

横向超声随焊控制铝合金焊接热裂纹倾向数值模拟研究

周广涛^{1,2}, 江余东¹, 方洪渊²

(1. 华侨大学, 福建 厦门 361021)

(2. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 从力学角度出发, 提出横向超声随焊控制铝合金焊接热裂纹的新方法。讨论了铝合金焊接热裂纹产生的条件, 建立脆性温度区间(BTR)金属材料-力学性能匹配模型, 采用弹塑性有限元方法对BTR区域金属产生的挤压塑性流变行为和应变场变化进行了分析。模拟结果表明, 横向超声冲击对BTR区金属产生横向压缩塑性应变, 并依靠BTR区金属的塑性变形把应变传递到焊缝中心, 随着横向超声冲击加载功率的增加, 在焊缝中心处产生的挤压应变也随之增大。通过实验测定实际情况下BTR区金属的横向压缩塑性应变值, 实验结果与模拟结果吻合良好, 进一步证明了该方法的可靠性。

关键词: 横向超声; 焊接热裂纹; 脆性温度区间; 数值模拟

中图分类号: TG404

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2015)06-1407-06

铝合金由于具有比强度高、密度小等优良特性被广泛应用于航空、航天等重要结构中。但铝合金本身较大的线膨胀系数、较高的热导率使得铝合金结构焊接时热裂倾向严重, 容易产生热裂纹^[1,2] (主要是结晶裂纹), 尤其铝合金薄板结构更为显著, 因此防止铝合金焊接热裂纹是一项重要的任务。一般认为, 焊接热裂纹是冶金因素和力学因素共同作用的结果, 因此, 防止热裂纹的途径主要集中在这两个方面。

从冶金角度出发, 主要是借助焊丝调整焊缝的合金成分和结晶组织, 改善焊缝金属的抗裂性。但冶金方法可能会由于异质焊丝的加入而牺牲焊接接头部分使用性能, 使得该法在实际应用中有一定的局限性。而从力学角度, 就是在焊接过程中对处于脆性温度区间的焊缝金属额外施加一定的横向挤压应变, 以抵消焊缝金属本身固有的致裂拉伸应变, 从而调整和改善焊接时应力和应变的分布情况, 达到防止焊接热裂纹的目的。目前防止焊接热裂纹的主要方法有: 横向预置应力法^[3]、随焊锤击法^[4]、碾压法及局部冷却和加热法^[5-10]等。

本研究从力学角度出发, 提出横向超声随焊控制铝合金焊接热裂纹的新方法, 即在焊接过程中, 在垂直于焊缝中心方向施加横向超声挤压应变, 抵消焊缝金属在脆性温度区间由于凝固收缩而产生的致裂横

向拉伸应变, 既达到防止焊接热裂纹的目的, 还避免了冶金方法的不足之处, 同时获得优质焊接接头^[11-13]。相比其他方法, 该方法具有自己的独特优点: 实验设备简单, 属于随焊操作, 控制性强, 接头表面外观优良。尤其与作者曾提出的横向预置应力法相比^[3], 具有一定优势: 横向预置应力法由于焊缝冷却收缩会减弱横向力, 定量控制存在着误差; 本法施加的高频横向力能始终作用于BTR区, 与焊接过程实时作用(随焊)。本实验首先通过计算焊接温度场确定脆性温度区间, 再建立BTR区金属材料温度-力学性能匹配模型并进行数值模拟计算, 探讨横向超声方法下BTR区焊缝金属挤压塑性流变行为和应变场的变化, 以阐明其防止热裂纹的机理。

1 横向超声随焊控制焊接热裂纹的机理

1.1 焊接热裂纹产生的条件

关于焊接热裂纹的形成, 被普遍接受的观点是普洛霍洛夫理论^[14,15], 该理论认为, 焊接热裂纹的产生在于焊缝中存在液态薄膜和在焊缝凝固过程中受到拉伸应力共同作用的结果。图1所示为拉伸应力与BTR区被焊金属塑性变化之间的关系。其中纵坐标表示为温度, 横坐标 ϵ 表示拉伸应力产生的应变, p 表示在脆性温度区间 T_B 内焊缝金属的塑性, 它是温

