# 高强韧 AI-Si-Mg 合金材料设计与制备

### 姜 坤<sup>1</sup>,赵 凯<sup>1</sup>,林 翰<sup>2</sup>,刘桂亮<sup>3</sup>,阎汐睿<sup>1</sup>,刘相法<sup>1</sup>

(1.山东大学材料液固结构演变与加工教育部重点实验室,山东济南 250061;2.贵州航天风华精密设备有限公司铸造工程中心,贵州贵阳 550000;3.山东吕美熔体技术有限公司,山东济南 250061)

**摘要:**:为获得高强韧Al-Si-Mg合金,以亚共晶Al-Si-Mg合金为研究对象,探究了ASN晶种 合金对其组织及室温力学性能的影响。试验结果表明:未添加ASN晶种合金时,Al-Si-Mg合 金中α-Al晶粒粗大,枝晶发达,共晶组织分布不均匀;而向Al-Si-Mg合金中添加1%的ASN 晶种合金后,α-Al晶粒得到一定细化,枝晶生长受到抑制,共晶组织分布较弥散均匀;此 外,引入ASN晶种合金后,Al-Si-Mg合金的布氏硬度由HBW107.8提升至HBW127.4,提高了 18.2%;室温抗拉强度由325 MPa提升至390 MPa,屈服强度由240 MPa提升至345 MPa,分别 提高了20.0%和43.8%。ASN晶种合金有效地改善了Al-Si-Mg合金的组织,提高了其室温力学 性能,从而获得了高强韧Al-Si-Mg合金。

关键词:Al-Si-Mg合金;ASN晶种合金;微观组织;力学性能;高强韧

Al-Si合金铸造性能优良、热裂倾向性小、流动性好,同时具有良好的耐腐蚀 性,是应用最为广泛的铸造铝合金。随着工业化的进行,常在Al-Si合金中添加Mg元 素形成Al-Si-Mg合金。Al-Si-Mg合金通过热处理可以明显提高合金的强度,并已广泛 应用于汽车自动化、电子设备、建筑等领域<sup>[1-5]</sup>。但是Al-Si-Mg合金铸件中α-Al枝晶 粗大,共晶Si易团聚,呈现粗大的珊瑚状或者长针状,严重割裂了基体,导致合金塑 韧性降低<sup>[6-8]</sup>。并且随着轻量化高性能铝合金的需求不断扩大,制备获得高强韧Al-Si-Mg合金受到了越来越多人的关注。

当前,国内外获得高强韧Al-Si-Mg合金的方法有合金化、熔体处理、成分优 化、热处理等,但是均无法稳定且高效地获得高强韧Al-Si-Mg合金。而ASN晶种合 金中富含大量弥散、稳定的AlN颗粒。AlN具有较低的密度、高热导率和低热膨胀 系数等优点,是一种有效的增强相,在合金中可发挥一定的强化作用<sup>[9-11]</sup>。根据胡恺 琪等人<sup>[12-14]</sup>的研究发现:将纳米AlN颗粒(以下简称AlNp)引入Al-Si合金后,纳米 AlNp能够阻碍α-Al枝晶的生长,使α-Al晶粒得到细化,并且能够在一定程度上改 善共晶Si的分布,对共晶Si产生稳定变质效果,调控共晶Si的尺寸及形貌,进而获得 了高强韧Al-Si合金。本文主要目的是获得高强韧Al-Si-Mg合金;介绍了制备获得Al-Si-Mg合金,通过添加ASN晶种合金对其进行优化,研究了ASN晶种合金对Al-Si-Mg 合金组织和力学性能的影响。

# 1 材料与方法

试验所用原料为高纯铝锭(纯度为99.99%,除特殊说明外,以下成分均为质量 分数)、高纯Si(纯度为99.9%)、工业纯Mg(纯度为99.7%)、ASN晶种合金(均 由山东吕美熔体技术有限公司提供)。将高纯铝锭在井式电阻炉内加热,待其熔化 后依次加入高纯Si、工业纯Mg,并在730℃下保温。将预热后的ASN晶种合金以中 间合金形式加入到合金熔体内,并用石墨棒持续搅拌,使ASN晶种合金均匀地分散 在熔体内,ASN晶种合金的添加量为1%(为方便描述,添加ASN晶种合金后简称Al-

作者简介:

姜 坤(1995-),男,硕
士,主要研究方向为亚共
晶 Al-Si 合金强韧化及细
化探究。
通讯作者:
刘相法,男,教授,博士,
博士生导师。E-mail: xfliu@ sdu.edu.cn

