

文章编号:1671-8879(2016)05-0110-08

1420 铝锂合金搅拌摩擦焊接头的组织 演变及力学性能

孟 瑶,李 辉

(长安大学 材料科学与工程学院,陕西 西安 710061)

摘 要:铝锂合金采用搅拌摩擦焊技术进行焊接可有效提高焊接接头的各项力学性能指标。采用 SEM、TEM、EBSD 等试验方法,对 10 mm 厚 1420 铝锂合金搅拌摩擦焊焊接接头的显微组织形貌、组织类型、析出相以及接头硬度分布情况进行分析,讨论了组织结构对接头力学性能的影响。研究表明:焊接接头的焊核区、热机影响区以及热影响区呈现不同组织形貌;焊核区由均匀细小的再结晶组织构成,热机影响区板条组织发生弯曲变形,热影响区在焊接热循环作用下晶粒发生粗化,其组织形貌与母材基本保持一致;焊核区主要织构类型为变形织构 $S\{123\}\langle 634\rangle$ 和再结晶织构 $R\{124\}\langle 211\rangle$,含量分别为 18.9% 和 18.1%,热机影响区和热影响区的主要织构类型与焊核区相同,含量稍有变化,母材中变形织构 $Copper\{112\}\langle 111\rangle$ 为主要织构类型,体积分数为 16.9%;合金的析出相为 δ' 相,即 Al_3Li ,相的含量沿母材、热影响区、热机影响区方向递减,直至焊核区内消失;焊缝的硬度值整体高于母材,并按照焊核区—热机影响区—热影响区—母材方向逐渐减少,焊接前进侧硬度始终小于后退侧硬度;试验中析出相对合金力学性能的影响较小,晶粒度是影响合金硬度的主要因素。

关键词:机械工程;搅拌摩擦焊;1420 铝锂合金;组织形貌;织构;硬度;力学性能

中图分类号: TG4 文献标志码: A

Microstructural characteristics and mechanical properties of friction stir welding joint of 1420 aluminum-lithium alloy

MENG Yao, LI Hui

(School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: The mechanical properties of weld joint in Al-Li alloy could be enhanced by using the friction stir welding (FSW). Microstructure, textures, precipitate phase, hardness distribution of 10 mm thick weld joint in 1420 Al-Li alloy after FSW were studied by using the SEM, TEM, EBSD methods, etc. Furthermore, interactions between microstructures and mechanical properties were discussed. The results show that the microstructures of three zones in the joint are all different, and they all vary from matrix. The stir zone is composed of recrystallization textures. The lath structures and grains distort in thermo-mechanically affected zone. Because of

收稿日期:2016-05-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51402023)

作者简介:孟 瑶(1990-),女,陕西西安人,工学硕士,E-mail:mygic@126.com。

the heat effect arising from FSW, grains in heat affected zone are forced to become bigger than those in matrix, but the shape is similar to that of the matrix. The types of major texture in the stir zone are $S\{123\}\langle 634\rangle$, $R\{124\}\langle 211\rangle$, and the volume fraction of texture is 18.9% and 18.1%, respectively. The main textures and their contents in thermo-mechanically affected zone and heat affected zone are similar to those in stir zone. But, in base metal (BM), Copper $\{112\}\langle 111\rangle$ (13.5%) become the initial texture and volume fraction is 16.9%; meanwhile, the contents of other textures, such as S and R, have a sharp decrease in BM. In this study, the δ' precipitate, known as Al_3Li , is the only precipitate of 1420Al-Li alloy. According to matrix, heat affected zone, thermo-mechanically affected zone and stir zone in order. The content of δ' precipitate decreases gradually, and finally, vanishes in the stir zone. The hardness of the joint is lower than that in matrix, and gradually decreases along the direction of the stir zone, thermo-mechanically affected zone, heat affected zone, and matrix direction. Also, the hardness of advancing side is always lower than that of retreating side. In this study, δ' precipitate has little influence on microhardness of the weld joint, but the grain size will be the main influence factor. 1 tab, 5 figs, 20 refs.

Key words: mechanical engineering; friction stir welding; 1420 aluminum-lithium alloy; micro-structure; texture; hardness; mechanical property

0 引言

铝锂合金具有低密度、高比强度、高比刚性、超塑性和良好的耐腐蚀性能,相比于常规铝合金结构,质量可减少 10%~15%^[1-7]。铝锂合金采用传统工艺焊接时,难以获得高强度接头,同时其表面存在一层牢固结合的氧化膜且难以去除,易形成焊接气孔、热裂纹等缺陷,焊接前需要进行复杂的预处理工艺,增加了焊接的复杂性,制约了铝锂合金在工业上的广泛应用^[6,8]。

