

超声冲击改善 6061 铝合金焊接残余应力的数值模拟

陈 健, 吕 林, 方 锴

(江苏科技大学 先进焊接技术省级重点实验室, 镇江 212003)

摘 要: 运用 ANSYS 有限元软件对无应力和存在焊接残余应力的 6061 铝合金试板的超声冲击过程进行了数值模拟, 并和实测结果进行了对比。结果表明, 对于无应力试板, 冲击中心表面为压应力, 周围为拉应力; 在冲击中心沿板厚方向, 应力状态逐渐由压应力转变为拉应力。随冲击过程的进行, 材料整体应力水平不断提高; 对于存在焊接应力的试板, 增加载荷位移, 冲击区域的应力降幅也随之增大, 最大拉应力逐渐向母材区转移且其峰值也不断下降, 应力降幅符合实测结果。

关键词: 超声冲击; 焊接残余应力; 数值模拟

中图分类号: TG404 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2013)12-0088-05



陈 健

0 序 言

超声冲击技术是一种机械表面处理工艺。由于其执行机构具有轻巧、可控性好等优点, 超声冲击处理逐渐成为一种理想的降低焊接残余应力, 改善构件耐疲劳、应力腐蚀等性能的方法^[1-3]。

目前对于超声冲击工艺研究主要通过具体的试验来完成, 而采用数值模拟方法对其研究且见于报道的还比较少^[4]。超声冲击处理过程中, 冲击次数至少达到几百次以上^[5], 单次冲击处理时间非常短暂, 另外, 材料在超高应变率条件下的应变硬化行为, 以及冲击过程中实际有效的冲击接触次数等很难确定, 若要对冲击全过程进行数值模拟, 数值分析的非线性程度很高, 计算难度很大。文中对模型设置了合理的假设, 利用 ANSYS 有限元软件对无应力

板件超声冲击过程, 以及超声冲击降低铝合金焊接残余应力进行了数值模拟, 并和实测结果进行了对比验证。

1 数值模型建立

超声冲击工艺数值模拟包含两部分: 一是对铝合金焊接残余应力模拟; 二是将焊接残余应力作为初始应力状态, 对超声冲击过程进行模拟。

1.1 焊接残余应力数值模型

焊接温度场、应力场关于焊缝截面具有对称性, 因此选取一半模型进行模拟。模型尺寸为 200 mm × 80 mm × 3 mm, 材料为 6061-T6 铝合金。与温度相关的材料性能参数见表 1。

焊接残余应力场是热-结构相互耦合的结果。

表 1 6061 铝合金性能参数
Table 1 Physical properties of 6061 Aluminum alloy

温度 $T/^{\circ}\text{C}$	比热容 $c/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	热导率 $\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	线膨胀系数 $\alpha_l/10^{-5}\text{K}^{-1}$	弹性模量 E/GPa	屈服强度 $R_{eL0.2}/\text{MPa}$
20	728	176	2.22	71	300
100	795	180	2.38	65	284
300	963	188	2.53	49	100
500	1 290	198	2.69	40	30
700	1 580	200	3.02	28	10

文中焊接热源采用高斯模型, 基于热弹塑性理论, 利

用间接耦合法对焊接残余应力场进行数值计算。热分析时, 选用 Solid70 划分模型; 结构分析时, 将其转换为 Solid185。焊缝区网格尺寸最小, 为 1.6 mm。

收稿日期: 2012-09-10

基金项目: 江苏省高校优势学科建设工程资助项目

忽略填充金属的熔敷作用。在模型边缘, 对其设置 x 、 y 、 z 方向位移约束, 以模拟焊接时的夹具对工件的拘束, 当焊件冷却至室温时将其解除。

1.2 超声冲击数值模型

超声冲击数值模拟是以焊接残余应力作为初始应力状态的, 因此冲击接触模型中焊件模型的尺寸、选用单元及网格划分与焊接应力场计算时的一致。与焊件产生冲击接触作用的为冲击针头前端的半球体面, 因此对冲击设备建模只需建立一个球体, 直径为 3 mm, 与实际针头前端的半球体直径相同。冲击接触模型如图 1 所示。

