2016年11月 Nov 2016

文章编号: 1004-0609(2016)-11-2247-09

微量 Sr 对 ZA35-4Si-3Sn 合金 组织与性能的影响



尹 斌,杜 军,李文芳

(华南理工大学 材料科学与工程学院, 广州 510640)

摘 要:利用普通铸造法制备不同 Sr 含量的 ZA35-4Si-3Sn 合金,研究 Sr 含量对该合金凝固组织和拉伸力学性能的影响,并揭示影响机制,探讨 Sr 变质合金的摩擦磨损特性。结果表明: Sr 含量为 0.1%(质量分数)时,初生 硅趋向于球状,细小的颗粒状或纤维状共晶硅数量显著增加;此时,合金的硬度达到 143HBW,抗拉强度与拉伸应变分别提高 45.8%和 151.5%。Sr 变质主要为促进共晶硅相形核和抑制共晶硅相的生长两种机制共同作用的 结果。与 ZA27 合金相比,ZA35-4Si-3Sn-0.1Sr 合金具有更低的摩擦因数。在低速磨损条件下,两种合金的耐磨 性相当;而在高速下,后者具有更低的摩擦温升和磨损量,表现出优异的摩擦磨损特性。

关键词: 耐磨锌合金; Sr 变质; 热分析法; 摩擦; 磨损

中图分类号: TG146.1 文献标志码: A

锌合金以其优异的耐磨性能及工艺性能,一直受 到广泛关注^[1-3]。特别是在当前铜资源日趋匮乏、价格 日益攀升的背景下,"以锌替铜"是今后有色合金工业 领域的重要方向,利用锌铝合金的良好摩擦磨损特性 以实现部分耐磨件替代,如轴瓦和涡轮等^[4]。然而, 锌铝合金抗软化能力较差,在高速、高载下因摩擦温 升高,导致合金迅速软化,从而造成严重的粘着磨损, 开发可适合于高速、高载下的耐磨锌铝合金显得尤为 重要。

改善锌铝合金的显微组织是提高其耐磨性能的关键,其中通过合金化方式形成一定数量的硬质相,对于提高合金的耐磨性尤为显著。近年来,研究人员开展了大量的相关工作。SAVASKAN 等^[5]在 Zn-25Al 合金中添加一定含量的 Si,形成一定数量的硬质 Si 相,极大地提高了合金耐磨性,其磨损率仅为 SAE660 的一半。LI 等^[6]、PRASAD^[7]采用 Mn、Ni 作为合金 元素,在合金基体中形成含 Mn 化合物及 NiAl₃硬质相,取得较好的效果。通过合金化形成的硬质相,提高了合金硬度,使得合金摩擦因数增大,高速高载下 摩擦温升较高,对合金减摩性造成不利的影响。本文 作者曾基于"耐磨+减摩"的复合思想,开发了一种 Si+Sn 复合的锌铝合金体系^[8],其较佳组分为 Zn-35%Al-3%Cu-4%Si-3%Sn,记为 ZA35-4Si-3Sn^[9]。 然而,Si 在合金中主要以不规则状初生硅相存在且尺

寸较大,与基体结合较差,降低合金的力学性能,这 是进一步提高锌铝合金性能需解决的问题。目前主要 采用的改善手段为变质处理,采用的变质剂主要为稀 土元素如 Ce、La、Gd 和 Y 等^[10-11]。Sr 对 Al-Si 合金 中的初生硅及共晶硅具有良好的变质效果,已有大量 的相关研究报 道^[12-13],而对锌合金采用 Sr 变质的研 究 较为少见^[14]。在此,本文作者采用 Sr 对 ZA35-4Si-3Sn 合金进行变质处理,改善合金中硅相形 貌及大小,以期提高合金力学性能及耐磨性,并基于 热分析技术讨论合金组织演变过程及变质机理;最后 探讨最佳变质条件下合金的干滑动摩擦磨损性能,并 与商用 ZA27 锌合金的耐磨性进行对比,旨在为高性 能耐磨锌合金的开发提供参考。

1 实验

试验原材料包括纯 Zn (纯度 99.99%, 质量分数)、 工业纯 Al 锭(≥99.7%)、纯 Sn 粒(纯度 99.99%)、 Al-50%Cu 中间合金、Al-20%Si 中间合金及 Al-10%Sr 中间合金。配制的目标合金体系为 ZA35-4Si-3Sn, Sr 的加入量依次为 0、0.05%、0.1%、0.2%和 0.4%(质量 分数),利用 SG2-3-12 型坩埚电阻炉熔制试样。先将 纯 Al、Al-20%Si、Al-50%Cu 加入预热至暗红色的石

