

# 镓中间层 1420 铝锂合金扩散连接方法与试验研究<sup>\*</sup>

Method and Technology of Diffusion Bonding of 1420 Al-Li Alloy by Using Gallium as Interlayer

中航工业北京航空制造工程研究所 牛涛 侯红亮 王耀奇 张艳苓

**[摘要]** 研究了镓对 1420 铝锂合金的表面活化作用,结果表明液态镓能有效破坏 1420 铝锂合金表面的氧化膜。基于镓中间层的表面活化作用,在力学拉伸试验机上通过机械加压方法,在试验温度 520℃,连接压力 7MPa,扩散时间 1h 条件下,对 1420 铝锂合金进行了扩散连接试验,并通过光学显微镜、扫描电镜和剪切强度试验等方法,对接头进行了微观分析和剪切强度测试。结果表明,中间层厚度小于 1mg/cm<sup>2</sup> 时,接头界面处的缝隙非常明显,焊合率较低,接头剪切强度很低,其剪切断面微观形貌光滑平整;中间层厚度大于 1mg/cm<sup>2</sup> 时(包括 1mg/cm<sup>2</sup>),扩散连接界面完全消失,接头剪切强度明显提高,其剪切断面微观形貌中呈现沿剪切方向的撕裂带,表现为韧性断裂特征。中间层厚度为 1mg/cm<sup>2</sup> 时,接头剪切强度最高,达到 58.35 MPa。

**关键词:** 镓 铝锂合金 扩散连接 中间层

**[ABSTRACT]** Surface-active of gallium to 1420 Al-Li alloy is studied. The results show that, liquid gallium can destroy the oxide film on the surface of 1420 Al-Li alloy effectively. Basing on this, the diffusion bonding of 1420 Al-Li alloy is studied by using pure gallium as interlayer under mechanical compression force using tensile testing machine. The experiment is carried out at the bonding temperature of 520℃ under the joining pressure of 7MPa for the diffusion time of 1h. The microstructure of the joints is studied by OM, SEM etc, and their mechanical properties are tested by shearing experiments. The results show that, when the thickness of the interlayer is less than 1mg/cm<sup>2</sup>, there is a clear fissure at the joint interface, the bonding ratio is very low, the shearing strength is very low, the fracture surface of the shearing test presents smooth. When the thickness of the interlayer is more than 1mg/cm<sup>2</sup> (including 1mg/cm<sup>2</sup>), the interface of the diffusion bonding disappears completely, the shearing strength increases obviously, the fracture surface of the shearing test presents many scratch of tearing along the tearing direction, exhibiting the characters of ductility

fracture. When the thickness of the interlayer is 1mg/cm<sup>2</sup>, the shearing strength is the highest, which is 58.35 MPa.

**Keywords:** Gallium Al-Li alloy Diffusion bonding Interlayer

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2015.01/02.111

铝锂合金作为一种新型轻合金材料,具有低密度、高模量、高比强度和比刚度等优点,若采用铝锂合金代替常规铝合金可以使构件重量减轻 10%~15%,刚度提高 15%~20%,在航空航天领域有着广阔的应用前景。研究表明,铝锂合金具有良好的超塑变形能力<sup>[1]</sup>,但铝锂合金超塑成形/扩散连接(SPF/DB)技术至今仍未得到较好的解决,严重制约了铝锂合金超塑成形/扩散技术的发展和應用。究其原因,铝锂合金表面在室温下极易形成一层致密稳定的氧化膜,且在扩散连接过程中氧化膜既不解体也不溶解于基体,严重阻碍铝原子的相互扩散。为此,铝合金、铝锂合金扩散连接已成为学术界研究热点之一,其中英国剑桥大学的 A.A.Shirzadi 等首先提出了镓中间层用于铝合金的扩散连接方法,并申请了发明专利。该方法是用液态镓作抛光剂,将铝合金试样在加热到 50℃的抛光盘上抛光 10s,使镓均匀的涂在试样表面<sup>[2-7]</sup>。E.Ferchaud 等也通过该方法获得了不错的扩散连接效果,并对镓致铝合金表面活化的机理做了深入研究<sup>[8]</sup>。目前,国内尚无开展镓中间层铝合金扩散连接的研究。

