

纳米 TiN 颗粒增强 Al-5Cu-0.5Mn 铝基复合材料显微组织与力学性能

陈 云¹ 邓 森¹ 杜 娟² 汪 锐¹ 杨 磊¹ 杜艳迎¹ 夏望红³

(1.武汉理工大学交通与物流工程学院; 2.武汉交通职业学院智能制造学院; 3.山东宏和轻量化科技有限公司)

摘 要 采用超声辅助机械搅拌工艺制备了纳米 TiN 颗粒含量为 0.3% 的 TiN/Al-5Cu-0.5Mn 铝基复合材料,并对其显微组织与力学性能进行了研究。结果表明,该工艺能显著细化其晶粒尺寸,由 182.74 μm 细化到 69.61 μm ,且组织等轴化倾向明显,纳米颗粒团聚平均尺寸也从 197.08 nm 减少至 173.92 nm。该工艺制备的 Al-5Cu-0.5Mn 复合材料的屈服强度、抗拉强度、伸长率、硬度相比 Al-5Cu-0.5Mn 基体合金分别增加了 16.73%、14.99%、58.81%、11.68%,说明该工艺可提升 Al-5Cu-0.5Mn 复合材料的综合力学性能。另外,拉伸断口为准解理断裂模式,断口河流花样明显增多,且均匀分布较多由 TiN 纳米颗粒脱落形成的小尺寸韧窝。

关键词 超声辅助;机械搅拌;纳米 TiN;Al-Cu-Mn 合金;力学性能

中图分类号 TB331;TG146.21

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.10.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Microstructure and Mechanical Properties of Nano-TiN Particles Reinforced Al-5Cu-0.5Mn Composites

Chen Yun¹, Deng Sen¹, Du Juan², Wang Rui¹, Yang Lei¹, Du Yanying¹, Xia Wanghong³

(1.School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology;

2.School of Intelligent Manufacturing,

Wuhan Technical College of Communications;3.Shandong Honho Lightweight Technologies, Co. Ltd.)

Abstract: 0.3% TiN nanoparticles reinforced Al-Cu-Mn composites were prepared by ultrasonic assisted mechanical stirring, and microstructure and mechanical properties of the composites were investigated. The results reveal that the grain size of the metal matrix is significantly refined from 182.74 μm to 69.61 μm , and the microstructure become equiaxed structure. Meanwhile, the average size of nanoparticles agglomeration is decreased from 197.08 nm to 173.92 nm. The yield strength, tensile strength, elongation and hardness of prepared Al-Cu-Mn composites are increased by 16.73%, 14.99%, 58.81% and 11.68%, respectively, indicating that the comprehensive mechanical properties of Al-Cu-Mn composites are improved. The tensile fracture of TiN nanoparticles reinforced Al-Cu-Mn is characterized by quasi-cleavage, where river patterns are increased obviously, and large amounts of dimples formed by the exfoliation of TiN nanoparticles are evenly distributed.

Key Words: Ultrasonic Assistance, Mechanical Stirring, TiN Nanoparticles, Al-Cu-Mn Alloy, Mechanical Properties

随着节能减排政策的实施和轻量化设计的发展,新型轻质材料正逐渐代替部分钢铁材料。铸造铝合金因其密度低、比强度高、良好的可加工性等特点,展现出良好的应用前景^[1]。但是,铸造铝合金的力学性能与钢相差较大,从而限制了其在汽车、航空航天等领域的应用。目前,提高铸造铝合金力学性能的方法是在合金中添加增强体得到铝基复合材料,其继承了基体合金良好的延

展性和韧性,也能发挥增强体的高强度和高刚度的优势^[2,3]。

研究表明,当增强体的尺度为微米级时,复合材料的韧性与基体合金相比略有下降,且强度会随着增强体含量的不断增加而降低^[4,5]。与微米级颗粒相比,纳米级颗粒增强铝基复合材料不仅能避免复合材料的韧性下降,还能在相同体积分数的条件下具有更好的力学性

收稿日期:2021-06-21
基金项目:中央高校基本科研业务费专项资助项目(2021IVA053)
第一作者简介:陈云,男,1981 年出生,教授,武汉(430063),E-mail:chenyunhbwh@whut.edu.cn
引用格式:陈云,邓森,杜娟,等. 纳米 TiN 颗粒增强 Al-5Cu-0.5Mn 铝基复合材料显微组织与力学性能[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(10):1 189-1 193.
CHEN Y, DENG S, DU J, et al. Microstructure and mechanical properties of Nano-TiN particles reinforced Al-5Cu-0.5Mn composites[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(10):1 189-1 193.