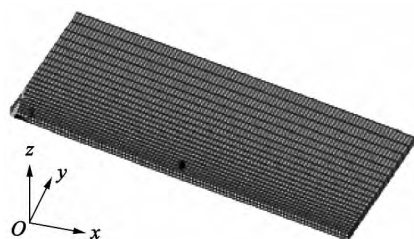


图 1 超声冲击有限元模型

Fig. 1 Finite element model of ultrasonic impact

分析时选择面一面接触方式。由于不需要分析针头表面的应力, 因此计算时将针头看作刚体, 作为目标面, 选用 Target170 目标单元。焊接件作为柔性体, 作为接触面, 选用 Conta174 接触单元。在求解接触问题时, 需要认真定义接触刚度。虽然设置大的接触刚度可使穿透小, 计算精度高, 但过大的接触刚度可能会造成收敛困难。计算过程中对接触刚度值反复试验, 发现该值对模型刚度、载荷大小等因素比较敏感。对于文中有限元模型, 接触刚度值范围在 0.6 ~ 1.0 之间时, 求解收敛情况较好。选用扩增的拉格朗日算法对模型计算。为了防止焊件在冲击过程中发生整体刚性移动, 在平板底面选取几个节点施加全约束, 对整个底面施加厚度方向约束。

受试验条件限制, 要想准确获得针头冲击能量在时间上的分布显得很困难。因此选择其它类型载荷代替力载荷。超声冲击时, 焊接残余应力分布状态与材料受冲击产生的塑性变形有着密切关系, 因此计算中可以对冲击针头施加载荷位移, 达到与力载荷相同的冲击效果。对于刚体模型的冲击针头, 建立一个控制节点来控制整个刚性目标面的运动, 载荷位移施加在控制节点上。在实际超声冲击过程中, 冲击次数达到上千次, 若对上千次冲击过程进行模拟, 以现有的计算机资源将很难完成。因此对冲击过程进行了简化, 假设只施加一次载荷位移即达

到多次冲击产生的效果。在冲击过程中, 载荷位移施加需要在一定时间内完成, 该时间即冲击针头与材料瞬间接触时间在 10 ~ 30 μs 范围内。

2 数值模拟结果与验证

2.1 焊接残余应力模拟结果验证

图 2 显示了焊件冷却至室温时, 距焊件始端 120 mm 处的纵向残余应力模拟结果与实测结果。

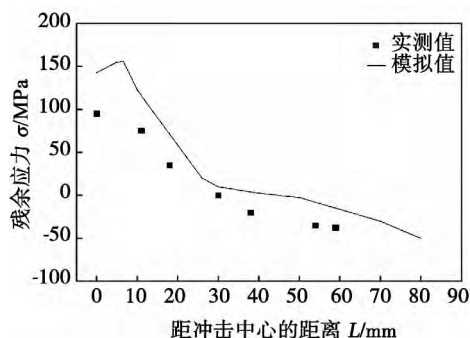


图 2 焊接残余应力数值模拟结果与实测结果比较

Fig. 2 Comparison between simulated and tested results of welding residual stresses

在焊缝中心及距焊缝中心 10 mm 范围内, 纵向应力的实际测量结果与模拟结果差异较大, 两者相差约 45 MPa 左右; 其余各点处的应力模拟结果与实际测量结果较为吻合。在焊缝中心及距焊缝中心 10 mm 范围内, 实测值和模拟值存在较大差异的原因主要包括: 材料力学性能参数是与温度相关的, 在升温阶段和降温阶段力学性能随温度变化率并不相同, 如果仅采用单一阶段的数据计算, 焊缝区的模拟结果与实测结果会存在一定的差异^[6], 但由于试验条件限制, 应力场数值计算时只能采用升温阶段数据代替降温阶段数据; 实际测量时要对焊缝余高进行打磨, 一部分应力得到释放; 另外实测结果本身也会有误差; 再者焊接时采用的夹具约束在有限元模型上只是通过对远离焊缝处一些节点设置刚性位移来实现的, 这在实际约束状态是有出入的, 这也是模拟结果与实际情况存在差异的原因^[7]。尽管模拟结果与实测结果存在一定的差异, 但总体趋势上两者还是相吻合的, 因此可以用应力场数值模拟结果作为超声冲击过程模拟的基础。