本文主要研究了镓对 1420 铝锂合金的表面活化作用和镓中间层 1420 铝锂合金扩散连接的实现方法,分析了镓对扩散连接接头焊合率的影响,结合接头显微组织和剪切强度对镓中间层厚度进行了优化。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

试验材料为中南大学在传统机械热处理技术基础上,采用双级时效制度和转向轧制工艺制备的 1420 铝锂合金超塑性细晶板材,板厚 1.8mm,化学成分如表 1 所示,显微组织如图 1 所示,晶粒呈等轴状态,晶粒尺寸在 10~20μm 范围内。中间层材料为纯度 99.9999% 的高纯金属镓。

<sup>\*</sup> 国家重点基础研究发展(国家 973)计划(2011CB012803)资助。

表1 1420铝锂合金化学成分

成分	Li	Mg	Zr	Fe	Si	Ti	Cu	Al
质量分数 /%	2.0	5.2	0.12	0.07	0.03	≤ 0.1	0.03	Bal

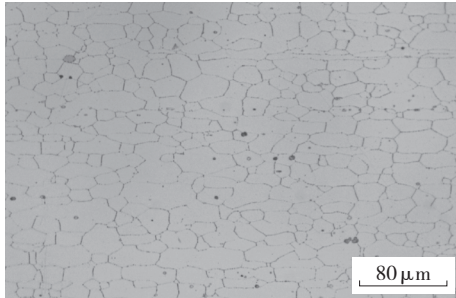


图1 1420铝锂合金微观组织  
Fig.1 Microstructure of 1420 Al-Li alloy

### 1.2 试验方法

试样尺寸为 20mm × 30mm × 1.8mm, 经逐次打磨并抛光, 去除约 0.1mm 厚的包铝层, 然后用丙酮进行超声清洗 10min。采用热吹风机把瓶装固体镓加热熔化(镓的熔点只有 29.8℃), 用干净的细布将少量的液态镓均匀的涂在试样表面, 并把多余的镓擦掉。试样表面的单位面积涂镓量可通过涂覆镓层前后试样增加的重量除以试样面积来计算。由于试验中间层为液态金属镓, 为了便于理解和方便测量计算, 采用单位面积涂镓量来反映中间层厚度。扩散连接试验在力创 letryDL-20T 型电子万能拉伸试验机上进行, 加载方式为机械加压, 加热方式为三段式电阻加热炉加热, 控温精度 ± 2℃。采用 Olympus BX41M 光学显微镜对接头微观组织进行观察分析, 剪切强度试验仍在电子万能拉伸试验机上进行, 剪切强度测试试样如图 2 所示。

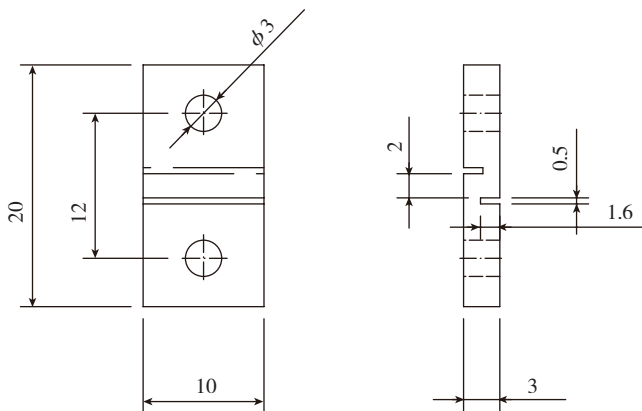


图2 剪切强度测试试样  
Fig.2 Specimen for shearing test

## 2 试验结果与分析

### 2.1 镓的表面活化研究

镓对 1420 铝锂合金表面活化作用如图 3 所示。分析表明在同样的侵蚀情况下, 试样表层的组织非常清晰, 晶界较宽, 晶粒呈等轴状态, 而试样深层组织比较模糊, 晶界较窄。根据 E. Pereiro-Lopez 等的研究结果<sup>[8-13]</sup>, 液态镓能够从铝合金表面沿晶界迅速向合金内部渗入。因此, 分析认为, 这是由于液态镓渗入到合金内部后存留在晶界处造成的。这表明液态镓能够穿过铝锂合金表面致密的氧化膜渗透到铝锂合金基体中。而且镓的渗透深度随镓涂层厚度的增加而增大, 如图 3 (f) 所示。