收稿日期: 2015-06-09; 修订日期: 2016-04-30

通信作者: 杜 军, 教授, 博士; 电话: 030-87113597; E-mail: tandujun@sina.com

墨粘土坩埚。将炉温升至 680 ℃,待炉料完全熔化后, 再向熔体中按配方加入纯 Zn、纯 Sn。待全部炉料熔 化后,降温至 650 ℃,搅拌均匀,保温 5 min,再用 0.1%(质量分数)的 ZnCl₂ 对熔体进行精炼,充分搅拌 后,静置 10 min 后扒渣。利用 Al-10%Sr 中间合金进 行变质,搅拌均匀后保温 15 min。将炉温降至 580~ 600 ℃,轻轻搅拌后扒渣,将熔液浇入预热至 250 ℃ 的金属模具中,浇铸成 10 mm×30 mm×60 mm 块状 试样。在试样中部截取 15 mm×15 mm×10 mm 的金 相试样,抛光后的试样用 4%HNO₃(体积分数)酒精溶 液进行腐蚀。利用 Leica-DFC320 型金相显微镜观察合 金的显微组织。通过 Image-Pro-Plus 6.0(IPP6.0)软件对 合金中硅相尺寸进行测量,并分别计算出平均等径圆 直径(*d*)和平均形状因子(*Q*)。

采用由热电偶、温度采集模块、温度信号转化器 及温度记录软件组成的温度采集系统,对合金凝固冷 却过程中温度的变化进行测量。测温元件为K型热电 偶,直径为0.3 mm,测温范围为0~750℃,电偶采用 双孔陶瓷管保护。每次测量时放置3根热电偶,取3 组数据平均值作为最终数据,利用Origin软件绘制成 凝固冷却曲线,并分析其一次微分和二次微分曲线。 利用 HB-3000B 型布氏硬度计测试合金硬度值,取3 次测量结果的算术平均值作为该试样的硬度值。利用 线切割制成 2.5 mm×5 mm×25 mm 片状拉伸试样, 在 AG-X100KN 精密电子万能材料试验机上测试合金 拉伸力学性能,拉伸速度为1mm/min。干滑动摩擦磨 损实验在 MM-2000 型环-块式磨损试验机上进行。利 用线切割加工 10 mm×10 mm×5 mm 的磨损试样, 磨 损试样和摩擦副均用细砂纸将表面打磨至同一粗糙 度,在试样磨损面的侧面中心处钻取尺寸为 d 2 mm× 2 mm 的小孔, 便于实验过程中放置热电偶, 测试材 料摩擦温升。摩擦副材质为经淬火+低温回火的 GCr15, 表面硬度为 60~64HRC。试验条件: 室温, 载荷 200 N,转速为低速(200 r/min)和高速(400 r/min), 滑动距离依次为 314、942 和 1884 m。磨损试样在测 试前后均需用丙酮和酒精超声清洗,去除油污和磨屑。 利用精度为 10⁻⁴ 的电子天平测量试样磨损前后的质 量,质量差即为磨损量,取3次磨损实验后的算术平 均值作为最终磨损量。

2 结果与分析

2.1 Sr 含量对 ZA35-4Si-3Sn 合金显微组织的影响

图 1 所示为铸态 ZA35-4Si-3Sn-x%Sr 合金的显微 组织,图 1(a)~(e)依次对应 Sr 的含量为 0、0.05%、0.1%、



0.2%和 0.4%。从图 1(a)中可以看出,未添加 Sr 的 ZA35-4Si-3Sn 合金中,初生硅相呈多边形块状,尺寸 较大,而共晶硅则呈条状,数量相对较少。而经 Sr 变质后,合金中初生硅得到不同程度的细化,其形态 也逐渐趋向于球状,而共晶硅的数量则显著增加,形 态上也由条状变为细小的颗粒状或纤维状。随 Sr 含量 的增加,初生硅的尺寸先减小后增大,当 Sr 含量为 0.1%时,初生硅尺寸最小,外形较为圆整(见图 1(c))。 当 Sr 含量增加至 0.2%时,初生硅形态上变得更为圆 整,但其尺寸有所增大(见图 1(d))。共晶硅的数量随 Sr 含量的增加呈先增加后减少的趋势,当 Sr 含量为 0.1%时,共晶硅的数量最多。进一步增加 Sr 含量,共 晶硅的数量逐渐减少,当 Sr 含量增加至 0.4%时,合 金中共晶硅的数量与未添加 Sr 变质的合金接近(见图 1(e))。

