

DOI: 10.3901/JME.2016.06.059

TIG-MIG 复合焊电弧间相互作用 对焊接过程的影响*

陈 姬 宗 然 武传松 陈茂爱

(山东大学材料液固结构演变与加工教育部重点实验室 济南 250061)

摘要: 根据毕奥-萨伐尔定律, 对惰性气体钨极保护-熔化极惰性气体保护(Tungsten inert gas-metal inert gas, TIG-MIG)复合焊 TIG-MIG 电弧间相互作用模型进行改进; 结合不同倾斜电弧下电流密度分布的自适应模型, 建立 TIG-MIG 复合焊的电弧力-热模型。对不同焊接电流下 TIG-MIG 复合焊电弧倾角展开计算, 分析复合焊电弧间相互作用力对工件上热流密度分布和焊缝成形的影响, 发现两电弧之间存在的排斥力能够增加 TIG 电弧的垂直度, 从而提高 TIG 电弧热流密度, 同时 MIG 电弧是影响 TIG-MIG 复合焊焊缝成型的主要因素。研究复合焊焊枪间距和两焊枪的前后位置对焊接过程的影响, 发现 TIG 焊枪在前、MIG 焊枪在后的方式更有利于焊接过程稳定。计算结果与试验结果的对比表明, 所建立的模型能够较好地描述 TIG-MIG 复合焊接物理过程, 这对优化其焊接工艺参数具有一定的指导意义和实际应用价值。

关键词: 复合焊; 电弧作用; 焊缝成形; 数值模拟

中图分类号: TG444

Influence of Arcs Interaction on TIG-MIG Hybrid Welding Process

CHEN Ji ZONG Ran WU Chuansong CHEN Maoai

(Key Laboratory for Liquid-Solid Structural Evolution & Processing of Materials of Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061)

Abstract: Considering Biot-Savart law, the models for arcs interaction during Tungsten inert gas-metal inert gas (TIG-MIG) hybrid welding process are improved. Base on the adaptive current density mathematical model of inclined arc, the heat-force models for TIG-MIG hybrid welding are established to study the interacting forces between TIG and MIG arcs by analyzing the distribution of heat flux and weld formation. The inclined angles of two arcs under different welding currents are also calculated. The results indicate that the repelling force between two arcs could increase verticality of TIG arc, which will develop the heat density of TIG arc. And the behavior of MIG energy is the main factor of bead forming process during TIG-MIG hybrid welding. Then the effect of distance between TIG and MIG torches and their relative front or back position on welding process is estimated. It is found that TIG leading in TIG-MIG hybrid welding is beneficial to stabilize the welding process. Good agreement is observed between numerical predictions and experimental data, the results show that these numerical models can reflect TIG-MIG hybrid welding process well and can be used to optimize its welding parameters.

Key words: hybrid welding; arc interaction; weld formation; numerical simulation

0 前言

惰性气体钨极保护-熔化极惰性气体保护(Tungsten inert gas-metal inert gas, TIG-MIG)复合焊是一种将辅助 TIG 电弧直接施加于工件上, 利用

TIG 电弧的热-力作用, 改善传统 MIG 焊接质量的一种复合焊接过程^[1]。与传统 TIG/MIG 相比, TIG-MIG 复合焊能够充分利用两种电弧各自不同优点, 实现低成本的高效优质焊接, 具有广阔的应用前景。试验结果表明, 即使在纯氩气保护条件下, 辅助 TIG 电弧仍能够有效稳定 MIG 电弧, 焊接过程稳定, 焊缝成形美观^[2-3]。但目前对这种新型焊接成形工艺的研究, 主要集中在工艺试验方面, 尚缺

