

[文章编号] 1004- 0609(2002) 03- 0521- 04

过共晶铝硅自生梯度复合材料的组织与性能^①

李 克, 王 俊, 周 鸣, 张雪萍, 孙宝德, 周尧和

(上海交通大学 材料科学与工程学院, 上海 200030)

[摘 要] 用电磁分离工艺成功制备了初生 Si 相体积分数、材料显微硬度和耐磨性沿径向呈梯度分布的棒状复合材料, 讨论了梯度层的形成过程。微观组织观察和力学性能测试结果表明: 在近外壁区域形成了体积分数高达 16% 的细小初生 Si 相偏聚区, 此区硬度高, 耐磨性好, 中心区为细小和均匀的共晶组织, 两部分之间为颗粒体积分数渐变的过渡区, 可使耐磨层与基体的结合强度得到保证。

[关键词] 电磁分离; 过共晶铝硅合金; 初生 Si 相; 自生梯度复合材料

[中图分类号] TB 331

[文献标识码] A

很多合金中的自生相具有硬度高、耐磨耐蚀性好、热膨胀系数小等优异的物理和力学性能, 可用作增强相。采用激光熔覆^[1]、电磁搅拌^[2]和离心铸造^[3]等工艺可以控制自生相在基体中沿深度方向的分布, 形成自生梯度材料, 其中离心铸造工艺可以使凝固过程中析出的初生相在离心力作用下运动并偏聚到管件的内壁, 提高内壁的耐磨性^[4]。在实际应用中, 常需要零件外表面具有良好的耐磨性, 因此为了获得具有足够强度的耐磨合金, 可以设计这样一种具有梯度微观结构特征的材料: 在表面层分布高体积分数的硬质颗粒以获得良好的耐磨性, 向内部延伸分布体积分数逐步减小的相同颗粒以获得更好的强度和韧性。电磁分离工艺可达到此目的。过去, 人们把电磁分离法作为净化金属熔体的新工艺进行研究, 其中线圈感生交变磁场方式可对其中的柱状金属熔体产生指向轴心的电磁力, 从而将熔体中的非金属夹杂排挤到分离器壁而除去^[5]。同样地, 可利用合金液中的多数自生相与合金液电导率差异很大的特点, 使之迁移到熔体表面层, 形成外层富集自生增强相的梯度材料。

作者以过共晶铝硅合金为对象, 用电磁分离工艺使凝固过程中析出的初生 Si 相在基体中形成沿径向的梯度分布, 并对此梯度材料的微观组织和性能进行分析。

1 实验

用工业纯 Al 和工业结晶 Si 在井式电阻炉中配

制成 Al-24% Si(质量分数) 过共晶合金。图 1 所示是电磁分离装置示意图。连接在高频电源(IGBT) 输出端的感应线圈中可产生频率为 15.6 kHz 的交变磁场。用石墨坩锅在电阻炉中熔化约 500 g 合金液, 加入 1.5% 复合变质剂, 在 780 ℃左右保温 30 min, 开启电源, 线圈内最大磁感应强度为 0.075T, 将合金液浇注于底部放置的水冷铜模的石膏型(室温) 中, 自然冷却后得到尺寸为 $d25\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的圆棒状试样 1。另外, 浇注不加电磁力、其它条件相同的试样 2 作为参照。

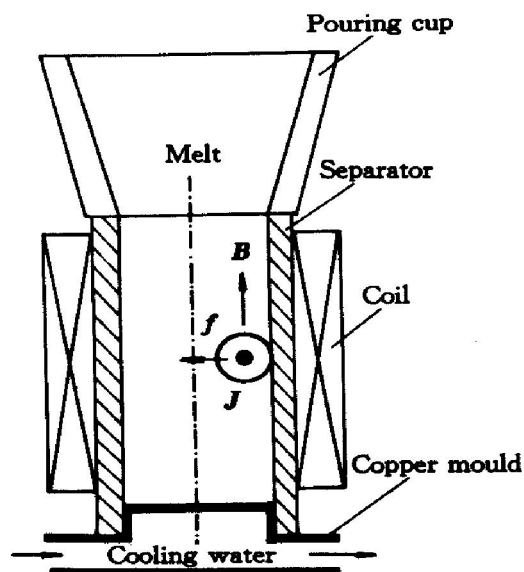


图 1 电磁分离法制备装置示意图

Fig. 1 Schematic illustration of electromagnetic separating process with copper mould water cooling system

① [基金项目] 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999064900- 4); 国家自然科学基金资助项目(59871029)