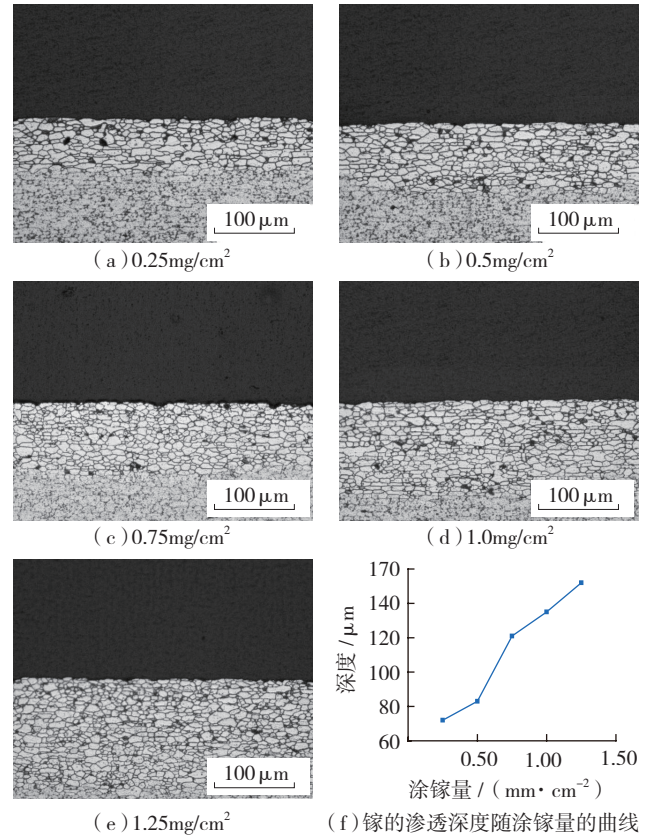


图3 镓的表面活化试验结果

Fig.3 Results of surface-active of gallium

由此可见, 液态镓能够穿过铝锂合金表面的氧化膜, 因此在镓中间层 1420 铝锂合金扩散连接试验时, 液态镓就可以打破合金表面氧化膜的障碍, 为铝锂合金基体原子的相互扩散提供通道, 形成良好的扩散连接接头。

### 2.2 扩散连接界面显微组织分析

如图 4 (a)~ (b) 所示, 中间层厚度小于 1mg/cm<sup>2</sup> 和没有添加镓中间层时, 接头界面处的缝隙非常明显, 基本没有焊合; 如图 4 (c)~ (e) 所示, 当中间层厚度大于 1mg/cm<sup>2</sup> 时(包括 1mg/cm<sup>2</sup>), 扩散连接界面完全消失, 实现界面完全焊合。此外, 涂镓后扩散连接界面附近有一层明显的灰色区域, 且随着中间层厚度的增加, 灰色区域的宽度明显增加。分析认为, 这主要是由于镓

