

Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维对铝合金基复合材料的增强作用

何玲^{*1, 2}, 刘晨光¹, 李文生¹, 孙卫民¹, 潘莉莉¹

(1. 兰州理工大学 有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 材料科学与工程学院, 兰州 730050)

摘要: 采用一种具有芯-壳结构的复合纳米纤维增强铝合金复合材料, 可以在提高抗拉强度的同时增加塑性。通过真空热压烧结技术制备了 Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 复合纳米短纤维增强 2024 铝合金复合材料。研究了纤维添加质量分数对复合材料致密度、硬度、抗拉强度及延伸率的影响; 并探究了芯-壳结构在复合材料增韧中的作用。结果表明: Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维具有良好的分散性, 在超声分散及机械搅拌混粉后均匀吸附在铝合金颗粒表面, 无分层及团聚现象; 经热压烧结后, Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维以短纤维形态均匀分散在铝合金基体内, 少量添加 Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维起到了桥联和孔洞填充作用, 使复合材料致密度和硬度提高; 添加质量分数为 1wt% 时, 抗拉强度和延伸率取得最大值, 由铝合金的 249.3 MPa、2.9% 增加到 299.1 MPa、4.3%。Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维的添加可以细化晶粒, 阻碍裂纹扩展, 且在拔出/断过程中 Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维芯-壳结构的塑性变形起到了增强增韧作用。

关键词: 铝合金复合材料; Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 复合纳米纤维; 抗拉强度; 延伸率; 芯-壳结构

中图分类号: TB331 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2020)02-0400-08

Enhancement effect of Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ short nanofibers on aluminum alloy matrix composites

HE Ling^{*1, 2}, LIU Chenguang¹, LI Wensheng¹, SUN Weimin¹, PAN Lili¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: By using a kind of composite nanofibers with core-shell structure to reinforce aluminum alloy matrix composites, it can improve the tensile strength while increasing plasticity. Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ short nanofibers reinforced 2024 aluminum alloy composites were prepared by vacuum hot pressing sintering technique. The effects of Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ nanofibers content on the relative density, hardness, tensile strength and elongation of composites were studied, and the effect of the core-shell structure on the toughening mechanism of the composites explored. The results show that the Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ short nanofibers have good dispersion, and the fibers are uniformly adsorbed on the surface of aluminum alloy particles without stratification and agglomeration was method of ultrasonic dispersion and mechanical agitation. After hot pressing sintering, the Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ short nanofibers are uniformly dispersed in the aluminum alloy matrix with a form of short fibers, and a small content of Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ short nanofibers plays the role of bridging and hole filling, which increases the relative density and hardness of the composites. There are the maximum tensile strength and elongation of the composites at the nanofiber mass fraction

收稿日期: 2019-02-25; 录用日期: 2019-05-13; 网络出版时间: 2019-05-24 16:11

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190524.001>

基金项目: 国家自然科学基金(51674130); 沈阳材料科学国家研究中心-有色金属加工与再利用国家重点实验室联合基金(18LHPY006); 甘肃省重点研发计划(17JR7GA014)

通讯作者: 何玲, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为陶瓷纤维增强功能复合材料 E-mail: hl_lut@163.com

引用格式: 何玲, 刘晨光, 李文生, 等. Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维对铝合金基复合材料的增强作用[J]. 复合材料学报, 2020, 37(2): 400-407.

HE L, LIU C G, LI W S, et al. Enhancement effect of Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ short nanofibers on aluminum alloy matrix composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(2): 400-407 (in Chinese).

of 1wt%, which increase from 249.3 MPa (matrix) to 299.1 MPa, 2.9% (matrix) to 4.3%, respectively. The addition of $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}-\text{Al}_2\text{O}_3$ short nanofibers can refine the composites grain, hinder crack propagation, and the plastic deformation of $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}-\text{Al}_2\text{O}_3$ core-shell structure plays a strengthening and toughening effect in the process of pulling out/breaking.

Keywords: aluminum alloy composite; $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ nanofibers; tensile strength; elongation; core-shell structure

