复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第34卷 第6期 6月 2017年
Vol. 34 No. 6 Jun 2017

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20161116.004

稀土 Er 和 Ce 复合改性对过共晶 Mg-Si 合金组织与性能的影响

柏世梅，尧军平*，刘辉，廖露亮，孙众
（南昌航空大学 航空制造工程学院，南昌 330063）

摘　要： 通过金相、SEM、EDS 和 XRD 等方法研究了稀土元素 Er、Ce 复合改性对过共晶 Mg-3.2Si 合金中初生 Mg_2Si 相的影响，并探讨了改性机制。结果表明，在过共晶 Mg-3.2Si 合金中，添加约 0.6%（质量比，下同）Er 时，初生 Mg_2Si 相的平均尺寸由 150 μm 减小到 40 μm，其形态从粗大树枝状变为不规则多面体；在此基础上，继续添加 1.0%Ce，可获得 5～10 μm 大小的多面体或球状初生 Mg_2Si 相，改性效果最佳；但稀土添加过量，会出现过改性现象。改性机制：稀土 Er 和 Ce 吸附或富集在初生 Mg_2Si 相表面，降低固液界面张力，减小临界形核功，有利于更多初生 Mg_2Si 晶核的生成；稀土 Er 和 Ce 在初生 Mg_2Si 相的表面富集，减小了晶向之间的相对生长速度，使初生 Mg_2Si 相从粗大树枝状变为不规则多面体形状；合金凝固时，稀土 Er 与 Ce 的晶体结构相同，形成了连续固溶体。当稀土添加量为 0.6% Er 和 1.0% Ce 时，Mg-3.2Si 合金试样的抗拉强度 σ_b 与伸长率 δ 分别提高到 127 MPa 和 3.7%最大值。

关键词： Mg-Si 合金；Mg_2Si；稀土 Er；稀土 Ce；相形态

中图分类号： TG146.2+2　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1000-3851(2017)06-1300-08

Effect of Er and Ce on modification of primary Mg_2Si phase in hypereutectic Mg-Si alloys

BAI Shimei, YAO Junping*, LIU Hui, LIAO Luliang, SUN Zhong
(School of Aeronautical Manufacture Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: The primary Mg_2Si phase of hypereutectic Mg-3.2Si alloys, in which rare earth Er and Ce were added, was studied by OM, SEM, EDS and XRD. And the metamorphic mechanism was also discussed. When 0.6% (mass ratio, the same below) Er to Mg-3.2Si alloys added, the size of the primary Mg_2Si phase decreases from 150 μm to 40 μm, and its shape transformes from the bulky dendritic into the irregular polyhedron shape. Then continuely adding 1.0% Ce, the polyhedron or globular primary Mg_2Si phase of 5－10 μm can be obtained. When the addition of rare earth increases higher, the primary Mg_2Si phase grows into a coarse. Rare earth Er and Ce on the primary Mg_2Si phase reduce the critical nucleation work and the relative growth rate between the crystallographic orientation, more primary Mg_2Si crystal nucleus form, and its shape transformes into the irregular polyhedron shape. The rare earth Er and Ce form a continuous solid solution during solidification. When 0.6% Er and 1.0% Ce added, the tensile strength σ_b and elongation δ of Mg-3.2Si reach to maximum value of 127 MPa and 3.7%.

Keywords: Mg-Si alloy; Mg_2Si; rare earth Er; rare earth Ce; phase shape

近年来，在镁合金研究方面已取得了重大的进步[1]，尤其是包含有 Mg_2Si 硬质颗粒的 Mg-Si 合金[2]。Mg-Si 合金中，大部分的 Si 与 Mg 反应形成了 Mg_2Si 金属间化合物，该化合物具有高熔点、低密度、高硬度和低的热膨胀系数[3-4]。因此，高硅镁合金作为结构材料具有很大的潜力。由于高硅镁合

收稿日期： 2016-07-12；**录用日期：** 2016-11-09；**网络出版时间：** 2016-11-16 16:19
网络出版地址： www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20161116.1619.008.html
基金项目： 国家自然科学基金(51661024；51164027)；江西省教育厅重点科技项目(GJJ14502)；江西省科技厅国合项目(20151BDH80054)
通讯作者： 尧军平，博士，教授，硕士生导师，研究方向为先进镁合金　E-mail：yyyjpsz@126.com
引用格式： 柏世梅，尧军平，刘辉，等. 稀土 Er 和 Ce 复合改性对过共晶 Mg-Si 合金组织与性能的影响[J]. 复合材料学报，2017，34(6)：1300-1307.
BAI Shimei, YAO Junping, LIU Hui, et al. Effect of Er and Ce on modification of primary Mg_2Si phase in hypereutectic Mg-Si alloys[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(6): 1300-1307 (in Chinese).

http://fhclxb.buaa.edu.cn

金中存在粗大的树枝状初生 Mg_2Si 相[5-7]，严重制约着合金的性能和应用，因此控制和改善初生 Mg_2Si 相的形态和尺寸，有利于提高 Mg-Si 合金的性能。稀土元素化学性质活泼，特别是突出的强化和改性性能逐渐被人们认识。稀土元素 Ce[8]、Y[9]等均可有效改性过共晶 Mg-Si 合金中的初生 Mg_2Si 相，但关于稀土复合改性对过共晶 Mg-Si 合金中初生 Mg_2Si 相的影响少有报道。本文拟考察稀土 Er 和 Ce 复合改性对过共晶 Mg-3.2Si 合金中初生 Mg_2Si 相的影响，期望提高镁硅合金的性能和应用。

