

用纯金属 Ni 作中间层扩散连接铝基复合材料

Diffusion Bonding of Aluminium Metal Matrix Composite
with Ni Interlayer

刘卫红^{1,2}, 孙大谦², 邱小明²,
孙德新²(1 北京航空材料研究院, 北京 100095;
2 吉林大学 材料科学与工程学院, 长春 130025)
LIU Wei hong^{1,2}, SUN Da qian², QIU Xiao ming², SUN De xin²
(1 Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2 School of
Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

摘要: 采用纯金属 Ni 作中间层扩散连接氧化铝颗粒增强铝基复合材料 ($Al_2O_3p/6061Al$), 探究了连接温度和保温时间对接头显微结构与力学性能的影响。结果表明, 连接温度 610~ 620℃ 时, 连接区主要由 Al_3Ni 和 Ni 在 Al 中固溶体组成, Al_3Ni 含量随连接温度升高、保温时间延长而减少; 连接温度 630℃ 时, 连接区主要由 Al_2O_3 颗粒和 Ni 在 Al 中固溶体组成, Al_2O_3 颗粒偏聚于接头中心。连接温度 620℃、保温时间 5~ 120min 条件下, 接头抗剪强度 68~ 93MPa, 断裂于连接区与母材界面; 连接温度 630℃、保温时间 5~ 120min 条件下, 接头抗剪强度 93~ 97MPa, 断裂于增强相偏聚区。

关键词: Ni 中间层; 铝基复合材料; 扩散连接

中图分类号: TG404 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2006)11-0009-04

Abstract: The effects of bonding temperature and bonding time on the microstructure and mechanical property of diffusion bonded aluminium-based metal matrix composite $Al_2O_3p/6061Al$ joint with Ni interlayer have been investigated. The experimental results show that, within the bonding temperature range of 610~ 620℃, the bonding region mainly consists of Al_3Ni and aluminium solid solution, and with increasing the bonding temperature and holding time results in the decrease of the amount of Al_3Ni in the joint. At the bonding temperature 630℃, the bonding region mainly consists of alumina particle and aluminium solid solution, in which alumina particles segregate in the center of the joint. For the joint bonded at 620℃/5~ 120min, shear strength is 68~ 93MPa and fracture occurs at the bonding region/base metal interface. For the joint bonded at 630℃/5min~ 120min, shear strength is 93~ 97MPa and fracture occurs at alumina particle segregation region.

Key words: Ni interlayer; aluminium metal matrix composite; diffusion bonding

颗粒增强铝基复合材料具有比强度高、比模量高、热膨胀系数小、耐磨损、各向同性等特性, 且制造方法简单、制造成本低, 在航空航天、军工、汽车、运动商品、电子等领域获得应用^[1,2]。随着其产品的商品化, 应用范围将进一步扩大, 其焊(连)接便成为亟待解决的问题之一。研究结果表明, 一些焊(连)接方法由于自身特点难于获得高质量接头, 而扩散连接被认为是较为理想的方法^[3,4]。颗粒增强铝基复合材料扩散连接时, 通常利用中间层的机械作用、化学作用或形成液相来克服待连接表面氧化膜(Al_2O_3)阻碍原子扩散及接头界面处存在增强相-增强相弱结合等困难。由于镍在铝中有高的扩散系数, 中间层与母材的相互作用较强, 一定程度上缩短了保温时间、提高了接头力学性

能^[5]。因此, 本工作用纯金属 Ni 作中间层连接颗粒增强铝基复合材料 ($Al_2O_3p/6061Al$), 探究连接温度和保温时间对其接头显微结构和力学性能影响, 旨在为获得满足使用性能要求的铝基复合材料焊(连)接头提供相应的实验依据。

