

文章编号:1673-9981(2019)01-0027-06

稀土元素对 Al-Si-Cu-Mg 系压铸 铝合金组织和性能的影响

朱锐祥,秦新宇,胡 南,陆良宇

合肥工业大学 材料科学与工程学院,安徽 合肥 230009



摘 要:采用单项试验法分别向压铸铝合金 ADC12 中添加不同含量的 Ce、La 和 Sm 稀土元素,通过拉伸试验数据及金相组织分析,研究稀土元素的加入对合金微观组织与力学性能的影响.结果表明:随着稀土元素的加入,合金的力学性能及组织均有着不同程度地提高与细化.单项试验中,当 Ce、La 及 Sm 的质量百分含量分别为 0.4%、0.4% 和 0.2% 时,合金的力学性能最好,抗拉强度分别比基体合金提高了 10.9%、7.0% 和 16.1%,同时延伸率也分别比基体合金提高了 8.1%、19.3% 和 20.6%.在 Sm 元素含量为 0.2% 时,合金组织的细化效果最为明显,稀土元素对合金力学性能及组织细化的影响顺序为 $Sm > Ce > La$.

关键词:压铸铝合金;稀土元素;微观组织;抗拉强度;延伸率

中图分类号:TG146.21

文献标识码:A

Al-Si 系铸造合金相比于其它系别的铝合金,具有良好的综合力学性能及原料成本较为低廉的特点而日益受到人们的关注,并被广泛用于汽车、航空、军工等领域中. ADC12 铝合金作为 Al-Si 系铸造合金中的一员,经压铸后因其铸件的强度高、热膨胀系数小、耐腐蚀性能高且切削性能好,而被作为生产汽车发动机缸体、缸盖及引擎齿轮箱的理想材料.但由于 ADC12 铝合金组织中存在不少块状、板条状、长针状的 Si 相及枝晶粗大的 α -Al 相,这些因素阻碍了该合金力学性能的提升.因此,在工业生产中为了提高铝合金的综合力学性能,经常会对合金进行变质细化处理^[1-3].

研究表明,稀土元素能与多种元素发生反应并

形成稳定化合物,可以净化合金液体,改善合金铸件的微观组织和铸造缺陷,增强合金的力学性能^[4-7].因此,针对 ADC12 铝合金,采用单项实验法分别向合金中加入不同种类、不同含量的稀土元素,旨在分析稀土元素对压铸铝合金组织与性能的影响规律.

1 实验部分

1.1 试 样

实验所需材料为 ADC12 铝合金,其成分含量如表 1 所示.

表 1 ADC12 铝合金成分含量

Table 1 The composition content of ADC12 aluminum alloy

元素	Si	Cu	Mg	Mn	Zn	Fe	Ni	Sn	Al
含量 $w/\%$	11	3.0	0.2	0.5	0.73	0.76	0.026	0.005	余量

收稿日期:2018-08-10

作者简介:朱锐祥(1991-),男,安徽滁州人,硕士研究生,主要从事高性能汽车用铝合金活塞的研究.

采用单项实验法向 ADC12 铝合金中添加不同量的 Ce、La 及 Sm 稀土元素,稀土元素是以 Al-La 中间合金、Al-Ce 中间合金、Al-Sm 中间合金的形式加入的,它们在合金中的加入量如表 2 所示。

实验的试棒采用压铸工艺制备,试样的形状及尺寸如图 1 所示。

表 2 合金中稀土元素添加量	
Table 2 The content of rare earth elements in alloy	
元素	添加量 $w/\%$
Ce	0.2,0.4,0.6
La	0.2,0.4,0.6
Sm	0.2,0.4,0.6

