

典型焊接参数对铝锂合金 FSW 对接接头疲劳性能的影响*

Influence of Typical Welding Parameters Process on Fatigue Properties of Al-Li Alloy FSW Butt Joint

中航工业北京航空制造工程研究所
北京航空航天大学
中国商飞上海飞机制造有限公司

董春林 王立东 孟强 栾国红
曲文卿 张丹丹
杨模聪 陈洁

[摘要] 采用疲劳试验机对3种不同对接工艺的Al-Li-S4铝锂合金FSW对接接头及母材进行了疲劳性能测试,并采用光学显微镜和扫描电镜对组织和断口进行了分析。结果表明:在210MPa应力水平下,Al-Li-S4-T8铝锂合金母材在疲劳寿命达到200万次;在600/400、800/80、800/200 3种典型FSW工艺条件下,800/200参数接头疲劳性能最优,在170MPa应力水平下,接头疲劳寿命可达200万次;Al-Li-S4合金FSW接头疲劳断裂大部分从焊缝表面起裂,这可能与FSW过程中金属材料的周期性流动和周期性微观组织使焊缝内部出现强度薄弱区或应力集中有关。

关键词: 搅拌摩擦焊 对接接头 微观组织 疲劳性能

[ABSTRACT] The fatigue properties of butt joints of Al-Li-S4 Al-Li alloy under different FSW Parameters is inspected by fatigue-testing machine microstructures and fractures are analyzed by OM and SEM. The result shows that, the fatigue life of Al-Li-S4 base metal is 2 million times under 210MPa stress level. For 600/400, 800/80, 800/200 processes, the fatigue property of butt joints under 800/200 is better than others, under 170MPa stress level, the fatigue life of 800/200 joint is about 2 million times. In the fatigue experiment, fatigue cracks of FSW joints initiate at the surface of joint mostly, this may be associated with low strength areas or stress concentration which appear in the joint because of the metal material cyclical flows and periodic microstructures in FSW process.

Keywords: Friction stir welding Butt joints Microstructure Fatigue properties

搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)作为一种新型的固相连接技术,已经在车辆、铁路、航空、航天等领域得到应用^[1-2]。凭借优质、高效、绿色等优势,FSW

的应用领域日益扩展,特别是在铝合金的焊接方面取得了巨大成功,并且逐步向新型铝合金或非铝基金合金拓展^[3-6]。

Al-Li系合金具有密度低、低温性能优良、比强度高、抗腐蚀以及超塑成型性能优良等一系列优点,未来将有可能成为新一代航空航天用结构材料^[7-9]。在Al-Li合金FSW接头的力学性能中,疲劳性能在很大程度上决定着焊接结构安全可靠性和使用寿命。本文针对新型第三代铝锂合金板材,开展FSW工艺试验,并对不同对接参数的FSW接头进行了疲劳性能检测,通过组织观察、性能测试、断口形貌分析接头在循环载荷作用下的疲劳行为。本研究对Al-Li合金FSW焊接结构设计、断裂安全评定具有参考意义。

1 试验材料及方法

试验材料为T8态2.0mm厚Al-Li-S4铝锂合金轧制板材,化学成分如表1所示。试验前将板材裁剪为400mm×150mm,铣削焊接面,用砂纸打磨焊缝附近区域,再用酒精擦拭,将焊接面清理干净后备焊。焊接搅拌头为双圆环轴肩,直径为10mm,锥形无螺纹搅拌针,针长1.8mm,根部直径为3.0mm。焊接设备为北京航空制造工程研究所FSW-LM2-3012中型二维搅拌摩擦焊机,焊接倾角为2.5°。经前期工艺试验,筛选出静强度较高的600/400、800/80、800/200(转速/焊速,转速单位:r/min,焊速单位:mm/min)3种参数进行焊接试验。金相组织试样垂直焊缝的方向截取,经研磨、抛光后,用混合酸溶液(1%HF+1.5%HCl+2.5%HNO₃)进行腐蚀,利用Olympus B×51M光学显微镜对焊缝组织形貌以

