

多粒径颗粒对石墨烯/铝基复合材料组织及性能的影响

解 双^{1,2} 张宇博^{1,2,3} 刘嘉鸣^{1,2} 李廷举^{1,2,3}

(1.大连理工大学材料科学与工程学院;2.辽宁省凝固控制与数字化制备技术重点实验室;3. 大连理工大学宁波研究院)

摘 要 采用球磨和真空热压烧结结合的工艺制备石墨烯增强铝基(Gr/Al)复合材料,研究不同粒径铝粉混合对复合材料微观组织和力学性能的影响。结果表明,利用球体最密堆积原理设计的多粒径铝粉混合, M_1 ($1\text{ }\mu\text{m}:10\text{ }\mu\text{m}$ 按 $1:1.5$ 混合)和 M_2 ($10\text{ }\mu\text{m}$ 与 $100\text{ }\mu\text{m}$ 按 $1:1.5$ 混合)的致密度均高于单一粒径的试样(S), M_2 致密度达到96.2%。 M_1 试样抗拉强度和伸长率相较于S试样有所降低, M_2 试样抗拉强度和伸长率均提高,其中伸长率提升31.8%。多粒径混合可促进分散小粒径铝粉和石墨烯,有效降低孔隙率,在减少原始颗粒界面的同时增加裂纹扩展路径,大尺寸粒径颗粒的加入使得复合材料的塑性大幅提升。

关键词 混合粒径;Gr/Al复合材料;微观组织;力学性能

中图分类号 TB331;TG146.21 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.03.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Multi-size Particle on the Microstructure and Properties of Graphene Reinforced Al-matrix Composites

Xie Shuang^{1,2},Zhang Yubo^{1,2,3},Liu Jiaming^{1,2},Li Tingju^{1,2,3}

[1. School of Materials Science and Engineering,Dalian University of Technology;
2.Key Laboratory of Solidification Control and Digital Preparation Technology(Liaoning Province);
3.Ningbo Institute of Dalian University of Technology]

Abstract:Effects of Al powders with different particle sizes on the microstructure and mechanical properties of graphene reinforced aluminum matrix(Gr/Al) composites fabricated by ball milling and vacuum hot-pressing sintering were investigated. The results indicate that the relative density of M_1 ($1\text{ }\mu\text{m}:10\text{ }\mu\text{m}=1:1.5$ mixture) and M_2 ($10\text{ }\mu\text{m}:100\text{ }\mu\text{m}=1:1.5$ mixture) of multi-size aluminum powder mixture designed by sphere densest packing principle is higher than that of S specimen ($10\text{ }\mu\text{m}$) with single size, where the density of M_2 reaches 96.2%. The tensile strength and elongation of M_1 are lower than that of S specimen, while those of M_2 are increased, where the elongation is enhanced by 31.8%. The multi-size mixture can effectively disperse small aluminum powders and graphene,reduce the porosity, and add the crack propagation path with the reduction of the original particle interface, consequently resulting in the enhanced plasticity.

Key Words: Multi-size,Gr/Al Composites,Microstructure,Mechanical Properties

收稿日期:2022-04-25;修改稿收到日期:2022-08-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51971048);大连理工大学重点实验室科研专题资助项目(DUT20LAB141)

第一作者简介:解双,女,1997年出生,硕士研究生,辽宁大连(116024),E-mail:xieshuang0429@163.com

通信作者:张宇博,男,1985年出生,副教授,辽宁大连(116024),E-mail:ybzhang@dlut.edu.cn

引用格式:解双,张宇博,刘嘉鸣,等.多粒径颗粒对石墨烯/铝基复合材料组织及性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2023,43(3):330-335.
XIE S,ZHANG Y B,LIU J M, et al. Effects of multi-size particle on the microstructure and properties of graphene reinforced Al-matrix composites[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(3):330-335.

[14] 温亚辉,李长亮,张清,等.粉末粒度对钨钼双金属性能影响[J].稀有金属,2016,40(11):1188-1192.

[15] LIU Y,BIAN X F,ZHANG K,et al.Interfacial microstructures and properties of aluminum alloys/galvanized low-carbon steel under high-pressure torsion[J].Materials & Design,2014,64(9):287-293.

[16] 陈天赐,李元东,李明,等.对固-液轧制A356/2024板材复合界面的影响[J].特种铸造及有色合金,2018,38(3):295-299.

[17] 张跃.型内感应加热钢/铝双金属复合成型工艺[D].郑州:郑州大学,2007.

[18] BAO Z,WANG S, HAN R H, et al. Structure and mechanical properties of aluminum/ steel bimetal using compound casting with electroless nickel plating[J].Materials Research Express,2021,8(1):016517.