能^[6]。但纳米颗粒增强铝基复合材料在制备过程中面临一定的问题,如纳米颗粒之间的范德华力使得纳米颗粒在加入铝合金熔体后容易形成团聚,纳米颗粒与铝合金熔体润湿性差使其很难在铝合金熔体中均匀分散,从而降低金属基复合材料的力学性能。

对铝合金熔体施加高频超声处理,借助超声处理的空化效应和声流效应,将团聚的纳米颗粒打散并均匀分散在熔体内^[7]。搅拌铸造技术因其工艺简单、成本低廉等特点,可以实现批量生产颗粒增强铝基复合材料,但存在增强体与基体合金的润湿性差、难以均匀分散的问题,且机械搅拌过程中少量空气会随着搅拌器的转动融入熔体内部。超声处理与机械搅拌相结合可以解决传统搅拌铸造中增强体在熔体中分散不均匀和机械搅拌过程中引入空气的问题。本课题以 Al-Cu-Mn 合金为基体、纳米 TiN 颗粒为增强体,研究超声辅助机械搅拌制备 Al-Cu-Mn 复合材料的显微组织与力学性能,旨在为金属基纳米复合材料的工业化生产提供参考。

1 试验方法

1.1 试验材料及方法

原材料为 99.7% (质量分数,下同) 纯铝锭, Cu 和 Mn 分别以 Al-50Cu、Al-10Mn 中间合金方式添加。增强体为商用 20 nm 的 TiN 粉末, 颗粒微观形貌见图 1。在井式坩埚电阻炉中进行熔炼, 在 200 °C 预热一段时间后升温至熔化, 在 720 °C 加入 Al-50Cu 和 Al-10Mn 中间合金, 升温至完全熔化, 加入精炼剂进行精炼, 静置 5~10 min 后, 除渣, 保温 20 min 后浇注得到 Al-5Cu-0.5Mn 基体合金。

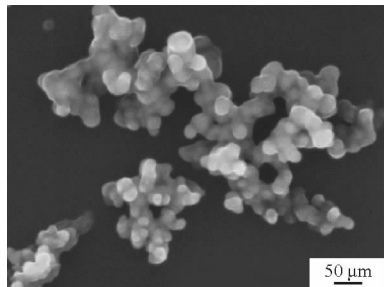


图 1 纳米 TiN 颗粒微观形貌

Fig.1 Micro-morphology of TiN nanoparticles

将 0.3% 的 TiN 颗粒在 200 °C 下预热 2 h 去除表面吸附的气体, 用铝箔包裹加入铝液中, 随后利用自制机械搅拌设备将纳米 TiN 颗粒导入熔体内部, 实现纳米 TiN 颗粒的初步分散。机械搅拌器的功率为 450 W, 转速为 400 r/min, 搅拌时间为 15 min。将机械搅拌后的熔体在 680 °C 下进行 3 min 超声处理, 以实现 TiN 颗粒的均匀分散。超声设备型号为 JY99-2D, 超声功率为

2.1 kW, 频率为 20 kHz。将超声处理后的铝合金熔体浇入预热至 200 °C 的不锈钢模具中, 获得尺寸为 $\phi 38$ mm $\times$ 100 mm 的复合材料试棒, 见图 2。



图 2 金属基复合材料试棒

Fig.2 Metal matrix composite specimens

1.2 显微组织与断口形貌观察

在试样顶部切除约 20 mm 凹陷, 在剩下试样上取样, 进行粗磨、细磨、抛光处理, 并用 Keller 试剂进行腐蚀, 通过蔡司 Scop.A1 金相显微镜观察其组织形貌。

截取拉伸断裂后的试样, 利用 FEI-Quanta 650 场发射扫描电镜观察其拉伸断口形貌。

1.3 力学性能测试

拉伸试棒按照 GB/T228-2002 进行加工, 试棒的尺寸见图 3。拉伸试验在 SANS—CMT4000 电子式万能试验机上进行, 引伸计标距为 25 mm, 试验温度为 20 °C, 加载速率为 1 mm/min。

