

文章编号:1673-9981(2017)04-0236-04

高性能亚共晶铝硅合金的研究

徐通, 张宇飞, 李咏凯

合肥工业大学材料科学与工程学院, 安徽 合肥 230009

摘要:通过成分优化、变质、合金化和热处理等方法, 来提高合金的硬度和强度。试验结果表明: 对亚共晶铝硅合金进行变质处理, 能将共晶 Si 由针片状变质成细小纤维状, 促使合金力学性能得到改善; 亚共晶合金中加入 Cu 和 Ni 等元素, 经固溶+时效处理后亚共晶 Al-Si 合金的力学性能得到大幅度提高; 当 Cu 含量为 3.5% 和 Ni 含量为 2.0% 时, 合金的硬度和抗拉强度达到最大值, 分别为 155 HBS 和 347.72 MPa, 与铸态下的相比硬度提高了 38.3%、强度提高了 66.8%。

关键词:变质; 热处理; 合金化; 力学性能

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

铝硅系铸造合金因具有密度小、比强度高、铸造性能好、可回收性强及资源丰富等一系列优点, 而被广泛应用^[1]。但铝硅系铸造合金的共晶硅呈片状, 使其力学性能较差, 特别是塑性较差。在实际生产中采取了多种工艺方法, 以改善共晶硅的形态, 提高铝硅铸造合金的力学性能。

本实验对亚共晶 Al-Si 活塞合金性能提高的研究主要集中于合金化、热处理及变质处理三方面^[2]。将 Cu, Ni 和 Mg 等强化元素添加到共晶 Al-Si 合金中配制成多元合金。一方面, 经热处理工艺将元素形成的强化相不同程度地溶入到 α -Al 基体中, 形成过饱和固溶体, 并在随后的时效过程中重新析出, 起到固溶强化和沉淀强化作用, 增强合金力学性能^[3]; 另一方面, 某些元素在合金中形成金属间化合物, 以共晶团形式分布在 α -Al 晶粒边界上, 促使合金组织发生复杂性变化^[4]。这些强化相不但能改善合金高温力学性能, 而且还能降低合金线膨胀系数。

1 试验材料及制备方法

1.1 试验材料

试验所用的亚共晶铝硅合金 ($w(\text{Si}) = 10.5\%$)

是由纯 Al 和工业纯 Si (纯度为 99.9%) 按一定比例熔炼而成。在进行亚共晶铝硅合金化试验时, 变质剂采用的是 Al-Sr ($w(\text{Sr}) = 10\%$) 合金, 添加的中间合金为 Al-Cu ($w(\text{Cu}) = 50\%$) 和 Al-Ni ($w(\text{Ni}) = 10\%$), 以及添加纯 Mg、纯 Zn、覆盖剂、精炼剂等。

1.2 合金的熔炼

制备亚共晶铝硅合金时, 用电阻式坩埚炉进行熔炼。先将纯铝在 780 °C 下熔化并保温 30 min, 待其完全熔化后将纯 Si 按一定比例压入熔体中并保温 30 min, 待其完全熔化后用钟罩将六氯乙烷压入熔体中进行一次精炼处理, 保温 10 min 后撇渣, 得到铝硅二元合金熔液。然后再分别加入不同量的中间合金 Al-Ni 和 Al-Cu, 搅拌均匀后在熔体表面均匀地撒上适量的覆盖剂, 静置 30 min 后撇渣, 加热待温度升至 780 °C 时, 再加入变质剂 Al-Sr 并静置 30 min, 最后浇注到模具中以制备金相试样。在浇铸的经不同变质处理的铝硅合金铸块的同一部位上切取试样, 然后用 0.5% 的 HF 溶液腐蚀 3 s, 最后进行显微组织观察与研究。