[19] 闫可安,许天早,韩礼红,等.双金属复合管的研究现状与发展趋势[J].化工技术与开发,2020,49(10):45-50.

[20] KOBAYASHI S,YAKOU T.Control of intermetallic compound layers at interface between steel and aluminum by diffusion-treatment[J].Materials Science& Engineering,2002,A338(1-2):44-53.

[21] 苗鹏,李元东,王慧,等.A356浇覆温度对铝/钢复合板界面组织及力学性能的影响[J].中国有色金属学报,2020,30(4):728-738.

(编辑:刘卫)

铝基复合材料具有低密度、高强度、耐腐蚀、易加工等特点,广泛应用于航空航天、军工、汽车电子等领域,石墨烯因具有优异的光电性能和力学性能而成为理想的增强相^[1-2]。国内外已经对石墨烯增强铝基复合材料(Gr/Al)展开了制备工艺、力学性能、工业化应用的研究。目前存在的主要问题是石墨烯易团聚,团聚的石墨烯会充当裂纹萌生点,使得石墨烯在复合材料中难以发挥其力学性能优势,同时还伴随着韧性的明显下降^[3-7]。为提升复合材料的力学性能,合理地设计复合材料构型、调控基体与增强相的分布并充分发挥各相的优势已成为进一步研究石墨烯增强铝基复合材料的关键问题^[8-11]。

研究表明,通过多尺寸粒径混合可以同时降低材料孔隙率,并减少界面失配应变。樊传刚等^[12]采用 30 nm 和 70 nm 双粒径 YSZ(Yttria-stabilized Zirconia, YSZ)纳米粉配料,在单轴液压机上成形,可明显降低 YSZ 陶瓷膜的烧结温度。陈路尧^[13]将表面改性的氧化石墨烯均匀分散在 2024Al 基体中进行球磨,构筑了一种非均匀复合构型,使得复合材料在加载过程中变形更加协调,提高了复合材料的韧性。由此,非均匀复合构型能够明显改善 Al 基复合材料的复合效果,提高 Al 基复合材料的韧性。

本研究采用球磨混粉和热压烧结工艺制备 Gr/Al 复合材料,根据球体最密堆积原理设计多粒径铝粉混合模型,分别进行了不同粒径铝颗粒(1 μm 、10 μm 和 100 μm)的非均匀构型,研究了不同粒径铝粉混合对 Gr 的分布和形貌以及 Gr/Al 复合材料微观组织和力学性能的影响,旨在为其应用提供参考。

1 试验材料与方法

采用平均粒径为 1、10 和 100 μm 纯铝粉作为基体材料,实测平均粒径分别为 $(1.96\pm0.25)\text{ }\mu\text{m}$ 、 $(9.04\pm1.25)\text{ }\mu\text{m}$ 和 $(97.08\pm7.25)\text{ }\mu\text{m}$,其显微形貌及粒径分布见图 1,具体成分见表 1。氧化石墨烯(GO)用改进的 Hummers 法制备,经由氧化插层、深度纯化、稀释和超声剥离而成,具有纯度高、分散均匀、含氧官能团丰富等特点,长期静置不沉降,其性能参数见表 2,显微形貌见图 2。

表 1 Al 粉的化学成分

Tab.1 Chemical composition of Al powder				%
w_B				
Fe	Si	Cu	Al	
0.067	0.031	0.000 7	余量	

表 2 GO 性能参数

Tab.2 GO performance parameters					
浓度/ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	片径/ μm	pH 值	纯度/ %	氧含量/ %	金属杂离子/ %
2	0.1~1	5~7	≥ 99.9	40~49	≤ 0.05

