复合细化变质处理ADC12铝合金的微观组织与力学性能

郑道友[1,2]，杨依帆[1,3]，程煜刚[1,3]，赵 葵[4]，王 坤[1,2,3]，王文权[1,2]

（1.浙江工贸职业技术学院 光电制造学院，浙江 温州 325002；2.吉林大学 材料科学与工程学院，长春 130022；3.兰州理工大学 材料科学与工程学院，兰州 730050；4.温州瑞明工业股份有限公司，浙江 温州 325204）

摘 要：本文采用Al-5Ti-1B（wt.%）中间合金细化剂与Al-10Ce（wt.%）中间合金变质剂对ADC12铝合金进行复合细化变质处理。利用X射线衍射（XRD）、光学显微镜（OM）、扫描电镜（SEM）和透射电镜（TEM）等表征方法分析了铝合金的物相结构、组织形貌、第二相的分布特征与界面结合特征，并测试了铝合金的拉伸性能与布氏硬度，建立了微观组织与力学性能的关联性。结果表明，经细化变质处理的ADC12铝合金的α-Al基体细化效果显著，共晶Si由粗糙的长针状转变为细小圆整的短棒状；添加0.75%AlTiB-0.75%Ce后，二次枝晶臂间距减小至11.4 μm，$CeCu_{0.5}Si_{1.5}$相在基体中弥散析出且$CeCu_{0.5}Si_{1.5}$稀土相与$Mn_{4.6}Fe_{0.4}Si_3$富Si相界面结合良好；铝合金的抗拉强度、延伸率和布氏硬度分别为272.7 MPa，3.1%和87.7 HB，与原始态铝合金相比分别提高79.2%、287.5%和11.2%，综合力学性能可以适用于需要高强度免热处理铸造铝合金的压铸件需求，如制造汽车的发动机部件、变速箱壳体等。

关键词：金属材料；ADC12铝合金；复合细化变质；微观组织；力学性能

中图分类号：TG223 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5497(2025)08-2570-09

DOI：10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240501

Microstructures and mechanical properties of composite refined and modified ADC12 Al alloy

ZHENG Dao-you[1,2], YANG Yi-fan[1,3], CHENG Yu-gang[1,3], ZHAO Kui[4], WANG Kun[1,2,3], WANG Wen-quan[1,2]

(1. *College of Optoelectronic Manufacturing, Zhejiang Industry & Trade Vocational College, Wenzhou* 325002, *China*; 2. *School of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun* 130022, *China*; 3. *School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou* 730050, *China*; 4. *Wenzhou Ruiming Industrial Co., Ltd., Wenzhou* 325204, *China*)

Abstract: Al-5Ti-1B (wt.%) master alloy refiner and Al-10Ce (wt.%) master alloy modifier were used to composite refine and modify ADC12 Al alloy. The phase structures, microstructures, distribution characteristics of the second phases, and interfacial bonding characteristics of the Al alloy were analyzed by

收稿日期：2024-03-11.

基金项目：吉林省科技厅创新平台和人才专项项目（20230508039RC）；温州市重大科技创新攻关项目（ZG2022035，ZG2023005）.

作者简介：郑道友（1976-），男，副教授，硕士. 研究方向：金属材料成型工艺. E-mail：zhengdaoyou@zjitc.edu.cn

通信作者：王坤（1987-），男，副教授，博士. 研究方向：金属材料组织调控. E-mail：wangkunccc@zjitc.edu.cn

X-ray diffraction (XRD), optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), and transmission electron microscopy (TEM). The tensile properties and Brinell hardness of the Al alloy were also tested, and the correlation between microstructures and mechanical properties was established. The results showed that the refinement effect of α-Al matrix of ADC12 Al alloy after composite refinement and modification was remarkable, and the eutectic Si transformed from rough long needles to fine round short rods. After adding 0.75%AlTiB-0.75%Ce, the secondary dendrite arm spacing was reduced to11.4 μm, $CeCu_{0.5}Si_{1.5}$ phase was dispersed in the matrix and $CeCu_{0.5}Si_{1.5}$ rare earth phase was well boned with $Mn_{4.6}Fe_{0.4}Si_3$ Si-rich phase at the interface. The tensile strength, elongation, and Brinell hardness of the Al alloy are 272.7 MPa, 3.1%, and 87.7 HB, respectively, which were increased by 79.2%, 287.5%, and 11.2% compared with as-received Al alloy. The comprehensive mechanical properties are applicable for die-casting requirements that need high-strength, heat treatment-free cast aluminum alloys, such as for manufacturing automotive engine parts, transmission casings, and similar components.

Key words: metallic materials; ADC12 Al alloy; composite refinement and modification; microstructure; mechanical property

0　引　言

随着现代工业的不断发展，轻质高强的铝合金材料在汽车和航空航天等领域得到了广泛的应用[1-3]。其中，ADC12铝合金作为一种常用的铸造铝合金，具有优异的流动性和力学性能，是汽车变速箱壳体等核心零部件的首选材料[4,5]。ADC12铝合金为Al-Si-Cu系铝合金，合金的铸造组织中存在较粗大的初生α-Al相和针片状的共晶Si相，并且大尺寸、结构复杂的铝合金薄壁铸件容易产生变形等问题，难以进行后续热处理[6,7]。针对高性能铝合金材料的应用需求，国内外研究学者在化学成分优化、凝固过程调控和成型工艺设计等方面进行了大量研究[8,9]。

