

[文章编号] 1004- 0609(2002)01- 0131- 05

热暴露对 B/Al 复合材料力学性能的影响^①

杨盛良¹, 张绪虎², 杨德明¹

(1. 国防科技大学 材料工程与应用化学系, 长沙 410073; 2. 航天材料及工艺研究所, 北京 100086)

[摘 要] 研究了由热等静压工艺制备的 B/Al 复合材料在 300 ℃和 500 ℃条件下经不同时间热暴露处理后的力学性能及断口特征, 从界面微观特征的角度分析了温度和时间等参数对性能产生影响的原因。实验结果表明: 在 300 ℃长时间(50~ 100 h)热暴露后, 性能下降幅度约为 20%~ 30%; 温度为 500 ℃时, 经较短的时间(数小时)热暴露后性能显著下降。微观分析表明: 在 300 ℃长时间热暴露后没有明显的界面反应, 在 500 ℃数小时热暴露后出现纤维和基体的界面反应层, 界面反应的发生使力学性能降低。

[关键词] B/Al 复合材料; 热暴露; 力学性能; 断口; 界面反应

[中图分类号] TG 318

[文献标识码] A

尽管金属基复合材料的种类越来越多, 研究内容也更广泛^[1, 2], 但硼纤维增强铝复合材料(B/Al)这类研究和应用最早的纤维增强金属基复合材料, 仍具有比强度、比模量高、结构刚度好等优势。该材料自 20 世纪 70 年代就在航空、航天等高新技术领域得到了应用^[3]。对于含 B₄C 涂层的硼纤维及其复合材料, 国内的研究单位也开展了不少研究工作^[4, 5], 对无涂层硼纤维增强铝基复合材料的研究则较少, 由于没有保护性涂层, 纤维与基体在高温下可能发生反应, 影响复合材料的力学性能。有研究表明, 热压温度和时间等工艺因素对性能有显著的影响^[6], 而且在实际应用中, B/Al 复合材料往往需要承受一定时间的高温环境条件, 因此研究热暴露对力学性能的影响也具有十分实际的意义。

1 实验材料与方法

实验所用 B 纤维表面无涂层, 直径约 140 μm, 基体为 LF6 铝合金, 主要合金元素有 Mg(5.8%~ 6.8%)和 Mn(0.50%~ 0.80%)。B/Al 板材采用热等静压法制备, 厚度约 2 mm, 纤维体积分数约 45%。制备工艺参数及热暴露处理(大气环境)规范如表 1 所示。典型的 B/Al 复合材料横截面金相如图 1 所示, 可以看到纤维排列规则, 分布均匀。

2 结果与讨论

2.1 B/Al 复合材料经热暴露后的力学性能

表 1 B/Al 复合材料制备工艺参数及热暴露规范

Table 1 Parameters of hot-press fabrication and thermal exposure process

Hot press temperature / ℃	Hot press pressure / MPa	Pressure holding time/ min	Thermal exposure temperature/ ℃	Thermal exposure time/ h
510~ 520	70	120	300, 500	0.5, 5, 10, 20, 50, 100

经热暴露处理后复合材料的拉伸强度和断裂延伸率如图 2, 3 所示。

由图可以看出, 力学性能随热暴露温度和时间变化规律主要有以下几个方面:

1) 材料在 300 ℃下热暴露时, 性能下降速度较慢, 20h 内强度基本不下降, 且经短时(0.5 h)热暴露后强度反而有小幅提高, 断裂延伸率也略有增大, 这一性能提高的现象在早期的研究中就已发现, 但对其解释尚未一致。早期报道认为其原因可能是原始氧化物界面产生了面积不大(< 1%)的局部破坏, 生成了大量孤立的、小的 AlB₂ 针状物, 起到把基体和纤维锁住的附加强化作用^[7]。还有人认为可能与材料内部残余应力状态的变化有关^[8], 对铝合金基体来说 300 ℃相当于退火温度, 有利于降低基体在复合过程中产生的内部残余拉伸应力, 从而提高基体的性能。作者通过对界面的 TEM 微观分析认为氧化物界面的局部破坏不明显, 因此后一种解释应该更符合本实验结果。

