电子束扫描波形对铝锂合金显微组织及力学性能的影响

张子阳，王善林，柯黎明，李 娟

(南昌航空大学 轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室，江西 南昌 330036)

摘 要：对厚度 1.8 mm 的 2198-T8 态铝锂合金薄板进行真空电子束焊接，分析了不同扫描方式对焊缝成形及接头力学性能的影响，以及最优焊接工艺下焊接接头的显微组织与力学性能。结果表明：在工作距离为 300 mm、加速电压 U=60 kV、聚焦电流 I_f=498 mA 以及电子束流 I_b=6.8 mA 情况下，不添加扫描可获得成形良好且无宏观气孔缺陷的焊接接头。相同参数条件下对比添加了扫描方式的焊接，得出焊接过程中添加三角波扫描时，焊缝的显微硬度值和焊接接头的抗拉强度均得到了提高，焊接接头的平均抗拉强度为 326.5 MPa，其中最高抗拉强度可达到母材的 71.5%，延伸率最高可达母材延伸率的 86.8%，焊缝熔合区较整个焊缝区来说最为薄弱。

关键词：铝锂合金；真空电子束焊；焊缝成形；力学性能

中图法分类号：TG146.22 **文献标识码：**A **文章编号：**1002-185X(2018)07-2245-07

Li 是世界上最轻的金属元素，其密度只有 0.53 g/cm^3，在铝中每加入 1%的 Li，可使合金密度减小 3%，弹性模量提高 6%[1,2]。在航空航天工业迅猛发展的今天，增加飞机的燃油效率和有效载荷已逐步成为航空航天领域中重要的研究方向。因此，实现飞机轻量化势在必行，这就要求所使用的材料质量轻且力学性能良好。研究表明，用高强铝锂合金替代常规的铝合金，可使结构减重 10%~15%，刚度提高 15%~ 20%[3]。2198 铝锂合金作为一种新型的航空航天结构材料，拥有高强度、高韧性，作为结构材料已用于国产 C919 飞机[4]。和传统铝合金材料相似，采用传统熔化焊方法焊接铝锂合金时，焊缝容易出现气孔、热裂纹和接头软化等缺陷[5,7]，难以获得高质量的焊接接头。如 2060 铝锂合金钨极氩弧焊（TIG）焊接时，焊缝中将形成直径可达 2 mm 的气孔，若焊前对板材表面进行处理，即将板材两侧各去掉 0.2~0.3 mm 的表面层，可以消除焊缝气孔的形成[8]。由于 2198Al-Li 合金中的 Mg 元素含量相对较低，使得焊接热裂纹的倾向较大[9]。然而，采用真空电子束焊接技术可以实现传统铝合金的焊接，且可以获得高质量的接头[10]。而目前鲜有关于 2198 铝锂合金的真空电子束焊的相关研究。因此，本研究主要通过改变焊接过程中的扫描波形，对 2198-T8 铝锂合金进行真空电子束对接试验，研究不同扫描波形对焊接接头显微组织和力学性能的影响，为获得高质量的 2198 铝锂合金焊接接头提供试验依据。

1 实 验

试验材料为 2198-T8 态铝锂合金，尺寸为 75 mm×45 mm×1.8 mm。焊前先用铁刷打磨，然后用丙酮擦拭、吹干。试验设备为 KS15-PN150KM 电子束焊机，工作距离(D)为 300 mm，表面聚焦电流 I_f=498 mA，加速电压 U=60 kV、焊接速度 V=1200 mm/min 和电子束流 I_b=6.8 mA，扫描方式分别为无扫描、圆形扫描、锯齿波扫描、椭圆扫描、三角波扫描、圆弧扫描（不同扫描波形下的工艺参数如表 1 所示）得到系列焊缝。焊后使用线切割在焊缝横截面分别切取金相和拉伸试样，图 1 为拉伸试样尺寸图。采用由 HF:HNO_3:HCl:H_2O=1.0 mL:2.5 mL:1.5 mL:95.0 mL 组成的 keller 试剂对金相试样进行腐蚀，通过 XJP-2C 型光学显微镜观察显微组织，并采用 Image Pro Plus 6.0 软件进行晶粒尺寸测量；使用 401MVD 型数显显微硬度计测量接头硬度，载荷为 100 N，加载时间为 5 s。根据 GB/T2651-2008 在 WA-100 型电子万能材料试验机上测试接头抗拉强度，拉伸速率为 2 mm·min^{-1}，取 3 个试样的平均值，拉伸后采用 SEM 分析断口形貌。

