

原位自生 AlB_2 /6061 复合材料的组织及耐磨性能

庄伟彬, 孙蕊, 满生博, 王筱智, 刘广柱, 刘敬福

(辽宁工程技术大学材料科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 以 Al-KBF_4 为反应体系, 采用熔盐反应法制备了原位自生 3% AlB_2 /6061 复合材料(质量分数), 对比 6061 基体材料, 研究了 AlB_2 颗粒对复合材料组织、硬度和耐磨性能的影响。结果表明, 在 6061 基体材料中原位自生了六边形 AlB_2 颗粒, 颗粒尺寸为 $0.5 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 。经 T6 热处理后, 3% AlB_2 /6061 复合材料的硬度为 HB 119.1, 较 6061 基体提高了 26.57%。复合材料比磨损率为 $1.83 \times 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, 较 6061 基体下降了 17.94%。 AlB_2 颗粒与基体材料之间的润湿性好, 界面结合强度高, 且其本身硬度高, 在磨损时能够起到承载作用, 有效地减少了复合材料与对磨材料间的接触面积, 提高了复合材料的耐磨性。复合材料的磨损机制主要为磨粒磨损和粘着磨损, 其平均摩擦系数为 0.235, 相较于 6061 基体材料降低了 17.54%。

关键词: 铝基复合材料; 原位自生; AlB_2 颗粒; 显微组织; 耐磨性能

中图分类号: TB331 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2021)08-0626-05

Microstructure and Wear Resistance of *In-Situ* Synthesized AlB_2 /6061 Composites

ZHUANG Weibin, SUN Rui, MAN Shengbo, WANG Xiaozhi, LIU Guangzhu, LIU Jingfu
(School of Materials Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: 3wt% AlB_2 /6061 composites were *in-situ* synthesized by molten salt method using Al-KBF_4 as reaction system. Compared with 6061 matrix, effects of AlB_2 particles on the hardness and wear resistance of the composites were studied. The results show that regular hexagonal AlB_2 particles with the size of $0.5 \sim 2.0 \mu\text{m}$ can be directly *in-situ* synthesized in 6061 matrix. After T6 heat treatment, the hardness of 3wt% AlB_2 /6061 composites is HB 119.1, which is 26.57% higher than that of 6061 matrix. The specific wear rate of the composites is $1.83 \times 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, which is 17.94% lower than that of 6061 matrix. Due to good enough wettability and high interface bonding strength between AlB_2 particles and the matrix, and high hardness of the particles, the particles can play a bearing role, then reduce the contact area between the composites and the wear-resistant material during wear, thus wear resistance of the composites is improved. The wear mechanism of the composites is mainly abrasive wear and adhesive wear. The average friction coefficient of the composites is 0.235, which is 17.54% lower than that of 6061 matrix.

Key words: aluminum matrix composites; *in-situ* synthesis; AlB_2 particles; microstructure; wear resistance

1 前言

颗粒增强铝基复合材料因具有高的比强度和比刚度、

良好的耐磨性能和尺寸稳定性, 成为近年来金属基复合材料的研究热点之一^[1-3]。与外加颗粒制备技术相比, 原位自生复合制备技术能够有效改善增强体与基体间的界面结合强度, 近年来受到研究人员的广泛关注^[4-6]。铝基复合材料中常见原位自生颗粒有 TiB_2 、 TiC 、 Al_2O_3 和 AlB_2 等^[7]。其中, AlB_2 颗粒结构单一、易于制备且具有优异的性能, 因此 AlB_2 颗粒增强铝基复合材料得到了研究人员的重视^[8,9]。Koksal 等^[8]以 $\text{Al-B}_2\text{O}_3$ 为反应体系, 采用离心铸造法制备了 AlB_2/Al 复合材料, 研究表明, 原位自生 AlB_2 颗粒可显著改善复合材料的力学性能。元琳琳等^[9]利用 Al-B 反应体系原位合成了 AlB_2/Al 复合材料, 复合材料的硬度与抗拉强度明显高于纯铝基

