

高速焊接时焊缝咬边的形成机理^{*}

冯雷 陈树君
(哈尔滨工业大学)

殷树言
(北京工业大学)

摘要 根据描述弯曲液面上任一点处液面内外压强差的 Young—Laplace 方程, 从液态金属在重力和表面张力作用下的平衡条件出发, 并基于二维假设, 建立了描述熔敷金属表面形状的静态平衡模型。以由三相接触线平衡条件确定的接触角 θ 和单位长度上熔敷金属体积为边界条件, 采用迭代算法求解 Young—Laplace 方程, 得出了平板表面上的熔敷金属平衡形状。在此基础上, 考虑熔池几何形状的影响, 建立了平板堆焊时咬边产生机理的静力学模型, 应用双重迭代算法对该模型进行求解, 可以得出熔敷液体金属与熔化母材共同达到平衡时的条件。采用该模型计算的产生咬边的临界条件与实验结果吻合得很好, 最后, 应用该模型对平板堆焊时影响焊缝咬边的因素进行了计算与讨论。计算结果指出, 增大材料润湿性, 减小熔宽, 增大单位长度上的熔敷金属量是减小咬边倾向的途径。

关键词: 熔池 焊缝成形 表面张力

0 序 言

进入 90 年代后, 随着自动化技术、人工智能理论等相关学科纷纷取得长足进展, 焊接生产的机械化、自动化和机器人化程度不断提高, 生产节拍不断加快, 因此, 对焊接加工环节本身的生产速度提出了更高的要求。但是, 焊接速度的提高会带来一些与常规速度焊接时不同的问题。其中最主要的是焊缝成形差, 出现焊道咬边的现象, 速度进一步提高时出现所谓“驼峰”焊道, 甚至造成焊缝不连续^[1,2]。为了改善高速焊接时的焊缝成形, 首先需要了解焊缝成形不良的机理。本文是针对平板堆焊时产生咬边的机理所进行的研究。

1 平板表面上的熔敷金属形状

1.1 液体表面的压强平衡

根据液体表面能的原理可以得出描述一弯曲液面上任一点处液面内外压强差的 Young—Laplace 方程^[3]:

$$\Delta P = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = 2\sigma H \quad (1)$$

式中: σ 比表面能, 或称表面张力系数, 单位 N/m。 R_1, R_2 为曲面在该点的两个互相垂直的法平面中的曲率半径。 $H = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$ 为平均曲率。

Young—Laplace 方程为二阶微分方程, 在边界条件足够时, 解此方程即可求出液体表面形状。Nishiguchi 和 Ohji 采用二维液柱模型, 计算了平板表面上熔敷金属的形状^[4,5]。计算中基于如下假设:

- 1) 焊接方向上熔池足够长, 可作为二维液体处理, 即沿焊缝长度方向上的曲率可以忽略。

* 本研究工作得到北京市自然科学基金的资助, 编号 3962004。

2) 忽略电弧的挖掘力。

3) 整个液体表面上表面张力均匀。

在上述情况下, 式(1)中 $R_2=\infty$, 则 $H=1/2R_1$, 对于截面如图 1 所示的二维液体, 建立图中所示坐标系, 根据式(1)和液体压强公式, 有

$$-\frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{\sqrt{1+(\frac{dy}{dx})^2}^3} = \frac{\sigma}{R_0} - \rho gy \quad (2)$$

将 $y=0$ 时 $dy/dx=0$ 作为边界条件, 并对 y 进行两次积分得:

$$x = \frac{1}{2} \int_0^y \left(\frac{\sqrt{1+f(y)}}{\sqrt{1-f(y)}} - \frac{\sqrt{1-f(y)}}{\sqrt{1+f(y)}} \right) dy \quad (3)$$

式中

$$f(y) = \frac{\rho g}{2\sigma} y^2 - \frac{1}{R_0} y - 1 \quad (4)$$

求解式(3)即为液体金属的平衡形状。

但注意到 $f(y)$ 的表达式中存在一个系数 R_0 , 它并不是一个常数, Nishiguchi 和 Ohji 并未提出确定 R_0 的方法, 因此无法得出一定条件下的确定解, 而只能给出一些定性的趋势。

