

Si、Cu、Ti 对亚共晶铝硅合金组织与性能的影响

王屿鑫, 相志磊, 李雷哲, 李 萌, 谷欣硕, 陈子勇

(北京工业大学材料科学与工程学院, 北京 100020)

摘要: 使用正交试验的方法研究了Si、Cu、Ti三种合金元素对铸造亚共晶铝硅合金组织及性能的影响。结果表明, 铸态合金中主要由 α (Al)、共晶Si、 θ -Al₂Cu、Q-Al₅Cu₂Mg₈Si₆和II-Al₈Mg₃FeSi₆相组成, 热处理后 θ -Al₂Cu相更均匀的析出, 而II相转变为 β -Al₅FeSi (Cu)相。经过元素调控和T6热处理后的铸造铝硅合金通过力学性能测试发现, 当Si含量为9%、Cu含量为1.5%、Ti含量为0.1%时, T6 (固溶520 ℃保温5 h+时效180 ℃保温4 h)处理的铝合金强塑性匹配达到最佳。合金的室温抗拉强度和伸长率分别为422 MPa和6.2%, 250 ℃保温1 h的高温抗拉强度和伸长率分别为215 MPa和9.6%, 为缸盖材料的应用和发展提供了一定的理论指导。

关键词: Al-Si-Cu-Mg合金; 正交试验; 显微组织; 力学性能; 高温性能

作者简介:

王屿鑫 (1998-), 女, 硕士, 主要研究方向为铝合金制备及加工技术。E-mail: 13522911420@163.com

通讯作者:

陈子勇, 男, 教授, 博士, 博士生导师。电话: 13520638022, E-mail: czy@bjut.edu.cn

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2024) 10-1392-09

基金项目:

国家自然科学基金 (10009011201802)。

收稿日期:

2024-03-06 收到初稿,
2024-05-06 收到修订稿。

铝合金作为一种轻质材料, 在汽车轻量化建设中已经得到了广泛应用, 尤其是发动机部件中常使用铝合金来替代传统的铸铁材料实现减重目的, 同时由于铝合金具有良好的导热性能也可以提高发动机散热能力。但由于现代汽车发动机技术朝着小型化、高功率及高爆发压力发展, 所以对缸盖材料的性能提出了更高的要求^[1-3]。

目前国内用于性能要求较高的高强韧铸造Al-Si合金是ZL114A, 沈阳铸造研究所^[4]开发的高强韧D357合金 (与国内ZL114A合金成分类似), 平均抗拉强度为359 MPa, 屈服强度为311 MPa, 伸长率为11.8%, 达到国际领先水平, 已用于航空用高强度铝合金铸件中。这种合金 (Al-Si-Mg-Ti) 室温性能表现良好, 但现在的汽车发动机缸盖要长时间暴露在200 ℃以上的高温环境中, 高温下合金中的强化相Mg₂Si会发生粗化, 硬度和抗拉强度将大幅降低^[5-6]。保时捷增压发动机上使用的G-AlCu5Ni1.5CoSbZr合金具有良好的高温性能, 250 ℃下抗拉强度为210 MPa, 屈服强度为140 MPa^[3], 但此合金成本较高。

合金化仍是提高铸造铝合金强韧性的重要途径, Si元素可以显著改善铝合金的铸造性能, 当Si含量越接近共晶成分点, 合金流动性会得到进一步提升, 且Si相作为硬质强化相, 当合金中Si相越多时会对合金的强度有显著提升。唐鹏等^[7]研究了Si含量对Al-Si合金性能的影响, 发现当Si含量低于共晶成分点时, 随Si含量提升Al-Si合金强度、硬度提高。

Cu元素的加入会使铝合金经过时效处理后析出弥散的Al₂Cu相, 另外, 合金中Cu和Mg同时存在会生成具有一定高温稳定性的四元金属间相Q-Al₅Cu₂Mg₈Si₆, 这种相既提高了合金的室温强度, 也提高了其高温性能, 使合金在长时间热暴露下也具有较高强度。Dong X X等^[8]研究了Al-9Si-0.5Mg-xCu合金的力学性能, 发现随Cu含量从0提升至1.25%, 合金的屈服强度呈增加趋势, 但在0.4%~0.85%的Cu含量之间, 强度无太大差别, 这与组织中 β 相的减少和 θ 相、Q相的增加有关, 其中Cu含量为1.25%时合金强度达到最大323 MPa, 伸长率为3%。

Ti元素在显著地细化铝合金晶粒的同时, 还可以降低合金中树枝状晶的间距,

并以此提高材料强韧性及抑制粗大第二相粒子生长。同时,晶粒细化也会促进合金元素均匀分布,降低合金元素偏析,有利于后续热处理。杨湘杰等^[9]研究了Ti元素对Al-12Si合金性能的影响,发现Ti元素的加入提升了合金的伸长率,但对强度提升不明显。