1 实验方法

以工业纯 Mg(>99.9%)、纯 Si(>99.9%)为原材料，制备出过共晶 Mg-3.2Si 合金。由于杂质元素对 Mg_2Si 的形态和化学成分有一定的影响[10-11]，稀土 Er 和 Ce 的加入分别以 Mg-30%Er 和 Mg-30%Ce 中间合金的方式加入。称取 400 g 的 Mg-3.2Si 母合金在不锈钢坩埚熔炼。首先，在过共晶 Mg-3.2Si 合金中添加 Mg-30%Er 中间合金，使熔体中稀土 Er 的质量比分别为 0.4%、0.5%、0.6%、0.7%、0.8%，确定改性效果最佳的稀土 Er 含量；然后，在此基础上，继续添加 Mg-30%Ce 中间合金，使熔体中稀土 Ce 的质量比依次为 0.3%、0.6%、1.0%、1.2%、1.4%。熔化后，轻轻搅拌，保温 10 min，清除熔渣。将熔体浇注到在 250℃预热的石墨模具中，从而制备了 Φ 30 mm×60 mm 的铸锭。实验中用混合气体(99 vol% CO_2+1 vol% SF_6)保护。

距离试样底端 10 mm 处截取试样，对该端面经标准程序制备金相试样，研磨抛光后，用体积分数为 5%的硝酸酒精溶液在室温下腐蚀。利用光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)和能谱分析仪(EDS)观察试样的金相组织，并摄取不同放大倍数的金相照片；采用 X 射线衍射仪(XRD)分析试样的相组成。

2 结果与分析

2.1 未改性处理的过共晶 Mg-3.2Si 铸态组织

图 1(a)和 1(b)分别是未改性处理的过共晶 Mg-3.2Si 合金的显微组织和 XRD 图谱。XRD 分析表明，该合金的相组成为 Mg_2Si 相和 α-Mg 相。从图 1(a)能清楚地看到，未改性合金的铸态组织由粗大的初生 Mg_2Si 相(平均晶粒大小超过 150 μm)、共晶 Mg_2Si 和 α-Mg 相组成。晕圈状 α-Mg 相包围着枝晶状的初生 Mg_2Si 相，同时晕圈状 α-Mg 相又被多相共晶组织包围。这种组织的形成主要由于高的冷却速率导致合金凝固过程中偏离平衡状态[12]。在凝固过程中，随着初生 Mg_2Si 相的形成，Mg 原子被排挤到初生 Mg_2Si 相周围的液相中，使 Mg 在周围液相中富集，这样，α-Mg 晕圈便形成了，并且生长在初生 Mg_2Si 相周围。

2.2 Er 对过共晶 Mg-3.2Si 中初生 Mg_2Si 相的影响

图 2 分别是用 0.4%、0.5%、0.6%、0.7%和 0.8%Er 改性的过共晶 Mg-3.2Si 合金的光学组织照片。可以看出，稀土 Er 的添加改变了 Mg_2Si 初生相的形态和尺寸。当 Er 的加入量为 0.4%时，与图 1(a)相比，初生 Mg_2Si 相的树枝晶破碎变小，平均尺寸由原来的大于 150 μm 减小到 60 μm 左右，表明 Er 的加入有效地抑制了凝固过程中初生 Mg_2Si 相的生长。随着 Er 的继续增加，初生 Mg_2Si 相进一步减小，当加入量为 0.6%时，初生 Mg_2Si 相的形态几乎完全由树枝状变为多面体块状(如图 2(c)所示)，同时平均尺寸也减小到 40 μm 以

