

离心铸造原位生成初生 $\text{Ti}(\text{AlSi})_2$ 颗粒增强 Al-16Si-6Ti 复合材料筒状零件的组织与性能

Microstructures and Properties of Al-16Si-6Ti Composites

Tube Reinforced with *In-situ* Primary $\text{Ti}(\text{AlSi})_2$ Particles

Fabricated by Centrifugal Casting

林雪冬^{1,2}, 刘昌明¹, 黄笑宇¹

(1 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400030;

2 重庆工程职业技术学院 机械工程学院, 重庆 400037)

LIN Xue-dong^{1,2}, LIU Chang-ming¹, HUANG Xiao-yu¹

(1 College of Materials Science and Engineering, Chongqing University,

Chongqing 400030, China; 2 College of Mechanical Engineering, Chongqing

Vocational Institute of Engineering, Chongqing 400037, China)

摘要: 采用离心铸造方法制备了 Al-16Si-6Ti 复合材料筒状零件, 使用 SEM, EDS 及 OM 观察分析了复合材料中的微观组织, 使用 Image Tool 测算了铸件中初生颗粒的体积分数, 测试了复合材料的硬度及耐磨性能。结果表明: 离心铸造 Al-16Si-6Ti 筒状零件沿半径方向形成了具有大量初生 $\text{Ti}(\text{AlSi})_2$ 颗粒的外层增强层组织, 无初生颗粒的铝基体中间层组织以及含有少量初生 Si 颗粒的内层组织。从外壁到内壁, 铸件的硬度及初生颗粒的体积分数均呈现先由高到低, 然后小幅上升的变化规律。铸件外层组织具有最好的耐磨性能。在离心场中, 初生 $\text{Ti}(\text{AlSi})_2$ 向铸件外侧偏移、聚集, 形成了高体积分数的初晶 $\text{Ti}(\text{AlSi})_2$ 颗粒增强铸件外层的 Al 基复合材料。

关键词: Al-16Si-6Ti 复合材料; 初生 $\text{Ti}(\text{AlSi})_2$; 硬度; 体积分数; 离心铸造

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.07.003

中图分类号: TB331 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2013)07-0011-05

Abstract: The microstructures of the Al-16Si-6Ti composites tube fabricated by centrifugal casting were observed and analyzed by SEM, EDS and OM. The hardness and wear resistance, and the particle volume fraction of the tube were measured by using Image Tool and calculated, respectively. The results show that the tube consists of an outer layer segregating many primary $\text{Ti}(\text{AlSi})_2$ particles, the middle layer of the Al matrix having no particles and the inner layer containing some primary Si particles. The hardness decreases gradually firstly and then increases slightly from outer wall to inner wall on the cross section of the tube along the radial direction, which conforms to the variation tendency of the particle volume fraction. In the centrifugal field, the primary $\text{Ti}(\text{AlSi})_2$ particles migrate and assemble in the outer layer of the tube to form the Al-16Si-6Ti composites.

Key words: Al-16Si-6Ti composite; primary $\text{Ti}(\text{AlSi})_2$; hardness; volume fraction; centrifugal casting

Al-Si 合金因其优良的铸造性、耐磨性及较低的热膨胀系数被用于制备发动机活塞、缸体等^[1-3], 研究制备铝合金缸套替代目前正在使用的铸铁(钢)缸套以实现全铝发动机的目标成为当前的热门课题。目前, 制备铝合金缸套的方法主要有喷射成形法^[4,5]及铝合金缸体内表面涂覆法^[6,7], 但这两种方法均存在工艺复杂、制备成本高的问题。翟彦博等^[8]在 Al-19Si 合金中加入 5%(质量分数)的 Mg, 采用离心铸造方法获得

了初生 Si, Mg_2Si 颗粒共同增强铝基体的梯度功能复合材料^[9], 比单一初生 Si 增强 Al-19Si 合金具有更好的耐磨性, 有望用于制备铝合金缸套^[10]。然而, 这种材料的制备存在一个无法避免的难点, 即合金中生成的初生 Si, Mg_2Si 颗粒的密度较小, 在离心场中将随着铸造夹渣、气孔等一起向离心力反方向偏移并聚集在铸件的同一侧, 极大地影响了铸件的性能。为此, 可以考虑在 Al-Si 合金中加入过量的 Ti, 以形成密度较大

的初生相 $\text{Ti}(\text{AlSi})_3$ 、 $\text{Ti}_7\text{Al}_5\text{Si}_{12}$ 或 $\text{Ti}(\text{AlSi})_2^{[11,12]}$, 从而实现两方面的意义: (1) 使生成的 TiAlSi 相具有比基体更大的密度, 从而在离心场中实现增强相与铸造夹渣、气孔的反向偏移, 净化铸件组织, 提高材料性能; (2) 通过离心铸造方法获得具有高体积分数的初生 TiAlSi 颗粒增强 Al 基复合材料以制备高耐磨铝合金缸套。