目前,针对采用Si、Cu、Ti元素综合调控以提高合金力学性能的研究相对较少,并且对于Si、Cu、Ti元素的复合微合金化的潜在机理尚未明确。本研究通过优化Si、Cu、Ti元素含量并辅以合适的热处理制度来研究复合微合金化对合金显微组织和力学性能的影响,并得到综合力学性能最佳的合金。

1 试验材料与方法

本试验采用石墨黏土坩埚进行熔炼,图1a为本试验熔炼时使用的井式电阻炉。试验材料为高纯Al(99.9%)、纯Mg和Al-30Si、Al-50Cu、Al-10Ti、Al-10Sr(质量分数,%)中间合金。纯Al及Al-30Si、Al-50Cu、Al-10Ti中间合金在750℃加热熔融,然后加入C₂Cl₆精炼剂除气精炼再静置5 min,加入Al-10Sr中间合金搅拌均匀再静置15 min,最后加入易烧损的纯Mg,在700℃进行浇注,浇注的金属型模具及铸锭如图2所示。对铸态合金进行热处理,在520℃固溶5 h,60℃的水淬火后再在180℃时效4 h。试验采用正交试验的

方法设计了3因素3水平即L₉(3³)的正交表,具体合金成分如表1所示。

微观试样经过粗磨、细磨、抛光后,采用如图1b

表1 设计的合金成分及含量
Table 1 Compositions and contents of
designed alloys

序号	Si	Cu	Ti	Mg	Al
A [#]	7.0	1.5	0	0.4	余量
B [#]	7.0	2.0	0.1	0.4	余量
C [#]	7.0	2.5	0.2	0.4	余量
D [#]	9.0	1.5	0.1	0.4	余量
E [#]	9.0	2.0	0.2	0.4	余量
F [#]	9.0	2.5	0	0.4	余量
G [#]	11.0	1.5	0.2	0.4	余量
H [#]	11.0	2.0	0	0.4	余量
I [#]	11.0	2.5	0.1	0.4	余量

所示的QUANTA FEG 650型热场发射扫描电镜观察,使用20 kV电压、5.0束斑直径观察合金微观组织,并通过附件EDAX能谱仪对合金中的第二相进行成分分析。采用如图1c所示的CMT 5504 GL型万能试验机对材料力学性能进行测试,其中,室温拉伸试样加工为宽度为3 mm、厚度为2 mm的板状拉伸试样,高温拉伸试样



(a) 井式电阻炉



(b) 扫描电镜



(c) 万能试验机

图1 试验设备

Fig. 1 Experimental equipments

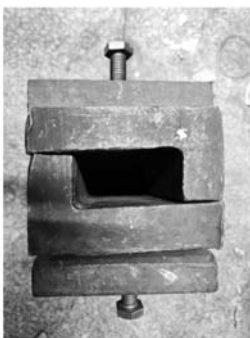


图2 金属型模具及铸锭

Fig. 2 Metal molds and ingots

加工为 $\Phi 5$ mm, 有凸台的棒状拉伸试样, 且两种拉伸试样的标距均为25 mm。室温及高温拉伸速率均为1 mm/min, 其中高温拉伸测试之前样品需要在250 $^{\circ}\text{C}$ 下保温1 h后开始测试, 室温及高温拉伸试样尺寸如图3所示。

2 试验结果与分析

2.1 铸态合金组织分析

图4是九种合金在背散射电子下的铸态微观组织图

像, 可以较为清晰地观察到各个合金中 α (Al) 晶粒的大小, 随着Ti含量的增加, α (Al) 的二次枝晶臂间距均有减小趋势, 且组织中粗大的树枝状 α (Al) 数量减少, 几乎由细小的等轴树枝晶所取代。这是由于Ti元素的加入使合金在凝固过程中发生 $\text{L} + \text{TiAl}_3 \rightarrow \alpha$ (Al) 的包晶反应^[10, 11], 另外 TiAl_3 与Al之间存在(100) TiAl_3 /(100) Al等十一对错配度未超过5%的共格晶面^[12-14], 两者良好的晶格匹配关系使 TiAl_3 颗粒可以成为很好的异质形核基底, 起到晶粒细化作用。

