

采用铸造法和粉末冶金法制备的 Al-Si-Cu-Mg 合金组织和力学性能的研究

陈静¹, 叶珍², 陈玖新², 徐连弟², 马朝利¹, 徐聪¹

(1. 北京航空航天大学 材料科学与工程学院 空天先进材料与服役教育部重点实验室, 北京 100191; 2. 保定市立中车轮制造有限公司, 河北 保定 071000)

摘要:采用铸造法和粉末冶金法制备了 Al-7.0Si-1.6Cu-0.45Mg 合金, 利用 SEM、XRD、万能电子拉伸试验机对不同工艺制备的合金显微组织、力学性能及断口进行了检测分析, 研究了不同制备工艺对铝硅合金组织和力学性能的影响。结果表明: 粉末冶金制备的铝硅合金中, 硅颗粒尺寸最小。对铸造合金进行热处理后, 共晶硅形貌逐渐由针状转变为球状。热挤压对铸造合金有良好的细化作用。铝硅合金组织有 α -Al 相、Si 相、Q (Al₅Cu₂Mg₉Si₆) 相和 θ (Al₂Cu) 相。与粉末冶金相比, 采用铸造法制备的铝硅合金伸长率显著增大。热处理可以提高铸造合金的强度, 但是单一热挤压工艺对改善铸造合金的力学性能没有明显的效果。

关键词: 铝硅合金; 铸造; 粉末冶金; 共晶硅; 力学性能

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2017.17.013

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2017)17-0055-04

Study on Microstructure and Mechanical Properties of Al-Si-Cu-Mg Alloy Prepared by Casting and Powder Metallurgy

CHEN Jing¹, YE Zhen², CHEN Jiuxin², XU Liandi², MA Chaoli¹, XU Cong¹

(1. Key Laboratory of Aerospace Advanced Materials and Performance, Ministry of Education, School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. Baoding Lizhong Wheel Manufacturing Co., Ltd., Baoding 071000, China)

Abstract: Al-7.0Si-1.6Cu-0.45Mg alloy was prepared by using casting and powder metallurgy, and the microstructure, mechanical properties and fracture of the alloys prepared by different processes were tested and analyzed by using SEM, XRD and universal electronic tensile testing machine. The results show that the size of silicon particles in Al-Si alloy prepared by powder metallurgy is the smallest. After the alloy is treated by heat treatment, the morphology of eutectic silicon gradually transforms from needle to spherical. Hot extrusion has good refining effect on the cast alloy. The Al-Si alloy consists of α -Al, Si phase, Q (Al₅Cu₂Mg₉Si₆) and θ (Al₂Cu) phases. Compared with powder metallurgy, the elongation of Al-Si alloy prepared by casting method is obviously improved. Heat treatment can greatly improve the strength of the cast alloy, but the single hot extrusion process has no obvious effect on improving mechanical properties of the cast alloy.

Key words: Al-Si alloy; casting; powder metallurgy; eutectic silicon; mechanical properties

铝硅合金具有优异的铸造性、可焊性、耐腐蚀性等一系列特点, 在汽车和航空航天等领域具有广阔的应用前景^[1]。共晶硅的尺寸、分布和形态对其力学性

能有重要的影响^[2-3]。一般认为, 具有高形状因子的粗大针状共晶硅会割裂铝基体, 恶化铝硅合金的性能。因此研究者提出了各种改性技术来改变共晶硅的形态和分布。热挤压^[4-5]作为一种被广泛应用于锻造铝合金和铝基复合材料的常规热加工工艺, 可以有效地细化晶粒、减少铸件缺陷。然而, 到目前为止, 关于对铸造铝硅合金进行热挤压的报道非常少。

传统的粉末冶金 (powder metallurgy, P/M) 工艺包括机械球磨、热压烧结和二次加工 (挤压、锻造等) 等工艺过程^[6]。粉末冶金工艺不仅可以获得致密的材料, 同时可满足材料结构性能的需求, 也可以不用

收稿日期: 2017-06-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51671007, 51671012, 51401010); 国家 863 项目 (2013AA031001); 国际科技合作项目 (2015DF A51430, 2013DFB70200)

作者简介: 陈静 (1985-), 女, 陕西渭南人, 博士, 研究方向: 轻质结构材料; 电话: 010-82319772; E-mail: jdy_jing@163.com

通讯作者: 徐聪 (1982-), 男, 河南许昌人, 博士, 研究方向: 轻合金材料; 电话: 010-82339772; E-mail: congxu@buaa.edu.cn

