现象。

原因：① I_a 太大；②焊接速度太小。

§ 3-5 焊缝成形

良好焊缝成形的标准：①无缺陷；②表面过度圆滑。

基础：首先要保持住熔池

一、平面内直缝的焊接

1、平焊：

最容易成形。

薄板用单面单道焊。

厚板用单面多道焊、双面多道焊。

最困难的是第一道焊缝：自由成型、强制成型。

2、其他位置的焊接

问题：熔池易于流淌

解决方法：强制成型、小电流（脉冲+摆动）

二、曲面焊缝的焊接

环焊缝、螺旋焊缝

1、焊头固定：

防止熔池金属的流淌：逆着焊接方向偏移一定位置。

2、全位置焊接：

1) 分段； 2) 减小线能量，采用脉冲TIG焊