Zou等[10]采用石墨烯纳米片增强ADC12铝合金，石墨烯的加入细化了铝合金晶粒，提高了位错密度，铝合金的屈服强度提高至245.8 MPa，强化机制为纳米片的晶界钉扎作用和位错强化。近年来，关于稀土元素作为改性剂变质处理铝合金的研究工作较多，证明了稀土元素调控铝合金凝固组织与提高合金力学性能的优异特性。Zou等[11]研究了稀土Yb(含量为0、0.3、0.6、0.9、1.2 wt.%)对ADC12铝合金组织和耐蚀性的影响，结果表明，添加稀土Yb后，合金中α-Al、共晶Si和β-Al_5FeSi相明显细化，耐腐蚀性能显著提高。Hu等[12]研究了稀土Er(含量为0、0.3、0.6和0.9 wt.%)对ADC12铝合金组织和拉伸性能的影响。结果表明，稀土Er的添加使共晶硅由粗糙的片状结构转变为精细的纤维状结构，当稀土Er添加量为0.6 wt.%时，铝合金拉伸强度为269 MPa，延伸率为2%。与此同时，采用稀土元素复合细化变质处理铝合金也显示一定的优势。Gong等[13]研究了富Ce混沌金属对5182铝合金退火和轧制过程中组织演变的影响。结果表明，富Ce混浊金属可以改变铸造5182 Al合金的显微组织，细化α-Al晶粒。Xia等[14]研究了Al-5Ti-1B-La中间合金细化剂对A356.2铝合金组织与性能的影响。结果表明，加入0.025-0.2 wt.%的Al-5Ti-1B-1La中间合金时，铝合金的二次枝晶臂间距从49 μm减小到27 μm，抗拉强度提高了30 MPa，延伸率从10%提高到26%。然而，稀土元素复合细化变质处理对ADC12铝合金的微观组织与力学性能的影响还缺乏深入的研究，且铝合金第二相之间的界面结合是影响细化变质调控的关键因素，但关于Si相与稀土相界面结构的研究报道非常少，亟待进一步的分析与探索。

本文从α-Al基体相晶粒细化和共晶Si相形状尺寸优化协同调控的角度出发，在ADC12铝合金中添加Al-5Ti-1B(wt.%)中间合金细化剂与Al-10Ce(wt.%)中间合金变质剂。研究了复合细化变质对ADC12铝合金微观组织和力学性能的影响，重点分析了第二相的形态分布特征、界面结合特征以及组织性能的关联性，为ADC12铝合金的成分设计与强韧化提供理论指导和试验数据。

1　试验材料与方法

试验材料包括ADC12铝合金铸锭、Al-5Ti-

1B(wt.%)中间合金、Al-10Ce(wt.%)中间合金以及C_2Cl_6精炼剂,ADC12铝合金化学成分如表1所示。熔炼过程中,首先将切割并称量好的ADC12铝合金铸锭放入经过预热的石墨坩埚中,在电阻炉(SG2-5-12)中加热至650 ℃将铸锭完全熔化。向熔体中添加一定比例的Al-5Ti-1B和Al-10Ce中间合金并进行快速搅拌,确保熔体混合均匀,保温1 h后加入C_2Cl_6进行精炼和除渣处理,并浇铸到模具中。浇铸出哑铃型拉伸试样,符合国标GB/T 228.1—2010要求,内直径为ϕ12 mm,夹持段直径为ϕ20 mm,平行段长度为75 mm。在ADC12铝合金中添加不同比例的Al-5Ti-1B和Al-10Ce中间合金进行复合细化变质处理。探究不同的Al-5Ti-1B和Ce含量对铝合金的微观组织和力学性能的影响,计算的5组试验成分如表2所示。

表1 ADC12铝合金化学成分(wt.%)

Table 1 Chemical composition of ADC12 aluminum alloy (wt.%)

成分	含量	成分	含量
Si	10.33	Sn	0.015
Cu	1.62	Mn	0.08
Mg	0.195	Pb	0.042
Fe	0.631	Zn	0.863
Ti	0.021	Al	余量
Ni	0.018	Sn	0.015

表2 复合细化变质试验成分组(wt.%)

Table 2 Experimental compositions of combined refinement and modification (wt.%)

组别	Al-5Ti-1B	组别	Ce
1	0	1	1.5
2	0.5	2	1.0
3	0.75	3	0.75
4	1.0	4	0.5
5	1.5	5	0

在铝合金铸锭的中心部位取金相试样,进行磨削、抛光及腐蚀处理(腐蚀液为凯勒试剂,腐蚀时间为10 s),采用光学显微镜(OM, AxioScope.A1)、扫描电子显微镜(SEM, PhenomXL)、透射电镜(TEM, FEI Titan Cube 80-300)以及X射线衍射仪(XRD, D8 Advance)分析铝合金的显微组织和物相结构,上述样品均取于拉伸样品标距段内。分别采用拉伸试验机(Intsron3369)与硬度计(220HBS-3000)测试铝合金的拉伸性能与布氏硬度。

2 分析与结论

2.1 物相结构

图1为复合细化变质ADC12铝合金的XRD分析结果,不同含量的AlTiB和Ce对ADC12铝合金的变质与细化作用改变了合金的物相结构,5组样品的XRD图谱具有不同的特征。由图1可见,衍射图谱中主要包括α-Al相和Si相,α-Al相的衍射峰沿(111)(200)(220)(311)晶面分布。α-Al相的衍射峰随着AlTiB和Ce含量不同而变化,样品1~5的(111)晶面和(220)晶面衍射峰强度先升高后下降,样品3(0.75%AlTiB-0.75%Ce)的(111)晶面和(220)晶面衍射峰强度最高;样品1~5的(200)晶面和(311)晶面衍射峰强度先下降后升高。α-Al相的(200)晶面逐渐向(111)晶面和(220)晶面转化,Si相在(111)(220)(311)(422)晶面的衍射峰变化不明显。结合图1(a)(b)的分析结果,复合细化变质后铝合金中第二相包括TiB_2相和CeCuSi三元化合物。

