

# Zn 对免热处理铸造铝硅系合金显微组织与力学性能的影响

李明<sup>1</sup>, 常博文<sup>2, 3</sup>, 刘志中<sup>3</sup>, 李宇飞<sup>4</sup>, 刘家懿<sup>2, 3</sup>, 康明<sup>4</sup>, 姜正鳌<sup>4</sup>

(1. 海装沈阳局驻沈阳地区第四军事代表室, 辽宁沈阳 110022;

2. 中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司, 高端装备铸造技术全国重点实验室, 辽宁沈阳 110022;

3. 中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司, 辽宁沈阳 110022; 4. 沈阳铸研科技有限公司, 辽宁沈阳 110022)

**摘要:** 研究了Zn元素含量分别为0.5wt%、1.0wt%、和1.5wt%时, 对Al-Si-Mn-Mg免热处理铸造铝合金的显微组织和力学性能影响。通过变质处理, 观察到不同的显微组织。结果表明, 随着Zn元素含量的提高, 合金的抗拉强度及屈服强度增加, 伸长率降低。同时发现, 随着Zn元素含量的提升, 合金的变质效果出现不同程度的下降。

**关键词:** 显微组织; 铝合金; 铸造铝合金; 合金化; 免热处理

铝合金凭借其低密度、耐腐蚀、高比强度等特质, 已成为我国汽车工业轻量化发展不可或缺的重要部分。目前, 因铝合金一体化铸件一般含有较多的合金化元素及后续的热处理工艺, 提高了其生产及使用成本。限制了其在汽车领域的大规模应用。

近年来, 国内外许多学者<sup>[1]</sup>针对铸造铝合金热处理时间长、热变形明显等问题, 开发研究出免热处理铸造铝合金, 使其在铸态就具有较高的强度和伸长率, 以满足汽车工业所需的轻量化、高强度等要求。

Zn元素是超高强度铝合金中的重要元素, 铸造铝硅合金中加入Zn元素可以显著提升合金的抗拉强度<sup>[2]</sup>, 但合金的伸长率随着Zn含量的增加而降低, Zn主要以固溶体的形式存在于Al基体中, 在Zn元素含量较低时(1wt%), 几乎未在合金中发现可见的含Zn析出相<sup>[3]</sup>。研究<sup>[4]</sup>发现, 在Al-Si-Cu-Mg合金中, 0.60%Zn的加入形成了一种含有Cu、Mg、Al的新的粒状化合物, 其弥散分布对合金起到了时效强化的作用。合金的 $\alpha$ -Al枝晶间距、共晶Si相的形态等是其铸态力学性能主要影响因素。Zn含量对Al-12Si-xZn-2Cu-Mg合金的热裂及缩松、缩孔等铸造性能有一定影响, Zn能够细化合金中Si相, 促进补缩, 并固溶于 $\alpha$ -Al中强化固相骨架, 从而降低热裂敏感性。同时, 晶粒细化和共晶温度的降低, 也降低了缩松、缩孔倾向<sup>[4]</sup>。

本文通过金相微区分析等手段, 探讨Zn元素对Al-Si-Mn-Mg免热处理合金铸态显微组织与性能的影响。

## 1 试验方法

采用纯度为99.99%的工业铝锭、99.5%的商用Mg锭、单晶Si、99.99%的工业Zn锭、Al-10%Mn中间合金为原料, 按照合金名义成分(表1)进行配料。使用Al-10%Sr中间合金为变质剂对合金进行变质, 细化剂为Al-4.8%Ti-B, 两者加入量分别为0.06%和0.10%。在XL-21自动控温电阻熔炼炉内进行熔炼。为保证熔体纯净, 合金熔炼前需要先将铸坩埚和金属型内浇道清理干净, 并对坩埚与模具内壁均匀涂刷涂料, 以减少Fe等杂质元素在熔炼过程中进入铝合金熔体, 对其内壁均匀涂刷ZnO

### 作者简介:

李明(1971-), 男, 正高级工程师, 主要从事舰船工程及轻质新材料研发工作。  
E-mail: 13804067277@139.com

中图分类号: TG146.2<sup>+</sup>1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

09-1243-05

### 收稿日期:

2024-08-19 收到初稿,

2024-09-09 收到修订稿。

表1 试验合金名义成分与实测成分  
Table 1 The nominal and analyzed compositions of tested alloys  $w_B/\%$