表1 Al-Li-S4铝锂合金的化学成分(质量分数) %

Li	Fe	Cu	Mn
0.72	0.026	3.56	0.30
Mg	Zn	Si	Al
0.72	0.34	0.025	余量

* 航空科学重点基金项目(2009ZE25007)资助。

及不同焊缝区域的显微组织进行观察。疲劳试验参照 HB 5287-96 金属材料轴向加载疲劳试验方法进行, 试验设备为 GZ-100C 型微机控制高频疲劳试验机, 振频 100Hz。

2 试验结果与分析

2.1 组织分析

图 1 给出了 3 种 FSW 参数对接接头的宏观形貌。可以看到: 焊缝区上宽下窄, 呈锥状, 与搅拌针形状相似。焊缝横截面分为 3 个区域: 焊核区(NZ)、热机影响区(TMAZ)、热影响区(HAZ); 焊核区受到搅拌针及轴肩剧烈摩擦产生的局部高温作用, 组织发生动态再结晶, 形成细小的等轴晶组织^[10-11]。前进侧的 TMAZ 与焊核区分界明显, 后退侧的 TMAZ 与焊核区分界模糊。这主要是由于前进侧金属直接受到搅拌针的剪切作用, 板条状母材组织被明显拉长; 后退侧金属则受到搅拌针前面金属的润滑作用, 减小了搅拌针的摩擦, 剪切应力较前进侧要小, 因此, 组织变形较小。

