

# 热处理对不同 Sr 含量变质 A356 合金组织及力学性能的影响

姜 峰, 索忠源, 刘祥玲, 关鲜洪, 王毅坚

(吉林化工学院机电工程学院, 吉林吉林 132022)

**摘要:** 研究了热处理对不同Sr含量变质A356合金组织及力学性能的影响。结果表明: A356合金经0.04%Sr变质与T6处理后, 合金中的共晶硅全部转变成近球形颗粒组织。合金的布氏硬度、抗拉强度和伸长率均达到最大值, 分别为HBW100.1, 310.61 MPa和13.16%, 综合力学性能得到显著提高。合金的断裂方式由铸态下的韧脆混合断裂转变成韧性断裂。

**关键词:** A356铝合金; Sr变质; T6热处理; 力学性能

A356合金具有铸造流动性好、气密性好、收缩率小和热裂倾向小等特点, 加之质量轻、价格适中、回收率高, 已成为减轻汽车自重的首选材料<sup>[1-3]</sup>。目前广泛用于摩托车、汽车轮毂<sup>[4-5]</sup>。随着汽车工业的不断发展, 铝合金轮毂的造型越来越复杂、精细, 因此对A356合金的综合力学性能提出了更高的要求<sup>[1, 6]</sup>。由于该合金在常规铸造生产中, 其组织中存在粗大块状和板条、板片状共晶硅, 该共晶硅组织严重割裂铝合金基体, 从而降低了合金的力学性能, 因此改变共晶硅相的形貌是提高该铝合金性能的有效途径<sup>[7-8]</sup>。Sr作为变质细化剂加入铝合金中, 会对铝合金的组织及力学性能产生重要的影响。A356合金经变质和热处理后, 其铸造组织和力学性能显著提高。Sr对A356合金具有良好的变质效果, 具有绿色、环保、变质长效性等优点, 应用广泛<sup>[9]</sup>。为此, 本研究就Sr变质剂加入量及T6热处理对A356合金组织及力学性能的影响进行了探索, 为该合金的工业化生产提供了工艺参数和理论依据。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验用原材料

采用A356亚共晶铝硅合金, 其原材料采用工业纯铝(99.7%)、结晶硅(99.9%)、工业纯镁。用TM-998Z型火花直读光谱仪测量实际合金化学成分, 其理论配比与实测值见表1所示。变质剂采用Al-10%Sr中间合金, Sr添加量分别为0、0.02%、0.04%、0.06%、0.08%, 与合金精炼变质后的Sr含量实测值见表2所示。精炼除气剂为六氯乙烷(C<sub>2</sub>Cl<sub>6</sub>)。

### 1.2 试验设备

试验所采用设备有: SG2-5-10型井式坩埚电阻炉(额定功率为5 kW, 额定温度1 000 ℃, 温控设备为XTM101数显调节仪)、JK-SX2-12-10N型箱式电阻炉、WAW-300型万能拉伸试验机, HB-3000C电子布氏硬度计、TX-400V型金相显微镜、TM-998Z型火花直读光谱仪、JSM-6490LV型扫描电镜(SEM)。

作者简介:

姜 峰(1984-), 男, 讲师, 从事有色合金制备及模具设计等方面的研究工作。E-mail: 122504582@qq.com

通讯作者:

王毅坚, 男, 教授。E-mail: jlwyj1961@163.com

中图分类号: TG166.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)

01-0029-05

收稿日期:

