

热压烧结 Gr/6061Al 复合材料的组织与性能

鲁宁宁, 许 磊, 历长云, 王有超, 米国发, 杨二阔

(河南理工大学, 河南 焦作 454000)

摘 要: 采用热压烧结法制备了片层石墨(Gr)含量为 1%~25% (体积分数, 下同)的 Gr/6061Al 复合材料, 并采用纳米铝粉包覆片层石墨的混粉工艺提高片层石墨在铝基体粉末中的分散均匀性。所制备的复合材料中, 片层石墨均匀分散在铝基体中, 界面结合良好, 未发现界面反应产物, 通过透射电镜观察到少层石墨烯的存在。1%~15%Gr 含量的 Gr/6061Al 复合材料的致密度均高于 90%; 复合材料的致密度, 硬度和摩擦系数随着片层石墨含量的增加都逐渐降低; 随着烧结温度的提高, 10%Gr 含量的 Gr/6061Al 复合材料的致密度和硬度均得到提高。与 1%和 25%Gr 含量的 Gr/6061Al 复合材料相比, 其他 Gr 含量的复合材料的磨损率均较高。

关键词: 片层石墨; 铝基复合材料; 致密度; 磨损率; 摩擦系数

中图分类号: TB333

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)06-1961-08

片层石墨具有独特的层状晶格结构^[1], 是一种优良的固体润滑剂, 可以在摩擦表面形成连续的自润滑薄膜进而降低剪切力和减少塑性变形的产生^[2,3], 从室温至 550 °C 均具有良好的减磨性能。Gr/Al 复合材料是由连续的铝或铝合金基体和均匀分布在其中的石墨颗粒或石墨片组成的材料, 不仅具有铝或铝合金的比强度高、导热导电性好等金属特性^[4], 而且还具有自润滑性能和减磨减振性^[5-8], 适于制造活塞、缸套、轴瓦、衬套等耐磨件, 刹车、传动零件或减震零件; 由于其良好的热稳定性和化学稳定性^[9], 适于制造强氧化性环境中的各种摩擦副及轴套材料; 以及由于其具有热导率高^[10]、热膨胀系数小等特点, 用于制做电子封装材料可以减少热量的累积, 避免因散热不好造成热烧毁, 适应对材料热导率要求高的大功率器件的封装要求^[11,12]。良好的阻尼性能也是 Gr/Al 复合材料重要的特征之一。阻尼性能是指材料内部消耗振动能量的能力, 材料良好的阻尼性能可以减少振动、降低噪音和提高疲劳性能, 受到工程技术界的极大关注^[13]。还可将 Gr/Al 复合材料加入到搅拌摩擦区域作为搅拌摩擦焊接头, 使其硬度和韧性均有显著提高^[14]。鉴于 Gr/Al 复合材料的以上用途, 继续研究 Gr/Al 复合材料的制备方法和提高其性能是十分必要的。

Gr/Al 复合材料可以采用液态法和固态法 2 种方法制备。采用液态法制备 Gr/Al 复合材料时, 由于 Gr

与铝基体之间润湿性差, 以及密度差别较大的原因, Gr 很难加入且均匀分散到铝基体中, 常常需要对石墨或铝基体进行一定的处理。对石墨的处理方法有表面镀铜^[15]或镀镍^[16], 热处理^[17]和化学清洗^[18]。对铝基体的处理方法为加入一定的合金元素如 Mg^[19]、Si^[20]等来增大石墨与铝液的润湿性并抑制界面反应。粉末冶金法由于其成本低、能保证材料成分的配比的准确性和均匀性、可以抑制界面反应等优点, 而受到越来越广泛的关注。粉末冶金法制备 Gr/Al 复合材料时粉末混合工艺中常见的问题就是颗粒的团聚。团聚的原因有两种, 一种是混粉过程中不同粉末的流动性不同, 二是不同粉末的密度不同^[21]。粉末流动性的问题不易解决, 但是可以通过对 Gr 进行处理增大其相对密度, 来提高 Gr 与铝的密度差。本实验采用热压烧结的方法来制备 Gr/6061Al 复合材料。为了提高石墨在基体铝粉中的分散性, 还设计了采用纳米铝粉对 Gr 进行包覆的工艺。热压烧结工艺简单、烧结温度低, 可避免界面产物的产生。重点分析了制备的 Gr/6061Al 复合材料的显微形貌, 讨论了石墨含量与烧结温度对 Gr/6061Al 复合材料致密度、硬度和摩擦磨损性能的影响。

1 实 验

1.1 实验材料

收稿日期: 2018-06-11

基金项目: 国家自然科学基金(51401077)

作者简介: 鲁宁宁, 女, 1992 年生, 硕士, 河南理工大学材料科学与工程学院, 河南 焦作 454000, 电话: 0391-3987472, E-mail: lnn18236881599@163.com

实验所采用的增强体为直径 20~70 μm 的不规则石墨片, 基体选择气体雾化法制备的粒度为 16~86 μm 的 6061Al 球形颗粒粉末。为了提高混粉过程中基体 6061Al 颗粒与石墨片的分散均匀性, 本实验采用了纳米铝粉包覆石墨片的混粉新工艺, 然后再将纳米铝粉包覆的石墨片与基体 6061Al 粉末机械混合, 其中纳米铝粉粒径为 80 nm 左右, 包覆过程中所使用的粘结剂为环氧树脂和环氧烯料, 固化剂为乙二胺。

1.2 Gr/6061Al 复合材料制备方法

热压烧结法制备 Gr/6061Al 复合材料, 主要包括以下 3 个步骤:

