

AZ31/LA141 搅拌摩擦搭接焊工艺及性能研究

张香云¹, 雷朱坦¹, 耿家源¹, 刘刚²

(1.荆州学院 智能制造学院,湖北 荆州 434020;2.南阳理工学院 智能制造学院,河南 南阳 473004)

摘要 借助体视镜、光学显微镜、万能试验机和维氏显微硬度计探究不同旋转速度对AZ31/LA141异种材料搅拌摩擦搭接接头组织、显微硬度和剪切性能的影响。结果表明:当焊接速度为0.1 m/min,旋转速度为1 400~1 800 r/min时,焊缝质量良好,无明显缺陷。同一焊接参数下,上层AZ31和下层LA141的前进侧热影响区晶粒尺寸均大于后退侧,而前进侧热影响区晶粒尺寸的变化趋势小于后退侧。前进侧热影响区晶粒尺寸随旋转速度的增加而增加。当旋转速度增大时,上层AZ31和下层LA141的显微硬度均增大,焊核区的显微硬度最大值为68.2HV。搅拌摩擦搭接接头的拉剪力先增后减,当焊接速度为0.1 m/min,旋转速度为1 600 r/min时,拉剪力达到最大值2 313.5 N。

关键词 AZ31/LA141;搅拌摩擦搭接焊;旋转速度;显微组织;力学性能

中图分类号 TG456.9

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2024)02-0024-05

DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20240229.002

Research on process and performance of AZ31/LA141 friction stir lap welding

ZHANG Xiangyun¹, LEI Zhutan¹, GENG Jiayuan¹, LIU Gang²

(1.School of Intelligent Manufacturing, Jingzhou University, Jingzhou 434020, China;

2.School of Intelligent Manufacturing, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China)

Abstract The effects of different rotation speeds on the microstructure, microhardness and shear properties of friction stir lap joints of AZ31/LA141 dissimilar materials were investigated by stereo, optical microscope, universal testing machine and Vickers microhardness tester. The results show that when the welding speed is 0.1 m/min and the rotation speed is 1 400-1 800 r/min, the weld quality is good and there are no obvious defects. Under the same welding parameters, the grain size of HAZ on the forward side of upper AZ31 and lower LA141 is larger than that on the back side, while the grain size of the heat engine influence zone on the forward side is smaller than that on the back side. The grain size of the heat engine influence zone on the forward side increases with the increase of rotation speed. When the rotation speed increases, the microhardness of upper AZ31 and lower LA141 increases, and the maximum microhardness of the welding core zone is 68.2HV. The tensile shear of the friction stir lap welding joint increases first and then decreases. When the welding speed is 0.1 m/min and the rotation speed is 1 600 r/min, the tensile shear reaches the maximum value of 2 313.5 N.

Keywords AZ31/LA141; friction stir lap welding; rotational speed; microstructure; mechanical property

随着全球对环保和节能的要求越来越高,镁合金因密度低、比强度和比刚度高、减振性好等优点,成为最具潜力的轻量化金属材料之一,被广泛应用于航空航天、汽车、医疗等领域^[1-5],常用于制造仪表盘、控制杆等零部件,镁合金的应用对推动节能减排具有十分重要的意义。近年来,作为一种轻质结构材料的镁合金已受到了众多学者的研究^[6-8],镁合金的可靠连接是其工业应用的重要保障,因此,通过焊接工艺连接镁合金成为必须面对的问题。

由于电弧的高温和镁合金的化学性质活泼,传统的熔化焊易生成粗大组织、夹杂物和气孔。与熔化焊相比,搅拌摩擦焊不存在金属的熔化与凝固,能很好地避免上述缺陷,较好地解决了镁合金等轻质金属用传

统焊接带来的弊端,同时搅拌摩擦焊具有噪音小、加工效率高、清洁无污染等优点,因而在镁合金等轻质合金结构的焊接中具有独特优势。范蒙等^[9]研究了LA103Z双相镁锂合金FSW的焊接性与力学性能,研究表明,LA103Z具有良好的焊接性,焊接后搅拌区无缺陷和裂纹,得益于其优良的塑性,由于相的破碎形成了过饱和固溶体使搅拌区晶粒实现了固溶强化,显微硬度提高。张婧等^[10]用FSW技术进行镁锂合金焊接,指出晶粒尺寸和接头的力学性能随热输入的增加而增大。CAO等^[11]研究了旋转速度对焊接接头力学性能的影响,研究表明,当旋转速度提高时,焊接接头的拉剪强度先增后减。目前,国内外关于镁合金搅拌摩擦焊在不同工艺参数下焊接接头显微组织和力学性能的

