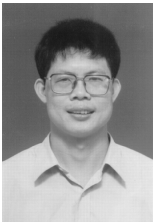


文章编号:1673-9981(2019)01-0001-07

Fe 对 Al-10Si 合金微观组织和摩擦性能的影响*

胡治流^{1,2}, 黄惠毅¹, 唐 鹏^{1,2}, 农 登³

1. 广西大学资源环境与材料学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西有色金属及特色材料加工重点实验室, 广西 南宁 530004; 3. 广东省材料与加工研究所, 广东 广州 510650



摘 要:采用 MM2000 摩擦磨损试验机研究 Al-10Si-xFe 合金在不同负载下的摩擦磨损性能. 结果表明,适量的 Fe 含量可改变 Al-10Si 合金的第二相组织. 在 100 N 低载荷时,Al-10Si-xFe 合金具有一定的摩擦性能,Fe 含量的增加对其磨损质量影响不大,但会减低其摩擦系数. 在 200 N 中载荷时,铁含量较低的 Al-10Si-xFe 合金的摩擦性能较低,当 Fe 质量分数达 1.5% 时,具有一定的摩擦性能. 在 300 N 高载荷时,Al-10Si-xFe 合金的摩擦性能较差. 该合金不适宜用作高载荷摩擦材料.

关键词:Fe 含量;Al-10Si;显微组织;磨损性能

中图分类号:TG146. 2

文献标识码:A

铝硅合金有很好的铸造性能,且强度高、热膨胀系数小、抗疲劳性能好,在汽车、航空航天等工业生产中被广泛应用^[1]. Al-10Si 合金接近共晶铝硅合金,其合金组织主要为粒状、条状和树枝状,力学性能不高,因此,需要进一步改善其微观组织形态^[2]. Fe 是再生铝硅合金中最常见的杂质元素,这是由于在合金重新回收过程中分拣不当,及熔炼过程中增铁等因素造成再生铝中 Fe 含量增多,且 Fe 在铝中的固溶度很低,常以第二相的形式存在^[3].

在 Al-Si-Fe 铸造合金中,Fe 可与 Al、Si 等元素形成多元富铁化合物. 根据其富铁化合物形态,大致可以分为两类,即 α -Fe(常以 Al_8Fe_2Si 相表示)和 β -Fe(常以 Al_3FeSi 相表示)^[4-6]. 其中 α -Fe 为汉字状,对合金性能影响较小; β -Fe 为长针状,会割裂基体,从而影响合金的拉伸性能^[7]. 相对于拉伸性能,铝硅合金中铁相形貌对磨损性能影响的研究较少. 吴桃泉^[8]等研究了 Mg2Si/富铁 A356 再生铝基复合材料的组织及耐磨性. 当铁含量较高($>5.5\%$)时,以磨粒磨损为主;当铁含量较低($<2.2\%$)时,主要是粘着磨损. 管红艳^[9]等研究发现,适量的 Fe 含量可

细化铝青铜合金的组织;当 Fe 质量分数为 4% 时,高铝青铜合金具有较好的耐磨性. 目前,关于 β -Fe 相在不同加载条件下对铝硅合金摩擦磨损性能的影响并没有系统的研究,且鲜有报道. 鉴于此,本文以 Al-10Si 铝合金为基体,通过添加不同含量的 Fe 元素,系统研究了 Fe 含量对 Al-10Si-xFe 型铝合金组织和摩擦磨损性能的影响,为以后研发耐磨 Al-10Si 合金及探索其磨损机制提供参考.

1 试样制备与测试

试验中以 Al-10Si 铝合金为基体材料,采用市售铁剂(Al-75% Fe),按照 Al-10Si-xFe(质量百分比 $x=0,0.2,0.5,1.0,1.5,2.0$)的成分制备试样,实际成分列于表 1. 采用传统工艺熔炼制备试样,在功率为 7.5 kW 的石墨坩埚电阻炉中将 Al-10Si 合金加热至熔化,然后加覆盖剂,保温 10 min 扒渣,再升温至 $(750 \pm 5)^\circ\text{C}$,均匀加入适量的铁剂,搅拌并保温 20 min,加精练剂,静置 10 min. 待合金熔体温度降至 $(720 \pm 5)^\circ\text{C}$ 时,将熔体分别浇注入 200℃ 预热的

收稿日期:2018-12-29

* 基金项目:广西自然科学基金(2017GXNSFAA198271);广西有色金属及特色材料加工重点实验室项目(GXYSYF1812);广西教育厅科研项目(2018KY0034);广西创新驱动项目(AA17202011-1).