(1) 制备纳米铝粉包覆的石墨片。将称量好的纳米铝粉与石墨片共同放入研钵中研磨 5 min, 随后将一定量的粘结剂(环氧树脂和环氧烯料混合物)加入其中继续混合 5 min, 最后加入固化剂乙二胺使粘结剂固化, 固化完成后放入 QM-3A 高速摆振球磨机中继续混合 30 min (无磨球), 制备出纳米铝包覆的石墨粉体。

(2) 制备 Gr/6061Al 复合材料粉末。将制备好的纳米铝粉包覆的石墨片与 6061Al 基体粉末放入 QM-3A 高速摆振球磨机中机械混合 30 min, 球磨机转速为 1400 r/min, 未加入磨球。实验中制备了 Gr 含量 1%、5%、10%、15% 和 25% 的复合粉末, 其中基体含量包括 6061Al 粉末和纳米铝粉粉末。

(3) 热压烧结法制备 Gr/6061Al 复合材料。将复合材料粉末放入内表面涂覆有 BN 的石墨模具内, 并将模具放入 ZT-52-20Y 型真空热压炉中, 真空度低于 1.3×10^{-3} Pa, 以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率进行加热, 在 300 $^{\circ}\text{C}$ 保温 30 min, 使复合材料粉末温度均匀化, 再以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率加热到烧结温度, 20 MPa 保温预压 60 min 后, 升压至 35 MPa 保温保压 120 min。保温保压结束后, 卸压降温, 烧结试样随炉冷却至室温, 得到 $\Phi 30$ mm \times 25 mm 的复合材料试样。实验制定了 505、520 和 535 $^{\circ}\text{C}$ 3 个烧结温度。

1.3 微观组织分析与性能测试

实验采用 FEI Quanta 250 FEG 场发射扫描电子显微镜观察材料表面的显微形貌; 采用 Rigaku 公司生产的 Smartlab X 射线衍射仪测试材料的 X 射线衍射图谱; 采用阿基米德法测量复合材料的密度; 采用 DHB-3000 型电子布氏硬度计测量复合材料的硬度, 压头材质为淬火钢球, 直径为 5 mm, 施加的载荷为 1225 N, 保压时间为 30 s。

采用 MMW-1 立式万能摩擦磨损试验机在干摩擦条件下对复合材料的摩擦磨损性能进行研究。将试样沿热压烧结单轴压力方向切成 $\Phi 4.8$ mm \times 12.7 mm 的小圆柱销, 对磨盘为硬度为 52~55 HRC, 尺寸为 $\Phi 31.7$

mm \times $\Phi 16$ mm \times 10 mm 的淬火 45# 钢, 试验条件为压力 20 N, 转速 240 r/min, 摩擦时间 900 s, 环境温度 32 $^{\circ}\text{C}$, 湿度 60~70 RH%。采用精确度 0.1 mg 的上海卓精万分之一电子分析天平 (BSM-120.4) 称量磨损前后的质量损失, 每个试样称量 3 次取平均值, 摩擦磨损形貌采用带有 EDS 分析功能的 Merlin Compact 场发射扫描电子显微镜进行观察。

2 结果与分析

2.1 显微形貌分析

520 $^{\circ}\text{C}$ 、35 MPa 条件下制备的 1%~15% Gr 含量的 Gr/6061Al 复合材料的 SEM 照片如图 1a、1b、1c 和 1e 所示。从图中可以看出, 虽然个别区域内存在 Gr 的少量聚集 (如图中①, ②, ③处所示), 但在总体范围内 Gr 均匀地分散在铝基体中, 说明混粉过程促进了 Gr 在 6061Al 颗粒中的均匀分布。并且 Gr 仍然以片状的形式存在于铝基体中。图 1d 为图 1c 的局部放大图, 显示了 Gr/6061Al 复合材料中厚度为 1 μm 左右的极薄片状 Gr 的存在。并且对 505 $^{\circ}\text{C}$ 、35 MPa 条件下制备的 Gr/6061Al 复合材料进行透射电镜观察时, 发现了少层石墨烯的存在, 如图 2 所示。说明在制备 Gr/6061Al 复合材料的过程中, Gr 被剥离成更薄的片层。

在石墨片层内部, 每个碳原子与 3 个相邻碳原子在 sp^2 轨道上以共价键链接, 碳原子间的结合力很强, 而在两平行的石墨片层间存在范德华能使它们结合在一起, 范德华力相对于原子间结合力而言是非常小的, 单位面积上片层之间靠范德华力而形成的结合能为^[22]:

$$E = -\frac{A}{12\pi} \left(\frac{1}{d^2} + \frac{1}{(d+h_1+h_2)^2} - \frac{1}{(d+h_1)^2} - \frac{1}{(d+h_2)^2} \right) \quad (1)$$

其中, A 为 Gr 的 Hamaker 常数 (2.38×10^{-19} J), h_1 和 h_2 是剥离的 2 片 Gr 层的厚度; d 是未被剥离的 2 平行 Gr 片层之间的距离 (0.335 nm)。

通过式(1)进行计算得出范德华力形成的结合能。图 3a 为从不同厚度的 Gr 基底 (h_2) 上剥离单层石墨 ($h_1=0.335$ nm) 所需要的能量图, 图 3b 为基底 Gr 厚度 h_2 为 2 μm 时剥离不同厚度 h_1 的 Gr 所需的能量图。由图 3a 可以看出, 除了将双层石墨烯分离成单层石墨烯所需的能量较低 (0.034 J/m^2) 外, 随着基底石墨厚度的增加, 剥离单层石墨所需的能量逐渐趋于稳定, 为 0.042 J/m^2 ; 由图 3b 中可以看出, 当剥离 Gr 层大于 8 个碳原子层时, 剥离 Gr 的单位面积能耗趋于一个定值为 0.055 J/m^2 。这说明要使单层或多层碳原子层从石墨基底上剥离下来, 只需要 0.042~0.055 J/m^2 的能量即可。因此石墨片很容易在机械力的作用下剥离。