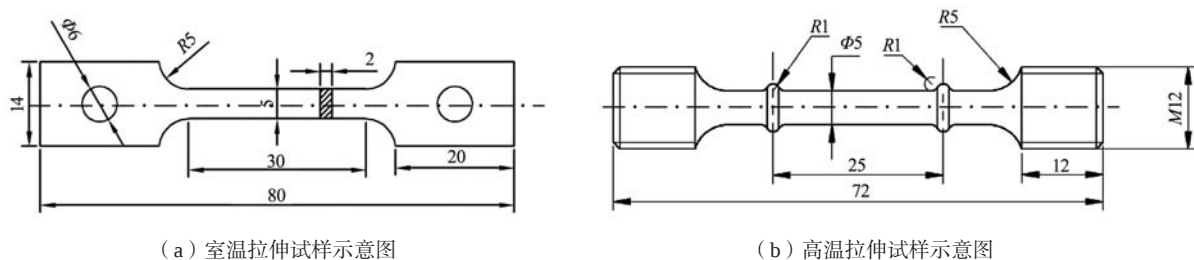


图3 拉伸试样尺寸示意图

Fig. 3 Diagram of size of the tensile specimens

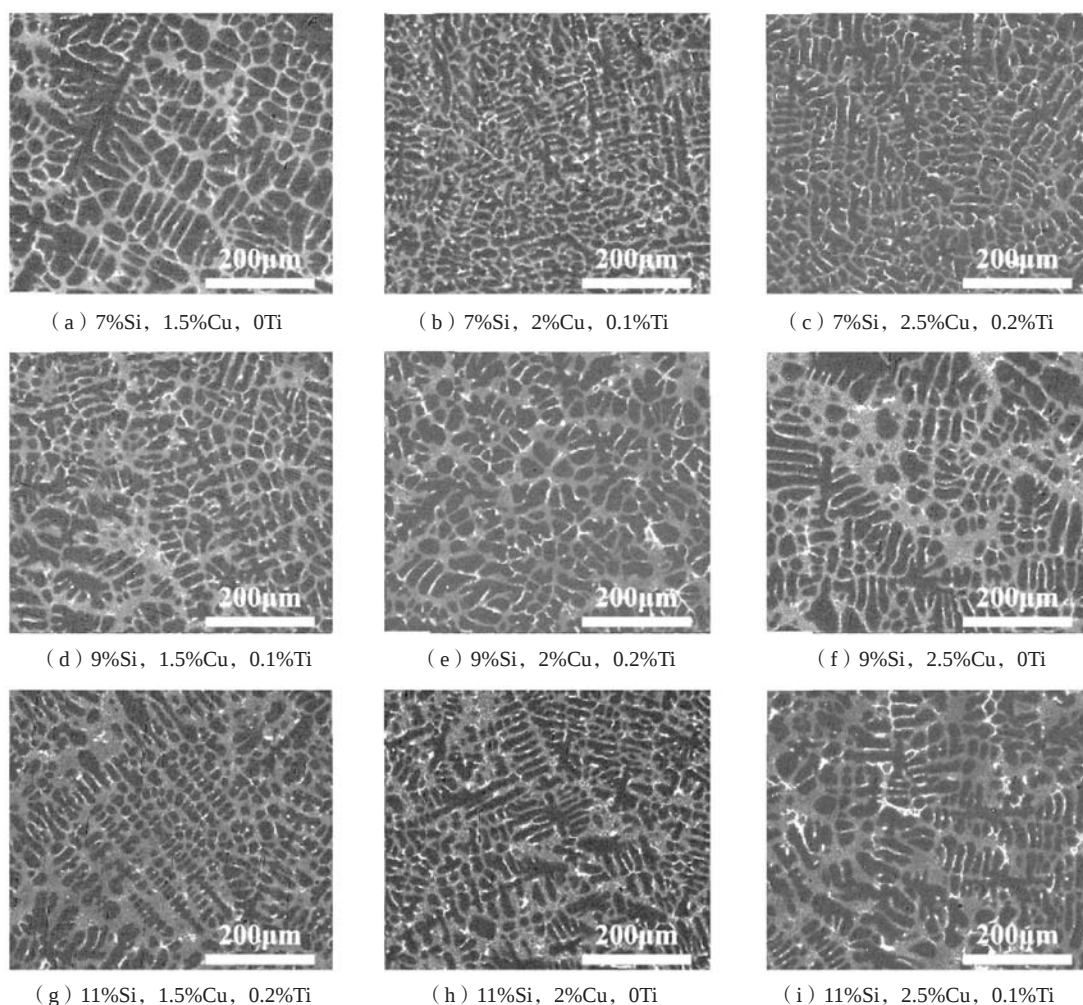


图4 Al-Si-Cu-Mg-Ti合金背散射电子图像

Fig. 4 Backscattered electron images of the Al-Si-Cu-Mg-Ti alloys

为了具体衡量Ti元素对合金的细化效果,对每种合金分别统计了二次枝晶臂间距,得到每种Ti含量下的平均二次枝晶臂间距如图5所示。根据统计结果发现,少量的Ti元素对铝合金有很好的晶粒细化作用,当Ti含量在0.1%时,已具有良好的细化作用,Ti含量在0.2%时,二次枝晶臂间距与0.1%的合金差异不显著。

观察图6发现,经过Sr变质后的共晶Si相呈现珊瑚状形貌,虽然这些不同Si含量的合金中添加的Sr元素含量相同,但几种合金中并没有观察到未完全变质或过变质的情况,均已呈现良好的变质效果,这种形貌的Si相也利于后续热处理时的熔断和球化。另外从图6中也可以发现,随着Si含量的增加,合金中黑色的共晶Si相体积分数明显增加,且分布在 α (Al)晶界间的Si相也从细条带分布逐渐连成大片。