收稿日期:2023-07-11;修回日期:2023-12-18

基金项目:国家自然科学基金(51701026);湖北省自然科学基金(2019CFC909);湖北省教育厅科学技术研究计划指导性项目(B2022470);

河南省科技攻关项目(232102230049)

第一作者:张香云,女,硕士,讲师。E-mail:114461196@qq.com。

研究较多^[12-14],但对镁铝合金异种材料搅拌摩擦搭接焊的研究鲜有报道。

因此,为了深入揭示搅拌摩擦搭接焊接头显微组织对力学性能的影响,本文作者用不同旋转速度的搅拌摩擦搭接焊(FSLW)来焊接AZ31/LA141异种金属,并对其接头组织、显微硬度及拉剪性能的影响进行研究,为改善AZ31/LA141异种金属搅拌摩擦搭接焊接头的力学性能提供理论参考。

1 试验材料与方法

试验材料为3 mm轧制态AZ31镁合金和2 mm的LA141镁铝合金商用板材,化学成分如表1所示。用线切割将其加工成60 mm×60 mm的若干试样,然后用金相砂纸对其表面打磨,之后用丙酮清洗表面,吹干,用夹具固定在搅拌摩擦焊机上。焊接速度为0.1 m/min,在旋转速度分别为1 400、1 600、1 800 r/min下进行焊接,以1、2、3#作为其样品的标注。图1为搅拌摩擦搭接焊示意图。AZ31镁合金板在上层,LA141镁铝合金板在下层,焊接方向平行于板材轧制的初始方向,搅拌摩擦搭接焊选用圆锥螺纹搅拌针,搅拌针轴肩直径为15 mm、长度为4.8 mm,焊接倾角为2.5°。

将焊接完毕后的3个样品进行切割,制作成金相样品备用,用不同型号碳化硅金相砂纸打磨,将3个样品分别抛光。用腐蚀液腐蚀,腐蚀液为酒精35 mL、冰醋酸5 mL、水5 mL、苦味酸2.1 g的混合液,用型号为ZSA0850型的体视显微镜和OLYMPUS-BX53M的光学显微镜进行宏观形貌和显微组织观察。用型号为FALCON-500的维氏显微硬度计对垂直焊缝的横截面进行硬度测试,用5 N的加载力,保持10 s,在距上层AZ31上表面1.5 mm和下层LA141下表面1 mm处每间

表1 AZ31和LA141的化学成分

Table 1 Chemical compositions of AZ31 alloy and LA141 alloy

成分	w(AZ31)/%	w(LA141)/%	成分	w(AZ31)/%	w(LA141)/%
Al	2.90	1.00	Si	0.07	—
Zn	0.84	—	Cu	0.01	0.01
Li	—	14.50	Fe	0.01	—
Mn	0.43	0.15	Mg	余量	余量

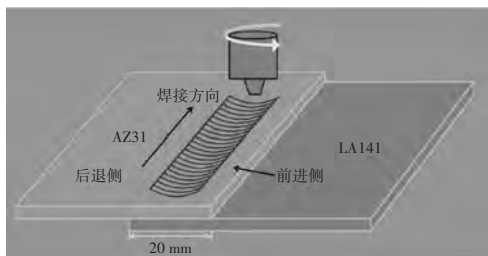


图1 搅拌摩擦搭接焊示意图

Fig.1 Schematic diagram of friction stir lap welding

隔1 mm测试一个点。在搅拌摩擦搭接焊后的1、2、3#样品上用线切割切取试样,图2为剪切拉伸试样示意图。用拉伸速度为0.001 m/min的CMT-5105万能试验机进行拉剪性能测试,1、2、3#样品均进行3次试验,取平均值。

