

DOI: 10.11973/jxgcl201706020

铝-钢异种金属 CMT 焊接接头应力场的数值模拟

刘国辉^{1,2}, 车洪艳^{1,2}, 马雷³, 余斯亮³, 曹睿³(1.安泰科技股份有限公司,北京 100086;2.河北省热等静压工程技术研究中心,涿州 072750;
3.兰州理工大学,有色金属先进加工与再利用省部共建国家重点实验室,兰州 730050)

摘要: 利用 ABAQUS 有限元软件对铝-钢异种金属冷金属过渡(CMT)焊接过程中焊接接头应力分布进行了数值模拟,分析了应力分布的变化规律,并进行了试验验证。结果表明:不同焊接时间下,焊接接头在钢板和铝合金板侧的 von Mises 应力分布不对称,其中铝合金板侧承受的应力较钢板侧的小;在焊接过程中,近焊缝处的纵向应力由压应力转变为拉应力,横向应力在焊初始阶段为拉应力,随后变为压应力,再转变为拉应力;在铝合金板侧和钢板侧热影响区的纵向残余拉应力最大,分别为 125,208 MPa,位于铝合金板侧和钢板侧的横向残余压应力峰值几乎相同,约为 80 MPa;残余应力分布模拟结果与试验结果的拟合优度为 0.75,证明了模拟结果的准确性。

关键词: 异种金属;应力分布;CMT 焊接;数值模拟

中图分类号: TG409 文献标志码: A 文章编号: 1000-3738(2017)06-0090-05

Numerical Simulation on Stress Field of Cold Metal Transfer (CMT) Welded Joint Aluminum and Steel Dissimilar Metals

LIU Guohui^{1,2}, CHE Hongyan^{1,2}, MA Lei³, YU Siliang³, CAO Rui³

(1.Advanced Technology & Materials Co., Ltd., Beijing 100086, China;2. Engineering and Technology Research Center of Hot Isostatic Pressing, Zhuozhou 072750, China;3.State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metal, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The numerical simulation of stress distribution in aluminum-steel dissimilar metal welded joint during cold metal transition (CMT) welding was carried out by using ABAQUS finite element software. The variation law of stress distribution was analyzed and verified by experiments. The results show that at different welding times, the von Mises stresses unsymmetrically distributed at steel plate side and Al alloy plate side in the welded joint. And the stresses at Al alloy plate side were smaller than those at steel plate side. During the welding process, the longitudinal stress near the weld changed from the compressive stress into tensile stress, while the lateral stress at the welding initiating stage was tensile stress, then changed into compressive stress and then tensile stress. The longitudinal residual tensile stresses reached the largest values in the heat affect zone near the side of steel plate and Al alloy plate, which were 125 MPa and 208 MPa, respectively, while the peak values of lateral residual compressive stress were almost the same at both sides, which was about 80 MPa. The goodness-of-fit between the simulated and test results of residue stress distribution was 0.75, indicating the accuracy of the simulation results.

Key words: dissimilar metal; stress distribution; CMT welding; numerical simulation

0 引言

近年来,铝合金在汽车中的应用越来越多,这使

得铝-钢异种金属的焊接成为了研究的热点^[1-2]。冷金属过渡(Cold Metal Transfer, CMT)焊接是一种精确控制型电弧焊,在铝-钢异种金属焊接中得到了广泛应用^[3]。铝-钢异种金属焊接需要在铝和钢之间形成金属间化合物层,且金属间化合物层的厚度不能超过 10 μm ,否则接头的性能会变得很差^[4]。而铝合金和钢的线膨胀系数相差较大,这会导致较

收稿日期:2017-03-13;修订日期:2017-05-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51675255,51265028)