铝合金及其复合材料具有高比模量、高比强度、低密度等综合性能,被广泛应用于国防工业、航空航天、汽车等领域^[1-4]。为了进一步使铝合金满足更高的强度要求,常以纤维、陶瓷颗粒等具有优异特性的第二相作为增强材料,来改善铝合金的力学性能。短纤维相对于连续纤维具有缺陷少、成本低的特点;并且较颗粒具有大的长径比、比表面积和优良的力学性能,使其对金属基复合材料具有更好的增强效果^[5-8]。目前已公开报道铝合金复合材料中所添加的短纤维主要有 Al_2O_3 ^[9]、 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ^[10]、 SiC ^[11]、 Si_3N_4 ^[12]、碳纤维^[13]。研究证明,添加短纤维后,复合材料硬度和抗拉强度均得到了明显改善。在 Kaczmar^[14]、Qu^[15] 与杨^[16] 等对单一纤维增强铝合金复合材料的研究中,复合材料抗拉强度明显提高的同时,延伸率出现了下降的趋势。Zhang 等^[17] 在碳纳米管(CNTs)- SiC_p 双相纳米材料增强铝合金复合材料的研究中,发现 SiC_p 起到了延缓 CNTs 拔出与抑制 CNTs 剥离的作用,并且改善了 CNTs 与基体之间的界面结合状态,相比于单一添加 CNTs 时提高了抗拉强度和延伸率。在 Li 等^[18-19] 的研究中同样发现复合增强相的强化效果在抗拉强度和延伸率方面优于单一增强相。因此,铝合金基体中添加复合增强相成为实现增强增韧的一种途径。在 Chiu^[20] 的研究中,发现 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 较 Al_2O_3 与金属基体间有更好的润湿性,可以改善纤维与基体间的结合性。综上,基于 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 与基体良好的润湿性及 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 与 Al_2O_3 相近的热膨胀系数,可将 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 与 Al_2O_3 制备成复合纤维以作为增强相,有望在铝合金复合材料中起到增强的同时提高塑性的作用。

因此,本文将自制的具有芯-壳结构的 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 纳米短纤维添加到 2024 铝合金中,通过真空热压烧结技术制备出 $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 复合纳米短纤维增强铝合金复合材料。研究 $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维添加质量分数对复合材料致密度、硬度、抗拉强度及延伸率的影响;并讨论 $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维芯-壳结构对铝合金复合材料的增强机制。($\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维

以下简称 $(\text{YAG}-\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{sf}}$ 。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

本文以商用 2024 铝合金粉为基体材料,成分见表 1。第二相材料为采用自有技术^[21] 制备的 $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维。

表 1 2024 铝合金化学成分

Table 1 Chemical composition of 2024 Al alloy wt%							
Element	Cu	Mg	Si	Mn	Fe	Others	Al
Content	4.5	1.3	0.5	0.48	0.5	0.5	Balance

1.2 块体复合材料制备过程

图 1 为块体复合材料制备流程图。以无水乙醇作为分散介质,采用超声分散加机械搅拌的方法使第二相 $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维均匀分散到 2024 铝粉中,混合粉体真空干燥后,通过真空热压烧结技术制备得到 $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}/2024\text{Al}$ 复合材料。烧结温度为 525°C ,升温速率为 $10^\circ\text{C}/\text{min}$,保温 10 min,到达烧结温度后的轴向压力为 20 MPa。按以上方法分别制备了 $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 添加质量分数为 0、1、2、3、5 wt% 的复合材料。

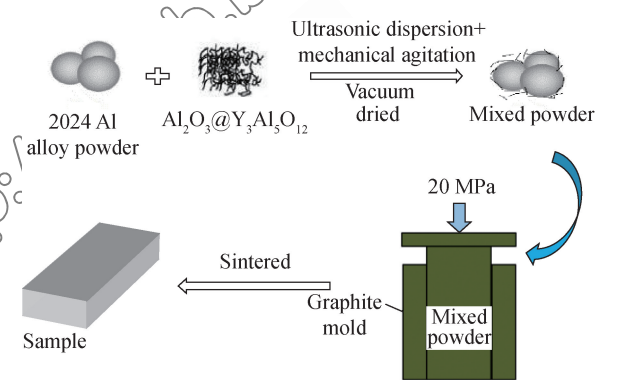


图 1 真空热压烧结制备 $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}/2024\text{Al}$ 复合材料过程示意图

Fig. 1 Process of preparing $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}/2024\text{Al}$ composite by vacuum hot pressing sintering

1.3 性能测试

通过 D8ADVANCE 型 X 射线衍射仪(XRD, 德国布鲁克 AXS 公司)分析复合材料相的组成,扫

描速度为 2°/min，扫面范围为 20°~80°，加速电压为 40 kV，电流为 30 mA；采用阿基米德排水法测量复合材料真实密度，并根据理论密度计算其致密度；将样品表面经 6.5 μm 砂纸打磨并清洗以后通过 HV-1000 型维氏硬度计(中国济南峰志仪器公司)进行硬度测量，载荷为 100 g，加载时间为 10 s，每组样品至少进行十次测试取平均值；通过 Axio Scope A1 型光学显微镜(德国卡尔蔡司公司)观察金相显微组织，并通过 Image Pro-Plus 软件对金相照片分析计算求得平均晶粒尺寸；利用 Quanta 450FEG 型场发射扫描电子显微镜(SEM, 美国 FEI 公司)和 JEM-2010 型透射电子显微镜(日本电子株式会社)对 Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维、2024 铝合金粉、复合材料微观结构及断口形貌进行观察；基体和复合材料的室温拉伸实验在 AGS-X 型电子万能试验机(日本岛津公司)上进行，夹头拉伸速率为 0.5 mm/min，拉伸试样尺寸如图 2 所示。

