

浅析搅拌摩擦焊残余应力

Brief Analysis on Residual Stress of Friction Stir Welding

北京航空航天大学机械工程学院 宋伟 曲文卿
中国搅拌摩擦焊中心 栾国红 董春林 李光

[摘要] 讨论了搅拌摩擦焊残余应力的产生原因,在已有的试验结果的基础上对残余应力的分布和规律进行了概述。并且以钨极氩弧焊(TIG)为例,将搅拌摩擦焊与传统熔焊的残余应力分布进行了对比,进一步肯定了搅拌摩擦焊在铝合金焊接时的优越性。同时还介绍了对搅拌摩擦焊残余应力的控制方法及其效果,最后对有关搅拌摩擦焊的残余应力的研究工作做出了展望。

关键词: 搅拌摩擦焊 残余应力分布 塑性变形

[ABSTRACT] The generating reasons of the residual stress in the process of FSW is briefly analyzed and the distribution and laws of residual stress are summarized on the basis of existing test results. The comparison of residual stress between friction stir welding and traditional fusion welding is done by using the example of TIG, it is proven that the advantages of FSW in the process of aluminum welding is obvious. Further more, the control methods of residual stress of the friction stir welding process and its effect are introduced, finally, the prospects for research work that connection with residual stress of friction stir welding are presented.

Keywords: Friction stir welding Residual stress distribution Plastic deformation

搅拌摩擦焊接(Friction Stir Welding, FSW)是由英国焊接协会(TWI)于1991年发明的一种新型固相焊接技术^[1-4],具有接头变形小、力学性能好、节能环保等特点,为铝合金、镁合金等熔化焊接性差的有色金属材料的有效连接提供了一个新的途径^[5]。

搅拌摩擦焊焊接接头具有细化的组织,无气孔、裂纹和元素烧损等熔焊缺陷且焊缝质量高度一致,适用于多种接头形式,连接工艺比较简单,目前已广泛应用于航空航天、船舶、机械、建筑、电器和汽车制造等领域。研究搅拌摩擦焊接接头残余应力的分布对优化焊接工艺、提高焊接质量和提升焊接构件的稳定性具有非常重要的意义。

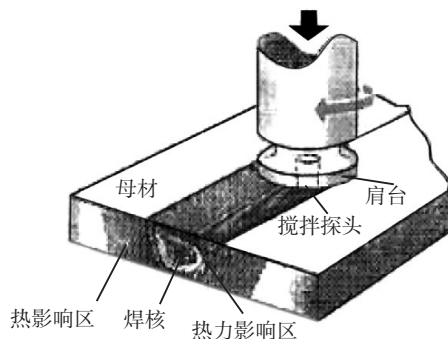


图1 搅拌摩擦焊示意图

Fig.1 Diagram of FSW process

1 FSW 残余应力的产生

图1为典型的搅拌摩擦焊设备的焊接过程。搅拌轴上装有搅拌头。被焊工件采用刚性夹具施加约束力,来防止工件与工作台的相对运动。搅拌头旋转并缓慢地将搅拌针插入两块对接板材之间的焊缝处^[6-9]。当旋转的搅拌头接触工件表面时,搅拌针与工件表面快速摩擦产生的热量使接触点材料的温度升高,达到塑性状态。搅拌针在外力作用下不断顶锻和挤压接缝两边的材料,直至轴肩紧密接触工件表面。这时,由搅拌头轴肩与搅拌针产生的摩擦热在轴肩下面和搅拌针周围形成大量的塑化层。当工件相对搅拌针移动时,在搅拌针侧面及旋转方向产生的机械搅拌顶锻作用下,搅拌针的前表面把塑化的材料移动到搅拌针后表面。在搅拌针沿接缝前进时,搅拌头前的对接接头表面被摩擦加热至超塑性状态。搅拌针和轴肩摩擦接缝,破碎氧化膜,搅拌和重组搅拌针后方的磨碎材料。搅拌针后方的材料冷却后就形成焊缝。在焊接薄板时,轴肩和工件的摩擦是主要的热量来源。