作者简介:刘国辉(1972-),男,辽宁朝阳人,高级工程师,博士

大的焊接变形和焊接残余应力,因此,对铝-钢异种金属的焊接(残余)应力场研究显得尤为重要。

目前,研究人员已经利用 ABAQUS 有限元软件,建立了 6061 铝合金板和 HDG60 钢板异种金属 CMT 焊接的有限元模型,重点对薄板 CMT 焊接过程中搭接接头的应力场进行了研究。HU 等^[5]对熔化极惰性气体保护(MIG)焊的电弧形态以及熔滴过渡形式进行了研究,并开发了一种混合模型模拟气体电弧焊接过程中发生的迁移现象。CHO 等^[6]对激光-GMA(气体保护)复合焊接时的熔池行为进行了探讨,采用自由面跟踪 VOF 法实现了激光-GMA 焊接熔池的计算分析。张洪涛等^[7]研究了铝/镀锌钢板 CMT 熔-钎焊的堆焊过程,认为随着锌蒸发量的增大,电弧作用面积增加,而热源中心温度降低。曹睿等^[8]利用生死单元技术模拟了 6061-T6 铝合金和 HDG60 镀锌钢板搭接焊缝的填充过程,得到了焊接过程中的温度场分布。作者课题组^[8-9]利用正交试验法对铝合金与镀锌钢薄板进行了异种金属 CMT 搭接焊接,发现在钢与铝或铝合金的焊接过程中会产生各种金属间化合物,这就增加了焊缝的脆性。在此基础上,作者利用 ABAQUS 有限元软件进一步模拟并试验研究了铝-钢 CMT 焊接接头在焊接过程中的应力分布。

1 试样制备与试验方法

1.1 试样制备

试验母材分别为 6061-T6 铝合金和 HDG60 镀锌钢板,尺寸均为 200 mm×100 mm×1 mm。利用 CMT 焊接技术进行焊接。由图 1 可知:在焊接过程中,钢板在下,铝合金板在上,接头形式为搭接,搭接长度为 10 mm;焊枪在铝合金板边沿正上方沿着 y 轴正方向行进,假设整个施焊过程中电弧没有发生偏移。

利用 Fronius CMT-3200 型焊机进行焊接,采用一元程序,保持送丝(4043 铝焊丝,φ1.6 mm)速

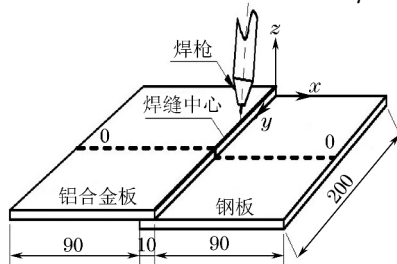


图 1 焊接示意及试样尺寸

Fig.1 Schematic diagram of welding and specimen size

度为 $3 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$,焊接电压为 10.9 V,焊接电流为 48 A,焊接速度为 $6 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$;焊接时的保护气体为氩气,流量为 $15 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

1.2 试验方法

采用小孔法测试残余应力。清理接头试样表面,将应变花贴在垂直焊缝的中心线上,用四分之一桥惠斯通电桥连接应变花,并接入补偿应变片;使钻具与应变花的中心对齐,保持均匀的力开始钻孔,当钻孔深度达到 1 mm 左右拔出钻头,每隔 10 min 用静态电阻应变仪记录一次应变。当相邻两次应变值相差很小时,表明此时应力达到新的平衡。根据平衡时的应变计算残余应力。残余应力测试点如图 2 所示:在焊缝中心线的垂直平分线上取点,位于钢板侧的 A 点到焊缝边沿的距离为 2 mm,相邻两点之间的距离为 10 mm;铝合金板侧的 5 个测试点与钢板侧的以焊缝为中心呈对称分布。

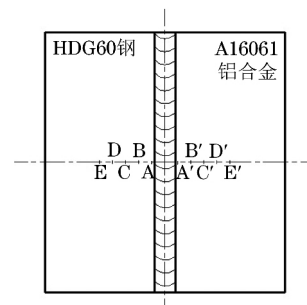


图 2 残余应力测试点示意

Fig.2 Schematic diagram of measure points for residual stress

2 有限元模型的建立

2.1 有限元模型与网格划分

采用大型通用分析软件 ABAQUS 6.13 对焊接过程进行有限元建模。按图 3 所示进行网格划分,焊缝及 HAZ 区的网格较细密,外围区域较稀疏。分别采用高斯面热源和双椭球体热源考虑电弧和熔滴对焊缝温度分布的影响,温度场求解时采用的网格类型为 C3D8R,节点数为 60 300 个,单元个数为 47 400 个。