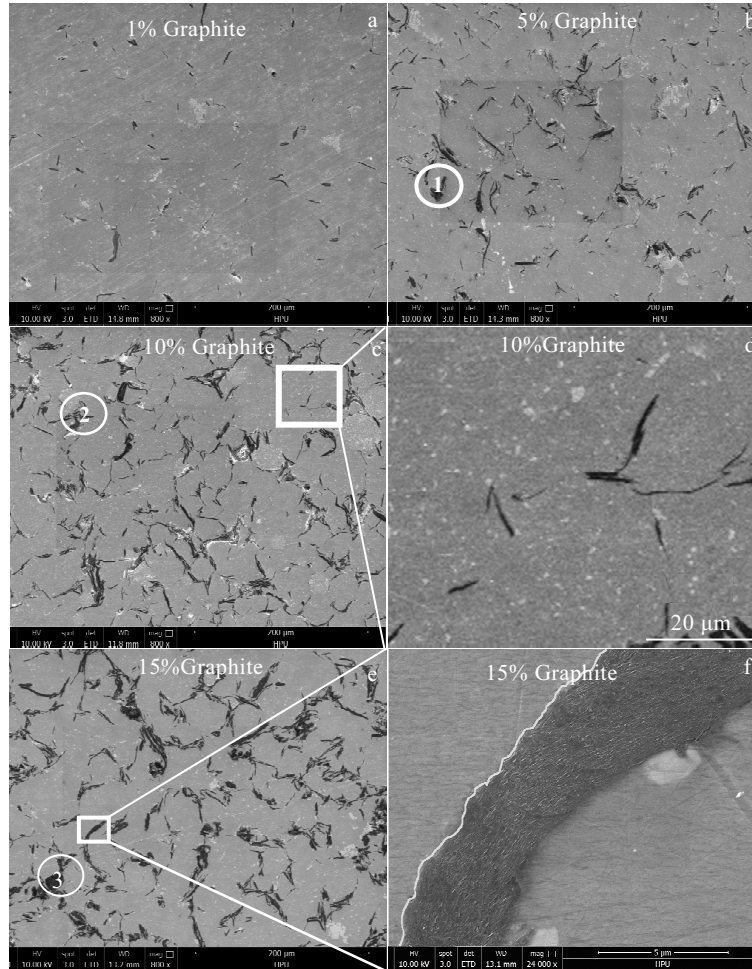


图 1 520 °C、35 MPa 条件下制备的 1%~15%Gr 含量的复合材料显微形貌

Fig.1 Optical images of micro-morphology of Gr/6061Al composites sintered at 520 °C under 35 MPa pressure with graphite content of 1% (a), 5% (b), 10% (c, d) and 15% (e, f)

在混粉过程的球磨罐中只有 Gr 与 6061Al 颗粒，此时 6061Al 颗粒相当于磨球对 Gr 进行球磨。Knieke 等^[23]报道采用 50 或 100 μm 的磨球对石墨进行剥离来制备石墨烯。复合粉末的运动比较复杂，以球磨罐摆动的平均直径处的速度为粉末的速度(5.86 m/s)，假设与 Gr 碰撞前后 6061Al 颗粒的速度差为 1 mm/s。从 6061Al 颗粒传递到石墨的能量可以从球磨介质的动力学能来估算^[23]：

$$\Delta E_{kin,P} = \frac{\pi}{12} \rho_{GM} d_{GM}^3 (v_{1,GM}^2 - v_{2,GM}^2) \cdot \left(1 + \frac{Y_P}{Y_{GM}}\right)^{-1} \quad (2)$$

在球磨过程中，是两个磨球介质同时对石墨进行作用，而式(2)的计算结果只是碰撞模型的一半，即 2 个磨球同时作用于石墨，只计算其中 1 个磨球对半个石墨的作用。式中的参数值如表 1 所示。

由式(2)和表 1 计算可得从 6061Al 传递到石墨的能量为 $31 \times 10^{-14} \text{ J/mm}^2$ ，能够剥离面积为 5.6 μm^2 的正

方形石墨片。虽然实验采用的石墨片粒径主要分布在 20~50 μm，但仍然存在小颗粒 Gr，并且计算结果是对无缺陷石墨片的分析，而实际采用的石墨表面会存在各种缺陷，导致所需剥离能降低。此外，6061Al 粒径为 50 μm 左右，如此小粒径的 Al 颗粒意味着在混粉的过程中石墨片层被 Al 颗粒反复剥离的次数显著增加，再加上压力烧结初期的颗粒重排过程中颗粒之间的摩擦作用，所以复合材料中存在一定数量的薄片状石墨。图 1f 显示的是 Gr 与铝基体的界面结合部位。从图中可以看出，Gr 与铝基体界面结合处没有明显的孔洞存在，且界面结合处呈微锯齿状，如图 1f 中黄线所示，说明界面结合良好。

Etter 等^[24]采用气体压力浸渗法制备 Gr/Al 复合材料，并且在铝液中加入了 Si 来阻止界面反应产物 Al_4C_3 的形成，但在复合材料中仍然发现了针状 Al_4C_3 相的存在，液态法制备无界面反应的 Gr/Al 复合材料仍有

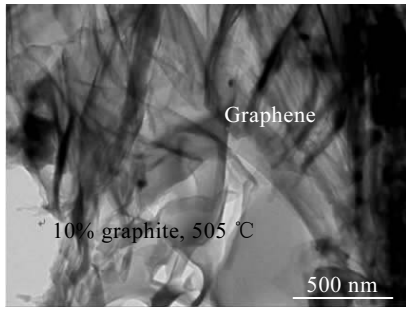


图 2 505 °C、35 MPa 条件下制备的 10%Gr 含量复合材料的透射电镜照片

Fig.2 TEM image of the Gr/6061Al composites with graphite content of 10% sintered at 505 °C under 35 MPa pressure

