

# 超声振动下不同 Si 含量对轨道车辆用 ADC12 铝合金微观组织与性能的影响

吴奇<sup>1, 2</sup>

(1. 辽宁铁道职业技术学院铁道车辆学院, 辽宁 锦州 121000;

2. 大连交通大学机车车辆工程学院, 辽宁 大连 116028)

**摘要:** 为研究不同 Si 含量对超声振动制备轨道车辆用铝合金的影响, 通过光学显微镜 (OM)、扫描电镜 (SEM)、摩擦磨损试验机研究了 Si 对铝合金的微观组织、硬度、耐磨损性能和耐腐蚀性能的影响。结果显示, 超声振动处理后, 铝合金试样微观组织明显被细化, 长针状 Si 相和第二相被细化成颗粒状或短棒状。随着 Si 含量的增大,  $\alpha$ -Al 相尺寸和长径比先减小后增大, 硬度不断增大, 磨损量和腐蚀速率先减小后增大, 耐磨损性能和耐腐蚀性能先增强后减弱。当 Si 含量为 12% 时,  $\alpha$ -Al 相数量增多, 尺寸减小到 48.4  $\mu\text{m}$ , Si 相分布均匀, 磨损量和腐蚀速率最小分别为 25.9 mg 和 1.57 mg/h, 磨损表面几乎没有磨损坑出现, 犁沟变窄变浅, 腐蚀表面较光滑, 表现为均匀腐蚀。

**关键词:** 轨道车辆; Si 含量; 微观组织; 耐腐蚀性能; 耐磨损性能

## 作者简介:

吴奇 (1988-), 女, 讲师, 硕士, 研究方向为铁道车辆空调、铁道车辆制动技术。E-mail: Qiwu198802@163.com

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)06-0702-07

## 基金项目:

国家自然科学基金资助项目 (11202043); 辽宁省自然科学基金资助项目 (201602112); 牵引动力国家重点实验室资助项目 (TPL0906)。

## 收稿日期:

2022-08-08 收到初稿,  
2023-05-10 收到修订稿。

随着新能源的广泛普及使用, 材料轻量化的要求被不断提出, Al-Si 系列铝合金作为一种重要的工业合金, 由于其密度小、流动性好、气密性好、铸造性能好和热裂倾向小等优势<sup>[1-3]</sup>, 用途广泛, 特别是在航空航天<sup>[4]</sup>、电子电力<sup>[5-6]</sup>、轨道交通<sup>[7-8]</sup>等领域备受青睐。不过在常规的铸造条件下 Al-Si 系列合金的工艺缺点也比较明显, 比如气孔、微观组织粗大等, 不利于铝合金耐磨损性能及耐腐蚀性能的提升。传统热处理方式往往难以解决铸造组织中上述缺陷对合金材料性能的影响, 为解决这些问题, 很多研究人员通过添加改性剂<sup>[9]</sup>、熔体过热<sup>[10]</sup>、超声振动<sup>[11]</sup>等方式来细化组织, 减少铸造缺陷的产生。在这些制备技术中, 超声振动法可在不改变合金成分情况下细化铝合金微观组织, 且超声振动操作方便、设备简单, 无污染物产生。董雄博等人<sup>[12]</sup>研究了超声振动对 Al-11.5Si-4Cu-2Ni-1Mg-0.45Fe 合金凝固组织的影响, 结果表明, 超声振动引起的空化效应可将长条形初生 Si 细化为短棒状, 将  $\alpha$ -Al<sub>3</sub>FeSi 相由块状细化为近似球状。Kotadia 等人<sup>[13]</sup>通过引入超声振动制备亚共晶和过共晶铝硅合金, 研究了其对凝固组织的影响, 结果显示超声振动可细化晶粒, 晶粒组织由树枝晶转变为等轴晶, 剧烈的熔体流动效应可球化共晶 Si 相。

但到目前为止, 在铝合金凝固的全部过程中引入超声振动的研究较少。在本研究中, 通过对熔体凝固全过程施加超声振动, 研究了施加超声振动后 Si 含量对轨道车辆用铝合金微观组织、硬度、耐磨损性能和耐腐蚀性能的影响, 探讨了其微观组织、磨损和腐蚀微观形貌的变化机理, 可为制备高性能的轨道车辆用铝合金提供数据支持与理论支撑。