合金设计成分	合金实测成分				
	Si	Mn	Mg	Ti	Zn
Al-9Si-0.6Mn-0.5Mg-0.5Zn	8.75	0.60	0.48	0.10	0.47
Al-9Si-0.6Mn-0.5Mg-1Zn	8.85	0.60	0.51	0.10	0.95
Al-9Si-0.6Mn-0.5Mg-1.5Zn	8.88	0.58	0.50	0.11	1.44



(a) 金属型铸造模具



(b) 金属型铸造试棒

图1 试验用模具

Fig. 1 Test mold

行浇注制备, 经测定, 金属型的冷却速度为 $9.7\text{ }^\circ\text{C/s}$ 。拉伸试棒选取中部圆柱形部分进行加工, 其加工形状和尺寸符合GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验》 $\Phi 10\text{ mm}$ 拉伸试棒尺寸。拉伸试验在国产DDL-300型万能试验机上进行, 室温拉伸速率为 $1\text{ mm/min}$ 。

使用QSN750型直读光谱仪测定浇注试样中的各元素含量, 测量结果如表1所示。采用X射线衍射仪分析铸态试样的物相组成。金相观察试样从单铸试棒中截取, 经过打磨抛光后, 使用 $0.5\%$  HF溶液进行腐蚀。采用光学显微镜(型号ZEISS AXIO Vert.A1)和扫描电子显微镜(型号EVO MA25)观察金相试样的微观组织和拉伸断口形貌。

## 2 试验结果与分析

对不同Zn元素含量的3种铸态合金试样进行XRD物相检测, 结果如图2所示。3种不同Zn元素含量的合金主要由 $\alpha$ -Al、Si和少量的AlMnSi相组成, Zn含量对合金中 $\alpha$ -Al和Si相的衍射峰位置及其强度没有明显影响。由于合金中Mn含量较少, 含Mn相的衍射峰值并不十分明显。合金中添加的微量Sr或Ti主要起到改善合金中各相的形貌以及细化晶粒的作用, 且均在固溶极限范围内, 因此对合金的物相组成影响不大。

### 2.1 Zn对Al-Si-Mn-Mg合金微观组织的影响

Al-Si-Mn-Mg-0.5Zn合金的SEM形貌如图3所示,

涂料, 以防止在熔炼过程中铁等杂质元素进入铝合金熔体中, 然后将铸铁坩埚、扒渣等工具和精铝等原材料 $250\text{ }^\circ\text{C}$ 预热 $2\text{ h}$ 。待炉料熔化后升温至 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 加入Al- $4.8\%$  Ti-B细化剂, 之后升温至 $730\text{ }^\circ\text{C}$ 保温 $20\text{ min}$ , 加入Al- $10\%$  Sr变质, 保温 $20\text{ min}$ 后升温至 $740\text{ }^\circ\text{C}$ , 通入氩气精炼 $15\text{ min}$ , 精炼后扒渣静置 $15\text{ min}$ , 熔体温度 $720\text{ }^\circ\text{C}$ 时浇注。熔体温度采用热电偶进行测量。

试验试样采用法标金属型及砂型模具(图1)进

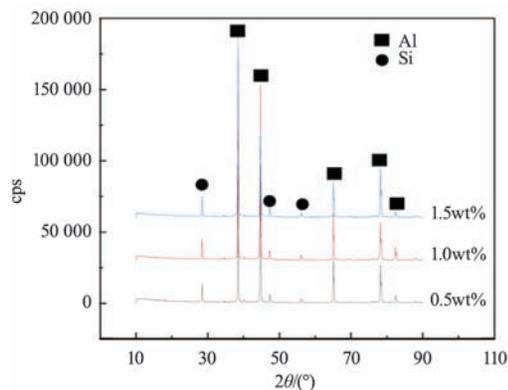


图2 不同Zn元素含量合金XRD物相分析结果

Fig. 2 XRD phase analysis results of alloys with different Zn element contents

合金的EDS分析如表2所示。可以看出, 经过Sr变质处理及Al-Ti-B细化剂细化晶粒, 添加了微量Zn元素的铸态Al-9Si-0.6Mn-0.5Mg合金组织主要由初生 $\alpha$ -Al枝晶、呈小蠕虫状组织的变质Si和沿着二次枝晶臂生长的第二相组成。合金的组织较为均匀,  $\alpha$ -Al的二次枝晶臂间距较小, 共晶Si变质完全并以细小的小蠕虫状组织存在, 未发现明显的粗大板条状共晶Si。在晶界上存在沿晶界连续析出的大尺寸第二相, 对合金进行EDS分析发现, 该大尺寸第二项为AlMnSi相。