收稿日期: 2020-05-23 修回日期: 2020-06-21

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51601085); 辽宁省教育厅科学研究经费项目基础研究项目(LJ2019JL008); 辽宁省大学生创新创业训练计划项目(201910147008)

第一作者: 庄伟彬, 男, 1983年生, 副教授

通讯作者: 刘敬福, 男, 1973年生, 教授, 博士生导师,

Email: liujingfu7354@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202005034

体, 但塑性有所降低。然而, 针对利用 Al-KBF₄ 反应体系原位合成颗粒增强复合材料及 AlB₂ 颗粒对 6061 铝基复合材料硬度及耐磨性能影响的研究报道较少。本研究以 Al-KBF₄ 为反应体系, 采用熔盐反应法制备原位自生 AlB₂/6061 复合材料。对比基体材料, 研究了原位自生 AlB₂ 颗粒对复合材料显微组织、硬度及耐磨性能的影响, 以为颗粒增强金属基复合材料的进一步研究和未来发展提供参考。

2 实验

2.1 复合材料的制备

复合材料基体选用工业 6061 铝合金, 制备增强体原料选用市售 KBF₄ 粉, 其纯度为 97%。采用熔盐反应法制备原位自生 AlB₂/6061 复合材料, 制备过程如下: 首先采用德国飞驰 Pulverisette 7 型球磨机对 KBF₄ 粉进行球磨, 球料比(质量比)选用 10:1, 转速为 200 r/min, 球磨 8 h; 然后, 将 KBF₄ 粉料用铝箔包裹待用; 采用带有氩气保护的坩埚炉, 将 6061 铝合金加热熔化并将熔体升温至 900 °C 保温, 用石墨钟罩将 KBF₄ 粉料压入熔体中, 加入量以生成质量分数为 3% 的 AlB₂ 来计算, 机械搅拌并保温 0.5 h; 待熔体降温至 720 °C 时, 通过精炼和扒渣去除反应的残余盐, 除气后浇铸成型, 模具为石墨模具^[4]。试样的 T6 热处理工艺^[10]为: 固溶 530 °C × 6 h; 时效 170 °C × 10 h。

2.2 组织和性能表征

利用倒置式 Axiovert 40 MAT 型金相显微镜和日本电子 JSM-7500F 型场发射扫描电镜观察试样的微观组织形貌。采用岛津 XRD-6100 型 X 射线衍射仪分析复合材料的物相, 管电压为 40 kV, 管电流为 30 mA, Cu 靶, 扫描范围为 10°~90°, 扫描速度为 8(°)/min。利用奥林巴斯 OLS4500 型激光共聚焦显微镜(laser scanning confocal microscope, LSCM)观察试样的磨损形貌。采用 HBS-3000 型布氏硬度计测试试样的硬度, 压球直径为 5 mm, 负载为 250 kg, 每个试样硬度值取 5 次测量的平均值。摩擦磨损实验在销盘式 MMU-10G 型摩擦磨损试验机上进行, 销试样尺寸为 Φ4 mm × 12 mm, 盘试样材质为 GCr15, 其热处理后硬度为 HRC 58~62。采用失重法^[11]按式(1)来计算试样的比磨损率 W :

$$W = \frac{M}{FS} \quad (1)$$

$$M = M_1 - M_2 \quad (2)$$

$$S = \pi dtn \quad (3)$$

式中, W 为比磨损率, kg · N⁻¹ · m⁻¹; M 为实验前后试样的质量差, kg; F 为实验法向载荷, 100 N; S 为磨损实

验总行程, m; M_1 为试样磨损前质量, kg; M_2 为试样磨损后质量, kg; d 为试样磨痕轨道的直径, 2 × 10⁻² m; t 为磨损时间, 5 min; n 为转速, 200 r/min。

3 结果与讨论

3.1 反应体系的吉布斯自由能

在 Al-KBF₄ 反应体系中, 可能发生以下(4)~(6)的反应:



采用吉布斯自由能函数法^[12]计算 Al-KBF₄ 体系在 700~1200 K 范围内, 反应(4)、反应(5)和反应(6)的标准反应吉布斯自由能, 计算结果如图 1 所示。由图 1 可见, 3 个反应的标准反应吉布斯自由能均小于 0, 即 3 个反应均能自发进行。与反应(5)和反应(6)相比, 反应(4)的标准反应吉布斯自由能最小, 即反应(4)最易发生, 可生成稳定 AlB₂。

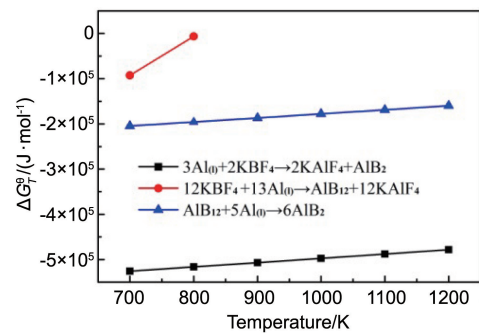


图 1 Al-KBF₄ 体系不同反应的标准反应吉布斯自由能

Fig. 1 Standard reaction Gibbs free energy of different reactions in the Al-KBF₄ system

3.2 复合材料的显微组织

图 2 为原位自生 3% AlB₂/6061 复合材料的 XRD 图谱。可见, 除了有 Al 的衍射峰外, 还在 2θ 角分别为 27.4°, 34.4°, 44.5°, 56.5° 和 61.7° 处出现了 AlB₂ 的衍射峰。除此之外, 未发现其它物相的衍射峰。由此说明, 利用本研究的制备工艺, 可在 6061 铝合金基体中直接合成 AlB₂ 颗粒, 且无明显中间相残留。

图 3 为原位自生 3% AlB₂/6061 复合材料与基体材料的显微组织对比。可以看出, 原位自生 3% AlB₂/6061 复合材料的晶粒显著细化。在复合材料凝固过程中, 原位自生 AlB₂ 颗粒可作为异质形核质点, 使得复合材料更易得到细小晶粒^[4]。原位自生 AlB₂ 颗粒对大角度晶界有一定的钉扎作用, 促使再结晶形核, 进一步细化复合材料的晶粒, 使复合材料的性能获得提高^[13]。