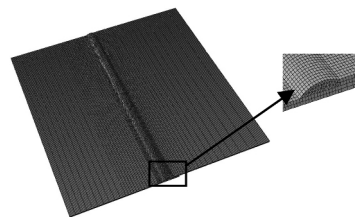
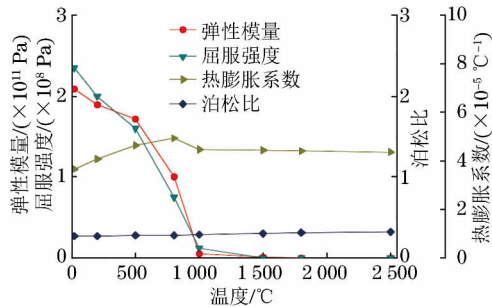


图 3 焊接有限元模型及网格划分

Fig.3 Finite element model of welding and meshing

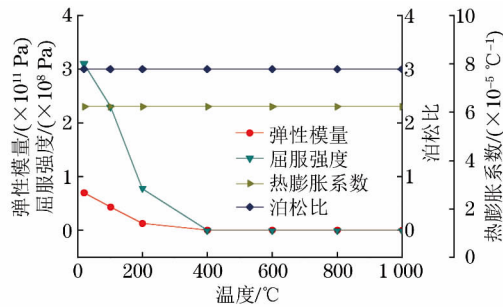
2.2 材料的热物理性能参数

在模拟时将铝焊丝的高温物理性能与铝合金母材的设为相同,母材的高温热物理参数见文献[8, 10]。模拟时仅考虑铝合金的熔化潜热,铝合金的固相线温度和液相线温度分别为 570.5, 630.3 °C, 熔化潜热为 338.05 kJ·kg⁻¹。在进行铝-钢异种金属焊



(a) HDG60钢

接的应力场分析时,需要得到不同温度下铝、钢的弹性模量、屈服强度、热膨胀系数等参数。这些性能参数随温度而变化,在低温区间可以通过查阅文献获取,而高温部分通常采用外推法获得,如图 4 所示。在进行热应力分析时,不改变温度场分析时的网格划分,只改变网格属性,将热传导属性改为应力属性。



(b) 6061-T6铝合金

图 4 HDG60 钢和 6061-T6 铝合金的性能参数随温度的变化曲线

Fig.4 Property parameter vs temperature curves for HDG60 steel (a) and 6061-T6 Al alloy (b)

2.3 边界条件

在加载边界条件时,提取模型中的几个作用点进行约束,具体分布如图 5 所示。分别约束作用点 3 个方向(x, y, z 轴)的自由度,以保证在模拟的过程中不出现刚性移动。模拟选用的迭代方式为完全 Newton-Raphson 方式。在进行应力分析时,时间步长与进行温度场计算时的设置一样。施加载荷时,把温度计算结果在 ABAQUS 软件中以预定义场的形式加载到整个模型上,读入热分析的节点温度,并指定相应的时间点或载荷步进行分析。

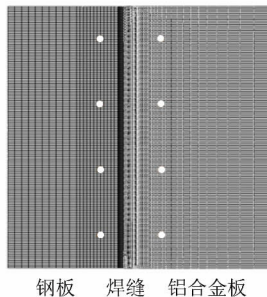


图 5 焊接模型中边界条件作用点示意

Fig.5 Schematic diagram of boundary condition action points in welding model

3 结果与讨论

3.1 焊接接头的等效应力分布

图 6 中焊缝中心左侧为钢板,右侧为铝合金板;开始焊接时即进行加热,焊接时间达到 33.4 s 后开始冷却;在冷却至 123.2 s 时,去掉边界条件。由图 6 可以看出:焊接时间为 3~30 s 时,熔池中心金属被加热

