文章编号: 1004-0609(2013)03-0695-08

### 离心铸造初生 Si 及 Si/Mg<sub>2</sub>Si 颗粒增强 铝基复合材料的组织与性能

林雪冬<sup>1,2</sup>,刘昌明<sup>1</sup>,吕循佳<sup>1</sup>,郝旭红<sup>1</sup>

(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)

摘 要:采用离心铸造方法制备初生 Si 颗粒单独增强 Al-18Si 初生 Si/Mg<sub>2</sub>Si 颗粒混合增强 Al-18Si-5Mg 铝基复合 材料活塞。研究内浇口尺寸、浇注温度、模具温度、离心转速对 Al-18Si-5Mg 活塞的组织的影响,测试两种离心 铸造活塞的硬度和耐磨性能,并与重力铸造 Al-18Si 活塞进行性能对比。结果表明:内浇口厚度尺寸为 8mm,浇 注温度为 770 ℃,模具温度为 400 ℃,离心转速为 800 r/min 时,离心铸造获得成形效果好且无铸造缺陷的 Al-18Si、Al-18Si-5Mg 活塞,活塞顶部及环槽区分别偏聚有大量的初生 Si 颗粒和初生 Si/Mg<sub>2</sub>Si 颗粒,而活塞裙部为无颗粒 的基体组织。离心铸造 Al-18Si-5Mg 活塞在顶部及环槽的硬度比离心铸造 Al-18Si 活塞的提高了 10%,前者的耐磨性能略优于后者;离心铸造 Al-18Si-5Mg 活塞顶部及环槽的硬度比重力铸造 Al-18Si 活塞的提高了 10%~20%,且前者的平均磨损量仅为后者的 60%~68%.

关键词:初生颗粒;铝基复合材料活塞;硬度;耐磨性能;离心铸造 中图分类号:TB331 文献标志码:A

# Structures and properties of aluminum matrix composite reinforced by primary Si and Si/Mg<sub>2</sub>Si particles fabricated by centrifugal casting

LIN Xue-dong<sup>1, 2</sup>, LIU Chang-ming<sup>1</sup>, LÜ Xun-jia<sup>1</sup>, HAO Xu-hong<sup>1</sup>

(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)

**Abstract:** The Al-18Si and Al-18Si-5Mg aluminum matrix composite pistons reinforced by primary Si and primary Si/Mg2Si particles were fabricated by centrifugal casting, respectively. The influences of various ingate sizes, pouring temperatures, mold temperatures and rotational speed of the mold on the structures of Al-18Si-5Mg pistons were studied. The hardness and wear resistance of the two centrifugal casting of pistons were measured, and a comparison of properties was made between the centrifugal casting of Al-18Si-5Mg piston and the gravity casting of Al-18Si piston. The results show that the appropriate technological parameters are 770 °C for the pouring temperature, 400 °C for the preheating temperature of the mold, 800 r/min for the rotational speed of the mold and 8 mm for the ingate thickness. And plenty resistance property of primary Si and primary Si/Mg2Si were segregated in the top and the ring groove of the Al-18Si and Al-18Si-5Mg piston, respectively, but no particle is observed in the piston skirt. The hardness at the top and the ring groove of the centrifugal casting of Al-18Si-5Mg piston is increased by 10% over that of the centrifugal casting of Al-18Si-5Mg piston is improved by 10%–20% over that of the gravity casting of Al-18Si piston, and the wear loss of the former is about 60%–68% as that of the latter.

Key words: primary particle; Al matrix composites piston; hardness; wear resistance; centrifugal casting