搅拌摩擦焊(FSW)作为一种新型固相连接方法,其搅拌头的旋转搅拌作用可有效破碎待焊表面的氧化膜,焊接产生的摩擦热低于材料本身的熔点,材料不会发生熔化,从而避免合金中锂元素的挥发损失;接头内不易形成脆性相和热裂纹,接头残余应力低,强度系数高,并且不会引入其他元素使合金性能发生局部改变^[8-11];焊缝不需填充材料,因而焊后构件质量不会增加,这对需要减重的结构件来说具有重要的意义^[11-14]。现阶段对于搅拌摩擦焊焊接铝锂合金的研究基本集中在改变搅拌摩擦焊焊接工艺参数以优化焊接接头的力学性能方面,包括拉伸性能、断口类型及接头度等^[6,11-12,15]。中国对于 2A97、2060 等多种类型铝锂合金搅拌摩擦焊接头的组织形貌与力学性能都有研究^[9,16-17]。郭晓娟等采用多种工艺参数焊接合金,对比接头的拉伸性能及断口形貌,并给出大致的硬度变化规律^[6]。魏世

同等通过选取适当工艺参数,得到接头强度达到母材的 77%,接头的力学性能优于氩弧焊接接头^[11]。但针对 1420 铝锂合金搅拌摩擦焊接头的显微形貌、织构类型及硬度分布等,还没有更直观精细的展现和分析。为此,本文采用 SEM、EBSD、TEM 技术及多点硬度测试等方法,具体分析了搅拌摩擦对接头的组织结构及硬度分布等的影响,为进一步优化铝锂合金性能提供参考。

1 试验材料和方法

试验用焊接材料为:1420 铝锂合金轧制板,合金成分(wt%)为 Al-(1.9-2.2) Li-(4.8-5.2) Mg-(0.08,0.15) Zr-0.1Fe-0.2Si,轧制板尺寸(长、宽、高)为 75 mm×60 mm×10 mm;搅拌摩擦焊搅拌头参数为:转速 $\omega=600$ r/min,行走速度 $v=90$ mm/min。从板材上切下宽约 5 mm 的长条形样品,作为试验试样。

(1)显微组织形貌。将试样进行打磨抛光至 40 倍光学显微镜下无划痕,再用酒精冲洗试样表面,用 3% HF 溶液对试样进行腐蚀(约 30 s)至光学显微镜下可看到明显组织即可。使用德国 ZEISS 公司 SUPRATM55 型扫描电子显微镜,观察试样微观形貌及微区成分。

(2)接头织构。将试样用相同方法抛光完成后,用无水乙醇清洗 10 min;再使用美国 GATAN682 离子刻蚀机进行样品再处理,设定参数 279 μ A,样

品台倾转角为 60° , 离子枪电压为 7.5 keV, FORE-LINE 为 3.6×10^{-5} ; 试验中每刻蚀 3 min 暂停 1 min, 共刻蚀 60 min。使用仪器为同款扫描电镜及配套丹麦 HKL 公司的背散射电子衍射仪 CHANNEL5。

(3) 接头处合金析出相形貌及分布。从合金板材上切下厚度约 1 mm 的合金薄片试样, 并机械减薄至 $68 \sim 80 \mu\text{m}$, 使用 $\Phi 3$ 金刚石冲片机从制备好的薄片上冲下圆片, 用 MTP-1A 双喷离子减薄机对圆薄片进行双喷(减薄机中的电解液为 1:3 硝酸甲醇溶液); 对双喷后的圆薄片使用美国 Gatan 公司 691 型离子减薄仪进行离子减薄。使用美国 FEI Tecnai F30 G2 透射电子显微镜, 加速电压为 300 kV, 对减薄后试样进行析出相分析。

(4) 接头处显微硬度。将试样打磨抛光后, 每 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 范围进行压痕试验, 使用仪器为 Hmv Micro HARDNESS TESTER(Japan) 维氏硬度计, 设定加载时间 15 s; 载荷 98.07 mN, 得到试样整体硬度分布情况。

2 结果分析与讨论

2.1 搅拌摩擦焊对晶粒形态的影响

图 1 为搅拌摩擦焊 1420 铝锂合金焊缝周围的显微组织形貌, 搅拌针方向如图所示。焊接接头的焊核区(SZ)、热机影响区(TMAZ)、热影响区(HAZ)及合金母材区(BM)呈现出明显的组织差异。