[收稿日期] 2001- 06- 21; [修订日期] 2001- 09- 17

[作者简介] 李 克(1971-), 男, 博士研究生。

将试样 1 沿长度方向对称面横向剖开并抛光, 用 0.5% HF 水溶液浸蚀试样, 在 Olympus PMG-3 型光学显微镜上观察其显微组织, 用 LECO 图像分析系统定量测定初生 Si 相体积分数沿径向的分布。用 HClO_4 酒精混合溶液电解抛光试样后观察初生 Si 相的宏观分布。用 HXD-1000 型显微硬度计测定试样横剖面上沿径向的显微硬度。在 MPX-2000 盘销式摩擦磨损试验机上测试干摩擦条件下试样 1 外层和中心部位以及试样 2 的磨损速度, 摩擦面积为 19.6 mm^2 , 对磨盘为 45[#] 钢, 转速为 370 r/min, 摩擦半径为 12 mm, 载荷 20 N, 实验周期 30 min。

2 结果与讨论

试样 1 横断面的宏观组织如图 2 所示。可以看出在近外壁 4~6 mm 厚的区域分布着高体积分数的初生 Si 相。试样 1 沿径向不同位置的显微组织如图 3 所示。在近壁面偏聚区域, 初生 Si 相的尺寸较小(20~40 μm), 形态为多面体状, 表明变质细化的效果明显; 在过渡区, 初生 Si 相尺寸相对较大(50~80 μm); 中心区域的组织细小且均匀, 由于大部分初生 Si 相向外迁移, 其成分接近共晶组织。图 4 所示是试样横剖面上初生 Si 相体积分数沿径向的分布(图中 r_1 表示圆棒半径)。可以看出, 宽度占 40% 范围的偏聚区内初生 Si 相的体积分数比较接近(14%~17%), 在靠近外壁面处达到一峰值。从偏聚层到过渡区初生 Si 相的体积分数变化较突然, 从过渡区到中心区则较平缓, 表明圆棒试样的显微组织具有初生 Si 相沿径向呈渐变梯度分布的特征。