1 实验

实验用母材为氧化铝颗粒增强铝基复合材料 ($Al_2O_3p/6061Al$), Al_2O_3 颗粒平均直径 15 μm 、体积分数为 19.4%, 基体主要成分见表 1, DT A 分析如图 1。母材试样规格为 3mm×5mm×8mm。中间层采用 Ni 箔, 厚度为 10 μm 。
连接前试样待连接表面、中间层箔片表面分别用

1200[#], 1800[#] 金相砂纸打磨, 并依次进行化学清洗、清水冲洗和超声波清洗。将中间层置于两试样待连接表面间, 装配在特制夹具上, 并施加一定的压力。连接在真空炉内进行, 真空度达到 4.0×10^{-3} Pa 时开始加热, 升温速度 5 °C/min, 连接温度误差 ± 5 °C, 保温预定时间后电阻炉断电, 试样随炉冷却至室温。

表 1 实验母材基体主要成分(质量分数/%)

Table 1 Composition of experimental materials (mass fraction/%)

Si	Mg	Cu	Zn	Fe	Al
0.49	0.62	0.25	0.25	0.70	Bal

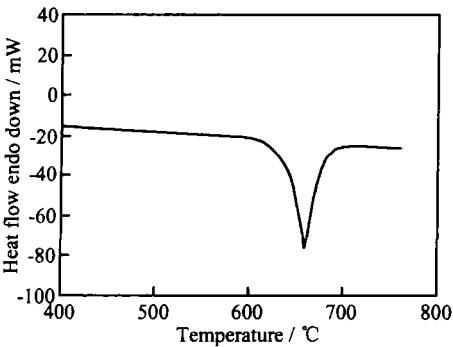


图 1 Al₂O₃p/6061Al 复合材料的 DTA 曲线

Fig. 1 DTA curve of Al₂O₃p/6061Al material

实验采用图像分析仪(VIDAS)测量增强相 Al₂O₃ 颗粒平均尺寸及体积分数; 使用配能谱仪的扫描电镜(JSM-5600)和 X 射线衍射仪(D/Max 2500PC)研究接头显微结构及相组成; 接头抗剪强度实验在 MTS810 型电液伺服材料实验系统上进行, 以三个试样接头抗剪强度平均值来评定。

2 结果与分析

2.1 接头显微结构

实验结果表明, 纯金属 Ni 中间层连接接头(Ni/Al₂O₃p/6061Al)显微结构主要取决于连接温度和保温时间。不同连接温度下各接头显微结构如图 2-4。由图 2 和图 3 可以看出, 连接温度 610~620 °C 时, Ni/Al₂O₃p/6061Al 接头连接区主要由 Al₃Ni 和 Ni 在 Al 中固溶体组成, Al₃Ni 的含量与连接温度和保温时间有关。连接温度越高、保温时间越长, 连接区中 Al₃Ni 含量越少。连接温度 610 °C 时, 随保温时间由 5min 延长至 120min, 连接区中 Al₃Ni 缓慢减少(图 2)。连接温度 620 °C 时, 保温时间由 5min 增至 60min, 连接区中 Al₃Ni 明显减少, 呈断续分布(图 3b); 保温时间达到 120min, 连接区中只有少量的 Al₃Ni 存在(图 3c)。由图 4 可见, 连接温度 630 °C 时, Ni/Al₂O₃p/6061Al 接头连接区主要由 Ni 在 Al 中固溶体和 Al₂O₃ 颗粒组