2.2 超声模拟结果与验证

2.2.1 超声单次冲击动态过程模拟结果

为了了解冲击过程中的应力应变动态变化过程, 先对无应力板件单次超声冲击进行模拟(图 3),

此时施加的载荷位移为 0.4 mm. 图 4 ~ 图 6 分别为 1 μ s、6 μ s、25 μ s 时纵向残余应力沿 OB、OC 路径(冲击方向)的分布情况,以及模型表面节点在 OC 路径上的位移.

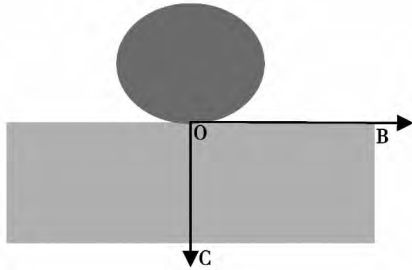


图 3 冲击截面及路径示意图

Fig. 3 Schematic diagram of impact section and paths

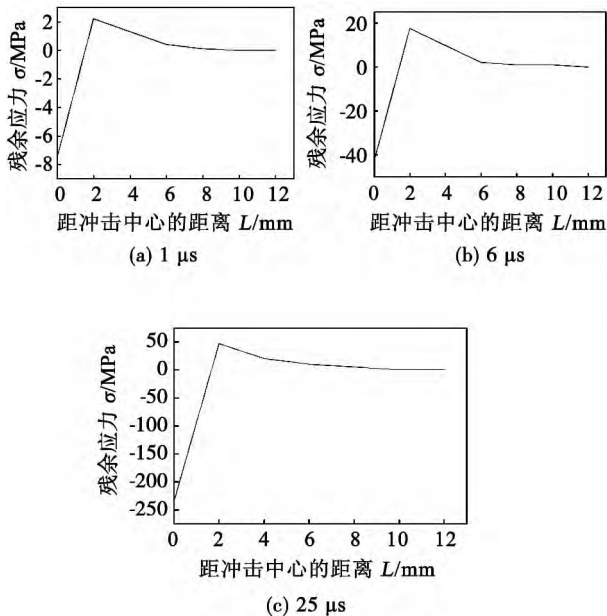


图 4 不同冲击时刻 OB 路径残余应力分布

Fig. 4 Stress distribution on OB path at different impact time

从图 4 可见冲击中心为压应力,周围为拉应力,离冲击中心稍远处则不受影响;此外随冲击针头与工件作用时间的延长,冲击中心的压应力从 7 MPa 增加至 236 MPa,周围的拉应力也随之增大,由 2 MPa 增加至 50 MPa,但压应力和拉应力在 OB 方向上的作用范围则几乎没有变化.

由图 5 可知,在冲击中心 OC 方向上,距冲击表面之间距离的增加压应力逐渐减小,超过一定距离后转变为拉应力.同样随冲击针头与工件作用时间的延长,压应力和相应的拉应力均随之增加.

