

# 短路过渡 CO<sub>2</sub> 焊接熔滴形状数值模拟与控制\*

朱志明 吴文楷 陈 强

(清华大学机械工程系 北京 100084)

摘要：为了进一步提高短路过渡 CO<sub>2</sub> 气体保护电弧焊的工艺性能和焊接质量，根据高速 CCD 摄像获得的熔滴及其短路过渡图像，分析了熔滴与熔池短路前的形状对熔滴与熔池的短路、熔滴在熔池中的铺展及液桥缩颈形成的影响。采用熔滴静力平衡模型研究了电磁力(燃弧电流)、表面张力、重力与熔滴形状的关系，并通过对燃弧电流的精确控制实现了对熔滴形状的有效控制。当熔滴与熔池短路前为细长形状时，短路过渡过程稳定柔顺，而当熔滴为扁平形状时，则不利于熔滴的短路过渡，甚至产生瞬时短路。燃弧阶段的熔滴形状体现了各种力对熔滴的作用，而电磁力(燃弧电流)是决定熔滴形状的主要因素。根据燃弧电流对熔滴形状的影响规律，提出了采用前期大、后期小的燃弧电流控制原则，以在燃弧的不同阶段获得不同的熔滴形状。试验结果表明：该控制方法获得了良好的适合于熔滴短路过渡的短路前熔滴形状，短路过渡过程柔顺稳定，消除了瞬时短路以及由此导致的飞溅，改善了熔滴的短路过渡行为，短路过渡结束后焊丝端部的残余液态金属具有良好的一致性。

关键词：熔滴形状 短路过渡 数值模拟 残余液态金属

中图分类号：TG403

## 0 前言

随着计算机技术、有限元分析技术以及电磁流体理论的发展，关于熔滴的数值模拟有了长足的进步，分别形成了静力平衡理论、电磁收缩失稳理论、时变动态模型等，而且模型涵盖的变量愈来愈多，对熔滴内部的压力分布、液态金属流动的速度、方向的分析也越来越细致。HAIDAR 等<sup>[1-2]</sup>建立了熔滴长大的二维时变模型(考虑了重力、表面张力、电磁力、送丝速度及保护气体流量等)，模拟并分析了氩气保护下熔滴由滴状过渡向喷射过渡转变的机理。CHOI 等<sup>[3-4]</sup>采用流体体积不变的方法模拟了滴状过渡及喷射过渡中熔滴的动态变化过程，分析了熔滴内部的压力及速度分布，指出熔滴内部液态金属的轴向运动及径向电磁收缩力是熔滴过渡的主要原因，熔滴内部的电流分布是熔滴形状、熔滴分离速度以及熔滴分离后焊丝端部形状的决定因素。JONES 等<sup>[5-6]</sup>基于拍摄的熔滴图像建立了熔滴形状及其过渡的动态模型，从理论上分析了电磁力对熔滴形状及熔滴过渡的作用。NEMCHINSKY<sup>[7-12]</sup>则研究了不同等离子气体对焊丝端部熔滴电磁收缩作用的影响、熔滴表面张力梯度引起熔滴内液态金属运动的机理、焊丝以及熔滴内部的热传输现象、焊丝端部熔融金属的分离对焊丝熔化形成熔滴的影响

等。RHEE 等<sup>[13-14]</sup>利用高速摄像分析了焊丝干伸长度、保护气体成份对熔滴直径、过渡模式及过渡频率的影响。

短路过渡焊接是燃弧与短路交替进行的周期性过程。熔滴的形状和尺寸决定了电弧行为、熔池行为以及短路过渡行为，从而直接关系到焊接过程的稳定性、焊接工艺性能及焊缝质量。MITA 等<sup>[15]</sup>基于焊接过程中短路过渡周期、短路持续时间及其变化率与焊接飞溅的对应关系，模糊控制焊接电源的输出电压以实现与送丝速度的合理匹配。俞建荣等<sup>[16]</sup>以短路过渡频率为寻优目标，通过寻求最高过渡频率并微调电弧电压粗选值来自适应调整焊接电压，实现了焊接电压与送丝速度的最优匹配。为抑制焊接飞溅，众多学者研究了短路过渡 CO<sub>2</sub> 焊接飞溅产生的机理，并形成了关于飞溅产生的“电爆炸理论”和“电弧冲击理论”，基于这些理论，又发展了立足于减小短路前与(或)短路后期液桥缩颈破断时的电流，减小由于短路过程而引入飞溅的方法，包括加入混合气体、再燃弧施加高压、采用电子电抗器、改变送丝方式、负脉冲电流诱导、短路电流波形削波控制、双电源结构、复合外特性控制及电流波形控制方法<sup>[17]</sup>等。

