

# 稀土复合微合金化对 A356.2 铝合金组织与性能的影响

叶 珍, 苗赛男, 郑长清, 朱大智

(保定市立中车轮制造有限公司 河北省高强韧轻量化车轮技术创新中心, 河北保定 071000)

**摘要:** 通过光学显微镜、扫描电镜和拉伸试验机等分析手段研究了多元稀土元素复合添加对 A356.2 铝合金微观组织及力学性能的影响, 并与添加 Al-Ti-B 和 Al-Sr 的 A356.2 微观组织及力学性能进行了对比。结果表明, 在多种元素复合添加后, A356.2 铝合金的细化和变质效果均较添加 Al-Sr、Al-Ti-B 时要好, 含 Fe 相也从针状转变成细小的颗粒状。且多元稀土元素复合添加后, 合金的伸长率为 6.26%, 较添加前的 4.40% 提升了 42.38%。

**关键词:** A356.2 铝合金; 稀土元素; 微观组织; 伸长率

汽车轻量化是目前汽车工业研究的重点之一<sup>[1]</sup>。铝合金的诸多优点使之逐渐成为汽车轻量化的理想材料<sup>[2]</sup>。A356.2 铝合金因其优越的铸造性能以及耐腐蚀性、可焊性, 自诞生以来就迅速应用到汽车轮毂、发动机等关键部件上, 并且在航空、航天、高速铁路和建筑等领域具有广阔的应用前景<sup>[2-3]</sup>。

目前, 铝合金车轮生产行业中最亟需解决的就是轮辐等厚大部位伸长率较低的问题, A356.2 铝合金车轮厚大部位具有的粗大枝晶、层片状共晶硅会极大降低其安全性<sup>[4-6]</sup>, 为了进一步提高其性能, 需要对其初生相  $\alpha$ -Al、共晶硅和某些杂质相的微观组织形貌进行改变和优化。目前铸造铝合金车轮生产过程中基本使用 Al-Ti-B 为细化剂、Al-Sr 为变质剂对合金进行细化和变质处理<sup>[5, 7-9]</sup>, 但是 Al-Ti-B、Al-Sr 在应用的过程中均存在不足。Al-Ti-B 在熔体中反应生成的  $TiB_2$  易聚集, 当添加量较大时就形成杂质<sup>[10]</sup>。Sr 会使合金中的含氢量大量增加, 造成铸件的针孔率提升, 降低铸件的力学性能<sup>[11]</sup>。有研究表明, Zr、Mn、Cr、Ba、Ca、Er、La、Ce 等元素对合金中的有害相具有良好的转变作用, 例如可以使层片状的共晶硅转变为纤维状或者细化复杂铁相组织<sup>[12-17]</sup>。在铸造铝硅合金中加入适量稀土, 除了能够使共晶硅改变形貌外, 还可以细化合金组织, 以及降低熔体中的氢含量从而有效改善合金的力学性能<sup>[10-11]</sup>。此外, 针状 Fe 相也容易在合金受力的过程中形成应力集中, 使合金塑性降低, 研究表明, Mn、Cr、Co 对 Fe 相具有良好的变质作用, 使针状 Fe 相断裂分叉或转变为汉字状, 大大减少针状 Fe 相的尺寸和数量<sup>[18-20]</sup>。本文主要研究了合金元素对 A356.2 铝合金微观组织和力学性能特别是伸长率的影响, 并分析了其影响机理。

## 1 试验条件及方法

### 1.1 试验材料

母材采用工业级 A356.2 合金锭, 其化学成分见表 1。试验过程中通过在 A356.2 铝合金中加入 0.03% 的 Al-10RE (65Ce35La) 稀土元素和以中间合金形式加入的辅助元素 0.4% Cr、0.02% Sr, 配制多元稀土元素复合添加合金 (以下简称为新合金)。另外设置 A356.2 合金 (以下简称为常规合金) 为对比参照组, 常规合金组中分别添加 0.2% Al-10Sr、0.2% Al-5Ti-1B 等常规中间合金作为变质剂、细化剂。