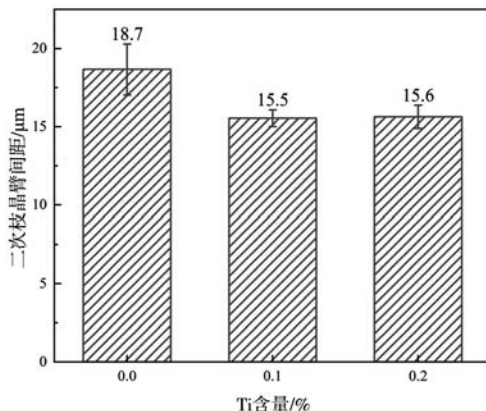


图5 合金在不同Ti含量下的平均二次枝晶臂间距

Fig. 5 Average secondary dendrite arm spacing of the alloys with different Ti additions

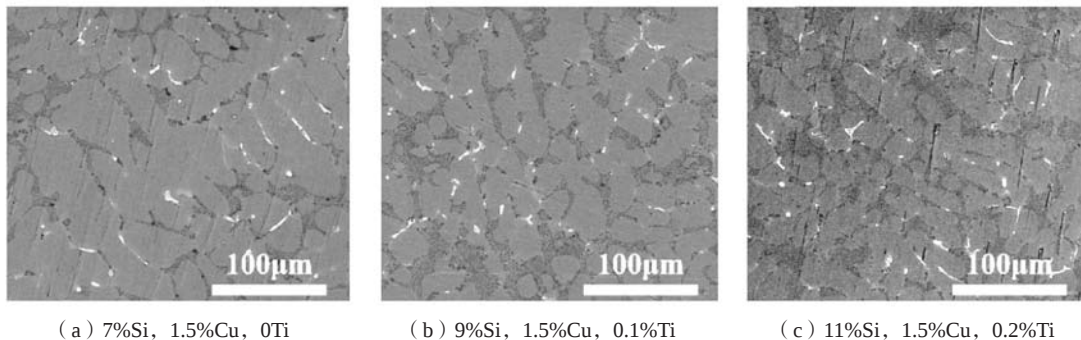


图6 铸态Al-xSi-1.5Cu合金微观组织

Fig. 6 Microstructures of the as cast Al-xSi-1.5Cu alloys

所有合金中含有的元素种类较少,各个合金中的第二相种类相同,以合金A[#]为例,使用了XRD测试以及EDS能谱分析的方法对合金中尺寸和形貌各异的金属间化合物进行分析。图7是铸态合金A[#]的XRD检测结果,可以发现,铸态材料中主要由 α (Al)、共晶Si、 θ -Al₂Cu、Q-Al₅Cu₂Mg₈Si₆和II-Al₈Mg₃FeSi₆相组成。图8b是合金A[#]在高倍下的背散射电子图像,结合表2的EDS能谱分析,对应铸态合金组织中的金属间化合物主要是:1点亮白色相为 θ -Al₂Cu相;2点浅灰色块状相为Q-Al₅Cu₂Mg₈Si₆相;3点则是由于杂质Fe的存在而出现的灰色中文汉字状II-Al₈Mg₃FeSi₆相,此EDS能谱分析结果也与图7的XRD检测结果一致。在图8中也可以明显看出,随着Cu含量的增加,合金中亮白色的 θ 相明显变多且呈带状分布,这是由于合金中高Cu低Mg的元素添加量使合金中的Q-Al₅Cu₂Mg₈Si₆相体积分数取决于Mg含量,除了与Al、Si、Cu元素结合生成的Q-Al₅Cu₂Mg₈Si₆相外,剩余的Cu均会生成 θ -Al₂Cu相^[15]。

2.2 热处理态合金组织分析

从图9中可以观察到,所有合金在经过520℃固溶

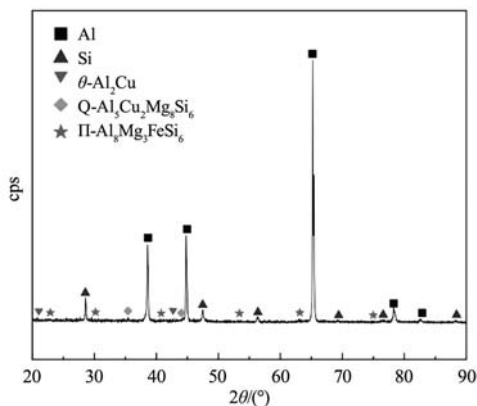
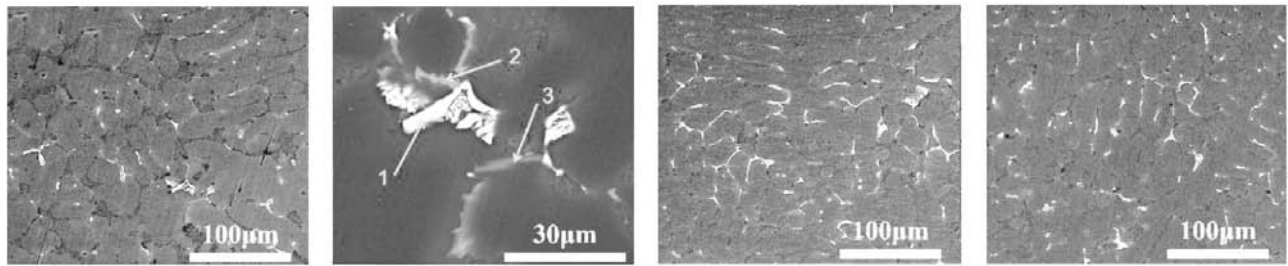


