

# Mg 对 Al-Si-Mn-Mg 免热处理合金显微组织与力学性能的影响

常博文<sup>1, 2</sup>, 黄景福<sup>1</sup>, 刘志中<sup>1</sup>, 李宇飞<sup>3</sup>, 李笑<sup>3</sup>, 杨继伟<sup>4</sup>

(1. 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;  
2. 中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司, 辽宁沈阳 110022; 3. 沈阳铸研科技有限公司, 辽宁沈阳 110022;  
4. 大连华锐重工铸业有限公司, 辽宁大连 116000)

**摘要:** 研究了Mg元素含量分别为0.3%、0.5%、0.7%和0.9%的Al-Si-Mn-Mg免热处理铸造铝合金的显微组织和力学性能。通过变质和不同凝固速率, 观察到不同的微观组织。结果表明, 随着Mg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Mg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; 力学性能; 铸造铝合金

铝合金因具有低密度、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<sup>[1]</sup>。但目前铝合金主要大规模应用于豪车车型, 而限制其在汽车领域应用的一个关键因素在于其较高的使用成本。铝合金因其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。

近年来, 国内外许多学者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。

铸造铝硅合金中加入Mg元素主要是通过产生Mg<sub>2</sub>Si强化相来提高合金的力学性能<sup>[2]</sup>, 人们主要针对Mg元素对合金的时效强化作用进行分析, 对于Mg对合金铸态组织及力学性能的影响考虑较少。对于合金的铸态力学性能来说, 合金的 $\alpha$ -Al枝晶间距、共晶Si相的形态等是其主要影响因素。本文针对Al-Si-Mn-Mg免热处理铝合金为研究对象, 通过金相微区分析等手段, 探讨Mg元素对铝合金铸态微观组织与性能的影响。

## 1 试验材料与方法

试验采用纯Al (99.99%)、单晶Si、纯Mg、Al-10%Mn中间合金为原料按照合金配比进行配料。Al-10%Sr中间合金为变质剂, Al-4.8%Ti-B中间合金为细化剂。在XL-21自动控温电阻熔炼炉内进行熔炼。合金熔炼前, 需要先将铸铁坩埚和金属型内浇道清理干净, 对其内壁均匀涂刷ZnO涂料, 以防止在熔炼过程中铁元素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在250℃预热2h。待炉料熔化后升温至700℃加入Al-4.8%Ti-B细化剂, 之后升温至730℃保温20min, 加入Al-10%Sr变质, 保温20min后升温至740℃通入氩气精炼15min, 精炼后扒渣静置15min, 熔体温度720℃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(图1)进行浇注制备, 经测定金属型的冷却速度为9.7℃/s、砂型冷却速度为1.2℃/s。拉伸试样选取中部圆柱形部分进行加工, 其加工形状和尺寸符合HB 5143—1996中螺纹圆形试样尺寸。拉伸试验在国产DDL-300型万能试验机上进行。

### 作者简介:

常博文(1997-), 男, 研究生, 主要研究免热处理铸造铝合金。E-mail: cbw19971201@126.com

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

05-0560-04

### 基金项目:

辽宁省科技计划项目国家风电传动及控制工程技术研究中心联合开放基金(2021-KF-15-03)。

### 收稿日期:

2023-03-06 收到初稿,

2023-04-18 收到修订稿。

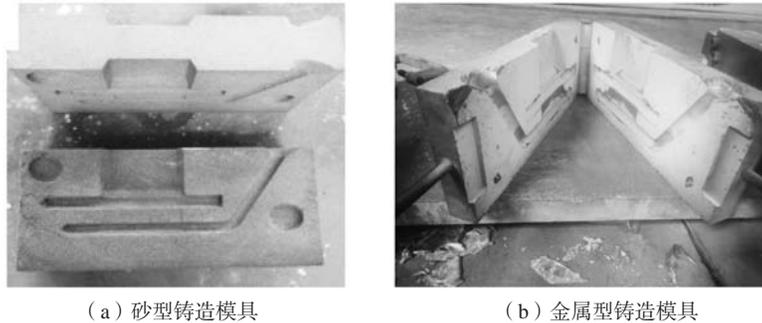


图1 试验用模具

Fig. 1 Test molds

金相试样由拉伸试棒尾部截取约20 mm段, 经过打磨抛光后使用0.5% HF溶液进行腐蚀, 采用光学显微镜观察其微观组织。

使用QSN750型直读光谱仪测定合金中各元素含量, 合金的具体化学成分如表1所示。

表1 试验合金成分  
Table 1 Compositions of the test alloys  $w_B / \%$

合金设计成分	合金实测成分					
	Si	Mn	Mg	Ti	Fe、Cu、Ni、Cr	Sr
Al-9Si-0.6Mn-0.3Mg	8.83	0.60	0.25	0.09	<0.01	0.06
Al-9Si-0.6Mn-0.5Mg	8.90	0.56	0.45	0.10	<0.01	0.06
Al-9Si-0.6Mn-0.7Mg	8.87	0.55	0.66	0.09	<0.01	0.06
Al-9Si-0.6Mn-0.9Mg	9.01	0.60	0.87	0.10	<0.01	0.06

