

文章编号:1673-9981(2018)04-0267-07

ADC12 压铸铝合金成分优化的研究

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:为获得 ADC12 压铸铝合金最佳的力学性能,通过单因素试验和正交试验对 Si, Cu, Mg, Mn 四种元素的添加量进行了研究,并对其显微组织进行分析.结果表明:在 ADC12 铝合金成分范围内,随 Si 和 Cu 含量增加,合金的抗拉强度先增大后降低;随 Mg 和 Mn 含量增加,合金的抗拉强度与延伸率皆提高.四种元素含量对合金抗拉强度及延伸率的影响顺序为: $Mg > Mn > Cu > Si$. 合金中主要元素的最优含量为 $w(Si) = 11\%$, $w(Cu) = 3.0\%$, $w(Mg) = 0.2\%$, $w(Mn) = 0.5\%$ 时,合金的力学性能最好,其抗拉强度为 285 MPa,延伸率为 2.23%.

关键词:压铸铝合金;显微组织;元素添加量;正交试验;力学性能

中图分类号: TG115.5+2

文献标识码: A

ADC12 铝合金压铸件因其成品率高、表面质量好、尺寸精度高、后续加工量少,十分适合大批量的生产.因此,普遍应用于汽车零部件的生产,如:活塞、缸体、缸盖、车轮及制动盘等零件,但由于铸造铝硅合金的强度韧性不高,致使其应用范围受到较大的限制^[1-2].目前,在工业生产过程中,就发动机缸盖材料来看铝合金正在逐步替代灰铸铁或合金铸铁.由于发动机缸盖形状较为复杂,致使所使用的铝合金材料必须有良好的机械性能和铸造性能^[3].为了满足发动机缸盖对材料铸造性、强度、稳定性等方

面的要求,本文在 ADC12 铝合金成分范围的基础上,通过对合金成分的优化设计来达到改善压铸铝合金综合力学性能的目的,为实际生产提供参考.

1 试验流程

1.1 试样

试验材料为 ADC12 铝锭(成分列于表 1)、Al-Cu 中间合金、Al-Mn 中间合金、Al-Mg 中间合金和单晶硅,采用压铸工艺制备试棒.

表 1 ADC12 铝锭的化学成分

Table 1 The chemical composition of ADC12 aluminum ingot

元 素	Si	Cu	Mg	Mn	Zn	Fe	Ni	Sn	Al
含量 $w/\%$	10.13	1.72	0.16	0.13	0.73	0.76	0.026	0.005	余量

1.2 试验方案

试验主要分为三个部分:(1)根据表 2 列出的 ADC12 铝合金成分的范围分别设计合金中 Si, Cu, Mg, Mn 四种元素的含量,通过单因素试验得到合

金中元素的最优含量.(2)在单因素试验的基础上,通过正交试验确定 4 种元素的最佳含量.(3)通过金相显微镜观察合金元素的加入对压铸铝合金组织影响的规律.试验流程如下图 1 所示.

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.

表2 ADC12 铝合金成分范围

Table 2 The composition range of ADC12 aluminum alloy

元素	Si	Cu	Mg	Mn	Zn	Fe	Ni	Sn	Al
含量 $w/\%$	9.6~12	1.5~3.5	≤ 0.3	≤ 0.5	≤ 1.0	≤ 1.3	≤ 0.5	≤ 0.3	余量