熔化,该区域应力几乎为 0;在钢板和铝合金板上的 von Mises 应力分布不对称,钢板侧承受的应力较大。在焊接时间为 3 s 时,垂直焊缝中心左侧的约束对焊接分析基本上不起作用。焊接时间为 63.4 s 时,焊缝两侧的应力出现较大变化,在加载边界条件的地方会出现较大的约束应力。去掉边界条件后,在钢板一侧,没有出现较大的约束应力,而在铝合金板一侧则出现较大的约束应力。在整个焊接过程中,最大的 von Mises 应力分布在钢板侧,达到 234 MPa。

3.2 特征点应力的变化过程

提取图 2 中靠近焊缝两侧的 A 点和 A' 点的纵向(y 轴方向)应力以及横向(x 轴方向)应力,绘制应力-时间曲线。由图 7(a)可知:从焊接开始到焊枪到达测试点 A, A' 时(约 16.7 s), A, A' 处的纵向应力 σ_y 由 0 慢慢变为压应力,压应力峰值分别为 178 MPa 和 45 MPa;焊枪经过测试点 A, A' 后,熔化的焊缝金属很快收缩,纵向应力由压应力变为拉应力,拉应力达到峰值后又缓慢下降;钢板侧测试点 A 的拉应力峰值比铝合金板侧的高。对比图 7(a) 与 7(b) 可知:测试点 A, A' 的横向应力 σ_x 的变化趋势和纵向应力的基本相似,但是从焊接开始到焊枪经过测试点位置时,测试点受到的横向应力是拉应力。这是因为焊缝周围存在较大的纵向应力,纵向应力产生横向应变,因而产生了附加横向拉应力;当焊枪经过测试点时,测试点处的横向应力又由拉应力变为压应力,而后迅速变为拉应力,钢板侧和铝合金板侧的横向压应力峰值分别为 224, 75 MPa。

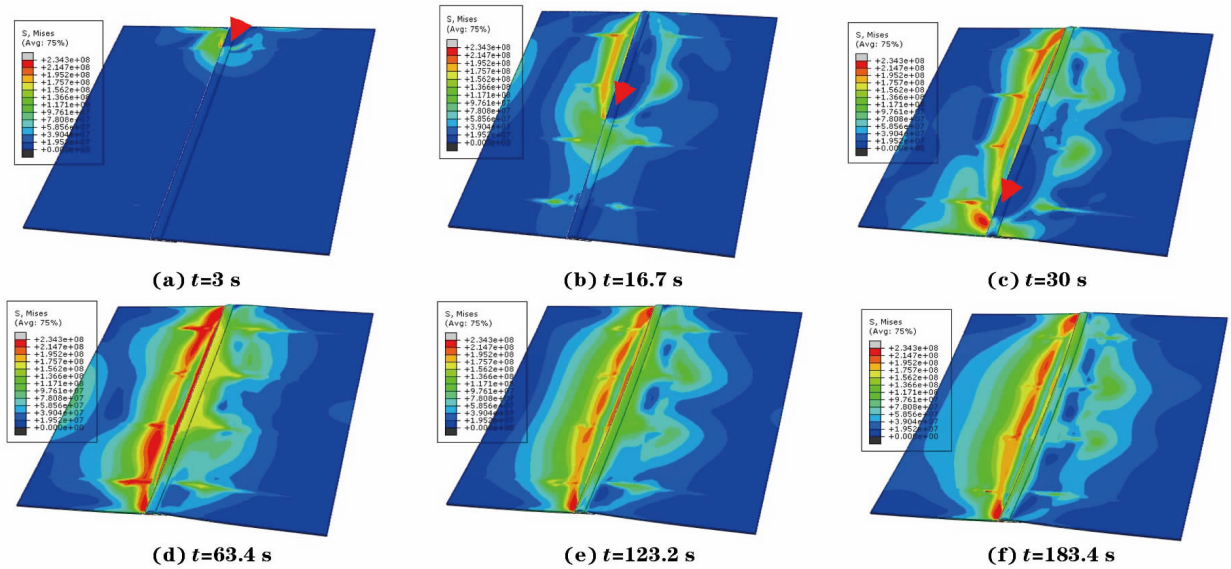


图 6 焊接不同时刻焊接接头中 von Mises 应力分布

Fig.6 Distribution of von Mises stresses in welded joint at various welding times

