

[文章编号] 1004-0609(2001)01-0051-04

铁含量对 Al-Si-Fe 合金微观组织及内耗性能的影响^①

罗兵辉, 谢佑卿

(中南大学 材料科学与工程系, 长沙 410083)

[摘 要] 采用快速凝固-粉末包套挤压工艺制备了含铁量分别为 1.2% 和 3.5% 的 Al-11% Si-Fe 合金。研究了这两合金在挤压和退火状态下的微观组织特征和内耗行为, 解释了 Fe 含量及其析出相、热处理状态等对内耗的影响, 提出了该合金系在 60~250 °C 温度范围产生内耗峰的机制。

[关键词] 快速凝固; 微观组织; 内耗; Al-Si-Fe 合金

[中图分类号] TG 113.22⁺ 6

[文献标识码] A

随着快速凝固技术的发展应运而生的快速凝固-粉末冶金技术(RS-PM)是采用快速凝固法制备粉末, 通过粉末冶金工艺将粉末体致密化并经挤压成材的一种工艺。目前在材料领域中得到了广泛的应用^[1, 2]。与喷射沉积制备技术相比^[3, 4], 该工艺冷却快, 成分均匀, 故采用该法制备的 Al-Si-Fe 系合金, 由于可获得细小均匀的组织, 其性能大为改善, 如解除了用传统熔铸工艺带来的塑性差、加工成型困难等缺陷。以前的工作^[2, 5]对采用快速凝固制备的 Al-Si-Fe 合金的力学性能等作了较深入研究, 但没有涉及内耗性能及其金属间化合物对内耗的影响。据此, 本文作者研究了 Al-11Si-1.2Fe 和 Al-11Si-3.5Fe 两种合金的组织特征及内耗行为。

1 实验

Al-Si-Fe 合金用的原材料是工业纯铝、工业纯铁和硅。利用母合金熔炼→快速凝固制粉→真空包套脱气→包套热挤压→退火工艺制备 Al-11Si-1.2Fe 和 Al-11Si-3.5Fe 合金, 再挤压出 30 mm × 2 mm 板材, 挤压温度为 450 °C, 挤压比为 14:1, 试样在 360 °C 退火。

试样组织特征在 KYKY-AMRAY 1000B 扫描电镜(SEM)和 H-800 透射电镜(TEM)上观测。在 SIMENS D-500 全自动 X 射线衍射仪上对试样进行析出相检测。

内耗测试在低频扭摆仪上进行, 试样经挤压和退火后, 选择有代表性区域切成尺寸为 1 mm × 2.5 mm × 35 mm。所有内耗曲线均是在 5 °C/min 的升温

速度和 1×10^{-6} 的应变振幅下获得。

2 实验结果

2.1 微观组织特征

图 1 所示为 Al-Si-Fe 合金经 RS-PM、挤压和热处理后的显微组织, 箭头所指为均匀分布的 Si 颗粒, 其平均尺寸为 4~6 μm, 这与前人工作^[6]一致。组织中分布着尺寸较小的黑色颗粒, 且同一成分合金挤压和等温退火后黑色粒状相分布大小及数量均相当(图 1(a), (b)), 但随 Fe 含量增加, 这些黑色粒状相数量略增加, 尺寸变化很小。从 X-ray 图谱(图 2)得出, 这些小尺寸颗粒是 FeAl₂ 及 Al-Si-Fe 金属间化合物。图 3 所示为 Al-11Si-3.5Fe 合金不同退火时间下透射电子显微组织。可见, 黑色粒状的 FeAl₂ 及 Al-Fe-Si 金属间化合物主要地沿晶界分布。同时在热处理过程中, Si 相粒子和基体合金晶粒尺寸不变。

2.2 内耗

2.2.1 不同 Fe 含量的铝硅铁合金的内耗特征

图 4 所示为含 Fe 量分别为 1.2% 和 3.5% 的 Al-Si-Fe 合金经挤压及 360 °C 退火 500 min 后在温度区间 10~300 °C 内耗随温度的变化, 可见在 60~250 °C 出现一内耗峰。随 Fe 含量增加, 内耗峰降低, 且峰位移向低温。

2.2.2 频率和热处理工艺对内耗性能的影响

实验频率对 Al-11Si-3.5Fe 合金内耗性能的影响如图 5 所示。在对试样进行测量前, 先将其在 360 °C 下退火 1000 min, 以消除由于过饱和固溶体