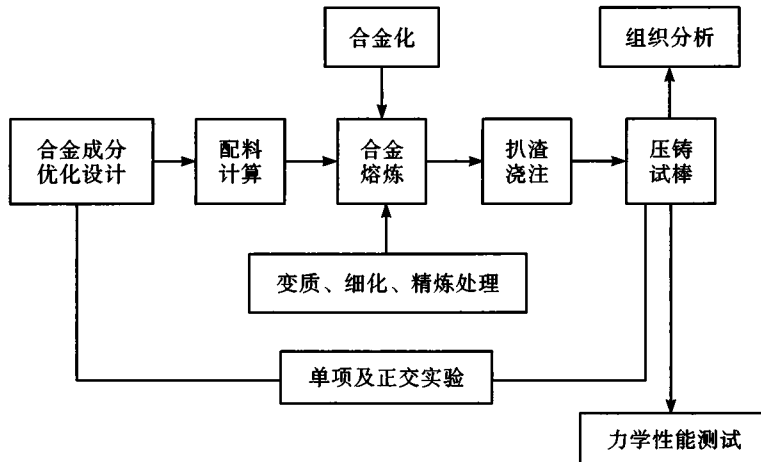


图1 试验工艺流程图

Fig. 1 The experimental process flow chart

2 试验结果及讨论

2.1 单因素试验

进行单因素试验时,一种元素含量作为变量,其余三种元素含量保持不变.试验中各元素质量分数范围分别为10%~12%Si,1.5%~3.5%Cu,0.1%~0.3%Mg,0.1%~0.5%Mn.在ADC12铝合金成分范围内,采用单因素条件试验分别向合金中添加不同量的Si,Cu,Mg,Mn元素时,考查合金力学性能的变化情况.在4种元素质量分数为10%Si,1.5%Cu,0.1%Mg,0.1%Mn的条件下,分别进行Si,Cu,Mg,Mn添加量对铸态合金抗拉强度与延伸率影响的单因素试验,试验结果如图2~5所示.

由图2~5可知,随着Si和Cu质量分数的增加,合金的抗拉强度先增大后降低.当Si质量分数为11%时合金的力学性能最好,此时合金的抗拉强度达到248.6MPa,延伸率为1.15%;当Cu质量分数为3%时,合金的抗拉强度与延伸率均达到最大,分别为276.7MPa,2.36%.随着Mg和Mn质量分数的增加,合金的抗拉强度与延伸率增大.在Mg质量分数为0.3%时,合金的力学性能最优,合金的抗拉强度与延伸率分别为264.38MPa,2.21%;当

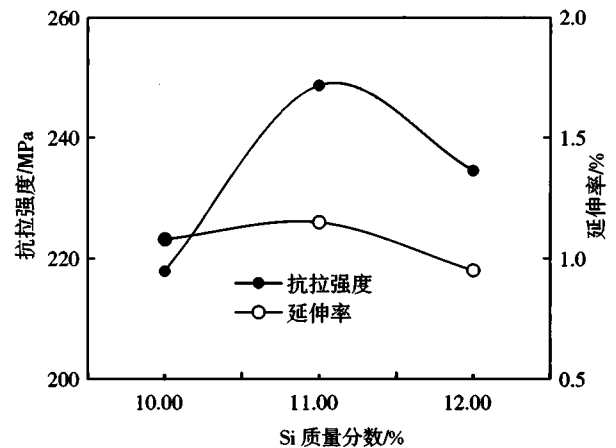


图2 铸态下Si含量对合金力学性能的影响

Fig. 2 Effect of Si content on mechanical properties of alloy in cast state

Mn质量分数为0.5%时,合金的抗拉强度与延伸率均达到最大,分别为259.92MPa,1.93%.单因素试验时表明,Si,Cu,Mg,Mn四种元素的质量分数分别为11%,3%,0.3%,0.5%时,合金的综合力学性能最好.

2.2 正交试验

在单因素试验的基础上,选择四因素三水平,即 $L_9(3^4)$ 正交表,进行正交试验,主要元素的正交因素水平表列于表3,正交试验结果列于表4.

