

La 变质对亚共晶 Al-xMg₂Si 组织及磨损性能的影响

王 鑫¹ 佟春玉² 姜 峰¹ 索忠源¹ 吕海波¹

(1.吉林化工学院机电工程学院; 2.吉林东泰环保锅炉制造有限公司)

摘 要 通过摩擦磨损试验研究了经0.4%的 La 处理的不同 Mg₂Si 含量的亚共晶 Al-xMg₂Si 合金的组织 and 磨损性能。结果表明,经 0.4% 的 La 变质后,合金磨损速率均降低,且磨损速率平稳波动较小;未变质时,合金的磨损机制为疲劳磨损+磨粒磨损+粘着磨损,变质后以粘着磨损为主,伴有氧化磨损+轻微磨粒磨损。由纵截面显微组织和硬度可知,随着硬化层厚度增加,合金的耐磨性增加,经 0.4% 的 La 变质后合金硬化层厚度增加,表现出较好的耐磨性,且变质对 Al-10Mg₂Si 和 Al-11Mg₂Si 合金的耐磨性提高更明显,使磨损速率降低,表现出较好的耐磨性和综合力学性能。

关键词 亚共晶 Al-Mg₂Si; La 变质; 磨损速率; 磨损机制

中图分类号 TG146.22; TG115.5⁺8 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.011.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of La Modification on Structure and Wear Properties of Hypoeutectic Al-xMg₂Si

Wang Xin¹, Tong Chunyu², Jiang Feng¹, Suo Zhongyuan¹, Lü Haibo¹

(1.College of Mechanical and Electrical Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology;

2.Jilin Dongtai Environmental Protection Boiler Manufacturing Co., Ltd.)

Abstract: Friction-wear test was carried out to investigate the effect of 0.4% La modification on microstructure and wear properties of hypoeutectic Al-xMg₂Si with different Mg₂Si contents. The results indicate that after 0.4% La modification, the wear rate is decreased, which fluctuates stably and slightly. The wear mechanism is characterized by fatigue wear+abrasive wear+adhesive wear before modification, which is dominated by adhesive wear after modification, accompanied with oxidation wear and slight abrasive wear. The microstructure and hardness of longitudinal section reveal that the wear resistance is increased with the increase of hardened layer thickness. After 0.4% La modification, the thickness of hardened layer is increased, exhibiting desirable wear resistance. Moreover, the modification has a more significant effect on the wear resistance of Al-10Mg₂Si and Al-11Mg₂Si, reducing the wear rate and leading to desirable wear resistance and comprehensive mechanical properties.

Key Words: Hypoeutectic Al-Mg₂Si, La Modification, Wear Rate, Wear Mechanism

由于 Mg₂Si 作为第二相在凝固过程中析出,铸态亚共晶 Al-Mg-Si 合金也称为亚共晶 Al-Mg₂Si 合金。该合金具有高熔点、低密度、高硬度、高弹性模量等特点,广泛应用于汽车活塞、连杆、发动机叶片等承受磨损载荷及综合力学性能要求高的部件^[1-3]。然而,在常规铸态下 Mg₂Si 相呈粗大的汉字状,严重割裂基体,为脆硬相,使合金使用性能下降,且 Mg₂Si 强化相含量对合金性能影响较大^[4-5]。

YADAV D K 等^[6]发现 La 是提高 Al-30Mg₂Si 合金力学性能的最佳稀土元素之一。AKHLAGHI A 等^[7]研究了 La 对 Al-15Mg₂Si 合金组织和拉伸性能的影响,发现合金的断裂模式由脆性向韧性转变。

TSAI Y C 等^[8]向 A356 合金中加入不同质量分数的 La,发现加入 La 后 Mg₂Si 相被细化,其形貌也发生改变。研究表明,稀土 Sc^[3] 和 Gd^[9] 的加入不仅可有效细化 Al-11Mg₂Si 合金中共晶 Mg₂Si 晶粒的尺寸,而且使共晶 Mg₂Si 相的形态从板状变为薄珊瑚状和纤维状,使合金拉伸性能显著提高。已有研究发现,低载荷下的耐磨性能会受材料中 Mg₂Si 增强相尺寸的影响^[10]。然而,对不同 Mg₂Si 含量的 Al-Mg₂Si 亚共晶合金体系及其改性手段的研究报道较少。因此,本研究揭示了亚共晶 Al-xMg₂Si,经 0.4% La 变质后合金组织及磨损性能的变化,并分析其磨损规律和断裂机理,为其研究和应用提供参考。

收稿日期:2023-05-02;修改稿收到日期:2023-08-17

基金项目:吉林化工学院科研资助项目(2019018)

第一作者简介:王鑫,女,1986 年出生,讲师,吉林省吉林市(132022),E-mail: wangxin050201@126.com

引用格式:王鑫,佟春玉,姜峰,等. La 变质对亚共晶 Al-xMg₂Si 组织及磨损性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(11):1 527-1 532.