目前, 关于 Al-Si-Ti 材料的研究已有报道。Choi 和 Park^[13] 发现随着 Si 含量的增加, 机械合金化 Al-10Ti-xSi ($x=0\sim6$) (质量分数/% , 下同) 合金的蠕变性能逐渐增强。Saheb 等^[14] 在 Al-12Si 合金中加入了高达 4% 的 Ti, 并研究了 Ti 加入量对快速冷却 (rapid cooling) 制备 Al-Si-Ti 合金耐磨性能的影响。Zeren 和 Karakulak^[15] 采用重力铸造方法制备了 Al-13.1Si-xTi ($x=0.1\sim10$) 合金, 发现合金的硬度随着 Ti 含量的增加而增大。Gao 等^[16] 采用重力铸造方法制备了 Al-xSi-2Ti ($3\leq x\leq 60$) 合金, 发现合金中的 TiAlSi 颗粒明显提高了材料的强度。

而采用离心铸造方法制备含有过量 Ti 的 Al-Si-Ti 三元合金复合材料的研究还鲜见报道。本实验在过共晶 Al-16Si 合金中加入 6% 的 Ti, 以某四缸发动机缸套尺寸为依据, 采用离心铸造方法制备了 Al-16Si-6Ti 复合材料筒状零件, 并研究在离心力作用下形成的铸件的组织与性能。本实验制备的具有高体积分数的初生 TiAlSi 相增强铸件外层的 Al 基复合材料, 有望开发成铝合金发动机缸套零件。

1 实验

1.1 材料准备与铸件制备

实验以工业纯 Al, 纯 Si, Al-10Ti 中间合金为原料, 在井式电阻炉中加热熔炼配制成 Al-16Si-6Ti 合金浆料。使用定制的浇包, 在 950°C 下将熔体浇注到高速旋转的离心模具中, 模具转速为 3000r/min, 模具温度保持在 $250\sim 300^\circ\text{C}$ 。离心铸造获得高度 176mm, 外圆直径 94mm, 厚度 10mm 的筒状零件, 如图 1(a) 所示。从铸件中部截取圆环, 抛光后观察其截面宏观形貌, 如图 1(b) 所示。可以看到, Al-16Si-6Ti 复合材料铸件的截面在宏观上呈现三种不同的组织。其中, 外层组织为含有初晶颗粒的增强层 (reinforcement layer), 中间层为不含颗粒的非增强层 (un-reinforcement layer)。外层与中间层之间存在明显的宏观分界面 (interface)。在靠近铸件内壁的区域, 还形成了一层较薄的内层组织。

1.2 微观组织观察

采用光学显微镜 (OM) 分别对试样的外层、中间

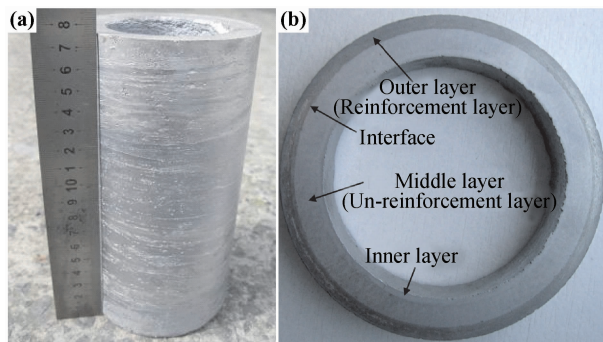


图 1 离心铸造 Al-16Si-6Ti 复合材料筒状零件 (a) 及铸件中部截面的宏观形貌 (b)

Fig. 1 The appearance of the centrifugal casting Al-16Si-6Ti composites tube (a) and the cross section of the tube (b)

层及内层进行组织观察, 并结合 SEM, EDS 对合金物相进行观察分析。实验中设定铸件外壁处为 0.0mm, 沿半径方向由外而内依次记为 1.0mm, 2.0mm, 3.0mm……至内壁处为 10.0mm。

1.3 硬度及耐磨性能测试

沿半径方向, 对铸件外壁至内壁的不同位置进行硬度测试。硬度测试采用 HR150 型洛氏硬度计, 选用 $\phi 1.588\text{mm}$ 的钢球压头, 载荷为 100N, 加载时间 5s。