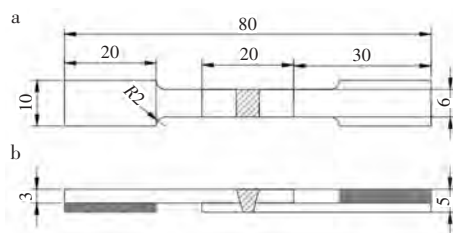


图2 剪切拉伸试样示意图(mm)

Fig.2 Schematic illustration of shear tensile test specimen(mm)

2 结果与分析

2.1 旋转速度对宏观形貌的影响

图3为不同旋转速度下搭接接头横截面宏观形貌图。焊接速度为0.1 m/min,图3a、b、c的旋转速度分别为1 400、1 600、1 800 r/min。上层板材为AZ31,下层板材为LA141。可以看出,不同旋转速度下的1、2、3#样品接头均未发现隧道、孔洞等缺陷,成型质量较好。不同旋转速度下接头的横截面宏观形貌不同,旋转速度为1 400 r/min时,从上层AZ31流到下层LA141的材料最少。当旋转速度为1 600 r/min时,流到下层LA141中的材料变多。当旋转速度为1 800 r/min时,流到下层的材料总量显著增加。其原因是随旋转速度的加快,摩擦生热更多,焊核搅拌区域的温度上升,进

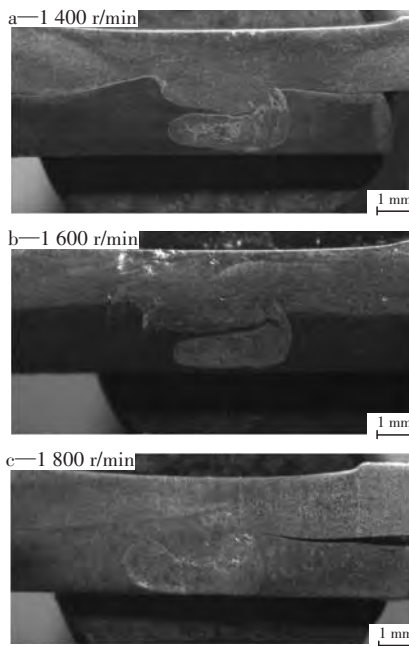


图3 不同旋转速度下接头的横截面宏观形貌

Fig.3 Macroscopic morphologies of cross section of joint at different rotation speeds

而这一区域的塑性流动增加,使得上层AZ31流到下层LA141中的材料越多。

2.2 旋转速度对显微组织的影响

图4为1#样品搭接接头的金相图。图4a为横截面宏观形貌。图4b、c、d、e分别为上层AZ31前进侧热机影响区、后退侧热机影响区、前进侧热影响区和后退侧热影响区的显微组织。由图4b、c可看出,前进侧热机影响区(AS-TMAZ)和后退侧热机影响区(RS-TMAZ)的组织均由部分再结晶的细小晶粒和粗大晶粒构成。图4b比图4c的晶粒分布更均匀且细小,其原因是搅拌摩擦搭接焊时,在搅拌针的旋转作用下,热塑性金属材料从前进侧流动到后退侧,软化状态的热塑性材料起到“润滑”作用,使得后退侧热机影响区(RS-TMAZ)晶粒的变形程度小于前进侧热机影响区(AS-TMAZ),进而AS-TMAZ动态再结晶更充分,晶粒分布更均匀。前进侧流动到后退侧的热塑性材料带来的热量,导致后退侧产生积热现象,同时,由于后退侧受到热循环作用的时间更长,增大了RS-TMAZ晶粒,这与相关研究成果^[15]一致。