收稿日期: 2017-08-28

作者简介: 徐通 (1992-), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生。

2 结果与讨论

2.1 Sr 变质处理

为了得到 Sr 对共晶铝硅合金最佳的变质效果,设计了 4 组试验,Sr 加入量分别为 0.04%,0.06%,0.08%和 0.10%。Sr 加入量对共晶铝硅合金组织形态的影响如图 1 所示。图 1(a)为未经变质处理的亚共晶铝硅合金组织形貌。从图 1(a)可见,组织中有大量锯齿状共晶硅,其严重割裂基体,影响了合金的力学性能,这样的合金在实际生产中无法达到使用要求。图 1(b)~图 1(e)是 Sr 加入量分别为 0.04%,

0.06%,0.08%和 0.1%的铝硅合金组织形貌。从图 1(b)~图 1(e)可见,随着 Sr 加入量的增加,共晶硅逐渐球化,形状从锯齿状向纤维状和蠕虫状转变。当 Sr 含量为 0.06%时,微观组织 $\alpha(\text{Al})$ 树枝晶略有细化,蠕虫状的共晶硅大部分细化成圆点状;当 Sr 含量增加到 0.08%乃至 0.10%时, $\alpha(\text{Al})$ 开始变粗,出现粗大树枝晶,圆点状共晶硅开始粗化,发生过变质现象。Sr 变质对合金中微观组织有显著的细化作用, $\alpha(\text{Al})$ 树枝晶得到了细化,其形状更规则、圆滑,没有明显的一次及二次分支;共晶硅由粗大的针片状变成细小蠕虫状。

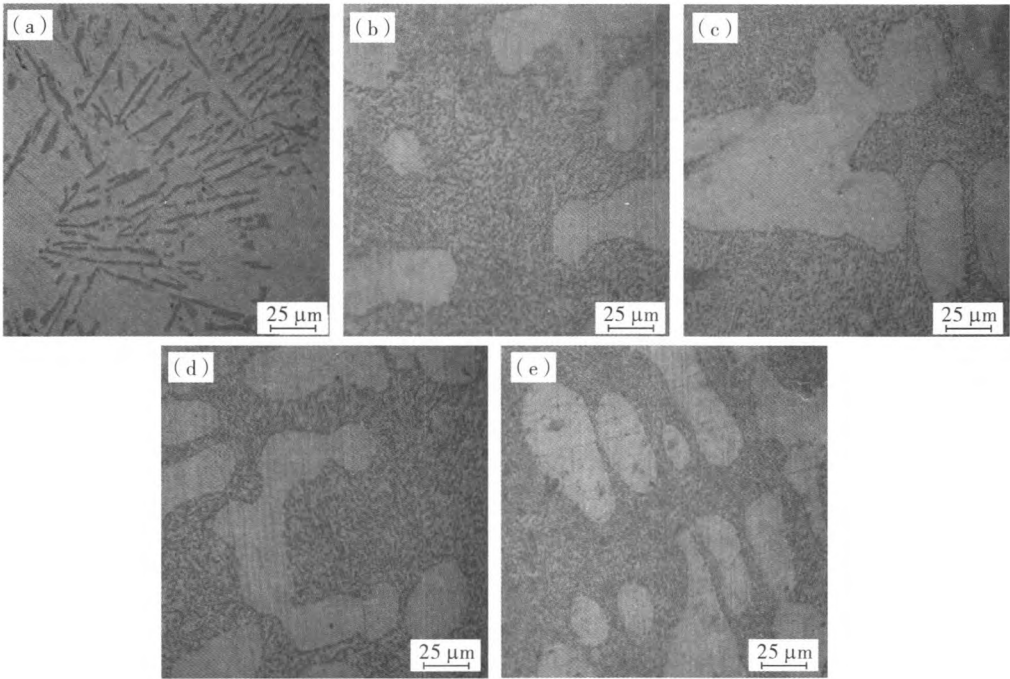


图 1 Sr 对亚共晶铝硅合金组织形态的影响
(a)0;(b) 0.04%;(c) 0.06%;(d) 0.08%;(e) 0.10%

Fig. 1 The effect of Sr modification on the structural morphology of hypo-eutectic Al-Si alloy