采用线切割加工方法沿铸件半径方向截取 $\phi 12\text{mm}$, 高度 10mm 的圆柱形耐磨试样, 如图 2(a) 所示。在自制的旋转式摩擦试验机上进行干摩擦磨损实验。图 2(b) 所示为摩擦实验方法示意图, 圆柱形耐磨试样在一定压力下垂直于旋转磨盘, 与旋转磨盘产生滑动摩擦。磨痕距磨盘中心为 60mm, 实验所用的旋转磨盘上的对磨材料为含 SiC 颗粒的耐水砂纸, 粒度 400, 每张砂纸使用一次。圆盘转速为 500r/min, 摩擦时间 60s, 外加载荷 15N。分别对试样的外层, 中间层及内层进行耐磨测试。采用螺旋测微器测量并计算实验前后试样的体积损失量。

2 结果与讨论

2.1 离心铸造 Al-16Si-6Ti 复合材料的微观组织分析

图 3(a), (b) 分别是 Al-16Si-6Ti 复合材料铸件外层和内层微观组织的扫描电镜 (SEM) 图片, 表 1, 2 分别是铸件外层和内层微观组织的 EDS 结果。据文献 [11], Al-Si-Ti 三元合金相图的富 Al 部分可能形成三种类型的金属间化合物, 如表 3 所示。本研究结合各谱点的 EDS 结果进行计算, 可以发现, 图 3(a) 中的谱图 1, 2, 3 所在位置的金相组织均为 Ti, Al, Si 三元素, 且各元素所占原子分数均与化学式 $\text{Ti}(\text{AlSi})_2$ 或 Ti

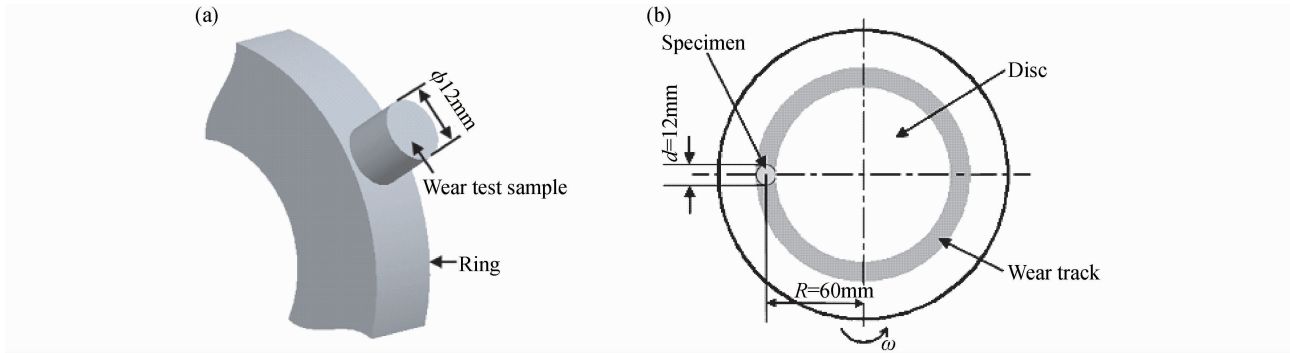


图 2 摩擦实验取样位置(a)及摩擦实验方法示意图(b)
Fig. 2 Schematic diagram of the sampling location for wear test (a) and the wear testing method (b)

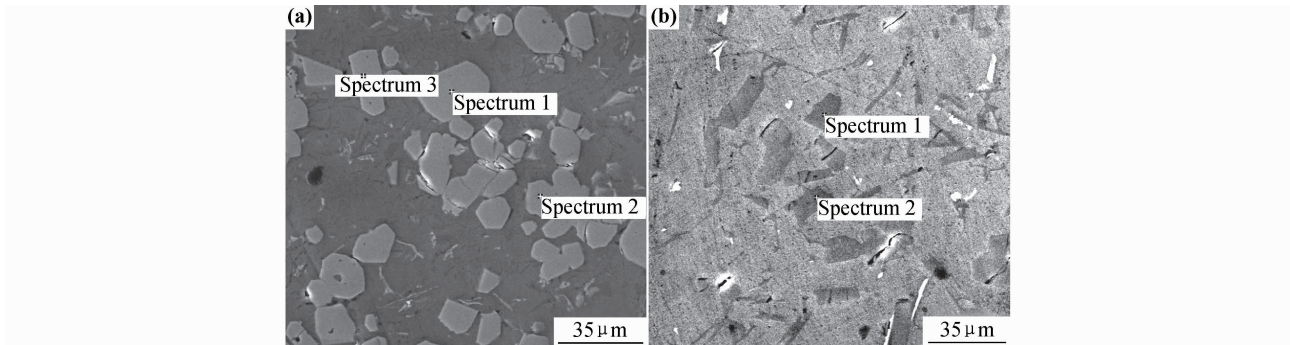


图 3 离心铸造 Al-16Si-6Ti 复合材料铸件外层微观组织(a)和内层微观组织(b)的 SEM 图片
Fig. 3 SEM images of the microstructures at the outer layer (a) and the inner layer (b)
of centrifugal casting of Al-16Si-6Ti composites tube

