DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.4164

Ti 元素对 Al–5Mg 合金晶粒细化机理研究

刘娇龙[1],陈海燕[1],陈小军[2],孟宪旗[2],李文亚[1],万　杰[1],陈豫增[1,3]

(1. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室,陕西 西安 710072;2. 宁波博德高科股份有限公司,浙江 宁波 315000;3. 西北工业大学 宁波研究院,浙江 宁波 315103)

摘　要:晶粒细化能有效降低铸造缺陷,减小晶粒尺寸,是提高 Al-Mg 合金强度和塑性的有效途径。研究了 Ti 元素对 Al-5Mg 合金晶粒细化的影响规律和机理。结果表明,Ti 元素能够有效细化 Al-5Mg 合金晶粒尺寸,与未添加 Ti 相比,添加 0.1% Ti(质量分数)的 Al-5Mg 合金的晶粒尺寸从 143.4 μm 降至 42.7 μm。其主要原因为 Ti、Zr 与 Al 原子结合形成 Al_3Ti、Al_3Zr、$Al_3(Ti, Zr)$颗粒能充当有效的异质形核核心,促进合金中细小、均匀等轴晶的形成。当 Ti 元素含量为 0.2%(质量分数)时,Al_3M 颗粒团聚粗化,形核位点数量减少,Ti 元素细化效果降低,合金的晶粒尺寸增加到 64.6 μm。当合金中 Al_3M 相尺寸越小、数量越多,分布越弥散,其细化晶粒效果越好。

关键词:Al-Mg 合金;Ti 元素;晶粒细化;微观组织;细化机理

中图分类号:TG146.21　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2024)09-0865-08

Investigation of the Grain Refinement Mechanism of Ti in Al–5Mg Alloy

LIU Jiaolong[1], CHEN Haiyan[1], CHEN Xiaojun[2], MENG Xianqi[2], LI Wenya[1], WAN Jie[1], CHEN Yuzeng[1,3]

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Ningbo Bode Hightech Co.,Ltd., Ningbo 315000, China; 3. Ningbo Institute of Northwestern Polytechnical University, Ningbo 315103, China)

Abstract: Grain refinement can enhance the strength and ductility of Al_3Mg alloys by reducing the number of casting defects and grain size. The effects of the addition of trace amounts of Ti on the microstructure and grain refinement mechanism of the Al-5Mg alloy were studied. The results show that the addition of the trace element Ti can refine the microstructure of the Al-5Mg alloy. Compared with that of the alloy without Ti, the grain size of the Al-5Mg alloy with 0.1 wt. % Ti decreases from 143.4 μm to 42.7 μm. The main reason for Ti refining grains is that Ti and Zr atoms combine with Al atoms to form $Al_3(Ti, Zr)$, Al_3Ti, and Al_3Zr particles, which provide heterogeneous nucleation sites for Al atoms, promoting the formation of microstructures with uniform and fine equiaxed grains. When the Ti content is 0.2 wt. %, the grain size of the alloy increases to 64.6 μm, and the agglomeration and coarsening of the Al_3Ti, Al_3Zr, and Al_3 (Ti, Zr) particles lead to a reduction in the number of heterogeneous nucleation sites and the effectiveness of the grain refinement of the Ti in the Al-5Mg alloy. The grain refinement effect improves as the size of the dispersed Al_3M phases in the alloy decreases and their quantity increases.

Key words: Al-Mg alloy; Ti; grain refinement; microstructure; refinement mechanism

Al-Mg 合金因具有比强度高、耐腐蚀性良好、焊接性能优异等特点,在高速铁路、航天航空领域得到了广泛应用[1]。铝合金在凝固过程中常因晶粒粗大、元素偏析问题,影响其可加工性及力学性能[2]。晶粒细化可有效减少铸造缺陷,获得细小、均匀的等轴晶[3-4],是提高 Al-Mg 合金强度和塑性的有效途径[5-6]。

晶粒细化法分为物理和化学方法[7],物理方法

收稿日期:2024-08-31

基金项目:宁波市首批重大科技攻关项目(2022Z109);国家自然科学基金(52374402);国家自然科学基金面上项目(52071262)

作者简介:刘娇龙,2000 年生,硕士生.研究方向为铝合金凝固及成形技术.Email: 2022261087@mail.nwpu.edu.cn

通讯作者:陈海燕,1984 年生,博士,教授.研究方向为表界面理论与精密钎焊技术基础和应用.Email: hychen@nwpu.edu.cn

陈豫增,1980 年生,博士,教授.研究方向为金属非平衡凝固与相变技术.Email: yzchen@nwpu.edu.cn

引用格式:刘娇龙,陈海燕,陈小军,孟宪旗,李文亚,万杰,陈豫增.Ti 元素对 Al-5Mg 合金晶粒细化机理研究[J].铸造技术,2024,45(9): 865-872.

LIU J L, CHEN H Y, CHEN X J, MENG X Q, LI W Y, WAN J, CHEN Y Z. Investigation of the grain refinement mechanism of Ti in Al-5Mg alloy[J]. Foundry Technology, 2024, 45(9): 865-872.

中国知网　https://www.cnki.net

主要包括快速冷却细化法和机械物理细化法；化学方法则是通过向熔体中添加或通过反应生成异质形核核心细化铝合金晶粒[8-10]。化学方法操作简单、成本低廉，被认为是细化合金晶粒有效又经济的方法之一。

Ti 元素作为铝合金中的常用细化剂[11]，通过与熔体中 Al 元素反应形成 Al_3Ti 颗粒，成为异质形核核心，从而达到细化晶粒的目的[12]。Ti 元素在铝合金中的作用可以通过与其他元素(Zr、Sc 等)的结合而增加[13-14]，张鑫等[15]发现 Ti 和 Zr 元素复合作用下晶粒具有良好的细化效果。然而，目前关于 Ti、Zr 元素联合作用对铝合金晶粒细化机制方面的研究较少，同时 Ti 与 Mg、Mn 等多元素之间的化学反应及其产物对 Al-Mg 合金微观组织和晶粒尺寸的影响机制尚不清楚，需要进一步研究。