2) 复合材料经 300 ℃长时间热暴露后性能有一定程度的下降。300 ℃50 h 后, 强度保留率约

① [收稿日期] 2001- 03- 06; [修订日期] 2001- 04- 17

[作者简介] 杨盛良(1970-), 男, 讲师, 博士。

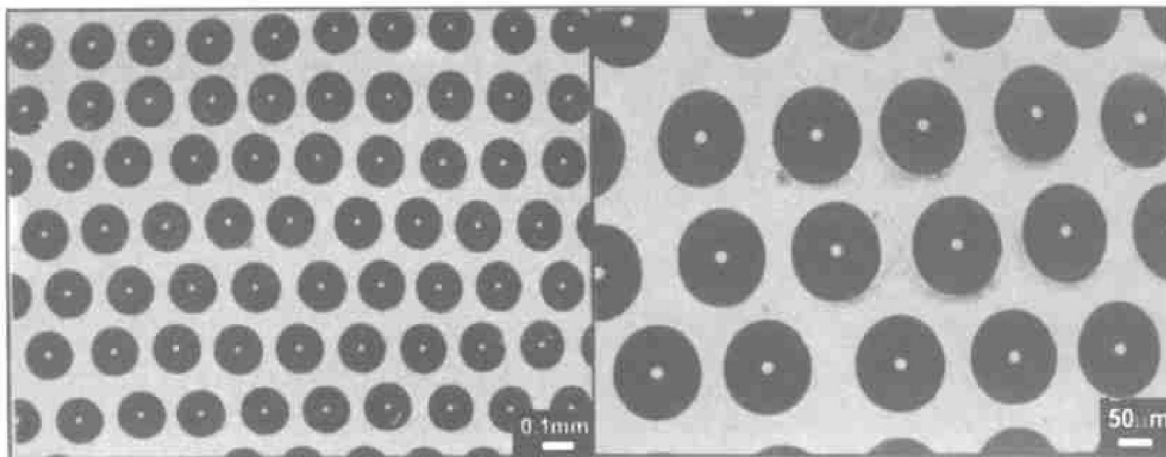


图 1 B/Al 复合材料横截面 SEM 照片

Fig. 1 SEM micrographs of B/Al composite

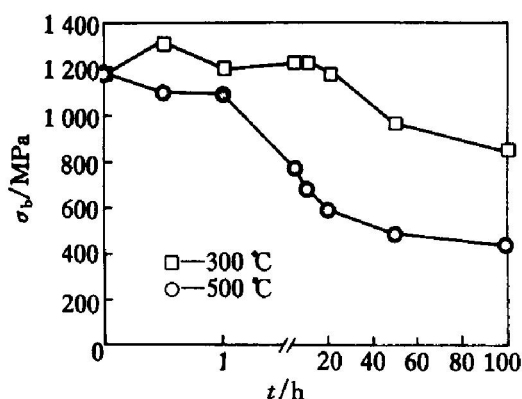


图 2 B/Al 复合材料拉伸强度随热暴露温度及时间的变化

Fig. 2 Tensile strength of B/Al composite under different thermal exposure conditions

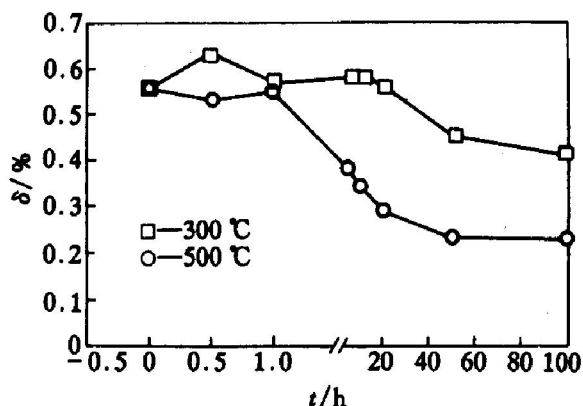


图 3 断裂延伸率随热暴露规范的变化

Fig. 3 Fracture elongation of B/Al composite under different thermal exposure conditions

82%，延伸率保留率 81%；100 h 后强度保留率约 72%，延伸率保留率 74%。

3) 热暴露温度为 500 °C 时，在 1 h 以内复合材料强度没有显著下降(强度保留率大于 95%)，但也

未明显上升；时间在 5 h 以上时，强度有明显降低。500 °C 热暴露 5 h 后材料强度明显低于 300 °C 热暴露 100 h 时的强度，强度保留率仅 65%，延伸率保留率 68%；而经 500 °C，100 h 热暴露后强度保留率不到 40%，延伸率保留率 41%，性能已严重降低。

2.2 B/Al 复合材料经热暴露后的拉伸断口特征

B/Al 复合材料经热暴露后力学性能产生的变化在拉伸断口的特征上也必然会有所体现。图 4 为典型热暴露规范下 B/Al 复合材料的宏观拉伸断口形貌，图 5 所示为断口微观形貌，从图中可以看出以下几点规律：