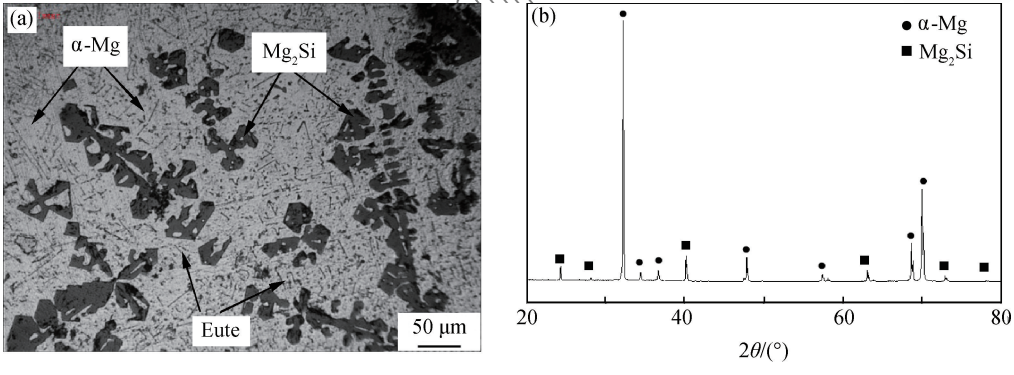
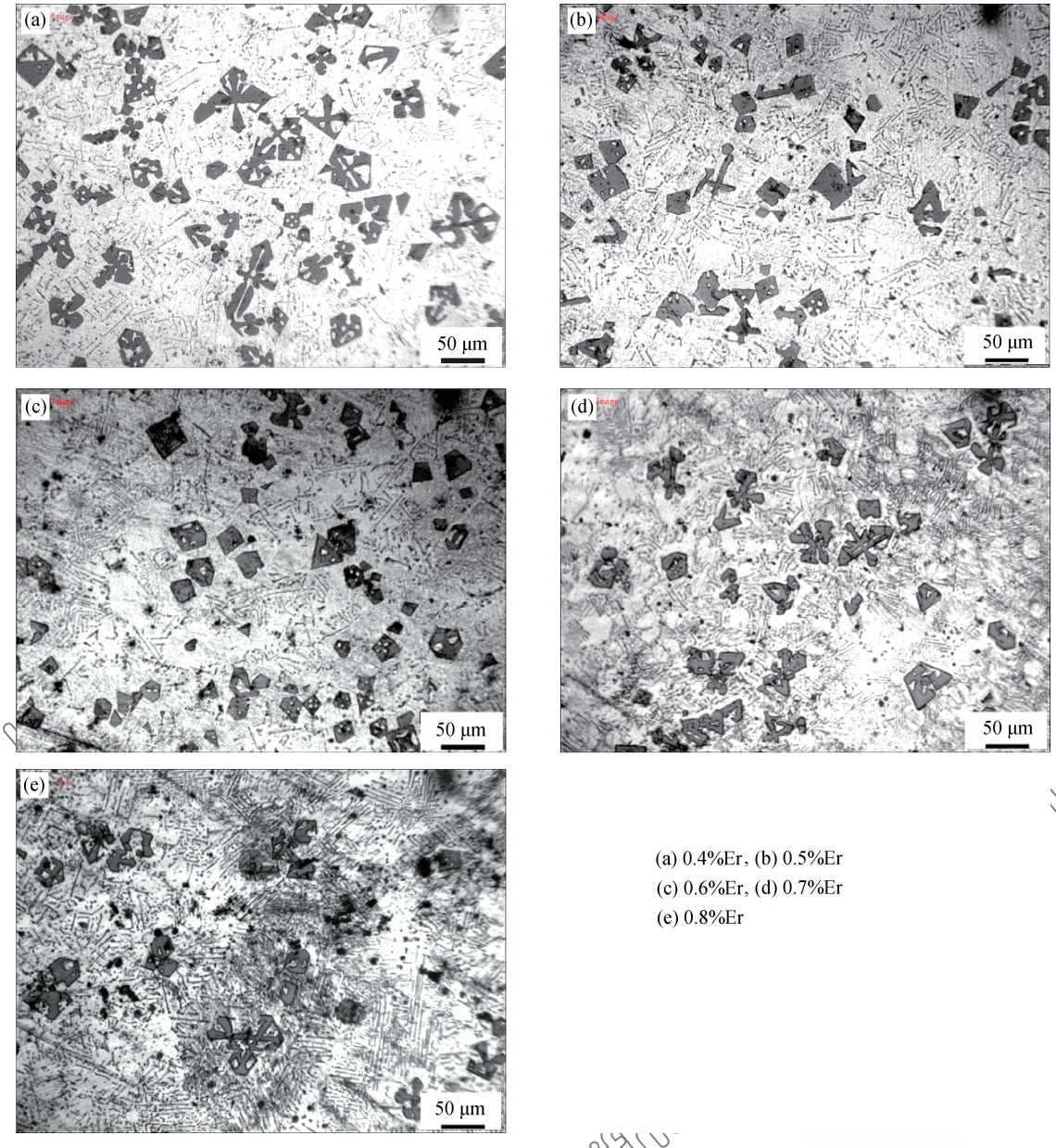


图 1 过共晶 Mg-3.2Si 合金的显微组织(a)及其 XRD 图谱(b)

Fig. 1 Optical microstructure (a) and XRD pattern (b) of the hypereutectic Mg-3.2Si alloy

http://fhclxb.buaa.edu.cn



(a) 0.4%Er, (b) 0.5%Er
(c) 0.6%Er, (d) 0.7%Er
(e) 0.8%Er

图 2　经不同含量 Er 改性的过共晶 Mg-3.2Si 合金的显微组织

Fig. 2　Typical optical microstructures of Mg-3.2Si alloys with different Er mass ratios

下。但继续增加稀土 Er，部分初生 Mg_2Si 相又生长为粗大树枝状，当 Er 加入量为 0.8%时，发现初生 Mg_2Si 相全部变为树枝状，平均晶粒尺寸也增加到 60 μm 以上，出现了过改性现象。因此，可以得出，Er 对过共晶 Mg-3.2Si 合金中初生 Mg_2Si 相有明显的改性效果，且加入 0.6%Er 时，初生 Mg_2Si 相减小到 40 μm 以下，获得了较佳的改性效果。

2.3　Er 和 Ce 复合改性对过共晶 Mg-3.2Si 中初生 Mg_2Si 相的影响

在最佳稀土 Er 含量(0.6%)改性过共晶 Mg-3.2Si 合金基础上，继续添加稀土元素 Ce。图 3 分别是用 0.3%、0.6%、1.0%、1.2%和 1.4%Ce 改性(Mg-3.2Si-0.6Er)合金的光学组织照片和 XRD 衍射图谱。由 XRD 衍射峰结果可知相组成均是 α-Mg 和 Mg_2Si。应该指出的是，添加的稀土 Er 和 Ce 都没有被检测到，这可能是由于用整块试样做 XRD 分析很难发现微量相。

从图 3(a)～3(e)可以看出，在采用 0.6%Er 稀土元素改性过共晶 Mg-3.2Si 合金基础上，继续添加不同含量稀土元素 Ce，初生 Mg_2Si 相的形态和尺寸发生了明显变化。当 Ce 的加入量为 0.3%时，初生 Mg_2Si 相由多面体形状变为树枝状，由图 2(c)