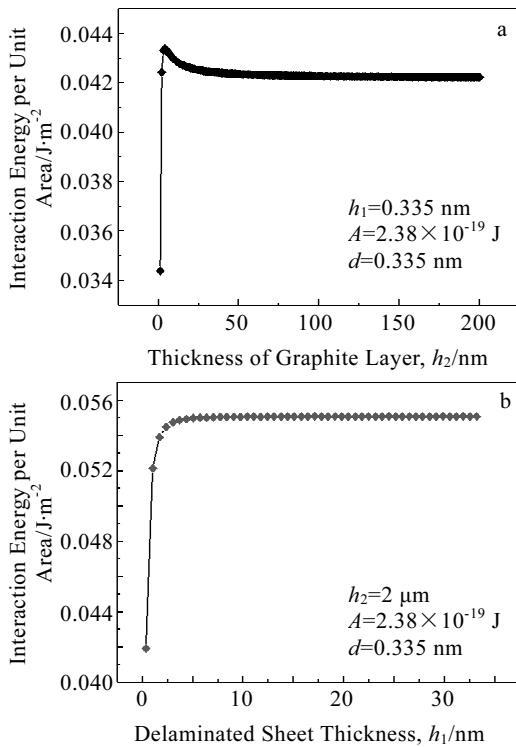


图 3 两片有限厚度的石墨片之间单位面积上的界面能：从不同厚度的石墨基底上剥离单层石墨所需要的能量和基底石墨厚度 h_2 为 2 μm 时剥离不同厚度 h_1 的石墨所需的能量

Fig.3 Interaction energies per unit area between two plates with finite thickness: (a) energy required to separate monolayer graphite from graphite substrates with different thicknesses and (b) energy required to separate different thickness graphite from graphite substrates with thicknesses of 2 μm

难度。图 4 为 505 和 535 °C 条件下制备的 10%Gr 含量的 Gr/6061Al 复合材料的 XRD 图谱。XRD 结果中只出现了 Gr 和铝基体的衍射峰，没有发现 Al_4C_3 衍射

表 1 能量传递计算公式中的参数

Parameter	Value
Density of the grinding media, $\rho_{GM}/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2700
Diameter of the grinding media, $d_{GM}/\mu\text{m}$	50
Velocity of faster bead 1, $v_{1,GM}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	5.86
Velocity of slower bead 2, $v_{2,GM}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	5.859
Young's modulus of the product, Y_p/GPa	230
Young's modulus of the grinding media, Y_{GM}/GPa	69
Minimal relative velocity of the grinding media, $v_{rel,min}/\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	1

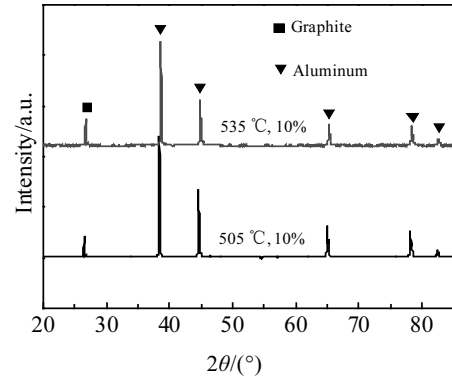


图 4 505、535 °C 条件下制备的 10%Gr 复合材料的 XRD 图谱

Fig.4 XRD patterns of Gr/6061Al composites with graphite content of 10% sintered at 505, 535 °C

峰的存在，说明复合材料在 505 和 535 °C 热压烧结过程中两相之间没有发生界面反应。

2.2 复合材料致密度与硬度分析

520 °C、35 MPa 条件下制备的不同 Gr 含量的 Gr/6061Al 复合材料的致密度变化趋势如图 5a 所示。1%~15%Gr 含量的复合材料致密度均高于 90%。随着 Gr 体积分数的增加，Gr/6061Al 复合材料的致密度呈下降趋势。原因有以下两个方面：一方面是因为添加进复合材料中的 Gr 颗粒分布在 6061Al 颗粒之间。在热压过程中比较软的 Gr 颗粒首先发生变形，而其表面与其邻接的 6061Al 颗粒却不会发生变形，此时两种粉末之间不能协同发生变形，必然会产生相对移动。在 Gr 含量较低时，Gr 相当于 6061Al 粉末之间的润滑剂，可以使复合材料粉末快速地进行颗粒重排，并且石墨在颗粒重排的过程中被挤入 6061Al 粉末颗粒之间填充了孔隙，所以 Gr/6061Al 复合材料致密度较高。而随着 Gr 含量的增加，Gr 虽然均匀分布，但是 Gr 存在的小区域内，Gr 是以团聚形式存在的，如图 1 中①、②、③处所示，所以 Gr 团聚现象相对增加，导致在压制过程中粉体的流动性变差，最终导致致密度降低。另一方面，

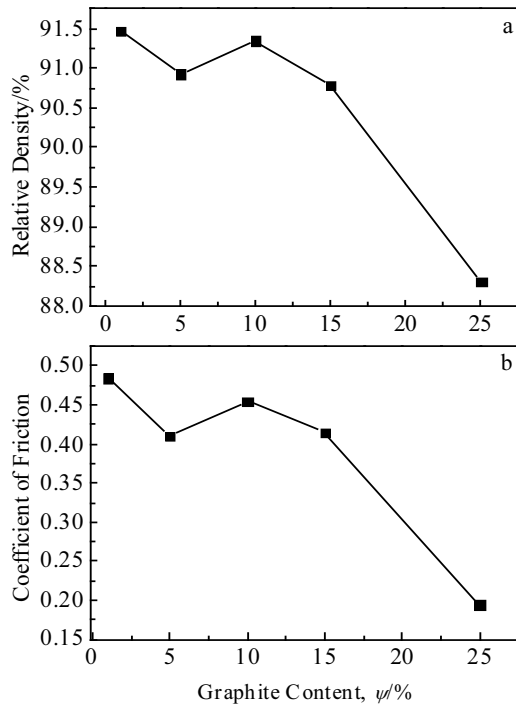


图 5 热压烧结法在 520 °C, 35 MPa 下制备的不同 Gr 含量的 Gr/6061Al 复合材料的致密度和摩擦系数

Fig.5 Relative densities (a) and COF (b) of Gr/6061Al composites with different graphite contents sintered under 35 MPa pressure at 520 °C

