

钛碳硼复合粒子对 ZL205A 齿轮室铸件组织和力学性能的影响

马文龙¹, 杨力², 吴昊¹, 龚小龙², 罗辉¹, 樊自田², 杨小冬¹, 马训山¹

(1. 江麓机电集团有限公司, 湖南湘潭 411100;

2. 华中科技大学材料科学与工程学院, 材料成形与模具技术全国重点实验室, 湖北武汉 430000)

摘要: 采用一种新型的Al-TCB中间合金对ZL205A齿轮室铸件进行晶粒细化, 研究了添加不同含量的Al-TCB中间合金对齿轮室铸件组织和力学性能的影响。结果表明, Al-TCB加入能明显细化ZL205A合金组织, 当加入1.0%Al-TCB时, 合金晶粒尺寸由240 μm细化至60 μm左右, 合金晶粒细小、组织均匀、致密度高, 析出的钛碳硼复合粒子为初生α-Al生长的异质形核质点。随着Al-TCB中间合金加入量的增加, 断口形貌中韧窝区面积和析出相的密度同步增加, 合金强化效果显著, 试样的显微硬度、抗拉强度和伸长率最高达到HV143、502 MPa和5.1%。

关键词: 钛碳硼复合粒子; ZL205A; 齿轮室铸件; 组织结构; 力学性能

晶粒细化是改善合金铸造性能, 细化合金组织, 提高合金强度和塑韧性的主要工艺方法^[1]。在传统的Al-Si系铸造铝合金中(如: ZL101、ZL104、ZL101A、ZL114A等)应用较为广泛的细化剂类型有Al-Ti-B和Al-Ti-C中间合金, 且都具有较好的应用效果^[2-5]。在Al-Cu系合金中, ZL205A合金因其优异的力学性能备受关注, 在武器装备等关键件中已有广泛应用^[6-8]。但是, ZL205A合金因其较宽的结晶温度、流动性差、糊状凝固等特性, 导致其在铸造生产中极易产生偏析、缩松、热裂等铸造缺陷, 严重影响了该合金的铸造性能和产品质量^[9-11]。已有研究发现采用Al-Ti-B或Al-Ti-C等传统细化剂难以对ZL205A合金达到理想的细化效果, 其根本原因是原本包覆在TiB₂或TiC_x粒子周围起到辅助形核作用的TiAl₃薄层被Zr元素破坏, 形成(Ti, Zr)Al₃相, 从而失去辅助形核的作用, 使TiB₂或TiC_x粒子的形核能力大大下降, 即出现Zr致细化“中毒”现象^[12-13]。

在最新的研究中, 山东大学李道秀、刘相法等报道了一种抑制Zr致细化“中毒”的新型中间合金细化剂Al-TCB^[14-15]。Al-TCB是一种含有高稳定性、高弥散化掺杂型TiC_xB_y粒子(简称TCB粒子)的中间合金, 能在熔体中释放大量异质形核点, 增大形核率, 减小晶粒尺寸, 细化形貌, 同时能够提高合金的流动性和成形性能, 提高合金的力学性能^[15-17]。

目前, 这种新型铝合金晶粒细化剂, 在实际铸造生产中鲜有报道。因此, 本文以工厂科研产品ZL205A合金齿轮室铸件为研究对象, 研究Al-TCB中间合金在工厂实际生产条件下对ZL205A合金的细化效果, 并对齿轮室铸件的组织结构和力学性能进行分析评判。

1 试验材料及方法

齿轮室铸件结构见图1, 铸件重24 kg, 轮廓尺寸664 mm×516 mm×240 mm, 均匀壁厚8 mm, 两处轴承孔为铸件输出轴受力部位, 壁厚为35 mm, 为铸件取样和力学性能评判区。铸件材质为Al-Cu系ZL205A(ZAlCu5MnCdVA)合金材料, 合金化学成分见表1。

作者简介:

马文龙(1989-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为铝合金铸件铸造工艺设计优化与精密成形技术。

E-mail: 1416966520@qq.com

通讯作者:

樊自田, 男, 教授, 博士、硕士生导师。E-mail: fanzt@hust.edu.cn

中图分类号: TG146.2⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

09-1238-05

收稿日期:

2023-11-24 收到初稿,

2024-01-18 收到修订稿。

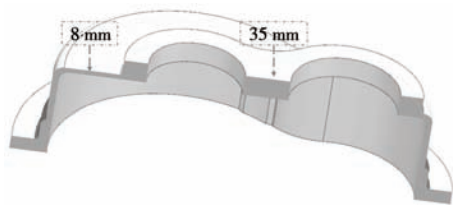


图1 齿轮室铸件结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of gear chamber casting structure

试验合金采用GB-150型坩埚熔化电阻炉熔炼，当合金熔融后温度达到720 ℃时加入商业购买的Al-TCB中间合金，Al-TCB中间合金分批次加入3个熔化炉中，添加量为每炉次总炉料的0、0.5%和1.0%，每炉铝液重260 kg，采用SY-CJ3型精炼剂+旋转吹气（氩气）的双级精熔炼工艺进行合金液的净化处理后浇注成齿轮室铸件（图2a）。在铸件取样部位取样加工金相试样（图2b，尺寸规格：Φ12 mm×15 mm）经打磨、抛光

表1 ZL205A合金成分
Table 1 Nominal chemical composition of ZL205A Alloys

w _B /%										
Cu	Mn	Ti	Cd	Zr	B	V	Fe	Si	Mg	Al
4.6~5.3	0.3~0.5	0.15~0.35	0.15~0.25	0.15~0.25	0.005~0.6	0.05~0.3	≤0.15	≤0.06	≤0.05	余量

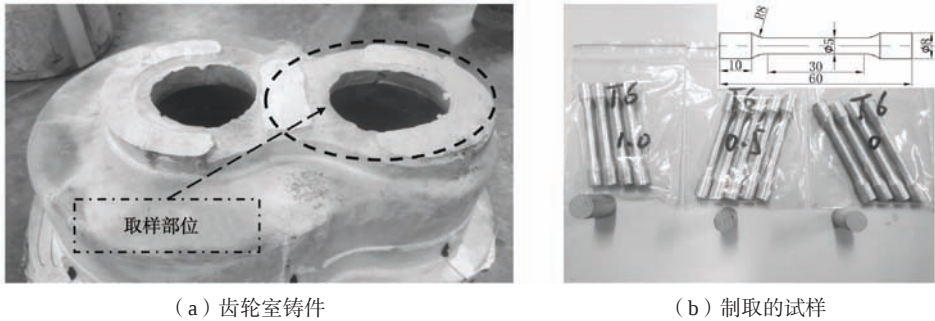


图2 ZL205A齿轮室铸件晶粒细化研究生产过程
Fig. 2 The ZL205A gear chamber castings production process diagram of grain refinement research

后用0.5wt%HF溶液进行腐蚀，在DMM-490C型光学显微镜（OM）下观察其组织形貌；利用200HV-5型维氏硬度计进行硬度检测；采用Quanta 200型扫描电子显微镜进行微区点、面分析和拉伸试样断口形貌观察；取样部位分别制取4根拉伸试样（图2b），试样经T6热处理后采用C42-104型微机控制电子万能试验机对试样进行拉伸试验，取样部位力学性能评判要求为：抗拉强度 $R_m \geq 450$ MPa，伸长率 $A \geq 3.5\%$ ，硬度 $HV \geq 120$ 。

2 试验结果与讨论

2.1 金相组织分析

图3为不同Al-TCB中间合金添加量下的齿轮室铸

件取样部位的铸态金相组织形貌。未添加Al-TCB中间合金时，试样的最大晶粒尺寸达到240 μm，平均晶粒尺寸较大且晶粒大小不一，形状不规则，铸件组织呈现不均匀性，如图3a所示。加入0.5%的Al-TCB中间合金时，晶粒得到了一定的细化，试样组织趋于均匀，但晶粒尺寸仍较为粗大（98~193 μm），如图3b所示。加入1.0%的Al-TCB中间合金后，试样的晶粒尺寸明显减小（62~116 μm），组织更加细化、均匀，呈现出细小、规则、圆整的形貌组织，如图3c所示。