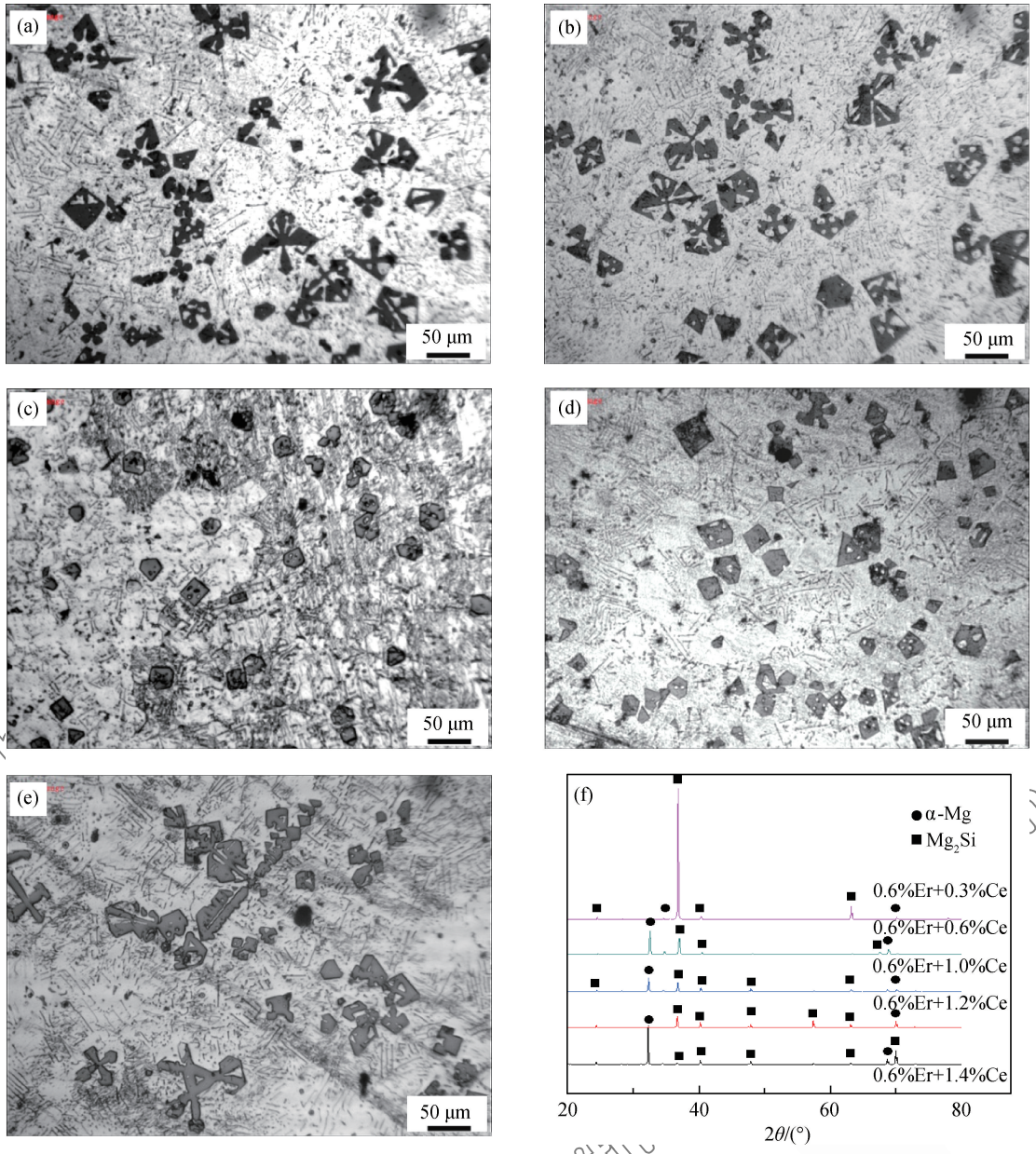


图 3　经不同 Ce 含量改性的 Mg-3.2Si-0.6Er 合金的低倍显微组织及其 XRD 图谱

Fig. 3　Typical optical microstructures of Mg-3.2Si alloys and XRD patterns of Mg-3.2Si alloys with different contents

((a) 0.3%Ce; (b) 0.6%Ce; (c) 1.0%Ce; (d) 1.2%Ce; (e) 1.4%Ce; (f) XRD)

的平均小于 40 μm 增加到了 50 μm 左右，表明 Ce 的微量加入，不及 0.6%Er(单独添加)对过共晶 Mg-3.2Si 合金的改性效果。随着 Ce 的继续增加，树枝状的初生 Mg_2Si 相逐渐减小，当 Ce 加入量为 1.0%时，初生 Mg_2Si 相的形态大部分由树枝状变为多面体块状，少许成球状(如图 3(c)所示)，同时其平均尺寸也减小到 5～10 μm，表明 Er 和 Ce 的复合加入可以有效抑制凝固过程中初生 Mg_2Si 相的各向异性生长。但是，当 Ce 的加入量超过 1.2%时，初生 Mg_2Si 相又变为粗大树枝状，出现过改性现象。由此可见，稀土 Er 和 Ce 的复合加入可以有效改变初生 Mg_2Si 相的形态和尺寸，在最佳稀土 Er 含量(0.6%)改性过共晶 Mg-3.2Si 合金基础上，继续添加 1.0% Ce，可获得 5～10 μm 大小的多面体或球状初生 Mg_2Si 相，改性效果最佳。

经稀土元素 Er 和 Ce 复合改性的过共晶 Mg-3.2Si 合金的 SEM 形貌和 EDS 结果如图 4 所示。由图 4(a)、4(b)可以观察到组织中一些白色的针状和块状相，分布在基体中，或附着在初生 Mg_2Si 相