收稿日期: 2014-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(51075158); 福建省自然科学基金(2012J01212); 厦门市科技计划(3502Z20133023)

作者简介: 周广涛, 男, 1971年生, 博士, 副教授, 华侨大学机电及自动化学院, 福建 厦门 361021, 电话: 0592-6162598, E-mail: zhouguangtao@hqu.edu.cn

度的函数，可以看出，当熔池金属凝固的后期，液态薄膜出现的瞬时，存在一个最小的塑性值 p_{min} 。

拉伸应力所产生的应变随温度按曲线 1 变化时，在焊缝塑性最小的固相线 T_s 附近，只产生了 $\Delta\varepsilon$ 的应变变量，对应的焊缝金属具有相当于 $p_{min}-\Delta\varepsilon$ 大小的塑性储备量，记为 $\Delta\varepsilon_s$ ，即 $\Delta\varepsilon_s=p_{min}-\Delta\varepsilon$ ，由于此时 $\Delta\varepsilon_s > 0$ ，因此在该情况下不会产生热裂纹；当按照曲线 2 变化时，拉伸应力产生的应变与焊缝的最低塑性值 p_{min} 相等，这样 $\Delta\varepsilon_s=0$ ，即处于不产生热裂纹的临界状态；当按照曲线 3 变化时，拉伸应力所产生的应变已超过焊缝金属在脆性温度区间内所具有的最低塑性 p_{min} ，即 $\Delta\varepsilon_s < 0$ ，此时液态薄膜就会被拉开，产生热裂纹。

1.2 横向超声随焊控制焊接热裂纹的基本原理

在铝合金焊接过程中，热裂纹常产生于脆性温度区间内，满足 $\Delta\varepsilon_s < 0$ 条件时，则会产生焊接热裂纹。如图 2 所示，焊接过程中，在与焊缝中心截面相垂直的方向，从两侧随焊施加指向焊缝中心面的功率超声波，对熔池后方处于脆性温度区间的冷凝状态的焊缝金属施加一横向挤压应变 $\Delta\varepsilon_c$ ，则 $\Delta\varepsilon_s=p_{min}-(\Delta\varepsilon+\Delta\varepsilon_c)$ ，其中 $\Delta\varepsilon_c$ 是横向超声冲击产生的挤压应变，即 $\Delta\varepsilon_c < 0$ ；只要保证 $\Delta\varepsilon_c$ 足够大， $\Delta\varepsilon_s$ 就能恒大于零，抵消焊缝固有的致裂拉伸应变，从而消除热裂纹的产生。本实验重点研究对热裂纹起关键作用的 BTR 金属的横向挤压行为。

2 横向超声对 BTR 区焊缝金属挤压作用的数值模拟

2.1 横向超声随焊控制焊接热裂纹模型

采用弹塑性有限元方法，利用 Marc 软件对横向超声冲击在工件中产生的应力分布情况进行了数值模拟。尺寸为 180 mm×100 mm×2 mm，模型如图 3 所示。