## 2 试验结果与分析

### 2.1 Mg对Al-Si-Mn-Mg合金微观组织的影响

4种不同成分的Al-Si-Mn-Mg合金金属型铸造的铸

态微观组织如图2和图3所示。可以看出, 合金的共晶Si基本变质完全, 未发现明显的粗大板条状共晶Si。合金的组织较为均匀, 在晶界上存在沿晶界连续析出的大尺寸第二相。随着Mg含量的增加, 合金的晶粒度没有明显变化, 但可以明显看出, 共晶Si的变质受到显著影响, 在Mg含量较高的合金中 ( $\geq 0.7\%$ ) 的共晶Si组织出现粗化, Mg元素含量的提升影响到了Sr对共晶Si的变质效果。而Mg含量较低的合金中Sr对共晶Si的变质更为完全, 合金中Si相细小均匀。这是因为在合金凝固过程中, Mg原子富集在Si相的凝固界面前, 使合金的共晶温度下降。使得合金的凝固速率降低, 导致合金中共晶Si相的粗化<sup>[3]</sup>。同时在共晶反应以前, Mg与Sr生成了 $Mg_2SrAl_4Si_3$ , 使得合金的变质不完全<sup>[4]</sup>。

图4是Mg含量为0.5%的Al-Si-Mn-Mg合金在不同冷却速度下的金相组织, 可以看出, 较小的冷却速度使得合金中 $\alpha$ -Al枝晶的二次枝晶臂明显粗大, 同时共晶Si的变质效果随着冷却速度的降低而变差, 在Si相富集

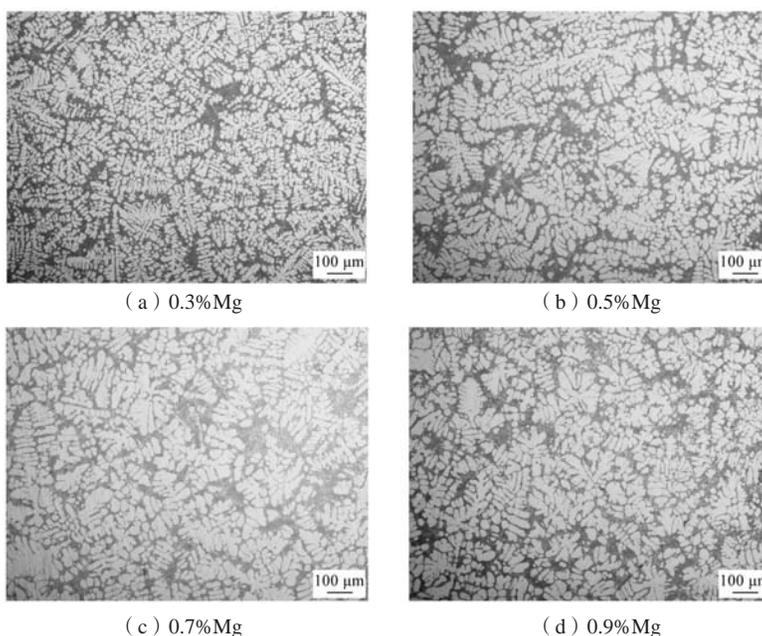


图2 不同Mg含量的Al-Si-Mn-Mg合金的金相组织

Fig. 2 Metallographic microstructures of the Al-Si-Mn-Mg alloys with different Mg contents

