

# Nd 元素对反重力浇注 ZL116 合金组织和力学性能的影响

何益可<sup>1</sup>, 周中波<sup>1</sup>, 林琳<sup>1</sup>, 曹博君<sup>2</sup>, 李小军<sup>1</sup>, 黄旗<sup>1</sup>

(1. 西安西工大超晶科技发展有限公司, 陕西西安 710016; 2. 吉林大学, 吉林长春 130000)

**摘要:** 通过OM、XRD、SEM以及室温拉伸试验等方法, 开展了Nd元素对反重力浇注ZL116合金显微组织和力学性能的影响研究。结果表明: 当Nd元素含量小于0.1%时, 随着Nd元素含量的提高, ZL116合金的抗拉强度和伸长率均有所提高。Nd元素主要分布在共晶Si相周围, 阻碍共晶Si相的长大, 进而可以促进ZL116合金中的长条状共晶Si转化为颗粒状, 即: Nd元素对ZL116合金中共晶相具有变质作用, 可以促进共晶Si的球化。

**关键词:** Nd元素; ZL116合金; 反重力浇注; 力学性能; 显微组织

ZL116合金在Al-Si系合金中具有很高的强度和韧性, 以及良好的铸造性能、气密性、抗热裂性, 可以铸造出形状复杂的高强度铸件, 现已被广泛应用于航空航天、重要的民用零部件领域<sup>[1-5]</sup>。然而ZL116合金中拥有大量的针状共晶Si相和粗大的 $\alpha$ -Al相, 这会对铝合金的力学性能产生不利的影 响, 在一定程度上限制了其更大规模的使用<sup>[6-8]</sup>。反重力铸造利用外加压力使金属液沿着与重力相反的方向自下而上充型并凝固成形, 其具有充型平稳, 充型速率可控等特点, 使铸件在压力下凝固, 有利于铸件补缩, 生产出来的铸件组织致密, 力学性能更为优异, 因此现阶段大多数高质量要求的铝合金均采用反重力铸造工艺生产<sup>[9-10]</sup>。

在铝合金中加入少量的稀土元素可以对其具有变质、净化以及细化晶粒的作用<sup>[11-16]</sup>。目前关于稀土Nd元素的研究主要集中在镁合金中领域, Nd元素的加入可以提高镁合金的常温、高温力学性能<sup>[17-21]</sup>。近年来关于Nd元素对Al-Si系合金力学性能的影响备受关注<sup>[22-24]</sup>, 石为喜等<sup>[25-30]</sup>采用Nd元素对Al-17.5%Si过共晶合金进行变质, 研究发现: 经过变质处理的过共晶铝硅合金中Si相的晶格常数和孪晶密度增加, 合金的极限抗拉强度和伸长率分别提高了35.8%和175%。然而关于稀土Nd元素对Al-Si系合金的影响机制研究以及实际的性能影响仍然有所欠缺。

因此, 本文针对不同微量稀土Nd元素含量的ZL116合金, 开展了反重力浇注方式下的力学性能和显微组织研究。本文以HB962中ZL116合金为成分设计基础依据, 采用不同的反重力浇注方式, 围绕Nd元素对ZL116合金显微组织和力学性能的影响展开研究。

## 1 试验材料与方 法

以99.99%高纯铝、AlSi12A中间合金、99.99%精镁锭、Al5Ti、AlBe3、Al-30Nd中间合金以及ZL116合金锭为原料, 采用150 kg、加热功率75 kW电阻坩埚炉进行合金熔炼。合金经过熔化、氩气悬吹精炼、撇渣静置之后, 将温度调整至720~730 ℃, 采用表1所示的反重力浇注方式, 最终浇注成板状试样。试样尺寸为180 mm × 40 mm × 12 mm, 试样结构如图1所示。

采用OBLF-QSN-II发射光谱仪检测ZL116合金的成分, 结果如表2所示。采用

作者简介:

何益可(1992-), 男, 硕士, 主要从事铸造、有色稀有金属研究。电话: 029-86512229, E-mail: 18710973295@163.com

中图分类号: TG146.21  
文献标识码: A  
文章编号: 1001-4977(2019)10-1098-06

收稿日期:

2019-05-20 收到初稿,  
2019-06-19 收到修订稿。

XRD进行不同成分配比的ZL116合金第二相检测。

对所有试样同炉进行T5热处理：固溶温度为 $(535 \pm 5)^\circ\text{C}$ ，保温时间为10 h；淬火转移时间小于10 s，淬火介质为50~60  $^\circ\text{C}$ 水，水中保温时间为4~5 min。时效温度为 $(175 \pm 5)^\circ\text{C}$ ，保温时间为6 h，出炉空冷。

所需显微组织试样，经打磨、机械抛光后，使用1 mL氢氟酸+1.5 mL硝酸+2.5 mL盐酸+95 mL蒸馏水的溶液进行腐蚀，腐蚀时间为15 s，然后用酒精吹洗干净，在EPIPHOT 300型金相显微镜上观察试样显微组织。采用Quanta FEI 400场发射扫描电镜针对共晶Si的形貌展开进一步的表征分析。

对于不同成分以及不同浇注方式下的板状试样，选取同位置加工成棒状拉伸试样，拉伸试样标距为40 mm，中间直径为6 mm（如图2所示）。在DDL50电子万能拉伸试验机上进行拉伸测试，拉伸速度为2 mm/min，每组测定3根试棒，最终取平均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 Nd元素对ZL116A合金力学性能的影响

图3a和b分别为不同Nd元素含量对ZL116合金T5热处理后抗拉强度和伸长率影响的数据曲线。由图可见，本试验在反重力差压、低压、调压以及重力浇注时，随着Nd元素含量的提高，ZL116合金抗拉强度和伸长率也随之提高，抗拉强度最高值分别可以达到344 MPa、

335 MPa、315 MPa、324 MPa，伸长率最高值分别达到4.8%、4.5%、3.7%、4.1%。从图3中还可以看出，ZL116h合金反重力差压、低压浇注试样明显高于HB962中的规定要求，进一步证明了反重力浇注方式在高性能铝合金生产中的优越性。

### 2.2 Nd元素对ZL116合金组织的影响

由于调压、重力浇注的ZL16合金力学性能相对于差压、低压浇注较差，因此选取最具有代表性的反重力差压、低压浇注的ZL116合金显微组织展开研究分析。图4为不同Nd元素含量的ZL116合金差压浇注的

表1 ZL116合金浇注工艺参数  
Table 1 Casting technological parameters of ZL116 alloy

项目	重力浇注	低压浇注	差压浇注	调压浇注
同步建压/kPa			500	-60
浇注温度/ $^\circ\text{C}$	$720 \pm 2$	$720 \pm 2$	$720 \pm 2$	$720 \pm 2$
浇注时间/s	2			
铸型温度/ $^\circ\text{C}$	常温	常温	常温	常温
升液速度/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$		100	100	100
充型速度/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$		100	100	100
充型压力差/kPa		35	35	35
结晶时间/s		120	120	120
热处理制度	T5	T5	T5	T5

表2 ZL116合金成分  
Table 2 Chemical composition of ZL116 alloy

元素	Nd	Ti	Mg	Si	Be	Fe	Zr	Cu	Zn	Mn	Sn	Pb	$w_B/\%$
配比值	0.02/0.05/0.1	0.20	0.45	7.5	0.30	0.02	0.05	0.01	0.01	0.01	-	-	
试样1	0.02	0.22	0.43	7.5	0.31	0.05	0.07	-	-	-	-	-	
试样2	0.05	0.23	0.44	7.3	0.32	0.06	0.06	-	-	-	-	-	
试样3	0.11	0.21	0.44	7.7	0.31	0.06	0.08	-	-	-	-	-	