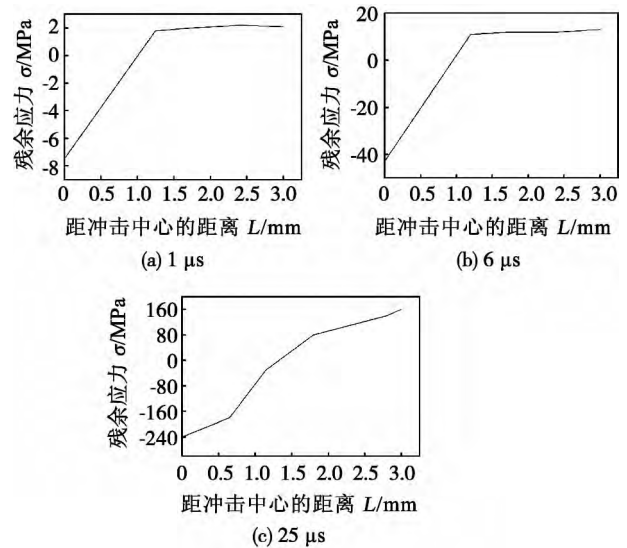


图 5 不同冲击时刻 OC 路径残余应力分布

Fig. 5 Stress distribution on OC path at different impact time

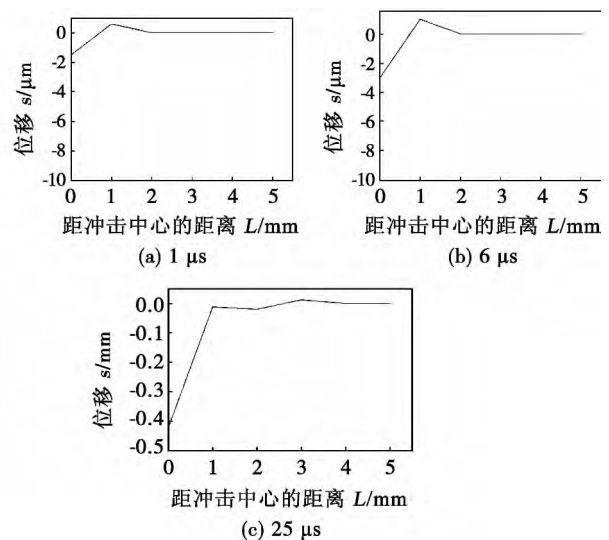


图 6 不同冲击时刻表面节点沿 OC 路径的位移

Fig. 6 Displacement of surface nodes on OC path at different impact time

综上所述,材料整体应力水平随冲击针头与工件作用时间的延长呈逐渐变大趋势.

从图 6 可知,在各冲击时刻(冲击针头与工件作用时间),处于冲击中心的节点在冲击方向位移最大,分别为 -1.6×10^{-3} 、 -9.3×10^{-3} 、 -4×10^{-1} mm;在其周围则产生数值较小的反向位移;同时在 OB 路径上发生变形的节点数逐渐增多.

图 7 反映了在不同冲击时刻,OB 路径、OC 路径上节点的等效塑性应变的变化情况.冲击刚开始时(6 μ s 之前),等效塑性应变为零,表明材料还没有发生塑性变形,应力状态变化是弹性应变造成的.

在 $15\ \mu\text{s}$ 时, 开始产生塑性应变, 冲击中心塑性变形量最大, 远离中心塑性变形量逐渐减小. 至 $25\ \mu\text{s}$ 时, 冲击中心表面塑性变形量达到 6.5×10^{-2} , 但塑性应变的最大值并不位于冲击中心表面, 而是发生在距表面一定深度处(图 7b). 总体来说, 冲击过程中不可恢复的等效塑性变形量不断增大, 显然, 冲击后在材料表面留下的“凹坑”亦将不断变大.