图4为添加不同含量Al-TCB中间合金的ZL205A合金经T6热处理后的组织形貌，由图4可以看出，合金试样经热处理后组织明显改善，粗大的晶界形貌消失，

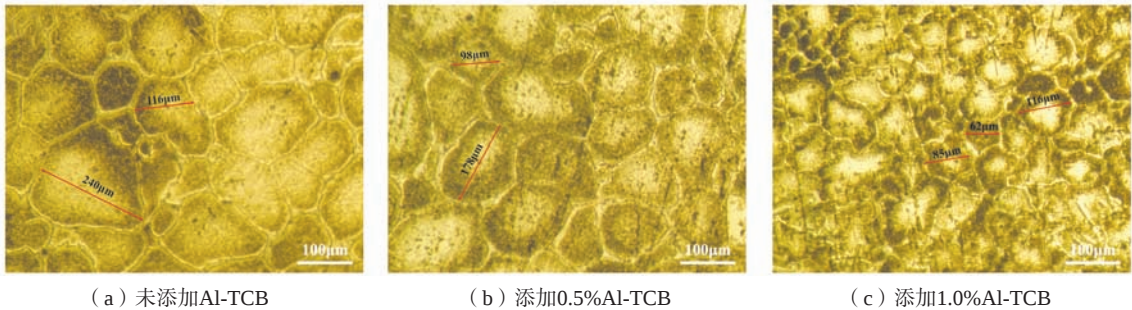
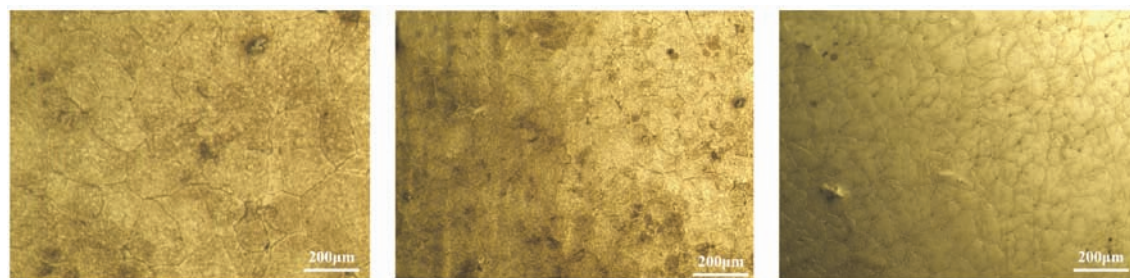


图3 不同含量Al-TCB中间合金添加后试样的铸态组织形貌
Fig. 3 The as cast microstructure and morphology of samples with different Al-TCB master alloys added



(a) 未添加Al-TCB

(b) 添加0.5%Al-TCB

(c) 添加1.0%Al-TCB

图4 T6热处理后不同含量Al-TCB中间合金添加下的试样组织形貌

Fig. 4 The microstructure of samples with different Al-TCB master alloy after T6 heat treatment

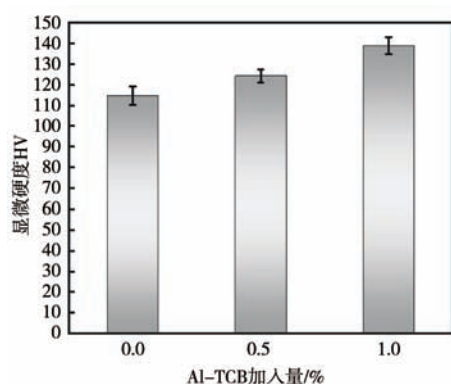
随着Al-TCB中间合金添加量的递增,合金试样的晶粒尺寸逐渐减小,组织细化、均匀性增大。

对比不同Al-TCB中间合金含量的试样组织形貌,证明Al-TCB中间合金对ZL205A齿轮室铸件组织具有较好的细化能力,当Al-TCB中间合金加入量为1.0%时,合金试样组织呈现出最优的细化效果,晶粒尺寸细小,组织均匀,致密度高。

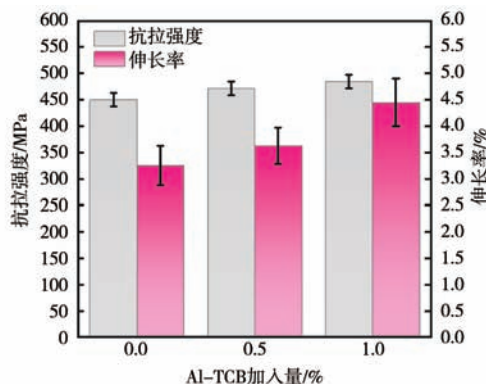
2.2 力学性能分析

齿轮室铸件取样部位的力学性能检测结果如图5所示,由图5可以看出,未添加Al-TCB中间合金时,

ZL205A合金试样的显微硬度、抗拉强度和伸长率都有不符合铸件技术要求的情况,铸件的力学性能不稳定,严重影响铸件的使用功能。加入Al-TCB中间合金后,合金试样的显微硬度、抗拉强度和伸长率都明显改善,当Al-TCB中间合金加入量达到1.0%时,试样的力学性能最优,显微硬度达到HV 143(图5a),抗拉强度和伸长率分别达到502 MPa和5.1%(图5b)。加入Al-TCB中间合金后ZL205A合金的力学性能均能满足并高于铸件规定的技术要求。可见,Al-TCB中间合金的加入对合金试样起到一定的强韧化效果,使铸件获得优异的力学性能。