1) 制造态 B/Al 的拉伸断口从宏观上看，断口路径呈锯齿状，较为曲折，从微观上看，部分纤维

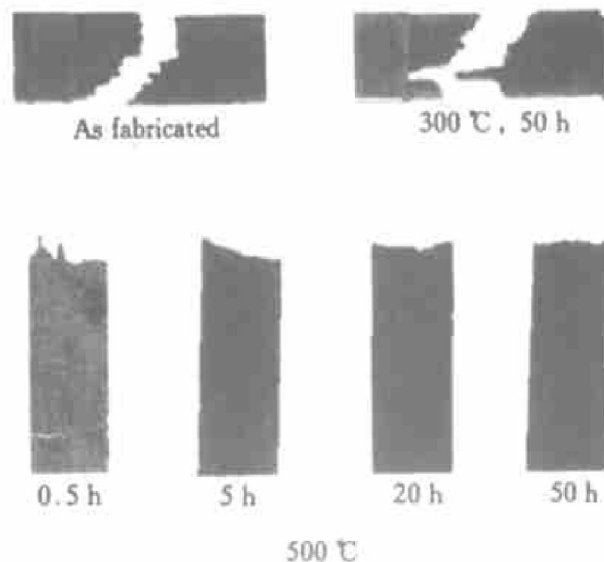


图 4 B/Al 复合材料试样的宏观断口形貌

Fig. 4 Fracture patterns of B/Al composite specimens under different thermal exposure processes

