

新型铝锡硅合金结晶行为及微观组织^①

袁鸽成 黎祚坚
(广东工业大学材料系, 广州 510090)

娄燕雄 张新明
(中南工业大学材料科学与工程系, 长沙 410083)

摘 要 采用 XRD、OM、SEM 及 EMPA, 分析了新型铝锡硅轴承合金的微观结构。根据相图, 探讨了合金的结晶过程。结果表明: 新型铝锡硅合金的非平衡结晶相组织由 $\alpha(\text{Al})$ 、 Si 、 $\beta(\text{Sn})$ 3 相组成。 $\beta(\text{Sn})$ 相依附于共晶 Si 凝固并以近网状分布于晶界; 经过适当的均匀化处理, $\beta(\text{Sn})$ 相以 Si 为核心聚集球化而形成 Sn 环绕 Si 的软硬相相结合的“包晶”式相结构。此外, 凝固组织的化学成分分析结果表明: 合金元素未产生宏观偏析现象。

关键词 铝锡硅合金 结晶 微观组织

铝锡合金作为发动机轴承材料, 具有较好的抗粘咬性、耐磨减摩性、耐腐蚀性等综合性能。自 60 年代以来, 它愈来愈多地用于替代巴氏合金和铜合金轴承材料^[1, 2]。

传统的铝锡合金以 Al 为基体, Sn 为主要合金元素, 另添加微量的基体强化组元, 如 Cu 、 Ni 、 Cd 、 Mg 等, 构成较硬基体中含有软相的两相结构, 从而达到减摩耐磨和抗粘咬的作用。

然而, 近年来随着发动机增压技术的改进, 传统设计的铝锡合金的耐疲劳性、承载能力和抗粘咬力已暴露出不能适应高速高负荷发动机的需要的缺点^[3, 4]。

添加适量的 Si 可以改善传统铝锡合金的耐疲劳性能和承载能力, 近年国外已有报导, 如日本专利报导的 A17X 和 A18X 及英国专利报导的 AS104, AS124 等合金^[5, 6]。国内对这方面的研究很少, 在合金的基础研究方面还未有文章报导。

众所周知, 合金的性能首先取决于其微观结构, 因此, 本文着重分析一种新型铝锡硅合金在铁模水冷铸造条件下的结晶行为及微观组织, 为控制最佳的组织形态和生产高性能的轴

承材料提供理论依据。

1 实验过程

采用功率为 5 kW 的坩埚电阻炉熔炼, 铁模水冷铸造法制备坯料。合金的名义成分为: Sn 10%、 Si 4%、 Cu 1%、 Al 为余量。熔体经适当的变质处理后浇铸, 制备的锭坯为 150 mm × 120 mm × 25 mm 的方锭。在锭坯的不同位置取样, 用于物相鉴定和成分分析。用线切割机在锭坯上切取若干小试样, 保留原始铸态样品, 其它样品进行均匀化处理。将上述样品经粗磨、精磨、机械抛光后制得金相样品, 选用不同的浸蚀剂和浸蚀时间, 选择性地显示相组织。采用化学法分析合金成分, 合金的相组成分析是在 Y-40 全自动 XRD 上完成的; 采用光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)及电子探针(EMPA)对金相样品的微观组织进行观察和分析。

2 实验结果及分析

2.1 锭坯的化学成分

① 湖南省科委科学基金资助项目(90-22-02)及广东省高教局重点学科基金资助项目(969302)

收稿日期: 1997-01-08; 修回日期: 1997-05-06 袁鸽成, 男, 33 岁, 讲师, 博士研究生

由化学分析法测定锭坯不同部位的化学组成如表 1 所示，表中数据表明：在铁模水冷铸造条件下，锭坯的化学组成基本均匀，不会因为 Sn 与其它元素比重差大且不固溶于 Al 而造成明显的宏观偏析现象。Sn 和 Si 的含量稍高于计算成份，一方面是由于 Al 的氧化烧损大而相对增加了它们的百分含量，另一方面则是由于原纯铝锭中不可避免地含有微量杂质 Si 的缘故。