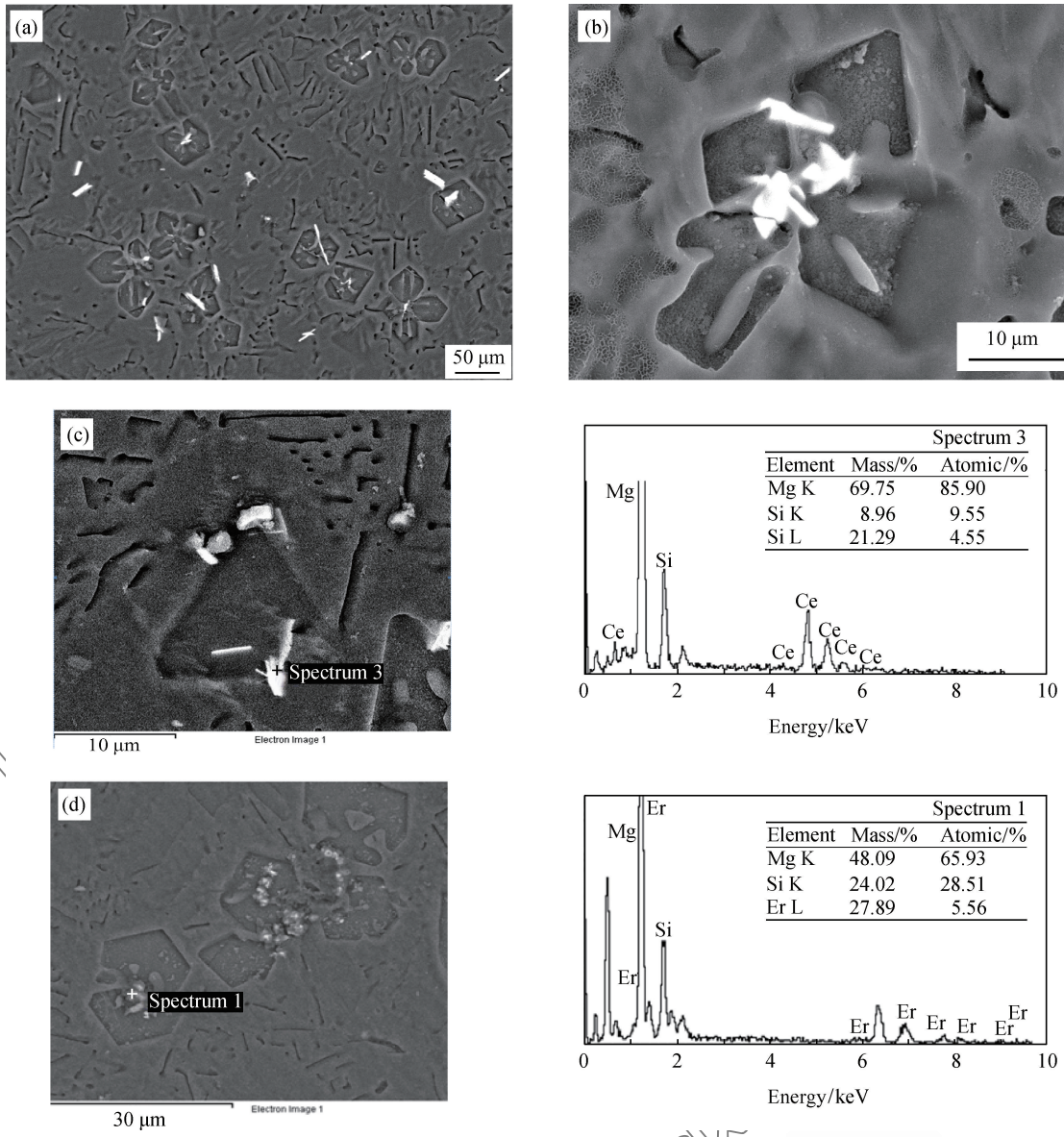


图 4　初生 Mg_2Si SEM 形貌((a)，(b))和稀土相的 EDS 分析((c)，(d))

Fig. 4　SEM images ((a)，(b)) and EDS result ((c)，(d)) of white phases in Mg-3.2Si alloys with rare earth addition

表面或周围。由图 4(c)、4(d)白色相的 EDS 分析可知，它们为含稀土相，说明稀土 Er 和 Ce 可附着在初生 Mg_2Si 相表面或 α-Mg 中，形成稀土相。由图 4(c)可得，此白色稀土相含有 Mg、Si 、Ce 三种元素。由于稀土元素活泼的性质和其在镁合金中低的固溶度，稀土加入到过共晶 Mg-3.2Si 合金中可以分别与 Mg 或 Si 反应形成 Mg-RE 或 Si-RE 化合物(RE—稀土)。两元素的电负性差值越小，越易形成固溶体，反之易形成化合物。Mg、Si 和 Ce 的电负性分别为 1.31、1.8、1.21[13]，Ce 与 Si 的电负性差值(0.59)大于 Ce 与 Mg 的电负性差值(0.1)，稀土 Ce 更倾向于与 Si 反应形成 Ce_xSi_y 化合物。同理，由图 4(d)可得，此白色稀土相含有 Mg、Si、Er 三种元素。Mg、Si 和 Er 的电负性分别为 1.31、1.8、1.22[13]，Er 与 Si 的电负性差值(0.58)大于 Er 与 Mg 的电负性差值(0.09)，稀土 Er 更倾向于与 Si 反应形成 Er_xSi_y 化合物。

由此可得出，在合金凝固过程中，稀土元素和硅元素可形成形如 Ce_xSi_y、Er_xSi_y 的硅化物。

2.4　Er 和 Ce 复合改性对过共晶 Mg-3.2Si 性能的影响

图 5 为不同含量的稀土 Ce 改性(Mg-3.2Si-0.6Er)合金后，其抗拉强度 σ_b 与伸长率 δ 的变化规律。可以看出，在普通重力铸造的条件下，稀土 Er

http://fhcl.