1.2 求取确定解的方法

研究中引入了两个边界条件来求解 Young—Laplace 方程:

1) 三相接触线平衡条件确定的接触角 θ , 即

$$\frac{dy}{dx} = \tan \theta \quad (y=h) \quad (5)$$

2) 单位长度上熔敷金属体积, 对于二维液柱即为截面积。这一条件表达为:

$$A = 2 \int_0^y x(y) dy = \text{Const} \quad (6)$$

式(6)所表达的约束条件是对式(3)积分结果的积分, 采用解析算法是无法利用这一条件对式(3)进行求解的。但是注意到 θ 一定时, 面积 A 为 R_0 的单调增函数, 因此可以为 R_0 设定任意的初值, 据此求出高度 h , 并沿 y 坐标从 0 到 h 取等步距的点, 对每一点, 采用数值积分, 得出每一个 y 值对应的 x 值, 然后再根据式(6)求出这时的面积 A 与给定面积比较, 如果误差大于允许值, 则对 R_0 进行迭代, 如此进行, 直到在 R_0 等于某一值时, 面积 A 与给定面积的误差在允许范围内, 即面积约束条件满足, 则此时可以得到一定接触角, 一定截面积的液体金属在平板上达到平衡时的表面形状。

2 平板堆焊时咬边产生机理的静力学模型

2.1 熔池形状的几何模型

在上述算法的基础上, 在考虑熔深形状的情况下, 对平板堆焊时产生咬边的静力学机理及其影响因素进行了分析。在计算中将熔深为 d , 熔宽为 W 的熔合线简化为椭圆的一段弧, 椭圆 y 方向上半轴长为 $b=2d$, 并假设其形状在整个过程中保持不变, 即忽略过热液体金属对母材的重熔

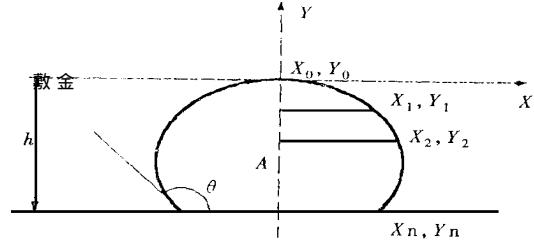


图 1 平板上液体的表面形状

Fig. 1 Shape of liquid surface on a flat plate

作用,如图 2 所示。根据几何知识可求出熔合线上距熔池底部高度为 h_s 的点 S 处的宽度 W_s , 点 S 处熔合线与水平线的夹角 ϕ , 熔化的母材金属截面积 A_b 以及经过点 S 的水平线以下的熔化金属截面积 A_s 。

2.2 液体金属混合物的平衡条件

在考虑母材熔化的情况下,液体金属达到稳定的条件应为熔敷金属与熔化的母材的混合物在表面张力和重力的作用下共同达到平衡。

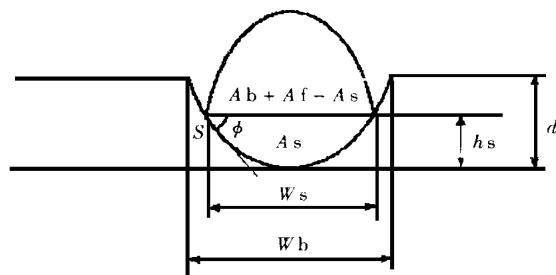


图 2 熔池形状的几何模型

Fig. 2 Geometrical model of weld pool

不妨假设熔敷金属首先铺展到焊趾部,这时确定焊趾部即三相接触线的受力情况的是两个角度值,一是液气界面与水平线的夹角 β ,另一个是熔合线与水平线的夹角 ϕ ,其定义如图 3 所示。因为在材料、表面状态、温度等条件一定时,固液相间的接触角 θ 是一个确定的约束条件,所以只有满足

$$\beta + \phi = \theta \quad (7)$$

时,三相接触线的受力才能够达到平衡。否则,根据 $\beta + \phi$ 与接触角 θ 的关系,会出现两种情况:

a) $\beta + \phi > \theta$, 则三相接触线所受合力 F 的方向是向熔池外部的,液体将向外铺展,不会形成咬边,如图 3(a)所示;

b) $\beta + \phi < \theta$, 则三相接触线所受合力 F 的方向是向熔池内部的,三相接触线将向熔池内部移动,同时熔化的母材金属向中间聚集, $\beta + \phi$ 的值不断增大,直到满足式(7)时达到平衡,如图中虚线所示。这样就形成了咬边,如图 3(b)所示。