数值模拟是研究影响短路过渡 CO<sub>2</sub> 焊接熔滴形状及尺寸的因素及规律的有力手段。MARUO 等<sup>[18]</sup>通过数值模拟及带电滴状水银模拟了熔滴的短路过渡过程，CHOI 等<sup>[19-20]</sup>通过建立的流体体积不变模型模拟了不同尺寸熔滴的短路过渡规律。而高速可控电源技术及计算机控制技术的发展为短路过渡

\* 国家自然科学基金资助项目(59975050)。20050221 收到初稿，20060210 收到修改稿

CO<sub>2</sub> 焊接熔滴的精确控制创造了条件。

### 1 熔滴的形成过程

在短路过渡焊接中，熔滴是在前一个过渡周期结束后，在焊丝端部残余的液态金属基础上，由燃弧能量熔化焊丝而形成的，如图 1 所示( $T_a$ 为燃弧时间)。由于短路过渡焊接通常采用直流反接方式，用于焊丝熔化的热量主要是阳极热和电阻热，仅极少一部分热量来自电弧和熔池的辐射。由此可得熔滴体积的动态模型为

$$V_j(t) = V'_{j-1} + \frac{Yl \int_0^t i^2(t) dt + d \int_0^t i(t) u_e dt}{Cr(T_m - T_0)} \quad (1)$$

式中  $V'_{j-1}$  ——第  $j-1$  个熔滴短路过渡结束后焊丝端部的残余液态金属体积

$C$  ——焊丝的比热容

$r$  ——焊丝的比密度

$T_m, T_0$  ——焊丝的熔点，初始温度

$Y, d$  ——燃弧阶段熔化焊丝的干伸长电阻热常数和阳极产热常数

$u_e$  ——阳极产热的等效压降

$l$  ——焊丝干伸长度

$i(t)$  ——燃弧电流瞬时值

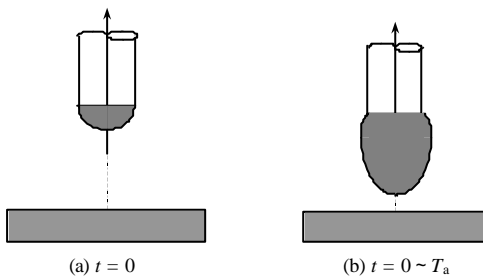


图 1 熔滴形成过程示意图

从短路过渡焊接过程看，熔滴的形成不仅取决于燃弧过程，而且受短路过渡过程的影响。由于短路过渡过程受熔池状态、焊接速度、送丝速度、短路前的熔滴径向尺寸和熔滴形状等多方面因素的影响，并且在稳定的焊接过程中，燃弧与短路阶段能量及时间的分配又必须满足一定的约束条件，因此，相比于非短路过渡方式，熔滴影响因素多，相互关系复杂，控制也相对困难。

### 2 熔滴形状对短路过渡过程的影响

对高速摄像获得的熔滴图像分析发现，短路过渡焊接短路前的熔滴体积和形状存在很大的分散

性。有些熔滴即使轮廓体积接近，形状也相差较大。熔滴过大或过小都将降低燃弧过程的稳定性。而短路前熔滴形状的差异将直接影响短路过渡过程以及熔滴金属的过渡量。根据磁流体失稳理论，流体的宽高比越大，越不易于失去平衡状态，因而，相对于细长形状的熔滴而言，扁平形状显然不利于熔滴的过渡。图 2 为扁平状熔滴在一个过渡周期内熔滴连续变化过程的图像(时间间隔为 1.05 ms)，可以看出，扁平状熔滴不仅短路过渡持续时间相对较长(9 ms)，而且焊丝干伸长部分出现大段表面熔化的迹象，熔化的液态金属集聚在焊丝端部，直接影响  $V'_{j-1}$  的大小。