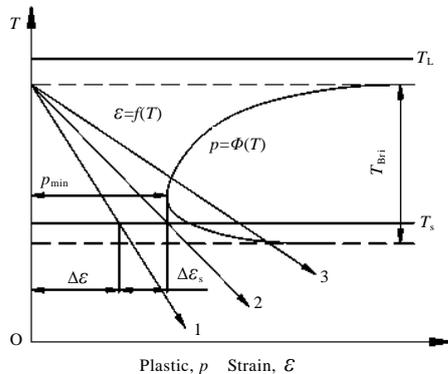


图 1 焊接时产生热裂纹的力学条件

Fig.1 Mechanical condition of hot cracks occurring during welding

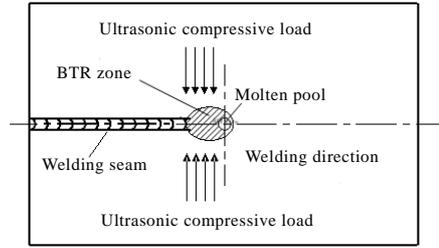


图 2 横向超声随焊控制焊接热裂纹原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of preventing hot cracks by welding with transverse ultrasonic

采用接触分析，超声冲击装置建为刚体，模拟真实实验情况。模型单元为八节点六面体类型，共含 10656 个单元、16353 个节点。材料采用 LY12CZ，其力学性能参数弹性模量 E 为 71 GPa，屈服极限 σ_s 为 315 MPa。

2.2 横向超声加载振幅对焊缝中心处应力场的影响

横向超声冲击载荷需要通过超声冲击杆沿铝合金薄板板宽方向的加载振幅来施加。加载振幅会对薄板产生高频脉动位移，该脉动位移便会在焊缝中心线处产生压应力。图 4 表示本模型中不同加载振幅在整个焊缝长度上产生的压应力，曲线 1 表示加载振幅为 0.001 mm 情况，随着超声加载振幅的增加，到达焊缝处的压应力逐渐增大，从 0.001 mm 条件下的 -9.37 MPa 升高到 0.3 mm 条件下的 -55.3 MPa。

通过计算可得出加载振幅与超声波功率的对应关系如表 1 所示。随着加载振幅的增加，超声波功率逐渐增加。

2.3 脆性温度区间的确定

横向超声的作用位置决定于脆性温度区间，为了确定 BTR 区的位置，对 LY12CZ 铝合金焊接温度场进行数值模拟，试件尺寸 180 mm×100 mm×2 mm，焊接规范为：焊接电流 $I=90$ A、焊接电压 $U=12$ V、焊接速度 $v=3.2$ mm/s。

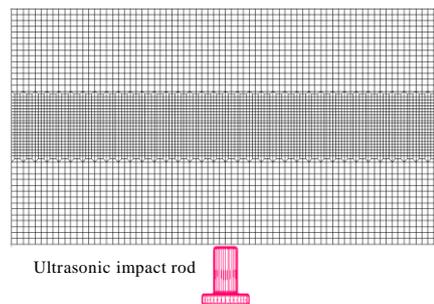


图 3 有限元模型及加载

Fig.3 FEM model and loading

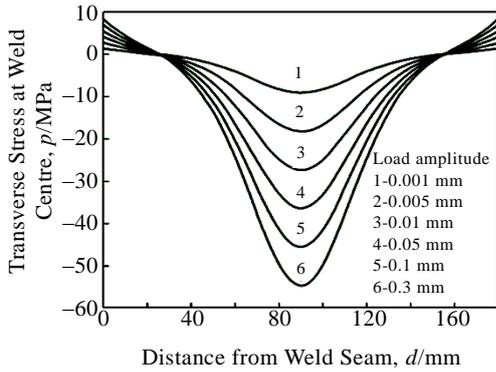


图 4 不同加载振幅对焊缝中心线横向应力的影响

Fig.4 Effects of different load amplitude on transverse stress of the weld center line

通过热物理模拟测出零强温度来确定 BTR 温度，脆性温度区间是处于液-固相之间的相对较窄的温度区域，位于熔池后方。图 5 采用用户定义显示方式显示熔池周围等温线分布，可以看出，其中最内圈温度为常规焊时液相线温度 650 °C，最外圈的等温线温度为 475 °C，两线之间的区域可看作是脆性温度区间（BTR 区）。

