

FSW 接头残余应力分布及控制技术

柴 鹏， 李国红， 郭德伦， 李 菊

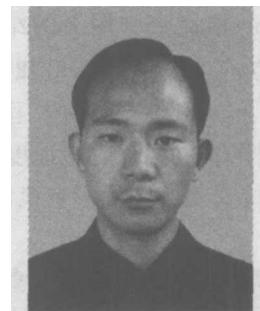
(北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

摘要：对不同搅拌头、不同工艺参数条件下的搅拌摩擦焊焊接结构宏观变形进行了测量和分析，在优化参数条件下，研究了动态控制低应力无变形焊接技术搅拌摩擦焊焊接结构宏观变形及残余应力的影响。研究表明，减小搅拌头轴肩直径、降低焊接热输入有助于减小结构宏观变形；动态控制低应力无变形焊接技术有助于减小接头残余应力，但是对结构宏观变形的作用不是很明显。

关键词：搅拌摩擦焊；残余应力；动态控制低应力无变形

中图分类号：TG 453 文献标识码：A 文章编号：0253-360X(2005)11-79-04

柴 鹏



0 序 言

焊接接头的残余应力一直是焊接结构完整性评定的重要方面，对结构变形、疲劳寿命、抗腐蚀性能等均有比较大的影响^[1]。焊接接头的残余应力首先是由于焊接过程中对零件的不均匀加热造成的^[2]。搅拌摩擦焊是一种固相连接技术，焊接区域的最高温度仅为材料熔点的 0.8^[3]。因此，搅拌摩擦焊接头中的残余应力水平大大低于熔焊接头。Sutton^[4]等人研究了 2024-T3 铝合金搅拌摩擦焊接头的残余应力分布及微观组织形貌，认为搅拌摩擦焊接头的残余应力分布是不对称的，且前进侧应力水平高于后退侧。Donne^[5]等人研究了残余应力对搅拌摩擦焊接头疲劳裂纹扩展速率的影响，认为，忽略残余应力的作用，会产生对搅拌摩擦焊接头疲劳裂纹扩展行为不安全的评估。

为解决薄壳结构变形问题，关桥等早在 1987 年就开发了薄板构件低应力无变形焊接方法及其装置，并申请了专利^[6]；1993 年关桥等又开发了动态控制低应力无变形 (DC-LSND) 焊接方法及其装置。

作者利用简易的动态控制低应力无变形焊接装置，研究了其对搅拌摩擦焊接头残余应力水平及分布的影响。

1 试验方法

试验材料为 LF5 铝合金，厚度 3 mm，试件尺寸为 600 mm × 150 mm，两两对接。搅拌摩擦焊焊接过

程中的低应力无变形动态控制原理见图 1。焊接过程中，在搅拌头后方采用热沉喷管（喷射水雾）对焊缝形成动态冷却。所有试验均在中国搅拌摩擦焊中心的悬臂式搅拌摩擦焊设备 DB-FSW-1 上进行。

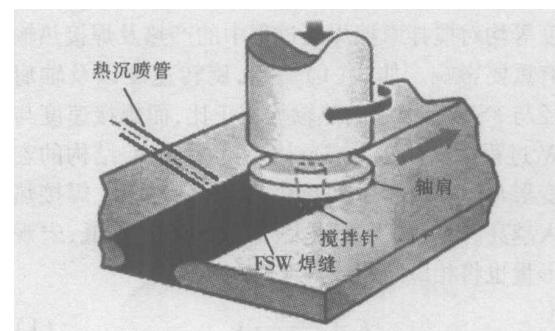


图 1 FSW 过程中的 DC-LSND 控制

Fig. 1 Dynamic control of LSND in FSW

试验分为几个步骤，首先对不同工艺参数条件下的宏观变形进行测量（图 2），并优化焊接参数；然后比较施加与不施加动态控制低应力无变形两种条件下的变形量，分析在搅拌摩擦焊接过程中采用动态控制低应力无变形技术的可能性；最后比较两种条件下的接头残余应力分布。