本文以含 0.1%Zr(质量分数)的 Al-5Mg 合金为研究对象，采用 SEM 和 EBSD 研究了 Ti 元素对该合金微观组织细化机理和 Zr、Mg、Mn 等元素分布的影响，为通过微量元素改善 Al-Mg 组织提供理论基础。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

采用纯 Al(99.99%质量分数，下同)、纯 Mg(99.99%)、Al-20Mn、Al-10Cr、Al-10Zr 和 Al-6Ti (质量分数，%)中间合金制备 Al-5Mg 合金。首先，将所需质量的纯铝置于电阻炉中熔化，熔炼温度为 780 ℃，向熔体中加入纯 Mg 和 Al-20Mn、Al-10Cr 中间合金，待合金完全熔化且炉温降至 740 ℃后，将 Al-10Zr 和 Al-6Ti 中间合金添加至熔体中。熔体静置 5 min 完成除气，在 710 ℃时浇铸至石墨模具内。通过计算和添加不同质量分数的 Al-6Ti 合金，制备了 4 种不同 Ti 含量的 Al-5Mg 合金，采用电感耦合等离子谱仪(ICP)分析技术测量所制备合金的化学成分，测试前需将样品进行充分溶解。实际化学成分如表 1 所示。合金质量分数为 0%Ti 中不含 Ti 元素，其他 3 组合金中 Ti 元素添加量分别为 0.03%(质量分数，下同)、0.1%和 0.2%，Zr 含量保持在 0.1%不变。

表1合金化学成分

Tab.1 Chemical composition of the alloys

(mass fraction/%)

Alloys	Mg	Mn	Fe	Cr	Si	Zr	Ti	Al
0%Ti	4.9	0.87	0.11	0.08	0.04	0.1	0	Bal.
0.03%Ti	4.8	0.86	0.11	0.08	0.04	0.1	0.03	Bal.
0.1%Ti	4.8	0.87	0.12	0.08	0.04	0.1	0.1	Bal.
0.2%Ti	4.7	0.87	0.12	0.07	0.04	0.1	0.2	Bal.

1.2 实验方法

实验所得铸锭尺寸为 ϕ50 mm×100 mm，金相试样取自合金铸锭中部位置。采用 Tescan Clara GMH 场发射扫描电镜观察试样中相的形状和分布，使用 ImageJ 软件测量组织中相的尺寸和体积分数。为了分析 Ti 含量对合金晶粒尺寸的影响，采集了合金的 EBSD 图像。EBSD 金相试样制备方法如下：首先进行机械抛光，然后在体积比 1:9 的高氯酸和无水乙醇抛光液中进行电解抛光，电压为 30 V，时间 15 s，步长为 8 μm。物相分析测试采用 D8 DISCOVER 型 Co 靶 X 射线衍射仪(XRD)，扫描角度为 20°~90°，步长为 4(°)/min。

2 实验结果及讨论

2.1 相组成和元素分布

图 1 为不同 Ti 元素含量的 Al-5Mg 合金的 XRD 图谱。由图 1 可知，0%Ti 和 0.03%Ti 合金中存在明显的 Al 和 Al_6(Mn, Fe)相的衍射峰。0.1%Ti 和 0.2%Ti 合金 XRD 结果中除了出现 Al 和 Al_6(Mn, Fe)相的衍射峰外，还观察到 Al_3Zr、Al_3Ti 和 Al_3(Ti，Zr)相的衍射峰。这说明当 Al-5Mg 合金中 Ti 元素的添加超过 0.1%时，合金中会形成 Al-Ti-Zr 相。

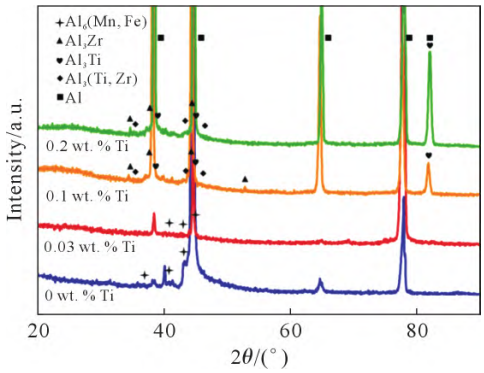

图 1 不同 Ti 含量 Al-5Mg 合金 XRD 图

Fig.1 XRD patterns of the Al-5Mg alloys with different Ti contents

Ti 元素添加量为 0%和 0.03%的 Al-5Mg 合金微观组织及元素分布如图 2 所示。由图 2a 和 c 可知，0%Ti 和 0.03%Ti 合金组织主要由 α-Al 基体和白色的第二相组成。图 2b 和 d 分别为图 2a 和 c 中黄色虚线方框区域的 SEM 图像和 EDS 面扫描结果。由图 2b 和 d 可知，第二相主要由 Al、Fe 和 Mn 元素组成。图 2b 和 d 中黄色箭头 1、2 处元素含量如表 2 所示，其 Al、Fe 和 Mn 原子之比均接近 6:1:1，结合 XRD 分析，推断该相可能为 Al_6(Mn, Fe)。0% Ti 和 0.03%Ti 合金中 Zr 元素溶解在 α-Al 基体中，并在基体中均匀分布。Mg 元素则在晶界处偏析，以

