

DOI: 10.3901/JME.2018.02.077

中厚板铝合金光纤激光+MIG复合热源焊残余应力的数值分析*

胥国祥 郭庆虎 胡庆贤 朱杰 刘朋 潘海潮
(江苏科技大学江苏省先进焊接技术重点实验室 镇江 212003)

摘要: 基于热弹塑性理论, 建立铝合金激光+熔化极惰性气体保护焊(Metal inert gas, MIG)复合热源焊残余应力的三维数值分析模型。激光和电弧热输入分别采用双椭球体热源模型和热流密度峰值指数递增的锥体热源模型描述。利用所建模型, 通过 ANSYS 有限元软件对 12 mm 厚铝合金复合焊对接接头残余应力进行模拟计算, 研究其分布特征, 并与 MIG 焊的计算结果进行比较。同时, 将温度场与残余应力的计算结果与试验结果进行对比, 验证模型的准确性。研究结果表明, 在焊缝及近缝区, 纵向拉应力及等效残余应力较大, 两者应力峰值均低于材料的屈服强度。而相较于电弧作用区域, 激光作用区域残余应力相对较高。焊趾处横向残余表现为拉应力, 但应力峰值相对较低。与 MIG 多层多道焊相比, 复合焊纵向应力和等效应力高应力区域明显较窄; 焊件上表面复合焊应力峰值小于 MIG 焊, 但下表面应力峰值则较 MIG 焊大。

关键词: 铝合金; 复合焊; 残余应力; 数值模拟

中图分类号: TG456

Numerical Analysis of Welding Residual Stress in Laser+MIG Hybrid Butt Welding of Medium-thick Aluminum Alloy

XU Guoxiang GUO Qinghu HU Qingxian ZHU Jie LIU Peng PAN Haichao
(Jiangsu Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology,
Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003)

Abstract: Based on thermal-elastic-plastic theory, a three dimensional numerical model of residual stress in laser+metal inert gas (MIG) hybrid welding of aluminum alloy is developed. The laser and arc heat inputs are modeled as the double ellipsoid heat source and the cone heat source with exponentially enhanced power density along the central axis, respectively. Using the built model, the residual stress in hybrid butt welding of 12 mm thick aluminum alloy is calculated through ANSYS finite element software and its distribution feature is analyzed, which is also compared with that of MIG welding. The calculated results of temperature and residual stress fields are compared with the experimental data to validate the accuracy of the model. Results show that, in and near weld zone, both the longitudinal tensile stress and Von-Mises equivalent stress are higher, their peak values being lower than the yielding stress of base metal. In addition, the stress in laser action zone is larger than that in arc action domain. A transversal tensile stress is generated at weld toe but its peak value is small. Compared with those of multi-pass and multi-layer MIG welding, the high stress is narrower. The peak stress at top surface of workpiece in hybrid welding is lower than that in MIG welding. But, at the workpiece bottom surface, the former is greater than the latter.

Key words: aluminum alloy; hybrid welding; residual stress; numerical simulation

0 前言

目前铝合金焊接结构件已被广泛应用于汽车、造船、化工等领域, 其中中厚板铝合金对接接头也被大量采用。但铝合金焊接过程中, 易出现气孔、

裂纹等缺陷^[1], 焊接质量难于控制。作为一种新型焊接工艺, 激光+熔化极气体保护焊(Gas metal arc welding, GMAW)复合热源焊综合了激光焊和 GMAW 焊的双重优点, 克服了两者的缺点, 具有焊速快、熔深大、搭桥能量强、焊接过程稳定等特点^[2-4], 同时可有效抑制铝合金焊接缺陷的产生^[5], 具有实现中厚板优质、高效焊接的巨大潜力。而对于焊接过程, 残余应力的产生不可避免, 其对接头

* 国家自然科学基金(51575252)、江苏省前瞻联合(BY2015065-02)和江苏省“青蓝工程”资助项目。20170906 收到初稿, 20171110 收到修改稿

力学性能具有重要影响。而铝合金热膨胀系数较大,其厚板焊接残余应力问题更为明显。因此,通过数值模拟的方法对中厚板铝合金激光+熔化极惰性气体保护(Metal inert gas, MIG)焊复合对接残余应力进行研究,利于深入、全面地理解激光+GMAW复合热源焊工艺特征,具有重要的学术价值和工程实用价值。