* 国家自然科学基金(51305235)和山东大学自主创新基金(2012GN053)资助项目。20150426 收到初稿, 20150929 收到修改稿

乏对其内在机理的研究,一定程度上限制了此工艺的发展和应用。数值模拟与少量试验验证相结合是深入研究 TIG-MIG 复合焊工艺机理并优化其焊接参数的有效途径之一。KIRAN 等^[4-6]通过改进面热源或体热源模型,研究复合焊时电弧热流密度分布对焊接过程的影响。但上述模型中焊枪或电弧倾角发生变化,热源模型需要依据试验重新调节。为此,MISHIMA 等^[7]根据 TIG-MIG 复合焊焊接过程特点,建立电弧-熔池三维瞬态流场热场一体化模型。研究发现,TIG 电弧可以提高 MIG 焊接过程中阴极斑点的稳定性,即在一定范围内,TIG 电流越大,TIG-MIG 焊接过程越稳定。史传伟等^[8]建立双钨极间接电弧三维有限元模型,研究复合焊时双钨极间接电弧的温度、等离子体流速等电弧参数对焊接过程的影响。但以上模型均需要对电流连续性方程、麦克斯韦方程组以及能量方程等联立求解,一定程度上限制了理论模型在实际工程中的推广及应用。本文拟根据 TIG-MIG 焊接过程的特点,基于一定的简化假设,改进复合焊两电弧间相互作用模型,基于不同电弧倾角的自适应电流密度分布模型,并结合少量试验验证,研究不同焊接参数对电弧偏转角度的影响;研究辅助 TIG 电弧对复合焊传热过程的影响以及对焊缝成形的影响。为进一步深入研究 TIG-MIG 焊接工艺机理、优化焊接工艺参数奠定基础。

1 数值模型及试验验证

1.1 TIG-MIG 复合焊热源模型

TIG-MIG 复合焊过程中,通过倾斜 TIG 焊枪一定角度,以获得最佳复合焊接效果。焊枪倾斜角度定义为 θ' ,如图 1 所示(TIG 焊枪前置)。

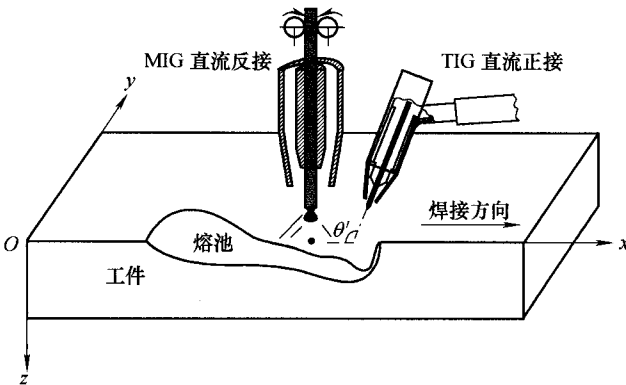


图1 TIG-MIG 复合焊示意图

热源模型分别采用双椭圆平面热源(TIG)以及双椭球体热源(MIG)。

$$q_{\text{TIG-MIG}} = \eta_T U_T j_T(x_i, y_j) + \eta_M U_M j_M(x_i, y_j) \quad (1)$$

式中, η_T 、 η_M 分别是 TIG 热源及 MIG 热源热效率, U_T 、 U_M 分别是 TIG、MIG 电弧电压, $j_T(x_i, y_j)$ 、 $j_M(x_i, y_j)$ 分别是 TIG、MIG 电弧倾斜时在工件(x_i, y_j)处的电流密度。根据文献[9],不同焊枪倾角下电弧电流密度在工件上的分布关系可以表达为

$$j(x_i, y_j) = j(s_i, s_j) \frac{s_{i+1} - s_{i-1}}{x_{i+1} - x_{i-1}} \frac{\cos \chi_2 h}{\cos \chi_3 \cos \chi_1 \sqrt{h^2 + \varepsilon^2}} \quad (2)$$