图7 铸态合金A[#]的XRD分析

Fig. 7 XRD analysis of the as-cast alloy A[#]

5 h以及180℃时效4 h的热处理后,铸态下呈现珊瑚状的共晶Si相发生熔断、细化和钝化,整体呈现近球状,更为均匀地分布在合金基体中。图中少量浅色的相均为金属间化合物,可以看到,合金中剩余的金属间相并没有很多,经过T6热处理后,几乎完全回溶Al₂Cu相,只有微量Q相和部分含Fe相,由于含Fe相的溶解温度较高,因而在合金中保留较多。随着Cu含量的提高,合金中Al₂Cu相的含量增加,且 θ 相在组织中存



(a) 7%Si, 1.5%Cu, 0Ti (低倍) (b) 7%Si, 1.5%Cu, 0Ti (高倍) (c) 7%Si, 2.0%Cu, 0.1%Ti (d) 7%Si, 2.5%Cu, 0.2%Ti

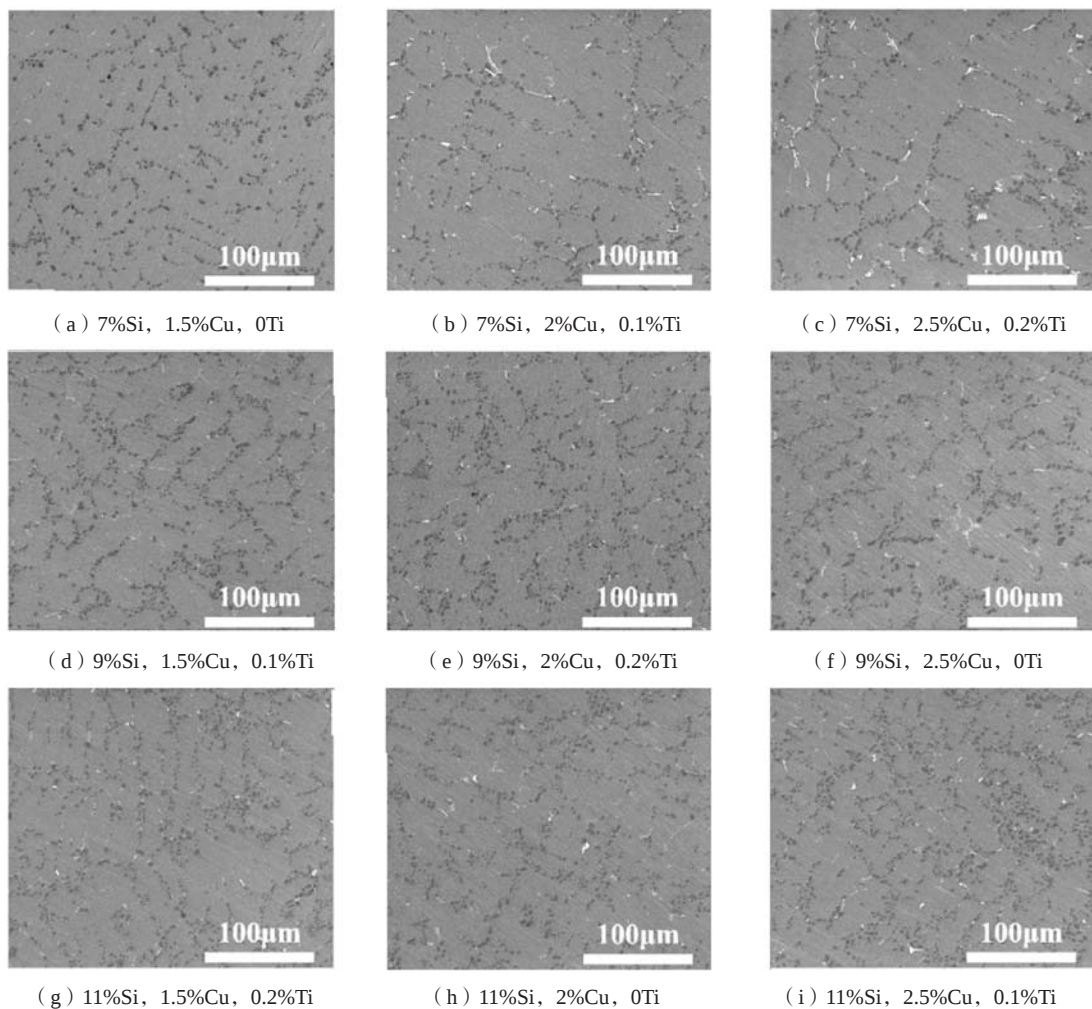
图8 不同Cu含量的铸态Al-7Si合金微观组织

Fig. 8 Microstructures of the as cast Al-7Si alloys with different Cu contents

表2 图8b中点的EDS能谱分析结果
Table 2 EDS results of strengthening phase in figure 8b
at. %

区域	Al	Si	Cu	Mg	Fe	第二相
1	72.4	1.6	26.0	-	-	θ -Al ₂ Cu
2	37.0	26.6	7.2	29.2	-	Q-Al ₅ Cu ₂ Mg ₆ Si ₆
3	65.4	20.0	-	11.1	3.5	II-Al ₆ Mg ₃ FeSi ₆

在两种形态，一种是块状的 θ_b 相，另一种是珊瑚状的共晶 θ_e 相，共晶 θ_e 相可以轻松碎裂成小颗粒状，然后球化将Cu扩散到周围基体而完成回溶，块状的 θ_b 相则需通过钝化、球化再逐渐扩散回溶，相比 θ_e 相的回溶需要更长时间^[16]。Cu含量的增加使含Cu相转为带状分布，也更利于 θ_b 相的析出，在热处理过程中受固溶度、固溶温度及时间的影