中图分类号:TG146.2 文献标识码:A 文章编号:1001-4977(2021) 06-0681-06

#### 基金项目:

国家自然科学基金(51731007& 52071189);济南市"高校 20条"资助自主创新培养 团队项目(2019GXRC002)。 收稿日期: 2021-01-19收到初稿, 2021-03-29收到修订稿。 Si-Mg-ASN)。熔体于在730 ℃下保温15 min后,使用 C<sub>2</sub>Cl<sub>6</sub>精炼剂(约占合金总质量的0.3%)对熔体进行精 炼处理。待熔体温度回升至710 ℃时,将熔体浇入抗拉 试棒模具及KBI环模,模具预热温度300 ℃。两种合金 的化学成分见表1。根据国标要求加工室温拉伸试棒, 如图1所示。合金在进行力学性能测试之前,对其进行 T6热处理。热处理工艺为:540 ℃下固溶20 h,淬火; 170 ℃下时效12 h,空冷。

使用光学显微镜、场发射扫描电子显微镜对ASN 晶种合金的物相、微观组织以及Al-Si-Mg合金的室温拉 伸断口进行分析。合金的室温力学性能,包括室温下 的抗拉强度、屈服强度、伸长率、布氏硬度,通过万 能试验机、布氏硬度计进行测试,布氏硬度计压头直 径为5 mm,加载载荷为250 kgf,加载时间为15 s,多 次测量取平均值,万能试验机拉伸速率设定2.0 mm/min。 合金的导电率使用电阻率测试仪进行测试。

# 2 结果与分析

#### 2.1 ASN 晶种合金的微观组织

ASN晶种合金中除α-AI基体相外,主要以AIN 相为主。从图2a中ASN晶种合金低倍SEM图中可以看 到,铝基体上均匀分布着大量的颗粒。利用ImageJ图像 处理软件统计了粒子的平均尺寸,测得AIN颗粒平均粒 径约为50 nm。图3b、c分别为ASN晶种合金高倍SEM图及 其EDS能谱面扫描分析,进一步确定纳米颗粒为AIN。

# 2.2 ASN 晶种合金对 Al−Si−Mg 合金微观组织的 影响

使用王水( $V_{HCl}: V_{HNO_3}: V_{H_2O}=6:3:1$ )分别对 Al-Si-Mg及Al-Si-Mg-ASN合金铸锭腐蚀15 s左右,观察 细化效果。图3a为Al-Si-Mg合金腐蚀后的宏观晶粒照 片。由图可知,铸锭边缘 $\alpha$ -Al晶粒尺寸粗大,多为垂 直于型壁生长的柱状晶,中心区域则以粗大的等轴晶 为主。图3b为Al-Si-Mg-ASN合金的宏观腐蚀照片,铸 锭边缘柱状晶消失,对比图3a发现,添加ASN晶种合 金后α-Al晶粒得到明显的细化,虽然晶粒尺寸仍在200 μm以上,细化效果相比于前期工作中的TCB晶种合金<sup>[18]</sup>要差,但粒径分布很均匀。

图4a、b分别为Al-Si-Mg及Al-Si-Mg-ASN合金的光 学显微组织图。Al-Si-Mg合金中α-Al枝晶发达,共晶 组织分布不均匀,出现团聚现象;而添加ASN晶种合 金后, 晶粒尺寸明显减小且共晶组织分布更加均匀, 无明显团聚现象。图4a中随机选取4个α-AI的二次枝晶 测量其间距得到,Al-Si-Mg合金中二次枝晶间距分别为 35 µm、31 µm、27 µm、29 µm; 而图4b中选取的 4个α-Al的二次枝晶间距分别为11 μm、18 μm、 15 μm、16 μm。这说明ASN晶种合金有效降低了Al-Si-Mg合金凝固过程中析出相的偏聚情况,其原因归因 于AlN<sub>P</sub>可以阻碍α-Al枝晶的生长。图4c、d为Al-Si-Mg 及Al-Si-Mg-ASN合金的SEM图。由图可知, Al-Si-Mg 合金中存在大量的长针状共晶Si,而添加ASN晶种合 金后,珊瑚状共晶Si数目减少,共晶Si形态主要由长针 状向球状转变,球化效果明显,表明ASN晶种合金对 Al-Si合金中共晶Si相具有一定的变质效果。

表1 添加ASN晶种合金后Al-Si-Mg合金成分 Table 1 Chemical omposition of Al-Si-Mg and Al-Si-Mg

	and A	$w_{\rm B}/\%$		
合金	Si	Mg	Fe	Al
Al-Si-Mg	7.20	0.58	0.02	余量
Al-Si-Mg-1%ASN	7.40	0.62	0.06	余量



