

快速凝固/粉末冶金高硅铝合金 微观组织及拉伸性能

Microstructure and Tensile Properties of a Rapidly
Solidified High Silicon Aluminum Alloy

孙剑飞¹, 谢壮德², 沈 军¹, 周彼德¹, 李庆春¹

(1 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001;

2 上海交通大学材料科学与工程学院, 上海 230003)

SUN Jian-fei¹, XIE Zhuang-de², SHEN Jun¹, ZHOU Bi-de¹, LI Qing-chun¹

(1 School of Material Science and Engineering, Harbin Institute of Technology,

Harbin 150001, China; 2 School of Material Science and Engineering,

Shanghai Jiaotong University, Shanghai 230003, China)

摘要: 采用快速凝固/粉末冶金法制备 Al-17Si-6Fe-4.5Cu-0.5Mg 合金, 并进行 T6 处理。利用现代测试手段对挤压态及 T6 处理态合金微观组织及拉伸性能进行研究。结果表明: 采用这种工艺可使合金组织中第二相得到显著细化, 经 T6 处理后第二相有粗化趋势, 同时也有新相沉淀析出; 合金拉伸性能主要表现在高强、低塑性及良好耐热性。

关键词: 快速凝固; 粉末冶金; 高硅铝合金; 微观组织; 拉伸性能

中图分类号: TG146.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2001) 11-0013-04

Abstract: An Al-17Si-6Fe-4.5Cu-0.5Mg alloy was manufactured by rapid solidification/powder metallurgy (RS/PM) process and followed by T6 temper. Microstructure and tensile properties of the extruded and T6 tempered alloys were studied by means of modern measuring techniques. The results show that the second phases in the microstructure of the alloy were obviously refined by this process, through T6 temper coarsening of the second phases occurred and a new phase precipitated in the matrix; the tensile properties of the alloy were characterized by high strength, low ductility and improved heat resistance.

Key words: rapid solidification; powder metallurgy; high silicon aluminum alloy; microstructure; tensile properties

利用快速凝固粉末冶金技术制备过共晶 Al-Si 合金可大大细化初晶 Si 相, 使其以细小颗粒状均匀分布于基体, 这种合金表现出良好的耐磨性和低热膨胀性, 特别是在高硅含量情况下表现尤为突出^[1-4]。通常在这种合金中加入 Cu, Mg 及以 Fe, Ni 等为代表的过渡族金属元素进行合金化作用, 其中添加 Cu, Mg 经固溶时效处理可改善合金常温性能^[5-7], 添加 Fe, Ni 等过渡族金属元素能够形成热稳定性很好的金属间化合物以提高合金的高温性能^[8-14]。

1 合金制备和试验方法

1.1 合金制备

合金设计成分为 Al-17Si-6Fe-4.5Cu-0.5Mg, 利用铸锭冶金法熔炼母合金, 利用超音速气体雾化法制

备合金粉末, 选用氮气作为雾化气体; 利用热挤压法固结合金粉末, 挤压前要对粉末进行包套密封和真空除气, 挤压温度为 450℃, 挤压比 14:1; 挤压后对挤压坯进行 T6 处理, 其工艺为: 480℃ 固溶 1h, 水淬, 然后 175℃ 人工时效 6h。

1.2 试验方法

利用 D/max- τ B X 射线衍射仪对合金中相组成进行研究, Cu-K α 辐射; 组织分析在 S-570 扫描电镜和 Philips-EM 420 透射电镜上进行。扫描电镜试样直接从挤压态和热处理态合金上截取, 砂纸打磨后, 机械抛光, 用 Keller's 试剂腐蚀试样; 透射电镜试样采用机械研磨及离子减薄法制备。

合金拉伸性能测试在 Graph2000 型万能电子拉伸试验机上进行, 主要测试合金室温及高温抗拉强度 σ_b 和延伸率 δ , 拉伸试样采用板状比例试样, 其标距