综合考虑搅拌摩擦焊的整个过程,残余应力的产生来源于2个方面。一方面,跟其他焊接方式中残余应力的产生一样,是由于在焊接时对零件的不均匀加热造成的。在焊接过程中搅拌头与工件之间的摩擦热传导具有不均匀性,导致金属夹具与焊缝之间存在温度梯度,

这势必会产生焊接残余应力^[10]。另一方面,搅拌摩擦焊残余应力的产生也有其自身的特点。在焊接过程中,由于被焊工件需要刚性夹具夹持,这种夹持的约束力可以阻止焊核及焊缝两侧的焊接热影响区产生的冷却收缩,这是导致焊缝和热影响区产生残余应力的又一重要原因^[11]。

2 FSW 残余应力的分布

构件在工作过程中,焊接残余应力与其所载荷引起的工作应力相互叠加,使其产生二次变形和残余应力的重新分布。这不但会降低构件的刚性和尺寸稳定性,而且也是造成焊接构件断裂、疲劳破坏和应力腐蚀的重要原因之一。

目前,对于残余应力的研究主要有试验和数值分析两种方法。具体的测量方法有:电阻应变法、X射线衍射法、应力敏感法、中子法、超声波法、电磁法、云纹法等。

最经典的残余应力测量方法是应变片钻孔法,但这种方法存在以下缺点:

(1) 钻孔释放的残余应力是随到孔周的距离增加迅速递减的,而应变片到孔周有一定的距离,所以应变片对释放的残余应力的敏感度会降低;

(2) 应变片测到的只是其长度范围内应变的平均值;

(3) 应变片钻孔法是将钻孔释放的残余应力作为均匀场来计算的,因此不适合焊接残余应力梯度很大的情况^[12]。

近年来,出现了与钻孔法相结合的光学测量方法。Nicoletto^[13]利用云纹干涉法获得了全场位移信息,通过多个钻孔得到了垂直于焊缝方向的残余应力分布,但是没有考虑残余应力沿深度的分布。Wu^[14]利用云纹干涉法与传统的阶梯钻孔法相结合的方法,测量了残余应力沿深度的分布,并得到了广泛应用。这两种方法与应变片钻孔法一样,都是假设孔周围的残余应力是均匀的。亚敏^[15]采用云纹干涉与钻孔系统对高强度铝合金 6056 搅拌摩擦焊试件的残余应力的水平与分布进行了测量,结果如图 2、图 3 所示。

从图 2 中可以看出,焊缝区的纵向残余应力 σ_x 和横向残余应力 σ_y 都是拉伸残余应力,且具有相同的分布趋势,随深度的增加而增加,但 σ_x 比 σ_y 大的多,这说明纵向残余应力是搅拌摩擦焊的主要残余应力;剪切残余应力与横向应力具有相同的量级,数值大小在 0 附近波动。

从图 3 可以看出,随着到焊缝中心的距离增加,拉伸残余应力先减小,而后逐渐增大,在热影响区 (HAZ)

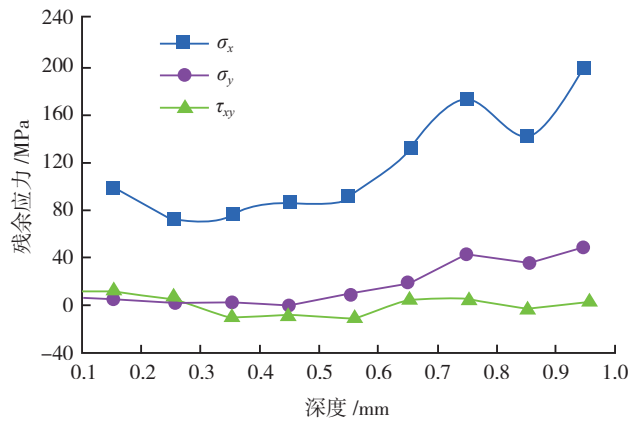


图2 焊缝缝区残余应力沿深度的分布
Fig.2 Residual stress distribution along depth of weld seam zone

