

铝镁微叠层复合材料制备与组织性能研究

左睿昊¹ 景 栋^{1,2} 孟令刚¹ 郭 倩¹ 周秉文^{1,2} 耿立国¹ 张兴国^{1,2}
(1.大连理工大学材料科学与工程学院; 2.大连理工大学宁波研究院)

摘 要 以 1060 铝合金片和 AZ31 镁合金片为原材料,制备了铝镁微叠层复合材料,研究了层厚比对复合材料组织与性能的影响。使用金相显微镜、X 射线衍射仪、场发射电子探针和扫描电镜对复合材料的组织结构、元素分布、裂纹扩展情况进行分析。结果表明,采用真空热压烧结技术制备的复合材料结合良好,力学性能呈先上升后下降的趋势。铝镁层厚比为 1 : 1.5 时复合材料性能最佳,其抗弯强度为 159 MPa,比强度为 7.4×10^4 N · m/kg,抗压强度为 310 MPa。

关键词 铝镁微叠层复合材料;真空热压;抗弯强度;抗压强度

中图分类号 TB331;TG146.21;TG146.22 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.08.022 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Preparation and Microstructure as well as Properties of Al-Mg
Microlaminated Composites

Zuo Ruihao¹, Jing Dong^{1,2}, Meng Linggang¹, Guo Qian¹, Zhou Bingwen^{1,2}, Geng Liguang¹, Zhang Xingguo^{1,2}
(1.School of Material Science and Engineering, Dalian University of Technology;
2.Ningbo Institute of Dalian University of Technology)

Abstract: Taking 1060Al and AZ31 magnesium alloy sheets as raw materials, the effects of layer thickness ratio on microstructure and properties of prepared Al-Mg microlaminated composites were investigated. The microstructure, element distribution and crack propagation of the composites were analyzed by metallographic microscope, X-ray diffractometer, field emission electron probe and scanning electron microscope. The results indicate that the composites prepared by vacuum hot pressing sintering is well-bonded, and the mechanical properties is increased firstly and then decreased. When the thickness ratio of Al-Mg layer is 1 : 1.5, the composites exhibit desirable properties, where the bending strength is 159 MPa, the specific strength is 7.4×10^4 N · m/kg, and the compressive strength is 310 MPa.

Key Words: Al-Mg Microlaminated Composites, Vacuum Hot Pressing, Bending Strength, Compressive Strength

收稿日期:2021-12-12;修改稿收到日期:2022-01-20
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFA0702903);国家自然科学基金资助项目(51971049)
第一作者简介:左睿昊,男,1996 年出生,硕士研究生,辽宁大连(116000),E-mail:376604957@qq.com
通信作者:张兴国,男,1960 年出生,教授,辽宁大连(116000),E-mail:zxgwj@dlut.edu.cn
引用格式:左睿昊,景栋,孟令刚,等. 铝镁微叠层复合材料制备与组织性能研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(8): 1 027-1 032.
ZUO R H, JING D, MENG L G, et al. Preparation and microstructure as well as properties of Al-Mg microlaminated composites[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(8): 1 027-1 032.

[2] 潘颜鹏. 高强韧铸造 Al-Si-Cu-Mg 合金组织性能研究[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2015.

[3] 王立东. 活塞用新型铝合金和 SiC_p/Al 复合材料的疲劳行为研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2006.

[4] 王宇鑫, 张瑜, 严鹏飞, 等. 铝基复合材料的研究[J]. 有色金属材料与工程, 2010, 31(4): 194-198.

[5] 郝斌, 段先进, 崔华, 等. 金属基复合材料的发展现状及展望[J]. 材料导报, 2005, 19(7): 64-68.

[6] 刘达利, 齐丕骧. 新型铝活塞[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.

[7] SONG I H, KIM D K, HAHN Y D, et al. Investigation of Ti₃ AlC₂ in the in situ TiC-Al composite prepared by the exothermic reaction process in liquid aluminum[J]. Materials Letters, 2004, 58(5): 593-597.

[8] 贺春林, 才庆魁. 铝金属基复合材料的腐蚀研究进展[J]. 材料导报, 2003, 17(1): 45-47.

[9] 李月珠. 快速凝固技术和材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.

[10] 陈光, 傅恒志. 非平衡凝固新型金属材料[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

[11] 程天一, 章守华. 快速凝固技术与新型合金[M]. 北京: 宇航出版社, 1990.

[12] 满佳乐. 凝固速度对铝基合金组织及性能的影响[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2018.

[13] GUAN R G, TIE D. A review on grain refinement of aluminum alloys: Progresses, challenges and prospects[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 30(5): 409-432.

[14] LIN C, WU S S, LU S L, et al. Effects of ultrasonic vibration and manganese on microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-Si alloys with 2% Fe[J]. Intermetallics, 2013, 32(3): 176-183.