内尺寸为 $5\text{mm} \times 1.5\text{mm}$, 标距长 15.5mm 。

2 试验结果及分析

2.1 X 射线衍射分析

图 1 所示为挤压态及热处理态合金 X 射线衍射结果, 为了便于比较, 同时列出相同成分铸态合金 X 射线衍射结果, 可以看出三种状态合金衍射线曲线基本相似, 组织中能鉴定出的相主要有 Al, Si, Al_5FeSi , $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$, $\text{Al}_4\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_7$ 等。

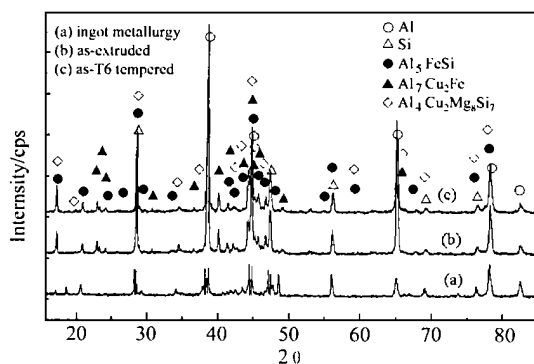


图 1 合金在不同状态 X 射线衍射曲线

Fig. 1 X ray diffraction patterns of the alloy in the different states

相对铸态合金而言, 挤压及热处理态合金基体相

衍射峰发生一定程度的宽化。分析认为两种状态合金基体衍射峰宽化是由基体晶格畸变引起的^[2], 造成基体晶格畸变主要有三方面原因: 过饱和固溶原子; Si 相和基体之间热膨胀系数的差异; 合金在热挤压过程中所受的严重变形^[10]。与挤压态合金相比, 合金经 T6 处理后基体衍射峰宽化程度有所减弱, 原因在于经 T6 处理后, 基体中一些固溶原子进一步脱溶析出, 在热作用下残余应力得以释放以及合金发生一定程度的回复再结晶作用, 因此使基体晶格畸变得一定程度松弛, 反应在衍射峰上则表现为峰宽化程度有一定程度减弱。

2.2 合金微观组织分析

图 2 为铸态、挤压态及 T6 处理态合金组织扫描电镜照片, 表明三种状态合金组织存在明显不同。在铸态下, 有大量粗大多角块和针片状第二相分布于基体, 这些块状相主要为初晶 Si 相, 针片状相为含 Fe 金属间化合物相; 利用快速凝固技术制备的合金, 其组织相对于铸态合金而言第二相尺寸明显被细化, 基本特征为基体组织上分布有大量细小弥散颗粒相, 由于其尺寸太小, 因此无法用能谱鉴定其成分组成。

比较图 2b, c 发现合金经 T6 处理后, 颗粒相平均尺寸有所增大, 而且一些尺寸非常小的颗粒相溶解消失。分析认为合金组织中第二相经 T6 处理后发生了一定程度的粗化, 这种粗化一般通过两种方式进

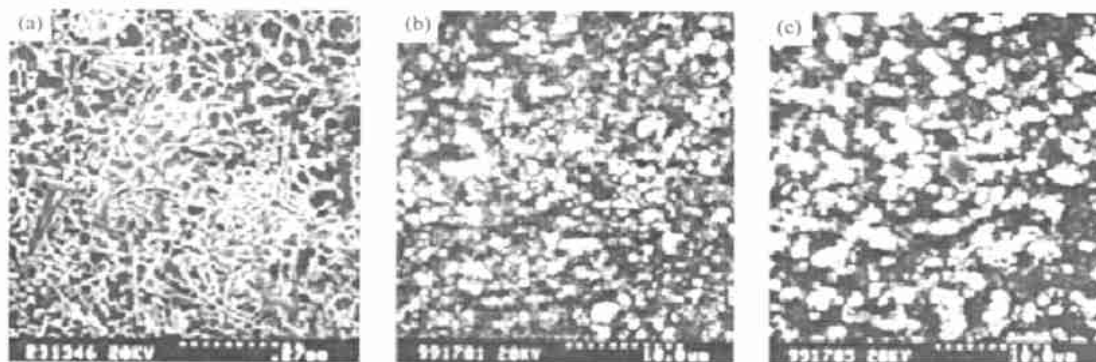


图 2 不同状态合金微观组织 (SEM) (a) 铸态; (b) 挤压; (c) T6 处理态

Fig. 2 Microstructures of the alloy in the different states (SEM) (a) ingot metallurgy; (b) extruded; (c) T6 tempered