式中, h 为电极端部到工件的距离; χ_1 、 χ_2 、 χ_3 、 ε 是两种条件下的坐标转换参数^[9]; $j(s_i, s_j)$ 是电弧垂直时在工件(s_i, s_j)处的电流密度。

$$j_T(s_i, s_j) = \begin{cases} \frac{I_T}{2\pi\sigma_q^2} \exp\left[-\frac{3(s_i - u_0 t - l_0)^2}{b_1^2}\right] \exp\left(-\frac{3s_j^2}{a_1^2}\right) & s_i - u_0 t - l_0 \geq 0 \\ \frac{I_T}{2\pi\sigma_q^2} \exp\left[-\frac{3(s_i - u_0 t - l_0)^2}{b_2^2}\right] \exp\left(-\frac{3s_j^2}{a_1^2}\right) & s_i - u_0 t - l_0 < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$j_M(s_i, s_j) = \begin{cases} \frac{6\sqrt{3}f_1 I_M \Delta z}{a_1 b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left[-\frac{3(s_i - u_0 t - l_0 + D_E)^2}{a_1^2}\right] \times \\ \exp\left(-\frac{3s_j^2}{b^2}\right) \exp\left(-\frac{3z^2}{c^2}\right) & x - u_0 t - l_0 + D_E \geq 0 \\ \frac{6\sqrt{3}f_2 I_M \Delta z}{a_1 b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left[-\frac{3(s_i - u_0 t - l_0 + D_E)^2}{a_r^2}\right] \times \\ \exp\left(-\frac{3s_j^2}{b^2}\right) \exp\left(-\frac{3z^2}{c^2}\right) & x - u_0 t - l_0 + D_E < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$f_1 + f_2 = 1 \quad (5)$$

式中, I_T 、 I_M 分别是 TIG、MIG 焊接电流; σ_q 是 TIG 热源热流密度参数; u_0 是焊接速度; t 是时间; l_0 是 TIG 电弧起弧位置; D_E 是两焊枪间距; a_1 、 b_1 、 b_2 、 a_r 、 a_r 、 b 、 c 是对应热流密度分布参数; Δz 是 z 方向网格间距; f_1 、 f_2 是比例系数。

电弧压力模型同理可得。采用有限体积法对能量守恒方程和表面变形方程进行求解^[9]。由于平板焊接具有对称性,仅对工件的一半进行计算,其温度边界条件参见文献[10]。

1.2 TIG-MIG 复合焊两电弧间相互作用模型

TIG-MIG 复合焊过程中,两电弧之间的协同作

用不仅包括 TIG、MIG 两电弧间能量的相互叠加, 也包括两电弧之间存在的电磁力所引起的相互吸引或排斥, 促使电弧偏移, 进一步改变电弧热-力在工件上的分布。本文假设如下: ① TIG-MIG 复合焊过程中, 电弧瞬间达到平衡状态, 且电弧始终挺直; ② 电磁力仅作用于电弧中心轴线; ③ 电弧受平均电磁力作用(F_{M-MIG} 、 F_{M-TIG} , 如图 2 所示); ④ TIG 钨极与 MIG 焊丝之间无内部电流流动。

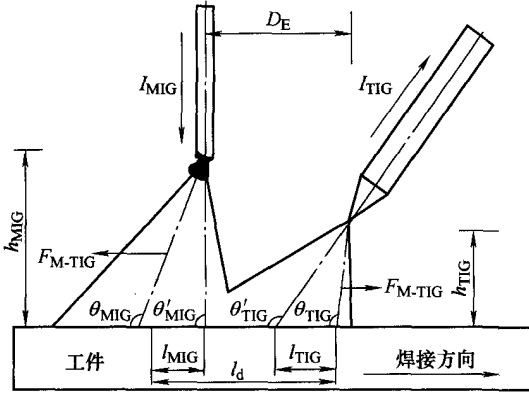


图 2 TIG-MIG 复合焊电弧间相互作用示意图

根据文献[10], 基于毕奥-萨伐尔定律, 当复合焊焊枪倾斜时, 两电弧偏移距离可修正为

$$l_{TIG} = \frac{I_{MIG} h_{TIG}^2}{I_{TIG} (l_d + D_E) \sin^2 \theta_{TIG}} \quad (6)$$

$$l_{MIG} = \frac{I_{TIG} h_{MIG}^2}{I_{MIG} (l_d + D_E) \sin^2 \theta_{MIG}} \quad (7)$$

$$l_d = l_{TIG} + l_{MIG} + D_E + h_{TIG} \cot \theta'_{TIG} - h_{MIG} \cot \theta'_{MIG}$$