通信作者:林雪冬,讲师,博士;电话: 13678483816; E-mail: dreamerdog@163.com

目前,工业生产已逐步采用铝合金材料来制造内 燃机发动机活塞。过共晶 Al-Si 合金以其优异的耐磨 性能、热稳定性及低膨胀系数成为制造发动机活塞的 理想材料<sup>[1-4]</sup>。过共晶 Al-Si 合金在凝固过程中能自生 析出初生增强颗粒,强化铝合金基体。考虑到活塞恶 劣的工作环境,其顶部及环槽与高温、高压的燃气接 触,工作温度高、热负荷大,要求活寒顶部及环槽具 有优良的高温耐磨性,因此,可以引入功能梯度复合 材料(Functionally graded materials, FGMs)的概念<sup>[5]</sup>, 提高活寒顶部及环槽区初生增强颗粒的体积分数,进 一步增强其高温耐磨性。自发明离心铸造方法制备 FGMs 以来<sup>[6]</sup>,人们已采用该法制备了大量的自生颗 粒增强 Al 基梯度功能复合材料, 如 Al-Mg<sub>2</sub>Si、Al-Ni、 Al-Ti、Al-Si-Mg、Al-Mg-B、Al-Zr 合金等<sup>[7-14]</sup>。为此, 可以考虑采用离心铸造方法制备局部含有高体积分数 增强颗粒的铝合金活塞。在过共晶 Al-Si 合金中加入 适量的 Mg,将同时形成初生 Si和 Mg<sub>2</sub>Si两种增强颗 粒。由于 Si/Mg<sub>2</sub>Si 具有比铝合金基体更小的密度  $(\rho_{\rm Si}=2.33 \text{ g/cm}^3, \rho_{\rm Mg_3Si}=1.88 \text{ g/cm}^3, \rho_{\rm m}=2.37 \text{ g/cm}^3),$ 因此,在离心铸造过程中,颗粒将沿离心力反方向偏 移、聚集。HAO 等<sup>[15]</sup>在过共晶 Al-20Si 中加入了 5% 的 Mg, 制备了初生 Si 和 Mg<sub>2</sub>Si 颗粒局部增强铝合金 活寒,初步考察了不同热处理状态下活塞的耐磨性能。

本文作者采用离心铸造方法制备了 Al-18Si 和 Al-18Si-5Mg 合金活塞,探讨了不同工艺条件下离心 铸造 Al-18Si-5Mg 合金活塞的宏观及微观组织变化,并对比了离心铸造 Al-18Si 和 Al-18Si-5Mg 两种活塞 的硬度及耐磨性能,对比了本离心铸造 Al-18Si-5Mg 合金活塞与某公司重力铸造 Al-18Si 合金活塞零件的 硬度及耐磨性能。

#### 1 实验

#### 1.1 材料准备与铸件制备

实验采用纯 Al、纯 Si 及纯 Mg 分别配制 Al-18Si 和 Al-18Si-5Mg 合金浆料。按文献[15]所述方法离心 铸造成形 Al-18Si-5Mg 和 Al-18Si 合金活塞,浇注工 艺参数如表 1 所列。图 1(a)所示为离心铸造活塞毛坯, 图 1(b)所示为重力铸造 Al-18Si 活塞零件。

#### 1.2 组织观察与性能测试

沿活塞毛坯中轴线切割,截取厚度为 20 mm 的 L 形试样,如图 2 所示。微观组织按图 2 所示的点 *a、d、* f3 个位置观察;颗粒体积分数按图 2 所示的点 *a、b、* 



图 1 离心铸造活塞毛坯及重力铸造活塞零件 Fig. 1 Centrifugal casting of piston blank (a) and gravity casting of piston component (b)

表 1 离心铸造 Al-18Si-5Mg 复合材料活塞的成形工艺参数 Table 1 Processing parameters of centrifugal casting of Al-18Si-5Mg composite pistons

D	Description	Mauld	Rotational	Ingate
Processing	, Pouring	Wiould	speed/	size/
No.	temperature/ C temperature/ C		$(\mathbf{r} \cdot \mathbf{min}^{-1})$	mm
1	770	400	800	6
2	770	400	800	8
3	770	400	800	12
4	770	400	400	8
5	820	400	800	8
6	770	500	800	8



图 2 活塞组织观察及性能测试位置示意图



c、d、f5个位置测定。

实验采用 HR-150A 型洛氏硬度仪, 按图 2 所示的点 *a*~*h* 8 个位置测试活塞顶部至裙部的洛氏硬度。

活塞各部分的耐磨性能测试在自制的旋转式摩擦 试验机上进行<sup>[13]</sup>,摩擦试验机的转速为 280 r/min,金 刚砂磨头直径为 8 mm,载荷 30 N,摩擦时间 10 min, 在图 2 所示的点 *a*、*d*、*f* 3 个位置进行,并用精度为 10<sup>-3</sup> g 的分析天平称量试样磨损前后的质量,计算平 某重力铸造 Al-18Si 合金活塞零件按照同样的方 法取样,并在相应的位置进行硬度、耐磨性能的测试。