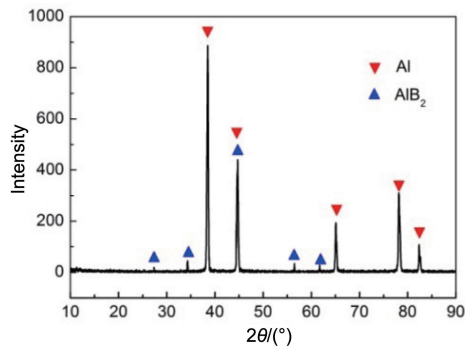
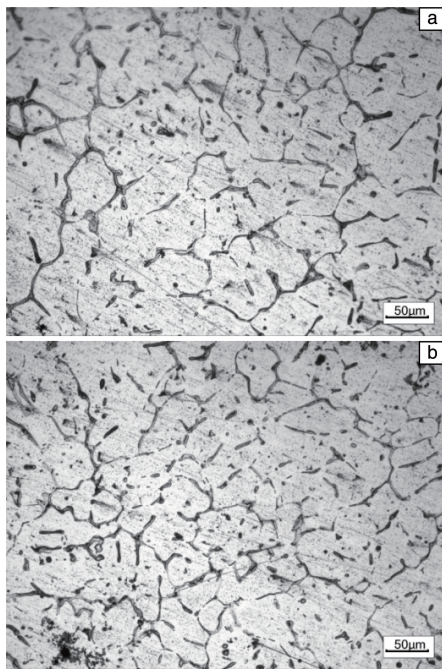
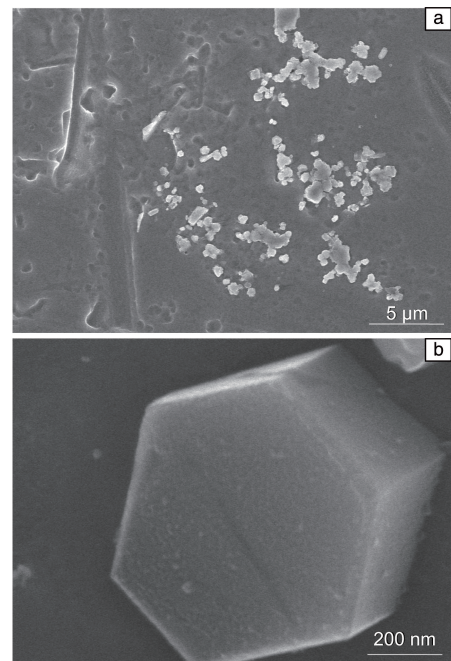
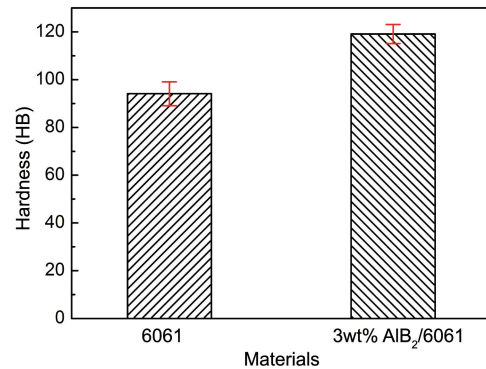
图 2 原位自生 3% AlB_2 /6061 复合材料的 XRD 图谱Fig. 2 XRD pattern of *in-situ* synthesized 3wt% AlB_2 /6061 composite图 3 基体(a)与原位自生 3% AlB_2 /6061 复合材料(b)的显微组织对比Fig. 3 Microstructure comparison of matrix (a) and *in-situ* synthesized 3wt% AlB_2 /6061 composite (b)

图 4 为原位自生 3% AlB_2 /6061 复合材料显微组织的 SEM 照片。由图 4a 可见, 复合材料中 AlB_2 颗粒分散较均匀, 无严重团聚, 颗粒尺寸为 0.5~2.0 μm 。图 4b 为图 4a 的局部放大图, 清晰可见 AlB_2 颗粒呈规则六边形。

3.3 复合材料的性能

3.3.1 复合材料的硬度

图 5 为原位自生 3% AlB_2 /6061 复合材料和 6061 基体材料的硬度对比。可以看出, 经 T6 热处理后, 6061 基体材料的平均硬度为 HB 94.1, 原位自生 3% AlB_2 /6061 复合材料的平均硬度为 HB 119.1, 复合材料硬度相较于 6061 基体提高了 26.57%。

图 4 原位自生 3% AlB_2 /6061 复合材料的 SEM 照片: (a) 整体形貌, (b) AlB_2 颗粒放大图Fig. 4 SEM images of *in-situ* synthesized 3wt% AlB_2 /6061 composites: (a) integral microstructure, (b) magnification of AlB_2 particles图 5 原位自生 3% AlB_2 /6061 复合材料与基体材料的硬度对比Fig. 5 Hardness comparison of *in-situ* synthesized 3wt% AlB_2 /6061 composite and matrix

3.3.2 复合材料的耐磨性能

经测试计算得, 复合材料比磨损率为 $1.83 \times 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, 6061 基体比磨损率为 $2.23 \times 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, 复合材料比磨损率较 6061 基体下降了 17.94%。在相同的磨损条件下, AlB_2 颗粒使得复合材料的耐磨性得到了明显提高。

图 6 为原位自生 3% AlB_2 /6061 复合材料与基体材料的摩擦系数曲线对比, 图中红色横线与纵坐标的交点数值为对应材料的平均摩擦系数。在相同磨损条件下, 复合材料的平均摩擦系数为 0.235, 6061 基体的平均摩擦