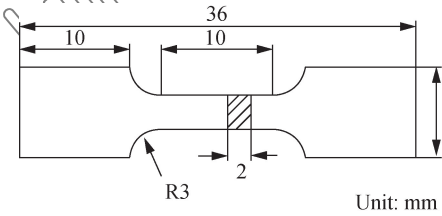


图 2 拉伸试样尺寸示意图
Fig. 2 Schematic of dimension of tensile specimen

2 结果与讨论

2.1 2024 铝合金粉末和 Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维的微观结构形貌

图 3 为基体 2024 铝合金粉的 SEM 图像及粒径分布，平均直径约为 25.7 μm。

图 4 为 Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维的 XRD 图谱，除了 Y₃Al₅O₁₂ 和 α-Al₂O₃ 相外，无其他杂质相出现。图 5 为 Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维的 SEM 图像，直径为 280~450 nm，长度为 20~30 μm，是一种短纤维。图 6 为 Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维的 TEM 图像和衍射斑点结构。可知，Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维形成了外部为 Y₃Al₅O₁₂、内部为 Al₂O₃ 的一种芯-壳结构；在衍射斑点结构中同时观察到 Y₃Al₅O₁₂ 和 Al₂O₃ 两种衍射斑点。说明本文中通过自有技术制备的 Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维是一种具有芯-壳结构的单晶复合纳米短

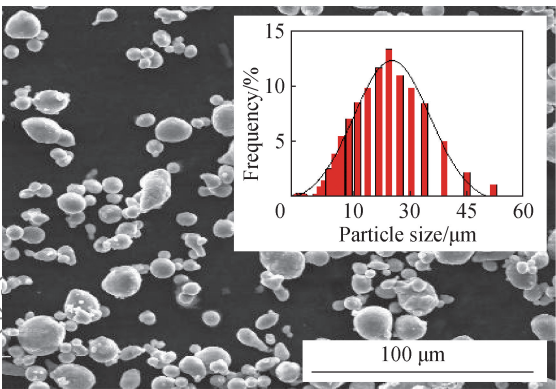


图 3 2024 铝粉的 SEM 图像和粒径分布
Fig. 3 SEM image of 2024Al powder and distribution of particle size

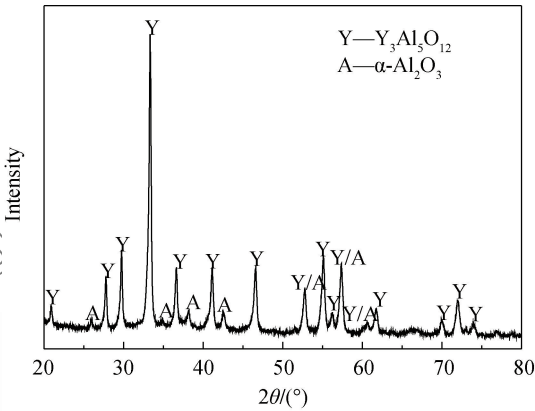


图 4 Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维的 XRD 图谱
Fig. 4 XRD pattern of Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ short nanofibers

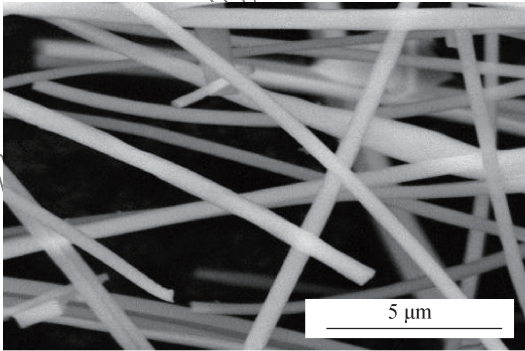


图 5 Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维的 SEM 图像
Fig. 5 SEM image of Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ short nanofibers

纤维，缺陷少，并且具有大的比表面积，有利于与基体间更好地结合。

2.2 Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维在 Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维/2024Al 混合粉体中的分布

图 7 为 Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维/2024Al 混合粉末的 SEM 图像。可以看出，Al₂O₃@

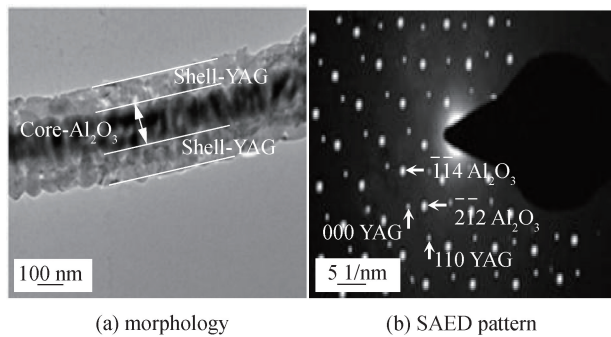


图 6 $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维的 TEM 图像
Fig. 6 TEM images of the $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ short nanofibers

