

# 喷射沉积 Al-Si-Fe-Mn-Cu-Mg 合金的 析出强化行为

王锋<sup>1)</sup> 杨滨<sup>1)</sup> 崔华<sup>1)</sup> 段先进<sup>1)</sup> 熊柏青<sup>2)</sup> 张济山<sup>1)</sup>

1)北京科技大学新金属材料国家重点实验室,北京 100083 2)北京有色金属研究总院复合材料中心,北京 100088

**摘要** 利用热分析(DSC)、显微硬度测定和透射电子显微分析等手段研究了喷射沉积 Al-20Si-5Fe-3Mn-3Cu-1Mg 合金的时效过程。结果表明,两种沉淀强化相 S-Al<sub>2</sub>CuMg 和  $\sigma$ -Al<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub>Mg<sub>2</sub> 从合金基体中析出,它们有效地提高了合金的室温强度和高温(300℃)强度。

**关键词** 喷射沉积;时效处理;沉淀强化;Al-Si 合金

**分类号** TG 146.2;TG 166

Al-Si 系中的高硅铝合金由于具有高的弹性模量、低的热膨胀系数和良好的耐磨性而得到广泛的应用。为了改善它的组织和性能,常常加入合金元素 Cu, Mg, Fe, Ni, Mn 等,其中 Cu, Mg 的主要作用是通过析出强化提高合金的室温强度,而加入 Fe, Ni, Mn 是为了改善合金的热稳定性,提高高温强度<sup>[1]</sup>。研究表明<sup>[2]</sup>,对于 Al-Cu-Mg 系合金,当 Cu / Mg (质量比)为 2~4 时,固溶处理后在 130~140℃ 长时间保温析出 S-(Al<sub>2</sub>CuMg) 相,此时合金具有最好的强化效果。喷射沉积快速凝固技术能够细化过共晶 Al-Si 合金中初晶 Si 相的尺寸,显著地提高了合金的力学性能。本文研究了喷射沉积 Al-20Si-5Fe-3Mn-3Cu-1Mg 合金的时效过程,分析了析出强化相对合金室温强度和高温(300℃)强度的影响。

## 1 试验方法

本试验所用合金的化学成分(质量分数,%)为:Si—20, Fe—5, Mn—3, Cu—3, Mg—1, 其余为 Al。喷射成形采用环孔式喷嘴,雾化气体为 N<sub>2</sub>,雾化压力为 0.6~0.8 MPa,喷射时熔体温度为 750~850℃,导流管直径为 3 mm,沉积距离为 400 mm。合金沉积坯在 400℃ 下热挤压,挤压比为 10:1,挤压后获得  $\phi$ 15 mm 棒材,在空气中冷却。

挤压后合金在 470℃ 固溶处理 1.5 h 后淬水,时效温度为 135℃。DSC 试验在 Dupont2100 型热分析仪上进行,加热速度为 10℃/min;合金硬度在 71 型显微硬度仪上测定,载荷为 50 g,保压时间为 10 s;TEM, HREM 分析分别使用 H-800 和 JEOL JEM-2010F 型透射电镜;拉伸试验在 MTS-810 型试验机上进行,拉伸速度为 0.5 mm/min。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同时效时间下合金显微硬度的变化

图 1 为合金显微硬度随时效时间的变化曲线。从图 1 可以看出,随着时效时间的延长,显

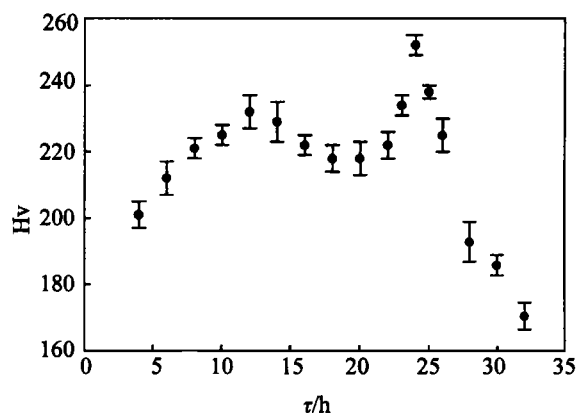


图 1 135℃ 不同时效时间( $\tau$ )喷射沉积 Al-20Si-5Fe-3Mn-3Cu-1Mg 合金的显微硬度曲线

Fig.1 Vickers hardness of the spray-deposited Al-20Si-5Fe-3Mn-3Cu-1Mg alloy at 135℃ for various aging time

微硬度两次出现峰值,表明时效过程中可能析出两种不同的强化相.当时效处理 12h,第一个峰值出现,此时合金的显微硬度为 Hv232.随着时效时间的增加,硬度逐渐下降,表明第一个析出相与合金基体的共格关系开始破坏,析出相周围的共格畸变减弱;时效时间延长到 24h,第二个硬度峰值出现,此时合金的最大硬度值达到 Hv252,这表明第二个析出相对合金硬度的贡献高于第一个析出相,成为时效过程中的主要析出强化相.

