

超声振动对 6061-T4 铝合金搅拌摩擦焊接头组织和性能的影响

刘小超, 武传松

(山东大学 材料液固结构演变与加工教育部重点实验室, 济南 250061)

摘 要: 利用自主研制的试验装置, 通过工具头将超声振动能量施加在搅拌头前方的待焊工件上, 研究了超声振动能量对减少焊接缺陷、改善搅拌摩擦焊接头组织和力学性能的影响。对 6 mm 厚度 6061-T4 铝合金板进行了超声振动强化搅拌摩擦焊工艺试验, 并与相同工艺条件下的常规搅拌摩擦焊进行了对比。结果表明, 超声振动能够减小焊速/转速比较大时的焊缝内部隧道型缺陷, 增大材料对接混合区宽度和焊核区体积, 细化焊核区和热力影响区微观组织, 提高接头抗拉强度和焊核区显微硬度。

关键词: 超声振动; 搅拌摩擦焊; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG456.9 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2014)01-0049-05

0 序 言

搅拌摩擦焊(FSW)作为一种新型固相连接技术, 具有接头质量高、焊接变形小、环境友好等优点, 但是搅拌摩擦焊的大规模应用仍然受到焊接速度低和搅拌头易磨损等问题的制约。随着人们对搅拌摩擦焊技术的认识越来越深入, 一些新技术正被逐渐用来解决传统搅拌摩擦焊焊接面临的这些问题。超声能量具有软化金属的作用^[1], 已经广泛应用于金属塑性加工工艺中, 如挤压、拉拔等。贺地求等人^[2-4]将搅拌头与超声的换能器变幅杆连为一体, 对搅拌头施加轴向(纵向)的超声振动, 研究了超声复合搅拌摩擦焊接头的组织与性能。Park 等人^[5]通过一对滚动轴承将超声振动施加于搅拌头侧面, 使搅拌头具有横向的超声振动, 并研究了搅拌头横向超声振动对铝合金和钢的搅拌摩擦焊接的影响。然而由于搅拌头的刚性和旋转, 无论是轴向还是横向的超声

振动都会受到一定的制约。Liu 等人^[6]提出了超声振动强化搅拌摩擦焊工艺(UVeFSW), 它利用超声波的定向发射特性, 使超声工具头与待焊工件直接接触, 从而将超声振动的能量导入搅拌头前方的待焊区域, 以软化焊接区材料, 增强材料的塑性流动性。文中通过开展超声强化搅拌摩擦焊和常规搅拌摩擦焊的对比试验, 分析了超声振动对焊缝横截面纹理特征、接头微观组织、接头力学性能和大焊速/转速比(v/ω)情况下焊接缺陷的影响, 初步揭示了超声振动对搅拌摩擦焊过程的影响机制。

1 试验方法

试验采用 6 mm 厚的 6061-T4 铝合金板分别进行常规搅拌摩擦焊和超声振动强化搅拌摩擦焊试验。6061-T4 铝合金化学成分如表 1 所示, 母材的抗拉强度 252 MPa, 断后伸出长度 17.12%, 显微硬度

表 1 6061-T4 铝合金化学成分(质量分数, %)

Table 1 Nominal compositions of aluminum alloy 6061-T4

Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Al
0.04~0.35	0.15~0.40	≤0.7	0.8~1.2	≤0.15	0.40~0.8	≤0.15	≤0.25	余量

约 784~833 MPa。

试板规格为 200 mm×60 mm×6 mm, 焊接方式为对接。焊接前将试板上下表面用砂纸打磨去除氧化膜, 保留对接面上的氧化膜作为标记材料, 用酒精擦洗干净, 然后固定在工作台上进行试验。试验设

收稿日期: 2013-08-30

基金项目: 国家自然科学基金委员会中德科学中心资助项目(GZ 739)

备采用 FSW-3LM-3012 搅拌摩擦焊机和自主设计的辅加超声振动的装置,如图 1 所示. 超声振动系统包含超声波发生器、换能器、变幅杆及工具头,系统的工作频率为 20 kHz;空载时换能器、变幅杆和工具头均达到共振状态,负载时系统以换能器一端为支点,驱动材料做受迫超声振动.