在烧结后进行塑性加工,而直接进行高温塑性加工,在致密化的同时达到最终成形的目的。在粉末冶金过程中,通过高能机械球磨可以实现亚微米级乃至纳米颗粒的均匀混合,并有效细化晶粒^[7]。热压烧结是将处理后的混粉装入模具,从单轴方向边加压边加热,使成型和烧结同时完成的一种烧结方式。常用的二次加工方法有挤压、锻造、轧制等。其中,热挤压工艺可以有效破碎粉末颗粒表面的氧化膜,改善界面结合和增加颗粒的分散状况,从而大幅度提高材料的强度和塑性。本文分别采用铸造法和粉末冶金法制备了 Al-7.0Si-1.6Cu-0.45Mg 合金,利用 SEM、XRD、万能电子拉伸试验机对不同工艺所制备的材料微观组织、力学性能及断口进行了检测分析,研究了不同制备工艺对铝硅合金组织和力学性能的影响。

1 试验方法

1.1 铸造 Al-Si-Cu-Mg 合金的制备方法

为制备 Al-7.0Si-1.6Cu-0.45Mg 铸造合金,首先将工业 A356 合金 (Al-7.1Si-0.46Mg-0.03Fe) 和 99.99%Cu (质量分数,下同) 先后放入电阻炉熔化,熔炼温度为 720℃,保温时间为 20min。使用 0.5% 的 C₂Cl₆ 精炼熔体,并且在 0.2MPa 下以 1.8L/min 的恒定流速用纯氩气进行脱气。然后倒入约 200℃ 的预热金属模具中。对铸造制备的部分样品进行热挤压,其中用于热挤压的圆柱状样品直径为 23mm,高为 20mm。将圆柱状样品装入挤压模具中,保证挤压模具的挤压比为 10。样品与模具接触部位使用石墨作为润滑剂,最后放入真空热压烧结炉中,在 450℃ 下热挤压。最后将挤出成形的部分样品进行 T6 热处理,T6 热处理工艺为 515℃ 固溶 8h,80℃ 水中淬火,然后 160℃ 时效 6h。

1.2 粉末冶金 Al-Si-Cu-Mg 合金的制备方法

以工业 Al-11.6Si 合金、纯 Al 和纯 Cu (99.99%) 粉末作为原始材料,基于 Al-7.0Si-1.6Cu-0.45Mg 合金的组成,按照相应的比例将上述粉末混合在一起。然后采用 Fritsch P5 行星式球磨机对混合粉末进行球磨,球磨参数如下:使用 SUS304 不锈钢作为球磨介质,球料比为 10:1,转速为 300 r/min,球磨时间 24 h,同时使用氩气对工作腔体进行保护。此外,为了抑制球磨过程中粉末与球磨介质之间的冷焊作用,添加了质量分数为 2% 的硬脂酸 (CH₃(CH₂)₁₆COOH) 作为过程控制剂。

将球磨后的粉末装入内径 23mm 的高强耐热不锈钢模具中进行真空热压烧结。烧结成型工艺参数如下:烧结温度为 450℃,烧结压力为 400MPa,保温保压时间为 30min。热挤压的挤压比为 10,挤出温度为 450℃,采用石墨作为润滑剂。最后获得直径为 7mm,长度约为 100mm 的圆棒状试样。为表述方便,根据试样的制备工艺对其进行命名,如表 1 所示。

表 1 不同试样制备工艺对应的名称
Tab.1 Labels corresponding to preparation processes of different samples

样品名称	制备工艺
P/M	粉末冶金
Cast	铸造
Cast-HE	铸造 + 热挤压
Cast-HT	铸造 + 热处理
Cast-HE-HT	铸造 + 热挤压 + 热处理

1.3 显微结构和力学性能分析

对组织观察试样采用 Keller 试剂 (95vol% H₂O, 2.5vol% HNO₃, 1.5vol% HCl 和 1vol% HF) 腐蚀 15s。采用 Carl Zeiss EVO18 扫描电镜 (SEM) 对腐蚀后的样品进行观察。合金的相组成采用 RIGAKU RINT-2000X 射线衍射仪 (XRD) 进行分析。采用 Instron 8801 型万能电子试验机对材料进行室温拉伸。根据美国材料和试验协会标准 (ASTM E8), 拉伸试样采用的是标距为 18mm, 横截面直径为 3mm 的骨状拉伸试样, 拉伸速率为 0.2mm/min。

