

# 变质处理对 A356 合金组织及摩擦磨损性能的影响

曾凡娇, 李便霞

(河南农业职业学院 机电工程学院, 河南郑州 451450)

**摘要:** 研究了Sr变质对A356合金组织及摩擦磨损性能的影响。结果表明: 添加0.04%Sr可显著细化共晶硅形貌, 使其由未变质铸态下的针片状和板条状转变为细小的颗粒状和蠕虫状。合金布氏硬度(HBW)由未变质时的46.3提高到了58.8, 硬度值提高了27%。经0.04%Sr变质后的合金, 试样表面磨损形貌较为平滑, 犁沟和磨痕浅而细小, 并逐渐消失, 局部区域出现微小的剥落坑和剥落区, 磨损形貌有磨削剥落和粘着痕迹, 磨损机制为微小磨粒磨损和粘着磨损。

**关键词:** A356合金; Sr变质; 显微组织; 摩擦磨损; 磨损机制

A356合金是亚共晶Al-Si铸造合金之一, 其具有良好的铸造性能, 热膨胀系数小, 较高的耐热、耐蚀和耐磨性。由于该合金成分靠近共晶区域, 因而在铸造过程中流动性好、无热裂性倾向、气密性高、无气孔等现象, 特别是铝合金因其质量轻、比强度高、比重小, 机械加工性好, 成为了生产汽车零件的理想轻量化材料。所以常用于铸造汽车活塞和轮毂等铸件<sup>[1-3]</sup>。由于A356合金在铸造过程中易出现粗大针片、细长杆状共晶硅组织, 严重割裂合金基体组织, 导致合金的力学性能显著下降。因此, 需要在合金中添加各类化学变质剂, 如Na、Bi、Sr、Sb及稀土La、Y等<sup>[4-10]</sup>, 来改善和细化共晶硅形貌。虽然当前对A356铝合金的应用和研究较多, 但对该合金变质后合金的摩擦磨损性能研究的相对较少, 由于A356铝合金在实际生产上大多采用Sr变质细化共晶硅尺寸并调控其形貌, 为此, 本文分析了Sr变质前后对A356合金组织的影响, 重点研究了Sr变质前后对A356合金试样的摩擦磨损行为和磨损机制的影响。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

试验所用A356铝合金是由工业纯铝(纯度99.7%)、紫铜(纯度99.8%)、工业纯镁(纯度99.9%)和Al-20%Si、Al-5%Ti中间合金, 按表1中名义化学成分熔炼而成。采用TM-998Z直读光谱仪测定合金实际化学成分见表1所示。变质剂为Al-10%Sr中间合金, 除气剂为六氯乙烷。

表1 A356合金化学成分  
Table 1 Nominal chemical compositions of the A356 alloy

项目	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Sr	Al
名义成分含量	6.5~7.5	<0.1	<0.05	0.30~0.45	<0.05	<0.2	-	余量
实际成分含量	7.223	0.062	0.022	0.435	0.026	0.184	-	余量
添加Sr实际成分含量	7.214	0.058	0.18	0.423	0.022	0.178	0.036	余量

作者简介:

曾凡娇(1984-), 女, 讲师, 主要从事机械设计与制造、工程材料等方面的研究。E-mail: 282201106@qq.com

中图分类号: TG146.21;  
TG249.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)  
10-1251-05

收稿日期:

2022-01-22 收到初稿,  
2022-03-10 收到修订稿。

## 1.2 试验方法及流程

把称量好的工业纯铝、紫铜及Al-20Si%、Al-5%Ti中间合金一同放入石墨坩埚中，将石墨坩埚放入井式坩埚电阻炉中进行熔炼。炉温设置为750℃左右，保温1~1.5 h。当合金完全熔化后，再将炉温降至700℃，把铝箔包裹称量好的纯镁用漏勺压入合金熔体直至熔化。然后静置保温5 min，随后将炉温升至730℃，加入中间合金变质剂Sr，对合金熔体进行变质处理，变质时间为30 min。之后升温至750℃，用添加量为0.5%的六氯乙烷对合金熔体进行精炼除气、扒渣，最后把合金液浇注到已事先预热300℃的金属模具（模具尺寸为 $\Phi 25\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ ）中，得到金属试棒（图1）。在距离金属试棒底端50~80 mm高度的中间位置，采用DK7745型电火花数控线切割机切取直径为 $\Phi 4\text{ mm}$ 的摩擦磨损试样及组织观察试样。将所取试样经砂纸粗磨、细磨、抛光等程序制成金相试样，采用0.5%的氢氟酸溶液腐蚀，使用TX-400V金相显微镜观察合金组织形貌。采用JSM-6490型扫描电镜（SEM）观察试样磨损表面形貌，使用D8 Focus型X射线衍射仪（XRD）对合金物相进行分析，利用HB-3000C电子布氏硬度计对试样进行硬度测试。

