

激光 - TIG 复合热源焊保护气体动力学特征数值分析

江苏科技大学 江苏省先进焊接技术重点实验室(镇江市 212003)

张 峰 胥国祥 王天宇

叶斯哈提·木拉提汗

摘要 从流体动力学及传热学角度出发,基于 FLUENT 软件建立了激光-电弧复合热源焊保护气体流场的数值分析模型,对不同条件下保护气体流态进行模拟计算,分析其流体动力学特征及不同保护模式对熔池保护效果的影响。结果表明,对于激光前置复合焊过程,无保护气室时,保护气体对熔池前部保护稍好,而对熔池后部则保护效果较差;当采用保护气室时,熔池前部保护有较大改善,但由于空气回流,熔池后部同样保护较差;而当改进保护气室后部结构后,较好地抑制了空气回流,实现了对整个熔池及其附近焊缝的有效保护,为增强复合焊熔池保护效果及保护气室的优化设计提供基础数据。

关键词: 复合焊 保护气体 流体流动 数值模拟

中图分类号: TG456.2

0 前言

激光-电弧复合焊综合了激光焊和电弧焊的双重优点,弥补了两者的缺点,具有焊速快、熔深大、搭桥能力强、焊缝成形好等特点,在工程制造业领域应用潜力巨大^[1]。但在复合焊过程中,激光与电弧焊都需要保护气体,且两者对保护气体的成分、流量及流动模式要求不同,因此,焊接时两者保护气体易产生相互干扰,降低了保护效果,且对熔池流体流动造成影响,恶化焊缝成形;尤其是对于铝合金、铜合金、钛合金等对气体保护要求较为苛刻的材料,复合焊优势受到较大限制。因此,通过数值模拟技术深入研究复合焊保护气体流场特征对于改善复合焊熔池保护效果、提高焊接质量及稳定性具有重要意义。

然而目前针对复合焊的研究仍然主要集中于工艺方面^[2-3],机理方面则主要侧重于焊件热场^[4-5]、力场^[6]及熔池流场^[7]等,而对于复合焊保护气体动力学特征的研究极少,仅是设计了简易的刚性保护罩或传统拖罩^[8],但缺乏对气体保护装置内保护气体流态的系统全面的分析。此外,受试验条件限制,难于直接观测复合焊保护气体流场。文中从流体动力学角度出发,

通过建立数值分析模型,研究不同保护条件下激光+TIG复合焊保护气体流动特征及其对熔池与焊缝的保护效果,探讨不同保护气室特征对保护气体流动模式的影响,从而为优化工艺及保护装置的设计提供基础数据,具有重要的学术价值与工程实用价值。

1 模型的建立

在激光+TIG复合焊过程中,电弧等离子体流对保护气体的流态具有重要影响;此外,小孔附近的激光致金属等离子体蒸汽也对保护气体流态一定影响,但影响较小。而电弧与激光致蒸汽等离子体的物理机制本身极为复杂,故为了将研究重点放在保护气体速度场,提高计算效率,在模拟过程中,忽略激光致金属蒸汽影响,同时将电弧等离子流进行简化处理,视为高速流动的高温气体,且不考虑电磁力对其影响。计算时,将电弧与保护气体置于统一求解区域内。将保护气体视为可压缩流体,流体流动为层流,其能量、动量及质量控制方程见文献[7]。而对于 FLUENT 软件,电弧和保护气体源项的施加通过合理设置边界条件实现。

1.1 边界条件

1.1.1 电弧等离子体速度入口

图1给出了计算区域示意图。在氩气保护条件下,电弧近似圆柱状,故计算时,在考虑电弧焊枪倾斜角度条件下及电极形状尺寸条件下,将电弧视为从熔池上方一定区域流入熔池的高速高温氩气气体,BC为