2.4 横向超声对 BTR 区金属挤压传递效应

2.4.1 横向超声冲击对 BTR 区的挤压作用效果

如果在 BTR 区间产生压缩塑性应变，则热裂纹将失去产生的条件。焊接时产生温度场，不同温度下材料的力学性能不同，彼此之间的约束便产生应力应变变化。根据这一特性，本研究创造性地建立 BTR 金属材料-力学性能模型，相当于此时已处于焊接温度场状况，把模型分为 4 个区域，如图 6 所示。

表 1 不同加载振幅下的超声波功率

Table 1 Ultrasonic power under different load amplitudes

Load amplitude/mm	0.001	0.005	0.01	0.05	0.1	0.3
Power/W	27	53	80	104	130	156

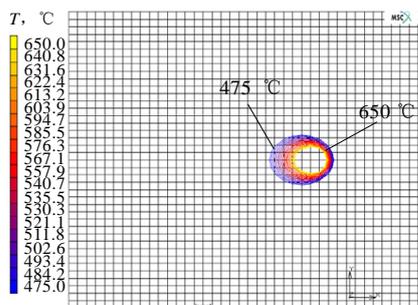


图 5 脆性温度区间

Fig.5 Brittle temperature range

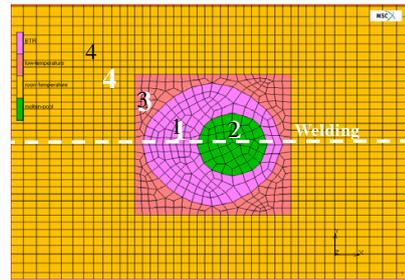


图 6 BTR 区有限元建模

Fig.6 FEM model generation of BTR material

根据 LY12CZ 高温拉伸性能数据，可知在 BTR 内金属的屈服应力在 0.3~7 MPa。模型各部分材料属性按照温度来赋予与之相应的高温的屈服极限和弹性模量。图中 1 区为 BTR 区，屈服极限取下限值 0.3 MPa；2 区为熔池，其力学性能参数数值接近为零；周围区域 3 区和 4 区则赋予与 BTR 区临近温度对应的力学性能，4 区具有较高的强度。由于 BTR 区以外区域材料具有较高的强度，能抵抗一定的变形，而 BTR 区内金属强度低，极易发生塑性变形。低屈服区小，产生塑性变形的程度也小，更能体现横向超声控制焊接热裂纹的效果。

图 7 表示横向超声作用下工件中 BTR 区的正塑性应变矢量分布图。可以看出，BTR 区焊缝处金属的正应变矢量垂直于板中性面，并指向板面以外，这说明 BTR 区金属被挤向焊缝中心，从两侧向焊缝中心发生了塑性流动，致使厚度方向产生应变，是周围向内压缩所致，是由横向超声冲击引起的，如箭头所示。金属向焊缝中心塑性流动与 BTR 区内焊接热裂纹产生时焊缝金属的流动趋势相反，这样横向超声产生的挤压应变与 BTR 区间金属凝固收缩时受到的拉伸应变发生作用，相互抵消补偿，使得 BTR 区间金属承受的应变限制在金属具有的最小塑性值以下，甚至变为压应变，从而防止热裂纹的产生。

2.4.2 横向超声对 BTR 区压缩塑性应变的影响

以 BTR 区及周围低温高屈服区域作为研究对象，被横向超声冲击压缩后的 BTR 区金属如图 8 所示。

图中黑色区域为熔池，屈服极限接近于零，白色区域为高屈服强度区，两者之间的区域是 BTR 区。路径 AGB 为 BTR 区的外边缘，路径 ACE 为 BTR 区间中焊缝中心位置。由于焊接时热源连续移动，因此 BTR 区间也是处于移动状态，为了在整个焊接过程中控制热裂纹，要求横向超声始终作用于处于熔池后