由图4d、e可以发现,前进侧的晶粒尺寸更大,这是由于前进侧无论是受到的摩擦阻力还是剪切力均更大,导致AS-HAZ产生了更多的热能,在热循环作用的影响下晶粒变大。

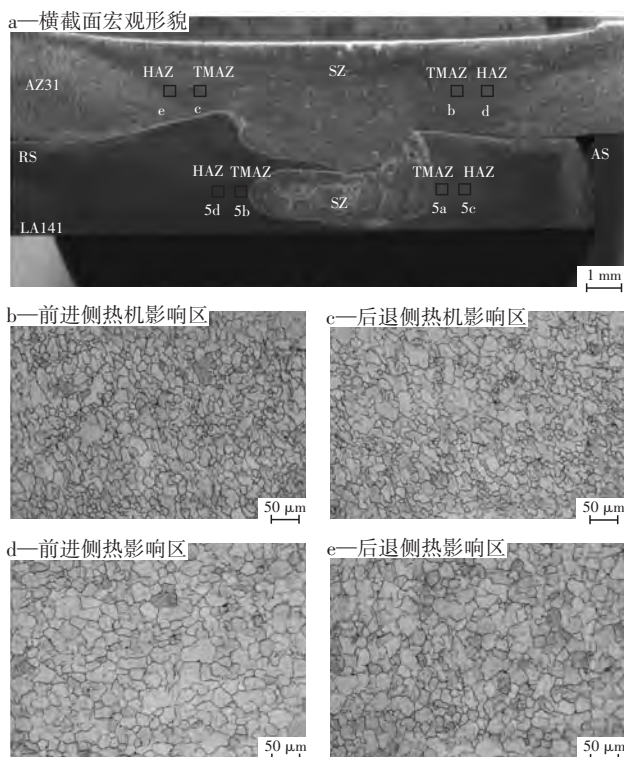


图4 1#样品搭接接头的金相图
Fig.4 Metallographic diagram of 1# sample lap joint

图5为图4a中搅拌摩擦搭接焊下层LA141不同区域的显微组织。由图5a、b可知,AS-TMAZ的晶粒尺寸比RS-TMAZ的小,这是由于下层LA141原始轧制态经过了充分的动态再结晶,热机影响区吸收的能量使晶粒长大,分析可知,搅拌针将前进侧热塑性金属带往后退侧,在后退侧引发积热,该部分受到热作用的时间更长,使得后退侧晶粒更大。由图5c、d可知,前进侧大尺寸的晶粒比后退侧更多,是由于前进侧金属受到搅拌针的剪切力和摩擦阻力,温度较后退侧更高,前进侧受到更强的热循环,导致大尺寸晶粒较后退侧的多。

图6为焊接速度为0.1 m/min,旋转速度分别为1 400、1 600、1 800 r/min时搅拌摩擦搭接焊上板AZ31和下板LA141前进侧热机影响区(AS-TMAZ)的显微组织。其中图6a、b、c为上板AZ31热机影响区,图6d、e、f为下板LA141热机影响区。可以看出,上板AZ31前进侧热机影响区(AS-TMAZ)的晶粒分布与下板LA141前进侧热机影响区(AS-TMAZ)的晶粒分布明显不同,图6a、b、c中热机影响区由于发生了部分动态再结晶,导致AS-TMAZ中的晶粒大小不一。图6d、e、f中未出现这种情况,这是由于下板LA141中仅由单一的 β -Li相构成,在原始轧制状态下,已经较充分地完成了动态再结晶,在焊接过程中,下板LA141中AS-TMAZ吸收的热量并未导致动态再结晶,而是作为晶粒长大的驱动力。

上板AZ31和下板LA141中AS-TMAZ的晶粒尺寸均随旋转速度的增加而变大。这是由于焊接速度为0.1 m/min时,旋转速度从1 400 r/min增至1 800 r/min时,温度上升,受到更长的热循环作用,使AS-TMAZ的晶粒长大速度越大,晶粒尺寸更大。

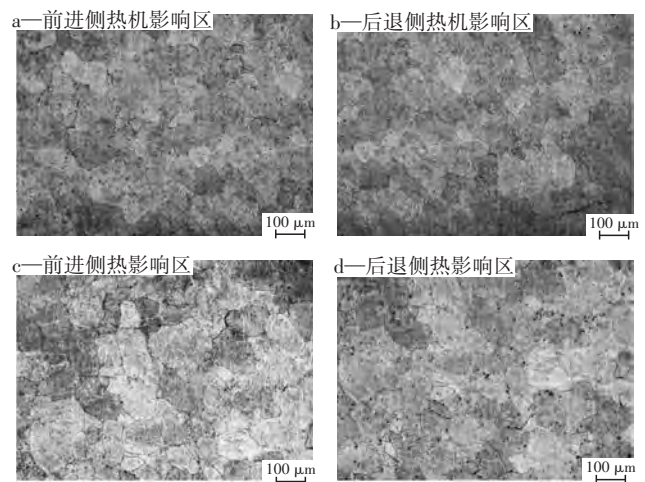


图5 1#样品搭接接头下层LA141不同区域的显微组织
Fig.5 Microstructure of different regions of lower LA141 of 1# sample lap joint