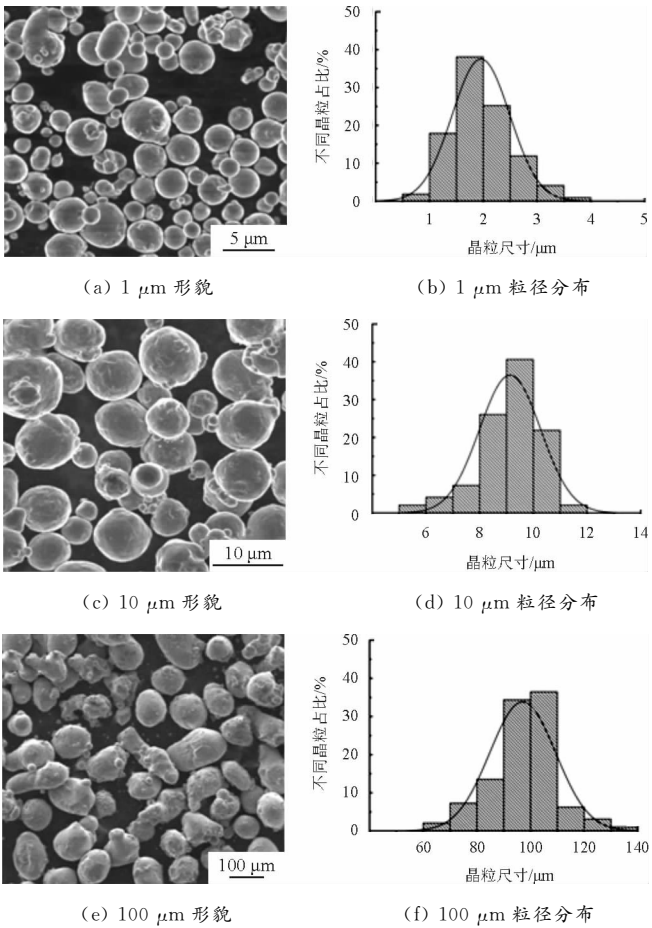


图 1 Al 粉的扫描电镜图及其粒径分布

Fig.1 SEM images and the corresponding particle size distribution of Al powders

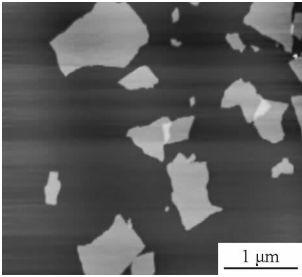


图 2 GO 的形貌

Fig.2 The morphology of GO

将 10 μm 粒径铝粉作为原始对照组,设计了 1 μm 和 10 μm 混合粒径、10 μm 和 100 μm 混合粒径,球磨后分别记为 S、M₁、M₂。在这 3 组粉末中分别添加质量分数为 0.2% 的 GO 进行球磨,球磨介质为无水乙醇,球磨时间为 1~4 h,球磨转速为 300 r/min,用以均匀分散 GO。图 3 为不同球磨时间下 Gr/Al 复合材料中 GO 的表面形貌。可以看到,球磨 1 h 和 2 h 时,石墨烯存在堆叠团聚,并且 Al 粉表面附着的 GO 很少,大部分 GO 与 Al 粉没有界面接触。随球磨时间逐渐延长,团聚的 GO 逐渐分离,球磨 4 h 时,GO 完全分散,均匀地附着在 Al 粉表面。在球磨过程中,Al 粉表面因电荷转

移而带电,GO 极易附着在 Al 粉上,GO 与 Al 粉之间得到理想的贴合,加强了界面结合。

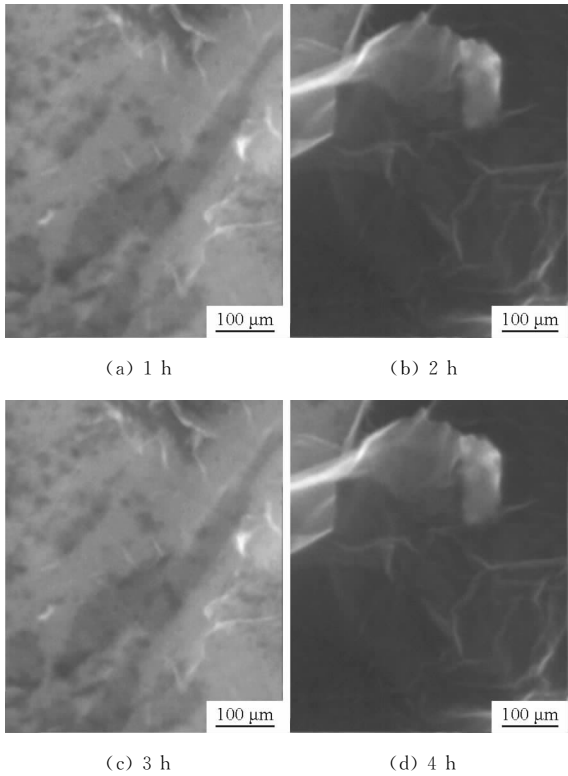


图 3 不同球磨时间下 Gr/Al 复合材料中 GO 的 SEM 形貌
Fig.3 SEM morphologies of Gr/Al composites for different ball milling time

球磨后真空抽滤脱去多余水分,再于真空干燥箱中(60 ℃)干燥 24 h,得到混合粉末(S、M₁ 和 M₂)不同试样 Al 粉颗粒占比见表 3。将混合粉末放进模具中进行真空热压烧结,烧结温度为 700 ℃,保温时间为 60 min,压力为 30 MPa。热压烧结后 GO 可被还原为石墨烯。制备试样尺寸为 φ60 mm×10 mm,见图 4。采用阿基米德法测量复合材料的密度,用 SU5000 扫描电镜和 JEM-2100F 场发射透射电镜进行组织观察,在万能试验机上进行拉伸试验,拉伸速度为 0.5 mm/min,拉伸试样见图 4b。