(a) 7%Si, 1.5%Cu, 0Ti

(b) 7%Si, 2%Cu, 0.1%Ti

(c) 7%Si, 2.5%Cu, 0.2%Ti

(d) 9%Si, 1.5%Cu, 0.1%Ti

(e) 9%Si, 2%Cu, 0.2%Ti

(f) 9%Si, 2.5%Cu, 0Ti

(g) 11%Si, 1.5%Cu, 0.2%Ti

(h) 11%Si, 2%Cu, 0Ti

(i) 11%Si, 2.5%Cu, 0.1%Ti

图9 热处理态Al-Si-Cu-Mg-Ti合金显微组织

Fig. 9 Microstructures of the heat-treated Al-Si-Cu-Mg-Ti alloys

响，Cu含量高的合金中的Al₂Cu相未能完全回溶到基体中。

以合金C[#]为例，对其热处理后的析出相进行EDS面扫描，各元素分布如图10所示。在图中可以清晰看到，Mg元素几乎均匀分布，左上部富集区域与Cu及Si元素富集区域重叠，此处浅灰色的相边缘钝化且模糊，这是未完全溶解的Q相。Fe元素富集的区域对应显微组织图中的针状相，且与Cu元素的富集区

域有重叠，这种细簇的针状β-Al₅FeSi(Cu)相是由Ⅱ-Al₈Mg₃FeSi₆相在固溶处理过程中将其中的Mg和Si释放到基体中转变而来的^[17]。剩余Cu元素未和Mg及Fe元素富集的区域则是未完全回溶的Al₂Cu相，此相已经发生熔断变成小颗粒状分布在基体中。观察整体热处理后的组织发现，合金中的大块金属间化合物消失，剩余的未回溶第二相细化分布在基体中。

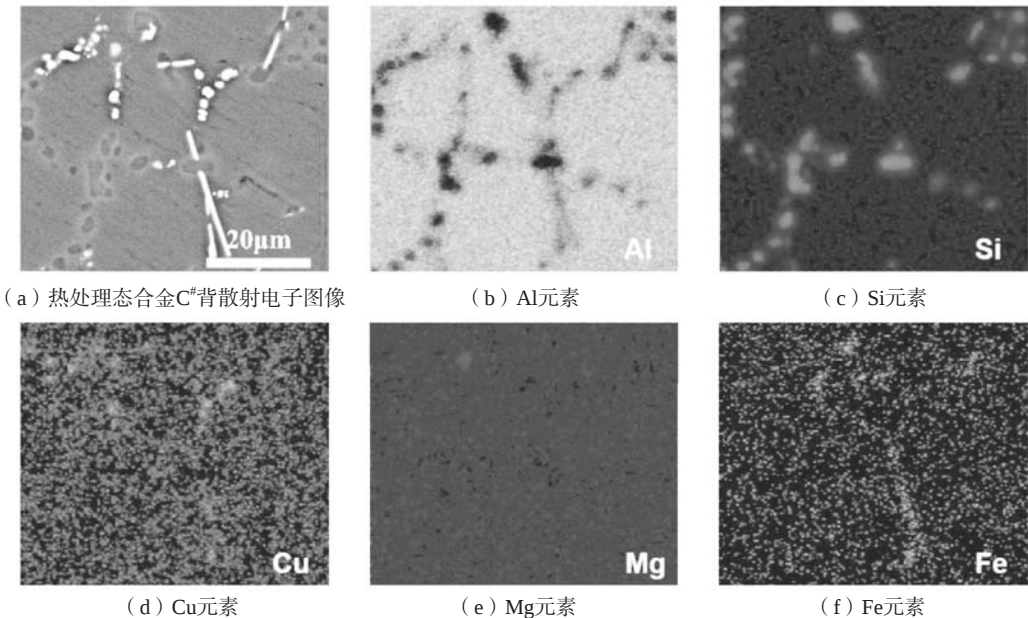


图10 热处理态合金C#显微组织及对应EDS元素分布图

Fig. 10 Microstructure and EDS distribution of the C# sample in heat-treated alloys

