

铝锂合金搅拌摩擦焊搭接接头疲劳行为研究*

Fatigue Behavior of Al-Li Alloy FSW Lap Joint

中航工业北京航空制造工程研究所 孟强 张坤 董春林 栾国红
北京航空航天大学 曲文卿 张丹丹
中国商飞上海飞机制造有限公司 杨模聪 陈洁

[摘要] 针对 Al-Li-S4 和 2099 铝锂合金 FSW 搭接接头,采用金相组织观察、疲劳性能测试、*S-N* 曲线绘制、断口分析等手段,考察了典型焊接参数下铝锂合金搭接接头的疲劳性能、微观组织,分析了接头断裂形式。
关键词: 铝锂合金 搅拌摩擦焊 搭接 疲劳性能

[ABSTRACT] The fatigue properties, microstructures, fractures of friction stir welded Al-Li-S4 and 2099 Al-Li alloy lap joints are studied by using optical microscope, fatigue test, and scanning electron micrograph.

Keywords: Al-Li alloy Friction stir welding Lap joint Fatigue properties

搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)是利用摩擦热和机械搅动使焊接材料发生塑化、混合、回复、再结晶等一系列过程,进而形成致密焊缝的一种固相焊接方法。焊接过程高效、绿色、独特,能够避免统熔焊时产生气孔、元素烧损等焊接问题。经过近 20 年的发展,FSW 技术已经成为航空、航天、列车、船舶等领域的技术闪光点,展现出非常广阔的开发和应用前景^[1-5]。

铝锂合金具有密度低、比强度高、耐腐等优点,应用于飞机结构时,相比常规铝合金可减重 10%~15%。目前,铝锂合金已经发展到第三代,其性能优势更加明显,尤其是 Al-Li-S4 这种最新型铝锂合金板材,将可能取代现用的 2XXX 系列和 7XXX 系列铝合金,成为新一代航空航天结构材料^[6-8]。大型飞机机身壁板结构中普遍采用“Z”或“L”形加强筋条与蒙皮搭接的结构,通常采用铆钉连接,其工序复杂,生产效率很低。此外,大量使用铆钉增加了结构重量,大幅降低连接面积,导致壁板结构最大承载能力下降。使用 FSW 代替铆接能够显著降低结构重量、提高结构件整体性能。但是,目前关于第三代铝锂合金的 FSW 报道较少,针对 Al-Li-S4 的更是处于几乎空白的状态。本研究以 Al-Li-S4 板材与 2099 铝锂合金挤压型材搭接结构为对象,通过焊接

试验、静力及疲劳性能测试、接头组织观察、断口分析,初步了解 Al-Li-S4 铝锂合金的 FSW 可焊性,为铝锂合金焊接结构的设计、断裂与安全评定提供重要的参考数据,为铝锂合金的 FSW 技术应用于飞机结构打下基础。

1 试验材料和方法

试验材料为 2.0mm 厚度的 Al-Li-S4 轧制板材及搭接 2099 铝锂合金“Z”形挤压型材,型材壁厚 2.0mm,焊接结构如图 1 所示,2 种材料的化学成分如表 1 所示。焊接设备为中航工业北京航空制造工程研究所 FSW2-4CX-006 搅拌摩擦焊机,搅拌头为双圆环轴肩及锥形带螺纹搅拌针,轴肩直径 10.0mm,搅拌针长度为 2.5mm。焊前将板材裁剪为 400mm × 240mm,2099 型材裁为 400mm 长,先用砂纸打磨板材及型材搭接面,再用酒精擦拭。通过前期工艺试验筛选出 3 种静力强度较好的焊接参数,分别为 600/200、800/200、800/400 (转速 / 焊速,转速单位: r/min,焊速单位: mm/min)。疲劳拉伸试样垂直于焊缝截取,利用 GZ-100C

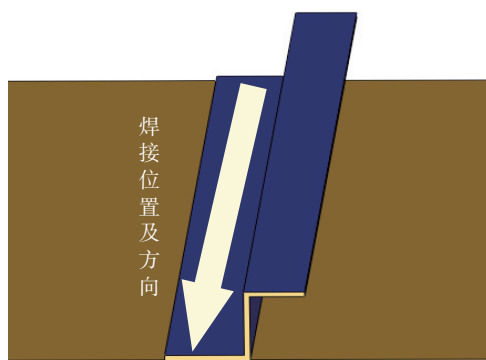


图1 焊接结构

Fig.1 Welding structures

表1 Al-Li-S4及2099铝锂合金的化学成分(质量分数) %

材料	Li	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Si	Al
Al-Li-S4	0.72	0.026	3.56	0.30	0.72	0.34	0.025	余量
2099	1.80	0.031	2.34	0.29	0.26	0.62	0.023	余量