收稿日期：2017-07-16

基金项目：国家自然科学基金 (51461031)；江西省教育厅基金 (GJJ150733，GJJ14539)；轻合金加工科学与技术国防重点实验室基金 (gf201501005)；江西省自然科学基金(20132BAB216024)

作者简介：张子阳，男，1996 年生，硕士，南昌航空大学轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室，江西 南昌 330036，E-mail: 15270808960@163.com

2　结果与分析

图 2 为不同扫描波形下接头宏观形貌。显然，当无扫描波形时，焊缝出现咬边和下塌现象，焊缝成形较差，如图 2a 所示。当扫描波形改为圆形后，焊缝出现轻微下塌和部分未焊透（如图 2b）。图 2c（锯齿波扫描）从焊缝的正面来看未发生咬边，但是在焊缝背面却出现了交错的焊透与未焊透形貌。图 2d（椭圆扫描）试样刚好未焊透。图 2e（三角波扫描）与图 2f（圆弧扫描）总体来说是加扫描焊接中表面成形最好的，但是图 2f 出现了背部下凹缺陷。焊缝截面宏观形貌如图 3 所示，图 3a~3f 可以明显观察到焊缝中心出现“洋葱环”，并且“洋葱环”由焊缝中心向熔合区扩张。图 3c、3d、3f 有明显的气孔缺陷，且气孔缺陷均出现在熔合线附近。对图 3e 进行分析得出三角波扫描方式下的焊缝为焊透状态，相比其它扫描波形，焊缝成形较优。一定程度上说明三角波扫描方式对能量的利用率相比其它扫描方式高，且能量密度的分布均匀性较好。

由于图 3c 锯齿波扫描和 3d 椭圆波扫描均出现了不同程度上的缺陷，故选出无扫描、圆形扫描、三角波扫描、圆弧扫描做显微组织分析。图 4 为 4 种扫描方式下焊缝近熔合线显微组织。由图 4 可知，焊缝熔合线附近均出现了独特的细化显微组织，取代了部分柱状晶区域。

从图4a无扫描方式下焊缝近熔合线显微组织可以看出，2198铝锂合金的电子束焊接接头热影响区（heat affected zone，HAZ）较窄，区域范围一般在35 μm左右。熔合区（fusion zone，FZ）附近存在等轴细晶区（equiaxed zone，EQZ），晶粒尺寸约10 μm，区域范围一般在35 μm左右。焊缝中心区（weld metal，WM）为树枝状晶区，总体范围较大，压缩了焊缝边缘柱状晶的生长，其晶粒尺寸约12 μm。图4b圆形扫描和图4d圆弧扫描方式下的焊缝近熔合线显微组织中等轴细晶区与柱状晶交替出现，即出现了温度分层，说明这2种扫描方式下焊缝组织出现了一定程度上的成分偏析。图4c为三角波扫描方式下的铝锂合金焊接接头显微组织，其中大部分为树枝晶组织，在EQZ组织旁有柱状晶组织，此柱状晶组织是焊缝金属凝固时从熔池边界外延生长形成的。2195[11]、1420[12]、2090[13]等铝锂合金的真空电子束焊接接头中同样也存在EQZ，由于铝锂合金中的Ti元素易于与Al形成高熔点的Al_3Ti化合物，在熔池中，这种高熔点化合物会导致固液相界面张力减小，降低异质形核的临界形核功ΔG[14]。熔池边缘的温度要稍高于母材的熔化温度，因此在铝锂合金焊接接头的热影响区与柱状晶区之间存在一层运动较慢的附面层，其中聚集了大量的难溶质点Al_3Ti，又由于Li元素的表面活性作用，导致该窄区域中的形核率相对较高，从而形成了大量的等轴细晶粒。由传统金属凝固理论可得焊缝金属首先从熔池边缘开始凝固，晶粒外延生长形成柱状晶组织，并已证实焊缝金属凝固过程中的联生结晶具有普遍存在性[15]。