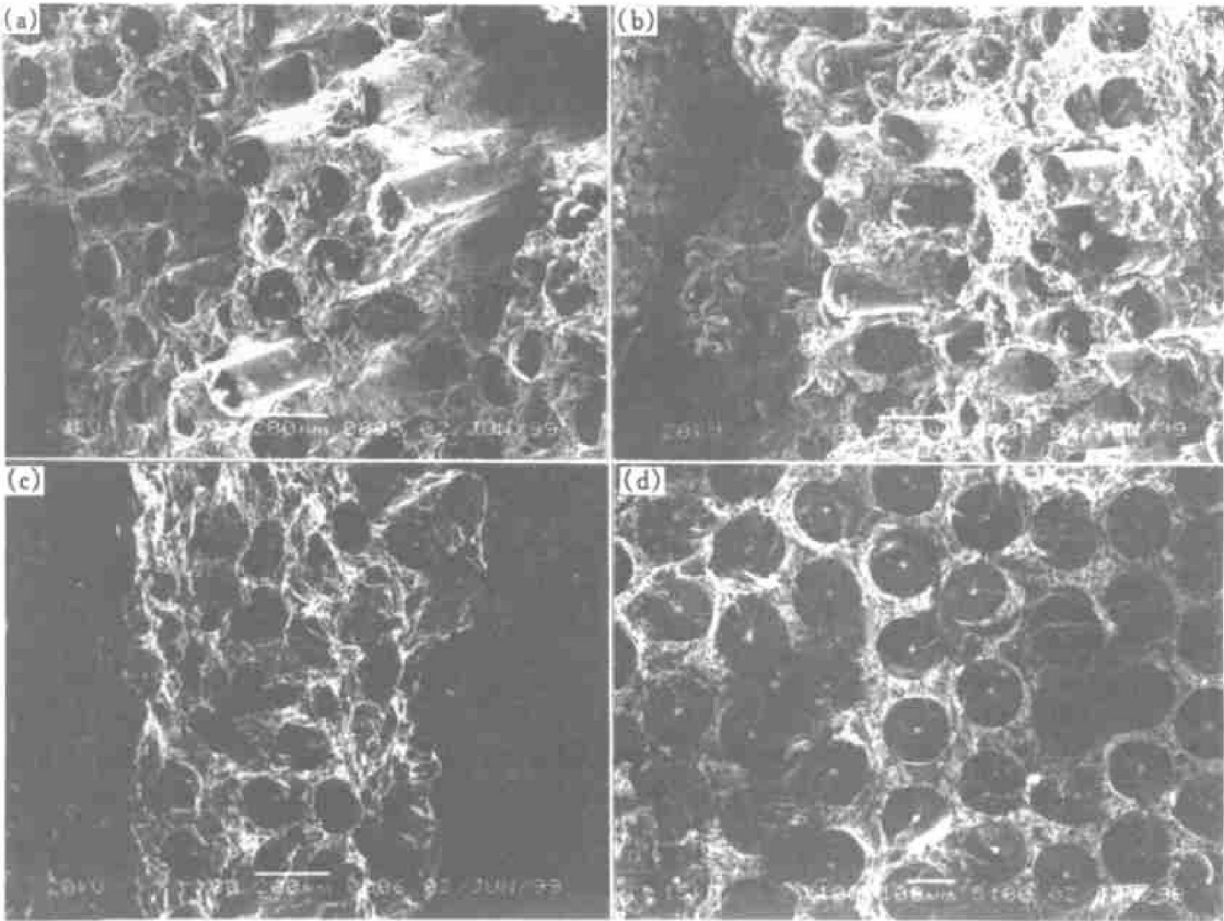


图 5 制造态及热暴露后 B/Al 复合材料断口形貌

Fig. 5 Fractographys of as fabricated and thermal exposed B/Al composite

(a) —As fabricated; (b) —Thermal exposure 300 °C, 50 h; (c) —500 °C, 5 h; (d) —500 °C, 50 h

有一定长度的拔出, 这种断裂为损伤累积型断裂, 纤维承载能力发挥较为充分, 有利于获得较高的强度。

2) 300 °C, 50 h 和 500 °C, 0.5 h 热暴露条件下的断口仍保持着制造态断口的曲折和纤维拔出特征, 但曲折程度和纤维拔出的长度有所减小, 由材料力学性能的变化规律可以判断, 经 300 °C 各时间及 500 °C, 1 h 内热暴露后, B/Al 复合材料的断口基本特征与制造态相似, 即宏观上断口较曲折, 微观上断口有纤维拔出, 随着性能的变化, 在断口曲折程度和纤维拔出长度及数量上有一定的变化。

3) 经 500 °C, 5 h 以上热暴露后, 复合材料强度的显著变化在断口上也有体现, 表现为宏观上断口较平直, 断裂路径短, 在断口微观形貌上表现为纤维基本没有拔出, 为典型的非累积型脆性断口, 局部纤维的断裂很快导致材料的整体破坏, 因而强度低。

在不同热暴露条件下之所以有不同的断裂模式, 应归因于界面反应层的影响。热暴露温度较高、时间较长时, 脆性的界面反应物形成明显的反

应层, 裂纹容易在反应层萌生, 并且向纤维横向扩展, 从而引起低应力破坏, 纤维也没有拔出现象。Herring H W 等^[9]也报道了不同温度和时间处理的 B/Al 复合材料强度与断口特征的规律, 与本实验结果是基本一致的。

2.3 热暴露后的界面微观结构特征

图 6 为经 300 °C, 50 h 热暴露后的界面 TEM 形貌像, 可见界面清晰, 未见 B-Al 反应物, 但在某些区域界面上有 FeMnAl 相析出, 影响了复合材料的性能(强度下降 20% ~ 30%)。从有关文献报道^[10]来看, 基体为含少量 Mg 的 Al 合金(1.8% ~ 2.8% Mg, 0.2% ~ 0.6% Mn)时, 经 300 °C, 长达 250~ 500 h 热暴露后, B/Al 强度下降仅约 5%, 萃取纤维强度基本不下降。本实验所用基体合金元素含量较高, 在界面析出的相数量较多、尺寸较大, 因而 300 °C 较长时间热暴露后性能有一定程度的下降。但总的来说, 温度为 300 °C 时, 即使进行长时间热暴露, 纤维也不会因反应而损伤并造成材料强度严重下降。

图 7 为经 500 °C 不同时间热暴露后的界面 TEM 形貌像。时间为 0.5 h 时, 界面清晰, B 纤维一侧为均匀的纤维原始形貌, 与图 6 中类似, 因此可以判断没有界面反应发生, 与此对应的复合材料力学性能基本上没有下降; 而时间为 5 h 时, 沿箭头所指仍可分辨界面位置(135°方向), 但界面两侧已可见到明显的反应层, B 纤维表层的反应层厚度在 600 nm 以上, 此时复合材料的性能也明显降低。由此可见, 500 °C 条件下经较短的时间后纤维与铝发生界面反应, 从而导致性能下降。

3 结论

1) 热暴露对 B/Al 复合材料的力学性能的影响与温度和时间密切相关。300 °C 热暴露时, 短时热暴露后强度略有升高, 强度在 20 h 内基本不下降, 100 h 时强度下降约 30%; 在 500 °C 热暴露时, 强度在 1 h 内未下降, 5 h 以后强度显著降低。