目前针对铝合金激光+GMAW复合热源焊的研究主要集中于焊缝成形^[6-8]、接头组织及力学性能^[9]、温度场^[10-11]等方面,且研究对象多为(小于6 mm)铝合金薄板,较少涉及残余应力分析,关于中厚板铝合金复合焊残余应力的研究更为甚少。XU等^[12]通过建立有限元数值分析模型,对T型接头铝合金激光+GMAW复合焊焊接残余应力进行了模拟计算。但其铝合金板厚仅为2 mm,且焊接过程中小孔行为不明显,无法充分体现激光+GMAW复合焊的工艺特点。KONG等^[13]针对6 mm厚钢板激光+GMAW复合热源对接焊残余应力进行了数值分析,研究了复合焊应力分布特征;而ZHANG等^[14]利用数值模拟方法,对9 mm厚钢板复合堆焊焊缝尺寸及残余应力进行了研究。但由于材料热物理能、板厚或接头形式不同,上述两者的研究结果无法适用于铝合金复合焊接头。

本文旨在建立适用的三维有限元数值分析模型,对12 mm厚铝合金激光+MIG复合焊残余应力进行模拟计算,分析其应力分布特征,并与MIG焊残余应力分布进行比较,从焊接残余应力角度对激光+GMAW复合焊接头质量进行评价,对于工艺的选择和优化具有重要意义。

1 试验方法

采用光纤激光+MIG复合热源焊接系统进行铝合金对接试验,其中母材为12 mm厚6061铝合金,焊丝为ER5356焊丝。焊接过程中,激光在前,电弧在后,激光功率为4.5 kW,光丝夹角为20°,光丝间距为2 mm,离焦量为-6 mm,保护气体为纯氩;采用Y型坡口,坡口角度为30°,钝边尺寸为6 mm,钝边间隙为0 mm。为了对比分析铝合金复合焊对接残余应力特征,采用单MIG焊进行了12 mm厚铝合金多层多道对接焊试验;焊接时,同样采用Y型坡口,坡口角度为60°,钝边为2 mm,钝边间隙为1 mm。图1和图2分别给出了复合焊接系统和母材坡口尺寸及焊层示意图。表1给出了获得良好焊缝成形时复合焊和MIG焊的焊接过程参数。焊接时,采用热电偶测量热循环曲线;试验后,采用小

孔法对焊件表面残余应力进行检测,以验证模型的准确性。



图1 激光+电弧复合焊平台

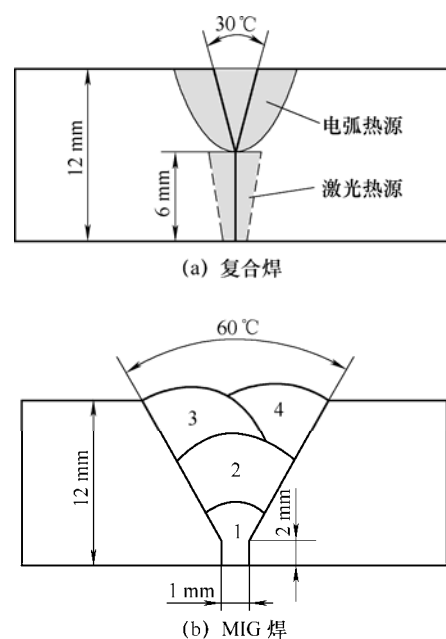


图2 试件坡口形貌示意图

表1 复合焊及MIG焊工艺参数

试验	焊道	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(cm/min)
复合焊	第一道	150	20	80
	第二道	180	22.7	40
MIG焊	第三道	190	21.7	40
	第四道	200	22.6	50
	第五道	209	22.7	50

2 有限元模型

2.1 温度场数值分析

2.1.1 热源模型

对于激光+GMAW复合热源焊,热量主要来自电弧热输入、熔滴热焓和激光热输入。对于电弧热输入,由于坡口的存在,电弧具有体积热源特征。同时,为了简化计算,将电弧热输入与熔滴热焓合并考虑,并采用双椭球体热源表征,其热流密度分布函数如下所示

$$q_f(x, y, z) = \frac{12\sqrt{3}\eta IU}{(a_f + a_r)b_h c_h \pi \sqrt{\pi}} \times \exp\left(-\frac{3x^2}{a_f^2} - \frac{3y^2}{b_h^2} - \frac{3z^2}{c_h^2}\right) \quad x \geq 0 \quad (1)$$

$$q_r(x, y, z) = \frac{12\sqrt{3}\eta IU}{(a_f + a_r)b_h c_h \pi \sqrt{\pi}} \times \exp\left(-\frac{3x^2}{a_r^2} - \frac{3y^2}{b_h^2} - \frac{3z^2}{c_h^2}\right) \quad x < 0 \quad (2)$$

式中, η 为热效率; I 为焊接电流, U 为电弧电压, q_f 、 q_r 分别为热源前、后部分的热流密度分布函数, a_f 、 a_r 、 b_h 、 c_h 分别为双椭球体热源的分布参数。

