

文章编号:1673-9981(2017)01-0009-04

Al-5Ti-B 细化剂对 A356 合金微观组织的影响

秦晓雄,杨运宇,冯绍凯,卢楠方,程 峰

合肥工业大学材料科学与工程学院,安徽 合肥 230009

摘 要:制定合理的熔炼工艺熔配 A356 合金,并在浇注前加入不同含量的 Al-5Ti-B 细化剂对合金液进行细化处理,研究细化剂对 A356 合金组织和性能的影响. 研究表明:加入 Al-5Ti-B 能使 A356 合金中的初生 α -Al 相显著细化,该相由粗大的树枝晶变为细小、无定向的枝晶;由于晶粒变小晶界增多,硅相变得更为分散地分布在枝晶和晶粒间隙内,导致粗大的针片状共晶硅减少且长度变短,使应力集中程度降低. 当细化剂加入量在 1.0% 时细化效果最好,二次枝晶间距为 22.98 μm ,铸态下其硬度为 62.4 HB,而未经过细化处理的 A356 合金,其硬度仅为 52.0 HB,相比提高了 12.4%.

关键词:A356 合金;Al-5Ti-B 细化;微观组织;硬度

中图分类号:TG113.12 **文献标识码:**A

A356 合金是美国于二十世纪 70 年代研制的铝合金,为常用的铸造 Al-Si-Mg 系合金,自诞生以来迅速应用在汽车上作为轮毂的材料,打破了传统钢制轮毂材料的限制. A356 合金主要有铸造流动性好、强度高、机械加工性能好、收缩率和热裂倾向小等优点,已成为目前汽车、摩托车轮毂使用最为广泛的亚共晶 Al-Si 系材料,并广泛应用于航空航天领域中,随着汽车设计向轻型化、节能化及多品种化方面发展,A356 合金在汽车工业中的应用与日俱增,应用范围不断扩大^[1].

晶粒细化是铝及其合金熔铸过程中的重要工艺之一,可显著提高材料的力学性能及加工性能,也是解决铸件气孔、裂纹等铸造缺陷的重要措施. 晶粒细化对材料的作用^[2]:(1)产生细晶强化作用,合金细化在提高材料强度和硬度的同时其塑性不会降低,进而提高材料的综合力学性能与加工工艺性能;(2)提高材料的塑性变形能力,为铸件后续加工中的塑性变形带来更大的灵活性,多晶体变形是材料各

个晶粒和晶界协调变形的结果,所以晶粒越细,变形均匀性越好,越有利于减少加工过程中的缺陷;(3)细化铸态组织使结晶组织均匀,可以减小组织内部缩松、偏析,防止产生裂纹和缩孔等缺陷,同时提高铸件的压力气密性、防腐性能,此外晶粒细化还能增加熔体的流动性,改善铸件填充性能,消除表面缩孔及减少热裂倾向.

本文通过制定合理的熔炼工艺熔配 A356 合金,并在浇注前加入不同含量的 Al-5Ti-B 细化剂,研究细化剂对 A356 合金组织和性能的影响.

1 实验部分

1.1 实验原料

实验原料为 Al-50Si 合金、纯铝、纯镁,将它们按一定计算比列配料并进行熔炼,通过制定合理的熔炼工艺,制备出标准的 A356 合金,其成分列于表 1.

表 1 A356 合金化学成分
Table 1 The chemical composition of A356 alloy

元素	Si	Mg	Cu	Zn	Mn	Ti	Fe	Al
含量 $w/\%$	6.5~7.5	0.3~0.5	0.1	0.1	0.1	0.5	<0.1	余量

1.2 A356 合金的熔炼工艺

实验用坩埚电阻炉熔炼,熔炼温度为 750 ℃、精炼温度 750 ℃、浇注温度 720 ℃、模具温度 200 ℃. 首先用砂纸打磨坩埚和熔炼工具,并烘干预热炉料及工具,将纯铝熔化再加入 Al-50Si 合金,待其熔化后在表面均匀撒上覆盖剂,保温 15 min,以便使金属液温度及成分均匀,然后再 750 ℃下加入 C₂Cl₆ 精炼剂,进行一次精炼,5 min 后扒渣,再把用铝箔包裹的纯镁压入铝液中,为防止镁燃烧氧化,在铝液表面撒上覆盖剂,保温 10 min,待镁块完全融化后进行二次精炼,扒渣,最后加入不同含量的 Al-5Ti-B 细化剂进行细化处理,静置 10 min 后在 720 ℃下浇注到铸铁金属型中,最终制得 A356 合金^[3].