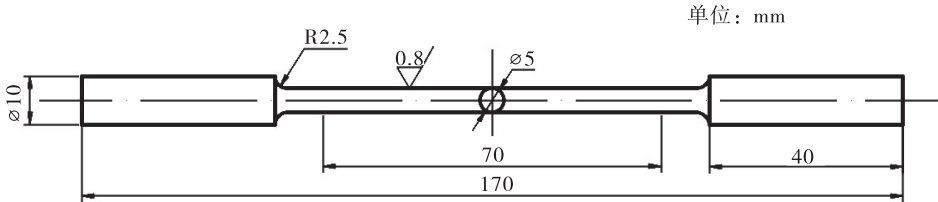


图 1 试样形状及尺寸图

Fig. 1 Sample shape and size

1.2 方 法

首先将熔炼所需的铁器工具如搅拌棒、撇渣勺、钟罩等进行清洁,在除锈清洁工作完成后将铸造涂料(质量分数为 30 % 的滑石粉(CaCO_3)、3% 的中性水玻璃及 67% 的蒸馏水的混合物)均匀涂抹在铁器工具的表面,随后将铁器工具置于 250 ℃ 的保温炉内进行时长为 1.5 h 的烘烤,去除其表面的水分。然后用天平称取熔炼时所需的各合金原料,待原料经铝合金清洗剂清洗去污后放入温度为 200 ℃ 的保温炉中进行烘干,时长为 2 h。最后将坩埚预热到 400 ℃ 后,将干净、预热好的 ADC12 铝合金放入坩埚电阻炉中进行熔炼,加热到 760 ℃ 后保温,待铝合金熔化后加入稀土中间合金,经搅拌、精炼(精炼剂为 C_2Cl_6)、静置和打渣后,采用低压冷室压铸方式将合金液压铸成试棒。

1.3 仪 器

用 SG2-5-12 型坩埚电阻炉进行合金原料熔炼,熔炼结束后通过 DCC400 型卧式冷室压铸机将合金液压铸成试棒。用 SYJ-150A 型低速金刚石切割机切割出金相试样,并在 WX100 型抛光机上进行打磨直至无划痕。用 Zwick/Roll Z050 型电子拉伸试验机测试合金试样的力学性能,通过 ZEISS-Imager 型金相显微镜对合金显微组织进行观察,运用 Image-Pro-Plus 软件对合金显微组织中共晶硅相的平均面积及长径比进行分析。

2 结果及分析

2.1 金相组织观察及分析

2.1.1 ADC12 铸态下显微组织

图 2 为无添加铸态下 ADC12 铝合金的显微组织。从图 2 中可看出:ADC12 铝合金微观组织中浅灰色的为富 Fe 相,主要为块状、条状,尺寸相对来说较大;深黑色的为共晶 Si 相,主要为板条状、长针状,并且棱角较为锋利,合金受拉时容易引起应力集中,从而降低合金的综合力学性能;组织中白色的为 $\alpha\text{-Al}$ 相,其枝晶较为粗大、分布不均匀、排列交叉错乱、呈树枝状,在一定程度上还存在偏析现象,以及二次枝晶臂间距较宽,这些均阻碍着合金综合力学性能的提升。