图1 拉伸试棒示意图<sup>[15]</sup> Fig. 1 Schematic diagram of tensile bar



(a) ASN 晶种合金SEM图(低倍)

(b) ASN晶种合金SEM图(高倍)
 图2 ASN晶种合金微观形貌及能谱分析
 Fig. 2 Microstructure and energy spectrum of ASN master alloy

(c) EDS能谱分析

#### 2.3 ASN 晶种合金对 Al-Si-Mg 合金导电性的影响

一般而言,向铝合金中添加合金元素后,由于元 素固溶引起的晶格畸变会阻碍电子移动,使合金的导 电性能下降。图5为添加ASN晶种合金前后Al-Si-Mg合 金导电性对比,其结果为对每种合金分别进行5次测试 后取平均值后得到的结果。未添加晶种合金时,合金 导电性为41.2%IACS,向制备的Al-Si-Mg合金中添加 ASN晶种合金后,合金的导电性能略有增加,为41.8% IACS,并没有出现下降的现象。由于ASN晶种合金中 含大量AlNp粒子,AlNp粒子一定程度上能够变质合金 中的共晶Si相,使共晶Si形貌转变,尺寸减小,有利于 减小电子运输过程中粗大共晶Si引起的电子散射,同时



 (a) Al-Si-Mg
 (b) Al-Si-Mg-ASN
 图3 Al-Si-Mg及Al-Si-Mg-ASN合金细化效果对比
 Fig. 3 Comparison of refinement effect of Al-Si-Mg and Al-Si-Mg-ASN alloys



(a) (c) Al-Si-Mg; (b) (d) Al-Si-Mg-ASN 图4 Al-Si-Mg及Al-Si-Mg-ASN合金微观组织 Fig. 4 Microstructure of Al-Si-Mg and Al-Si-Mg-ASN aluminum alloys

合金在进行热处理后,Mg和Si原子经铝基体析出,晶 格畸变降低,从而导电性略有增加。

## 2.4 ASN 晶种合金对 Al−Si−Mg 合金力学性能的 影响

热处理是提高铝合金铸件力学性能的有效方法。 Al-Si-Mg及Al-Si-Mg-ASN合金经T6热处理后,测试其 布氏硬度及室温拉伸性能。图6a为Al-Si-Mg及Al-Si-Mg-ASN合金的布氏硬度变化图。从图中可以看出, Al-Si-Mg合金的布氏硬度值仅有HBW107.8;而向Al-Si-Mg合金中添加ASN晶种合金后,其布氏硬度值显 著提高,可达到HBW127.4,提高了18.2%。图6b为Al-Si-Mg及Al-Si-Mg-ASN合金的室温应力-应变曲线,添



图5 Al-Si-Mg及Al-Si-Mg-ASN合金导电性能对比 Fig. 5 Comparison of electrical conductivity of Al-Si-Mg and Al-Si-Mg-ASN alloys

加ASN晶种合金后,Al-Si-Mg合金的拉伸性能明显提高。其室温拉伸强度由325 MPa提升至390 MPa,提高近20.0%;室温屈服强度由240 MPa提升至345 MPa, 提高了43.8%。因此,在Al-Si-Mg合金中添加ASN晶种合金后,合金的室温抗拉强度和屈服强度得到明显改善。而添加ASN晶种合金后,伸长率由12.8%降低为12.0%,分析其原因为:拉伸强度大幅度提高,会导致合金塑性下降,而由于添加ASN晶种合金后晶粒细化,使得合金的伸长率只是从12.8%降低为12.0%。

通过向Al-Si-Mg合金中添加ASN晶种合金引入AlN 颗粒后,性能提升的强化机制主要为细晶强化、热错 配位错强化以及Orowan强化机制。

通过向Al-Si-Mg合金中添加ASN晶种合金,Al-Si-Mg合金中α-Al晶粒尺寸得到了一定程度地细化。而随着α-Al晶粒的细化,合金中的晶界数量增多,位错滑移受到晶界的阻碍作用变强。晶粒细化对屈服强度的影响可以利用Hall-Petch公式进行计算<sup>[16]</sup>:

 $\sigma_s = \sigma_0 + KD^{-\frac{1}{2}}$  (1) 式中: k为Hall-Petch系数,  $\sigma_0$ 为常数, d为平均晶粒 尺寸,  $\sigma_s$ 为合金的屈服强度。因此添加ASN晶种合金 后,由于  $\alpha$ -Al晶粒细化,使得Al-Si-Mg合金的室温屈 服强度得到大幅度提升。同时ASN晶种合金中的微纳 米颗粒还可调控共晶Si的尺寸与形貌,缓解了应力集 中,同样有利于Al-Si-Mg合金的性能提升。