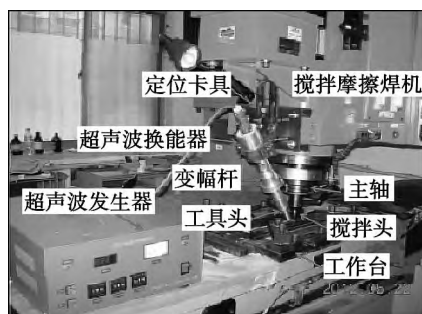


图 1 试验装置

Fig. 1 Experimental system

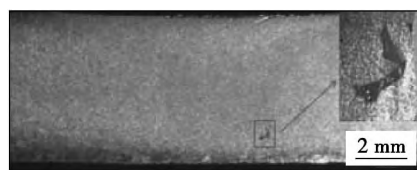
试验选用的搅拌头轴肩直径 15 mm,搅拌针为圆台形,锥角 15° ,表面带有螺纹,针长度 5.75 mm. 焊接时轴肩倾角约 2.5° ,轴肩下压量 0.05 mm. 搅拌头旋转频率采用 600 r/min 和 800 r/min,焊接速度 100 ~ 250 mm/min. 工艺试验结束后,在垂直于焊接方向上取样进行焊缝截面形貌观察,金相分析以及力学性能测试. 金相试样采用 0.5% HF 溶液和 Keller 试剂(3 mL 硝酸 + 6 mL 盐酸 + 6 mL 氢氟酸 + 150 mL 水)进行腐蚀,然后分别在立体显微镜(Stemi DV4)和金相显微镜(XJP-6A)下观察焊缝截面宏观形貌、横截面纹理特征和接头微观组织,在电子万能试验机(CMT5105 型)上进行拉伸测试,最后利用显微硬度计(HXD-1000C 型)分别在距离焊缝上表面 1、3 和 5 mm 位置处测量焊缝各个区域的显微硬度分布(载荷 1 N,保持时间 10 s).

2 结果与讨论

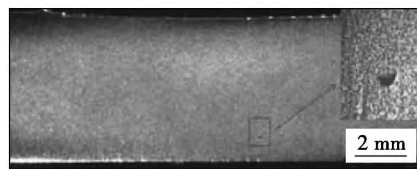
2.1 比值 v/ω 较大时焊缝内部隧道型缺陷分析

搅拌摩擦焊焊接速度(v)过快或搅拌头旋转频率(ω)过低时,会在前进侧焊核区和热力影响区交界处形成隧道型缺陷,如图 2 所示. 一般认为这种情况下产生隧道型缺陷的原因是:搅拌头旋转频率的减小或焊接速度的增大导致焊接时焊缝中热输入不足,造成塑性状态的材料体积减小. 在搅拌摩擦焊接过程中,搅拌头不断地将塑性材料从前进侧转移到后退侧,由于塑性材料的流动性变差,前进侧材料转移后留下的空腔未能被来自后退侧的塑性材料

及时填充,从而导致此区域内材料体积减少,最终在此处留下隧道型缺陷.



(a) 常规搅拌摩擦焊



(b) 超声强化搅拌摩擦焊

图 2 焊缝内部隧道型缺陷(600 r/min, 250 mm/min)

Fig. 2 Weld internal tunnel defect

从图 2 中可以看出,相同焊接工艺参数时,与常规搅拌摩擦焊相比,超声强化搅拌摩擦焊焊缝内部隧道型缺陷明显减小. 这表明辅加超声振动后,在最易发生隧道型缺陷的前进侧周围,材料的塑性流动性增加或发生塑性流动的材料体积增大,有利于减小或消除隧道型缺陷.

2.2 焊缝横截面纹理特征分析

在搅拌摩擦对接焊过程中,搅拌针经过后,前进侧材料和后退侧材料之间的平整对接面变成一个严重变形且形状复杂的焊合面^[7]. 变形的复杂程度与焊接参数(焊接速度、主轴旋转频率等)相关,并且焊接速度越低,或主轴旋转频率越高,前进侧材料和后退侧材料的混合就越充分,焊合面也就越复杂. 如图 3 所示,由于焊前对接面氧化膜的存在,在用 Keller 试剂腐蚀之后,焊合面呈现出一条衬度与周围明显不同的灰色线条. 线条所占焊缝横截面的宽度可定义为材料对接混合区宽度. 通过精确测量发现,常规搅拌摩擦焊在主轴旋转频率 600 r/min,焊接速度 180 mm/min 的工艺参数下,材料对接混合区宽度仅 2.84 mm(图 3a),而超声强化搅拌摩擦焊在相同焊接参数下,材料对接混合区宽度达到了 5.55 mm(图 3b). 这表明超声振动在搅拌摩擦焊中有着与提高主轴旋转频率或降低焊接速度相同的功效,即增强了材料的塑性流动.