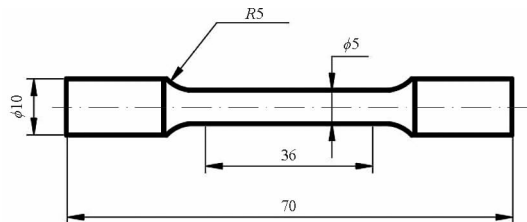


图 3 拉伸试棒尺寸

Fig.3 Dimension of tensile specimen

硬度测试采用 HV-1000A 显微硬度仪, 加载载荷为 5 N, 加载时间为 10 s。选择 8 个点进行测定, 取其平均值。

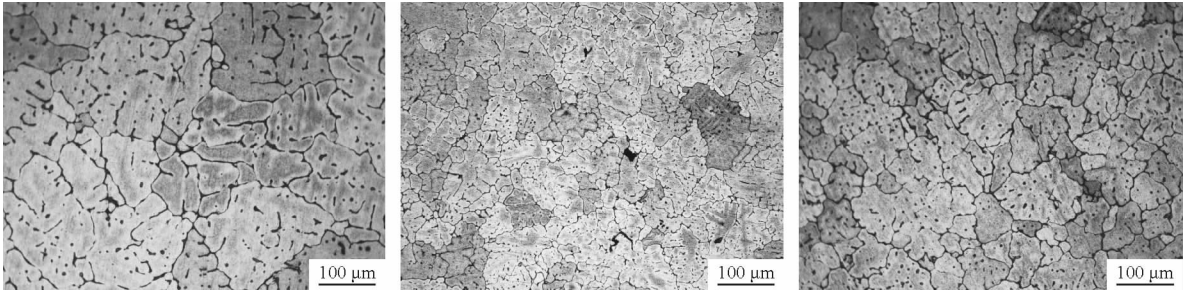
2 试验结果与讨论

2.1 显微组织

图 4 为 Al-Cu-Mn 合金铸态金相组织及其不同方法制备的复合材料。从图 4a 可以看出, 白色为 α -Al 基体, 黑色的晶界为 θ -Al₂Cu 相和 T-Al₁₂CuMn₂ 相组成的共晶组织。通过 ImageJ 软件使用截点法统计铸态组织晶粒尺寸约为 182.74 μ m。与 Al-5Cu-0.5Mn 基体合金的铸态组织相比, 经机械搅拌后, 纳米 TiN 颗粒增强

Al-5Cu-0.5Mn 复合材料的晶粒尺寸出现了一定程度的细化,约为 157.93 μm ,见图 4b,原因是凝固过程中纳米 TiN 颗粒在晶界处起到了阻止晶粒长大和促进异质形核的作用,细化了铝合金基体的晶粒。此外,强烈的机械搅拌会使金属液和纳米 TiN 颗粒之间产生不同程度的相对运动,导致枝晶臂的折断、破碎和增殖,从而实现晶粒的细化^[8]。从图 4c 可以看出,合金熔体经超声处理后,晶粒尺寸出现明显细化,约为 69.61 μm ,且组织

等轴化倾向明显。与机械搅拌法制备试样相比,晶粒显著细化原因是超声辅助机械搅拌法中引入超声作用,金属液中超声空化泡在膨胀时吸热而使得空化泡四周的熔体产生过冷,从而在气泡壁的局部熔体内形成大量的晶核,并且在超声声流的搅拌作用下,形成的晶核会分布在整个熔池中,随着超声空化的不断进行,熔体内的晶核不断产生、大量增殖,熔体的形核速率得到提高,从而使晶粒得到细化^[9]。



(a) Al-Cu-Mn 合金 (b) 机械搅拌法, $w(\text{TiN})=0.3\%$ (c) 超声辅助机械搅拌, $w(\text{TiN})=0.3\%$

图 4 不同制备工艺下 TiN/Al-Cu-Mn 铝基复合材料的显微组织

Fig.4 Microstructure of TiN/Al-Cu-Mn composites under various processes

图 5 分别为机械搅拌法和超声辅助机械搅拌法制备的 Al-Cu-Mn 铝基复合材料 SEM 图。从图 5a 可以看出,组织中存在界限模糊、结合紧密的纳米颗粒团聚物。与图 5a 相比,超声处理后纳米颗粒界限清晰、结合松散,达到比较理想的分散状态,整体颗粒平均尺寸从 197.08 nm 减小至 173.92 nm,见图 5b。超声处理后纳米颗粒团聚减少,这是因为超声在熔体中产生的空化效应和声流效应共同作用下,部分纳米颗粒团聚被打散。

25.24%,达 105.39 MPa、195.60 MPa 和 5.26%;而超声辅助机械搅拌法制备的复合材料与基体合金相比,屈服强度、抗拉强度、伸长率分别增加了 16.73%、14.99% 和 58.81%,达 114.23 MPa、211.84 MPa 和 6.67%。

