

# 高速 GMAW 驼峰形成过程的数值分析

吴东升<sup>1,2,3</sup>, 华学明<sup>1,2</sup>, 叶定剑<sup>1,2</sup>, 张 菁<sup>1,2</sup>

(1. 上海交通大学 上海市激光制造与材料改性重点试验室, 上海 200240;

2. 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240; 3. 上海发电设备成套设计研究院, 上海 200240)

**摘 要:** 文中通过数值模拟来研究常速、高速熔化极气体保护焊的温度场和流场, 并利用高速摄影观察熔池流动, 分析了驼峰形成过程。结果表明, 常速焊接熔池纵截面同时存在逆时针向内和顺时针向外两种流动方式, 但随着焊接速度的提高, 熔池纵截面仅存在逆时针向内单一流动方式。高速焊接时, 较大动量的后向液体流和足够大的表面张力促进液态金属在熔池尾部不断堆积、变大。沿焊接方向, 熔池受到不均匀的表面张力法向力作用而收缩, 这是驼峰形成的两个重要因素。任何能降低表面张力的措施, 都能抑制驼峰的形成。

**关键词:** 熔化极气体保护焊; 高速焊接; 驼峰; 熔池流动

**中图分类号:** TG 444 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)10-0005-04

## 0 序 言

在焊接生产中, 提高焊接效率可以节省大量的生产成本, 这其中一个重要的途径就是提高焊接速度。但是当焊接速度达到一定的临界值时会出现一些焊缝成形缺陷, 如咬边、驼峰等。在高速焊接过程中, 驼峰的形成严重制约着焊接速度的提高, 从而影响焊接效率。因此, 研究高速焊接驼峰的形成机理并提出抑制方法, 具有重要意义。

国内外学者已提出多种模型来研究驼峰的形成。Bradstreet<sup>[1]</sup>首先在熔化极气体保护焊(gas metal arc welding, GMAW)中观察到驼峰的形成, 并提出毛细不平衡理论, 即高速焊接时液态金属在表面张力作用下失稳是产生驼峰的主要原因。Mills 等人<sup>[2]</sup>认为表面张力梯度引起的熔池流动是产生驼峰的根本原因。根据拍摄的高速摄影图片, Nguyen 等人<sup>[3,4]</sup>提出高速流向熔池尾部的液态金属流(后向液体流)是产生驼峰的主要原因, 任何降低后向液体流动量的因素都有利于抑制驼峰的形成。Cho 等人<sup>[5]</sup>通过模拟和试验来研究驼峰形成现象, 指出表面张力作用下产生的液体通道收缩以及液体通道内的液态金属提前凝固, 将熔池分为前后两部分, 从而形成驼峰。Chen 等人<sup>[6]</sup>建立高速 GMAW 三维数值模型, 定量的分析了驼峰的形成过程以及工艺参数的影响。杨战利等人<sup>[7]</sup>利用高速摄影研究了粗丝高速

GMAW 驼峰形成机理, 并提出动态平衡点远离电弧是产生驼峰的根本原因。常云龙等人<sup>[8]</sup>研究发现, 外加磁场有助于减小表面张力温度系数, 从而解决高速焊接时出现的驼峰问题。娄小飞等人<sup>[9]</sup>开展了高速钨极氩弧焊和熔化极气体保护焊复合试验, 研究发现复合焊电弧相互作用导致电弧压力减小, 避免了驼峰的形成。

目前, 对于驼峰的形成机理问题, 国内外专家学者进行了一定的研究, 但还没有达成统一的共识, 大多是建立在一定的理论假设的基础上来讨论的, 而且驼峰形成过程中熔池与常速 GMAW 熔池的差异性还未进行系统地研究。文中通过数值模拟来研究常速、高速 GMAW 的温度场和流场, 并采用高速摄影拍摄熔池流动情况, 分析常速 GMAW 与高速 GMAW 熔池的差异性, 探讨驼峰的影响因素, 以及表面张力在驼峰形成过程中的作用。