(Al_xSi_{1-x})₂ (0.15≤x≤0.30)相吻合,因此可以推断,这种 TiAlSi 颗粒的化学式应为 Ti(AlSi)₂。在铸件内层,形成的颗粒为初生 Si。

表 1 离心铸造 Al-16Si-6Ti 铸件外层微观组织的 EDS 结果(原子分数/%)

Table 1 EDS results of the microstructures at the outer layer of centrifugal casting Al-16Si-6Ti composites tube(atom fraction/%)

	Al	Si	Ti
Spectrum 1	12.92	53.62	33.46
Spectrum 2	14.09	52.54	33.37
Spectrum 3	12.92	52.99	34.10

表 2 离心铸造 Al-16Si-6Ti 铸件内层微观组织的 EDS 结果(原子分数/%)

Table 2 EDS results of the microstructures at the inner layer of centrifugal casting Al-16Si-6Ti composites tube(atom fraction/%)

	Al	Si	Ti
Spectrum 1	0	100.00	0
Spectrum 2	0	100.00	0

表 3 Al-Si-Ti 三元合金相图富 Al 部分可能存在的相^[11]

Table 3 Possible phases existing in the Al-rich part of the ternary Al-Si-Ti system^[11]

Phase name	Chemical range
Ti(AlSi) ₃ or Ti(Al _{1-x} Si _x) ₃	0≤x≤0.15
Ti ₇ Al ₅ Si ₁₂ or (Ti _{1-x} Al _x) ₈ (Al _y Si _{1-y}) ₁₆	x≈0.12, 0.06≤y≤0.25
Ti(AlSi) ₂ or Ti(Al _x Si _{1-x}) ₂	0.15≤x≤0.30

2.2 离心铸造 Al-16Si-6Ti 复合材料铸件的微观组织

图 4(a),(b),(c)所示分别为 Al-16Si-6Ti 复合材料铸件外层、中间层及内层的微观组织。可以看到,铸件的外层偏聚了大量的 Ti(AlSi)₂ 颗粒,直径约为 20~35μm;内层偏聚了少量的初生 Si 颗粒,直径约为 15~25μm。并且可以发现,相对于内层中呈现块状形貌的初生 Si,外层中的 Ti(AlSi)₂ 颗粒更加圆润,呈现圆球状。中间层没有颗粒,为铝合金基体。

对 Al-16Si-6Ti 铸件外层、中间层及内层的初生颗粒的体积分数进行了测定,结果如图 5 所示。可以看到,铸件在外层偏聚的 Ti(AlSi)₂ 颗粒体积分数达到 32.5%,沿着半径方向由外而内,颗粒的体积分数逐渐减少,至中间层颗粒体积分数为 0%,在靠近铸件内壁处的内层区域,偏聚的初晶 Si 颗粒体积分数为 6%~8%。

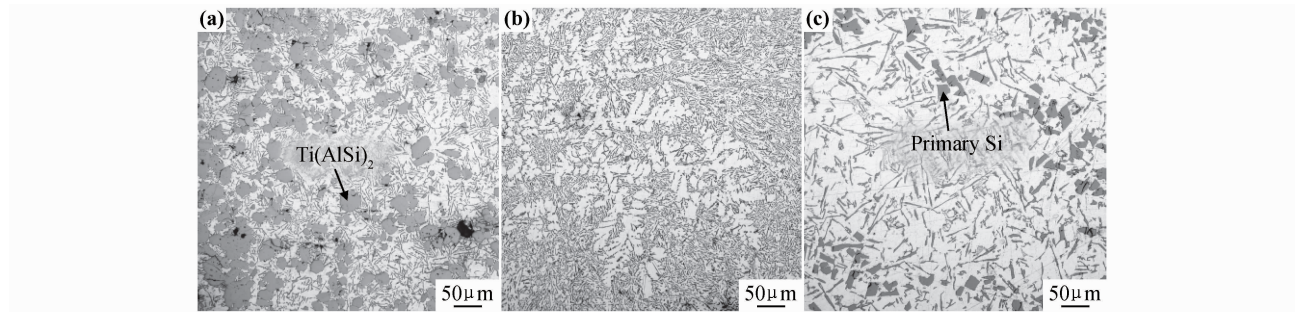


图 4 离心铸造 Al-16Si-6Ti 复合材料铸件外层(a)、中间层(b)及内层(c)的微观组织
Fig. 4 The microstructures at the outer layer (a), middle layer (b) and the inner layer (c) of centrifugal casting Al-16Si-6Ti composites tube