收稿日期: 2015-12-19

基金项目: 国家自然科学基金(51575252);江苏省本科创新项目;江苏科技大学本科创新项目。

电弧等离子体速度入口。计算过程中,电弧温度将定为 $8\,000\text{ K}^{[9]}$, 等离子体流速假定为 100 m/s 。

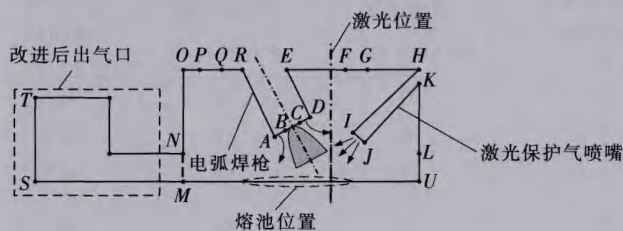


图1 计算区域示意图

1.1.2 保护气体与空气速度入口

AB 与 CD 设置为电弧焊保护气体速度入口, 而 IJ 为激光保护气体速度入口。为了简化计算, 焊接过程中假定复合焊枪固定, 而焊件移动, 故将 LU 设为空气速度入口, 其气体流速为焊接速度。

1.1.3 壁 (Wall) 与压力出口

将 UM 假定为焊件表面, 计算时设为壁, 则符合如下一定散热条件:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = -q_{\text{conv}} - q_{\text{rad}} \quad (1)$$

$$q_{\text{conv}} = \alpha_c (T - T_0) \quad (2)$$

$$q_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) \quad (3)$$

式中, q_{conv} 为由对流导致的热损失; q_{rad} 为由辐射导致的热损失; α_c 为对流换热系数; T_0 为环境温度; σ 为玻尔兹曼常数; ε 为辐射发射率。

此外, 作为电弧与激光保护气体喷嘴, RA , DE , HI 和 JK 也设为壁, 但不设置散热条件。

而对于其它剩余边界, 依据不同保护方案将其设置为壁、压力出口或速度入口。当 EF , FG , GH , MN , NO , OP , PQ , QR 设置为压力出口, 而 KL 与 LU 同时设置为空气速度入口时, 复合焊过程中无保护气室 (此时, 无图 1 中虚线框内部分); 而当 EF , GH , KL , NO , OP 及 QR 将设为壁时, 则存在保护气室; 同时, 又可通过分别设置 PQ 和 FG 的不同条件以实现在气室中添加附加保护气体或设计气体出口; 此外, 还可添加或去除图 1 中虚线部分, 表明保护气室出气口结构的不同, 当存在图 1 中虚线部分时, 边界 TS 为空气压力出口, 而 MN 则为计算区域。

1.2 网格划分

利用 GAMBIT 软件建立上述复合焊保护气体计算区域的几何模型, 并对其进行网格划分, 如图 2 所示。为了综合考虑计算精度与计算效率, 划分网格时采用不等距模式, 即电弧、保护气体入口及熔池附近区域等

气体流动速度梯度较大区域网格较密, 其余区域网格较为稀疏。



图2 网格划分

2 结果分析与讨论

基于上述所建模型, 采用 FLUENT 流体动力学软件对不同条件下激光 + TIG 复合热源焊保护气体流动进行模拟计算。作为初步研究, 计算中, 采用氩气为保护气体。TIG 焊枪轴线与激光中心轴线之间夹角为 30° , 两者与焊件表面交点距离为 1 mm , 钨极直径为 (BC) 1.5 mm , 钨极端点到焊件距离为 10 mm , 激光保护气体喷嘴内径为 6 mm , 其轴线与激光轴线之间夹角为 45° , 其计算条件见表 1。

而对于保护气室, 其尺寸为 $50\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 。为了增加其灵活性, 气室不与焊件表面接触, 前方进气口尺寸 (LU) 为 3 mm , 后部出气口尺寸 (MN) 为 5 mm , 而气室侧面到焊件距离为 1 mm 。氩气热物性参数如图 3 所示。