对于激光深熔焊, 光能主要通过小孔壁加热焊件; 激光在小孔内存在多次反射, 受 Fresnel 吸收影响, 小孔下部能量密度较大^[15]。综合考虑热作用区域及热流峰值密度沿焊件厚度方向变化, 文中采用热流峰值指数递增-锥体热源模型表征激光能量, 其热流密度函数如式(3)所示^[10]

$$q(r, z) = Q_0 \exp\left(\frac{\ln x}{z_i - z_e}(z - z_e)\right) \exp\left(-\frac{3r^2}{r_0^2(z)}\right) \quad (3)$$

$$Q_0 = \frac{3Q_l \ln x}{\left\{r_e^2 - r_i^2 - 2\frac{r_i - r_e}{\ln x} \left[r_e - r_i x - \frac{r_i - r_e}{\ln x}(1 - x)\right]\right\}} \times \frac{1}{\pi(1 - e^{-3})(z_i - z_e)} \quad (4)$$

式中, $r_0(z)$ 为 z 坐标处热源半径; z_e 和 z_i 分别为热源上、下表面 z 坐标; r_e 和 r_i 分别为热源上、下表面半径; Q_l 为激光有效热输入; χ 为热源上下表面热流峰值比例系数; Q_0 为计算常数。

锥体热源半径沿厚度方向成线性递减, 热源中心轴热流峰值沿焊缝厚度方向呈指数变化。当比例系数大于 1 时, 热流峰值沿焊件厚度方向指数递增; 而当小于 1 时, 则指数递减。热源任意截面内, 热流成高斯分布, 即该热源是由一系列热源半径和热流峰值不同高斯平面热源叠加而成。将上述电弧和激光热源组合, 建立复合焊组合式热源模型, 其作用位置如图 2a 所示。电弧与激光之间的相互作用通过适当调节热源分布参数间接考虑。

2.1.2 热传导方程与边界条件

为了减少计算量, 在焊接温度场计算中, 仅考虑固体热传导过程, 忽略熔池内流体流动。瞬态热传导方程如下所示

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_H \quad (5)$$

式中, ρ 为密度; c 为比热容; k 为热导率; T 为温度; S_H 为热源项。

焊件表面考虑对流换热、辐射及蒸发散热, 其边界条件如式(6)所示

$$kT \nabla \cdot \mathbf{n}_i = \alpha_c (T - T_\infty) + L_b (T - T_\infty) \quad (6)$$

式中, ∇ 为拉普拉斯算子; α_c 为对流和辐射综合散热系数; L_b 为蒸发潜热。

同时, 计算前, 依据焊件尺寸及坡口形式, 建立焊件的几何模型。综合考虑计算精度和计算效率, 对其进行非均匀网格划分, 焊缝及近缝区域网格较细, 而远离焊缝区域则网格较粗, 如图 3 所示。此外, 计算中, 通过“生死”单元法描述焊丝熔融金属填充过程。

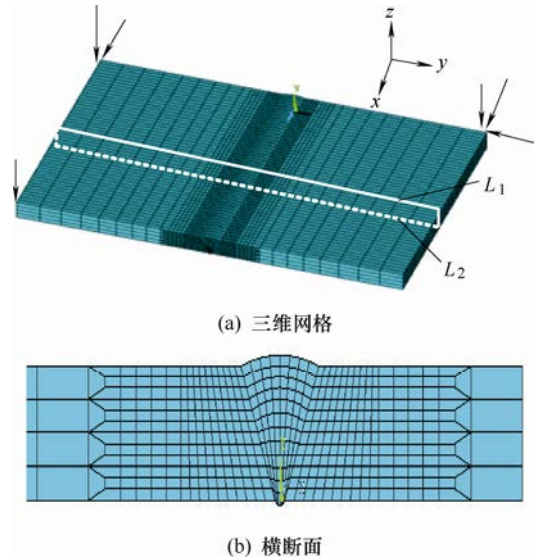


图 3 网格划分

2.2 焊接应力场计算

为了简化计算, 本文采用间接耦合法^[16]计算焊接残余应力, 即将首先计算获得的温度场作为热载荷输入到应力计算模型, 再对应力及变形进行模拟分析; 计算时仅考虑温度场对应力场的影响, 而忽略后者对前者的影响。同时, 为防止工件刚体移动, 对焊件施加一定约束, 如图 3a 所示。焊接过程中, 母材每一点总的应变包括弹性应变、塑性应变、热应变以及由体积变化和相变塑性引起的应变, 其中后两者主要与母材的固态相变有关。而对于铝合金, 相变对应力影响很小, 故总应变增量可表示为

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon^E + \Delta \varepsilon^P + \Delta \varepsilon^T \quad (7)$$