表 1 锭坯不同位置的化学组成(%)				
位置	Sn	Si	Cu	Al
顶部中心	9.98	4.30	0.96	余量
顶部表层	10.29	4.10	1.00	余量
底部中心	10.29	4.15	0.97	余量
底部表层	10.35	4.20	0.99	余量

2.2 相组织组成

X 射线衍射仪相分析结果如图 1 所示，在非平衡结晶条件下，所获得的凝固态组织仅含有 α(Al)、Si 及 β(Sn) 相，其中，β(Sn) 为正方结构，晶格常数为 $a=5.831$ 、 $b=c=3.132$ ，Si 是共晶硅，α(Al) 则是 Al 基固溶体。(上述 3 种物相的 JCPDS 卡片号分别为：4-787、5-565、4-673)。由此可见，Sn 元素在合金中未形成化合物，微量 Cu 也未形成 CuAl₂ 化合物。

2.3 凝固组织

铸态显微组织如图 2(a)，(b) 所示，图 2(a) 是未经变质处理的凝固态组织，在 OM 下，灰色共晶 Si 以条状分布于晶界，黑色的 β(Sn)

相也分布于晶界。显然，在此条件下，凝固态组织中存在 β(Sn) 分布不均匀的现象。图 2(b) 为变质处理后的凝固组织，β(Sn) 相呈近似网状分布于晶界，条状的共晶 Si 不复存在，而是以颗粒状的形态被 β(Sn) 相包围，由此可见，变质处理不仅可以改变共晶 Si 的形貌，而且可以改变 β(Sn) 相的结晶行为。β(Sn) 的结晶凝固温度低，固态下不溶于 Si 且几乎不溶于 Al，因此，最后富集于晶界凝固是必然的。然而，先行结晶的共晶 Si 为 β(Sn) 相的凝固提供了有利的非自发核心，未变质时，β(Sn) 相依附于长条状共晶 Si，由于总表面能太大而不能全包围条状 Si 而凝固，但是，在变质条件下，Si 细化成粒状，β(Sn) 完全可以环绕 Si 而凝固；另一方面，变质处理可使熔体的粘度增加，可以减低 β(Sn) 与其它元素比重差的影响，为 β(Sn) 相在晶界的均匀分布创造了有利条件。

合金经适当的均匀化处理后，其显微组织如图 3(a)~(d) 所示。图 3(a) 为 SEM 的背散射电子像(BEI)，根据原子序数大小，白色为 Sn，灰色为 Si，BEI 像很好地反映了 Sn、Si 两相的衬度。β(Sn) 相以 Si 粒子为核心聚集球形形成明显的 Sn 环绕 Si 的“包晶”式相组织。图 3(b) 为采用选择性浸蚀强烈地腐蚀 β(Sn) 相后的二次电子像(SEI)，显而易见，Si 粒子存在于 β(Sn) 相中，呈现出凸凹不平的形貌，其平均尺寸为 2~4 μm，相应的 Sn 相平均尺寸为 3~8 μm；图 3(c) 和图 3(d) 分别为对应图 3(a)