2018-09-20 收到初稿,

2018-10-25 收到修订稿。

### 1.3 试验方法及过程

A356合金熔炼、变质过程：首先将每批所要熔炼的A356合金进行原材料理论配比添加量计算，然后将相应称量好的工业纯铝、结晶硅一次性装入石墨坩埚电阻炉中，之后开始升温预热，预热温度为400℃，保温1h后升温至780℃，并保温3~4h。待结晶硅全部溶解到铝液中后，将温度调到750~760℃，用事先准备好的钟罩将纯镁块压入合金液底部，同时均匀搅拌10s，之后保温10min左右，接着用钟罩将六氯乙烷压入合金液底部，对合金熔体进行第一次精炼、除气、扒渣。然后将炉温调到变质温度750℃，用钟罩将已称量好的Al-10%Sr变质剂压入合金熔体中，均匀搅拌15s，变质保温时间为20min。随后再用六氯乙烷进行第二次精炼、除气、扒渣。最好将熔炼好的A356合金液浇注到预热温度为200℃的金属模具（尺寸 $\Phi 25\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ ）中，得到金属试棒。

A356合金热处理过程：将得到的金属试棒放入箱

表1 A356合金化学成分

Table 1 Chemical composition of A356 alloy							$w_B/\%$
	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
理论	6.5~7.5	<0.1	<0.05	0.30~0.45	<0.05	<0.2	余量
实测	6.843	0.064	0.032	0.386	0.027	0.085	余量

式电阻炉中，然后进行T6（540℃×3h+180℃×4h）热处理，随后将T6处理后的金属试棒切片，进行布氏硬度及显微组织观察。拉伸试样加工成如图1所示的短标距圆形试样。试样经拉伸后在JSM-6490LV型扫描电镜进行断口分析与拍照观察。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 不同状态下的A356合金微观组织

图2和图3分别为A356合金在不同Sr含量变质及变

表2 变质剂Sr含量

Table 2 Content of modifier Sr					$w_B/\%$
理论值	0	0.02	0.04	0.06	0.08
实测值	0	0.012	0.035	0.051	0.073

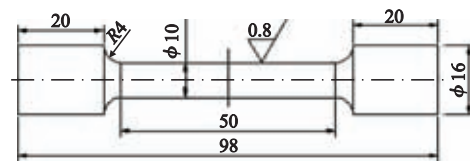
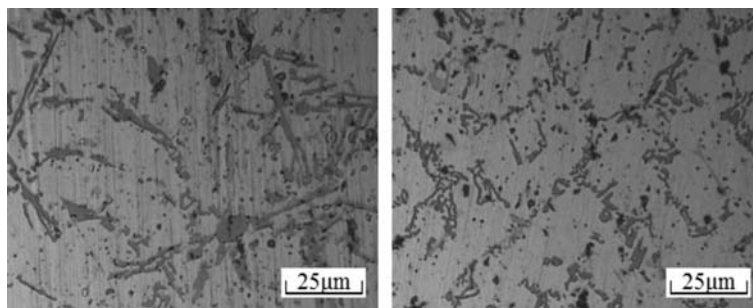