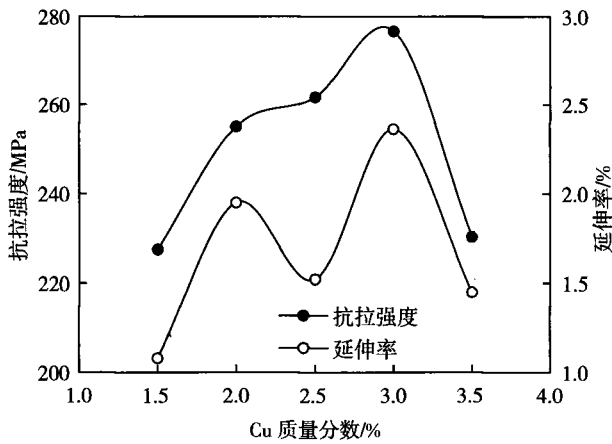


图 3 铸态下 Cu 含量对合金力学性能的影响

Fig. 3 Effect of Cu content on mechanical properties of alloy in cast state

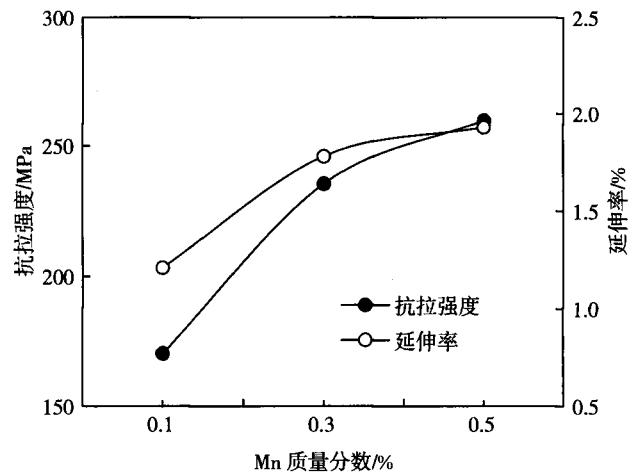


图 5 铸态下 Mn 含量对合金力学性能的影响

Fig. 5 Effect of Mn content on mechanical properties of alloy in cast state

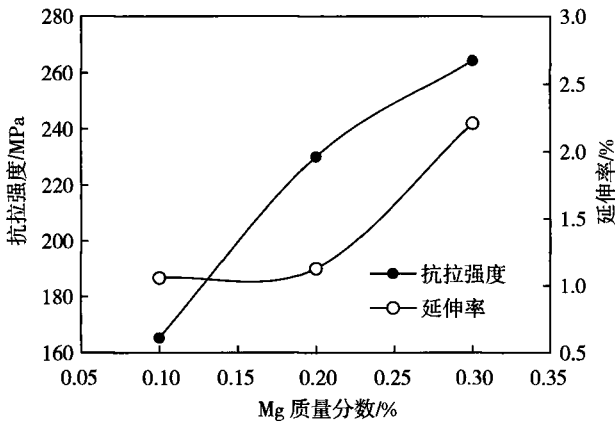


图 4 铸态下 Mg 含量对合金力学性能的影响

Fig. 4 Effect of Mg content on mechanical properties of alloy in cast state

表 3 正交因素水平表

Table 3 The orthogonal factor level table

水平	因素			
	w(Si)/%	w(Cu)/%	w(Mg)/%	w(Mn)/%
	A	B	C	D
1	10.5	2.5	0.2	0.4
2	11.0	3.0	0.3	0.5
3	11.5	3.5	0.4	0.6

表 4 正交试验结果

Table 4 The results of orthogonal experiment

编号	因素				力学性能	
	w(Si)/%	w(Cu)/%	w(Mg)/%	w(Mn)/%	抗拉强度/MPa	伸长率/%
	A	B	C	D		
L ₁	1	1	1	1	262	1.23
L ₂	1	2	2	2	222	1.95
L ₃	1	3	3	3	278	2.46
L ₄	2	1	3	2	235	2.12
L ₅	2	2	1	3	292	2.33
L ₆	2	3	2	1	257	1.78
L ₇	3	1	2	3	236	2.11
L ₈	3	2	3	1	234	1.67
L ₉	3	3	1	2	256	1.84

续表 4

编号	因素				力学性能	
	$w(\text{Si})/\%$	$w(\text{Cu})/\%$	$w(\text{Mg})/\%$	$w(\text{Mn})/\%$	抗拉强度/MPa	伸长率/%
	A	B	C	D		
K_1	762	733	810	753	抗拉强度:各因素水平指标求和	
K_2	784	748	715	713		
K_3	726	791	747	806		
$K_1/3$	254	244	270	251	抗拉强度:各因素水平指标的平均值.	
$K_2/3$	261	249	238	238		
$K_3/3$	242	264	249	269		
极差 R	19	20	32	31		
H_1	5.64	5.43	4.82	4.96	延伸率:各因素水平指标求和	
H_2	5.96	5.98	5.35	6.04		
H_3	5.56	5.75	6.99	6.16		
$H_1/3$	1.88	1.81	1.61	1.65	延伸率:各因素水平指标的平均值	
$H_2/3$	1.99	1.99	1.78	2.01		
$H_3/3$	1.85	1.92	2.33	2.05		
极差 R	0.14	0.18	0.72	0.4		