对不同 Sr 含量 ZA35-4Si-3Sn 合金的物相组成进 行了 XRD 分析,其结果如图 2 所示。由图 2(a)可知, ZA35-4Si-3Sn 合金中除初生 Si 相外,还存在 α (Al)相、 η -Zn 相、单质 Sn 以及部分 Cu 与 Zn 反应形成的 CuZn₅





化合物相。添加 0.4%Sr 后,合金中形成了微量的 Sr₃Al₂Si₂相^[13],如图 2(b)所示。

图 3 所示为 ZA35-4Si-3Sn 合金中初生硅与共晶硅的尺寸及圆整度随 Sr 含量的变化。由图 3 可看出,当 Sr 含量为 0.1%时,初生硅的尺寸最小,由 41.4 µm 减小至 24.9 µm,减小了 39.1%,此时初生硅的圆整度为 0.8; Sr 含量为 0.2%时,初生硅的圆整度最高,为 0.83, 但其尺寸有所增大,达 31 µm。结合图 2(b)可知,当 Sr 含量为 0.05%~0.2%时,共晶硅的尺寸较小,约为 4.3~4.5 µm,其中 Sr 含量为 0.1%时,圆整度最高,达 0.7。



图 3 Sr 含量对 ZA35-4Si-3Sn 合金中初生硅及共晶硅的平 均尺寸及圆整度的影响

Fig. 3 Effect of Sr content on average size and roundness of primary Si (a) and eutectic Si (b) in ZA35-4Si-3Sn alloy

2.2 Sr 对 ZA35-4Si-3Sn 合金凝固过程的影响

图 4 所示为不同 Sr 含量 ZA35-4Si-3Sn-x%Sr 合金的凝固冷却曲线。由图 4 可看出,随 Sr 含量变化,该 合金中共晶硅的析出温度各有不同,通过分析获得各 共晶硅析出反应阶段特征温度(见表 1)。其中, θ_{EN} 为 共晶形核温度; θ_{EU} 为共晶形核最低温度; θ_{EG} 为共晶 生长温度; θ_{EC} 为共晶反应结束温度。 $\Delta \theta'$ 为再辉温差, 等于 θ_{EG} 与 θ_{EU} 之差,该值一定程度上反应了晶粒的 生长速度,晶粒生长越快,释放的结晶潜热越多,再



图 4 不同 Sr 含量的 ZA35-4Si-3Sn-x%Sr 合金凝固冷却曲线 Fig. 4 Solidification cooling curves of ZA35-4Si-3Sn-x%Sr alloys

辉温差越大^[15]。 $\Delta \theta_{\rm E}$ 为共晶过冷度,等于变质前后的 $\theta_{\rm EG}之差, \Delta t$ 为共晶生长时间。

由表 1 可知,随着 Sr 含量增加,合金的共晶形核 温度 θ_{EN} 渐降低,共晶生长时间 Δt 逐渐缩短,共晶过 冷度 $\Delta \theta_E$ 逐渐增大。当 Sr 含量为 0.1%时, $\Delta \theta_E$ 增大为 19.5 °C,这表明 Sr 的加入使熔体产生较大的过冷度, 提高共晶硅相形核率。同时,共晶生长时间 Δt 由 33 s 缩短至 17 s,再辉温差 $\Delta \theta$ '减小为 1 °C,表明 Sr 降低 了共晶硅的生长速率,并缩短其生长时间,一定程度 上抑制了共晶硅相的进一步长大。然而,当 Sr 含量增 加到 0.2%~0.4%时,在图 3 中并未观察到明显的共晶 硅析出平台,这可能与合金中共晶硅相数量较少有关。

表1 不同 Sr 含量的 ZA35-4Si-3Sn-x%Sr 合金共晶硅析出反应特征参数

 Table 1
 Characteristic parameters of eutectic Si precipitation

 of ZA35-4Si-3Sn alloy modified by various Sr contents

w(Sr)/%	$\theta_{\rm EN}/^{\circ}{\rm C}$	$\theta_{\rm EU}/^{\circ}{\rm C}$	$\theta_{\rm EG}/{}^\circ\!{\rm C}$	$\theta_{\rm EC}/^{\circ}{\rm C}$	$\Delta \theta ' / ^{\circ} \mathrm{C}$	$\Delta \theta_{\rm E}/^{\circ}{\rm C}$	$\Delta t/s$
0	582.8	_	578	567.9	_	-1	33
0.05	563.6	558	559.5	557.9	1.5	17.5	21
0.1	557.8	556.5	557.5	556.2	1	19.5	17