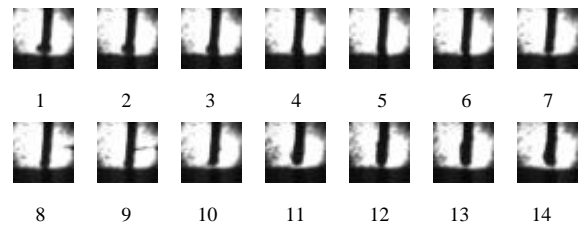


图 2 扁平状熔滴的短路过渡过程

在影响熔滴大小的两个要素中，燃弧能量的影响相对明确且可以对其实施有效控制，而焊丝端部残余液态金属  $V'_{j-1}$  的控制则相对较为复杂。 $V'_{j-1}$  是熔滴体积的初始值，是第  $j-1$  个熔滴短路过渡结束后的结果，因此它必定与短路前的熔滴体积和形状有关。熔滴体积对  $V'_{j-1}$  的影响主要是在熔滴体积过小时较为明显。而熔滴形状对  $V'_{j-1}$  影响更为突出，从体积接近的熔滴的短路过渡过程看，短路前的熔滴形状不同， $V'_{j-1}$  差异很大。由于  $V'_{j-1}$  主要决定于短路前的熔滴形状，而短路前的熔滴形状由熔滴的受力状态决定。

### 3 力对熔滴形状的影响

在图 3 所示的柱坐标系中，若假定：熔滴轴向对称。电流在熔滴或液桥内均匀分布。熔滴只受电磁力、表面张力及重力的作用。则熔滴形状满足<sup>[8]</sup>

$$p(R, z) = s \left[ -\frac{R''}{(1+R'^2)^{1.5}} + \frac{1}{R(1+R'^2)^{0.5}} \right] \quad (2)$$

式中  $p(R, z)$  ——熔滴内外压力差

$s$  ——液态金属的表面张力系数

$R$  ——熔滴在轴向坐标为  $z$  处的半径

$R' = dR/dz$

$R'' = d^2R/dz^2$

假定熔滴受力平衡，则

$$F_r = -\frac{\partial p(r,z)}{\partial r} = F_{mr} \quad (3)$$

$$F_z = \frac{\partial p(r,z)}{\partial z} = F_{mz} - r g \quad (4)$$

式中  $p(r,z)$  ——熔滴内  $(r,z)$  处的压力

$r$  ——液态金属的密度

$g$  ——重力加速度

$F_{mr}$  ——熔滴所受电磁力的径向分量

$F_{mz}$  ——熔滴所受电磁力的轴向分量

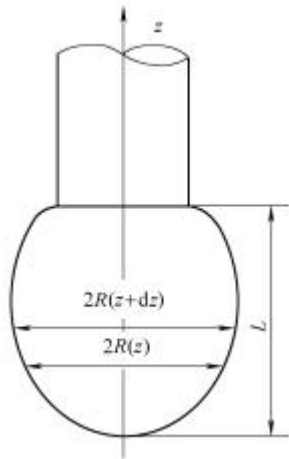


图3 熔滴形状示意图

熔滴所受电磁力为流经它的电流与其自感磁场的矢量积，即  $F = J \times B$ ，因此

$$F_{mr} = -J_z B \quad F_{mz} = J_r B \quad (5)$$

式中  $J_r$  ——电流密度的径向分量

$J_z$  ——电流密度的轴向分量

$B$  ——自感磁场强度

假设电流在熔滴内均匀分布，则

$$J_z = \frac{I}{\pi R^2} \quad (6)$$

根据欧姆定律及电流连续方程

$$J_r = -G \frac{\partial \Delta V}{\partial r} \quad J_z = -G \frac{\partial \Delta V}{\partial z}$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r G \frac{\partial \Delta V}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( G \frac{\partial \Delta V}{\partial z} \right) = 0$$