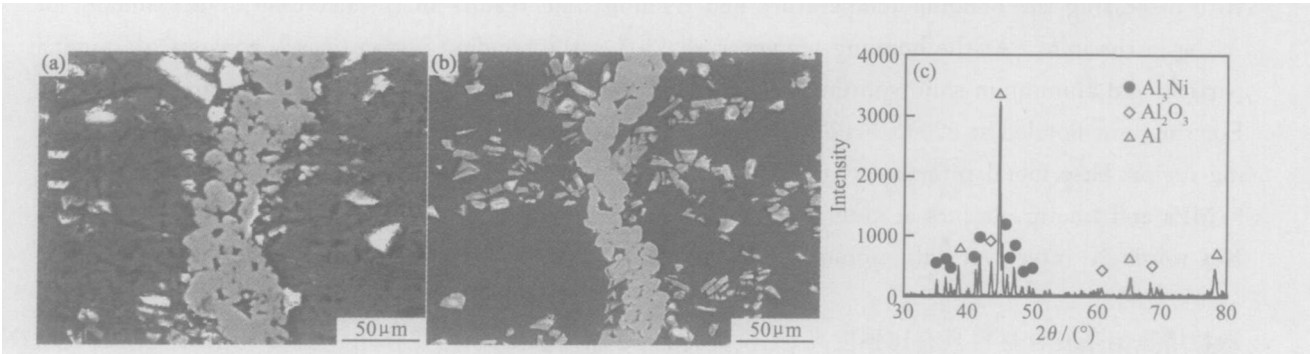


图 2 连接温度 610 °C 条件下 Ni/Al₂O₃p/6061Al 接头显微结构与分析 (a) 5min; (b) 120min; (c) 接头(a) 断口 X 射线分析

Fig. 2 Microstructures and analyses of Ni/Al₂O₃p/6061Al joints bonded at 610 °C

(a) 5min (b) 120min; (c) X-ray diffraction analysis of joint(a)

成, Al₂O₃ 颗粒偏聚于接头中心。这意味着 Al₂O₃ 颗粒是随母材溶解进入连接区的。

连接温度 610~620 °C 时, 连接区由 Al₃Ni 和 Ni 在 Al 中固溶体组成, 这主要是 Al, Ni 相互扩散的结果。L. S. Castleman 等人研究结果已显示, Al/Ni 扩散对在温度 600 °C 条件下保温几分钟, 界面处因 Al, Ni 相互扩散就可形成 Al₃Ni^[6,7]。这是该工艺条件下 Ni 中间层能够在较短保温时间内转化为 Al₃Ni 的主要原因。其次, 扩

散系数随温度升高而增大的, 较高的连接温度(610~620 °C)加速了中间层 Ni 与母材的相互作用。再者, 由 Al₂O₃p/6061Al 复合材料的热分析(图 1)可以看出, 连接温度 610~620 °C 时有微量母材转变为液相, 这些基体液相将进一步促进 Al, Ni 原子间互扩散。随连接温度升高, Al, Ni 原子间互扩散能力增强; 随保温时间延长, 连接区中有更多的 Ni 原子进入母材。因而, 连接温度愈高, 保温时间愈长, 连接区中 Al₃Ni 含量愈少。

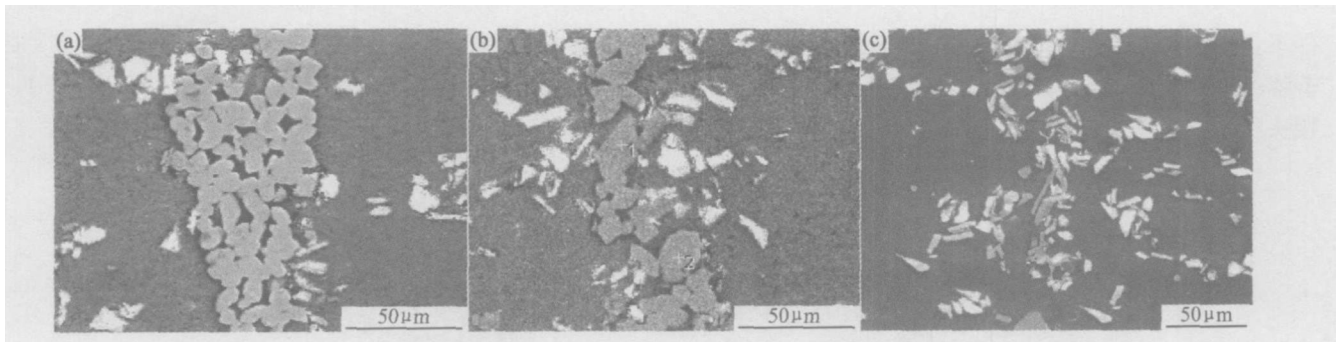


图 3 连接温度 620 °C 条件下 Ni/Al₂O₃p/6061Al 接头显微结构 (a) 5 min; (b) 60 min; (c) 120 min
Fig. 3 Microstructures of Ni/Al₂O₃p/6061Al joints bonded at 620 °C (a) 5 min; (b) 60 min; (c) 120 min