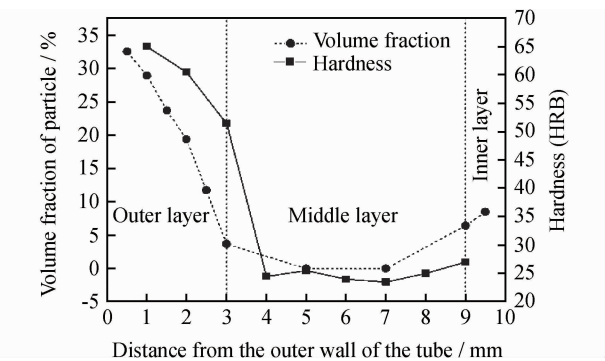


图 5 离心铸造 Al-16Si-6Ti 复合材料铸件
不同位置的硬度及颗粒体积分数

Fig. 5 The hardness and volume fraction of particle at various locations of centrifugal casting Al-16Si-6Ti composites tube

2.3 离心铸造 Al-16Si-6Ti 复合材料铸件的硬度

图 5 所示是 Al-16Si-6Ti 复合材料铸件沿半径方向从外壁到内壁的硬度变化规律。从图 5 中可以看到,颗粒体积分数由外而内呈现先逐渐降低后略有上升的变化趋势,其相应位置的铸件的硬度也呈现同样的变化规律。在外层,铸件的硬度具有最大值 HRB64,由外而内,其硬度逐渐降低,至中间层达最小值 HRB23.5;在内层,铸件的硬度值为 HRB25~HRB27。

由于外层偏聚了大量的初生 $\text{Ti}(\text{AlSi})_2$ 颗粒,共同增强了该区域,导致了铸件外层整体硬度的大幅度提高;中间层为共晶组织,由于没有增强颗粒,硬度值最低;在铸件内层,主要集中了少量的初生 Si 颗粒,导致该处硬度相比中间层略有提高。可见,铸件外层中偏聚的大量 $\text{Ti}(\text{AlSi})_2$ 对铝合金基体的增强作用非常明显。而在内层,少量的初生 Si 颗粒对基体组织在硬度方面的贡献并不大。

2.4 离心铸造 Al-16Si-6Ti 复合材料铸件的耐磨性能

图 6 为 Al-16Si-6Ti 复合材料铸件外层、中间层及

内层组织分别在干摩擦磨损实验条件下的体积损失量。从图 6 中可以看到,在相同的摩擦条件下,铸件外层的体积损失量为 11.07mm^3 ,而中间基体层则达到了 34.2mm^3 。铸件的外层的体积磨损量只有中间层的 30%左右。相对于没有初生颗粒的中间层,外层中大量的初生 $\text{Ti}(\text{AlSi})_2$ 颗粒是重要的耐磨支撑点,在摩擦过程中承担了主要的磨损并阻碍了磨损的进一步发生。而在内层,其体积磨损量为 18.4mm^3 ,这说明少量的初生 Si 也改善了材料的耐磨性。可见,Al-16Si-6Ti 铸件的外层具有最好的耐磨性能,中间层铝基体层的耐磨性最差。初生 $\text{Ti}(\text{AlSi})_2$ 颗粒对 Al-16Si-6Ti 复合材料基体的耐磨性能增强效果明显,铸件外层区域具有优良的耐磨性能,可以作为铝合金缸套的耐磨层,与发动机铝活塞相匹配,形成优良的摩擦副,为采用铝合金缸套代替现行的铸铁(钢)缸套提供了可能性。

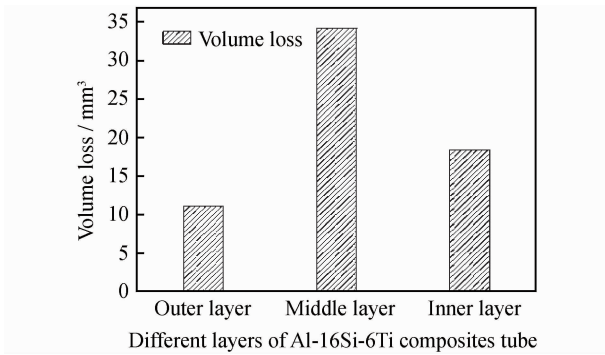


图 6 离心铸造 Al-16Si-6Ti 复合材料铸件外层、中间层及内层组织的耐磨性

Fig. 6 The wear resistance at the outer layer, middle layer and the inner layer of the centrifugal casting Al-16Si-6Ti composites tube

2.5 离心铸造 Al-16Si-6Ti 复合材料组织的形成机制分析

在离心场中,Al-16Si-6Ti 复合材料中的初生颗粒

主要受离心力 F_c 、向心浮力 F_f 及铝液的黏滞阻力 F_v 的共同作用(重力忽略不计)。对颗粒进行受力分析, 则有^[17]:

$$m_s \frac{d^2 x}{dt^2} = F_c - F_f - F_v = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D_s}{2} \right)^3 |\rho_s - \rho_m| G g - 3 \pi \eta D_s \frac{dx}{dt} \quad (1)$$

