

基于 Ti 元素添加的 A356 铝合金 成型工艺影响分析

赵利平

(广东科技学院, 广东 东莞 523083)

摘 要: 基于 A356 铝合金固态成型工艺, 针对航空机器人的外壳 A356 铝合金进行加工设计, 添加钛元素可有效降低铁元素的含量, 富铁相的数量也得到有效控制, 复合材料中针状 β 富铁相逐渐转变为 α 富铁相, 同时富铁相的尺寸显著降低; 抗拉强度、屈服强度大幅提升, 塑性也有所增强。研究表明, 随着钛元素的增加, 合金的晶粒得到了明显的细化, 当超过一定值时, 细化效果明显下降, 在进行半固态等温处理时, 富铁相的宽度和长度都随着温度的升高先增大后变小; 晶粒尺寸也随着温度的升高先减小后增大。随着等温时间的延长, 富铁相长度和宽度有所增大; 延长等温时间或添加细化剂, 未熔初生相的球化呈现明显趋势。

关键词: A356 铝合金; 成型工艺; Ti; 富铁相

中图分类号: TF821 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2020)03-0156-05

DOI: 10.7531/j.issn.1004-7638.2020.03.027

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Influence Analysis of A356 Aluminum Alloy Forming Process Based on Ti Element

Zhao Liping

(Guangdong University of Science and Technology, Dongguan 523083, Guangdong, China)

Abstract: In view of the aluminum alloy is good process performance, based on the research, on the basis of A356 aluminum alloy solid forming for air processing for the A356 aluminum alloy shell of the robot design, adding titanium can effectively reduce the content of iron, to effectively control the number of iron-rich phase, acicular beta iron-rich phase in the composites gradually transformed into Chinese characters shape alpha iron-rich phase, at the same time, the size of the iron-rich phase decreased significantly; Tensile strength, yield strength increased significantly, plastic also increased. The results show that, with the increase of titanium element, the grain size of the alloy is obviously refined, and when it exceeds a certain value, the refining effect is obviously decreased. In the semi-solid isothermal treatment, the width and length of the iron-rich phase increase first and then decrease with the increase of temperature. The grain size also decreases first and then increases with the increase of temperature. With the extension of isothermal time, the length and width of the iron-rich phase increase. The spheroidization of the unmelted primary phase showed an obvious trend when the isothermal time was prolonged or the refiner was added.

Key words: A356 aluminum alloy, molding process, Ti, iron-rich phase

收稿日期: 2019-05-10

基金项目: 广东科技学院自然科学类一般项目(项目编号: GKY-2019KYYB-19)。

作者简介: 赵利平(1982—), 男, 汉族, 湖南衡阳人, 讲师, 研究方向: 材料成型工艺。E-mail: zhqian668@163.com。

0 引言

具有优良铸造性能和力学性能的Al-Si合金广泛应用于汽车工业和航空航天领域,铁元素作为一种杂质元素难以避免对合金的性能产生较大的危害。为了实现高性能,合金中对铁元素的含量控制得非常严格,这导致该合金的成本大幅上升,难以广泛使用。因此采用先进工艺提高Al-Si合金对铁杂质的允许含量成为研究的热点。有研究^[1]表明,Ti元素对于铝合金性能的改善有较大帮助。半固态金属加工技术是近年来全世界范围内竞相开展研究与开发的一项金属加工技术,主要采用触变成形工艺,该工艺包括半固态坯料的制备、二次加热和触变成形三个工艺环节。不仅如此,江福林等人^[2]研究发现,Ti的加入使得铝合金的断裂机制由脆性断裂转变为韧性断裂,且他们还研究逐渐通过改善形核与长大过程来改善合金组织。Sergio^[3]发现,在添加0.025%的Al5TiB后,复合材料中富铁相的晶粒尺寸明显降低。除了常用的固、液态成形方法外,半固态加工方法也作为一种新的金属成形方法,有着固溶共存、粘度相对液态较高、固相粒子无结合力等特殊的性质,在汽车零部件制造等领域有着广泛的应用。