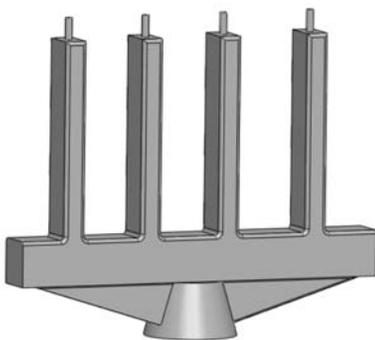


图1 板状试样  
Fig. 1 Plate specimens



图2 拉伸试样  
Fig. 2 Tensile specimen

铸态组织, 图5为不同Nd元素含量的ZL116合金低压浇注的铸态组织, 图6为不同Nd元素含量的ZL116合金差压浇注的T5热处理后组织, 图7为不同Nd元素含量的ZL116合金低压浇注的T5热处理后组织。

从图4和图5中可以看出, 合金铸态显微组织主要由 $\alpha$ -Al基体相、共晶Si相、以及 $Mg_2Si$ 强化相组成。当Nd元素加入量0.02%时, ZL116合金的中Si相出现明显的细化, 且其Si相部分形貌由长针状开始转化为短条

状, 随着Nd元素含量的增加, ZL116合金中的Si相细化更为明显, 部分Si相已经开始由短条状转化为球状。从图6和图7中可以看出, ZL116合金经过T5热处理之后, 共晶Si相得到了进一步的细化, 而且Si相短条状开始趋于圆整化。这是由于Nd元素可以改善ZL116合金的共晶硅形貌, 使其呈球状分布, 同时其成分过冷也可以细化晶粒<sup>[31]</sup>, 最终提高ZL116合金的综合力学性能, 这与图3中的ZL116合金力学性能变化曲线结果相一致。

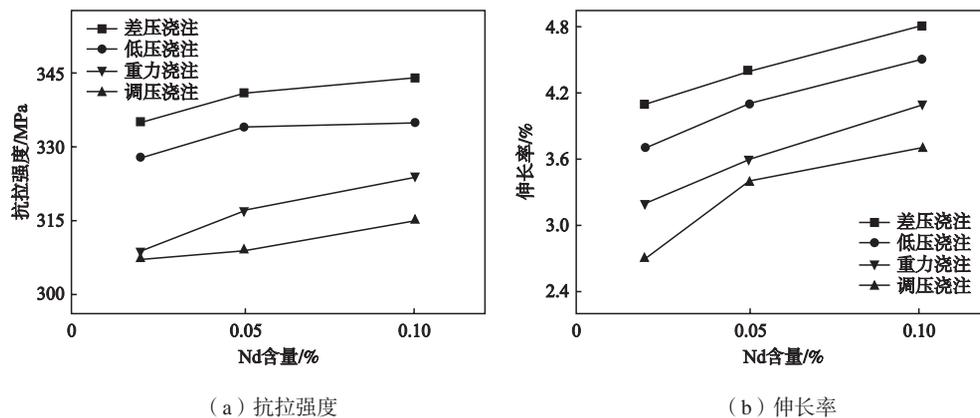


图3 Nd元素对ZL116合金力学性能影响数据曲线

Fig. 3 Mechanical properties curves of ZL116 alloy with different Nd contents

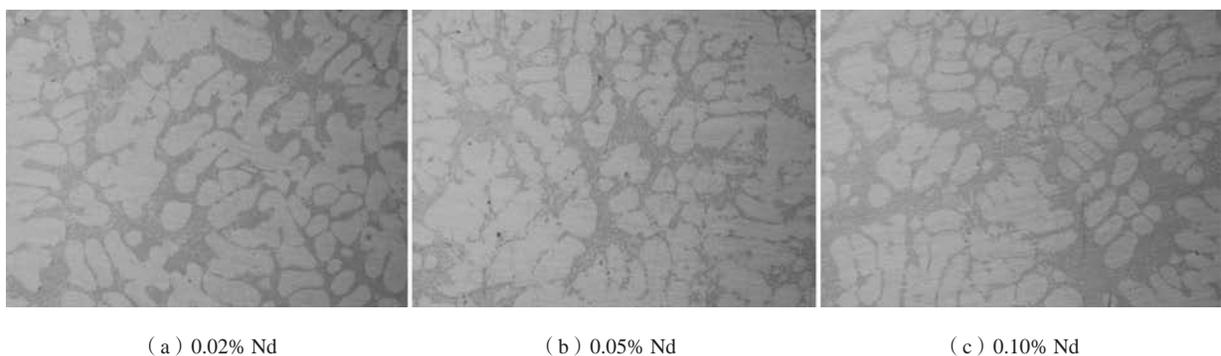


图4 不同Nd元素含量ZL116合金差压浇注铸态组织

Fig. 4 OM microstructures of as-differential pressure cast ZL116 alloy with different Nd contents