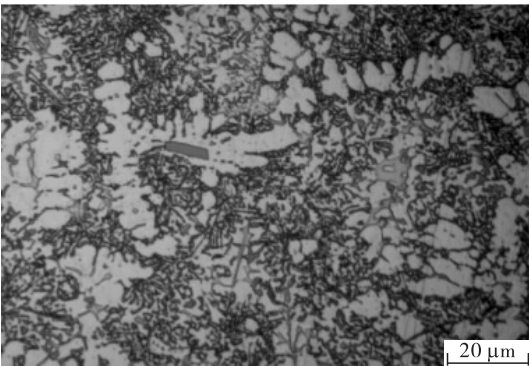


图 2 ADC12 铸态下显微组织

Fig. 2 ADC12 microstructure under cast state

2. 1. 2 Ce 元素对合金组织的影响及分析

图 3 为添加不同量 Ce 元素铸态下合金的金相显微组织. 从图 3(a) 可见:当 $w(\text{Ce}) = 0.2\%$ 时, $\alpha\text{-Al}$ 相得到了一定程度的细化,粗大树枝状 $\alpha\text{-Al}$ 枝晶减少,细小 $\alpha\text{-Al}$ 枝晶增多;富 Fe 相变为小块状,甚至颗粒状;共晶 Si 形貌变成无锋利的棱角,比较光滑且其尺寸明显减小. 从图 3(b) 可见:当 $w(\text{Ce}) = 0.4\%$ 时, $\alpha\text{-Al}$ 相出现了明显的细化,粗大的 $\alpha\text{-Al}$ 枝晶基本消失,初生的 $\alpha\text{-Al}$ 相枝晶也处于细小的形态;富 Fe 相的分布也较为均匀,其形貌已逐步变为细小颗粒状,细化效果较为明显;共晶 Si 相也以细小颗粒状的形态分布在 $\alpha\text{-Al}$ 晶界上,此时变质效果较佳,二次枝晶臂间距也降低许多,甚至有些 $\alpha\text{-Al}$ 晶粒边界变得圆整了. 从图 3(c) 可见,当 Ce 的加入量增至 0.6% 时, $\alpha\text{-Al}$ 枝晶开始变得粗大起来,富 Fe 相细化程度也有所减弱,开始出现偏聚和长大的现象,此时共晶 Si 相又逐渐变为细小短棒状、条状,细化效果有所减弱.

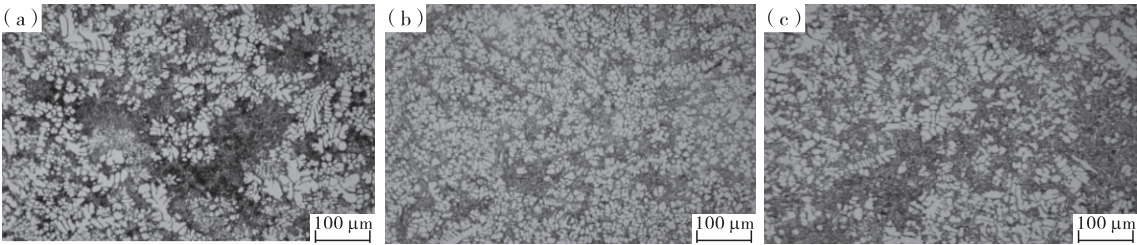


图 3 加入 Ce 元素后合金的金相组织
(a) $w(\text{Ce}) = 0.2\%$;(b) $w(\text{Ce}) = 0.4\%$;(c) $w(\text{Ce}) = 0.6\%$
Fig. 3 The metallographic structure of the alloy after adding Ce element

2. 1. 3 La 元素对合金组织的影响及分析

图 4 为添加不同量的 La 元素后铸态下合金的金相显微组织图. 从图 4 可见,随着 $w(\text{La})$ 增加,合金中的 $\alpha\text{-Al}$ 相晶粒尺寸变小、数量增多、排列较为紧密,而二次枝晶臂间距明显减小. 从图 4(a) 可见,当 La 的添加量为 0.2% 时, $\alpha\text{-Al}$ 相得到了一定程度的细化,粗大的 $\alpha\text{-Al}$ 枝晶减少,细小 $\alpha\text{-Al}$ 枝晶增多. 从图 4(b) 可见,当 La 的添加量为 0.4% 时,合金试样的微观组织变化最大,此时组织晶粒数量最多,几何尺寸最小且大小相近,粗大的块状多边形初晶硅消失,针状的共晶硅也得到不同程度的细化,由长针状变为短棒状,几乎没有粗大的树枝晶存在,甚至有些晶粒边界变得圆整了,此时二次枝晶臂间距最小,合金的抗拉强度增加. 从图 4(c) 中可见,当 La