半固态坯料原始组织晶粒尺寸对半固态浆料中固相颗粒尺寸大小有重要影响,因此,研究者在开发半固态浆料制备技术的进程中一直不断寻求获得细晶组织。国内外少数学者采用金属型重力铸造与Ti细化工艺相结合,利用光学显微镜、拉伸机、深腐蚀、半固态等温处理等手段研究Al-Si合金中富铁相的成型方法。笔者主要开展了Ti含量对富铁相、晶粒以及力学性能的影响,以及等温时间和等温温度对富铁相的改善和对晶粒尺寸的影响研究,全面开展了对金属型铸造A356合金中富铁相的形成特点及其力学性能的研究。

1 试验材料及准备

1.1 试验设备和方法

为了得到试验所需的金属样品,需要对相关材料进行熔炼,制备所需铝合金。由于本次熔炼的是铝合金,熔点在660℃左右,所以熔炼设备选用最高温度为1000℃的坩埚熔化电阻炉进行加热熔炼^[4-6],设备灵敏度 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。

1.2 试验材料

试验中主要通过添加Ti元素对 β -Fe富铁相进

行中和变质,从而降低富铁相的危害,需要对添加不同含量的Ti对合金性能的影响进行分析,从而确定最佳的优化方案,因此以0.2%Ti为例进行配料计算。配制含0.2%Ti合金Al-7Si-0.3Mg-1Fe-0.2Ti,即A356铝合金的成分(质量分数)为:6.5%~7.5%Si、 $\leq 1\%$ Fe、0.30%~0.45%Mg、0.18%~0.22%Ti,余量为铝。此次熔炼没有回炉料,首先称量出重约505g的铝锭配制A356合金,通过计算所用中间合金的量分别为302.1g的Al-20Si、12.9g的Al-20Mg、86.3g的Al-10Fe、34.5g的Al-5Ti-B。类似地配制了0.5%Ti的铝合金。

1.3 试验准备

根据试验的实际需求,需要在一幅金属型模具中成型出两个部件,一个用于制作出观察金相所用的样品,另一个制作拉伸试样用于测试合金拉伸性能。金相观察所用样品使用简单的小铁套即可成型,拉伸试验设计的模具型腔三维造型如图1所示。根据所设计的试样结构制造出相应的金属型模具后即可在模具中进行浇注成型。成型过程中为便于脱模,所设计的金属型铸造模具可以在表面涂抹石墨机油,石墨机油为石墨粉与机油配制而成,两者都能起到润滑作用使得脱模简单^[7-8]。

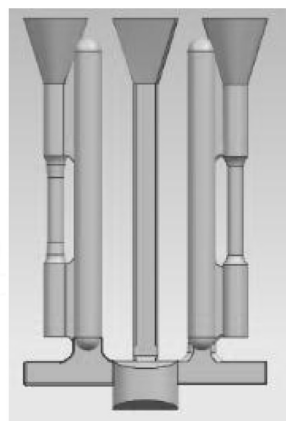


图1 模具型腔三维造型

Fig. 1 The picture of Mold cavity design and material object

测试力学性能的试样尺寸为大头直径为10mm,中间直径5mm,中间长度为100mm,试样总长为200mm。使用拉伸机对5根试样进行试验取其结果平均值。

根据试验条件等综合考虑,使用触变成形加工,大致流程为将前期铸造出的金属样品在电阻炉中重

新加热到合金的半固态区,达到设定温度后迅速冷却,即可得到半固态金属坯料。为了进行比较分析,加热温度控制在 570、580 ℃ 和 590、600 ℃ 几个不同温度,设定好温度后分别在各个温度对样品保温 30、60、90 min。