图 2 分别给出了 3 种参数接头横截面不同区域的

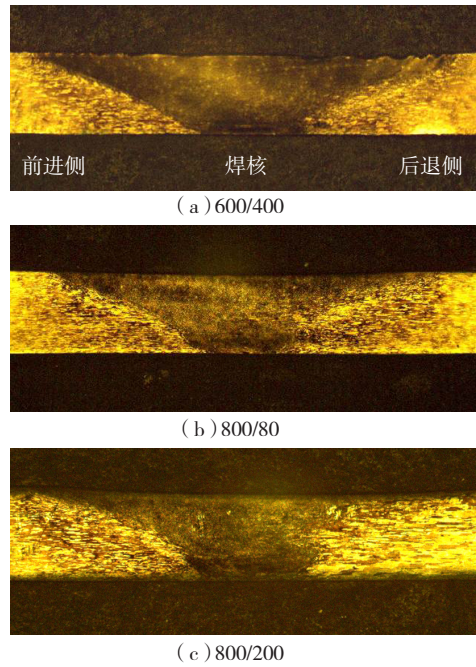


图1 接头宏观组织照片

Fig.1 Macrostructures of butt joints under different processes

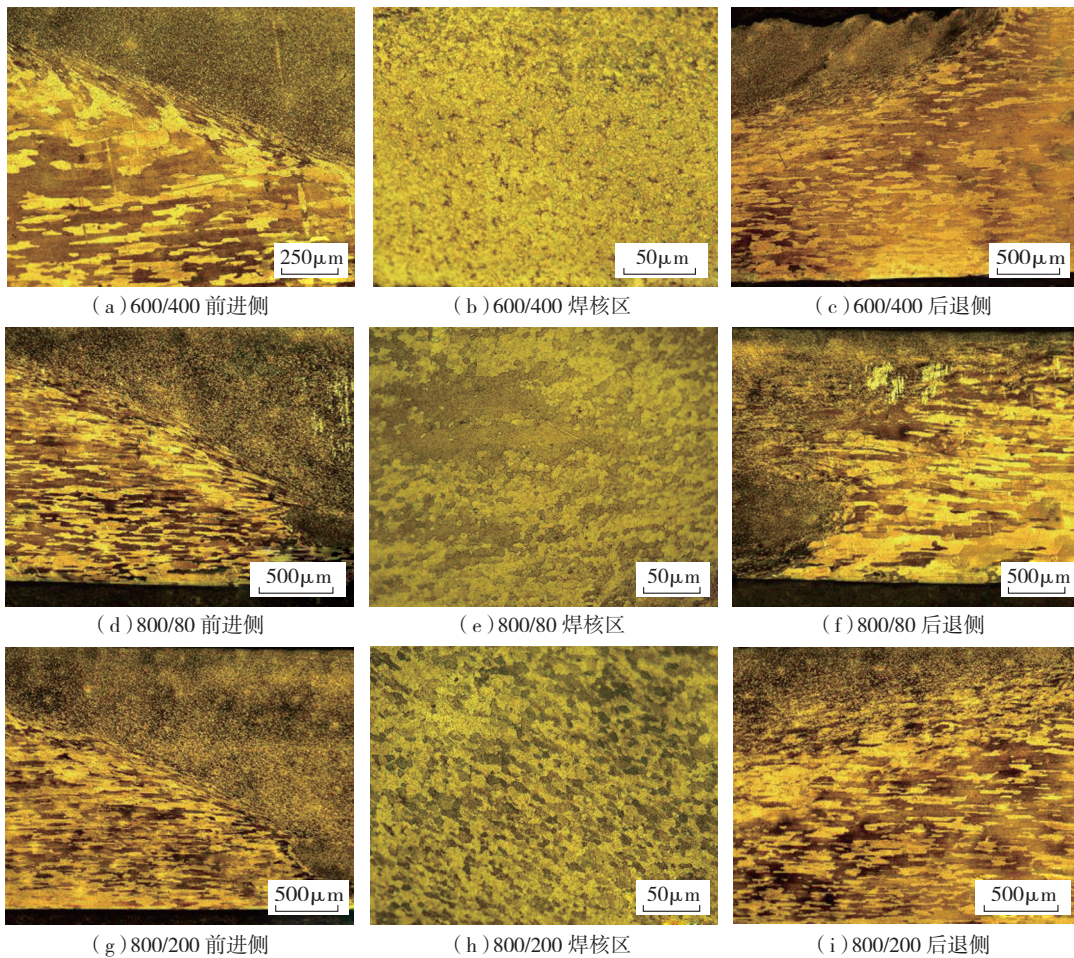


图2 不同工艺参数对接接头微观组织

Fig.2 Microstructure of butt joints under different welding processes

微观组织。由图 2(a)~(c)可以看出,由于 600/400 参数转度低焊速高,单位长度焊缝上的热输入量较小,焊核区受到搅拌头的强烈机械搅拌作用,但是没有足够的热量发生回复、再结晶,因此焊核区晶粒十分细小。同时,焊缝金属塑化不足,前进侧及后退侧热机影响区较窄,因此,接头宏观照片上焊缝区域边界清晰。图 2(d)~(e)给出了 800/80 参数下 Al-Li-S4 板材 FSW 对接接头不同区域的微观组织形貌。由于转速高、焊速低,单位长度焊缝上的热输入较高,焊核区再结晶晶粒尺寸明显高于 600/400 参数接头,同时,热机影响区较宽,体现了焊缝金属良好的流动性。800/200 参数热输入量恰好能使材料充分塑化而不至于发生晶粒过度生长,因此,焊核区晶粒尺寸及热机影响区厚度适中。