WANG X, TONG C Y, JANG F, et al. Effects of La modification on structure and wear properties of hypoeutectic Al-xMg₂Si[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(11):1 527-1 532.

1 试验材料及方法

亚共晶 $\text{Al}-x\text{Mg}_2\text{Si}$ 合金的制备, Mg_2Si 含量(质量分数,下同)分别为 6%、8%、10%、11% 和 12%, 其中 $\text{Al}-10\text{Mg}_2\text{Si}$ 中 Mg 、 Si 含量分别为 6.34% 和 3.66% (Mg 、 Si 质量比为 1.732), 余量为 Al 。首先将一定比例的纯度为 99.98% 的工业纯 Al 和 $\text{Al}-20\text{Si}$ 中间合金放入箱式电阻炉中, 在 300 °C 下预热 1 h, 然后放入井式电阻炉的石墨坩埚中升温至 750 °C, 使用 0.5% 的 C_2Cl_6 进行第一次除气(用铝箔纸包裹后放入金属液中搅拌), 待温度降至 690~700 °C 将 Mg 块(Mg 的添加量额外考虑 20% 的质量烧损)用铝箔包裹, 压入金属熔液中, 保温 5 min; 将温度升到 730~750 °C, 加入 0.4% 的 La 变质剂, 保温 15~20 min 后, 使用 C_2Cl_6 进行二次除气后除渣, 随后将温度升至 760 °C 保温 10 min, 将熔体浇入预热至 200 °C 的金属型模具中。

室温干磨擦磨损试验在销-盘式高温磨损试验机(MG-200 型)上进行, 取未变质和 La 变质处理的 $\text{Al}-$

$x\text{Mg}_2\text{Si}$ 铝合金制备成尺寸为 $\phi 23\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 的圆盘试样。磨擦副采用尺寸为 5 mm $\times$ 20 mm 的 45 号钢, 其硬度(HRC)为 46~48。载荷为 80 N, 转速为 100 r/min, 时间为 100 min, 每 10 min 用电子天平进行称重, 计算其磨损量: $W_s=V/d$, 其中 V 为磨损体积(磨损质量损失/密度), d 为滑动距离。采用 MPC-400 光学显微镜观察试样的显微组织, 试样在室温下体积分数为 0.5% 的 HF 水溶液中腐蚀 20 s; 使用 PTI 多相含量分析系统对初生 $\alpha\text{-Al}$ 和共晶 Mg_2Si 晶体特征进行测量; 采用 HV-1000 型维氏硬度计进行硬度测试, 载荷为 0.5 N, 保压 10 s, 每隔 10 μm 测一次; 采用 JSM-6490 型扫描电镜对磨损形貌及磨屑进行结构观察和分析。

2 试验结果与分析

2.1 La 变质对 $\text{Al}-x\text{Mg}_2\text{Si}$ 合金组织的影响

图 1 为 La 变质前后不同 Mg_2Si 含量的 $\text{Al}-x\text{Mg}_2\text{Si}$ 合金的金相组织。可以看出, $\text{Al}-x\text{Mg}_2\text{Si}$ 组织主要由白色的初生 $\alpha\text{-Al}$ 相和灰色的($\alpha\text{-Al}+\text{Mg}_2\text{Si}$)共晶团组成,