表 1 基体合金及 TiN/Al-5Cu-0.5Mn 铝基复合材料的力学性能

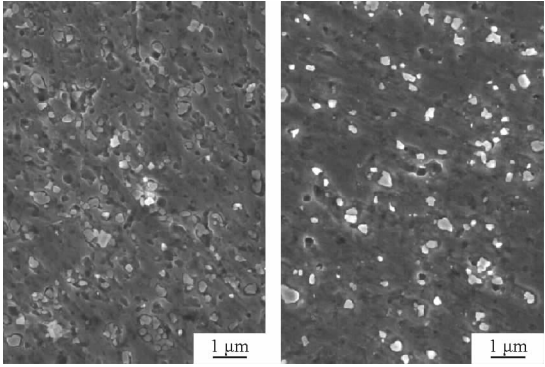
Tab.1 Mechanical properties of matrix alloy and TiN/Al-Cu-Mn composites

材料	$\sigma_{0.2}$ / MPa	σ_b / MPa	δ / %	硬度 (HV)
Al-Cu-Mn 基体合金	97.86	184.22	4.20	59.94
机械搅拌法制备	105.39	195.60	5.26	65.32
超声辅助机械搅拌法制备	114.23	211.84	6.67	66.94

TiN/Al-Cu-Mn 铝基复合材料在受到拉伸时,纳米 TiN 颗粒在基体中承担了比基体更多的载荷,使得 TiN 颗粒周围出现应力集中。颗粒增强金属基复合材料所受载荷从弹性模量低、质地软的基体转移到弹性模量较高的硬质颗粒上,通过载荷的转移使得复合材料的力学性能得到提高。超声处理提高复合材料的韧性主要是通过细化晶粒来实现,小晶粒受到外加载荷发生塑性变形时可分散在更多的晶粒内进行,塑性变形较均匀,应力集中较小。此外,晶粒越小,晶界面积越大,晶界越曲折,越不利于裂纹的扩展^[10]。

从表 1 可知,Al-Cu-Mn 复合材料的硬度随加入纳米 TiN 颗粒和超声处理而得到一定增强。基体合金平均硬度(HV)为 59.94,加入纳米 TiN 颗粒并通过机械搅拌制备试样的硬度提高了 8.98%,而采用超声辅助机械搅拌法制备试样的硬度提高了 11.68%。

作为固体陶瓷颗粒,TiN 颗粒的强度、硬度和弹性



(a) 机械搅拌 (b) 超声辅助机械搅拌

图 5 TiN/Al-Cu-Mn 铝基复合材料组织中纳米 TiN 颗粒分布

Fig.5 Distribution of TiN nanoparticles in TiN/Al-Cu-Mn composites

2.2 力学性能

表 1 为 3 种状态下 Al-Cu-Mn 合金及其复合材料的力学性能。可以看出,加入纳米 TiN 颗粒可以提高 Al-Cu-Mn 合金的强度和韧性。与 Al-Cu-Mn 基体相比,加入纳米 TiN 颗粒机械搅拌后,复合材料屈服强度、抗拉强度、伸长率分别提高了 7.69%、6.18% 和

模量远远高于金属基体,因此具有较强的抵抗外部载荷以减少塑性变形的能力。此外,由于 TiN 与基体的热膨胀系数不同而导致 TiN 颗粒周边的位错运动受到 TiN 颗粒的限制,即复合材料中位错的迁移率将更高^[11]。因此,机械搅拌法制备的复合材料比基体合金具有更高的硬度。超声辅助机械搅拌法制备的试样比机械搅拌法制备的试样硬度高,这一现象可解释为:①超声处理减少了气孔、缩松及缩松缺陷,提高了复合材

料的致密度;②超声处理细化了晶粒并粉碎纳米 TiN 颗粒团聚物,使得纳米 TiN 颗粒趋于均匀分布。

2.3 断口分析

图 6 为不同制备工艺下 TiN/Al-Cu-Mn 铝基复合材料的宏观断口形貌。可以看出,3 种制备方法得到的试样断口都没有出现较明显的宏观塑性变形,断口边缘无剪切唇、较平整,表现为脆性断裂。