中国知网 https://www.cnki.net

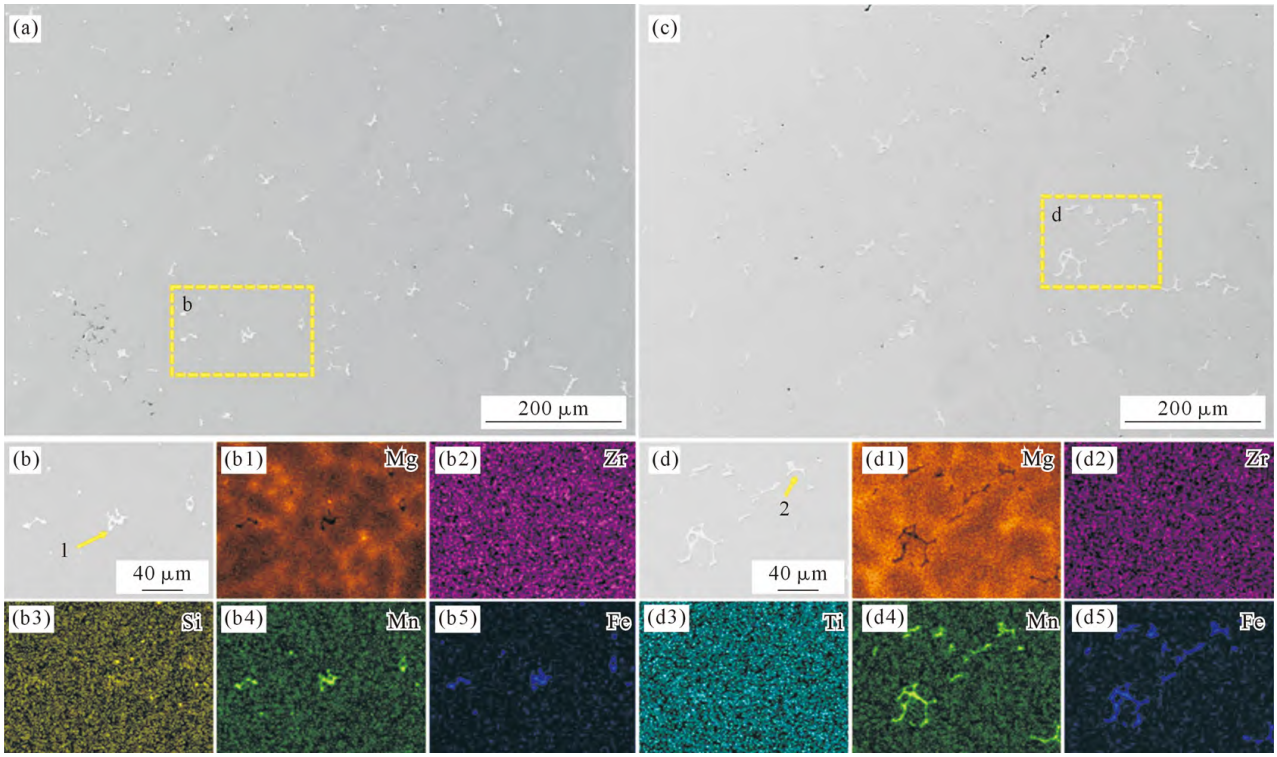

图 2　不同 Ti 含量 Al-5Mg 合金微观组织及不同元素面分析：(a, b) 0%Ti; (c, d) 0.03%Ti

Fig.2　Microstructure and elemental map analysis of Al-5Mg alloys with different Ti contents: (a, b) 0 wt. %Ti; (c, d) 0.03 wt. %Ti

表2 不同Ti含量Al–5Mg合金的EDS点扫描结果

Tab.2 EDS point results for the corresponding positions in the Al–5Mg alloys with different Ti contents

(atomic fraction/%)

Position	Mg	Mn	Fe	Cr	Si	Zr	Ti	Al
1	0.32	8.92	7.34	0.33	0.64	-	-	Bal.
2	0.42	9.81	6.54	0.42	0.53	-	-	Bal.
3	0.12	0.23	0.09	0.09	0.00	8.28	10	Bal.
4	0.33	8.76	2.34	0.05	0.02	0.03	1.75	Bal.
5	0.31	0.26	0.05	0.05	0.00	8.38	9.91	Bal.
6	0.31	0.54	0.03	0.68	0.12	-	21	Bal.
7	0.32	7.24	2.06	0.06	0.00	0.06	3.96	Bal.
8	10.42	0.96	0.00	0.08	0.03	0.05	5.95	Bal.

固溶态的形式存在于 Al-Mg 合金基体中，在合金中起固溶强化的作用。

Ti 元素添加量为 0.1%和 0.2%的 Al-5Mg 合金微观组织及元素分布如图 3 所示。由图 3a 和 c 可知，除 Al_6(Mn, Fe)相外，0.1%Ti 和 0.2%Ti 合金基体中还检测出大量球状和块状金属间化合物。黄色箭头 3 处球状相主要由 Al、Ti 和 Zr 元素组成，其原子比接近 3:1:1，结合 XRD 分析和相关文献报道[16]，推断该相为 Al_3(Ti, Zr)。黄色箭头 6 处球状相中 Al、Ti 之比接近 3:1，说明该金属间化合物为 Al_3Ti 相。结合图 1 可知，0.1%Ti 和 0.2%Ti 合金中球状相包括 Al_3Ti、Al_3Zr 和 Al_3(Ti, Zr)$_3$ 相(下文提到的球状相由 Al_3M 代替)。图 3b 和 d 分别为图 3a 和 c 中黄色虚线方框区域的 SEM 图像和 EDS 面扫描结果。图 3d 中可以观察到，块状相周围存在大量针状相聚集体(如箭头 5 所示)。点扫结果表明，该针状相为 Al_3(Ti, Zr)，显然这些团聚的针状 Al_3(Ti, Zr)相不具备成为有效形核质点的潜力。图 3b 和 d 中块状相的元素分布图表明，块状相可以被分为 Ti-Mg 相和 Ti-Mn-Fe相。

表 3 列出了不同 Ti 含量下 A1-5Mg 合金中 Al_6(Mn, Fe)相的尺寸和体积分数，由 ImageJ 软件定量统计得到。由表 3 可知，与未添加 Ti 元素的合金相比，0.03%Ti 合金中 Al_6(Mn, Fe)的尺寸从 16.48 μm 增加到 25.85 μm，这是因为微量 Ti 元素的添加有利于

表 3 不同 Ti 含量 Al–5Mg 合金中 Al_6(Mn, Fe)的尺寸和体积分数

Tab.3 Sizes and volume fractions of Al_6(Mn, Fe) in Al–5Mg alloys with different Ti contents

Alloys	0 wt. %Ti	0.03 wt. %Ti	0.1 wt. %Ti	0.2 wt. %Ti
Size/μm	16.48	25.85	12.32	10.29
Volume fraction/%	1.69	3.40	0.62	0.47