2.1 无保护气室 (C1 - C3)

图 4 和图 5 给出了焊接速度为 1 m/min 、无保护气室条件下复合焊保护气体的速度场。由图 4a 可以看出, 当激光保护气体流速为 2 m/s 时, 焊接过程中, 电弧等离子体高速流向焊件; 到达熔池表面后, 电弧等离子体分别向熔池前后流动; 其中, 在熔池前部, 电弧等离子体冲击熔池后转向熔池上方, 在其粘性拖拽力作用下, 电弧前部电弧焊保护气体与激光保护气体向熔池上部流动。可见, 保护气体主要集中于熔池上方, 熔池表面附近区域 (GH) 仍存在一定空气成分, 保护效果相对较差。由于 TIG 焊枪存在一定倾斜角度, 电弧等离子体冲击熔池后向其后部的流速较小, 而 TIG 焊保护气体对熔池后部及附近区域焊缝几乎无任何保护。当激光保护气体流速增大到 3 m/s , 其复合焊保护气体流态基本不变, 仅熔池前部保护效果稍有改善。而电弧保护气体也增加到 3 m/s 时, 熔池后部保护效果仍无改

表 1 计算条件

方案	条件编号	激光保护 气体流速	电弧保护 气体流速	焊接速度	气室后部 气体流速	气室前部 气体流速	气室前部 气体出口
		$v_{\text{laser}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_{\text{arc}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_{\text{w}}/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	$v_{\text{r}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_{\text{f}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	
无保护 气室	C1	2	1	1	0	0	无
	C2	3	1	1	0	0	无
	C3	3	3	1	0	0	无
	C4	1	1	1	0	0	无
	C5	2	1	1	0	0	无
保护 气室	C6	3	1	1	0	0	无
	C7	4	1	1	0	0	无
	C8	3	1	2	0	0	无
	C9	3	1	3	0	0	无
	C10	1	1	1	1	1	无
改进 保护 气室	C11	1	1	1	1	0	有
	C12	1	1	1	1	1	无
	C14	1	1	1.5	1	1	无
	C15	1	1	1	0.2	1	无
	C16	1	1	1.5	0.2	1	无

善。此外,需要指出,此种流态将烟尘及金属等离子体吹向激光焊枪方向,易对对激光束造成干扰。但从图 4 和图 5 可知,上述所建模型能够较为合理、准确地描述复合焊过程保护气的流体动力学状态。

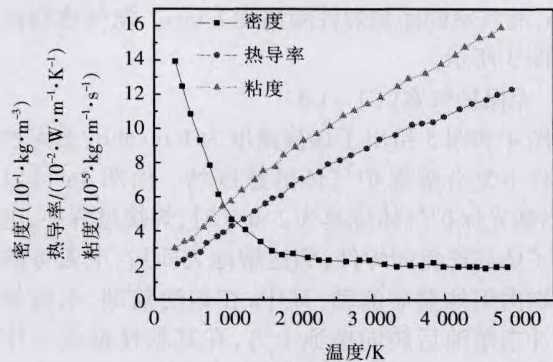


图 3 氩气热物理性质

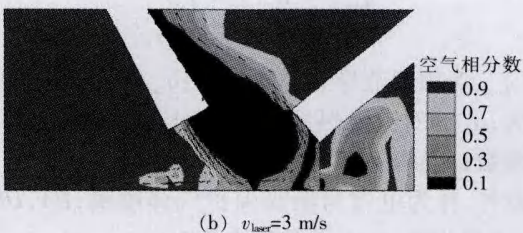
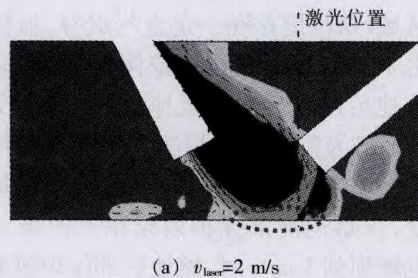