#### 作者简介:

叶 珍 (1974-), 男, 高级工程师, 主要从事汽车铝合金车轮的研发和制造工作。电话: 0312-5997671, E-mail: yezhen@lzwheel.com

中图分类号: TG146.2<sup>+</sup>1  
文献标识码: A  
文章编号: 1001-4977 (2021) 03-0356-05

#### 收稿日期:

2020-06-10 收到初稿,  
2020-11-16 收到修订稿。

## 1.2 试验流程

准备足量的A356.2铝锭及各元素的中间合金，通过计算得出各合金的加入量。将铝锭放入坩埚内随炉升温，并通过温度记录仪实时监控坩埚炉内的温度。待铝块完全熔化且温度稳定在740℃后，将配置好的中间合金加入，并用石墨棒搅拌均匀；利用高纯度流动的氩气精炼熔体10 min，除去表面浮渣后静置几分钟并对铝液进行成分检测，通过ICP光谱仪确定合金成分，见表2；当铝液温度为700℃时，将其倒入提前预热到480℃的铸铁模具中，得到所需的模拟轮辐的铸态试棒；合金棒体按T6热处理工艺热处理；将热处理完毕后的单铸棒随正常生产线进行涂装。上述过程中，除了加入的中间合金不同外，常规合金与新合金其余试验参数无任何差异。

## 1.3 检测方法

将热处理后的铸棒根据GB/T 228.1标准加工成拉伸试样，常温下在WDW-50电子万能试验机上对材料的力学性能进行测试，所得的每个数据为4次测试结果的平均值；性能测试完毕后在拉伸断棒的夹持端上切取一块制成金相试样，经过粗磨、细磨、研磨抛光处理后，制成金相样品，用Imager.A2m研究级金相显微镜观察其微观组织。

# 2 试验结果与分析

## 2.1 多元稀土元素复合添加对A356.2铝合金组织的影响

图1为两组添加不同中间合金得到的A356.2铝合金的100倍金相组织。从图中可以看到常规合金组与新合金组的 $\alpha$ -Al相均存在一定方向性的树枝状晶组织，且两组在局部均存在等轴晶。但是常规合金组（图1a）中 $\alpha$ -Al相的整体尺寸及其二次枝晶间距（SDAS）明显比新合金组（图1b）大，对两组合金的具体SDAS进行检测，检测结果如表3所示，常规合金组的SDAS为41.60  $\mu\text{m}$ ，而新合金组为27.29  $\mu\text{m}$ ，说明新合金组中添加的细化元素（Al-RE）对A356.2铝合金的细化效果比常规合金组添加Al-Ti-B更加优异。

图2为两组不同中间合金处理的A356.2铝合金的200倍金相组织图及晶界析出相的能谱分析结果。图2a、b右上角的嵌入图为各自的局部区域放大图，图2c、d分别为图2a、b中晶界析出相的化学成分。从图2a、b中可以观察到，常规合金组与新合金组中的共晶硅变质效果均较好，整体尺寸较小，但常规合金组（图2a）中局部会出现尺寸较大的共晶硅，说明常规合金组的共晶硅局部变质不均匀；而新合金组中的共晶硅尺寸较均匀，且基本呈细小的颗粒状或短棒状，

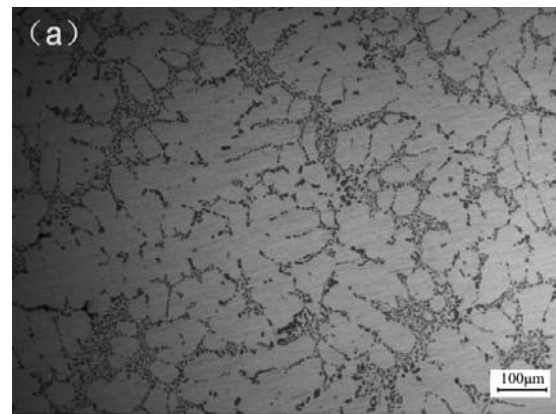
表1 A356.2铝合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of A356.2 aluminum alloy  $w_B/\%$