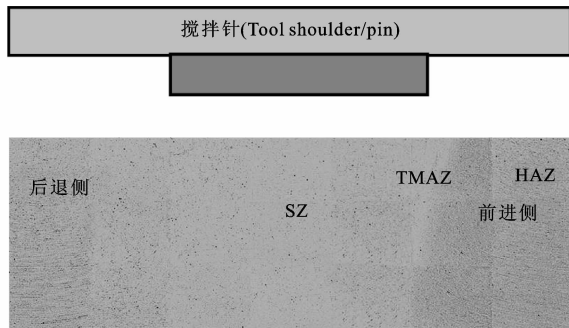


图 1 1420 铝锂合金搅拌摩擦焊接头的光学微观形貌

Fig. 1 Optical micrograph of overview weld region

前进侧(advancing side)形成了明显界限, 并且晶粒走势具有强烈方向性; 而后退侧(retreating side)则是逐步从焊核内部向外延展过渡, 使得热机影响区与焊核区的过渡面积减小, 过渡区域没有前进侧明显。两侧形貌的差异源于焊接过程中, 搅拌针与前进侧所形成的软化层由前进侧向后退侧方向

流动, 流动到后退侧的软化层起到润滑作用, 极大地降低了搅拌针与后退侧间的摩擦剪切力, 使后退侧板条组织受力小, 即该区组织变形程度较小。

下页图 2(a)、(b)中, 焊核区的晶粒均匀细小, 完全没有合金原有的条状组织形貌。原因是焊核区受到搅拌头的搅拌作用最强烈, 组织发生了剧烈的变形, 原有的晶界被破坏, 晶粒破碎, 伴随着搅拌摩擦焊接时产生的热循环作用, 合金组织不断回复和动态再结晶, 即等效于进行了短时间的退火处理, 所以最后形成了如图所示的均匀细小晶粒形态。

下页图 2(c)、(d)中, 热机影响区组织在搅拌针机械作用下发生弯曲变形, 并且在减弱了的热循环作用下, 晶粒被细化程度低于焊核区晶粒, 晶粒尺寸粗大。

下页图 2(e)、(f)中, 热影响区基本不受搅拌作用影响, 而只在焊接热循环作用下, 其组织未受挤压, 形貌与母材基本一致, 为条状轧制组织, 类似于河流状曲线分布。

综上所述, 包括母材在内的 4 个区域的组织形貌各不相同。焊核区由细小再结晶组织构成; 热机影响区板条组织发生变形弯曲, 前进侧弯曲程度高于后退侧, 其块状组织尺寸比后退侧小; 热影响区在焊接热循环作用下发生粗化, 但形貌与母材基本保持一致。