鉴于ASN晶种合金中的纳米AIN颗粒与铝基体之间的热膨胀系数差异较大,热处理过程中存在温度变化,导致纳米陶瓷颗粒和铝基体间热变形程度不同,热应力使陶瓷相周围的基体中产生了大量位错,被称为热错配位错。热错配位错对Al-Si-Mg合金的强化效果可以表示为<sup>[17]</sup>:

$$\Delta \sigma_{\text{CTE}} = 1.25 Gb \sqrt{\rho_{\text{CTE}}}$$
 (2)

$$\rho_{\rm CTE} = 12 \frac{\Delta T \Delta a f_{\rm p}}{b d_{\rm p} (1 - f_{\rm p})} \tag{3}$$

式中:  $G \pi b \beta N b a$ 体的剪切模量和柏氏矢量,  $f_p$ 为合金中增强相的体积分数, $\rho_{CTE}$ 为热配错位错的位 错密度, $\Delta T$ 为合金的热加工温度和测试温度的差值,  $d_p$ 为增强相的平均粒子尺寸, $\Delta \alpha$ 是基体与增强相间热 膨胀系数的差值。研究表明,高密度位错可为沉淀相 提供形核衬底,使析出相生长速度加快,进而促进时 效处理过程的动力学过程。

根据Orowan强化机制:不可变形粒子的强化作用 与粒子间距成反比,粒子越多,间距越小,强化效果 越显著。根据强化机制模型可知:

$$\tau = \frac{Gb}{\lambda} \tag{4}$$

式中: *C*为切变弹性模量, *b*为柏氏矢量, λ 为粒子间 距。同体积分数下, 粒子越小间距越小, 强化作用越 强, 而AIN粒子为纳米级别颗粒, 强化效果显著。添加 ASN晶种合金后, 增强颗粒会在合金变形过程中会对 位错的运动产生阻碍作用, 增强颗粒周围会形成大量位 错环, 由此带来的弥散强化效果也越来越显著<sup>Π</sup>。此外, 纳米AIN颗粒自身具有优异的物理特性, 在Al-Si-Mg合 金中亦能发挥优异的承载效应。同时, 如前文所述, ASN晶种合金中的微纳米颗粒还可调控共晶Si的尺寸以 及形貌, 缓解了应力集中, 有利于Al-Si-Mg合金性能的 提升。

图7为Al-Si-Mg及Al-Si-Mg-ASN合金拉伸断口的 SEM图。如图所示,两种合金拉伸断口均为韧窝状, 其断裂方式符合韧性断裂的特点,为微孔聚集型开 裂。图7a、b分别对应Al-Si-Mg合金不同放大倍率下的 断口形貌,而且在韧窝的底部发现大量断裂的脆性共 晶Si相,如7b箭头所示。而添加ASN晶种合金后,Al-Si-Mg合金断口中的韧窝尺寸明显减小,数量增多。 进一步观察,某些韧窝内表面存在增强颗粒。前面提 到,ASN晶种合金除可细化Al-Si-Mg合金的晶粒外,还 对共晶Si具有变质作用。共晶Si尺寸及形貌的变化使合





Fig. 6 Comparison of room temperature mechanical properties of Al-Si-Mg and Al-Si-Mg-ASN alloys



(c)、(d)加入ASN晶种合金后Al-Si-Mg合金室温断口形貌
 图7 Al-Si-Mg及Al-Si-Mg-ASN合金室温拉伸断口形貌

Fig. 7 Room temperature tensile fracture morphologies of Al-Si-Mg alloy and Al-Si-Mg-ASN alloys

金在塑性变形过程中发生应力集中的倾向降低,这也 是合金强度大幅度提高的重要原因。 均同步得到优化。

(2)通过引入ASN晶种合金,获得高强韧Al-Si-Mg合金。室温抗拉强度由325 MPa提升至390 MPa, 室温屈服强度由240 MPa提升至345 MPa,分别提高了 20%和43.8%。