中国知网　https://www.cnki.net

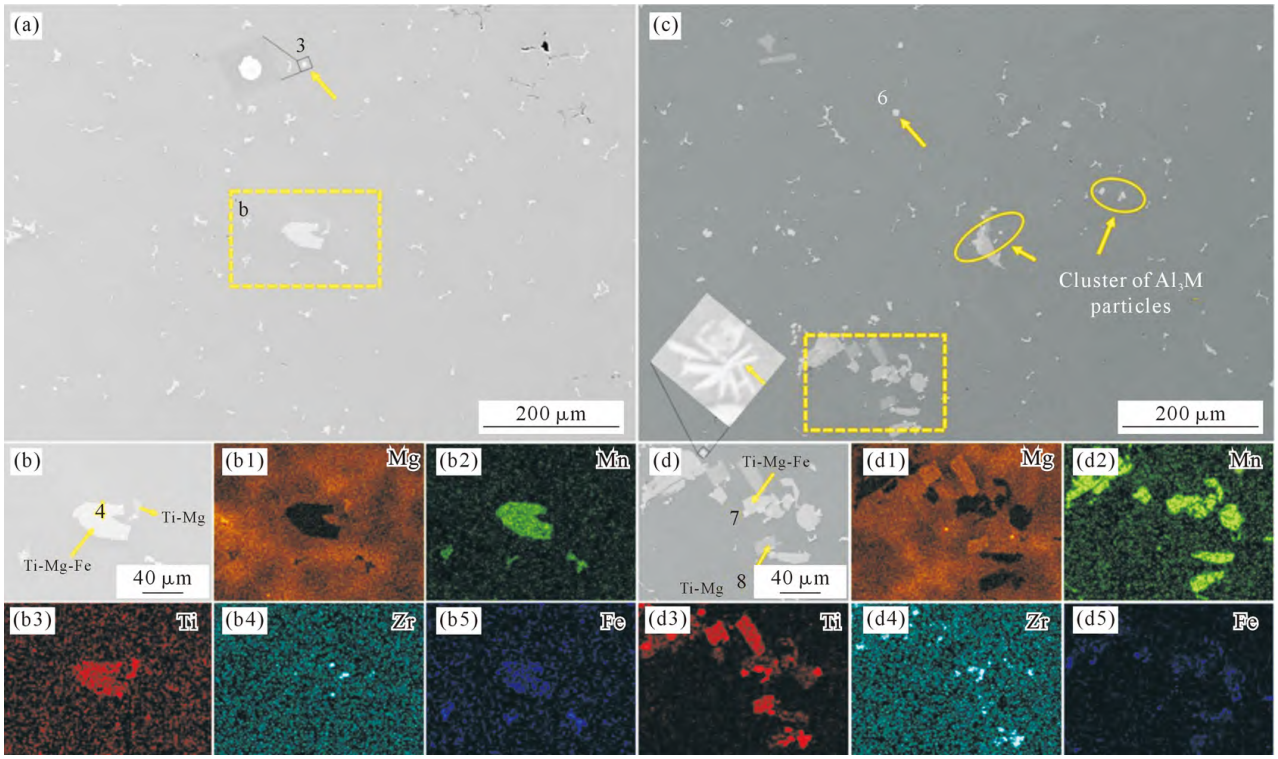

图 3 不同 Ti 含量 Al-5Mg 合金微观组织及不同元素面分析:(a, b) 0.1%Ti; (c, d) 0.2%Ti

Fig.3 Microstructure and different element map analyses of the Al-5Mg alloy with different Ti contents: (a, b) 0.1 wt. %Ti; (c, d) 0.2 wt. %Ti

促进溶质 Mn、Fe 原子的富集,从而使得Al_6(Mn, Fe)相尺寸和体积分数增加。当 Ti 元素的添加量为 0.1%时,合金开始形成球状 Al_3M 相、针状 Al_3(Ti, Zr)相和块状 Ti-Mg、Ti-Mn-Fe 相;当 Ti 元素添加量达到 0.2%时,开始出现大量尺寸不一的块状相,同时出现块状相、球状相和针状相团聚现象。Ti-Mn-Fe 相的形成消耗了大量 Mn、Fe 元素,使得合金中 Al_6(Mn, Fe)相含量与尺寸减小,导致 XRD难以检测到 0.1%和 0.2%合金中的 Al_6(Mn, Fe)相。

同时,随着合金中 Ti 元素含量的增加,Mg 元素在基体中的分布明显不同,在 0%Ti 或添加 0.03%Ti 的条件下,Mg 元素主要呈网状分布于晶界处;而在 0.1%Ti 和 0.2%Ti 合金中,Mg 元素主要在块状相周围聚集。研究表明 Zr 与 Al 原子反应生成 Al_3Zr 粒子可以细化晶粒[17],但本文研究结果表明,当 Zr含量为 0.1%(质量分数,下同)时,在 0%Ti 或添加 0.03%Ti 的条件下,Zr 元素弥散分布于基体中,并未发现 Al_3Zr 相。

2.2 Ti 含量对晶粒尺寸的影响

图 4 为不同 Ti 含量的 Al-5Mg 合金微观组织。由图 4 可知,0%Ti 合金主要由粗大的等轴晶粒组成,平均晶粒尺寸为 143.4 μm。在合金中添加0.03%Ti 后,合金的晶粒尺寸变化不大,减小至 138.2 μm;在合金中添加 0.1%Ti 后,合金的晶粒尺寸波动较大,减小至 42.7 μm;当合金中 Ti 元素的含量达到 0.2%时,晶粒增大至 64.6 μm,此时组织仍为等轴晶。

图 5 为不同 Ti 元素含量的 Al-5Mg 合金平均晶粒尺寸变化趋势,由图中可以确定细化效果较好时 Ti 元素的添加量。当 Ti 元素添加量小于 0.1%时,随着 Ti 元素添加量的增加,α-Al 的平均晶粒尺寸呈现单调下降趋势。当 Ti 元素含量超过 0.1%时,α-Al 的平均晶粒尺寸开始增加,合金晶粒整体粗化,Ti 的细化效果恶化。以上结果可以得出,Ti 元素细化含Zr Al-5Mg 合金时,两者联合作用可以显著细化合金的晶粒尺寸,当合金 Ti:Zr 元素之比适当时,Ti、Zr 元素细化作用是相容的,并不存在 Zr 中毒的问题。当合金中 Ti、Zr 含量均为 0.1%时,细化效果较佳。