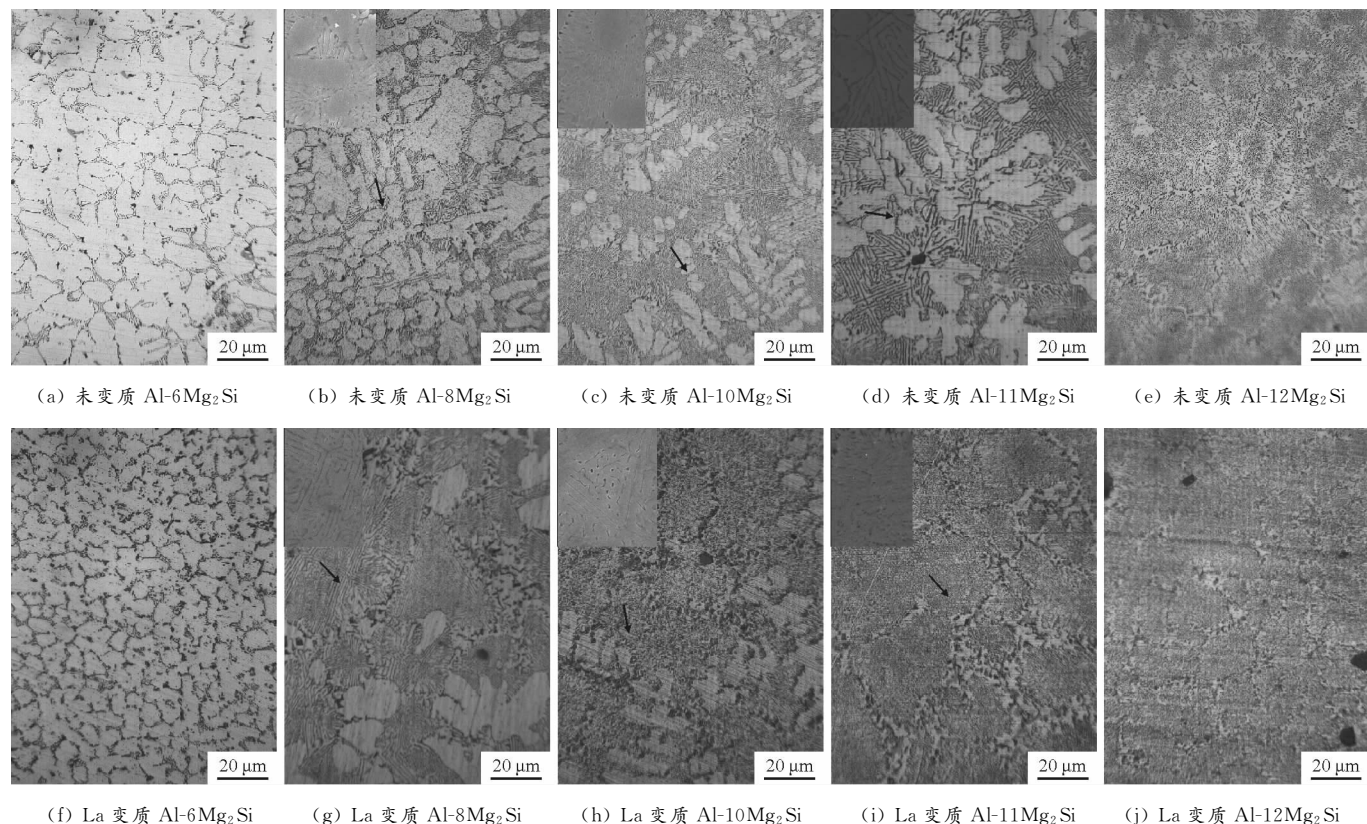


图 1 La 变质前后不同 Mg_2Si 含量的亚共晶 $\text{Al}-x\text{Mg}_2\text{Si}$ 合金的金相组织

Fig.1 Metallographic structure of hypoeutectic $\text{Al}-x\text{Mg}_2\text{Si}$ alloy with different Mg_2Si contents before and after La modification

$\text{Al}-12\text{Mg}_2\text{Si}$ 合金经 La 变质后会出现黑色的初生 Mg_2Si 。王连登等^[11]研究发现, 由于非平衡结晶, 易出现比较粗大的块状或汉字状初生 Mg_2Si 相和片状或短棒状的共晶 Mg_2Si 相, 并随着 Si 含量的增加而增多增

粗。未变质时, 初生 $\alpha\text{-Al}$ 相为较粗大的长条状和树枝状, 同时 Mg_2Si 呈片层状, 二次枝晶间距较大; 变质后, 初生 $\alpha\text{-Al}$ 相得到一定的细化, 长条状枝晶被破碎, 变得圆整(长宽比下降)。另外, 变质后 Mg_2Si 占比增加(见

图 2),Mg₂Si 二次枝晶间距细化明显,呈团絮状、纤维状分布。Mg₂Si 含量为 12%时,由于 Mg₂Si 含量较高,初生 α-Al 相含量较低,且变质后共晶团细化,有少量块状初生 Mg₂Si 相。故 Al-11Mg₂Si 亚共晶合金经 La 变质后,共晶团细化且分布均匀,初生 α-Al 相枝晶破碎,变质后 Mg₂Si 面积比增加,表现出较好的强韧相组织形貌,Al-10Mg₂Si 次之。

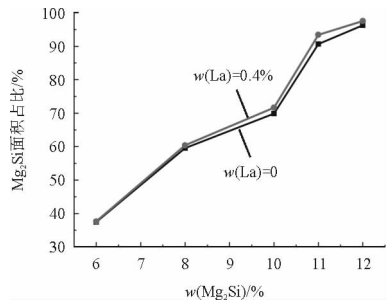


图 2 La 变质前后 Al-xMg₂Si 合金中 Mg₂Si 面积占比
Fig.2 Area ratio of Mg₂Si in Al-xMg₂Si alloy before and after La modification

2.2 La 变质对 Al-xMg₂Si 合金磨损性能的影响

图 3 为 La 变质前后 Al-xMg₂Si 合金的磨损速率。可以看出,在未变质时,合金稳定磨损阶段波动较大,而 Al-6Mg₂Si 磨损速率最大,这是由于 Mg₂Si 含量较低时,组织中强化相较少,韧性相初生 α-Al 占比较多,表现出较低的耐磨性;当 Mg₂Si 含量为 10%时磨损速率最低,这是由于 Mg₂Si 体积分数增加,且初生 α-Al 的存在吸附强化相,起到减磨的作用,综合性能较好;当 Mg₂Si 含量过高(11%、12%)时,强化相 Mg₂Si 增多,特别是 Al-12Mg₂Si 合金中接近共晶成分,基本没有韧性相,合金表现为较高的硬度和脆性,磨损速率反而增加。