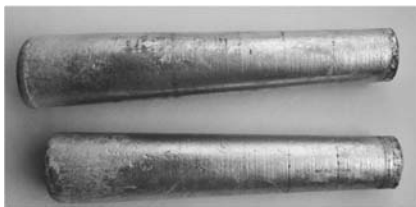


图1 金属试棒  
Fig. 1 Metal test bars

将 $\Phi 4\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 圆柱试样放置在型号为MMX-3G的销盘式摩擦磨损试验机上进行摩擦磨损试验，摩擦副材质为304不锈钢，硬度为HRC45，摩擦环外径与内径尺寸分别为 $\Phi 54\text{ mm}$ 和 $\Phi 37\text{ mm}$ ，摩擦环厚度为

10 mm。试验温度为25℃干摩擦，载荷为50 N，转速为200 r/min和150℃油润滑，载荷为50 N，转速为100 r/min的摩擦磨损环境中，采用FA1004电子分析天平（精度0.1 mg）对试样磨损的失重量进行测量。试样失重测量间隔为10 min。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 合金显微组织

图2所示为A356合金Sr变质前后的XRD衍射图谱，图3为合金显微组织形貌。

从图2中可看出，A356合金变质处理前后，合金中的主要组织为 $\alpha\text{-Al}$ 相和Si相。由于合金中的其他合金元素含量较少，因此在XRD图谱中很难看出其他元素物相的衍射峰值。

从图3中可观察到，合金组织中主要由初生 $\alpha\text{-Al}$ 相和共晶硅组成。当合金中未添加Sr变质时（图3a），合金组织的共晶硅形貌大多呈细长杆状、针片状及板条状，局部夹杂着多角形块状，共晶硅的平均尺寸约为25  $\mu\text{m}$ ，这严重割裂合金中的基体组织。当合金中添加0.04% Sr变质（图3b）时，共晶硅形貌全部转变成细小的颗粒状和蠕虫状组织。未变质合金组织中粗

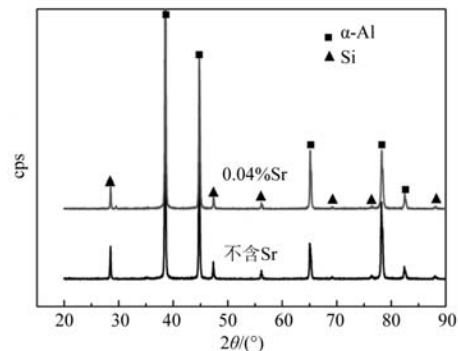
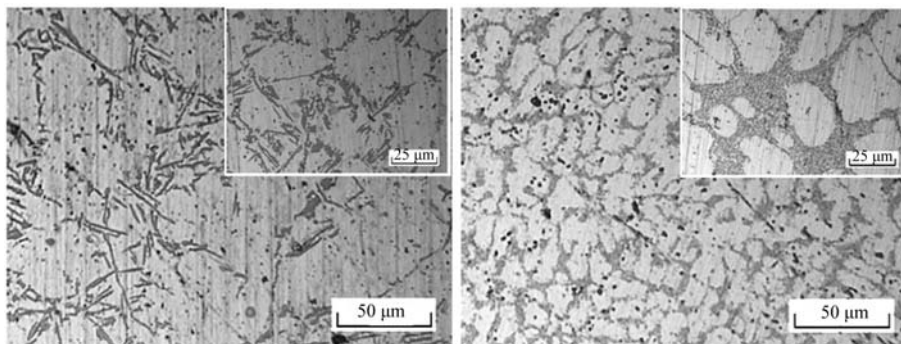


图2 Sr变质前后A356合金的XRD图谱  
Fig. 2 XRD patterns of the A356 alloys before and after Sr modification



(a) 不添加Sr (b) 0.04% Sr

图3 Sr变质前后A356合金显微组织形貌

Fig. 3 Microstructures of the A356 alloys before and after Sr modification

大的板片状、针片状及细长杆状的共晶硅形貌消失，共晶硅变质效果显著。未变质合金试样的布氏硬度（HBW）为46.3，经0.04% Sr变质后，合金试样的布氏硬度为（HBW）为58.8，其硬度值提高了27%。