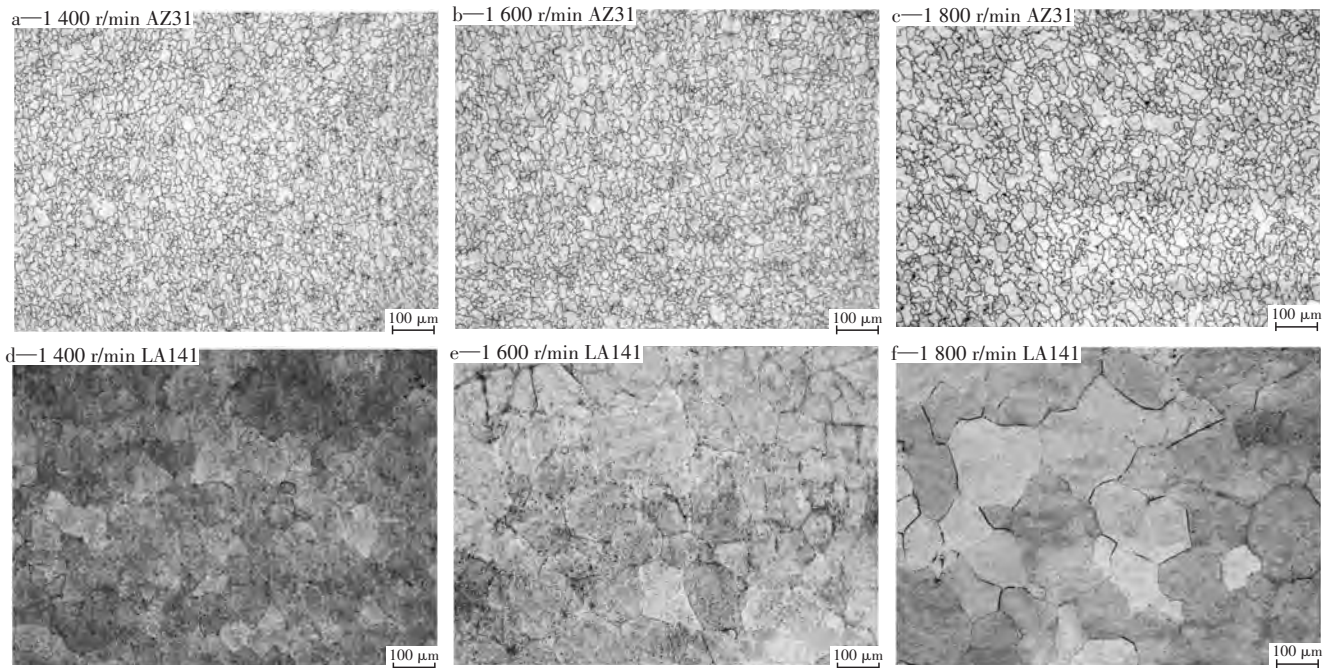


图6 不同旋转速度下搅拌摩擦搭接焊前进侧热机影响区的显微组织

Fig.6 Microstructure of AS-TMAZ on forward side of friction stir lap welding at different rotation speeds

2.3 旋转速度对显微硬度的影响

图7为在不同旋转速度下上层AZ31和下层LA141搅拌摩擦搭接焊接头不同区域的显微硬度曲线。可知,上层AZ31焊核区显微硬度与旋转速度呈正相关(图7a),在旋转速度为1800 r/min,焊接速度为0.1 m/min时,上层AZ31焊核区的显微硬度最高值为

68.2HV。当旋转速度从1400 r/min增至1800 r/min时,热输入增大,晶粒变大,而根据Hall-Petch公式判断,在晶粒变大时,硬度值降低,然而检测结果显示,显微硬度平均值却随旋转速度的变大而增加,这是由于旋转速度增加,热输入变大,提高了材料塑性流动能力,让其具备更强的织构强化作用,在这种情况下,相比晶粒粗大作用,织构强化作用程度更大,因而显微硬度增加。