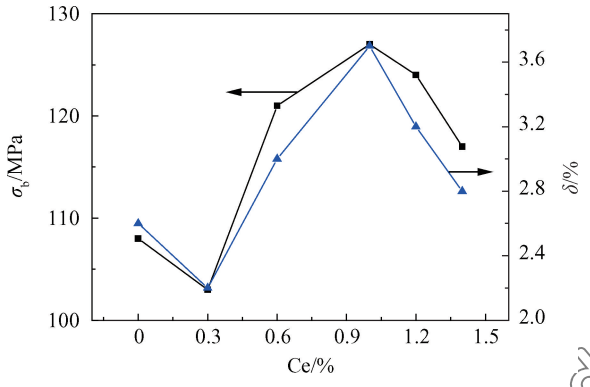


图 5　不同 Ce 含量改性对 Mg-3.2Si-0.6Er 合金的抗拉强度 σ_b 和伸长率 δ 影响

Fig. 5　Tensile strength σ_b and elongation δ of Mg-3.2Si-0.6Er alloys with different Ce contents

和 Ce 共同变质对过共晶 Mg-3.2Si 合金的抗拉强度与伸长率影响明显。当稀土 Ce 加入量为 0～0.3%时，试样的抗拉强度与伸长率均低于 0.6% Er 单独变质过共晶 Mg-3.2Si 合金的影响。随着改性剂的不断增加，抗拉强度和延伸率不断提高，当稀土 Ce 加入量为 1.0%时，合金试样的抗拉强度 σ_b 与伸长率 δ 分别提升到 127 MPa 和 3.7%，为最大值。

合金力学性能的提高主要是由于合金组织中初生 Mg_2Si 相的形貌由粗大的树枝状相转变为细小的多面体形状或球状(如图 3(c)所示)，消除了树枝状初生 Mg_2Si 相对合金力学性能的不利影响。但是，继续增加稀土 Ce，合金中同时存在块状以及树枝状初生 Mg_2Si 相(如图 3(d)、3(e))，合金的力学性能下降。

图 6 为加入 1.0%稀土 Ce 时，不同倍率条件下试样的断口形貌(图中箭头所指为不同倍率下的同一初生 Mg_2Si 相)。由于镁合金为密排六方结构，其滑移系较少，只能进行非常有限的宏观变形，对于镁合金而言，其主要的断裂机制分为准解理断裂、解理断裂、沿晶断裂及前面几种机制所组成的混合断裂方式。由图 6 可见，初生 Mg_2Si 相呈不规则多面体形状或颗粒状，晶粒立体感强，且试样断裂时晶界光滑，是一种典型的沿晶断口形貌。断裂源主要来自两个方面：(1) 初生 Mg_2Si 相自身断裂；(2) 初生 Mg_2Si 相与共晶相界面处微裂纹。

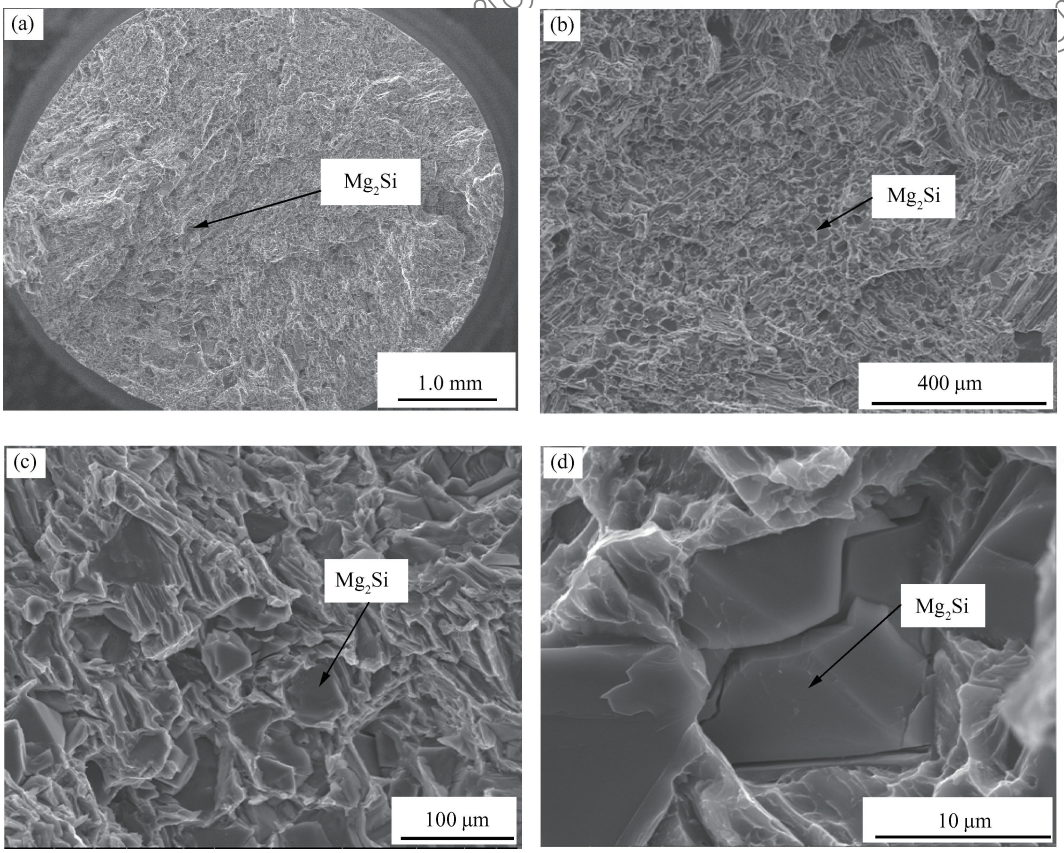


图 6　1.0%Ce 改性 Mg-3.2Si-0.6Er 合金的断口形貌

Fig. 6　Fracture surface of Mg-3.2Si-0.6Er alloy samples with 1.0%Ce

http://xbkb.buaa.edu.cn

3　Mg-3.2Si 改性机制

众所周知，可以通过在合金中加入微量的稀土元素获得组织的细化。按照金属凝固原理，过共晶 Mg-3.2Si 合金的初生 Mg_2Si 晶体成长的临界晶核半径为[14]

$$r^* = 2\sigma_{PL}/\Delta G_m \tag{1}$$

式中：σ_{PL} 为初生 Mg_2Si 晶体与液态合金的界面张力；ΔG_m 为初生 Mg_2Si 固相与液相单位体积的自由能差。

而初生 Mg_2Si 晶体的临界形核功为[14]

$$\Delta G = \frac{1}{3}A^*\sigma_{PL} = \frac{1}{3}(4\pi r^{*2})\sigma_{PL} \tag{2}$$