## 1 试验材料和方法

试验所用原材料为ADC12铝合金、利用纯铝粉和硅粉配置的Al-Si二元中间合金（Si质量分数分别为5%及30%），用以制备Si含量为8%、10%、12%、14%的铝合金试样。先将铝粉和硅粉在真空烘干箱中烘干去除水分，然后按19：1和7：3的质量比例球磨混合均匀后，最后在热挤压机中将其挤压成直径为1 cm的长杆状Al-Si二元中间合金。将Al-Si中间合金剪成块状，用砂纸打磨去除ADC12铝合金表面的氧化皮，将打磨后的ADC12铝合金锭放入石墨坩埚当中，然后置于电阻炉中在720 ℃下保温熔化，至完全熔化后保温20 min，将Al-Si中间合金加入到熔体中，边加中间合金边进行机械搅拌，待充分混合均匀后，在620 ℃保温30 min后，用熔体总质量0.6%的 $C_2Cl_6$ 精炼剂除气去渣，最后将熔体浇注到预热至250 ℃的模具内，在熔体凝固过程中对模具施加超声振动，超声功率为850 kW，超声频率为1.5 kHz，超声时间为90 s。ADC12铝合金和不同Si含量铝合金试样的成分如表1所示。

表1 铝合金试样化学成分  
Table 1 Chemical compositions of the aluminum alloy samples  $w_B/\%$

试样编号	Si	Mg	Cu	Zn	Mn	Fe	Al
A	8.04	0.28	3.01	0.58	0.34	0.55	余量
B	10.12	0.36	2.86	0.55	0.39	0.51	余量
C	12.06	0.41	2.66	0.64	0.36	0.61	余量
D	13.96	0.45	2.59	0.71	0.41	0.59	余量

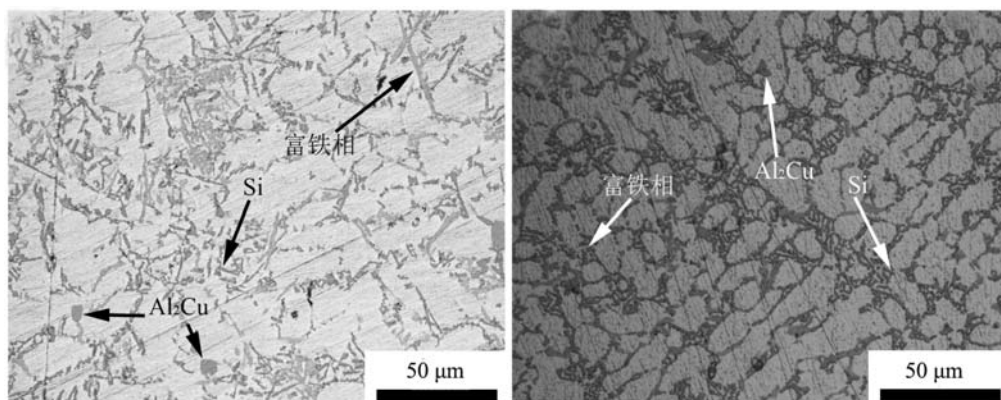
将熔体冷却至常温后，切割、超声清洗后在镶嵌机中制成金相试样，然后进行打磨抛光，用0.7%的氢

氟酸溶液对金相试样腐蚀5 s，吹干后用Nikon Ecliose MA200光学显微镜观察试样的微观组织形貌，用Image-Pro Plus图像分析软件对 $\alpha$ -Al晶粒尺寸和微观形貌进行量化分析。试样的硬度用HVS-1000A显微硬度计进行测试，硬度加载载荷为200 g，加载时间为10 s。利用UMT-3摩擦磨损试验机在室温下对试样进行摩擦磨损性能测试，载荷2 kg，加载时间为15 min，转速1 000 r/min，利用磨损前后失重作为试样的磨损量，利用VEGA3扫描电镜对磨损表面形貌进行观察分析。将试样用胶水粘住预留出10 mm×10 mm大小面积裸露在腐蚀液中，放在0.1 mol/L的盐酸中做浸泡腐蚀实验，腐蚀时间为10 h，称量腐蚀前后重量，利用腐蚀失重计算试样的腐蚀速率，然后用VEGA3扫描电镜观察其腐蚀表面的形貌。