① [收稿日期] 2000-03-10; [修订日期] 2000-06-12

[作者简介] 罗兵辉(1965-), 男, 副教授。

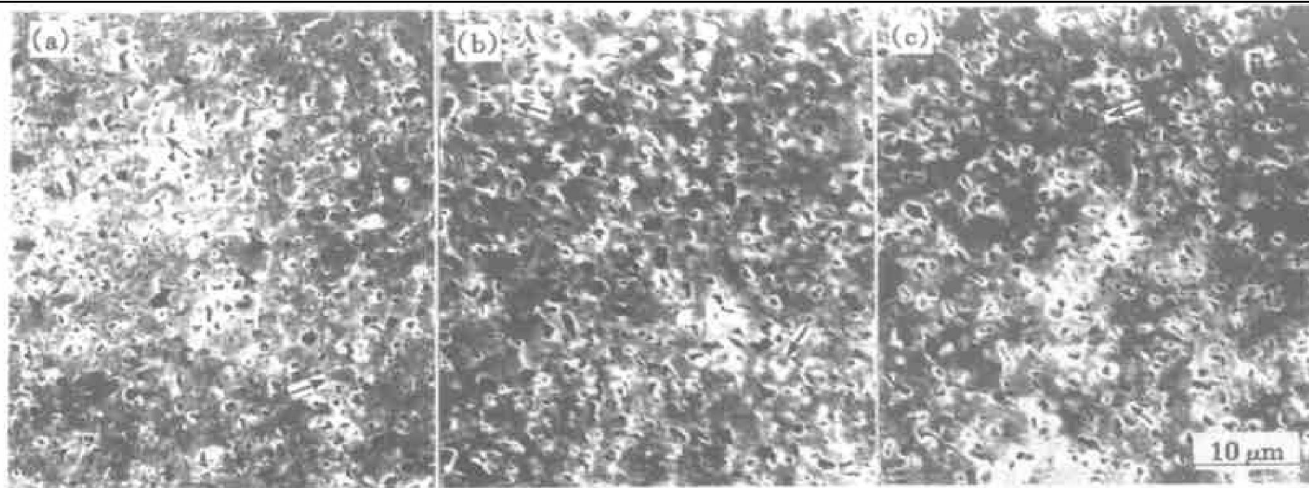


图 1 Al-Si-Fe 合金显微组织

Fig. 1 Microstructures of Al-Si-Fe alloy

(a) —Al-11Si-1.2Fe alloy, as-extruded; (b) —Al-11Si-1.2Fe alloy, as-extruded + annealing (500 min);
(c) —Al-11Si-3.5Fe alloy, as-extruded + annealing (500 min)

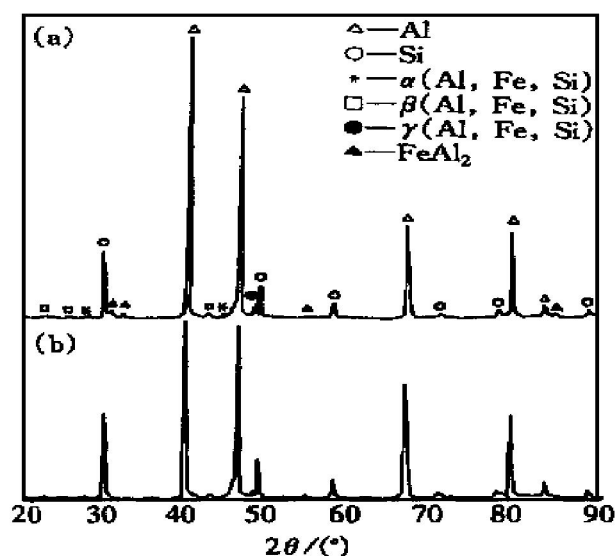


图 2 Al-11Si-3.5Fe 合金不同退火时间下的 XRD 谱

Fig. 2 XRD patterns of Al-11Si-3.5Fe alloy

(a) —Annealing (200 min); (b) —Annealing (800 min)