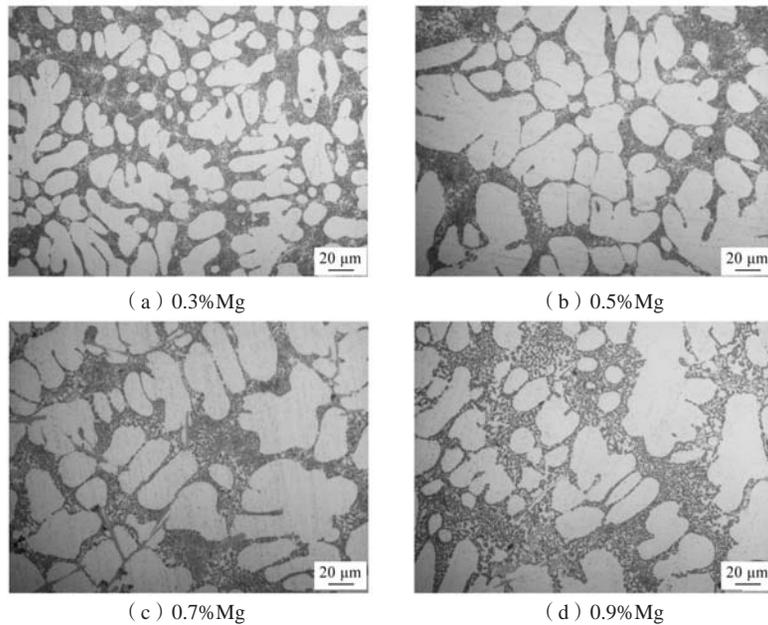
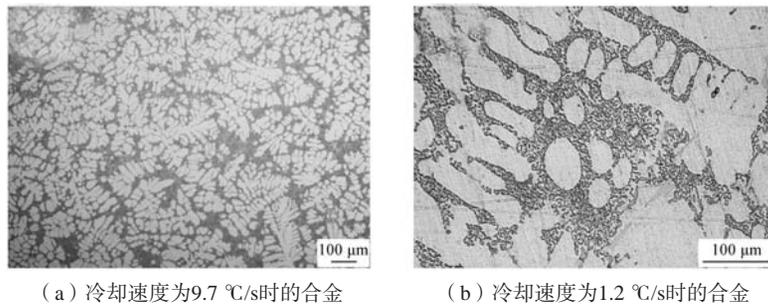


图3 不同Mg含量的Al-Si-Mn-Mg合金的高倍金相组织

Fig. 3 Metallographic microstructures of the Al-Si-Mn-Mg alloys with different Mg contents



(a) 冷却速度为9.7 °C/s时的合金

(b) 冷却速度为1.2 °C/s时的合金

图4 不同冷却速度的Al-Si-Mn-Mg合金的金相组织

Fig. 4 Metallographic microstructure of the Al-Si-Mn-Mg alloys with different cooling rates

区共晶Si形态相较于高冷却速度来说更加粗大。这都是因为较低的冷却速度所导致的更长的凝固时间和更低的凝固速度，使得合金中各相形核后持续长大，导致合金的组织粗大。

对冷却速度为9.7 °C/s的Mg含量为0.5%的Al-Si-Mn-Mg合金进行扫描电镜（SEM）观察和能谱分析（EDS），见图5和表2所示。由EDS分析可以看出，在Mn元素含量过多时，合金中沿着二次枝晶臂析出的大

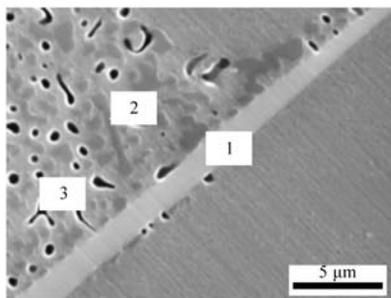


图5 0.5%Mg含量的Al-Si-Mn-Mg合金SEM照片

Fig. 5 SEM image of the Al-Si-Mn-Mg alloy with 0.5% Mg content

表2 0.5%Mg含量的Al-Si-Mn-Mg合金EDS分析  
Table 2 EDS analysis of the Al-Si-Mn-Mg alloy with 0.5% Mg content

图谱	Al	Si	Mn	Mg	$w_B / \%$
1	52.98	24.98	20.78	1.26	
2	62.98	33.59	-	3.43	
3	68.82	27.34	-	3.84	

量针状相为富Mn相，该相明显的棱角与边界在合金承受载荷时会引起较大的应力集中，导致合金力学性能下降，同时可以看出，在Al-Si-Mn-0.5Mg合金中，Mg在整个合金基体中都有不同程度的分布，但在Si相附近形成区域富集，Ti元素在 $\alpha$ -Al基体中分布均匀。

## 2.2 Mg对Al-Si-Mn-Mg合金力学性能的影响

选取同一成分同一炉次的多根试棒进行拉伸试验，每组成分选取5-6根试棒拉伸并取平均值。冷却速度为9.7 °C/s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Mg含量的提高，合金的抗