## 2.2 摩擦磨损性能

图4为Sr变质前后A356合金在不同状态下的摩擦磨损量随磨损时间的变化曲线图。其中，图4a为A356合金试样Sr变质前后，在室温25℃下、载荷50 N、转速200 r/min的干摩擦条件下的磨损量随磨损时间的变化曲线图。图4b为A356合金试样Sr变质前后，在150℃油润滑条件下、载荷50 N、转速200 r/min的摩擦磨损量随磨损时间变化曲线图。

从图4a中磨损量随磨损时间的变化曲线可以看出，未变质合金试样的磨损量随磨损时间的延长，其磨损程度明显加剧，磨损量分别为8.2、9.8、14.6、21.4、25.3、26.4 mg。而经过0.04% Sr变质后的试样，其磨损量随磨损时间的延长明显降低，分别为4、6.2、9.8、13.4、14.6、16.6 mg。由此可知，未变质处理的合金试样的磨损量曲线斜率明显大于Sr变质后合金试样的磨损量斜率。因此，经Sr变质后的合金试样，表

面耐磨性明显提高。从图4b中可看出，未变质合金试样，在150℃油润滑摩擦条件下，相同磨损时间间隔，合金试样的磨损量明显比室温干摩擦环境下的磨损量减少，分别为2.8、6.2、8.2、10.2、13.4、15.6 mg。同时，发现合金试样在变质前后，总的磨损量变化趋势相同。合金经0.04% Sr变质后的磨损量分别为1.2、3.2、6.4、8.3、10.2、11.8 mg。变质后的合金试样磨损量曲线斜率明显小于未变质合金的磨损量的曲线斜率，这说明，经变质后的合金在油润滑条件下仍保持更好的耐磨性。图5所示为Sr变质前后合金试样在室温25℃下磨损1 h后的表面磨损形貌。

由图5a可见，室温下未经Sr变质的合金试样表面出现较粗大的磨痕和犁沟，且在犁沟磨痕的两侧出现较多的脱落、撕裂起皮。此外，磨痕表面有磨损挤压造成的沟槽，且有剥落层和平行滑动方向的犁沟产生，这是由于合金组织中存在粗大板条状、针片状及块状硬脆相共晶硅。在摩擦磨损过程中，脆硬相共晶硅周围产生应力集中，导致粗大共晶硅块脱落，脱落后的较大磨屑在滑动过程中对铝基体表面产生加工硬化，同时，犁削试样表面，导致试样表面磨痕加剧，进而导致合金表面磨损程度严重，磨损机制属于磨粒

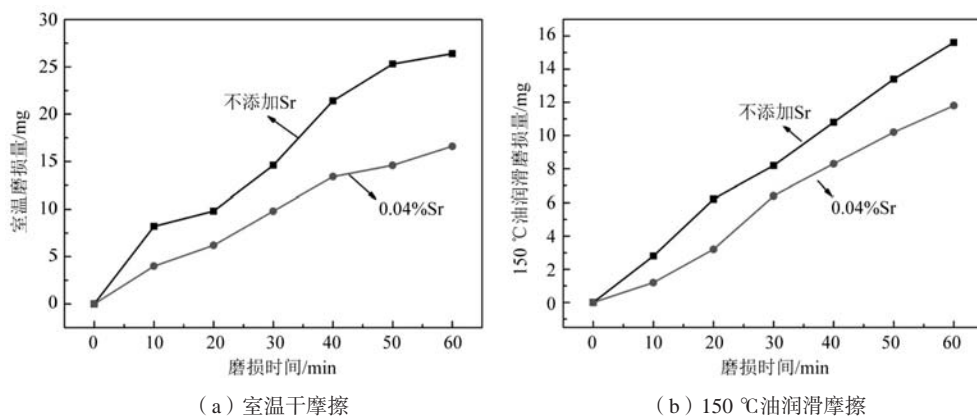


图4 Sr变质前后A356合金在不同状态下的摩擦磨损量随磨损时间的变化曲线图

Fig. 4 Variation curves of friction and wear amount of A356 alloy under different conditions with wear time before and after Sr modification

