

[文章编号] 1004-0609(2002)03-0422-04

Al-8.7Fe-1.6V-1.3Si 耐热铝合金的固液混合铸造^①

陈振华, 严红革, 陈刚, 张福全, 胡仲勋, 傅杰兴

(湖南大学材料科学与工程学院, 长沙 410082)

[摘要] 研究了耐热铝合金 Al-8.7Fe-1.6V-1.3Si (8009) 的固液混合铸造。结果表明: 采用固液混合铸造工艺制备的耐热铝合金显微组织明显细化, 室温和高温力学性能明显优于铸造和搅拌铸造耐热铝合金。固液混合铸造坯具有良好的挤压性能, 挤压坯具有优异的室温和高温耐磨性能。在本工艺条件下, 当粉末添加质量和合金熔体质量比为 1 时, 耐热铝合金中的 $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ 析出相粒径可控制在 30 μm 以下, 材料的室温力学性能为: $\sigma_b = 210 \text{ MPa}$, $\sigma_{0.2} = 190 \text{ MPa}$, $\delta = 4\%$; 在 473 K 时为: $\sigma_b = 150 \text{ MPa}$, $\sigma_{0.2} = 130 \text{ MPa}$, $\delta = 5\%$; 在 573 K 时为: $\sigma_b = 110 \text{ MPa}$, $\sigma_{0.2} = 90 \text{ MPa}$, $\delta = 6\%$ 。

[关键词] 固液混合铸造; 耐热铝合金; 半固态加工

[中图分类号] TG 292

[文献标识码] A

Al-Fe-V-Si (8009) 耐热铝合金是 1986 年美国联合信号 (Allied-Signal) 公司的 Skinner 等人^[1, 2] 利用快速凝固和粉末冶金 (RS/PM) 技术开发出来的一种新型高温铝合金。该合金系在 350 $^{\circ}\text{C}$ 以下具有稳定的高温性能, 其主要原因是: 在制备合金的过程中采用了快冷工艺, 在合金中产生了高体积分数的 $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$ 弥散颗粒, 其尺寸约 30 nm 左右。这种弥散颗粒抑制了高温下晶粒的长大和析出物的粗化。当合金的冷速较低时, $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$ 颗粒粗大, 弥散强化作用减弱, 导致针状的 $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ 相析出和长大, 降低了材料性能。目前国内外只有采用 RS/PM (主要为平面流铸造^[3, 4]) 和多层喷射沉积等技术才能顺利生产该合金^[5, 6]。

本研究中采用作者发明的固液混合铸技术来制备 8009 耐热铝合金。所谓固液混合铸工艺主要是在过热熔体中加入大量的同种合金粉末或润湿性好的异种金属粉末, 强烈均匀搅拌, 然后进行铸造或各种热加工的一种材料制备工艺。采用固液混合铸造工艺制备的耐热铝合金的晶粒微细, 合金性能明显优于传统铸造和半固态铸造合金, 但低于平面流铸造和多层喷射沉积合金。若通过优化固液混合铸造工艺, 合金的性能将会进一步提高。另外固液混合铸造技术具有工艺简单、生产成本低廉、能成形复杂形状件、可制备大件等优点, 因而具有一定的应用前景。

1 实验方法

实验采用成分 (质量分数) 为 Al-8.7% Fe-1.6% V-1.3% Si 合金的喷射沉积过喷粉末, 分别以不同的固液质量比例加入到同种成分的合金熔体中。熔体的过热温度为 50~100 K, 采用机械搅拌装置强烈均匀搅拌, 粉末的加入和搅拌过程均在惰性气体保护下进行, 搅拌均匀后进行压铸成形。将压铸试样加热到一定温度, 挤压成直径 10 mm 的小棒, 挤压比为 10:1。采用金相显微镜观察显微结构, 采用 X 射线衍射仪分析相组成, 并对合金的低温和高温性能进行测试。另外对合金的室温和高温摩擦磨损性能也进行研究。