2.2 金相组织

图2为复合细化变质ADC12铝合金的金相组织,AlTiB和Ce的加入改变了α-Al相和共晶Si

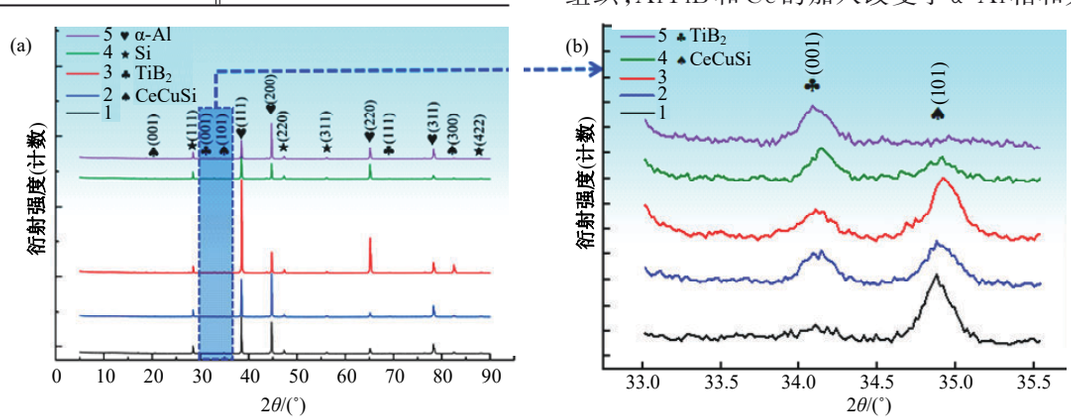

图1 复合细化变质ADC12铝合金的XRD分析

Fig. 1 XRD analysis of ADC12 Al alloy fabricated by composite refinement and modification

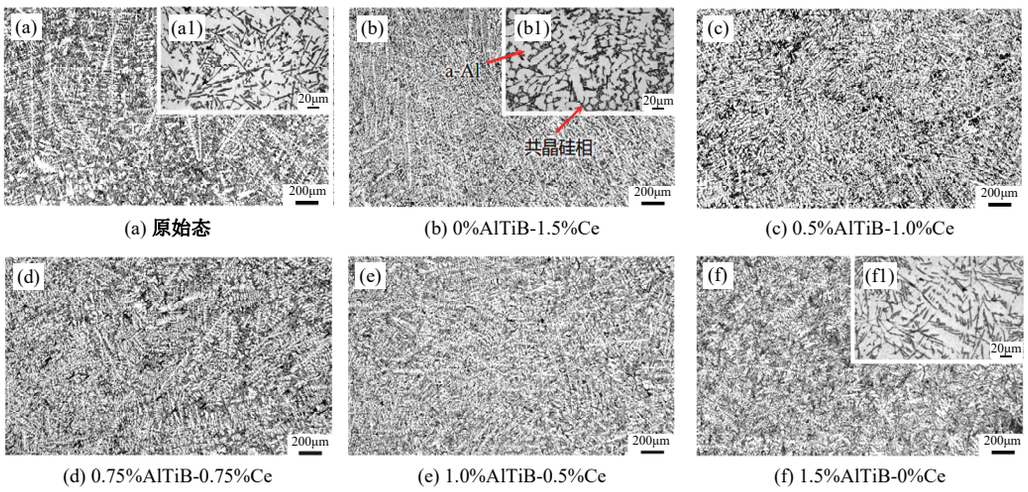

图 2　复合细化变质 ADC12 铝合金的金相组织

Fig. 2　Metallographic microstructures of ADC12 Al alloy fabricated by composite refinement and modification

相的形貌尺寸。原始态的铝合金中粗大的 α-Al 相呈无序排列且共晶 Si 相为粗糙的长针状；添加 0%AlTiB-1.5%Ce 后，共晶 Si 尺寸变短，形态也转变为珊瑚状和团絮状，表现出较好的变质效果，而添加 1.5%AlTiB-0%Ce 后，共晶 Si 尺寸与形态则与原始态样品相当。

图 3 为复合细化变质 ADC12 铝合金的二次枝晶臂间距统计结果，二次枝晶臂间距通过金相图片与式(1)计算得出[15,16]：

$$l=\frac{L}{N-1} \tag{1}$$

式中：l 为铝合金铸锭的二次枝晶臂间距，μm；L 为检测线总长度，μm；N 为检测线与第二相交点总数，个。

原始态铝合金的二次枝晶臂间距为 19.3 μm，细化变质的铝合金样品 1～5 的二次枝晶臂间距分别为 14.3、13.3、11.4、14.0、14.1 μm。本文采用的试验方案为保证 AlTiB 和 Ce 总含量为 1.5% 的情况下，调控二者的相对成分。添加 1.5%AlTiB-0%Ce 后，其二次枝晶间距尺寸降低为 14.1 μm，表现出显著的细化效果。联合添加细化剂和变质剂后，AlTiB 中的 TiB_2 和 Al_3Ti 以及 AlCe 中的 Ce 颗粒作为晶核，抑制初生 α-Al 晶核的生长，在铝合金的凝固过程中增加形核质点，导致 α-Al 晶粒和共晶 Si 的显著细化。当 AlTiB 和 Ce 含量接近时，即样品 3(0.75%AlTiB-0.75%Ce)的晶粒细化效果最好，二次枝晶间距尺寸仅为 11.4 μm，推测细化剂与变质剂在铝合金改性过程中起协同作用。

