

快速凝固耐热铝合金 Al-Fe-Cr-Zr 的固结工艺及性能^①

肖于德 李松瑞 谢允安 徐移恒

(中南工业大学材料科学与工程系, 长沙 410083)

摘 要 采用多级快速凝固装置制取 RSAl-Fe-Cr-Zr 合金粉末, 并用二次挤压等四种工艺固结制备出实验样品。通过 X 射线衍射、光学金相、硬度以及拉伸实验等测试手段, 研究了该合金的显微组织、热稳定性和低温高温拉伸性能。结果表明, 采用二次挤压工艺的样品具有良好的固结状态, 而且第二相颗粒细小均匀弥散; RS/PM Al-Fe-Cr-Zr 合金属于较好的耐热铝合金系列, 合金中的主要析出相有 $\text{Al}_{13}\text{Cr}_2$ 、 Al_3Zr 和 $\text{Al}_3(\text{Fe}, \text{Cr})$ 。

关键词 快速凝固 粉末冶金 耐热铝合金

研究新型耐热铝合金的目的在于寻求能够在 150~350 °C 温度范围内使用的铝合金, 以取代钛合金或耐热钢^[1]。目前, 国内外开发成功的快速凝固耐热铝合金多为 Al-Fe-X (X = Mo、V、Cr、Zr、Ce、Si 等) 和 Al-Cr-Zr 合金系列^[2]。RS/PM Al-Fe 合金具有良好的高温强度、但因其组织不均匀和原始硬度较高, 故难于加工成型; 与之相反, RS/PM Al-Cr-Zr 合金容易加工, 而且 Al_3Zr 的析出可以使合金具有良好的沉淀强化效应, 细小的 Al_3Zr 颗粒析出有利于改善合金的强度和韧性。理论上, 两种合金系混合配制的一种新合金系, 不仅容易加工, 而且具有良好的高温强度和足够的韧性^[3]。本文选择 RS/PM Al-Fe-Cr-Zr 合金作为研究对象, 旨在寻求合适的生产工艺, 提高合金的性能。

1 试验部分

样品制备采用如图 1 所示的工艺流程。

快速凝固制粉在中南工业大学的多级快速

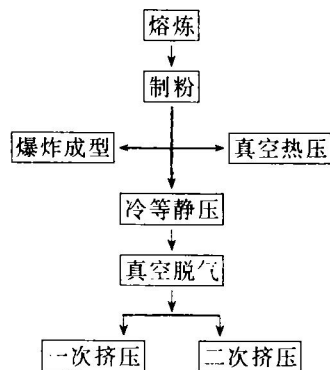


图 1 实验合金粉末固结工艺流程

凝固设备^[4](冷速 $10^5 \sim 10^6$ K/s)上完成, 熔炼合金为 Al-6.8Fe-3.75Cr-1.52Zr(%)。爆炸成型实验采用硝胺炸药, 炸药量与固结粉末量之比为 4.5。真空热压在真空度 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ Pa、温度 450 °C 下保温 30 min, 然后在 7×10^2 MPa 压力下保压 10 min。冷等静压在 4×10^2 MPa 压力下保温 3 min。真空脱气在真空度 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ Pa、温度 350 °C 下保温 120 min。热挤压在 YA-500 立式油压机上完成, 粉末压块在氩气保护下于 450 °C 保温 90 min, 挤压比为: 一次挤压 $\lambda_1 = 4$, 二次挤压 $\lambda = 36(\lambda_1 = 4, \lambda_2 = 9)$ 。

① 收稿日期: 1994-0-18; 修回日期: 1994-08-05

样品的显微组织在 Neophot-2 型光镜下观察, 采用 HF(1.0 ml)+HCl(1.5 ml)+HNO₃(2.5 ml)+H₂O(95.0 ml) 的 Kever 试剂作为侵蚀剂。粉末形貌在 KYKY-2000B 型 SEM 上观察, 粒度在 SKC-2000 型光沉淀粉末粒度分析仪上测量。X 射线衍射在 SIMENS D500 全自动 X 射线衍射仪上进行。材料拉伸力学性能检测在 Instron8032 拉伸实验机上进行, 实验温度为室温、250、350 及 400 ℃, 在高温条件下保温 7 min, 拉伸速度为 0.2 mm/min。

2 结果分析与讨论

2.1 粉末形貌

图 2 为实验合金粉末的形貌与粒度分布。粉末主要分布在 8~80 μm 的直径范围内, 除了少数细小粉末 ($d < 8 \mu\text{m}$) 呈表面光洁的球形外, 大多数呈无规则形状。