的析出对内耗稳定性的影响。可见, 随频率变化, 内耗峰变化很小, 表明测量过程中组织变化小。频率增加, 内耗峰向高温移动, 意味着内耗峰能用滞弹性过程解释。为了决定内耗峰温度, 假定高温内耗背底为 $Q_0^{-1} = Q_0^{-1} + A \exp(-B/T)$, 参数 A , B 能通过低温、高温内耗数据得到。 Q_0^{-1} 值在 $Q^{-1} = 0$ 及室温内耗之间(即 $Q_0^{-1} < Q_{RT}^{-1}$)。扣除高温背底后内耗曲线如图 5 下部。根据随频率变化的峰温变化可得弛豫过程激活能为 $176 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$, 比多晶铝 ($142 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$) 稍大。弛豫时间 τ_0 为 $3.1 \times 10^{-21} \text{ s}$,

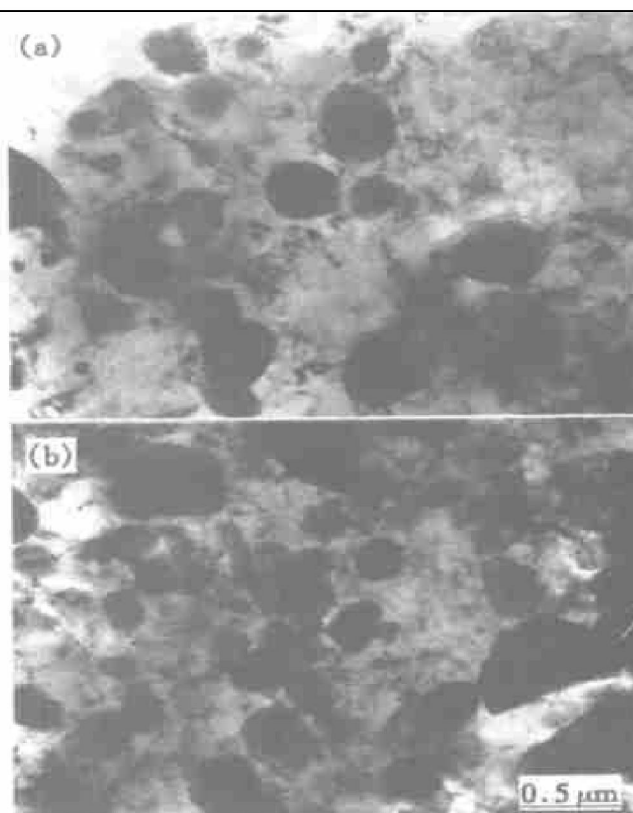


图 3 Al-11Si-3.5Fe 合金不同退火时间下的 TEM 照片

Fig. 3 TEM morphologies of Al-11Si-3.5Fe alloy

(a) —Annealing (200 min); (b) —Annealing (800 min)

低于多晶铝的弛豫时间 $10^{-14} \text{ s}^{[7]}$ 。退火时间对 Al-11Si-3.5Fe 合金内耗性能的影响如图 6 所示, 可见在 $10 \sim 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内, 该合金内耗随退火时间增加基本不变。

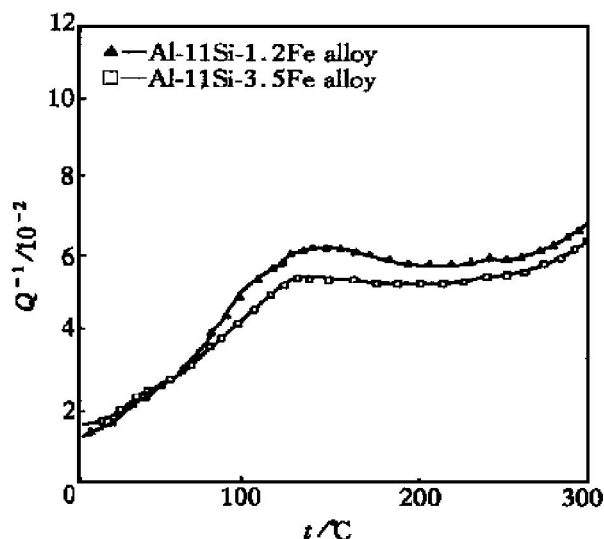


图 4 Al-11Si-1.2Fe 及 Al-11Si-3.5Fe 合金内耗与温度关系($f = 1 \text{ Hz}$)

Fig. 4 Internal friction vs temperature of Al-11Si-1.2Fe and Al-11Si-3.5Fe alloys($f = 2.2 \text{ Hz}$)