式中，A^* 为临界晶核的表面积。

与未改性的过共晶 Mg-3.2Si 合金相比，用稀土改性的过共晶 Mg-3.2Si 合金熔体在凝固过程中，因稀土在初生 Mg_2Si 相生长界面的富集，有利于降低固液界面张力 σ_{PL}。由式(1)和式(2)可得出，若 σ_{PL} 越低，则临界晶核半径 r^* 越小，所需临界形核功就越低，有利于更多初生 Mg_2Si 晶核的生成。

稀土元素在初生 Mg_2Si 相的表面富集，将会影响其生长过程并改变其生长方式。Mg_2Si 的晶格类型为面心立方结构，其生长过程中优先生长晶向为〈100〉[15]，且生长方式及其最终形态取决于〈100〉晶向和〈111〉晶向之间的相对生长速度。在含有改性元素的情况下，溶质原子会偏析富集于生长界面，并抑制优先生长晶向〈100〉的生长速度。若 $v_{\langle100\rangle}/v_{\langle111\rangle} > \sqrt{3}$，则初生 Mg_2Si 相会按照树枝晶方式生长成树枝状晶[15]，比值越大，则树枝状晶的轴向长度越长，长径比越大。未改性的过共晶 Mg-3.2Si 合金，优先生长晶向的生长速度快，比值较大，自然生长成树枝状晶(如图 1(a)所示)。用稀土改性过共晶 Mg-3.2Si 合金后，优先生长晶向速度 $v_{\langle100\rangle}$ 被抑制，随着稀土含量的逐渐增加，优先生长晶向速度 $v_{\langle100\rangle}$ 逐渐减小，$v_{\langle100\rangle}/v_{\langle111\rangle}$ 比值也逐渐减小，树枝状晶的长径比将会逐渐降低，并呈颗粒状，但外形呈现非规则状态(如图 2(a)～2(c))。在此情况下，如果两个垂直方向生长的枝晶前端互相接触并闭合，就可能会有少量的镁被包裹在初生 Mg_2Si 晶体内部，导致初生 Mg_2Si 相内部小孔的形成(如图 2(b)和 2(c))。若 $v_{\langle100\rangle}/v_{\langle111\rangle} \leqslant \sqrt{3}$，则逐渐倾向于长成多面体颗粒[15](如图 2(c))，此时，初生 Mg_2Si 相呈现出规则外形。

因此，单种稀土 Er 改性 Mg-Si 合金时，初生相 Mg_2Si 的尺寸由大于 150 μm 减小到 40 μm 以下，其形态从粗大的树枝状变为不规则多面体形状。分析其原因：(1)稀土 Er 吸附或富集在初生 Mg_2Si 相表面，降低固液界面张力，减小临界形核功，有利于更多初生 Mg_2Si 晶核的生成；(2)稀土 Er 可在初生 Mg_2Si 相的表面富集，减小了晶向之间的相对生长速度，使初生 Mg_2Si 相从粗大树枝状变为不规则多面体形状。

单种稀土 Ce 改性 Mg-Si 合金[8]时，当 Ce 加入量超过 0.4%后，初生 Mg_2Si 相形态由粗大的树枝状晶转变为呈非规则形状的颗粒，改性机制主要与稀土元素富集于初生 Mg_2Si 相生长表面并抑制优先生长晶向的生长有关。

稀土 Er、Ce 复合改性 Mg-3.2Si 合金时，随着稀土 Ce 含量的增加，初生 Mg_2Si 相由约 40 μm 的不规则多面体形状先变成 50 μm 的树枝状，再变成 5～10 μm 的多面体或球状。根据相关研究[16]，稀土 Er 和 Ce 在室温到 750℃范围内均为面心立方结构，本实验中，合金凝固时，稀土 Er、Ce 的晶体结构相同，它们在过共晶 Mg-3.2Si 合金中可形成连续固溶体[13]。图 3(a)与图 2(c)相比较，初生 Mg_2Si 相由多面体颗粒状变成了稍大型树枝状，表明，0.3%Ce 的加入不及 0.6%Er(单独添加)对过共晶 Mg-3.2Si 合金的改性作用，这是由于 Er 和 Ce 在合金中形成连续固溶体，减少了初生 Mg_2Si 相表面富集的稀土含量，促进了粗大树枝状 Mg_2Si 相的形成。随着 Ce 含量的增多，初生 Mg_2Si 相表面或周围两种稀土增多，抑制了初生 Mg_2Si 相的各向异性生长，晶体逐渐细化，当加入 1.0%Ce 时，可获得 5～10 μm 大小的多面体或球状初生 Mg_2Si 相，获得最佳改性效果(如图 3(c))。

另外，组织中发现 Er、Ce 与 Si 可能形成 Ce_xSi_y、Er_xSi_y 化合物，其原因可能是由于 Er 和 Ce 原子的局部偏析，导致含稀土化合物的形成。当加入的 Er 和 Ce 过量时(如图 2(d)～2(e)或图 3(d)～3(e))，大量的稀土原子吸附到初生 Mg_2Si 相的生长前沿，对稀土相的形成提供了充足的稀土原子，Er 和 Ce 原子更倾向于与扩散过来的 Si 反应形成化合物。此时，Er、Ce 就不能有效地阻止 Mg 和 Si 原子向生长的初生 Mg_2Si 相扩散，从而促进了粗大初生 Mg_2Si 相的形成，导致稀土 Er、Ce 改性的失效。

http://fcclab.buaa.edu.cn

4 结 论

（1）在过共晶 Mg-3.2Si 合金中添加约 0.6% Er 时，初生相 Mg_2Si 的平均尺寸由大于 150 μm 减小到 40 μm 以下，其形态从粗大的树枝状变为不规则多面体形状；但超过 0.7%Er 时，稀土 Er 对初生 Mg_2Si 相产生过改性现象。