2 金相组织测试及分析

2.1 金相组织

为判断分析 Ti 含量以及半固态等温处理对合金成形性能、机加工性能等各方面性能的影响,通过光学显微镜拍摄出不同 Ti 含量铸态 A356 合金的显微组织(见图 2),对同一样品选取约 5~10 处视图。由图 2 可以看出,A356 合金中组织主要包括共晶 Si

和富铁相。由图 2(a)可以看出,铝合金内部富铁相 β 铁相(粗大的针状)的形态分布在共晶组织附近。这种形态对基体有一定的割裂作用,会造成组织的断裂,从而使组织的受力点聚集,这会使得铝合金的力学性能显著下降。

由图 2(b)可知,在合金中添加 0.2% 的 Ti 时,合金中的富铁相发生了较显著的变化,针状的富铁组织可明显看到被细化,变成较小的短棒状,在间隙间可以明显发现有部分 β 铁相转化成了 α 铁相。当合金中 Ti 元素增加到 0.5% 时,富铁相方面表现更加明显,基本所有结构转化成了短棒状,在长度方面锐减较大,针状富铁相变得更细,成块的富铁增多^[9-10]。

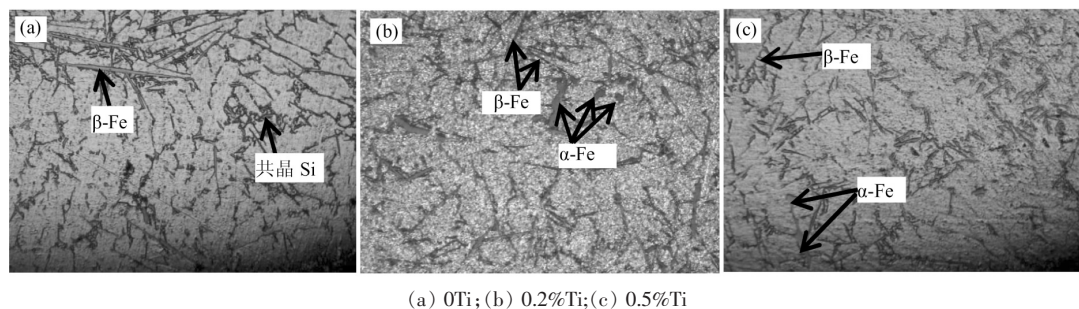


图 2 不同 Ti 含量下铸态显微组织

Fig. 2 Microstructure of as cast samples with different Ti contents

2.2 α (Al)晶粒尺寸

将拍摄的金相图在 Photoshop 中进行处理,用相机拍摄出晶粒的相关形貌,见图 3。

每图测出 α (Al)晶粒 20 处,然后计算平均值。通过晶粒图片可知,在铝合金中无添加剂时,晶粒大小相对一致,而且均匀分布。当含有 0.2% Ti 时,形成团絮状的晶粒聚集在一起,分布也较不均

匀。当 Ti 的含量增加为 0.5% 时,晶粒变细小,分布也变均匀。

无添加剂的铝合金,平均尺寸为 164.6 μm ,波动较小。加入 0.2% Ti 后,晶粒平均尺寸为 153.2 μm ,细化比较明显。当 Ti 元素的含量为 0.5% 时,晶粒尺寸减小较明显,波动幅度最小,这时晶粒的平均尺称为 112.9 μm ,晶粒尺称减小了 31.4%。