3种不同成分Al-Si-Mn-Mg合金在不同放大倍数下的铸态微观组织对比如图4-5所示。低Zn元素含量合金

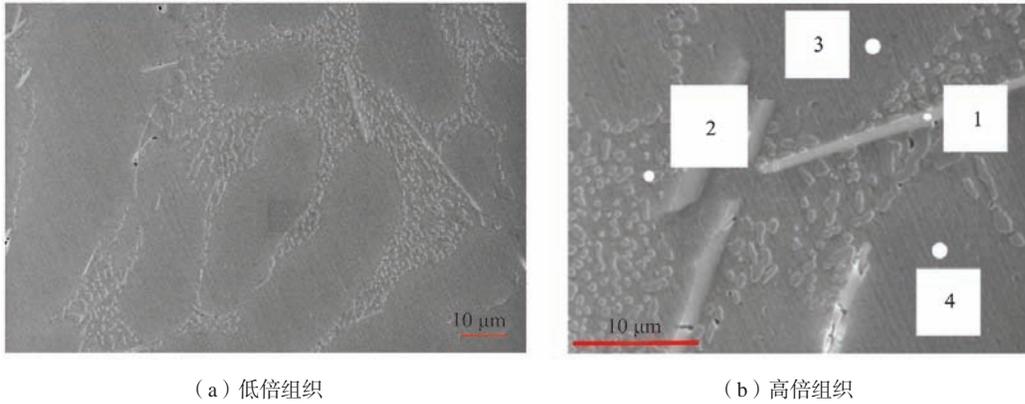


图3 Al-Si-Mn-Mg-Zn合金的SEM组织形貌  
Fig. 3 SEM Microstructure of Al-Si-Mn-Mg-Zn alloys

表2 Al-Si-Mn-Mg-Zn合金的EDS分析  
Table 2 EDS analysis of Al-Si-Mn-Mg-Zn alloy  $w_B/\%$

图3b中点的谱图	质量分数			
	Al	Si	Mn	Mg
1	57.99	23.18	16.82	2.01
2	56.41	41.17	-	2.42
3	97.54	1.04	-	1.42
4	97.29	1.33	-	1.38

的金相组织相较Zn元素添加量高的合金来说，Si相更为细小，合金铸态组织中Si相基本以细小的变质Si形式均匀分布在枝晶间。在Zn含量达到1.5%时，合金的铸

态组织（图4c）中Si相明显变得粗大，变质Si形貌发生变化，部分变质Si不再是以细小的纤维状存在于合金中，而是转变为较为粗大的形貌，变质Si颗粒粗大并且存在较为明显的富集区，表明Zn元素含量的提升影响到了共晶Si的变质效果，这与文献[5-6]的研究结果一致。

上述结果表明，Zn元素对变质合金的组织有着较大的影响，从Al-9Si-0.6Mn-0.5Mg-0.5Zn合金到Al-9Si-0.6Mn-0.5Mg-1.0Zn合金再到Al-9Si-0.6Mn-0.5Mg-1.5Zn合金，合金中变质Si相的大小形貌随着Zn元素含量的增加而增加，高Zn含量合金中的Si相变质不完全。主要原因是Zn元素主要固溶在 $\alpha$ -Al相中，凝固开始时先

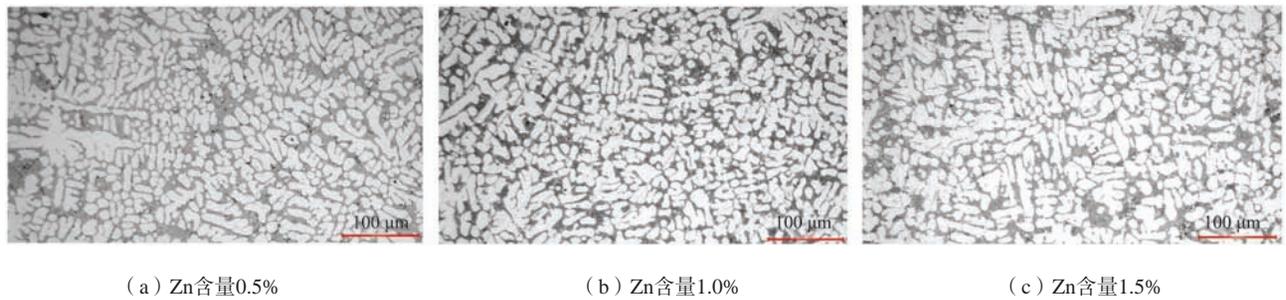


图4 不同Zn含量的Al-Si-Mn-Mg合金的组织形貌  
Fig. 4 Microstructure of Al Si Mn Mg alloys with different Zn contents