2 结果与讨论

不同工艺制备的铝硅合金的显微组织如图 1 所示。在铝硅合金中共晶硅的尺寸及形貌对材料的力学性能有重要的影响。基于文献[5]中报道的方法,表 2 统计出了不同工艺制备的铝硅合金的共晶硅颗粒性质。粉末冶金制备的合金中,硅颗粒以针状或板状形貌存在。但是与铸造合金相比,其硅颗粒的尺寸相对较小。一方面是由于粉末冶金的烧结温度低于铸造法的加工温度,从而抑制了硅颗粒长大,且在粉末冶金过程中,相邻的粉末互相抑制生长导致晶粒细化。另一方面是因为粉末冶金的最高温度为 450℃,而铝硅合金的共晶温度为 577℃^[8],因此 Si 颗粒在合金中仍保持固态,难以长大。在铸造铝硅合金中,共晶硅相互连接难以区分,如图 1(b)所示,所以该样品的数据没有列于表 2 中。对铸造合金进行

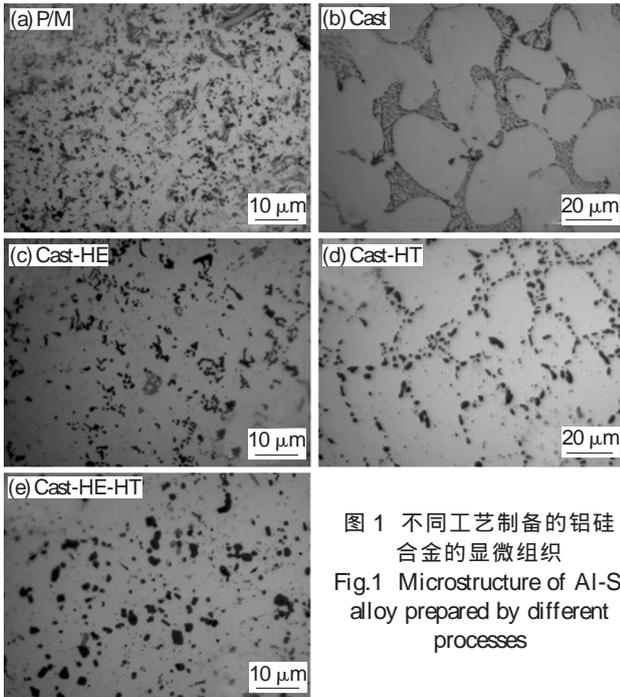


图1 不同工艺制备的铝硅合金的显微组织
Fig.1 Microstructure of Al-Si alloy prepared by different processes

表2 不同工艺制备的铝硅合金的共晶硅颗粒性质
Tab.2 Characteristics of eutectic silicon particles in Al-Si alloy prepared with different processes

样品	颗粒直径/ μm	形状因子	长宽比
P/M	1.28	1.72	1.03
Cast-HE	1.68	2.05	1.68
Cast-HT	2.77	1.41	2.17
Cast-HE-HT	1.65	1.27	0.91

热处理后，共晶硅的形貌发生了明显的改善（图1(d)）。对于铸造合金，热处理是改善其性能的关键工艺，一方面可以形成固溶体提高材料的强度，另一方面可以改善共晶硅组织的尺寸、形貌及分布等，研究表明，共晶硅组织的球化可以极大提高合金的抗拉性能和伸长率，同时对合金的屈服强度也会产生影响。对铸造铝硅合金进行热挤压，共晶硅的尺寸减小（图1(c)）。根据共晶硅的细化机制，合金在变形过程中基体和共晶硅之间的应变差异会导致共晶硅周围发生局部塑性变形，当变形达到临界应变时裂纹萌生，最终导致共晶硅破碎。此外，对铸造合金同时进行热挤压和热处理后（图1(e)），合金中共晶硅的形状因子和长宽比最小。

不同工艺制备的铝硅合金的XRD图谱如图2所示，从图中可以看出，粉末冶金法制备的铝硅合金中硅相的衍射强度高于铸造合金的硅相强度。这是因为在粉末冶金过程中，粉末和模具会发生摩擦导致样品中形成织构，进而提高XRD的衍射强度。对