2) 拉伸试样的断口分为两种类型: 在 300 °C 热暴露或 500 °C 短时热暴露时断口上有纤维的拔出, 断裂路径比较曲折; 而在 500 °C 较长时间热暴露, 性能显著下降时, 断口比较平直, 无纤维拔出。

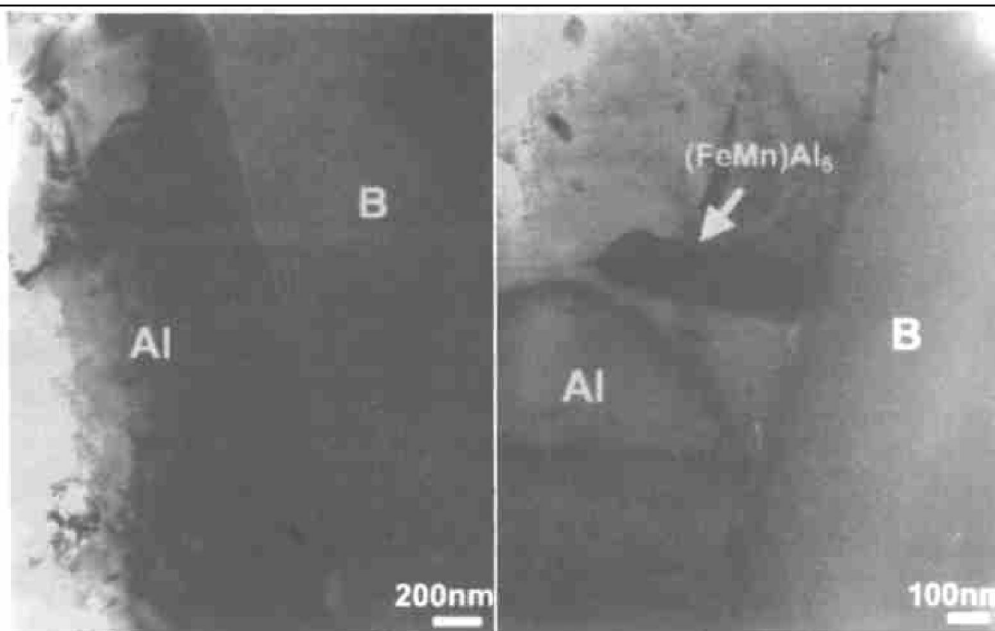


图 6 经 300 °C, 50 h 热暴露后 B/Al 的界面 TEM 像

Fig. 6 TEM micrographs of B/Al composite after 300 °C, 50 h thermal exposure

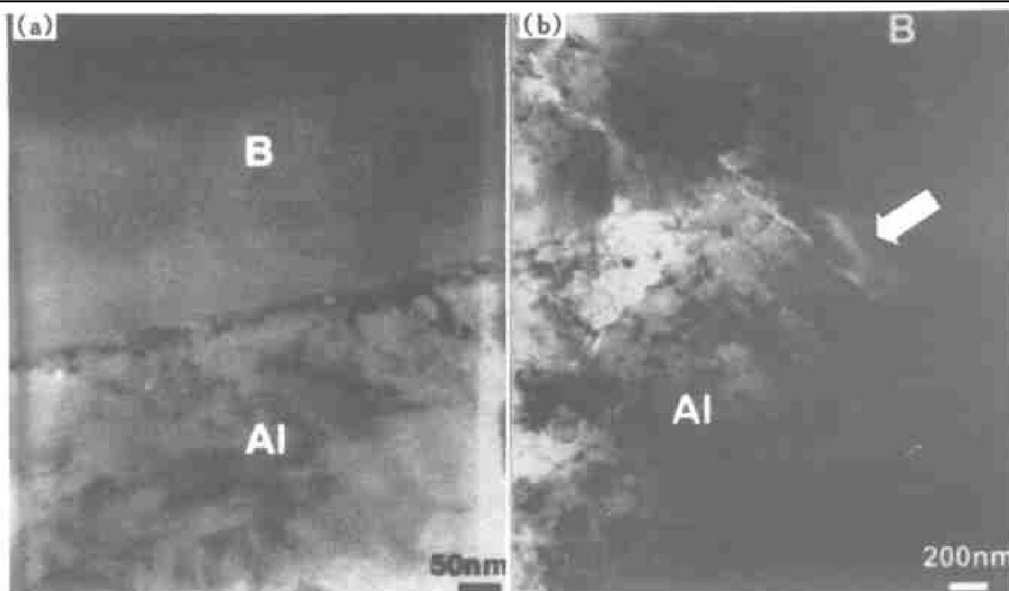


图 7 经 500 °C 不同时间热暴露后的 B/Al 界面 TEM 形貌像

Fig. 7 TEM micrographs of B/Al composite after 500 °C thermal exposure

(a) —500 °C, 0.5 h; (b) —500 °C, 5 h (arrow shows interface)

