

# 利用热分析仪研究 Sr 元素对 A356.2 铝合金的变质效果

杨海军<sup>1, 2</sup>, 蔡振斌<sup>1, 2</sup>, 刘志国<sup>1, 2</sup>, 李 广<sup>1, 2</sup>

(1. 秦皇岛开发区美铝合金有限公司, 河北秦皇岛 066004; 2. 河北车轮新材料与测试技术创新中心, 河北秦皇岛 066004)

**摘要:** A356.2铝合金中加入不同含量的Sr元素对合金进行变质处理, 利用热分析仪获得的特征值TSO可以得到合金变质前后共晶生长温度降低值 $\Delta TSO$ 。通过分析不同 $\Delta TSO$ 数值与合金的金相组织之间的对应关系, 认为: 当 $\Delta TSO < 3.9$  °C时, 金相组织中显示硅变质不足; 当 $3.9$  °C $\leq \Delta TSO \leq 5.7$  °C时, 金相组织中显示硅变质效果中等; 当 $\Delta TSO > 5.7$  °C时, 金相组织中显示硅变质效果良好。因此, 可直接利用热分析仪分析结果, 判断A356.2铝合金中硅元素的变质效果, 用此方法可以省时省力。

**关键词:** 热分析仪; A356.2铝合金; Sr; 变质

20世纪80年代以来, 随着我国汽车、机械工业的发展, 铝硅合金在铸造厂得到越来越多的应用。铝硅合金凝固时, 先经历一个发生在液相线和共晶平台之间的枝晶形核与生长阶段, 然后是发生在共晶平台上的共晶形核与生长阶段<sup>[1-3]</sup>。铝硅合金中, 硅元素在铝合金中的形态直接影响铝合金的性能, 在生产中一般对硅元素进行变质处理, 从而改变Si的形貌和尺寸, 提高合金的强度和韧性。常见变质剂有Na、Sr、P、Te或RE等, 加入变质剂能改变合金冷却时的共晶凝固平台温度, 不同的元素加入量均可不同程度地降低共晶凝固平台的温度, 也就是说, 共晶凝固平台的温度高低可以反映熔体的变质情况。一般来说, 变质不会影响液相线温度, 而共晶温度则会随变质元素的种类及加入量的不同而有不同程度的降低, 也即合金温度区间的大小(液相线与固相线温度差值)会扩大。对应于相图的变化, 合金凝固冷却曲线也有相应的变化, 合金变质后冷却曲线上的共晶平台位置要比变质前有相应下降<sup>[4-7]</sup>, 这样共晶温度下降可用热分析仪的 $\Delta TSO$ 参数来表示 [ $\Delta TSO = (TSO_{共晶})_{未变质} - (TSO_{共晶})_{变质}$ , TSO为固态温度上限(共晶生长的最高温度)], 因此,  $\Delta TSO$ 值与合金变质效果存在一定的对应关系, 这就是本文的研究内容。

作者简介:

杨海军(1979-), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为铸造铝合金、变形铝合金材料的设计和制备。电话: 0335-5910211, E-mail: yhjzhhn.79@163.com

中图分类号: TG146.21  
文献标识码: A  
文章编号: 1001-4977(2021)10-1196-04

收稿日期:

2021-05-10 收到初稿,  
2021-06-30 收到修订稿。

## 1 试验材料及方法

试验材料用 A356.2合金, 其化学成分见表1。

将A356.2合金锭放入熔化量为10 kg的坩埚电阻炉中, 升温至(750±5) °C, 合金熔化均匀后, 用高纯氩气精炼除气10 min, 然后升温至(740±5) °C, 按预先设定的顺序分别加入不同重量的Al-10Sr中间合金(用专用工具压入熔体), 并每次搅拌5 min, 使Sr溶解分布均匀。静置保温时间为15 min。在720~730 °C下浇注试样, 然后分别进行光谱、金相及热分析仪检测, 并进行数据采集。从浇注试样中部锯切取

表1 A356.2合金的化学成分  
Table 1 Chemical composition of A356.2 alloy

														$w_B / \%$
Si	Fe	Mg	Ti	Ca	Sr	Zn	Ni	Cu	Mn	Sn	Pb	Cr	P	
7.06	0.118	0.304	0.108	0.001 3	0	0.009 6	0.003 0	0.002 4	0.002 2	0.006 2	0.001 5	0.001 7	0.001 2	

样, 打磨, 抛光, 用0.5%的HF腐蚀, 制备金相试样。取光谱样检测, 确定试样中的Sr含量分别为 0.002 3%、0.004 2%、0.007 2%、0.012 2%、0.016 1%、0.021 3%、0.025%。