[15] 张松利, 赵玉涛, 陈刚, 等. 熔体超声处理对 A356 合金铸态显微组织和力学性能的影响[J]. 机械工程材料, 2009, 33(7): 22-25.

[16] 潘蕾, 陈锋, 吴申庆, 等. 高能超声作用下金属基复合材料的制备[J]. 机械工程材料, 2003, 27(7): 1-2.

镁合金具有密度低、比强度高、重复利用率高、电磁屏蔽性能好等特点^[1~3],在交通、医疗、国防军工和航空航天等领域具有广泛的应用前景^[4~7]。将其与铝结合制备出的复合材料既保持了自身的优良性质,又利用铝的耐腐蚀性弥补自身不足^[8~10],得到研究者关注。

为了制备出性能优良的铝镁复合材料,研究者分别采用不同复合方式对其进行了大量研究。王小伟等^[11]利用爆炸焊接方法制备了 AZ31/2A12 复合材料,发现在铝/镁复合区有波形界面、熔化区和绝热剪切带存在,而熔化区的金属间化合物明显提升了基板整体的硬度。贺东升^[12]采用热轧工艺制备出 6061/AZ31B/6061 对称复合板,发现复合板的最佳压下率为 25% 时,其抗拉强度为 243 MPa,伸长率为 23.8%。以上两种方法可以获得铝镁复合材料,但由于工艺限制,制备出的复合材料层厚较大。CHANG H 等^[13]和 HAI C 等^[14]采用累积叠轧工艺制备出 Mg/5052Al 复合板,发现从第三道次开始 Al、Mg 两层界面处出现大量块状金属间化合物,而且在制备过程中这些脆性较大的金属间化合物内部产生了微裂纹,降低了材料整体性能。累积叠轧工艺制备的复合材料组织取向性严重,试样中缺陷明显,难以大量应用。

真空热压烧结技术是一种在真空下以一定压力保温一定时间的扩散连接加工方法,可以有效地实现多种材料的复合^[15,16],而且该方法制备的材料组织均匀、层

厚和力学性能可控。本课题采用热压法制备铝镁微叠层复合材料,通过对微叠层材料进行结构设计,调控强化层厚度及种类,充分发挥层间距小、多界面强化效应,以期制备出综合性能优异的铝镁微叠层复合材料。并对扩散层形成机理及失效行为进行分析,探究内部结构对复合材料性能的影响,旨在为其应用提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 试验方法

所用原材料为 1060 铝合金和 AZ31 镁合金薄片,两种材料的化学成分见表 1。AZ31 镁合金薄片厚度为 0.5 mm,铝合金薄片的厚度分别为 0.15、0.2、0.3、0.4、0.5 mm。

表 1 两种合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of AZ31 alloy and 1060 alloy %						
合金	w_B					
	Mg	Al	Zn	Si	Mn	Fe
AZ31	95.53	33.30	0.67	0.05	—	0.45
1060	0.03	99.40	0.05	0.08	—	0.24

叠层前首先对金属薄片表面进行预处理,即将其裁剪成直径为 100 mm 的圆片,并用 200 号砂纸打磨,然后将其置于超声清洗机中分别用水、乙醇清洗 5 min,以去除表面残留的油污和金属粉末,试验装置及制备方法见图 1。

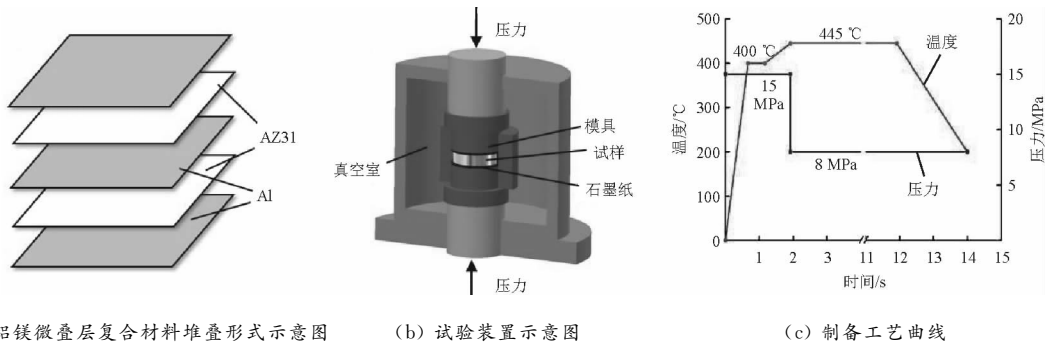


图 1 试验装置及制备方法
Fig.1 Experimental apparatus and preparation process

模具材料为高强石墨,为方便脱模,在模具内侧添加 0.1 mm 厚的石墨纸。试验时,首先将真空室内真空度抽至 20 Pa 以下,通入一定量的高纯 Ar 作为保护气体,然后开始热压。加热时以 10 °C/min 的速率升温至 400 °C,然后在 15 MPa 的压力下保温 30 min。为使试样内的温度场均匀,在保温结束后继续以 1 °C/min 的加热速率缓慢升温至 445 °C,在 8 MPa 压力下保温 10 h 后随炉冷却至室温。按上述工艺制备了不同层厚的铝镁微叠层复合材料,试样编号及层厚比见表 2。