式中, $\Delta \varepsilon^E$ 、 $\Delta \varepsilon^P$ 和 $\Delta \varepsilon^T$ 分别为弹性、塑性及热应变增量。计算过程中, 弹性应变遵循胡克定律, 热应变通过热膨胀系数表征, 塑性应变不考虑变形速率, 材料的屈服行为符合米塞斯准则。

3 结果与讨论

利用上述所建模型, 通过 ANSYS 软件对 12 mm

厚铝合金光纤激光+MIG 复合热源单道对接焊及 MIG 多层多道焊残余应力进行计算。图4给出了计算过程中所需要的材料热物理及力学性能参数^[17]。

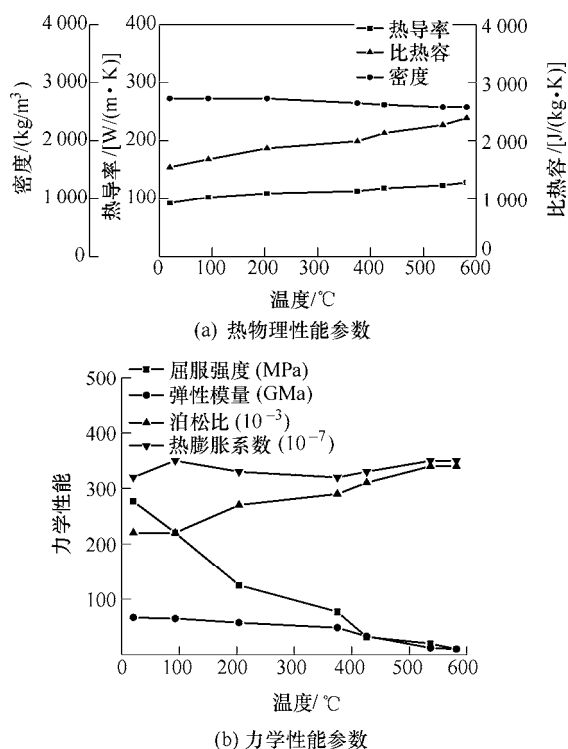


图4 铝合金热物理及力学性能参数

图5给出了激光+MIG 复合焊和 MIG 焊焊缝横断面计算结果与试验结果的比较。可以看出, 两者吻合较好, 从而证明的温度场模型的准确性。

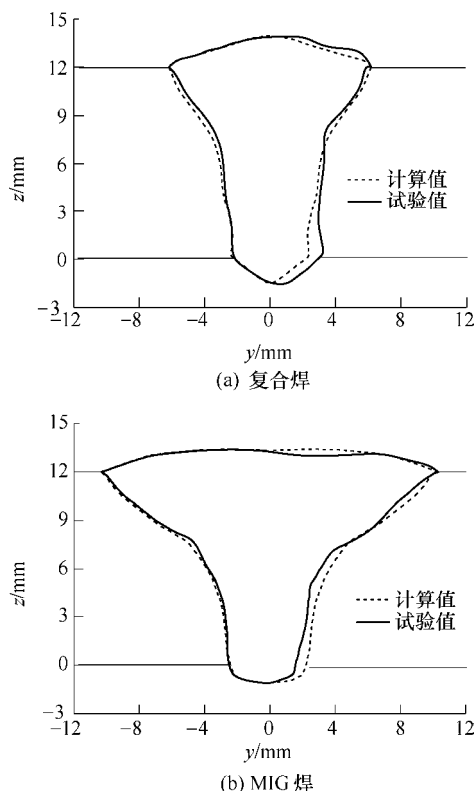


图5 焊缝横断面计算结果与试验结果的比较

图6和图7分别给出了激光+MIG 复合焊和 MIG 焊温度场和热循环曲线。可见, 由于复合焊接电流较小、焊速较快, 以及小角度坡口和激光对电弧的收缩作用, 使得复合焊熔池尺寸及焊件上部温度场明显较 MIG 焊窄。此外, 图7还比较了热循环曲线计算结果与检测结果。同样, 两者吻合较好, 进一步证明了温度场计算结果的准确性, 从而为应力计算奠定了基础。