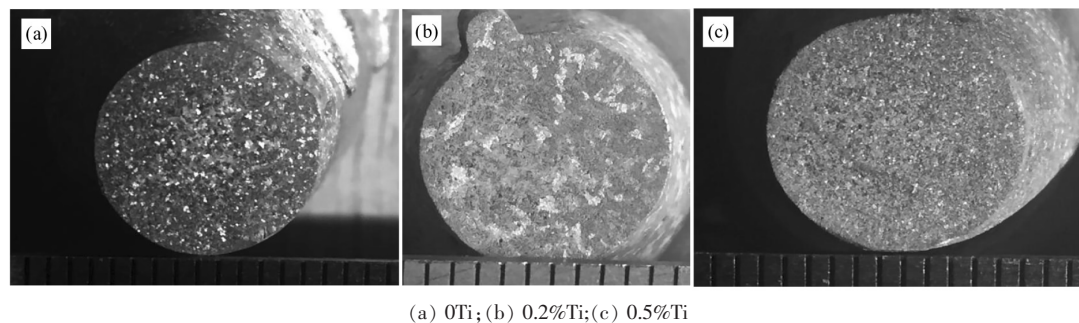


图 3 不同 Ti 含量下的晶粒直径

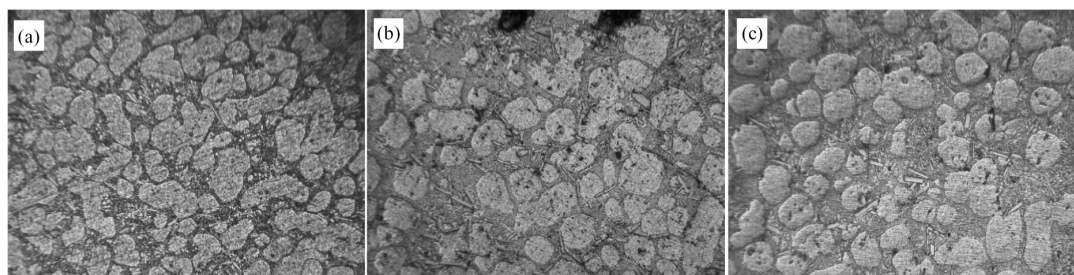
Fig. 3 The diameter of grain of samples with different Ti contents

2.3 半固态等温处理时间对合金金相组织的影响

设计等温处理时间分别为30、60、90 min,每一个温度拍摄5张照片,每张图选5处位置,分别测富铁相的宽度和长度,同时测量晶粒的尺寸,得到的金相组织如图4所示。由图4可知,等温处理时间越长,基体中的液相越多,固相也变得越圆整。等温处理30 min,富铁相长度由41.6 μm 增长为44.2 μm ;等温处理60 min,富铁相长度变为50.9 μm ,等温90

min后,富铁相尺寸增长到56.1 μm 。

通过测量的数据可知,在半固态等温处理之前,富铁相的宽度为1.26 μm ,等温处理30 min后,宽度增大为5.3 μm ;等温处理60 min,富铁相宽度增长为8.9 μm ;等温处理90 min,富铁相增长为9.2 μm 。随着等温时间增长,未熔初生相颗粒的平均尺寸减小较快,球化效果变好;经半固态等温处理后,合金中的共晶硅相及富铁相形貌都发生了较大变化。



(a)590 °C,30 min; (b)590 °C,60 min; (c)590 °C,90 min

图4 不同等温时间下半固态显微组织

Fig. 4 The microstructure of semi solid samples with different isothermal time

图5为不同Ti含量下的拉伸力学性能。由图5可知,合金的力学性能随着含Ti量的增加不断提高,但是增长的趋势变慢。未添加Ti元素的铝合金抗拉强度为168 MPa,屈服强度为129 MPa,延伸率为2.3%。当添加0.2% Ti,抗拉强度变为235 MPa,屈服强度变为203 MPa,延伸率变为3.1%,依次提高了39.9%,57.4%和34.8%。当Ti含量提高为0.5%时,抗拉强度升高为245 MPa,屈服强度升高为223 MPa,延伸率增长为3.9%,相对于无添加剂的铝合金,依次提高了45.8%,72.9%和43.5%。