## 2 结果与讨论

### 2.1 微观组织分析

图1a、b分别是光学显微镜下相同Si含量的未经超声振动处理的铝合金试样和经过超声振动后的铝合金试样的微观组织图。从图1a中可以明显看出，未经任何处理的铝合金试样微观组织比较杂乱粗大， $\alpha$ -Al相较粗大，尺寸约为92.5  $\mu\text{m}$ ，呈现为粗大的珊瑚状，Si相呈现为长针状，平均长度大于50  $\mu\text{m}$ ，且组织中的第二相鱼骨状富铁相和片状 $Al_2Cu$ 相分布在晶界处<sup>[14-15]</sup>。图1b中经过超声振动后的铝合金试样微观组织更细小、成分更均匀， $\alpha$ -Al相尺寸更小，约为66.7  $\mu\text{m}$ ，形貌趋于椭圆状，少量呈现为珊瑚状，Si相被细化成颗粒状，鱼骨状富铁相消失，被打碎细化成短棒状，片状 $Al_2Cu$ 相尺寸变小。这证明超声振动对铝合金试样的微观组织有着明显的细化作用，在凝固过程中对熔体超声处



(a) 未超声振动

(b) 超声振动后

图1 铝合金在 (a) 未超声振动和 (b) 超声振动后的微观组织

Fig.1 Microstructures of the aluminum alloys (a) without ultrasonic vibration, (b) with ultrasonic vibration

理, 晶粒生长被超声振动击碎, 使得长针状Si相和鱼骨状富铁相得到明显的细化。

图2是不同Si含量铝合金试样的微观组织。从图2a中可以看出, 当Si含量为8%时, 试样A的 $\alpha$ -Al相尺寸约65.2  $\mu\text{m}$ , 大部分呈现为椭球状, 珊瑚状 $\alpha$ -Al相减少, Si相聚集在晶界处。当Si含量为10%时, 图2b中试样B的 $\alpha$ -Al相数量增多, 尺寸减小到56.6  $\mu\text{m}$ , 呈现为椭球状, Si相在晶界处的分布较均匀, Si相聚集减少。

图2c中所示Si含量为12%的试样C的 $\alpha$ -Al相数量继续增多, 尺寸减小到48.4  $\mu\text{m}$ , 形貌主要呈现为圆球形或椭球状, Si相分布更加均匀。图2d为Si含量为14%的试样D的微观组织,  $\alpha$ -Al相数量减少, 尺寸又增大到57.9  $\mu\text{m}$ , 形貌主要呈现为椭球状, 大部分Si相变成长针状。图3是利用Image-Pro Plus图像分析软件对图2中各试样铝合金的 $\alpha$ -Al相尺寸和长径比的量化分析, 这进一步说明了试样中微观形貌的变化, 适量的Si对铝合