系数为 0.285，复合材料的平均摩擦系数降低了 17.54%。 AlB_2 颗粒使得复合材料的平均摩擦系数明显降低，耐磨性能提高。

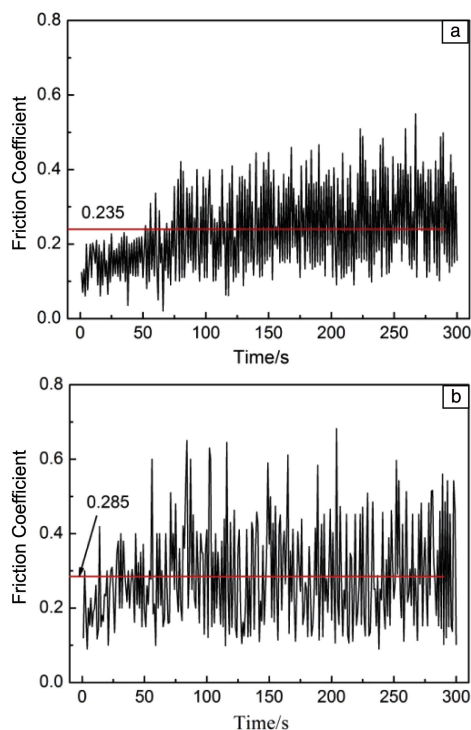


图 6 原位自生 3% AlB_2 /6061 复合材料(a)与基体材料(b)的摩擦系数曲线

Fig. 6 Friction coefficient curves of *in-situ* synthesized 3wt% AlB_2 /6061 composites (a) and matrix (b)

图 7 为原位自生 3% AlB_2 /6061 复合材料与基体材料的磨损形貌对比，两者的磨损形貌都出现了犁沟和材料脱落现象，说明两者的磨损机制均为磨粒磨损和粘着磨损。然而，对比图 7a 和图 7b 可以发现，原位自生 3% AlB_2 /6061 复合材料的磨损形貌中犁沟不连续、且较细而浅，材料脱落现象不明显，表面磨屑较少。材料的磨损量与硬度成反比，即硬度越高，耐磨性能越好^[14]。由于原位合成的 AlB_2 颗粒使得复合材料的硬度明显提高，因此复合材料的耐磨性能也得到了明显改善，比磨损率明显减少，平均摩擦系数降低。此外，采用原位自生工艺制备的 3% AlB_2 /6061 复合材料中， AlB_2 颗粒与 6061 基体之间的润湿性良好，界面结合强度高，且 AlB_2 颗粒的硬度远高于基体，在摩擦磨损时能够起到承载作用，可以有效地减少磨损时复合材料与对磨材料间的接触面积，降低了复合材料的比磨损率^[14]。

4 结 论

(1) 采用熔盐反应法，在 900 °C 下通过向熔融铝液中

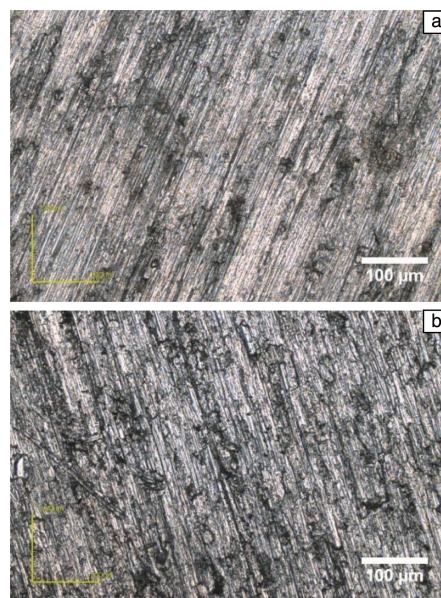


图 7 原位自生 3% AlB_2 /6061 复合材料(a)与基体材料(b)的磨损形貌

Fig. 7 Wear morphology of *in-situ* synthesized 3wt% AlB_2 /6061 composite (a) and the matrix (b)