行^[12]。第一种方式是通过 Oswald 粗化机制进行, 合金组织中一些小颗粒相由于比表面积较大, 具有较高的表面能, 处于一种不稳定状态, 因此在 T6 处理受热过程中为释放剩余的表面能将重新溶解于基体, 引起此处合金组元在基体中溶解度较高, 而一些尺寸比较大的颗粒相, 其比表面积较小, 相对比较稳定, 不易溶解, 其周围合金组元在基体中溶解度较低, 因此从原来小颗粒位置到大颗粒位置形成一个浓度梯度, 这

将促使溶质原子在浓度梯度作用下向大颗粒方向扩散, 并在大颗粒表面沉淀析出, 使其尺寸变大, 降低表面能, 进一步趋向稳定化。总的结果是小颗粒溶解消失, 大颗粒发生粗化, 颗粒总数减小, 颗粒平均尺寸变大。另外一种粗化方式是通过颗粒的相互粘连而进行的, 以这种方式长大的颗粒一般要满足两个基本条件, 首先它本身的尺寸相对较大, 其次相互粘连的颗粒必须充分接近。只有这样才能使溶解于基体的溶

质原子在它们表面沉积, 添充它们间的间隙, 从而使两个或多个颗粒相互连接形成一个更大的颗粒。以这种方式长大的情况也在图 2c 中有所反映。

为了更进一步了解这些第二相颗粒真实形态, 利用透射电镜对挤压态和 T6 处理态合金组织进行研

究, 结果如图 3 所示。从中可以看出两种状态合金组织中第二相形态基本相似, 主要以块状、棒状、鹅卵石状及大小不同颗粒状等形式存在, 但是经 T6 处理后第二相尺寸明显增大, 与前述扫描电镜组织分析结果相符。

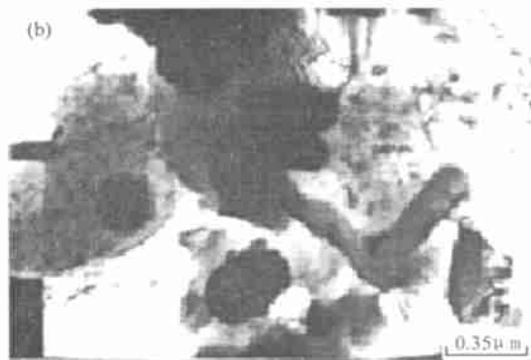


图 3 快速凝固合金透射显微组织 (a) 挤压态; (b) T6 处理态

Fig. 3 TEM micrograph of the rapidly solidified alloy (a) as-extruded; (b) T6 tempered

此外合金经 T6 处理后在基体上会沉淀析出一种细小针状相, 而且在基体上呈一定方向性分布, 因此可以推断这种相与基体保持某种的共格或半共格位向关系, 其形态如图 4 所示。由于它的尺寸太细, 无法用能谱和选区衍射分析其成分组成和相结构, 一般认为在快速凝固 Al-Si-Fe-Cu-Mg 合金中, 由于 Fe 元素的加入形成了热稳定性很好的含 Fe 金属间化合物消耗了大量的 Cu, Mg 元素, 因此经 T6 处理不会再沉淀析出其它新相^[9], 但在本文研究中发现这种合金经 T6 处理也有新物质形成, 因此认为这类合金的时效特性与传统 Al-Si-Cu-Mg 合金有相似之处。