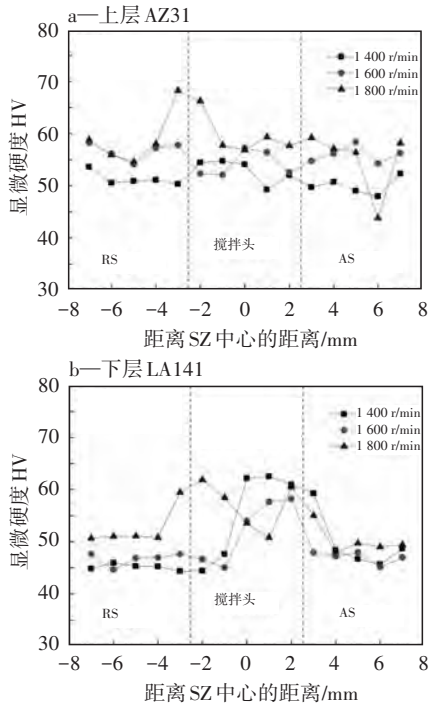


图7 不同旋转速度下搅拌摩擦搭接焊接头不同区域的显微硬度曲线

Fig.7 Microhardness curves of different regions of friction stir lap welded joints at different rotation speeds

随旋转速度的增加,下层LA141AS的显微硬度随之增加(图7b),而RS的显微硬度先减小后增大。下层LA141焊核区的显微硬度变化趋势与上层AZ31焊核区的有所不同,焊核区的显微硬度随旋转速度的增加先减小后增大,当旋转速度为1400 r/min,焊接速度为0.1 m/min时,下层LA141焊核区的显微硬度达到最大值62.5HV。当旋转速度从1400 r/min增至1600 r/min时,热输入值小晶粒尺寸小,显微硬度值稍大,当旋转速度从1600 r/min增至1800 r/min时,热输入增大使晶粒变大,由Hall-Petch公式可知,晶粒粗大,硬度值应该降低,然而显微硬度平均值却高于焊接速度为1600 r/min时的显微硬度值,主要是由于旋转速度增至1800 r/min,热输入变大,塑性流动能力增强,增加了织构强化作用,这时织构强化作用大于晶粒粗大作用,使显微硬度增加。

2.4 旋转速度对剪切拉伸的影响

图8为焊接速度为0.1 m/min,旋转速度分别为1400、1600、1800 r/min时AZ31/LA141搅拌摩擦搭接焊接头的拉剪力曲线图。由图可得,搅拌头旋转速度

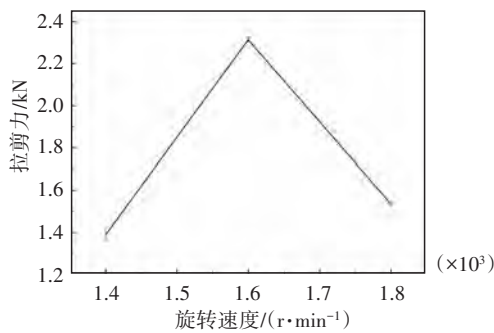


图8 不同旋转速度下搅拌摩擦搭接焊接头的拉剪力曲线图

Fig.8 Tensile shear curves of friction stir lap welded joints at different rotation speeds

为1 400~1 800 r/min时,接头断裂拉剪力随旋转速度增大先增后降。可知,若旋转速度为1 400 r/min,1 390.1 N可以导致接头断裂;在旋转速度为1 600 r/min时,接头拉剪力达到最高,为2 313.5 N;当旋转速度增至1 800 r/min时,接头断裂所需拉剪力降至1 534.6 N。其原因在于,转速为1 800 r/min时热输入比值最大,此时产热量过多,界面处形成了较多较厚的脆性金属间化合物,随旋转速度降至1 600 r/min时,热输入比值有所下降,产生的热量更低,对界面处金属间化合物数量的形成产生了一定的抑制作用,提高了抗拉剪力。在旋转速度继续降低后,接头断裂所需的拉剪力下降,其原因在于,旋转速度降低后,接头热输入比值降低,该部位产生的金属间化合物过少,进而接头断裂所需的拉剪力降低。

3 结论

1) 焊接速度为0.1 m/min,旋转速度为1 400~1 800 r/min时,搭接接头质量均保持良好,在旋转速度不断增加时,热输入也增加,因而从上层进入下层的材料逐渐变多。