式中, l_{TIG} 、 l_{MIG} 分别是 TIG 电弧和 MIG 电弧因两电弧间电磁作用力所偏移的距离; I_{TIG} 、 I_{MIG} 分别 TIG 与 MIG 焊接电流; h_{TIG} 、 h_{MIG} 是 TIG 电弧与 MIG 电弧高度; θ'_{TIG} 、 θ'_{MIG} 分别是 TIG 焊枪与 MIG 焊枪倾斜角度; θ_{TIG} 、 θ_{MIG} 分别是 TIG 电弧与 MIG 电弧倾斜角度; D_E 是两焊枪间距, 两电弧中心轴线分别与工件交于两点; l_d 是两交点之间的距离。

θ_{TIG} 、 θ_{MIG} 修正方程为

$$\theta_{TIG} = \begin{cases} \pi + \arccot\left(-\cot\theta_{TIG}^* - \frac{l_{TIG}}{h_{TIG}}\right) \\ -\cot\theta_{TIG}^* - \frac{l_{TIG}}{h_{TIG}} \leq 0 \\ \pi - \arccot\left(-\cot\theta_{TIG}^* - \frac{l_{TIG}}{h_{TIG}}\right) \\ -\cot\theta_{TIG}^* - \frac{l_{TIG}}{h_{TIG}} > 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\theta_{MIG} = \begin{cases} \pi + \arccot\left(\cot\theta_{MIG}^* - \frac{l_{TIG}}{h_{TIG}}\right) \\ \cot\theta_{MIG}^* - \frac{l_{TIG}}{h_{TIG}} \leq 0 \\ \arccot\left(\cot\theta_{MIG}^* - \frac{l_{TIG}}{h_{TIG}}\right) \\ \cot\theta_{MIG}^* - \frac{l_{TIG}}{h_{TIG}} > 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中, θ_{TIG}^* 、 θ_{MIG}^* 分别是 TIG、MIG 电弧倾角中间计算值。电弧偏移距离及倾斜角度计算流程如图 3 所示。

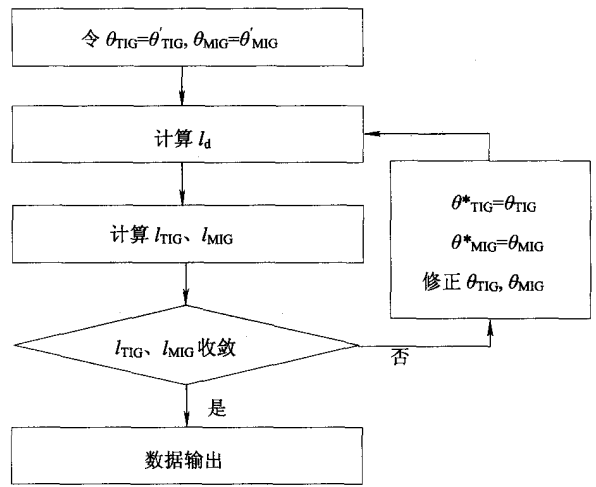


图 3 电弧偏移距离及倾斜角度计算流程

1.3 试验验证

试验采用 150 mm×50 mm×3 mm Q235 低碳钢。作为系列研究的第一步, 本文重点研究 TIG-MIG 复合焊时两电弧间相互作用模型以及自适应电流密度分布模型。为避免高速焊时其他因素(如咬边、驼峰等缺陷)对焊接过程的影响, 采用低焊速试验验证上述数值模型。TIG-MIG 复合焊焊接参数如下: TIG 焊接电弧电压为 13.59 V, 钨极高度 $h_{TIG}=5$ mm, 焊枪倾斜角度 $\theta'_{TIG}=120^\circ$; MIG 焊接电流 $I_{MIG}=150$ A, 电弧高度 $h_{MIG}=5$ mm, 电弧电压为 20.1 V, 焊丝直径为 1.2 mm, 送丝速度为 3.6 m/min, 焊接速度为 0.5 m/min, 焊枪垂直于工件($\theta'_{MIG}=90^\circ$)。