(a) 显微硬度



(b) 抗拉强度和伸长率

图5 Al-TCB中间合金添加前后齿轮室铸件取样部位力学性能对比(T6热处理后)

Fig. 5 Comparison of mechanical properties of sampling parts of gear chamber castings before and after adding Al-TCB master alloy (After T6 heat treatment)

2.3 SEM选区面扫和断口分析

试验对添加1.0%的Al-TCB中间合金试样进行SEM选区面扫,结果如图6所示。从图6可以看出,ZL205A合金中Ti、C、B元素粒子弥散固溶于 α -Al基体中,未产生单个元素的偏聚现象,表明Ti、C、B粒子不易在熔体中团聚沉淀而降低其细化能力。 α -Al基体上析出的第二相由Ti、C、B复合粒子掺杂而成,形成稳定的聚合物相呈颗粒状形貌分布,具有亚微米及纳米的多尺度特征。钛碳硼复合粒子由Al-TCB中间合金在熔体中演变而成,成为初生 α -Al异质形核的核心,凝固过

程中初生 α -Al相由于异质晶核数增多,从而实现了晶粒细化^[15-16]。

图7为添加不同含量Al-TCB中间合金后ZL205A合金试样的断口微观形貌。ZL205A合金断口为典型的混合型断口,包括沿晶断裂区和韧窝区,其中沿晶断裂区所占比例较大(图7a),预示着合金的塑韧性较差。添加Al-TCB中间合金后,合金组织得到逐步细化,断口组织中韧窝区面积明显增大,沿晶断裂区面积减小(图7b、c)。此外,韧窝形貌周边细小的析出相颗粒存在于韧窝底部,如图7d、e所示,相变热处

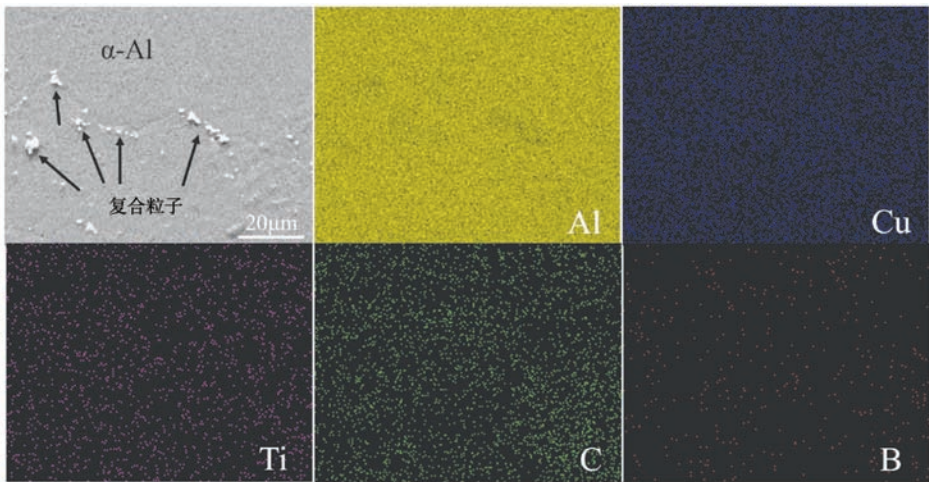


图6 添加1.0% Al-TCB中间合金后试样的SEM面扫结果（T6热处理后）
Fig. 6 The SEM surface scanning results of samples with 1.0% Al-TCB master alloy (After T6 heat treatment)