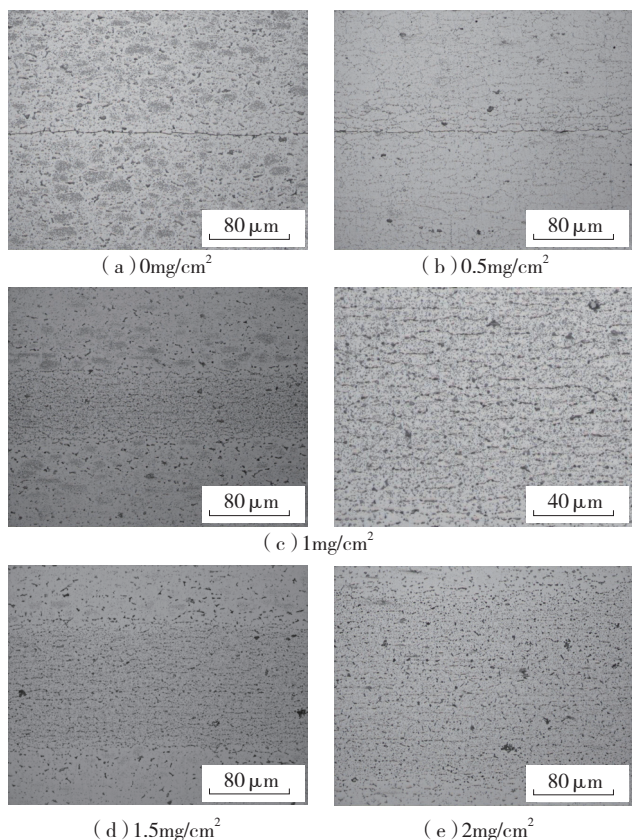


图4 中间层厚度对接头界面焊合程度的影响

Fig.4 Microstructure of joints with different interlayer thickness

中间层向合金内部的渗入和扩散造成的。

### 2.3 扩散连接接头剪切强度分析

在试验温度 520℃、连接压力 7MPa 和扩散时间 1h 的条件下,中间层厚度对接头剪切强度的影响如图 5 所示。结果表明,在中间层厚度为 1mg/cm<sup>2</sup> 时,接头剪切强度达到最大 58.35MPa,而不加中间层(即中间层厚度为 0mg/cm<sup>2</sup>)的接头剪切强度几乎为零。同时,镱中间层超过 1mg/cm<sup>2</sup> 时,剪切显著下降,说明镱对扩散连接的影响存在一个最优范围,若从接头力学性能来评价,最佳中间层厚度应该为 1mg/cm<sup>2</sup>。

中间层厚度小于 1mg/cm<sup>2</sup> 时,由于中间层镱太少,不能有效的破坏铝锂合金表面致密稳定的氧化膜,严重阻碍基体 Al 原子的相互扩散,导致扩散进行的不够充分,因而在界面处形成了一条明显的缝隙,造成接头剪切强度不高。

中间层厚度大于 1mg/cm<sup>2</sup> (包括 1mg/cm<sup>2</sup>) 时,足够多的中间层镱有效的破坏了铝锂合金表面致密稳定的氧化膜,为基体 Al 原子的扩散提供了足够多的通道,使原子间进行充分的相互扩散,因而在试验条件下形成了完好的接头界面,达到了很高的剪切强度。但是随着中间层镱的增加,过多的镱聚集在界面处,造成接头严重

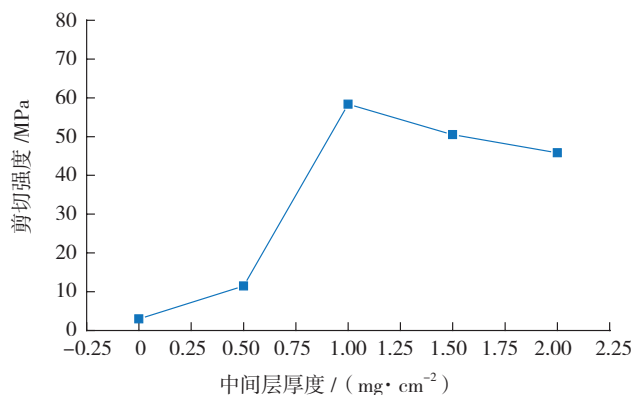


图5 中间层厚度对接头剪切强度影响规律

Fig.5 Shearing strength of joints with different interlayer thickness

脆化。因此当中间层厚度大于 1mg/cm<sup>2</sup> 时,随中间层厚度的增加,接头剪切强度呈降低趋势。

### 2.4 扩散连接接头剪切断面微观形貌分析

镱中间层 1420 铝锂合金扩散连接接头剪切断面微观形貌如图 6 所示。可以看出中间层厚度小于 1mg/cm<sup>2</sup> 时,剪切断面微观形貌表现为平整光滑,没有发现撕裂的迹象,如图 6 (a) 所示。这表明大部分区域都没有实现冶金结合,因此接头剪切强度不高。