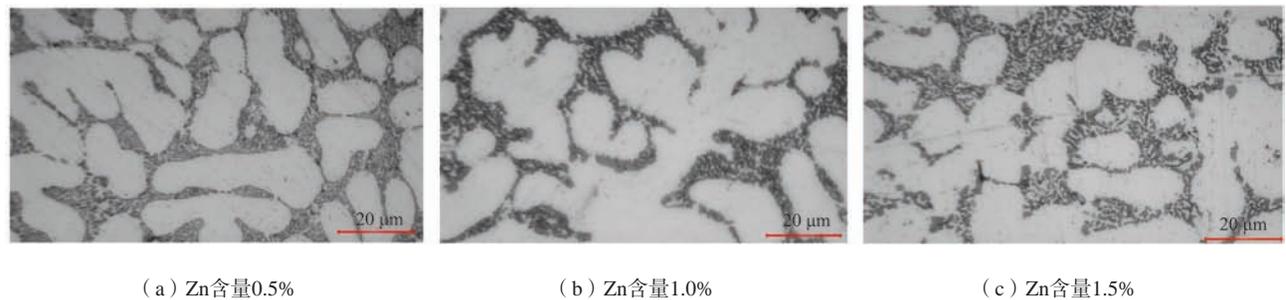


图5 不同Zn含量的Al-Si-Mn-Mg合金的组织形貌  
Fig. 5 Microstructure of Al Si Mn Mg alloys with different Zn contents

形成初生  $\alpha$ -Al相, 溶质含量低, 使剩余金属液中溶质含量提高, 后续共晶反应生成的  $\alpha$ -Al相中Zn的固溶量高于初生  $\alpha$ -Al相。随后在共晶凝固时, 由于Zn主要在Al相固液前沿富集, 阻碍Al相的生长, 使得Si相的生长速率相对得到提升, Si相获得更大的生长空间, 从而使Si相变得粗大。

## 2.2 Zn对Al-Si-Mn-Mg合金力学性能的影响

对3种添加了不同Zn元素含量的合金进行拉伸试验, 不同Zn元素含量的Al-Si-Mn-Mg合金铸态力学性能如图6所示, 从图中可以看出, 随着Zn含量的提高, 合金的抗拉强度及屈服强度都有着不同程度的提升, 极限抗拉强度由211 MPa提升至229 MPa, 提升了约8.5%, 其主要原因可以归结于Zn的固溶强化作用。当Zn含量从0.5%增加至1.5%后, 合金的断后伸长率急剧下降, 伸长率由6.5%下降至5%, 降低了23%, 这是由于过量Zn元素的加入, 降低了共晶Si的变质效果, 同时共晶组织中的Si尺寸和富集程度增加, 这些变质不良且尺寸变大的共晶Si存在一些尖锐的折角, 增加了应力集中现象, 进而降低合金的塑性。

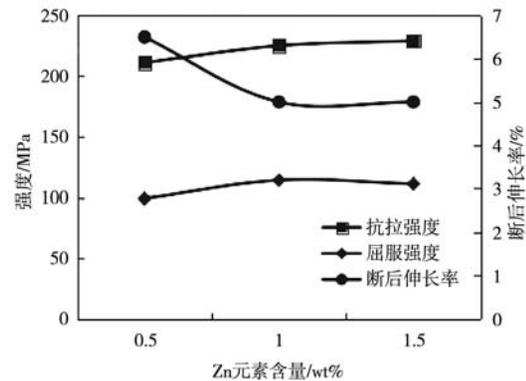
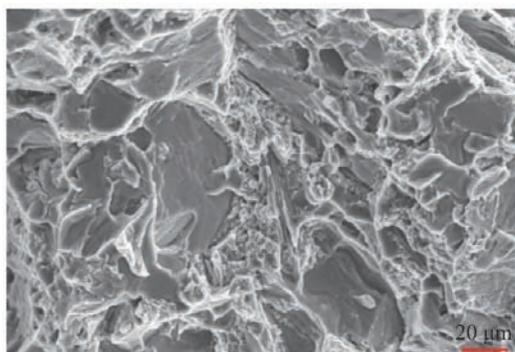