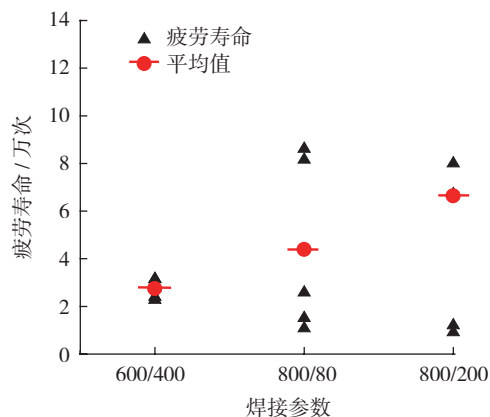
2.2 疲劳性能

拉伸疲劳试验采用正弦波加载,应力比 $R=0.1$,最大应力参考预估值;控制试件表面温度为 20~70℃,振频 100Hz。采用 origin 中自定义函数生成拟合曲线,选择 $y=ax^b$ 为拟合函数,因为疲劳曲线一般服从 $S^mN=C$ 规律(S 为应力, N 为循环次数),通过拟合生成数据,可以计算出对应的 m 值和 C 值,最后得到 $S-N$ 疲劳曲线。图 3 为 FSW 3 种工艺参数下 Al-Li-S4 对接接头在 280MPa 和 250MPa 2 种应力水平下的疲劳寿命对比。可以看出:在 2 种应力水平下,800/200 参数接头平均疲劳寿命明显高于 600/400 和 800/80 接头,但是接头疲劳寿命分散度略大。

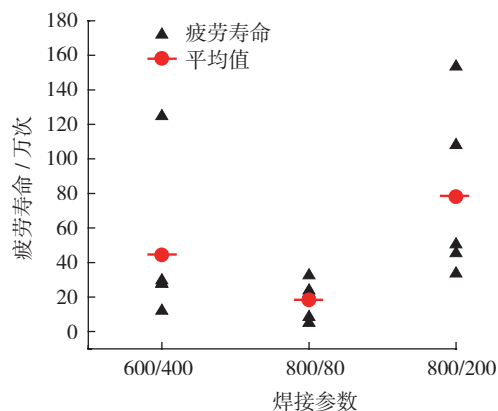
经过在高应力水平下的筛选,选取 800/200 接头进行进一步疲劳试验,并绘制 $S-N$ 曲线,得出 800/200 工艺参数接头的 $m=13.51$, $C=3.81 \times 10^{37}$,同时绘制母材 $S-N$ 曲线以作比较,试验结果如图 4 所示。可以看出,实测 800/200 接头 200 万次的条件疲劳极限约为 170MPa,低于拟合值 210MPa,这主要是由于拟合曲线时考虑了离散点的影响。

2.3 断口分析

图 5 分别给出了 3 种参数下 Al-Li-S4 铝锂合金 FSW 接头疲劳断口的疲劳起裂源、疲劳裂纹扩展区及瞬断区的 SEM 照片。图 5(a)~(c)为 600/400 参数接头,可以看出,疲劳拉伸过程中裂纹首先从试样表面起裂,然后成扇形向焊缝内部扩展,最后发生瞬断。裂纹多沿晶界扩展,并且存在大量的二次裂纹。瞬断区表现出剪切断裂特征,存在大量较浅的韧窝。图 5(d)~(f)为 800/80 参数接头疲劳断口形貌,裂纹依然从试件表面起裂,向晶体内部扩展,起裂源附近存在放射纹路和台阶,裂纹多沿着晶界扩展,并且存在大量的二次裂纹。裂纹扩展区发现疲劳条带,体现出疲劳断口的特征。图 5(g)~(i)为 800/200 参数接头疲劳断口形貌,可以看出,疲劳裂纹从