2) 相同工艺参数下,上层AZ31和下层LA141前进侧和后退侧不同区域的晶粒尺寸有所差距。和后退侧相比,前进侧热机影响区晶粒尺寸较小,而前进侧热影响区域晶粒则更大。

3) 当焊接速度为0.1 m/min,其他参数一定时,旋转速度在1 400~1 800 r/min内增加时,上层AZ31和下层LA141前进侧热机影响区的晶粒尺寸逐渐增大,与此同时,焊核区的显微硬度也随之上升,而接头拉剪力的变化趋势为先升后降。

4 参考文献

[1] 李慧,徐荣正,侯艳喜,等. 镁锂合金的焊接技术及其在航天领域的应用[J]. 热加工工艺,2019,48(1):1-4.
LI Hui, XU Rongzheng, HOU Yanxi, et al. Welding technology

of Mg-Li alloy and its application in aerospace field [J]. Hot Working Technology, 2019, 48(1): 1-4. (in Chinese)

[2] 彭翔,刘文才,吴国华. 镁锂合金的合金化及其应用[J]. 中国有色金属学报,2021,31(11):3024-3043.
PENG Xiang, LIU Wencai, WU Guohua. Alloying of MMG and its application [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(11): 3024-3043. (in Chinese)

[3] 黄进,邓皓. 新型镁合金路灯控制器外壳的挤压工艺优化[J]. 热加工工艺,2018,47(3):133-135.
HUANG Jin, DENG Hao. Extrusion process optimization of novel magnesium alloy shell for street lamp controller [J]. Hot Working Technology, 2018, 47(3): 133-135. (in Chinese)

[4] 冯凯,李丹明,何成旦,等. 航天用超轻镁锂合金研究进展[J]. 特种铸造及有色合金,2017,37(2):140-144.
FENG Kai, LI Danming, HE Chengdan, et al. Progress in superlight Mg-Li alloys for aerospace industry [J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2017, 37(2): 140-144. (in Chinese)

[5] ISLAM R, HADADZADEH A, WELLS M, et al. Characterization and analysis of hot compression behaviors of an ultralight Mg-Li-Al alloy [J]. International Journal of Light weight Materials and Manufacture, 2019, 2(3): 217-226.

[6] 李瑞红,蒋斌,陈志军,等. Y和Sr对Mg-14Li-1Al合金组织及力学性能的影响[J]. 热加工工艺,2016,45(14):67-70.
LI Ruihong, JIANG Bin, CHEN Zhijun, et al. Effects of Y and Sr on microstructure and mechanical properties of Mg-14Li-1Al alloy [J]. Hot Working Technology, 2016, 45(14): 67-70. (in Chinese)

[7] 圣冬冬,施颖杰,王茜茜,等. 超轻镁锂合金的研究现状与发展趋势[J]. 轻合金加工技术,2021,49(8):8-12.
SHENG Dongdong, SHI Yingjie, WANG Qianqian, et al. Research status and development trend of ultra-light magnesium-lithium alloy [J]. Light Alloy Processing Technology, 2021, 49(8): 8-12. (in Chinese)

[8] 江雯,蒋璐瑶,黄伟九,等. 退火处理对搅拌摩擦加工LZ91双相镁锂合金微观组织及力学性能的影响[J]. 材料导报,2020,34(S1):307-311.
JIANG Wen, JIANG Luyao, HUANG Weijiu, et al. Effect of annealing treatment on microstructure and mechanical properties of LZ91 dual-phase magnesium-lithium alloy processed by friction stir processing [J]. Materials Reports, 2020, 34(S1): 307-311. (in Chinese)

[9] 范蒙,张贵锋,柴东郎,等. 镁锂超轻合金搅拌摩擦焊及其机制的研究[J]. 焊管,2019,42(11):25-30.
FAN Meng, ZHANG Guifeng, CHAI Donglang, et al. Study on friction stir welding of Mg-Li ultra-light alloy and its mechanism [J]. Welded Pipe and Tube, 2019, 42(11): 25-30. (in Chinese)

[10] 张婧,封小松,张成聪,等. 镁锂合金搅拌摩擦焊接工艺特性分析[J]. 焊接学报,2017,38(4):119-123.