快速凝固 Al-Fe-Cr-Zr 合金粉末主要包括光学无特征的 A 区组织和含细小析出物的 B 区组织^[3]。随着冷却速度的提高, 合金粉末中 A 区增加, B 区减少, 获取完全的 A 区对合金最终性能是十分有益的。在冷却速度不够的情况下, 粉末中会出现粗大第二相颗粒甚至平衡相 Al₁₃Fe₄, 造成合金强度和塑性严重下降。从合金粉末 X 射线衍射分析(如图 3)可以知道, -140 目细粉已基本达到完全过饱和, -60 目粉末中只有 Al₁₃Cr₂ 存在, 而+60 目粉末中除了出现 Al₁₃Cr₂, Al₃Zr 和 Al₃(Fe, Cr) 外, 还出现平衡相 Al₁₃Fe₄。从-60 目粉末爆炸成型样品的金相组织来看, 除了细粉只有 A 区和少量粗粉只有 B 区外, 大多数粉末中既有 A 区(粉末表层)又有 B 区(粉末心部)。在样品中没有发现粗大第二相存在。因此, 在实验中选用 60 目筛子除去粗大粉末, 以避免粗大第二相和平衡相 Al₁₃Fe₄ 的不良影响。

2.2 粉末时效

图 4 为在不同温度下时效粉末(-140 目)的 X 射线衍射分析。粉末经 350 ℃保温 4 h, 除

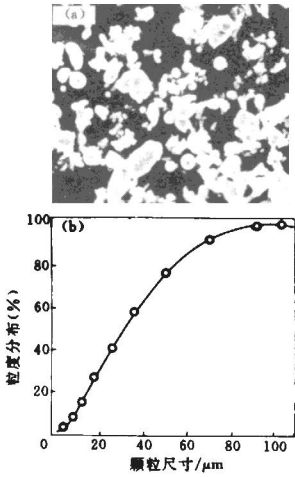


图 2 实验合金粉末的粒度与形貌, ×500
(a) — 形貌; (b) — 粒度分布

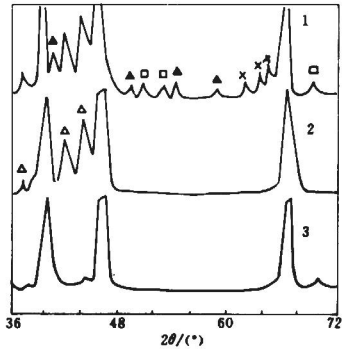


图 3 实验合金原始粉末 X 射线衍射分析
1—+60 目; 2—-60 目; 3—-140 目;
△—Al₁₃Cr₂; ×—Al₃Zr;
□—Al₃(Fe, Cr); ▲—Al₁₃(Fe, Cr)₄
有了少量的 Al₁₃Cr₂ 析出, 基本上还保持原始

组织;经 400℃保温 4 h,粉末中已有稳定 Al_3Zr 和 $\text{Al}_3(\text{Fe}, \text{Cr})$ 存在,但没有出现 $\text{Al}_{13}(\text{Fe}, \text{Cr})_4$ 平衡相;经 550℃保温 1 h,粉末中出现 $\text{Al}_{13}(\text{Fe}, \text{Cr})_4$ 平衡相,而 $\text{Al}_3(\text{Fe}, \text{Cr})$ 减少。

亚稳 Al-Fe-Cr-Zr 过饱和固溶体具有较好的热稳定性,把粉末脱气处理的温度选在 350℃,保温 2 h,基本上可以使粉末优异的快速凝固组织区破坏;在高温条件下, $\text{Al}_3(\text{Fe}, \text{Cr})$ 转化成 $\text{Al}_{13}(\text{Fe}, \text{Cr})_4$ 平衡相,故挤压温度不宜选择过高,以免第二相质点粗化和平衡相 $\text{Al}_{13}(\text{Fe}, \text{Cr})_4$ 出现。实验中挤压温度选在 450℃,相应地,真空热压的温度也定在 450℃。

在时效粉末的 X 射线衍射分析中未观察到亚稳 Al_3Zr (fcc , $a = 0.4053 \sim 0.4071 \text{ nm}$) 的衍射峰,原因很可能是其点阵结构与铝基体 (fcc , $a = 0.4049 \text{ nm}$) 的相近^[5],亚稳 Al_3Zr 的衍射峰湮灭在铝的衍射峰中而难以观察到。

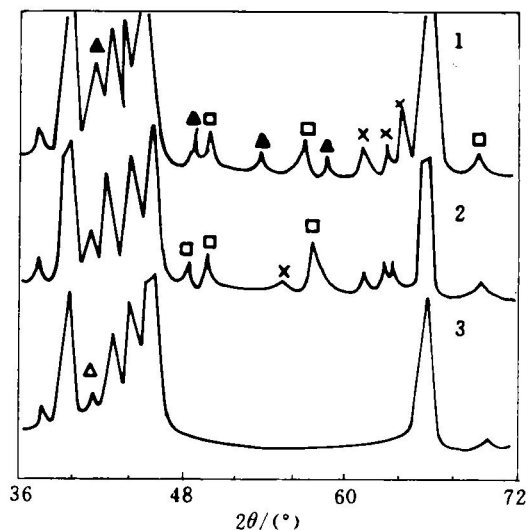


图4 实验合金时效粉末

X 射线衍射分析

1—500℃, 1h; 2—400℃, 4h; 3—350℃, 4h;

△— $\text{Al}_{13}\text{Cr}_2$; ×— Al_3Zr ;