# 3 结论

(1)添加ASN晶种合金后,Al-Si-Mg合金中的 α-Al枝晶明显细化,而且共晶硅的尺寸、形貌及分布

#### 参考文献:

- [1] 全琪峰,董立新,刘力菱,等.多级时效对ZL114A合金组织和拉伸性能的影响[J].铝加工,2019(6):27-29.
- [2] 荀诗文,邹良利,李润霞.挤压铸造中比压对未变质过共晶Al-Si合金组织性能的影响[J].铸造,2020,69(10):1093-1097.
- [3] 贲能军,孙瑜,周鹏飞. Mg含量对AISiMg合金组织演变及性能的影响 [J]. 铸造, 2020, 69 (9): 929-933.
- [4] 范耀强. ZL114A合金热处理工艺探究 [D]. 太原:中北大学, 2015.
- [5] 康福伟,李如一,乔昕,等. 热处理工艺对ZL114A铝合金组织和力学性能的影响 [J]. 哈尔滨理工大学学报,2019,24(1):113– 117.
- [6] 孙鹏,罗平辉.铝合金导体铸件缺陷分析及工艺改进[J].特种铸造及有色合金,2019,39(11):1261-1262.
- [7] 颜丹丹,陈善明,高文嫱.AlSi7Mg汽车涡轮增压器压壳重力铸造数值分析与缺陷预测 [J].铸造技术,2018,39(10):2289-2291.
- [8] 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.
- [9] 王锋,徐海林,赵亮,等.基于AIN HTCC基板的宽带T/R组件设计 [J]. 固体电子学研究与进展,2020,40(3:):186–190.
- [10] 何勇军,周庭燕,马朝科.单层AIN类石墨烯材料热力学性质随温度的变化研究 [J].西南师范大学学报,2020,45(5):58-63.
- [11] XU Qingfei, MA Xia, HU Kaiqi, et al. A novel (AlN+Si3N4) /Al composite with well-balance strength and ductility [J]. Materials Science & Engineering A, 2018, 726: 113–119.
- [12] HU Kaiqi, MA Xia, GAO Tong, et al. Morphological transformation mechanism of eutectic Si phases in Al-Si alloys by nano-AlNp [J]. Journal of Alloy & Compounds, 2018, 765: 113–120.
- [13] 张邦冉. 纳米AlNp增强铝基耐热导电材料的研究 [D]. 济南:山东大学, 2018.
- [14] 马霞. 网状AlNp的原位构筑及其对铝基体的高文强化机制 [D]. 济南:山东大学, 2019.
- [15] 杨化冰,王海超,刘桂亮,等. N掺杂型Al-4Ti-1C对A356铝合金细化及力学性能的影响 [J]. 精密成型工程,2017,9(5): 39–43.

- [16] FENG Xiuli, LIU Huijie, SUDARSANAM S B. Effect of grain size refinement and precipitation reactions on strengthening in friction stir processed Al-Cu alloys [J]. Scripta Materialia, 2011, 65 (12): 1057–1060.
- [17] JIANG L, YANG H, YEE J K, et al. Toughening of aluminum matrix nanocomposites via spatial arrays of boron carbide spherical nanoparticles [J]. Acta Materialia, 2016, 103 (15) : 128–140.
- [18] 刘相法,聂金凤,孙谦谦,等.TiCB-AI晶种合金、其制造方法及可遗传铝合金:中国, CN111996404A [P]. 2020-11-27

# Design and Preparation of High Strength and Toughness Al-Si-Mg Alloy Material

#### JIANG Kun<sup>1</sup>, ZHAO Kai<sup>1</sup>, LIN Han<sup>2</sup>, LIU Gui–liang<sup>3</sup>, YAN Xi–rui<sup>1</sup>, LIU Xiang–fa<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Liquid–Solid Structure Evolution and Processing of Materials, Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 2. Guizhou Aerospace Fenghua Precision Equipment Co., Ltd., Guiyang 550000, Guizhou, China; 3. Shandong Al&Mg Melt Technology Limited Company, Jinan 250061, Shandong, China)

#### Abstract:

In order to obtain high strength and toughness Al-Si-Mg alloy, hypoeutectic Al-Si-Mg alloy was used as the research object, and the influence of ASN master alloy on its structure and room temperature mechanical properties was explored. The results show that  $\alpha$ -Al dendrites are extraordinary coarse and eutectic structure is unevenly distributed in Al-Si-Mg alloy. However, when 1% ASN seed alloy is added to Al Si Mg alloy, the  $\alpha$ -Al grains are refined, the dendrite growth is inhibited, and the eutectic structure is well distributed. In addition, the Brinell hardness of Al-Si-Mg alloy is increased from HBW107.8 to HBW127.4, with an increase of 18.2%; the room temperature tensile strength is increased from 325 MPa to 390 MPa, and the yield strength from 240 MPa to 345 MPa, by 20.0% and 43.8%, respectively. Conclusively, the addition of ASN master alloy optimize the microstructure of Al-Si-Mg alloy and improve its mechanical properties. Therefore, high strength and toughness Al-Si-Mg alloy is obtained.

#### Key words:

Al-Si-Mg alloy; ASN master alloy; microstructure; mechanical properties; high strength and toughness