图 4 电弧保护气体流速为 1 m/s 时流场的计算结果



图 5 电弧保护气体流速为 3 m/s 时流场的计算结果($v_{\text{laser}}=3\text{ m/s}$)

2.2 采用保护气室

2.2.1 无气室保护气体及空气出口(C4 - C9)

图 6 给出了采用保护气室条件下保护气体流场的计算结果,其中,焊接速度为 1 m/min,电弧保护气体流速为 1 m/s,而激光保护气流速分别为 1 ~ 4 m/s。此时,PQ 与 FG 均设为壁,LU 为气室空气速度入口,NM 为气室压力出口;焊接前预通气,使得保护气室内充满

氩气。可以看出,与无气室时相比,电弧等离子体高速流向焊件时,向熔池后部产生一定倾斜。这是由于保护气室前方空气进口尺寸较小,尽管焊接速度不变,空气流场的挺度增大,对电弧等离子体的冲击力增加,从而迫使电弧向后产生一定偏转。但需要指出,由于文中没有考虑激光的收弧作用,电弧实际向后倾斜程度较小,但模型仍能反映出空气冲击对电弧形态影响。此外,由于气体无法从气室上部流出,故当激光保护气体及电弧前部保护气体在电弧等离子体粘性拖拽力作用下,在熔池前部上方区域产生逆时针涡流。由图 6a 可见,当激光保护气体流速为 1 m/s 时,熔池前部上方环流区域内存在空气,故该区域熔池保护较差。而随着激光保护气体流速的增加,保护气体对熔池前部区域的保护效果逐渐改善;但流速增加到 3 m/s 时,熔池前部已获得较好保护。而对于熔池尾部及其附近焊缝区域,仅存在电弧后部 TIG 焊保护气体,气室后部区域主要为空气,与无保护气室相比并无改善。图 7 给出了激光保护气体为 3 m/s 时不同焊接速度条件下保护气

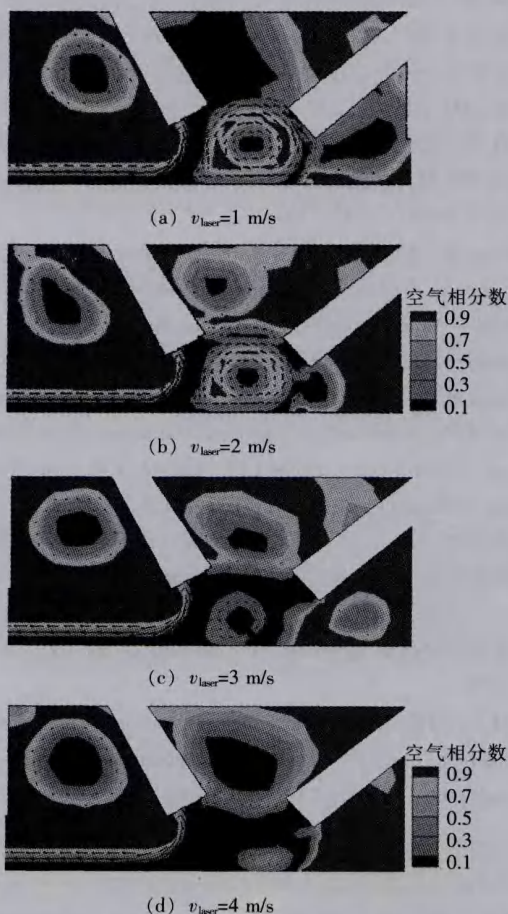


图 6 复合焊保护气体流场的计算结果($v_w = 1 \text{ m/min}$)