对比图 4c 推出圆形扫描和圆弧扫描这 2 种扫描方式下的能量密度在焊接过程中存在一定程度的损失引起了温度分层，导致组织出现成分偏析。3 种扫描方式下，三角波所形成的等轴细晶粒层更为集中且薄，其晶粒度约为 6 μm，熔合区的晶粒也相对细小，所以三角波扫描下焊缝区与热影响区结合比较好。

图 5 为焊缝中心的放大图，其中图 5c 三角波扫描下焊缝中心主要为细小的树枝晶，而图 5a 无扫描、图 5b 圆形扫描和图 5d 圆弧扫描下的焊缝中心的树枝晶都发生了不同程度的长大。随着熔池冷却，柱状晶生长时会将熔合线附近的元素向熔池中聚集，导致熔池中的成分过冷度增大，柱状晶的生长被抑制，大量的柱状晶向树枝晶转化。

表 1　不同扫描波形下的工艺参数

Table 1　Process parameters of 2198 Al-Li alloy with different scanning methods

Scanning methods	Process parameters	Scanning amplitude/mm	Frequency/Hz	Waveform
Non-scanning		-	-	-
Circular scanning		x=y=0.5	500	O
Saw tooth wave scanning	V=1200 mm/min I_b=6.8 mA U=60 kV	x=0.5，y=0.2	500	∿
Elliptical scanning	D=300 mm I_f=498 mA	x=0.6，y=0.4	500	○
Triangle wave scanning		x=0.6，y=0.5	500	N
Circular arc scanning		x=0.6，y=0.5	500	)

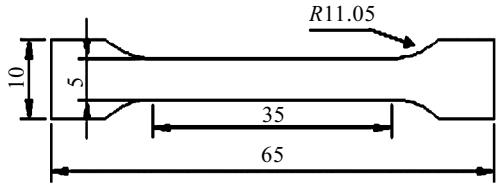


图1　拉伸试样

Fig.1　Tensile specimen

图 6 为无扫描、圆形扫描、三角波扫描、圆弧扫描焊接接头横截面沿中心线显微硬度分布。可以看出 2198 铝锂合金接头强度，是以焊缝中心线为对称轴基本呈现对称分布，焊缝中心区的维氏硬度较高，在硬度($HV_{0.1}$)750~900 MPa 之间，远离焊缝中心处硬度值逐渐下降，而靠近热影响区(HAZ)时硬度值又逐渐回升。对比无扫描、圆形扫描、三角波扫描、圆弧扫描的显