2.3 Ti 对 Al–5Mg 合金的细化机理

图 6 为 0.1%Ti 合金的微观组织和相应位置元素分布图。由图 6a 和 d 可知,0.1%Ti 合金由等轴晶组成,晶粒大小分布均匀。图 6b 和 c 可以观察到基体中存在许多富 Ti、Zr 元素的第二相,这些第二相大部分位于晶内,少部分刚好位于晶界处。从图 6d 中观察到[001]取向的 α-Al 晶粒正中心存在一个富 Ti、Zr 元素的颗粒。图 6g 为图 6d~f 中黄色线框区域的高倍显微组织放大图,可以看出,该颗粒呈近球状、半径约为 3 μm,这与表 5 所示的统计结果一致。图 6h 为图 6g 中颗粒的元素分布,Al、Ti 和 Zr 元素均匀分布在颗粒中,结合 XRD 结果,分析该相为 Al_3(Ti, Zr),这与图 3a 和 c 结果一致。同时图 6h 中还

中国知网 https://www.cnki.net

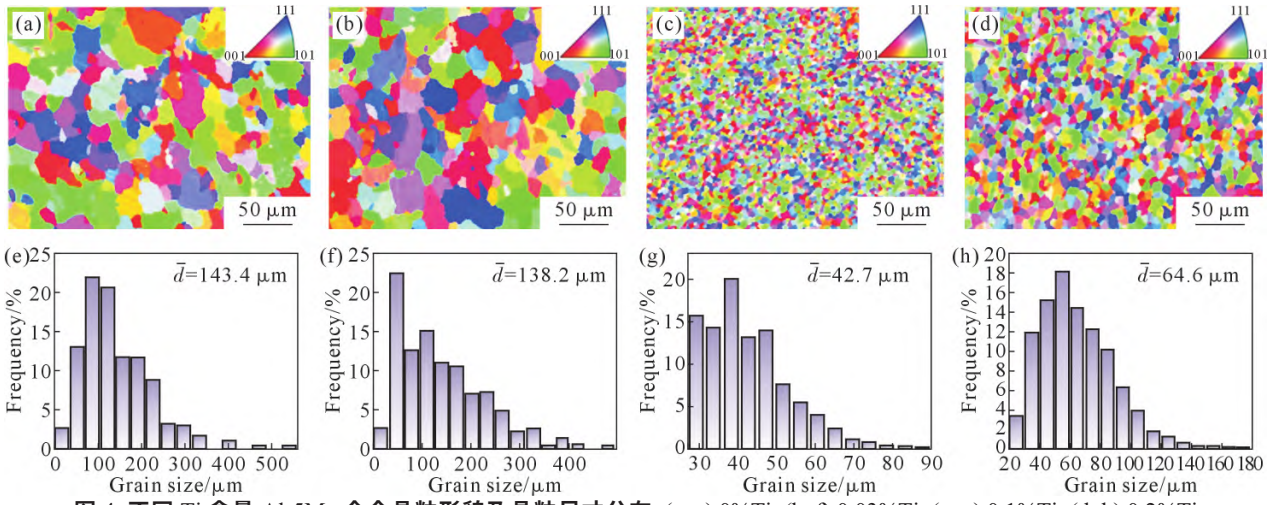

图 4　不同 Ti 含量 Al-5Mg 合金晶粒形貌及晶粒尺寸分布：(a, e) 0%Ti; (b, f) 0.03%Ti; (c, g) 0.1%Ti; (d, h) 0.2%Ti

Fig.4　Grain morphology and grain size distributions of the Al-5Mg alloys with different Ti contents: (a, e) 0 wt. % Ti; (b, f) 0.03 wt. %Ti; (c, g) 0.1 wt. %Ti; (d, h) 0.2 wt. %Ti

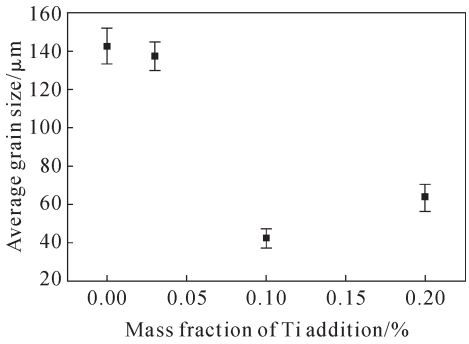

图 5　不同 Ti 含量 Al-5Mg 合金晶粒尺寸

Fig.5　Grain size of the Al-5Mg alloys with different Ti contents

观察到 $Al_3(Ti, Zr)$内部 Zr 元素含量均高于 Ti元素含量，这主要是因为 Ti 和 Zr 同是过渡族元素，核外电子结构相近，原子半径、电负性相近[18]，Ti 元素会置换 Al_3Zr 中的 Zr 元素从而形成 $Al_3(Zr, Ti)$相[19]。

以上实验结果表明，Ti 元素通过向熔体中引入异质形核核心促进晶粒成核，实现对 Al-5Mg 合金晶粒的细化，同时其细化效果与异质形核点的类型、尺寸、数量和体积分数等因素密切相关。图 7 是根据不同 Ti 含量的 Al-5Mg 合金微观组织结构和相分布情况给出的凝固过程中晶粒形核和长大的示意图。由图 7a 可知，0%Ti 合金和 0.03%Ti 合金凝固过程中并没有形成 Al_3M 异质形核核心，满足无细化剂