中间层厚度为 1mg/cm<sup>2</sup> 时,剪切断面微观形貌具有较明显的撕裂带,如图 6 (b) 所示。撕裂带是由于在剪切试验时剪应力超过其屈服强度而发生塑性变形留下的痕迹,宽大的撕裂带表明接头已经基本实现了大面积的冶金结合,因此接头剪切强度较高。

中间层厚度大于 1mg/cm<sup>2</sup> 时,接头剪切断面微观形貌的撕裂带反而减少,而且多为细小的线状,如图 6 (c) 和图 6 (d) 所示。这表明接头只有局部的线结合,因此

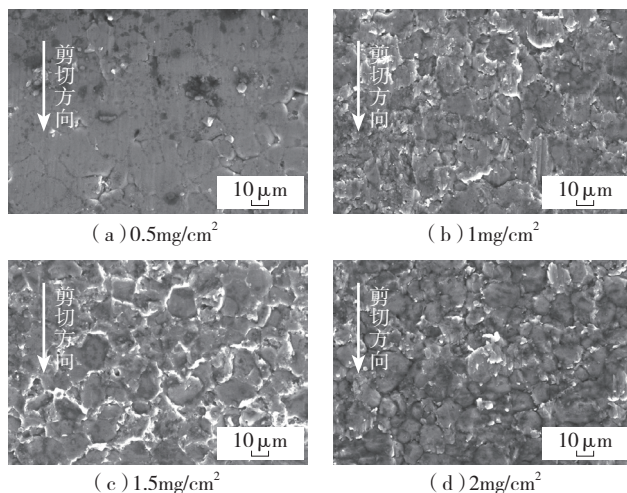


图6 不同中间层厚度接头剪切断面微观形貌

Fig.6 Fracture surface of shearing test with different interlayer thickness

接头剪切强度反而降低。

### 3 结论

(1) 液态镓可以穿透 1420 铝锂合金表面氧化膜并沿晶界向材料内部扩散,其镓的渗透距离随镓涂层厚度的增加而增大,从而为原子的相互扩散提供了有效通道。

(2) 镓中间层可以促进 1420 铝锂合金扩散连接过程,其中间层厚度对接头质量有着重要影响,中间层厚度为  $1\text{mg}/\text{cm}^2$ ,扩散连接界面实现冶金结合,接头剪切强度达  $58.35\text{MPa}$ ,断口形貌呈现韧性断裂特征。

#### 参考文献

[1] 张艳苓,郭和平,李志强,等. 细晶 1420 铝锂合金超塑性性能试验研究. 塑性工程学报, 2009,16(4):134-137.

[2] Shirzadi A A, Saindrenan G, Wallach E R. Flux-free diffusion brazing of aluminium-based materials using gallium(patent application: UK0128623.6). Mater Sci Forum, 2002(396):1579-1584.

[3] Shirzadi A A, Saindrenan G. New method for flux free diffusion brazing of aluminium alloys using liquid gallium(UK patent application 0128623.6).Sci Technol Weld Joining, 2003(8):149-153.

[4] Shirzadi A A, Ghoshouni E R, Wallach E R. Surface treatment of oxidizing materials[P]. 美国专利: US2003/0022597 AL, Jan.30, 2003.

[5] Shirzadi A A, Wallach E R. Novel method for diffusion bonding superalloys and aluminium alloys, Materials Science Forum, 2005(502):431-436.

[6] Shirzadi A A, Saindrenan G, Wallach E R. New method for joining aluminium alloys using liquid gallium, Proceedings of Joining of Al and Mg, 2002(9):101-106.

[7] Shirzadi A A, Assadi H, Wallach E R. Interface evolution and bond strength when diffusion bonding materials with stable oxide films. Surface and Interface Analysis, 2001(31):609-618.