Ce 元素能够细化晶粒的原因是因为 Ce 原子可吸附在 Si 相表面,使 Si 在 $\{111\}$ 晶面形成大量孪晶,促使共晶 Si 按孪晶凹谷机制多面生长,使共晶 Si 相变为棒状或纤维状,从而达到细化共晶硅的作用. 并且 Ce 元素能够与合金中的 Si, Cu, Mg 和 Mn 等元素形成多元稀土合金相,这些稀土相能够于固/液界面前沿产生富集,导致成分过冷的同时也阻碍了固液界面的移动与 $\alpha\text{-Al}$ 相晶粒的长大,从而细化了晶粒. 同时 Ce 元素在 $\alpha\text{-Al}$ 形核过程中,可以引起晶格畸变,一定情况下会与 Fe 相化合物反应,从而改善了 Fe 相的形貌,削弱了 Fe 相对基体的割裂作用,达到细化晶粒的作用. 当合金中 Ce 元素的含量较大时,Ce 元素会与熔体中的合金元素发生反应并生成数量较多的粗大混合稀土化合物,使得液相中各溶质原子的数量减少,进而导致了液相平衡溶解度的降低,破坏了固液界面的稳定性,致使二次枝晶臂间距增大,最终导致 $\alpha\text{-Al}$ 相晶粒变得粗大,降低了合金的力学性能.

的添加量为 0.6% 时, $\alpha\text{-Al}$ 枝晶开始变得粗大起来,合金微观组织的改善效果有所下降.
因为 La 元素在合金中的固溶度较低,基本不溶于 $\alpha\text{-Al}$ 基体,凝固过程中这些稀土相便会富集于固/液界面前沿,增大了熔体的过冷度,形成了一定数量的细小形核质心,从而促进了晶粒形核,提高了形核率,达到了细化晶粒的目的. 而当 La 元素的加入量过高时,合金中会形成大量的多元稀土化合物,这些化合物会聚集长大且形状不规则,并释出大量的结晶潜热,使得固 - 液界面前沿的溶质浓度梯度的改善作用降低,致使晶粒粗化,进而导致合金受力时容易引起应力集中而产生裂纹,一定程度上降低了合金的力学性能.

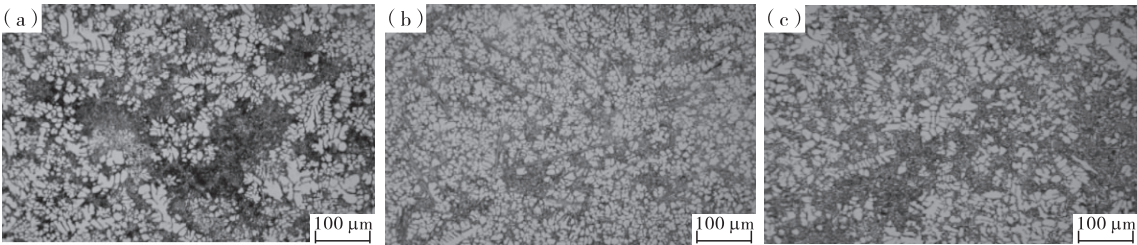


图 4 加入 La 元素后合金的金相组织
(a) $w(\text{La}) = 0.2\%$; (b) $w(\text{La}) = 0.4\%$; (c) $w(\text{La}) = 0.6\%$
Fig. 4 The metallographic structure of the alloy after adding La element

2. 1. 4 Sm 元素对合金组织的影响及分析

图 5 为添加不同量的 Sm 元素后铸态下合金的金相显微组织图. 从图 5 可见: 当 $w(\text{Sm}) = 0.2\%$ 时细化效果最为明显, 组织中树枝状 $\alpha\text{-Al}$ 枝晶得到了明显的改善且大部分为等轴晶及一些被碎化的枝晶, 共晶硅也出现细化且大多数呈纤维状或短棒状并呈均匀分布, 同时组织中气孔缺陷也得到了改善; 随着 Sm 含量的增加, 合金组织的改善程度逐渐降低, 当 $w(\text{Sm}) = 0.4\%$ 和 $w(\text{Sm}) = 0.6\%$ 时, 合金组织中又开始出现粗大晶粒, 同时粗大针状且分布不均匀的共晶硅相增多.