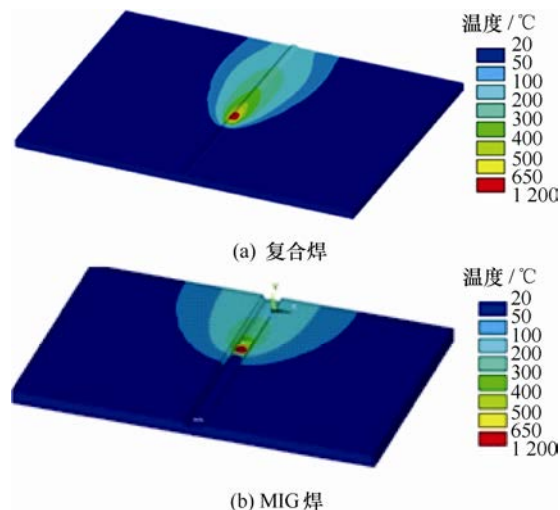


图6 温度场计算结果

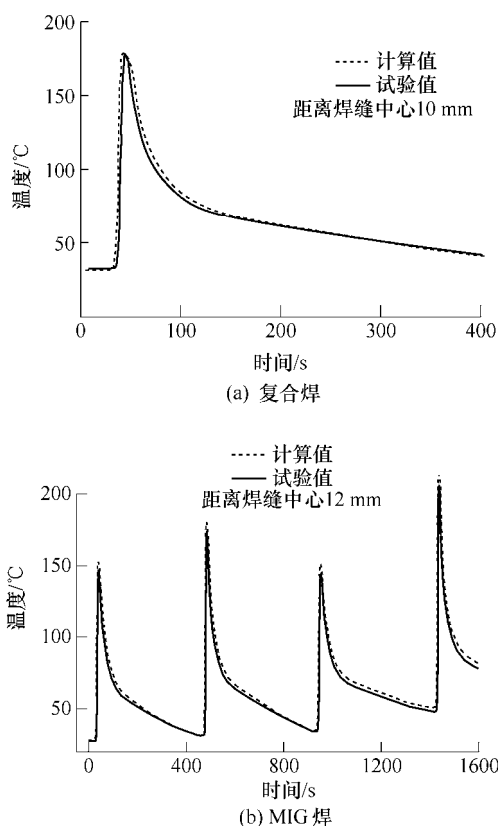


图7 热循环曲线计算结果与试验结果比较

图8和图9为铝合金复合焊残余应力分布云图。可以看出, 对于纵向应力, 在焊缝及近缝区表

现较大的拉应力,但应力峰值低于材料的屈服强度;随着离焊缝距离的增大,纵向应力逐渐减小为压应力。而沿厚度方向,纵向应力变化较小。与纵向应力不同,横向残余应力在焊趾及焊缝厚度方向中部区域存在较大拉应力,但应力峰值明显较纵向应力小。而由图 8c 和图 9c 可知,对于铝合金复合焊,厚度方向残余应力非常小,且分布特征不明显。图 8d 和图 9d 给出了铝合金复合焊 Von-Mises 等效应力分布云图。可见,与纵向应力相似,焊缝及近缝