本次试验使用德国MK公司生产的TA110型热分析仪来检测合金变质效果, 设备主要由热分析系统主机、永久性热电偶、专业测试坩埚、热分析支架等组成, 设备照片见图1。热分析所用的坩埚有适当的壁厚, 内壁敷有涂料, 内装热电偶。试验使用的Ni-Cr热电偶为新型热电偶, 反应灵敏, 采用特殊的套管保护热电偶, 使其可永久使用, 同时方便试样回收。

## 2 铝硅合金热分析特征值分析

利用热分析仪在进行热分析试验时, 由于主要是对未变质和变质后合金的冷却曲线进行分析, 所以对于合金未变质处理时得到的参数, 即合金标准参数, 我们也要进行合理的分析和处理, 包括所有的特征值信息。因为标准参数值是否准确直接影响铝硅合金变质效果的判别, 它是整个热分析系统的基础。在每炉浇注时都要取得合金的标准参数以保证试验的随机性, 最后取平均值作为标准热分析特征值, 这样得到的标准参数更准确合理。每一组数据浇注3次, 得到平均标准热分析特征值, 结果如表2。



图1 TA110型热分析仪  
Fig. 1 TA110 thermal analyzer

表2 A356.2合金各组标准热分析特征值数据  
Table 2 Standard thermal analysis characteristic value data of each group of A356.2 alloy

序号	Sr含量/%	TSO/℃	$\Delta$ TSO/℃
1	0	574.2	0
2	0.002 3	571.9	2.3
3	0.004 2	570.3	3.9
4	0.007 2	568.5	5.7
5	0.012 2	567.9	6.3
6	0.016 1	568.0	6.2
7	0.021 3	567.9	6.3
8	0.025 0	567.9	6.3

根据表2可以看出, 随着Sr加入量的改变, 合金共晶阶段的特征值参数有较为明显的变化。当Sr加入量从0增加到0.012 2%时, 从整体趋势上看, 共晶生长温度TSO从574.2℃降低至567.9℃, 达到最高值; 当Sr加入量达到0.025%时, 共晶温度到567.9℃, 数值趋于稳定, 这可能是由于铝硅合金共晶硅的析出是有限的; 当Sr含量为0.012 2%时, 共晶硅基本全部析出, 结晶潜热释放充分, TSO减小; 继续增加Sr含量, 共晶硅没有再析出, 结晶潜热的释放没有再增加, 因此, 共晶温度没有再继续减小, 而是基本保持在一个平台上。

由图2可知, 变质效果随着Sr加入量的改变, 其 $\Delta$ TSO值有较为明显的变化, 而变化规律和TSO相反, 其变化趋势见图2。 $\Delta$ TSO为未变质合金共晶生长温度与变质后共晶生长温度的差值。从图2中可以看出,  $\Delta$ TSO先随Sr含量的增加而增加, 当Sr含量为0.012 2%时,  $\Delta$ TSO达到最大值。当Sr的含量超过0.012 2%时, 由于没有更多硅相析出,  $\Delta$ TSO值没有继续增加, 结晶潜热没有释放更多, 因此共晶温度没有继续减小, 值趋于稳定。

## 3 Sr含量对A356.2变质效果的影响

图3所示为A356.2铝合金在不同Sr含量时的金相组织。由图3a看出在未变质时, 硅相呈粗大针片状,  $\alpha$  (Al) 枝晶也十分粗大。加入变质剂Sr变质后,  $\alpha$  (Al) 枝晶得到细化, 硅相由针片状转变成短棒状或点状。图3可观察到不同含锶量的A356.2合金微观组织的变化, Sr含量为0.002 3%时,  $\alpha$  (Al) 枝晶和硅相开始细化, 但硅相仍呈短针棒状, 这种组织的试样断口晶粒粗大、平整, 变质效果不足, 如图3b; 当Sr含量增至0.004 2%时,  $\alpha$  (Al) 枝晶显著细化, 部分硅相已呈细针棒状, 变质效果中等, 如图3c; 当锶含量达到0.007 2%时, 合金显微组织出现突变, 硅相皆呈短棒状, 部分为点状,  $\alpha$  (Al) 枝晶进一步细化, 如图3d; 当Sr含量升至0.012%~0.025%时,  $\alpha$  (Al) 枝晶和硅相最细小, 分布