表 2 试样原材料尺寸

Tab.2 Dimension of raw material		
编号	铝片厚/mm	层厚比
1	0.15	1 : 2
2	0.2	1 : 1.5
3	0.3	1 : 1
4	0.4	1 : 0.75
5	0.5	1 : 0.6

1.2 微观结构表征及力学性能测试

使用 Zeiss Axio Obeserver 型金相显微镜和

SU5000 型扫描电镜 (SEM) 分析复合材料的组织结构与界面结合情况, 用 XRD-6000 型 X 射线衍射仪 (XRD) 确定生成的金属间化合物种类, 利用 JXA-8530F Plus 型场发射电子探针 (EPMA) 分析复合材料扩散层元素的分布情况。

材料的弯曲和压缩性能测试采用 CSS-2210 万能试验机测试。使用电火花线对试样切割, 弯曲试样尺寸为 $80\text{ mm}\times 15\text{ mm}\times D$ (试样厚度), 压缩试样尺寸为 $7\text{ mm}\times 7\text{ mm}\times D$ (试样厚度)。力学性能测试在室温下进行, 加载速率均为 0.5 mm/min , 三点弯曲跨距为 60 mm 。选取典型试样绘制应力-应变曲线, 同时使用扫描

电镜对复合材料弯曲后的裂纹扩展形貌进行观察分析。

2 试验结果与分析

2.1 微观组织及成分分析

图 2 为热压复合法制备的铝镁复合材料的微观组织形貌。可以看出, 铝镁微叠层复合材料实现了良好的冶金结合, 界面平直, 无明显孔洞, 组织致密。从图 2a 看出, 在 1 号试样中仍有 AZ31 层, 生成多层扩散层。从图 2b~图 2e 可以看出, AZ31 没有完全反应, 纯铝层也有不同程度的剩余, 且剩余厚度随原始铝层厚度的增

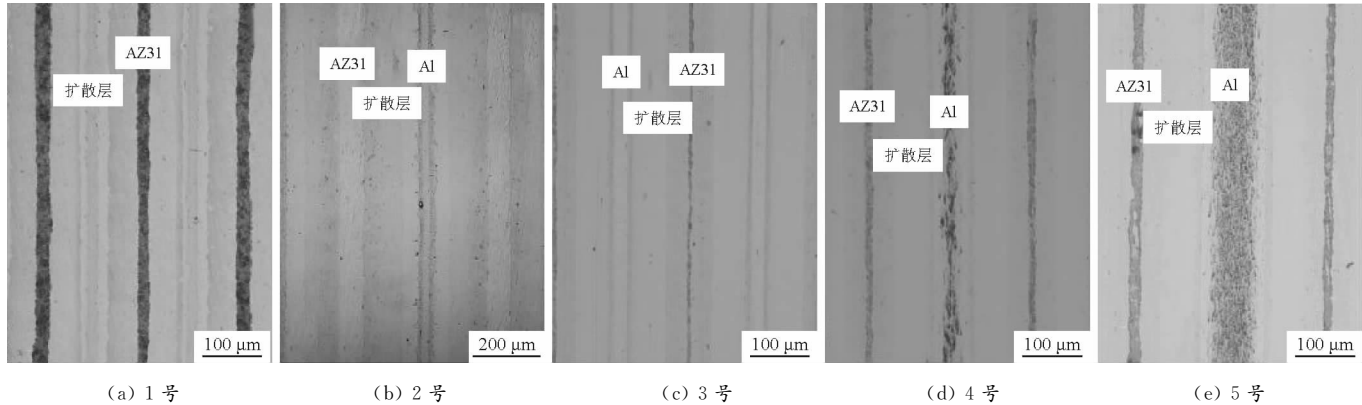


图 2 5 种试样的组织形貌
Fig.2 Morphologies of five kinds of specimens

加而增加。从图 2b、图 2c 可以看出, 随着反应进行, Al 层内的杂质随之扩散, 最终在剩余铝层与扩散层的界面处形成富集区。从图 2d、图 2e 可以看出, 由于 Al 剩余较多, 界面处富集的杂质较少, 故剩余铝层界面处的富集相对较少, 而基体内的杂质含量较高。