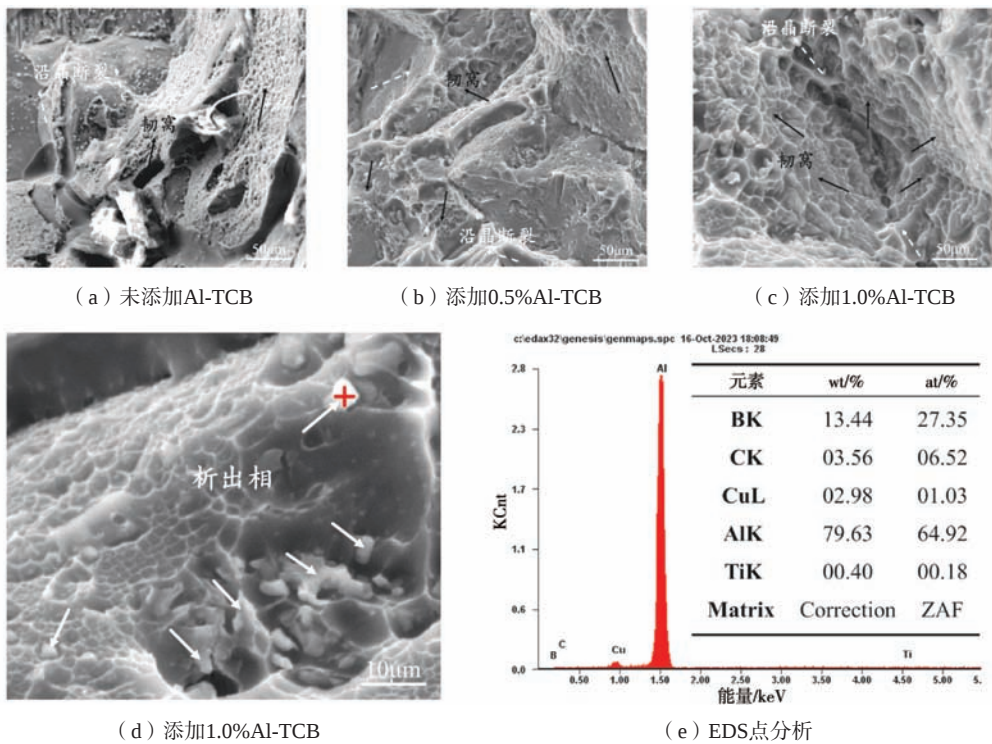


图7 不同Al-TCB中间合金添加量下的拉伸试样断口形貌
Fig. 7 The fracture morphology of tensile samples with different addition of Al-TCB master alloy

理后析出相组成主要为 Al_2Cu (θ' 相)和钛碳硼复合粒子相,随着Al-TCB中间合金加入量的增加,ZL205A合金试样韧窝区面积占比随之增大,析出相的密度也同步增加,从而使合金获得良好的沉淀强化(第二相强化)效果^[18]。因此,Al-TCB中间合金的添加,对ZL205A合金细晶强化、沉淀强化能力提供了良好的助力,使合金的强韧化效果明显,当加入1.0%的Al-TCB中间合金时合金的细化、强化效果最佳,齿轮室铸件具有最优的力学性能。

3 结论

- (1) Al-TCB中间合金对ZL205A齿轮室铸件的细化效果显著。加入1.0%的Al-TCB中间合金后,试样的最小晶粒尺寸达到60 μm 左右,组织更加致密、均匀,随着Al-TCB中间合金添加量的递增,试样的力学性能提升显著,显微硬度、抗拉强度和伸长率最高达到HV 143、502 MPa和5.1%。
- (2) Al-TCB中间合金在熔体中演变而成的钛碳硼

复合粒子成为初生 α -Al 异质形核的核心, 使初生 α -Al 相形核质点数量增加, 晶粒细化。Al-TCB 中间合金加入后, 断口形貌中韧窝区面积和析出相的密度同步增加, 表明合金强韧化效果显著。

参考文献:

- [1] TIAN Y Z, LI Z Y, XI W L, et al. Research on grain refinement of Sc and Zr addition in an Al-Mg-Zn alloy from experiments and first-principles calculations [J]. Metals, 2023, 13 (3): 519-519.
- [2] QIANG Z C, XIN W H, LEI S, et al. Effect of rare earth on morphology and dispersion of TiB₂ phase in Al-Ti-B Alloy refiner [J]. China Foundry, 2023, 20 (2): 115-124.
- [3] 黄俊辉, 孙明, 张燕艳, 等. Al-Ti-B 在 Al-Si 合金中的晶粒细化行为的研究进展 [J]. 有色金属材料与工程, 2022, 43 (5): 47-60.
- [4] 牛经纬, 张国伟. Al-Ti-C 中间合金在 ZL205A 合金石膏型铸造中的应用 [J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41 (2): 194-197.
- [5] POPOVA A E, BRODOVA G I, YABLONSKIKH I T, et al. Structure of Al-Ti-C master alloys [J]. The Physics of Metals and Metallography, 2011, 111 (6): 579-586.
- [6] 贾泮江, 陈邦峰. ZL205A 合金高强优质铸件在大飞机上的应用 [J]. 材料工程, 2009 (1): 77-80.
- [7] 罗磊, 夏宏营, 骆良顺, 等. 行波磁场耦合顺序凝固改善 ZL205A 大型薄壁件缺陷及性能 [J]. 中国有色金属学报: 英文版, 2021, 31 (4): 865-877.
- [8] 贾利军, 李秀玲. 汽车发动机用 ZL205 合金的变质处理及性能研究 [J]. 铸造技术, 2018, 39 (7): 1591-1594.
- [9] WANG Y, WU S, XUE X, et al. Formation mechanism and criterion of linear segregation in ZL205A alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24 (11): 3632-3638.
- [10] FAN L, HAO Q T, XIAN F C. Element segregation behavior of aluminum-copper alloy ZL205A [J]. China Foundry, 2014, 11 (6): 510-515.
- [11] 史晓平, 李玉胜. ZL205A 合金偏析缺陷研究 [J]. 铸造, 2011, 60 (10): 1022-1026.
- [12] WANG Y, FANG C, ZHOU L, et al. Mechanism for Zr poisoning of Al-Ti-B based grain refiners [J]. Acta Materialia, 2019, 164: 428-439.
- [13] 贾义旺, 疏达, 王舒滨, 等. Al-Ti-B 细化含 Zr 铝合金中毒现象的研究进展 [J]. 轻合金加工技术, 2017, 45 (8): 20-25.
- [14] 山东大学解决铝合金细化中毒难题 [J]. 铝加工, 2023 (2): 41.
- [15] LI D, YAN X, FAN Y, et al. An anti Si/Zr-poisoning strategy of Al grain refinement by the evolving effect of doped complex [J]. Acta Materialia, 2023, 249: 118812.
- [16] 徐英, 张将, 彭银江, 等. Al-TCB 晶种合金对 A356 合金抗“中毒”的长效细化行为 [J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41 (12): 1539-1543.
- [17] 阎汐睿, 韩梦霞, 林翰, 等. Al-TCB 对 ZL205A 合金晶粒细化及强韧化行为的影响 [J]. 铸造, 2022, 71 (11): 1374-1381.
- [18] 万杨杰, 钱晓英, 曾迎, 等. Al-Mg-Si 合金中第二相与固溶体的力学特性与电子特性的第一性原理计算 [J]. 材料热处理学报, 2019, 40 (10): 158-165.

Effect of Ti, C, B Composite Particles on the Microstructure and Mechanical Properties of ZL205A Gear Chamber Castings

MA Wen-long¹, YANG Li², WU Hao¹, GONG Xiao-long², LUO Hui¹, FAN Zi-tian², YANG Xiao-dong¹, MA Xun-shan¹

(1. Jianglu Machinery Electronics Group Co., Ltd., Xiangtan 411100, Hunan, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, State Key Laboratory of Material Forming and Mould Technology, Wuhan 030024, Hubei, China)

Abstract:

In this paper, a new type of Al-TCB master alloy is used to refine the grain of ZL205A gear chamber casting, and the effect of adding different Al-TCB master alloy on the microstructure and mechanical properties of gear chamber casting is studied. The results show that the addition of Al-TCB can obviously refine the microstructure of ZL205A alloy. When 1.0% Al-TCB is added, the grain size of the alloy is refined from 240 μm to about 60 μm , and the alloy has fine grains, uniform structure and high density. The Ti, C, B composite particles are heterogeneous nucleation particles grown by primary α -Al. With the increase of the addition of Al-TCB master alloy, the dimple area and the density of precipitated phase increase synchronously in the fracture morphology, and the effect of strengthening and toughening the alloy is remarkable. The microhardness, tensile strength and elongation of the sample reach HV143, 502 MPa and 5.1% respectively.

Key words:

Ti, C, B composite particles; ZL205A; gear chamber casting; microstructure; mechanical properties