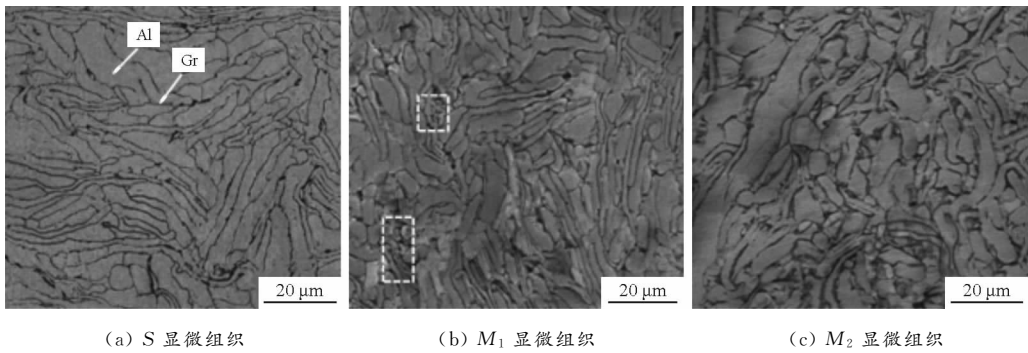


图 5 3 种试样的微观组织和其致密度
Fig.5 Microstructure and relative densities of specimens

表 3 不同试样中 Al 粉不同颗粒尺寸的含量

Tab.3 Al powder contents with various particle

编号	sizes in different specimens			%
	1 μm	10 μm	100 μm	
S	—	100	—	—
M ₁	40	60	—	—
M ₂	—	40	60	—

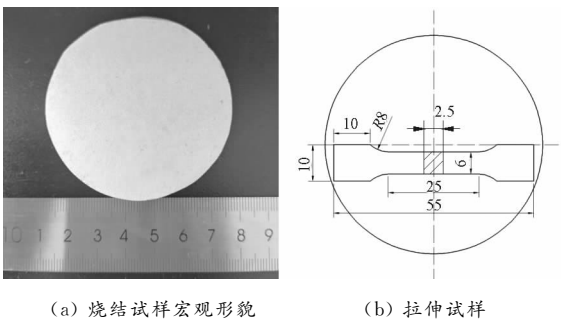


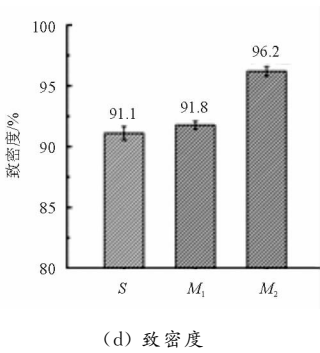
图 4 热压烧结 GO 复合材料宏观形貌和拉伸试样

Fig.4 Macromorphologies and tensile specimens of hot pressing sintered GO composites

2 试验结果与讨论

2.1 复合材料微观组织

图 5 为 3 种试样的微观组织及致密度。从图 5a 可以看到,GO 均匀分布于 Al 基体中,没有明显团聚现象,且未有明显的微观缺陷。从图 5b 可以看到,有部分小粒径 Al 颗粒仍保持球形,小颗粒团聚处呈现出轻微欠烧现象,见方框区域,而大粒径 Al 颗粒几乎全部发生塑性变形,变形后的 Al 颗粒呈片层结构,片层厚度为 2~5 μm,片层直径为 20~40 μm,GO 与 Al 基体完全贴合,包覆较紧密。从图 5c 看出,Al 颗粒发生明显塑性变形,部分大颗粒由于严重塑性变形发生破碎,变形后的 Al 颗粒呈非均匀片层结构,但 GO 与 Al 基体依旧完全贴合,GO 均匀分布在 Al 基体中,未出现欠烧现象。由于采用了相同的球磨工艺,因此获得试样的微观组织及 Al-GO 界面组织没有明显区别,在基体的大部



分位置,GO 均匀地分散在铝粉的晶界处。

多粒径 Al 粉的优化可以显著影响复合材料的致密度,对烧结后试样的致密度进行计算,见图 5d。对比 3 种试样,由于混合粒径中小颗粒会进入大颗粒堆积形成的孔隙中,提高空间利用率,从而使得混合粒径试样致密度较高。同时,混合粒径也促进石墨烯的均匀分布,消除了试样内部的 GO 偏聚问题。随着 Al 粉粒径的增加,小粒径 Al 粉和 GO 的分散更加均匀,因此 M_2 试样的致密度最高。