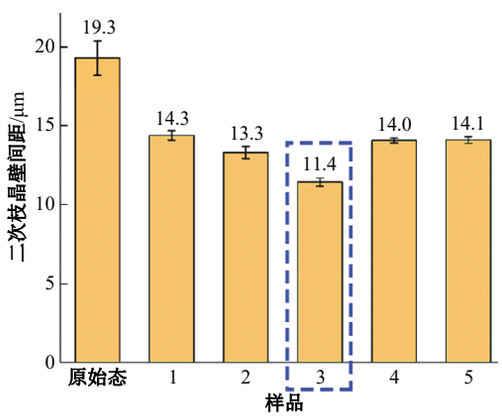

图 3　不同 AlTiB 和 Ce 含量对 ADC12 铝合金二次枝晶臂间距的影响

Fig. 3　Effects of different AlTiB and Ce contents on the secondary dendrite arm spacing of ADC12 Al alloy

2.3　力学性能

图 4 为不同 AlTiB 和 Ce 含量对 ADC12 铝合金力学性能的影响，可见，抗拉强度、延伸率和布氏硬度具有相似的变化趋势。原始态铝合金的抗拉强度、延伸率和布氏硬度分别为 152.1 MPa，0.8% 和 78.9 HB。样品 1(1.5%Ce-0%AlTiB)、2 (1.0%Ce-0.5%AlTiB)、3 (0.75%Ce-0.75%AlTiB)、4 (0.5%Ce-1.0%AlTiB)、5 (0%Ce-1.5%AlTiB)的抗拉强度分别是 165、250.0、272.6、215.0、205.0 MPa，伸长率分别是 2.1%、3%、3.1%、2.8%、2.6%，硬度分别是 76.3、84.3、87.7、80.3、77.7 HBW。添加 0.75% 的晶粒细化剂和 0.75% 的变质剂后，AlTiB、TiB_2 和 Al_3Ti 在铝合金的凝固过程中促进成核，降低晶粒的生长速率，细化 α-Al 晶粒；Ce 对针片状共

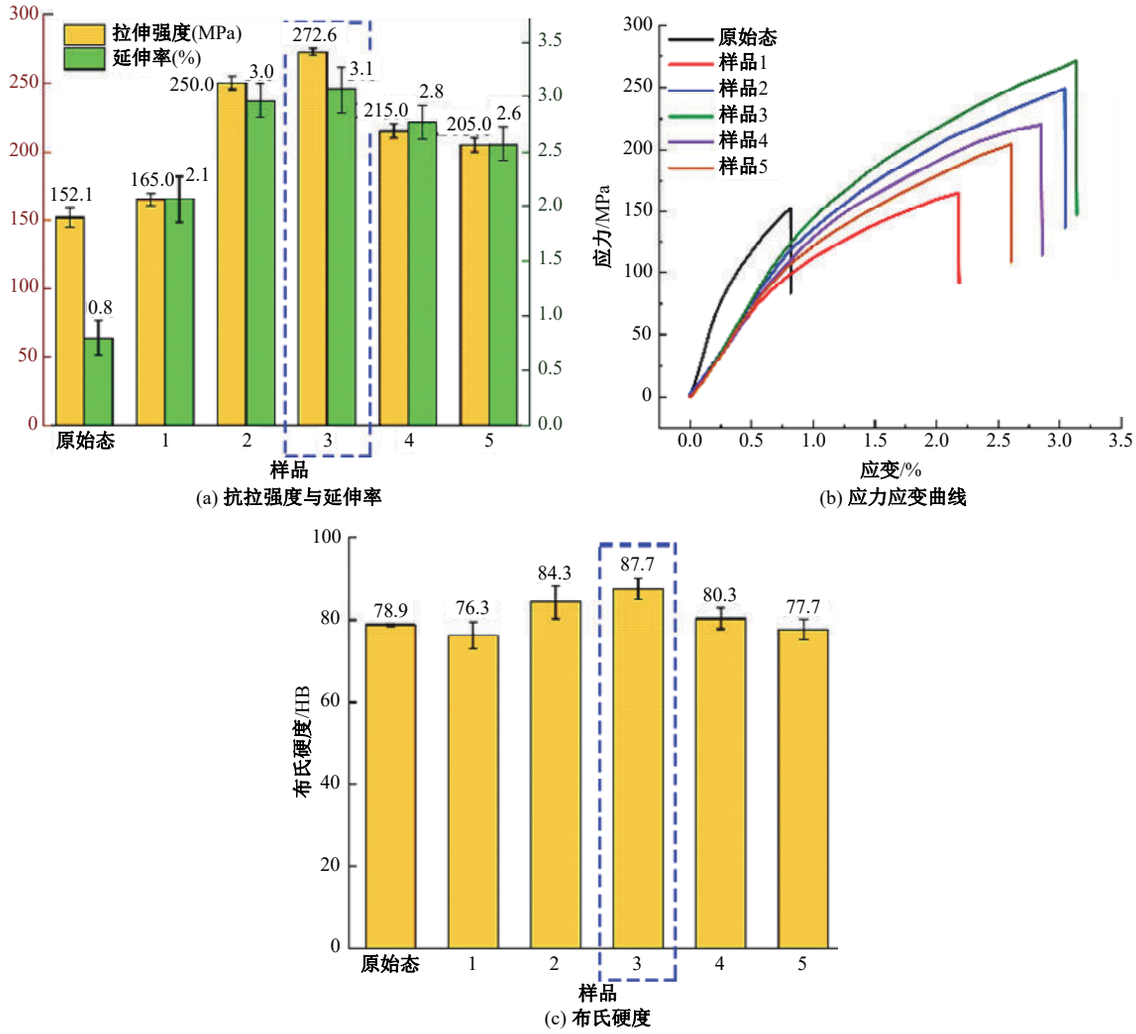

图4 不同AlTiB和Ce含量对ADC12铝合金力学性能的影响

Fig. 4 Effects of different AlTiB and Ce contents on the mechanical properties of ADC12 Al alloy