在浇注试样的同一位置切取并制备金相试样,用体积分数为 0.5% 的 HF 溶液进行腐蚀,观察材料的微观金相组织,并用 HB3000 型布氏硬度计测试其布氏硬度.

2 实验结果与分析

2.1 合金的微观组织

向金属液中加入不同含量的 Al-5Ti-B 细化剂进行细化处理,细化剂加入量(质量百分数)分别为 0,0.5%,1.0%和 1.5%,以探究最佳细化效果.图 1 为加入不同含量细化剂后的细化效果.

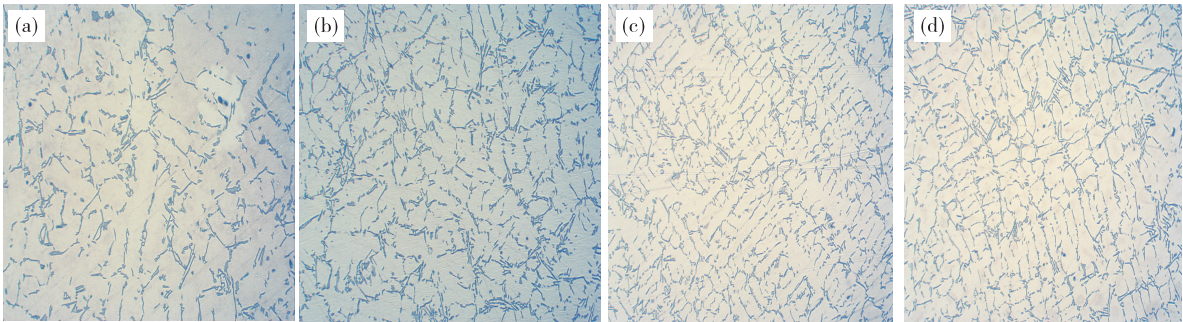


图 1 不同含量细化剂的细化效果
(a)未细化处理;(b)添加量 0.5%;(c)添加量 1.0%;(d)添加量 1.5%

Fig. 1 Effect of different content of refining agent

(a)without refinement treatment;(b)0.5wt% refiner added;(c) 1.0 wt% refiner added;(d)1.5 wt% refiner added

图 1(a)为未进行细化处理的 A356 合金的微观组织,可以看到树枝晶较粗大,晶粒的二次枝晶间距也很大;图 1(b)为细化剂加入量为 0.5% 的 A356 合金的微观组织,与未经细化处理的合金组织相比,其树枝晶尺寸开始减小,二次枝晶间距也减小,但细化效果不是很明显,从宏观来看,整体的晶粒尺寸仍然较大;继续增加细化剂的加入量,当细化剂加入量为 1.0% 时,取得了非常显著的细化效果,二次枝晶间距显著减小,晶粒均匀细小,与未进行细化处理的合金微观组织相比,其共晶硅也更加分散细小;当细化剂加入量为 1.5% 时,与加入量 1% 的合金相比,

其晶粒尺寸略变大,出现粗化的趋势.
为了能定量地研究细化剂加入量的细化效果,采用 Image-Pro-Plus 软件对合金微观组织中晶粒的尺寸进行测量分析.晶粒大小一般用一次枝晶的长度和二次枝晶间距表征,由于在凝固过程中树枝晶往往互相搭接在一起,在材料微观组织的金相照片中完整的晶粒往往不容易区别,而用二次枝晶间距则比较容易测量.本实验用二次枝晶间距来表征晶粒的大小,二次枝晶间距越小,说明晶粒尺寸越细小^[3].
图 2 为细化剂加入量与二次枝晶间距的关系.

从图 2 可以看出,随细化剂加入量的提高,二次枝晶间距先减小后升高.未加细化剂的 A356 合金, α 相二次枝晶间距为 $78.02\text{ }\mu\text{m}$;当 Al-5Ti-B 细化剂加入量为 0.5% 时,A356 合金的二次枝晶间距减小到 $52.49\text{ }\mu\text{m}$;当 Al-5Ti-B 细化剂加入量为 1.0% 时,A356 合金的 α 相晶粒的二次枝晶间距减小为 $22.98\text{ }\mu\text{m}$;当 Al-5Ti-B 细化剂加入量为 1.5% 时,合金的二次枝晶间距为 $27.03\text{ }\mu\text{m}$,晶粒尺寸没有变的更细,相反有变大的趋势.