式中  $G$  ——金属熔滴的电导率

$\Delta V$  ——熔滴上的电压降

可得

$$J_r = -\frac{r}{2\pi} \frac{d}{dz} \left( \frac{I}{R^2} \right) \quad (7)$$

由 Maxwell 方程，可得

$$B = \frac{\mu_0}{r} \int_0^r j_z^2 d\varrho = \frac{\mu_0 r I}{2\pi R^2} \quad (8)$$

将式 (6)~(8) 代入式(5)，有

$$F_{mr} = -\frac{m_0 r}{2\pi^2 R^4} I^2 \quad (9)$$

$$F_{mz} = -\frac{m_0 r^2 I}{4\pi^2 R^2} \frac{d}{dz} \left( \frac{I}{R^2} \right) \quad (10)$$

将式(9)代入式(3)并积分，可得

$$p(r,z) = p_0(z) + \frac{\mu_0 r^2 I^2}{4\pi^2 R^4} \quad (11)$$

式中  $p_0(z)$  ——轴线上坐标为  $(z,0)$  处的压力

式(11)两边分别对  $z$  求导，并将式(4)、(10)代入可得

$$\frac{dp_0(z)}{dz} = -\frac{m_0 r^2 I}{4\pi^2 R^2} \frac{d}{dz} \left( \frac{I}{R^2} \right) - r g - \frac{m_0 r^2}{4\pi^2} \frac{d}{dz} \left( \frac{I^2}{R^4} \right) \quad (12)$$

为消去式(12)中的  $r$ ，将式(12)两边同乘  $2\pi r dr$ ，并对  $r$  从 0 到  $R$  积分，整理得

$$\frac{dp_0(z)}{dz} = -\frac{m_0 I}{8\pi^2} \frac{d}{dz} \left( \frac{I}{R^2} \right) - \frac{m_0 R^2}{8\pi^2} \frac{d}{dz} \left( \frac{I^2}{R^4} \right) - r g \quad (13)$$

令式(11)中  $r = R$ ，并将式(2)代入可得

$$p_0(z) = -\frac{m_0 I^2}{4\pi^2 R^2} + S \left[ -\frac{R''}{(1+R'^2)^{1.5}} + \frac{1}{R(1+R'^2)^{0.5}} \right] \quad (14)$$

熔滴形状即由式(13)和式(14)构成的联立方程组决定。在  $CO_2$  气体保护焊中，高温燃烧的焊接电弧使多原子  $CO_2$  气体在弧柱区发生分解吸热反应，对电弧产生强烈的冷却作用，使电弧电流密度提高，电弧弧柱收缩变细，弧柱电位梯度增大，弧根不易扩展，而电弧又力图在最短距离上燃烧，从而使电弧斑点集中于熔滴下端的倾向强烈。假定焊接电流全部流经熔滴，即  $I(z)=I$ 。将式(14)对  $z$  求导，并与式(13)相减，整理得

$$R'' = \frac{r g - \frac{m_0 I^2 R'}{4\pi^2 R^3}}{S} (1+R'^2)^{1.5} + \frac{3R'' R'}{1+R'^2} - \frac{R'}{R^2} (1+R'^2) - \frac{R'' R'}{R} \quad (15)$$

于是， $CO_2$  气体保护下的熔滴形状即由式(15)确定，然而式(15)的解析解很难获得，但可以运用差分方法求出熔滴形状的数值解。取

$$S = 1.2 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$r = 7860 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$m_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$g = 9.806 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

则在给定熔滴长度  $L$  及焊接电流  $I$  的情况下，由熔滴的边界条件(焊丝直径  $f = 1.2 \text{ mm}$ )

$$R(L) = 0.6 \text{ mm} \quad R(0) \rightarrow 0 \quad R'(0) \rightarrow \infty$$