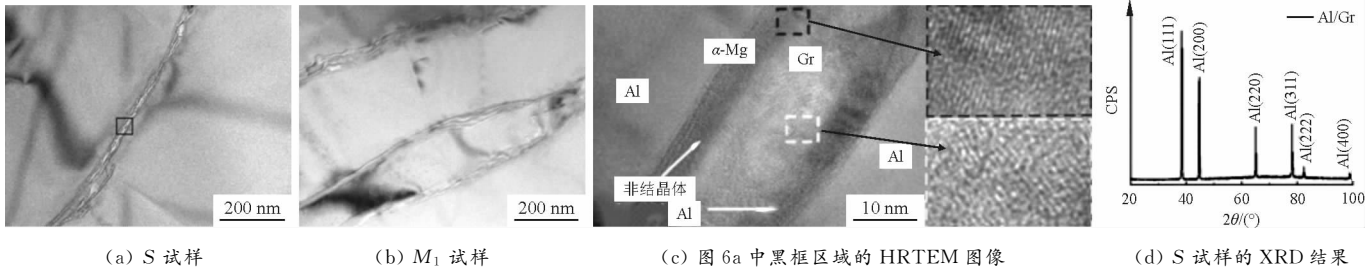


图 6 S、 M_1 试样的 TEM 形貌及 S 试样的 XRD 图谱

Fig.6 TEM images of S and M_1 specimens as well as XRD patterns of S specimen

或是混合粒径的铝粉(M_1 和 M_2),由于混粉过程和烧结工艺相同,因此石墨烯和铝的界面结构基本相似,均没有明显的 Al_4C_3 相生成。

2.3 力学性能及断口形貌

图 7 为 3 种试样的应力-应变曲线。可以看出,在拉伸过程中,弹性阶段曲线趋势较为接近,塑性阶段均未出现明显的屈服平台,不同粒径配比的复合材料的塑性表现出较大的差别。与 S 试样相比, M_1 试样的伸长率低于 S 试样,而 M_2 试样的伸长率提高了 31.8%。 M_1 试样的抗拉强度也低于 S 试样, M_2 试样的抗拉强度与 S 试样相近。为进一步分析复合材料的失效行为,对不同试样的拉伸断口形貌进行观察,结果见图 8。可以看出, M_1 断口形貌中由于小粒径 Al 颗粒团聚现象而留下大韧窝,颗粒团聚体内的颗粒之间多为孔隙或者弱粘结,拉伸时裂纹易在这些结合较弱的界面处形成,随后沿着界面向基体扩展。随着拉伸应力逐渐增大,裂纹发生进一步扩展直至复合材料断裂。复合材料

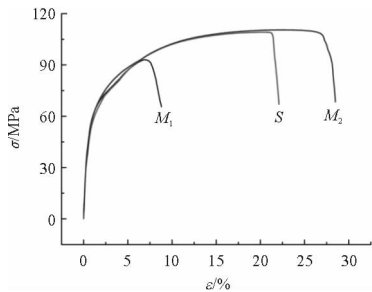


图 7 不同粒径铝粉制备的复合材料的拉伸应力-应变曲线
Fig.7 Tensile stress-strain curves of the composites fabricated by Al powders with different particle sizes

2.2 复合材料物相分析

图 6 为 S、 M_1 试样的 TEM 形貌。可以看出,Al 与 GO 之间均呈现出层状堆叠结构,与扫描电镜的结果一致。对图 6a 中的黑色区域进行放大,通过高分辨透射电镜,可以观察到 3 层的界面结构,由铝基体、无定形 Al_2O_3 和 GO 组成,见图 6c。 Al_2O_3 层和 GO 层结合紧密,没有发现明显裂纹。从图 6d 中未看到明显的 Al_4C_3 的特征峰,说明 GO 烯片层上不存在高密度的缺陷,没有明显的 Al_4C_3 相生成。无论采用单粒径的铝粉(S)

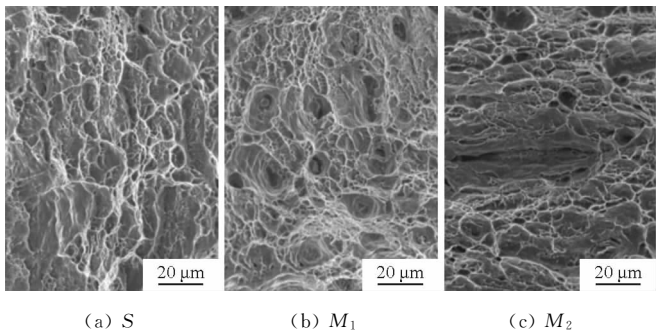


图 8 不同粒径铝粉制备的复合材料的拉伸断口 SEM 形貌
Fig.8 SEM images of tensile fracture of the composites fabricated by Al powders with different particle sizes