## 1 试验方法

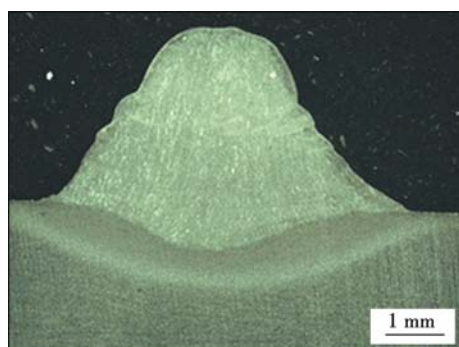
高速 GMAW 焊接工艺条件为: 焊接方向向左, 焊接电流 300 A, 电压 28 V, 焊接速度为 1.5 m/min, 焊丝直径为 1.2 mm 的 JM53 牌号焊丝, 纯氩气保护, 气体流量为 20 L/min, 喷嘴到工件的距离是 15 mm, 焊丝轴线与工件垂直。焊接材料采用 8 mm 厚的 A36 船用低碳钢, 其材料性质见表 1。试验为平板堆焊, 采用带有 808 nm ± 10 nm 窄带滤光片的 CCD 相机来拍摄熔池流动情况, 每帧 3 ms。试验结束后剖开焊缝, 用 4 % HNO<sub>3</sub> 酒精溶液腐蚀, 得到波

峰波谷横截面的宏观金相照片如图 1 所示. 由图 1 可知, 驼峰的波峰处金属熔敷量大, 波谷处金属熔敷量小, 但是两处的熔深与熔宽基本相同.

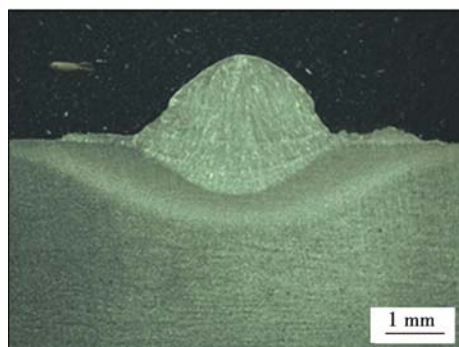
表 1 A36 钢材性质

Table 1 Material properties of A36 steel

密度 $\rho$ $/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	粘度 $\mu$ / $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$	热导率 $K$ / $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	液相线温 度 $T/\text{K}$	表面张力 $\gamma/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$
7 800	0.005 9	32.3	1 798	1.2



(a) 波峰处横截面



(b) 波谷处横截面

图 1 高速 GMAW 焊缝横截面

Fig. 1 Transverse section macrographs of weld

## 2 数学模型和数值计算

模拟选用 8 mm 厚的 A36 船用低碳钢, 考虑到对称性, 沿焊接电弧运动方向取一半进行模拟, 计算域长宽高为 70 mm  $\times$  5 mm  $\times$  15 mm, 采用 0.25 mm 的均匀网格尺寸来划分. 高速 GMAW 熔池模拟的数学模型需要考虑质量、动量、能量守恒方程. 利用流体体积方程 (volume of fluid, VOF) 来追踪熔池上表面的变形, 计算方法有 unsplit 和 split 两种, 因高速 GMAW 熔池上表面变形剧烈, 文中采用 split 算法, 熔池自由表面的移动在每个方向上分开进行计算. 边界条件包括能量边界条件和压力边界条件, 熔滴过渡模拟为球状液滴以一定的高度、尺寸、频

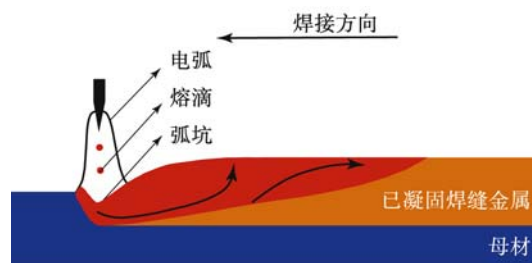
率、速度, 沿负 Z 方向下落. 利用双椭球热源模型来描述电弧热输入, 熔宽的一半作为双椭球模型的宽度参数, 熔深作为双椭球模型的深度参数, 前半椭球长度采用熔宽的一半, 后半椭球长度采用熔宽的两倍<sup>[10]</sup>. 详细的数学模型描述可参考作者以前的研究<sup>[11]</sup>.