## 2.2 DSC 分析

图 2 为喷射沉积 Al-20Si-5Fe-3Mn-3Cu-1Mg 合金经 470℃ 固溶处理后的 DSC 曲线.很明显,在加热过程中出现了两个放热峰,而冷却过程中却没有发生吸热反应.这表明在 30~500℃ 加热过程中发生了两次不可逆的放热反应,第一个峰值出现在 356℃,第二个峰值出现在 492℃. 相比而言,第二个峰面积大于第一个峰面积,表明第二个放热反应在时效过程中占有主导地位.在 300℃ 以下范围内,没有发现 GP 区形成引起的放热反应,这是由于喷射沉积过程中较高的冷却速度使合金基体晶格畸变增大,溶质原子的固溶度增加,从而使合金元素析出的速度加快,直接析出了沉淀强化相.此外,合金中存在的大量的 Si, Fe, Mn 元素改变了 Al-Cu-Mg 系合金的时效特性,抑制了 GP 区的出现<sup>[3]</sup>.

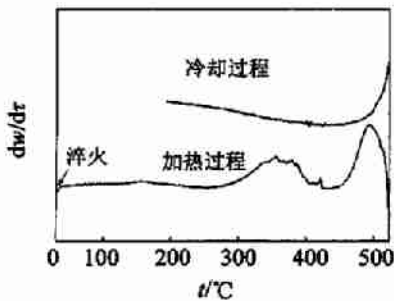


图 2 喷射沉积 Al-20Si-5Fe-3Mn-3Cu-1Mg 合金的 DSC 图

Fig.2 DSC thermogram for the specimen of the spray-deposited Al-20Si-5Fe-3Mn-3Cu-1Mg alloy

## 2.3 TEM 和 HREM 分析

观察不同时效温度下合金的透射电子显微图像,没有发现明显的 GP 区出现.图 3 为合金在时效 24h 的电子显微图像,可以看到,在合金基体的位错线附近析出了大量的小颗粒相,它们是合金时效过程中出现的最初的产物.大量

弥散分布的小颗粒有效地阻碍了位错的运动,显著地强化了合金的基体.图 4,图 5 分别为合金在时效 48h 后两种不同形态析出相的形貌和电子衍射图像,可以看到,薄片状的析出相是 S-Al<sub>2</sub>CuMg, 方块状的析出相是 σ-Al<sub>2</sub>Cu<sub>6</sub>Mg.

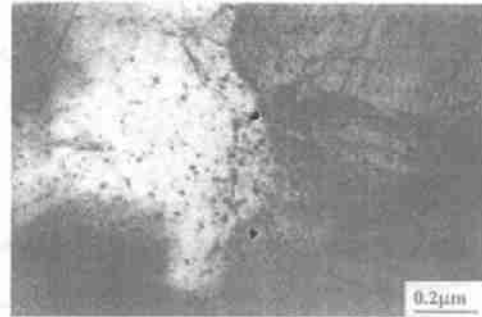


图 3 喷射沉积 Al-20Si-5Fe-3Mn-3Cu-1Mg 合金在 135℃ 时效 24 h 后的电子显微图像

Fig.3 Microstructure of the spray-deposited Al-20Si-5Fe-3Mn-3Cu-1Mg alloy aged at 135°C for 24 h

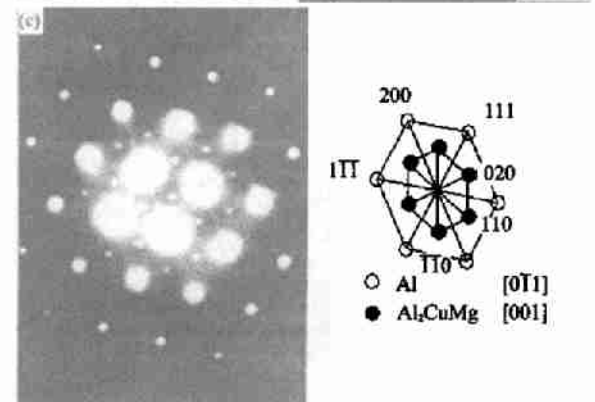
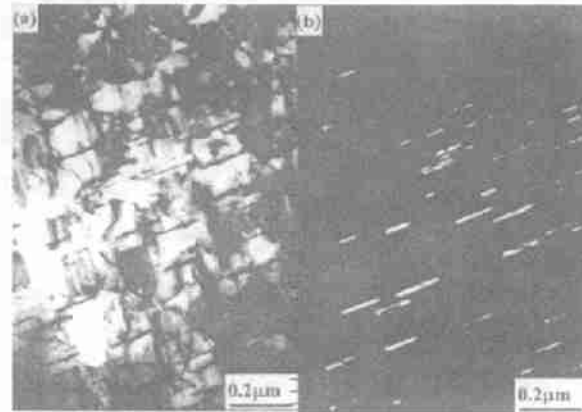