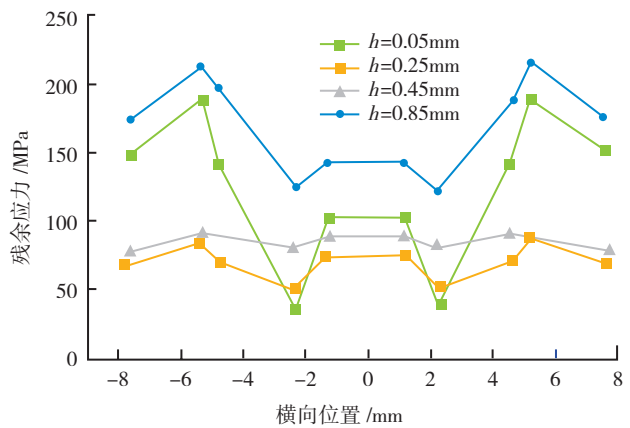


图3 纵向残余应力 σ_x 沿垂直焊缝和沿深度方向的分布
Fig.3 Distribution of longitudinal residual stress (σ_x) along vertical weld seam and depth direction

处达到最大值,最后在母材区域逐渐减小,最终减小为 0,然后改变方向成为压缩残余应力,从而与焊缝区内的拉伸残余应力保持平衡。在焊缝与热影响区之间存在一个残余应力的低谷,此处即为搅拌影响区(热机影响区)。残余应力 σ_x 与 σ_y 的分布相似。

由此可以总结出 FSW 残余应力的主要分布特点有以下 4 种:

(1) 纵向的应力远大于横向的应力,成为主要残余应力;

(2) 在垂直于焊缝的方向上,残余应力呈 M 型分布,最大值出现在热影响区边界,且为拉伸应力,其大小低于材料的室温屈服强度;

(3) 在焊缝中心,拉伸残余应力相对较小,在焊缝中心线两侧有所降低,在搅拌影响区内拉伸残余应力从最低值急剧上升,然后随距焊缝中心线距离的增加逐渐

降低;

(4) 前进侧(旋转方向与焊接方向相同的那一侧)和后退侧(旋转方向与焊接方向相反的那一侧)残余应力分布非严格对称。

FSW 焊接本身也是一个非对称的工艺过程。如图 4 所示。在前进侧,由于轴肩任意点的线速度与焊接速度方向相同,形成叠加效应,因此轴肩与接头材料之间的相对运动速度比较大;而在后退侧,由于轴肩任意点的线速度与焊接速度方向相反,因此轴肩与接头材料之间的相对运动速度比较小。这种相对速度的差异使得在 FSW 焊接过程中,接头对接面两侧受力状态、热输入等均有比较大的差异,从而造成接头残余应力的分布也不对称,并且前进侧应力水平较高、后退侧应力水平较低^[16]。

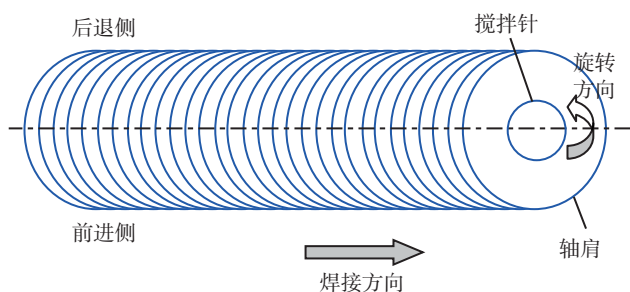


图4 FSW焊接过程
Fig.4 FSW welding process

虽然试验的研究方法具有真实、直观的优点,但却很难考虑包括温度、组织结构变化等多种因素对结果的综合影响。为此引入数值模拟的方法,通过对算法的研究来了解残余应力的分布是十分必要的。

有关 FSW 残余应力的数值模拟往往基于特定的理想模型。Livan Fratini^[17] 等人,通过有限元模型,使用 DEFORM-3DTM 软件对搅拌摩擦焊的过程进行了模拟。得出了如图 5、图 6、图 7 所示的模拟结果。