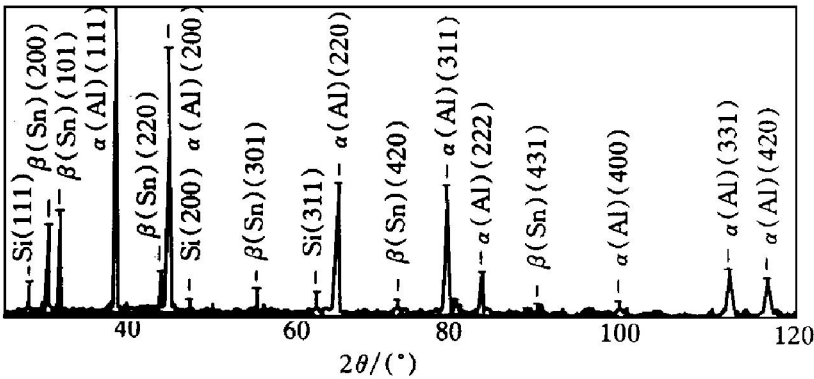


图 1 非平衡结晶条件下 X 射线衍射谱

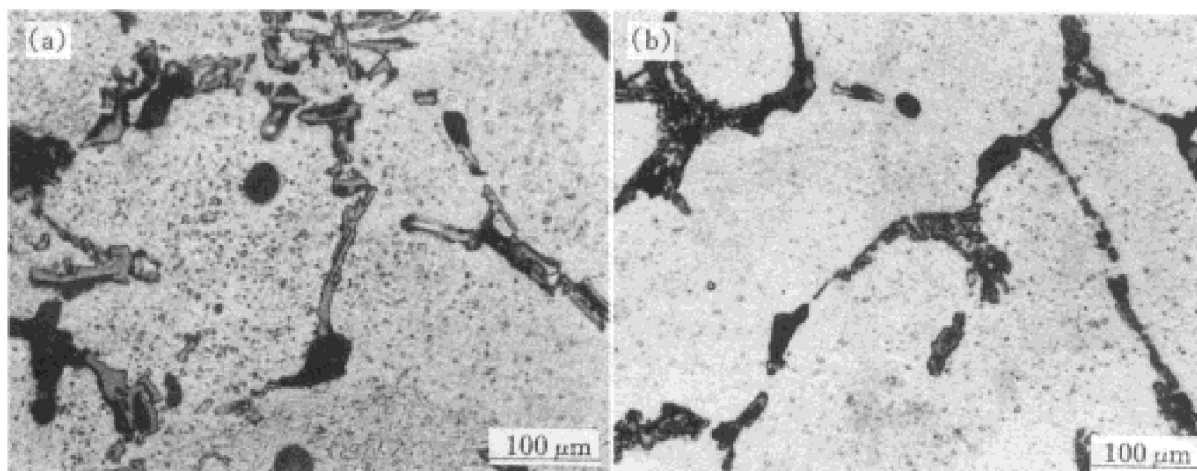


图2 凝固态组织的 OM 形貌

(a) —未变质; (b) —已变质

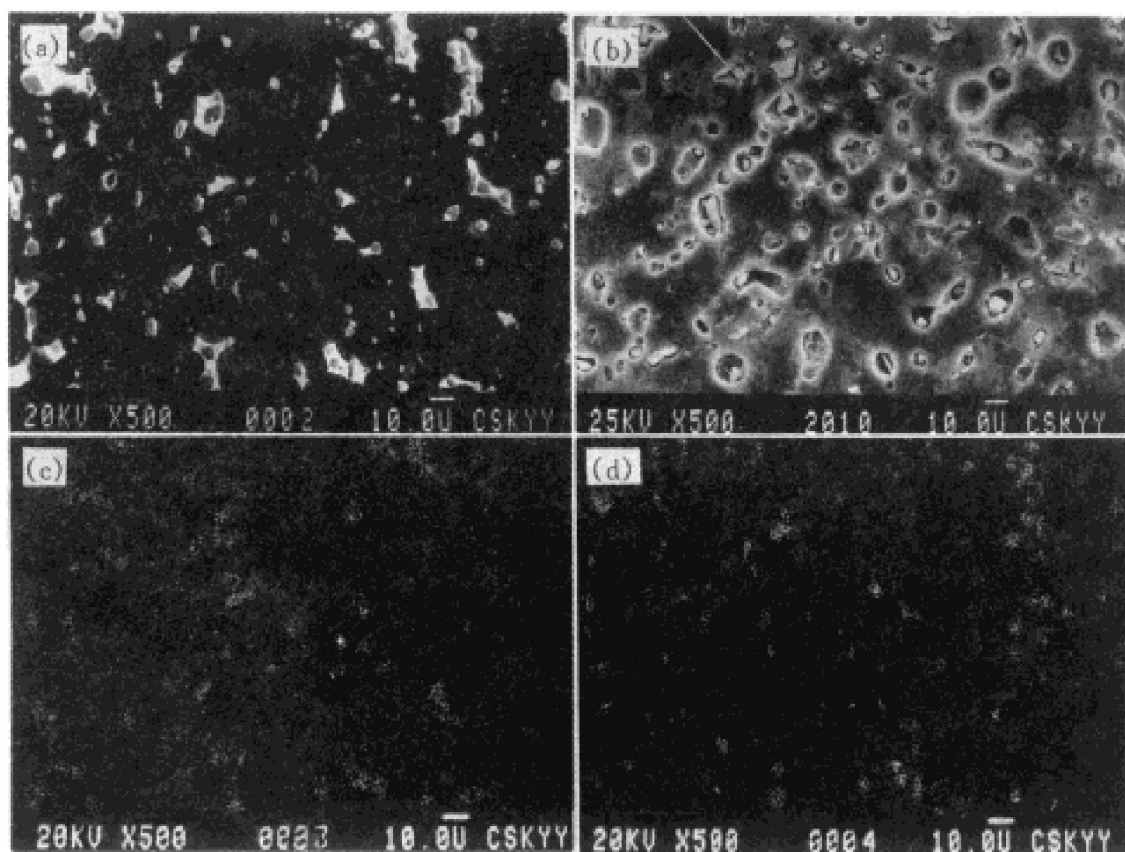


图3 凝固态均匀化处理后的 SEM 形貌

(a) —BEI; (b) —SEI; (c) —Sn 分布; (d) —Si 分布

的 Sn 元素和 Si 元素的面分布图像, 它们进一步说明了在基体相中形成了 Sn 包 Si 的复合相结构。众所周知, Sn 是柔软组元, 具有好的润滑功能; 而硅是耐磨性极高的硬粒子。这种软硬相相结合的“包晶”式复合相组织为提高轴承材料的性能创造了最佳的相组织组态。

3 结晶过程讨论

新型铝锡硅合金的主要合金元素为 Al、Sn、Si 元素, Cu 为微量元素。上面的分析结果表明: 在非平衡结晶状态下, 微量元素 Cu 可完全固溶至铝基体中, 因此, 可以从 Al-Sn-Si 三

元系来讨论合金的结晶过程。然而, Al-Sn-Si 三元系相图目前还未有报导, 下面首先从 Al-Sn 、 Al-Si 、 Si-Sn 三个已知的二元系相图来讨论 Al-Sn-Si 三元系情况。