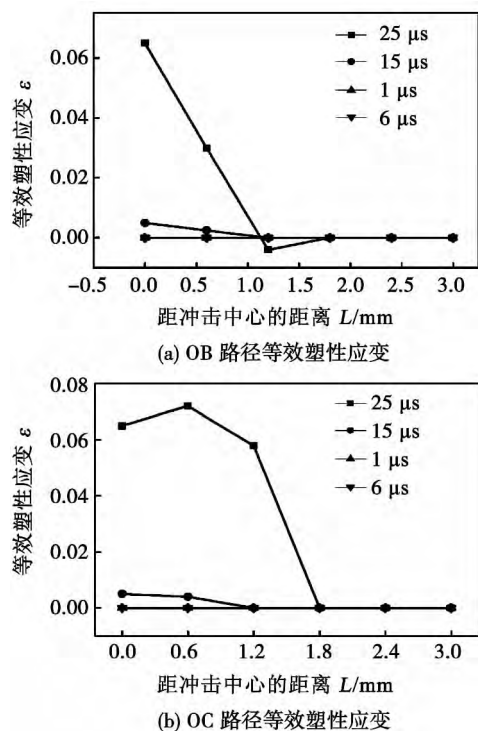


图 7 不同冲击时刻等效塑性应变

Fig. 7 Equivalent plastic strain at different impact time

综合上述分析结果, 在冲击过程中, 冲击区域的压应力以及整体应力水平变化趋势与节点等效塑性变形量的变化趋势是一致的, 均呈上升趋势.

2.2.2 超声冲击降低焊接残余应力模拟结果与验证

图 8 为经不同载荷位移冲击焊趾后, 距焊件始端 120 mm 处纵向残余应力数值模拟结果. 从图 8 中可看出, 冲击后焊缝及附近区域的应力均有较大幅度的下降, 其中冲击区域即焊趾处的应力下降程度最明显. 随载荷位移的增大, 焊缝及近缝区逐渐由拉应力转变为压应力, 同时, 最大拉应力逐渐向母材区转移且其峰值也不断下降. 这表明增加载荷位移可以更大程度地降低焊接残余应力. 对于某一特定的受冲击材料, 载荷位移实质上是冲击接触力的反映. 冲击力大, 则载荷位移大, 应力降低程度越明显.

当超声冲击头以 $13\ \text{mm/s}$ 的移动速度对焊趾冲击 3 遍后, 实测材料表面“凹坑”的深度约为 0.2

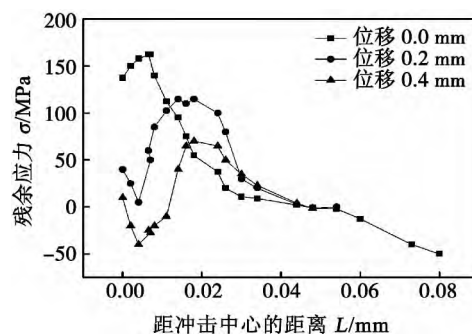


图 8 不同载荷位移冲击后应力分布

Fig. 8 Stress distribution after impact with different displacement loads

$\sim 0.3\ \text{mm}$. 由于材料在超声冲击时发生的变形既有弹性变又有塑性变形, 同时还会产生应变硬化等原因, 因此材料表面的“凹坑”深度要小于冲击时的实际位移, 为此选取载荷位移为 0.4 mm 时的模拟值与实测值^[8]作比较, 结果如表 2 与表 3 所示.

表 2 焊缝中心处残余应力模拟值与实测值对比

Table 2 Comparison between simulated and tested results of stress at weld center

研究方法	冲击前残余应力	冲击后残余应力	残余应力差值
	σ/MPa	σ'/MPa	$\Delta\sigma/\text{MPa}$
实测	90	-52	142
数值模拟	140	2	138

表 3 距焊缝中心 10 mm 处残余应力模拟值与实测值对比

Table 3 Comparison between simulated and tested results of stress at locations 10 mm away from weld center

研究方法	冲击前残余应力	冲击后残余应力	残余应力差值
	σ/MPa	σ'/MPa	$\Delta\sigma/\text{MPa}$
实测	70	-25	95
数值模拟	110	5	105

由表 2 和表 3 可见, 尽管实测值与模拟值存在较大的差异, 但冲击前后应力变化的幅值 ($\Delta\sigma$) 却相当接近, 这说明冲击模拟的结果是符合实际情况的. 至于实测值与模拟值的具体差异, 则主要源于焊接残余应力场模拟结果与其实测结果之间的差异, 其原因已在上文中作了说明.