晶Si晶粒细化,转变成细小均匀的珊瑚状和团絮状,样品3的力学性能提升效果最显著。图5为原始态和复合细化变质ADC12铝合金的断口形貌与EDS点扫描分析结果,由图5可见,复合细化变质前后铝合金断口表面观察到解理台阶,均具有脆性断裂的特征,但第二相的尺寸和分布特征以及断口形貌具有较大差异。原始态铝合金的断裂表面具有较多解理裂纹和部分撕裂棱,Al-Si共晶基体组织较粗大。根据点扫描分析结果,原始态铝合金中存在少量长条状β-Al_5FeSi相,且表面观察到部分裂纹,证明了β-Al_5FeSi相的脆性较大且与基体的界面结合能力较差,在承载过程中第二相与基体的界面容易成为裂纹源。另外,XRD图谱中没有检测到β-Al_5FeSi相,这是由于物相含量较少,超出了XRD的检测极限[17]。复合细化变质ADC12铝合金(0.75%AlTiB-0.75%Ce)的断口表面没有观察到粗大的第二相,细小均匀的CeCuSi等第二相均匀分布于α-Al基体中或吸附于共晶Si相附近,且解理台阶数量减少,揭示了铝合金的塑性在一定程度上的提高,与力学性能测试结果一致。

2.4 界面分析

为探究AlTiB和Ce对ADC12铝合金中第二相分布的影响机制以及界面的结合特征,对样品3(0.75%AlTiB-0.75%Ce)进行透射分析。图6为第二相界面的暗场形貌及界面扫描分析结果,可见,灰色区域具有明显的Ce、Cu和Si元素的富集,结合XRD标定结果,确定为CeCuSi三元相。另外,在富Si相中可以观察到Mn元素与Fe元素的富集,结合EDS点扫描分析结果确定为MnFeSi三元相。MnFeSi相呈长针状分布于铝合金基体内部,CeCuSi析出相趋向于依附富Si相的表面生长,

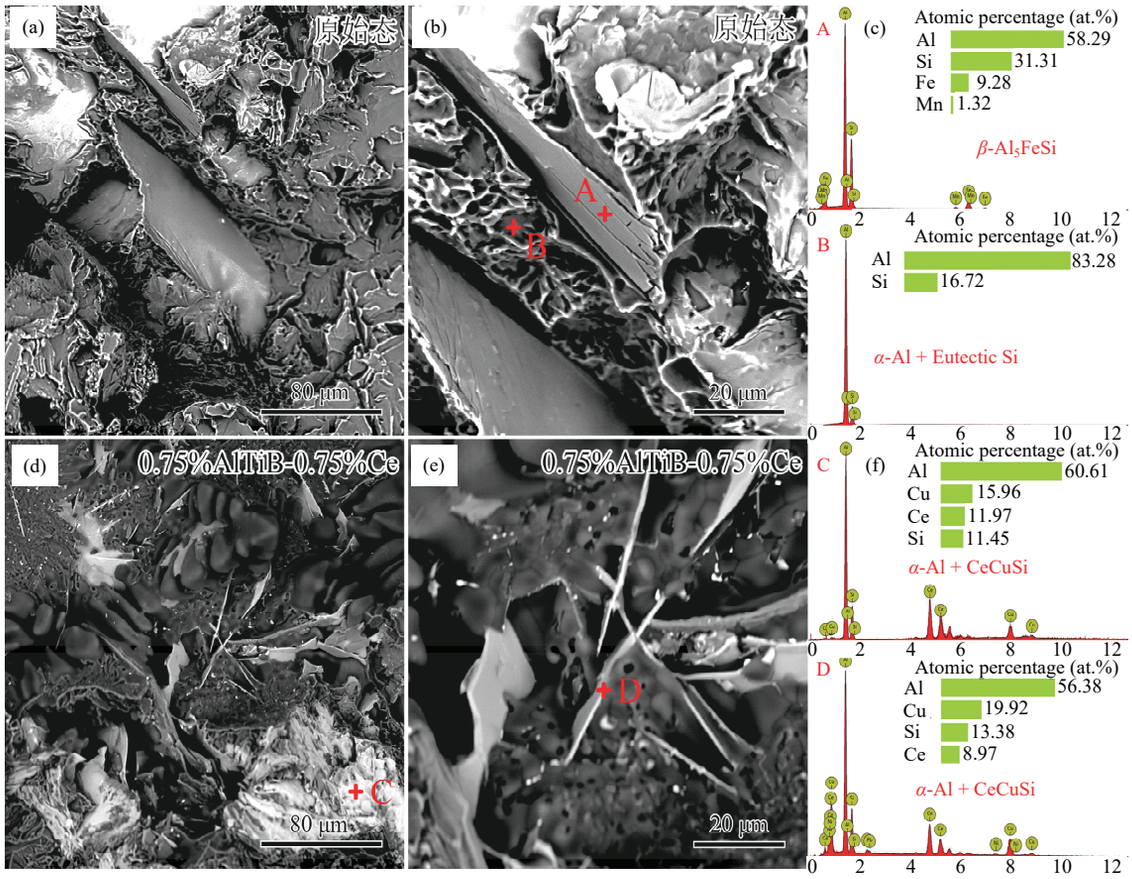

图 5　ADC12铝合金的断口形貌与EDS点扫描分析结果：(a)–(c) 原始态；(d)–(f) 0.75%AlTiB–0.75%Ce

Fig. 5　The fracture morphologies and EDS point scanning analysis results of ADC12 Al alloy