在焊缝前进侧,由于焊核区与热力影响区材料的塑性流动状态存在着明显差别,因此其图像衬度也明显不同,如图 3 所示,焊核区与热力影响区的分界面十分清晰. 焊核区可认为是由搅拌针搅动区和轴肩搅动区两部分组成. 分别作这两个部分与热力

影响区分界面的切线,并测得其与水平面的夹角。在搅拌针搅动区,由于搅拌针锥角 15° ,因此该处切线与水平面的夹角理论上应不超过 75° ,实际测量的值常规搅拌摩擦焊为 71.5° ,超声强化搅拌摩擦焊为 69° ,这表明在相同条件下,超声强化搅拌摩擦焊搅拌针搅动区比常规搅拌摩擦焊要大。在轴肩搅动区,常规搅拌摩擦焊中测得的分界面切线与水平面的夹角为 37.5° ,而超声强化搅拌摩擦焊仅 34° ,说明与常规搅拌摩擦焊相比,超声强化搅拌摩擦焊的轴肩搅动区更加平坦宽泛,相应的体积也就更大。

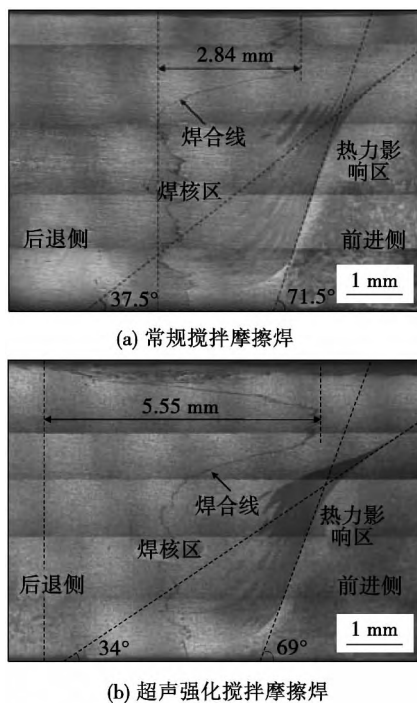


图3 焊缝横截面纹理(600 r/min, 180 mm/min)

Fig. 3 Texture patterns on transverse cross-section

2.3 焊接接头微观组织分析

根据晶粒组织和沉淀相的微观结构特点,铝合金搅拌摩擦焊的焊接接头从中心向两侧可以依次分为四个区域:即焊核区(WNZ)、热力影响区(TMAZ)、热影响区(HAZ)和母材区(BMZ)。

常规搅拌摩擦焊和超声强化搅拌摩擦焊在相同焊接参数下相应位置处的金相微观组织如图4所示。图4a、b展示了母材区的微观组织,可以看出超声振动对母材区的晶粒尺寸几乎没有影响(晶粒大小约 $50\ \mu\text{m}$)。热影响区在焊接过程中经历了一个热循环,但是没有发生任何塑性变形,因此和母材区相比晶粒发生明显粗化,其晶粒尺寸大约 $100\ \mu\text{m}$,如图4c、d所示。对比可以看出超声振动对热影响区晶粒大小也无明显影响。这意味着试验条件下超

声振动的热作用对母材区和热影响区的影响可以忽略不计。

焊核区由于受到搅拌头强烈的机械搅拌而发生连续的动态再结晶现象^[8,9]。最终的晶粒尺寸可由以下公式^[10]来模拟表征,即

$$D = C_1 \varepsilon^k \dot{\varepsilon}^j D_0^h \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

式中: D 表示发生连续动态回复再结晶现象后的平均晶粒尺寸; ε 表示等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}$ 表示应变速率; D_0 表示原始晶粒尺寸; Q 表示材料连续再结晶活化能; R 表示气体常数; T 表示热力学温度; C_1 、 k 、 j 和 h 均是材料属性相关的常数。这个模型局部地考虑了温度、应变量和应变速率对晶粒尺寸的影响。图4e、f展示了焊核区的微观组织结构,可以看出,焊核区由细小的等轴晶组成。对于常规搅拌摩擦焊,晶粒尺寸大约 $4 \sim 6\ \mu\text{m}$,而超声振动强化后,焊核区的等轴晶发生明显细化,约 $2 \sim 4\ \mu\text{m}$ 。这表明超声振动在焊核区连续动态回复再结晶过程中有细化晶粒作用。由于公式中的 k 和 j 都是负数^[10],所以动态回复再结晶后的晶粒尺寸大小与应变量和应变速率呈现负相关关系,即当初始晶粒尺寸一致时,在一定的变形温度下,应变量和应变速率越高,最终的晶粒尺寸就越小。在超声辅助的作用下,材料的变形应力(超声振动的弹性应力与搅拌头的搅拌应力的叠加)增加,同时应变速率也相应的增大,因此晶粒得到细化。