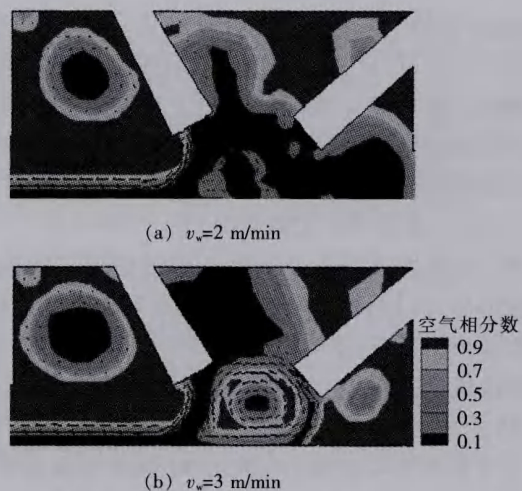


图 7 复合焊保护气体流场计算结果($v_{\text{laser}}=3 \text{ m/s}$)

体流场的计算结果。可见,随着焊接速度的增加,保护效果有所恶化。

2.2.2 添加气室保护气体及出气口(C10-C11)

图 8 为施加气室保护气体时流场计算结果($v_{\text{arc}} = 1 \text{ m/s}$)。图 8a 为气室前部和后部添加额外保护气体时流场的计算结果,即图 1 中边界 PQ、FG 设置为氩气的速度入口,两者保护体流速均为 1 m/s。可以看出,当气室额外保护气体存在时,复合焊熔池前部流场分布特征与无额外气体时相似,但熔池前部保护效果明显改善;而熔池后部保护效果仍然较差。尽管此种条件下气室后部均为保护气体,但由于相较于焊接速度,靠近焊缝区域气体流出气室时流速较大,而其上部气体流速较小,故在出口处存在空气回流,将导致熔池后部及焊缝区域分布为空气。

图 8b 给出了气室前部设置空气(FG)出口、后部

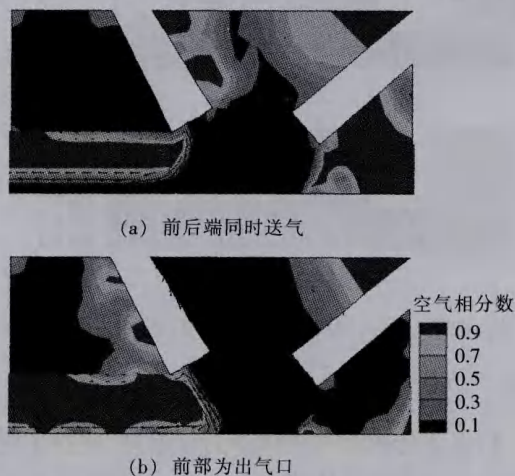


图 8 施加气室保护气体时流场计算结果($v_{\text{arc}} = 1 \text{ m/s}$)

(PQ)通入保护气体时的流场计算结果。可见,由于此种条件下气体可由气室上部流入,电弧挺度明显增加,其熔池前部保护气体流动特征与无气室时类似,但熔池保护效果很好。但熔池后部及焊缝同样由于空气出口的气体回流保护效果较差。

2.3 采用改进后气室(C12-C13)

为了解决熔池后部及其附近焊缝的保护问题,对气室后部出气口结构进行改进,如图1中虚线框内部分。需要指出,该拖罩的添加并非用于保护焊缝,而是由于解决气室后部空气出口气体回流问题,此时图1设置TS为压力出口,而为NM内部区域。图9和图10给出了气室出气口改进后(激光、电弧及气室前部FG保护气体流速均为1 m/s时)复合焊保护气体流场的计算结果。可以看出,气室改进后,由于空气出口增大,其回流无法进入保护气室,从而实现了熔池前部、熔池后部及其附近焊缝的良好保护,且在气室后部保护气流量较小时仍能达到良好的保护效果。