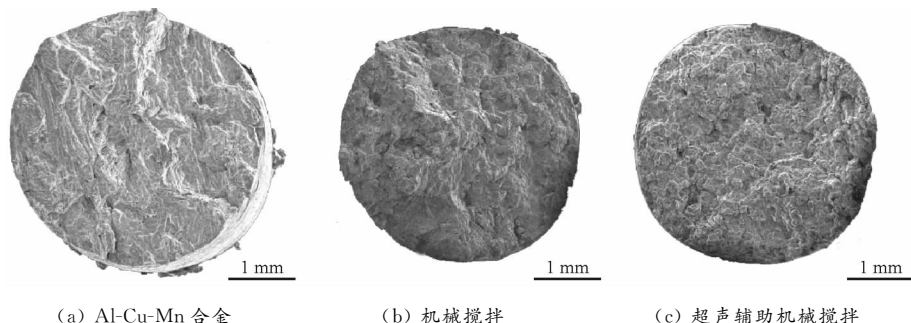


图 6 不同制备工艺下 TiN/Al-Cu-Mn 铝基复合材料的宏观断口形貌

Fig.6 Macro fracture morphology of TiN/Al-Cu-Mn composites under various processes

图 7 为不同制备工艺下 Al-Cu-Mn 合金及其复合材料的微观断口形貌。从图 7a 可以看出,断口存在较明显的解理台阶、解理面和裂纹,解理台阶上存在一些显微孔洞和部分河流花样。从图 7b 可以看出,断口解理面减少,河流花样增多,裂纹沿晶界分布。从图 7c 可

以看出,断口表现为准解理断裂,河流花样明显增多,裂纹尺寸进一步减小,且断口存在很多由 TiN 纳米颗粒脱落形成的均匀分布的小尺寸韧窝。TiN 纳米颗粒的存在能有效地钉扎晶界和位错的移动,使复合材料的强度得以提高^[12]。

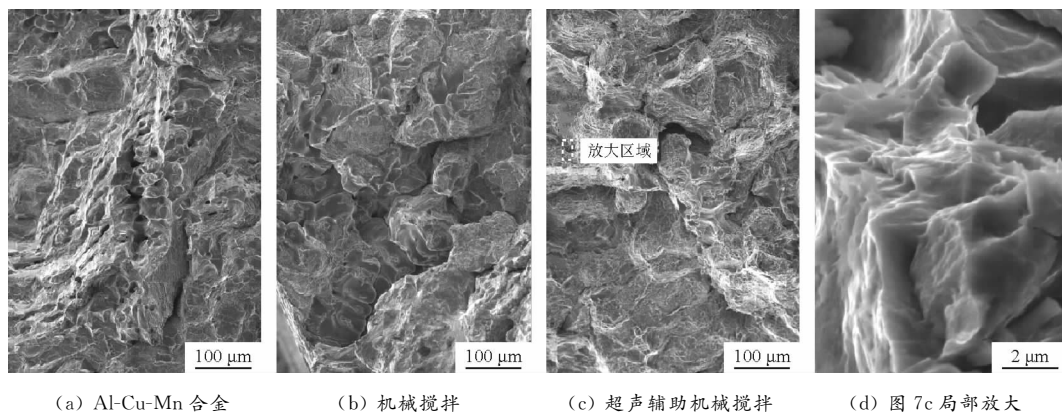


图 7 不同制备工艺下 TiN/Al-Cu-Mn 铝基复合材料的微观断口形貌

Fig.7 Micro fracture morphology of TiN/Al-Cu-Mn composites under various processes

3 结 论

(1)与 Al-5Cu-0.5Mn 基体及机械搅拌法制备纳米 TiN 颗粒增强复合材料相比,超声辅助机械搅拌法制备的复合材料晶粒尺寸明显细化,并且组织等轴化倾向明显。

(2)与机械搅拌法相比,超声辅助机械搅拌法更有利于纳米颗粒在 TiN/Al-5Cu-0.5Mn 铝基复合材料内部的分散,纳米颗粒团聚平均尺寸从 197.08 nm 减少至

173.92 nm。

(3)与基体合金相比,超声辅助机械搅拌法制备的 TiN/Al-5Cu-0.5Mn 铝基复合材料屈服强度、抗拉强度、伸长率、硬度分别增加了 16.73%、14.99%、58.81% 和 11.68%,说明 Al-5Cu-0.5Mn 复合材料的综合力学性能得到提高。

(4)超声辅助机械搅拌法制备的 TiN/Al-5Cu-0.5Mn 铝基复合材料属于准解理断裂模式,断口河流花样明显增多,且均匀分布较多由 TiN 纳米颗粒脱落形成的小尺寸韧窝。