为确定不同扩散层的相组成, 对 4 号试样进行 EPMA 及 XRD 分析, 结果见图 3。图 3b 为沿图 3a 中

直线从 Al 层到 AZ31 层的 EPMA 线扫描分析结果。可以看到, 剩余的 Al 和 AZ31 层界面清晰。根据元素浓度变化, 扩散层大体可分为 3 个区域 (见图 3b): 靠近 Al 层的 I 区, Al 含量呈“抛物线”状缓慢下降, 而 Mg 含量随 Al 含量的下降从 0 开始增长; II 区为扩散层的中间层, Al 含量较多, 但 Al、Mg 含量比较固定, 仅在一定范围内缓慢变化; III 区靠近 AZ31 层, Mg 含量高, 但

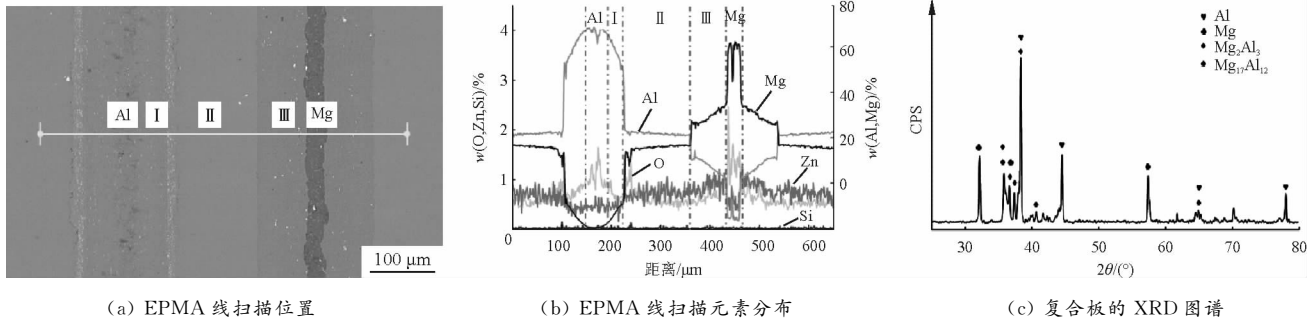


图 3 4 号试样 EPMA 及 XRD 分析结果
Fig.3 EPMA and XRD results of specimen 4

Al、Mg 含量变化较小。

II 区和 III 区元素摩尔比固定, 根据 Al-Mg 二元相图可知, 二者为铝镁的金属间化合物层。由图 3c 可知, 复合材料中含有 Mg_2Al_3 、 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 两种金属间化合物, 再结合图 3b 可知 II 区为 Mg_2Al_3 层, III 区为 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$

层。 Mg_2Al_3 的生长活化能为 86 kJ/mol , 而 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 的生长活化能较高, 为 165 kJ/mol ^[17], 可见在相同条件下, Mg_2Al_3 相生长所需的能量更小, 故 Mg_2Al_3 层的厚度较大。 I 区为 Mg 固溶于 Al 的固溶层。 Al 固溶体的扩散活化能较小, 为 105 kJ/mol , 介于 Mg_2Al_3 、

Mg₁₇Al₁₂之间,制备过程中该相会随着元素扩散在 Al 层周围大量生成。而 Mg 固溶体的扩散活化能较大,为 187 kJ/mol^[17],由图 3b 可知,在制备过程中没有 Al 固溶于 Mg 的固溶层生成。

图 4~图 6 分别为 1、2 和 5 号试样的 EPMA 面扫描结果。对比可知,1 号试样中 Al 层反应完全,中心区域为 Mg₂Al₃,但 AZ31 层有大量剩余。相比之下,2 号和 5 号试样的 Al 层和 AZ31 层都没有完全反应,二者之间的 Mg₁₇Al₁₂层和 Mg₂Al₃层界面清晰可见,而 Al 层周围的固溶层由于自身元素比变化较大,在 EPMA 面扫描图中并不明显。对比图 4d、图 5d 和图 6d 可以看出,Zn 在扩散层和剩余 AZ31 层中均有分布,而剩余 Al 层中,由于距 AZ31 层较远,Zn 扩散不充分,故含量