3) 经 300 °C 热暴露未发现明显的界面反应, 500 °C 热暴露时间较短且性能未下降时也未发现界面反应; 而 500 °C 热暴露 5 h 以上, 即力学性能显著下降时, 界面有明显的反应层。

[REFERENCES]

- [1] 欧阳柳章, 罗承萍, 隋贤栋, 等. 原位生成制备 Al_2O_3 增强铝基复合材料 [J]. 中国有色金属学报, 2000, 10 (2): 159– 162.
OUYANG Lir-zhang, LUO Cheng-ping, SUI Xian-dong, et al. Mechanical properties and microstructure of in-situ Al_2O_3 reinforced aluminum matrix composite [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10 (2): 159– 162.
- [2] 卢德宏, 金燕苹, 顾明元, 等. 混杂铝基复合材料的摩擦系数模型 [J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(3): 416– 419.
LU De-hong, JIN Yan-ping, GU Ming-yuan, et al. A model of friction coefficient of aluminum matrix hybrid composites [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(3): 416– 419.
- [3] Weisinger M D. Composite struts pave space shuttle weight [J]. Metal Progress, 1978, 113(5): 60– 65.
- [4] 孙长义. 硼/铝复合材料的力学性能与界面 [J]. 航空材料学报, 1990, 10(Suppl): 107– 112.
SUN Chang-yi. Mechanical properties and interface of B/Al composites [J]. Journal of Aeronautical Materials, 1990, 10(supplement): 107– 112.
- [5] 彭应国, 张少卿, 颜悦, 等. B/Al 复合材料的界面微观结构 [J]. 航空材料学报, 1997, 17(3): 39– 43.
PENG Ying-guo, ZHANG Shao-qing, YAN Yue, et al. Interfacial microstructure of B/Al composites [J]. Journal of Aeronautical Materials, 1997, 17(3): 39– 43.
- [6] 张绪虎, 胡欣华, 关盛勇, 等. B/Al 复合材料的制造、性能及应用 [J]. 宇航材料工艺, 2000, 30(1): 19– 26.
ZHANG Xu-hu, HU Xin-hua, GUAN Sheng-yong, et al. Fabrication methods, mechanical behaviour and applications of boron/aluminum composites [J]. Aerospace Materials & Technology, 2000, 30(1): 19– 26.
- [7] Kreider K G. Metallic Matrix Composites [M]. New York: Academic Press, 1974.
- [8] Mileiko S T, Sarkissyan N S, Serebryakov A V, et al. Structure and properties of boron/aluminum composites [J]. Composites Science and Technology, 1994, 50(2): 423– 429.
- [9] Herring H W, Lytton J L, Steele J H. Experimental observation of tensile fracture in unidirectional boron filament reinforced aluminum sheet [J]. Metallurgical Transactions, 1973, 4(3): 807– 817.
- [10] Izdinsky K, Minar P, Ivan J. The effect of isothermal exposure and thermal cycling on the properties of boron fiber/aluminum alloy composite material [J]. Key Engineering Materials, 1995, 104– 107: 845– 852.

Effects of thermal exposure on mechanical properties of B/Al composite

YANG Sheng-liang¹, ZHANG Xu-hu², YANG De-ming¹

(1. Department of Materials Engineering and Applied Chemistry, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China;

2. Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology, Beijing 100086, China)

[Abstract] The effects of thermal exposure on the mechanical properties of boron fiber reinforced aluminum composite were studied in terms of tensile strength and fracture elongation. The interfacial microstructure was also analyzed by TEM. The results show that there is no severe decrease of mechanical properties after thermal exposure at 300 °C and no interfacial reaction revealed from the TEM micrograph. Thermally exposed at 500 °C, the composite begins to lose their strength dramatically after several hours. The TEM study shows that an obvious interfacial reaction layer appears at this time. The fracture patterns and fractographies of composite under different thermal exposure conditions show that as the properties decrease, the fracture routes become less zigzag and the pull-out of boron fiber gradually reduces.

[Key words] B/Al composite; thermal exposure; mechanical properties; fractography; interfacial reaction

(编辑 朱忠国)