3 结 论

(1) 对无应力试板进行超声冲击的数值模拟显示: 冲击中心表面为压应力, 周围为拉应力; 在冲击

中心沿板厚方向,应力状态逐渐由压应力转变为拉应力;随冲击过程的进行,材料整体应力水平不断提高,材料内部产生更多的不可恢复的塑性应变,但塑性应变的最大值并不位于冲击中心表面,而是发生在距表面一定深度处。

(2) 对有焊接应力试板进行超声冲击的数值模拟结果表明,增加载荷位移,冲击区域的应力降幅也随之增大,最大拉应力逐渐向母材区转移且其峰值也不断下降。

(3) 以材料表面“凹坑”的深度为依据,选取合适的载荷位移,对冲击效果进行数值模拟的结果表明:应力降幅符合实测结果。

参考文献:

- [1] 饶德林,陈立功,倪纯珍,等. 超声冲击对焊接结构残余应力的影响[J]. 焊接学报, 2005, 26(4): 48-50, 64.
Rao Delin, Chen Ligong, Ni Chunzhen, *et al.* Effect of ultrasonic impact treatment on residual stress of welded structure[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(4): 48-50, 64.
- [2] 赵晓辉,王东坡,王惜宝,等. 承载超声波提高 TC4 钛合金焊接接头的疲劳性能[J]. 焊接学报, 2010, 31(11): 57-60.
Zhao Xiaohui, Wang Dongpo, Wang Xibao, *et al.* Improvement of fatigue performance of TC4 Ti-alloy welded joints by loading ultrasonic peening[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(11): 57-60.
- [3] Xiang Ling, Gang Ma. Effect of ultrasonic impact treatment on the stress corrosion cracking of 304 stainless steel welded joints[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2009, 131: 1-5.
- [4] Mordyuk B N, Prokopenko G I. Fatigue life improvement of α -titanium by novel ultrasonically assisted technique[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 437: 396-405.
- [5] Efim Sh Statnikov, Oleg V Korolkov, Vladimir N Vityazev. Physics and mechanism of ultrasonic impact[J]. Ultrasonics, 2006, 44: 533-538.
- [6] 张增磊. 铝合金焊接应力变形数值模拟研究及应用[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [7] 刘川,张建勋. 外拘束力对堆焊焊接残余应力的影响[J]. 中国机械工程, 2009, 20(10): 1234-1239.
Liu Chuan, Zhang Jianxun. Effects of external restraining forces on bead-on-plate welding residual stress[J]. China Academic Journal Electronic Publishing House, 2009, 20(10): 1234-1239.
- [8] 陈健,方锴,肖越,等. 超声冲击工艺对铝合金焊接接头残余应力影响[J]. 江苏科技大学学报(自然科学), 2012, 26(5): 444-447.
Chen Jian, Fang Kai, Xiao Yue, *et al.* Influence of ultrasonic impact treatment on residual stress of aluminum alloy joint[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 26(5): 444-447.

作者简介: 陈健,男,1963年出生,副教授.主要从事高性能铜合金的开发、焊接、等离子喷涂方面研究.发表论文20余篇. Email: jsch168@yeah.net

the semi-natural thermocouple. The points on different distance from the interface were measured with K type thermocouple. The temperature on the friction interface rises quickly and there is an obvious stage with constant temperature. With the increase of distance from friction interface, the rising rate of the temperature decrease gradually. After the welding process, the temperature gradually tends to be homogenous.

Key words: radial friction welding; temperature field; temperature measurement

Geometric size effect on interfacial elements diffusion of Cu/SAC305/Cu micro-structure LUO Liangliang, SUN Fenglian, ZHU Yan (College of Materials Science and Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, China). pp 75 – 78

Abstract: The relation between solder thickness and the growth behavior of IMC during HTS (high-temperature storage) aging was investigated with Cu/SAC305/Cu sandwich structures at different solder thicknesses (15 ~ 50 μm). The results indicated that the solid state diffusion of interfacial elements is greatly dependent upon solder thickness during HTS aging. The thinner the solder layer is, the faster the Cu_3Sn layer grows, which leads to a thickness ratio decrease of $\text{Cu}_6\text{Sn}_5/\text{Cu}_3\text{Sn}$ after HTS aging at 160 $^{\circ}\text{C}$. The growth rate of IMC layer (Cu_6Sn_5 layer + Cu_3Sn layer) also decreases with the decrease of solder thickness during HTS aging. The diffusion coefficient is in relation with the size of solder layer. Further data correlating indicates that the alternation regularity between diffusion coefficient and solder thickness is approximately accordance with parabolic correlation.