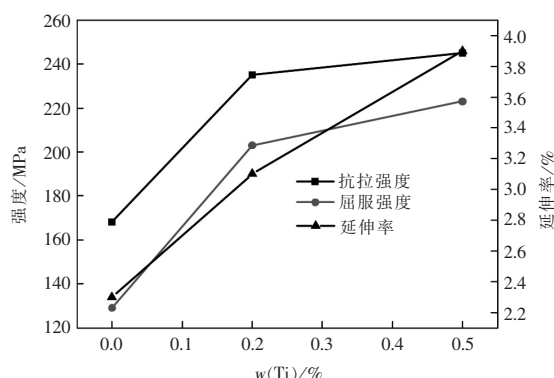


图5 不同Ti含量下拉伸力学性能

Fig. 5 Tensile mechanical properties of samples with different Ti contents

图6为不同等温温度下富铁相宽度和不同等温

温度下的晶粒尺寸。由图6可知,当等温温度从560 °C增加到570 °C时,富铁相的宽度没有明显变化,当等温温度由570 °C增长到590 °C时,富铁相宽度变大,当等温温度由590 °C增长为600 °C时,富铁相的宽度变小,晶粒整体尺寸变大。当等温温度从580 °C增加到590 °C时,晶粒整体尺寸变小。

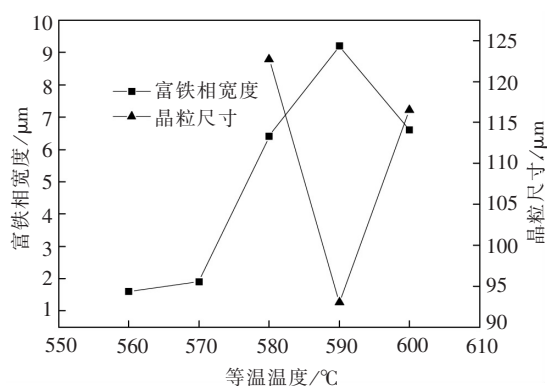
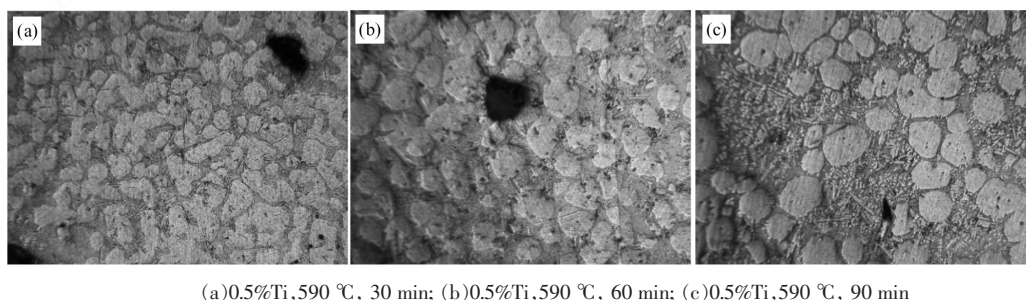


图6 不同等温温度下富铁相宽度和晶粒尺寸

Fig. 6 The width of Fe-rich phase and the size of grain in samples with different isothermal temperatures

由图7的显微组织可知,在加入0.5% Ti元素后进行等温处理,时间由30 min增长到90 min,富铁相的变化规律不明显,但晶粒尺寸明显下降,这也表明半固态等温处理的过程中,Ti元素也能够对晶粒进行细化。



(a)0.5%Ti, 590 °C, 30 min; (b)0.5%Ti, 590 °C, 60 min; (c)0.5%Ti, 590 °C, 90 min

图 7 加 Ti 后等温时间对显微组织的影响

Fig. 7 Influence of isothermal time on microstructure of sample with Ti addition

3 结论

1) 探究了 Ti 元素对 A356 铝合金中富铁相的影响关系, 通过金属型重力铸造得到试样, 在光学显微镜下观察其显微组织, 并在常温下测其相关力学性能, 研究 Ti 元素对铝合金的影响机理。同时对试样进行半固态等温处理, 探究不同等温温度和等温时间下添加 Ti 元素后微观组织的变化, 在无 Ti 元素添加剂的 A356 合金中, 富铁相以长针状 β 相的形式存在。Ti 元素的加入提高了 A356 合金的力学性能, 随着 Ti 含量的增加, A356 合金的力学性能在先上升后趋于平稳。