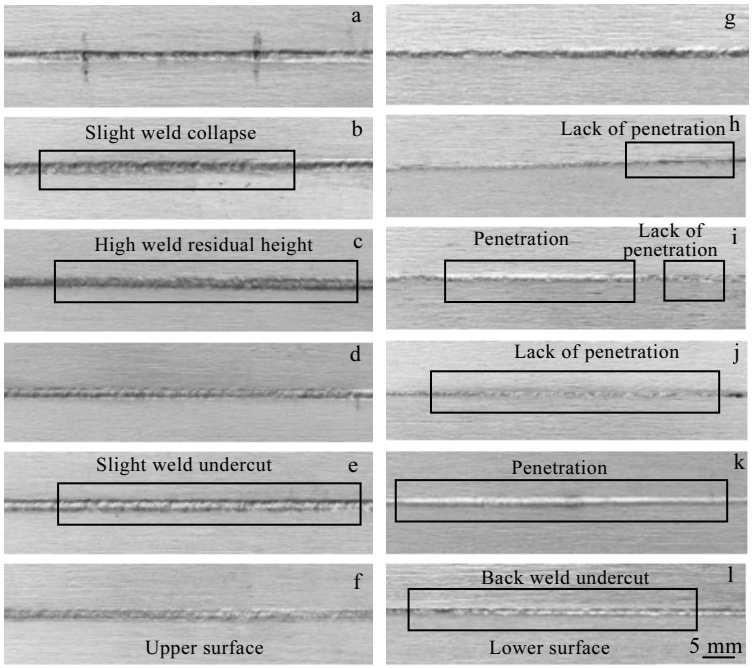


图 2　不同扫描方式下焊缝的宏观形貌

Fig.2　Macromorphologies of the weld joints with different scanning methods: (a~f) upper surface; (g~l) lower surface; (a, g) non-scanning; (b, h) circular scanning; (c, i) saw tooth wave scanning; (d, j) elliptical scanning; (e, k); triangle wave scanning; (f, l) circular arc scanning

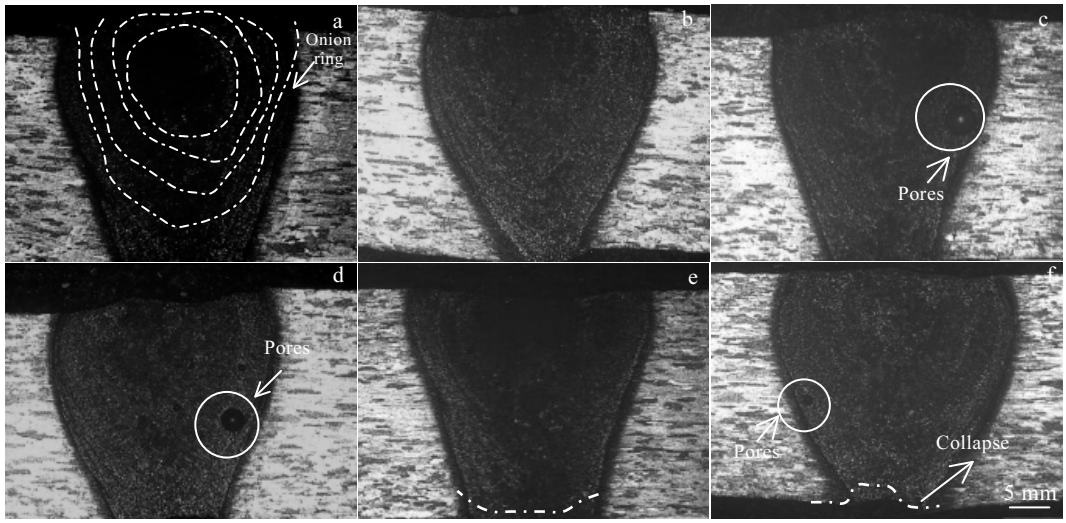


图 3　焊缝截面宏观形貌

Fig.3　Macromorphologies of weld cross section: (a) non-scanning, (b) circular scanning, (c) saw tooth wave scanning, (d) elliptical scanning, (e) triangle wave scanning, and (f) circular arc scanning

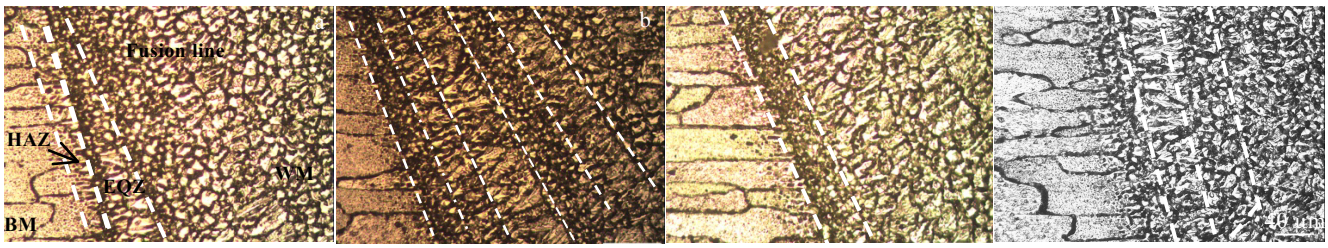


图 4　焊缝显微组织

Fig.4　Microstructures of welded joints: (a) non-scanning, (b) circular scanning, (c) triangle wave scanning, and (d) circular arc scanning