合金主要元素含量对合金抗拉强度与延伸率的影响程度与极差的大小成正比。由表 4 可知,四种元素含量对合金抗拉强度及延伸率的影响顺序皆为: $\text{Mg} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{Si}$ 。(1)当合金中四种元素含量组合为 $A_2B_3C_1D_3$,即 Si, Cu, Mg, Mn 四种元素的质量分数分别为 11%, 3.5%, 0.2%, 0.6% 时,合金的抗拉强度达到最佳。考虑到 ADC12 铝合金成分范围要求 $w(\text{Mn}) \leq 0.5\%$,确定组合为 $A_2B_3C_1D_2$,即合金中 Si, Cu, Mg, Mn 元素质量分数分别为 11%, 3.5%, 0.2%, 0.5%,此时合金的抗拉强度为 289 MPa,延伸率为 2.05%。(2)当四种元素含量组合为 $A_2B_2C_3D_3$,即 Si, Cu, Mg, Mn 四种元素质量分数分别为 11%, 3.0%, 0.4%, 0.6% 时,合金的延伸率达到最佳。考虑到 Mn 含量超出 ADC12 铝合金成分范围,确定合金延伸率最佳的成分含量为 $A_2B_2C_3D_2$,此时合金的抗拉强度为 267 MPa,延伸率为 2.52%。经综合考虑,确定合金四种元素含量的最佳组合为 $A_2B_2C_1D_2$,即 $w(\text{Si}) = 11\%$, $w(\text{Cu}) = 3.0\%$, $w(\text{Mg}) = 0.2\%$, $w(\text{Mn}) = 0.5\%$,此时合金的抗拉强度为 285 MPa,延伸率为 2.23%。

3 金相组织观察及分析

3.1 Si 含量对合金组织的影响

在 Cu, Mg, Mn 三种元素的质量分数分别为 1.5%, 0.1%, 0.1% 的条件下,铸态下不同 Si 含量的合金显微组织如图 6 所示。图 6 中灰色区域为富 Fe 相,主要呈块状和条状,尺寸相对较大。黑色区域为共晶 Si 相,呈长针状和板条状,并都具有锋利的棱角。从图 6(a)可看出,组织中白色的 $\alpha\text{-Al}$ 相枝晶较粗大、分布不均匀、排列交叉错乱、呈树枝状,在一定程度上还有偏析现象,这些现象都阻碍着合金综合力学性能的提高。随着硅含量的增加,晶粒逐渐细化,初晶硅的尺寸减小,并呈现细条状,树枝晶破碎呈短棒状,共晶 Si 相也得到较大程度的细化,金属流动性增大,铸造性能变好,有利于合金力学性能的提高^[4-5],如图 6(b)所示。但从另一方面来说, Si 元素的增加会降低 Mn 在 Al 中的溶解度,促进 α 相的生成,增大第二相金属化合物的尺寸,并使析出相粗化,不利于合金力学性能的提高。