加入 KBF_4 ，可直接在 6061 基体材料中合成 AlB_2 颗粒，颗粒尺寸为 0.5~2.0 μm，并呈规则六边形。

(2) 经 T6 热处理后，3% AlB_2 /6061 复合材料的硬度为 HB 119.1，较 6061 基体提高了 26.57%。显微组织观察表明，与 6061 基体相比，原位自生 3% AlB_2 /6061 复合材料晶粒明显细化。

(3) 原位自生 3% AlB_2 /6061 复合材料比磨损率为 $1.83 \times 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ，较 6061 基体下降了 17.94%，这是由于采用原位自生工艺制备的复合材料， AlB_2 颗粒与基体材料之间的润湿性好，界面结合强度高，且颗粒本身硬度高，在磨损时能够起到承载作用，有效地减少了磨损时复合材料与对磨材料间的接触面积，提高了复合材料的耐磨性。

(4) 原位自生 3% AlB_2 /6061 复合材料的磨损机制主要为磨粒磨损和粘着磨损，其平均摩擦系数为 0.235，相较于 6061 基体材料降低了 17.54%。而且，相较于基体材料，复合材料磨损表面的犁沟变细变浅，表面磨屑减少。

参考文献 References

- [1] ZHAO Y, MA X, ZHAO X, *et al.* Journal of Alloys and Compounds [J], 2017, 726: 1053-1061.
- [2] 郝世明, 毛建伟, 谢敬佩. 粉末冶金工业[J], 2018, 28(1): 56-62.
HAO S M, MAO J W, XIE J P. Powder Metallurgy Industry [J], 2018, 28(1): 56-62.

- [3] DU R, YUAN D, LI F, *et al.* Journal of Alloys and Compounds[J], 2019, 776: 536–542.
- [4] 庄伟彬, 田宗伟, 刘广柱, 等. 材料导报[J], 2019, 33(22): 3762–3767.
ZHUANG W B, TIAN Z W, LIU G Z, *et al.* Materials Reports[J], 2019, 33(22): 3762–3767.
- [5] 陈砚池, 吴量, 邓亚琪, 等. 中国材料进展[J], 2019, 38(3): 308–312.
CHEN Y C, WU L, DENG Y Q, *et al.* Materials China[J], 2019, 38(3): 308–312.
- [6] LIU X, LIU Y, HUANG D, *et al.* Materials Science & Engineering: A [J], 2017, 705: 55–61.
- [7] ZHAO Y F, MA X, CHEN H W, *et al.* Materials & Design [J], 2017, 131: 23–31.
- [8] KOKSAL S, FICICI F, KAYIKCI R, *et al.* Journal of Composite Materials[J], 2014, 48(15): 1801–1812.
- [9] 元琳琳, 韩静涛, 刘靖. 中国有色金属学报[J], 2015, 25(5): 1163–1167.
YUAN L L, HAN J T, LIU J. The Chinese Journal of Nonferrous Metals[J], 2015, 25(5): 1163–1167.
- [10] 张德芬, 谭盖, 刘璐, 等. 金属热处理[J], 2015, 40(11): 184–187.
ZHANG D F, TAN G, LIU L, *et al.* Heat Treatment of Metals[J], 2015, 40(11): 184–187.
- [11] 李冰月. 6061 铝合金低温盐浴碳氮共渗工艺及摩擦磨损性能研究[D]. 无锡: 江南大学, 2018: 16–17.
LI B Y. Study on the Friction and Wear Properties of 6061 Alloy with Low-Temperature Salt Bath Treatment[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018: 16–17.
- [12] XIAO P, GAO Y M, YANG X R, *et al.* Journal of Alloys and Compounds[J], 2018, 764: 96–106.
- [13] PANDEY U, PUROHIT R, AGARWAL P, *et al.* Materials Today Proceedings[J], 2017, 4(4): 5452–5460.
- [14] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 305–310.
WEN S Z, HUANG P. Principles of Tribology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 305–310.

(编辑 惠 琼)