

文章编号: 1004-0609(2005)06-0849-05

SiC_w/6061Al 铝基复合材料 粉末夹层瞬间液相扩散焊接工艺^①

刘黎明^{1, 2}, 高振坤²

(1. 哈尔滨工业大学 金属精密热加工国家重点实验室, 哈尔滨 150001;

2. 大连理工大学 材料工程系, 大连 116024)

摘 要: 采用质量比为 2:1 的铝铜混合金属粉末作为中间夹层, 通过 TLP 扩散焊接工艺焊接了 SiC_w/6061Al 铝基复合材料。结果表明, 在真空度为 1.33 Pa、焊接预紧力 20 MPa 的条件下, 最佳工艺参数为: 焊接温度 620 ℃, 保温时间 60 min。采用扫描电镜研究了焊缝的微观组织, 发现较低温度下焊缝存在较多的孔洞。用电子探针分析焊缝周围元素分布, 结果表明, 在焊缝处富集较多的氧元素和镁元素。这是因为基体铝合金中的镁与铜粉颗粒表面的氧化铜以及焊接工件表面的氧化膜(Al₂O₃)发生置换反应, 生成细小的 MgO 和 Al₂MgO₄ 颗粒。该反应有利于减小氧化膜的影响, 提高接头强度。

关键词: 铝基复合材料; 瞬间液相; 扩散焊接; 粉末夹层

中图分类号: TG 407

文献标识码: A

Pulverous interlayer transient liquid phase bonding craft of Al-based composite SiC_w/6061Al

LIU Liming^{1, 2}, GAO Zhenkun²

(1. National Key Laboratory for Precision Hot Processing of Metals,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Department of Materials Engineering,

Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Using aluminum powder and copper powder as pulverous interlayer, Al-based composite SiC_w/6061 was welded by transient liquid phase bonding. Mass ratio of aluminum powder and copper powder is 2:1, vacuum degree is 1.33 MPa, and retightening load is 20 MPa. The result of experiment shows that the optimum process parameters are: welding temperature 620 ℃, holding time 60 min. Observing with scanning electronic microscope, many holes are found at weld lines if works pieces are welded at lower temperature. Distribution of elements around weld line is analyzed with electronic probe. The results indicate that O and Mg is enriched at weld line. Magnesium within aluminum alloy reacts with CuO and Al₂O₃ to produce MgO particles and Al₂MgO₄ particles respectively, which is favorable for restraining the effect of oxide film and enhancing mechanics properties of welded joints.

Key words: Al-based composite; transient liquid phase(TLP); diffusion welding; pulverous interlayer

由于铝基复合材料具有高比强度、高比刚度、耐热性和耐磨性等优异性能, 目前已经被广泛应用到航空航天、汽车、机械等领域, 具有很大的开发

潜力。但是受这种材料特殊组织结构限制, 采用普通的焊接方法焊接时, 在焊缝极易出现气孔、偏聚和界面反应等缺陷, 很难得到良好的接头性能。

① 收稿日期: 2004-12-23; 修订日期: 2005-03-10

作者简介: 刘黎明(1967-), 男, 博士, 教授。

通讯作者: 刘黎明, 教授; 电话: 0411-84707817; E-mail: liulm@dlut.edu.cn

目前,美国、俄罗斯、日本等国家在金属基复合材料焊接技术方面的研究比较成熟,主要集中在脉冲 TIG 焊、脉冲 MIG 焊、扩散焊、摩擦焊、爆炸焊和激光焊接等领域,并且已经在实际生产中得到广泛应用;国内关于金属基复合材料焊接技术的研究起步较晚,尚处于实验阶段,报道较多的焊接方法有扩散焊接、脉冲氩弧焊、摩擦焊和脉冲激光焊等^[1, 2]。

扩散焊接由于其焊接温度低等特点,可以避免或减少焊接缺陷,获得良好接头^[3~7]。但是采用扩散焊焊接铝基复合材料时,结合面上存在裸露的增强相,会降低接头强度^[8, 9]。而通过结合面产生液相来润湿增强相,能消除部分焊接缺陷,获得较高质量的焊接接头^[10]。所以本文作者以 SiC_w/6061Al 铝基复合材料为对象,研究了用铝、铜混合金属粉末作为中间夹层进行 TLP 扩散焊接的特点和机理,通过焊接过程中在结合面生成铝、铜低熔点共晶产物来改善接头性能^[11~14]。