在真空热压烧结过程中, 由于增强体 Gr 颗粒的存在对烧结过程存在抑制作用, 阻碍铝基体的烧结扩散, 所以增强体 Gr 颗粒体积分数的增加也使得 Gr/6061Al 复合材料的烧结性能变差, 导致 Gr/6061Al 复合材料的致密度随增强体 Gr 颗粒体积分数的增加而下降。表 2 为 Gr/6061Al 复合材料的硬度与致密度测试结果。Gr/6061Al 复合材料的硬度结果显示随着 Gr 体积分数的增加而逐渐降低, 这是由于石墨硬度较低缘故。不同烧结温度下制备的 10%Gr 含量的 Gr/6061Al 复合材料的致密度和硬度结果显示, 535 °C 条件下制备的复合材料的致密度和硬度最高, 这是因为烧结温度足够高是复合材料致密化的必要条件, 进而影响材料的硬度。

2.3 复合材料摩擦磨损性能分析

实验中, 520 °C, 350 MPa 条件下制备的不同 Gr 体积分数和不同温度下制备 10%Gr 含量的 Gr/6061Al 复合材料的摩擦系数分别如图 5b 和表 2 所示。其中 520 °C 条件下制备的 25%Gr 含量的 Gr/6061Al 复合材料的摩擦系数最小。王庆年等^[25]对一些金属基自润滑复合材料的报道进行总结分析后得出, 当 Gr 含量高于 25% 以后, 几种金属基自润滑复合材料的摩擦系数都基本不随 Gr 含量的增加而变化, 呈现出接近于 Gr 材料本身

表 2 热压烧结法制备的 Gr/6061Al 复合材料的硬度、致密度和摩擦系数

Table 2 Hardness, relative density and COF of the Gr/6061Al composites sintered in this experiment

Graphite content, ψ/%	Sintering pressure/ MPa	Sintering temperature/ °C	Hardness, HBS/ ×10 MPa	Relative density/ %	COF
5	35	520	39.26	90.93	0.41
10	35	505	34.42	91.24	0.42
10	35	520	37.75	91.35	0.455
10	35	535	48.51	91.95	0.509
15	35	520	33.92	90.78	0.415
25	35	520	22.68	88.31	0.194

的摩擦系数的一个比较稳定的低值。本实验中 Gr 的最高含量为 25%, 25% Gr 含量的 Gr/6061Al 复合材料的摩擦系数为 0.194, Gr 的摩擦系数为 0.14~0.19, 这与王庆年等得出的结论相一致。

热压条件下制备的不同 Gr 含量的 Gr/6061Al 复合材料的摩擦系数变化趋势与其致密度呈现相同的变化趋势, 这是因摩擦系数与致密度的影响因素一样都是 Gr 的含量。而不同烧结温度下制备的 10% Gr 含量的 Gr/6061Al 复合材料的摩擦系数(表 2)随着烧结温度的升高而增大, 这是因为烧结温度越高, 烧结成型性越好, Gr/6061Al 复合材料的致密度和硬度都比较高, 要使磨损表面材料从材料体脱落需要更大的摩擦力, 所以摩擦系数较大。

520 °C、35 MPa 下制备的不同 Gr 含量的 Gr/6061Al 复合材料的摩擦磨损形貌如图 6 所示。1%Gr 含量的 Gr/6061Al 复合材料表面有大的剥落坑和较深的犁沟(图 6a)。这是因为复合材料与对磨盘材料相比硬度较低, 在对磨过程中, 2 种材料相互黏着, 所以 1%Gr 含量的 Gr/6061Al 复合材料磨损表面具有较大的剥落坑存在。同时对磨盘表面的微凸体在压力的作用下嵌入 1%Gr 含量的 Gr/6061Al 复合材料表面, 在摩擦磨损过程中使试样表面产生较大的犁沟(图 6a)。1%Gr 含量的 Gr/6061Al 复合材料摩擦磨损表面的 EDS 面分布如图 7 所示。在磨损表面存在大量的 Fe 元素和 O 元素, O 元素的存在说明与摩擦副之间的磨损表面发生了氧化, Fe 元素的存在也进一步说明了销材料与对磨盘直接接触导致了磨损表面的犁沟和剥落层。

而 5%、10%、15%Gr 含量的 Gr/6061Al 复合材料摩擦表面则有大量的塑性变形区存在(图 6b, 6c, 6d)。5%、10% Gr 含量的 Gr/6061Al 复合材料摩擦表面的 EDS 能谱图未检测到 Fe 元素的存在。这是因为, Gr 含量的增加降低了复合材料的烧结成型性, 使得复合粉末结合不够牢固, 在滑动摩擦过程中摩擦力的作用