图 4 喷射沉积 Al-20Si-5Fe-3Mn-3Cu-1Mg 合金在 135℃ 时效 48 h 后的显微图像。(a) 片状析出相的明场相; (b) 片状析出相的暗场相; (c) 选区衍射图

Fig.4 Microstructures of the spray-deposited Al-20Si-5Fe-3Mn-3Cu-1Mg alloy aged at 135°C for 48 h

图 6 为喷射沉积 Al-20Si-5Fe-3Mn-3Cu-1Mg 合金时效 12h 后的 HREM 图像,结果表明,合金中析出了方块状的强化相,没有发现片状

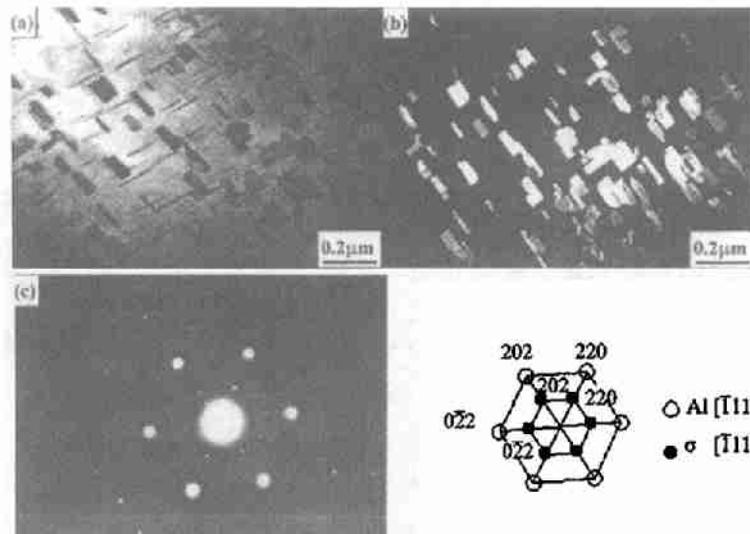


图5 喷射沉积 Al-20Si-5Fe-3Mn-3Cu-1Mg 合金在 135°C 时效 48 h 后的电子显微图像。(a) 方块形析出相的明场相；(b) 方块形析出相的暗场相；(c) 选区衍射图

Fig.5 Microstructures of the spray-deposited Al-20Si-5Fe-3Mn-3Cu-1Mg alloy aged at 135°C for 48 h

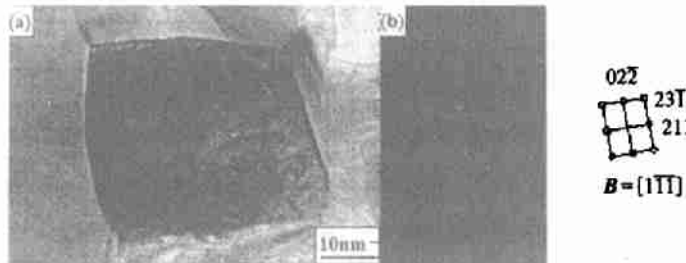


图6 喷射沉积 Al-20Si-5Fe-3Mn-3Cu-1Mg 合金在 135°C 时效 12 h 后的 HREM 图像。(a) 方块析出相的明场相；(b) 选区衍射图

Fig. 6 HREM photographs of the spray-deposited Al-20Si-5Fe-3Mn-3Cu-1Mg alloy aged at 135°C for 12 h

的析出相；电子衍射分析表明，方块状的强化相是  $\sigma$ -Al<sub>3</sub>Cu<sub>2</sub>Mg<sub>2</sub>。图 7 为方块状析出相  $\sigma$  的高分辨电子谱。

根据显微硬度测定、DSC 分析、TEM 和

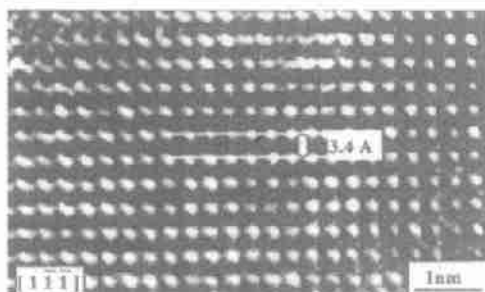


图7 方块形  $\sigma$  相的 HREM 图像

Fig.7 HREM photographs of cubic  $\sigma$  phase

HREM 观察的结果，很明显，喷射沉积 Al-20Si-5Fe-3Mn-3Cu-1Mg 合金在 135°C 下的时效过程中析出了两种强化相，是 S-Al<sub>3</sub>CuMg 和  $\sigma$ -Al<sub>3</sub>Cu<sub>2</sub>Mg<sub>2</sub>。当时效时间为 12 h，合金中首先析出了方块状的  $\sigma$  相；当时效时间延长到 24 h，片状的 S 相从合金基体中析出。所以，在 135°C 下时效 24 h 合金硬度的提高是两种强化相共同作用的结果。