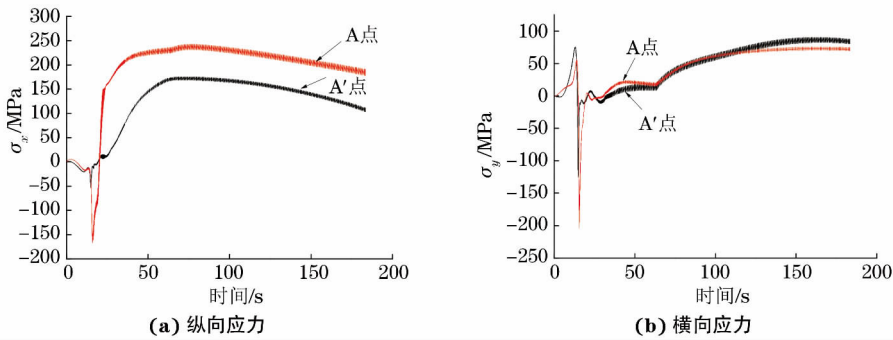


图 7 A 点和 A' 点(如图 2 所示)的纵向应力和横向应力随时间的变化曲线

Fig. 7 Longitudinal stress (a) and transversal stress (b) versus time curves at measure points A and A' (as shown in Fig.2)

为了进一步了解焊后残余应力的分布规律,选取垂直焊缝方向在距焊缝不同位置处(图 2 中的 A~E 点, A'~E' 点)的残余应力分布进行研究。由图 8(a)可知:模拟得到焊缝中心处存在较小的纵向残余拉应力;纵向残余拉应力在铝合金板侧和钢板侧的热影响区达到峰值,分别为 125, 208 MPa, 随

后,随着距焊缝距离的增大,纵向残余拉应力迅速下降转变为残余压应力,达到压应力峰值后逐渐趋向于 0。由图 8(b)可知:焊缝中心存在横向残余压应力;随着距焊缝距离的增大,横向残余压应力变小,变为拉应力后又在焊缝热影响区达到峰值,随后,残余拉应力减小又转变为残余压应力,残余压应力达

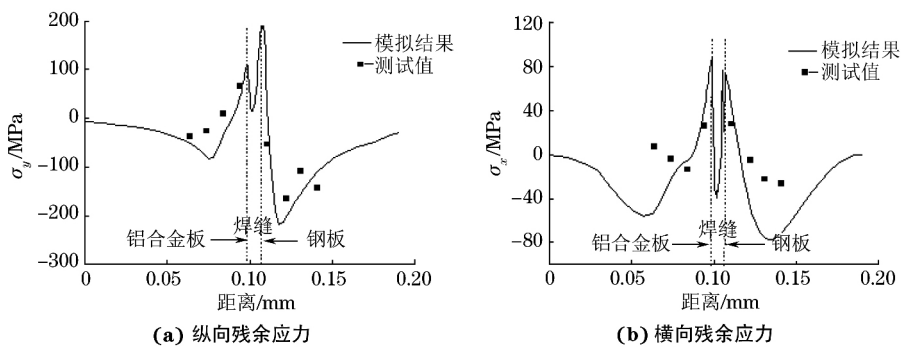


图 8 模拟和试验得到垂直于焊缝方向的焊后残余应力分布

Fig.8 Simulated and experimental residual distribution perpendicular to weld direction after welding:

(a) longitudinal stress and (b) transverse stress

到峰值后又趋向于0;位于铝合金板侧和钢板侧的残余压应力峰值几乎相同,大约为80 MPa。

由图8还可以看出,试验测得的残余应力分布和模拟得到的整体变化趋势吻合,拟合优度为0.75。随着焊缝的冷却,接头两端会出现一定的变形,导致夹具对接头的夹持作用比较显著;在测试残余应力的过程中,打小孔时会引入很大的附加应力,导致拟合优度偏低。数值模拟虽采用了多点约束,但并没有达到线性约束,而且材料的高温物理和力学性能由外推法获得,准确性不高,这些都会影响模拟的准确性。但总体而言,模拟结果比较准确。