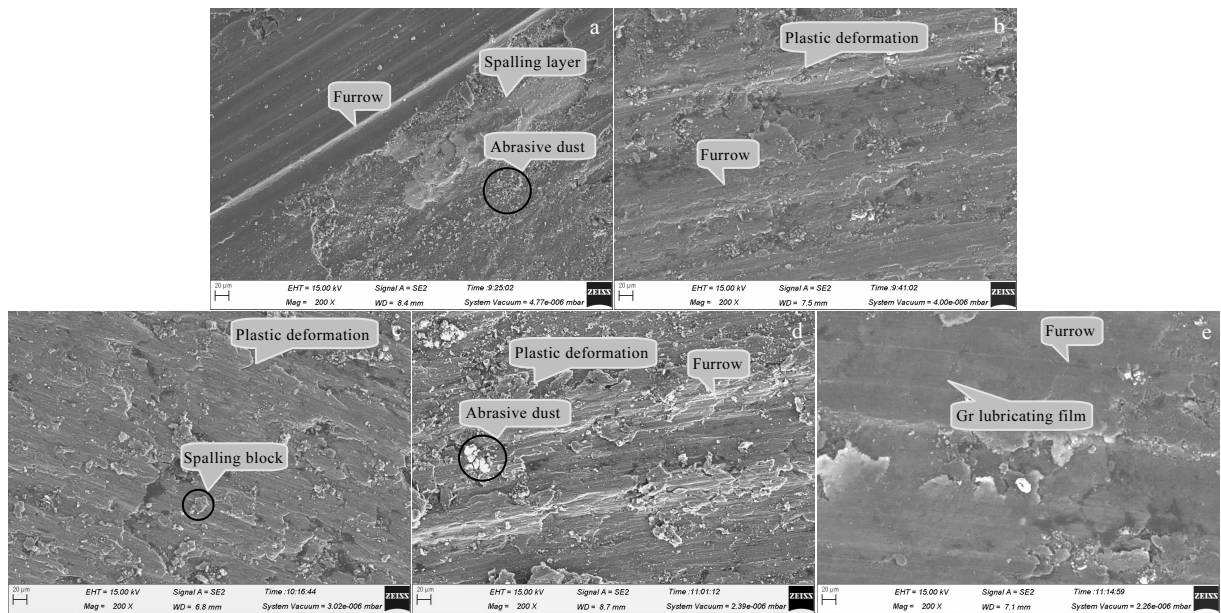


图 6 520 °C，35 MPa 条件下制备的不同 Gr 含量的 Gr/6061Al 复合材料的摩擦磨损形貌

Fig.6 SEM micro-graphs of worn surface of Gr/6061Al composites with different graphite contents sintered at 520 °C under 35 MPa: (a) 1%, (b) 5%, (c) 10%, (d) 15%, and (e) 25%

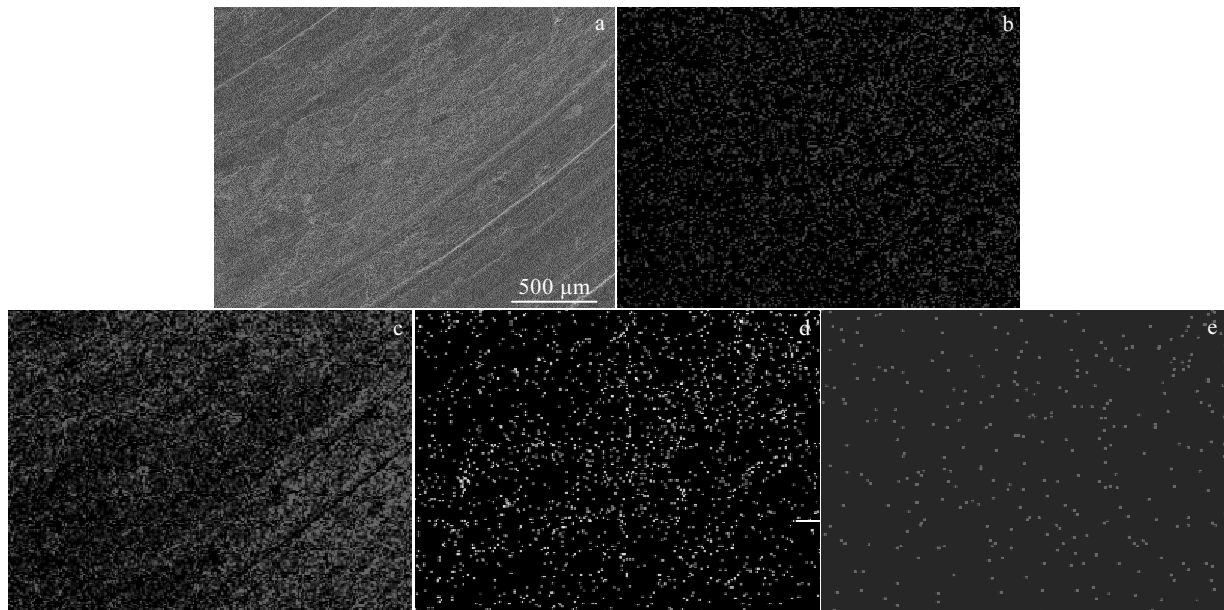


图 7 1%Gr 含量 Gr/6061Al 复合材料的摩擦磨损表面的 EDS 面扫描

Fig.7 EDS mapping of worn surface of Gr/6061Al composites with graphite content of 1% sintered at 520 °C under 35 MPa: (a) SEI, (b) O, (c) Al, (d) Fe, and (e) C

下，Gr 颗粒周围的铝基体发生塑性变形，将 Gr 从基体中挤出，进入摩擦接触面，在剪切力的作用下，涂覆在摩擦表面形成固体自润滑膜。但是由于石墨含量的限制，自润滑膜不能将摩擦表面完全覆盖且润滑膜厚度较小。随着石墨颗粒的释放，其周围的铝基体在