作者简介:胡治流(1962-),男,广西钦州人,教授,硕士,研究方向是有色金属加工.

通讯作者:唐鹏(1980-),男,广西桂林人,讲师,博士,研究方向是铝熔体处理及其合金强化.

Φ25 mm×150mm 金属模具和标准磨损试样金属型模具中,冷却凝固制成试样。

试样经切割、磨平、研磨抛光后,用 0.5% HF 水溶液腐蚀制得金相试样。采用德国蔡司 Observer A1m 金相显微镜和扫描电镜 (SEM, Hitachi TM4000PLus) 观察合金的微观组织。通过能量色散光谱仪 (EDS) 检测相的元素组成,并用 X 射线衍射仪 (XRD, Rigaku D/Max 2500v/pv) 进行物相分析。采用 MM-2000 型万能摩擦磨损试验机测定试样磨损性能和摩擦系数,摩擦试样尺寸为 30mm×7mm×8mm,摩擦副为用 45 号钢制成的外径 40 mm、内径 20 mm、厚度 15 mm 的圆环,试验中选取转速为 200 r/min,载荷分别为 100,200,300 N,时长为 20 min。

表 1 Al-10Si-xFe 合金的化学成分
Table 1 Chemical composition of Al-10Si-xFe alloys

Al-10Si-xFe 合金	质量分数/%			
	Si	Fe	Zn	Al
Al-10Si	10.36	—	0.03	Bal.
Al-10Si-0.2Fe	10.28	0.18	0.03	Bal.
Al-10Si-0.5Fe	10.22	0.51	0.02	Bal.
Al-10Si-1.0Fe	10.18	0.98	0.02	Bal.
Al-10Si-1.5Fe	10.06	1.46	0.02	Bal.
Al-10Si-2.0Fe	9.98	1.94	0.01	Bal.

2 试验结果与分析

2.1 Fe 对 Al-10Si 合金微观组织的影响

图 1 为不同铁含量的 Al-10Si 铸造合金的金相组织图。从图 1(a)可以发现,Al-10Si 合金中 α-Al 相排列整齐,呈明显的数枝晶状结构。随铁含量增加,α-Al 相的排列趋于无序,且加铁后的组织出现了明显的针状 β-Fe 相形貌。当铁含量较低时,图 1(b)和图 1(c)显示,β-Fe 相呈细针状。当铁质量分数达 1.0% 时,出现颜色较黑的粗大的长针状相,但其基体针状 Si 相变得更细 [图 1(d)]。当铁质量分数达到 1.5% 时,长针状相变得异常粗大,β-Fe 相呈密集交错分布,其 β-Fe 相交叉生长形成一个“针状网” [图 1(e)]。当铁质量分数达到 2.0% 时,出现更粗更长的长针状 β-Fe 相,其基体 Si 相也开始变得粗大 [图 1(f)]。

图 2 为 Al-10Si-xFe 合金高倍扫描电镜图,其中图 2(a)未加铁,图 2(b)添加质量分数 1.5% Fe。图 2(a) Al-10Si 合金中 A 点为 α-Al,基体较纯净,为共晶硅相。图 2(b) Al-10Si-1.5Fe 合金中 A 点为针状 β-Fe 相,B 点为骨骼状 α-Fe 相,C 点为块状初生硅相。