通过观察纵向、横向残余应力云图和残余应力沿深度方向的分布图,其结果与亚敏的试验所得到的分布趋势基本一致。

3 FSW 与传统熔焊的残余应力分布比较

西安交通大学的王训宏^[18] 等,利用 X 射线衍射法测量了铝合金搅拌摩擦焊和钨极氩弧焊(TIG)焊接接头表面的残余应力分布曲线。由图 8、图 9 可见,两种焊接接头平行于焊缝(纵向)的残余应力和垂直于焊缝(横向)的残余应力具有相似分布趋势,需要注意的是氩弧焊接接头在横向和纵向残余应力的分布应力值变化较大。在热影响区,FSW 焊接接头比 TIG 焊接接头

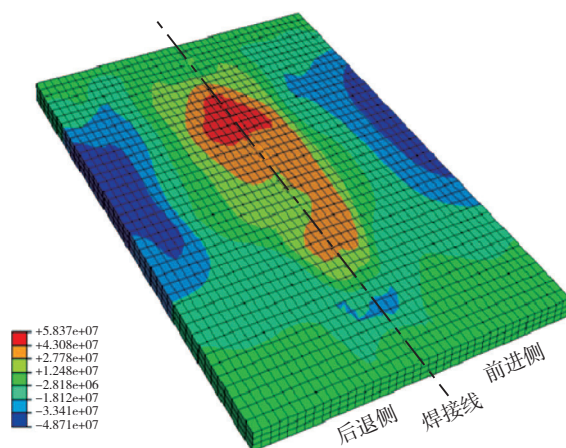


图5 纵向残余应力云图 (MPa)

Fig.5 Longitudinal residual stress variation (MPa)

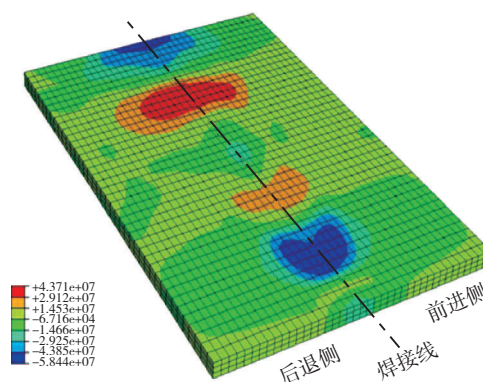


图6 横向残余应力云图 (MPa)

Fig.6 Transverse residual stress variation (MPa)

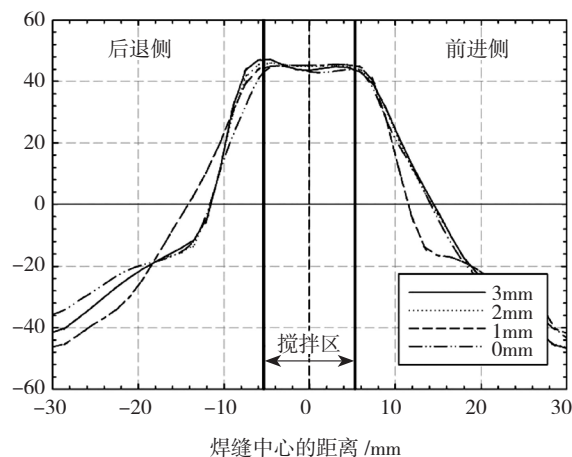


图7 纵向残余应力沿横截面不同深度的分布情况
Fig.7 Longitudinal residual stress distribution along different depths of cross section