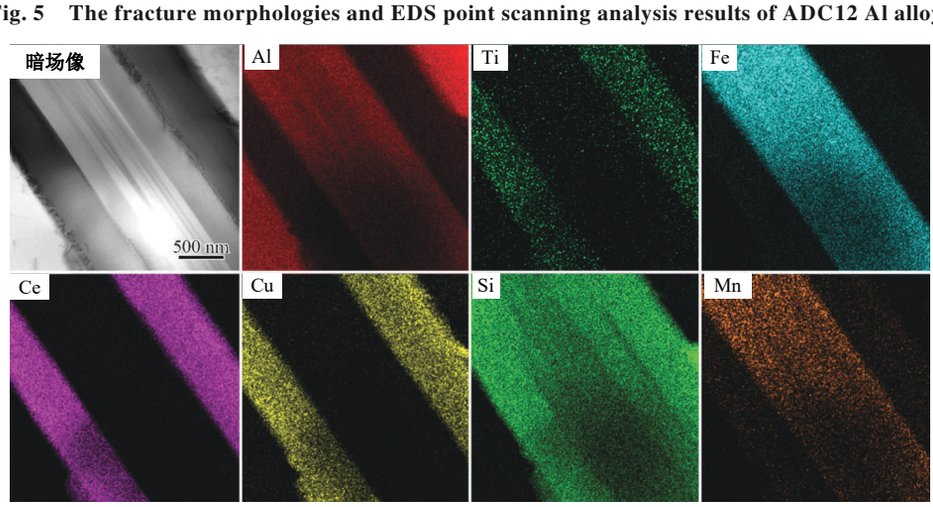

图 6　MnFeSi相/CeCuSi相界面的暗场形貌与EDS–mapping分析

Fig. 6　Dark–field (DF) morphology and EDS–mapping analysis of MnFeSi/CeCuSi interface

以抑制针状相的长大。同时观察到Ti元素在CeCuSi相内部的弥散分布(B元素的相对原子质量较小，在EDS能谱中难以准确识别)，证明了AlTiB和Ce对ADC12铝合金复合变质细化的协同作用。CeCuSi相的形成阻碍了Si、Fe、Mn和Ti夹杂物的聚集与生长，提高了铝合金的综合性能。

为了观察第二相的高倍形貌和晶体结构，MnFeSi相/CeCuSi相界面的明场形貌与选区电子衍射分析结果如图7所示，可见，第二相之间以及第二相与基体之间的界面较为完整，无可见缺陷，结合致密。根据选区电子衍射结果可知，CeCuSi相标定为$CeCu_{0.5}Si_{1.5}$相，MnFeSi相为$Mn_{4.6}Fe_{0.4}Si_3$相，且二者的晶带轴皆为$[1\bar{2}10]$。对$CeCu_{0.5}Si_{1.5}/Mn_{4.6}Fe_{0.4}Si_3$界面进行高分辨分析，

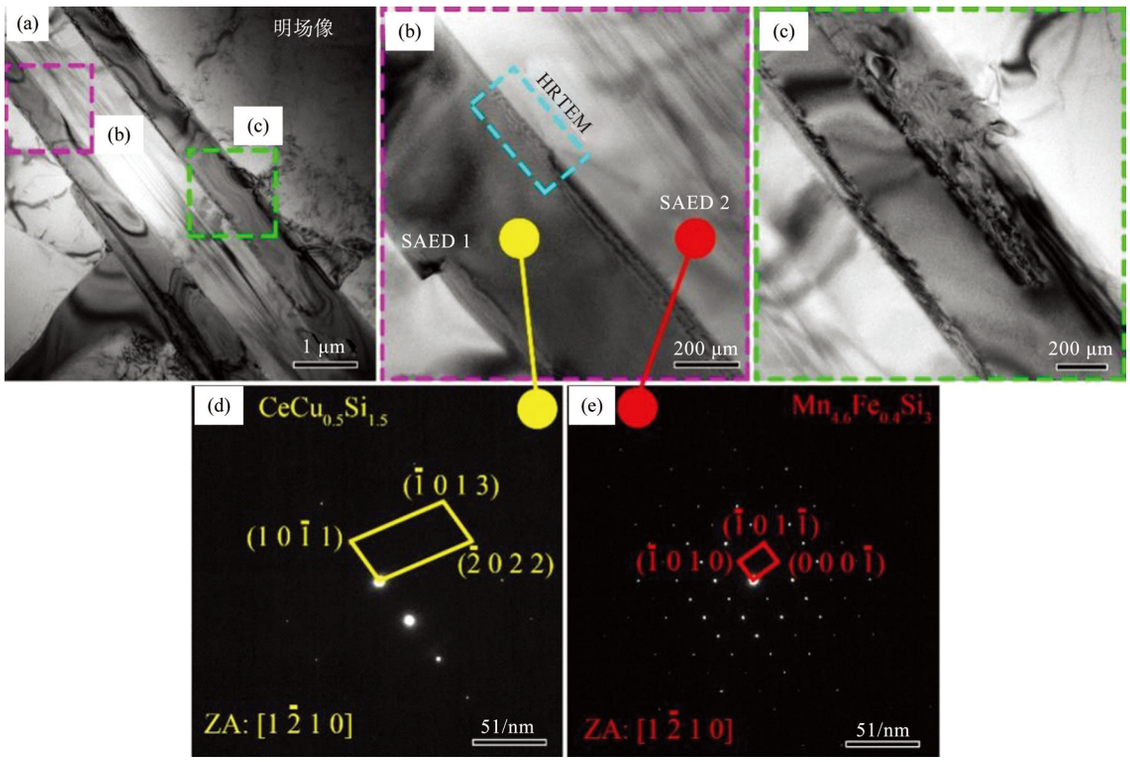

图7 MnFeSi相/CeCuSi相界面的明场形貌与选区电子衍射分析

Fig. 7 Bright-field (BF) morphologies and selected area electron diffraction (SAED) analysis of MnFeSi/CeCuSi interface