目前,关于 Sr 变质机理主要存在抑制形核和抑制 生长两种理论^[12-14,16]。前者认为, Sr 可在一定程度上 消除硅的异质形核质点,并可削弱 Si—Si 共价键, 降低初生硅的自发形核能力^[17],同时, Sr 在固液界面 富集,产生一定的过冷度,增大了共晶硅形核率。后 者主要从硅相生长机制角度考虑,认为未变质的硅相 主要按台阶生长机制长成片状。当添加变质元素 Sr

后, Sr 吸附在硅相生长台阶上, 改变硅原子堆积次序, 形成大量孪晶,抑制硅相的台阶生长,转而以孪晶凹 谷方式生长为具有一定方向的纤维状共晶硅[17]。另 外, MAO 等^[14]指出, Sr 能提高共晶硅在初生硅相上 的形核能力,从而增加共晶硅数量。因此,最终导致 初生硅数量减少而共晶硅数量增加(见图 1(b)~(c))。当 Sr 含量增加时,初生硅表面吸附大量的 Sr,形成 SrSi, 或 SrAl₂Si₂(见图 2(b))化合物相^[13],覆盖在初生硅的 表层,产生物理隔离作用,降低共晶硅在其表面的成 核率,从而导致共晶硅数量减少,出现 Sr 过变质现象, 如图 1(d)和(e)所示。TIMPEL 等^[12, 18]研究发现, Sr-Al-Si 相具有诱导硅相由各向异性生长转变为各向 同性生长的作用,使硅相形貌发生球化,如图 1(d)所 示。综合实验结果来看, Sr 的加入在合金中产生了较 大的过冷度,促进共晶硅相形核,同时对共晶硅相的 生长产生一定的抑制作用。因此, Sr 对合金的变质效 果应为两种机制共同作用的结果,但相比而言,本实 验中 Sr 加入后产生的过冷现象更为明显。

2.3 Sr 含量对 ZA35-4Si-3Sn 合金性能的影响

图 5 所示为铸态 ZA35-4Si-3Sn-x%Sr 合金拉伸应 力应变曲线。由图 5 可看出,所有试样均未出现明显 的屈服阶段,也均未出现明显的"颈缩"现象,表现为 明显的脆性断裂。加 Sr 后,合金的抗拉强度和拉伸应 变均有所提高,呈先增大后减小的趋势。当 Sr 含量为 0.1%时,合金的抗拉强度与拉伸应变最高,分别由 145 MPa 和 1.67%提高为 211.4 MPa 和 4.2%,分别提高了 45.8%和 151.5%。合金的抗拉强度与拉伸应变出现上 述变化与硅相的尺寸及形貌发生改变有关。当 Sr 含量 为 0.1%时,合金中初生硅与共晶硅的尺寸最小,外形 较为圆整,降低了硅相与基体界面处微裂纹的萌生与 扩展几率,从而提高合金强度。

而对于合金的硬度,随 Sr 含量的增加先增大后减 小,磨损量则先减小后增大。Sr 含量为 0.1%时,合金 的硬度最高,磨损量最小。从图 1(c)中可以看到,此 时合金中的初生硅数量较少且较为细小、圆整,同时, 存在大量细小的纤维状及短杆状共晶硅,这在一定程 度上提高了合金的硬度,在磨损过程中,硅相不易脱 落,从而降低合金的磨损量。



图 5 ZA35-4Si-3Sn-x%Sr 合金拉伸应力应变曲线、硬度及 其磨损质量损失

Fig. 5 Tensile stress-strain curves of as-cast ZA35-4Si-3Sn-x%Sr alloys (a) and their hardness and wear loss (b) (Wear conditions: applied load 150 N, sliding speed 200 r/min, wear time 10 min)