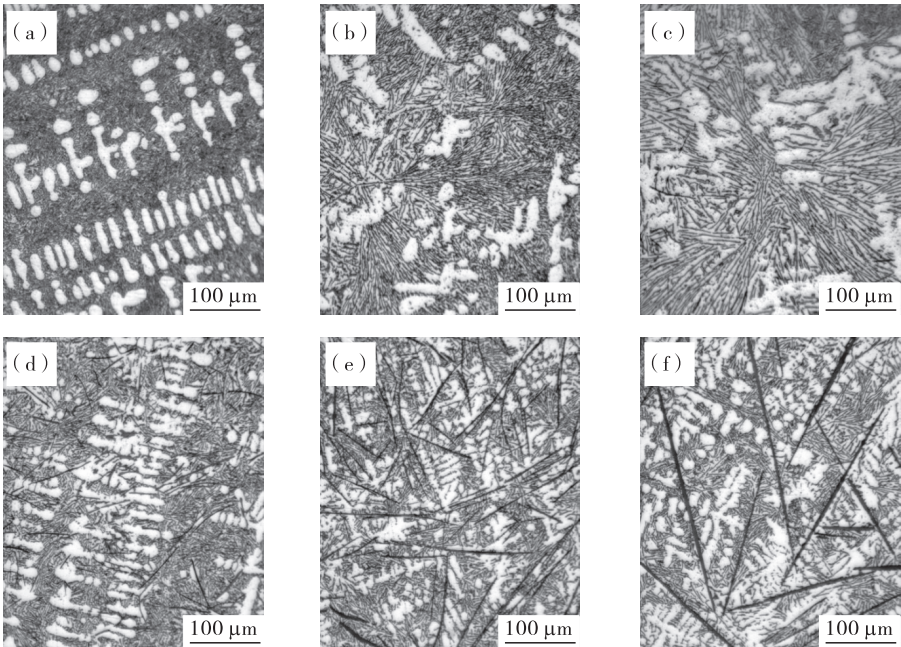


图 1 不同 Fe 含量的 Al-10Si 铸造合金的金相组织

Fig. 1 The microstructure of Al-10Si cast alloy with different Fe content

(a) 未加 Fe; (b) w(Fe) = 0.2%; (c) w(Fe) = 0.5%; (d) w(Fe) = 1.0%; (e) w(Fe) = 1.5%; (f) w(Fe) = 2.0%

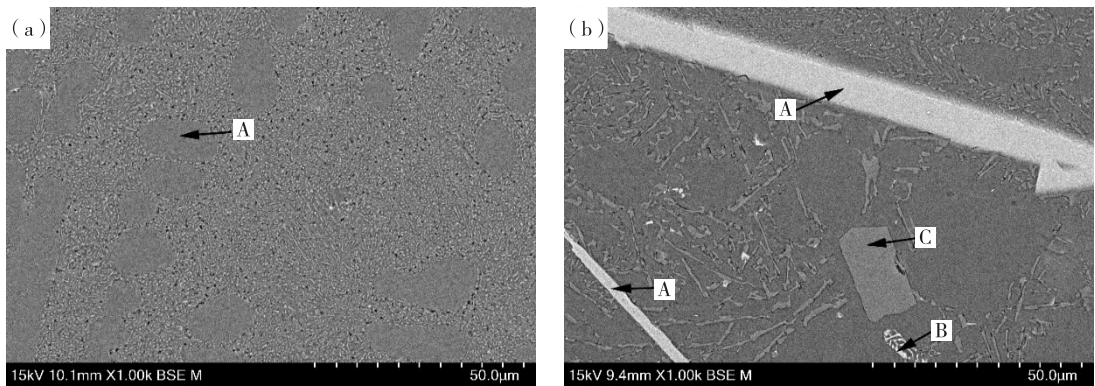


图 2 未加铁与加铁 Al-10Si 合金的 SEM 图
Fig. 2 SEM image of Al-10Si alloy with and without Fe
(a) 未加 Fe; (b) $w(\text{Fe}) = 1.5\%$

图 3 为 Al-10Si 和 Al-10Si-1.5Fe 合金的 XRD 图谱. 图 3(a) 显示 Al-10Si 合金主要是 α -Al 相和共晶 $\text{Al}_{3.21}\text{Si}_{0.47}$ 相. 图 3(b) 显示, Al-10Si-1.5Fe 合金中

出现了图 2 (b) 中点 C 的块状初生 Si 相和 $\text{Al}_{0.7}\text{Fe}_3\text{Si}_{0.3}$ 的 β -Fe 相, 并没有出现 α -Fe 相.