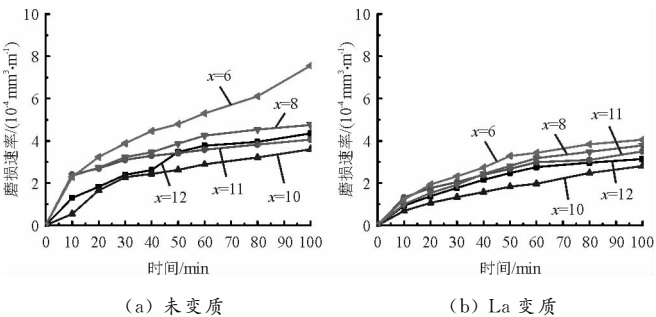


图 3 La 变质前后 Al-xMg₂Si 合金的磨损速率
Fig.3 Wear rate of Al-xMg₂Si alloy before and after La modification

经 La 变质后,不同 Mg₂Si 含量的亚共晶 Al-Mg₂Si 合金的磨损速率均降低,耐磨性得到了较大提升,在跑合阶段和稳定磨损阶段都非常稳定。其中磨损速率最

优的是 Al-10Mg₂Si 合金,此时磨损速率为 $2.805 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$,较变质前降低了 22.21%;磨损速率最高的是 Al-6Mg₂Si,其变质后提升也最明显,最大磨损速率为 $4.057 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$,较变质前降低了 46.31%。

图 4 为 La 变质前后 Al-xMg₂Si 的平均摩擦因数。可以看出,当 Mg₂Si 含量为 10%时 Al-Mg₂Si 合金平均摩擦因数最低,且变质后摩擦因数进一步降低。其中变质后 Al-12Mg₂Si 平均摩擦因数为 0.079 21,较变质前降低了 63.04%,耐磨性提高最多。

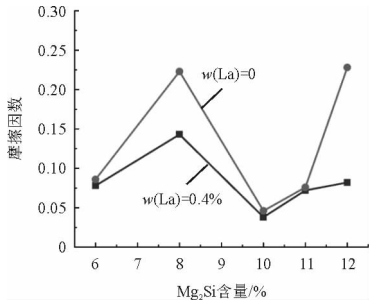


图 4 La 变质前后 Al-xMg₂Si 合金的平均摩擦因数
Fig.4 Average friction coefficient of Al-xMg₂Si before and after La modification

图 5 为 Al-xMg₂Si 合金 La 变质前后的磨损形貌。可以看出,未变质时,合金磨损较严重,在磨损表面发现大量宽而深的犁沟和挤压堆叠的磨损层,在一些犁沟中有很深的剥落坑。由于表面经历了反复的压缩应力和切向摩擦,在表面剥落和磨损后,出现了一些裂纹(见图 5b、图 5c)。因此,未变质合金的磨损机制是严重的磨粒磨损和粘着磨损。变质后磨损表面出现了许多平行排列的浅而窄的沟槽,一些沟槽伴有少量浅坑(见图 5g),单个深凹坑周围的磨损表面沿滑动方向产生塑性变形。同时,由于粘着磨损,表面有许多细小的磨损碎屑。这些现象表明,经过 0.4% 的 La 变质后,合金的磨损机制转变为粘着磨损为主,磨损由严重变为轻微。

在 La 变质后合金组织中共晶 Mg₂Si 相的细化和均匀分布,导致与 α-Al 的有效结合面积和结合力增加,提高了合金的塑性和韧性,并有助于在摩擦过程中释放接触应力,减缓因应力集中而导致的合金大面积剥落^[12]。此外,摩擦产生的热量在摩擦过程中无法及时释放,合金磨损表面温度升高,表面氧化形成耐磨性较差的 Al₂O₃ 膜。La 在氧化物膜和衬底之间的界面处的偏析提高了氧化物膜的附着力^[13],增强了氧化物膜与衬底之间的附着力,并细化了氧化物膜结构,这有助于提高氧化膜的耐磨性和剥离性,使变质后合金的耐磨性提高。