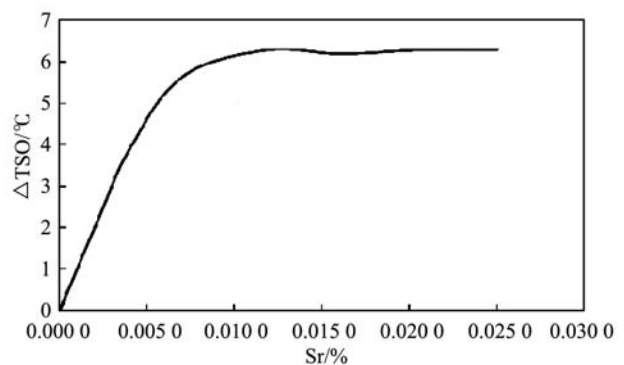


图2 合金中Sr含量与 $\Delta$ TSO的关系  
Fig. 2 Relationship between Sr content and  $\Delta$ TSO of the alloy

均匀,如图3e-h,变质效果良好,是最佳Sr含量范围。

#### 4 热分析特征值与变质效果之间的特征关系

通过对A356.2热分析特征值与金相组织的分析可得, A356.2铝合金热分析特征值 $\Delta TSO$ 与变质效果的对应关系如表3所示。

表3 A356.2铝合金的 $\Delta TSO$ 与变质效果的关系  
Table 3 Relationship between the modification effect and  $\Delta TSO$  of A356.2 alloy

$\Delta TSO/^\circ\text{C}$	变质效果
$\Delta TSO < 3.9$	变质不足
$3.9 \leq \Delta TSO \leq 5.7$	变质中等
$\Delta TSO > 5.7$	变质良好

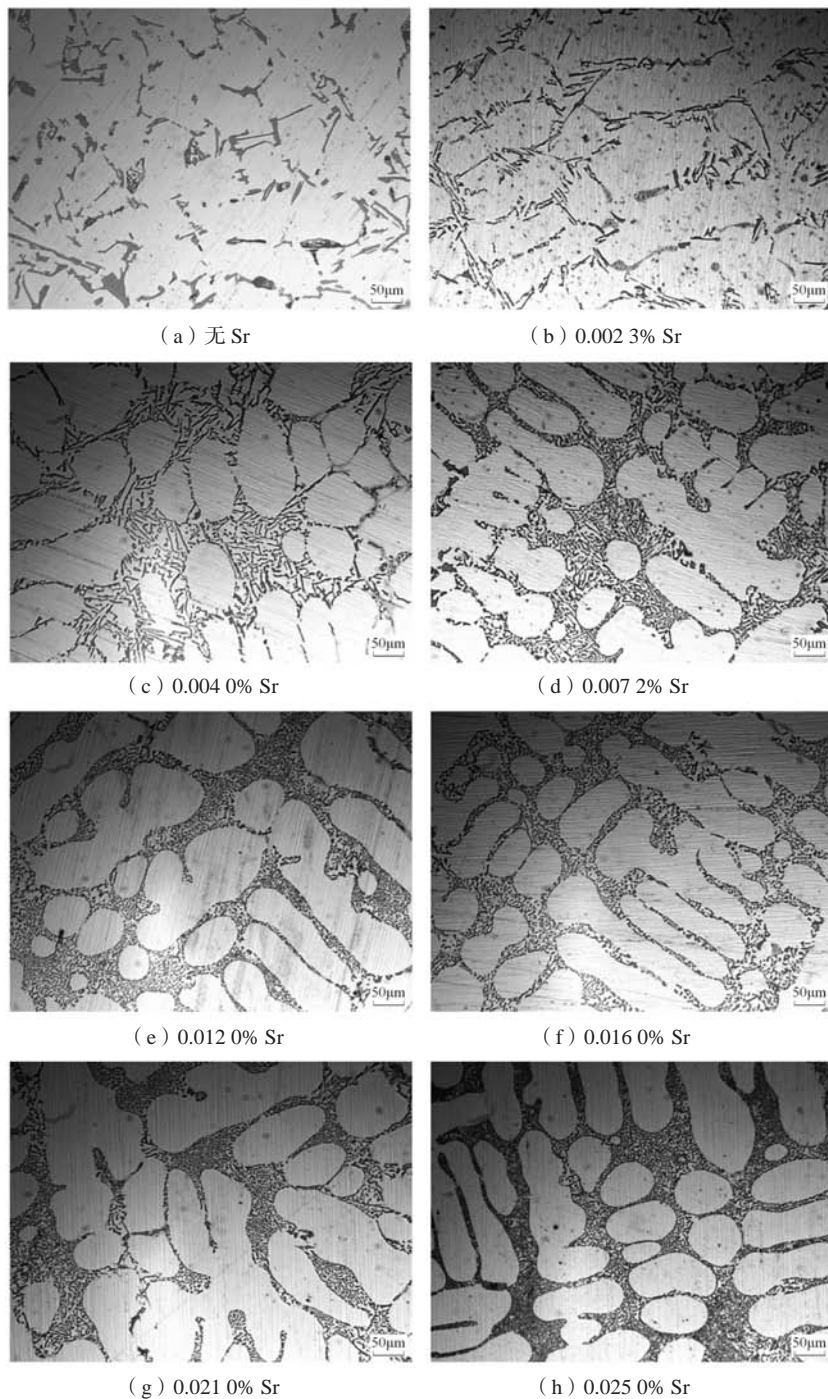


图3 不同Sr含量A365.2铝合金的金相组织

Fig. 3 Metallographic structure of A365.2 aluminum alloy with different Sr contents