2 结果和讨论

2.1 合金的显微组织和力学性能

采用传统铸造、半固态铸造和固液混合铸造工艺制备了合金试样, 其显微组织特征如图 1 所示。X 射线衍射分析结果表明, 图 1(a), (b) 所示的样品中含有 $\alpha(\text{Al})$ 和 $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ 相, 而图 1(c) 所示样品的组成相为 $\alpha(\text{Al})$, $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ 和 $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$ 相。图 1(a) 所示的普通铸造合金样中, 粗大的平衡析出相 $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ 的平均尺寸为 0.8 mm, 最大尺寸有 2~3 mm, 析出物以长针状形式析出, 该合金的抗拉强度只有 30~40 MPa, 无塑性。图 1(b) 表明,

① [收稿日期] 2001-04-11; [修订日期] 2001-06-10

[作者简介] 陈振华 (1946-), 男, 教授, 博士。

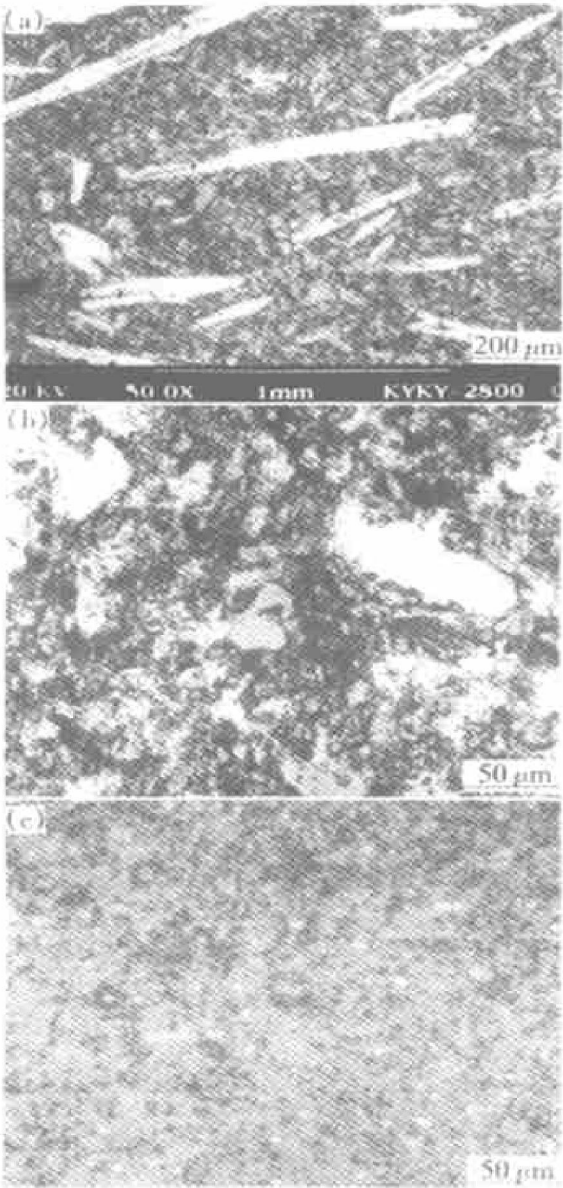


图 1 不同工艺制备的 8009 合金的金相照片

Fig. 1 Metallographies of 8009 alloy samples prepared by different processes

(a) —Conventional casting process;

(b) —Semi-solid casting process;

(c) —Mixed solid-liquid casting process

经机械搅拌处理后合金的组织变细, $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ 相的平均尺寸减小到 $150\text{ }\mu\text{m}$, 但组织仍比较粗大。该合金的抗拉强度为 96 MPa , 塑性极低。图 1(c) 所示的

固液混合铸造合金组织微细, 且显微组织随粉末加入量的增加而变细。当添加粉末的质量与合金熔体的质量比为 1 时, $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ 相的平均粒度可控制在 $30\text{ }\mu\text{m}$ 以下。X 射线衍射测试表明, 随着粉末添加量的增加, $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$ 相衍射峰的强度增加。固液混合铸造合金的力学性能较前两种合金有明显提高, 虽然仍低于 RS/PM 和多层喷射沉积工艺制备合金的性能, 但通过优化固液混合铸工艺, 合金的力学性能有望进一步提高。有关 3 种方法制备的耐热铝合金的力学性能如表 1 所示。