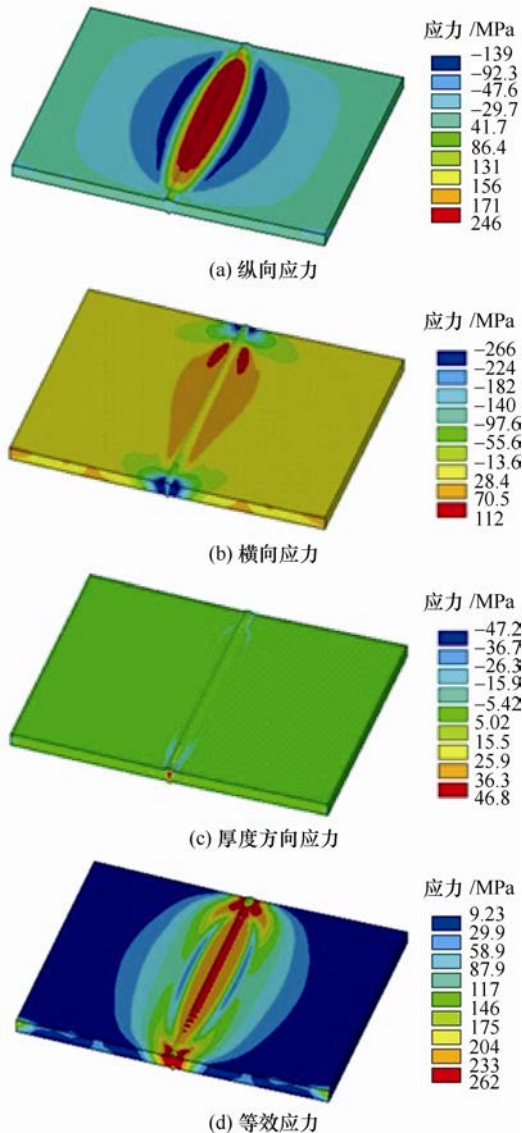


图 8 铝合金复合焊残余应力三维分布云图

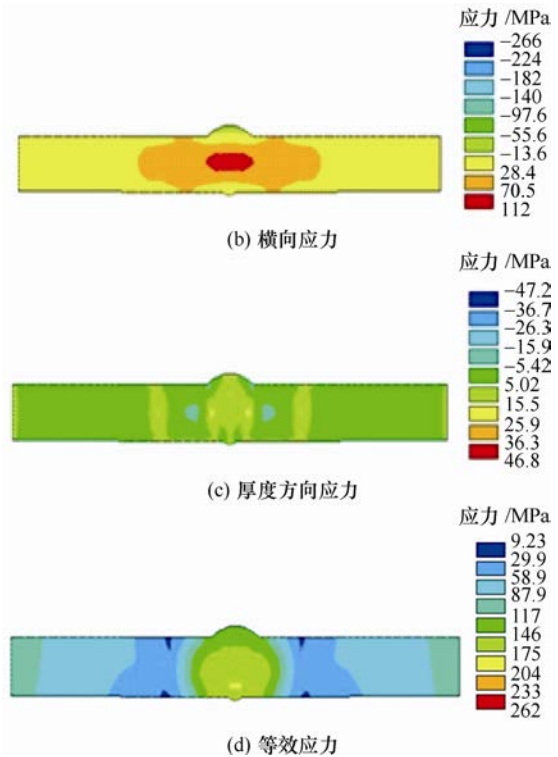
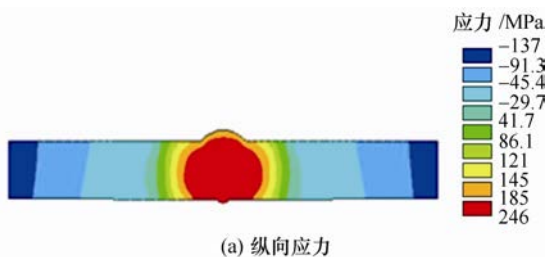
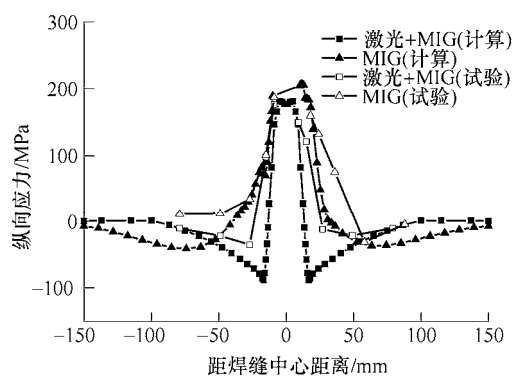


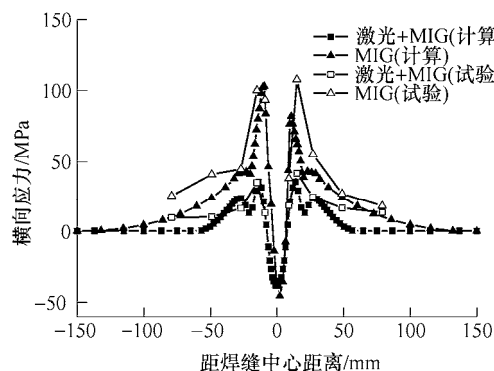
图 9 焊件横截面残余应力分布云图

区存在较大的等效应力,且焊缝中下部激光作用区域应力值明显高于电弧作用区域。这与激光作用区域能量密度高、温度梯度大有关。

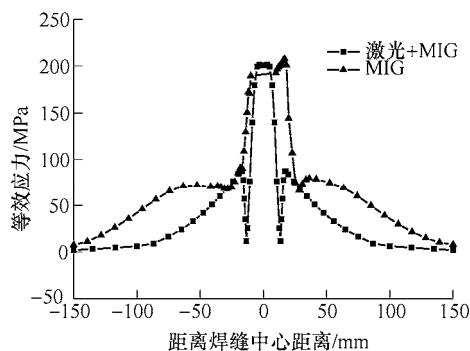
图 10 给出了焊件上表面复合焊与 MIG 焊残余应力沿垂直焊缝方向的分布,并与检测结果进行了比较,计算位置如图 3a 所示。可见,计算结果与检测结果吻合较好,从而证明了模型的准确性。同时,由图 10 还可看出,复合焊与 MIG 焊残余应力分布特征相似,但由于复合焊焊缝尺寸及温度场宽度较小,故其高应力分布区域较 MIG 焊窄,尤其是对于纵向应力和等效应力,这一差别更为明显。此外,由于复合焊电流较小且焊速较快,焊件上表面单位焊缝长度的热输入相对 MIG 焊较小;同时,激光的吸弧作用使得更多电弧热流通过坡口作用于焊件内部,增加了其在焊件厚度方向上的分布区域,进一步降低了复合焊电弧热流密度,从而导致复合焊焊件上表面残余应力峰值较低。由图 10a 可知,复合焊和 MIG 焊在焊缝区域的纵向拉应力峰值分别为 181 MPa 和 215 MPa,后者比前者高近 18%,但两者均低于材料的屈服强度。对于横向残余应力,复合焊和 MIG 焊在焊缝区域均表现为压应力,且应力值相近,均为 48 MPa 左右;但对于焊趾处横向拉应力,复合焊明显低于 MIG 焊。与纵向残余应力类似,复合焊 Von-Mises 等效残余应力峰值也小于 MIG 焊,两者分别为 190 MPa 和 209 MPa。