的残余应力值约低 15%~25%。搅拌摩擦焊接接头的残余应力如此分布的主要原因为:一方面由于搅拌摩擦

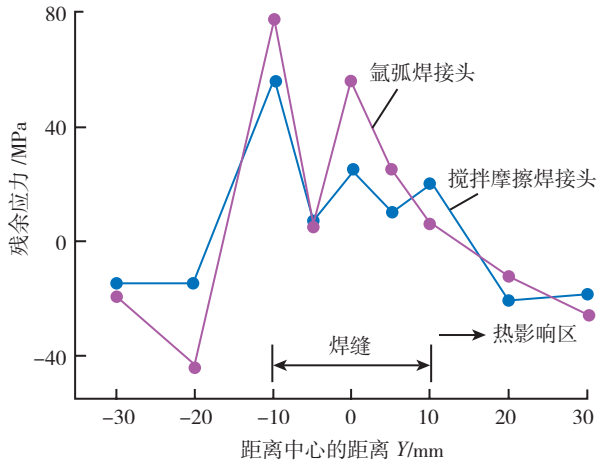


图8 垂直于焊缝方向的残余应力分布
Fig.8 Residual stress distribution of perpendicular to weld seam direction

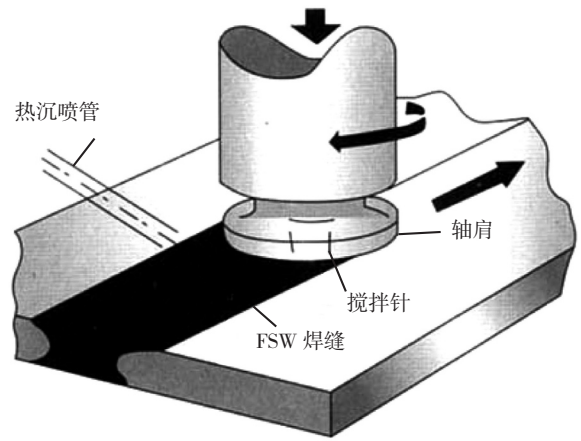


图10 FSW过程中DC-LSND控制
Fig.10 DC-LSND control during FSW

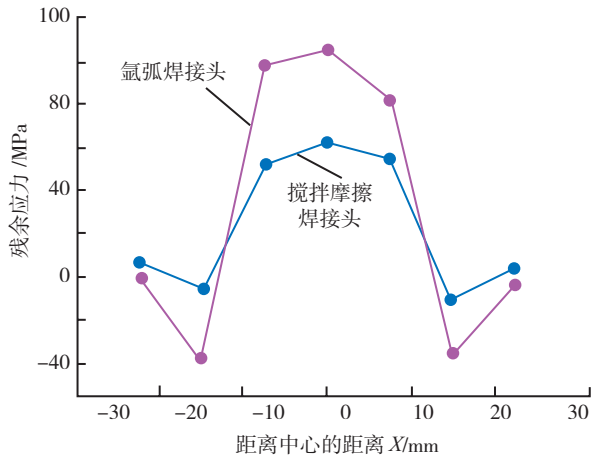


图9 平行于焊缝方向的残余应力分布
Fig.9 Residual stress distribution parallel to weld seam direction

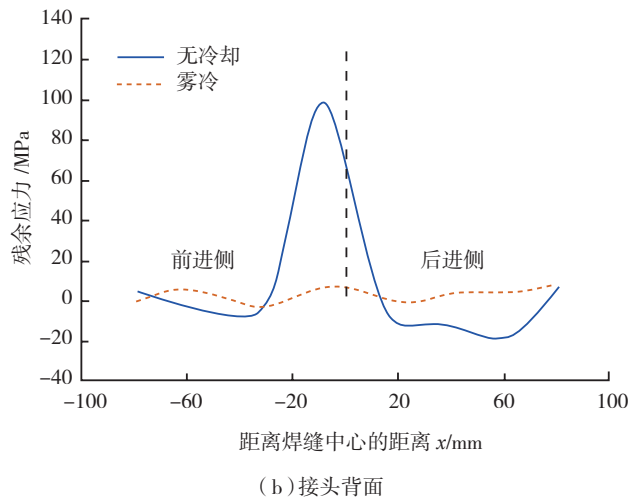
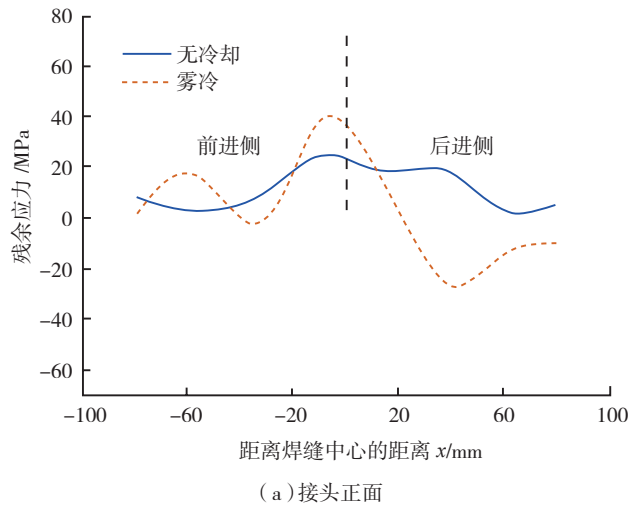