较低。此外,由于 Zn 与 Mg 基体具有相同的晶体结构(HCP),而与 Mg₁₇Al₁₂相(BCC)的晶体结构不同,这抑制了 Zn 在 Mg₁₇Al₁₂层中的扩散^[18],导致了 AZ31-Mg₁₇Al₁₂界面处 Zn 含量较高。从图 4e、图 5e 和图 6e 可以看出,作为杂质元素存在的 Si,以固溶形式富集于 Al-扩散层界面处。这是由于 Si 原子自身扩散能力较差,热压温度不足以推动 Si 的扩散,而且 Mg 向 Al 中扩散能力强于 Al 向 Mg 中扩散能力^[17],基体中的 Si 随着原子扩散在 Al-扩散层界面处逐渐聚集。从图 4f、图 5f、图 6f 可以看出,在试验前处理原材料时,由于 Al、Mg 比较活泼、容易氧化,无法完全去除表面氧化层,O 就以金属间化合物的形式存在于试样之中,在试验过程中,随着原子扩散而在纯金属-扩散层的界面附近聚集。

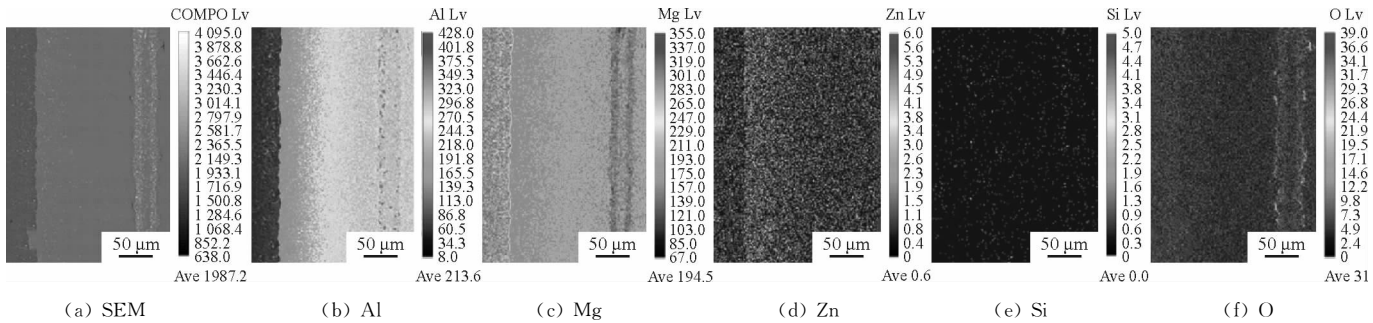


图 4 1 号试样扩散层 EPMA 成分分析

Fig.4 EPMA composition analysis of diffusion layer in specimen 1

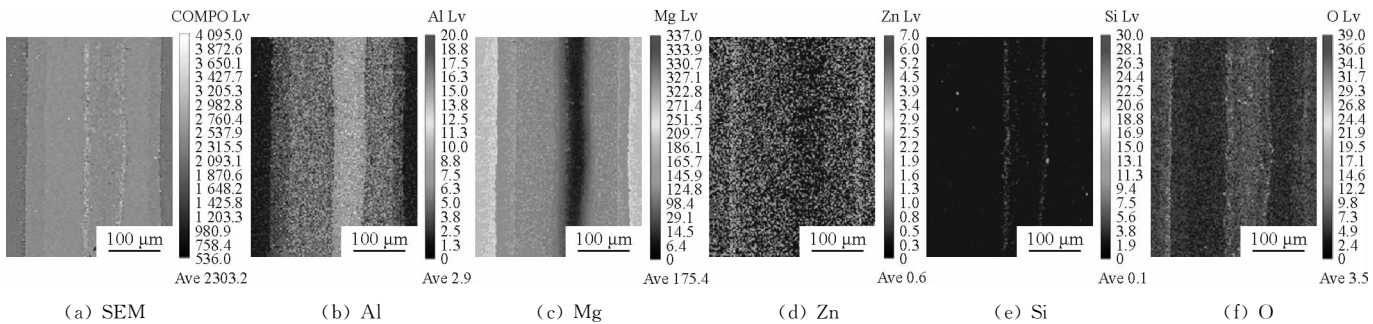


图 5 2 号试样扩散层 EPMA 成分分析

Fig.5 EPMA composition analysis of diffusion layer in specimen 2

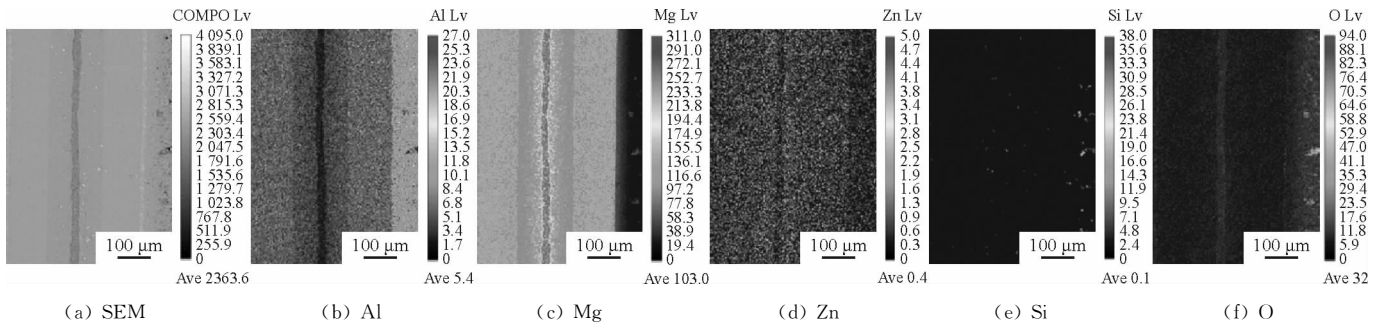


图 6 5 号试样扩散层 EPMA 成分分析

Fig.6 EPMA composition analysis of diffusion layer in specimen 5

2.2 弯曲性能

在室温下对 5 组试样进行三点弯曲试验,试样的弯曲应力-应变曲线见图 7。结果表明,5 组试样的弯曲变

形行为相似。试验开始时,试样在弯曲载荷作用下,弯曲应力与弯曲应变成正相关,处于弹性应变阶段;随着弯曲载荷增大,曲线的斜率逐渐下降,有一个很小的塑