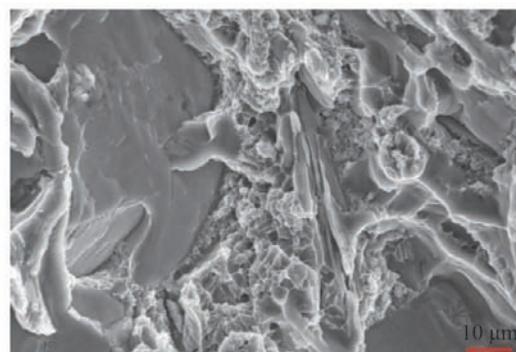
图6 不同Zn元素含量对Al-9Si-0.6Mn-0.5Mg合金室温拉伸性能的影响

Fig. 6 The effect of different Zn element contents on the room temperature tensile properties of Al-9Si-0.6Mn-0.5Mg alloy

加入1.5%的Zn后, 拉伸试棒的断口形貌如图7所示, 在断口中可以观察到, 断口处存在部分微裂纹, 同时其断口上韧窝数量少, 试棒在Si相附近易发生断裂。



(a) 低倍



(b) 高倍

图7 1.5%Zn含量的Al-Si-Mn-Mg-Zn合金的组织形貌

Fig. 7 Microstructure of Al-Si-Mn-Mg-Zn alloy of 1.5% Zn content

## 3 结论

(1) Zn元素主要以固溶的形式存在于Al-Si-Mn-Mg-Zn合金中, 在添加量为1.5%的合金中也未发现含Zn的第二相析出, 铸态合金的组织主要为 $\alpha$ -Al、共晶Si及沿枝晶臂析出的富Mn相。

(2) Zn元素的过量添加将粗化共晶Si, 并导致其变质不良。Zn的固溶强化作用提高了合金的室温抗拉强度及屈服强度, 但粗大且变质不良的Si相也致使合金的断后伸长率明显降低。

## 参考文献:

- [1] 段宏强, 韩志勇, 王斌. 汽车结构件用非热处理压铸铝合金研究进展 [J]. 汽车工艺与材料, 2022 (5): 1-6.
- [2] 张恩图, 郝建飞, 夏鹏, 等. 细化变质对免热处理压铸Al-Zn-Si-Cu合金组织及性能的影响 [J]. 铸造, 2024, 73 (6): 746-752.
- [3] 宋东福, 曾强, 贾义旺, 等. Zn含量对Al-Si-Mg合金中Mg<sub>2</sub>Si时效析出行为的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42 (3): 323-329.
- [4] 许国宇. 合金元素对Al-Si-Cu-Mg铸造合金显微组织和力学性能的影响 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2006.
- [5] 杨伏良, 易丹青, 刘泓, 等. 高硅铝合金粉末的高温空气氧化预处理工艺 [J]. 中国有色金属学报, 2007 (7): 1166-1171.
- [6] 何建刚, 郭睿, 曾大新, 等. Zn含量对Al-12Si-2Cu-1Mg-xZn合金铸造性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43 (11): 1545-1549.
- [7] 韩盼文, 袁灵洋, GHULAM Asghar, 等. Zn对压铸Al-Si合金共晶Si的粗化及粗化后变质处理 [J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41 (4): 483-489.

## Effect of Zn on the Microstructure and Mechanical Properties of Al-Si Non-Heat Treatment Alloy

LI Ming<sup>1</sup>, CHANG Bo-wen<sup>2,3</sup>, LIU Zhi-zhong<sup>3</sup>, LI Yu-fei<sup>4</sup>, LIU Jia-yi<sup>2,3</sup>, KANG Ming<sup>4</sup>, JIANG Zheng-ao<sup>4</sup>

(1. The Forth Naval Military Representative Office in Shenyang District, Shenyang 110022, Liaoning, China; 2. National Key Laboratory of Advanced Casting Technologies, Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., CAM, Shenyang 110022, Liaoning, China; 3. Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., CAM Shenyang 110022, Liaoning, China; 4. Shenyang Zhuyan Technology Co., Ltd., Shenyang 110022, Liaoning, China)

### Abstract:

The effects of Zn content of 0.5wt%, 1.0wt%, and 1.5wt% on the microstructure and mechanical properties of Al Si Mn Mg heat free cast aluminum alloy were studied. By metamorphism, different microstructures were observed. The results indicate that with the increase of Zn element content, the tensile strength and yield strength of the alloy increase, while the elongation rate decreases. At the same time, it was found that with the increase of Zn element content, the modification effect of the alloy decreased in different degrees.

### Key words:

microstructure; aluminum alloy; casting aluminum alloy; alloying; non-heat treatment