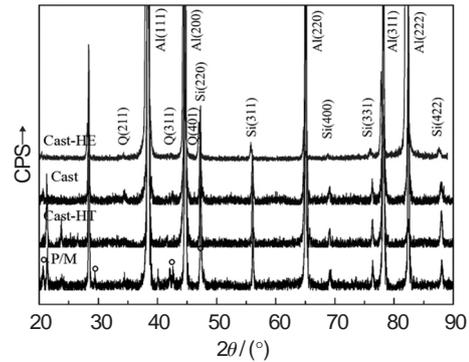


图2 不同工艺制备的铝硅合金的XRD图谱
Fig.2 XRD spectra of Al-Si alloys prepared by different processes

铸造合金进行热处理后，硅相强度显著提高，这可能是热处理导致共晶硅球化引起的。此外在铝硅合金中除了 $\alpha\text{-Al}$ 相和Si相外，还含有 $Q(\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_6\text{Si}_6)$ 相和 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 相（图中圆圈所示）。

图3是不同工艺制备的铝硅合金的室温拉伸曲线。如图所示，不同的工艺制备方法对合金的强度和韧性有明显的影 响，其中铸造法制备的铝硅合金强度为255MPa，伸长率高达20%，比粉末冶金法制备的合金伸长率提高了194%。这主要是因为 在粉末冶金过程中，材料的制备温度低于铝硅合金的共晶温度，硅颗粒在合金中保持针状，针状的硅颗粒容易在变形期间诱发裂纹导致材料断裂。热处理可以显著提高铸造合金的强度。对铸造合金进行热处理后，合金的强度从255MPa提高到了330MPa，并且材料的伸长率没有降低，一方面是由于由于热处理过程析出 θ 相和Q相，这些析出相可以钉扎晶界、亚晶界和位错，从而提高合金的强度，另一方面热处 理工艺对铸造合金中的共晶硅具有球化效应，如对热挤压的铸造合金样品进行热处理后，使共晶硅的长宽比从1.68降至0.91，从而使材料的强度从211

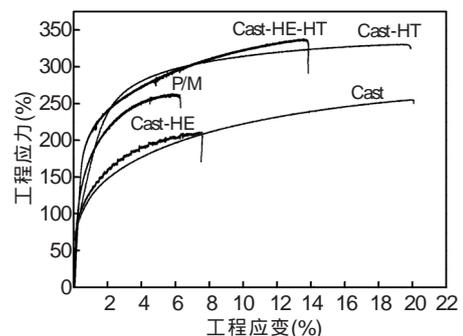


图3 不同工艺制备的铝硅合金的室温拉伸曲线
Fig.3 Tensile curves of Al-Si alloys prepared by different processes at room temperature

MPa 提高到了 338MPa, 并且伸长率也从 7.5% 提高到了 13.8%。但是与铸造合金相比, 对合金只进行热挤压, 合金的强度没有提高, 说明单一的热挤压工艺对改善铸造合金的力学性能没有明显的效果。

从宏观断口上看, 不同工艺制备的铝硅合金的拉伸断裂为韧性断裂。从微观上看, 其断口 SEM 形

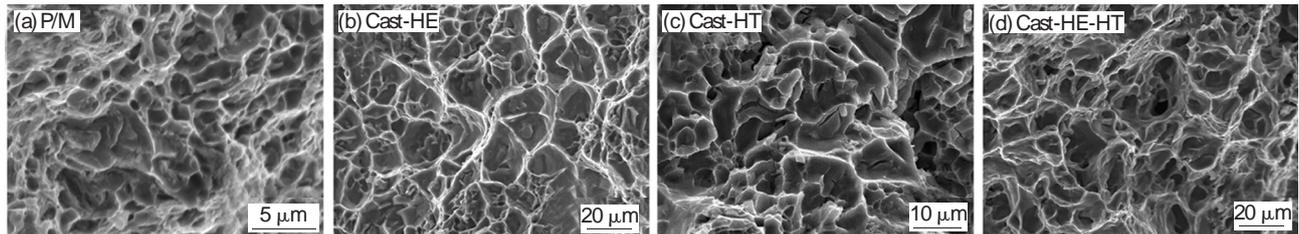


图 4 不同工艺制备的铝硅合金拉伸试样的断口 SEM 照片

Fig.4 SEM images of fracture of Al-Si alloy tensile specimens prepared by different processes

3 结论

(1) 采用粉末冶金法制备的合金中, 硅颗粒尺寸最小。对铸造合金进行热处理后, 共晶硅的形貌逐渐由针状向球状转变。

(2) 由铸造法和粉末冶金制备的铝硅合金中, 除了 α -Al 相和 Si 相外, 还含有 Q ($\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_9\text{Si}_6$) 相和 θ (Al_2Cu) 相。