性变形区域存在;最后在载荷的作用下复合材料中裂纹失稳发生脆性失效。在变形过程中,随着铝镁层厚比的增大,弯曲应变随着剩余 Al 层厚度增加也随之增大,试样的应变变小,变形程度越来越大。值得注意的是,在试样发生脆性失效后,作为韧性层的剩余 Al 层厚度越大,裂纹失稳导致的应力下降越小,弯曲行为越趋向于韧性断裂。同时剩余 Al 层对裂纹扩展有一定的阻碍作用,因此随着位移增加,失效试样的层间应变会重新分布,应变更加均匀,甚至在 5 号试样中出现了应力增大的现象。

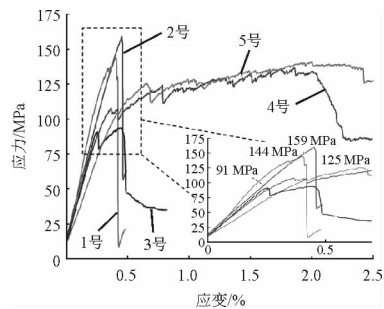


图 7 铝镁微叠层复合材料三点弯曲应力-应变曲线
Fig.7 Bending stress-strain curves of Al-Mg microlaminated composites

5 组试样的抗弯强度见表 3。可以看出,随着原始 Al 片厚度增加,复合材料的抗弯强度大体呈先上升后下降的趋势,2 号试样抗弯强度最高,为 159 MPa;3 号试样抗弯强度最低,为 91 MPa。这是由于韧性较好的铝层可以有效抑制垂直于层向的裂纹继续纵向扩展,相比于铝完全消耗的叠层材料,剩余铝通过抑制裂纹扩展而提高了材料的承载上限,使得 2 号试样的强度高于 1 号试样的。但是,作为软相层的韧性较好的铝层强度很低,剩余 Al 含量过多会明显降低材料的综合力学性能^[19],因此 2 号试样的力学性能要优于 Al 含量更多的叠层材料。而 3 号试样中,两种合金反应比较完全,生成的金属间化合物体积分数最大,在受到外部载荷时,硬相层的金属间化合物脆性较大,有利于裂纹的产生与扩展,降低了合金的抗弯强度,最终导致材料过早失

效^[20]。此外,复合材料的密度随着 Al 片厚度增加而逐渐增大,2 号试样的比强度最高,达到 $7.4 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{kg}$ 。

表 3 5 种试样的密度和弯曲性能

Tab.3 Densities and bending properties of specimens			
编号	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	抗弯强度/ MPa	比强度/ ($\times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{kg}^{-1}$)
1	2.12	144	6.8
2	2.14	159	7.4
3	2.24	91	4.1
4	2.31	108	4.7
5	2.38	125	5.3