## 3 结果讨论

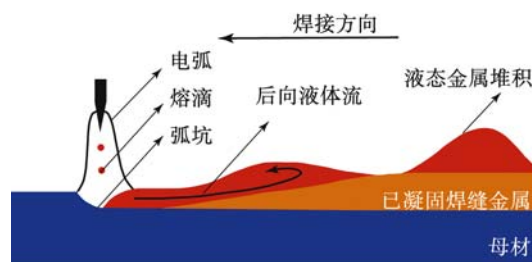
### 3.1 常速、高速 GMAW 熔池流动的差异性

为了更好地对比常速 GMAW、高速 GMAW 熔池的差异性, 以及阐述驼峰的形成机理, 根据模拟获得的温度场、速度场结果, 采用图 2 来描述常速 GMAW、高速 GMAW 熔池流动方式, 以及各种术语. 其中蓝色区域表示为母材, 黄色部分表示熔池中已经凝固的焊缝金属, 红色部分表示熔池中的液态金属.

常速 GMAW 熔池内同时存在由电弧压力、熔滴动态冲击力和电磁力作用引起的液态金属逆时针向内流动, 和远离电弧区域, 由表面张力梯度驱动的液态金属顺时针向外向外流动方式<sup>[11]</sup>.



(a) 常速 (0.6 m/min) GMAW 熔池流动示意图



(b) 高速 (1.5 m/min) GMAW 熔池流动示意图

图 2 常速和高速 GMAW 熔池流动

Fig. 2 Schematic diagrams of weld pool convection in normal and high speed GMAW processes

图 3a 显示的是高速 GMAW  $t = 0.66$  s 熔池纵截面温度场与流场局部放大图, 红色部分表示熔池内液态金属的温度超过熔点. 白色箭头代表流动循环方向. 高速 GMAW 熔池内, 在电弧压力和熔滴冲击

力作用下,熔池表面发生严重变形. 过渡到熔池中的熔滴和熔化的母材形成液态金属流,沿着电弧两侧的通道以及电弧正下方薄的液态金属层,向电弧后方流动. 紧靠电弧后方,三股分离的液态金属流,汇合在一起,形成“后向液体流”,继续流向熔池尾部,在熔池尾部形成液态金属堆积,熔池尾部不易提前凝固. 熔池内仅存在逆时针向内流动方式. 由于高速 GMAW 电弧具有较强的挖掘作用,电弧下方熔池变形比常速 GMAW 更严重,形成较大的弧坑. 在图 3b 熔池高速摄影照片中可以观察到电弧前方熔池自由表面的变形,和液态金属在熔池尾部堆积,体积变大,熔池拉长.

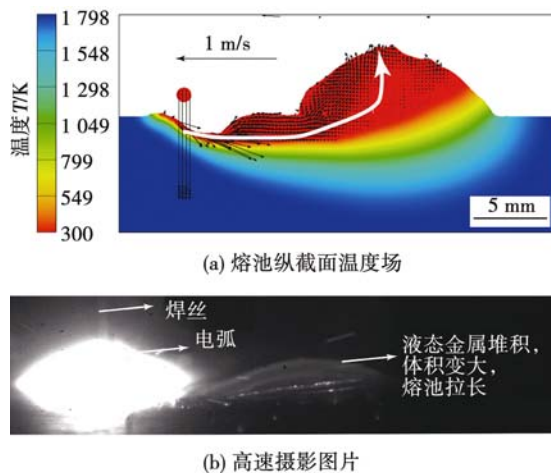


图 3 高速 GMAW  $t=0.66$  s 模拟和试验结果

Fig. 3 Numerical and experimental results in high speed GMAW process at  $t=0.66$  s

### 3.2 驼峰形成的影响因素

由前述分析可知,具有较大动量的后向液体流促进液态金属在熔池尾部不断堆积、变大,这是驼峰形成的一个重要因素. 另一个重要因素是表面张力的作用. 液态金属在熔池尾部堆积,体积不断增大,如果没有足够大的表面张力,那么堆积的液态金属将会在母材上铺展开来,不容易形成驼峰. 另外,表面张力法向力对熔池内流体的分布起着重要作用,假设熔池横截面为圆形,则截面曲率近似等于截面宽度一半的倒数,表面张力法向力与截面曲率成正比.