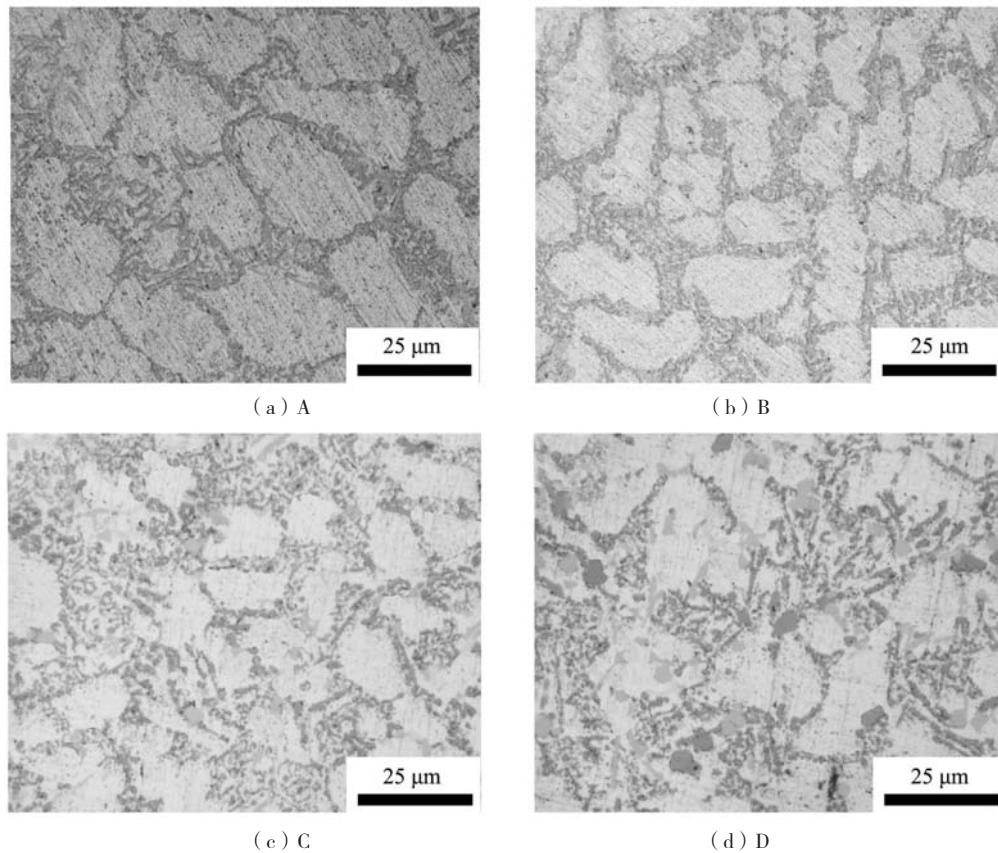


图2 不同成分铝合金微观组织

Fig. 2 Microstructures of the aluminum alloys with different composition

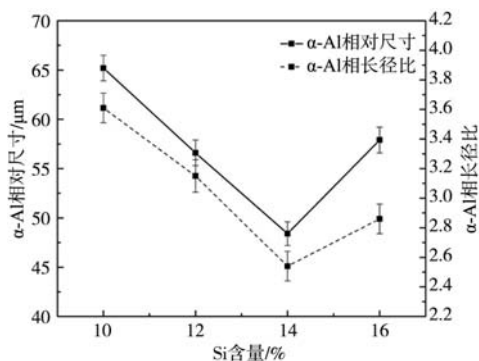


图3 铝合金 $\alpha$ -Al相尺寸和长径比

Fig. 3 The sizes and aspect ratios of  $\alpha$ -Al in the aluminum alloy

金试样的微观组织具有细化作用。

## 2.2 显微硬度分析

图4显示了不同Si含量铝合金试样的硬度。当Si含量为8%时, 试样A的维氏硬度为HV 91.6, 从图4中可以看出随着Si含量的增加, 铝合金试样的维氏硬度逐渐增大, 当Si含量达到14%时, 铝合金试样的维氏硬度达到最大值为HV116.5, 相比于试样A提高了27.2%。由于Si自身的硬度较高, 随着Si含量的增大, 使得铝合金试样的维氏硬度不断增大, 细化后的Si相、富铁相和 $\text{Al}_2\text{Cu}$ 相降低了对铝合金的割裂效果。



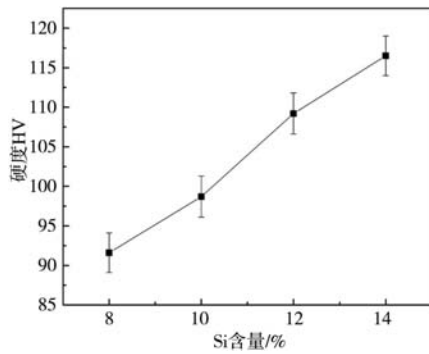


图4 铝合金硬度

Fig. 4 Hardnesses of the aluminum alloy samples

### 2.3 耐磨损性能分析

图5是不同Si含量铝合金试样的磨损量变化图，随着Si含量的增大，铝合金试样的磨损量先减小后增大。图6是不同Si含量铝合金试样磨损表面形貌图，磨损机制呈现为典型的粘着磨损和磨粒磨损。当Si含量为8%