方的脆性区间的焊缝金属，这样使得到达 BTR 区周围的应力不衰减，能保证达到最大的挤压效果。

压缩应变，随着向熔池延伸，应变值有个小幅降低后增大，最大值可达 18%，到熔池位置后应变值又有所

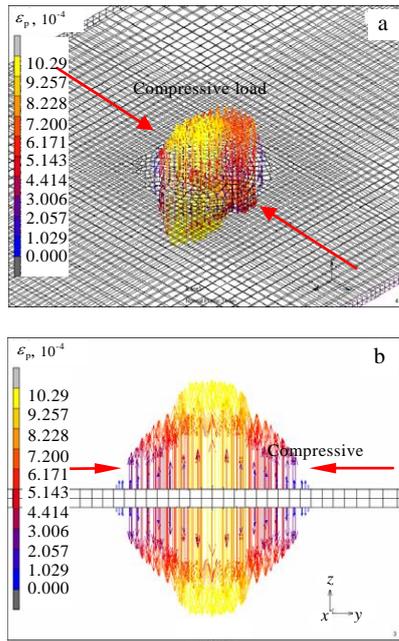


图 7 横向超声作用下 BTR 区间的正塑性应变矢量

Fig.7 Normal plastic strain generated by transverse ultrasonic in BTR: (a) axonometric drawing and (b) elevation view

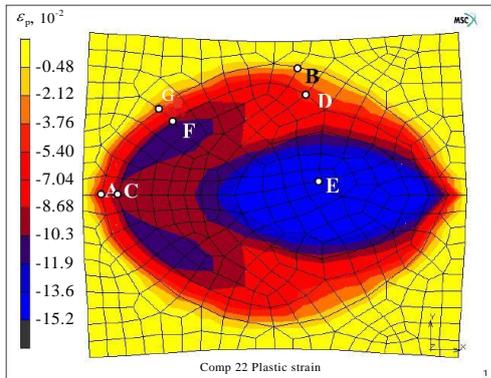


图 8 压缩后的脆性温度区间内横向压缩塑性应变

Fig.8 Transverse compressive plastic strain in brittle temperature range after compression

图 9 表示了当超声波功率为 80 W 时，脆性温度区间金属及熔池金属产生的横向压缩塑性应变，曲线 1 表示脆性温度区间外边缘上部分节点的横向塑性应变，接近中心线的点 A 处的塑性应变数值最大，为 8% 左右，向熔池方向应变值逐渐减小；曲线 2 表示脆性温度区间内部某路径的塑性应变，同曲线 1 相比，压缩塑性应变值明显增大，在靠近焊缝中心线处的点塑性应变值大，可达 13% 左右，随着向熔池方向延伸，应变值逐渐降低，曲线 3 代表焊缝中线处横向

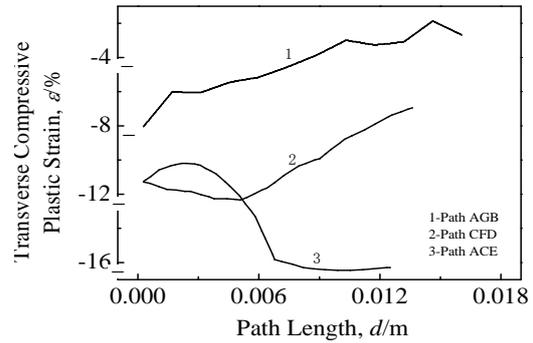


图 9 BTR 内不同路径的横向压缩塑性应变

Fig.9 Transverse compressive plastic strain of different paths in BTR

增加，即使在热裂纹极少发生的部位即 BTR 边缘，横向超声冲击产生的压应变值也在 2% 以上，说明横向超声冲击的挤压效应有能力去补偿导致热裂纹产生的拉伸应变，使焊缝金属不具备热裂纹产生的力学条件，能积极有效地消除热裂纹。