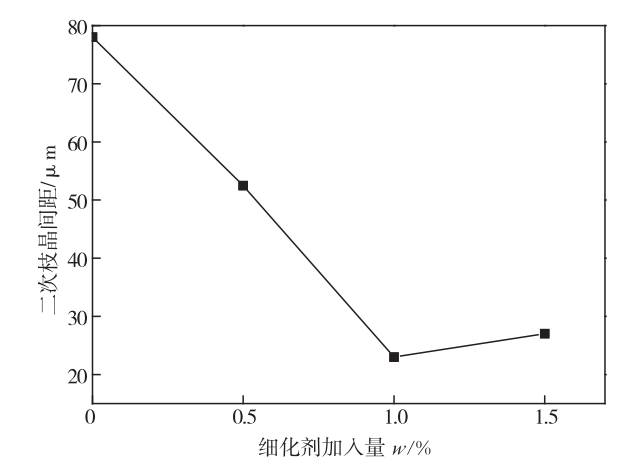


图 2 细化剂对二次枝晶间距的影响
Fig. 2 The effect of refiner on the distance of secondary dendrite

2.2 合金的硬度

材料布氏硬度的测定原理是用一定大小的试验力 F ,把直径为 D 的淬火钢球或硬质合金球压入被测金属的表面,保持规定时间后卸除试验力,测量压痕平均直径 d ,再通过查表得出材料的布氏硬度值^[4].布氏硬度测试的是材料的宏观硬度,一般而言,材料的宏观硬度与其强度是相关联的,材料的宏观硬度越大其强度越高.对金属材料而言,材料的微观组织中如果没有严重割裂基体的脆性相存在,那么其抗拉强度约为其布氏硬度的 3~4 倍,这一规律对很多常用的金属工程材料都成立.用铸态下未经细化的 A356 合金浇注制备出拉伸试样,其抗拉强度为 169 MPa ,为其布氏硬度的 3.2 倍,经试验验证该结论对 A356 合金也成立,故本实验可以用材料的布氏硬度表征细化对材料强度的影响.

对铸态下加入不同含量细化剂的 A356 合金进行布氏硬度测试,结果见图 3.从图 3 可以看出:未加细化剂的合金,其铸态下的布氏硬度为 52.3 HB ;加入 0.5% 细化剂的合金,铸态下其布氏硬度为

55.3 HB ;加入 1.0% 细化剂的合金,铸态下其布氏硬度为 62.4 HB ,相比未添加细化剂的合金硬度提高了 12.4% ;加入 1.5% 细化剂的合金,铸态下其布氏硬度为 59.0 HB ,开始出现下降趋势.由此可知,对 A356 合金来说,Al-5Ti-B 细化剂的最佳加入量为 1.0% .

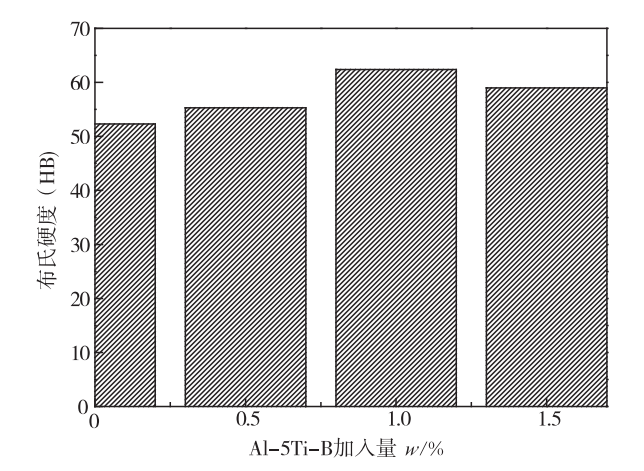


图 3 不同含量细化剂的 A356 合金的布氏硬度
Fig. 3 Brinell hardness of A356 alloy with different content of refining agent

细化晶粒之所以能起到强化作用,在很大程度上与晶界和硅相的分布及形态有着密切的关系.一方面,由于晶界对位错滑移的阻滞效应,以及晶界两侧晶粒的取向不同,加之这里杂质原子较多,也增大了晶界附近的滑移阻力.因而位错在多晶体中运动时,一侧晶粒中的滑移带不容易直接进入第二个晶粒中,而且晶界上的形变,需要多个滑移系统同时动作,这同样导致位错不易穿过晶界,而是塞积在晶界处,塞积在晶界处的位错相互纠缠交割,很难再移动,从而在晶界处形成位错密度很高的位错墙,成为后续位错运动的障碍,因而晶粒越细小,晶界越多,位错被阻滞的地方就越多,宏观体现为材料的强度和硬度增大.