时，试样A的磨损量为36.9 mg，图6a所示为试样A的磨损表面形貌，磨损表面有明显的犁沟和较大的磨损坑。在干摩擦时，磨损初期表面粗糙度较大，只有局部接触产生应力并引起塑性变形，然后磨损接触面产生严重的粘着磨损，且Si相较粗大，更容易发生割裂，产生较大的磨损坑，不断滑动下磨屑脱落，因为磨屑

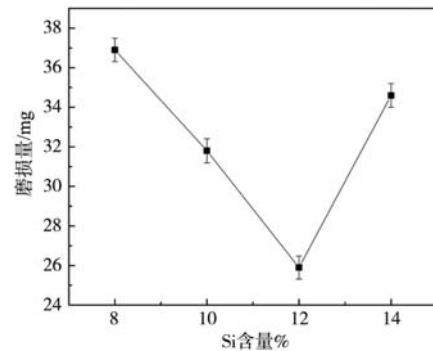
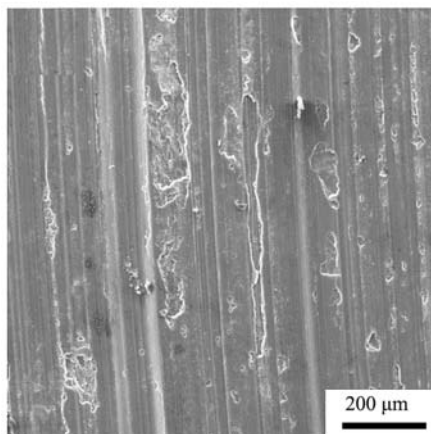
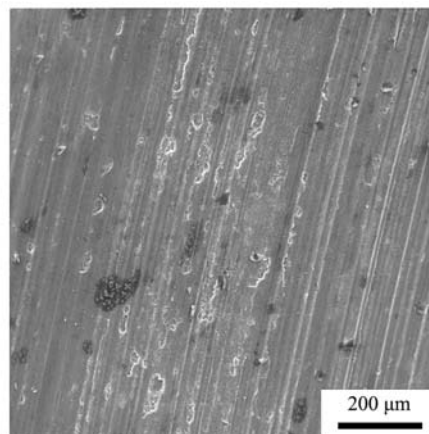


图5 铝合金磨损量变化曲线

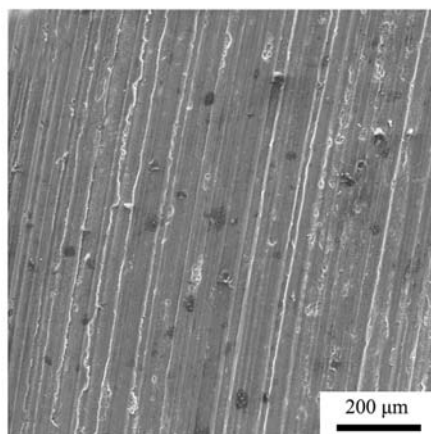
Fig. 5 Variation curve of wear loss of the aluminum alloys



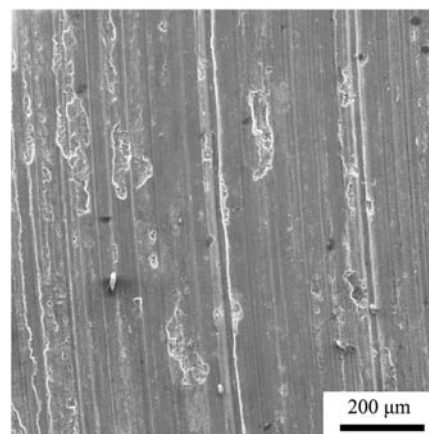
(a) A



(b) B



(c) C



(d) D

图6 铝合金磨损表面SEM形貌

Fig. 6 SEM morphologies of worn surfaces of the aluminum alloys aluminum alloy worn surface