Sm 元素有着细化晶粒的作用, 其原因是: (1)

合金中 Sm 元素的氧化物为合金提供了形核介质, 促进了异质形核, 提高了形核率, 使得铸件组织中的晶粒数增加, 晶粒变小; (2) Sm 原子填补了 $\alpha\text{-Al}$ 枝晶表面缺陷的同时降低了固液两相间的表面张力, 阻碍了基体晶粒的长大, 使铸件组织中的晶粒细小且排列紧密. 当合金中 Sm 元素含量较高时会出现过变质现象, 合金中稀土相容易长大并出现团簇的趋势, 致使稀土相不能均匀的分布在熔体中, 起不到异质形核的作用. 同时, 由于晶界处的稀土相含量过多, 使得晶界变厚, 从而减弱了其成分过冷的作用, 导致晶粒细化效果减弱.

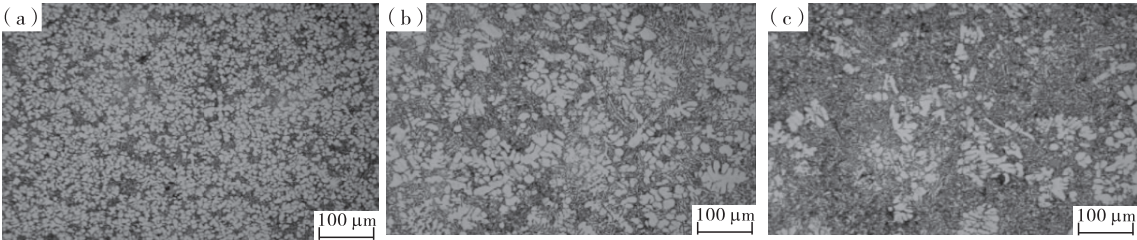


图 5 加入 Sm 元素后合金的金相组织
(a) $w(\text{Sm}) = 0.2\%$; (b) $w(\text{Sm}) = 0.4\%$; (c) $w(\text{Sm}) = 0.6\%$
Fig. 5 The metallographic structure of the alloy after adding Sm element

综上所述, 加入稀土元素后合金组织出现了不同程度地细化. 当 Ce, La 及 Sm 的质量百分含量分别为 0.4%, 0.4% 和 0.2% 时, 合金组织中晶粒细化效果最为明显, 其中 Sm 元素的变质效果最佳.

运用 Image-Pro-Plus 软件, 进一步对稀土变质后合金微观组织中共晶硅相平均面积及长径比进行分析. 图 6 为加入稀土元素后合金中共晶硅相平均面积及长径比变化情况. 从图 6 可见: 加入稀土元素后合金中共晶硅相尺寸变小, 而且明显细化; 随着稀土元素加入量的提高, 共晶硅的尺寸先下降后增加; 当 Sm 元素加入量为 0.2% 时, 合金中共晶硅相尺寸达

到最小.

2. 2 稀土元素对合金抗拉强度的影响

添加 Ce, La 及 Sm 三种元素加入后, 对经压铸所得合金试棒进行了拉伸实验, 以研究稀土元素加入对合金的抗拉强度及延伸率的影响, 未加入稀土元素合金的 $\sigma = 285\text{ MPa}$ 和 $\delta = 2.23\%$. 图 7 和图 8 为抗拉强度与断后延伸率对比曲线图. 从图 7 和图 8 可见, 随着稀土元素的加入, 合金的抗拉强度与延伸率有着不同程度的提高, 表明稀土的加入可改善合金的综合力学性能.