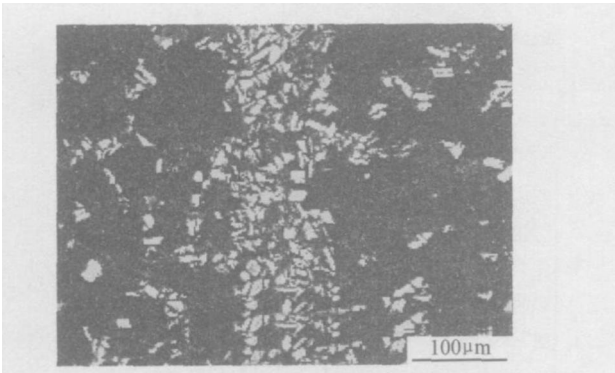


图 4 连接温度 630 °C、保温时间 120 min 条件下 Ni/Al₂O₃p/6061Al 接头显微结构
Fig. 4 Microstructure of Ni/Al₂O₃p/6061Al joint bonded at 630 °C for 120 min

连接温度 630 °C 时, Ni/Al₂O₃p/6061Al 接头连接区主要由 Ni 在 Al 中固溶体和 Al₂O₃ 颗粒组成, Al₂O₃ 颗粒偏聚于接头中心, 这主要归功于中间层 Ni 与母材发生共晶反应。中间层 Ni 与母材基体共晶反应形成液相, Al₂O₃ 颗粒随母材溶解进入液相; 在随后等温凝固过程中, 由于固/液界面的移动将 Al₂O₃ 颗粒推至接头中心未凝固的液相中, 导致形成增强相偏聚区。低于 Al-Ni 共晶温度 640 °C 发生 Ni 中间层与 Al₂O₃p/6061Al 母材共晶反应, 这可能主要与母材基体成分有关。母材基体中含有少量的合金元素 Si, Mg, Cu 等, 通过扩散形成了熔点更低的多元共晶体, 使连接系统的共晶温度降低。

2.2 接头力学性能

连接温度和保温时间对 Ni/Al₂O₃p/6061Al 接头抗剪强度影响的实验结果见图 5。由图可以看出, 连接温度 620 °C 时, 接头抗剪强度先随保温时间延长而缓慢增加, 当保温时间大于 60 min 时则明显增加。连接温度 630 °C 时, 随保温时间改变, 接头抗剪强度基本保持不变(93~97 MPa)。保温时间低于 60 min 时, 连接温度 620 °C 时接头抗剪强度均较低; 保温时间达到 120 min 时, 连接温度 620 °C 和 630 °C 时接头抗剪强度

相近。接头断裂截面分析结果表明, 接头断裂位置因其显微结构不同而不同, 如图 6 所示。连接温度 620 °C, 接头断裂于连接区与母材界面(图 6a), Al₃Ni/基体界面多为裂纹源; 连接温度 630 °C, 接头断裂于增强相偏聚区(图 6b)。

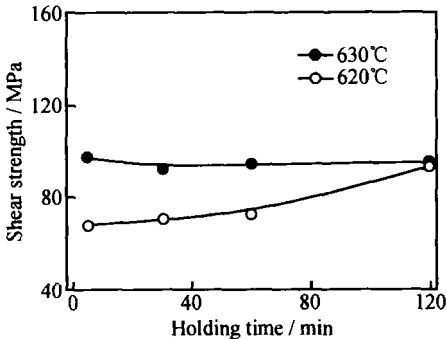


图 5 连接温度和保温时间对 Ni/Al₂O₃p/6061Al 接头抗剪强度影响

Fig. 5 Effect of bonding temperature and holding time on shear strength of Ni/Al₂O₃p/6061Al joint