的存在, 在表面滑过后形成较深的犁沟, 发生磨粒磨损。当Si含量为10%时, 试样B的磨损量为31.8 mg, 图6b中磨损表面的磨损坑变小, 犁沟变浅。由于增大Si含量, 试样B的硬度增大, 而材料的硬度越高, 强度越高, 其表面抵抗塑性变形的能力越强, 粘着磨损减弱, 磨损量降低<sup>[16-17]</sup>, Si相变小变圆整, 滑动摩擦趋于滚动摩擦, 在表面使得犁沟更浅, 铝合金试样的耐磨损性能得到提升。当Si含量增大到12%时, 试样C的磨损量降低到25.9 mg, 图6c中磨损表面几乎没有磨损坑出现, 犁沟变窄变浅。组织细化后的试样C的硬度更高, 抗塑性变形能力更强, 近球状Si相在表面几乎没有大的磨损坑产生, 尺寸细小的Si相剥落后, 表面发生滚动摩擦模式, 产生的犁沟较小。增大Si含量达到16%时, 试样D的磨损量反而增大到34.6mg, 图6d中磨损表面的磨损坑变大, 犁沟变深变宽。Si含量增加到14%, 铝合金试样的磨损量反而增大, 这是由于Si相变得粗大, 针状Si相容易产生应力集中, 割裂与之接触的摩擦副面, 在摩擦副表面产生深度较大的犁沟, 使得磨损表面的磨损坑增大, 铝合金试样的耐磨损性能反而减弱。

## 2.4 耐腐蚀性能分析

图7显示了不同Si含量铝合金试样在0.1 mol/L的盐酸中浸泡腐蚀10 h后的腐蚀速率。随着Si含量的增大, 铝合金试样的腐蚀速率先减小后增大, 当Si含量为12%时, 腐蚀速率为1.57 mg/h。图8是不同Si含量铝合金试样浸泡腐蚀表面形貌图。从图8a中可以看出, 当Si含量

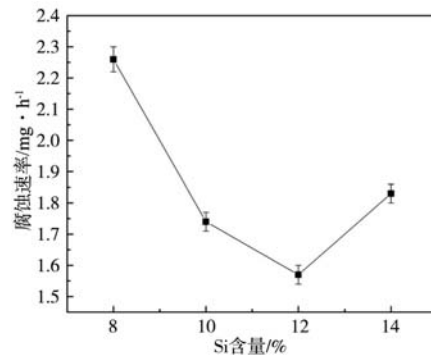


图7 铝合金浸泡腐蚀10 h的腐蚀速率

Fig. 7 Corrosion rates of the aluminum alloys after immersion corrosion for 10 hours