3 试验验证

为了验证所建模型和模拟结果的正确性，采用 LY12 铝合金为试验材料，在铝合金薄板中心用电阻丝绕成尺寸与模型的 BTR 区域大致相同的椭圆形，并在验证点横向划出刻线，加热电阻温度至 600 °C，当温度冷却至 BTR 温度区间时，施加功率为 80 W 的横向超声冲击，待完全冷却后，测量初始验证点相对中心线的位移，并计算出横向压缩塑性应变，验证点的位置如图 10 所示。

根据实际测量结果与模拟结果比较，如图 11 所示，可以看到模拟与试验所得数据相差不大，说明模拟结果准确可靠。

4 分析与讨论

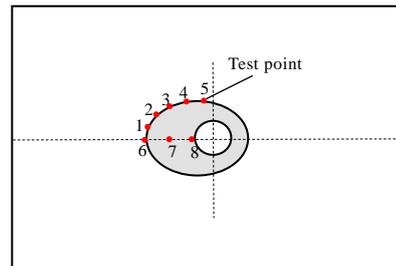


图10 验证点位置示意图

Fig.10 Schematic diagram of test point location

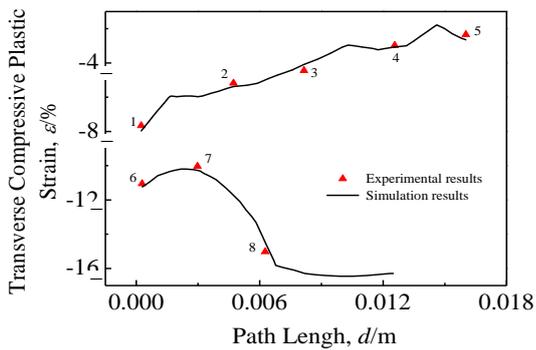


图11 验证点的横向压缩塑性应变测量值与模拟值对比

Fig.11 Comparison of transverse compressive plastic strain of test points between the simulation and the experiment

当焊缝金属凝固时,成分较纯的金属熔点较高,首先凝固形成枝晶的主干,而大部分合金元素及杂质仍保留在液体中,随着温度的进一步降低,枝晶慢慢长大,液态金属越来越少而杂质浓度越来越高,最后被排挤到晶界上,形成液态低熔共晶薄膜。液态薄膜和固体金属共存的温度范围就称为脆性温度区间(BTR)。脆性温度区间金属的延性很小,如果受到拉应力的作用,液态薄膜就容易被拉开成为微裂纹,此时如果没有足够量的液态金属补充,当焊缝完全凝固以后,此裂纹就会保留下来,最终形成热裂纹。

热裂纹的产生主要是冷凝到脆性温度区间的金属承受的拉伸应变超过了此时金属具有的最低塑性值,因此塑性拉伸应变是热裂纹产生的关键量,由于金属在该温度区间处于“黏糊”状,虽然不能承受更大的应力,但却可以传递应变发生塑性变形,在脆性温度区间周围的金属由于弹性模量大,可以承担较大的应力,横向超声冲击载荷通过超声冲击杆振幅施加在薄板上,产生高频脉冲位移,该脉冲位移便会对BTR周围区间金属产生的较大压应力,并依靠BTR区间金属的塑性变形把压缩塑性应变传递到焊缝中心,这样施加的横向超声冲击便能补偿抵消焊缝中心处致裂拉伸应变,间接说明横向超声随焊控制铝合金焊接热裂纹新方法的可行性,为下一步模拟焊接条件下BTR区瞬态应变行为并进行焊接试验提供理论基础,后续将进一步进行深入研究。

5 结论

1) 针对铝合金焊接热裂倾向大的问题,提出横向超声随焊控制铝合金焊接热裂纹的新方法,建立该

方法下BTR区金属材料-力学匹配模型,从数值模拟和试验两方面验证了该方法的可行性。

2) 横向超声数值模拟计算表明,横向功率超声能在试件中产生压应力,并且对BTR区间的焊缝金属产生横向压缩塑性应变,并依靠BTR区间金属的塑性变形把应变传递到焊缝中心。随着横向超声冲击加载振幅的增加,在焊缝中心处产生的挤压应力也随之增大。