图 4 为高速 GMAW 不同时刻熔池上表面温度场. 由图 4 可知,由于液态金属在熔池尾部大量堆积,导致熔池前部液态金属体积较少,熔池尾部熔池截面宽度大,截面曲率小,表面张力法向力小,而熔池前部,沿着焊接方向,熔池截面宽度逐渐变窄,截面曲率变大,表面张力法向力变大. 沿着焊接方向,

熔池受到不均匀的表面张力法向力的作用,开始收缩,这减缓了熔池前部与尾部的液态金属、能量的传递. 到 1.2 s 时,由于熔池中部的液态金属较少且远离电弧,得不到足够的能量供应,提前凝固,形成驼峰中的“波谷”,波谷的形成阻止了液态金属继续向后流动,尾部堆积的液态金属随后也慢慢凝固,形成驼峰中的波峰.

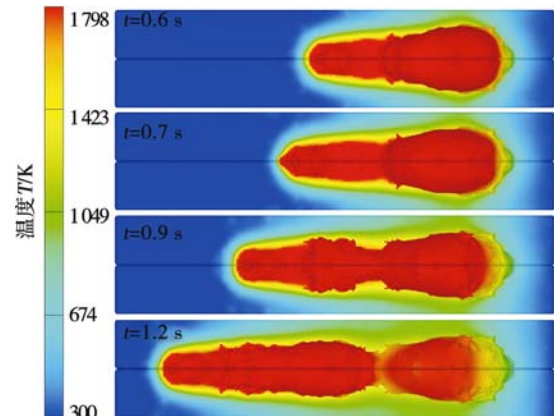


图 4 高速 GMAW 熔池上表面温度场

Fig. 4 Temperature (K) field of weld pool at top view

图 5a 为 1.2 s 熔池高速摄影图片,凝固后的波谷将熔池分为两部分,这标志着驼峰的形成. 此时靠近电弧的熔池的高度较低. 如图 5b 所示,由于熔池内流动方式保持不变,随后液态金属又会在熔池尾部堆积,体积不断增大,开始形成新的驼峰.

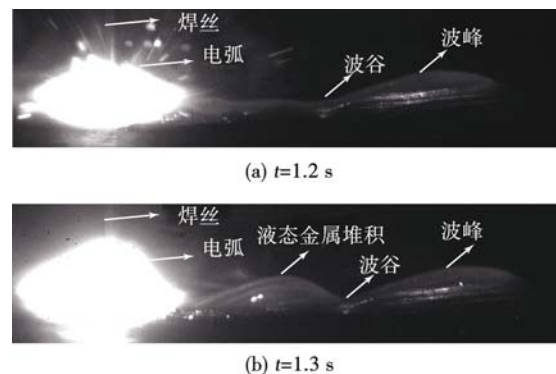


图 5 高速 GMAW 熔池高速摄影图片

Fig. 5 High-speed photographys picture of weld pool

### 3.3 驼峰的抑制

通过在氩气中加入活性  $\text{CO}_2$  气体,可降低液态金属的表面张力,提高其与母材的润湿性,从而得到良好的焊缝<sup>[3]</sup>. 模拟中其它焊接条件不变,将液态金属的表面张力减小一半 ( $0.6 \text{ N/m}$ ),得到的结果



如图 6 所示. 熔池内的流动方式不变,但是液态金属不易在熔池尾部堆积,从而抑制了驼峰的产生.

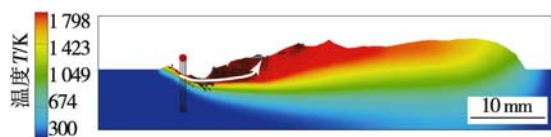


图 6 高速 GMAW  $t=1.6$  s 纵截面温度场 (表面张力减小一半)  
Fig. 6 Temperature field at longitudinal section at  $t=1.6$  s  
(surface tension force reduced by half)

为了验证模拟的结果,在其它条件不变的情况下,采用 80% Ar-20%  $\text{CO}_2$  气体保护,重新焊接,得到的熔池高速摄影照片如图 7 所示,熔池尾部没有液态金属堆积,熔池高度比较均匀,焊缝成形较好. 模拟和熔池高速摄影照片表明,降低熔池液态金属的表面张力可以抑制驼峰焊道的形成.