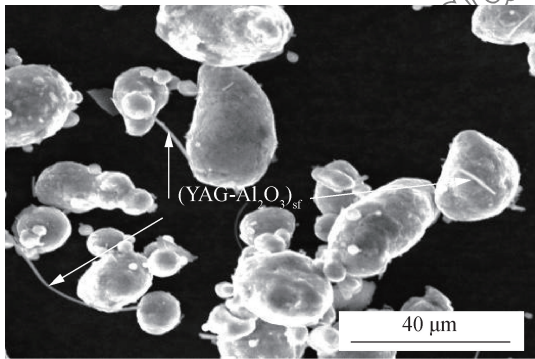


图 7 2wt% $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维在 $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维/2024Al 复合材料粉体中的分布
Fig. 7 Distribution of 2wt% $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ short nanofibers in $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ short nanofibers/2024Al composite powder

$Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维依然保持了良好的纤维形貌, 纤维大多吸附在 2024 铝颗粒表面, 分布均匀, 未发现明显团聚现象。纳米短纤维优异的表面吸附性使其均匀的吸附在金属颗粒表面, 这既避免了 $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维与 2024 铝粉间因密度差造成分层, 又可以防止混粉过程中纤维出现团聚现象。

2.3 $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维/2024Al 块体复合材料物相与形貌

图 8 为真空热压烧结后 $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维/2024Al 复合材料的 XRD 图谱。可以看出, 2024 铝基体的衍射峰是由 Al 相及强化相 Al_2Cu 组成; 当添加第二相 $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维后, 在衍射图像中除 Al 和 Al_2Cu 外还观察到了纤维成分 $Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 和 Al_2O_3 的衍射峰, 并且, 复合材料中无其他杂质相生成。

图 9 为真空热压烧结后块体复合材料中 $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维的分布情况。当添加质量分数为 1wt%~2wt% 的 $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短

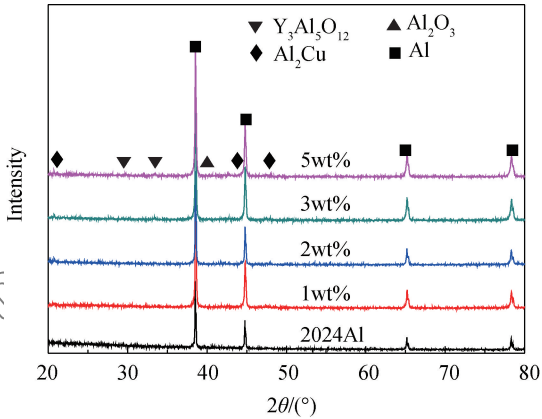


图 8 不同短纤维含量 $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维/2024Al 复合材料 XRD 图谱
Fig. 8 XRD patterns of $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ short nanofibers/2024Al composites with different content of short fibers

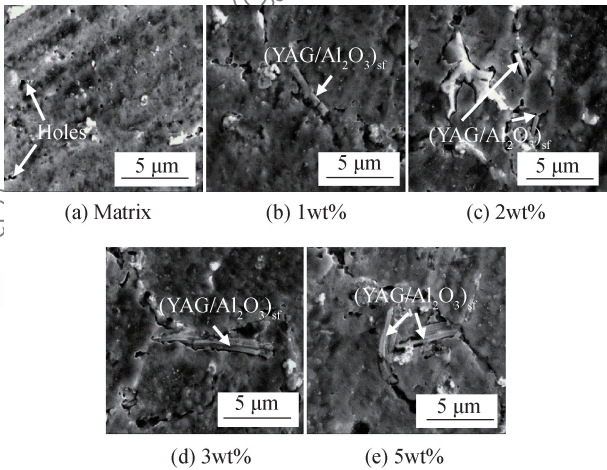


图 9 不同短纤维含量 Al 基体和不同短纤维含量 $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维/2024Al 复合材料的 SEM 图像
Fig. 9 SEM images of Al matrix and $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ short nanofibers/2024Al composites with different content of short fibers

纤维时, 纤维在基体中具有良好的分散性, 由于纳米短纤维对孔洞有填充作用, 复合材料中孔洞相对于基体减少; 当添加 $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维的质量分数增大时, $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维逐渐出现团聚现象, 团聚处出现孔洞。图 10 为基体和 1wt% $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维/2024Al 复合材料光学显微照片, 通过软件 Image-Pro Plus 对晶粒尺寸进行计算求平均值后得出, 1wt% $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维/2024Al 复合材料的平均晶粒尺寸 ($5.13\ \mu\text{m}$) 较基体合金 ($10.11\ \mu\text{m}$) 减小, 说明 $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维的加入使 $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维/2024Al 复合材料晶粒得到细化。

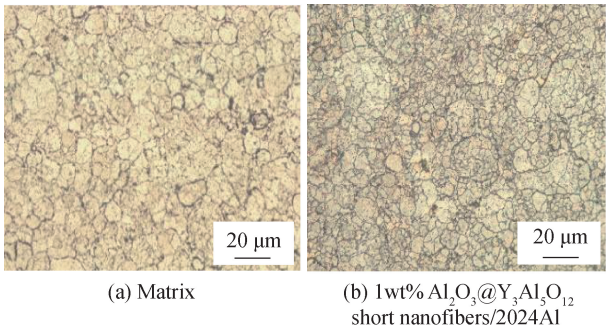


图 10 基体和 1wt% Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维/2024Al 复合材料光学显微照片