同时,在亚共晶Al-Si合金中,Sr对共晶温度的影响还与熔体中Si、Mg、Fe、Cu等元素的含量及冷却速度有关。上述因素限制了在一定条件下得到的共晶温度或热分析特征值与变质效果间定量关系的适用范围。

因此,在做A356.2铝合金热分析时,一定要考虑合金中的其他元素及成分范围,尤其是Mg的含量变化对 $\Delta TSO$ 影响很大。新产品在做热分析前,要根据产品的化学成分范围、浇注温度及现场环境,通过试验确定热分析特征值 $\Delta TSO$ 与变质效果的对应关系。

A356.2铝合金的 $\Delta TSO$ 值不断升高,合金变质效果越来越好,当Sr的含量超过0.0122%时,由于没有更多硅相析出, $\Delta TSO$ 值没有继续增加,晶潜热没有释放更多,因此共晶温度没有继续减小,值趋于稳定。

(2) A356.2铝合金的 $\Delta TSO$ 与变质效果存在对应关系,当 $\Delta TSO < 3.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,变质效果不足,当 $\Delta TSO > 5.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,变质效果良好。利用热分析仪获得的特征值 $\Delta TSO$ 可以较准确而快捷地评估Sr元素对A356.2铝合金的变质效果。

## 5 结论

(1) 当变质剂Sr的含量从0增加到0.0122%时,

### 参考文献:

- [1] 刘云,杨晶,侯击波,等.微分热分析法在铝合金变质处理上的应用[J].铸造,2003(1):66-68.
- [2] 熊红玲,吴树森,袁文文,等.ZL104铝合金变质等级与变质效果的热分析研究[J].热加工技术,2007(3):28-30.
- [3] 马莹;杨刚;刘云.不同Sr加入量对Al-7Si合金变质效果的热分析研究[J].热加工工艺,2018(4):95-98.
- [4] 李大勇,李峰.AI-Si合金变质处理效果炉前快速检测技术研究与应用状况[J].中国铸造装备与技术,2003(6):13-15.
- [5] 金伟伟,龚著实.热分析法测定铝硅合金的变质效果[J].热加工工艺,1990(5):43-44.
- [6] 鲁薇华,王汝耀.锶变质铝硅合金的组织、性能及其变质工艺[J].特种铸造及有色合金,1997(7):44-49.
- [7] 刘永刚,张良明,陈光,等.Sr和RE变质对Al-Si铸造合金晶枝 $\alpha$ 的影响[J].有色金属,2005(5):15-19.

## Study of Sr Modification Effect on A356.2 Aluminum Alloy by Thermal Analyzer

YANG Hai-jun<sup>1,2</sup>, CAI Zhen-bin<sup>1,2</sup>, LIU Zhi-guo<sup>1,2</sup>, LI Guang<sup>1,2</sup>

(1. Qinhuangdao Development Zone Meilv Alloy Co., Ltd., Qinhuangdao 066004, Hebei, China; 2. Hebei Wheel New Material and Testing Technology Innovation Center, Qinhuangdao 066004, Hebei, China)

### Abstract:

As different amounts of Sr elements are added to A356.2 aluminum alloy to modify the silicon phases in the alloy, the characteristic value TSO can be obtained by the thermal analyzer, so as to obtain the value  $\Delta TSO$  which is the eutectic growth temperature reduction before and after modification. By analyzing the corresponding relationship between the metallographic structure of the alloy and the different  $\Delta TSO$  values, it is found that when  $\Delta TSO < 3.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the metallographic structure shows an insufficient silicon modification to the alloy; when  $3.9\text{ }^{\circ}\text{C} < \Delta TSO < 5.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the metallographic structure shows a medium silicon modification effect; when  $\Delta TSO > 5.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the metallographic structure shows a excellent silicon modification effect. Therefore, the analysis results of the thermal analyzer can be directly used to judge the modification effect of silicon for the A356.2 alloy. And this method can save time and labor.

### Key words:

thermal analyzer; A356.2 aluminum alloy; Sr; modification