2.4 ZA35-4Si-3Sn-0.1Sr 合金的摩擦磨损特性

图 6(a)所示为低速和高速下载荷 200 N 时 ZA27 与 ZA35-4Si-3Sn-0.1Sr 合金摩擦因数随滑动距离的变 化曲线。其中:最大滑动距离为 1884 m,并得到图 7(a) 所示的不同滑动距离阶段的平均摩擦因数。对于 ZA27 合金,其摩擦因数曲线随滑动距离和滑动速度的变化 呈大幅度波动,并随着滑动速度增大,ZA27 合金平 均摩擦因数由 0.48 增大至 0.56,而 ZA35-4Si-3Sn-0.1Sr 合 金 则 较 为 平 稳, 随 着 滑 动 速 度 增 大, ZA35-4Si-3Sn-0.1Sr 合金平均摩擦因数由 0.26 减小至 0.21。

图 6(b)所示为不同滑动速度下合金摩擦温度随滑 动距离变化曲线。从图 6(b)可以看出,两种合金的磨 损表面温度随滑动速度增加而升高。随着滑动距离增 加,滑动速度对 ZA27 合金磨损表面温升影响越大。 滑动速度由 200 r/min 增加到 400 r/min 后,ZA27 合金 磨损表面温度由 120 ℃增加至 230 ℃,增幅高达 91.7%。而 ZA35-4Si-3Sn-0.1Sr 合金磨损表面温度仅由 由 110 ℃增加至 130 ℃,增幅仅为 18.2%。可见,在高 速下 ZA35-4Si-3Sn-0.1Sr 合金仍具有较低的摩擦温升。

图 7(b)所示为两种合金在低速和高速下不同滑动 距离阶段的平均磨损量。在低速下,两种合金的磨损 量相当,表现出相近的耐磨性。与低速磨损相比,高 速磨损条件下两种合金的磨损量均显著提升,但是 ZA35-4Si-3Sn-0.1Sr 的磨损量显著低于 ZA27 合金的。 同时,随着滑动距离的延长,ZA27 合金磨损量的增 幅更为显著。当滑动距离为 1884 m 时,ZA27 合金磨



图 6 ZA35-4Si-3Sn-0.1Sr 与 ZA27 合金摩擦因数与摩擦温 度随距离的变化

Fig. 6 Variation of friction coefficient (a) and temperature (b) with sliding distance under sliding speed of 200 r/min and 400 r/min



图 7 不同滑动速度下 ZA27 和 ZA35-4Si-3Sn-0.1Sr 合金的 平均摩擦因数和平均磨损量

Fig. 7 Average friction coefficient (a) and wear loss (b) of ZA27 and ZA35-4Si-3Sn-0.1Sr alloys under different sliding speeds

损量从低速时的 108 mg 增加至高速时的 360.9 mg, 增幅高达 234%,而 ZA35-4Si-3Sn-0.1Sr 合金磨损量仅 由 121 mg 增加至 165.8 mg,增幅仅为 37%。可见, 在高速磨损条件下,ZA35-4Si-3Sn-0.1Sr 合金的耐磨 性比 ZA27 合金的更佳。

对不同滑动速度下的磨损试样表面进行 SEM 观察(见图 8)。对于 ZA27 合金,无论是低速还是高速下 磨损,其磨损表面均较为粗糙。在低速下,其磨损表 面主要为塑性变形和局部粘着撕裂,并伴有磨粒磨损 (见图 8(a))。而在高速下,磨损表面存在大面积的剥落 (见图 8(c))。而对于 ZA35-4Si-3Sn-0.1Sr 合金,其磨损 表面始终较为光滑,在低速下的磨损表面主要为犁沟 且边缘出现一定量的塑性变形,合金主要表现为犁削 磨损(见图 8(b)),而在高速下,磨损表面犁沟较浅且 数量较少,仅存在轻微的局部粘着撕裂(见图 8(d))。 进一步对磨损表面进行 EDS 成分分析,其结果如表 2 所示。在磨损表面除合金的基本组分外,还存在大量 的 O,说明磨损过程中存在严重的氧化磨损。对于 ZA27 合金,其磨损表面还存在大量的 Fe 元素。