2.3 热处理态合金性能分析

缸盖材料最重要的是室温力学性能，在对正交试验的九种合金进行性能评定时选择对室温力学性能评价来确定最优元素添加量。为了综合衡量合金的整体拉伸性能，在此引入一个质量指数 Q ，这个概念最早由Drouzy等人提出，适用于Al-Si合金铸件的质量标准评定， Q 可用如下公式表示^[18]：

$$Q=UTS+c\log(e_f) \quad (1)$$

式中： UTS 为抗拉强度， e_f 为材料伸长率数值， c 为常数150 MPa。通过计算合金的 Q 值可比较合金的综合力学性能，最终得到室温拉伸性能如表3所示，试样拉伸断裂实物图如图11所示，九种合金应力应变曲线如图12所示。

图13为试验合金室温力学性能统计图，表示了Si、Cu、Ti三种元素对合金力学性能的影响程度，得到各合金元素对性能影响顺序分别如下：抗拉强度， $Si>Cu>Ti$ ；屈服强度， $Cu>Si>Ti$ ；伸长率， $Si=Cu>Ti$ ；质量指数 Q ， $Si>Cu>Ti$ 。具体各元素对合金的影响分析如下。

通过试验发现，Si含量为9%的合金相比Si含量为7%的合金抗拉和屈服强度均有大幅度提高，Si含量进一步提升到11%时，强度方面的提升有所减缓，另外，

表3 不同元素含量合金室温力学性能
Table 3 Mechanical properties of the alloys with different element contents at room temperature

合金号	Si/%	Cu/%	Ti/%	UTS/MPa	YS/MPa	δ /%	Q /MPa
A [#]	7.0	1.5	0	396	321	4.8	498
B [#]	7.0	2.0	0.1	400	332	3.4	480
C [#]	7.0	2.5	0.2	423	344	4.2	516
D [#]	9.0	1.5	0.1	422	338	6.2	541
E [#]	9.0	2.0	0.2	425	351	3.3	503
F [#]	9.0	2.5	0	427	350	3.9	516
G [#]	11.0	1.5	0.2	414	337	3.5	496
H [#]	11.0	2.0	0	433	350	2.9	502
I [#]	11.0	2.5	0.1	444	365	2.4	501

此时由于Si含量过多，虽然抗拉强度和屈服强度得到了进一步提升，但伸长率迅速下降，从质量指数 Q 的变化趋势也可以看出，当Si含量为9%时，合金的综合力学性能达到最佳。

本试验的设计成分中Si含量均低于11%属于亚共晶铝合金，在合金中的Si会以共晶硅的形式存在，由于加入了Sr元素对共晶Si相进行变质处理，铸态下的共晶



图11 试样拉伸断裂实物图

Fig. 11 Specimen tensile fractured

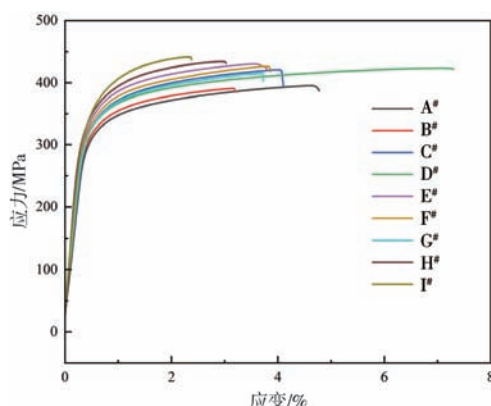


图12 合金应力应变曲线图

Fig. 12 Stress-strain curves of the alloys

Si会以珊瑚状形态存在, 经过热处理后Si相以近球状分布在合金基体中。随着Si含量的增加, 经过热处理后, 较多球化的Si相在合金基体中分布起到了很好的强化效果, 所以对合金强度达到了很好的提升效果, 但当Si含量过高时, 铸态下Si相连成大片, 即使在经过热处理后硬质Si相也很难在基体中分布均匀, 拉伸过程中这些硬脆相容易成为裂纹源使合金塑性下降^[19]。另外有研究^[20, 21]表明, 随着Si含量的增加, β -Al₅FeSi相的形成温度也随之下降, 较高的Si含量也促使合金中的Fe元素以中文汉字状 Π -Al₈Mg₃FeSi₆相生成, 而易产生应力集中的针状 β -Al₅FeSi相被抑制析出, 有利于提高合金的整体塑性。