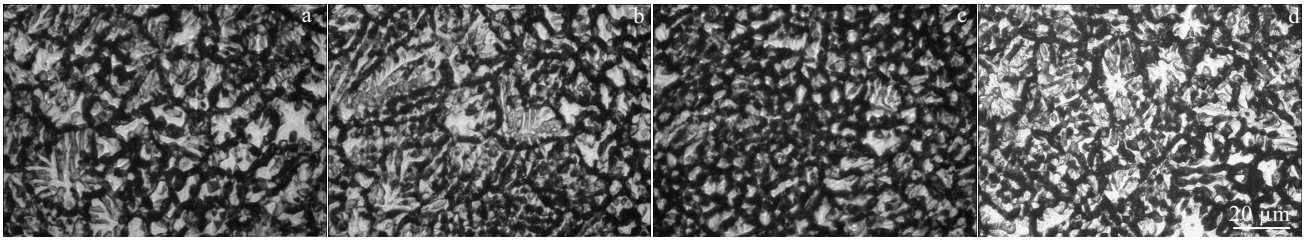


图 5　焊缝中心显微组织局部放大图

Fig.5　Local magnification microstructures of weld center: (a) non-scanning, (b) circular scanning, (c) triangle wave scanning, and (d) circular arc scanning

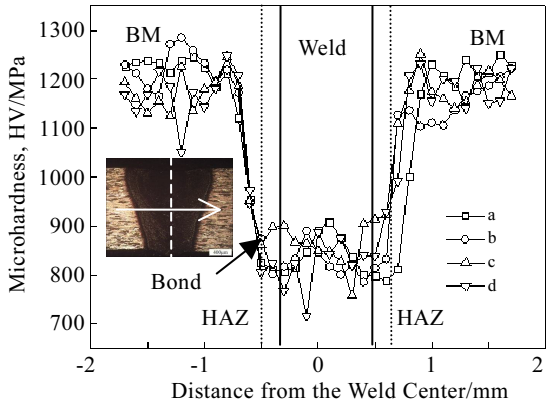


图 6　不同扫描方式下的接头显微硬度曲线

Fig.6　Microhardness curves of joints with different scanning modes: (a non-scanning, b circular scanning, c triangle wave scanning, and d circular arc scanning)

微硬度曲线，可以看出三角波焊缝区域显微硬度的平均值高于圆形扫描，而圆弧扫描的显微硬度值在焊缝区域波动幅度比较大，且平均硬度值比圆形扫描和三角波扫描都要低。母材(base metal，BM)为 T8 态，经固熔热处理后冷加工达到人工时效的状态，产生大量 T1 强化相[16]。经过热处理后，热影响区发生沉淀强化相聚集长大，焊接接头热影响区过时效，出现软化现象。由金相分析可知焊缝中心为细小的树枝晶，所以硬度较高。而远离焊缝中心的位置，晶粒长大，导致硬度降低。焊缝是快速凝固的铸态组织，由于快速加热与冷却，熔池凝固时元素偏析导致固溶体中的过饱和度降低，所以焊缝区显微硬度较熔合区高。

三角波扫描方式下的焊接接头显微硬度较其它试样高。根据霍尔佩奇公式[17]，即

$$HV=H_0+k_Hd^{-1/2} \quad (1)$$

式中：HV为显微硬度；d为晶粒直径；其中H_0和k_H是与硬度测量相关的适当的常数。可以看出，三角波扫描方式下的显微硬度较其它扫描方式下的高是由三角波扫描方式下的晶粒更为细小所致。

不同扫描方式下接头的拉伸曲线如图 7 所示。可以看出当扫描方式由圆弧扫描改变至三角波扫描时，拉伸曲线的趋势大致相同，最高变形位移均在 1.2 mm 左右开始达到屈服状态，而且由拉伸曲线可以明显看出焊接过后的抗拉强度以及延伸率均弱于母材。由表 2 可以看出当扫描方式由圆弧扫描改变至三角波扫描时，焊接接头抗拉强度呈现出递增的趋势。这个结果刚好验证了前面利用霍尔佩奇公式所推论的结果，由于三角扫描方式下的晶粒更为细小所以硬度更高，而在拉伸试验过程中，较细的晶粒结构可以增加位错滑移的距离，减少位错堆积的数量从而阻碍位错运动[18]，故三角波扫描方式下的抗拉强度高于其它扫描方式下的抗拉强度直接证明了组织与性能之间的匹配关系，但均低于母材抗拉强度。对于延伸率来说，当扫描方式由圆弧扫描改变至三角波扫描时焊接接头的