在磨损初期,ZA27 合金摩擦表面上的微凸体受 到较大的瞬间冲击力而发生变形,产生较大振动,导 致摩擦因数波动较大。此时摩擦力做功产生的热量不 均匀,导致摩擦表面温度波动较大^[19]。随着滑动距离 增大,产生大量热量使合金软化,同时合金表面的 Zn 和 Al 与周围空气中的氧反应,形成一层较薄的氧化 膜^[19],具有一定减摩效果,合金摩擦因数波动减小。 随着滑动速度的增加,接触点数量及尺寸增加,摩擦 表面变得更为粗糙,摩擦因数增大。随着磨损继续进 行,氧化膜层厚度增加,与基体结合强度较低^[20],在 外力作用下容易剥落,裸露出新鲜的基体表面与对磨 副形成新的粘着,摩擦力增大,产生大量热量,摩擦 表面温度逐渐升高,对磨副与合金产生严重粘着转移, 大量 Fe 元素转移至磨损表面, 磨损表面材料粘着撕裂 速度加快,导致合金磨损量增大。由于大量合金表面 材料转移至对磨副表层,合金与对磨副的摩擦逐渐转 变为合金自身材料间的相互摩擦^[21],摩擦力降低,摩 擦做功产生的热量减少,摩擦表面温度出现下降,并 随着滑动距离增加在较小范围内波动。

对于 ZA35-4Si-3Sn-0.1Sr 合金,由于合金中存在 润滑减摩的软质 Sn 相,在低速和高速磨损中均可起 到良好的润滑效果^[22], 合金中的高熔点硬质 Si 相具有 很好的承载能力,从而使整个摩擦过程较为平稳,摩 擦因数波动较小,摩擦力做功产生热量较为稳定,合 金磨损表面温升较平稳。随着滑动速度增大,在磨损 初期, 磨损表面粗糙度较大, 摩擦力做功产生大量热 量,合金摩擦表面温度迅速升高。随着磨损继续进行, 合金出现轻微软化, 增大了 η 相及 Sn 相减摩润滑效 果^[22],且在合金磨损表面形成一层润滑性较好的氧化 层,对磨副对合金犁削作用减弱^[19],合金摩擦因数降 低,摩擦力做功减少,摩擦温升变得较为平缓,仅出 现小幅度增长。这在一定程度上减缓了合金表面材料 的剥落速度,因而合金磨损量仅出现较小幅度增加。 此外,在摩擦温度作用下,对磨副与合金开始形成少 量的粘着点,在摩擦力作用下被剪断而产生轻微的粘 着转移,但并未出现 Fe 元素转移现象。

综合上述分析可知,ZA35-4Si-3Sn-0.1Sr 合金在 低速下主要为磨粒磨损,并伴有一定程度的氧化磨损, 随着滑动速度增加,合金开始出现轻微的粘着磨损。 而 ZA27 合金在低速下主要表现为粘着磨损和氧化磨 损,并伴有轻微的磨粒磨损,随着滑动速度增大,摩 擦温度升高,合金迅速软化,粘着转移加剧。



图 8 载荷 200 N、距离 1884 m 时不同滑动速度下 ZA27 与 ZA35-4Si-3Sn-0.1Sr 合金磨损表面形貌 Fig. 8 Worn surface morphology with different sliding speed at sliding distance of 1884 m and load of 200 N: (a) ZA27, 200 r/min; (b) ZA35-4Si-3Sn-0.1Sr, 200 r/min; (c) ZA27, 400 r/min; (d) ZA35-4Si-3Sn-0.1Sr, 400 r/min

Alloy	Rotation speed/ $(r \cdot min^{-1})$ -	Chemical composition of worn surface, w/%					
		Zn	Al	Si	Sn	0	Fe
ZA27	200	60.16	21.42	-	-	9.21	9.21
ZA27	400	44.50	11.67	-	-	15.68	28.15
ZA35-4Si-3Sn-0.1Sr	200	24.43	34.17	4.33	6.01	31.06	-
ZA35-4Si-3Sn-0.1Sr	400	34.11	33.43	4.50	5.72	22.24	-

表 2 ZA27	和 ZA35-4Si-3Sn-0.1Sr 合金磨损表面 EDS 分析结果	
----------	--------------------------------------	--

 Table 2
 EDS analysis results of worn surfaces of ZA27and ZA35-4Si-3Sn-0.1Sr alloys

3 结论

1) 合金中加入微量 Sr 后,初生硅得到不同程度的细化,其形态也逐渐趋向于球状,而共晶硅的数量则显著增加,形态上也由条状变为细小的颗粒状或纤维状。Sr 含量为 0.1%时,合金的变质效果较好。Sr 的变质效果主要为形成较大的过冷度促进共晶硅相形核和抑制共晶硅相的生长两种机制共同作用的结果。