断裂后,颗粒团聚体分成两部分留在各自断口上。而 S 与 M_2 试样断口形貌中未观察到明显的团聚现象,GO 与 Al 颗粒结合较好,在拉伸载荷施加过程中,GO 阻碍微裂纹的产生和长大。当发生宏观失效时,基体被撕裂,因而基体部分有较明显的撕裂棱。比较二者韧窝的深浅可知,单一粒径试样的断口韧窝尺寸明显较大,深度较浅,断口也较为平整。而多粒径试样的断口韧窝较深,基体部分也出现明显的撕裂棱,表现为明显的韧性断裂,塑性相对较好。同时,由于颗粒粒径优化,GO 和小粒径 Al 粉的偏聚问题得到了很好的解决,因此 M_2 试样的伸长率和强度都得到了提升。

3 分析与讨论

3.1 复合材料结构设计

根据球堆积的最密堆积原理,当相同半径的球最密

堆积时,不论半径大小其空间利用率均为 74.05%。即单一粉末粒径变化时在自然的几何堆积上对理论相对密度没有影响。而当两种粒径相差较大颗粒混在一起时,小颗粒会进入大颗粒堆积形成的孔隙中,进而提高空间利用率,使其相对密度提高。

根据 GERMAN R M^[14] 对不同粒径的颗粒随机紧密堆积密度的测试结果,见图 9,在粒径比小于 10 : 1 时,相对密度随颗粒粒径比增加而增大,在粒径比大于 10 : 1 时,密度增加明显减缓直至不变。因此,混合粒径比选择 10 : 1。

在两种颗粒粒径组成的体系中,大颗粒间的间隙由小颗粒填充,以得到最紧密的堆积,混合物的单位体积内大颗粒质量 W_1 和小颗粒质量 W_2 为:

$$W_1 = (1 - \epsilon_1) \rho_{P1} \quad (1)$$

$$W_2 = \epsilon_1 (1 - \epsilon_2) \rho_{P2} \quad (2)$$

式中, ϵ_1 、 ϵ_2 、 ρ_{P1} 、 ρ_{P2} 分别表示大颗粒和小颗粒的孔隙率和密度。设大颗粒所占质量分数为 f_{w1} , 则

$$f_{w1} = \frac{W_1}{W_1 + W_2} = \frac{(1 - \epsilon_1)(1 - \epsilon_2) \rho_{P1}}{(1 - \epsilon_1) \rho_{P1} + \epsilon_1 (1 - \epsilon_2) \rho_{P2}} \quad (3)$$

按粒径理论上能达到的最密堆积计算, $\rho_{P1} = \rho_{P2} = \rho$, $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1 - 0.74 = 0.26$, 则 $f_{w1} = 0.79$, 即大颗粒质量分数为 79%。而按平均每一个大颗粒周围均匀包覆一周小颗粒计算大颗粒质量分数为:

$$f_{w1} = \frac{R_3}{(R + 2r)^3} \quad (4)$$

将粒径比 10 : 1 代入式(4), 则 $f_{w1} \approx 0.59$, 即大颗粒质量分数为 59%。

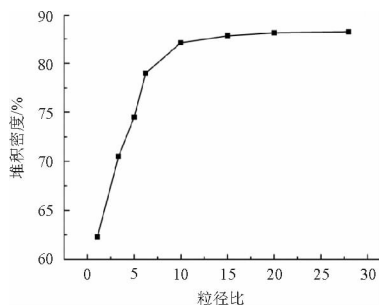


图 9 粒径比与堆积密度的关系^[14]

Fig.9 The relationship between particle size ratio and relative density^[14]

综合以上两种计算方法可知, $0.59 < f_{w1} < 0.79$, 结合粒径实际堆积情况, 取 $f_{w1} = 0.6$ 。由试验结果可知, 使用粒径比为 10 : 1, 小颗粒与大颗粒质量分数比为 1 : 1.5 进行颗粒混合后, M_1 和 M_2 的致密度相较于单一粒径均有提升, 符合球体堆积的最密堆积原理。

热压烧结作为粉末的固结过程, 是使烧结体获得最大的致密化程度的过程, 热压烧结致密化过程有 3 个基本阶段^[15]: ①快速致密化阶段, 也称微流动阶段, 即在