Fig. 10 Optical micrographs of matrix and 1wt% Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ short nanofibers/2024Al composite

2.4 纳米短纤维的质量分数对 Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维/2024Al 复合材料致密度与硬度的影响

图 11 为复合材料致密度和硬度随 Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维质量分数的变化曲线。当添加质量分数为 1wt%~2wt% 的 Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维后, Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维/2024Al 复合材料的致密度相对于基体有一定增加。在烧结过程中, 烧结温度处于基体粉末的固液相温度间, Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维发挥了一种媒介/桥联的作用, 加快了合金液相在颗粒与颗粒间的扩散和流动, 促进了复合材料的致密化。本研究中的基体粉末直径约为 25.7 μm, Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维平均直径约为 280~350 nm, 长度为 20~30 μm, 图9(a)中孔洞尺寸约为 310~490 nm, Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维尺寸与孔洞尺寸匹配性较高。在少量添加时, Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维均匀吸附在金属颗粒表面, 与

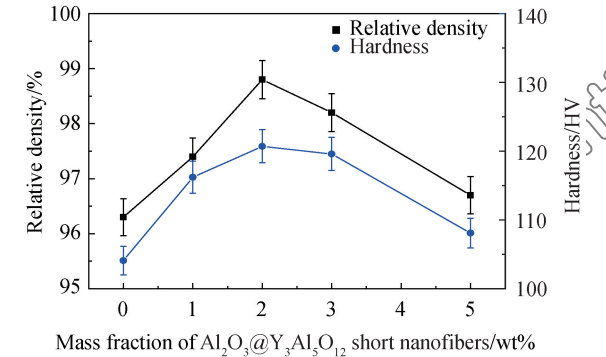


图 11 Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维/2024Al 复合材料致密度和硬度随纳米短纤维添加量的变化曲线

Fig. 11 Curves of relative density and hardness of Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ short nanofibers/2024Al composites with different mass fraction of short nanofibers

基体间有良好的润湿结合性。因此, 在复合材料制备过程中, 这部分纤维可以有效填充颗粒与颗粒间的空隙, 提高致密度。当 Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维质量分数为 2wt% 时, 复合材料致密度达到最大值为 98.8%。随着质量分数继续增大, 铝粉颗粒表面的 Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维逐渐达到饱和状态, 发生局部团聚, 团聚体内部不易被合金液体润湿。团聚体纤维尺寸变大且分布不均匀, 纤维的媒介/桥联作用降低。团聚后的纤维团簇与孔洞尺寸匹配性变差, 导致 Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维/2024Al 复合材料致密度下降。

Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维/2024Al 复合材料硬度随 Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维质量分数增加而先增大后减小, Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维质量分数为 2wt% 时达到最大值为 HV 120.7; 当 Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维质量分数超过 3wt% 时, Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维/2024Al 复合材料硬度逐渐下降。这与 Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维/2024Al 复合材料致密度随 Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维质量分数的变化趋势一致, 表明 Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维/2024Al 复合材料致密度对硬度有着较直接的影响。

2.5 纳米短纤维的质量分数对 Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维/2024Al 复合材料抗拉强度与延伸率的影响

图 12 为纳米短纤维/2024Al 复合材料抗拉强度和延伸率随 Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维的质量分数变化曲线。当 Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维的质量分数为 1wt% 和 2wt% 时, Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳

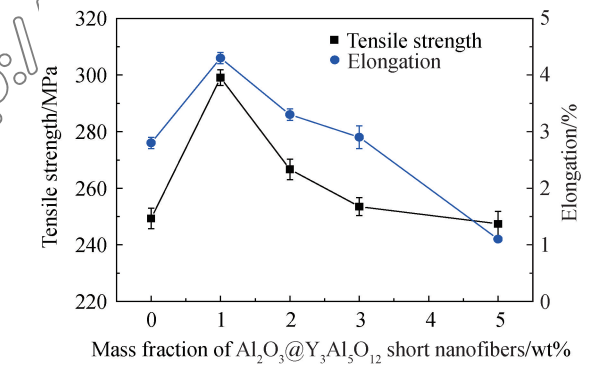


图 12 Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维/2024Al 复合材料抗拉强度和延伸率随 Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ 纳米短纤维添加量变化曲线

Fig. 12 Curves of tensile strength and elongation of Al₂O₃@Y₃Al₅O₁₂ short nanofibers/2024Al composites with different mass fraction of short nanofibers