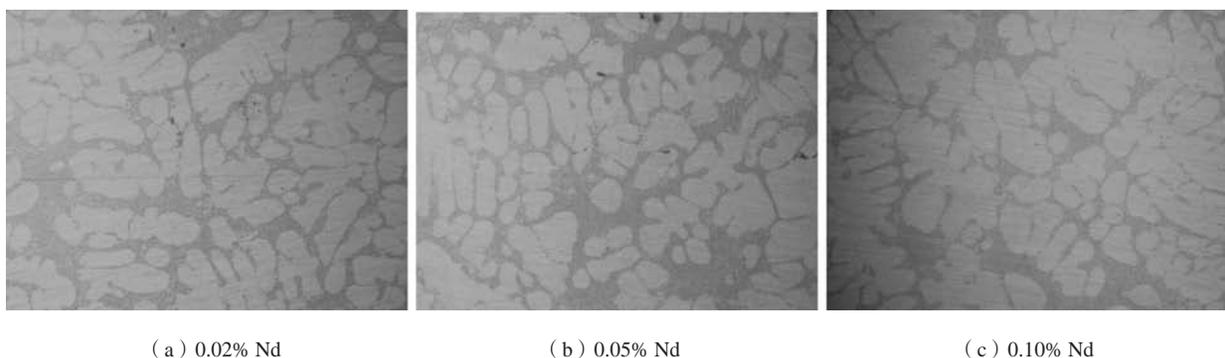


图5 不同Nd元素含量ZL116合金低压浇注铸态组织

Fig. 5 OM microstructures of as-low pressure cast ZL116 alloy with different Nd contents

### 2.3 Nd元素对ZL116合金的强化机理

为研究Nd元素对ZL116合金的强化机理,采用扫描电镜观察不含有Nd元素和Nd元素含量为0.1%的ZL116合金T5热处理后的共晶Si形貌。从图8a可以看出,当ZL116合金中不含有Nd元素时,共晶Si相主要以长条状和细长颗粒状为主;当ZL116合金中Nd元素含量为0.1%时,共晶Si大多数转化为颗粒状,如图8b所示。Nd元素可以促进ZL116合金中共晶Si的球化,由长条状转化为颗粒状,进而提高ZL116合金的力学性能。

为进一步查明Nd元素对ZL116合金共晶Si形貌的影

响机理,对Nd元素含量0.1%的T5热处理后ZL116合金试样进行能谱分析。图9为ZL116合金试样能谱的背散射扫描位置图,图10为相对应的能谱分析结果。由于Nd元素在ZL116合金中属于比重较大的元素,因此在背散射扫描面下,呈现为明亮的组织分布。结合图9、10中1、2点的元素分析结果可以看出,Nd元素富集在 $\alpha$ -Al和共晶Si区域,从侧面也可以反应出:稀土Nd元素易于聚集在共晶Si相周围,阻碍共晶Si的长大,并且诱发形成大量的凹角,使得共晶Si由粗大的板平状转化为颗粒状,这与文献[32]和[33]中的研究结果具有一致性。



(a) 0.02% Nd

(b) 0.05% Nd

(c) 0.10% Nd

图6 不同Nd元素含量ZL116合金差压浇注T5热处理后组织

Fig. 6 OM microstructures of differential pressure cast and T5 solution treated ZL116 alloy with different Nd contents