对磨盘摩擦力的作用下进一步发生塑性变形，产生加工硬化，并逐渐从材料体脱落形成磨屑，之后的磨损过程中磨屑阻止了复合材料销与对磨盘的直接接触，复合材料在磨屑的作用下继续磨损。随着 Gr 含量的进一步提高，达到 15%时，摩擦过程中产生的 Gr 自润

滑膜的大小和厚度都进一步增加,对磨损性能的保护起到了一定作用,磨屑的产量减小,摩擦过程中除了磨粒磨损之外,还有复合材料销与对磨盘直接接触产生的摩擦磨损。此外,15% Gr 含量的 Gr/6061Al 复合材料摩擦表面的 EDS 能谱图中也检测到了少量的 Fe 元素。

25%Gr 含量的 Gr/6061Al 复合材料摩擦表面相对比较光滑。这是因为 Gr 的含量足够高,在摩擦表面形成了足够面积和厚度的润滑膜层,阻碍了复合材料与对磨盘的直接接触。但是摩擦表面上仍有细小的犁沟存在。这是对磨盘表面微凸体在复合材料表面作用产生的。因此 25%Gr 含量的 Gr/6061Al 复合材料摩擦表面的 EDS 能谱图也检测到了少量的 Fe 元素的存在。

实验制备的 Gr/6061Al 复合材料的磨损率如图 8 所示。根据经典的 Archard 磨损理论,材料的磨损率与其硬度成反比,与其摩擦系数成正比。由图 8 可知,1% 和 25%Gr 含量的 Gr/6061Al 复合材料的磨损率相对较低,与 Archard 磨损理论不一致。1%Gr 含量的 Gr/6061Al 复合材料磨损率低是因为 Gr 含量较少,复合材料硬度较高,耐磨性比较好。25%Gr 含量的 Gr/6061Al 复合材料的磨损率相对较低,是因为 Gr 含量相对较高,Gr 均

匀分布时也是以团聚的形式存在于小区域内,相当于更大颗粒尺寸的 Gr 增强的 Gr/6061Al 复合材料,在滑动摩擦过程中亚表面粗大的 Gr 颗粒周围的基体铝合金容易发生变形,导致基体中镶嵌的 Gr 颗粒被挤到摩擦表面上,并依靠 Gr 独特的层状结构,在销/盘接触面之间剪切力的作用下产生拖尾效应,在摩擦表面上形成一层自润滑膜,进而阻止磨损的进一步进行,减小磨损率。

520 °C 下制备的 5%、10%、15% Gr 的 Gr/6061Al 复合材料的磨损率与 Archard 磨损理论相一致。从图 8a 中还可以看出,在 520 °C 下制备的 5%、10%、15% Gr 的 Gr/6061Al 复合材料与 1%和 25%Gr 含量的 Gr/6061Al 复合材料相比,磨损率大幅度提高,且 10%Gr 含量的 Gr/6061Al 复合材料磨损率最大,高达 $134 \times 10^{-5} \text{ g/m}^3$ 。随着 Gr 含量的增加,Gr/6061Al 复合材料的烧结成型性会降低。当 Gr 含量达到 5% 时,在摩擦磨损过程中,随着 Gr 的脱落,其周围的铝基体会进一步发生塑性变形,加工硬化,最终从材料体脱落形成磨屑,而 5% 的 Gr 含量还不足以在摩擦表面形成完整的自润滑膜,大量的磨屑对材料表面产生磨粒磨损,因此磨损率急剧增加;当 Gr 含量达到 10% 时,Gr 与其周围基体铝更容易脱落形成磨屑,磨屑数量增多,并且 10%Gr 含量依然不足以形成完整的自润滑膜,因此其磨损率最高;当 Gr 含量达到 15% 时,在摩擦磨损过程中依然有磨屑的产生,但 Gr 含量较高,脱落的 Gr 在摩擦表面形成大面积的自润滑层,阻止了材料进一步的磨削,降低了磨屑数量,磨损率降低。

而从不同温度下制备的 Gr/6061Al 复合材料的磨损率结果来看(图 8b),535 °C 条件下制备的 Gr/6061Al 复合材料磨损率最低,且比 505 和 520 °C 烧结温度下制备样品的磨损率要低得多,这是因为 505 和 520 °C 烧结温度相对较低,影响复合材料的烧结成型性,使磨损率增大。

3 结 论

1) 采用纳米铝包覆的石墨粉制备的 Gr/6061Al 复合材料,石墨在铝基体中均匀分布,Gr 与铝基体界面结合良好,未发现界面反应产物的产生。透射电镜观察 Gr/6061Al 复合材料时发现了少层石墨烯的存在。

2) 随着石墨含量的增加,Gr/6061Al 复合材料的致密度和硬度都呈下降的趋势。随着烧结温度的提高,10% Gr 含量的 Gr/6061Al 复合材料的致密度和硬度均得到提升。

3) 随着石墨含量的增加,Gr/6061Al 复合材料的摩擦系数与致密度具有相同的变化趋势,逐渐降低。

4) 1%和 25% Gr 含量的 Gr/6061Al 复合材料的磨

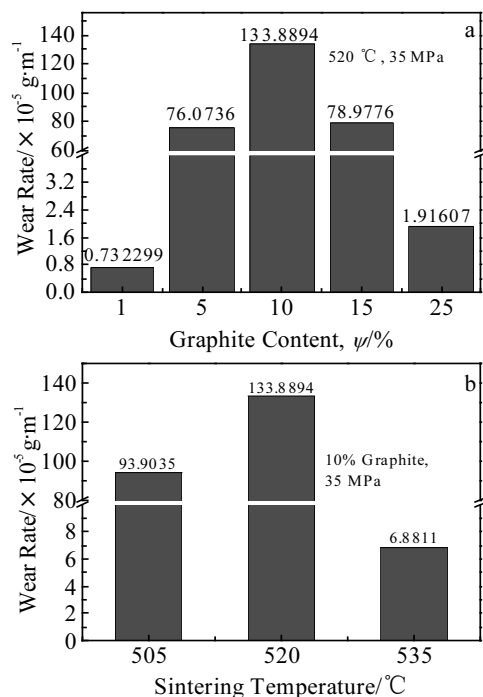


图 8 热压烧结法在 520 °C、35 MPa 下制备的不同 Gr 含量的 Gr/6061Al 复合材料的磨损率和在 35 MPa 不同烧结温度下制备的 10%Gr 含量的 Gr/6061Al 复合材料的磨损率