从图9中可以看出:在垂直于焊缝方向上,von Mises应力有4个峰值。根据等效应力的定义,结合图8分析可知,在焊缝附近区域出现两个残余拉应力峰值,而在远离焊缝中心会出现两个残余压应力峰值。当应力状态为拉应力时,焊缝中心的残余拉应力峰值得到进一步叠加加强,使焊缝附近区域的材料容易达到其屈服强度而产生屈服;当外在的应力状态为压应力时,远离焊缝的两个残余压应力峰值得到加强,并达到材料屈服强度而使材料屈服。正是由于残余应力状态的差异,外在应力类型显著影响着接头的失效方式,造成了焊接接头对载荷类型的敏感性。

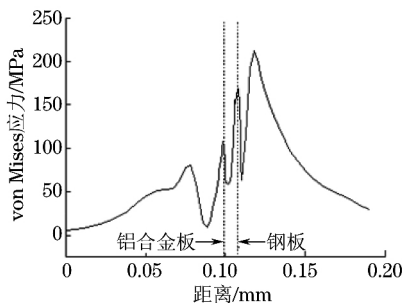


图9 垂直于焊缝方向的 von Mises 应力分布

Fig.9 Von Mises stress distribution perpendicular to weld direction

4 结论

(1) 不同焊接时间下,焊接接头在钢板和铝合金板侧的 von Mises 应力分布不对称,其中铝合金

板侧承受的应力较钢板侧的小。

(2) 在焊接的过程中,近焊缝处钢板和铝合金板侧的纵向应力由0变为压应力,在达到峰值后压应力迅速减小并变为拉应力,拉应力达到峰值后又缓慢下降,钢板侧的拉应力峰值高于铝合金板侧的;横向应力的变化趋势和纵向应力的大致相同,但是在焊枪经过测试点前,由于焊缝周围存在的较大纵向应力使该处产生了横向附加拉应力,此时受到的横向应力为拉应力;焊接结束后,在焊缝两侧形成了残余拉应力和残余压应力区间。

(3) 在铝合金板侧和钢板侧热影响区的纵向残余拉应力最大,分别为125 MPa和208 MPa,而位于铝合金板侧和钢板侧的横向残余压应力峰值几乎相同,约为80 MPa;残余应力分布模拟结果与试验结果的拟合优度为0.75,证明了模拟结果的准确性。

参考文献:

- [1] 秦国梁,武传松. 铝合金/钢异种材料熔钎焊接工艺及其研究现状[J]. 机械工程学报, 2016, 52(24):24-35.
- [2] JARRELL A W, STRAUSS A M, COOK G E. Dissimilar metal T-joint of aluminum and steel formed by friction stir extrusion[M]//Friction Stir Welding and Processing IX. [S. l.]:Springer International Publishing, 2017: 91-96.
- [3] 郭斌,张李超. Cold Metal Transfer(CMT)与CMT Advanced的异同研究[J]. 精密成形工程, 2016(2):50-54.
- [4] 张洪涛,何鹏,孔庆伟,等. 铝钢异种材料焊接研究现状与发展[J]. 焊接, 2006(12):7-12.
- [5] HU J, TASI H L. Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Part II: The metal [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(2): 808-820.
- [6] CHO J H, NA S J. Three-dimensional analysis of molten pool in GMA-laser hybrid welding [J]. Welding Journal, 2009, 80(1):35-43.
- [7] 张洪涛. 铝/镀锌钢板CMT熔-钎焊机理研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2008.
- [8] 曹睿,余斯亮,王岑,等. 铝钢异种金属CMT焊接温度场的数值模拟[J]. 兰州理工大学学报, 2013, 39(5):19-22.
- [9] 曹睿,余刚,陈剑虹. 铝合金和镀锌钢异种金属CMT焊接性分析[J]. 焊接, 2012(1):31-36.
- [10] 武传松,陈茂爱,李士凯. GMAW焊接熔滴长大和脱离动态过程的数学分析[J]. 机械工程学报, 2006, 42(2):76-81.

欢迎来稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告