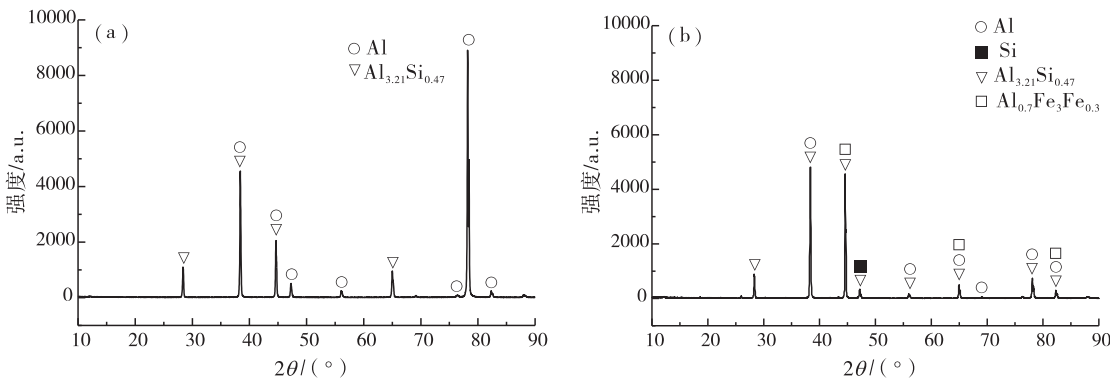


图 3 Al-10Si 合金和 Al-10Si-1.5Fe 合金的 XRD 图谱
Fig. 3 XRD pattern of Al-10Si and Al-10Si-1.5Fe alloy
(a) Al-10Si; (b) Al-10Si-1.5Fe

2.2 Fe 含量对 Al-10Si 合金磨损性能的影响

图 4 为 Al-10Si- x Fe 合金摩擦磨损试样分别在 100, 200, 300 N 干摩擦的条件下, 磨损 20 min 后磨损质量和平均摩擦系数的变化趋势. 由图 4(a) 可见, 在低载荷(100 N)时, 随 Fe 添加量增加, 试样的磨损质量波动较小, 即在此条件下 Fe 对材料的磨损性能影响很小, 且相对磨损质量也较低. 在中载荷(200 N)时, 铁添加 Fe 质量分数在 0 ~ 1.5% 递增时, 磨损质量逐渐加大, 并在 Fe 质量分数为 1.5% 时达到最大值. 当 Fe 质量分数超过 1.5% 时, 磨损质量减少. 在高载荷(300 N)时, 未加铁的 Al-10Si 合金磨损质量很大, 但随着 Fe 添加量增加, 试样的

磨损质量逐渐减小, 且减幅较大; 在 Fe 质量分数为 1.5% 时磨损质量达到最低; 当 Fe 质量分数超过 1.5% 时, 磨损质量又开始增加, 即在此条件下 Fe 含量对材料的磨损影响较大. 这说明载荷越大, 合金的磨损质量就越多; 在 Al-10Si 合金中加入一定量的 Fe 元素, 可减少合金的磨损质量. 由图 4(b) 可见, 在载荷较低(100 N)的条件下, Al-10Si- x Fe 合金的摩擦系数维持在 0.35 ~ 0.45 之间, 铁元素的添加量对其影响不大. 在载荷为 200 N 的条件下, 当铁添加量较低时, 摩擦系数低于 0.1; 随铁添加量增加, 合金的摩擦系数增加, 当 Fe 质量分数为 1.5% 时摩擦系数达最高值, 之后又开始下降. 在载荷为 300 N 的条件下, Al-10Si- x Fe 合金的摩擦系数均低于

0.05,铁添加量对其影响不大. 这说明 Al-10Si-xFe 合金不适宜用作高载荷下的耐磨材料.

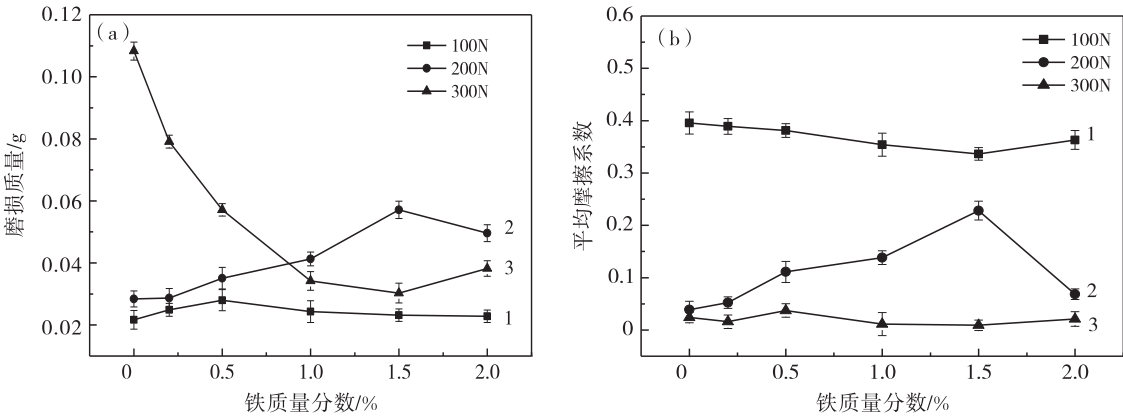


图 4 不同 Fe 含量对 Al-10Si 合金磨损质量和摩擦系数的影响
Fig. 4 Effect of different Fe content on wear loss and friction coefficient of Al-10Si alloy