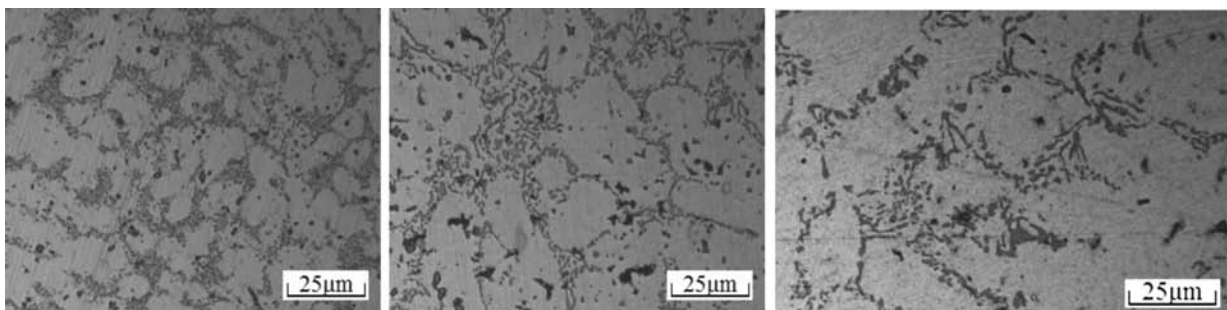
图1 拉伸试样尺寸

Fig. 1 Dimensions of tensile sample



(a) 未变质

(b) 0.02% Sr



(c) 0.04% Sr

(d) 0.06% Sr

(e) 0.08% Sr

图2 不同Sr含量变质A356铝合金的显微组织

Fig. 2 Microstructure of A356 aluminum alloy modified by different Sr content

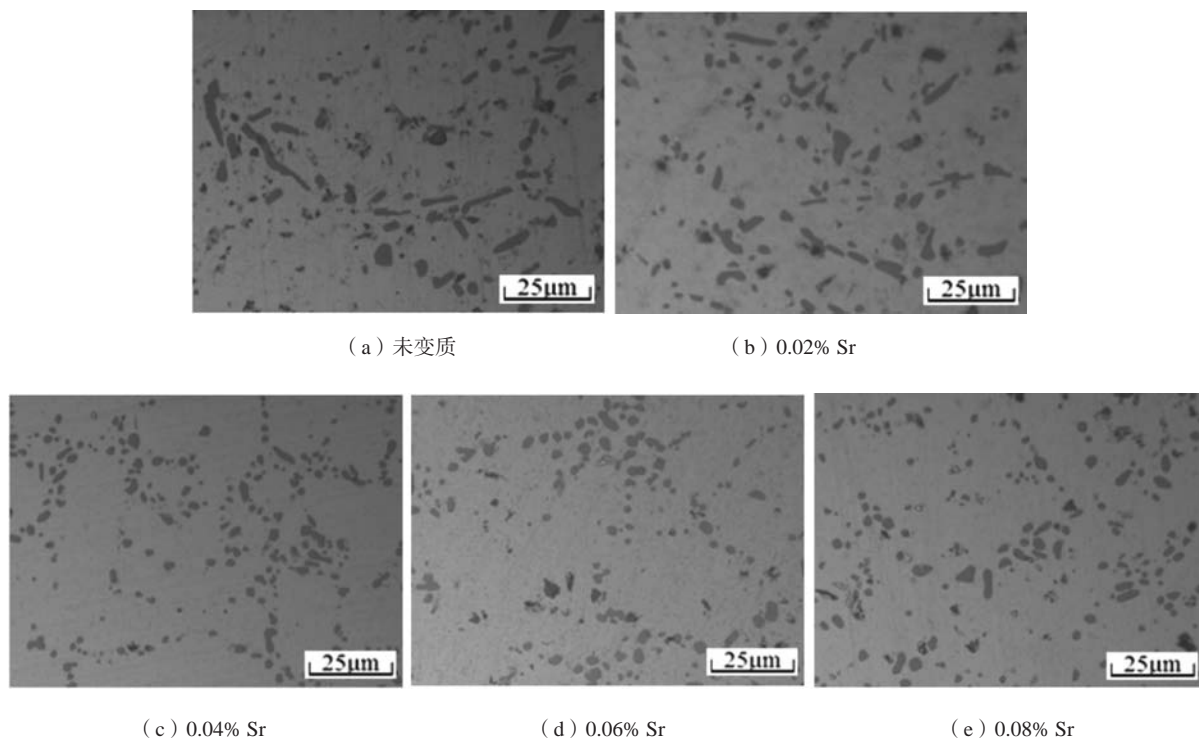


图3 T6热处理A356铝合金的显微组织

Fig. 3 Microstructure of T6 heat treated A356 aluminum alloy

质后经T6处理的显微组织。

从图2可明显看出,当A356合金中未添加变质剂时(图2a),合金铸态组织中的共晶硅形貌大多呈针片状与长杆状,部分区域出现较大块状,严重割裂铝合金基体。当Sr含量为0.02%时(图2b),共晶硅相明显细化,形貌绝大部分呈短杆状和细小片状,部分区域出现颗粒状。当Sr含量为0.04%时(图2c),共晶硅相形貌均为细小颗粒状形式析出,且弥散均匀地分布于 $\alpha$ -Al基体中,此时达到良好的变质效果,与图2b相比,共晶硅尺寸显著减小并细化。随着Sr含量的继续添加(0.06%~0.08%),见图2d-e,共晶硅相开始逐渐长大。当变质剂含量为0.06%时,合金中的共晶硅形貌均呈颗粒状和纤维状<sup>[10]</sup>,与图2c相比,其尺寸明显变大,当Sr添加量达到0.08%时,合金中共晶硅开始粗化,共晶硅多数形貌出现短杆状和针状,且有粗大的共晶硅颗粒出现,其尺寸与之前相比明显粗化,开始出现过变质。

从图3可观察到,热处理后合金中板条状共晶Si的边角更加圆滑,共晶硅端部圆钝化,从而改善了合金的强度。A356合金未变质经T6处理后的组织中(图3a),共晶硅形貌大多数仍呈长条状(即短棒状)、针状和较大块状,其间夹杂着部分颗粒状。随着Sr含量的不断添加,再经T6热处理后,未变质时的针片状、