2) 在进行半固态等温处理时, 当等温时间一致, 温度由 560 °C 增长为 590 °C 时, 富铁相的宽度变大, 由 590 °C 增长为 600 °C 时, 富铁相宽度变小; 温度由 580 °C 变为 590 °C 时, 晶粒尺寸先变小, 当温度由 590 °C 变为 600 °C 时, 晶粒尺寸变大。所以富铁相的宽度和晶粒尺寸都在 590 °C 达到峰值。

3) 当等温温度一定时, 随着等温时间的延长, 富铁相的宽度和长度也有所增大, 但变化幅度不大; 晶粒尺寸有所减小, 变化不明显。

4) 从富铁相的改善情况、晶粒大小和球化的程度综合考虑, 最合理的工艺参数为: 等温温度 590 °C、添加 0.5% 的 Ti、等温时间 90 min。

参考文献

- [1] Song Mousheng, Liu Zhongxia, Li Jiwen, *et al.* Effect of titanium alloying manner and titanium content on microstructure and mechanical properties of A356 alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(10): 1729-1735. (宋谋胜, 刘忠侠, 李继文, 等. 加钛方式与钛含量对 A356 合金组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(10): 1729-1735.)
- [2] Jiang Fulin, Zhang Hui, Meng Xianna, *et al.* Effects of Ti addition on the microstructures and mechanical properties of the Al-Mn-Mg-RE alloy[J]. Materials & Design, 2014, 55(mar.): 280-285.
- [3] Sergio Haro Rodríguez, Reyes R E G, Dwivedi D K, *et al.* The effect of Al-5Ti-1B on microstructure and mechanical properties of Al-12Si-xFe alloy[J]. Advanced Manufacturing Processes, 2012, 27(6): 599-604.
- [4] Moustafa M A. Effect of iron content on the formation of β -Al5FeSi and porosity in Al-Si eutectic alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(1): 605-610.
- [5] Murty B S, Kori S A, Chakraborty M. Grain refinement of aluminum and its alloys by heterogeneous nucleation and alloying[J]. International Materials Reviews, 2002, 47(1): 3-29.
- [6] Evangelos Tzimas, Antonios Zavaliangos. Evolution of near-equiaxed microstructure in the semisolid state[J]. Materials Science & Engineering A, 2000, 289(1-2): 228-240.
- [7] Lü Xinyu, Yan Hong, Hu Zhi. Microstructure evolution of 7075 Al alloy during semi-solid isothermal heat treatment[J]. Material & Heat Treatment, 2011, 40(12): 145-148. (吕新雨, 闫洪, 胡志. 7075 铝合金等温热处理半固态组织的演变[J]. 热加工工艺, 2011, 40(12): 145-148.)
- [8] Yuan Linlin, Han Peng, Chen Xiaoyu, *et al.* Study on microstructures and properties of high boron aluminum alloy prepared by powder metallurgy combined with hot rolling[J]. Powder Metallurgy Technology, 2018, 36(4): 249-255. (元琳琳, 韩鹏, 陈晓宇, 等. 粉末冶金结合热轧制备高硼铝合金组织与性能研究[J]. 粉末冶金技术, 2018, 36(4): 249-255.)
- [9] Kori S A, Murty B S, Chakraborty M. Development of an efficient grain refiner for Al-7Si alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2000, 280(1): 58-61.
- [10] Narayanan L A, Samuel F H, Gruzleski J E. Dissolution of iron intermetallics in Al-Si Alloys through nonequilibrium heat treatment[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 1995, 26(8): 2161-2174.

编辑 邓淑惠