热压初期, 颗粒由于相对滑动、破碎和塑性变形发生重排, 致密化速度较快, 这一过程主要取决于粉末的粒度、形状及材料的断裂和屈服强度; ②致密化减速阶段, 主要机制为塑性流动, 是闭孔收缩阶段; ③趋近终极密度阶段, 主要机制为受扩散控制的蠕变, 此时, 晶粒的长大使致密化速度大为减缓, 近终密度后致密化过程逐渐停止。当在铝粉中加入石墨烯时, 石墨烯包覆在铝粉表面形成晶界层, 会影响烧结反应的进行, 因此, 在致密化减速阶段, 烧结收缩率较低, 当烧结收缩率较低时, 堆积密度将成为影响烧结密度的主要因素, 因此, M_1 和 M_2 的烧结密度均高于单一粒径。

3.2 混合粒径对力学性能的影响

在 Gr/Al 复合材料复合材料结构中, 材料的塑性主要由基体决定^[16]。由于铝基体较软, 塑性应变大于石墨烯层, 而在层间界面处, 应变必须是连续的, 这就导致了在这些界面附近产生应变梯度, 大量的位错将会在此产生以适应应变梯度^[9-11], 位错的堆积将会产生背应力硬化。随着拉伸应变的增加, 较软 Al 片层中的位错源首先被激活, 然而软铝片层被硬石墨烯层包围约束, 会产生长程背应力以阻止位错滑移, 这一过程中片层堆叠的几何形状使得软、硬层之间的相互约束更加有效, 从而增加材料强度及塑性。

在非均匀构型复合材料结构中, 不同粉末粒径变化会对石墨烯产生影响, 理论上粒径小的颗粒比表面积大, 表面扩散较易进行^[14-15], 但是其前提是颗粒间界面必须充分接触。在制备过程中, GO 包覆于 Al 粉颗粒边界, 阻碍了粉末颗粒之间的元素扩散和冶金结合, 导致粉末颗粒的再结晶不充分。相较于 S 试样, M_1 试样由于加入更小粒径铝粉来提高相对密度, 由此带来的弊端就是增加了原始颗粒界面。在图 6 中, 界面层由 Al 基体, 无定形氧化铝和石墨烯组成, 颗粒越小, 界面的比表面积越大, 由此带来的冶金缺陷越多。由于 GO 层与 Al 基体塑性不同, 大量位错堆积和应力集中会使 Gr/Al 界面处形成孔洞进而形成裂纹源, 并为裂纹扩展提供连续路径, 造成颗粒边界结合较弱, 因此复合材料表现出较差的塑性。

在同等压力条件下, 小颗粒由于数目多, 所获得的颗粒间接触力小于大颗粒间接触力, 更不容易发生塑性变形。所以小颗粒接触面积少于大颗粒, 大颗粒试样烧结程度更好。 M_2 试样由于加入大粒径的 Al 粉, 更容易产生较高的可变形性, 在加载过程中容易发生变形。随着塑性变形增加, 在界面处萌生的裂纹扩展时会沿变形界面发生偏转^[13], 以减少裂纹尖端的局部应力集中, 使裂纹扩展路径增加, 从而提高复合材料韧性。断口形貌中除存在 GO 被拔出现象, Al 粉烧结形成的 Al 层

也在载荷作用下逐渐变形直至断裂,这种断裂模式由沿晶断裂向穿晶断裂转变,也是塑性提高的表现。此外,该结构中还存在局部复杂的三维应力状态,它是由对厚度不同的 Al 层施加的单轴应力产生的塑性不均匀性导致的。应力状态的变化会激活更多的滑移系统,从而促进位错的累积和相互作用,这将增加偶然位错密度,该位错不会产生长程背应力,因此这种结构能够使得复合材料兼备高强度和高塑性。

4 结 论

(1)根据球体堆积的最密堆积原理及不同粒径的颗粒随机紧密堆积密度的测试结果,设计混合粒径比例 1:10,对应质量分数为 1:1.5 的 M_1 和 M_2 ,相较于单一粒径 S 试样,混合粒径 M_1 和 M_2 试样相对密度均有所提高。

(2)加入大粒径的 Al 粉进行粒径优化,可产生较高的可变形性,有效分散小粒径 Al 粉和 GO,同时提升塑性变形能力,在界面处萌生裂纹扩展时会沿变形界面发生偏转,以减少裂纹尖端的局部应力,使裂纹扩展路径增加,从而提升复合材料韧性,较 S 试样伸长率提高了 31.8%。