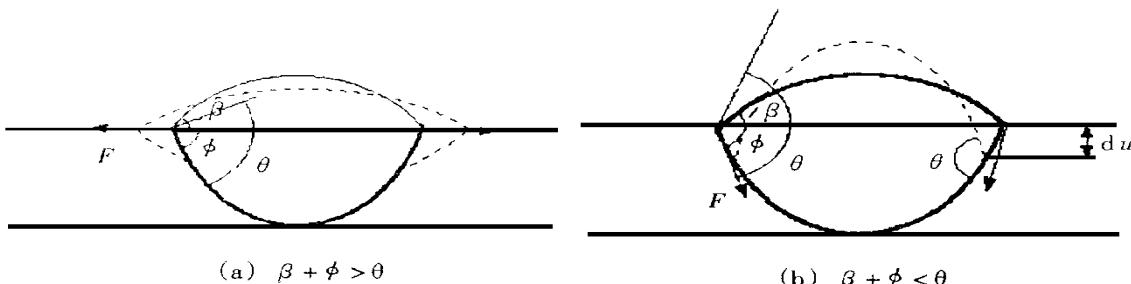


图 3 熔敷金属液体在熔池边缘的受力与运动趋势

Fig. 3 Forces and moving tendency of molten pool at edge

2.3 确定平衡位置的算法

由上面的分析可知,在考虑熔池形状的情况下,求解液态金属平衡方程的关键在于确定一定截面积的液体金属,在底部宽度一定时,其三相接触线上液体表面与水平线的夹角 β 。请注意,此时作为边界条件的截面积与平板表面时的情况不同,由于液体金属向熔池中央聚集,使三相接触线离开母材表面,所以此时必须考虑这一部分向中央聚集的熔化母材的重力作用。设熔化的母材金属截面积为 A_b , 熔敷金属的截面积为 A_f , 则总的液体金属的截面积为 $A_b + A_f$ 。当三相接触线处于熔合线上任一点 S 时,需要通过表面张力维持的是通过 S 点的水平线以上的液体金属的重力,这

部分液体截面积为 $A_b + A_f - A_s$, 如图 2 中所示。因此, 为通过 Young—Laplace 方程求解此时的 β , 应引入如下边界条件:

$$A = A_b + A_f - A_s \quad (8)$$

$$W = W_s \quad (9)$$

式中 A_s 和 W_s 的定义如图 2 中所示。

与上一节中求解 R_0 的算法类似, 由于在液体截面积一定时, 底部宽度 W 是底角 β 的单调减函数, 所以可以利用式(8)和式(9)两个边界条件, 采用迭代算法确定 β 的值。在这一过程中利用了上一节中确定 R_0 的算法子程序。即采用了双重的迭代算法来确定 β 。当所求得的结果满足式(7)时, 液态金属达到平衡。此时能够得出咬边深度、宽度以及焊道高度、底部宽度和顶部曲率等焊道形状参数。

由于实际焊接时的焊道形状参数很难保证, 为了验证这一算法的正确性, 采取了统计的方法, 即对每一确定的熔敷金属截面积(这可通过送丝速度与焊接速度确定), 调节焊接电压, 得到一系列比较分散的熔宽数值, 观察焊道出现咬边的情况, 与计算得出的临界条件比较。试验材料如下:

母材—厚度 3mm 的低碳钢板;

焊丝—H08Mn2Si, $\phi 1.2\text{mm}$;

保护气—100% CO_2 , 流量 15L/min。

这一组试验的结果如图 4 所示。图中数据点所表示的是不同熔宽与熔敷金属截面积的匹配, 其中实心圆点表示计算得出的不产生咬边的临界点, 实线为这些点的拟合结果, 实心三角为无咬边产生的试验点, 空心三角为产生咬边的试验点。可见, 计算得出的产生咬边缺陷的临界条件与试验点的分布情况基本相符。