如图8所示。$CeCu_{0.5}Si_{1.5}/Mn_{4.6}Fe_{0.4}Si_3$界面结合良好且存在一定厚度的过渡层,对过渡层进行快速傅里叶变换(Fast fourier transform, FFT)。$CeCu_{0.5}Si_{1.5}$相的[10$\bar{1}$1]晶面的衍射斑点与$Mn_{4.6}Fe_{0.4}Si_3$相的[$\bar{2}$020]晶面的衍射斑点趋近重合,因此提取该衍射斑点进行反傅里叶变换(Inverse fast fourier transform, IFFT),如图8(c)所示。FFT图谱中观察到均匀的晶格条纹,测量得出$CeCu_{0.5}Si_{1.5}$相[10$\bar{1}$1]晶面的面间距为0.296 nm,略高于标准PDF卡片(#01-072-2050)中的数值(0.273 nm),可以确定Ti元素的固溶作用可以使$CeCu_{0.5}Si_{1.5}$相内部产生晶格畸变效应。$Mn_{4.6}Fe_{0.4}Si_3$相[$\bar{2}$020]晶面的面间距为0.313 nm,与固溶后$CeCu_{0.5}Si_{1.5}$相的晶面间距差异减小,界面失配度降低,界面结合更牢固,表明AlTiB和Ce对ADC12铝合金复合变质细化的协同作用。由高分辨分析结果可以看出,CeCuSi相易于在MnFeSi相表面形核并沿(10$\bar{1}$1)晶向生长,形成了明显的伴生现象。CeCuSi相与MnFeSi相的相互缠绕可以有效降低两相的生长速度,减小第二相的尺寸,产生细晶强化作用。由图9可以观察到位错在第二相界面处塞积。铝合金中的第二相通常具有不同于基体的晶体结构或力学特性,这使位错难以穿过,从而

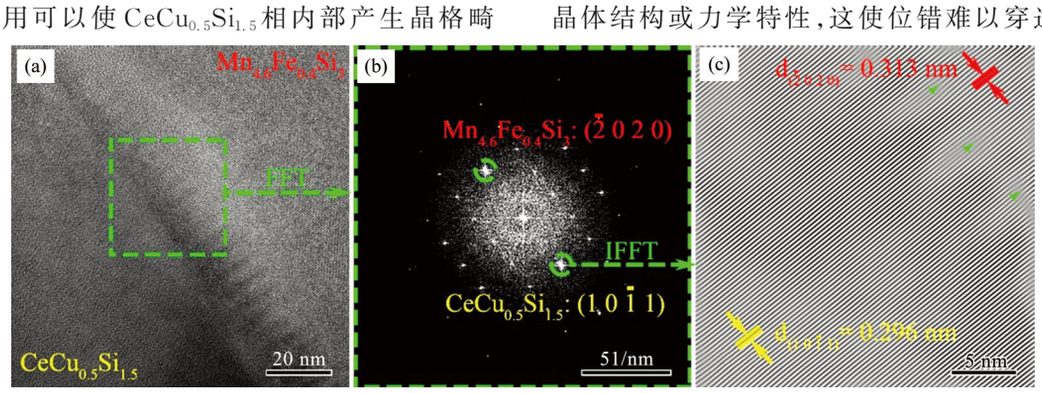

图8 MnFeSi相/CeCuSi相界面的高分辨分析

Fig. 8 High resolution transmission electron microscope (HRTEM) analysis of MnFeSi/CeCuSi interface

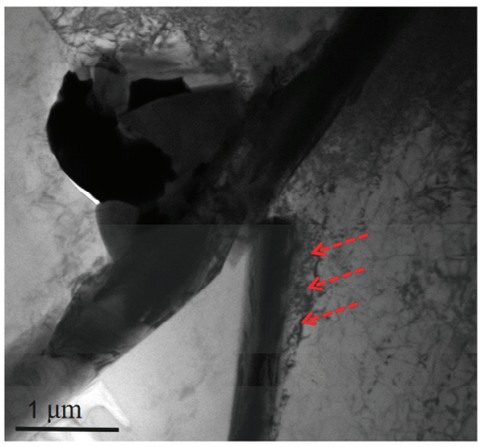

图9　第二相的位错强化作用

Fig. 9　Dislocation strengthening effect of the second phase

在这些界面处形成塞积，进而增加局部的应力集中并导致材料强度提升。

综合而言，AlTiB和Ce的加入改善了α-Al尺寸和共晶Si相形态。通过精确控制AlTiB和Ce的比例（0.75%Ce-0.75%AlTiB）和总量（1.5%），可以显著细化铝合金的组织结构，原因为TiB_2和Al_3Ti的形成促进了形核过程，有利于降低二次枝晶臂间距，而Ti在CeCuSi相内的存在提升了后者对铝合金第二相的变质效果，体现出明显的复合细化变质的协同作用。