* 航空科学重点基金项目(2009ZE25007)资助。

型高频疲劳试验机在室温(20℃)条件下进行疲劳试验,正弦波加载,应力比 $R=0.1$,振频100Hz。金相试样沿垂直焊缝方向截取,经研磨、抛光后,用混合酸溶液(1%HF+1.5%HCl+2.5%HNO₃)进行腐蚀,采Olympus B×51M光学显微镜观察并记录组织形貌。利用JSM-5800扫描电镜观察疲劳断口形貌。

2 试验结果与分析

2.1 接头静力及疲劳性能

表2给出了不同FSW工艺参数下搭接接头的静力拉伸性能。可以看出,3种参数焊接接头的抗拉强度相差不大,其中800/200参数下接头强度略低,但强度系数依然达到88.5%。600/200及800/400参数下接头强度系数达90%以上。这说明,就静力强度而言,Al-Li-S4和2099搭接结构对FSW具有较好的参数适应性。

表2 母材及FSW接头静力性能

参数 / (r/min, mm/min)	抗拉强度 / MPa	强度系数 / %
母材	539	-
600/200	486	90.2
800/200	477	88.5
800/400	487	90.4

图2(a)给出了3种工艺焊接接头在320MPa应力水平下的疲劳寿命,可以看出,600/200、800/400参数接头的疲劳性能明显低于800/200。因此,对800/200参数搭接接头进行进一步疲劳性能检测,按照函数 $y=ax^b$ 拟合曲线,同时使疲劳曲线服从 $S^mN=C$ 规律,即得 $m=3.30, C=5.37 \times 10^{12}$,绘制疲劳S-N曲线如图2(b)所示。从图2(b)中可以看出,800/200参数接头200万次条件疲劳极限约为80MPa。

2.2 微观组织

图3给出了3种FSW工艺参数下接头横截面的金相组织形貌。Al-Li-S4母材晶粒粗大,呈长条形,是典型的轧态组织,2099为细小的等轴晶粒。各参数焊缝前进侧搭接界面几乎完全消失,后退侧存留着清晰的界面。图3(a)为600/200参数搭接接头组织形貌,焊核区前进侧发现细小孔洞缺陷,直径约为30μm,后退侧搭接界面中夹杂黑色线条。800/200参数接头组织中未发现缺陷,前进侧界面完全消失,后退侧界面结合紧密,说明此参数下焊缝材料流动性较好、混合充分,如图3(b)所示。图3(c)为800/400参数下搭接接头组织,前进侧能看出明显的“洋葱环”组织,搭接界面发生严重的“Z”形扭曲,但无明显缺陷,后退侧界面中发现黑色线条,说明此处界面尚未完全消失,材料混合不充分,这可

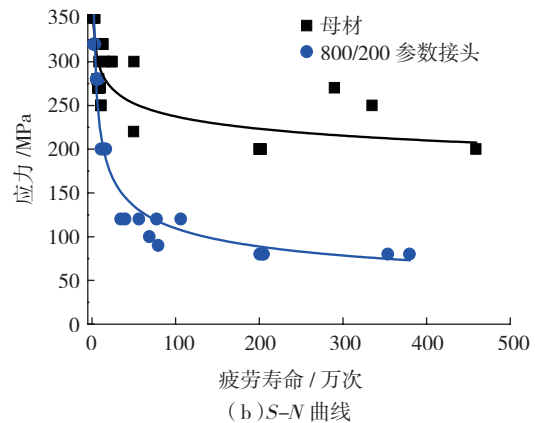
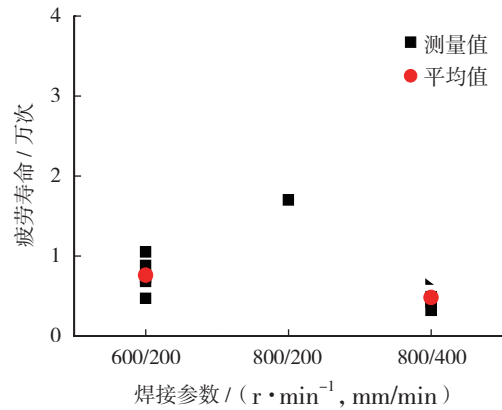