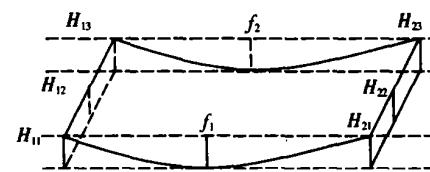


图 2 宏观变形量的测量

Fig. 2 Measurement of FSW distortion

2 试验结果及讨论

2.1 不同工艺参数条件下的宏观变形分析

如表 1 所示, 对不同搅拌头(轴肩直径)、不同参数条件下的宏观变形量的对比表明, 小直径($d=10\text{ mm}$)搅拌头作用下的结构宏观变形($H_{m\text{ax}}$ 和 f_{max} 分别为最大弯曲变形量和最大挠度)明显小于大直径($d=13\text{ mm}$)搅拌头作用下的结构宏观变形; 而同种搅拌头条件下, 旋转速度 ω 与焊接速度 v 的匹配对结构宏观变形的影响也比较明显。

表 1 不同搅拌头、不同参数条件下的宏观变形量

Table 1 Distortion under different tools and parameters

序号	轴肩直径 d/mm	旋转速度 ω 焊接速度 v	变形方式	最大弯曲变形量 $H_{m\text{ax}}/\text{mm}$	最大挠度 f_{max}/mm
1	10	6.7	面弯	9.5	8
2		3.3	面弯	2.4	0.8
3	13	6.7	背弯	9.6	8.5
4		3.3	面弯	13.2	11.5

这是由于搅拌头轴肩直径以及旋转速度、焊接速度等均对搅拌摩擦焊接过程中的产热及焊接热输入有重要影响。如式(1)所示, 旋转速度以及轴肩直径与 FSW 过程中的热输入成正比, 而焊接速度与 FSW 过程中的热输入成反比。可见, FSW 结构的宏观变形与焊接过程中的热输入有密切关系, 焊接热输入越高, 宏观变形量越大; 焊接热输入降低, 宏观变形量也将相应减小。

$$E = \frac{\omega \cdot d}{v} \cdot \kappa \quad (1)$$

式中: E 为 FSW 过程中的焊接热输入; κ 为与 FSW 过程相关的能量系数。

由此分析, 采用 DC - LSDN 技术动态控制 FSW 过程中的焊接热输入有可能达到控制结构变形效果。

2.2 随焊冷却对结构宏观变形量的影响

在工艺优化基础上, 选择了两种冷却方式(气冷和水雾冷却, 所谓水雾冷却实际上是水-气混合冷却, 利用压缩空气将一定量的水雾化后喷射到工件上进行焊接过程中的动态冷却, 以提高焊接过程中的散热能力并防止大水流对焊接环境的污染)来实施 DC - LSDN 控制技术, 并对两种冷却方式作用下的 FSW 结构变形进行了测量。

如表 2 所示, 水雾冷却效果明显优于气冷效果, 尤其是对于平均弯曲变形量(H_{1a} 和 H_{2a}); 但是两种冷却方式下挠度的变化不是很明显。相对于不采取

任何冷却措施的结构变形, 水雾冷却的弯曲变形量有了明显降低, 但是挠度值却提高了很多。因此, 从宏观变形角度考虑, 尚无法判断水雾冷却是否能够有效降低 FSW 结构的焊接变形。

表 2 不同冷却方式下的宏观变形量

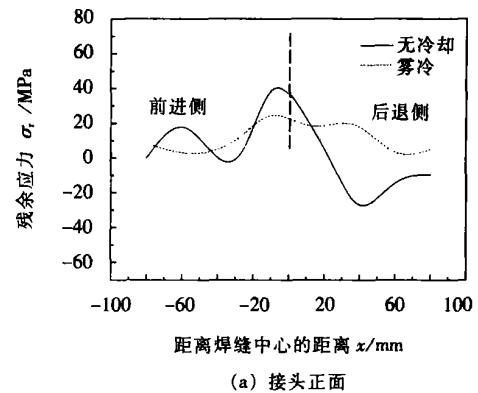
Table 2 Distortion under different cooling methods