(a) 纵向应力



(b) 横向应力

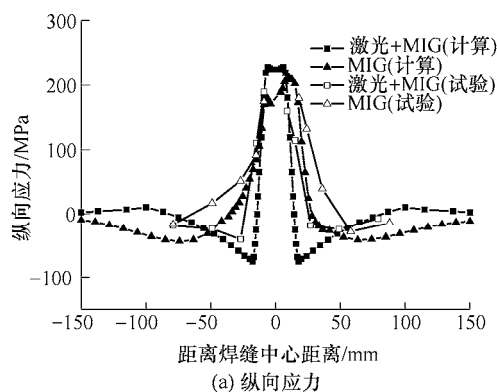


(c) 等效应力

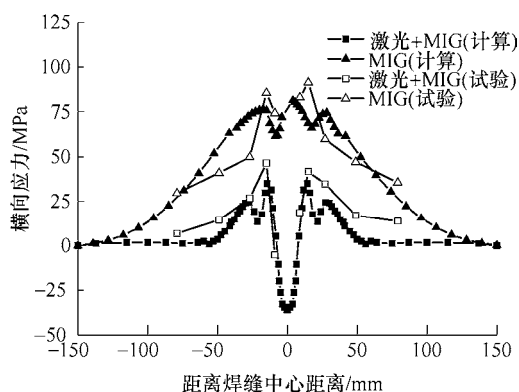
图10 复合焊与MIG焊残余应力的比较(线 L_1)

图11给出了焊件下表面复合焊与MIG焊残余应力沿垂直焊缝方向的分布。可以看出,计算结果与检测结果同样吻合较好,进一步证明了模型的准确性。对于焊件下表面,复合焊高应力区域也同样明显窄于MIG焊。复合焊和MIG焊纵向残余应力和Von-Mises等效应力分布特征与上表面相似,但复合焊应力峰值有所增大,其纵向和等效残余应力峰值分别为235 MPa和224 MPa;而MIG焊应力峰值与上表面相比,则略有减小。复合焊下表面横向应力分布趋势同样与上表面相近,但其峰值有所减小。对于MIG焊,由于受多层多道焊应力叠加效应影响,其横向应力在焊件下表面焊缝及近缝区均表现为拉应力,其应力峰值明显较复合焊高,但仅为81.4 MPa,仍远小于材料屈服强度。此外,通过比较可以发现,在焊件下表面,复合焊纵向应力和等效应力峰值均高于MIG焊。这是由于对于复合焊,

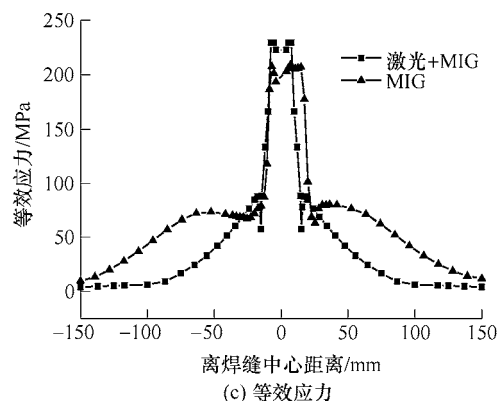
激光能量作用于焊件下表面,虽然其热流分布区域较MIG焊小,但是激光能量密度高,温度梯度相对较大;同时,激光作用区域无坡口、间隙,该处高温金属热变形时受拘束较大,从而导致焊件下表面应力峰值相对较高。而在MIG多层多道焊过程中,后续焊道对前序焊缝具有一定的热处理作用,有助于降低应力峰值。上述结果表明,与单MIG焊相比,复合焊的优势更多表现于较小的高应力区宽度,而在应力峰值方面,优势并不明显。



(a) 纵向应力



(b) 横向应力



(c) 等效应力

图11 复合焊与MIG焊残余应力的比较(线 L_2)