众所周知, Al-Si 二元系为共晶型相图, 共晶点含硅量为 12.6%, 在 577 °C 发生共晶反应: $L \rightarrow \alpha(\text{Al}) + \text{Si}$, 根据参考文献[7], Al-Sn 、 Si-Sn 系也为二元共晶型相图, 共晶点含 Sn 量分别为 99.8% 和几乎 100%, 共晶反应温度分别为 229 °C 和 232 °C, 固态下, Sn 与 Al 几乎不互溶, Sn 与 Si 则完全不互溶。由于 Al、Sn、Si 之间未形成任何化合物相, 因此, 根据相图理论和三元相图的基本规律, 由 Al、Sn、Si 构成的三元系应为三元共晶型相图。图 4 就是由 Al-Si 、 Al-Sn 、 Si-Sn 三个二元系构造的可能的 Al-Sn-Si 三元系液相面投影图, 由三个二元共晶点的位置, 可以断定三元共晶点在 Sn 角附近, 即含 Sn 量几乎为 100%, 共晶温度约为 229 °C。因此, 根据图 4 可知, 新型铝锡硅合金的结晶过程应为: 液相首先结晶出 $\alpha(\text{Al})$ 固溶体相, 然后, 开始发生 $L \rightarrow \alpha(\text{Al}) + \text{Si}$ 二元共晶反应, 随着温度的降低, 液相中 Sn 的浓度越来越高, 最后在 229 °C