连接温度 620 °C 时, 连接区主要由 Al₃Ni 和 Ni 在 Al 中固溶体组成, Al₃Ni/基体界面为弱连接。保温时间短, 连接区中 Al₃Ni 较多, 接头抗剪强度低; 随保温时间延长, 连接区中 Al₃Ni 逐渐减少, 接头抗剪强度逐渐增加; 保温时间高于 60 min, 连接区中 Al₃Ni 呈断续分布, 接头抗剪强度明显提高; 保温时间达到 120 min 时, 连接区中仅有少量零星分布的 Al₃Ni, 接头抗剪强度得以大大提高。

连接温度 630 °C 时, 主要由 Ni 在 Al 中固溶体和 Al₂O₃ 颗粒组成, Al₂O₃ 颗粒偏聚于接头中心。连接区中主要有三种结合形式, 即基体-基体、Al₂O₃-基体和 Al₂O₃-Al₂O₃, 其中后两者为弱结合, 可使接头强度降低。随保温时间增加, 连接区中弱连接几乎不变, 故接头抗剪强度基本保持不变。

综上所述, 仅从接头显微结构及力学性能角度考虑, 本实验条件下可得到较满意的 Ni/Al₂O₃p/6061Al 接头。特别是在连接温度 620 °C、保温时间 120 min 条

件下, 接头显微结构与母材近似, 接头抗剪强度较高。若继续延长保温时间, 连接区中 Al_3Ni 将进一步减少, 接头抗剪强度也可望得以改善。由扩散连接工艺角度

来看, 连接温度较高, 不利于保持母材的组织与性能。因此, 改进扩散连接工艺条件, 降低连接温度, 是下一步研究工作重点。

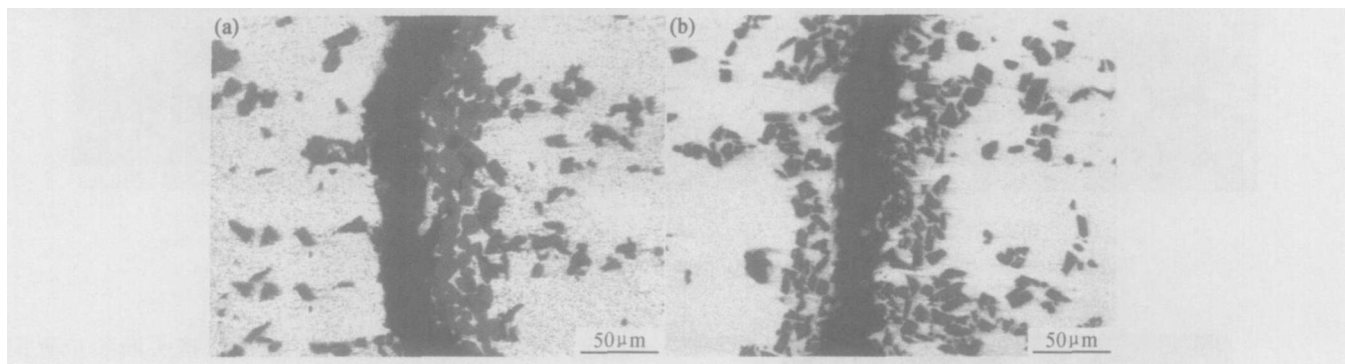


图 6 Ni/Al₂O_{3p}/6061Al 接头断裂位置(保温时间 5min) (a) 连接温度 620℃; (b) 连接温度 630℃

Fig. 6 Failure site of Ni/Al₂O_{3p}/6061Al joints at 620℃ (a) and 630℃ (b) for 5min