(a) 应力水平 280MPa



(a) 应力水平 250MPa

图3 3种工艺接头的疲劳寿命

Fig.3 Fatigue life of joints under three different stress levels

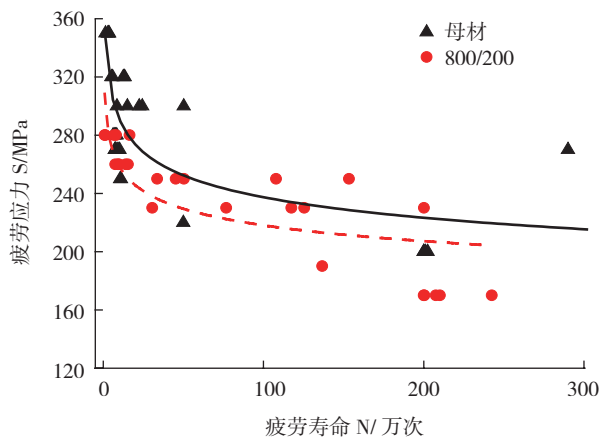


图4 800/200接头及母材S-N曲线

Fig.4 Fatigue S-N curves of 800/200 butt joint and base metal

焊缝表面起裂,呈扇形扩展,表现出典型的单源起裂特征,裂纹多沿着晶界扩展,并且存在大量的二次裂纹,断口中存在明显的疲劳区域,裂纹进入扩展区之后首先沿着最大剪切力方向扩展,随后裂纹逐渐与应力垂直,随后进入快速扩展区域。