图4g、h展示了热力影响区的晶粒组织。对比可以看出,超声振动强化搅拌摩擦焊焊缝热力影响区的晶粒组织也得到细化,而且更加均匀。晶粒尺寸约 $10 \sim 15\ \mu\text{m}$,而在没有超声的条件下,晶粒尺寸约 $15 \sim 20\ \mu\text{m}$ 。这表明超声振动对热力影响区的微观组织结构也有有益的影响。热力影响区发生部分的塑性变形和动态回复,最终的晶粒尺寸取决于原始晶粒的变形程度,因此可以推断超声振动增强了热力影响区的塑性变形程度。

综上所述,超声振动在焊核区和热力影响区起到了细化晶粒、增强材料塑性流动的作用,而在母材区和热影响区,则无明显影响。

2.4 焊接接头力学性能分析

接头抗拉强度及其断后伸出长度是评价焊接接头力学性能的一个重要指标。试验测得在焊接参数600 r/min、180 mm/min条件下,常规搅拌摩擦焊接头平均抗拉强度199.87 MPa,达到母材的79%,平均断后伸出长度约10%。超声强化搅拌摩擦焊接头平均抗拉强度高达211.24 MPa,达到了母材的84%,平均断后伸出长度12.04%。拉伸试样外观和

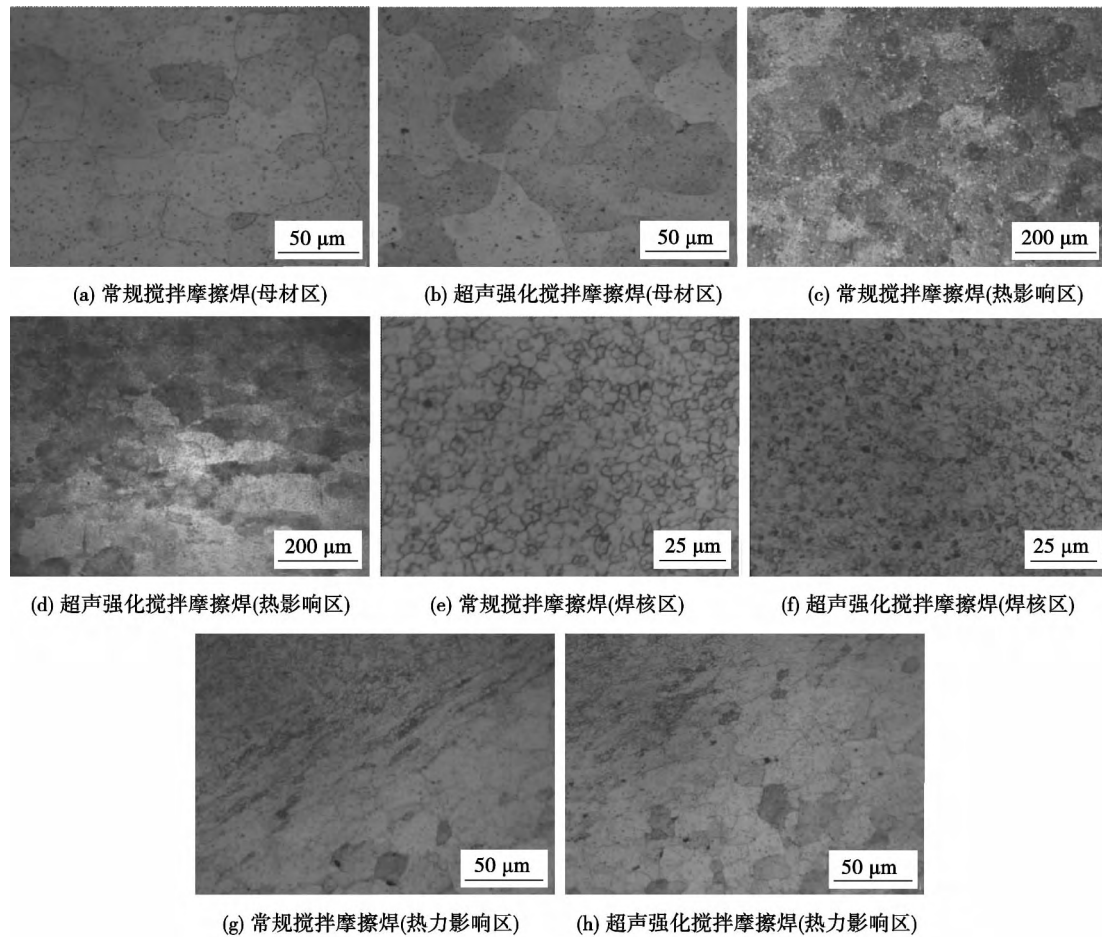


图 4 焊接接头微观组织(800 r/min, 100 mm/min)

Fig. 4 Microstructure of weld joint

拉伸试验数据分别见图 5 和表 2。可以看出超声振动强化搅拌摩擦焊的接头抗拉强度及断后伸出长度都有所升高。