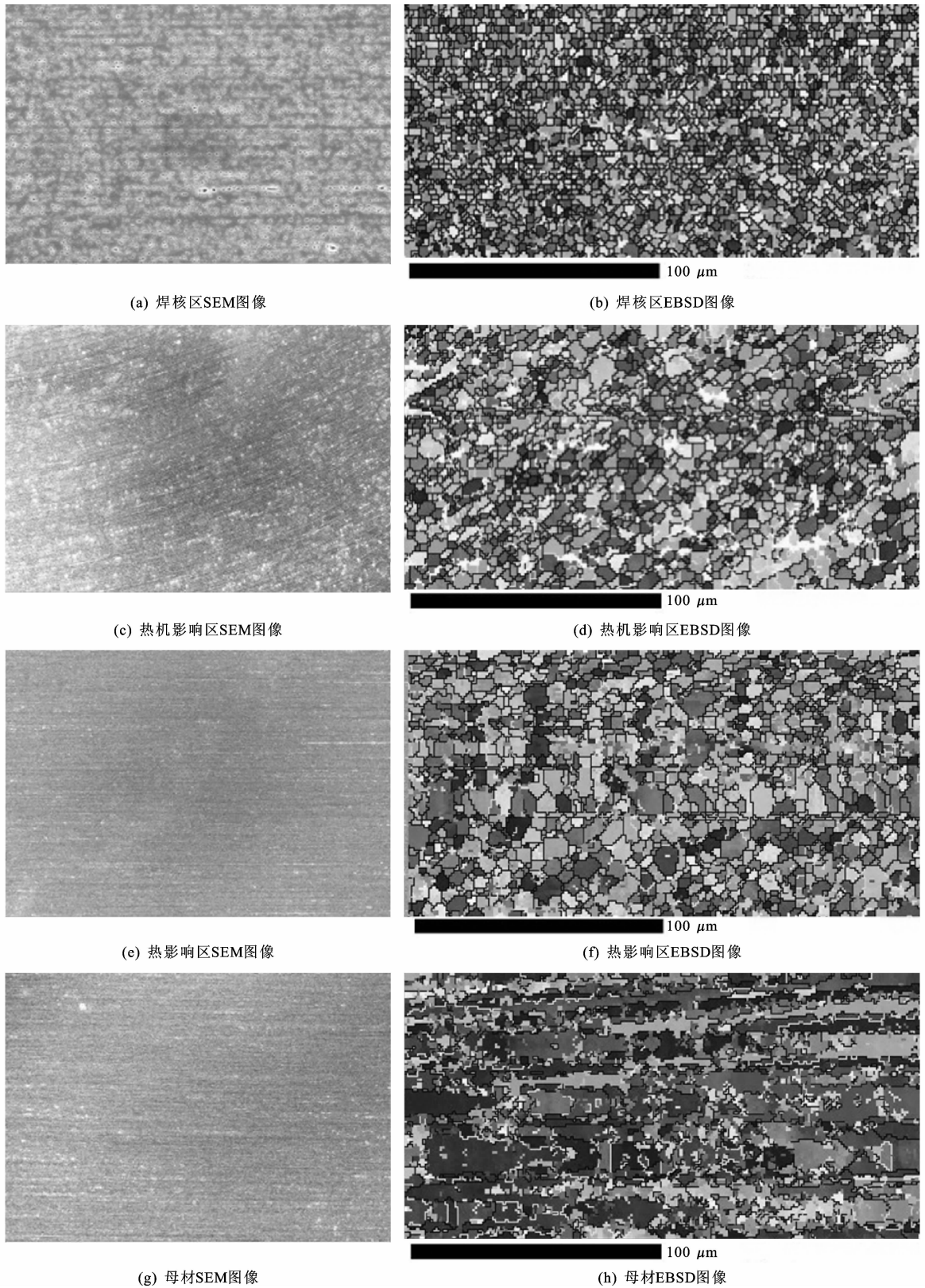
2.2 搅拌摩擦焊对金属晶粒度的影响

合金 4 个区域中晶粒度的变化情况通过下页图 2 右侧 EBSD 图样观察可知: 焊核区晶粒最为细小, 且分布均匀; 热机影响区晶粒稍大于焊核区, 且组织受到弯曲变形; 而远离焊核区的热影响区晶粒更加粗大, 并且热效应已经很低, 与母材区相比, 无论在形貌还是晶粒上都相差不多。

2.3 搅拌摩擦焊对合金织构的影响

金属热塑性加工时, 其内部主要发生 2 种微观过程: 一种是以位错运动为主的塑性变形, 并伴随着金属基体缺陷密度的上升; 另一种是以回复、形核和晶粒长大为主的动态再结晶, 并伴随着金属基体缺陷密度的下降。这两者在变形过程中同时或者交替出现, 使实际发生的微观过程极其复杂。塑性变形过程导致金属内生成变形织构, 而动态再结晶过程会产生再结晶织构^[18-19]。

合金焊缝 4 个区域中织构类型及体积分数见下页表 1。4 个区域中的主要织构为: 变形织构黄铜织构 Brass{011}<211>、S 织构{123}<634>和铜型



(a) 焊核区SEM图像

(b) 焊核区EBSD图像

(c) 热机影响区SEM图像

(d) 热机影响区EBSD图像

(e) 热影响区SEM图像

(f) 热影响区EBSD图像

(g) 母材SEM图像

(h) 母材EBSD图像

图 2 搅拌摩擦焊接合金前进侧各区域组织形态

Fig. 2 Microstructures of different regions in joint: grain structures at the AS region (left-hand side) and EBSD map (right-hand side)

织构 Copper $\{112\} \langle 111 \rangle$; 再结晶织构立方织构 Cube $\{001\} \langle 100 \rangle$ 、戈斯织构 Goss $\{011\} \langle 100 \rangle$ 、

R 织构 $\{124\} \langle 211 \rangle$ 以及 P $\{011\} \langle 122 \rangle$; 晶体学取向 $\{025\} \langle 100 \rangle$ ^[18]。

表1 合金不同区域的织构体积分数

Tab. 1 Types of textures and their volume fractions of whole weld region

%

结构类型	黄铜{011} <211>	S{123} <634>	铜型{112} <111>	立方{001} <100>	戈斯{011} <100>	R{124} <211>	P{011} <122>	{025} <100>
焊核区	9.94	18.90	13.20	2.81	3.45	18.10	9.00	8.22
热机影响区	12.20	18.10	12.10	1.92	12.10	20.40	8.21	11.30
热影响区	11.10	20.30	10.50	4.16	4.99	19.10	8.28	8.29
母材	0.03	0.39	16.90	8.04	0.55	0.11	6.05	10.40

焊核区内三大类织构同时存在,主要的织构组元为变形织构 S{123}<634>,其含量为 18.9%,铜型织构 Copper{112}<111>(13.2%),以及再结晶织构 R{124}<211>(18.1%),晶体学取向织构 {025}<100>(8.22%)相对较少。

热机影响区与焊核区中织构类型和与其对应的体积分数相类似,只有戈斯织构 Goss{011}<100>的体积分数在此区域明显增高,达到了 12.1%。

热影响区的织构成分分布变化并不显著。变形织构 S{123}<634>(20.3%)与再结晶织构 R{124}<211>(19.1%)依旧是主要组成部分;只有再结晶织构 Goss{011}<100>的变化非常明显,在此区域中,它的体积分数又降回到低数值(4.99%)。