电磁分离工艺利用的原理是, 在交变磁场中, 金属熔体会受到指向轴心的电磁挤压力作用, 熔体

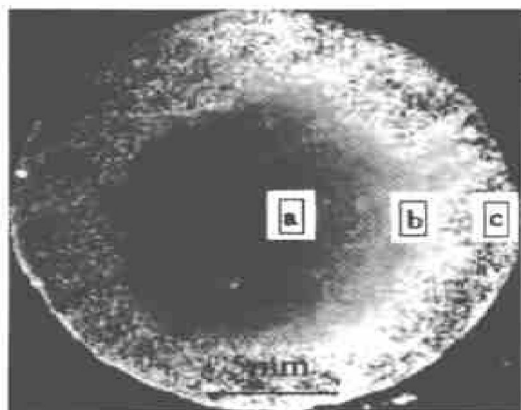


图 2 试样 1 横断面的宏观组织照片

Fig. 2 Macrostructure of cross section of sample 1

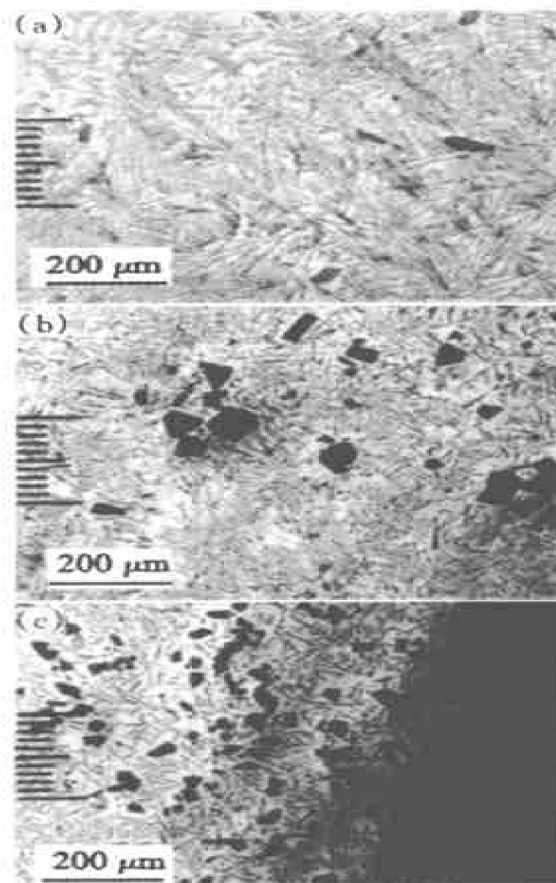


图 3 试样 1 的显微组织照片

Fig. 3 Microstructures of sample 1

(a) —Inner area; (b) —Transitional area; (c) —Outer area

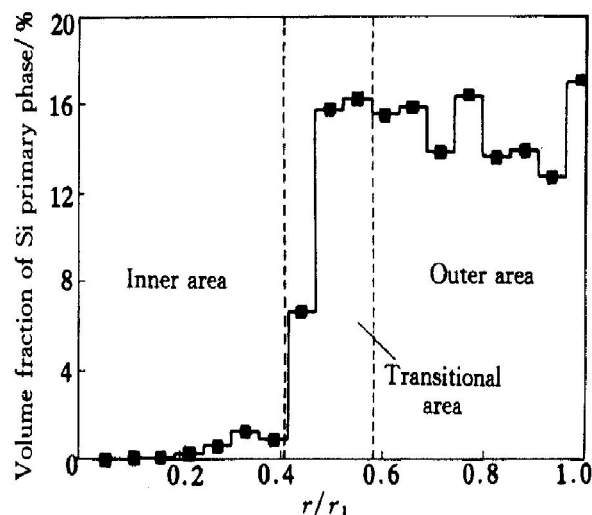


图 4 初生 Si 相体积分数沿径向的分布

Fig. 4 Particle volume fraction distribution along radial direction of sample

中导电率小或不导电的颗粒则受到相反方向的力作用, 并沿径向向外部迁移^[5]。在合金液温度降低时, 初生 Si 相不断析出和长大, 在上述电磁力的作用下向外壁面迁移而形成偏聚层。根据 Stocks 公式可推导出球形颗粒迁移速度与颗粒直径的平方成正

比^[7]:

$$v_p = \frac{d_p^2}{24\mu} \cdot f_p \quad (1)$$

式中 f_p 为作用于夹杂颗粒的电磁挤压力, N; d_p 为夹杂颗粒粒径, μm ; μ 为熔体的粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

由式(1)可以看出, 粒径越大的初生 Si 相其迁移速度越快, 因此越接近型壁, 生成初生 Si 相的粒径越大。但是, 由于采用水冷铜模加速冷却, 随着液/固界面由外向内推移, 初生 Si 相会很快地被快速移动的液/固界面所阻挡和捕获, 初生 Si 相可移动的距离较短, 而中心区域由于冷却速度较慢, 处于过渡区及中心区的初生 Si 相可能长得比近外壁区的更大。因此, 最终形成了在径向上初生 Si 相颗粒半径和体积分数呈梯度分布的自生梯度复合材料, 通过优化和控制连续铸造成型的各项工艺参数, 可进而获得表面耐磨的梯度棒材和管材。

铸态试样沿径向的硬度分布如图 5 所示。与初生 Si 相体积分数沿径向的分布相对应, 含初生 Si 相体积分数越高的区域, 其平均硬度值越大。不同区域的耐磨性测试结果见图 6。可见磨损速率与初生 Si 相的含量有关。初生 Si 相的维氏显微硬度最高达到 800 HV 以上, 因此, 在含有高体积分数初生 Si 相的近外壁区域, 磨损量较中心部位减少了一倍。中心部位的磨损量比未经电磁分离处理的 Al-24% Si(质量分数)过共晶合金的稍大, 说明由于初生 Si 增强相被分离到了外部而降低了耐磨性, 但是仍可保持一定的强度和韧性。这表明, 电磁分离法可使材料的成分组成和力学性能获得最优分布, 制备外表面耐磨性能好的梯度复合棒材, 使外部接触层耐磨, 中心部位保持足够的强度和韧性,

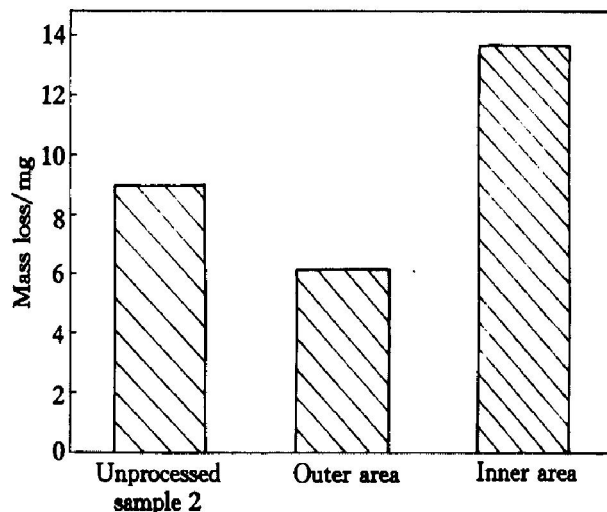


图 6 不同位置的磨损量比较

Fig. 6 Mass loss of different site in samples

而且形成了颗粒体积分数渐变的过渡层, 可使各部分之间的结合强度得到保证。

在理想的稳恒力场作用下颗粒的迁移及分布可通过理论来计算, 但是温度场随时间、位置不同而发生变化, 且初生相具有原位生成和粒径随时间变化的特点, 因此, 初生 Si 相在梯度材料中的形成和分布规律较为复杂, 还有待进一步研究。