米短纤维/2024Al 复合材料的抗拉强度与延伸率相对于基体分别增大了 20%、53.6% 和 7%、17.9%，说明少量添加 $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维有助于提高 $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维/2024Al 复合材料抗拉强度与延伸率。当添加 3wt% 的 $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维时， $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维/2024Al 复合材料抗拉强度和延伸率分别为 253.5 MPa 和 2.9%，与基体接近。当 $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维的质量分数大于 3wt% 时， $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维/2024Al 复合材料抗拉强度和延伸率明显低于基体，因此，过量添加 $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维不利于 $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维/2024Al 复合材料的增强增韧。

图 13 为 $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维/2024Al 复合材料断口形貌。在图 13(a)~13(b)中均可看到 $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维拔出/断的现象，并且伴随有韧窝与撕裂棱出现，这是一种典型的韧性断裂现象。当应力足够大产生微裂纹，在基体中扩展和增殖。一种情况，微裂纹在传递过程中会导致 $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维被拔出留下孔洞或被拔断， $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维被拔出/断的过程使抗拉强度增大。另一种情况， $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维能够阻碍裂纹扩展。因此，这两种情况都能使 $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维/

2024Al 复合材料的强度提高。在 $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维质量分数为 1wt% 时，同时观察到 $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维两端嵌在基体中，中部呈现拱形的分布状态，这种现象类似于桥联，如果有裂纹在拱形下方传递，会起到阻碍裂纹扩展的作用。

而且随着 $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维的质量分数增加，复合材料断口形貌中的韧窝尺寸变小，数量减少，说明 $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维/2024Al 复合材料的断裂机制正在从韧性断裂向脆性断裂转变。如图 13(c) 所示，在 $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维质量分数为 3wt% 时，纤维出现团聚现象，裂纹在传递过程中产生的应力集中导致纤维断裂，并从断裂面穿过， $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维的拔出/断效应减弱，因此复合材料的增强增韧效果下降。当 $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维质量分数超过 3wt% 时，如图 13(d) 所示， $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维团聚现象严重，观察不到明显的韧性断裂特征，抗拉强度和延伸率均低于基体。

2.6 纳米短纤维对 $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维/2024Al 复合材料的增强增韧机制

$\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维/2024Al 复合材料拉伸受力时， $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维相对于基体是一种硬质相，能够承担一部分外加载荷^[22-25]。在 $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维/2024Al 复合材料断口中纤维有明显的拔出/断现象，表明载荷能够从基体传递到 $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维上，使 $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维/2024Al 复合材料得到强化。另外， $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维的添加起到了晶粒细化的效果。虽然， $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维作为第二相能够产生 Orowan 位错强化。但是，对于长径比较大的 $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维来说，在提高复合材料抗拉强度和塑性方面效果不明显^[26-27]。因此，在本研究 $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维/2024Al 复合材料中，强化机制主要有载荷转嫁和细晶强化。在已报道短纤维增强铝合金复合材料的强化机制研究^[28-30]中，载荷转嫁引起的强度增量在整个强化机制中贡献最多。

本研究中所用 $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维是一种具有芯-壳结构的纳米纤维，内部的 Al_2O_3 起到一个类似骨架支撑的作用。在 Chen 等^[31]对芯-

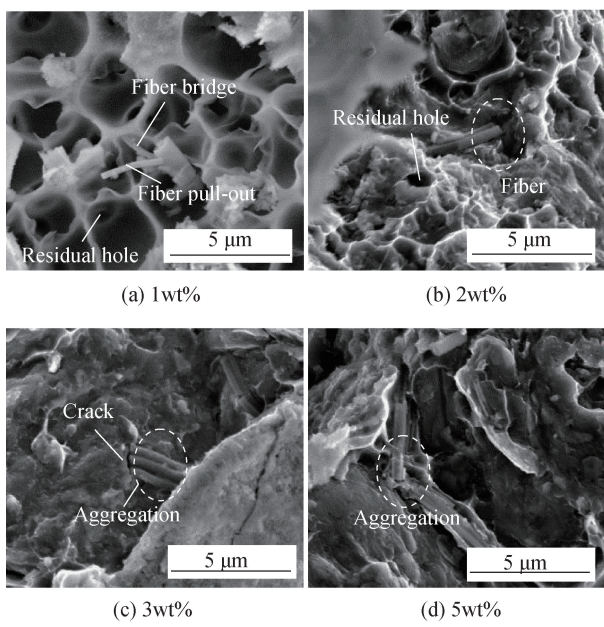


图 13 $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维/2024Al 复合材料断口形貌
Fig. 13 Fracture morphologies of $\text{Al}_2\text{O}_3 @ \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ short nanofibers/2024Al composites

壳结构的研究中发现,这种结构有利于起到增强增韧的作用。在本研究中,YAG与 Al_2O_3 的热膨胀系数很接近,但两者的抗拉强度却有着明显的差异。因此,在外力的作用下,内部的 Al_2O_3 与外部的YAG可能会发生相对运动,即发生一定的塑性变形。 $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维的运动变形过程如图14所示。这种变形可以适应基体的变形,使 $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维/2024Al复合材料塑性增加;增加了纤维与基体的接触面积,使 $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维在拉拔过程中与基体间的剪切应力变大,能够对 $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维的拔出起到延缓作用; $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维能够阻碍裂纹扩展,消耗更多的能量,使抗拉强度增大。当 $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维质量分数过大时发生团聚导致 $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维的拔出/断效应减弱,增强增韧效果下降。