图 6 为 La 变质前后 Al-xMg₂Si 合金的磨屑形貌。可以发现,随着 Mg₂Si 含量的改变,磨屑的形貌也出现

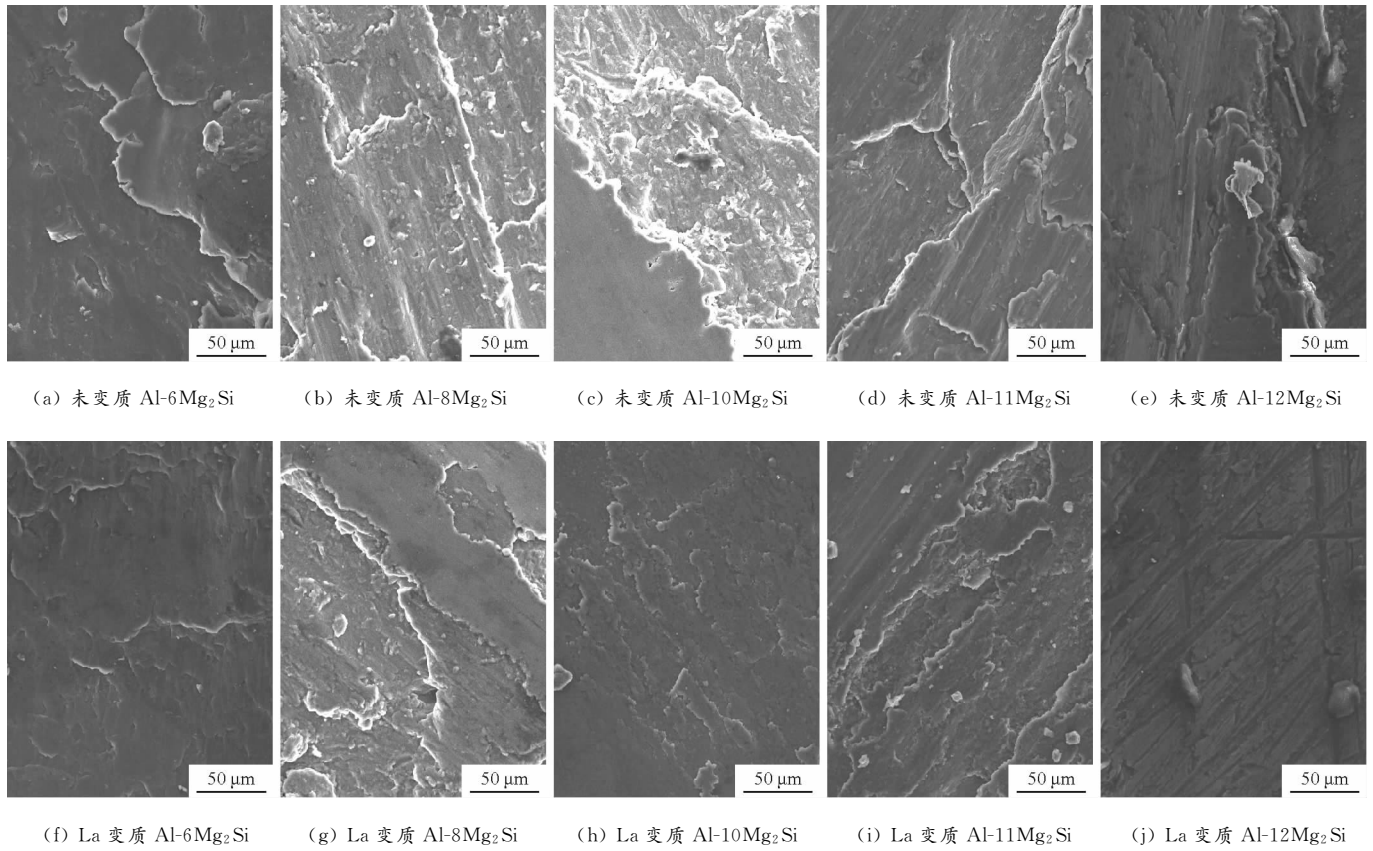


图 5 La 变质前后 Al- x Mg₂Si 合金磨损形貌

Fig.5 Worn morphologies of Al- x Mg₂Si alloy before and after La modification

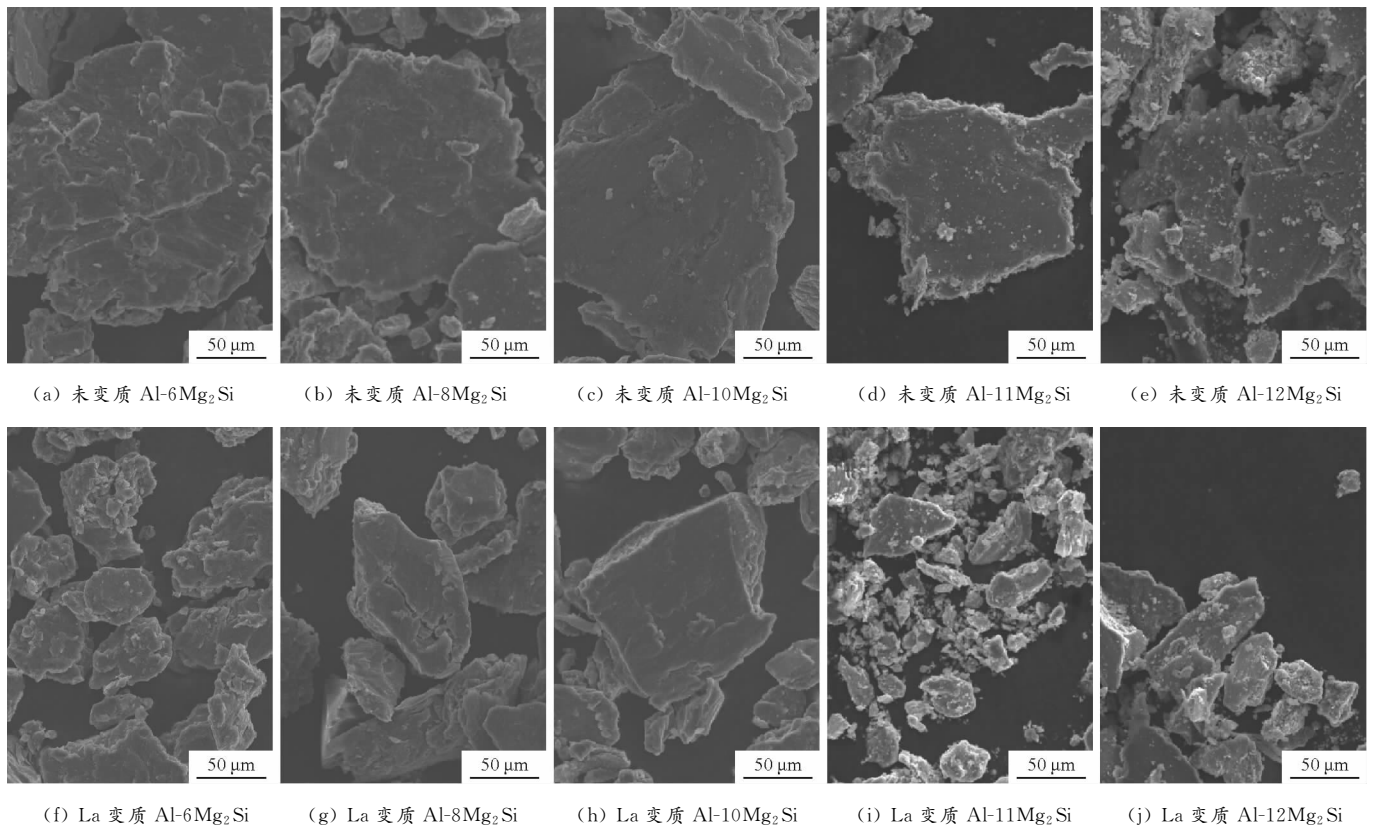


图 6 La 变质前后 Al- x Mg₂Si 合金磨屑形貌

Fig.6 Abrasive dust morphologies of Al- x Mg₂Si alloy before and after La modification