可求出熔滴形状。在运用 Bvalfit 方法将边值条件转

换为初值条件后，采用 Runge-Kutta 方法迭代求出了熔滴半径  $R$  (图 4)。

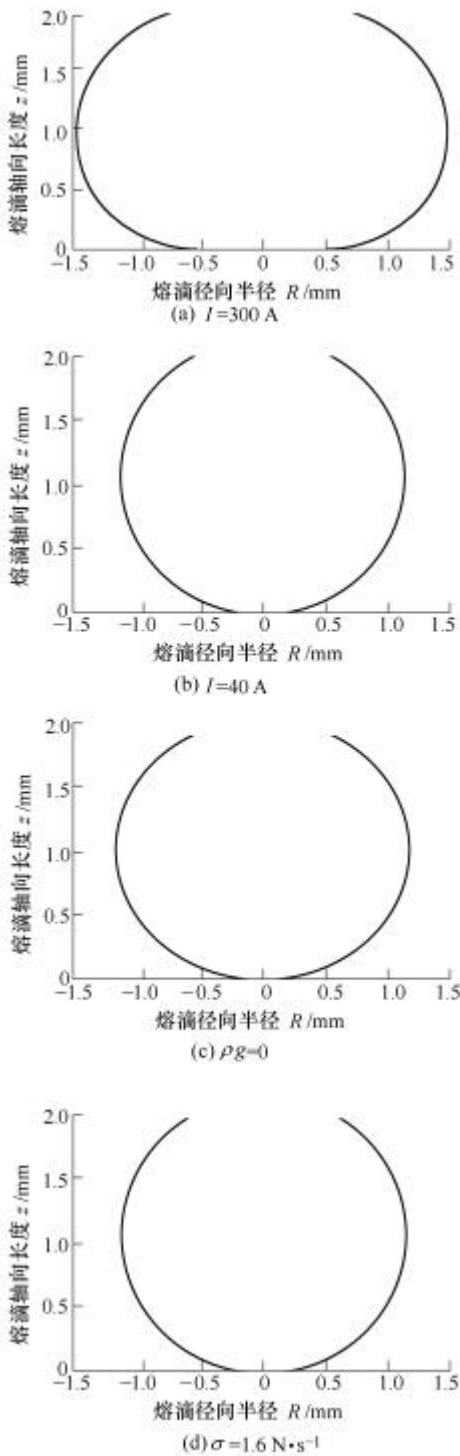


图 4 电磁力、重力和表面张力对熔滴形状的影响

图 4a 是焊接电流  $I = 300 \text{ A}$ 、熔滴长度  $L = 2 \text{ mm}$  情况下的熔滴模拟形状。可见，由于弧柱电流密度大(热收缩效应和电磁收缩效应)，电弧收缩于熔化金属下端时，焊丝端部熔滴被轴向向上的电磁力托起，形成扁平球状而不易过渡到熔池，这也正是 CO<sub>2</sub> 气氛下焊接电流达到 1 000 A 仍然难以实现喷射过渡的原因。从力学角度看，在 CO<sub>2</sub> 气体保护下，熔

滴不可能以细小颗粒向熔池过渡，也不会因为焊接电流的增大而出现 Ar 气保护下的锥形形状，而只可能以椭球形状出现。

焊接过程中，熔滴受重力、表面张力、电磁力以及等离子流力的作用，在一定的气体流量范围内，等离子流力相对较小，可不予考虑。为比较熔滴形状受诸力影响的大小，在式(15)中，分别改变重力、表面张力以及电流的取值，可模拟其不同条件下的熔滴形状。当焊接电流由 300 A 减小至 40 A 时，熔滴形状产生了明显的变化(图 4b，其他条件与图 4a 相同)，熔滴最大直径  $D_{\max}$  由 2.921 mm 减小为 2.263 mm。当不考虑重力的影响时( $\rho g = 0$ )，熔滴最大直径  $D_{\max}$  仅从 2.263 mm 变化为 2.330 mm (图 4c，其他条件与图 4b 相同)。可见，重力对熔滴形状的影响甚微。随着表面张力系数的增大( $\sigma = 1.6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ )，熔滴最大直径  $D_{\max}$  将变化为 2.252 mm (图 4d，其他条件与图 4b 相同)，熔滴形态也仅产生微小的变化。

上述模拟结果表明，CO<sub>2</sub> 气体保护焊时，熔滴的形状主要决定于熔滴所受的电磁力，重力及表面张力对熔滴形状的影响相对较小，改变流经熔滴的电流大小可以控制熔滴的形状。