图11 不同条件下FSW接头残余应力分布
Fig.11 Residual stress distribution of FSW joint under different conditions

焊接是一种固态塑性焊接，铝合金焊缝中心最高温度未达到其熔点，避免了较大的热应力；另一方面，相对熔化焊接而言，搅拌摩擦焊接接头的晶粒明显细化，并且各个组织区域晶粒过渡平缓，无熔化焊接接头中的粗大等轴晶粒和柱状晶粒，减小了组织应力。

4 FSW 残余应力的控制方法

无论是搅拌摩擦焊还是传统的熔焊，对残余应力的有效消除都是非常必要的。在焊接过程中和焊接后，沿焊缝线方向进行纵向拉伸，可以降低变形程度和拉伸残余应力。可采用的拉伸方法有以下2种。

第一种是机械拉伸方法，即通过夹具牵引被焊接金属板的端部进行拉伸，焊后进行释放。P.Staron、

M.Kocak^[19]等人曾经在焊接前,将铝板固定在专用的加载设备上,然后通过机械拉伸使其拉伸应力达到屈服应力的70%。焊后释放铝板,利用中子衍射仪测量其残余应力。S.W. Williams、D.A. Price^[20]等人采用机械拉伸法得出了应力对比图。试验结果表明,在焊接过程中进行机械拉伸,可以在焊缝中产生较大的压应力,可以有效避免焊缝区域残余应力的产生。

另一种是热拉伸方法,即在焊缝处喷射低温液体或在靠近焊缝处加热,从而沿焊缝中心线产生热拉伸应力。有关试验最早由关桥院士在1993年利用他开发的动态控制低应力无变形(DC-LSND)焊接方法及其装置来实现^[21]。具体做法是,利用图10所示的装置,在焊接过程中通过热沉喷管喷射水雾对焊缝形成动态冷却,研究它对搅拌摩擦焊接接头残余应力及其分布的影响。图11为柴鹏^[11]等在优选搅拌头、优选参数条件下,采用DC-LSND技术(水雾冷却)与不采用DC-LSND技术(无冷却)的FSW接头正面(a)、背面(b)的残余应力分布图。结果表明,虽然无法完全消除结构的焊接变形和残余应力,但是可以有效控制FSW结构中的残余应力水平及其分布。

5 FSW 残余应力未来的研究方向

FSW是在近年来新发展起来的一项焊接技术,在工程领域应用的时间还不是很长。虽然国内外许多学者针对FSW的残余应力做了相当多包括试验和模拟在内的多手段研究,并取得了一些成果,但是由于FSW过程的复杂性,可用于工程设计的残余应力分布规律还没有找到。因此,在有关FSW的残余应力方面,还有诸多问题尚待解决^[7]。亟待解决的问题主要有以下几个方面。

首先,我们应该明确的是,焊接温度场是引起残余应力和焊接变形的根源。所以要想更客观更深入地分析FSW的残余应力分布,首先应进一步明确其温度场的分布。

其次,目前关于FSW的研究手段主要由试验和数值模拟的方法。但是这2种方法都有其自身的瓶颈。试验方法无法考虑包括温度、组织结构变化、金属流动在内的多种因素对结果的综合影响;而数值模拟的方法对搅拌摩擦焊接残余应力的分析效果很大程度上依赖于理想模型的建立。如果能更好地优化研究方法,无疑会使对残余应力的研究提高到一个新的层次。