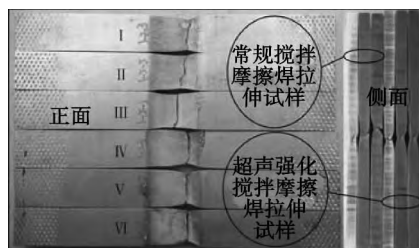


图 5 拉伸试样

Fig. 5 Morphology of tensile samples

焊接接头的显微硬度是衡量其综合力学性能的又一个重要指标。图 6 分别展示了焊接参数 600 r/min、180 mm/min 条件下距离焊缝上表面 1、3、5 mm 位置处的显微硬度分布。从图 6a 可以看出,在焊接接头上部区域,接头硬度分布呈现“W”型,即焊核区显微硬度稍高,从焊核区到热影响区显微硬

表 2 拉伸试验数据

Table 2 Detailed data of tensile test

	抗拉强度 R_m /MPa			断后伸长率 A (%)		
	I	II	III	I	II	III
无超声	203.86	197.44	198.31	10.58	10.14	9.28
均值	199.87			10.00		
有超声	208.67	210.78	214.27	12.44	11.63	12.05
均值	211.24			12.04		

度逐渐降至最低,再向外到母材区显微硬度又重新升高。对比有无超声振动下的显微硬度分布可以发现,超声强化搅拌摩擦焊焊接接头的焊核区至热影响区的显微硬度都明显高于常规搅拌摩擦焊。在热影响区和母材区的过渡区,二者显微硬度回升的趋势基本一致。在母材区,施加过超声振动的母材显微硬度略有升高。从图 6b 中可以看出,在焊接接头中部区域,显微硬度分布趋势与上部一致,区别在于焊核区和热影响区都变窄,而且显微硬度的最低值出现在前进侧热影响区。在焊接接头下部区域,显