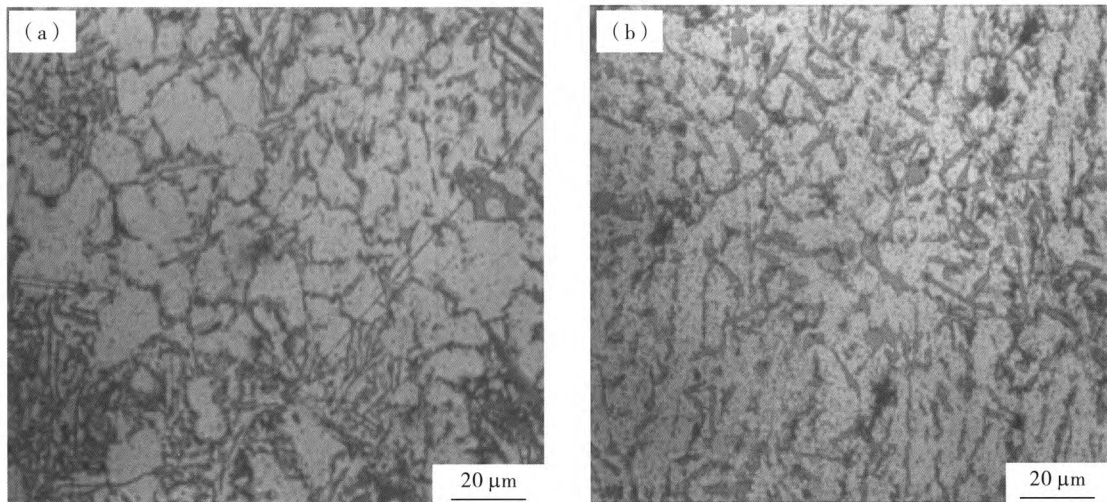


图 6 铸态下不同 Si 含量的合金显微组织
(a) $w(\text{Si}) = 10\%$; (b) $w(\text{Si}) = 11\%$

Fig. 6 Optical microstructure of alloys with different Si content in cast state

3.2 Cu 含量对合金组织的影响

合金中加入 Cu 元素后, Cu 会以颗粒状化合物形式存在于铝基体之中或者固溶于铝基体, 显著提高铝合金的强度和硬度, 但会使铝合金的伸长率有所降低; Cu 在 Al-Si 合金中会形成强化相 Al_2Cu 及 $\text{Al}_4\text{Mg}_6\text{Cu}_4\text{Si}_4$, 这两种强化相有助于提高合金的强

度^[6]. 在 Si, Mg, Mn 三种元素的质量分数分别为 10%, 0.1%, 0.1% 的条件下, 铸态下不同 Cu 含量的合金显微组织如图 7 所示. 由图 7 可知, 随着 Cu 含量的增加, 条片状 Si 相减少, 细化程度得到明显改善, 分布逐渐变得不均匀, 大部分 Si 相呈现聚集倾向.

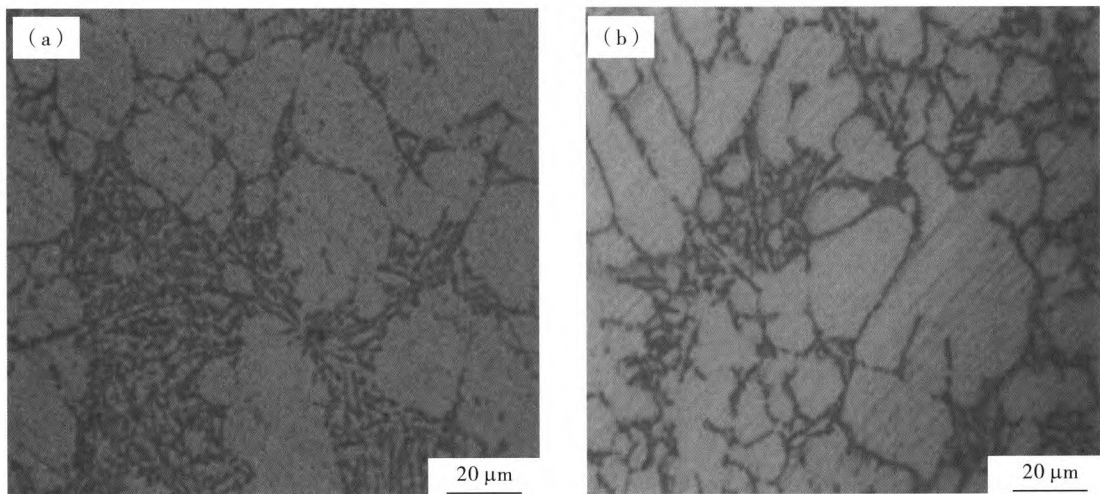


图 7 铸态下不同 Cu 含量的合金显微组织
(a) $w(\text{Cu}) = 1.5\%$; (b) $w(\text{Cu}) = 3\%$

Fig. 7 Optical microstructure of alloys with different Cu content in cast state

3.3 Mg 含量对合金组织的影响

在 Si, Cu, Mn 三种元素的质量分数分别为 10%, 1.5%, 0.1% 的条件下, 铸态下不同 Mg 含量

的合金显微组织如图 8 所示. 图 8 显示, 当 Mg 含量增大时, Mg 与 Si 在合金中会形成 Mg_2Si 相, 而 Mg_2Si 的硬度与弹性模量比铝高, 从而使合金的抗拉强度提高. 然而当 Mg 含量过高时, 由于形成的

Mg_2Si 较多且与共晶 Si 相、 Al_2Cu 相及 $Al_9Fe_2Si_2$ 等相聚集在一起,形成较大的不规则块状物分布于 $\alpha(Al)$ 晶界,致使合金的抗拉强度降低^[7]. 随着 Mg 含量的增加,白色块状物增加,树枝状共晶 Si 的面

积逐渐缩小. 图 8(b) 显示,当 Mg 质量分数达到 0.3% 时,基体 Al 与共晶 Si 的分布趋于有序,有助于细化共晶 Si 相,并克服共晶 Si 相的偏聚,形成的 Mg_2Si 相多分布于共晶 Si 相与 $\alpha(Al)$ 的交界处.