在综合力学性能方面，样品3的抗拉强度、延伸率和布氏硬度均有显著提升。这主要是由于晶粒细化和第二相形态的优化，增加了材料的抗裂性和塑性。

3　结　论

（1）AlTiB和Ce的变质与细化作用改变了铝合金的物相结构与组织形貌，添加0.75%AlTiB-0.75%Ce后，α-Al相细密均匀，共晶Si结构明显细化且初生硅几乎消失。AlTiB中的TiB_2和Al_3Ti以及AlCe中的Ce颗粒作为晶核，抑制初生α-Al晶核的生长，在铝合金的凝固过程中增加形核质点，二次枝晶臂间距减小至11.4 μm。

（2）添加0.75%AlTiB-0.75%Ce后获得最优的细化变质效果，铝合金的抗拉强度、延伸率和布氏硬度分别为272.7 MPa、3.1%和87.7 HB，与原始态铝合金相比分别提高了79.2%、287.5%和11.2%，断口表面没有观察到粗大的第二相，细小均匀的CeCuSi等第二相均匀分布于α-Al基体中或吸附于共晶Si相附近，且解理台阶数量减少。

（3）$CeCu_{0.5}Si_{1.5}$稀土相与$Mn_{4.6}Fe_{0.4}Si_3$富Si相界面结合良好且存在一定厚度的过渡层，$CeCu_{0.5}Si_{1.5}$相的形成阻碍Si、Fe、Mn和Ti夹杂物的聚集与生长，α-Al相与共晶Si的细化和均匀以及位错在第二相处塞积是细化变质处理铝合金力学性能提高的主要原因。

参考文献：

[1] Atxaga G, Arroyo A, Canflanca B. Hot stamping of aerospace aluminium alloys: automotive technologies for the aeronautics industry[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 81: 817-827.

[2] Li S S, Yue X, Li Q Y, et al. Development and applications of aluminum alloys for aerospace industry [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27: 944-983.

[3] Feng M, Wu Q, Xue J, et al. High-pressure-torsion-induced segregation, precipitation and grain refinement of Al-(Si, Mg and Cu) binary alloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 199: 102-113.

[4] Ulewicz R, Czerwińska K, Pacana A. A rank model of casting non-conformity detection methods in the context of industry 4.0[J]. Materials, 2023, 16 (2): 723.

[5] Okayasu M, Ohkura Y, Takeuchi S, et al. A study of the mechanical properties of an Al-Si-Cu alloy (ADC12) produced by various casting processes[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 543: 185-192.

[6] 周烨，陈晖，邹金红，等. 稀土Ce变质对ADC12铝合金组织及力学性能的影响[J]. 热加工工艺，2024，15: 89-93.
Zhou Ye, Chen Hui, Zou Jin-hong, et al. Effects of rare earth ce modification on microstructure and mechanical properties of ADC12 Al alloy[J]. Hot Working Technology, 2024, 15: 89-93.

[7] Okayasu M, Sahara N, Mayama N. Effect of the microstructural characteristics of die-cast ADC12 alloy controlled by Na and Cu on the mechanical properties of the alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 831: 142120.

[8] 苏云高，崔振铎，朱胜利，等. 用非晶合金细化变质处理A356铝合金的显微组织和力学性能[J]. 机械工程材料，2017，41(1): 65-71.

Su Yun-gao, Cui Zhen-duo, Zhu Sheng-li, et al. Microstructures and mechanical properties of A365 aluminum alloys after modificated by adding amorphous alloy[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2017, 41(1): 65-71.

[9] Yao Y, Euesden R, Curd M E, et al. Effect of cooling rate on the composition and chemical heterogeneity of quench-induced grain boundary η-phase precipitates in 7xxx aluminium alloys[J]. Acta Materialia, 2024, 262: 119443.

[10] Zou X, Yang Y, Xiong J, et al. Aging behavior, microstructure and mechanical properties of graphene nanoplatelets reinforced ADC12 composites fabricated by ultrasonic assisted casting[J]. Materials Characterization, 2022, 194: 112372.

[11] Zou Y, Yan H, Yu B, et al. Effect of rare earth Yb on microstructure and corrosion resistance of ADC12 aluminum alloy[J]. Intermetallics, 2019, 110: 106487.

[12] Hu X, Jiang F, Ai F, et al. Effects of rare earth Er additions on microstructure development and mechanical properties of die-cast ADC12 aluminum alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 538: 21-27.

[13] Gong T, Dong J, Shi Z, et al. Effects of Ce-rich mischmetal on microstructure evolution and mechanical properties of 5182 aluminum alloy[J]. Materials, 2019, 12: 4230.

[14] Xia G, Zhao Q, Ping X. Effect of Al-5Ti-1B-La intermediate alloy on microstructure and mechanical properties of A356.2 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 30: 1458-1469.

[15] Ghadimi H, Nedjhad S H, Eghbali B. Enhanced grain refinement of cast aluminum alloy by thermal and mechanical treatment of Al-5Ti-B master alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(6): 1563-1569.

[16] 车家宝, 廖敦明, 孙飞, 等. 铝合金铸件凝固过程二次枝晶臂间距模拟计算[J]. 铸造, 2020, 69(4): 382-387.
Che Jia-bao, Liao Dun-ming, Sun Fei, et al. Simulation calculation of secondary dendritic arm spacing during solidification of aluminum alloy casting[J]. Foundry, 2020, 69(4): 382-387.

[17] Li C, Zhou Q, Han M, et al. Effect of rare earth element Er on the microstructure and properties of highly alloyed Al-Zn-Mg-Cu-Zr-Ti alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 956: 170248.