采用 Image-Pro-Plus 软件进一步对 Sr 变质后的亚共晶铝硅合金微观组织中共晶 Si 相晶粒尺寸进行了分析,结果列于表 1。由表 1 可知:当 Sr 加入量为 0.04%时,合金微观组织中共晶 Si 相平均尺寸从未变质的 73 μm 减小为 34 μm ;当 Sr 加入量增加到 0.06%时,合金微观组织中共晶 Si 相平均尺寸急剧减小到 8 μm ;进一步增加 Sr 含量到 0.08%时,合金微观组织中共晶 Si 相平均尺寸略微增加到 19 μm ;当 Sr 含量增加到 0.1%时,合金微观组织中共

晶 Si 相平均尺寸增加到 21 μm 。综上所述,亚共晶铝硅合金中 Sr 的加入量以 0.06%较为合适,对组织的细化效果最好。

表 1 Sr 含量对共晶硅相平均尺寸的影响					
Table 1 The effect of Sr content on the average size of the eutectic silicon phase					
Sr 加入量 $w/\%$	0	0.04	0.06	0.08	0.10
共晶硅平均尺寸/ μm	73	34	8	19	21

2.2 合金化对亚共晶铝硅合金力学性能的影响

选取四个不同组成成分的亚共晶铝硅合金试样(表 2),将它们分别经过变质处理(Sr 加入量为

0.06%)和热处理(510 ℃下固溶 6 h,185 ℃下时效 6 h)后,对合金进行硬度及室温下抗拉强度的测定,所得结果分别列于表 3 和表 4.

表 2 试样合金元素含量
Table 2 sample alloy elements content

序号	试样合金元素含量 w/%						
	Si	Cu	Ni	Mg	Zn	Sr	Al
1	10.5	3.0	1.0	1.0	0.5	0.06	余量
2	10.5	3.5	1.0	1.0	0.5	0.06	余量
3	10.5	3.0	2.0	1.0	0.5	0.06	余量
4	10.5	3.5	2.0	1.0	0.5	0.06	余量

表 3 铸态下合金的硬度和抗拉强度
Table 3 The hardness and tensile strength of the alloy in casting

序号	合金元素含量 w/%		硬度 (HBS)	抗拉强度 /MPa
	Cu	Ni		
1	3.0	1.0	93.9	151.14
2	3.5	1.0	98.3	194.24
3	3.0	2.0	99.5	164.58
4	3.5	2.0	112	208.43

由表 3 可知,铸态下当其它合金元素含量相同时,随着 Cu 和 Ni 含量的增加合金的硬度及抗拉强度逐渐增加,当 Cu 和 Ni 含量为 3.5%和 2.0%时,合金硬度及抗拉强度达到最大值,分别为 112 HBS 和 208.43 MPa.

表 4 时效后合金的硬度和抗拉强度
Table 4 The hardness and tensile strength of the alloy after aging

序号	合金元素含量 w/%		硬度 (HBS)	抗拉强度 /MPa
	Cu	Ni		
1	3.0	1.0	140	290.43
2	3.5	1.0	150	323.74
3	3.0	2.0	138	298.73
4	3.5	2.0	155	347.72

由表 4 可知,经热处理后合金的力学性能大幅度提高,当 Cu 含量 3.5%和 Ni 含量 2.0%时合金的硬度及抗拉强度达到最大值,分别为 155 HBS 和 347.72 MPa,与铸态合金相比硬度提高了 38.3%、

强度提高了 66.8%.综上所述,在加入 3.5%的 Cu 和 2.0%的 Ni,同时经过适当的热处理工艺后,Al-Si 合金力学性能达到最佳.