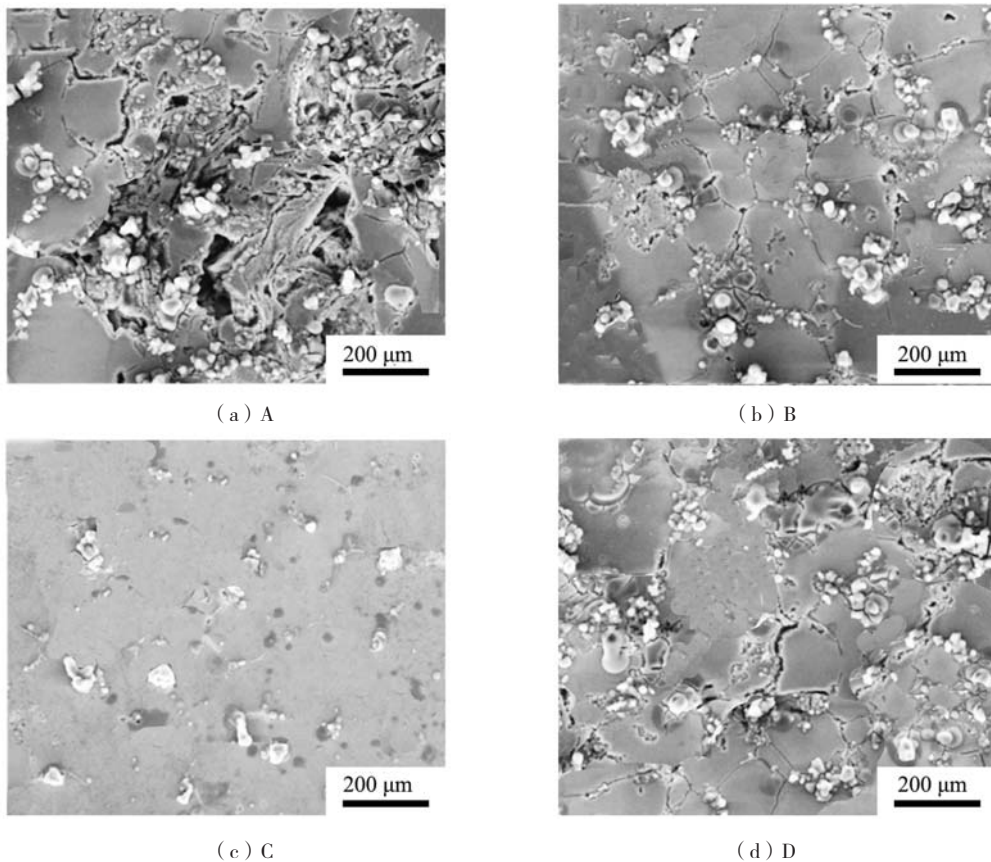


图8 铝合金浸泡腐蚀表面SEM形貌图

Fig. 8 SEM morphologies of immersion corrosion surface of the aluminum alloys

为8%时,试样A的腐蚀表面出现白色的腐蚀产物和较大较深的腐蚀坑,呈现为明显的晶间腐蚀和点蚀<sup>[18]</sup>,腐蚀从晶间不断向晶内扩散,晶间较耐腐蚀的Si相和第二相由于 $\alpha$ -Al相的粘结效果减弱,会产生脱落,使得晶间产生较大的腐蚀坑洞。当Si含量为10%时,由于微观组织较细小均匀,图8b中试样B腐蚀表面的腐蚀产物减少,腐蚀坑变小,且都分布在晶间,点蚀程度减弱,腐蚀失重减小,导致腐蚀速率减小。当Si含量为12%时,试样C的腐蚀速率最小,腐蚀表面腐蚀产物减少,几乎没有腐蚀坑,如图8c所示,主要表现为均匀腐蚀。当Si含量增大到14%时,试样D的腐蚀速率反而增大,表面腐蚀产物增多,腐蚀坑较大,这主要是由于Si含量的增大造成试样组织不均匀性,使得长针状粗大Si相发生腐蚀脱落,直接造成了试样腐蚀的不均匀。

### 3 结论

(1) 超声振动后,铝合金的微观组织明显得到细化, $\alpha$ -Al相尺寸由92.5  $\mu\text{m}$ 减小到66.7  $\mu\text{m}$ ,形貌由珊瑚状细化为椭球状,长针状Si相被细化为颗粒状,粗大第二相鱼骨状富铁相和片状 $\text{Al}_2\text{Cu}$ 相被细化为短棒状和小块状。

(2) 随着Si含量的增大, $\alpha$ -Al相数量先增多后减少,尺寸和长径比先减小后增大。当Si含量为12%时, $\alpha$ -Al相形貌主要呈现为圆球形或椭球状,Si相呈现为颗粒状,均匀分布在晶界处。

(3) 随着Si含量的增大,铝合金硬度先增大后减小,磨损量和腐蚀速率先减小后增大。当Si含量为12%时,铝合金磨损量和腐蚀速率最小,分别为25.9 mg和1.57 mg/h,磨损表面几乎没有磨损坑出现,犁沟变窄变浅。腐蚀表面腐蚀产物减少,呈现为均匀腐蚀。