微硬度分布与中上部明显不同, 接头硬度分布呈现出“V”型, 如图 6c 所示。显微硬度的最低值出现在焊缝中心, 从中心向两侧逐渐升高至母材平均水平。

需要指出的是, 在焊接接头下部区域, 超声强化搅拌摩擦焊的接头显微硬度均低于相同位置处常规搅拌摩擦焊的接头显微硬度, 即在焊接接头底部, 由于焊

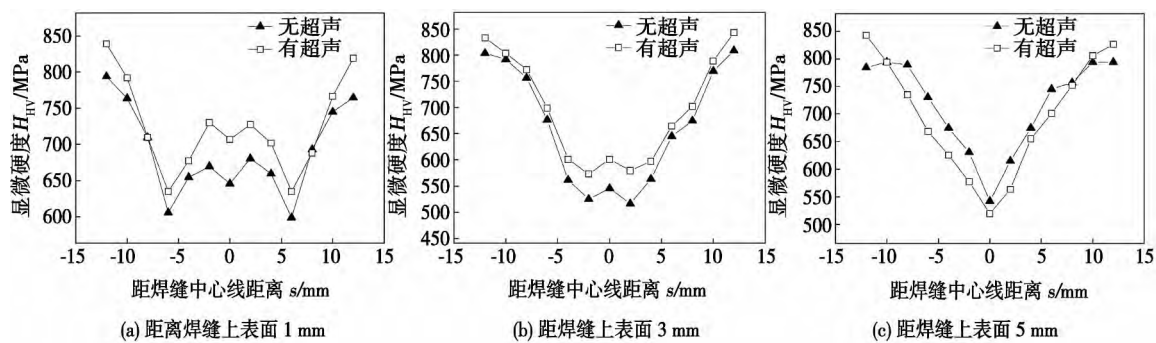


图 6 焊接接头显微硬度分布

Fig. 6 Distribution of microhardness in weld joint

接热循环而软化的区域变宽。

3 结 论

(1) 超声振动能够减小因焊接速度过高或者主轴旋转频率过低引起的焊缝内部隧道型缺陷。

(2) 超声振动增强了前进侧材料和后退侧材料的混合程度, 增大了材料对接混合区宽度, 亦增大了焊核区的体积。

(3) 超声振动能够细化焊核区晶粒组织, 细化和均匀热力影响区的晶粒组织。

(4) 超声振动能够改善焊缝力学性能, 提高了接头抗拉强度和断后伸出长度, 也提高了搅拌摩擦焊接接头中上部区域焊核区至热影响区的显微硬度, 而在焊接接头底部, 超声振动的施加使得因受热而软化的区域增大。

参考文献:

- [1] Langenecker B. Effects of ultrasound on deformation characteristics of metals[J]. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, 1966, 13(1): 1-8.
- [2] 贺地求, 李 剑, 李东辉, 等. 铝合金超声搅拌复合焊接[J]. 焊接学报, 2011, 32(12): 70-72.
He Diqu, Li Jian, Li Donghui, et al. Study on ultrasonic stir hybrid welding of aluminium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(12): 70-72.
- [3] 马慧坤, 贺地求, 刘金书. 超声对不同铝合金搅拌摩擦焊接

头性能的影响[J]. 焊接学报, 2012, 33(1): 6-8.

Ma Huikun, He Diqu, Liu Jinshu. Effects of ultrasonic on properties of joints welded by friction stir welding process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(1): 6-8.

- [4] 马慧坤, 贺地求, 刘金书. LF21 超声搅拌摩擦焊接头组织及性能分析[J]. 焊接学报, 2012, 33(9): 21-23.
Ma Huikun, He Diqu, Liu Jinshu. Ultrasonic friction stir welding of LF21 aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(9): 21-23.
- [5] Park K. Development and analysis of ultrasonic assisted friction stir welding process[D]. Ph. D. Thesis, The University of Michigan, 2009.
- [6] Liu X C, Wu C S, Zhang H T, et al. Effect of ultrasonic vibration on the friction stir weld quality of aluminium alloy[J]. China Welding, 2013, 22(3): 12-17.
- [7] Xu S, Deng X. A study of texture patterns in friction stir welds[J]. Acta Materialia, 2008, 56(6): 1326-1341.
- [8] Jata K V, Semiatin S L. Continuous dynamic recrystallization during friction stir welding of high strength aluminum alloys[J]. Scripta Materialia, 2000, 43: 743-749.
- [9] Su J Q, Nelson T W, Mishra R, et al. Microstructural investigation of friction stir welded 7050-T651 aluminium[J]. Acta Materialia, 2003, 51(3): 713-729.
- [10] Lenard J G, Pietrzyk M, Cser L. Mathematical and physical simulation of the properties of hot rolled products[M]. Oxford: Elsevier, 1999.

作者简介: 刘小超, 男, 1990 年出生, 硕士研究生. 主要从事超声振动强化搅拌摩擦焊方面的科研工作. 发表论文 3 篇. Email: lc4467@qq.com

通讯作者: 武传松, 教授, 博士生导师. Email: wucs@sdu.edu.cn

pp 37 – 40

Abstract: Tungsten inert gas (TIG) welding of 12 mm thick 5083 aluminum alloy plates was conducted using ER5356 filler wire. The results show that the microstructure in the weld, consisting of α -Al matrix and β -Al₃Mg₂ eutectic phase, was fine and homogeneous. The microstructure in the HAZ was slightly coarsened compared with the microstructure in the weld, and the microstructure in the base metal was fibrous along the rolling direction. The tensile strength of welded joints was over 90% of that of 5083 base metal. The welded joint had high strength and ductility, with good resistance to cold bending, fulfilling the standards of American bureau of shipping (ABS) and China classification society (CCS).