为分析各金属层裂纹扩展情况,在 SEM 下对 1、3 和 5 号试样三点弯曲后的失效试样裂纹扩展情况进行观察,结果见图 8。从图 8a 和图 8b 可以看出,复合材料在承受弯曲载荷时,裂纹由 Al-扩散层界面处开始扩展。这是由于扩散生成的 Mg_2Al_3 与 Al 的热膨胀系数和弹性模量存在差异,在冷却过程中会有残余应力产生^[19]。此外,杂质元素(Si 和 O)也在此处聚集,加剧残余应力的产生。在承受外界弯曲载荷时,Al-扩散层界面处因应力集中效应而成为材料内的裂纹源。随着弯曲载荷增加,裂纹会沿着 Al-扩散层界面或在脆性最大的 Mg_2Al_3 层内扩展^[20]。从图 8c 和图 8d 可以看出,初始裂纹在 Al-扩散层的界面处萌生,在裂纹的后续扩展过程中,韧性较好的剩余金属层会使其发生偏转,延长了裂纹的扩展路径,提高材料韧性。3 号试样中虽然仍有合金层剩余,对裂纹的纵向扩展有一定阻碍作用,但由于脆性较大的金属间化合物层体积分数最大,这为裂纹沿垂直于界面方向扩展提供了有利条件,使得裂纹在金属间化合物层中快速、大面积扩展(见图 8c),因此合金弯曲强度显著降低。从图 8e 可以看出,扩散层中的 AZ31 层残余会阻碍裂纹扩展,而 Al 层剩余较多,在承受弯曲载荷时发生变形,而扩散层中的金属间化合物塑性较差,就在断口附近出现了两层剥离的现象。从图 8d 可以看出,金属间化合物层中有大量微裂纹存在,在

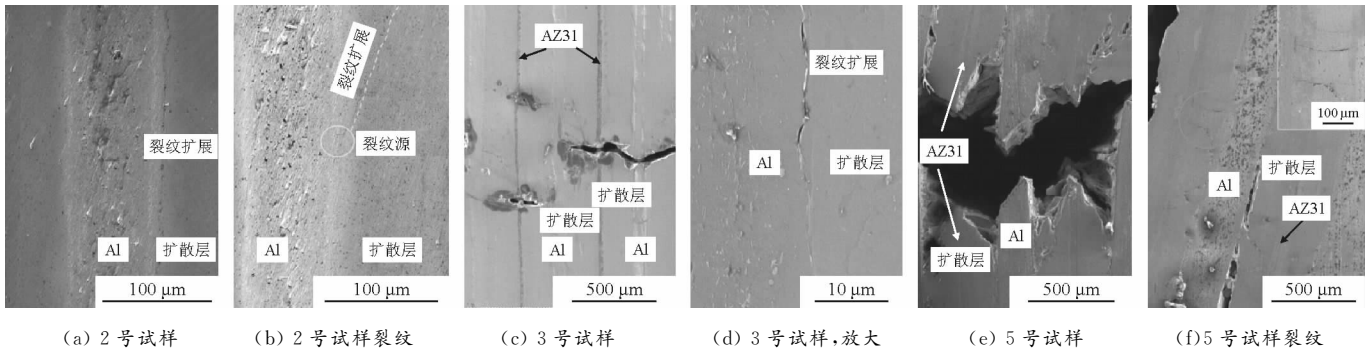
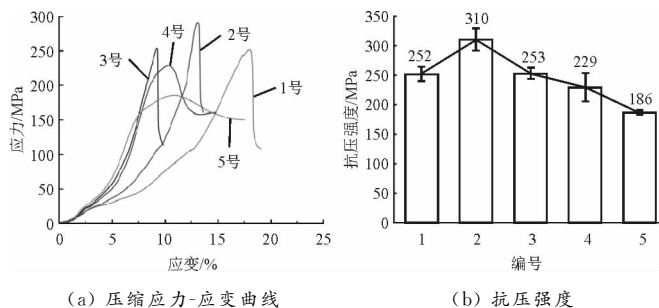


图 8 3 种弯曲试样裂纹形貌
Fig.8 Crack morphologies of bending specimen 1,3 and 5

材料弯曲变形过程中需要消耗大量能量,因而提高了材料整体的塑性^[21]。

2.3 压缩性能

图9为铝镁不同层厚比试样的压缩试验结果。从图9a可以看出,5组试样的压缩变形行为有所不同。其中,1、2和3号试样由于金属间化合物所占比例较大,合金整体失效形式为脆性断裂。随着剩余Al层的增加,金属间化合物所占比例逐渐减小,压缩行为逐渐趋向于韧性断裂。由图9b可见,复合材料的压缩性能随着铝片厚度的增加,呈现先上升后下降的趋势。2号试样的抗压强度最高,为310 MPa;5号试样的抗压强度最低,为186 MPa。这是因为1号试样的Al完全反应,导致金属间化合物层较厚,降低了复合材料整体性能。2号试样在两层金属间化合物间有很薄的Al层剩余,这种韧性层的存在阻碍了脆性层金属间化合物的裂纹扩展,提高了材料性能。但纯铝的强度、硬度较小,随着剩余Al层厚度增大,试样的抗压强度逐渐降低。



(a) 压缩应力-应变曲线

(b) 抗压强度

图9 5种试样压缩试验结果

Fig.9 Compression results of five kinds of specimens

3 结论

(1)利用真空热压烧结技术,在445℃、8 MPa下保温10 h制备的铝镁微叠层复合材料结合良好。铝镁间扩散层共有3层:近Mg侧为 $Mg_{17}Al_{12}$ 、中间层为 Mg_2Al_3 、近Al侧Mg固溶于Al的固溶层。