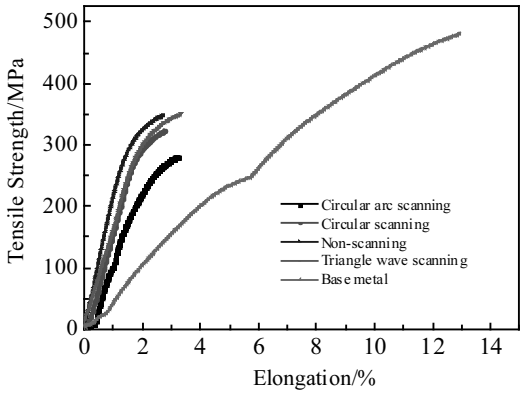


图 7　不同扫描方式接头的拉伸曲线

Fig.7　Tensile curves of welded joints under different scanning waveforms

延伸率增减趋势不同于抗拉强度，而是呈现出先减小后增加的趋势。结果表明，电子束焊接接头的平均抗拉强度为326.5 MPa，拉伸断裂后接头抗拉强度最高可达到母材的71.5%，延伸率最高可达母材延伸率的86.8%。

对 2198-T851 铝锂合金电子束焊接接头的拉伸断口进行 SEM 微观组织观察。焊接接头拉伸时断口位于熔合区。从图 8a 母材断口形貌可以看出，接头断裂形式主要是穿晶断裂且伴有大量韧窝，故母材呈现出典型的韧性断裂特征。图 8b 为三角波扫描下的接头，呈现为穿晶断裂，断裂区分布的韧窝数量多且尺寸小（局部韧窝放大图如图 8c），呈明显的韧性特征，表明接

表 2　不同扫描波形下的拉伸实验数据

Table 2　Tensile test data under different scanning wave forms

Scanning methods	Tensile strength/MPa				Elongation/%			
	a	b	c	Average	a	b	c	Average
Circular arc scanning	290	274	304	289.3	3.1	3.4	3.1	3.2
Circular scanning	327	331	330	329.3	2.9	2.8	2.6	2.8
non-scanning	334	350	342	342	2.8	2.5	2.8	2.7
Triangle wave scanning	344	351	348	347.7	3.5	3.4	3.1	3.3
Base metal	490	492	488	490	12.9	13.1	13.0	13.0

Note: a, b, c represent the three sets of tensile specimens with the same parameters