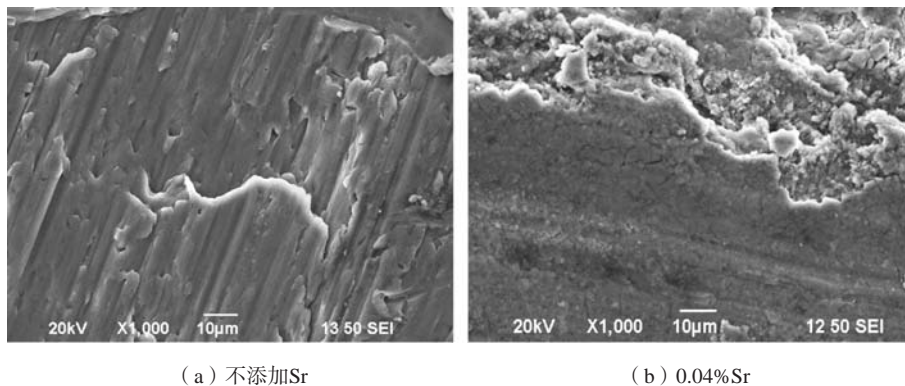


图5 Sr变质前后合金试样在室温下的干摩擦磨损表面形貌

Fig. 5 Dry friction surface wear morphologies of the alloy samples before and after Sr modification at room temperature

磨损+犁削磨损<sup>[11-13]</sup>。添加0.04% Sr变质后的合金试样(图5b),发现试样磨损表面的犁沟和磨痕变得细小且平滑,磨损形貌有磨削剥落和粘着痕迹,表面存在有微小裂纹,犁沟较少,有波纹状磨痕,同时磨损表面的磨痕中有很多细小的磨粒,有较小的剥落坑,犁沟较浅。这是因为经过Sr变质后,粗大的板片状、针片形和块状共晶硅全部转变成颗粒状和蠕虫状,均匀地分布在 $\alpha$ -Al基体中,整个合金基体硬度提高,降低了共晶硅颗粒在摩擦磨损过程中的应力集中。因此,合金表面的磨损犁沟消失和磨痕变浅,属于磨粒磨损+粘着磨损机制<sup>[9, 13-15]</sup>。

图6为150℃、载荷50 N、转速100 r/min的油润滑条件下, Sr变质前后合金试样的摩擦磨损形貌图。

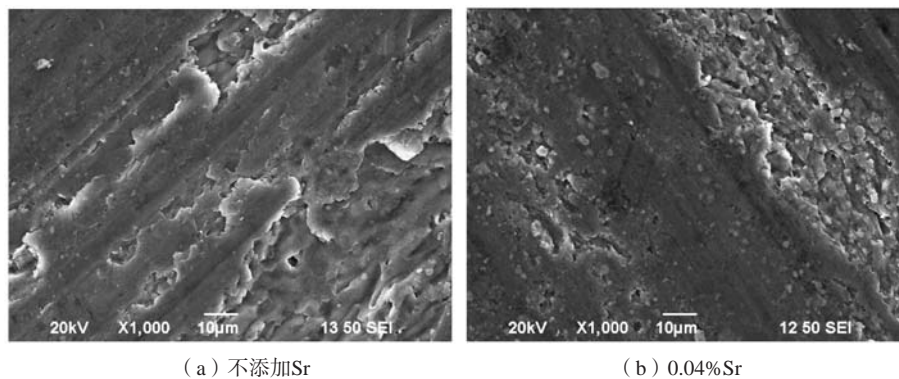


图6 Sr变质前后合金试样在150℃下的油润滑摩擦表面磨损形貌图

Fig. 6 Wear morphologies of oil-lubricated friction surfaces of the alloy samples before and after Sr modification at 150℃

### 3 结论

(1) 变质剂Sr不仅使A356合金中的共晶硅形貌由未变质合金组织中的针片状、板条状和块状转变为细小的颗粒状和蠕虫状。合金布氏硬度(HBW)由未变质时的46.3提高到了58.8,提高了27%。

(2) 无论在室温干摩擦和150℃油润滑摩擦环境下,未变质合金试样磨损表面均为粗大的磨痕和犁

沟,且在磨痕两侧出现较多的脱落、撕裂起皮。磨痕表面有磨屑挤压造成的沟槽,属于典型的磨粒磨损+犁削磨损机制。经0.04% Sr变质后的合金试样,其试样磨损表面的犁沟和磨痕都变得细小且平滑,局部区域出现微小的剥落坑,磨损形貌有磨削剥落和粘着痕迹,同时表面有微小裂纹,磨损机制为微小磨粒磨损+粘着磨损。