2.2 粉末添加对合金性能的影响

将粉末加入到同种合金的熔体中后, 液相中的形核核心数大幅度增加, 促进了形核过程。同时, 由于粉末的吸热和部分融解, 使粉末颗粒周边的熔体和粉末融解时产生的熔体产生快速凝固, 从而抑制晶粒的长大。因此, 随着粉末添加量的增加, 平衡析出相的数量将大幅度减少, 平均尺寸下降, 晶粒组织细化, 网状枝晶组织消失。对耐热铝合金来说, 快速凝固粉末中含有大量的 $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$ 相, 部分未融解的 $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$ 相及粉末颗粒周边熔体中因快速凝固再一次产生的 $\text{Al}_{12}(\text{Fe}, \text{V})_3\text{Si}$ 相, 使固液混合铸造合金的室温和高温力学性能提高。固液混合铸造合金的室温和高温力学性能的提高幅度取决于粉末的加入量和粒度, 一般来说, 粉末的加入量愈大、粒度愈细, 则合金的室温和高温力学性能提高得愈多。图 2(a) 所示为粉末加入量对耐热铝合金室温性能的影响, 图 2(b) 所示为加入粉末的粒度对耐热铝合金室温力学性能的影响。

2.3 固液混合铸造坯的挤压

大量研究表明, 固液混合铸造工艺最重要的优点之一是解决了高合金铸件难以挤压的问题。一般来说, 对很多高合金铸件, 由于析出相粗大和偏聚, 挤压时产生不均匀变形, 往往引起铸件的开裂。固液混合铸造工艺解决了铸件显微组织粗大化

表 1 几种方法制备的耐热铝合金的力学性能

Table 1 Mechanical properties of as-prepared 8009 alloy by different processes

Process	Room temperature			473 K			573 K		
	σ_b / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	δ / %	σ_b / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	δ / %	σ_b / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	δ / %
Conventional casting process	30~ 40	30~ 40	0						
Semi-solid casting process	96	86	0.4						
Solid-liquid mixed casting process	212	190	4	150	130	5	110	90	6

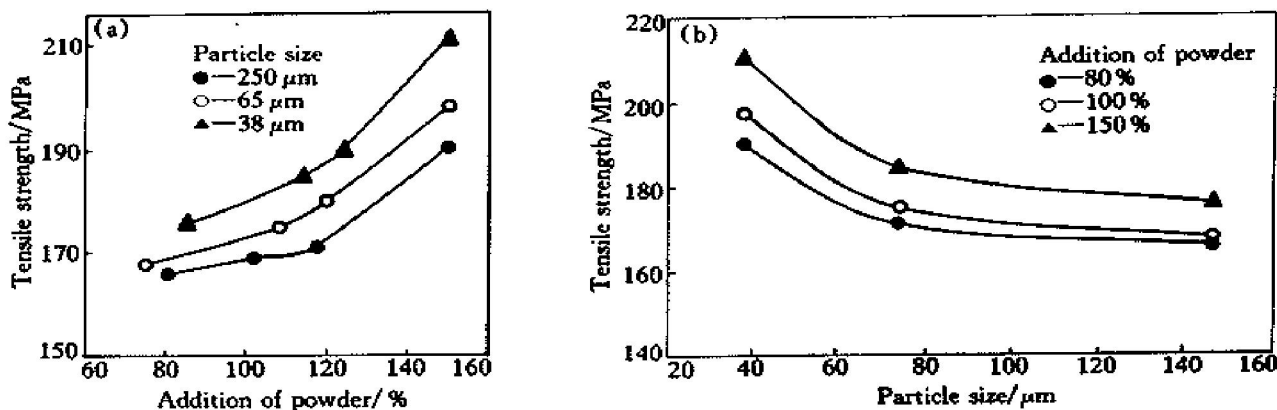


图 2 粉末加入对固液混合铸造合金室温力学性能的影响
Fig. 2 Influences of added powder on mechanical properties of alloys at room temperature
(a) —Influence of addition amount of powder; (b) —Influence of particle size of powder