为进一步分析载荷对 Al-10Si-xFe 合金性能的影响,现对 Al-10Si-1.5Fe 合金在不同载荷下的即时摩擦系数进行分析. 考虑前 180 s 处于磨合阶段,我们只对正常磨损后产生的数据进行统计分析,如图 5 所示. 由图 5 (a) 可知,当载荷较低时,Al-10Si-1.5Fe 合金在前 600 s 具有较高的摩擦系数,摩擦效果较好;在磨损 900 s 后,其摩擦系数仍可保持在

0.2 以上. 由图 5 (b) 可知,当载荷增至 200 N 时,合金在前 200 s 的摩擦系数较高,随时间延长摩擦系数下降幅度较大,在 500 s 时摩擦系数接近 0.2,此后摩擦系数甚至低于 0.1. 由图 5 (c) 可知,在 300 N 高载荷时,Al-10Si-1.5Fe 合金几乎不能产生有效的摩擦,其摩擦系数低于 0.03,几乎起不到有效的摩擦作用.

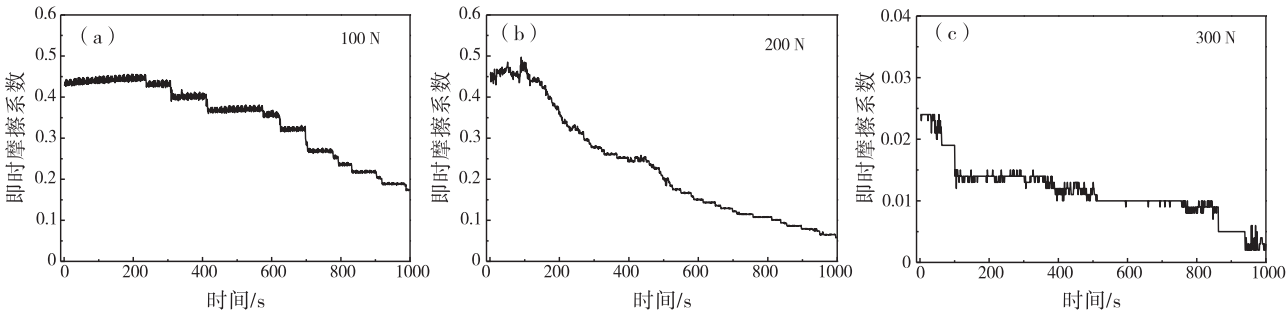


图 5 Al-10Si-1.5Fe 合金在不同载荷下的即时摩擦系数
Fig. 5 Instant friction coefficient of Al-10Si-1.5Fe alloy under different loads

3 分析讨论

3.1 Fe 元素对合金组织及摩擦磨损性能的影响

在低载荷(100 N)摩擦磨损的条件下,Al-10Si 合金的微观组织为非平衡组织,合金强度较高,随着 Fe 含量增加磨损质量变化不大,说明合金的组织足以抵抗合金在低载荷下的磨损,Fe 元素的含量对低载荷摩擦磨损条件下的磨损作用不明显. 在中

载荷(200N)摩擦磨损的条件下,随着 Fe 含量增加,磨损质量不断增加的原因是:在此磨损条件下,Fe 的针状相在干磨损过程中会剥落;随着 Fe 含量的增加,剥落越严重,导致合金抵抗磨损的能力下降. 在高载荷(300 N)摩擦磨损的条件下,Al-10Si-xFe 合金的摩擦表面形貌及成分分析如图 6 所示. 从图 6(a)可看出,在 300 N×200 r/min 磨损的条件下,不含 Fe 材料的磨损主要为粘着磨损,并以小块状方式剥落. 图 6(b)显示,摩擦表面整体为较整齐的梨沟,其磨损方式主要为磨粒磨损,这是磨损质