3 结论

(1) Ni/Al₂O_{3p}/6061Al 扩散连接接头显微结构取决于连接温度。连接温度 610~620℃ 时, 连接区主要由 Al_3Ni 和 Ni 在 Al 中固溶体组成, Al_3Ni 含量随连接温度升高、保温时间延长而减少; 连接温度 630℃ 时, 连接区主要由 Ni 在 Al 中固溶体和 Al_2O_3 颗粒组成, Al_2O_3 颗粒偏聚于接头中心。

(2) 连接温度 620℃ 时, 随保温时间增加 (5~120min), Ni/Al₂O_{3p}/6061Al 接头抗剪强度提高 (68~93MPa), 断裂于连接区与母材界面。

(3) 连接温度 630℃ 时, 随保温时间增加 (5~120min), Ni/Al₂O_{3p}/6061Al 接头抗剪强度基本保持不变 (93~97MPa), 断裂于增强相偏聚区。

参考文献

[1] 张大童, 李元元, 龙雁. 铝基复合材料研究进展[J]. 轻合金加工技术, 2000, (1): 5-10.

[2] 桂满昌, 王殿斌, 张洪. 颗粒增强铝基复合材料在汽车上的应用[J]. 工程材料, 1996, 10(5): 30-33.
[3] 任家烈, 吴爱萍. 先进材料的连接[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
[4] 刘卫红, 孙大谦, 贾树盛, 等. 颗粒增强铝基复合材料扩散连接研究进展[J]. 吉林大学学报工学版, 2002, 3: 96-100.
[5] ASKEW J R. Transient liquid phase bonding of 2124 aluminum metal matrix composite[J]. Materials Science and Technology, 1998, 14: 920-924.
[6] CASTLEMAN L S, SEIGLE L L. Layer growth during interdiffusion in the aluminium-nickel alloy system[J]. Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 1958, 212(5): 589-596.
[7] CASTLEMAN L S, SEIGLE L L. Formation of intermetallic layer in diffusion couples[J]. Journal of Metals, 1957, (10): 1173-1174.

收稿日期: 2005-09-08; 修订日期: 2006-01-05

作者简介: 刘卫红 (1969-), 女, 在职博士后, 主要从事材料焊(连)接技术研究, 联系地址: 北京 81 信箱 20 分箱 (100095)。

(上接第 8 页)

[11] KERRY S, SCOTT V D. Structure and orientation relation of precipitates formed in Al-Cu-Mg-Ag alloys[J]. Metals Science, 1984, 18: 289-294.
[12] CHEN Da qin, ZHENG Zi qiao, LI Shi chen, et al. Mechanism of stress aging in Al-Cu(-Mg-Ag) alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition), 2004, 14(4): 779-784.
[13] CHIH-HORNG CHANG, SHENG-LONG LEEB, JING-CHIE LINB, et al. Effect of Ag content and heat treatment on the stress corrosion cracking of Al-4.6Cu-0.3Mg alloy[J]. Materials Chemistry and Physics, 2005, 91: 454-462.
[14] XIAO D H, WANG J N, DING D Y, et al. Effect of Cu content on the mechanical properties of an Al-Cu-Mg-Ag alloy[J]. Jour-

nal of Alloys and Compounds, 2002, 343: 77-81.

[15] TELESNOV V V, KAPUTKIN E YA, GOLOVLEVA A P, et al. Temperature ranges of phase transformations and mechanical properties of alloys of the Al-Cu-Mg-Ag system with various Cu/Mg ratios[J]. Metal Science and Heat Treatment, 2005, 47(3-4): 139-144.

收稿日期: 2006-02-14; 修订日期: 2006-06-14

作者简介: 夏卿坤 (1963-), 男, 教授级高工, 博士生, 主要从事新型耐热铝合金的研究与开发, 联系地址: 中南大学材料科学与工程学院 (410083)。