序号	轴肩直径 d/mm	冷却方式	平均弯曲变形单量 H_{1a}/mm	平均弯曲变形单量 H_{2a}/mm	平均挠度 f_a/mm
1	10	气冷	2.1	4.2	3.6
2		雾冷却	0.7	0.4	3.3

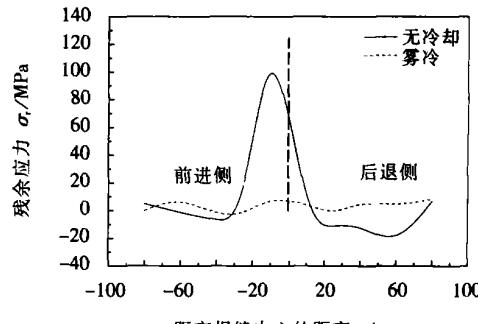
这主要是由于相对于熔焊、FSW 过程中不仅存在热的作用, 也存在着比较强烈的力的作用。因此, FSW 过程中的焊接变形也有两方面的原因, 热作用和力作用。从而控制 FSW 结构的焊接变形也应从两个方面去考虑, 而不是单独采用动态冷却方式去控制。

2.3 FSW 接头残余应力分析

图 3 为优选搅拌头、优选参数条件下, 采用 DC - LSDN 技术(水雾冷却)与不采用 DC - LSDN 技术(无冷却)的 FSW 接头正面(A)、背面(B)的残余应



(a) 接头正面



(b) 接头背面

图 3 不同条件下 FSW 接头的残余应力分布
Fig. 3 Distribution of residual stress for different parameters

力分布对比。由图中可以看出, FSW 接头的残余应力水平比较低(约为母材强度 310 MPa 的 $1/3$), 这是由于 FSW 技术是一种固态焊接过程, 焊接过程中的热输入比较低。

比较前进侧(旋转方向与焊接方向相同的那一侧)与后退侧(旋转方向与焊接方向相反的那一侧)的应力水平及分布可以发现, FSW 接头的残余应力分布具有明显的非对称性, 前进侧的残余应力水平明显高于后退侧的残余应力水平, 这一结果与 Sutbn 等人的研究结果是一致的。这也表明 FSW 焊接本身是一个非对称过程。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 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高、后退侧应力水平低。

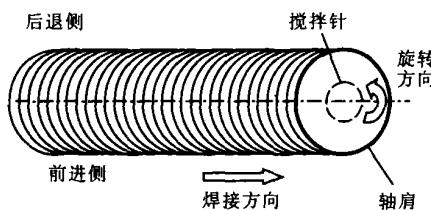


图 4 FSW 焊接过程

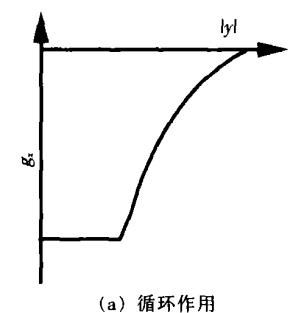
Fig. 4 Friction stir welding process

Terasaki^[7]等人的研究表明, FSW 焊接过程中力的作用(图 5b)抵消了一部分热的作用(图 5a), 从而造成 FSW 焊接过程中的残余应力水平低于一般熔焊的应力水平(图 5c)。并且由于接头正面有轴肩的作用, 因而力的作用比接头背面更强烈, 从而造成接头正面的残余应力水平远小于接头背面的残余应力水平。