量低的原因. 图 6(c) 显示, 当 Fe 质量分数增至 2.0% 时, 出现较明显的粘着剥落. 这是在高载荷 (300 N) 下随着 Fe 含量增加, 磨损质量先减少后增加的原因. 微观上由于 Al-10Si 合金冷却速度较快, Fe 溶入基体中形成过饱和固溶体, 从而引起基体晶格严重畸变, 起到一定的固溶强化作用. 随 Fe 含量的增加, 先共析的 α -Al 形成不规则杂乱的树枝状,

Fe 相以长针状分布于基体中, 且针状相是一种硬脆相^[6, 10-11]. 当某一点受到压应力作用时, 针状相的 Fe 能够制约和阻碍周围金属的相互流动^[12]. 从而使合金有更高的强度抵抗摩擦磨损过程中的塑性变形, 这反映出随 Fe 含量的增加, 试样抵抗磨损的能力增强.

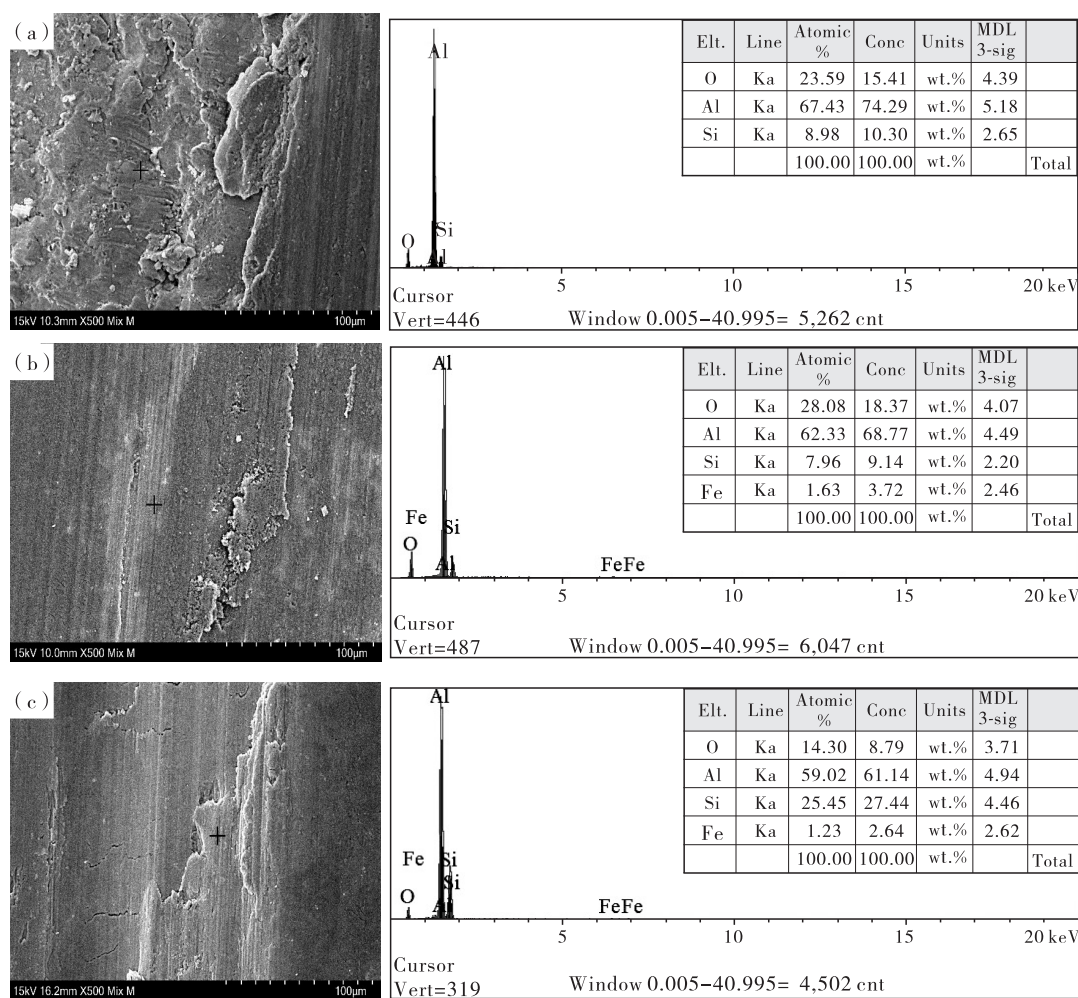


图 6 Al-10Si-xFe 合金的摩擦表面形貌及成分分析

Fig. 6 Friction surface morphologies and EDS analysis

(a) Al-10Si; (b) Al-10Si-1.5Fe; (c) Al-10Si-2.0Fe

3.2 载荷对摩擦磨损性能的影响

由摩擦系数的测定公式(1)可见, 随着载荷的增加, 摩擦系数减小. 摩擦系数反应了材料的耐磨性能, 该参数和载荷、温度、磨损表面等相关. 在摩擦过程中, 材料的磨损表面相互作用, 由于表面变形、摩擦温度和环境介质等因素的影响, 表面层将发生机械性质、组织结构、物理和化学变化. 实际的

摩擦磨损中, 通常是几种形式的磨损同时存在, 且一种磨损发生后往往诱发其他形式的磨损. 在摩擦过程中温度的改变也会造成合金材料表面性质不同, 从而引起摩擦系数的变化^[13-14].

$$\mu = \frac{F}{P} = \frac{T}{R \cdot P} \tag{1}$$

式(1)中 μ —摩擦系数, T —摩擦力矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$),

F —摩擦力(N), P —试样所承受垂直负荷(N), R —下试样的半径(m).