Hallpetch 公式^[5]定量地表明了材料晶粒尺寸和力学性能的关系 $\sigma_s = \sigma_0 + Kd^{-1/2}$.式中 σ_0 为常数,反应晶内对变形的阻力; K 为常数,表征晶界对强度影响的程度, d 为平均晶粒直径.从公式中可以看出,材料晶粒越小,材料的强度越高,实验结果与之相吻合.

另一方面,从相图也可以得出,经过细化处理的材料微观组织中,硅相的分布更均匀分散,形态更细

小,这是因为共晶硅是最后凝固的. 分析 Al-Si 二元相图发现,材料先共晶相是 α -Al 相,先析出的 α -Al 相构成枝晶骨架,共晶硅最后凝固,所以只能分布在 α -Al 晶粒的间隙即晶界处,故 α -Al 晶粒细化后晶界增多,导致硅相的分布也更加均匀,形态也比较细小,避免了粗大的针状硅的析出,减少了应力集中,这也有利于材料强度的提高.

3 结 论

通过制定合理的熔炼工艺,制备出标准的 A356 合金,并向其中添加 0.5%~1.5%的 Al-5Ti-B 细化剂进行细化处理,利用金相显微镜、布氏硬度计等实验仪器和 image-pro-plus 软件研究 Al-5Ti-B 细化剂对 A356 合金微观组织和力学性能的改善. 结果表明,Al-5Ti-B 细化剂的加入使材料的微观组织改善, α -Al 晶粒得到细化,由粗大树枝晶变为细小树枝晶,硅相的分布也比较分散. 用 image-pro-plus 软件分析得知,随细化剂加入量的提高,二次枝晶间距

先减小后升高,最佳加入量为 1.0%,未加细化剂的 A356 合金, α 相二次枝晶间距为 78.02 μm ,当 Al-5Ti-B 细化剂加入量为 1.0%时, A356 合金的 α 相晶粒的二次枝晶间距减小为 22.98 μm . 铸态下的布氏硬度由未经细化时的 52.3HB 提高到 62.4HB,提高了 12.4%.

参考文献:

[1] 张振. 汽车轮毂用 A356 铝合金的精炼及净化[D]. 硕士学位论文,秦皇岛:燕山大学,2015.

[2] 杨阳,刘相法,边秀房,等. 铝及铝合金 α -Al 晶粒细化方法的进展[J]. 上海有色金属,1997,33(6):602-608.

[3] 黄吉,程和法,杜承信,等. Sc 对 A356 合金组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2015,35(12):1318-1321.

[4] 胡凌云. 浅谈金属布氏硬度、洛氏硬度检测适用范围[J]. 机械管理开发,2012,5:91-92.

[5] 崔忠圻,覃耀春. 金属学与热处理[M]. 北京:机械工业出版社,1989.

The effect of Al-5Ti-B refiner microstructure of A356 alloy

QIN Xiaoxiong, YANG Yunyu, FENG Shaokai, LU Nanfang, CHENG Feng

School of Material Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

Abstract: The author formulate a reasonable process of A356 alloy. And a series of different amounts of Al-5Ti-B grain refiner have been added into the mdten before pouring, to investigate the effect of Al-5Ti-B grain refiner on micstructure and mechanical properties of A356 alloy. The results show that the primary α -Al phase in A356 alloy can be refined significantly, which are changed into fine non-directional dendrites from coarse dendrite. Meanwhile, due to the decrease of grain size, grain boundary increase a lot, silicon phase change more dispersed and the size of eutectic silicon in the alloy is decreased. As a result, the stress concentration level is reduced. The desirable refinement of the α -Al phase in A356 alloy is obtained with 1.0% Al-5Ti-B refiner, the mechancial properties of as-cast A356 with 1.0% Al-5Ti-B refiner reach 62.4 HB in hardness.

Key words: A356 alloy; Al-5Ti-B refiner; micstrcture; hardness