母材区的织构形貌和织构组成成分与焊缝的 3 个区域都有明显差别,具体表现在:变形织构 Copper{112}<111>为主要织构(16.9%),在焊缝中大量存在的 S{123}<634>和 R{124}<211>分别只有 0.39%和 0.11%;同时,在焊缝中含量较多的织构 Brass{011}<211>(0.03%)在母材中基本不存在;同样,再结晶织构 Goss{011}<100>(0.55%)在母材中也基本不存在。

通过对不同焊接区织构的分析得出以下结论。

(1)变形织构 Brass{011}<211>在整个焊接接头中大量存在,说明在受到搅拌摩擦焊搅拌作用以及随之产生的热效应作用下,合金中的晶粒、晶界发生破碎,从而形成了大量变形织构 Brass;且越靠近热机影响区,前进侧的搅拌摩擦焊产生的搅拌作用使得变形织构体积分数继续增大,在此区域达到体积分数最大值;而在热影响区中,搅拌作用已经基本消失,越靠近母材,变形织构 Brass 的体积分数就越少,甚至在母材中基本不存在。变形织构 S{123}<634>的变化趋势与织构 Brass 相似,但含量最高,是焊接接头中的主要织构类型。

(2)同样为变形织构的 Copper{112}<111>在 4 个区域内却始终存在,在母材区中并没有消失,这可能是由于试样采用片状板材,铸造过程中除了一

些晶体学取向,还存在一些成型过程中留下的亚稳定的形变织构,即变形织构 Copper 在合金中本来就存在,并非由搅拌摩擦焊接作用直接形成。

(3)搅拌摩擦焊过程中也会产生再结晶织构:变化最典型的为织构 R{025}<100>,其织构含量和变化走势与变形织构 S{123}<634>基本相同,即在接头中大量存在,而在母材中基本消失。这与焊接过程中的热循环作用有密切的联系,焊核区以及热机影响区的热效应是最为明显的,所以织构 R 产生的主要原因是焊接作用。

(4)再结晶织构 Cube{001}<100>在合金的 4 个区域中一直存在,且在母材中最多(8.04%)。另一种再结晶织构 P{011}<122>在 4 个区域中的含量始终保持在 8%左右。而同为再结晶织构的 Goss 织构的变化却非常频繁,但它在整个接头中的含量始终不高,且在母材中已基本不存在(0.55%)。其产生和变化很大程度上受到搅拌摩擦焊热循环作用的影响,在母材区已没有摩擦焊的热效应,即晶粒受热后的回复和再结晶行为消失了,Goss 织构也不会再产生。

(5)晶体学取向 {025}<100>的含量在 4 个区域中一直存在,并基本保持稳定,平均值为 9.55%。

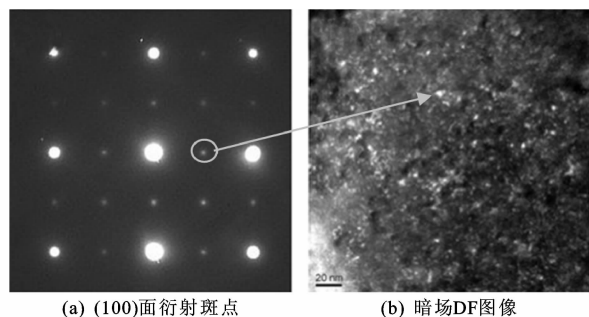
(6)在热影响区以及热机影响区中产生并发生了一定程度的动态再结晶过程,但由于焊接热效应的温度低于合金的熔点,所以它不足以使区域内的晶粒全部发生动态再结晶,而是只有晶粒相当于进行了短暂的退火处理。由于此过程的产生使接头的焊核区、热机影响区以及热影响区中都有部分的再结晶织构;在搅拌头搅拌作用下,接头中同时也会产生大量的变形织构;而由于热影响区远离焊核区,其受到的搅拌作用相对小很多,只有热效应作用比较明显。本试验样品为薄板型,在这样小范围内的热加工、搅拌摩擦焊工艺下所得到的织构分布及含量,比大块合金材料更容易出现明显的取向性。

2.4 搅拌摩擦焊对析出相的影响

试验运用透射电镜分别对母材以及焊接接头 3

个区域进行衍射斑点和该斑点区域的明场、暗场分析,了解搅拌摩擦焊搅拌作用和热循环作用下合金中析出相的组成、分布和变化。

图 3(a)为母材区(100)面的衍射斑点花样。图中有 2 套衍射斑点,较大的主衍射斑点为 Al 原子,围绕 Al 原子斑点均匀分布在图中的另一套相对小的斑点为 δ' 析出相(Al_3Li)。图 3(b)为此位置下的暗场图像,图中箭头所指即为 δ' 相的微观形貌。