式中: m_s 为颗粒质量; D_s 为颗粒直径; ρ_s, ρ_m 分别为颗粒、熔体的密度, G 为重力系数 ($G = \omega^2 R / g$, R 为离心半径); η 为熔体黏度; g 为重力加速度; $d^2 x / dt^2, dx / dt$ 分别为颗粒离心方向上的加速度与速度。令 $d^2 x / dt^2 = 0$, 将 $\omega = 2\pi N$ (N 为离心转速, r/s) 代入式(1)中, 则得颗粒的运动速度:

$$v_s = \frac{2\pi^2 |\rho_s - \rho_m|}{9\eta} N^2 R D_s^2 \quad (2)$$

由式(2), 当 $\rho_s > \rho_m$ 时, 则颗粒沿离心力方向运动; 当 $\rho_s < \rho_m$ 时, 则颗粒沿离心力方向的反方向运动。本工作中, 初生 $\text{Ti}(\text{AlSi})_2$ 具有最大的密度, 经估算约为 3.1 g/cm^3 , 而初生 Si 颗粒与 Al 熔体的密度分别为 $\rho_{\text{Si}} = 2.33 \text{ g/cm}^3$, $\rho_m = 2.6 \text{ g/cm}^3$, 则在离心场中, 熔体中的初生 $\text{Ti}(\text{AlSi})_2$ 颗粒将沿离心力方向, 即向铸件外层运动; 而初生 Si 颗粒则向铸件内层运动。据式(2), 可以得到初晶 $\text{Ti}(\text{AlSi})_2$ 与初晶 Si 颗粒的运动速度之比:

$$\frac{v_{\text{TiAlSi}}}{v_{\text{Si}}} = \frac{(\rho_{\text{TiAlSi}} - \rho_m) D_{\text{TiAlSi}}^2}{(\rho_m - \rho_{\text{Si}}) D_{\text{Si}}^2} \approx 4.2 \quad (3)$$

式中: $D_{\text{TiAlSi}} = 30 \mu\text{m}$; $D_{\text{Si}} = 20 \mu\text{m}$ 。可见, 在离心场中初生 $\text{Ti}(\text{AlSi})_2$ 颗粒的偏移速率是初生 Si 的 4.2 倍。

在 Al-16Si-6Ti 合金中, 随着熔体温度逐渐降低, 熔体自生析出初生颗粒。当熔体浇注到铸型以后, 在离心力的作用下, 首先自熔体中析出的密度较大的初生 $\text{Ti}(\text{AlSi})_2$ 颗粒开始向外壁运动, 而稍晚析出的密度较小的初生 Si 颗粒开始向内壁运动。值得注意的是, 虽然初生 $\text{Ti}(\text{AlSi})_2$ 与 Si 颗粒在离心场中具有相反的运动方向, 但由于初生颗粒初生 $\text{Ti}(\text{AlSi})_2$ 析出时间较早^[18-20], 且在离心场中的运动速度更快, 在很短的时间内便偏聚到铸件外层, 因此与稍晚析出初晶 Si 发生颗粒碰撞或粘连的几率较小, 这与文献[8]中提到的初晶 Mg_2Si 与初晶 Si 颗粒之间的碰撞、粘连以及推移作用有所不同。初晶 $\text{Ti}(\text{AlSi})_2$ 与 Si 颗粒分别独自向铸件的两侧偏聚, 进而形成不含任何颗粒的中间层区域。最终, 铸件的外层中主要为初生 $\text{Ti}(\text{AlSi})_2$ 颗粒, 而内层则主要为初生 Si 颗粒(见图 4)。总之, 初生 $\text{Ti}(\text{AlSi})_2$ 的离心运动与初生 Si 的向心运动形成了具有三层组织的 Al-16Si-6Ti 复合材料。

3 结论

(1) 采用热模离心铸造工艺成功制备了 Al-16Si-6Ti 复合材料筒状铸件。在离心力作用下, 铸件外层偏聚了大量的 $\text{Ti}(\text{AlSi})_2$ 颗粒, 内层积聚了少量初晶 Si 颗粒, 中间层为无颗粒的铝合金基体。

(2) 从外壁到内壁, Al-16Si-6Ti 铸件的硬度先逐渐降低后小幅升高, 与铸件内形成的初生颗粒体积分数的变化趋势相吻合。铸件在外层中的初生颗粒体积分最大可达 32.5%; 在内层, 颗粒体积分数为 6%~8%。铸件外层具有最高硬度达 HRB65, 中间层的硬度最低为 HRB23.5。