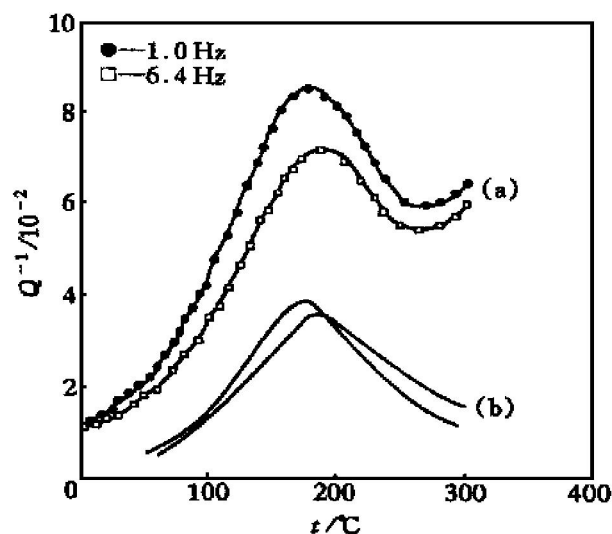


图 5 频率对 Al-11Si-3.5Fe 合金内耗性能的影响

Fig. 5 Effect of frequency on internal friction of Al-11Si-3.5Fe alloy preannealed at $360 \text{ }^{\circ}\text{C}$ for 1 000 min
(a) —Original data and background;
(b) —After subtraction of the background

3 讨论

快速凝固制粉, 其冷却速度可达 $10^3 \sim 10^6 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ ^[2], 与传统的熔炼铸造加工法相比, 其具有: 1) 组织细化; 2) 固溶体过饱和度增加。与目前应用较多的喷射沉积相比, 其冷却速度亦大 $10 \sim 100$ 倍。这样高饱和度的铝铁硅合金粉末在后续加热挤压和空气冷却时过饱和相就会完全脱溶析出(图 1、图 2)。

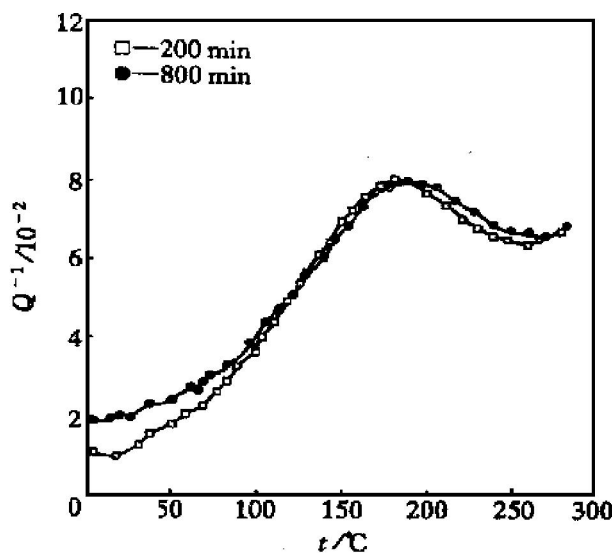


图 6 不同退火时间下 Al-11Si-3.5Fe 合金内耗与温度关系

Fig. 6 Internal friction vs temperature of Al-11Si-3.5Fe alloy preannealed at $360 \text{ }^{\circ}\text{C}$ for different time ($f = 1.0 \text{ Hz}$)

铝硅铁合金随退火时间延长, 其尺寸变化不明显, 主要与添加铁有关^[1]。含 Fe 的金属间化合物具有较好的耐热性, 并阻碍晶界迁移, 改变合金再结晶过程, 抑制晶粒粗化。另外退火过程中 Si 相晶粒尺寸几乎没有变化也与合金中含 Fe 有关, 主要基于以下两方面原因: 1) 由于 Si 与 Fe 和 Al 形成金属间化合物, 或 Si 相粒子中 Fe 的掺入降低了 Si 的活动能力; 2) Si 相粒子粗化是 Si 原子从一个颗粒到另一个颗粒的长程扩散过程。由于原子沿管道扩散比体扩散激活能低, Si 原子主要是沿晶界或亚晶界扩散。Al-Si-Fe 合金经挤压后其金属间化合物主要是沿晶界或亚晶界分布, 这些含 Fe 金属间化合物有效地淹没了长距离扩散的空位, 并成为扩散的障碍, 造成 Si 原子扩散困难, 降低了粗化速度。