最后,在进一步了解FSW残余应力分布规律的基础上,切实改进现有消除残余应力的方法或者开辟更为行之有效的FSW残余应力的途径也是将来该领域研究的一个方向。

参考文献

- [1] Thomas W M, Nicholas E D, Needham J CN, et al. Friction stir butt welding. International Patent Application NO. PCT/GB92102203 and Great Britain Patent Application NO.9125978.8;1991.
- [2] Dawes C J. An introduction to friction stir welding and its development. welding Metal Fabrication, 1995(1):12.
- [3] Rhodes C G, Mahoney M W, et. al. Effect of friction stir welding on micro structure of 7075 aluminum. Scr Mater. 1997, 36(1):69.
- [4] Dawes C J, Thomas WM. Friction stir process welds aluminum alloy. Welding J, 1996, 75(3): 41.
- [5] 关桥, 栾国红. 搅拌摩擦焊的现状与发展. 第十一届全国焊接学术会议, 上海:2005(1D):15.29.
- [6] 王德庆, 刘日明, 丁成钢, 等. 搅拌摩擦焊接技术的发展现状. 大连铁道学院学报, 2002,23(1):75.
- [7] 栾国红, 郭德伦, 关桥, 等. 飞机制造工业中的搅拌摩擦焊研究. 航空制造技术, 2002,(10):43.
- [8] 赵衍华, 林三宝, 吴林, 等. 搅拌摩擦焊应用及焊接设备简介. 电焊机, 2004,34(1):7.
- [9] 何建军, 刘明宇, 杨宗辉. 搅拌头—搅拌摩擦焊的心脏[J]. 电焊机, 2004,34(1):24.
- [10] Masahito Mochizuki, Makoto Hayashi, Toshio Hattori. Numerical analysis of welding residual stress and its verification neutron diffraction measurement. Transactions of the ASME Journal of Engineering Materials and Technology, 2000, 122(1): 98-103.
- [11] 黄华, 董仕节, 刘静. 先进的搅拌摩擦焊技术. 有色金属, 2006,58(1):60.62.
- [12] 陈贺静, 杨新歧. 搅拌摩擦焊接残余应力的研究进展. 有色金属加工, 2007,36(4):34.
- [13] G. Bussu, P. E. Irving. The role of residual stress and heat affected zone properties on fatigue crack propagation in friction stir welded 2024-T351 aluminum joints. International Journal of Fatigue. 2003. 25:77-88.
- [14] Wu Z. Détermination des contraintes résiduelles par interférométrie de moiré et méthode de perage du trou incremental. University Technology of Troyes, 1998.
- [15] 亚敏, 戴福隆, 吕坚. 搅拌摩擦焊接接头残余应力的试验. 焊接学报, 2002,23(5):53-56.
- [16] 柴鹏, 栾国红, 郭德伦, 李菊. FSW接头残余应力分布及控制技术. 焊接学报, 2005,26(11):79, 81, 82.
- [17] Livan Fratini, Gandolfo Macaluso, Salvatore Pasta. Residual stresses and FCP prediction in FSW through a continuous FE model. Journal of Materials Processing Technology, 2009,209(2):5470-5471.
- [18] 王训宏, 王快社, 沈洋, 等. 搅拌摩擦焊和钨极氩弧焊接接头的残余应力. 机械工程材料, 2007, 31(1):27-28.
- [19] Staron P, Kocak M, Williams S, et al. Residual stress in friction stir-welded Al sheets. Physica B:Condensed Matter, 2004,350: 491-493.
- [20] S. W. Williams, D. A. Price, A. Wescott, A. Steuwer, M. Peel, J. Altenkreh, P. J. Withers, M. Poadl. Distortion Control in Welding by Mechanical Tensioning. Science and Technology of Welding and Joining, 2007,12(7):620-633.
- [21] 关桥, 郭德伦, 李从卿, 等. 薄壁构件低应力无变形焊接方法及设备: 中国, 87100959.5[P]:1987-02-28.

(责编 亦非)