由于重力铸造 Al-18Si 合金活塞零件为时效态, 为了进行性能对比,对本实验离心铸造 Al-18Si-5Mg 合金活塞进行热处理。热处理工艺为:(500 ℃,8 h) 固溶处理,(180 ℃,12 h)时效处理。

#### 2 结果与分析

#### 2.1 离心铸造 Al-18Si-5Mg 和 Al-18Si 合金活塞

2.1.1 活塞的截面宏观组织

1) 不同内浇口尺寸对离心铸造 Al-18Si-5Mg 合金 活塞宏观组织的影响

图 3(a)~(c)分别为在工艺 1~3 条件下制备的 Al-18Si-5Mg 合金活塞毛坯的宏观形貌。当内浇口厚 度尺寸为6 mm 时,活塞顶部出现大的集中缩孔,如 图 3(a)所示;当内浇口厚度尺寸为12 mm 时,活塞顶 部的颗粒增强层很薄,且接近中心的位置,基本没有 增强颗粒,如图 3(c)所示。Al-18Si-5Mg 合金中自生颗 粒密度小于基体,在离心场中向内浇口方向偏聚。在 铸件凝固过程中,当内浇口厚度尺寸过小时,将先于 铸件凝固,造成活塞顶部的补缩不足,形成集中缩孔; 当内浇口厚度尺寸过大时,将晚于铸件凝固,使较多 的增强颗粒偏聚于内浇口内,而活塞顶部无增强颗粒。 因此,内浇口厚度尺寸为8 mm 时较适合,如图 3(b) 所示,既保证了铸件充型完整,又使活塞顶部偏聚较 多的初生增强颗粒。

2) 不同离心转速、浇注温度及模具温度对离心铸造 Al-18Si-5Mg 活塞宏观组织的影响

工艺2和4考察了在不同转速条件下,初生颗粒 在活塞各位置的分布情况,如图3(b)和(d)所示。当转 速为400 r/min 时,获得的活塞的顶部、环槽及裙部均 分布有初生颗粒,而当离心转速为800 r/min 时,初生 颗粒集中分布在活塞顶部及环槽区,裙部几乎没有颗 粒。工艺2和5考察了不同浇注温度对活塞中初生颗 粒分布的影响,如图3(b)和(e)所示。在这两种工艺条 件下,初生颗粒均能偏聚于活塞顶部及环槽区,增强 区域和非增强区域之间的界线比较明显。但当浇温为 820 ℃时,活塞环槽区的增强颗粒仅偏聚于靠近活塞 顶部一端,与裙部相连一端的环槽区无明显的增强颗 粒,且在活塞顶部出现缩孔、气孔等缺陷。工艺2和 6考察了不同模具温度对活塞中初生颗粒分布的影 响,如图3(b)和(f)所示。当模温为400 ℃时,增强颗 粒主要分布在活塞顶部和环槽区,而模温为500 ℃时, 增强颗粒仅偏聚在活塞顶部,且偏聚层较薄。

观察各工艺条件成形活塞的宏观组织后发现,只 有工艺2成形活塞的顶部及环槽区分布了较多的初生 颗粒,且铸件表面无缺陷,成形效果好。

图 3(g)所示为按工艺 2 离心铸造获得的 Al-18Si 合金活塞的截面宏观组织。由图 3(g)可以看到,在活 塞的顶部及环槽区均分布有初生颗粒。

 2.1.2 离心铸造 Al-18Si-5Mg 和 Al-18Si 活塞的微观 组织

图 4~7 所示分别为工艺 2、4、5 和 6 条件下成形 活塞不同位置的微观组织。据文献[13]可知,图中较 大的浅灰色块状颗粒为初生 Si,而较小的黑色颗粒为 初生 Mg<sub>2</sub>Si,其余为共晶组织及 α。

从图 5 可以看到,初生 Si 和 Mg2Si 颗粒存在于 活塞的各个部位,说明在该转速(400 r/min)下颗粒的 偏聚效果不明显。与之相比,当转速为 800 r/min 时, 活塞裙部的初生颗粒明显减少,集中偏聚至活塞顶部 及环槽区,如图 4 所示。这说明,离心转速越高越有 利于颗粒的偏聚,本实验中 800 r/min 是合理的离心铸 造转速。