#### 参考文献:

- [1] 陈安柱, 周鹏飞, 陆从相. 高Mg含量对Al-Si-Cu-Mg合金凝固过程和组织演变的影响 [J]. 铸造, 2022, 71 (3): 315-322.
- [2] 陈涛, 宋东福, 陈胜迁, 等. Al-Si-Fe铸造铝合金的搅拌摩擦加工组织和性能研究 [J]. 稀有金属, 2019, 43 (12): 1275-1282.
- [3] 李艳霞, 李忠磊, 王倩, 等. Al-Si-P中间合金对Al-25%Si合金变质细化机理研究 [J]. 铸造, 2020, 69 (1): 35-39.
- [4] 马琳, 宋雨键, 崔庆贺, 等. 搅拌摩擦加工工艺及水冷对A356铸铝合金晶粒细化作用及变形控制 [J]. 材料导报, 2021, 35 (24): 122-127.
- [5] 曹宇, 朱玉涛, 赵解扬, 等. 电子产品外观件用Al-Mg合金的热处理工艺 [J]. 金属热处理, 2017, 42 (7): 121-125.
- [6] 刘洋, 陈杰, 王凌志, 等. 3.5% NaCl溶液中电缆铝护套的交流腐蚀特性 [J]. 腐蚀与防护, 2021, 42 (7): 20-24.
- [7] 赵丽娟. 高速列车用铸造AlSi<sub>7</sub>Mg合金耐盐雾腐蚀性能研究 [J]. 铸造, 2021, 70 (10): 1200-1203.
- [8] 邓桢桢, 郭世杰, 纪艳丽, 等. 不同固溶制度对6082铝合金力学性能和腐蚀性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2021, 42 (3): 64-72.
- [9] LI J, HAGE F S, LIU X, et al. Revealing Heterogeneous nucleation of primary Si and eutectic Si by AlP in hypereutectic Al-Si alloys [J]. Scientific Reports, 2016, 6 (1): 25244-25252.
- [10] XU C L, JIANG Q C. Morphologies of primary silicon in hypereutectic Al-Si alloys with melt overheating temperature and cooling rate [J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 437 (2): 451-455.
- [11] SUN Y H, YAN H, XIONG J J. Al<sub>3</sub>Ti/ADC12 composite synthesized by ultrasonic chemistry in situ reaction [J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2020, 27 (1): 10-18.
- [12] DONG X B, GUO Y C, LI J P, et al. Effect of ultrasonic vibration on solidification microstructure in near-eutectic Al-Si piston alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51 (1): 11-17.
- [13] KOTADIA H R, DAS A. Modification of solidification microstructure in hypo- and hyper-eutectic Al-Si alloys under high-intensity ultrasonic irradiation [J]. Journal of Alloys & Compounds, 2015, 620: 1-4.
- [14] 喻保标, 闫洪, 刘建龙, 等. La对ADC12微观组织及耐腐蚀性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39 (3): 335-338.

- [15] 李康, 李晓谦, 李瑞卿. 超声铸造2219铝合金的固溶工艺和Al<sub>2</sub>Cu相的演变 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (2): 167-170, 174.
- [16] 宋晓萍, 王优强, 张平, 等. 固溶处理后 7055 铝合金的摩擦磨损性能 [J]. 润滑与密封, 2020, 45 (7): 68-74.
- [17] 李静, 蔡元兴, 林晓娟, 等. Al 含量对Fe<sub>3</sub>Al金属间化合物耐磨性的影响 [J]. 金属热处理, 2007, 32 (2): 23-26.
- [18] 陈圆圆, 郑子樵, 魏修宇, 等. 2197铝锂合金在不同热处理状态下的晶间腐蚀及剥蚀行为 [J]. 腐蚀与防护, 2010, 31 (1): 29-33.

---

## The Influence of Different Si Contents Under Ultrasonic Vibration on the Microstructure and Properties of ADC12 Aluminum Alloy Used in Rail Vehicles

WU Qi<sup>1,2</sup>

(1.College of Railway Rolling Stock, Liaoning Railway Vocational and Technical College, Jinzhou 121000, Liaoning, China; 2.College of Locomotive and Rolling Stock Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, Liaoning, China)

### Abstract:

To study the effect of different Si content on aluminum alloy for rail vehicle prepared by ultrasonic vibration, the effects of Si on the microstructure, hardness, wear resistance and corrosion resistance of the aluminum alloy were studied by optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), and friction and wear tester. The results showed that after ultrasonic vibration treatment, the microstructure of the aluminum alloy sample was obviously refined, and the long needle Si phase and the second phase were refined into granular or short rod shape. With the increase of the Si content, the size and aspect ratio of  $\alpha$ -Al phase first decreased and then increased, the hardness increased, the wear loss and corrosion rate first decreased and then increased, and the wear resistance and corrosion resistance first increased and then decreased. When the Si content was 12%, the number of the  $\alpha$ -Al phase increased, the size decreased to 48.4  $\mu\text{m}$ , the distribution of Si phase was uniform, the wear loss and corrosion rate were the smallest, which were 25.9 mg and 1.57 mg/h, respectively. There were almost no wear pits on the wear surface, the furrow becomes narrow and shallow, the surface were characterized by uniform corrosion.

### Key words:

rail vehicle; Si content; microstructure; wear resistance; corrosion resistance

---