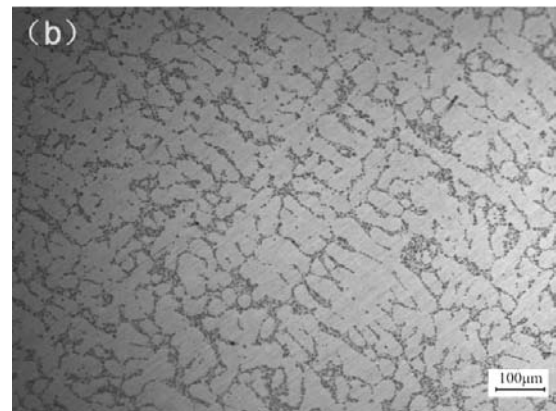
Si	Fe	Mg	Ti	Ni	Zn	Cu	Mn	Sr	Al
6.91	0.109	0.320	0.104	0.009	0.014	0.004	0.003	0.000	1 余量

表2 常规A356.2铝合金与新合金材料的化学成分  
Table 2 Chemical composition of conventional A356.2 aluminum alloy and new alloy material  $w_B/\%$

合金	Si	Fe	Mg	Ti	Sr	Cr	Ce	La	Al
常规合金	6.90	0.11	0.32	0.10	0.02	0	0	0	余量
新合金	6.53	0.11	0.30	0.09	0.02	0.39	0.019	5.010	5 余量



(a) 常规合金组



(b) 新合金组

图1 不同中间合金处理的A356.2铝合金金相组织  
Fig. 1 Microstructure of A356.2 alloy treated by different master alloys

表3 常规A356.2铝合金与新合金材料的二次枝晶间距对比  
Table 3 Comparison of secondary dendrite arm spacing between conventional A356.2 aluminum alloy and new alloy material

合金	SDAS/ $\mu\text{m}$
常规合金组	41.60
新合金组	27.29

说明新合金组中的共晶硅变质较均匀；从嵌入图中还可以观察到两组合金中晶界析出相的形貌变化，图2c、d的能谱分析显示析出相均为含Fe相，图2a中局部会出现针状含Fe相，但是图2b中的含Fe相均呈细小的颗粒状。

新合金组合金组织细化变质效果的优化主要是由于稀土对合金的细化效果和变质效果的加强。稀土可以对A356.2铝合金产生明显的细化效果，主要是因为：在铝熔体中加入稀土元素La、Ce后会产生共晶反应，形成 $\alpha(\text{Al}) + \text{Al}_4\text{RE}$ 和 $\alpha(\text{Al}) + \text{Al}_{11}\text{RE}_3$ ，共晶反应得到的 $\text{Al}_4\text{RE}$ 和 $\text{Al}_{11}\text{RE}_3$ 与 $\alpha\text{-Al}$ 具有较小的晶格错配度，而且本身的熔点较高（高于1 200 °C）<sup>[21]</sup>，会在A356.2铝合金凝固过程中成为 $\alpha\text{-Al}$ 的异质形核核心，从而达到细化 $\alpha\text{-Al}$ 的目的<sup>[22-23]</sup>。