#### 4 熔滴形状控制

短路前的熔滴形状是影响短路历程及短路结束后焊丝端部液态金属残余量的重要因素，而焊接电流又是决定熔滴形状的主要因素，因此可以通过焊接电流控制熔滴形状。

从熔滴体积的动态模型可以看出，焊接过程中完全可能存在燃弧电流  $i(t)$  的变化过程不同，而在某一时刻燃弧能量相同而焊接电流不同的状况。图 5 是相同体积的液态金属在不同电流下其形状的模拟结果，可以看出，焊接电流较大时，熔滴轴向距离小，径向直径大。

在燃弧初期，希望熔滴具有扁平形状，以避免熔滴与熔池的非正常接触短路，因此此时应提供较大的焊接电流；当然，施加燃弧大电流还可以强化焊丝端头的快速返烧，避免小尺寸熔滴扎入熔池。而在燃弧后期，在熔滴达到一定尺寸后，又希望熔滴能够以有利于失稳过渡的细长形状开始其短路过渡过程，以获得尽可能少的焊丝端部残余液态金属，因此，在燃弧后期要求提供较小的焊接电流。在液态金属体积接近时，提供较小的相同的焊接电流，将有利于获得均匀接近的熔滴形状，避免熔滴形状的不同导致  $V'_{j-1}$  的差异；同时较小的焊接电流还可

以减小熔滴所受的斑点压力，避免电弧斑点的飘浮摆动，降低熔滴与熔池接触短路的随机性，增强熔滴轴向过渡的指向性。

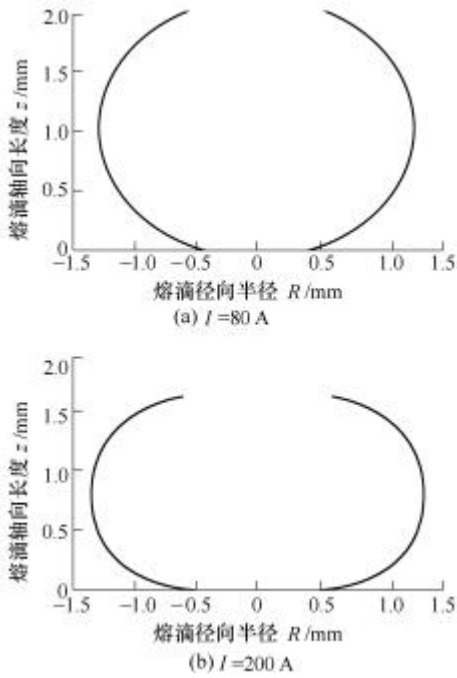
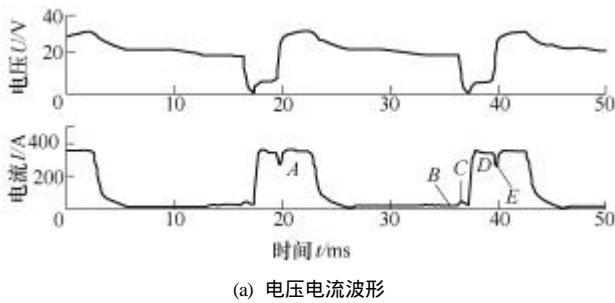
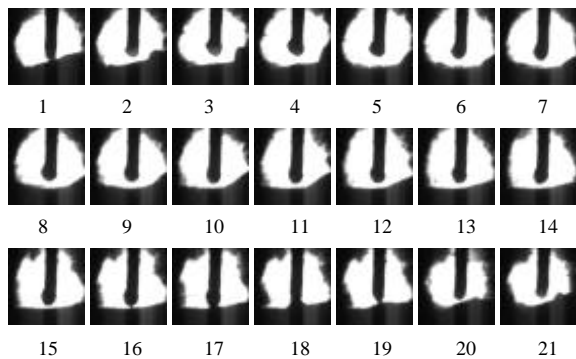


图 5 焊接电流与熔滴形状的对对应关系

图 6 所示为对熔滴体积和形状进行控制的电压、电流波形及实拍的连续一个过渡周期的熔滴图像(时间间隔 1.05 ms)。



(a) 电压电流波形



(b) 实拍熔滴图像(连续一个过渡周期)