(3) 在干摩擦磨损条件下, Al-16Si-6Ti 复合材料铸件的外层颗粒层具有优良的耐磨性能, 为制备 Al-Si-Ti 复合材料汽缸套提供了可能性。

(4) 在离心场中, 初生 $\text{Ti}(\text{AlSi})_2$ 向铸件外侧发生偏移、聚集, 增强了铸件外层组织。初生 $\text{Ti}(\text{AlSi})_2$ 的离心运动与初生 Si 的向心运动形成了具有三层组织的 Al-16Si-6Ti 复合材料筒状零件。

参考文献

- [1] TORABIAN H, PATHAK J P, TIWARI S N. Wear characteristics of Al-Si alloys [J]. *Wear*, 1994, 172(1): 49-58.
- [2] 谭银元. 离心铸造 Al-16wt% Si 合金自生梯度复合材料[J]. *复合材料学报*, 2002, 19(5): 47-51.
TAN Yin-yuan. In situ gradient composites of Al-16wt% Si alloy by centrifugal casting [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2002, 19(5): 47-51.
- [3] 钱建刚, 张家祥, 王纯, 等. AZ91D 镁合金表面激光等离子复合喷涂 Al-Si/Al+Al₂O₃ 涂层的研究[J]. *航空材料学报*, 2011, 31(3): 60-64.
QIAN Jian-gang, ZHANG Jia-xiang, WANG Chun, et al. Study on Al-Si/Al+Al₂O₃ coating of AZ91D Mg alloy by laser plasma hybrid spraying[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2011, 31(3): 60-64.
- [4] 弗兰兹·吕克特, 彼得·斯托克, 罗兰德·比德曼. 超共晶硅铝合金汽缸衬筒及其制造方法[P]. 中国专利: CN1129743, 1996-08-28.
- [5] HA T K, PARK W J, AHN S, et al. Fabrication of spray-formed hypereutectic Al-25Si alloy and its deformation behavior [J]. *J Mater Process Tech*, 2002, 130-131: 691-695.
- [6] UOZATO S, NAKATA K, USHIO M. Evaluation of ferrous powder thermal spray coatings on diesel engine cylinder bores [J]. *Surf Coat Tech*, 2005, 200(7): 2580-2586.
- [7] BOBZIN K, ERNST F, RICHARDT K, et al. Thermal spraying of cylinder bores with the plasma transferred wire arc process [J]. *Surf Coat Tech*, 2008, 202(18): 4438-4443.

- [5] 高坚新,沈亚鹏.主被动阻尼层合板结构的自由振动和阻尼特性分析[J].应用数学和力学,1999,20(10):1004-1014.
GAO Jian-xin, SHEN Ya-peng. Vibration and damping analysis of a composite plate with active and passive damping layer [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1999, 20(10): 1004-1014.
- [6] SCHULTZ A B, TSAI S W. Dynamic moduli and damping ratio in fiber-reinforced composites[J]. J Composite Materials, 1968, (2): 368-379.
- [7] HASHIN Z. Complex moduli of viscoelastic composites: I General theory and application to particulate composites [J]. Int J Solids and Struct, 1970, 6(5): 539-552.
- [8] ADAMS R D, FOX M, FLOOD R J L, et al. The dynamic properties of unidirectional carbon and glass fiber-reinforced plastics in torsion and flexure[J]. J Comp Mater, 1969, 3: 594-603.
- [9] ADAMS R D, BACON D G C. Measurement of flexural dynamic capacity and dynamic Young's modulus of metals and reinforced plastic[J]. J Phys D: Appl Phys, 1973, 6: 27-41.
- [10] ADAMS R D, BACON D G C. Effect fiber-orientation and laminate geometry on properties of CFRP[J]. J Comp Mater, 1973, 7: 402-428.
- [11] BOTELHO E C, CAMPOS A N, D BARROS E, et al. Damping behavior of continuous fiber/metal composite materials by the free vibration method[J]. Composites: Part B, 2006, 37: 255-263.
- [12] 武海鹏,侯泽洋,孙立娜. 玻璃纤维、碳纤维复合材料的阻尼性能分析[J]. 应用力学学报, 2011, 29(1): 65-68.
WU Hai-peng, HOU Di-yang, SUN Li-na. Damping analysis of glass and carbon fiber composites [J]. Chinese Journal of Ap-

plied Mechanics, 2011, 29(1): 65-68.