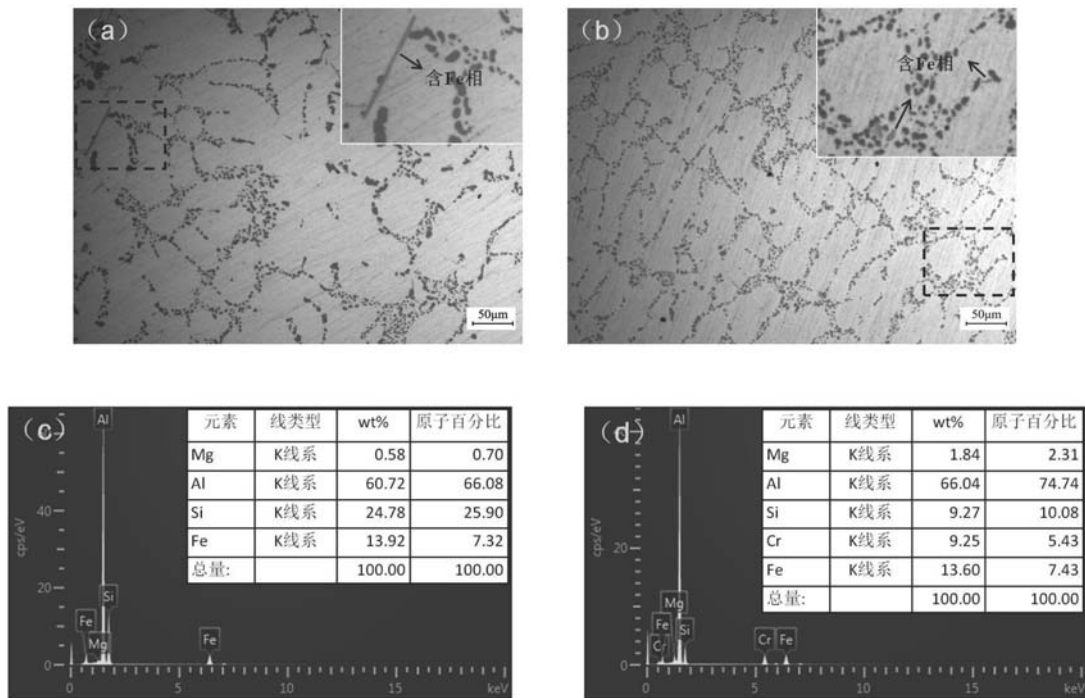
根据共晶硅变质的杂质诱导孪晶理论，向铝熔体中添加的变质剂，其原子会嵌入硅相晶格中成为异类原子缺陷，引起晶格畸变，从而导致硅相在更多的方向产生孪晶<sup>[22-23]</sup>，使共晶硅实现多向生长。在上述过程中

变质剂原子半径大小是衡量变质能力的首要条件<sup>[24]</sup>，最合适的比例是 $r_i/r_{\text{Si}}=1.65$ ，式中， $r_i$ 为变质原子半径， $r_{\text{Si}}$ 为硅原子的半径。稀土元素La、Ce和Sr的半径与硅比值均接近1.65，可认为是有效的变质剂，对共晶硅有良好的加强变质效果。这一结论也与李干<sup>[25]</sup>等人的从杂质产生孪晶观点出发，认为两种变质剂的变质机理相同，变质效果不会相互削弱这一观点相符合。

元素Cr在Fe相中的固溶度远大于在Al基体中的固溶度，因而主要固溶于Fe相中。Cr原子在Fe中的固溶度较大，在Fe相中存在时，会占据Fe原子的原有生长位置，阻碍了Fe原子的扩散，减缓Fe相沿择优生长方向的生长，使Fe相不易沿针状方向生长，而横向生长，容易长成汉字状或鱼骨状。

## 2.2 多元稀土元素复合添加对 A356.2 铝合金力学性能的影响

表4为A356.2铝合金与新合金材料的力学性能对比。从表中可以看出：新合金组在添加三种元



(a)、(c) 常规合金组；(b)、(d) 新合金组

图2 不同中间合金处理的A356.2合金的金相组织及析出相能谱分析结果：

Fig. 2 Microstructure of alloys and results of energy spectrum analysis of precipitates

表4 A356.2铝合金与新合金材料的力学性能对比

Table 4 Mechanical properties between A356.2 aluminum alloy and new alloy material

合金	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
常规合金组	224.95	283.69	4.40
新合金组	222.37	280.70	6.26