□— $\text{Al}_3(\text{Fe}, \text{Cr})$; ▲— $\text{Al}_{13}(\text{Fe}, \text{Cr})_4$

2.3 固结样品金相组织

图5为粉末(—60目)以不同固结工艺固结样品的金相组织。从图可见,爆炸成型样品中,粉末几乎保持了原始粉末的形貌和显微组织,粉末结合不好,有孔洞存在;真空热压样品虽然固结状态有所改善,但还存在未变形粉末颗粒,可以观察到颗粒界面和微孔;一次挤压样品的结合状态较好,几乎观察不到粉末颗粒界面,但第二相质点析出不充分,而且分布状态不佳;二次挤压克服了上述缺陷。在二次挤压过程中粉末有较大变形,金属流动过程中可以充分破坏粉末表面氧化膜,有利于提高粉末结合强度;另一方面,通过两次加热变形,可以提高第二相的形核率,有利于第二相质点均匀弥散析出。因此,采用二次挤压工艺可以改善粉末固结,且优化组织,从而有利于提高合金性能。

2.4 二次挤压样品时效

图6为二次挤压样品在不同温度时效硬度变化曲线。可见,在 250℃经长时间保温,合金硬度几乎保持不变,在 350℃保温 8 h, 400℃保温 2 h,合金硬度下降不明显,故 RSAl-Fe-Cr-Zr 合金具有较好的热稳定性,这主要归功于其中的强化相 $\text{Al}_{13}\text{Cr}_2$ 、 Al_3Zr 和 $\text{Al}_3(\text{Fe}, \text{Cr})$ 具有良好的热稳定性和抗粗化能力^[2, 3]。

与铝基体共格的亚稳 Al_3Zr 对铝合金有明显的沉淀强化效应^[6],但在图6中未观察到强化峰,可能是由于形变促使第二相质点析出,致使亚稳 Al_3Zr 在二次挤压过程中已充分析出,甚至稳定化。

2.5 力学性能

附表表示 RS $\text{Al-6.8Fe-3.75Cr-1.5Zr}$ 合金

附表 试验合金的力学性能

温度 /℃	性能		
	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	$\delta\%$
25	411.9	465.1	5.0
250	282.9	259.1	2.4
350	140.1	156.5	4.4
400	102.1	108.1	9.3

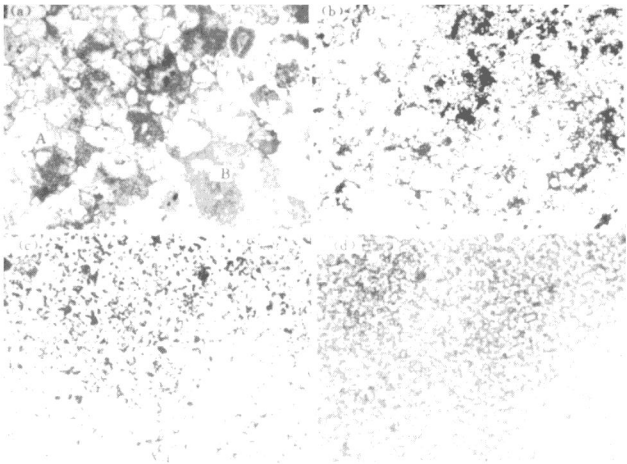


图 5 固结样品金相显微组织，×1000
(a) 爆炸成型；(b) 真空热压；(c) 一次热压；(d) 二次热压

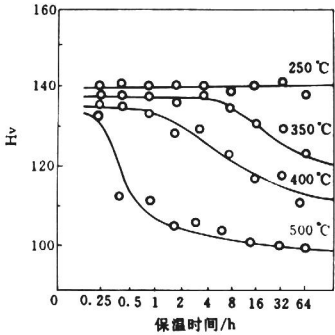


图 6 二次热压样品在不同温度时效硬度变化
的力学性能。
从附表所示实验合金二次热压棒材的拉伸力学性能数据和文献[7]可以知道，实验合金的高温 and 低温强度已超过了 Al-5.5Fe-0.5V-

1.1Si 合金，接近 Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si 合金，因此，可以认为 RS/PM Al-Fe-Cr-Zr 不失为较好的耐热铝合金系列。合金塑性较差，尤其 250℃ 塑性只有 2.4%，这可能是快速凝固耐热铝合金的反常塑性行为(即中温脆性)，其产生的机理和解决办法有待于进一步研究探索。

参考文献

1 Chellman D J *et al.*, Metal Powder Report, 1988, 43(10): 672.
2 Michot G, Champier G. Physical Metallurgy of P/M Aluminium Alloys. In: ICMA2, Oct. Beijing, 1990.
3 Marshall G J. Journal of Materials Science, 1987, 22 (10): 3581.
4 陈振华等. CN90106130. 1, 1990.
5 Lee H M, Lee J *et al.* Scripta Metallurgy et Materials, 1991, 25(3): 517.
6 Marshall G J, Hughes I R *et al.* Materials Science and Technology, 1986, 2(6): 611.
7 王祝堂, 田荣璋等, 铝合金及其加工手册, 长沙: 中南工业大学出版社, 1988: 290.