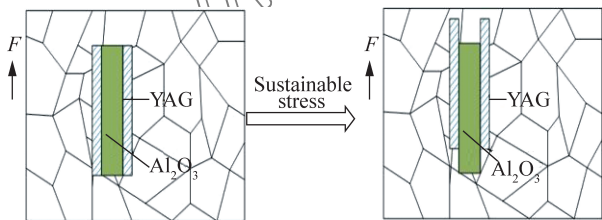


图14 $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维/2024Al复合材料拉伸受力时纳米短纤维的变形状态

Fig. 14 Short nanofibers deformation mode in the process of $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ short nanofibers/2024Al composites under stress

3 结 论

- (1) 通过超声分散加机械搅拌能够得到 $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维均匀分散的混合粉体, $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维与2024铝颗粒间有良好的亲和力,使纤维均匀吸附在金属颗粒表面,在混粉过程中不会造成分层和团聚现象,有利于 $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维/2024Al复合材料致密化和硬度的提高。
- (2) $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维质量分数为1wt%~5wt%时,复合材料的断裂机制从韧性断裂向脆性断裂转变,在韧性断裂机制中涉及到 $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维的拔出/断。在相同的制备工艺下,1wt% $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维/2024Al复合材料的力学性能相对于基体来说,增强效果最佳。其硬度、抗拉强度和延伸率分别为HV 116.2、299.1 MPa和4.3%。
- (3) 在本研究中, $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤

维/2024Al复合材料的强化机制主要为载荷转嫁和细晶强化。 $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维的拔出/断过程、纤维对裂纹的阻碍作用及 $\text{Al}_2\text{O}_3@Y_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 纳米短纤维芯-壳结构的塑性变形,实现了良好的增强增韧作用。

参考文献:

[1] JOEL J, ANTHONY X M. Aluminum alloy composites and its machinability studies: A review[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(5): 13556-13562.

[2] ASHWATH P, JOEL J, PRASHANTHA H G, et al. Processing and characterization of extruded 2024 series of aluminum alloy[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(5): 12479-12483.

[3] 张文龙, 陈嘉颐, 吴楠干, 等. $(\text{Al}_2\text{O}_3)_f/\text{Al}$ 复合材料在强界面结合下的疲劳损伤模式[J]. 复合材料学报, 2003, 20(1): 106-110.

ZHANG W L, CHEN J Y, WU Z G, et al. Fatigue damage mode of $(\text{Al}_2\text{O}_3)_f/\text{Al}$ composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2003, 20(1): 106-110 (in Chinese).

武高辉. 金属基复合材料发展的挑战与机遇[J]. 复合材料学报, 2014, 31(5): 1228-1237.

WU G H. Development challenge and opportunity of metal matrix composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(5): 1228-1237 (in Chinese).

[5] SHALABY E A M, CHURYUMOV A Y, SOLONIN A N, et al. Preparation and characterization of hybrid A359/ $(\text{SiC} + \text{Si}_3\text{N}_4)$ composites synthesized by stir/squeeze casting techniques[J]. Materials Science and Engineering A, 2016, 674: 18-24.

[6] TJONG S C. Novel nanoparticle-reinforced metal matrix composites with enhanced mechanical properties[J]. Advanced Engineering Materials, 2007, 9(8): 639-652.

[7] MA Z Y, TJONG S C. The high-temperature creep behaviour of 2124 aluminium alloys with and without particulate and SiC-whisker reinforcement[J]. Composites Science and Technology, 1999, 59(5): 737-747.

[8] MASUDA C, TANAKA Y. Fatigue properties and fatigue fracture mechanisms of SiC whiskers or SiC particulate-reinforced aluminium composites[J]. Journal of Materials Science, 1992, 27(2): 413-422.

[9] XU H, ZHANG G Z, CUI W, et al. Effect of $\text{Al}_2\text{O}_3_{sf}$ addition on the friction and wear properties of $(\text{SiC}_p + \text{Al}_2\text{O}_3_{sf})/\text{Al}2024$ composites fabricated by pressure infiltration[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2018, 25(3): 375-382.