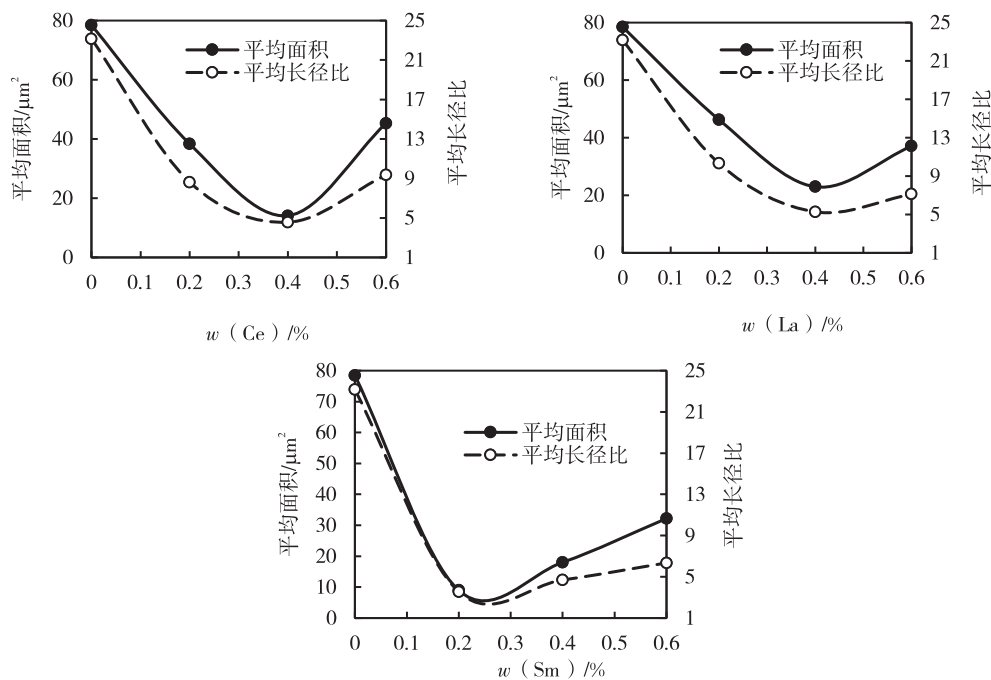


图 6 加入稀土元素后合金中共晶硅相平均面积及长径比

Fig. 6 Average area and aspect ratio of eutectic silicon phase in alloy after rare earth element addition

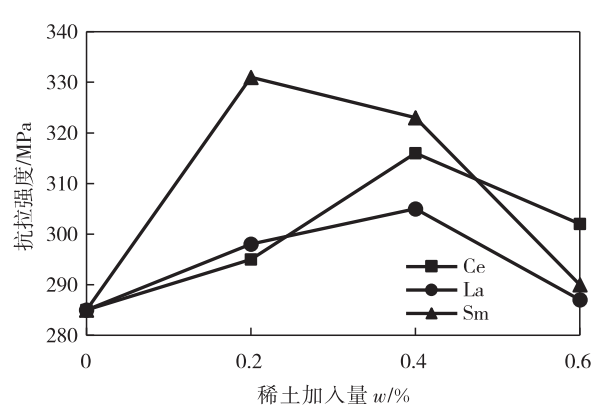


图 7 加入 Ce,La 和 Sm 后合金的抗拉强度

Fig. 7 Tensile strength of alloy after adding Ce, La and Sm

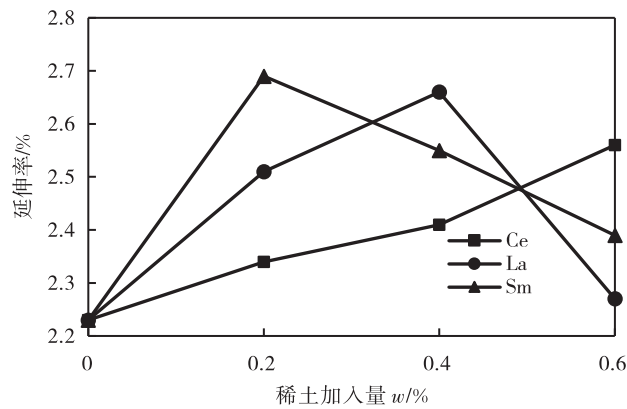


图 8 加入 Ce,La 和 Sm 后合金的断后延伸率

Fig. 8 Elongation of alloy after adding Ce, La and Sm

随着合金中 Ce 含量的增加,合金的抗拉强度先增后降,而延伸率一直增大. 当 Ce 加入量为 0.4% 时,合金的抗拉强度与延伸率分别为 316MPa 和 2.41%,比基体合金提高了 10.9% 和 8.1%. 随着合金中 La 元素含量的增加,合金的抗拉强度与延伸率皆是先增大后降低. 当 $w(\text{La}) = 0.4\%$ 时,合金的抗拉强度与延伸率分别为 305 MPa 和 2.66%,分别比基体合金提高了 7.0% 和 19.3%. 随着合金中 Sm 元素含量的增加,合金的抗拉强度与延伸率也是先增

大后降低. 当 Sm 加入量为 0.2% 时,合金的抗拉强度与延伸率均达到最优,分别为 331MPa 和 2.69%,比基体合金提高了 16.1% 和 20.6%.