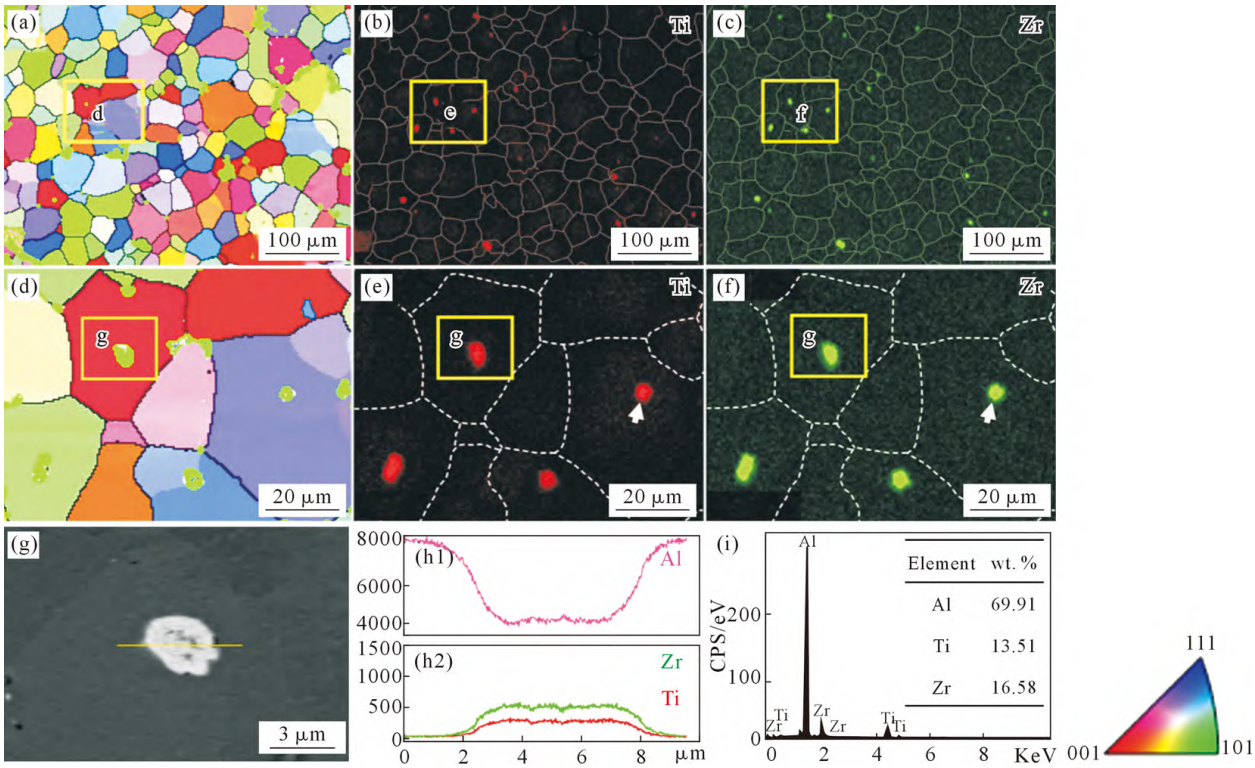

图 6　0.1%Ti 合金晶粒形貌及 EDS 分析：(a, d, g) 微观组织；(b~e, f, h1~i) EDS 分析

Fig.6　Grain morphology and EDS analysis of the 0.1 wt. % Ti alloy: (a, d, g) microstructure; (b~e, f, h1~i) EDS analysis

中国知网　https://www.cnki.net

添加下的非平衡凝固。因此，图 4 中 0%Ti 合金和 0.03%Ti 合金的微观组织是由尺寸、形态不一的等轴晶组成。0.03%Ti 合金晶粒尺寸略低于 0%Ti 合金的原因是合金中晶界处尺寸较大的 Al_6(Fe, Mn) 对晶粒的生长起到一定的阻碍作用。

由图 7b 可知，当熔体中 Ti 元素添加量为 0.1% 时，液态金属凝固过程会优先形成高熔点的 Al_3Ti 和 Al_3Zr 金属间化合物，随后 Ti、Zr 元素在 Al_3M 金属间化合物中相互取代形成 Al_3(Zr, Ti)相。表 4 列举了 Al_3M 的晶体结构和晶格常数。可以看出，Al_3M 和 Al 基体的晶体结构和晶格常数都十分相近，两相间的晶格错配度小，从而保证 Al_3M 能够成为 α-Al 良好的非均质形核核心，促进晶粒的细化[20]。这些弥散分布在熔体中的 Al_3M 颗粒，大部分会成为 α-Al 相的形核位点，凝固完成后位于晶粒中心或晶粒内部，而一些尚未成为形核核心的 Al_3M 颗粒则被生长的晶粒推向晶界。

表4 Al_3M晶体结构和晶格常数
Tab.4 Crystal structure and lattice constant of Al_3M

	Crystal structure	Lattice constant/nm
Al	Face-centered cubic	a=0.405
Al_3Ti	Cubic	a=0.387 5; c=3.387
Al_3Zr	Cubic	a=0.401 3; c=1.732

由图 7c 可知，0.2%Ti 合金的凝固过程与 0.1%Ti 合金类似，凝固过程中在金属熔体中优先形成 Al_3M 金属间化合物，其作为异质形核核心，促进晶粒形核，从而细化合金晶粒。另外根据文献[21]，当铝熔体中含有 0.12%~0.15%Ti 时，初生 Al_3Ti 在 665 ℃与液态 Al 发生包晶反应，其过程如式(1)所示。因此 0.2% Ti 合金除了通过 α-Al 相的异质形核细化晶粒外，也可以通过 Al_3Ti 相和液态 Al 之间的包晶反应达到细化晶粒的目的。