1 实验

1.1 材料

铝基复合材料 SiC_w/6061Al 采用挤压铸造法制造。增强相 SiC_w 直径为 0.5~2 μm,长度为 2~10 μm,体积分数为 20%。该复合材料在退火状态下的拉伸强度为 223 MPa,经 DSC 热分析系统测定,基体铝合金的液、固温度区间为 618~676 ℃。复合材料的显微组织见图 1,基体 6061Al 的化学成分列于表 1。实验中采用 Al 与 Cu 质量比为 2:1 的铝粉与铜粉混合金属粉末为中间夹层。所用铝粉的平均粒径为 80 μm,其中含有少量 Fe、Cu、Si 等杂质元素;铜粉平均粒径为 50 μm,其中铜的含量不少

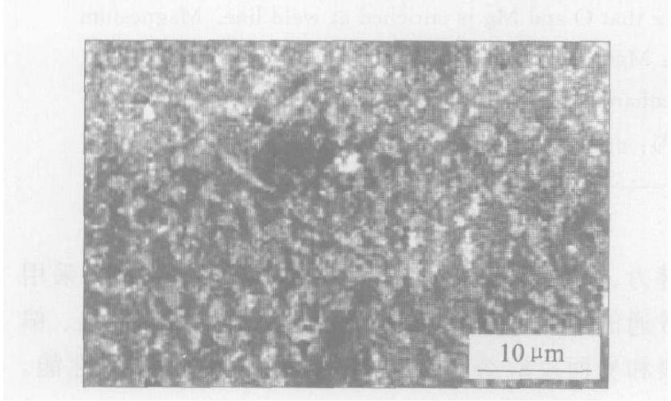


图 1 SiC_w/6061Al 铝基复合材料的显微组织
Fig. 1 Microstructure of aluminum matrix composite SiC_w/6061Al

于 99.5%,所含杂质列于表 2。

表 1 6061Al 的化学成分
Table 1 Chemical compositions of 6061Al alloy (mass fraction, %)

Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Ni	Al
0.34	0.75	0.22	0.36	1.26	< 0.15	< 0.05	< 0.05	Bal

表 2 铜粉中杂质的含量
Table 2 Content of impurities in copper powder (mass fraction, %)

Nitric acid insoluble matter	Water soluble matter	Fe	Sulfur compound	Chloride
< 0.030	< 0.030	< 0.010	< 0.010	< 0.002

1.2 实验方法

将材料加工成尺寸为 5 mm × 10 mm × 25 mm 的试件,进行对接平焊。接头处理过程如图 2 所示。金属粉末中加入粘结剂,调成均匀的糊状,然后平铺在清洗后工件的待焊表面上,吹干后用夹具夹紧。焊接过程在自制真空炉中进行,用电阻丝加热;真空度为 1.33 Pa;焊接温度在 580~640 ℃之间每隔 20 ℃取一点,焊接试件和夹具在真空状态下随炉一起由室温升至实验温度,升温速度为 8 ℃/min,保温时间为 20~60 min,保温结束后,在真空状态下冷却至室温;焊接预紧压力为 20 MPa。随温度的不断升高,夹具会受热产生膨胀,造成接头压力不断降低,这恰好弥补了铝基复合材料在液固温度区间强度低、易破碎的缺点。工件和夹具冷却后,夹具收缩,接头压力有所升高,但是由于焊接工件变形不能达到焊前的预紧压力。

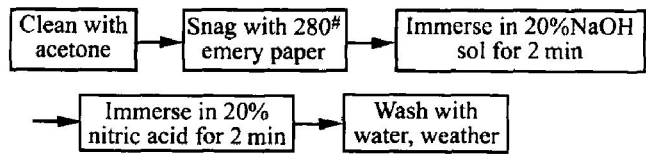


图 2 接头表面处理流程图
Fig. 2 Flow chart for treatment of joint surface

焊后利用 CSS - 2205 型电子万能实验机测试焊接接头的力学性能。采用扫描电子显微镜 JSM - 5600LV 分析接头微观组织。采用 EPMA - 1600 型电子探针分析接头各种合金元素的分布。