图 6 熔滴开环控制电压电流波形及熔滴图像

在系统检测到再燃弧开始后，电源输出一定宽度的燃弧大电流(图 6a 电流波形图中的 A 段)，强化焊丝的熔化，并使熔滴呈现扁平形状(图 6b 中的图

像 3~5)，避免熔滴与熔池的不规则接触；随后，为避免电流突变造成对熔池的摄动，电流缓降至较低的数值，熔滴在燃弧后期维弧小电流的作用下(图 6a 电流波形图中的 B 段)，形成有利于熔滴过渡的细长形状与熔池接触短路(图 6b 中的图像 15,16)。在系统检测到短路开始后，电源输出约 0.8 ms 的小电流(图 6a 电流波形图中的 C 段)，以便于熔滴在熔池中的铺展过渡(图 6b 中的图像 17)；随后，电源输出阶跃大电流(图 6a 电流波形图中的 D 段)，强迫熔滴向熔池过渡(图 6b 中的图像 18)；在短路液桥缩径破断前夕，将焊接电流减小至相对较低的数值(图 6a 电流波形图中的 E 段)，使液桥在小电流下实现破断(图 6b 中的图像 19)。

从熔滴图像的连续变化过程看，在前期大、后期小的燃弧电流作用下，燃弧前期及短路瞬间的熔滴形状与前文的理论分析相一致；而在短路电流作用下，熔滴铺展柔顺，过渡过程加快，短路结束残余在焊丝端部的液态金属  $V'_{j-1}$  也很少，从而使  $V'_{j-1}$  具有很好的一致性。同时，由于熔滴在小电流下与熔池短路接触，有效避免了瞬时短路现象的发生，而在短路液桥缩径破断前夕，焊接电流减小至相对较低的数值，避免了液桥破断时的电爆炸现象，因此系统对焊接飞溅也有良好的控制作用。

### 5 结论

- (1) 静力平衡模型是分析熔化极气体保护焊熔滴形状影响因素的有效手段。
- (2) 根据熔滴静力平衡模型的分析结果，在燃弧阶段采用前期大、后期小的焊接电流波形控制方法，在提高熔滴长大过程稳定性的同时，可有效控制熔滴与熔池短路前的形状和尺寸。
- (3) 系统采用的电流波形控制方法可有效降低短路过渡  $CO_2$  焊接的飞溅量。

### 参 考 文 献

[1] HAIDAR J, LOWKE J J. Predictions of metal droplet formation in arc welding[J]. J. Phys. D : Appl. Phys., 1996, 29 : 2 951-2 960.

[2] HAIDAR J, LOWKE J J. Effect of  $CO_2$  shielding gas on metal droplet formation in arc welding[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1997, 25(5) : 931-936.

[3] CHOI S K, YOO C D, KIM Y S. The dynamic analysis of metal transfer in pulsed current gas metal arc welding[J]. J. Phys. D : Appl. Phys., 1998, 31 : 207-215.

[4] CHOI S K, YOO C D, KIM Y S. Dynamic simulation of metal transfer in GMAW, part 1 : globular and spray

transfer models[J]. *Welding J.*, 1998, 77 : 38-44.