在摩擦学原理中,两个互相接触的物体,无论其表面被加工得多光滑,在微观上摩擦面之间总是凹凸不平的,在实际接触时只有一些微小凸峰进行接触,摩擦面间得的接触面积较小.在外加载荷的作用下,微小凸体发生变形,使摩擦面间的实际接触面积增大.随着载荷增大,摩擦力也随着增大,但实际接触面积的变化和摩擦力的变化并不呈线性关系.由于变形硬化效应,随外加载荷的增大,微凸体越来越不易发生变形,摩擦面之间实际接触面积增大的幅度越来越小,摩擦力与载荷的比值变小,使得摩擦系数减小.随着载荷增加,磨损表面的温度也有一定的增加,使试验中的试样表面软化,导致切削抗力减小^[10, 13, 15].这也是使得 Al-10Si-xFe 合金摩擦系数减小的一个原因.

在低载荷(100 N)磨损的条件下,由于摩擦过程中的磨屑在材料磨损表面粘着使得摩擦系数较高.在中载荷(200 N)磨损的条件下,随着铁含量增加,摩擦表面逐渐形成剥落的磨粒层,使材料表面摩擦系数有所增加,从而使磨损增加.在高载荷(300 N)磨损的条件下,因载荷较大,Al-10Si-xFe 合金中的耐磨颗粒无法起到有效的摩擦作用,在磨损过程中导致摩擦面的材料剥落;载荷和材料的硬度越高,抵抗变形的能力越强,摩擦副啮合与粘着程度越差,摩擦系数越低^[16-17].

4 结 论

(1)添加 Fe 元素可以改变 Al-10Si 合金的组织形貌.当 Al-10Si 合金中 Fe 质量分数超过 1.0% 时,出现粗大长针状分布 β -Fe 相,且随着铁含量增加,长针状组织变得更粗大.当铁含量较高、Al-10Si-xFe 合金析出时,出现了大量初生 Si 相和 $\text{Al}_{0.7}\text{Fe}_3\text{Si}_{0.3}$ 相.

(2)在 100 N 低载荷摩擦的条件下,随 Fe 含量的增加 Al-10Si-xFe 合金的磨损质量变化不大,摩擦系数在 0.35 ~ 0.45 之间;在 200 N 中载摩擦条件下,随 Fe 含量增加磨损质量和摩擦系数均呈先逐渐增加后减低的趋势,Fe 质量分数为 1.5% 时合金的磨损质量和摩擦系数最高;在 300 N 高载荷摩擦条件下,增加铁含量可减少磨损质量,但其摩擦系

数较低,摩擦性能差,说明该合金不适宜用作高载荷摩擦材料.