2 结果及讨论

2.1 力学性能及微观组织的分析

实验中分别在不同焊接温度和保温时间下焊接 SiC_w/6061Al 铝基复合材料, 焊后进行接头力学性能测试, 每一个测试结果分别取相同工艺参数下 3 个试样拉伸强度的平均值。测试结果如图 3 所示。

从图 3 中数据可以看出, 随保温时间的延长和焊接温度的增加接头强度都有一定程度的提高。这

是因为在实验所选的焊接温度下, 混合粉末中的铜会向铝粉和基体金属中扩散, 生成低熔点共晶产物, 从而在较低的温度下得到液态金属。随焊接时间的延长, 熔化的共晶产物逐渐铺展到金属颗粒和基体金属的表面, 在这样的情况下, 不断有铜和铝被溶解, 并扩散到液态金属中, 使液态金属不断增加, 直到夹层中的铜颗粒完全溶解为止。同时, 液态金属中的铜也会不断向基体扩散, 伴随液相中铜含量的减少, 液态金属的熔点不断升高, 最后沉积在基体表面。继续保持实验温度, 焊缝中富集的铜会不断向母材中扩散, 使得焊缝组织逐渐均匀化, 最终得到性能良好的焊接接头。根据 Al-Cu 二元相图可知, 如果焊接温度不够高, 焊接过程中获得液相产物的铝、铜比例范围相对减小, 就不能得到足够的液相, 这不利于原子的扩散, 从而容易在焊缝出现孔洞等焊接缺陷, 导致接头性能降低。图 4 所示为不同焊接温度下接头的微观组织照片。可见, 如果保温时间较短, 焊缝中的铜元素不能充分扩散到母材当中, 导致焊缝中存在大量的共晶产物。由于该共晶产物为脆性相, 因此, 其存在会严重降低接头强度。实验表明在焊接温度高于 620 ℃或保温时间为 60 min 时, 可以得到较高强度的接头。在 640 ℃保温 60 min 的焊接条件下, 获得最高的接头

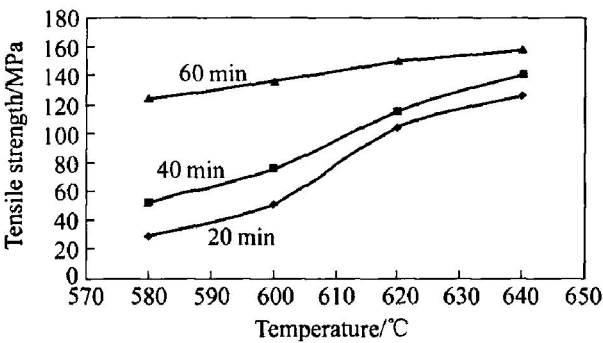


图 3 不同焊接温度和保温时间下焊接接头的拉伸强度

Fig. 3 Tensile strength of welded joint under different welding tempertures and holding time