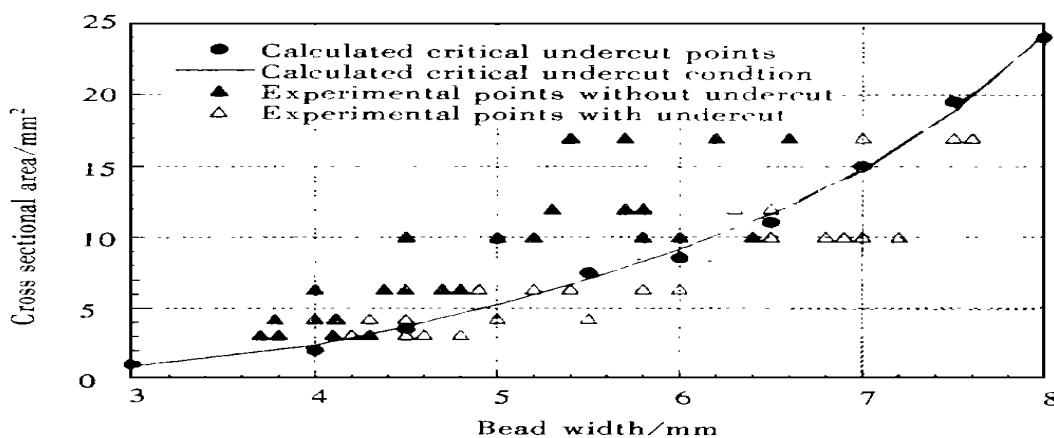


图 4 理论计算的咬边临界条件与试验数据的比较

Fig. 4 Calculated critical condition of undercut and experimental points

3 计算结果与讨论

把平衡时的咬边深度 d_u 作为衡量咬边倾向的指标, 利用上述算法, 分别计算了各焊缝形状参数对咬边倾向的影响。

图5所示为熔敷金属截面积为 6.36mm^2 (对应焊接速度 $1.6\text{m}/\text{min}$, 焊丝直径 1.2mm , 送丝速度

9m/min 的情况), 接触角分别为 90° 和 135° 时, 不同的熔宽 W_b 对咬边倾向的影响情况。由图 5 中可见, 在同样的接触角和熔敷金属量条件下, 随熔宽的增大, 咬边倾向明显增加。而当熔宽小于一定值时, 不会发生咬边。

图 6 是一定熔宽(6mm)条件下, 熔敷金属截面积 A 对咬边倾向影响的计算结果。可以看出, 咬边倾向随熔敷金属量的增大而减小, 当熔敷金属量足够大时不出现咬边。

另外, 从图 5 和图 6 都可以看出, 接触角 θ 的大小对咬边倾向的影响很大, 在接触角小于 90° 时, 即润湿性良好的情况下, 几乎不可能出现咬边。

采用以上算法, 由以上计算结果可知, 减小咬边倾向可从以下几个方面入手: (a) 减小接触角 θ ; (b) 减小熔宽; (c) 增大熔敷金属量。其中, 减小接触角可以通过调整焊丝和保护气体成分实现, 即通过加入少量氧化性成分等措施, 减小液态金属的表面张力, 从而减小接触角; 减小熔宽可以通过降低焊接电压实现; 而增大熔敷金属量则需要增大送丝速度即焊接电流。