3) 试验与模拟结果吻合良好,证明横向超声随焊加载控制热裂纹的可行性,模拟结果准确可靠。

参考文献 References

- [1] Wang Rui(王蕊), Liang Zhenxin(梁振新), Zhang Jianxun(张建勋). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(7): 1264
- [2] Li Zhanming(李占明), Zhu Youli(朱有利), Du Xiaokun(杜晓坤) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(S2):307
- [3] Zhou Guangtao(周广涛), Liu Xuesong(刘雪松), Yang Jianguo(杨建国) et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2009, 19(4): 613
- [4] Fang Hongyuan(方洪渊), Dong Zhibo(董志波), Xu Wenli(徐文立) et al. *Welding & Joining*(焊接)[J], 2002(3): 17
- [5] Tian Xitang(田锡唐), Guo Shaoqing(郭绍庆), Xu Wenli(徐文立). *Aerospace Materials & Technology*(宇航材料工艺)[J], 1998, 28(5): 48
- [6] Zhao Zheng(赵征), Li Jinglong(李京龙), Li Ming(黎明) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(3): 525
- [7] Cicala E, Duffet G, Andrzejewski H et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2005, 395: 1
- [8] Zivkovic D, Anzulovic B. *Materials and Design*[J], 2005, 26: 247
- [9] Ankara A, Ari H B. *Material and Design*[J], 1996, 17(5-6): 261
- [10] Zhou Pengzhan(周鹏展), Zhong Jue(钟掘), He Diqui(贺地求). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2006, 16(6): 964
- [11] Liu Gang, Wang Liliang, Yuan Shijian et al. *Trans Nonferrous Met Soc China*[J], 2006, 16(5): 1103
- [12] Liu Renpei, Dong Zujue, Pan Yongming. *Trans Nonferrous Met Soc China*[J], 2006, 16(1): 110
- [13] Li Jing, Yin Yansheng, Liu Yingcai et al. *Trans Nonferrous Met Soc China*[J], 2006, 16(4): 795

- [14] Li Jun(李 军), Yang Jianguo(杨建国), Yan Dejun (闫德俊) *et al. Transactions of the China Welding Institution(焊接学报)*[J], 2009, 30(7): 69
- [15] Zhou Zhenfeng(周振丰). *Welding Metallurgy and Weld of Metal(焊接冶金与金属焊接性)*[M]. Beijing: China Machine Press, 1993: 122

Numerical Simulation of Transverse Ultrasonic for Controlling the Tendency of Welding Hot Cracking in Aluminum Welding

Zhou Guangtao^{1,2}, Jiang Yudong¹, Fang Hongyuan²

(1. Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

(2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A new method was presented from the view of mechanics to prevent welding hot cracking for aluminum alloy by employing transverse ultrasonic during welding. The mechanical condition of welding hot cracking was discussed. The material-mechanical properties matching model within brittle temperature region (BTR) metals was established and the plastic flow and the variation of the strain field in welds by transverse ultrasonic were analyzed numerically. The simulation results show that the transverse ultrasonic impact produces transverse compressive plastic strain in BTR metal, and the plastic deformation is transferred to the weld centre through the metal within BTR. With the ultrasonic load amplitude increasing, the compressive stress in weld centre increases. Experiment was carried out through the ultrasonic extrusion in BTR area. It is indicated that the simulation results and the experiment results are in good accordance, which proves the reliability of the new method.

Key words: transverse ultrasonic; welding hot cracking; brittle temperature range; numerical simulation

Corresponding author: Zhou Guangtao, Ph. D., Associate Professor, College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, P. R. China, Tel: 0086-592-6162598, E-mail: zhouguangtao@hqu.edu.cn