Fig.8 Wear rate of Gr/6061Al composites with different graphite contents sintered under 35 MPa at 520 °C (a) and with graphite content of 10% sintered under 35 MPa at different temperatures (b)

损率较低, 而 5%、10%和 15% Gr 含量的 Gr/6061Al 复合材料的磨损率则较高。

参考文献 References

- [1] Mantilla Gilart P, Yedra Martínez Á, González Barriuso M *et al. Solar Energy Materials and Solar Cells*[J], 2012, 107: 205
- [2] Fallahdoost H, Nouri A, Azimi A *et al. Journal of Physics and Chemistry of Solids*[J], 2016, 93: 137
- [3] Mahdavi S, Akhlaghi F. *Tribology Letters*[J], 2011, 44(1): 1
- [4] Dorri Moghadam A, Omrani E, Menezes P L *et al. Composites Part B: Engineering*[J], 2015, 77: 402
- [5] Baradeswaran A, Perumal A E. *Composites Parts B: Engineering*[J], 2014, 56: 472
- [6] Radhika N, Subramanian R, Prasat S V *et al. Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*[J], 2011, 10(5): 427
- [7] Moghadam A D, Schultz B F, Ferguson J B *et al. The Minerals, Metals & Materials Society*[J], 2014, 66(6): 872
- [8] Deaquino-Lara R, Soltani N, Bahrami A *et al. Materials and Design*[J], 2015, 67: 224
- [9] Sherif E, Almajid A A, Latif F H *et al. International Journal of Electrochemical Science*[J], 2011, 6: 1085
- [10] Chen J K, Huang I S. *Composites Part B: Engineering*[J], 2013, 44(1): 698
- [11] Liuyi Zhuozi(刘依卓子), Guo Hong(郭宏), Han Yuanyuan(韩媛媛) *et al. Chinese Journal of Rare Metals(稀有金属)*[J], 2018(3): 1
- [12] Han Jiandong(韩建栋), Wu Jingfeng(吴景峰). *Semiconductor Technology(半导体技术)*[J], 2010(8): 797
- [13] Liu Weigao(刘维镐), Chen Dianling(陈电玲), Jia Xianjun(贾宪军) *et al. Light Alloy Fabrication Technology(轻合金加工技术)*[J], 2000, 28(9): 38
- [14] Jeon C, Jeong Y, Hong S *et al. Journal of Mechanical Science and Technology*[J], 2014, 28(2): 499
- [15] Liu Zhengang(刘振刚), Yao Guangchun(姚广春), Liu Yihan(刘宜汉) *et al. Materials Review(材料导报)*[J], 2009(2): 57
- [16] Tang Y, Liu L, Li W *et al. Applied Surface Science*[J], 2009, 255(8): 4393
- [17] Long Yi(龙毅), Xu Hongtao(徐洪涛). *Chemistry & Bioengineering(化学与生物工程)*[J], 2007(6): 70
- [18] Krishnan B P, Surappa M K, Rohatgi P K. *Journal of Materials Science*[J], 1981, 5(16): 1209
- [19] Wang C, Chen G, Wang X *et al. Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2012, 43(7): 2514
- [20] Cheng H, Zhou B, Kitahara A *et al. Journal of Material Research*[J], 1996, 11(5): 1284
- [21] Omrani E, Moghadam A D, Menezes P L *et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2016, 83(1-4): 325
- [22] Tadmor R. *Journal of Physics: Condensed Matter*[J], 2001, 13: 195
- [23] Knieke C, Berger A, Voigt M *et al. Carbon*[J], 2010, 48(11): 3196
- [24] Etter T, Schulz P, Weber M *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2007, 448(1-2): 1
- [25] Wang Qingnian(王庆年), Sui Zhongxiang(隋忠祥), Zhang Ming(张明) *et al. Tribology(摩擦学报)*[J], 1997(1): 90

Microstructure and Properties of Gr/6061Al Composites Sintered by Hot Pressing

Lu Ningning, Xu Lei, Li Changyun, Wang Youchao, Mi Guofa, Yang Erkuo

(Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: The graphite sheet (Gr)/6061Al composites with Gr content of 1%~25% (volume fraction) were prepared by vacuum hot-pressure sintering. The nano-aluminum powders were adopted as cladding materials on the surface of graphite sheet to improve the dispersal uniformity of graphite sheet within aluminum matrix. The graphite sheet disperses uniformly in the aluminum matrix, and the interface between aluminum and Gr is well without interfacial reaction product being found. Few layer grapheme is observed by transmission electron microscopy (TEM). The relative densities of the Gr/6061Al composites with 1%~15% Gr content are all higher than 90%. The relative density, hardness and coefficient of friction (COF) of the samples decrease with the increasing of graphite content. However, with the increasing of the sintering temperature, the relative density and hardness of the Gr/661Al composite with 10% Gr increase. The wear rate of the samples with Gr content of 5%, 10% and 15% are all higher than that with 1% and 25% Gr.

Key words: graphite sheet; aluminum matrix composite; relative density; wear rate; coefficient of friction

Corresponding author: Xu Lei, Ph. D., Senior Engineer, College of Materials Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, P. R. China, Tel: 0086-391-3987472, E-mail: xulei_80@126.com