结构参数对金属丝网夹芯板力学性能的影响

郭晴晴, 钱金行, 廖娟

(福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350116)

摘要 为了研究不锈钢编织金属丝网(SSWWM)芯构成的轻质夹芯板的性能,用真空钎焊技术制备不同结构参数(层数、金属网的堆叠顺序和中间层)的夹芯板。对金属丝网夹芯板进行拉伸试验和三点弯曲试验,评估其力学性能。并对抗弯刚度的理论解析值与试验值进行比较。结果表明:适当增加夹芯板的层数、合适的堆叠顺序、在金属丝网间加入层间板均可显著提升夹芯板的力学性能。在所有试样中,带层间板的三层混合堆叠夹芯板(Tw-mix)的抗弯刚度最佳,带层间板的双层45°(Dw-45°)夹芯板的抗拉强度和伸长率最高。

关键词 夹芯板;力学性能;金属丝网;轻量化;理论弯曲刚度

中图分类号 TB331

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2024)02-0029-07

DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20240204.002

Influence of structural parameters on mechanical properties of woven wire mesh sandwich panels

GUO Qingqing, QIAN Jinhang, LIAO Juan

(School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract In order to study the properties of lightweight sandwich panels composed of stainless steel woven wire mesh (SSWWM) cores, sandwich panels with different structural parameters (number of layers, stacking sequence of woven wire mesh and interlayer) were prepared by vacuum brazing technology. Tensile test and three-point bending test were carried out to evaluate the mechanical properties of woven wire mesh sandwich plate. The theoretical analytical values of flexural stiffness were compared with the experimental values. The results show that the mechanical properties of sandwich panels can be significantly improved by increasing the number of layers, stacking sequence and adding interlayer panels between woven wire mesh. The flexural rigidity of Tw-mix with interlaminar is the best, and the tensile strength and elongation of double-layer 45° (Dw-45°) sandwich with interlaminar are the highest.

Keywords sandwich panel; mechanical properties; woven wire mesh; lightweight; theoretical flexural stiffness

结构轻量化一直以来都是航空航天、汽车船舶等领域亟需解决的问题之一。传统的单一材料已无法满足市场的需求,因此夹芯板作为一种轻质、比强度高、

比刚度高等综合性能优良的复合材料逐渐引起了人们的关注。夹芯板由薄且致密的面板和厚且轻质的芯层组成,面板需具备较高的强度,通常采用金属板、硬塑

收稿日期:2023-11-08;修回日期:2024-01-18

基金项目:国家自然科学基金项目(12272094);福建省自然科学基金项目(2022J01541)

第一作者:郭晴晴,女,硕士。E-mail:210220117@fzu.edu.cn。

通信作者:廖娟,女,博士,教授。E-mail:jliao@fzu.edu.cn。

ZHANG Jing, FENG Xiaosong, ZHANG Chengcong, et al. Investigation on friction stir welding of Mg-Li alloy [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38 (4): 119-123. (in Chinese)

[11] CAO X, JAHAZI M. Effect of tool rotational speed and probe length on lap joint quality of a friction stir welded magnesium alloy [J]. Materials & Design, 2011, 32: 1-11.

[12] XU N, SONG Q N, FUJII H, et al. Mechanical properties' modification of large load friction stir welded AZ31B Mg alloy joint [J]. Mater Lett, 2018, 219: 93-96.

[13] 苑晨晨, 蒋健博, 李慧, 等. 超轻双相LZ91镁铝合金搅拌摩擦搭接焊接技术研究 [J]. 有色金属工程, 2020, 10(7): 26-31.

YUAN Chenchen, JIANG Jianbo, LI Hui, et al. Study on friction stir lap welding of ultraligh dual-phase LZ91 Mg-Li alloy [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(7): 26-31. (in Chinese)

[14] XU N, FENG R N, REN Z K, et al. Improvement of microstructure and mechanical properties of AZ61 Mg alloys subjected to rapid cooling friction stir welding [J]. Sci Technol Weld Join, 2021, 26: 503-512.

[15] LIU Gang, MA Lina, MA Zhenduo, et al. Effects of welding speed and post-weld hot rolling on microstructure and mechanical properties of friction stir-welded AZ31 magnesium alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2018, 31: 853-864.