图2 接头疲劳性能

Fig.2 Fatigue properties of joints

能与焊速过快,搅拌不充分有关。

由此可见,对于Al-Li-S4和2099搭接FSW结构而言,600/200参数转速较低,热输入不足,焊缝材料流动性不足;800/400参数焊速过快,单位长度焊缝上的热输入量较低,而且搅拌头对材料的搅动时间较短,材料混合不充分,导致后退侧界面不能完全消失。疲劳试验加载过程中,存在于焊接接头中的各类微小缺陷都会成为敏感的裂纹源,导致材料过早断裂,因此,600/200、800/400参数下,接头疲劳寿命很低。800/200参数下,焊缝材料的塑化程度和搅拌混合较为充分,无缺陷,因此,接头疲劳寿命显著提高。

2.3 断口形貌

图4给出了600/200参数接头疲劳断口形貌。320MPa应力水平下,试样疲劳寿命较低,为10500次。疲劳试样在前进侧断裂,由图4(a)可以看出,裂纹从焊缝表面向内部扩展,为多源起裂形式,靠近源区存在垂直于扩展方向的二次裂纹。扩展区疲劳条带较浅且粗,条带间距较大,如图4(b)所示。瞬断区部分韧窝中心存在微孔,较大的韧窝内出现蛇形滑移的特征,韧窝周边塑性变形大,形成撕裂棱,如图4(c)所示。

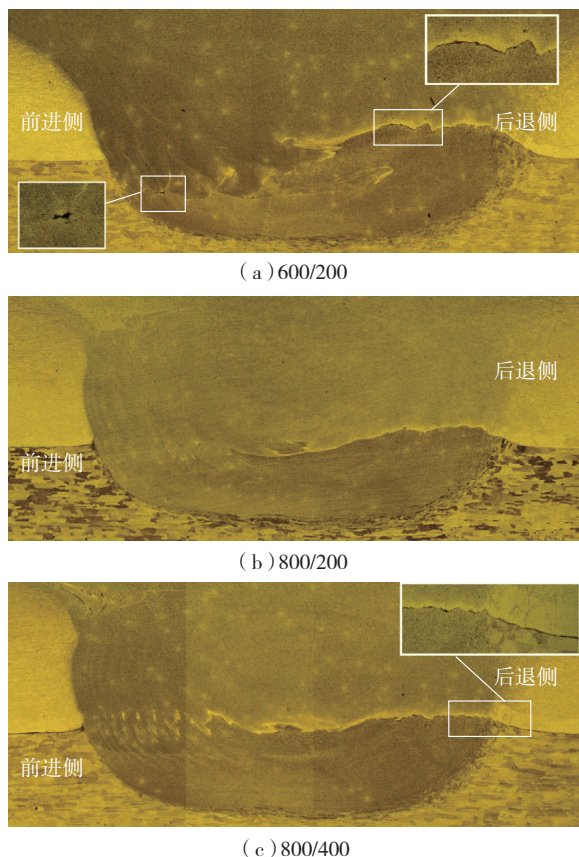


图3 不同焊接参数搭接接头金相组织形貌
Fig.3 Microstructures of lap joints under different parameters

图 5 给出了 800/200 参数接头的疲劳断口形貌。在 320MPa 应力水平下,接头疲劳寿命为 36700 次。疲劳试样均从前进侧断裂,图 5 (a) 显示,断口照片中疲劳断裂的各种典型区域较明显,裂纹从前进侧搭接界面位置起裂(图 5 (a)、(b)试样下方部位),有放射状纹路,属于点裂源。有明显的疲劳条带,图 5 (c)瞬断区表现出剪切断裂痕迹,存在着大量较浅的韧窝。

图 6 给出了 800/400 参数接头疲劳断口形貌。在 320MPa 应力水平下,接头疲劳寿命仅为 3200 次。试样同样在前进侧断裂,图 6 (a)中可以看出,试样下方为焊缝表面,也是疲劳起裂源生成区,疲劳源为线源,裂纹从试样表面起裂后,向内部扩展,起裂位置存在台阶,疲劳裂纹浅。图 6 (b)扩展区中没有发现较明显的疲劳条带,图 6 (c)中瞬断区韧窝量少且形状小,说明材料脆性较大,因此疲劳性能很差。

上述试验反映出 Al-Li-S4 和 2099 搭接 FSW 结构疲劳断裂的一个共同特点,即试样均从焊接接头前进侧断裂,而且断口 SEM 照片显示裂纹均起源于前进侧 Al-Li-S4 表面,可见此处为搭接结构力学性能薄弱点。结合图 4、图 5 和图 6 中各参数接头微观组织照片可以看