- [5] JONES L A, EAGER T W, LANG J H. Magnetic forces acting on molten drops in gas metal arc welding[J]. *J. Phys. D : Appl. Phys.*, 1998, 31 : 93-106.
- [6] JONES L A, EAGER T W, LANG J H. A dynamic model of drops detaching from a gas metal arc welding electrode[J]. *J. Phys. D : Appl. Phys.*, 1998, 31 : 107-123.
- [7] NEMCHINSKY V A. The effect of the type of plasma gas on current constriction at the molten tip of an arc electrode[J]. *J. Phys. D : Appl. Phys.*, 1996, 29 : 1 202-1 208.
- [8] NEMCHINSKY V A. Size and shape of the liquid droplet at the molten tip of an arc electrode[J]. *J. Phys. D : Appl. Phys.*, 1994, 27 : 1 433-1 442.
- [9] NEMCHINSKY V A. Heat transfer in an electrode during arc welding with a consumable electrode[J]. *J. Phys. D : Appl. Phys.*, 1998, 31 : 730-736.
- [10] NEMCHINSKY V A. Heat-transfer in a liquid droplet hanging at the tip of an electrode during arc-welding[J]. *J. Phys. D : Appl. Phys.*, 1997, 30 : 1 120-1 124.
- [11] NEMCHINSKY V A. Electrode vaporization in an arc with pulsing current[J]. *J. Phys. D : Appl. Phys.*, 1997, 30 : 2 895-2 899.
- [12] NEMCHINSKY V A. The rate of melting of the electrode during arc welding - the influence of discrete removal of the melt[J]. *J. Phys. D : Appl. Phys.*, 1998, 31 : 1 565-1 569.
- [13] RHEE S. Analysis of pressure effect on metal transfer in gas metal arc welding[J]. *J. Phys. D : Appl. Phys.*, 1991, 24 : 5 056-5 075.
- [14] RHEE S et al. Observation of metal transfer during gas metal arc welding[J]. *Welding J.* 1992, 71(10) : 381-386.
- [15] MITA T, TANOUE H. Automatic setting of arc voltage using fuzzy logic[J]. *Welding Review International*, 1996 : 130-132.
- [16] 俞建荣, 张甲英, 蒋力培, 等. CO<sub>2</sub> 气体保护焊短路过渡的和谐控制[J]. *农业机械学报*, 1998(1) : 120-124.
- [17] 朱志明, 吴文楷, 罗小锋. 波控短路过渡 CO<sub>2</sub> 焊接恒频自适应控制系统[J]. *机械工程学报*, 2001, 37(11) : 81-84.
- [18] MARUO H. Bridging transfer phenomena of conductive pendent drop[R]. *IIW Doc. XII-1347-93*, 1994.
- [19] CHOI S K, YOO C D, KIM Y S. Dynamic simulation of metal transfer in GMAW, part 2: short-circuit transfer models[J]. *Welding J.*, 1998, 77 : 45-51.
- [20] CHOI S K, LEE K H. Analysis of metal transfer through equilibrium shape of pendent drop in GMAW[J]. *Quarterly Journal of Japan Welding Society*, 1996, 14(2) : 243-247.

## NUMERICAL SIMULATION AND CONTROL OF MOLTEN DROPLET SHAPE IN SHORT-CIRCUIT CO<sub>2</sub> ARC WELDING

ZHU Zhiming WU Wenkai CHEN Qiang  
(Department of Mechanical Engineering,  
Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** : To improve the welding process behavior and quality of short-circuit CO<sub>2</sub> arc welding further, the effects of molten droplet shape just before short-circuit on the short-circuit of molten droplet with weld pool, the spread of molten droplet in weld pool and the formation of liquid bridge neck are analyzed through the images of molten droplet and its short-circuit transfer photographed by a high-speed CCD camera. By using a static force balance model of molten droplet, the relationships between molten droplet shape and electromagnetic force (arc current), surface tensile force, gravity is studied. And then the molten droplet shape is controlled effectively via precise adjusting of arc current. When the molten droplet shape just before short-circuit is columned, the short-circuit transfer process is stable and gentle. But the flat-shaped molten droplet makes the short-circuit transfer unfavorable, generates transient short-circuit even. The molten droplet shape during arc phase embodies the action of various forces on the molten droplet, in which the electromagnetic force (arc current) is the dominative factor to determine the molten droplet shape. To obtain appropriate molten droplet shape during different stages of arc phase, a control principle by adopting a large arc current in prophase and a small current in anaphase during the arc phase is proposed according to the influence regulation of arc current on the molten droplet shape. The experimental results show that a favorable molten droplet shape just before short-circuit is achieved with this control approach, which is adapt to short-circuit transfer. The short-circuit transfer is stable and gentle, the transient short-circuits and the metal spatter induced by them are eliminated, the short-circuit behavior of molten droplet is improved and the residual liquid metal quantity at the end of wire electrode after the completion of short-circuit transfer has a good equality.

**Key words** : Droplet shape Short-circuit transfer

Numerical simulation Residual liquid metal

作者简介：朱志明，男，1964年出生，博士，副教授，清华大学焊接技术中心副主任，中国焊接学会计算机应用技术专业委员会副主任。主要从事焊接工艺过程控制及自动化、人工智能与计算机辅助焊接加工技术、现代功率电子技术与电能变换方面的研究和教学工作，发表论文 80 余篇。

E-mail : zzmme@tsinghua.edu.cn