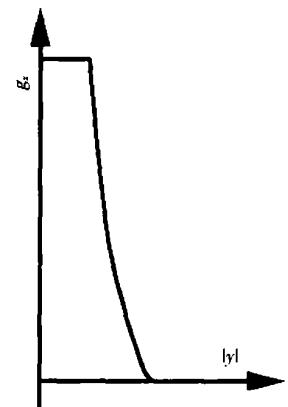
另外, 从图 5 中也可以发现, 残余应力峰值出现在前进侧距焊缝中心约 10 mm 的位置。根据前文的参数优化结果, 试验中用于残余应力测量的 FSW 试件所采用的搅拌头直径为 10 mm。因此, 残余应力峰值不在搅拌头的直接作用区内。这一现象也表明, FSW 过程中力的作用对接头残余应力水平及分布具有重要影响。在 FSW 技术中采用应力、变形控制措施时, 有必要考虑 FSW 过程中力的作用。

对比不同冷却条件下 FSW 接头的残余应力分

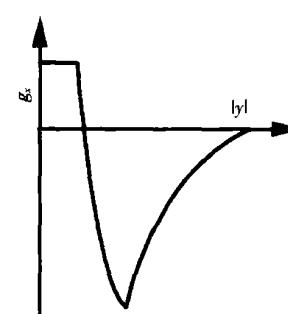
布可以发现, DC - LSDN 技术对 FSW 接头残余应力水平及其分布的影响比较明显, 尤其是对接头背面的残余应力水平及其分布。采用 DC - LSDN 技术后, 应力峰值下降到 20 MPa 以下。因此, DC - LSDN 技术可以有效控制 FSW 结构中的残余应力水平及其分布。



(a) 循环作用



(b) 焊接压力作用



(c) 热-力耦合作用

图 5 FSW 接头内部应变产生的原因

Fig. 5 Mechanism of internal strain in FSW joints

3 结 论

(1) 搅拌头、搅拌摩擦焊接参数对结构宏观变形有比较大的影响, 因而可以通过搅拌头优化、工艺参数优化等方式在一定程度上控制 FSW 结构的焊接变形。

(2) FSW 技术无法完全消除结构的焊接变形和残余应力,采用 DC - LSDN 技术可以进一步有效控制 FSW 结构的焊接变形以及残余应力水平(可以降低 50%以上的残余应力)。

(3) FSW 接头中的残余应力与残余塑性应变分布具有明显的非对称性,这一点也表明 FSW 技术具有工艺不对称性。

(4) FSW 接头正面与背面的残余应力水平有较大差异,并且残余应力峰值不在搅拌头的直接作用范围之内,这些现象均是由于 FSW 过程中力的作用的存在造成的。

参考文献:

- [1] 关桥. 焊接手册(第 3 卷)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001
- [2] Bagshaw N, O'Klen E, Bertaso D. Numerical simulation and experimental validation of low stress no distortion (LSND) welding

in 304 stainless steel[J]. TWI Report 2003.

- [3] Xu S. Microstructure analysis and solid mechanics modeling of friction stir welding[D]. PhD, University of South Carolina USA 2003
- [4] Sutton M A, Reynolds A P, Wang D Q, et al. A study of residual stresses and microstructure in 2024-T3 aluminum friction stir butt welds[J]. Journal of Engineering Materials and Technology 2002 124: 215 - 221
- [5] Donne Dalle G, Biallas G, Ghidini T, et al. Effect of weld imperfections and residual stresses on the fatigue crack propagation in friction stir welded joints[A]. Gothenburg 2nd International Symposium on Friction Stir Welding[C], Sweden 2000 26 - 28
- [6] 关桥, 郭德伦, 李从卿, 等. 薄壁构件低应力无变形焊接法及设备[P]. 中国专利: 87100959.5 1987-02-28
- [7] Terasaki T, Akiyama T. Mechanical behaviour of joints in FSW residual stress inherent strain and heat input generated by friction stir welding[J]. Welding in the World 2003 47(11/12): 24 - 31

作者简介: 柴鹏,男,1976年5月出生,工学硕士,工程师。主要从事搅拌摩擦焊接技术研究,发表论文5篇。

E-mail: chaireneng@cfswt.com; cphank@sina.com

was low, changing rotation speed did not change tensile strength; with high welding speed, higher rotation speed was bad for tensile strength. When welding speed and rotation speed were both low, the mechanical properties of joints welded with non-threaded tool are better than those with threaded tool; increasing welding speed and rotation speed did not influence tensile strength.