（2）在过共晶 Mg-3.2Si-0.6%Er 合金中，加入 1.0%Ce 时，可获得 5～10 μm 的多面体或球状初生 Mg_2Si 相，获得最佳改性效果；但 Ce 含量超过 1.2%时，产生过改性现象。

（3）稀土 Er 和 Ce 复合改性对过共晶 Mg-3.2Si 合金的抗拉强度与伸长率影响明显。当稀土加入量为 0.6% Er 和 0.3% Ce 时，试样的抗拉强度与伸长率均低于 0.6%Er 单独改性过共晶 Mg-3.2Si 合金。但是，随着稀土改性剂的不断增加，合金的抗拉强度和延伸率也不断提高，当稀土添加量为 0.6%Er 和 1.0% Ce 时，Mg-3.2Si 合金的抗拉强度 σ_b 与伸长率 δ 分别提高到 127 MPa 和 3.7%，为最大值。

参考文献：

[1] MABUCHI M, KUBOTA K, HIGASHI K. Tensile strength, ductility and fracture of magnesium silicon alloys[J]. Journal of Materials Science, 1996, 31(4): 1529.

[2] 林雪冬，刘昌明，吕循佳. Si 与 Mg 含量对离心铸造原位颗粒增强 Al-xSi-yMg 复合材料组织与耐磨性能的影响[J]. 复合材料学报，2013，30(1)：155-164.
LIN Xuedong, LIU Changming, LV Xunjia. Si and Mg content of centrifugally cast in situ particle reinforced Al-xSi-yMg composite organization and wear-resisting performance impact[J]. Journal of Composite Materials, 2013, 30(1): 155-164 (in Chinese).

[3] 胡勇，闫洪，陈国香，等. Si 对原位自生 Mg_2Si/AM60 复合材料组织及性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程，2009，28(2)：343-347.
HU Yong, YAN Hong, CHEN Guoxiang, et al. Effects of Si on microstructure and properties of in situ synthesized Mg_2Si/AM60 composites[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 28(2): 343-347 (in Chinese).

[4] 张金山，高义斌，裴利霞，等. P 变质对 Si 合金化 AZ91 镁合金显微组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报，2006，16(8)：1361-1364.
ZHANG Jinshan, GAO Yibin, PEI Lixia et al. Effect of P modifying on microstructures and mechanical properties of Si alloying AZ91 magnesium alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(8): 1361-1364 (in Chinese).

[5] PAN Y C, LIU X F, YANG H. Microstructural formation in a hypereutectic Mg-Si alloy[J]. Materials Characterization, 2005(55): 241-247.

[6] JIANG Q C, WANG H Y, WANG Y. Modification of Mg_2Si in Mg-Si alloys with yttrium[J]. Materials Science and Engineering, 2005(392): 130-135.

[7] KIM J J, KIM D H, SHIN K. Modification of Mg_2Si morphology in squeeze east Mg-A1-Zn-Si alloys by Ca or P addition[J]. Scripta, 1999, 41(3): 333-340.

[8] 周海涛，曾小勤，刘文法，等. 稀土铈对 AZ61 变形镁合金组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报，2004，14(1)：99-104.
ZHOU Haitao, ZENG Xiaoqin, LIU Wenfa, et al. Effect of Ce on microstructures and mechanical properties of AZ61 rought magnesium[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(1): 99-104 (in Chinese).

[9] 任玉艳，刘桐宇，李英名. 稀土元素钇对复合材料 Al-30wt% Mg_2Si 组织和力学性能的影响[J]. 复合材料学报，2015，32(5)：1367-1373.
REN Yuyan, LIU Tongyu, LI Yingming. Rare earth element yttrium on composite material Al-30wt% Mg_2Si organization and mechanical properties of impact[J]. Journal of Composite Materials, 2015, 32(5): 1367-1373 (in Chinese).

[10] LI G H, GILL H S, VARIN R A. Magnesium silicide intermetallicalloys [J]. Metallurgical Transactions A, 1993 (A24): 2383-2387.

[11] KIM J J, KIM D H, SHIN K S, KIM N J. Modification of Mg_2Si morphology in squeeze cast Mg-Al-Zn-Si alloys by Ca or P addition[J]. Scripta Materialia, 1999, 41(4): 333-339.

[12] PAN Y H, LIU X F, YANG H. Microstructural formation in a hypereutectic Mg-Si alloy[J]. Materials Characterization, 2005, 55(1): 241-243.

[13] 唐定骧，刘余九，张洪杰，等. 稀土金属材料[M]. 北京：冶金工业出版社，2011：14-21.
TANG Dingxiang, LIU Yujiu, ZHANG Hongjie, et al. Rare earth metal materials[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011, 14-21 (in Chinese).

[14] 胡汉起，沈宁福，姚山. 金属凝固原理[M]. 北京：机械工业出版社，2000：81-83.
HU Hanqi, SHEN Ningfu, YAO Shan. The metal solidification principle[M]. Beijing: Mechanical Industry Publishing House, 2000: 81-83 (in Chinese).

[15] QIN Q D, ZHAO Y G, ZHOU W, et al. Effect of phosphorous on microstructure and growth manner of primary Mg_2Si crystal in Mg_2Si/Al composite[J]. Materials Science and Engineering A, 2007(A447): 186-191.

[16] 殷探月. 新显色剂偶氮胂-DBS 直接光度法快速测定铜铁中稀土[J]. 痕量分析，1989，5(4)：65-68.
YIN Tanyue. New chromogenic agent azo arsine-DBS direct spectrophotometric rapid determination of copper in iron Re [J]. Journal of Trace Analysis, 1989, 5(4): 65-68 (in Chinese).

http://fmclxb.buaa.edu.cn