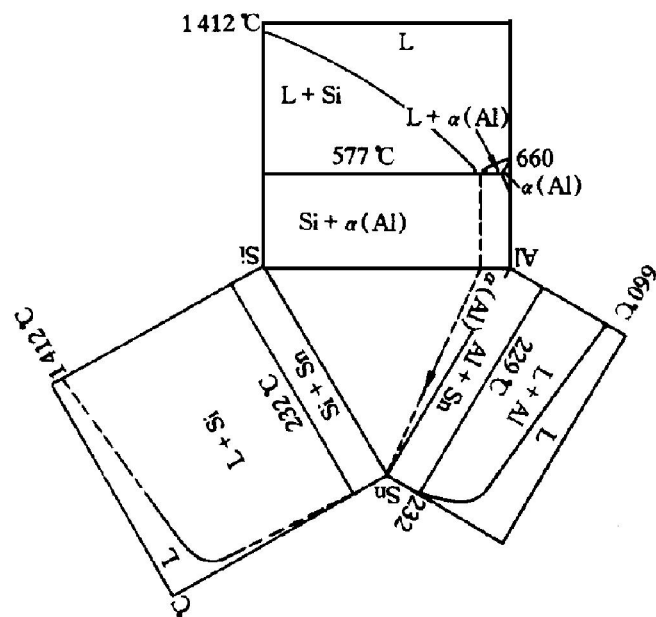


图 4 Al-Sn-Si 三元相图展开图及液相面投影示意图

左右, 几乎为纯 Sn 的液相发生 $L \rightarrow \alpha(\text{Al}) + \text{Si} + \beta(\text{Sn})$ 三元共晶反应, 因此, 最后凝固的 Sn 相存在于晶界并环绕共晶硅粒子而形成锡包硅的“包晶”相结构, 但是, 必须明确指出: 它并非包晶反应的产物, 而是一种特殊的共晶组织。至于微量元素 Cu, 由 Al-Cu 二元相图可知, Cu 在 Al 中的极限溶解度为 5.7%, 即使在非平衡结晶条件下, Cu 在 Al 中的极限溶解度一般也大于 1%^[7, 8], 因此, 含有微量 Cu 的铝锡硅合金在非平衡结晶条件下, 也难形成 CuAl_2 化合物相, 这与前述实验结果相符。

4 结论

(1) 新型铝锡硅合金非平衡结晶相组织由 $\alpha(\text{Al})$, 共晶 Si 以及 $\beta(\text{Sn})$ 相组成, 微量元素 Cu 固溶于基体而不形成 CuAl_2 化合物相。

(2) 结晶过程中, $\beta(\text{Sn})$ 相依附于共晶 Si 粒子凝固并以近似网状分布于晶界, 均匀化后, $\beta(\text{Sn})$ 相以硅粒子为核心聚集球化而形成 Sn 环绕 Si 的“包晶”式相结构。

(3) 变质处理不仅可以细化共晶硅粒子, 而且可以改善 Sn 相的结晶行为。此外, 水冷凝固条件下, 凝固组织不会出现 Sn 元素造成明显的宏观偏析。

参考文献

- 1 Tiwai S N, et al. Light Metal Science and Technology, 1986, 2: 318- 329.
- 2 Eastwood, Brit B J. GB2175604, 1986.
- 3 荻田幸男. 润滑, (日文), 1988, 33(2): 35- 41.
- 4 Warriner J F, Westerling D F. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1991, 113(7): 331- 339.
- 5 Massey I D, MacQuarrine N A, Eastham D R. In: T and N Technical Symposium, 1990, 2: 25- 26.
- 6 Davies G J. In: SAE Technical Symposium, 1986, 1: 108- 112.
- 7 Eric A. Brandes, Smithells Metals Reference book. New York: In Association with Fulmer Research Institute Ltd., 1983: 50- 434.
- 8 袁鸽成. 硕士学位论文, 中南工业大学, 1990: 16- 28.

CRYSTALLIZATION AND MICROSTRUCTURE OF NEW Al-Sn-Si ALLOY

Yuan Gecheng, Li Zuojian

*Department of Materials Science and Engineering,
Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090*

Lou Yanxiong, Zhang Xinming

*Department of Materials Science and Engineering,
Central South University of Technology, Changsha 410083*

ABSTRACT The microstructure of new Al-Sn-Si bearing alloy was analyzed by XRD, OM, SEM and EMPA. According to the equilibrium diagrams, crystallization of the alloy was discussed. It is demonstrated that the microstructure consists of α (Al), Si, and β (Sn) phases, β (Sn) phases are solidified around Si and distributed in the grain boundary as network structure. The “peritectic-type” structure of silicon surrounded with tin is formed by homogenization. Chemical analysis shows that there is no macro-segregation of the elements in the alloy.

Key words Al-Sn-Si alloy crystallization microstructure

(编辑 黄劲松)