沟,且在磨痕两侧出现较多的脱落、撕裂起皮。磨痕表面有磨屑挤压造成的沟槽,属于典型的磨粒磨损+犁削磨损机制。经0.04% Sr变质后的合金试样,其试样磨损表面的犁沟和磨痕都变得细小且平滑,局部区域出现微小的剥落坑,磨损形貌有磨削剥落和粘着痕迹,同时表面有微小裂纹,磨损机制为微小磨粒磨损+粘着磨损。

#### 参考文献:

- [1] 刘旦,周俊,段军鹏. 铸造铝轮毂用A356合金元素强化研究现状[J]. 科技创新导报, 2020, 12: 63-64.
- [2] 何芳,庄林忠,何国元,等. 汽车轮毂用A356铝合金合金化的研究进展[J]. 铸造, 2021, 70(4): 431-437.
- [3] 怯喜周,王研,陶然,等. 稀土Er对A356.2合金微观组织和力学性能的影响[J]. 铸造技术, 2016, 37(12): 2527-2531.
- [4] 姜峰,索忠源,刘祥玲,等. 热处理对不同Sr含量变质A356合金组织及力学性能的影响[J]. 铸造, 2019, 68(1): 29-33.
- [5] 姜峰,索忠源,王德禹,等. 不同Sr含量变质对A356合金组织及力学性能的影响[J]. 铸造, 2018, 67(11): 1012-1015.
- [6] 姜峰,索忠源,关鲜洪,等. 热处理对混合稀土变质A356合金组织及力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(2): 1414-1417.
- [7] 胡中潮,于慧,崔元胜,等. 变质及不同时效工艺对A356合金组织和力学性能的影响[J]. 铸造, 2018, 67(5): 437-440.
- [8] 尹延国,朱国乾,林桢弟. Bi对2A12铝合金摩擦磨损特性的影响研究[J]. 轴承, 2016(9): 42-45.
- [9] 成剑锋,尹延国,李聪敏,等. Bi含量对4032铝合金力学及摩擦学性能的影响[J]. 轻合金加工技术, 2021, 49(1): 71-77.
- [10] 张苏,杨钢,吴云峰,等. 稀土La变质处理对A356铝合金显微组织的影响[J]. 热加工工艺, 2013, 42(17): 69-72.

- [11] 黄朝慧. 汽车零部件用低压铸造A356合金的摩擦磨损性能研究 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (17): 88-90, 93.
- [12] 王鑫, 刘祥玲, 牛玉, 等. 熔体过热处理对亚共晶Al-10Mg2Si合金磨损性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41 (1): 22-25.
- [13] 王志辉, 樊新波, 简忠武, 等. 压铸ZL101A铝合金摩擦磨损性能及机理的研究 [J]. 湖南工业职业技术学院学报, 2021, 21 (4): 7-12.
- [14] 张中可, 车云, 门三泉. ZL211铝合金耐磨性能和磨损机制研究 [J]. 热加工工艺, 2015, 44 (4): 63-65.
- [15] 梁朝杰, 王成磊, 梁满朝, 等. 不同温度固溶+时效处理对6082铝合金锻件组织和摩擦磨损性能的影响 [J]. 机械工程材料, 2020, 44 (9): 62-66.

---

## Effect of Modification Treatment on Microstructure and Friction and Wear Properties of A356 Alloy

ZENG Fan-jiao, LI Bian-xia

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Vocational College of Agriculture, Zhengzhou 451450, Henan, China)

### Abstract:

The effect of Sr modification on the microstructure and friction and wear properties of A356 alloy was studied. The results showed that the addition of 0.04% Sr significantly refined the morphology of the eutectic silicon from the needle-like and lath-like for unmodified as-cast alloy to fine granular and worm-like shapes. The Brinell hardness (HBW) has increased from HBW 46.3 for the unmodified alloy to HBW 58.8 for the alloy with the addition of 0.04%Sr, and the hardness value increased by 27%. After the alloy was modified by 0.04%Sr, the wear morphology of the sample surface was relatively smooth, the furrows and wear scars were shallow and fine, and gradually disappeared. There were small spalling pits and spalling areas in some areas. The wear morphology had grinding peeling and adhesion marks, and the wear mechanism was micro abrasive wear+adhesive wear.

### Key words:

A356 alloy; Sr modification; microstructure; friction and wear; wear mechanism

---