综合分析可知,Sm 元素对合金的综合力学性能影响最大,Ce 元素次之,而 La 元素影响最小.

3 结 论

添加稀土元素后,合金组织明显的细化、组织中

晶粒排列紧密,尺寸细小且相近,共晶硅呈现纤维状或短棒状,同时组织中气孔缺陷也得到了改善,致使合金的综合力学性能得到了很大的提升,其中当 Sm 含量为 0.2% 时,合金组织细化效果最好.

随着稀土元素的加入,合金的抗拉强度与延伸率有着不同程度的提高,其综合力学性能得到了改善. 其中在 $w(\text{Ce})=0.4\%$ 时,合金的抗拉强度与延伸率分别比基体合金提高了 10.9% 和 8.1%; 当 $w(\text{La})=0.4\%$ 时,合金的抗拉强度与延伸率分别比基体合金提高了 7.0% 和 19.3%; 当 $w(\text{Sm})=0.2\%$ 时,合金的抗拉强度与延伸率分别比基体合金提高了 16.1% 和 20.6%. 表明,Sm 元素对合金的综合力学性能影响最大、Ce 元素次之、La 元素影响最小.

参考文献:

[1] 檀廷佐. 变质及热处理对铸造铝硅合金组织及性能的影响[D]. 南京:南京航空航天大学,2012.

[2] HUANG Xin,YAN Hong. Effect of rare earth La addition on microstructure and mechanical property of as-cast ADC12 Al-alloy[J]. Journal of Wuhan University of Technology , 2013,28(1) :202-205.

[3] ZUO Min,ZHAO Degang,TENG Xinying, et al. Effect of P and Sr complex modification on Si phase in hypereutectic Al-30Si alloys [J]. Materials and Design, 2013, 47: 857-864.

[4] 袁孚胜,李明茂,朱应禄,等. 稀土在铝及其合金中的作用和应用[J]. 上海有色金属,2009,30(3):129-133.

[5] 杨军军,聂祚仁,付静波,等. 稀土在铝合金中的作用及研究进展[J]. 北京工业大学学报,2002,28 (4) : 500-505.

[6] 王荣滨. 稀土铝合金的研究与应用[J]. 有色金属加工, 2007,36(2) :21-23.

[7] 曹大力,石忠宁,杨少华,等. 稀土在铝及铝合金中的作用[J]. 稀土,2006,27(5) :88-93.

Effect of rare earth elements on microstructure and properties of Al-Si-Cu-Mg die-cast aluminum alloy

ZHU Ruixiang, QIN Xinyu, HU Nan, LU Liangyu
School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

Abstract: Different amounts of Ce, La and Sm rare earth elements were added to die-cast aluminum alloy ADC12 by a single test method. Tensile test data and metallographic structure analysis were carried out to study the effect of rare earth elements on the microstructure and mechanical properties of the alloy. The results show that with the addition of rare earth elements, the mechanical properties and microstructure of the alloys were improved and refined to varying degrees. In the single test, when the mass percentages of Ce, La and Sm were 0.4%, 0.4% and 0.2%, respectively, the mechanical properties of the alloy were the best, and the tensile strength was 10.9%, 7.0% and 16.1 higher than the base alloy, respectively. The elongation was 8.1%, 19.3% and 20.6% higher than the base alloy, respectively. When the content of Sm element was 0.2%, the refining effect of the alloy structure was most obvious. The order of influence of rare earth elements on mechanical properties and microstructure refinement of the alloy is: Sm > Ce > La.

Key words: die-casting aluminum alloy; rare earth element; microstructures; tensile strength; elongation