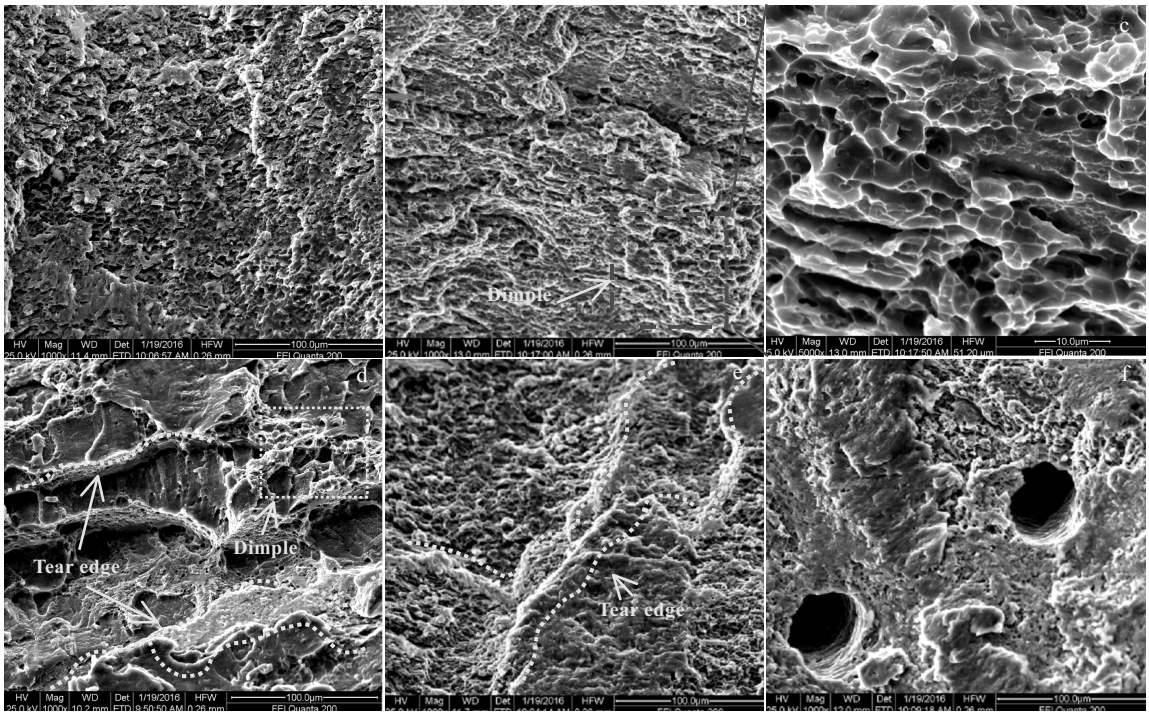


图 8　焊接接头的拉伸断口SEM形貌

Fig.8　SEM tensile fracture of welded joints: (a) base metal, (b) triangle wave scanning, (c) dimple morph, (d) non-scanning, (e) tear edge morphology, and (f) pore defect

头力学性能优良。以聚集长大的连接方式扩展，形成韧窝状断口。图 8d 为无扫描波形下的断口形貌。从图中可以看出断口形貌中既含有撕裂棱也含有韧窝，所以无扫描波形下的断口形貌是穿晶断裂与沿晶断裂的组合。图 8e 为无扫描波形下的断口形貌中的撕裂棱，撕裂棱的存在会产生一定脆性断裂特征。由于裂纹沿晶界扩展时晶内共面滑移仍在继续，于是在已开裂的滑移面上产生突脊，从而形成带有撕裂棱的沿晶断口。图 8f 为无扫描波形下的气孔缺陷形貌，由于无扫描没有三角波扫描下的搅拌充分，因此熔池不能很好的流动，不利于气体的逸出，使得气孔残留在焊缝中，降低接头的强度与韧性。这与拉伸试验结果相符合，即无扫描波形下的延伸率之所以最低是与其断口形貌中含有的孔洞以及撕裂棱等特征有关。综上所述，相比母材断口形貌，焊接接头出现了沿晶断裂，在断口处有明显的撕裂棱存在，这说明焊接接头断裂前塑性变形较少。依据前述的拉伸试验结果，由于不同扫描方式下的能量密度存在差异，故不同扫描方式下焊接接头力学性能也有所不同。三角波扫描接头的抗拉强度和延伸率均高于未加扫描以及其它扫描波形的接头。由此说明，三角波扫描改变了接头的断裂机制，使接头由脆性的沿晶断裂转变成韧性的穿晶断裂，提高了接头的力学性能。相比于其它扫描方式，可以说明三角波扫描以其较高的能量密度更剧烈的搅拌熔池，使得熔池中吸附的气体逸出，减少焊缝中的气孔数量，从而提高接头的力学性能。

3　结　论

1）真空电子束焊接 2198 铝锂合金，相比于其它扫描方式，三角波扫描具有较高的能量密度，可以更剧烈的搅拌熔池，有利于熔池中吸附的气体逸出，减少焊缝中的气孔数量，从而提高接头的力学性能。

2）电子束焊接接头的平均抗拉强度为 326.5 MPa，低于母材的抗拉强度，拉伸断裂后接头抗拉强度最高可达到母材的 71.5%，延伸率最高可达母材延伸率的 86.8%，熔合区为接头的薄弱部位。