图 3 不同工艺参数成形的离心铸造 Al-18Si-5Mg 合金活塞和 Al-18Si 合金活塞的宏观组织

**Fig. 3** Macrostructures of Al-18Si-5Mg alloy (a)–(f) and Al-18Si alloy (g) pistons fabricated by centrifugal casting with different processing parameters



图 4 工艺 2 成形 Al-18Si-5Mg 合金活塞的微观组织

**Fig. 4** Microstructures of Al-18Si-5Mg alloy piston fabricated with processing 2: (a) Piston top; (b) Piston ring groove; (c) Piston skirt



图 5 工艺 4 成形 Al-18Si-5Mg 合金活塞的微观组织

**Fig. 5** Microstructures of Al-18Si-5Mg alloy piston fabricated with processing 4: (a) Piston top; (b) Piston ring groove; (c) Piston skirt



图 6 工艺 5 成形 Al-18Si-5Mg 合金活塞的微观组织

**Fig. 6** Microstructures of Al-18Si-5Mg alloy piston fabricated with processing 5: (a) Piston top; (b) Piston ring groove; (c) Piston skirt

浇注温度的提高更利于初生颗粒集中偏聚至活塞 顶部及环槽,而裙部则几乎没有颗粒,如图6所示。 但是,浇注温度的提高也使铸件中产生气孔等缺陷。

图 7 所示为采取工艺 6 制备的 Al-18Si-5Mg 合金 活塞顶部的微观组织。如图 7 所示,随着模具温度的 提高,铸件的凝固速度减慢,凝固时间延长,更有利 于离心场中初生颗粒的迁移、聚集,活塞顶部的增强 颗粒更集中,在数量上也明显增多。但初生颗粒过度 集中在活塞顶部导致了活塞环槽区增强颗粒的缺失。

图 8 所示为离心铸造 Al-18Si 合金活塞不同位置的微观组织。由图 8 可知,铸件中自生析出的初生 Si

颗粒主要偏聚于活塞顶部和环槽区,颗粒偏聚区由块 状初生 Si 和分布于其间的共晶组织组成;活塞的裙部 为共晶组织,初生 Si 的含量极少。

#### 2.2 离心铸造 Al-18Si-5Mg 与 Al-18Si 活塞初生颗粒 的体积分数

图 9 所示为根据图像法计算各工艺条件下成形活 塞在不同位置的初生颗粒的体积分数。由图 9 可知, 离心铸造 Al-18Si 合金活塞顶部的初生 Si 颗粒体积分 数 约 为 23%, 裙 部 含 有 少 量 的 初 生 颗 粒 。 而 Al-18Si-5Mg 合金活塞顶部的初生 Si 和 Mg<sub>2</sub>Si 颗粒体



图 7 工艺 6 成形 Al-18Si-5Mg 合金活塞顶部的微观组织 Fig. 7 Microstructures at piston top of Al-18Si-5Mg alloy piston fabricated with processing 6

积分数之和达到 22%~27%,且随着浇注温度、模具温度及离心转速的提高,活塞顶部的初生颗粒体积分数逐渐提高。同在工艺 2 条件下成形的 Al-18Si-5Mg 合金活塞顶部及环槽的初生颗粒体积分数高于 Al-18Si 合金活塞的。

## 2.3 离心铸造 Al-18Si-5Mg、Al-18Si 活塞及重力铸造 Al-18Si 活塞的硬度对比

图 10 所示为离心铸造 Al-18Si-5Mg 和 Al-18Si 合 金活塞与重力铸造 Al-18Si 合金活塞分别在铸态、时 效态的硬度对比。

铸态下,Al-18Si 合金活塞颗粒偏聚区的硬度比基 体区的硬度提高了 24%,而 Al-18Si-5Mg 合金活塞的 相关硬度则提高了 31%。同时,在颗粒增强区,初生 Si/Mg<sub>2</sub>Si 共同增强铝基体的硬度比初生 Si 颗粒单独增 强的要提高 10%,但在裙部二者的硬度差别很小。

时效态下,离心铸造法制备的 Al-18Si-5Mg 合金 活塞在顶部及环槽区的硬度均显著高于重力铸造 Al-18Si 合金活塞,提高幅度在 10%~20%;在活塞裙 部靠近环槽区一侧,离心铸造活塞的硬度要高于重力 铸造活塞,但在裙部末端重力铸造活塞的硬度略高。