杆状和粗大块状的共晶硅相组织逐渐消失,其形貌转变为近球形的颗粒状组织。当Sr含量为0.04%时,合金中共晶硅最为细小,其形貌均为圆球形的颗粒状,较均匀地分布于合金基体中(图3c)。随着Sr含量的逐渐增加(0.06%~0.08%)(图3d-e),合金组织中的共晶硅形貌仍为近圆球形颗粒状,但其明显聚集,开始粗化长大,这与Sr的过变质有关。

综上所述,A356合金经过Sr变质后,可以显著细化合金中的共晶硅组织,使其从针片状、长杆状和粗大块状组织转变成细小的蠕虫状与颗粒状组织,且较均匀地分布于合金基体中。经过T6热处理后,合金中的共晶硅棱角变得更加圆润和钝化,从而降低了棱角状共晶硅颗粒对合金基体的割裂作用。

## 2.2 热处理对不同Sr含量变质A356合金力学性能的影响

A356合金经不同Sr含量变质处理及变质处理后加T6处理的力学性能变化曲线见图4。

从图4a-c中不同状态下的A356合金力学性能变化曲线图可明显看出,经Sr变质和T6热处理后,A356合金的布氏硬度、抗拉强度、伸长率与变质后未经T6处理相比,均得到大幅度提升。随着Sr含量的不断增加,A356合金的硬度、抗拉强度、伸长率均呈先升高

而后降低的趋势。当变质剂Sr的添加量为0.04%时,合金的力学性能均达到最大值。其中未经T6处理,合金的布氏硬度、抗拉强度和伸长率分别为HBW57, 216.5 MPa和6.82%;经T6热处理(540 °C × 3 h+180 °C × 4 h)后,合金的布氏硬度、抗拉强度以及伸长率分别为HBW100.1, 310.61 MPa和13.16%。合金T6处理后比热处理前的布氏硬度、抗拉强度和伸长率分别提高75.4%, 43.47%和92.96%。而当Sr含量超过0.06%时,合金的布氏硬度、抗拉强度以及伸长率均开始出现明显下降。这主要是由于Sr过多产生过变质现象,在合金中产生较多的锶化物,致使合金的强度、塑性降低<sup>[11-12]</sup>。由此可见,A356合金经Sr变质与T6处理后,其综合力学性能得到显著提高。