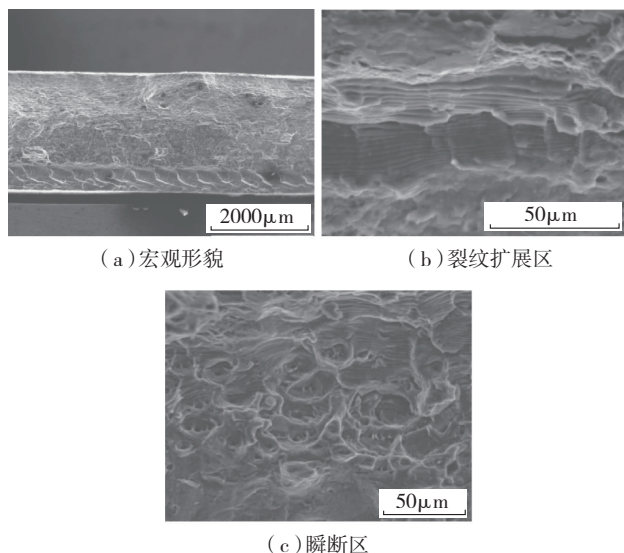


图4 600/200参数接头疲劳断口形貌
Fig.4 SEM images of fatigue fracture under 600/200 welding process

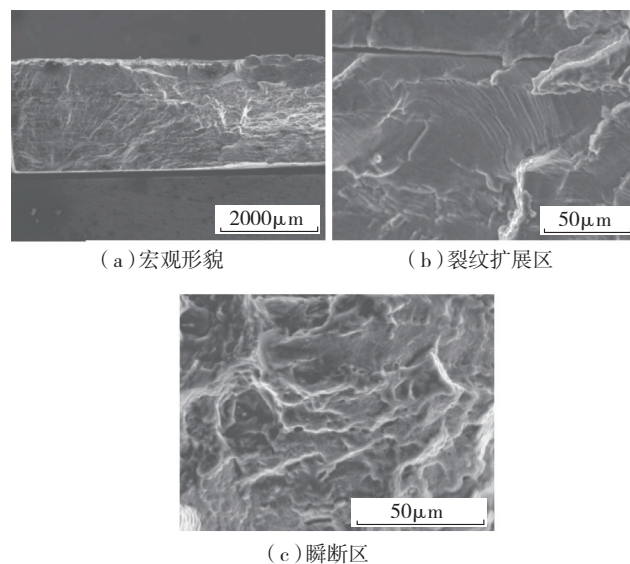


图5 800/200参数接头疲劳断口形貌
Fig.5 SEM images of fatigue fracture under 800/200 welding process

出,裂纹源所在位置为焊核区前进侧,搭接界面在这里突然消失,形成“Y”形交界点。在疲劳试验过程中,“Y”形交界点形成应力集中区域,容易萌生裂纹,由于拉伸应力加载在 Al-Li-S4 板材上,因此一旦“Y”形交界点出现微裂纹,应力就会集中于裂纹尖端,使裂纹向焊核底部扩展,样品很快发生断裂,疲劳寿命显著降低。

3 结论

(1)对于 Al-Li-S4 和 2099 搭接 FSW 而言,600/200 转速过低、800/400 焊速过快,焊缝单位长度上热输入

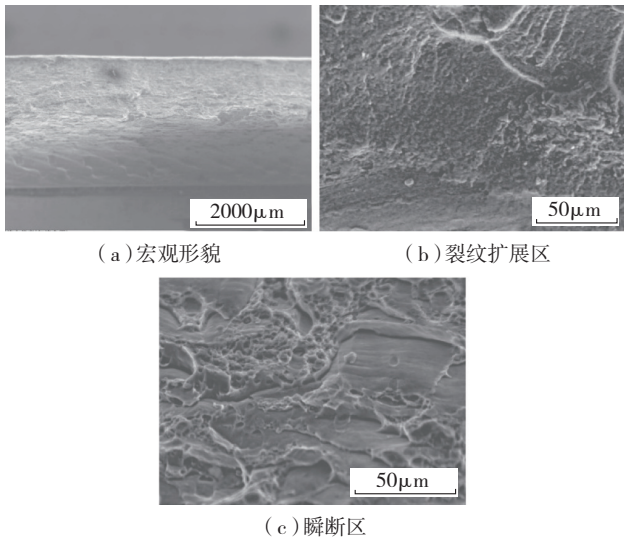


图6 800/400参数接头疲劳断口形貌

Fig.6 SEM images of fatigue fracture under 800/400 welding process

小,搅拌不充分,因此,接头中存在孔洞或未焊合缺陷。

(2) 600/200、800/200、800/400 (r/min, mm/min) 参数下, Al-Li-S4 和 2099 搭接接头静强度均接近母材的 90%,但疲劳性能较差,800/200 参数接头 200 万次疲劳强度仅为 80MPa。