了较大的改变,当 Mg₂Si 含量低于 10% 时,磨屑呈层片状,属于严重的疲劳磨损;当 Mg₂Si 含量大于 10% 时,磨屑存在大量的细小磨粒,大块组织没有出现层皮状,属于表面疲劳磨损、磨粒磨损和粘着磨损的混合;而当 Mg₂Si 含量为 10% 时,磨屑同时存在细小磨粒和轻微片层状,属于轻微的表面疲劳磨损。未变质时,磨屑都较为粗厚,且磨屑边缘为齿状,并未出现明显裂纹;经 La 变质后,磨屑出现了明显的细小化,边缘的齿状结构大幅降低,大多为圆润边缘,Mg₂Si 含量为 8% 时,有磨屑出现裂纹。

图 7 为 La 变质前后磨损表面截面形貌。由于载荷作用,磨损表面形成变形层即硬化层,且变质后合金硬化层增加。变质前,变形层组织为碎小的细小颗粒,无序排列,主要有机械混合层和剪切亚层组成,而变质后出现碎化和塑化现象,同时变形层出现瘤化组织,主要以剪切亚层为主,机械混合层为辅。材料塑性越好抵抗剪切变形的能力越强,相应的材料强度和硬度较低,在相同的条件下对应的塑性变形层越厚^[14-15]。由于 Al-xMg₂Si 合金为亚共晶组织,硬度较低,所以硬化层深度越厚越好。