参考文献:

- [1] TANG P, HU Z, ZHAO Y, et al. Investigation on the solidification course of Al-Si alloys by using a numerical newtonian thermal analysis method[J]. Materials Research Express, 2017, 4(12): 126511.
- [2] 张春月,刘伟东,赵旭,等. Na 盐和 La 变质对 Al-10Si 合金组织与硬度的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2016(9): 992-996.
- [3] 王刚,高安江,曲信磊,等. 再生铝的熔炼技术研究[J]. 再生资源与循环经济, 2015(4): 31-34.
- [4] 孙业赞,于敞,厉松春,等. 铁在铝硅合金中存在的形态及其作用分析[J]. 铸造, 1998(7): 44-48.
- [5] 韩志强,李金玺,杨文,等. 铝合金挤压铸造过程微观孔洞形成的建模与仿真[J]. 金属学报, 2011(1): 7-16.
- [6] 赵明露,刘炳. 铝锰合金及其复合材料的滑动摩擦磨损性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2011(12): 1148-1150.
- [7] 宋东福,王顺成,郑开宏,等. 锰结合熔体保温再生铝降铁机制的探讨[J]. 稀有金属, 2018(5): 555-560.
- [8] 吴桃泉,杜军,关玉芹,等. Mg₂Si/富铁 A356 再生铝基复合材料的组织及耐磨性研究[J]. 铸造, 2016(10): 970-974.
- [9] 管红艳,卢松涛,舒寅清. 铁对高铝青铜合金摩擦磨损性能的影响[J]. 热加工工艺, 2013(12): 99-101.
- [10] 路阳,金峨馨,李文生,等. Fe 对高铝青铜摩擦磨损性能的影响[J]. 材料导报, 2008(2): 135-137.
- [11] 顾恒恒,水丽. 变质处理及合金化对 Al-18Si 摩擦磨损性能的影响[J]. 铸造, 2016(5): 416-419.
- [12] 杨颖,王宇鑫,张瑜,等. 过共晶铝硅合金耐磨性能的研究进展[J]. 金属功能材料, 2011(4): 72-76.
- [13] 巴德玛,孟凡军,孙晓峰,等. 堆焊熔敷层表面纳米晶层摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2014(2): 120-126.
- [14] 王晓笋,巫世晶,陈杰,等. 考虑动载荷与动态磨损系数的直齿轮传动系统动态磨损特性[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014(2): 408-413.
- [15] 王怀庆,司乃潮,司松海,等. Ni 对 ZA27 合金组织及磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2013(1): 57-64.
- [16] 许斌,冯承明,宋月鹏. 微量稀土元素和铬对渗硼层粘着磨损性能的影响[J]. 金属热处理, 2000(4): 17-19.
- [17] 唐鹏,赵艳君,李睿,等. Al-Ti-C 对 Mg₂Si/Al 基复合材料组织及性能的影响[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2017(2): 633-638.

Effect of Fe on microstructure and tribological properties of Al-10Si alloy

HU Zhiliu^{1,2},HUANG Huiyi¹,TANG Peng^{1,2},NONG Deng³

1. School of Resources,Environment and Materials,Guangxi University, Nanning 530004,China;2. Guangxi Key Laboratory of Processing for Non-ferrous Metal and Featured Materials, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. Guangdong Institute of Materials and Processing, Guangzhou 510650, China

Abstract: The wear behavior of Al-10Si-xFe alloy under different loads was examined by using MM2000 friction and wear tester. The results show that the microstructure of the Al-10Si alloy can be modification by adding proper Fe element. At load 100N, Al-10Si-xFe alloy has certain frictional properties,and the Fe content increases,which will reduce its friction coefficient and its frictional amount does not change much. To load 200N,the Al-10Si-xFe alloy with lower iron content has lower frictional properties,and when the Fe content reaches 1.5% ,it has certain frictional properties. With loads 300 N, the Al-10Si-xFe alloy has lower friction properties,indicating that it is not suitable for use in high load friction materials.

Key words: Fe content; Al-10Si;microstructure;wear properties



· 信 息 ·

《材料研究与应用》征稿启事	插页 2
本刊开设特约文章专栏.....	第 26 页
广东省新材料研究所高层次人才引进公告	插页 13 ~14

· 单位介绍 ·

广东省新材料研究所	封三
发展中的广东省科学院	封底
广东省资源综合利用研究所	插页 3
广东省稀有金属研究所	插页 4
广东省半导体产业技术研究院	插页 5
广东省焊接技术研究所(广东省中乌研究院)	插页 6
广东省工业分析检测中心	插页 7
广东省材料与加工研究所	插页 8
广东省科学院产业技术育成中心	插页 9
广东省材料研究学会	插页 10
广东材料谷	插页 11
广州市红日燃具有限公司	插页 12