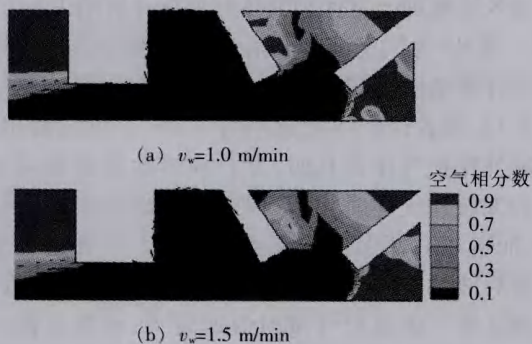


图9 改进气室后保护气体流场计算结果($v_g = 1$ m/s)

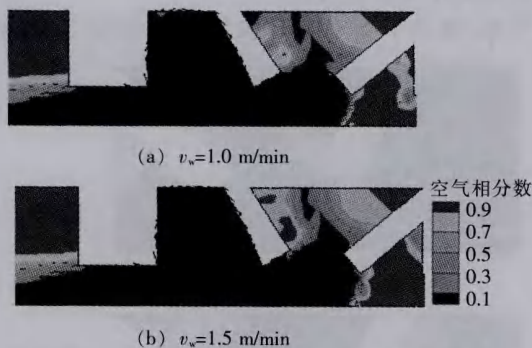


图10 改进气室后保护气体流场计算结果($v_g = 0.2$ m/s)

3 结 论

(1)基于传热学与流体动力学原理,建立了激光-TIG复合焊接保护气体流场数值分布模型,并对不同工艺条件及不同保护气室结构下复合焊保护气体动力学特

征进行模拟计算,模型能够合理地反映其主要分布特征。

(2)当无保护气室时,电弧挺度较大,复合焊熔池前部保护稍好,熔池后部保护较差;当采用保护气室但无额外保护气体及空气出口时,电弧等离子体向熔池后部产生一定倾斜,复合焊熔池前部上方存在保护气体逆时针涡流,熔池前部保护效果良好;但随着焊接速度的增加,效果有所降低,熔池后部保护仍然较差。

(3)当保护气室前部与后部同时通入保护气体时,电弧向后倾斜,熔池前部保护较好,熔池后部保护较差;当气室前部为空气出口,后部通入保护气体时,保护效果变化有限,但电弧挺度有所增加。气室后部结构改进后,可有效解决气室后部空气回流问题,实现整个熔池及其附近焊缝的有效保护。

参 考 文 献

- [1] Bagger C, Olsen F O. Review of laser hybrid welding[J]. Journal of Laser Applications, 2005, 17(1): 2-14.
- [2] 高明. CO₂激光-电弧复合焊工艺、机理及质量控制研究[D]. 武汉:华中科技大学博士学位论文,2007.
- [3] 秦国梁,雷震,王旭友,等. Nd:YAG激光+脉冲MAG电弧复合热源焊接参数对焊缝熔深的影响[J]. 焊接学报,2007,28(1): 225-228.
- [4] 胥国祥,武传松,秦国梁,等. 铝合金T型接头激光+GMAW复合热源焊温度场的有限元分析[J]. 金属学报,2012,48(9): 1033-1041.
- [5] Xu G X, Wu C S, Qin G L, et al. Adaptive volumetric heat source models for laser beam and laser + pulsed GMAW hybrid welding processes[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 57: 245-255.
- [6] Kong F R, Ma J J, Kovacevic R. Numerical and experimental study of thermally induced residual stress in the hybrid laser-GMA welding process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211: 1102-1111.
- [7] 胥国祥,张卫卫,马学周,等. 激光+GMAW复合热源焊流体流动数值分析模型[J]. 2015, 36(7): 51-54.
- [8] 汪苏,巩水利,段素爽,等. 激光电弧复合焊气体保护装置及激光电弧复合焊机[P]. 中国专利 200910210194.7, 2010.
- [9] Hu J, Tsai H L. Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Part I: The arc[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(5-6): 833-846.

作者简介: 张峰,1993年出生,学士。主要从事焊接工艺及计算研究工作。