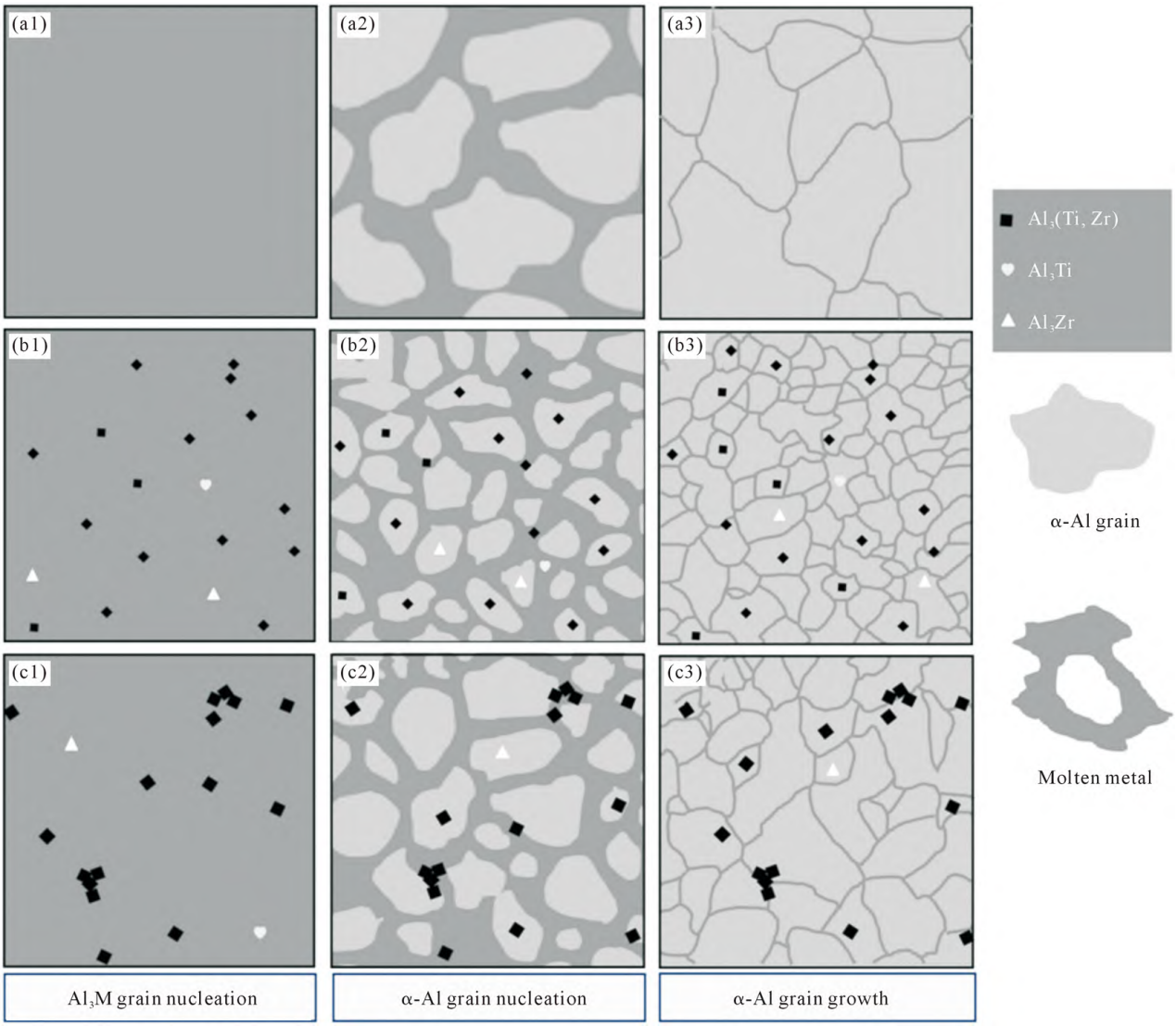

图 7 不同 Ti 含量 Al-5Mg 合金凝固过程示意图：(a1~a3) 0%Ti/0.03%Ti; (b1~b3) 0.1%Ti; (c1~c3) 0.2%Ti
Fig.7 Schematic diagram of the solidification process of Al-5Mg alloys with different Ti contents: (a1~a3) 0 wt. %Ti/0.03 wt. %Ti; (b1~b3) 0.1 wt. %Ti; (c1~c3) 0.2 wt. %Ti

中国知网 https://www.cnki.net

$$L+Al_3Ti\ (s)\rightarrow\alpha\text{-}Al(s) \quad (1)$$

表 5 列出了不同 Ti 含量下 Al-5Mg 合金中Al_3M相的尺寸、体积分数及单位面积上的个数，该数据由 ImageJ 软件定量统计得到。由表 5 可知，当合金中的 Ti 元素含量从 0.1%增加到 0.2%时，Al_3M 相的尺寸和体积分数分别增加了 1.5 倍和 2.8 倍，Al_3M 相的数量则从 1×10^3 个/cm^2 降低到 7×10^2 个/cm^2。此外，由图 3 可知，当 Ti 含量为 0.1%时，Al_3M 相在基体中弥散分布；当 Ti 含量增加到 0.2%时，Al_3M颗粒出现团聚现象。由图 5 可知，当合金中添加 0.1%Ti 时，细化晶粒的效果较好。同 0.1%Ti 合金相比，0.2%Ti 合金的晶粒尺寸开始增加，说明 Ti 元素的细化效果开始弱化，其原因在于 0.2%Ti 合金中尺寸较大的 Al_3M 颗粒和针状 $Al_3(Ti, Zr)$相的形成和团聚，使得熔体中其他位置 Ti、Zr 元素含量降低，基体中弥散分布的小尺寸 Al_3M 颗粒数量减少，有效形核位点减少，导致细化效果恶化。由上述结果可以判断，当 Ti 元素的含量能够促进熔体中 Al_3M 相的形成，并且其尺寸越小、数量越多、分布越弥散时，晶粒细化效果越好。

表 5 不同 Ti 含量 Al–5Mg 合金中 Al_3M 的尺寸和体积分数
Tab.5 The size and volume fraction of Al_3M in Al–5Mg alloys with different Ti contents

Alloy	Size of Al_3M /μm	Volume fraction of Al_3M/%	Number of Al_3M /($\times10^2$ Pcs·cm^{-2})
0 wt. %Ti	-	-	-
0.03 wt. %Ti	-	-	-
0.1 wt. %Ti	2.78	0.09	10
0.2 wt. %Ti	4.18	0.25	7

3　结论

(1)Ti 元素能够有效细化 Al-5Mg 合金晶粒尺寸，形成细小均匀的等轴晶。当合金中 Ti 元素含量为 0.1%时，晶粒尺寸由未添加 Ti 元素的 143.4 μm 降至 42.7 μm；当 Ti 元素含量为 0.2%时，晶粒尺寸为 64.6 μm，Ti 元素的细化效果弱化。

(2)Al_3M 颗粒与 Al 的共格关系良好，能充当有效的异质形核核心，促进合金形成细小、均匀的等轴晶。当合金中 Ti、Zr 含量均为 0.1%时，细化效果较好。进一步增加 Ti 元素含量会形成大尺寸 Al_3M 颗粒，并引起团聚，导致基体中异质形核颗粒减少，从而影响细化效果。

(3)当合金中 Ti 元素促进 Al_3M 相的形成，且其尺寸越小、数量越多、分布越弥散时，晶粒细化效果越好。

参考文献：

[1] GUO C, CHEN Y F, ZHANG H T, JI H P, WU Z B, LIU X G, NAAGAUMI H. Synchronous improvement of mechanical properties and corrosion resistance of novel heat-treatable 5xxx aluminum alloy by non-isothermal ageing[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 939: 168770.