延伸率随温度变化的曲线。可以看出在室温, 两状态合金都具有较高的强度水平, 挤压态合金强度约 450MPa, 经 T6 处理后合金强度有一定程度的提高, 接近 500MPa, 这种强度水平在传统铸造铝合金中是根本无法达到的 (如传统铸造铝合金 ZL117 室温强度仅约为 250MPa)。但是合金室温延伸率很低, 两种状态合金仅约 1% 左右, 与传统铸造铝合金相当。

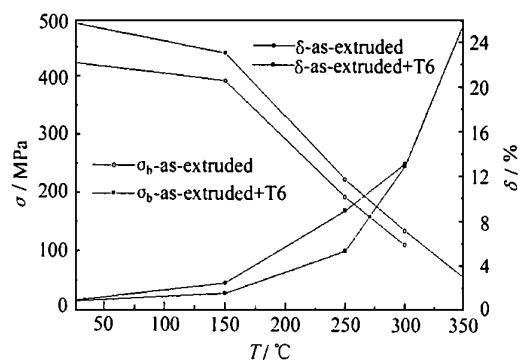


图 5 合金抗拉强度和延伸率随温度变化曲线

Fig. 5 Variation of ultimate tensile strength and elongation of the alloy with temperature

随着试验温度的升高, 两种状态合金强度都有下降趋势, 延伸率存在相反的变化。但在 150 °C 以内这种变化比较缓慢, 超过 150 °C, 变化特别明显。尽管如此, 两种状态合金在 300 °C 仍就能保持一定的强度水平, 分别达 110MPa 和 140MPa, 延伸率接近 13%。而对于传统铸造铝合金来说在如此高的温度下材料的强



图 4 T6 处理后基体上析出的针状相

Fig. 4 The needle shape phase precipitated from the matrix of the T6 tempered alloy

2.2 合金拉伸性能

图 5 所示为两种状态快速凝固合金抗拉强度和

度几乎完全消失。这主要是合金中存在大量含 Fe 金属间化合物的作用,但是试验温度太高,这些含 Fe 金属间化合物也会发生粗化或溶解,失去了对合金的强化作用,因此温度较高时合金强度有一定程度下降,特别是在温度超过 300 时,合金的强度下降到一个很低的水平,比如 T6 处理合金在 350 抗拉强度仅为 50MPa 左右。

3 结论

(1) X 射线相分析表明,快凝 Al-17Si-6Fe-4.5Cu-0.5Mg 合金的挤压态和 T6 态组织主要由 Al, Si, Al₃FeSi, Al₇Cu₂Fe, Al₄Cu₂Mg₈Si₇ 等相组成,相对于铸态合金,基体衍射峰有一定程度宽化,经 T6 处理衍射峰宽化程度有所减弱。

(2) 在扫描电镜下对合金组织进行观察发现,两种状态快凝合金组织特点为基体上分布有大量细小弥散第二相颗粒,经 T6 处理态后这些第二相颗粒有所粗化;在透射电镜下观察,这些颗粒相表现出块状、棒状、鹅卵石状及大小不同的颗粒状等形态特征;相对于挤压态, T6 处理后合金组织除了第二相颗粒有所长大外,还沉淀析出一种在基体上呈一定方向性分布细小针状相,从它的这种分布特征判断这种相与基体保持一定共格或半共格位向关系。

(3) 两种状态快凝合金都具有较高的强度水平,但延伸率并不占优势;相对于挤压态, T6 处理后,合金强度有一定程度升高;随着温度的升高,两状态合金强度都有下降趋势,但在不低于 300 的温度时,合金仍就保持一定的强度水平。