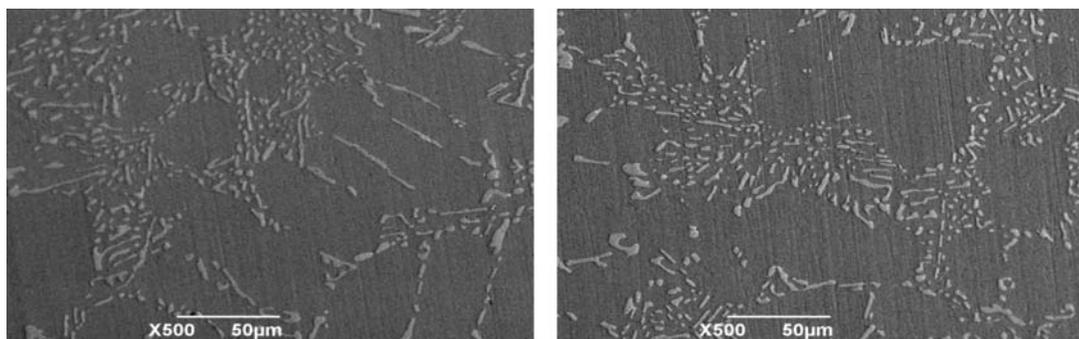
(a) 0.02% Nd

(b) 0.05% Nd

(c) 0.10% Nd

图7 不同Nd元素含量ZL116合金低压浇注T5热处理后组织

Fig. 7 OM microstructures of low pressure cast and T5 solution treated ZL116 alloy with different Nd contents



(a) 无Nd

(b) 0.1%Nd

图8 ZL116合金T5热处理后共晶Si形貌组织

Fig. 8 Eutectic Si morphology of T5 solution treated ZL116 alloy without and with 0.1% Nd addition

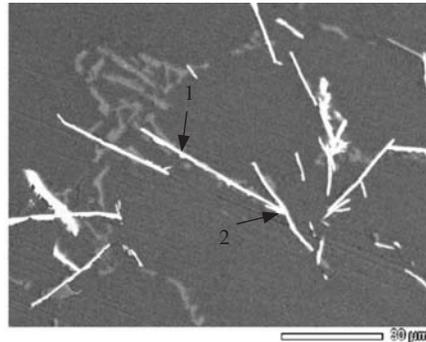
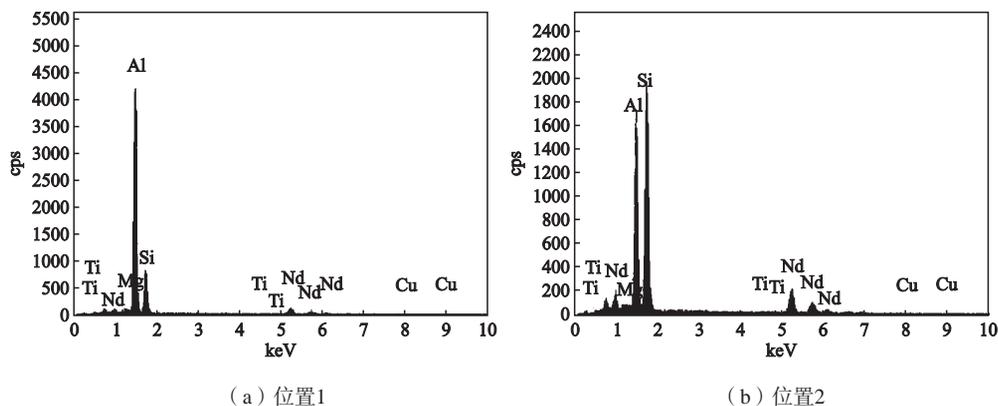


图9 ZL116合金的点扫描位置图

Fig. 9 EDS point scanning of T5 solution treated ZL116 alloy



(a) 位置1

(b) 位置2

图10 图9中相对应的区域的元素EDS分析结果

Fig. 10 Atomic contents of elements at zones 1 and 2 in Fig.9

### 3 结论

(1) 差压浇注下ZL116合金的抗拉强度和伸长率最高, 其后依次为低压、重力、调压浇注。

(2) 随着Nd元素含量的提高, ZL116合金的抗拉强度也随之提高; 当Nd元素含量为0.1%时, 分别采用差压、低压、重力、调压浇注方式, ZL116合金抗拉强度最高依次可以达到344 MPa、335 MPa、315 MPa、