对亚共晶 Al-Si 合金来说,固溶和时效处理对其力学性能有显著影响.在固溶温度下保温的目的是使合金中的强化相充分溶入基体中,从而形成过饱和固溶体,同时球化 Si 相.固溶处理可提高合金基体过饱和程度及组织均匀化程度,为时效时沉淀相的析出提供驱动力,从而影响沉淀相的数量、大小及分布状态,最终决定合金的力学性能.亚共晶 Al-Si 合金在固溶处理后需要进行时效处理,时效处理过程中合金元素沉淀过程一般需要经过四个阶段:形成 GPI 区,合金力学性能提高;形成 GPII 区,合金强度进一步提高;形成亚稳相,使合金得到更高的强度;形成第二相质点的聚集,显著降低合金强度,提高合金塑性. Cu 和 Ni 对铝硅合金的强度及硬度有强化效果,直径更大的 Cu 和 Ni 原子会置换合金中的 Al 原子,从而使晶格发生畸变,阻止位错的滑移^[5].同时, Cu 和 Ni 会与 Al 生成金属化合物 CuAl₂或 Ni₃Al 且弥散分布在基体周围,阻碍位错的运动,使位错切割需要更大的力,从而使合金的强度及硬度增加.所以 Cu 和 Ni 的加入,经过热处理后在合金组织中形成强化相,对提高合金力学性能有很大的帮助.

3 结 论

(1)Sr 变质对亚共晶 Al-Si(w(Si)=10.5%)合金中微观组织有显著的细化作用,当 Sr 含量为

0.06%时对组织的细化效果最好.

(2)亚共晶 Al-Si 合金的力学性能随着 Cu 和 Ni 含量的增加而提高,铸态下当 Cu 含量为 3.5%和 Ni 含量为 2.0%时,合金硬度达到最大值 112HBS,抗拉强度最大值 208.43 MPa.

(3)经过固溶+时效处理之后,亚共晶 Al-Si 合金的力学性能得到大幅度提高,当 Cu 含量 3.5%和 Ni 含量 2.0%时硬度和抗拉强度达到最大值,分别为 155HBS 和 347.72 MPa,与铸态的相比硬度提高了 38.3%、强度提高了 66.8%.

参考文献:

[1] 陈琪云. 铝合金活塞材料的研发与应用进展[J]. 合肥学院学报,2012,22(3):46-49.

[2] 孙进宝. Al-15.5Si-4.5Cu-1.0Zn-0.7Mg-0.5Ni 变形合金组织与性能研究[D]. 沈阳:东北大学,2011.

[3] ASGHAR Z, REQUENA G, KUBEL F. The role of Ni and Fe aluminides on the elevated temperature strength of an AlSi12 alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(21): 5691-5698.

[4] BELOV N A, ESKIN D G, AVXENTIEVA N N. Constituent phase diagrams of the Al-Cu-Fe-Mg-Ni-Si system and their application to the analysis of aluminium piston alloys [J]. Acta Materialia, 2005, 53 (17): 4709-4722.

[5] 张洋. Sr 加入量及微量 Cu 元素对 A357 合金组织和性能的影响[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学材料科学与工程学院,2010.

The study of high performance hypo-eutectic aluminum silicon alloy

XU Tong, ZHANG Yufei, LI Yongkai

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

Abstract: Through the composition methods of optimization metamorphism, alloying and heat treatment to improve the hardness and strength of the alloy. The results show that the modification treatment of hypoeutectic Al-Si alloy, eutectic Si by needle plate can be metamorphosed into tiny fibrous and mechanical properties of alloy can be improved. When adding the element such as Cu and Ni, after solid solution and aging treatment, the mechanical properties of hypo eutectic Al-Si alloy are improved greatly; When Cu content is 3.5% and the content of Ni was 2.0%, alloy reach maximum hardness and tensile strength, 155 HBS and 347.72 MPa, respectively, compared with the as-cast alloy the hardness increased by 38.3%, the intensity is increased by 66.8%.

Key words: metamorphism; heat treatment; alloying; mechanical properties