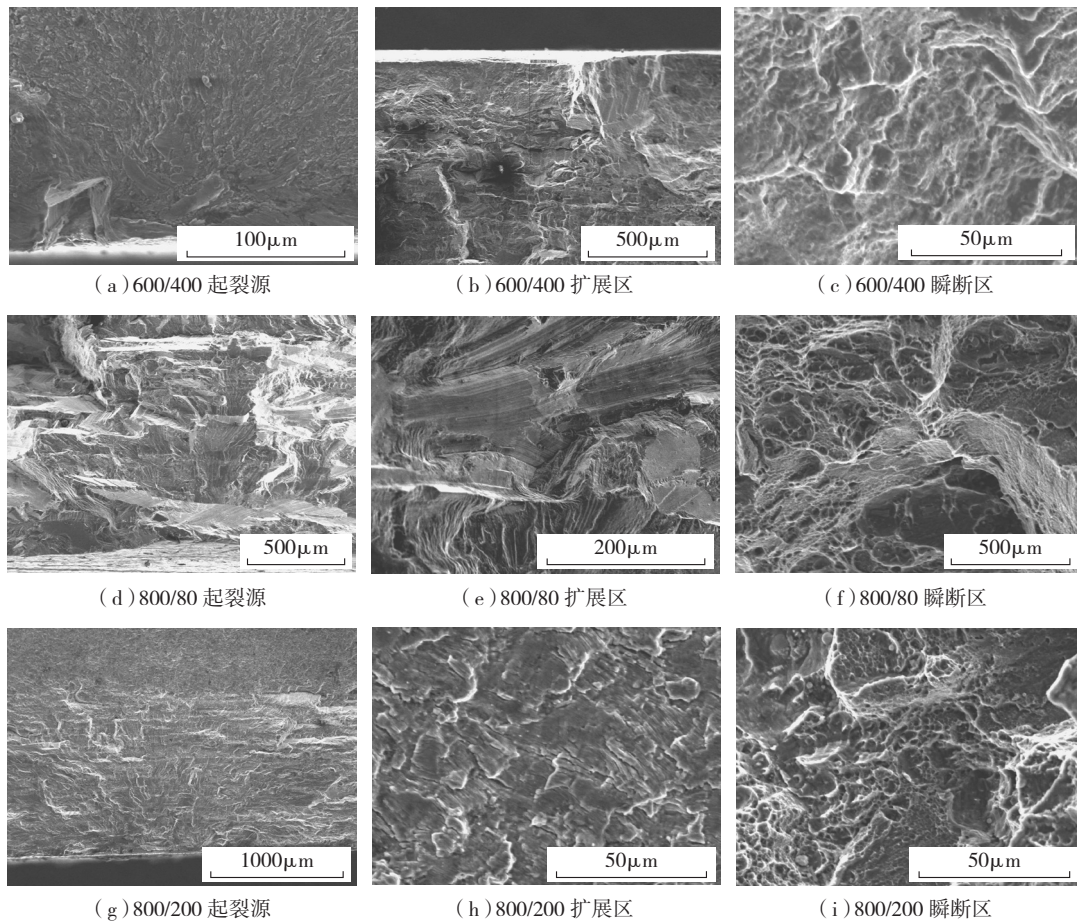


图5 断口形貌

Fig.5 Morphology of fatigue crack

由疲劳断口裂纹源位置可以看出,对于 Al-Li-S4 铝锂合金 FSW 对接接头而言,焊缝表面更容易萌生裂纹。这可能与 FSW 焊缝表面上周期性分布的“弧纹”或称“鱼鳞纹”有关,“弧纹”是焊缝金属材料周期性流动的表现,其周期跨度与“焊速/转速”的比值相一致,金属流动以及显微组织的周期性必然导致焊缝力学性能的周期性变化,焊接接头受载时,焊缝局部就会出现强度薄弱区,或者因弹性、塑性变形不协调引发应力集中,进而萌生裂纹^[12],使接头的疲劳寿命降低。

3 结论

(1) Al-Li-S4-T8 铝锂合金母材 200 万次疲劳极限约为 210MPa。

(2) 3 种典型参数下 800/200 参数接头疲劳性能最优,200 万次疲劳极限可达 170MPa,为母材的 81%。

(3) Al-Li-S4-T8 铝锂合金 FSW 接头疲劳断裂大部分从焊缝表面起裂,这可能与 FSW 过程中金属材料的周期性流动和周期性微观组织使焊缝内部出现强度薄弱区或应力集中有关。

参考文献

- [1] 栾国红,郭德伦,张田仓,等. 革命性的宇航结构件焊接新技术: 搅拌摩擦焊. 航空制造技术,2002(12): 33-39.
- [2] Paglia C S, Buchheit R G. A look in the corrosion of aluminum alloy friction stir welds. Scripta Materialia,2008,58: 383-387.
- [3] Jata K V. Friction Stir Welding of High Strength Aluminum Alloys. Materials Science Forum,2000,331-337: 1701-1712.
- [4] 王希靖,孙桂萍,张杰,等. 焊后热处理对高强铝合金搅拌摩擦焊接头的影响. 中国有色金属学报,2009,19(3):484-489.
- [5] Eberl F, Gardiner S, Campanile G, et al. Age formable panels for commercial aircraft. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering,2008,222(6): 873-886.
- [6] Sutton M A, Yang B, Reynolds A P, et al. Micro-structural studies of friction stir welds in 2024-T3 aluminum. Material Science and Engineering A,2002,323(1):160-166.
- [7] 冯吉才,王大勇,王攀峰. 锥形光头搅拌针搅拌摩擦焊接铝锂合金接头组织及力学性能. 中国机械工程,2004,15(10): 932-935.
- [8] 束彪,国旭明,张春旭. 2195 铝锂合金搅拌摩擦焊接头组织及性能. 航空材料学报,2010,30(4): 12-15.

(下转第 133 页)

耐腐蚀性能的影响。由于缺陷的存在减少了结构承载的有效面积,更主要的是在缺陷周围产生了应力集中。因此,焊接缺陷对结构的净载强度、疲劳强度、脆性断裂以及抗应力腐蚀开裂都有重大的影响。

常见的焊接缺陷有焊缝外形尺寸不符合要求、弧坑、焊瘤、金属未焊透、过热、零件咬边、夹渣、表面的裂纹以及气孔等。

不锈钢蒙皮零件焊接后,也可能产生焊缝缺陷,为了保证零件的焊接质量和结构完整性,一般采用非破坏性检验方式中的外观检查 and 无损检验进行缺陷检测,无损检验方式中一般采用磁粉探伤、渗透探伤和超声波探伤等方法。

3.1 外观检查

用放大镜、卡尺和专用工具对焊缝作外观检验和测量,能发现外部裂纹、气孔和咬边。

3.2 无损检验

无损检验之所以广泛应用,是因为其有以下优点:

(1)可直接对所生产的产品进行试验,而与零件的成本或可得到的数量无关,除去坏零件之外也没多大损失;