硬度测试结果表明,初生 Si/Mg<sub>2</sub>Si 混合增强铝基 合金活塞的硬度要高于初生 Si 单独增强的。离心铸造



图 8 工艺 2 成形 Al-18Si 合金活塞的微观组织 Fig. 8 Microstructures of Al-18Si alloy piston fabricated with processing 2: (a) Piston top; (b) Piston ring groove; (c) Piston skirt



**图 9** 离心铸造 Al-18Si 和 Al-18Si-5Mg 活塞不同位置初生 增强颗粒的体积分数

**Fig. 9** Volume fraction of primary particles at different positions of Al-18Si and Al-18Si-5Mg pistons fabricated by centrifugal casting



图 10 离心铸造 Al-18Si-5Mg 和 Al-18Si 合金活塞与重力铸造 Al-18Si 合金活塞的铸态、时效态的硬度对比

**Fig. 10** Comparisons of hardness at different positions of centrifugal casting of Al-18Si-5Mg and Al-18Si alloy pistons and gravity casting of Al-18Si alloy piston under as-cast and ageing conditions, respectively

Al-18Si-5Mg 合金活塞的硬度明显高于重力铸造 Al-18Si 活塞的。活塞硬度与增强颗粒的数量、大小和 分布有关。由图 9 可知,离心铸造 Al-18Si 合金活塞 的顶部及环槽区分布的初生 Si 颗粒的体积分数低于 Al-18Si-5Mg 合金活塞在该处的初生 Si/Mg<sub>2</sub>Si 颗粒的 体积分数之和,因此,在颗粒偏聚区 Al-18Si-5Mg 合 金活塞的硬度要高于 Al-18Si 合金活塞的。颗粒体积 分数的分布与硬度的变化规律基本一致。

#### 2.4 离心铸造 Al-18Si 和 Al-18Si-5Mg 合金活塞及重 力铸造 Al-18Si 合金活塞的耐磨性能对比

离心铸造 Al-18Si-5Mg 和 Al-18Si 合金活塞与重 力铸造 Al-18Si 合金活塞在铸态、时效态的耐磨性能 对比结果如图 11 所示。从图 11 可以看出,离心铸造 Al-18Si-5Mg 合金活塞在颗粒增强区的耐磨性略优于 离心铸造 Al-18Si 合金活塞,而在基体区二者差异很 小;与重力铸造 Al-18Si 合金活塞的耐磨损失相比, 离心铸造 Al-18Si-5Mg 合金活塞的耐磨损失相比, 离心铸造 Al-18Si-5Mg 合金活塞的可部及环槽区的平 均磨损量仅为前者的 60%~68%;在活塞裙部,两种活 塞的耐磨性能相差不大。

当有外加载荷作用在初生 Si 颗粒单独增强的活 塞上时,初生 Si 颗粒会逐渐暴露出来,直接与磨头接 触。嵌在软基体中的硬质相初生 Si 就会随外界摩擦作 用的进一步加剧而发生迁移或脱落,使摩擦力再次直 接作用在基体合金上,达不到理想的增强效果。然而, 在 Al-18Si-5Mg 合金活塞中,第二相初生 Mg<sub>2</sub>Si 颗粒的出现不仅提高了颗粒的体积分数,同时,由于它的晶粒尺寸比初生 Si 颗粒小,与基体的结合强度高。另外,初生 Mg<sub>2</sub>Si 颗粒还能分担部分摩擦力,有效地阻止了初生 Si 颗粒的迁移和脱落,使初生 Si 颗粒能最大限度地发挥它的强耐磨作用,因此,Al-18Si-5Mg 合金活塞的耐磨性要优于 Al-18Si 合金活塞的。



图 11 离心铸造 Al-18Si-5Mg 和 Al-18Si 合金活塞与重力铸造 Al-18Si 合金活塞铸态、时效态的耐磨性能对比

**Fig. 11** Comparisons of wear resistance at different positions of centrifugal casting of Al-18Si-5Mg and Al-18Si alloy pistons and gravity casting of Al-18Si alloy piston: (a) As-cast; (b) Ageing