(2)铝镁微叠层复合材料的弯曲性能和压缩性能都呈现先上升再下降的趋势,以Mg厚度为0.3 mm,Al厚度为0.2 mm试样的综合力学性能最佳,其抗弯强度为159 MPa,比强度为 7.4×10^4 N·m/kg,抗压强度为310 MPa。材料变形时效过程中,韧-脆相间的结构优化了应力分布,提升了材料的整体性能。

(3)铝镁微叠层复合材料中Al-扩散层界面处杂质元素聚集是导致裂纹在此处开始扩展的原因之一。因此,消除界面有害元素的影响是提升铝镁微叠层复合材料性能的有效途径。

参考文献

[1] ZHANG X C, WANG C J, DENG K K, et al. Fabrication, micro-

structure and mechanical properties of the as-rolled ZW31/PMMC laminate[J]. Materials Science & Engineering, 2019, 761:135 043.

[2] 苏再军,黄艳香,刘楚明,等.铸造稀土镁合金的研究现状及发展趋势[J].特种铸造及有色合金, 2015, 35(10): 5.

[3] 张从阳,李志锐,方东,等. $SiC_p/AZ91D$ 镁基纳米复合材料的室温拉伸行为及塑性变形机理[J].材料工程, 2020, 48(4): 108-115.

[4] BAGHNI I M, YIN-SHUN WU, JIU-QING LI, et al. Mechanical properties and potential applications of magnesium alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2003, 13(6): 1 253-1 259.

[5] 汪荣香,洪立鑫,章晓波.生物医用镁合金耐腐蚀性能研究进展[J].材料工程, 2021, 49(12): 14-17.

[6] 冯凯,李丹明,何成旦,等.航天用超轻镁锂合金研究进展[J].特种铸造及有色合金, 2017, 37(2): 140-144.

[7] 周亦人,沈自才,齐振一,等.中国航天科技发展对高性能材料的需求[J].材料工程, 2021, 49(11): 41-50.

[8] 陈琦,迟之东.镁/铝复合板材制备工艺及性能研究[J].有色金属加工, 2015, 44(1): 26-28.

[9] SHENG K, LU L W, XIANG Y, et al. Crack behavior in Mg/Al alloy thin sheet during hot compound extrusion[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2019, 7(4): 8-11.

[10] SEBASTIAN M, RENATA M, PIOTR S, et al. Microstructure and properties of 1050A/AZ31 bimetallic bars produced by explosive cladding and subsequent groove rolling process[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2020, 20(3): - .

[11] 王小伟,杨东青,李晓鹏,等. AZ31Mg/2A12Al爆炸复合板界面组织与性能[J].焊接学报, 2021, 42(5): 14-17.

[12] 贺东升.铝镁铝复合板热轧工艺及其性能研究[D].太原:太原科技大学, 2020.

[13] CHANG H, ZHENG M Y, GAN W M, et al. Texture evolution of the Mg/Al laminated composite fabricated by the accumulative roll bonding[J]. Scripta Materialia, 2009, 61(7): 717-720.

[14] HAI C, MINGYI Z. Effect of intermetallic compounds on the fracture behavior of Mg/Al laminated composite fabricated by accumulative roll bonding[J]. Rare Metal Materials & Engineering, 2016, 45(9): 2 242-2 245.

[15] 姜波.高强韧Ti/Al-3Ti金属层状材料超声固结制备研究[D].北京:北京科技大学, 2021.

[16] 丁青云. Ni/Al含能结构材料的真空热压法制备及性能研究[D].南京:南京航空航天大学, 2020.

[17] SARAH B, KATRINA B, NAGRAJ S, et al. Interdiffusion in the Mg-Al system and intrinsic diffusion in β - Mg_2Al_3 [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2012, A43(11): 4 043-4 052.

[18] TANG J, CHEN L, ZHAO G, et al. Study on Al/Mg/Al sheet fabricated by combination of porthole die co-extrusion and subsequent hot rolling[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 784: 727-738.

[19] 张博洋,李泽斌,刘宝玺.层状金属复合材料断裂和增韧机理的研究进展[J].河北工业大学学报, 2020, 49(4): 1-11.

[20] 梅瑞斌,史现利,包立,等.多道次热辊轧制Al/Mg层状复合板材结合面特性研究[J].复合材料学报, 2022, 39(7): 3 485-3 497.

[21] 王宏伟.三维层界面Al/Mg/Al复合板材的制备、显微组织与力学性能[D].太原:太原理工大学, 2021.

(编辑:刘卫)