(a) (100)面衍射斑点

(b) 暗场DF图像

图 3 母材区 TEM 图像

Fig. 3 TEM data of the BM region

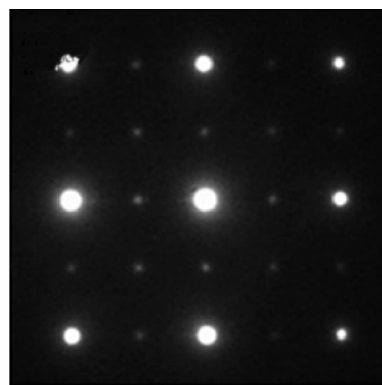
图 4(a)~(c)分别给出热影响区、热机影响区、焊核区的衍射花样图像。图 4(a)中依旧可以较为明显地观察到析出相 δ' 相的衍射斑点,说明在热影响区 HAZ 有与母材基本相同的原子结构,而 δ' 析出相在硬度等力学性能方面发挥着重要的作用。图 4(b)衍射花样中,析出相的 1 套斑点已经非常微弱,说明在 TMAZ 中的 δ' 相含量已经相当少,基本不会对热机影响区的性能有很大影响。图 4(c)焊核区中只有铝 1 套衍射斑点,除了铝元素之外,基本不含 δ' 析出相,在搅拌摩擦焊作用下,合金发生回复和动态再结晶,而没有 Al_3Li 存在于焊核区中。

一般来说,合金中的析出相对其硬度等力学性能有很大影响,细小析出相 δ' 的存在理论上可以增强 1420 铝锂合金的硬度^[20]。

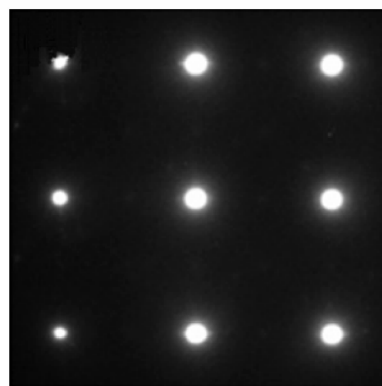
2.5 接头的微观硬度分析

下页图 5 为焊缝区试样完整的显微硬度分布云图,云图颜色的深浅表示硬度值的变化,由此可以直观地看出显微硬度的变化与合金的区域变化有很大关联。本试验中,试样的中心区域(大于 146 HV)整体硬度最高,这也使试样的焊核区靠近热机影响区的位置。

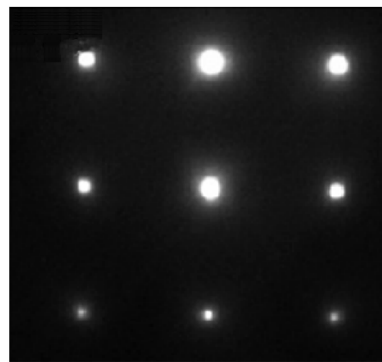
在焊核区周围硬度开始下降,按照焊核区、热机影响区、热影响区以及母材方向依次降低;同时,左边后退侧部分的硬度高于右边前进侧的硬度,且在两边硬度同时下降的情况下,始终保持这个趋势。图 5 的硬度数据可以用来研究焊接的不对称性。图



(a) 热影响区



(b) 热机影响区



(c) 焊核区

图 4 搅拌摩擦焊接头区域 TEM 图像

Fig. 4 TEM data for the welded joint

5 中前进端焊核区的硬度在其与热机影响区的分界处急剧减少;而在后退侧,硬度的下降比较平缓。也就是说,前进侧的焊核区与热机影响区的界限很明显且很容易辨认,而后退侧的界限因其连续地逐渐变化而不甚清楚。

试样的母材区硬度最低,在右侧数值较低区域即为母材区。图 5 中,热影响区与母材大致的区分线还能观察到试样的前进侧范围要大于后退侧范围,这是因为在搅拌摩擦焊过程中,搅拌头在前进侧进行焊接需要时间较长,前进侧所受的应力也大于后退侧,使得在微观形貌与硬度分布上都表现为前进侧区域大于后退侧区域。