### 2.3 不同状态下的A356合金断口形貌

图5为A356合金在不同状态下的拉伸断口形貌。

从图5a拉伸断口的扫描电镜照片来看,未变质铸态下的A356合金断口形貌中出现大量较平滑的准解理面,而局部区域夹杂着大小不等的韧窝,其尺寸小而且韧窝浅,数量相对较少,在准解理面边缘可以发现细小的裂纹,这与冉广等人<sup>[13]</sup>的研究结果一致。由此可知,未变质铸态下的A356合金塑性相对较差,属于韧窝+解理断裂的韧脆混合断裂方式。从图5b中可看,经0.04% Sr变质与T6热处理后的A356合金的断口形貌中出现大量尺寸不等的韧窝,且韧窝较深,较大光滑解理面消失。与未变质铸态合金断口组织相比,其韧窝数量大幅增加,而光滑解理面消失,其塑性明显增强,由此可看出,其断裂形式为以韧窝为主的韧性断裂。

## 3 结论

(1) A356合金经过Sr变质后,可以显著细化合金

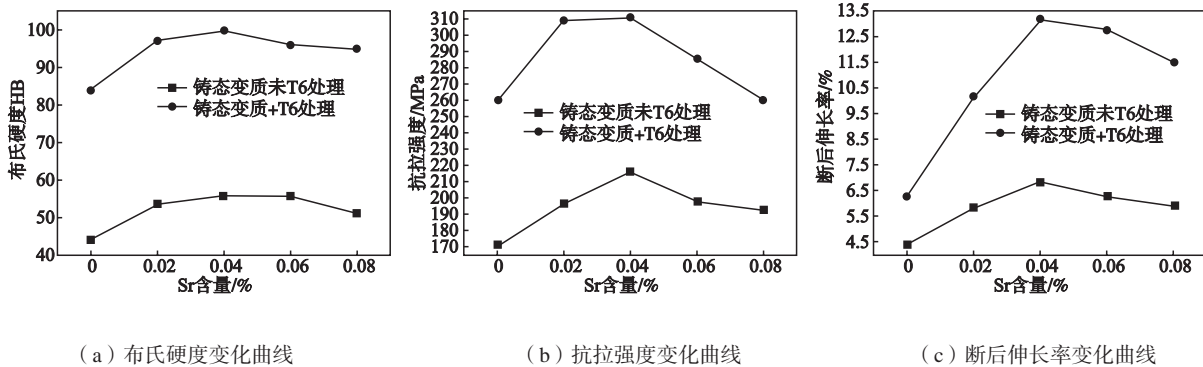
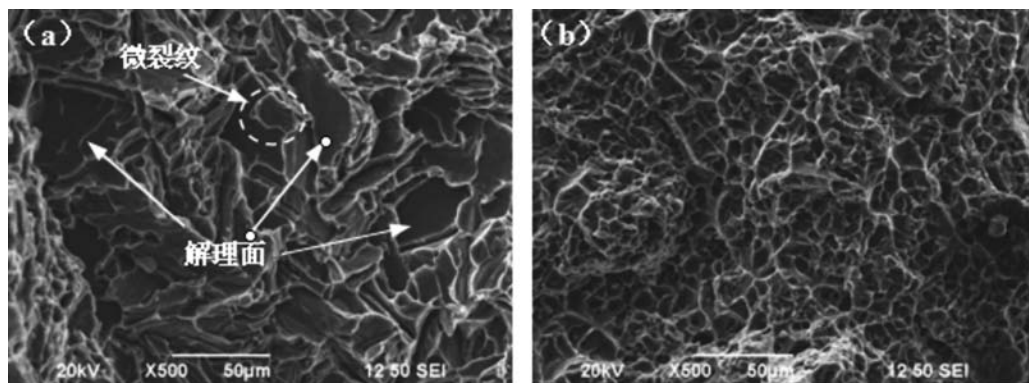


图4 A356合金经不同Sr含量变质处理在T6处理前后的力学性能变化曲线

Fig. 4 Mechanical properties of A356 alloy treated with different Sr content before and after T6 heat treatment