(3) 采用铸造法制备的铝硅合金伸长率可达 20%, 比粉末冶金法制备的合金伸长率提高了 194%。单一热挤压工艺对改善铸造合金的力学性能没有明显的效果, 但是对铸造合金进行热处理可以显著提高材料的强度。

(上接第 54 页) 氢 TC4 钛合金与 TiAl 合金扩散焊接界面仍有孔洞存在。

(2) 同等工艺条件下, 置氢 0.5wt% 的 TC4/TiAl 的扩散焊接强度明显高于未置氢 TC4/TiAl 的扩散焊接强度。高温下, 置氢 0.5wt% 的 TC4 钛合金中氢气的逸出, 增加了扩散焊接接头界面附近的空位数量, 降低了原子间的扩散激活能, 促进了 Ti、Al 和 V 的扩散。

(3) 保温时间为 30 min 时, 置氢 0.5wt% 的 TC4/TiAl 的扩散焊接接头抗剪强度的平均值可达 290MPa, 且焊接接头抗剪强度随保温时间的增长而升高, 断口特征属于典型的脆性断裂, 界面处相组成为 TiAl、 Ti_3Al 、 TiAl_2 和 Ti_3Al_5 相。

参考文献:

[1] 柳笛, 张利军, 米磊, 等. TiAl 基合金的制备及研究现状[J]. 钛工业进展, 2014, 31(4): 11-15.

貌如图 4 所示。在样品的断裂表面可以清晰地看到很多韧窝, 不同尺寸的韧窝表明材料具有不同的塑性变形能力。显然, 通过铸造法制备的铝硅合金具有更好的塑性。通过粉末冶金法制备的铝硅合金断裂表面的韧窝最浅, 为 $2\mu\text{m}$, 这与其较差的抗拉强度相一致。

参考文献:

- [1] 冯鹏飞, 唐靖林. 铸造铝合金精炼技术现状及发展 [J]. 热加工工艺, 2005, 34(1): 58-61.
- [2] 梁济, 蔡惠民. 改变共晶硅形态的研究 [J]. 热加工工艺, 1992, 21(3): 35-37.
- [3] 古秀莲. 共晶铝硅合金的变质处理 [J]. 铝加工, 1998, 21(5): 1-2.
- [4] 刘静安. Al-Mg-Si 系合金的热加工工艺与可挤压性 [J]. 铝加工, 2002, 25(1): 1-4.
- [5] 刘静安. 热加工工艺对 Al-Mg-Si 系合金型材性能的影响 [J]. 轻合金加工技术, 2002, 30(2): 1-5.
- [6] 刘静安. 热加工工艺对 Al-Mg-Si 系合金型材性能的影响 [J]. 轻合金加工技术, 2002, 30(2): 1-5.
- [7] 杨圣品, 施雨湘. 高能球磨法制备金属微粉的研究 [J]. 焊接技术, 2002, 31(3): 43-44.
- [8] 杨启杰, 苏广才, 王文超. 改良铸造铝硅合金复合变质处理的研究 [J]. 热加工工艺, 2010, 39(11): 40-43.
- [2] Chen G Q, Zhang B G, He J S. Effect of cooling rate on the microstructure of electron beam welded joints of two-phase TiAl-based alloy [J]. China Welding, 2007, 12(2): 11-14.
- [3] Pramanik A. Problems and solutions in machining of titanium alloys [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70(5-8): 919-928.
- [4] 陈思杰, 朱春莉. 钛及钛合金先进连接技术研究 [J]. 热加工工艺, 2015, 44(3): 18-21.
- [5] Cao J, Liu J K, Song X G, et al. Diffusion bonding of TiAl intermetallic and Ti_3AlC_2 ceramic: interfacial microstructure and joining properties [J]. Materials Design, 2014, 56: 115-121.
- [6] Zou G S, Xie E H, Bai H L. A study on transient liquid phase diffusion bonding of Ti-22Al-25Nb alloy [J]. Materials Science & Engineering A, 2009, 499(1): 101-105.
- [7] 王义峰, 曹健, 宋晓国, 等. 置氢 TC4 钛合金与 Al_2O_3 陶瓷扩散焊接工艺研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(3): 598-602.
- [8] 罗致春, 王秀峰, 刘学斌. γ 基 TiAl 合金与异种合金扩散焊接研究 [J]. 钛工业进展, 2006, 23(6): 20-23.