#### 2.4 喷射沉积 Al-20Si-5Fe-3Mn-3Cu-1Mg 合金的力学性能

表 1 为喷射沉积 Al-20Si-5Fe-3Mn-3Cu-1Mg 和 Al-20Si-5Fe-3Mn 合金的力学性能数据。从表中可知，在 Al-20Si-5Fe-3Mn 合金中加入

表 1 喷射沉积合金的力学性能

Table 1 Mechanical properties of spray-deposited alloys

合金	过程	T/K	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\sigma_b$ /MPa
Al-20Si-5Fe-3Mn	SD+400°C 热挤压	300	209	316
	+470°C 调质	573	148	260
Al-20Si-5Fe-3Mn-3Cu-1Mg	SD+400°C 热挤压	300	328	452
	+T6 调质	573	279	324

一定数量的 Cu, Mg 元素后, 合金经过喷射沉积快速凝固和后续的时效处理, 在合金基体中析出了时效强化相, 合金在常温下的屈服强度提高了约 120 MPa, 抗拉强度提高了 136 MPa, 在高温下 (300℃) 的屈服强度提高了 131 MPa, 抗拉强度提高了 64 MPa, 这是由于合金在时效过程中析出了大量的 S,  $\sigma$  相, 它们能够强烈地阻碍位错的运动, 显著地提高合金的常温强度; 片状的 S 相在温度高于 150℃ 时开始分解, 而方块形析出相  $\sigma$  具有较高的热稳定性, 它在超过 400℃ 才开始分解<sup>[4]</sup>, 所以  $\sigma$  相的析出大大地改善了合金的高温强度。

### 3 结论

喷射沉积 Al-20Si-5Fe-3Mn-3Cu-1Mg 合金的时效过程中析出了两种不同形态的强化相 S-

Al<sub>2</sub>CuMg,  $\sigma$ -Al<sub>3</sub>Cu<sub>6</sub>Mg<sub>2</sub>, 片状的 S 相能够提高合金的室温强度, 方块状的  $\sigma$  相具有较高的热稳定性, 它的存在可以显著地改善合金的高温强度 (300℃)。

### 参 考 文 献

- 1 Anand S, Srivatsan T S, Yue Wu. Microstructure and Fracture Behavior of Spray Atomized and Deposited Aluminum-silicon Alloy. *J Mater Sci*, 1997, 32: 2835
- 2 Shih H C, Ho N J, Huang J C. Precipitation Behaviors in Al-Cu-Mg and 2024 Aluminum Alloys. *Metall Mater Trans*, 1996, 27A: 2479
- 3 Yuan X G, Ren L Q, Li Q C. Microstructure and Mechanical Property of Spray-deposited Al-20Si-5Fe-3Cu-1Mg Alloy. *Acta Metallurgica Sinica*, 1999, 35(5): 482
- 4 Schueller R D, Wawner F E, Sachdev A K. Strengthening Potential of the Cubic  $\sigma$  Precipitate in Al-Cu-Mg-Si Alloys. *J Mater Sci*, 1994, 29: 239

## Precipitation Behavior of the Spray-deposited Al-Si-Fe-Mn-Cu-Mg Alloy

WANG Feng<sup>1)</sup>, YANG Bin<sup>1)</sup>, CUI Hua<sup>1)</sup>, DUAN Xianjing<sup>1)</sup>, XIONG Baiqing<sup>2)</sup>, ZHANG Jishan<sup>1)</sup>

1) State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, UST Beijing, Beijing 100083, China

2) Composite Materials Center, General Research Institute for Non-ferrous Metals, Beijing 100088, China

**ABSTRACT** The aging process of the spray-deposited Al-20Si-5Fe-3Mn-3Cu-1Mg alloy was investigated by DSC analysis, microhardness measurement, TEM and HREM observations. The results show that two kinds of precipitates, S-Al<sub>2</sub>CuMg and  $\sigma$ -Al<sub>3</sub>Cu<sub>6</sub>Mg<sub>2</sub> precipitate from matrix and improve the tensile strength of the alloy efficiently at both the ambient and elevated temperatures (300℃).

**KEY WORDS** spray deposition; age treatment; precipitation hardening; Al-Si system alloy