#### 2.5 离心铸造初生颗粒局部增强 Al-18Si-5Mg 复合材 料活塞的形成机制

在离心场中,Al-18Si-5Mg 合金熔体中的初生颗 粒主要受离心力 *F*<sub>c</sub>、向心浮力 *F*<sub>f</sub>及铝液的粘滞阻力 *F*<sub>v</sub>的共同作用(重力忽略不计)。对颗粒进行受力分析, 则有<sup>[16]</sup>:

$$m_{\rm s} \frac{{\rm d}^2 x}{{\rm d}^2 t} = F_{\rm c} - F_{\rm f} - F_{\rm v} = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D_s}{2}\right)^3 \left|\rho_{\rm s} - \rho_{\rm m}\right| Gg - 3\pi \eta D_{\rm s} \frac{{\rm d}x}{{\rm d}t}$$
(1)

式中:  $m_s$ 为颗粒质量,  $D_s$ 为颗粒直径,  $\rho_s$ 、 $\rho_m$ 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),  $\eta$  为熔体粘度, g 为重力加速度,  $d^2x/dt^2$ , dx/dt分别为颗粒离心方向上的加速度与速度。令  $d^2x/dt^2=0$ , 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:

$$v_{\rm s} = \frac{2\pi^2 \left| \rho_{\rm s} - \rho_{\rm m} \right|}{9\eta} N^2 R D_{\rm s}^2 \tag{2}$$

由式(2)可知, 当ρ<sub>s</sub>>ρ<sub>m</sub>时,则颗粒沿离心力方向 运动; 当ρ<sub>s</sub><ρ<sub>m</sub>时,则颗粒沿离心力方向的反方向运 动。本研究中,初生 Si 和 Mg<sub>2</sub>Si 的密度均小于基体的 密度,则在离心场中,熔体中自生析出的初生 Si 和 Mg<sub>2</sub>Si 颗粒将沿离心力反方向,即向活塞头部运动, 从而形成初生增强颗粒局部增强活塞头部及环槽的铝 基复合材料活塞。由式(2)可以推导出两种颗粒在离心 场中的运动速率之比:

$$\frac{v_{Mg_2Si}}{v_{Si}} = \frac{(\rho_{Al} - \rho_{Mg_2Si})D_{Mg_2Si}^2}{(\rho_{Al} - \rho_{Si})D_{Si}^2} \approx 1.6$$
 (3)

式中:  $D_{Mg_2Si}=25 \ \mu m$ ,  $D_{Si}=70 \ \mu m$ 。可见, 其中初生 Mg\_2Si 具有更快的运动速度, 在离心场中有助于推动 初生 Si 颗粒向活塞头部偏聚, 使成形活塞的头部及环 槽聚集更高体积分数的增强颗粒。初生颗粒集中偏聚 至活塞头部与环槽, 则其裙部为不含颗粒的基体。

#### 3 结论

1) 采用不同离心铸造工艺制备了初生 Si/Mg<sub>2</sub>Si 颗粒混合增强 Al-18Si-5Mg 铝基复合材料活塞。当浇 注温度为 770 ℃,模具温度为 400 ℃,离心转速为 800 r/min,内浇口厚度尺寸为 8 mm 时,离心铸造获得成 形效果好且无铸造缺陷的 Al-18Si 和 Al-18Si-5Mg 合 金活塞,在活塞的顶部及环槽分别偏聚有大量的初生 颗粒 Si 和 Si/Mg<sub>2</sub>Si,而活塞裙部为基体组织。

2) 随着浇注温度、模具温度及离心转速的增加, 离心铸造 Al-18Si-5Mg 合金活塞的项部的初生颗粒体 积分数逐渐增加。同等条件下成形的 Al-18Si-5Mg 合 金活塞的项部及环槽具有比 Al-18Si 合金活塞在相同 位置更大的颗粒体积分数。

3) 在颗粒增强区,离心铸造 Al-18Si-5Mg 合金活 塞的硬度及耐磨性均优于离心铸造 Al-18Si 合金活塞; 在非增强区的,二者的硬度和耐磨性接近。

4) 离心铸造制备的自生初生 Si/Mg<sub>2</sub>Si 颗粒混合

局部增强 Al-18Si-5Mg 复合材料活塞在活塞顶部及环 槽区的硬度及耐磨性能均显著优于重力铸造 Al-18Si 合金活塞,其中活塞顶部及环槽的硬度提高了 10%~20%,离心铸造活塞的平均磨损量仅为重力铸造 活塞的 60%~68%左右。