4 结 论

(1) 采用考虑熔池形状的液态金属的流体静力学模型, 可以解释平板堆焊时焊道咬边现象的产生机理。

(2) 焊道咬边倾向随接触角和熔宽的增大而增大, 随单位长度上熔敷金属量的增大而减小。

(3) 为减小咬边倾向, 一方面可以调整焊丝和保护气体成分, 另一方面, 可采用大电流匹配低电压进行焊接。

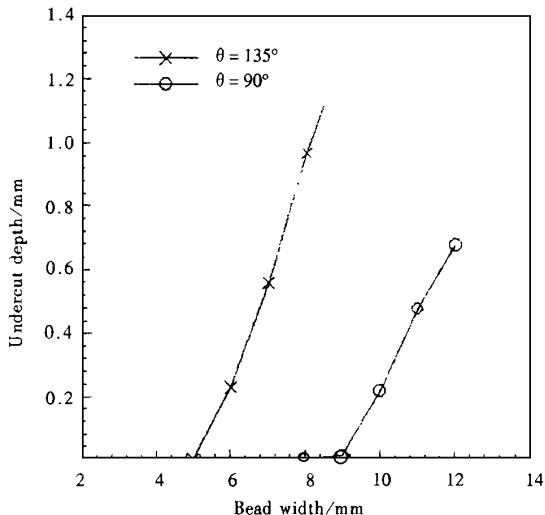


图 5 熔宽 W_b 对咬边倾向的影响
Fig. 5 Effect of bead width W_b on undercut tendency

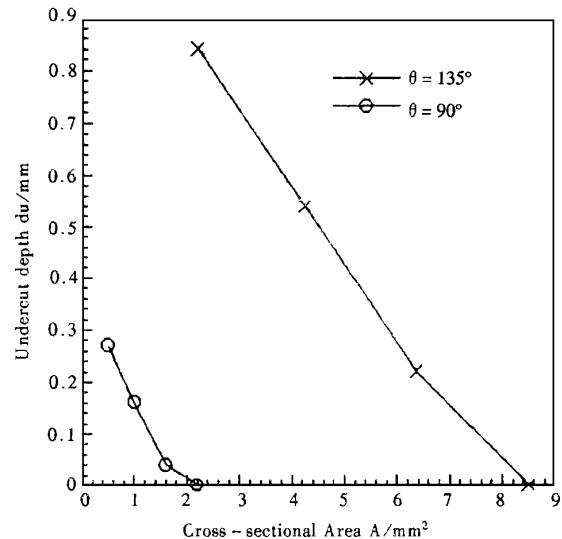


图 6 熔敷金属截面积 A 对咬边倾向的影响
Fig. 6 Effect of cross-sectional area A on undercut tendency

参 考 文 献

- 1 Lancaster J F. The Physics of Welding. Pergamon Press. 1984.
- 2 殷树言, 张九海. 气体保护焊工艺. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1989.
- 3 C A 米勒尔, P 尼奥基著, 杨承志, 金静芷译. 界面现象—平衡与动态效应. 北京: 石油工业出版社, 1992.
- 4 Nishiguchi K et al. Study on Bead Surface Profile. IIW—DOC. 212—391—77.
- 5 Akira Matsunawa. Role of Surface Tension in Fusion Welding (Part 1). IIW—DOC. 212—618—85.

Mechanism of Undercut Phenomenon in High Speed Welding

Feng Lei, Chen Shujun

(*Harbin Institute of Technology*)

Yin Shuyan

(*Beijing Polytechnical University*)

Abstract On the basis of the equilibrium conditions between gravity force and surface tension exerted on liquid metal, a static model is established to describe the surface shape of the deposited metal, the foundation of the model is the Young—Laplace Equation, which describes the pressure difference between the two sides of a curved liquid surface. Two dimensional hypothesis is adopted to simplify the calculation. The contact angle θ and the volume of filler metal on unit bead length are taken as two boundary conditions, so that the surface shape of the molten metal on a plane can be solved by an iteration algorithm. Then a static equilibrium model of the mechanism of the undercut phenomenon in high speed bead-on-plate welding is established, in which the geometry of the molten pool is considered. A ‘double iteration algorithm’ is applied to get the equilibrium condition for the mixture of the filler metal and the molten base metal. The critical undercut condition calculated by this model corresponds well with the experimental result. Finally, the model is applied in analyzing the factors that act upon the undercut tendency. The analysis shows that by improving the wettability of the material, decreasing the bead width and increasing the volume of filler metal on unit bead length, the undercut tendency can be decreased.

Key words molten pool, bead formation, surface tension

作者简介 冯雷, 男, 1972年出生。1989年考入哈尔滨工业大学焊接工艺与设备专业; 1993年获学士学位, 并考取硕士研究生, 研究方向为激光加工工艺与数控自动编程系统; 1996年被录取为哈尔滨工业大学博士研究生, 主要从事焊接设备与焊接自动化方面的研究与开发及焊接电弧物理研究。