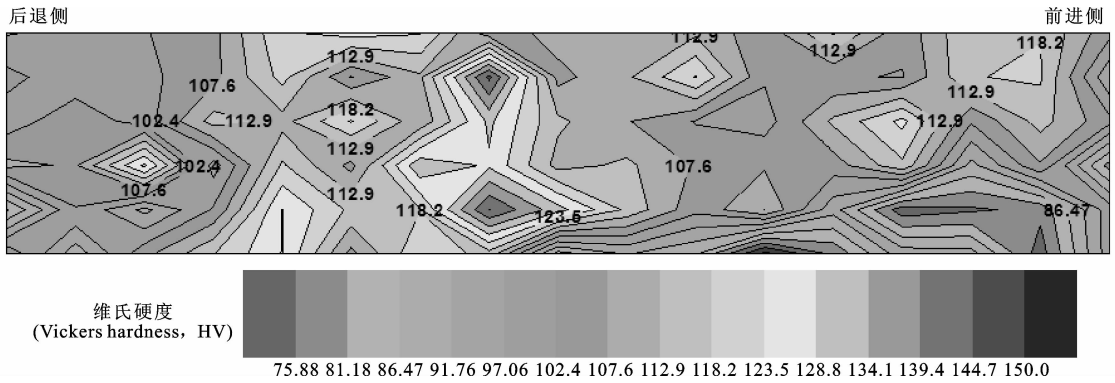


图5 试样 2D 硬度分布

Fig. 5 Two-dimensional hardness map through the weld region

3 结 语

(1) 焊接接头的焊核区、热机影响区、热影响区以及母材的微观组织形貌各不相同,焊核区中组织的晶粒度在合金 4 个区域中最小;热机影响区晶粒度大于焊核区晶粒度,且组织发生变形弯曲,前进侧变形程度高于后退侧;热影响区在焊接热循环作用下晶粒度值再次增大,但其组织形貌与母材基本保持一致。

(2) 焊接接头 3 个区域内都存在再结晶织构、变形织构以及晶体学取向。焊核区受到搅拌作用和热效应作用最为强烈,组织变形大,晶粒发生回复和动态再结晶,主要织构为变形织构 $S\{123\}\langle 634\rangle$ 以及再结晶织构 $R\{124\}\langle 211\rangle$;热机影响区、热影响区的织构变化与焊核区基本相似;母材中的主要织构是变形织构 $Copper\{112\}\langle 111\rangle$ 及晶体学取向 $\{025\}\langle 100\rangle$ 。

(3) 合金母材中存在一种析出相 δ' 相,即 Al_3Li 。 δ' 析出相越深入接头中心,含量越少;从热影响区到热机影响区逐渐减少,焊核区中没有 δ' 析出相。

(4) 1420 铝锂合金搅拌摩擦焊接头硬度高于母材,并按热影响区、热机影响区、焊核区顺序依次增大,本试验中 δ' 相对合金硬度的影响较小,主要影响因素为晶粒度,焊核区的晶粒度最细小均匀,其硬度在合金中最高。此外,前进侧焊核区与热机影响区硬度分界明显,而后退侧硬度是从焊核区逐渐减小的。

(5) 本文给出了 1420 铝锂合金搅拌摩擦焊接头的组织结构及硬度分布,为进一步优化 1420 铝锂合金性能提供参考依据。下一步可针对成分不同铝锂合金的搅拌摩擦焊接头性能进行对比研究,为铝锂

合金的广泛应用提供依据。

参考文献:

References:

- [1] STEUWER A, DUMONT M, ALTENKIRCH J, et al. A Combined approach to microstructure mapping of an Al-Li AA2199 friction stir weld[J]. Acta Materialia, 2011, 59(8): 3002-3011.
- [2] 周昌荣, 潘青林, 朱朝明, 等. 新型铝锂合金的研究和发展[J]. 材料导报, 2004, 18(5): 30-32. ZHOU Chang-rong, PAN Qing-lin, ZHU Chao-ming, et al. Development and study of new types aluminum-lithium alloys[J]. Materials Review, 2004, 18(5): 30-32. (in Chinese)
- [3] 杨守杰, 陆政, 苏彬, 等. 铝锂合金研究进展[J]. 材料工程, 2001(5): 44-47. YANG Shou-jie, LU Zheng, SU Bin, et al. Development of aluminum-lithium alloys[J]. Journal of Materials Engineering, 2001(5): 44-47. (in Chinese)
- [4] 张新明, 叶凌英, 郑大伟. 1420 铝锂合金的晶粒细化及超塑性行为[J]. 航空制造技术, 2009(10): 82-86. ZHANG Xin-ming, YE Ling-ying, ZHENG Da-wei. Grain refinement and super plastic behavior of 1420 Al-Li alloy sheets[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(10): 82-86. (in Chinese)
- [5] 李锡武, 郑子樵, 李海, 等. 1420 铝锂合金力学性能的各向异性[J]. 稀有金属, 2004, 28(1): 151-155. LI Xi-wu, ZHENG Zi-qiao, LI Hai, et al. Anisotropy of mechanical properties for 1420 Al-Li alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2004, 28(1): 151-155. (in Chinese)
- [6] 郭晓娟, 李光, 董春林, 等. 1420 铝锂合金搅拌摩擦焊接头力学性能[J]. 焊接学报, 2009, 30(4): 45-48. GUO Xiao-juan, LI Guang, DONG Chun-lin, et al. Mechanical properties of 1420 aluminum-lithium al-