表 1 是两焊枪间距 D_E 为 10 mm, TIG 焊接电流变化时两电弧倾斜角度计算结果与试验结果对比。可见本文复合焊电弧相互作用模型的计算结果与试验结果吻合良好, 能够较好地反映两电弧间电磁作用力对电弧偏移的影响。但当两电流相差较大时, 本模型仍需要进一步改进。

表1 TIG-MIG 焊电弧倾角计算结果与试验结果对比

TIG 电流 I_{TIG}/A	MIG 电流 I_{MIG}/A	计算结果		试验结果	
		TIG 电弧 倾斜角度 $\theta_{TIG}/(^{\circ})$	MIG 电弧 倾斜角度 $\theta_{MIG}/(^{\circ})$	TIG 电弧 倾斜角度 $\theta_{TIG}/(^{\circ})$	MIG 电弧 倾斜角度 $\theta_{MIG}/(^{\circ})$
		$\theta_{TIG}/(^{\circ})$	$\theta_{MIG}/(^{\circ})$	$\theta_{TIG}/(^{\circ})$	$\theta_{MIG}/(^{\circ})$
150	150	104.6	100.7	103.0	101.1
125	150	96.9	98.4	95.5	95.6
100	150	93.0	96.5	93.3	93.2
75	150	87.9	95.1	93.3	91.0

图4、图5分别是TIG焊接电流 $I_{TIG}=125\text{ A}$ 时，TIG-MIG复合焊缝横断面及工件背面焊接热循环曲线计算结果与试验结果对比。可见，计算结果与试验结果整体吻合良好，本文所建立的电弧热-力模型能够较好地反映复合焊两电弧的协同作用。

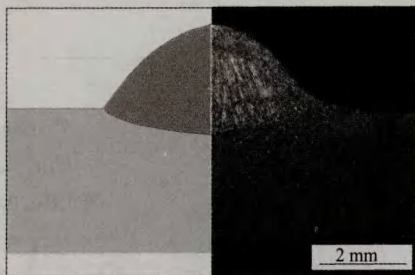


图4 焊缝横断面计算结果与试验结果对比

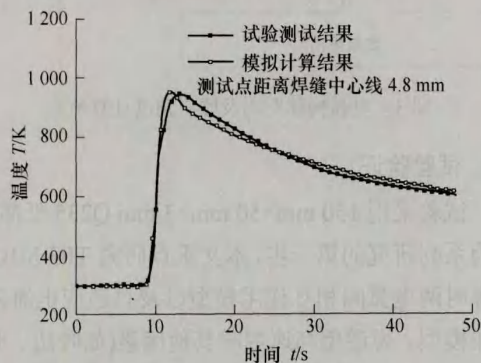
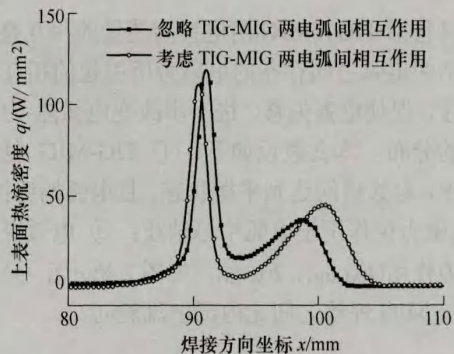
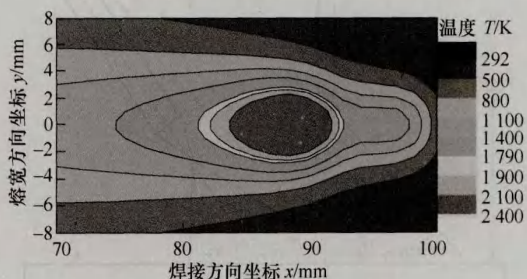