324 MPa。

(3) 随着Nd元素含量的提高, ZL116合金的伸长率也随之提高; 当Nd元素含量为0.1%时, 分别采用差压、低压、重力、调压浇注方式, ZL116合金伸长率最高依次可以达到4.8%、4.5%、3.7%、4.1%。

(4) Nd元素主要分布在共晶Si相周围, 可以促进共晶Si相发生球化, 对ZL116合金具有一定的变质作用。

#### 参考文献

- [1] 潘复生, 张丁非. 铝合金及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [2] 彭晋民, 钱翰城. 铸态铸造铝硅合金的现状和发展 [J]. 铸造技术, 2000 (6): 32.
- [3] 戴晓元, 夏长清, 吴安如, 等. 含钕超高强铝合金的研究现状及发展趋势 [J]. 材料导报, 2006, 20 (5): 104-107.
- [4] 焦登宁, 王旭飞, 谭飞, 等. 汽车铝合金材料的应用与发展 [J]. 山东工业技术, 2019 (6): 5.
- [5] 王进, 孙玉桃, 贾兴隆. 铝合金在通信塔中的应用与研究 [J]. 江苏建筑, 2019 (1): 91-94.
- [6] 李建峰, 李金山, 寇宏超, 等. 熔体处理对A357合金枝晶搭接点的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2006, 16 (3): 470-475.
- [7] 胡欧林, 李鹏飞, 芦富敏, 等. Mg和Cu含量对Al-Si-Mg系合金组织和性能的影响 [J]. 上海金属, 2019, 41 (1): 20-24.
- [8] 王剑, 曹东, 许德英. 高导热共晶Al-Si合金的制备及其性能 [J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38 (4): 441-445.
- [9] 王英杰. 铝合金反重力铸造技术 [J]. 铸造技术, 2004, 25 (5): 361-362.
- [10] 李胜君, 程俊明, 吕永强, 等. 铝合金反重力铸造成型热芯盒浇注系统的研究 [J]. 中国铸造装备与技术, 2019, 54 (1): 41-44.
- [11] 杜挺. 稀土元素在金属材料中的一些物理化学作用 [J]. 金属学报, 1997, 33 (1): 69-77.
- [12] FERRO R, SACCONI A, BORZORIE G. Rare earth metals in light alloys [J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 1997, 15