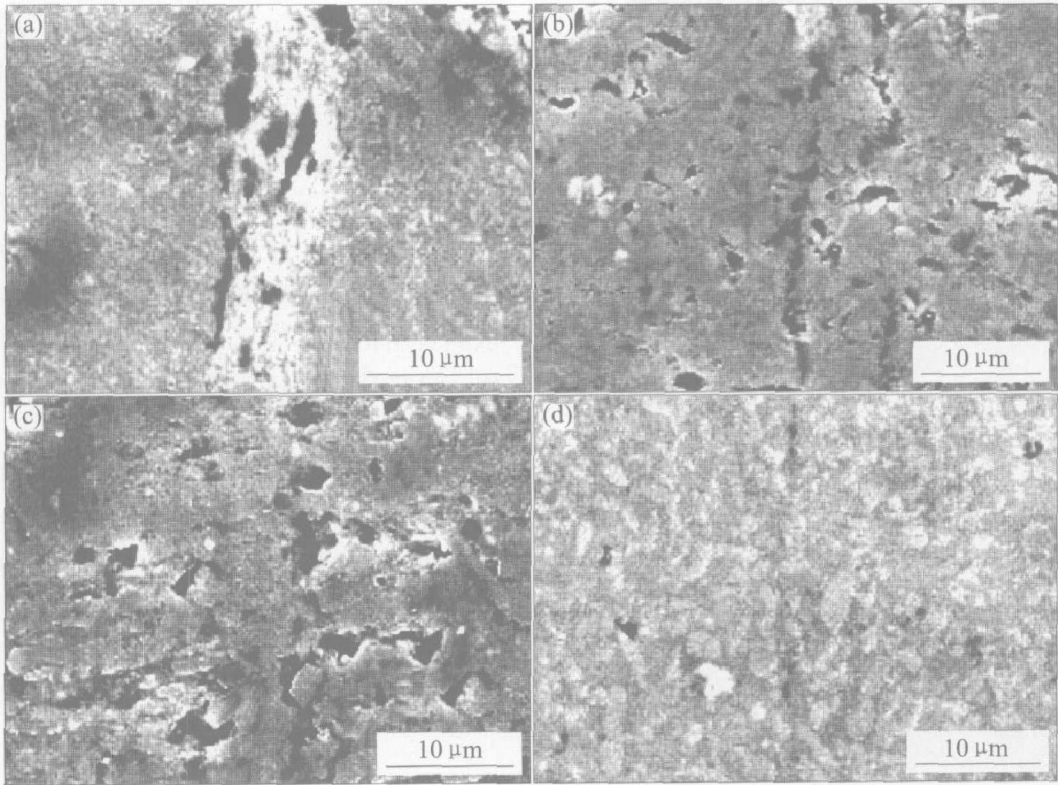


图 4 焊接接头的微观组织

Fig. 4 Microstructures of welded joints at different melding temperatures (a) —580 ℃, 60 min; (b) —600 ℃, 60 min; (c) —620 ℃, 60 min; (d) —640 ℃, 60 min

强度为 157 MPa, 相当于母材拉伸强度的 70%, 但是由于温度过高, 焊接工件存在较大的变形, 所以最理想的焊接工艺参数为: 焊接温度 620 °C, 保温时间 60 min。

2.2 焊缝区域元素的分布

采用电子探针对 620 °C 保温 60 min 条件下的焊接接头元素分布进行检测时, 发现焊缝及周围区域的铜元素分布均匀, 与母材基体中铜的含量基本相同, 而焊缝处铝元素却有轻微减少的趋势(如图 5(a) 所示)。这说明在该焊接条件下铜元素已经完全溶解并充分扩散, 包括铜粉颗粒表面的氧化铜也被还原; 铝含量的减少, 说明焊缝处含有一些其他杂质。镁与氧的含量在焊缝处急剧增加(如图 5(b) 所示)。由于铝合金中含有少量镁元素, 其活性高于铜和铝, 所以镁优先与铜粉颗粒表面的氧化铜发

生置换反应, 反应式为



通过发生式(1)的反应, 焊缝处的 Mg 和 CuO 不断转化为细小的 MgO 颗粒和金属铜, 使得此处单质镁的浓度不断降低。在浓度梯度的作用下, 母材基体中的镁元素不断扩散到焊缝处, 并维持反应(1)的进行。此外, MgO 小颗粒的扩散性很差, 通常滞留在焊缝中, 造成焊缝中聚集较多的 MgO, 这就是导致电子探针测试结果中焊缝处含有大量的氧和镁的原因。由于 MgO 颗粒非常细小, 一般情况下会弥散在焊缝金属中, 所以 MgO 对焊接过程中原子扩散的阻碍作用并不大, 对焊后接头性能的影响也不明显; 同时, 该反应消除了氧化铜的不良影响, 总的来说有利于焊接过程中原子的扩散, 从而得到较高质量的接头。

此外, 牛等^[15]和刘^[16]的研究表明, 基体铝合金中的镁还会与焊接工件表面的氧化膜(Al_2O_3)发生置换反应, 生成细小的 Al_2MgO_4 颗粒和 Al, 使得氧化膜破碎、弥散, 这在很大程度上降低了焊接过程中氧化膜对原子扩散的阻碍作用, 减少了接头缺陷, 有利于接头强度的提高。

3 结论

1) 采用 Al-Cu 混合金属粉末作为中间夹层, 通过 TLP 扩散焊接工艺焊接铝基复合材料 $\text{SiC}_w/6061\text{Al}$, 可以得到较高强度的接头。