参 考 文 献

- [1] 刘云圻. 纳米材料前沿石墨烯从基础到应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2017.
- [2] POURMAND N S, ASGHARZADEH H. Aluminum matrix composites reinforced with graphene: A review on production, micro-structure, and properties[J]. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 2019, 45(4): 289-337.
- [3] ZHANG Z W, LIU Z Y, XIAO B L, et al. High efficiency dispersal and strengthening of graphene reinforced aluminum alloy composites fabricated by powder metallurgy combined with friction stir processing[J]. Carbon, 2018, 135: 215-223.
- [4] 缪宇, 傅强, 夏春, 等. 石墨烯对搅拌摩擦加工铝基复合材料性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(1): 83-87.
- [5] 梁建权, 赵宇宏, 陈利文, 等. 石墨烯纳米片增强铝基复合材料的制备及研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(6): 652-656.
- [6] 申超, 朱德智, 罗铭强, 等. 放电等离子烧结石墨烯铝材料的组织与性能[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(4): 709-716.
- [7] 常庆明, 李宗伦, 许芳宇. 石墨烯增强铝基复合材料的制备及性能研究[J]. 热加工工艺, 2022(14): 70-73, 77.
- [8] WU X L, JIANG P, CHEN L, et al. Extraordinary strain hardening by gradient structure[J]. Proceedings of the National Academy of the United States of America, 2014, 111(20): 7 197-7 201.
- [9] FENG S W, GUO Q, LI Z, et al. Strengthening and toughening mechanisms in graphene-Al nanolaminated composite micro-pillars[J]. Acta Materialia, 2017, 125: 98-108.
- [10] LIU Z Q, MEYERS M A, ZHANG Z, et al. Functional gradients and heterogeneities in biological materials: Design principles, functions, and bioinspired applications[J]. Progress in Materials Science, 2017, 88: 467-498.

- [11] CHENG Z, ZHOU H F, LU Q H, et al. Extra strengthening and work hardening in gradient nanotwinned metals[J]. Science, 2018, 362: 559-563.
- [12] 樊传刚, 朱思伟, 左艳波, 等. 双粒径组分 YSZ 纳米粉体的成型、烧结与电学性能研究[J]. 功能材料, 2005(10): 78-80.
- [13] 陈路尧. 石墨烯/铝基复合材料的组织构型调控及性能研究[D]. 银川:宁夏大学, 2021.
- [14] GERMAN R M. Powder Injection Molding[M]. 宋久鹏 译, 长沙:中南工业大学出版社, 2001.
- [15] GERMAN R M. 烧结实践与科学原理[M]. 贾成厂, 褚克, 刘博文, 等 译. 北京:化学工业出版社, 2021.
- [16] SHIN S E, CHOI H J, SHIN J H, et al. Strengthening behavior of few-layered graphene/aluminum composites [J]. Carbon, 2015, 82:143-151.

(编辑:刘卫)

国内首款可降解镁骨钉完成临床试验

东莞宜安科技股份有限公司(以下简称宜安科技)宣布,由该公司研发的中国首款可降解高纯镁骨科植入器械产品——“可降解镁骨内固定螺钉”完成临床试验,并举行了新闻发布会暨医用镁合金骨科植入器械临床转化研讨会。

据介绍,临床入组工作的完成,意味着可降解镁植入材料成功在人体上实现批量临床使用,标志着生物可降解金属植入物产业化步入了新阶段。目前,国内医疗市场尚无可降解镁骨钉产品。

产品可避免二次手术

在宜安科技研发总部实验室,镁骨钉产品露出真容:外形和普通螺丝钉相差无几,银白色,长度几厘米不等,质量较轻。

在许多骨科手术中,打钢钉、打钢板是常见的治疗手段,缺点是康复后需要二次手术将其取出,会给患者增加身体负担。

宜安科技研发的国内首款镁骨钉既能治病,又无需取出。该产品由纯度为 99.999% 的镁制成,相关试验显示,它不仅具有类似钢钉的医学功能,还能在人体内自动溶解,从而免除二次手术取出的麻烦。

据了解,在骨科手术中,骨钉主要用于固定骨骼,帮助受损骨骼愈合,目前有不锈钢钉、钛合金钉和聚乳酸钉,而镁骨钉将是第 4 种新型骨钉材料。

“镁骨钉由高纯镁制作而成,镁在人体环境中会发生腐蚀降解,最终形成镁离子,通过尿液被排出体外。”镁安医疗器械有限公司董事长李卫荣表示,镁骨钉在体内的降解过程需要两三年,前期发挥固定骨骼的功能,“服役”完成后自动消失,无需取出。

“安全性方面,Mg 是人体不可或缺的矿物质元素,成年人每天约需摄取几百毫克的镁,多余的 Mg 将自动排出体外,不会给人体造成危害。”李卫荣表示,镁骨钉生产成本相对较低,价格将低于其他骨钉产品,且免除了二次手术,可以帮助骨科患者降低治疗成本及生理上的创伤。

(摘自中国有色网)