2) 与 ZA27 合金相比,ZA35-4Si-3Sn-0.1Sr 合金 具有更低的摩擦因数和摩擦温升。在低速下,两种合 金的耐磨性能相当。与低速磨损相比,高速下 ZA27 合金平均摩擦因数由 0.48 增至 0.56,摩擦温度由 120 ℃最高升至 230 ℃,磨损量增幅达 234%。而 ZA35-4Si-3Sn-0.1Sr 合金摩擦因数由 0.26 反而降低至 0.21,摩擦温度仅由 110 ℃升高至 130 ℃,磨损量增 幅仅为 37%。高速下 ZA35-4Si-3Sn-0.1Sr 合金表现出 更优异的摩擦磨损性能。

3) ZA27 合金主要表现为粘着磨损和氧化磨损, 高速下粘着磨损和氧化磨损加剧。而 ZA35-4Si-3Sn-0.1Sr 合金的磨损表面较为光滑,主要 表现为磨粒磨损,随着滑动速度的增加,始终未发生 明显的粘着磨损。

REFERENCES

- [1] CHEN Fei, WANG Tong-min, CHEN Zong-ning, MAO Feng, HAN Qiang, CAO Zhi-qiang. Microstructure, mechanical properties and wear behaviour of Zn-Al-Cu-TiB2 in situ composites[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(1): 103–111.
- [2] WANG Feng, XIONG Bai-qing, ZHANG Yong-an, LIU Hong-wei, LI Zhi-hui, LI Xi-wu, QU Chu. Effect of Cu addition on microstructure and corrosion behavior of spray-deposited Zn-30Al alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 532: 100–105.
- [3] 孙利平,林高用,王 莉,曾菊花.易切削变形Zn-Cu-Bi合金的显微组织与性能[J].中国有色金属学报,2011(7):1547-1553.
 SUN Li-ping, LIN Gao-yong, WANG Li, ZENG Ju-hua. Microstructure and properties of free-cutting deformation

Zn-Cu-Bi alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011(7): 1547–1553.

- [4] LIU Yang, LI Hong-ying, JIANG Hao-fan, LU Xiao-chao. Effects of heat treatment on microstructure and mechanical properties of ZA27 alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(3): 642–649.
- [5] SAVASKAN T, MALEKI R A, TAN H O. Tribological properties of Zn-25Al-3Cu-1Si alloy[J]. Tribology International, 2015(81): 105–111.
- [6] LI Yuan-yuan, XIA Wei, Ngai T L, LUO Jun-ming, ZHENG Ling-yi. Microstructure of a novel high-strength, wear-resisting Zinc alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 1995, 5(4): 84–88.
- [7] PRASAD B K. Effect of microstructure on the sliding wear performance of a Zn-Al-Ni alloy[J]. Wear, 2000, 240(1): 100-112.
- [8] 杜 军, 尹 斌, 李文芳. 一种耐磨锌合金及其成型方法: 中国, CN104232999A [P]. 2014.
 DU Jun, YIN Bin, LI Wen-fang. A novel wear-resistant zinc alloy and processing metod: China, CN104232999A[P]. 2014.
- [9] 尹 斌. 新型 Zn-Al-Si-Sn 系合金的组织控制及摩擦磨损特性 研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015: 43-46.
 YIN Bin. Research of microstructure control and friction and wear properties on a novel Zn-Al-Si-Sn alloy[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015: 43-46.
- [10] 卫爱丽,李建春,梁 伟. Y 对 Zn-25Al-5Mg-2.5Si 合金铸态 组织及力学性能的影响[J]. 材料导报, 2010, 24(12): 50-52.
 WEI Ai-li, LI Jian-chun, LIANG Wei. Effects of Y on as-cast microstructure and mechanical properties of Zn-25Al-5Mg-2.5Si alloy[J]. Materials Review, 2010, 24(12): 50-52.
- [11] 赵浩峰, 张凤林, 赵沛廉. 稀土化合物增强 ZA27 合金耐磨性的研究[J]. 中国稀土学报, 1999, 17(3): 227-230.
 ZHAO Hao-feng, ZHANG Feng-lin, ZHAO Pei-lian.

Wear-resistance performance of ZA27 alloy reinforced by rare earth compounds[J]. Journal of the Chinese Rare Earths Society, 1999, 17(3): 227–230.