[2] LI W P, MAO J, FENG J. Aluminium grain refinement by Ti(C, N) nanoparticles additions: Principles, advantages and drawbacks[J]. Metallurgical Research & Technology, 2019, 116: 212.

[3] YAN S Q, WANG H X. The Effect of small amount of titanium addition on the grain refinement and mechanical properties of ZA48 alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, 22: 1113-1119.

[4] MONTERO-SISTIAGA M L, MERTENS R, VRANCKEN B, WANG X B, HOOREWEDER B V, KRUTH J P, HUMBEECK J V. Changing the alloy composition of Al7075 for better processability by selective laser melting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 238: 437-445.

[5] HU K S, ZOU C M, WANG H W, WEI Z J. Influence of Ti elements on the evolution of microstructure, mechanical properties and thermal stability of Al-Cu alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 952: 169860.

[6] ZHAO Z, LI D X, YAN X R, CHEN Y, JIA Z, ZHANG D Q, HAN M G, WANG X, LIU G L, LIU X F, LIU S D. Insights into the dual effects of Ti on the grain refinement and mechanical properties of hypoeutectic Al-Si alloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 189: 44-59.

[7] LIU S Q, ZHAO T, FU J Y, ZU Q. Development of inoculants for aluminum alloy: A review[J]. Materials, 2023, 15: 5500-5519.

[8] WANG F, LIU Z L, QIU D, TAYLOR J A, EASTON M A, ZHANG M X. Revisiting the role of peritectics in grain refinement of Al alloys[J]. Acta Materialia, 2013, 1: 360-370.

[9] HIROKI A, KOZO S, KEN K, JUN K S. Effect of Zr addition on dynamic recrystallization during hot extrusion in Al alloys[J]. Materials Transactions, 2005, 2: 211-214.

[10] YAO H, XU X J, ZHANG R K, ZHANG P, SUN Z W, WANG H. Effect of Ti and Ce microalloy on microstructure and properties of Al-Si-Cu-Zr-Sr cast aluminum alloy[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater, 2023, 4: 897-902.

[11] ZHANG Y, YAN F, ZHAO Y H, SONG C L, HOU H. Effect of Ti on microstructure and mechanical properties of die-cast Al-Mg-Zn-Si alloy[J]. Materials Research Express, 2020, 7(3): 036526.

[12] GAIROLA S, JAYAGANTHAN R, AJAY J. Laser powder bed fusion on Ti modified Al 2024 alloy: Influence of build orientation and T6 treatment on mechanical behaviour, microstructural features and strengthening mechanisms[J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 896: 146296.

[13] FENG J, YE B, ZUO L J, QI R J, WANG Q D, JIANG H Y, HUANG R, DING W J, YAO J, WANG C T. Effects of Zr, Ti and Sc additions on the microstructure and mechanical properties of Al-0.4Cu-0.14Si-0.05Mg-0.2Fe alloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34: 2316-2324.

中国知网　https://www.cnki.net

[14] SAMUEL E, ZEDAN Y, SAMUEL A M, SAMUEL F H. An experimental study of the effect of Ag, Cu, Li, Mg, Ni, Ti, Sc, Zr on grain refining in binary and multicomponent Al-based alloys[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 30: 332-347.

[15] 张鑫，杨成刚，吴杰杰，张嘉祺，杨龙威，管仲达. Ti、Zr 对纯铝组织和性能的复合影响[J]. 铸造技术，2021, 42(9): 754-75.
ZHANG X, YANG C G, WU J J, ZHANG J Q, YANG L W, GUAN Z D. Combined effects of Ti and Zr on microstructure and property of pure aluminum[J]. Foundry Technology, 2021, 42(9): 754-75.

[16] XU D B, LONG W, ZHOU X Q. Microstructure and corrosion resistance of Al_3(Zr, Ti)/Al composite prepared by powder metallurgy[J]. Advanced Composites Letters, 2020, 29: 1-9.

[17] 孙红梅，刘翠玲，陈健，房洪杰. 微合金化元素 Zr 对 5083 铝合金组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2023, 3: 263-268.
SUN H M, LIU C L, CHEN J, FANG H J. Effect of microalloying element Zr on microstructure and properties of 5083 aluminum alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2023, 3: 263-268.

[18] 刘潇，杨昇，赵艳. Ti 对耐热导电铝合金微观组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金，2011, 9: 862-865.
LIU X, YANG S, ZHAO Y. Effects of Ti on microstructure and properties of heat resistant conductive aluminum alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2011, 9: 862-865.

[19] 徐道兵，龙威，周小平. 粉末冶金 Al_3(Zr, Ti)/Al 复合材料的组织与性能[J]. 材料热处理学报，2020, 4: 19-25.
XU D B, LONG W, ZHOU X P. Microstructure and properties of powder metallurgy Al_3(Zr,Ti)/Al composites[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2020, 4: 19-25.

[20] 国旭明，杨成刚，钱百年，徐强，张洪延. 孕育剂 Ti, Zr 对 2219 Al-Cu 合金焊缝组织及性能的影响[J]. 金属学报，2005, 4: 397-401.
GUO X M, YANG C G, QIAN B N, XU Q, ZHANG H Y. Effects of inoculants Ti and Zr on the microstructure and properties of 2219 Al-Cu alloywelds[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2005, 4: 397-401.

[21] MOHANTY P S, GRUZLESKI J E. Mechanism of grain refinement in aluminium[J]. Acta Metallurgica, 1995, 43: 2001-2012.

中国知网 https://www.cnki.net