(a) 铸态

(b) 0.04% Sr变质+T6处理

图5 A356合金在不同状态下的拉伸断口形貌

Fig. 5 Tensile fracture morphology of A356 alloy at different states



中的共晶硅组织,使其从针片状、长杆状和粗大块状组织转变成细小的蠕虫状与颗粒状组织,且较均匀地分布于合金基体中。经过T6热处理后,合金中的共晶硅棱角变得更加圆润和钝化,从而降低了棱角状共晶硅颗粒对合金基体的割裂作用。

(2) A356合金经0.04% Sr变质与T6处理后,合金中的共晶硅全部转变成近球形颗粒组织。合金的布氏硬度、抗拉强度和伸长率最大值分别为HBW100.1, 310.61 MPa和13.16%。合金的断裂方式由铸态下的韧脆混合断裂转变成韧性断裂,其综合力学性能得到显著提高。

#### 参考文献:

- [1] 孙守庄, 彭晓东, 谢卫东, 等. T6处理对Al-Sr中间合金变质的A356铝合金组织与性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2010, 39 (18): 155-157.
- [2] 唐超兰, 温竟青, 仲召军, 等. 变质处理对Al-10.5Si合金组织及性能的影响 [J]. 铸造, 2017, 66 (6): 609-617.
- [3] 仲召军, 李龙, 周德敬. 铸造Al-Si合金细化变质处理技术的研究进展 [J]. 铸造, 2016, 65 (3): 242-246.
- [4] 姚巍. RE-Sr复合处理对A356合金组织和性能的影响 [C]// 2012中国铸造活动周论文集, 2012: 492-496.
- [5] 杨彬, 高平, 赵宝荣, 等. 混合稀土及热处理对A356合金组织与性能的影响 [J]. 机械工程材料, 2006, 30 (4): 68-69.
- [6] 王国军, 熊柏青, 张永安, 等. 铝合金材料的新型热处理技术研究 [J]. 轻合金加工技术, 2008, 36 (7): 10-13.
- [7] 黄耀光, 杨途才, 黄蓓. A356合金复合细化变质研究 [J]. 化学工程与装备, 2018 (2): 47-50.
- [8] 仲召军, 李龙, 周德敬. 铸造Al-Si合金细化变质处理技术的研究进展 [J]. 铸造, 2016, 65 (3): 242-246.
- [9] 崔勇, 范学义, 王志峰, 等. Al-10Sr对A356合金变质效果的研究 [J]. 热加工工艺, 2010, 39 (19): 24-27.
- [10] 董光明, 孙国雄, 廖恒成, 等. 铝硅合金中共晶硅的变质机理: 杂质诱发共生成对孪晶 [J]. 材料科学与工艺, 2008, 16 (1): 34-37.
- [11] 蔡郭生, 吴龙, 李新松, 等. Sr变质对ZL102组织和性能的影响 [J]. 铸造技术, 2013, 34 (12): 1656-1658.
- [12] 米国发, 朱兆军, 王宏伟, 等. Sr变质对Al-Si合金组织的影响 [J]. 铸造技术, 2006, 27 (11): 1217-1222.
- [13] 冉广, 周敬恩, 王永芳. 铸造A356铝合金的拉伸性能及其断口分析 [J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35 (10): 1620-1624.

---

## Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of A356 Alloy Modified by Different Sr Content

JIANG Feng, SUO Zhong-yuan, LIU Xiang-ling, GUAN Xian-hong, WANG Yi-jian

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin 132022, Jilin, China)

#### Abstract:

The effects of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of A356 alloy modified by different Sr content were studied. The results show that eutectic silicon in A356 alloy is transformed into nearly spherical granular structure by 0.04% Sr modification and T6 heat treatment. The Brinell hardness, tensile strength and elongation of the alloy reach the maximum values, which are HBW 100.1, 310.61 MPa and 13.16%, respectively. The fracture mode of the alloy changes from ductile-brittle mixed fracture to ductile fracture, and its comprehensive mechanical properties are significantly improved.

#### Key words:

A356 aluminum alloy; Sr modification; T6 heat treatment; mechanical properties