[8] Ferchaud E, Christien F, Barnier V, et al. Characterisation of Ga-coated and Ga-brazed aluminium. Materials Characterization, 2012(67):17-26.

[9] Pereiro-Lopez E, Ludwig W, Bellet D. Discontinuous penetration of liquid Ga into grain boundaries of Al polycrystals. Acta Materialia, 2004(52):321-332.

[10] Pereiro-Lopez E, Ludwig W, Bellet D. In situ investigation of Al bicrystal embrittlement by liquid Ga using synchrotron imaging. Acta Materialia, 2006 (54):4307-4316.

[11] Pereiro-Lopez E, Ludwig W, Bellet D. Nanometric intergranular liquid layer penetration in the Al/Ga system: An X-ray projection microscopy investigation. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2006 (B246):226-231.

[12] Pereiro-Lopez E, Ludwig W, Bellet D. Grain boundary liquid metal wetting: A synchrotron micro-radiographic investigation. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2003 (B200):333-338.

[13] Ho-Seok Nam, Srolovitz D J. Effect of material properties on liquid metal embrittlement in the Al - Ga system. Acta Materialia, 2009 (57):1546-1553.

(责编 深蓝)

(上接第 110 页)

试验件破坏形式和仿真分析结果如图 4 所示。从对比图可以看出,分析结果与破坏试验结果具有高度符合性;从表 1 也可以看出,分析与试验结果的误差小于 6%,由此证明非线性分析方法具有较高的计算精度,是一种比较有效的复合材料多钉连接分析方法。

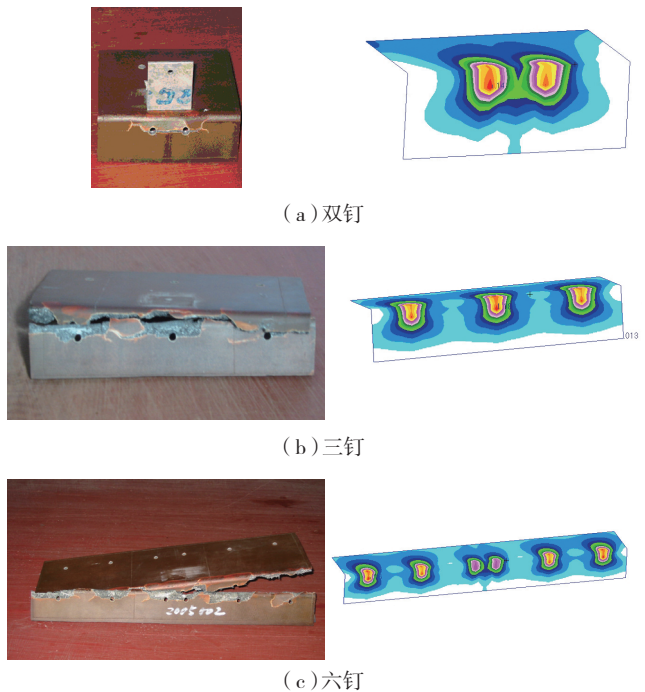


图4 双钉、三钉、六钉对角接头破坏形式

Fig.4 Damage forms of twin fasteners, three fasteners, six fasteners diagonal joint

### 3 结论

本文在理论研究的基础上,应用有限元法进行复合材料多钉连接的载荷分配,并通过有限元法预测连接孔的挤压强度,大大提高了分析的精度;同时利用非线性分析方法分析了复合材料对角接头多钉连接的强度,并通过试验进行了验证。结果表明,分析与试验数据具有高度的符合性。本研究为复合材料主承力结构连接强度设计、分析提供了依据,为复合材料在中、重型直升机上的应用提供了借鉴。

#### 参考文献

[1] 陈祥宝. 聚合物基复合材料手册. 北京: 化学工业出版社, 2004.

[2] 赵渠森. 先进复合材料手册. 北京: 机械工业出版社, 2003.

[3] 中国航空研究院. 复合材料结构设计手册. 北京: 航空工业出版社, 2001.

[4] 中国航空研究院. 复合材料连接手册. 北京: 航空工业出版社, 1994.

(责编 谷雨)