固溶温度对 2195 铝锂合金组织与性能的影响

肖代红 王新凯 陈伟斌 刘文胜
(中南大学轻质高强结构材料重点实验室)

摘 要 通过差热分析、组织分析、力学性能试验等方法,研究了不同固溶温度对 2195 铝锂合金显微组织及力学性能的影响。结果表明,固溶处理能够提高铝锂合金的力学性能。随着固溶温度增加,合金中残余 Al₂Cu 相逐渐溶解进入基体,得到最大过饱和度固溶体,实现固溶强化;但固溶温度偏离最佳制度时,促使合金内回复再结晶和过烧情况发生,恶化合金的力学性能。

关键词 铝锂合金;固溶温度;力学性能;微观组织

中图分类号 TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.10.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Solid Solution Temperature on the Microstructure and Properties
of 2195 Al-Li Alloy

Xiao Daihong, Wang Xinkai, Chen Weibing, Liu Wensheng

(National Key Laboratory of Science and Technology on High-strength Structural Materials,
Central South University)

Abstract: The effects of different solid solution temperatures on the microstructure and mechanical properties of 2195 Al-Li alloy were investigated by differential thermal analysis, electron microscopy analysis, and tensile tests. The results indicate that solution treatment can improve the mechanical properties of 2195 alloy. As the solid solution temperature increases, the residual Al₂Cu phase is gradually dissolved into the matrix, leading to the maximum supersaturation solid solution, achieving solid solution strengthening. However, the deviation of solid solution temperature from the optimal system promotes the recovery of recrystallization and over-burn in the alloy, resulting in deterioration of the mechanical properties.

Key Words: Al-Li Alloy, Solid Solution Temperature, Mechanical Properties, Microstructure

收稿日期:2021-05-18

第一作者简介:肖代红,男,1971 年出生,副教授,长沙(410083),E-mail:daihongx@csu.edu.cn

引用格式:肖代红,王新凯,陈伟斌,等. 固溶温度对 2195 铝锂合金组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(10):1 193-1 196.

XIAO D H, WANG X K, CHEN W B, et al. Effects of solid solution temperature on the microstructure and properties of 2195 Al-Li alloy [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(10):1 193-1 196.

参 考 文 献

[1] CESCHINI L, DAHLE A, GUPTA M, et al. Aluminum and Magnesium Metal Matrix Nanocomposites[M]. Singapore: Springer, 2017.

[2] AKBARI M K, BAHARVANDI H R, SHIRVANIMOGHADD-AM K. Tensile and fracture behavior of nano/micro TiB₂ particle reinforced casting A356 aluminum alloy composites[J]. Materials & Design, 2015, 66: 150-161.

[3] 郝世明, 谢敬佩, 王爱琴, 等. 微米级 SiC 颗粒增强铝基复合材料的强化机制[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(5): 1-6.

[4] RANA R S, PUROHIT R, SONI V K, et al. Characterization of mechanical properties and microstructure of aluminum alloy-SiC composites[J]. Materials Today: Proceedings, 2015, 2(4-5): 1 149-1 156.

[5] 潘飞, 严青松, 芦刚, 等. 超声温度对 ZL114A 合金组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(11): 1 205-1 208.

[6] 陈小会. 纳米颗粒增强铝基复合材料的制备及其半固态模锻成形研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2016.

[7] 胡志, 闫洪, 聂俏, 等. 超声法制备纳米 SiC 颗粒增强 AZ6 镁基复合材料的显微组织[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(5): 841-846.

[8] DING J H, CUI C X, SUN Y J, et al. Microstructures and mechanical properties of in-situ CaB₆ ceramic particles reinforced Al-Cu-Mn composite[J]. Ceramics International, 2019, 45: 21 668-21 675.

[9] 马继宇. 超声空化下 TiN_p/Al 复合材料制备及性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.

[10] KILICLI V, AKAR N, ERDOGAN M, et al. Tensile fracture behavior of AA7075 alloy produced by thixocasting[J]. Trans. Nonferrous Met. Soc., 2016, 26: 1 222-1 231.

[11] XIA C J, WANG L, ZHANG Q, et al. An investigation of microstructural evolution, tensile properties and work-hardening behavior of nanosized TiB₂/Al-Cu-Mn composites[J]. Materials, 2020, 13: 4 250.

[12] 何广进, 李文珍. 纳米颗粒分布对镁基复合材料强化机制的影响[J]. 复合材料学报, 2013, 30(2): 105-110.

(编辑:彭瑾)

1193