图5 焊接热循环曲线计算结果与试验结果对比

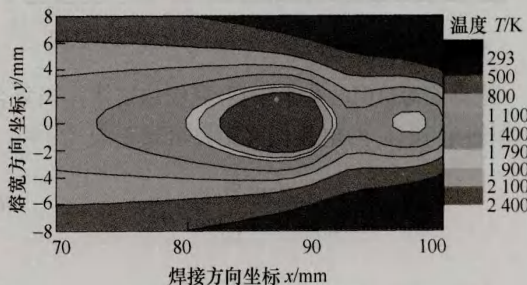
2 结果分析

2.1 复合焊两电弧间作用力对焊接过程的影响

图6是两焊枪间距 $D_E=10\text{ mm}$ ，TIG焊接电流设定为 125 A ，熔池上表面焊缝中心线处($y=0$)热流密度计算结果。可见，在此焊接工艺条件下，尽管TIG-MIG两电弧间的排斥力会增加两电弧间距离，但TIG电弧倾斜程度降低(120° 降至 96.9°)，电弧更加集中，其上表面热流密度由忽略电弧排斥力时的 33.6 W/mm^2 提高至 45.1 W/mm^2 ，增加的热流密度促使图7b中 $x=96.0\sim 99.0\text{ mm}$ 处出现了部分工件熔化；而在此焊接工艺条件下，两电弧间排斥力对MIG电弧热流密度分布影响程度相对较小。

图6 熔池上表面焊缝中心线处($y=0$)热流密度

(a) 忽略两电弧间相互作用力



(b) 考虑两电弧间相互作用力

图7 TIG-MIG复合焊工件上表面温度场计算结果

2.2 复合焊两焊枪间距 D_E 对焊缝成形影响

表2是TIG焊接电流设定为 125 A ，改变焊枪间距对复合焊两电弧倾斜角度影响的计算结果。图8及图7b是对应工件上表面温度场计算结果。从计算结果可见，当焊枪间距由 4 mm 提高至 10 mm ，两电弧由共熔池逐渐转变为分别作用在前后两熔池，但焊缝宽度仅由 5.5 mm 变化为 5.7 mm ，熔深也仅变化 0.2 mm ，焊缝余高变化幅度小于 0.1 mm 如图9所示。同时，焊缝最大宽度处始终出现在MIG电弧下的熔池。这表明，在此焊接工艺条件下，MIG电弧及熔滴熔对焊缝成形起主要作用。

表2 复合焊两焊枪间距对电弧倾角的影响

TIG 电流 I_{TIG}/A	MIG 电流 I_{MIG}/A	焊枪间距 D_E/mm	计算结果	
			TIG 电弧倾斜 角度 $\theta_{TIG}/(^{\circ})$	MIG 电弧倾斜 角度 $\theta_{MIG}/(^{\circ})$
125	150	4	70.00	109.60
125	150	6	84.80	105.10
125	150	8	92.43	100.59
125	150	10	96.96	98.40