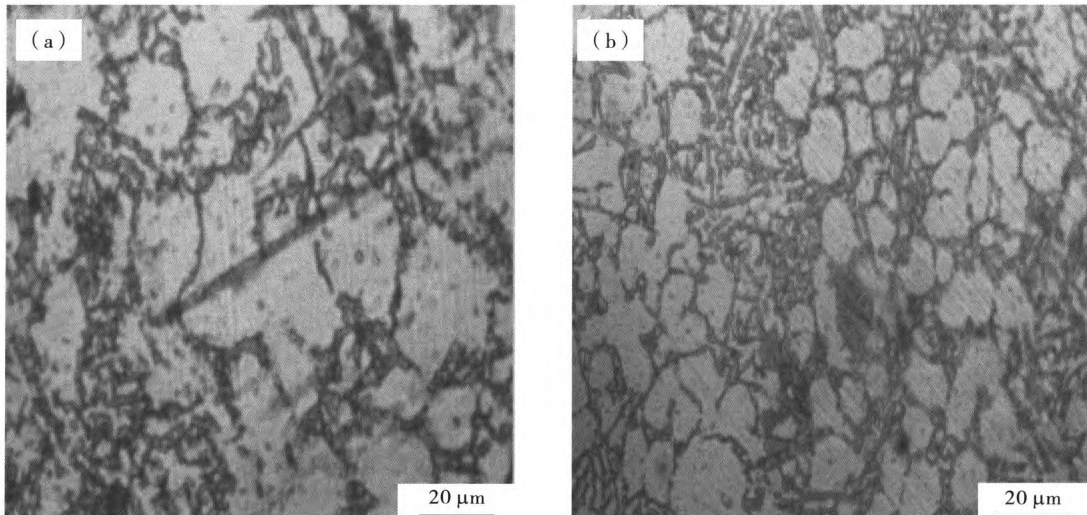


图 8 铸态下不同 Mg 含量的合金显微组织

(a) $w(Mg)=0.1\%$; (b) $w(Mg)=0.3\%$

Fig. 8 Optical microstructure of alloys with different Mg content in cast state

3.4 Mn 含量对合金组织的影响

研究表明^[8], Mn 元素的增加可以改变铸态合金中 Fe 相的分布与形态,减小 Fe 元素对合金塑性的不利影响,同时能够细化晶粒、阻止晶粒长大和再结晶. 在固溶过程中 Mn 会与基体形成 Al_6Mn 相,这种相在合金中弥散分布,在合金发生塑性变形时,

Al_6Mn 相会阻碍晶界的滑移,有助于提高合金的抗拉强度.

在 Si, Cu, Mg 三种元素的质量分数分别为 10%, 1.5%, 0.1% 的条件下,铸态下不同 Mn 含量的合金显微组织如图 9 所示. 由图 9 可知,随着 Mn 含量的增加,合金组织中的枝晶变得粗大密集,形貌