- [13] 卢子兴,夏彪,杨振宇. 三维编织复合材料悬臂梁的振动特性. 复合材料学报[J]. 2010, 27(6): 172-178.
LU Zi-xing, XIA Biao, YANG Zhen-yu. Vibration characteristics of 3D braided composites cantilever beam[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2010, 27(6): 172-178
- [14] 李典森,卢子兴,李嘉禄,等. 三维编织复合材料振动阻尼特性的实验研究[J]. 机械强度, 2009, 31(2): 211-214.
LI Dian-sen, LU Zi-xing, LI Jia-lu, et al. Experimental research on the vibration damping properties of 3D braided composites [J]. Journal of Mechanical Strength, 2009, 31(2): 211-214.
- [15] ZHANG R X, NI Q Q, MASUDA A. Vibration characteristics of laminated composite plates embedded shape memory alloys [J]. Composite Structure, 2006, 74(4): 389-398.
- [16] 吕书强,李小平,瞿晓. 快速傅里叶变换在振动预测中的应用[J]. 电气应用, 2009, 28(24): 72-74.
LV Shu-qiang, LI Xiao-ping, ZHAI Xiao. The application of Fast Fourier Transform in vibration prediction [J]. Electrotechnical Application, 2009, 28(24): 72-74.
- [17] 曹树谦,张文德,肖龙翔. 振动结构模态分析[M]. 天津:天津大学出版社, 2001. 13-14.

基金项目:天津市科技计划项目(11ZCKFSF00500,10SYSYJC27800)

收稿日期:2012-05-03;修订日期:2013-03-21

作者简介:裴晓园(1983-),女,博士研究生,主要从事编织复合材料的振动模态性能方面的研究工作,联系地址:天津市西青区宾水西道399号,天津工业大学科研楼复合材料研究所(300387),E-mail: woshipeixiaoyuan@126.com

(上接第15页)

- [8] ZHAI Y B, LIU C M, WANG K, et al. Characteristics of two Al based functionally gradient composites reinforced by primary Si particles and Si/in situ Mg₂Si particles in centrifugal casting [J]. T Nonferr Metal Soc, 2010, 20(3): 361-370.
- [9] FUKUI Y. Fundamental investigation of functionally gradient material manufacturing system using centrifugal force [J]. JSME International Journal Series III-Vibration Control Engineering Engineering for Industry, 1991, 34(1): 144-148.
- [10] 刘昌明,翟彦博,谢勇,等. 内层颗粒增强缸套及其制造方法[P]. 中国专利:200810070197.0, 2009-01-07.
- [11] CHEN X G, FORTIER M. Formation of primary TiAlSi intermetallic compounds in Al-Si foundry alloys [J]. Mater Forum, 2004, 28: 659-665.
- [12] RAGHAVAN V. Al-Si-Ti (Aluminum-Silicon-Titanium) [J]. JPEDAV, 2005, 26(6): 624-628.
- [13] CHOI C J, PARK J K. Effect of Si addition on mechanical alloying behavior and creep properties of Al-10Ti-xSi alloys [J]. Met Mater Int, 1999, 5(2): 179-184.
- [14] SAHEB N, LAOUI T, DAUD A R. Influence of Ti addition on wear properties of Al-Si eutectic alloys [J]. Wear, 2001, 249(8): 656-662.
- [15] ZEREN M, KARAKULAK E. Influence of Ti addition on the microstructure and hardness properties of near-eutectic Al-Si al-

loys [J]. J Alloy Compd, 2008, 450(1-2): 255-259.

- [16] GAO T, LI P, LI Y, et al. Influence of Si and Ti contents on the microstructure, microhardness and performance of TiAlSi intermetallics in Al-Si-Ti alloys [J]. J Alloy Compd, 2011, 509(31): 8013-8017.
- [17] OGAWA T, WATANABE Y, SATO H, et al. Theoretical study on fabrication of functionally graded material with density gradient by a centrifugal solid-particle method [J]. Compos Part A-Appl S, 2006, 37(12): 2194-2200.
- [18] NOWOTNY H, HUSCHKA H. Studies of the partial systems Al-TiSi₂, Al-ZrSi₂, Al-WSi₂ [J]. Monatsh Chem, 1957, 88: 494-501.
- [19] BRUKL C, NOWOTNY H, SCHOB O, et al. Die Kristallstrukturen von TiSi, Ti(Al,Si)₂ und Mo(Al,Si)₂ [J]. Monatsh Chem, 1961, 92: 781-788.
- [20] SCHOB O, NOWOTNY H, BENESOVSKY F. Die dreistoffe (titan, zirkonium, hafnium)-aluminium-silizium [J]. Planseeber Pulvermet, 1962, (10): 65-71.

收稿日期:2012-03-08;修订日期:2012-07-20

作者简介:林雪冬(1983-),男,博士,讲师,研究方向:铝基复合材料的制备技术及高性能铝合金零件的开发,联系地址:重庆市沙坪坝区上桥重庆工程职业技术学院机械工程学院(400037),E-mail: dreamerdog@163.com