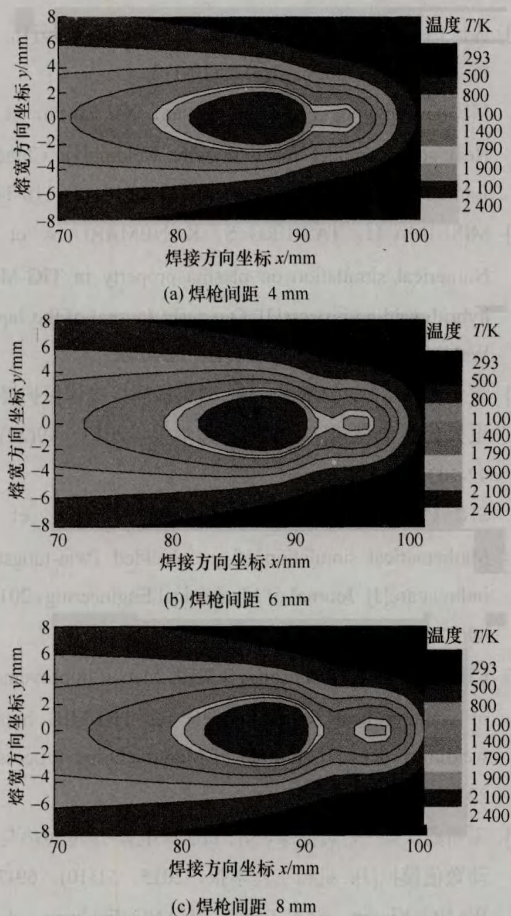


图8 焊枪间距对工件上表面温度场的影响

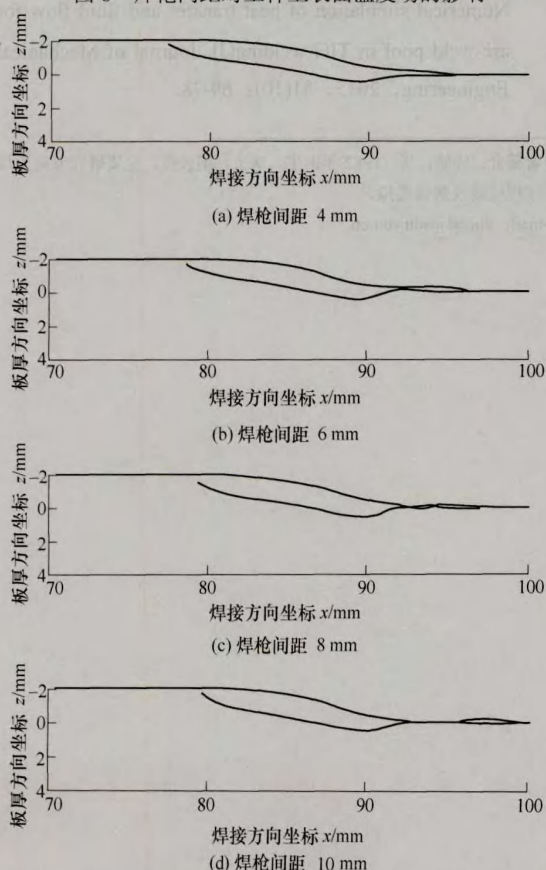


图9 不同焊枪间距下焊缝纵截面熔池轮廓线计算结果

2.3 复合焊两焊枪前后位置对焊接温度场的影响

当 TIG 焊接电流设定为 125 A, 两焊枪间距 D_E 为 -10 mm (即 TIG 焊枪后置), TIG 焊枪倾斜角度为 60° 时, TIG、MIG 电弧倾斜角度计算值分别为 81.3° 和 82.2° 。图 10 是工件上表面温度场计算结果, 与图 7b 相比, TIG 焊枪后置, 能够在较大焊枪间距下实现两电弧共熔池, 熔池宽度由 5.5 mm 增加到 6.5 mm, 焊缝余高经计算也由 2.1 mm 降至 1.7 mm。显然, 增大熔池宽度、减小余高有利于稳定熔池, 即理论上, TIG 焊枪置于 MIG 焊枪后侧比置于前侧的焊接过程更稳定。但试验中发现, 小电流 MIG 焊接时, 熔滴过渡导致液态熔池后部存在一定程度的振荡(图 11), 同时 TIG 焊对电弧长度变化较敏感, 此时 TIG 焊枪置于 MIG 焊枪前侧反而更有利于焊接过程稳定。