素后, 其屈服强度、抗拉强度分别为222.37 MPa、280.70 MPa, 较常规合金组在添加Al-Sr、Al-Ti-B后的224.95 MPa、283.69 MPa分别降低了1.15%、1.05%。但是新合金组合金的伸长率为6.26%, 比常规合金组的4.40%提升了42.38%。新合金组伸长率提升的原因主要是合金的细化和变质效果较好, 且含Fe相形貌也得到改善。但是可以看出, 新合金组的强度稍微呈下降趋势, 主要是因为新合金组的添加元素较多, 与常规合金组相比外来合金的添加量较大, 在一定程度上稀释了Mg、Si等主要元素的含量, A356合金的强度提升主要依靠时效后Mg<sub>2</sub>Si的含量及尺寸, 新合金组中的整体Mg、Si含量降低会导致强度有一定程度的下降。但是本研究的主要目的是提升合金的伸长率, 因此研究结

果也达到了预期目标, 若将Mg、Si添加到正常范围, 反而可能会稍降低合金的塑性。

### 3 结论

(1) 新合金组在添加稀土和元素Sr、Cr后, 合金的细化程度、变质程度均较常规合金组在添加Sr、Al-Ti-B时有所改善, 新合金组中的含Fe相形貌也从针状转变成细小的颗粒状。

(2) 本研究中RE、Sr和Cr复合添加下的新合金组的屈服强度、抗拉强度、伸长率分别为222.37 MPa、280.70 MPa、6.26%, 较常规合金组的224.95 MPa、283.69 MPa、4.40%分别提升了-1.15%、-1.05%、42.38%, 达到了本研究提升合金伸长率的目的。

#### 参考文献:

- [1] 范军锋, 陈铭. 中国汽车轻量化之路初探 [J]. 铸造, 2006, 55 (10): 995-998.
- [2] POURBAHARI B, EMAMY M. Effects of La intermetallics on the structure and tensile properties of thin section gravity die-cast A357 Al alloy [J]. Materials and Design, 2016, 94: 111-120.
- [3] LIU Z W, WANG X M, HAN Q Y, et al. Effects of the addition of Ti powders on the microstructure and mechanical properties of A356 alloy [J]. Powder Technology, 2014, 253 (2): 751-756.
- [4] ZHU M, JIAN Z Y, YANG G C, et al. Effects of T6 heat treatment on the microstructure, tensile properties, and fracture behavior of the modified A356 alloys [J]. Materials and Design (1980-2015), 2012, 36: 243-249.
- [5] ZHU M, JIAN Z Y, YAO L J, et al. Effect of mischmetal modification treatment on the microstructure, tensile properties, and fracture behavior of Al-7.0%Si-0.3%Mg foundry aluminum alloys [J]. Journal of Materials Science, 2011, 46 (8): 2685-2694.
- [6] BORODIANSKIY K, ZINIGRAD M. Modification performance of WC nanoparticles in aluminum and an Al-Si casting alloy [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2016, 47 (2): 1302-1308.
- [7] MALLAPUR D G, KORI S A, UDUPA K R. Influence of Ti, B and Sr on the microstructure and mechanical properties of A356 alloy [J]. Journal of Materials Science, 2011, 46 (6): 1622-1627.
- [8] YU L, LIU X F, WANG Z Q, et al. Grain refinement of A356 alloy by AlTiC/AlTiB master alloys [J]. Journal of Materials Science, 2005, 40 (14): 3865-3867.
- [9] CHEN R, XU Q Y, JIA Z N, et al. Precipitation behavior and hardening effects of Si-containing dispersoids in Al-7Si-Mg alloy during solution treatment [J]. Materials and Design, 2016, 90 (9): 1059-1068.
- [10] 刺军, 尹建宝, 李逸泰, 等. Al-5Ti-B-Ce与Al-5Ti-B-La中间合金对工业纯铝晶粒细化效果的对比 [J]. 轻合金加工技术, 2015, 43 (11): 30-34.
- [11] 孙洪强, 赵玉涛, 陈刚, 等. 添加微量稀土对锆变质铝轮毂材料组织和性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2007, 36 (13): 5-8.
- [12] 乔进国, 刘相法, 刘相俊, 等. Al-P中间合金的变质特性及变质机理探讨 [J]. 内燃机配件, 2003 (5): 19-23.
- [13] 徐佐, 吴大勇, 李振宇, 等. Mg与稀土Ce混合添加对A356.2铝合金组织与性能的影响 [J]. 铸造, 2016, 65 (9): 855-859.
- [14] KNUUTINEN A, NOGITA K, MCDONALD S D, et al. Modification of Al-Si alloys with Ba, Ca, Y and Yb [J]. Journal of Light Metals, 2001, 1 (4): 229-240.
- [15] 李俊硕. 钕元素对亚共晶A356合金组织与力学性能的影响 [D]. 辽宁: 大连理工大学, 2018.
- [16] NOGITA K, MCDONALD S, DAHLE A. Eutectic modification of Al-Si alloys with rare earth metals [C]// Japan Institute of Metals Fall Meeting. Japan Institute of Metals, 2004.
- [17] 白霄, 姚三九, 史霞, 等. Zr, Cr元素对Al-Si合金电导率与力学性能的影响 [J]. 铸造, 2011, 60 (4): 372-372.
- [18] 宋东福, 王顺成, 周楠, 等. Al-Si合金中富铁相形态及其影响因素研究进展 [J]. 材料工程, 2016 (5): 120-128.