参考文献

- [1] N Amano, Y Odani and Y Takeda. MPR, 1985, 11: 642.
- [2] I Yamauchi, I Ohnaka, S Kawamoto and T Fukusako. Mater Trans JIM, 1986, 27: 187.
- [3] I Yamauchi, I Ohnaka, S Kawamoto and T Fukusako. Mater Trans JIM, 1986, 27: 195.
- [4] N Amano, Y Odani, Y Takeda and K Akechi. MPR, 1989, 3: 186.
- [5] J Zhou, J Duszczyk and M Korevaar. J Mater Sci, 1990, 8: 91.
- [6] P Todeschini, G Champier and F H Samuel. J Mater Sci, 1992, 27: 3539.
- [7] J L Estrada and J Duszczyk. J Mater Sci, 1990, 25: 886.
- [8] J Zhou, J Duszczyk and M Korevaar. J Mater Sci, 1991, 26: 824.
- [9] J Zhou, J Duszczyk and M Korevaar. J Mater Sci, 1991, 26: 3041.
- [10] J Zhou, J Duszczyk and M Korevaar. J Mater Sci, 1992, 27: 3856.
- [11] R M Gomes, T Satot, H Tezuka and A Kamio. Mater Trans JIM, 1998, 39: 357.

- [12] R M Gomes, T Satot and A Kamio. Light Metal, 1997, 47: 90.
- [13] T S Kim, S J Hong, W T Kim and C W Won. 1998 PM World Congress Light Alloys, 1998: 319.
- [14] T S Kim, S J Hong, W T Kim and C W Won etc. Mater Trans JIM, 1998, 39: 1214.

基金项目: 哈尔滨工业大学“百名英才”杰出青年学术带头人基金项目

收稿日期: 2000-09-13; 修订日期: 2001-04-15

作者简介: 孙剑飞 (1962-), 男, 博士, 副教授, 目前主要从事快速凝固微晶及非晶材料方面的研究工作, 联系地址: 哈尔滨工业大学 434 信箱 (150001)

* * * * *

(上接第 24 页)

参考文献

- [1] S Kajiwar. Characteristic feature of shape memory effect and related transformation behavior in Fe-based alloys [J]. Materials Science and Engineering, 1999, A 273-275: 67-68.
- [2] T W Duering. Application of shape memory [J]. Materials Science Forum, 1990, 156-58: 679-692.
- [3] H Tanahashi, T Maruyama and H Kubo. Applications of Fe-Mn-Si Alloy for Pipe Joints [J]. Trans Mat Res Soc Jpn, 1994, 18B: 1149-1154.
- [4] 王四根, 王绪, 花礼先. Fe-Mn-Si 形状记忆合金管接头研究 [J]. 金属热处理, 1997, (8): 8-9.
- [5] K Nagaya, Y Hirata. Analysis of a Coupling Made of Shape Memory Alloy and Its Dynamic Response Due to Impacts [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1992, 114: 297-304.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59801005)

收稿日期: 2000-10-28; 修订日期: 2001-06-26

作者简介: 林成新 (1963-), 男, 副教授 (博士生), 主要研究方向为机械设计、形状记忆合金及应用。已发表论文 20 余篇, 出版书籍 10 部, 获河北省科技进步一等奖一项、专利 2 项、鉴定成果 2 项, 联系地址: 天津市河北工业大学 56[#] (300130)

* * * * *

(上接第 34 页)

- [9] C Wolden, S Mitra, K K Gleason. J Appl Phys, 1992, 72 (8): 375-3758: 3750-3758.
- [10] 崔景彪, 马玉蓉, 方容川. 高压物理学报, 1996, 10 (2): 151-156.
- [11] 周灵平, 靳九成, 李绍禄等. 人工晶体学报, 1998, 27 (2): 126-131.
- [12] Ju J H, Mo Y W, Huang X Q, Xia Y B. Journal of Shanghai University, 1998, 2 (4): 337-341.
- [13] J Yu, R F Huang, L Sh Wen, Ch X Shi, Mater Sci Eng (B), 1999, 57: 255-258.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59976038)。

收稿日期: 2000-11-28; 修订日期: 2001-03-09

作者简介: 戚学贵 (1976-), 男, 博士研究生, 联系地址: 安徽合肥中国科学技术大学 323-135 室 (230026)。