2) 提高焊接温度, 可以扩大焊接过程中得到金属液相的 Al-Cu 比例范围, 从而有利于加速接头元素的扩散速度, 并且可以填充焊缝中存在的孔洞。

3) 延长保温时间, 可以使焊缝中铜元素充分扩散到母材的基体金属中, 使得焊接过程开始形成的铝、铜共晶产物转变成与基体材料相似的铝合金, 获得均匀的焊缝组织。

4) 基体铝合金中的镁元素分别与铜粉颗粒表面的氧化铜和焊接工件表面的氧化膜发生置换反应, 生成细小的 MgO 颗粒和 Al_2MgO_4 颗粒, 并弥散在焊缝处的金属中, 降低了氧化物对焊接过程中原子扩散的阻碍作用, 减少焊缝处的缺陷, 从而提高了接头强度。

REFERENCES

- [1] 许志武, 吕世雄, 闫久春, 等. 非连续增强铝基复合材料固相焊接研究现状[J]. 哈尔滨工业大学学报,

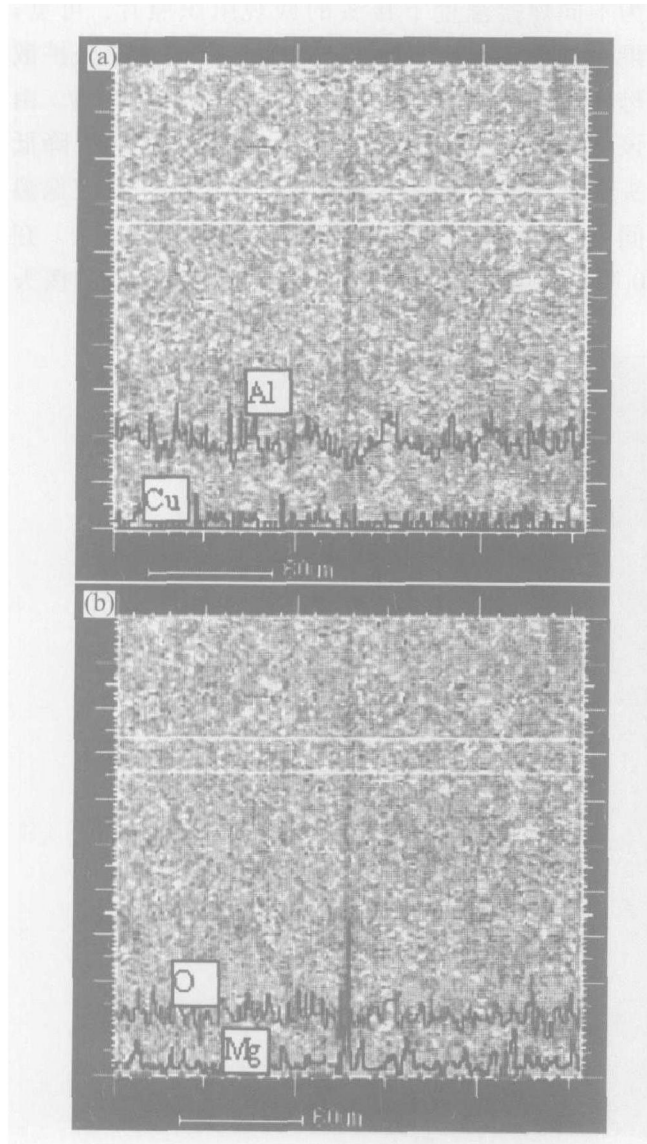


图 5 焊接接头的元素分布

Fig. 5 Distributions of elements in welded joint

- 2004, 36(5): 593 - 598.
- XIU Zhiwu, LÜ Shixiong, YAN Jinchun, et al. Solid phase bonding of discontinuously reinforced aluminum based metal matrix composites[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004, 36(5): 593 - 598.
- [2] 曲文卿, 张彦华, 姚君山. SiC 颗粒增强 Al 基复合材料焊接工艺研究[J]. 宇航材料工艺, 2002(4): 46 - 50.
- QU Wenqing, ZHANG Yanhua, YAO Junshan. Study of welding process of SiC particle reinforced Al based composite[J]. Aerospace Materials & Technology, 2002(4): 46 - 50.
- [3] 卡扎柯夫 H Q. 材料的扩散焊接[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984. 4 - 12.
- Kazagof H Q. Diffusion Welding of Materials[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1984. 4 - 12.
- [4] Lee C S, Li H, Chandel R S. Vacuum-free diffusion bonding of aluminum metal matrix composite[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 89 - 90: 326 - 330.
- [5] LIU Liming, DONG Changfu, GAO Zhenkun. Diffusion welding process and joint's microstructure behavior of SiCw/6061Al composite[J]. Rare Metals, 2004, 23(4): 347 - 351.
- [6] LIU Liming, NIU Jitai, TIAN Yanhong, et al. Diffusion bonding mechanism and microstructure of welded joint of aluminum matrix composite Al_2O_3 /6061Al[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 1999, 9(4): 826 - 830.
- [7] LIU Liming, ZHU Meili, NIU Jitai, et al. Predicting effects of diffusion welding parameters on welded joint properties by artificial neural network[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2001, 11(4): 475 - 478.
- [8] 牛济泰, 刘黎明, 武高辉, 等. 亚微米级 Al_2O_3 /6061Al 复合材料的扩散焊接[J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(3): 477 - 481.