(3) FSW 过程使搭接结构焊核区前进侧界面形成“Y”形交界点,疲劳试验过程中产生应力集中,微裂纹一旦出现,就会向焊核底部迅速扩展,使样品很快发生断裂。通过焊接工艺控制“Y”形交界形貌,将有可能改善搭接结构疲劳性能。

参考文献

- [1] 张华,林三宝,吴林. AZ31 镁合金搅拌摩擦焊工艺及应用. 焊接技术,2000,29(2):6-9.
- [2] 刘小文,鄢君辉,林随更,等. LY12 搅拌摩擦焊技术. 焊接学报,2001,22(4): 55-57.
- [3] Mishra R S, Ma Z Y. Friction stir welding and processing. Materials Science and Engineering R,2005,50:1-78.
- [4] Cavaliere P, Cabibbo M, Panella F. 2198 Al-Li plates joined by Friction Stir Welding: Mechanical and microstructural behavior. Materials and Design,2009,30: 3622-3631.
- [5] Hirasawa S, Badarinarayan H, Okamoto K. Analysis of effect of tool geometry on plastic flow during friction stir spot welding using particle method. Journal of Materials Processing Technology,2010,21: 1455-1463.
- [6] James M N, Bradley R, Lombard H. Residual stresses and fatigue performance. Fatigue fract Eng Mater Structure,2005,28: 254-256.
- [7] 魏世同,郝传勇. 01420 铝锂合金的搅拌摩擦焊接. 航空材料学报,2006,26(6): 21-25.

- [8] 王永,胡捷,胡国平,等. 可焊铝锂合金焊接研究现状. 有色金属,2002,54(1): 16-20. (责编 可岚)

(上接第 114 页)

现象,形成蠕变断裂的再热裂纹。

再热裂纹产生的原因分析:

从母材和焊丝的化学成分能谱分析可以看出,裂纹断口处铝元素含量异常升高,正常的焊缝组织中铝元素含量应该非常低,而测试表明裂纹和氧化物中均含有较高的铝元素成分,这一测试结果非常不合理(表 4)。铝的熔点远低于铁,容易形成低熔点共晶,符合产生裂纹的条件,可能在焊接或热处理的再热过程中产生裂纹。

正常的生产过程不应该有铝元素的添加和含量的升高。结合实际生产过程,发现用来焊接生产该产品的场地和使用的焊接设备同时焊接大量铝合金产品,不排除操作手套、焊丝或设备被细微铝污染,融入焊缝金属,在焊接冶金的过程中偏析形成裂纹的可能性。

无论裂纹是在焊接还是在热处理阶段产生的,该类型裂纹都是热裂纹,属于冶金裂纹,是材料的自身属性和加工工艺容易出现的缺陷类型。

3 防止措施

针对裂纹分析,制定了如下措施加以控制:做好焊前清理工作、尽量减少焊接热输入量、装配时均匀分布,减少装配应力、第 1 遍焊接后尽快焊接第 2 遍,保证焊接层间温度;其次焊后调质处理阶段,缓慢升温,提高淬火介质温度,可减小热应力的产生,从而减缓微裂纹的扩展。通过上述措施的落实,基本杜绝了类似裂纹缺陷的发生。

4 结论

(1) 1 号裂纹处于焊缝处,2 号裂纹处于热影响区,裂纹沿晶扩展,都属于热裂纹。

(2) 该裂纹可能是焊接过程中产生的微裂纹,在调质阶段得到了扩展,也可能是淬火保温过程中产生的再热裂纹。从本质上都属于冶金裂纹。

(3) 可以通过减小焊接热输入,控制焊接层间温度,加强焊前清理,控制装配状态、优化热处理规范等措施加以控制,能够减少该类热裂纹产生的概率。

参考文献

- [1] 中国机械工程学会焊接学会. 焊选手册·材料的焊接. 2 版. 北京:机械工业出版社,2001.
- [2] 崔忠圻. 金属学与热处理. 北京:机械工业出版社,1997.
- [3] 张文钺. 焊接冶金学. 北京:机械工业出版社,1997.

(责编 良辰)