问题,使得很多高合金铸件具有一定塑性,可以实现挤压和其它一些热加工。实验表明,高硅铝合金、高铬铝合金和高铁铝合金通过固液混合铸造后,能顺利进行挤压和其它方式的热加工。耐热铝合金固液混合铸造坯的组织较粉末冶金耐热铝合金的要粗大些,故其挤压抗力比同成分合金的粉末冶金坯的挤压抗力要小得多,但随着粉末添加量的增加,组织变细,因而单位面积挤压抗力逐渐增加。表 2 所示为固液混合铸造坯与粉末冶金坯挤压抗力的比较。

表 2 固液混合铸造与粉末冶金坯单位面积挤压抗力的比较(MPa)

Table 2 Comparison of resistances to extruding deformation per unit area between mixed solid-liquid casting samples and powders metallurgy samples (MPa)

Sample	Resistance to extruding deformation		
	573 K	625 K	725 K
Powder metallurgy sample	2 248	1 556	1 296.8
Mixed solid-liquid casting sample(S/L= 0.75)	1 124	864.5	691.6
Mixed solid-liquid casting sample(S/L= 1)	1 383	1 037	864.5

Extruding ratio is 10:1

2.4 合金的摩擦磨损性能

随着对耐热铝合金(8009)使用性能的要求不断提高,要求其不但要有一定的强度,而且还要有一定的耐磨性^[7],而材料的磨损量又与 $Al_{13}Fe_4$ 析出相的数量和尺寸有很密切的关系。如图 3 所示,随着 $Al_{13}Fe_4$ 相数量的增加和尺寸的增大,材料的磨损量增加。

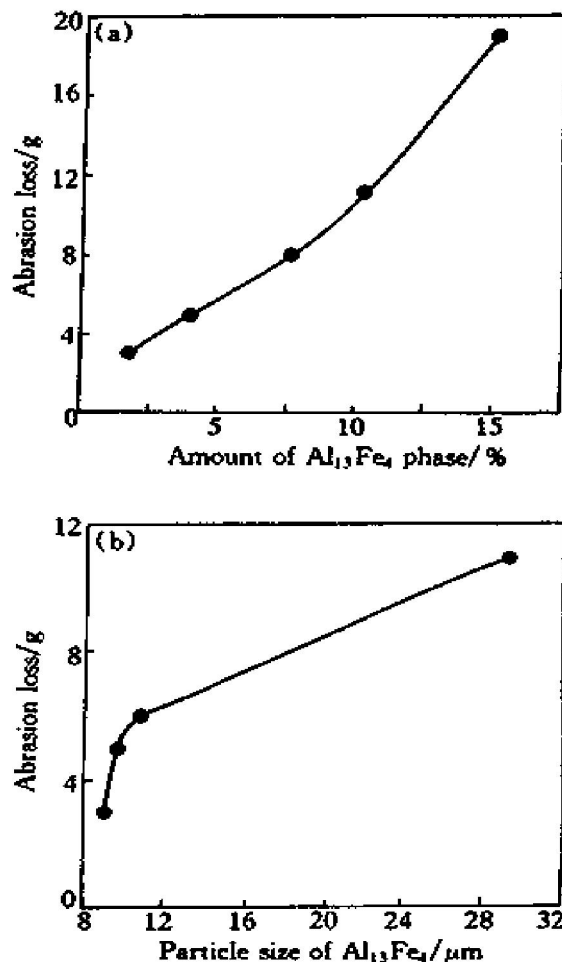


图 3 8009 合金 $Al_{13}Fe_4$ 相的析出量(a)和析出物(b)尺寸与磨损量的关系

Fig. 3 Abrasion loss of 8009 alloy vs amount (a) and particle size (b) of $Al_{13}Fe_4$ phase

研究表明,固液混合铸造耐热铝合金的耐磨性比半固态铸造和铸造合金的耐磨性好得多,并且随着粉末加入量的增加,材料的磨损量降低。这是由于 $Al_{13}Fe_4$ 是脆性相,与基体的结合强度不高,容

易剥落,所以在摩擦时磨损量比较大。固液混合铸造耐热铝合金中的 $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ 析出相弥散细小,与基体结合牢固,不易脱落,因而磨损量较小。