- loy friction stir welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(4): 45-48. (in Chinese)
- [7] 李劲风, 郑子樵, 陈永来, 等. 铝锂合金及其在航天工业上的应用[J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(1): 13-19. LI Jin-feng, ZHENG Zi-qiao, CHEN Yong-lai, et al. Al-Li alloys and their application in aerospace industry[J]. Aerospace Materials & Technology, 2012, 42(1): 13-19. (in Chinese)
- [8] 王大勇, 冯吉才, 张伟, 等. 铝锂合金搅拌摩擦焊接热循环[J]. 稀有金属, 2004, 28(1): 156-159. WANG Da-yong, FENG Ji-cai, ZHANG Wei, et al. Thermal cycle analysis of friction stir welding Al-Li alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2004, 28(1): 156-159. (in Chinese)
- [9] 蔡彪, 郑子樵, 孙景峰, 等. 2A97 铝锂合金搅拌摩擦焊焊缝的微观组织特征[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2012, 17(2): 147-152. CAI Biao, ZHENG Zi-qiao, SUN Jing-feng, et al. Microstructural characteristics of joint line of friction stir welding of 2A97 Al-Li alloy[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2012, 17(2): 147-152. (in Chinese)
- [10] SUTTON M A, YANG B, REYNOLDS A P, et al. Microstructural studies of friction stir welds in 2024-T3 aluminum[J]. Material Science and Engineering: A, 2002, 323(1/2): 160-166.
- [11] 魏世同, 郝传勇. 1420 铝锂合金的搅拌摩擦焊接[J]. 航空材料学报, 2006, 26(6): 21-25. WEI Shi-tong, HAO Chuan-yong. Friction stir welding process of 1420 aluminum lithium alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006, 26(6): 21-25. (in Chinese)
- [12] GUERRA M, SCHMIDT C, MCCLURE J C, et al. Flow patterns during friction stir welding[J]. Materials Characterization, 2002, 49(2): 95-101.
- [13] 张田仓, 郭德伦, 陈沁刚, 等. 铝合金搅拌摩擦焊技术研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(2): 127-130. ZHANG Tian-cang, GUO De-lun, CHEN Qin-gang, et al. Aluminum alloys friction stir welding technology[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(2): 127-130. (in Chinese)
- [14] 栾国红, 郭德伦, 张田仓, 等. 铝合金的搅拌摩擦焊[J]. 焊接技术, 2003, 32(1): 1-4. LUAN Guo-hong, GUO De-lun, ZHANG Tian-cang, et al. Friction stir welding of aluminum alloy[J]. Welding Technology, 2003, 32(1): 1-4. (in Chinese)
- [15] 张丹丹, 曲文卿, 庄来杰, 等. 铝锂合金搅拌摩擦焊搭接接头组织及力学性能[J]. 航空材料学报, 2013, 33(4): 24-28. ZHANG Dan-dan, QU Wen-qing, ZHUANG Lai-jie, et al. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded Al-Li alloy lap joints[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2013, 33(4): 24-28. (in Chinese)
- [16] 孙景峰, 郑子樵, 林毅, 等. 2060 合金 FSW 接头微观组织与力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(2): 364-370. SUN Jing-feng, ZHENG Zi-qiao, LIN Yi, et al. Microstructures and mechanical properties of 2060 alloy FSW joint[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(2): 364-370. (in Chinese)
- [17] 赵衍华, 林三宝, 申家杰, 等. 2014 铝合金搅拌摩擦焊接头的微观组织及力学性能[J]. 航空材料学报, 2006, 26(1): 67-70. ZHAO Yan-hua, LIN San-bao, SHEN Jia-jie, et al. Microstructures and mechanical properties of friction stir welding joint of 2014 aluminum alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006, 26(1): 67-70. (in Chinese)
- [18] 杨中玉, 张津, 郭学博, 等. 铝合金的组织及测试分析研究进展[J]. 精密成形工程, 2013, 5(6): 1-6. YANG Zhong-yu, ZHANG Jin, GUO Xue-bo, et al. Research progress on aluminum alloy texture and test analysis[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2013, 5(6): 1-6. (in Chinese)
- [19] SIDOR J J, PETROV R H, KESTENS L A I. Microstructural and texture changes in severely deformed aluminum alloys [J]. Materials Characterization, 2011, 62(2): 228-236.
- [20] 李红英, 张建飞, 耿进峰, 等. 冷却速度对 Al-Cu-Li 系合金析出相及其硬度的影响[J]. 热加工工艺, 2006, 35(18): 38-40. LI Hong-ying, ZHANG Jian-fei, GENG Jin-feng, et al. Effect of cooling rate on precipitation phases and hardness of Al-Cu-Li alloy [J]. Hot Working Technology, 2006, 35(18): 38-40. (in Chinese)