- [19] 范晓明, 谭聪, 马斌, 等. Cr对高铁量的A356合金铸态显微组织的影响 [J]. 热加工工艺, 2014, 43 (11): 62-64, 71.
- [20] 范晓明, 雷昶, 马斌, 等. Sr、Cr对高铁A356合金力学性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2014, 43 (18): 103-105.
- [21] LI X Z, FAN J L, SU Y Q, et al. Lamellar orientation and growth direction of  $\alpha$  phase in directionally solidified Ti-46Al-0.5W-0.5Si alloy [J]. Intermetallics, 2012, 27 (Complete): 38-45.
- [22] QIU C R, MIAO S N, LI X R, et al. Synergistic effect of Sr and La on the microstructure and mechanical properties of A356.2 alloy[J]. Materials and Design, 2017, 114: 563-571.
- [23] 李新荣. A356.2铝合金用Ar-Sr-La变质剂的开发及其细化、变质效果的研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2016.
- [24] 杜挺. 稀土元素在金属材料中的一些物理化学作用 [J]. 金属学报, 1997, 33 (1): 69.
- [25] 李干, 罗吉荣, 宋象军, 等. 高温铝液的Sr-Re复合变质研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2001 (5): 16-18.

---

## Effect of Rare Earth Compound Microalloying on Microstructure and Mechanical Properties of A356.2 Aluminum Alloy

YE Zhen, MIAO Sai-nan, ZHENG Chang-qing, ZHU Da-zhi

(Baoding Lizhong Wheel Manufacturing Co., Ltd., Hebei High Strength and Toughness Lightweight Wheel Technology Innovation Center, Baoding 071000, Hebei, China )

### Abstract:

The microstructure and mechanical properties of A356.2 aluminum alloy treated by multiple rare earth compound were studied by means of optical microscope, scanning electron microscope and tensile testing machine, and compared with those of A356.2 aluminum alloy treated by Al-Ti-B and Al-Sr master alloys. The results show that after the addition of multiple rare earth compound, the refinement and modification effects of A356.2 aluminum alloy were better than those with treated by Al-Ti-B and Al-Sr master alloys, and the morphology of the Fe-containing phase also changed from needle-like to fine particles. In addition, the elongation of the alloy treated with multiple rare earth compound is 6.26%, with 42.38% higher than 4.40% obtained by the conventional alloy refined and modified by Al-Ti-B and Al-Sr.

### Key words:

A356.2 aluminum alloy; rare earth element; microstructure; elongation