在多晶铝中, 在 $290 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 出现内耗峰, 该峰是晶界弛豫的结果, 它受晶界析出相的影响^[7]。Al-Fe-Si 合金的内耗峰高度低于多晶铝, 峰位在较低温处, 但我们认为该峰仍是晶界弛豫的结果。FeAl₂ 粒子和 Al-Fe-Si 金属间化合物在晶界析出、阻碍晶界滑动, 使内耗峰高度降低, 峰位移向低温, 且随 Fe 含量增加(在一定范围内), 这种析出相增多, 其阻碍晶界滑移作用显著。

等温退火对 Al-Si-Fe 合金内耗行为的影响也可根据晶界析出相对晶界弛豫的影响来解释。由于挤压后过饱和相析出即结束, 基体晶粒和 Si 粒子随退火时间延长而粗化过程被含 Fe 的析出相抑制, 所以晶粒尺寸基本不变(图 3), 内耗峰高度随等温退火时间延长亦基本不变(图 6)。

弛豫时间 τ_0 与内耗峰的温度有关^[8], 如果过程激活能不变, τ_0 的降低导致峰温降低。析出相数量增加, 引起峰温移向低温(图4)。据此亦可推断 Al-Si-Fe 合金与多晶铝比较, τ_0 值很小是由于合金中 FeAl₂ 和 Al-Si-Fe 金属间化合物析出引起的。

4 结论

1) 经快速凝固制粉和包套挤压制备的 Al-Si-Fe 合金析出相 FeAl₂ 和 Al-Si-Fe 金属间化合物在挤压态即已沿晶界呈粒状析出, Fe 含量增加, 析出相增多。

2) 该合金在 60~250 °C 出现内耗峰, 内耗峰是由于晶界弛豫引起的, 且受晶界析出相 FeAl₂ 和 Al-Si-Fe 金属间化合物的影响。

3) Fe 含量增加, 内耗峰高度降低。因为含 Fe 金属间化合物增多, 对晶界滑动阻碍作用增大。

4) 内耗峰随退火时间增加, 变化不大。因为含 Fe 金属间化合物抑制基体晶粒及 Si 粒子粗化。

[REFERENCES]

[1] Zhou J, Duszczek J and Korevaar B. Microstructural features and final mechanical properties of the iron-modified

Al-20Si-3Cu-1Mg alloy product processed from atomized powder [J]. J Mater Sci, 1991(26): 3041.

[2] LI Yue-zhu (李月珠). Technology and Materials of Rapid Solidification(快速凝固技术和材料) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993. 22.

[3] CHEN Zhen-hua (陈振华) and ZHANG Hao (张豪). 多层喷射共沉积法制备 6066 铝合金/SiC 颗粒复合材料 [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1996, 6(4): 83.

[4] GUO Hong-zhen (郭鸿镇) and YAO Ze-kun (姚泽坤). 快速凝固 Nb₃AlNb 固溶体两相合金的组织与性能 [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1998, 8(3): 472.

[5] YUAN Xiao-guang (袁晓光) and XU Da-ming (徐达鸣). 喷射沉积 Al-Si-Fe-Cu-Mg 合金组织与力学性能 [J]. Acta Metallurgica Sinica(金属学报), 1997, 33(3): 248-252.

[6] Fabbietti L M and Sekhar J A. Planar to equiaxed transition in the presence of an external wetting surface [J]. Metall Trans, 1992, 23A: 3361.

[7] Nowick A S and Berry B S. Anelastic Relaxation in Crystalline solids [M]. New York: Academic Press, 1972. 435.

[8] FENG Duan (冯端), WANG Ye-ning (王业宁) and QIU Di-rong (丘第荣). Metal Physics B(金属物理 B) [M]. Beijing: Science Press, 1975. 557.

Effect of iron content on microstructure and internal friction of Al-Fe-Si alloy

LUO Bing-hui, XIE Your-qing

(Department of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, P. R. China)

[Abstract] Al-11Si-1.2Fe and Al-11Si-3.5Fe alloys were experimentally made with rapid solidification-powder extrusion technology. The internal friction and the microstructure of the alloys under extruded and isothermal annealing conditions were investigated. An internal friction peak was observed in the temperature range 60~250 °C in the present alloys. The Q^{-1} peak decreases with the increase of iron, which was found to be directly attributed to the precipitation of FeAl₂ and Al-Si-Fe intermetallics from the aluminium alloy matrix. The internal friction mechanisms of the alloy were put forward.

[Key words] rapid solidification; microstructure; internal friction; Al-Si-Fe alloy

(编辑 朱忠国)