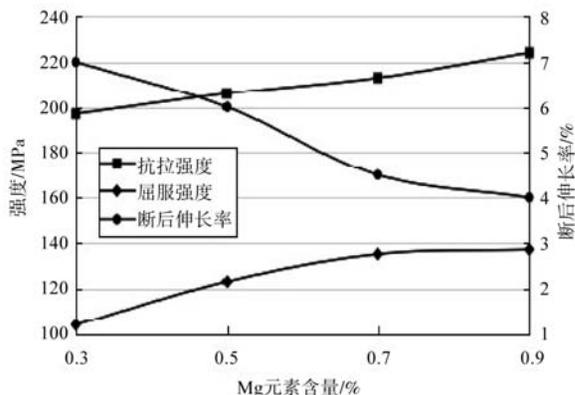


图6 冷却速度为9.7 °C/s时合金的铸态力学性能

Fig. 6 Mechanical properties of as-cast alloy at 9.7 °C/s cooling rate

拉强度及屈服强度都有着不同程度的提升，而合金的断后伸长率出现明显下降，极限抗拉强度由197 MPa提升至224 MPa，提升了约12%，而断后伸长率由7%下降至3.5%，降低了50%。在Mg含量从0.5%增加至0.7%时，断后伸长率急剧下降，从6%下降至4.5%。这是由于随着Mg元素的加入，合金在凝固时析出强化相 $Mg_2Si$ <sup>[5]</sup>，提升了合金的抗拉及屈服强度，但是由于

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 邹景霞. Al-Mg-Si-Mn-Cr合金组织和性能的研究 [D]. 湖南长沙: 中南大学, 2013: 5-15
- [3] 陈忠伟, 介万奇. Mg含量对Al-Si-Mg铸造合金微观组织与力学性能的影响 [J]. 材料科学与工程学报, 2004 (5): 647-652.
- [4] JOENOS A T, GRUZLESKI J E. Magnesium effects on the microstructure of unmodified and modified Al-Si alloys [J]. Cast Metals, 1991, 4 (2): 62-71.
- [5] WANG Q G, DAVIDSON C J. Solidification and precipitation behaviour of Al-Si-Mg casting alloys [J]. Journal of Materials Science, 2001, 36 (3): 739-750.
- [6] 黄晓锋, 冯凯, 谢锐. Mg及Mn元素对Al-Si合金显微组织和力学性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2012, 22 (8): 2196-2204.

## Effect of Mg on Microstructure and Mechanical Properties of Al-Si-Mn-Mg Non-Heat Treatment Alloy

CHANG Bo-wen<sup>1,2</sup>, HUANG Jing-fu<sup>1</sup>, LIU Zhi-zhong<sup>1</sup>, LI Yu-fei<sup>3</sup>, LI Xiao<sup>3</sup>, YANG Ji-wei<sup>4</sup>

(1. Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., CAM, National Key Laboratory of Advanced Casting Technologies, Shenyang 110022, Liaoning, China; 2. Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., CAM, Shenyang 110022, Liaoning, China; 3. Shenyang Zhuyan Technology Co., Ltd., Shenyang 110022, Liaoning, China; 4. Dalian Huarui Heavy Industry Casting Co., Ltd., Dalian 116000, Liaoning, China)

#### Abstract:

The microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mn-Mg cast aluminum alloy without heat treatment with different Mg contents of 0.3%, 0.5%, 0.7% and 0.9% were studied. Different microstructures were observed in the alloys after modification and different solidification rates. The results showed that with the increase of the Mg content, the tensile strength and yield strength of the alloy increased, while the elongation decreased. At the same time, it was found that with the increase of the Mg content, the modification effect of the alloy decreased in varying degrees.

#### Key words:

microstructure; mechanical properties; cast aluminum alloy

脆性的 $Mg_2Si$ 相及共晶Si在拉伸过程中容易产生应力集中，易产生微裂纹，加速合金的断裂<sup>[6]</sup>，使得合金的断后伸长率出现较为明显的下降，同时Mg对于Sr变质作用的影响也导致Si相的粗大，进一步影响合金的塑性。

## 3 结论

(1) Al-Si-Mn-Mg合金中Mg元素在基体中均有分布，但多在Si相区域富集，影响凝固时Si相的凝固速率，导致在Mg元素含量较高时，合金中易产生较为粗大的Si相。

(2) Mg元素的增加影响了Al-Si-Mn-Mg合金中Sr对于共晶Si的变质效果，使合金中共晶Si的变质效果得到减弱，共晶Si变质不完全。

(3) 随着合金中Mg元素的增加，合金的铸态抗拉强度及屈服强度增加，断后伸长率降低。

(4) 随着冷却速度的增加， $\alpha$ -Al枝晶的二次枝晶臂间距明显减小。目前常用的免热处理Al-Si合金多以压铸件为主，压铸极高的冷却速率势必会导致合金的组织进一步细小，从而获得更高的力学性能。