图 7 80% Ar-20%  $\text{CO}_2$  气体保护,熔池高速摄影照片  
Fig. 7 High speed photographs of weld pool with 80% Ar-20%  $\text{CO}_2$  shielding gas

## 4 结 论

(1) 常速 GMAW 熔池纵截面同时存在逆时针向内和顺时针向外两种流动方式,而高速 GMAW 熔池纵截面仅存在逆时针向内单一流动方式.

(2) 高速 GMAW 熔池内,较大动量的后向液体流和足够大的表面张力促进液态金属在熔池尾部不断堆积、变大. 沿焊接方向,熔池受到不均匀的表面张力法向力作用,开始收缩,这减缓了熔池前部与尾部的液态金属、能量的传递.

(3) 模拟和试验结果表明,降低液态金属表面张力,可以抑制驼峰的形成.

## 参考文献:

- [1] Bradstreet B J. Effect of surface tension and metal flow on weld bead formation [J]. Welding Journal, 1968, 47(7): 314s - 322s.
- [2] Mills K C, Keene B J. Factors affecting variable weld penetration [J]. International Materials Reviews, 1990, 35(1): 185 - 216.
- [3] Nguyen T C, Weckman D C, Johnson D A, *et al.* The humping phenomenon during high speed gas metal arc welding [J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2005, 10(4): 447 - 459.
- [4] Nguyen T C, Weckman D C, Johnson D A. Predicting onset of high speed gas metal arc weld bead defects using dimensional analysis techniques [J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2007, 12(7): 634 - 648.
- [5] Cho M H, Farson D F. Understanding bead hump formation in gas metal arc welding using a numerical simulation [J]. Metallurgical and materials transactions B, 2007, 38(2): 305 - 319.
- [6] Chen M J, Wu C S. Numerical analysis of forming mechanism of hump bead in high speed GMAW [J]. Welding in the World, 2010, 54(9): 286 - 291.
- [7] 杨战利, 张善保, 杨永波, 等. 粗丝高速 MAG 焊驼峰焊道形成机理分析 [J]. 焊接学报, 2013, 34(1): 61 - 64.  
Yang Zhanli, Zhang Shanbao, Yang Yongbo, *et al.* Study on humping bead formation mechanism in thick-wire high-speed MAG welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(1): 61 - 64.
- [8] 常云龙, 路 林, 李英民, 等. 磁控 TIG 高速焊焊缝成形机理 [J]. 焊接学报, 2013, 34(6): 1 - 4.  
Chang Yunlong, Lu Lin, Li Yingming, *et al.* Mechanism of weld formation during high speed TIG welding with external magnetic fields [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(6): 1 - 4.
- [9] 娄小飞, 陈茂爱, 武传松, 等. 高速 TIG-MIG 复合焊焊缝驼峰及咬边消除机理 [J]. 焊接学报, 2014, 35(8): 87 - 90.  
Lou Xiaofei, Chen Maoai, Wu Chuansong, *et al.* Humping and undercutting suppression mechanism for high speed TIG-MIG hybrid welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(8): 87 - 90.
- [10] Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. A new finite element model for welding heat sources [J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 1984, 15(2): 299 - 305.
- [11] 吴东升, 华学明, 叶定剑, 等. MIG 焊接熔池形成与凝固过程数值模拟 [J]. 焊接, 2015(9): 6 - 11.  
Wu Dongsheng, Hua Xueming, Ye Dingjian, *et al.* Numerical analysis of weld pool formation and solidification in MIG process [J]. Welding & Joining, 2015(9): 6 - 11.

作者简介: 吴东升,男,1991 年出生,硕士. 主要从事电弧焊相关研究. Email: ctrj5xdmWDS@sina.com

通讯作者: 华学明,男,教授. Email: xmhua@sjtu.edu.cn