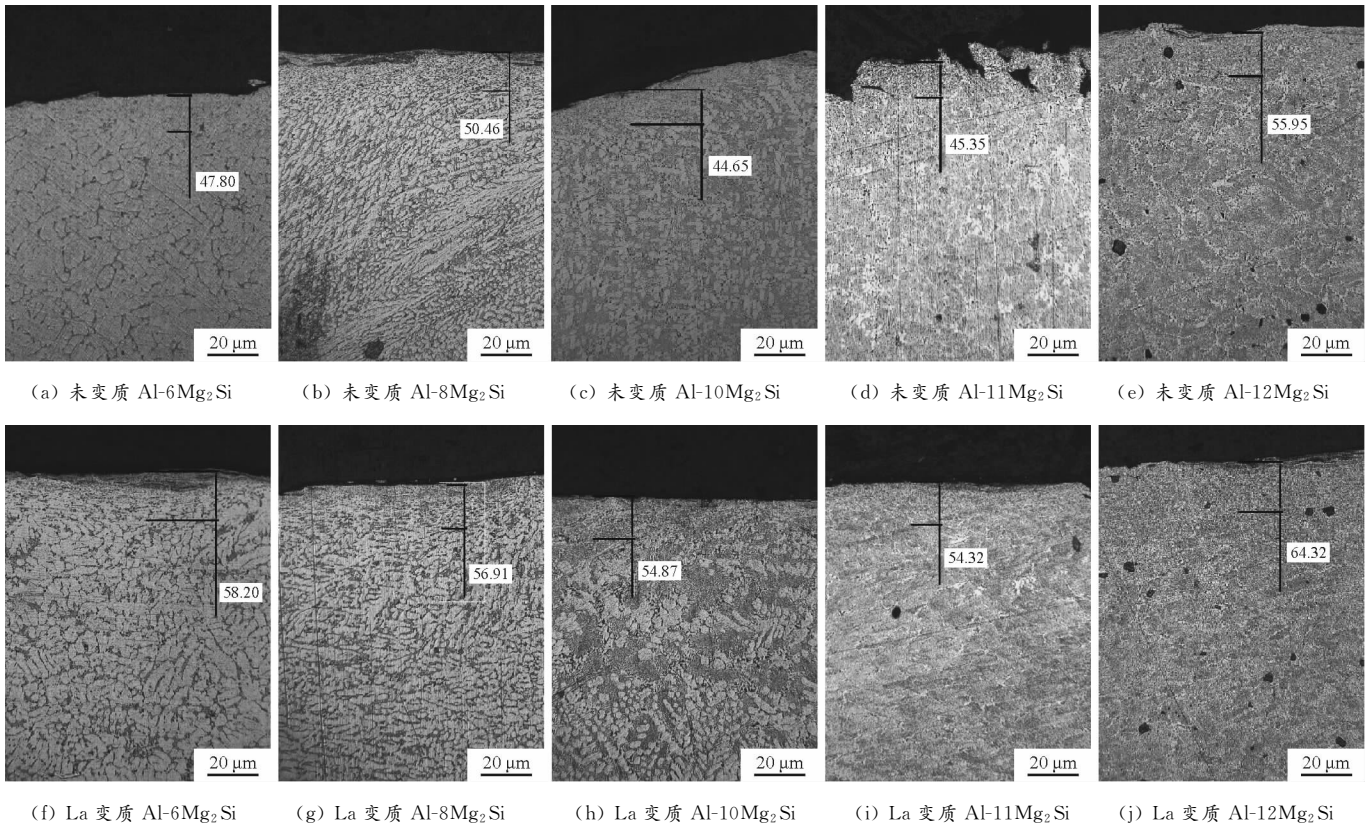


图 7 La 变质前后 Al-xMg₂Si 合金磨损表面截面形貌

Fig.7 Cross section morphologies of worn surface of Al-xMg₂Si alloy before and after La modification

图 8 为 La 变质前后 Al-xMg₂Si 合金磨损截面的显微硬度。可以看出,硬化层硬度远大于心部组织,距

离表面越近,应变越大,加工硬化效果越明显。当 Mg₂Si 含量较低时(Al-6Mg₂Si 合金),未变质时硬度较低,变质后硬化层较宽,硬度增加;Al-10Mg₂Si 和 Al-11Mg₂Si 合金变质后,硬化层厚度分别增加了 18.58% 和 16.51%,耐磨性最好,硬度分布均匀,表现出较好的强韧性。

3 结 论

(1)亚共晶 Al-xMg₂Si 组织主要由白色的鱼骨状初生 α-Al 相和灰色的 α-Al+Mg₂Si 共晶团组成,变质后 α-Al 被打碎,α-Al+Mg₂Si 共晶团呈细小团絮状分布,且当 Mg₂Si 含量为 11% 时,组织细化效果最好;当

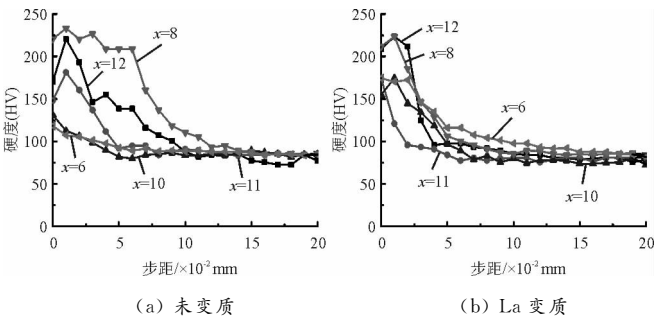


图 8 La 变质前后 Al-xMg₂Si 合金磨损截面显微硬度

Fig.8 Microhardness of worn section of Al-xMg₂Si alloy before and after La modification