Key words: FSW; aluminum; process parameter; mechanical properties of the joint

Spatial distribution features of weld defects in complex structure

SHI Duan-hu, GANG Tie, YUAN Yuan (State Key Lab of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). p71 - 74

Abstract: X-ray real time imaging method was adopted to nondestructively test the complex structure welding parts of titanium alloys, the spatial position of tiny flaws was determined based on the line profile distribution of flaws position, and a formula which could calculate the burial depth of flaws was obtained. According to the characteristic of abnormal peak and abnormal slant-concave flaw, an automatic extraction algorithm of projection distance was presented individually. Experimental results showed that the above algorithm can figure out the projection distance very well and can determine the spatial distribution features of the flaws.

Key words: titanium alloy laser welding; ray detection; tiny flaw; line profile; spatial distribution features

Simulation of the influence of scan path on temperature field in the welding rapid prototyping

HU Rong-hua, ZHANG Hua, XU Jian-nings, WAN Ling-na (Mechanical and Electronic School, Nanchang University, Nanchang 330029, China). p75 - 78

Abstract: The part fabricated by welding rapid prototyping has excellent mechanics capability, so welding prototyping will be widely applied in the future. But welding is a processing of local high temperature, the distribution of temperature field will affect the quality and performance of welding part. In this paper, one-layer depositing of thin-wall part was studied. Numerical simulation was done by ANSYS, and the influences of scan path on temperature field and stress field were analyzed. This study will offer theoretical foundation to accurately choose the scan path in the welding rapid prototyping.

Key words: rapid prototyping based welding; scan path; temperature field; simulation

Distribution and control of residual stresses in FSW joints

Peng, LUAN Guo-hong, GUO De-lun, LI Ju (Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China). p79 - 82

Abstract: Deformation of FSW structures welded with different parameters and tools was measured and analyzed in this paper. Results showed that smaller tool shoulder and lower welding energy would reduce the deformation. With optimized welding parameters, dynamic control of welding deformation (DC-LSND) which was usually used in TIG was introduced to FSW, and its effects on structure deformation and residual stresses were also studied.

Key words: friction stir welding, residual stress, dynamic control

Preliminary study on friction stir welding of titanium alloy

LUAN Guo-hong, CHAI Peng, SUN Chengbin (P. O. Box 340, China FSW Center, Beijing 100024, China). p83 - 88

Abstract: According to the analysis of the thermophysical characteristics of several conventional titanicium alloys, friction stir weldability of titanium alloy had been discussed in this paper. According to the features of Ti alloy, the pin tool, welding anvil and protecting device were designed and applied for the friction stir welding of Ti alloy. By observation of the weld appearances and microstructures of the joint, as well as the mechanical property testing, the results showed that Ti-6Al-4V alloy can be successfully welded by FSW, and tensile strength of the joint can reach up to 90% of the base metal. With optimization of the welding parameter, procedure, pin tool profile and material, the property and performance of FSW of Ti alloy shall be unproved.

Key words: friction stir welding; titanium alloy; weldability

Microstructures and phase composition of QCr0.8/1Cr21Ni5Ti joint by EBW with focus on steel side

ZHANG Bing-gang, HE Jing-shan, WU Lin, FENG Ji-cai (State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). p89 - 92

Abstract: Electron beam welding experiments of QCr0.8/1Cr21Ni5Ti dissimilar butt joint were carried out. The microstructures, elements distribution and phase composition of the joint were investigated by means of Optical Micrography, EPMA, EDX and XRD. The results showed that the microstructure of joint mostly consists of phase $\alpha + \epsilon$, and phase α was quantitatively more than phase ϵ . A few of Cu (ss. Fe) phase formed only in top weld near to copper side and any brittle phase was not generated in the whole weld. The microstructures and bonding