- (1): 57-61.
- [13] 林德源, 李一, 陈云翔, 等. 稀土在铝合金防腐中的应用 [J]. 稀土, 2016, 37 (6): 121-127.
- [14] 刘春海, 李天, 吴大勇, 等. 稀土Ce对Al-7Si-0.7Mg-0.2Fe合金组织和性能的影响 [J]. 铸造, 2019, 68 (2): 152-157.
- [15] 余静喜, 伍玉娇, 龙琼, 等. 稀土元素Y与Cu复合添加对Al-Mg-Si系钎料性能的影响 [J]. 上海金属, 2018, 40 (5): 40-45.
- [16] 彭竹琴, 李俊魁, 卢金斌, 等. 稀土CeO<sub>2</sub>对AlCoCuFeMnNi高熵合金组织与性能的影响 [J]. 材料工程, 2018, 46 (8): 91-97.
- [17] 黄晓锋, 王渠东, 曾小勤, 等. 钕对Mg-5Al-1Si高温蠕变及组织性能的影响 [J]. 中国稀土学报, 2004, 22 (3): 361-364.
- [18] 迟大钊, 吉泽升, 梁维中. Mg-Nd-Zr-Zn合金的制备及钕对合金组织性能的影响 [J]. 中国稀土学报, 2004, 22 (2): 251-253.
- [19] 赫国强, 董晟全, 梁艳峰, 等. 稀土Y和Ce元素对铸造Mg-Al-Zn合金组织和性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2019 (3): 42-48.
- [20] MENG S J, YU H, FAN S D, et al. Recent progress and development in extrusion of rare earth free Mg alloys: A review [J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2019.
- [21] 张翼. Zr含量对ZL114A合金微观组织与力学性能的影响 [J]. 铸造, 2018, 67 (4): 349-353.
- [22] 戴景杰, 张丰云, 王阿敏, 等. Nb掺杂对Ti-Al合金化层抗高温氧化性能的影响 [J]. 材料工程, 2017, 45 (2): 24-31.
- [23] 郭永春, 郭松松, 李建平. 稀土Nd对活塞用Al-Si合金显微组织和力学性能的影响 [J]. 稀有金属, 2017, 41 (10): 1069-1076.
- [24] HAN L, SUI Y, WANG Q, et al. Effects of Nd on microstructure and mechanical properties of cast Al-Si-Cu-Ni-Mg piston alloys [J]. Journal of Alloys & Compounds, 2017, 695: 1566-1572.
- [25] 石为喜, 高波, 涂赣峰, 等. Nd变质过共晶Al-17.5%Si合金的微观组织和断口形貌 [J]. 中国有色金属学报, 2011, 21 (4): 719-725.
- [26] 吴双, 龚成云, 林兆富, 等. Al-Si-Cu系铸造铝合金的热处理 [J]. 金属热处理, 2017, 42 (9): 57-60.
- [27] 牛艳萍, 赖心, 马文花, 等. Sr变质对铸造Al-Si-Mg合金组织与性能的影响 [J]. 有色金属加工, 2017, 46 (2): 10-13.
- [28] TOSCHI S. Optimization of A354 Al-Si-Cu-Mg alloy heat treatment: effect on microstructure, hardness, and tensile properties of peak aged and overaged alloy [J]. Metals, 2018, 8 (11): 961.
- [29] AHN S S, PATHAN S, KOO J M, et al. Enhancement of the mechanical properties in Al-Si-Cu-Fe-Mg alloys with various processing parameters [J]. Materials, 2018, 11 (11).
- [30] JING L J, PAN Y, LU T, et al. Refinement effect of two rare earth borides in an Al-7Si-4Cu alloy: A comparative study [J]. Materials Characterization, 2018, 145: 664-670.
- [31] 刘冀尧, 王文焱, 陈玉勇, 等. 添加Nd元素对Ti-6Al-4V-2Cr组织与性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2017, 38 (7): 44-49.
- [32] LU S Z, HELLAWEELL A. The mechanism of silicon modification in aluminum-silicon alloys: Impurity induced twinning [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 1987, 18A: 1721-1733.
- [33] 蔡厚道. 稀土元素Nd变质对ZL101铝合金的显微组织与力学性能的影响 [J]. 铸造, 2015, 64 (6): 499-503.

## Effect of Nd Addition on Microstructure and Mechanical Properties of ZL116 Alloy by Counter-Gravity Casting

HE Yi-ke<sup>1</sup>, ZHOU Zhong-bo<sup>1</sup>, LIN Lin<sup>1</sup>, CAO Bo-jun<sup>2</sup>, LI Xiao-jun<sup>1</sup>, HUANG Qi<sup>1</sup>

(1. Xi'an Supercrystal Science & Technology Development Co., Ltd., Xi'an 710016, Shaanxi, China; 2. Jilin University, Changchun 130000, Jilin, China)

### Abstract:

The effect of Nd addition on the microstructure and mechanical properties of ZL116 alloy by counter-gravity casting was investigated by means of OM, XRD, SEM and tensile testing. The results showed an increase in tensile strength and elongation when the Nd content was less than 0.1%. Nd element distributed around the eutectic Si resulted in the growing eutectic Si phase hindered and the stripe eutectic Si transformed into granular shape. So it can be concluded that Nd addition can modify the eutectic Si and promote the spheroidizing of eutectic Si phase in the ZL116 alloy.

### Key words:

Nd element; ZL116 alloy; counter-gravity casting; mechanical properties; microstructure