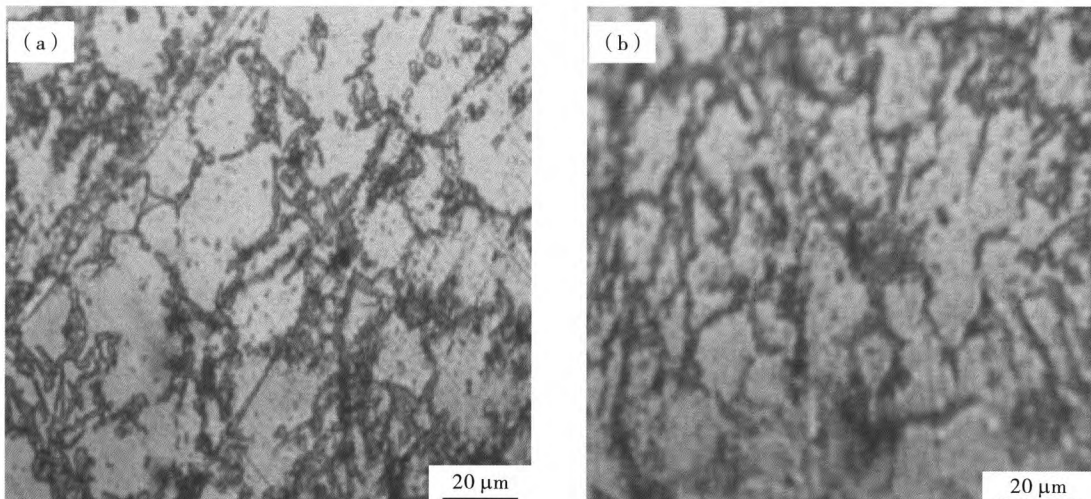


图 9 铸态下不同 Mn 含量的合金显微组织

(a) $w(Mn)=0.1\%$; (b) $w(Mn)=0.5\%$

Fig. 9 Optical microstructure of alloys with different Mn content in cast state

多为长片状和多角形块状,可以成为初生硅与共晶硅的形核核心,使硅相依附在复合相上生长。同时,共晶组织得到明显细化,由长针状变为细小的短棒状,减少了裂纹扩展的路径。

4 结 论

在 ADC12 铝合金元素含量要求的范围内,随 Si 和 Cu 含量增加,合金的抗拉强度先增大后降低;随 Mg 和 Mn 含量增加,合金的抗拉强度与延伸率皆增大。四种元素含量对合金抗拉强度及延伸率的影响顺序皆为: $Mg > Mn > Cu > Si$ 。合金中 4 种元素的最优化含量为 $w(Si) = 11\%$, $w(Cu) = 3.0\%$, $w(Mg) = 0.2\%$, $w(Mn) = 0.5\%$ 时,合金的力学性能最好,其抗拉强度为 285 MPa,延伸率为 2.23%。

参考文献:

- [1] 董显明,蹇超. 铝合金压铸标准现状及展望[J]. 铸造, 2017,66(10):1122-1124.
- [2] 文浩,罗斌,谢达明. 压铸铝合金在汽车上的应用及发展[J]. 世界有色金属,2017(14):269-271.
- [3] 余东梅. 中国铝合金压铸业的发展及现状[J]. 世界有色金属,2007(3):63-65.
- [4] 刘勇,陈超,张振富,等. 不同 Mg、Si 质量比对压铸铝合金组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色金,2017,37(11):1179-1182.
- [5] 康积行,傅高升,黄利光,等. 铝硅合金中 Si 初细化的现状与初探[J]. 福州大学学报:自然科学版,1996(6):46-51.
- [6] 杨承志,龙思远,王朋,等. Cu 含量对压铸铝硅合金组织和性能的影响[J]. 金属热处理,2016,41(11):57-61.
- [7] 石锦罡,姚辉,陈名海,等. Mg 含量对 ADC12 铝合金组织及性能的影响[J]. 热处理,2011,26(4):48-52.
- [8] 张建新,高爱华,陈昊. 合金元素对 Al-Mg-Si 系铝合金组织及性能的影响[J]. 铸造技术,2007(3):373-375.

Study on composition optimization of ADC12 die-casting aluminum alloy

ZHU Ruixiang, QIN Xinyu, HU Nan, LU Liangyu

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

Abstract: In order to obtain the best mechanical properties of ADC12 die-casting aluminum alloy, the addition of Si, Cu, Mg and Mn was studied by single factor test and orthogonal test, and the microstructure was analyzed. The results show that the tensile strength of the alloy increases first and then decreases with the increase of Si and Cu content in a certain range. The tensile strength and elongation of the alloy increase with the increase of Mg and Mn contents. The order of influence of four elements on the tensile strength and elongation of the alloy is $Mg > Mn > Cu > Si$. When the optimum content of main elements in the alloy is $w(Si) = 11\%$, $w(Cu) = 3.0\%$, $w(Mg) = 0.2\%$, $w(Mn) = 0.5\%$, the mechanical properties of the alloy are the best. Its tensile strength is 285 MPa, and the elongation is 2.23%.

Key words: die-casting aluminum alloy; microstructures; element addition amount; orthogonal test; mechanical properties