- [12] TIMPEL M, WANDERKA N, SCHLESIGER R. The role of strontium in modifying aluminium-silicon alloys[J]. Acta Materialia, 2012, 60(9): 3920–3928.
- [13] 董光明,孙国雄,廖恒成. 锶在铸造铝硅合金中的变质行为
 [J]. 特种铸造及有色合金, 2005(3): 146-149.
 DONG Guang-ming, SUN Guo-xiong, LIAO Heng-cheng.
 Modification of cast Al-Si alloy with Sr[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2005(3): 146-149.
- [14] MAO Feng, CHEN Fei, YAN Guang-yuan, WANG Tong-min, CAO Zhi-qiang. Effect of strontium addition on silicon phase and mechanical properties of Zn-27Al-3Si alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 622: 871–879.
- [15] 程仁菊,姜山,李 权,刘文君,李 成,蒋显全. 锶对 AZ31 镁合金晶粒细化作用研究[J]. 功能材料, 2014, 45(5): 5070-5073.
 CHENG Ren-ju, JIANG Shan, LI Quan, LIU Wen-jun, LI Cheng, JIANG Xian-quan. Research about the grain refinement effects of strontium on AZ31magnesium alloys[J]. Journal of Functional Materials, 2014, 45(5): 5070-5073.
- [16] SUMANTH S, YANCY W R, MAKHLOUF M M. Nucleation mechanism of the eutectic phases in aluminum silicon hypoeutectic alloys[J]. Acta Materialia, 2004, 52: 4447–4460.
- [17] LU S Z, HELLAWELL A. Growth mechanisms of silicon in Al-Si alloys[J]. Journal of Crystal Growth, 1985, 73: 316–328.
- [18] TIMPEL M, WANDERKA N, SCHLESIGER R. Sr-Al-Si co-segregated regions in eutectic Si phase of Sr-modified Al-10Si alloy[J]. Ultramicroscopy, 2013, 132: 216–221.
- [19] SAVASKAN T, AZAKLI Z. An investigation of lubricated friction and wear properties of Zn-40Al-2Cu-2Si alloy in comparison with SAE 65 bearing bronze[J]. Wear, 2008, 264(11/12): 920–928.
- [20] 徐 菲,刘伯威,刘 咏,窦玉海,刘延斌. Fe 元素对 ZA27 合金摩擦磨损性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2012(4): 508-513.
 XU Fei, LIU Bo-wei, LIU Yong, DOU Yu-hai, LIU Yan-bin.
 Effect of Fe Content on wear-friction properties of ZA27 alloy[J].

Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2012(4): 508-513.

- [21] AZAKLI Z, SAVASKAN T. An examination of friction and sliding wear properties of Zn-40Al-2Cu-2Si alloy in case of oil cut off[J]. Tribology International, 2008, 41(1): 9–16.
- [22] 叶 新,鲁忠臣,曾美琴,胡仁宗,朱 敏. Si 添加量对机械 合金化 Al-12%Sn 合金组织与摩擦性能的影响[J]. 中国有色 金属学报, 2014, 24(1): 53-58.

YE Xin, LU Zhong-chen, ZENG Mei-qin, HU Ren-zong, ZHU Min. Effects of Si addition on microstructure and wear properties of mechanical alloying Al-12%Sn[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(1): 53–58.

Effect of trace Sr on microstructure and wear properties of ZA35-4Si-3Sn alloy

YIN Bin, DU Jun, LI Wen-fang

(School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: ZA35-4Si-3Sn alloy containing with different Sr contents were prepared by ordinary gravity casting. The effect of Sr content on the microstructure and tensile strength were investigated. The modification mechanism of Sr was deeply disclosed through thermal analysis. The dry sliding friction and wear properties under different sliding speeds were mainly studied. The results show that the primary Si crystals gradually become nodular, while the eutectic Si crystals with fine fibrous structure significantly increase with increasing the Sr content. After being modified by 0.1%Sr (mass fraction), the hardness of ZA35-4Si-3Sn alloy increases to 143 HB. The tensile strength and strain to failure are improved by about 45.8% and 151.5%, respectively. The modification mechanism is mainly ascribed to promote the nucleation and restrict the growth of eutectic Si crystals. Compared with ZA27 alloy, ZA35-4Si-3Sn-0.1Sr possesses lower friction coefficient. There is no significant change in wear properties under the low sliding speed of 200 r/min. However, the ZA35-4Si-3Sn-0.1Sr exhibits excellent friction and wear properties under high sliding speed of 400 r/min with lower temperature rising and wear loss.

Key words: wear-resistant zinc alloy; strontium modification; thermal analysis; friction; wear

Received date: 2015-06-09; Accepted date: 2016-04-30

Corresponding author: DU Jun; Tel: +86-20-87113597; E-mail: tandujun@sina.com

(编辑 龙怀中)