在室温条件下,磨损表面的犁沟痕迹说明磨粒磨损起主要作用。普通铸造和半固态铸造的耐热铝合金在 200 °C 时已经产生粘着磨损。固液混合铸造的耐热铝合金在 200~300 °C 时仍以磨粒磨损为主,300 °C 以上材料摩擦属于粘着磨损,在 300 °C 以上材料的磨损量随温度升高而迅速增加。

2.5 应用讨论

固液混合铸造工艺类似于半固态加工工艺,但两者的半固态概念有所不同,前者的“固相”是指未熔化的粉末颗粒,而后的“固相”是指由被搅拌破碎的枝晶生成的球状晶。固液混合铸造和喷射沉积的固液相概念相同。固液混合铸造工艺的特点为:

1) 通过搅拌粉末和熔体的混合物而产生半固态浆料的方法简单,容易制备大件。即使是纯金属粉末,也可以通过几种方法来实现半固态加工。

2) 固液混合铸造工艺可以细化合金晶粒,减少平衡析出相数量和尺寸,部分组织为急凝固组织,合金性能比铸造和半固态加工材料的性能高。

3) 固液混合铸造坯具有良好的热加工性能,克服了高合金铸造塑性低和挤压变形不均匀易产生开裂的困难。

[REFERENCES]

- [1] Skinner D J, Bye R L, Raybould D, et al. Dispersion strengthened Al-Fe-V-Si alloys [J]. Scripta Metall, 1986, 20: 867-872.
- [2] Das S K, Davis L A. High performance aerospace alloys via rapid solidification processing [J]. Mater Sci Eng, 1988, 98: 1-12.
- [3] Das S K. Rapidly solidified aluminum and magnesium alloys-recent developments [J]. Review in Particulate Materials, 1993, 1: 1-20.
- [4] YUAN Wu-hua, CHEN Zhen-hua. The application of multi-layer spray deposition to production of heat-resisting aluminum alloy [A]. Int Conf on Spray Deposition and Melt Atomization [C]. Germany: Bremen, 2001. 277-284.
- [5] 陈振华, 黄培云, 蒋向阳, 等. 多层喷射沉积规律 [J]. 中国有色金属学报, 1995, 5(4): 70-72.
CHEN Zhen-hua, HUANG Pei-yun, et al. Regularities of multilayer spray deposition process [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1995, 5(4): 70-72.
- [6] CHEN Zhen-hua, KANG Zhi-tao, YAN Hong-ge. Application of a novel multilayer spray forming technology in the preparation of large dimension aluminum alloy blanks [J]. J Cent South Univ Technol, 2000, 7(4): 201-203.
- [7] Zedalis, Bryant J D, Gilman P S. High temperature discontinuously reinforced aluminum [J]. JOM, 1991, 8: 29-31.

Mixed solid-liquid casting processing of Al-8.7Fe-1.6V-1.3Si elevated temperature alloy

CHEN Zhen-hua, YAN Hong-ge, CHEN Gang, ZHANG Fu-quan, HU Zhong-xun, FU Jie-xing
(College of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

[Abstracts] A novel mixed solid-liquid casting technology was utilized to prepare elevated temperature aluminum alloy (8009). The results show that, comparing with conventional casting processing and stirring casting process, this process can effectively refine the grains and precipitated $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ phase particles and can obviously improve the room temperature or high temperature mechanical properties. Better extrudability, abrasive resistance at room temperature and high temperature can also be obtained by this process. When mass ratio of the alloy powder to the melt is up to 1, the mean size of the $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ particles in the alloy samples can be controlled under 30 μm ; its mechanical properties at room temperature is $\sigma_b=210\text{ MPa}$, $\sigma_{0.2}=190\text{ MPa}$, $\delta=4\%$; at 473 K, $\sigma_b=150\text{ MPa}$, $\sigma_{0.2}=130\text{ MPa}$, $\delta=5\%$; at 573 K, $\sigma_b=110\text{ MPa}$, $\sigma_{0.2}=90\text{ MPa}$, $\delta=6\%$.

[Key words] mixed solid-liquid casting; elevated temperature aluminum alloy; semi-solid processing

(编辑 袁赛前)