#### REFERENCES

- HAQUE M M, SHARIF A. Study on wear properties of aluminium-silicon piston alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 118(1/3): 69–73.
- [2] 谭银元. 离心铸造过共晶 Al-Si 合金自生梯度复合材料及其 阻尼性能[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(2): 353-357.
   TAN Yin-yuan. In situ gradient composite of hypertutectic Al-Si alloy by centrifugal casting and its damping property[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(2): 353-357.
- [3] 晋芳伟,任忠鸣,任维丽,邓 康,钟云波,余建波.强磁场下 过共晶铝硅合金凝固过程中初生硅的迁移行为[J].中国有色 金属学报,2007,17(2):313-319.
  JIN Fang-wei, REN Zhong-ming, REN Wei-li, DENG Kang, ZHONG Yun-bo, YU Jian-bo. Migratory behaviors of primary crystal silicon in hypereutectic Al-Si alloy under high magnetic field[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(2): 313-319.
- [4] ELMADAGLIA M, PERRYB T, ALPAS A T. A parametric study of the relationship between microstructure and wear resistance of Al-Si alloys[J]. Wear, 2007, 262(1/2): 79–92.
- [5] KIEBACK B, NEUBR A, RIEDEL H. Processing techniques for functionally graded materials[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 362(1/2): 81–106.
- [6] DUQUE N B, MELGAREJO Z H, SUAREZ O M. Functionally graded aluminium matrix composites produced by centrifugal casting[J]. Materials Characterization, 2005, 55(2): 167–171.
- [7] ZHANG Jian, FAN Zhong-yun, WANG Yu-qing, ZHOU Ben-lian. Hypereutectic aluminium alloy tubes with graded distribution of Mg<sub>2</sub>Si particles prepared by centrifugal casting[J]. Materials & Design, 2000, 21(3): 149–153.
- [8] WATANABE Y, ERYU H, MATSUURA K. Evaluation of three-dimensional orientation of Al<sub>3</sub>Ti platelet in Al-based functionally graded materials fabricated by a centrifugal casting technique[J]. Acta Materialia, 2001, 49(5): 775–783.
- [9] WATANABE Y, NAKAMURA T. Microstructures and wear resistances of hybrid Al-(Al<sub>3</sub>Ti+Al<sub>3</sub>Ni) FGMs fabricated by a centrifugal method[J]. Intermetallics, 2001, 9(1): 33–43.
- [10] RAJAN T P D, PILLAI R M, PAI B C. Functionally graded Al-Al<sub>3</sub>Ni in situ intermetallic composites: Fabrication and microstructural characterization[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 453(1/2): L4–L7.

[11] MELGAREJO Z H, SUAREZ O M, SRIDHARAN K.

Microstructure and properties of functionally graded Al-Mg-B composites fabricated by centrifugal casting[J]. Composites Part A-Applied Science and Manufacturing 2008, 39(7): 1150–1158.

- [12] EL-HADAD S, SATO H, WATANABE Y. Wear of Al/Al3Zr functionally graded materials fabricated by centrifugal solid-particle method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(15): 2245–2251.
- [13] ZHAI Yan-bo, LIU Chang-ming, WANG Kai, ZHOU Mao-hua, XIE Yong. Characteristics of two Al based functionally gradient composites reinforced by primary Si particles and Si/in situ Mg<sub>2</sub>Si particles in centrifugal casting[J].Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(3): 361–370.
- [14] LIN Xue-dong, LIU Chang-ming, ZHAI Yan-bo, WANG Kai. Influences of Si and Mg contents on microstructures of

Al-xSi-yMg functionally gradient composites reinforced with in situ primary Si and Mg<sub>2</sub>Si particles by centrifugal casting[J]. Journal of Materials Science, 2011, 46(4): 1058–1075.

- [15] HAO Xu-hong, LIU Chang-ming, PAN Deng-liang. Microstructure and mechanical behavior of in situ primary Si/Mg<sub>2</sub>Si locally reinforced aluminum matrix composites piston by centrifugal casting[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 22(5): 1–5.
- [16] OGAWA T, WATANABE Y, SATO H, KIM I S, FUKUI Y. Theoretical study on fabrication of functionally graded material with density gradient by a centrifugal solid-particle method[J]. Composites Part A, 2006, 37(12): 2194–2200.

(编辑 何学锋)