4 结论

(1) 考虑材料热物理及力学性能、坡口几何特征和工艺特点,建立了适用于铝合金激光+MIG复

合热源对焊残余应力的三维有限元数值分析模型, 对 12 mm 厚铝合金复合对接焊残余应力进行了模拟计算, 计算结果与试验结果吻合较好, 从而证明了模型的准确型。

(2) 在铝合金复合焊焊缝及近缝区, 纵向残余拉应力和 Von-Mises 等效应力较大, 应力峰值分别为 235 MPa 和 224 MPa。相较于电弧作用区域, 焊缝下部激光作用区域等效应力较大。横向残余应力在焊趾表现为拉应力, 但应力值较小。

(3) 复合焊应力分布特征与单 MIG 焊相似, 但复合焊高应力区域明显较窄。焊件上表面电弧作用区域复合焊应力峰值低于 MIG 焊, 而焊件下表面复合焊应力峰值较 MIG 焊大, 表明复合焊优势主要表现在高应力区宽度, 而非应力峰值。本项目研究对于从残余应力角度全面认识激光+MIG 复合焊工艺特征具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 周万盛, 姚君山. 铝及铝合金的焊接[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
ZHOU Wansheng, YAO Junshan. Welding of aluminum and its alloys[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [2] STAUFER H. Laser hybrid welding in the automotive industry [J]. Welding Journal, 2007, 86(10): 36-40.
- [3] BAGGER C, OLSEN F O. Review of laser hybrid welding [J]. Journal of Laser Application, 2005, 17(1): 2-14.
- [4] DEFALCO J. Practical application for hybrid laser welding[J]. Welding Journal, 2007, 86(10): 47-50.
- [5] KATAYAMA S, UCHIUMI S, MIZUTANI M, et al. Penetration and porosity prevention mechanism in YAG laser-MIG hybrid welding[J]. Welding International, 2007, 21, 25-31.
- [6] 张维明, 武传松, 秦国梁, 等. 铝合金激光+脉冲 GMAW 焊焊缝成形的数值模拟[J]. 机械工程学报, 2013, 49(10): 110-115.
ZHANG Weiming, WU Chuansong, QIN Guoliang, et al. Prediction of weld shape and size for laser+GMAW-P hybrid welding of aluminum alloys[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(10): 110-115.
- [7] ZHANG C, GAO M, WANG D Z, et al. Relationship between pool characteristic and weld pool porosity in laser arc hybrid welding of AA6082 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 240: 217-222.
- [8] ASCARI A, FORTUNATO A, ORZI L, et al. The influence of process parameters on porosity formation in hybrid LASER-GMA welding of AA6082 aluminum alloy[J]. Optics & Technology, 2012, 44: 1485-1490.
- [9] ZHANG D Q, JIN X, GAO L X, et al. Effect of laser-arc hybrid welding on fracture and corrosion behavior of AA6061-T6 alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528: 2748-2754.
- [10] 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.
XU Guoxiang, WU Chuansong, QIN Guoliang, et al. Finite element analysis of temperature field in laser+GMAW hybrid welding for T-joint of aluminum alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2012, 48(9): 1033-1041.
- [11] MAZAR ATABAKI M, NIKODINOVSKI M, CHENIER P, et al. Experimental and numerical investigation of hybrid laser arc welding of aluminum alloy in the thick T-joint configuration[J]. Optics & Laser Technology, 2014, 59: 68-92.
- [12] XU G X, WU C S, MA X Z, et al. Numerical analysis of welding residual stress and distortion in laser+GMAW hybrid welding of aluminum alloy T-joint[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 26(3): 353-360.
- [13] 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.
- [14] ZHANG T, WU C S, QIN G L, et al. Thermo mechanical analysis for Laser+GMAW-P hybrid welding process[J]. Computational Materials Science, 2010, 47: 848-856.
- [15] JIN X Z, BERGER P, GRAF T. Multiple reflections and Fresnel absorption in an actual 3D keyhole during deep penetration laser welding[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39: 4073-4712.
- [16] 刘川, 张建勋, 牛靖. 焊接动态约束变形三维多体耦合数值模拟[J]. 机械工程学报, 2010, 46(6): 83-86.
LIU Chuan, ZHANG Jianxun, NIU Jing. 3D multi-body coupling numerical simulation of welding dynamic distortion with restraints[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(6): 83-86.
- [17] 段永刚. 基于 ANSYS 软件的焊接应力变形工程预测[D]. 上海: 上海交通大学, 2003.
DUAN Yonggang. Prediction of welding FEM deformation and stress distribution based on ANSYS[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2003.

作者简介: 胥国祥, 男, 1981 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为激光+电弧复合焊、摇动电弧窄间隙焊、焊接过程数值分析。

E-mail: xugxiang@163.com

胡庆贤(通信作者), 男, 1976 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为焊接过程数值模拟。

E-mail: huqingxian@126.com