Mg₂Si 含量为 12% 的 Al-xMg₂Si 经变质后会出现少量的初生 Mg₂Si 相。

(2)在相同载荷下,随着 Mg₂Si 含量增加,磨损速率呈先降低后升高的趋势,当 Mg₂Si 含量为 10% 时,合金的磨损速率最低,为 $3.606 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$,Mg₂Si 为强化相,初生 α -Al 存在起到吸附强化相和减磨的作用,综合性能较好。

(3)经 0.4% 的 La 变质后,合金磨损速率较未变质前均降低,且磨损速率平稳波动较小,变质后 Mg₂Si 占比增加,同时 α -Al+Mg₂Si 共晶团细化明显,进一步提高了该合金的耐磨性;未变质时合金的磨损机制为疲劳磨损+磨粒磨损+粘着磨损,变质后以粘着磨损为主,伴有氧化磨损+轻微磨粒磨损。

(4)随着硬化层厚度增加,塑性材料的耐磨性增加,经 0.4% 的 La 变质后硬化层厚度增加,其中 Al-10Mg₂Si 和 Al-11Mg₂Si 的硬化层厚度提升最大,分别增加了 18.58% 和 16.51%,耐磨性最好;0.4% 的 La 变质对 Al-10Mg₂Si 和 Al-11Mg₂Si 合金作用更明显,使磨损速率降低,表现出较好的耐磨性和综合力学性能。

参 考 文 献

- [1] 王钰,李青春,伍复发,等.Sc 对亚共晶 Al-11Mg₂Si 合金组织与力学性能的影响[J].热加工工艺,2019,20(48):42-48.
- [2] JI S X, YAN F, FAN Z Y, Development of a high strength Al-Mg₂Si-Mg-Zn based alloy for high pressure die casting[J]. Mater. Sci. Eng., 2015, A626: 165-174.
- [3] WU X F, WANG K Y, WU F F, et al. Simultaneous grain refinement and eutectic Mg₂Si modification in hypoeutectic Al-11Mg₂Si alloys by Sc addition[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 791(6): 402-410.
- [4] LI J Y, AN Q, WU S S, et al. Relationship of Mg₂Si morphology with Mg₂Si content and its effect on properties of in-situ Mg₂Si/Al-Cu composites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 808(11): 1-9.
- [5] CHEGINI M, SHAERI M H, TAGHIABADI R, et al. Effect of equal channel angular pressing on microstructure and mechanical properties of thermally-homogenized Al-Mg₂Si composites[J]. Materials Chemistry and Physics, 2021, 259(1): 124-200.
- [6] YADAV D K, MAHALI M, GUPTA S K, et al. Microstructural characterization and mechanical behavior of Al-4Mg₂Si in-situ metal matrix composite synthesis via cooling slope casting technique[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 62(2): 442-447.
- [7] AKHLAGHI A, NOGHANI M, EMAMY M. The effect of La-intermetallic compound on tensile properties of Al-15Mg₂Si in-situ composite[J].Procedia Materials Science, 2015,11(1): 55-60.
- [8] TSAI Y C, CHOU C Y, LEE S L, et al. Effect of trace La addition on the microstructures and mechanical properties of A356(Al-7Si-0.35Mg) aluminum alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 487:157-162.
- [9] WANG K Y, ZHAO R D, WU F F, et al. Improving microstruc-

ture and mechanical properties of hypoeutectic Al-Mg₂Si alloy by Gd addition[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 813: 152-178.

- [10] 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):23-28.
- [11] 王连登,傅高升,陈晓,等.硅对 Mg₂Si/ZM5 复合材料组织和性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2003(2):7-10.
- [12] MOUSSA M E, WALY M A, EL-SHEIKH A M. Effect of Ca addition on modification of primary Mg₂Si, hardness and wear behavior in Mg-Si hypereutectic alloys[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2014, 2(3): 1-9.
- [13] ZHOU B, WEI X, WANG Y, et al. Effect of lanthanum addition on microstructures and corrosion behavior of ZnAl-LDHs film of 6061 aluminum alloys[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 379: 1 250-1 256.
- [14] GUI Y L, QI X J, SONG C Y. Metallic tribological compatibility of Moss-Toughened Mo2Ni3Si metal silicide alloys[J]. Materials Science Forum, 2011, 704-705: 1 068-1 072.
- [15] 尹存宏,李少波,梁益龙.钢铁材料摩擦层结构演变与干摩擦自润滑行为研究进展[J].材料导报,2020,34(19):1-15.

(编辑:栗万仲)

《特种铸造及有色合金》征稿启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管,中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,SA、CA、MA、AJ、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊面向国内外广大科技工作者征稿,征稿内容包括:各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料的成形理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,此外还包括各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、新能源材料、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术和技术研究成果等。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址:武汉市江岸区九万方路 26 号

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024

传真:027-85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