[10] MILEIKO S T. High temperature oxide-fibre/metal-matrix

- composites[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2018, 210: 353-361.
- [11] 许晓静, 戈晓岚. SiC 晶须增强铝基复合材料超塑性[J]. *复合材料学报*, 2003, 20(3): 127-131.
- XU X J, GE X L. Superplasticity of SiC whisker aluminum matrix composite[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2003, 20(3): 127-131 (in Chinese).
- [12] DOUGHERTY T, XU Y, HANIZAN A. Mechanical properties and microstructure of PM Ti-Si₃N₄ discontinuous fibre composite[J]. *The Minerals, Metals and Materials Society*, 2016, 145: 721-728.
- [13] SHIRVANIMOGHADDAM K, HAMIM S U, AKBARI M K, et al. Carbon fiber reinforced metal matrix composites: Fabrication processes and properties[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, 92: 70-96.
- [14] KACZMAR J W, NAPLOCHA K, JERZY M. Microstructure and strength of Al_2O_3 and carbon fiber reinforced 2024 aluminum alloy composites[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, 23(8): 2801-2808.
- [15] QU X Y, WANG F C, SHI C H, et al. In situ synthesis of a gamma- Al_2O_3 whisker reinforced aluminium matrix composite by cold pressing and sintering[J]. *Materials Science and Engineering*, 2018, 709: 223-231.
- [16] 杨川, 张吉喜, 刘世楷, 等. Al_2O_3 短纤维增强铝基复合材料的抗拉强度及影响因素[J]. *机械工程材料*, 2004, 28(2): 13-16.
- YANG C, ZHANG J X, LIU S K, et al. Tension strength of $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{sf})/\text{Al}$ composites and its influence factors[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2004, 28(2): 13-16 (in Chinese).
- [17] ZHANG X, LI S F, PAN D, et al. Microstructure and synergistic-strengthening efficiency of CNTs-SiC_p dual-nano reinforcements in aluminum matrix composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, 105: 87-96.
- [18] LI S S, SU Y S, JIN H L, et al. Effects of carbon nanotube content on morphology of SiC_p(CNT) hybrid reinforcement and tensile mechanical properties of SiC_p(CNT)/Al composites[J]. *Journal of Materials Research*, 2017, 32(7): 1239-1247.
- [19] LI S S, SU Y S, ZHU X H, et al. Enhanced mechanical behavior and fabrication of silicon carbide particles covered by in-situ carbon nanotube reinforced 6061 aluminum matrix composites[J]. *Materials and Design*, 2016, 107: 130-138.
- [20] CHIU H P, YANG J M, AMATO R A. A study of fiber coating in Al_2O_3 fiber-reinforced NiAlFe matrix composites[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1995, 203(1-2): 81-92.
- [21] 何玲, 孙卫民, 贾宝兰, 等. YAG/ Al_2O_3 复合纳米纤维的制备方法: ZL 201610127066.6[P]. 2016-07-13.
- HE L, SUN W M, JIA B L, et al. The preparation method of YAG/ Al_2O_3 composite nano-fibers: ZL 201610127066.6 [P]. 2016-07-13 (in Chinese).
- [22] ZHANG X Z, CHEN T J, QIN Y H. Effects of solution treatment on tensile properties and strengthening mechanisms of SiC_p/6061Al composites fabricated by powder thixoforming[J]. *Materials and Design*, 2016, 99: 182-192.
- [23] CHRISTMAN T, NEEDLEMAN A, SURESH S. An experimental and numerical study of deformation in metal-ceramic composites[J]. *Acta Metallurgica*, 1989, 37(11): 3029-3050.
- [24] KONGSHAUG D R, FERGUSON J B, SCHULTZ B F, et al. Reactive stir mixing of Al-Mg/ $\text{Al}_2\text{O}_{3\text{np}}$ metal matrix nanocomposites: Effects of Mg and reinforcement concentration and method of reinforcement incorporation[J]. *Journal of Materials Science*, 2014, 49(5): 2106-2116.
- [25] ZHANG C X, YIN J W, YAO D X, et al. Enhanced tensile properties of Al matrix composites reinforced with $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ whiskers[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, 102: 145-153.
- [26] TJONG S C. Novel nanoparticle-reinforced metal matrix composites with enhanced mechanical properties[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2007, 9(8): 639-652.
- [27] KIM K T, ECKERT J, MENZEL S B, et al. Grain refinement assisted strengthening of carbon nanotube reinforced copper matrix nanocomposites[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 9(12): 1901-1903.
- [28] PARK J G, KEUM D H, LEE Y. Strengthening mechanisms in carbon nanotube-reinforced aluminum composites[J]. *Carbon*, 2015, 95: 690-698.
- [29] AKBARPOUR M R. Analysis of load transfer mechanism in Cu reinforced with carbon nanotubes fabricated by powder metallurgy route[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, 25(5): 1749-1756.
- [30] ZHANG X, LI S F, PAN B, et al. A novel strengthening effect of in-situ nano $\text{Al}_2\text{O}_3\text{w}$ on CNTs reinforced aluminum matrix nanocomposites and the matched strengthening mechanisms[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 764: 279-288.
- [31] CHEN T J, QIN H, ZHANG X Z. Effects of reheating duration on the microstructure and tensile properties of in situ core-shell-structured particle-reinforced A356 composites fabricated via powder thixoforming[J]. *Journal of Materials Science*, 2018, 53(4): 2576-2593.