3）未加扫描的接头断口为沿晶断裂，而采用三角波扫描的接头表现为塑性较好的穿晶断裂，断口上分布着细小的韧窝，接头具有较好的塑性和抗裂纹扩展能力。

参考文献　References

[1] Williams J C, Starke E A J. *Acta Materialia*[J], 2003, 51(19): 5775

[2] Liu Bing(刘　兵), Peng Chaoqun(彭超群), Wang Richu(王日初) *et al*. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* (中国有色金属学报)[J], 2010, 20(9): 1705

[3] Lippold J C, Lin W M. *Materials Science Forum*[J], 1996, 217-222: 1685

[4] Xing Li(邢　丽), Song Xiao(宋　骁), Ke Liming(柯黎明). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2014, 24(7): 1714

[5] Xiao R S, Zhang X Y. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2014, 16(2): 166

[6] Ravindra A, Dwarakadasa E S. *Journal of Materials Science*[J], 1993, 28(12): 3173

[7] Xiao Rongshi(肖荣诗), Yang Wuxiong(杨武雄), Chen Kai(陈　锴). *Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2007, 34(Sl): 239

[8] Yang Wuxiong, Zhang Xinyi, Xiao Rongshi. *Chinese Journal of Lasers*[J], 2013, 40(7): 0 703 001

[9] Lin Kaili(林凯莉), Yang Wuxiong(杨武雄), Lv Junxia(吕俊霞) *et al*. *Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2014, 41(1): 84

[10] Ravindra A, Dwarakadasa E S. *Journal of Materials Science* [J], 2010, 28(12): 3173

[11] Houkh. *J Mater Sci Lett*[J], 1996, 15(3): 208

[12] Shi Y, Zhong F, Li X *et al*. *Materials Science and Engineering A*[J], 2007, 465(1): 153

[13] Lin Dechao (林德超), He Yong(贺　勇), He Yunjia(贺运佳) *et al*. *Materials for Mechanical Engineering*(机械工程材料)[J], 1996(4): 10

[14] Mollan P A, Srivatsan T S. *Journal of Materials Science*[J], 1990, 25: 3374

[15] Nakagawa H, Katoh M, Matsuda F. *Trans of JWS*[J], 1970(1): 94

[16] Lynch S P. *Materials Science and Engineering A*[J], 1991, 136: 25

[17] Sato Y S, Urata M, Kokawa H *et al*. *Materials Science and Engineering A*[J], 2003, 354: 298

[18] Xu W F, Zhu H Q, Li F *et al*. *Materials & Design*[J], 2013, 47: 599

Effect of Scanning Mode on Microstructure and Mechanical Properties of 2198 Al-Li Alloy Joint Fabricated by Electron Beam Welding

Zhang Ziyang, Wang Shanlin, Ke Liming, Li Juan

(National Defence Key Disciplines Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology,
Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Vacuum electron beam welding of 2198-T8 aluminum lithium alloy sheet with a thickness of 1.8 mm was carried out. The influence of different scanning modes on weld formation and joint mechanical properties was investigated, as well as the microstructure and mechanical properties of the welding joint under the optimal welding process. The results show that when the working distance is 300 mm, the acceleration voltage (U) is 60 kV, the focusing current (I_f) is 498 mA, the welding speed (V) is 1200 mm/min, and the electron beam (I_b) is 6.8 mA, the welding joint without the addition of scanning are formed well without macro porosity defects. According to the comparison of welding with scanning modes under the same parameters, we derive that the hardness values and tensile strength of the welding joint are improved when adding triangle wave scanning in the process of welding. The average tensile strength of welded joint is 326.5 MPa, the fracture strength of the joint is 71.5% of that of the base metal, and the elongation is up to 86.8% of the base metal elongation. The weld fusion zone is the weakest in the weld zone.

Key words: aluminum-lithium alloy; electron beam welding; weld formation; mechanical property

---

Corresponding author: Wang Shanlin, Ph. D., Associate Professor, National Defence Key Disciplines Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, P. R. China, E-mail: slwang70518@nchu.edu.cn