3 结论

- 1) 用电磁分离工艺制备了初生 Si 相体积分数、硬度和耐磨性沿径向呈梯度分布的棒状复合材料。
- 2) 在棒材的近外壁区域形成了细小初生 Si 相偏聚层, 体积分数高达 16%, 硬度高, 耐磨性好; 中心部位为细小和均匀的共晶组织, 保证了材料的整体韧性; 两部分之间为颗粒体积分数渐变的过渡层, 可使耐磨层与基体之间有足够的结合强度。

[REFERENCES]

- [1] Pei Y T, de Hosson J TH M. Functionally graded materials produced by laser cladding [J]. Acta Mater, 2000, 48: 2617- 2624.
 - [2] 金俊泽, 张永安, 曹志强. 电磁搅拌自生表面复合材料的组织与性能 [J]. 材料研究学报, 1998, 12(4): 446- 448.
- JIN Jun-ze, ZHANG Yong-an, CAO Zhi-qiang. Structures and properties of surface composite pipe of Al-Ni alloy made by electromagnetic processing [J]. Chinese Journal of Materials Research, 1998, 12(4): 446- 448.

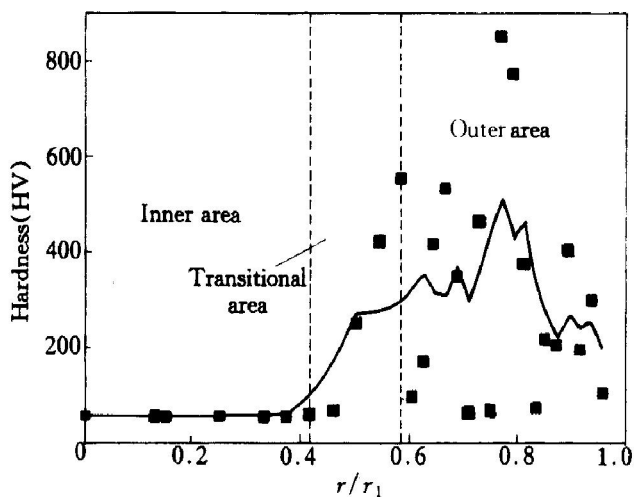


图 5 试样中沿径向的硬度分布

Fig. 5 HV hardness distribution along radial direction of sample

- [3] ZHANG Jian, FAN Zhong-yun, WANG Yu-qing, et al. Hypereutectic aluminum alloy tubes with graded distribution of Mg_2Si particles prepared by centrifugal casting [J]. Mater & Design, 2000, 21: 149–153.
- [4] 王渠东, 丁文江. 离心铸造铝硅合金初晶自生复合材料的研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 1999(Suppl. 1): 9–11.
- WANG Qir-dong, DING Wen-jiang. Study on fabrication of primary crystal in situ composites of Al-Si alloy by centrifugal casting [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 1999(Suppl. 1): 9–11.
- [5] Asai S. Birth and recent activities of electromagnetic processing of materials [J]. Iron Steel Inst Jpn Int, 1989, 29(12): 981–922.
- [6] 李克, 孙宝德, 疏达, et al. 利用高频磁场连续分离铝熔体中非金属夹杂的实验研究 [J]. 金属学报, 2001, 37(4): 405–410.
- LI Ke, SUN Bao-de, SHU Da, et al. Study on applications of high frequency field to separate inclusion particles in aluminum melt [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2001, 37(4): 405–410.
- [7] Taniguchi S, Brimacombe J K. Application of pinch force to the separation of inclusion particles from liquid steel [J]. Iron Steel Inst Jpn Int, 1994, 34(9): 722–731.

Microstructure and properties of in-situ hypereutectic Al-Si functional graded materials

LI Ke, WANG Jun, ZHOU Ming, ZHANG Xue-ping, SUN Bao-de, ZHOU Yao-he

(School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

[Abstract] Hypereutectic Al-Si functional graded materials (FGMs) were produced by electromagnetic separating process. It is found that Si primary particles are formed at the outer zone of the cylinder like samples with graded distribution and its volume fraction reaches 16%. Results show that the hardness and wear resistance also exhibit graded distribution along the radial direction.

[Key words] electromagnetic separating; hypereutectic Al-Si alloy; primary Si phase; in-situ FGMs

(编辑 杨 兵)