(2)既能对产品进行普验,也可对典型的抽样进行试验;

(3)对同一产品既可同时又可依次采用不同的试验方法;

(4)对同一产品可以重复进行同一种试验;

(5)可对使用着的零件进行检测;

(6)可直接测量运转使用期内的累计影响;

(7)可查明失效的机理;

(8)试样很少或无需制备;

(9)为了应用于现场,设备往往是携带式的;

(10)劳动成本很低,对同类零件进行重复性试验时更是如此。

3.2.1 磁力探伤

磁力探伤是通过对铁磁材料进行磁化所产生的漏磁场,来发现其表面或近表面缺陷的无损检验法。

磁力探伤可发现不锈钢蒙皮零件焊接焊缝中内部裂纹、金属未焊透处和夹渣。

磁力探伤包括磁粉法、磁敏探头法和漏磁法。

铁磁材料的工件被磁化后,在其表面和近表面的缺陷处磁力线发生变形,逸出工件表面形成漏磁场。用磁粉法、磁敏探头法和漏磁法将漏磁场检测出来,进而确定缺陷的位置(有时包括缺陷的形状、大小和深度),这就是磁力探伤基本原理。

3.2.2 渗透探伤

渗透探伤是利用带有荧光染料(荧光法)或红色燃

料(着色法)渗透剂的渗透作用,显示缺陷痕迹的无损检验法。可用于各种金属材料和非金属材料构件表面开口缺陷的质量检验。

渗透探伤的基本原理是:在被检工件表面涂覆某些渗透力较强的渗透液,在毛细作用下,渗透液被渗入到工件表面开口的缺陷中,然后去除工件表面上多余的渗透液(保留渗透到表面缺陷中的渗透液),再在工件表面上涂上一层显象剂,缺陷中的渗透液在毛细作用下重新被吸到工件的表面,从而形成缺陷的痕迹。根据在黑光(荧光渗透液)或白光(着色渗透液)下观察到的缺陷显示痕迹,作出缺陷的评定。

3.2.3 超声波探伤

脉冲反射法是超声波探伤中应用最广的方法。其基本原理是将一定频率间断发射的超声波(称脉冲波)通过一定介质(称耦合剂)的耦合传入工件,当遇到异质界面(缺陷或工件底面)时,超声波将产生反射,回波(即反射波)为仪器接收并以电脉冲信号在示波屏上显示出来,由此判断缺陷的有无,并进行定位、定量和评定。现代超声波探伤器能显现直径小于1~2mm的,甚至0.1mm的裂纹、未焊透、夹渣和其他夹杂物,因此对于不锈钢蒙皮零件焊接是适用的。

4 结束语

通过对航空不锈钢蒙皮从蒙皮成形过程到焊接过程进而到装配过程进行全过程的工艺控制及进行缺陷检测,满足了后续的装配要求。通过实施有效的检测,保证了焊缝的质量,从而保证了焊件的结构完整性。

参考文献

- [1] 邓文英. 金属工艺学(上册). 3版. 北京: 高等教育出版社, 1964.
- [2] 王敏. 激光焊接技术与航空制造. 航空制造技术, 2009(9): 48.

(责编 三丰)

(上接第128页)

- [9] Triolo A, Lin J S, Triolo R. Early and late stages of demising of a commercial Al-Li alloy. Journal of Materials Science, 2002, 37(6): 1207-1213.
- [10] 谭新伟, 曲文卿, 姚君山. 铝合金搅拌摩擦焊接头组织与性能. 中国科技论文在线, 2011, 6(2): 115-120.
- [11] 刑丽, 柯黎明, 刘鸽平, 等. 铝合金LD10的搅拌摩擦焊组织及性能分析. 焊接学报, 2002, 23(6): 25-33.
- [12] Cui G R, Ma Z Y, Li S X. Periodical plastic flow pattern in friction stir processed Al-Mg alloy. Scripta Materialia, 2008, 58(12): 1082-1085.

(责编 小城)