Key words: aluminum welding; TIG welding; microstructure; mechanical property

Characteristics of reaction phases and effects of phases on mechanical properties of TiAl/42CrMo steel brazed joint

LI Yulong^{1,2}, LV Mingyang¹, FENG Jicai², HE Peng² (1. Key Lab for Robot & Welding Automation of Jiangxi Province, Mechanical & Electrical Engineering School, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). pp 41 – 44

Abstract: TiAl alloy and 42CrMo steel were vacuum brazed at temperature of 1 143–1 213 K for 120 s–500 s. The microstructure was analyzed using optical microscope, scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive spectrometer (EDS). The thickness of the reaction layers was measured using an analysis software. The hardness of the reaction layers and phases was tested and compared using nano-indenter and traditional microhardness tester. In order to determine the weak phases or layers, the brazed joints were tensile tested with in-situ observation by SEM. The results show that TiC, AlCuTi, Ti₃Al and AlCu₂Ti phases had higher hardness but the Ag-based solid solution was much softer. The hardness values acquired using the nano-indenter were a little higher than those traditional microhardness tester. The tensile test results revealed that the Al-Cu-Ti ternary layer adjacent to the TiAl substrate was the weakest part. When subjected to tensile load, cracks easily occurred in this zone and resulted in failure.

Key words: TiAl; brazing; reaction phase; nano-indentation

Influence of electrode pressure on Cr12MoV electric-spark depositing YG6 process

GAO Ying^{1,2}, HAN Jinghua^{1,2}, LOU Liyan^{1,2}, LI Huan^{3,4} (1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China; 2. Tianjin key laboratory of high speed cutting and Precision Machining, Tianjin 300222, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 4. Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin 300072, China). pp 45 – 48

Abstract: Electric-spark deposition (ESD) process was developed since the beginning of this century. Because the discharge time is short and the bonding strength of deposition layer

is strong, the ESD process is widely used for materials life extension and surface modification. In this paper, an automatic electric spark deposition system, a high-speed camera and metallurgical analysis technique were used to analyze the process of electric-spark depositing YG6 on Cr12MoV mold steel. The effect of electrode pressure on the deposition surface roughness and deposition rate was analyzed. The optimal electrode pressure parameter (1.6 N) was obtained after a large number of experiments. In the deposition process with 1.6 N electrode pressure, spark discharge occurred mainly with subsidiary short circuit discharge, and the deposition efficiency was high with low surface roughness.

Key words: electric-spark deposition; high speed camera; metallographic; electrode pressure

Effect of ultrasonic vibration on microstructure and mechanical properties of friction stir welded joint of 6061-T4 aluminum alloy

LIU Xiaochao, WU Chuansong (Key Lab for Liquid-Solid Structure Evolution and Materials Processing (Ministry of Education), Shandong University, Jinan 250061, China). pp 49 – 53

Abstract: Utilizing self-designed experimental device to exert ultrasonic vibration on the workpiece in front of the stirring tool, the effect of ultrasonic vibration on reducing weld defects, improving the microstructure and mechanical properties of friction stir welded joint was investigated experimentally. A series of tests on ultrasonic-vibration-enhanced friction stir welding were conducted on 6 mm thick 6061-T4 aluminum alloy sheets. The experimental results were compared with those by conventional friction stir welding under the same welding conditions. The results show that ultrasonic vibration could reduce the tunnel defects caused by a high ratio of welding speed to rotation speed, enlarge the width of mixed zone and the volume of weld nugget, refine the grains in the weld nugget and thermo-mechanical affected zone, and improve the tensile strength of joints and the microhardness in the weld nugget.

Key words: ultrasonic vibration; friction stir welding; microstructure; mechanical property

Application of high order elements in welding thermal elastic-plastic finite element analysis

ZHAO Sheng, CHEN Zhen, LUO Yu (School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China). pp 54 – 58

Abstract: Three dimensional finite element model with different mesh sizes and element orders was established to investigate the effect of high order elements on the deformation in thermal elastic-plastic finite element analysis. The process of CO₂ gas shielded arc welding was simulated by general finite element software ABAQUS. Several conclusions were drawn after comparing the calculation accuracy and time of temperature field and welding deformation between linear element and quadratic element. The results show that quadratic element could better reflect the deformation characteristics in the welded area, and the calculated results were close to the measured ones. The element order had great influence on the stress strain field, but had little