- NIU Jitai, LIU Liming, WU Gao-hui, et al. Diffusion bonding mechanism of submicron composite Al_2O_3 /6061Al[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1999, 9(3): 477 - 481.
- [9] YAN Jinchun, XU Zhiwu, WU Gao-hui, et al. Interface structure and mechanical performance of TLP bonded joints of Al_2O_3 /6061Al composites using Cu/Ni composite interlayers[J]. Scripta Materialia, 2004, 51(2): 147 - 150.
- [10] Shirzadi A A, Assadi H, Wallachl E R. Interface evolution and bond strength when diffusion bonding materials with stable oxide films[J]. Surface and Interface Analysis, 2001, 31(7): 609 - 618.
- [11] 郭庚辰. 液相烧结粉末冶金材料[M]. 北京: 化工工业出版社, 2003. 2 - 219.
- GUO Gengchen. Liquid Sintering of Powder Metallurgy Materials[M]. Beijing: Publishing House of Chemical Industry, 2003. 2 - 219.
- [12] 闫国永, 李绍成. 铝锂合金无中间层扩散焊接工艺研究[J]. 材料开发与应用, 2001, 16(2): 10 - 12.
- YAN Guoyong, LI Shaoyang. Research on diffusion welding technology of Al-Li alloys without interlayer[J]. Development and Application of Materials, 2001, 16(2): 10 - 12.
- [13] 周波, 盛光敏, 黄家伟, 等. 钛合金与不锈钢的纳米扩散焊接工艺探索[J]. 焊接技术, 2004, 33(1): 15 - 17.
- ZHOU Bo, SHENG Guangmin, HUANG Jiawei, et al. Diffusion bonding of titanium alloy and stainless steel by interlayer of nano Ni particles[J]. Welding Technology, 2004, 33(1): 15 - 17.
- [14] 张胜, 侯金保, 郭德伦, 等. MGH956 合金 TLP 连接机理及接头组织分析[J]. 焊接学报, 2004, 25(3): 43 - 48.
- ZHANG Sheng, HOU Jinbao, GUO Delun, et al. Transient liquid phase bonding mechanism and microstructure of MGH956[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(3): 43 - 48.
- [15] 牛济泰, 王慕珍, 刘黎明, 等. 扩散焊条件下 Al_2O_3 /6061Al 复合材料中氧化膜的行为[J]. 材料研究学报, 2000, 14(3): 244 - 248.
- NIU Jitai, WANG Muzhen, LIU Liming. Behavior of oxide film in diffusion welding of aluminum matrix composites Al_2O_3 /6061Al[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2000, 14(3): 244 - 248.
- [16] 刘黎明. 铝基复合材料非夹层液相扩散焊接机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2000.
- LIU Liming. A Study of Mechanism of Noninterlayer Liquid Phase Diffusion Welding for Aluminum Matrix Composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2000.

(编辑 陈爱华)