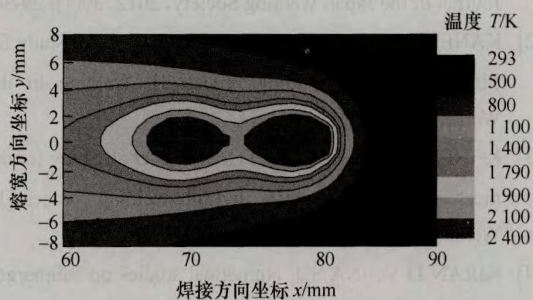


图10 MIG 焊枪前置时工件上表面温度场计算结果

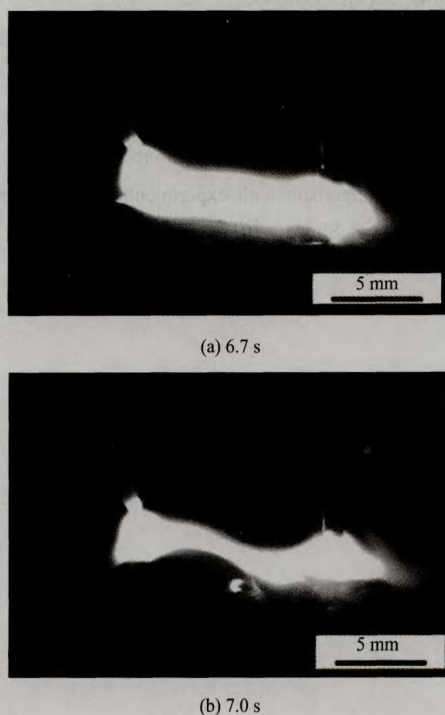


图11 MIG 焊枪前置时不同时刻复合焊电弧形态

3 结论

(1) 本文基于一定的简化假设, 建立 TIG-MIG

复合焊电弧热-力模型。结果表明,当 TIG、MIG 焊接电流异向时,两电弧之间存在的排斥力在一定焊接参数下能够增加 TIG 电弧的垂直度,从而提高 TIG 电弧的热流密度。

(2) 计算结果显示, TIG、MIG 焊接电流分别为 125 A 和 150 A 时, MIG 电弧及其熔滴对焊缝成形起主要作用。

(3) 复合焊过程中, 由于熔滴过渡造成熔池中后部液态金属振荡, TIG 焊枪置于 MIG 焊枪前方更有利于焊接过程的稳定。

参 考 文 献

- [1] KANEMARU S, SASAKI T, SATO T, et al. Basic study on TIG-MIG hybrid welding process[J]. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 2012, 30(1): 29-34.
- [2] KANEMARU S, SASAKI T, SATO T, et al. Study for TIG-MIG hybrid welding process[J]. Welding in the World, 2014, 58(1): 11-18.
- [3] KANEMARU S, SASAKI T, SATO T, et al. Study for the mechanism of TIG-MIG hybrid welding process[J]. Welding in the World, 2015, 59(2): 261-268.
- [4] KIRAN D V, NA S J. Numerical studies on submerged arc welding process[J]. Journal of Welding and Joining, 2014, 32(4): 339-347.
- [5] 石玦, 韩日宏, 黄健康, 等. 旁路耦合电弧焊温度场模拟及验证[J]. 物理学报, 2012, 61(2): 020205.
SHI Yu, HAN Rihong, HUANG Jiankang, et al. Numerical simulation of temperature field of DE-GMAW and its comparison with experimental measurements[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(2): 020205.
- [6] 孟庆国, 方洪渊, 徐立文, 等. 双丝焊热源模型[J]. 机械工程学报, 2005, 41(4): 110-113.
MENG Qingguo, FANG Hongyuan, XU Liwen, et al. Heat source model for twin wire welding[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(4): 110-113.
- [7] MISHIMA H, TASHIRO S, KANEMARU S, et al. Numerical simulation on plasma property in TIG-MIG hybrid welding process[J]. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 2013, 31(4): 22s-25s.
- [8] 史传伟, 邹勇, 邹增大, 等. 双钨极间接气体保护焊接电弧的数值模拟[J]. 机械工程学报, 2013, 49(22): 97-102.
SHI Chuanwei, ZOU Yong, ZOU Zengda, et al. Mathematical simulation of gas shielded Twin-tungsten indirect arc[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(22): 97-102.
- [9] CHEN Ji, WU Chuansong, CHEN Maoai. Improvement of welding heat source models for TIG-MIG hybrid welding process[J]. Journal of Manufacturing Process, 2014, 16(4): 485-493.
- [10] 王新鑫, 樊丁, 黄健康, 等. TIG 焊电弧-熔池传热与流动数值模拟[J]. 机械工程学报, 2015, 51(10): 69-78.
WANG Xinxin, FAN Ding, HUANG Jiankang, et al. Numerical simulation of heat transfer and fluid flow for arc-weld pool in TIG welding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(10): 69-78.

作者简介: 陈姬, 男, 1982 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为焊接过程检测及数值模拟。

E-mail: chenji@sdu.edu.cn