Key words: high-temperature storage aging; intermetallic compounds; diffusion coefficient; geometrical size effect

Numerical research on weld bead geometry and residual stresses with different heat source models in laser welding of TC4 titanium alloy LI Xingxia¹, WANG Hongyu², ZHANG Jianxun² (1. Department of Materials Engineering, Henan Mechanical and Electrical Engineering College, Xinxiang 453002, China; 2. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China). pp 79 – 82

Abstract: According to the features of laser deep penetration welding, three heat models of uniform heat source, double ellipsoidal heat source and the combined heat source were used to study numerically the weld bead geometry and residual stresses in CO_2 laser welding of TC4 titanium alloy. The results show that the heat source model in calculation should be selected according to the energy input. Then an approach to select the heat source model was proposed that the uniform heat source should be used under the condition of the greater energy input, the double ellipsoidal heat source is suitable for medium energy input and the combined heat source fits for smaller energy input. Both the double ellipsoidal heat source and the combined heat source can indicate the decrease of heat input with depth, and the estimated weld bead geometry as circular cone shape or nail shape. The residual stresses on top and back sides are similar when the uniform heat source is used, but the larger residual stress exists on the top surface than that on back surface when the double ellipso-

dial and combined heat sources are used.

Key words: laser welding; heat source model; titanium alloy

Analysis of arc adjustment mechanism to pulsed MIG welding based on PFM adjustment ZHANG Xiaoli^{1,2}, LIN Fang³, LI Yuzhen², XUE Jiaxiang² (1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangxi University of Science & Technology, Ganzhou 341000, China; 2. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. Department of Electromechanical, Jiangmen Polytechnic College, Jiangmen 529000, China). pp 83 – 87

Abstract: Aimed at the problems of arc length control in pulsed MIG welding power supply, the research of arc self-regulating mechanism and arc adjusting mechanism under the control of the pulse frequency modulation (PFM) was developed. The mathematical model of arc length was established. The principle of PFM arc adjustment system was introduced and the PFM current regulation model was given. The PFM arc control mechanism and the problems existing in the arc control were analyzed for non-resistance wire and resistance wire. A more stable welding effect can be obtained for PFM current regulation of non-resistance wire from theoretical derivation. For the resistance wire, the stable welding effect can be obtained when CTWD is fixed and satisfactory welding results cannot be obtained while CTWD changing. Finally the step tests of PFM arc adjustment were carried out by using non-resistance wire and resistance wire, respectively. The theory above is verified by test results.

Key words: PFM adjustment; pulsed MIG welding; arc; resistance wire; non-resistance wire

Numerical simulation of ultrasonic impact treatment on 6061 aluminum alloy welding residual stress CHEN Jian, LÜ Lin, FANG Kai (Jiangsu Provincial Lab of Advanced Welding Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China). pp 88 – 92

Abstract: The ultrasonic impact treatment on the thin 6061 aluminum alloy plate without and with welding residual stress was analyzed by means of the finite element software ANSYS. The simulated result was compared with the tested one. In the case of the existence of no welding residual stress, the result shows that the surface stresses are compressive at the impact center, and tensile around the center after treatment. Along the depth of the sample, compressive stresses turn into tensile ones. The whole stress state increases gradually with the treatment. In the case of the existence of welding residual stress, with the increase of the displacement load, stresses at the impact zone decrease greatly and the highest stress locates the area away from the weld. The simulated result of the stress change accords well with the tested one.

Key words: ultrasonic impact treatment; welding residual stress; numerical simulation

Welding groove model and accuracy of processing technology of square tube REN Qingchuan, XU Lei, HUANG Shiyou, YE Zhenzhen (School of Manufacturing Science & Engineer-