从图13的试验结果表明, Cu元素对合金强度影响明显, 无论是抗拉还是屈服强度都随着Cu含量的提升而升高, 但Cu含量较多时伸长率会迅速下降, 当Cu含量为1.5%时综合力学性能表现最好。Mg和Cu是铝合金中最为常用且非常有效的合金化元素, 当添加高Cu低Mg比例的合金元素时, 合金中不再生成硬脆相Mg₂Si, Mg元素会与Al、Si、Cu元素结合生成具有一定高温稳定性的Q-Al₅Cu₂Mg₈Si₆相, 多余的Cu则会生成Al₂Cu相, 这些强化相可以显著提高铝合金的强度。热处理后大部分Al₂Cu相回溶到基体再经过时效处理析出弥散的纳米级 θ' -Al₂Cu相。但前文提到的随Cu含量

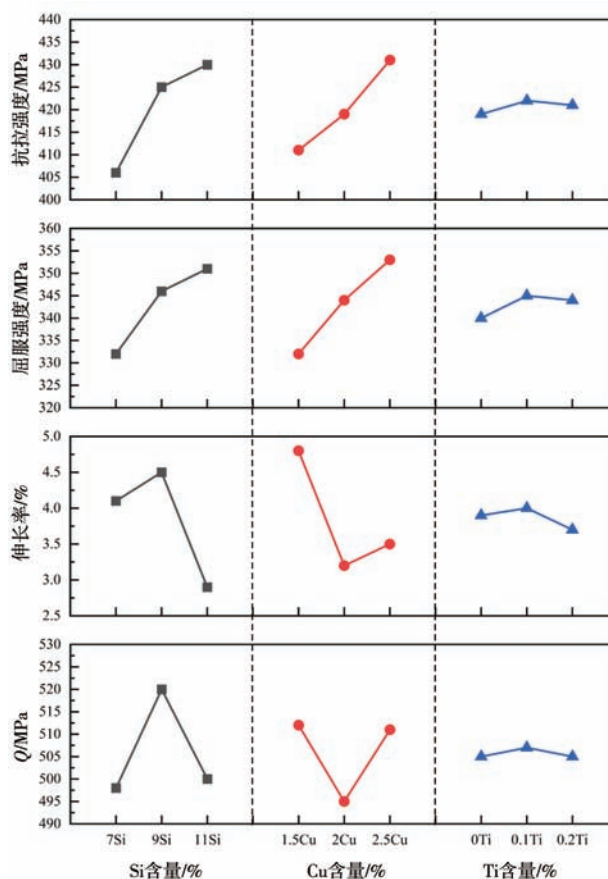


图13 不同Si、Cu、Ti元素含量对合金力学性能的影响

Fig. 13 Influences of different Si, Cu and Ti contents on mechanical properties of the alloys

提高合金中Al₂Cu相增加且呈现条带状分布, 这使合金在后续热处理过程中仍会有部分Al₂Cu相残留在晶界中, 降低了晶粒间结合强度, 在拉伸过程中Al₂Cu相阻碍位错的滑移提高了合金的强度, 但也降低了其塑性^[22]。另外Mg和Cu元素的含量对Q相的形成温度有很大影响, Cu含量增加时Q相的形成温度随之降低, Mg含量增加时Q相的形成温度升高, Q相形成温度越高即高温稳定性越好, 越不容易在后续固溶处理中溶解^[23]。随Cu含量提高Cu/Mg比增加, Q相的形成温度降低, 这也会使 Π -Al₈Mg₃FeSi₆相变多而Q相变少, 所以在Cu含

量相对较低的情况下,合金中的Mg元素更容易与Al、Si、Cu元素结合生成 $Q-Al_5Cu_2Mg_8Si_6$ 相,使得合金中的 $\Pi-Al_8Mg_3FeSi_6$ 相减少,热处理后合金中除了弥散析出的 Al_2Cu 相,更多保留的是圆滑的 $Q-Al_5Cu_2Mg_8Si_6$ 相而不是 $\Pi-Al_8Mg_3FeSi_6$ 相转变的细簇针状 $\beta-Al_5FeSi$ 相,这也有利于合金的塑性。

Ti元素对晶粒细化效果很明显,但从图13的结果反映出Ti元素对合金力学性能的影响不显著,对伸长率的影响相对明显,结合对晶粒的细化效果,并且为了防止较多的Ti元素加入使合金中出现容易产生应力集中的针状 Al_3Ti 相,这种相熔点较高在热处理后形态也几乎不会发生改变,再考虑Ti元素添加成本,0.1%的Ti含量表现最佳。

根据前文的正交试验结果并综合衡量合金室温力学性能,发现当此铸造铝硅合金中Si含量为9%、Cu含量为1.5%、Ti含量为0.1%时综合力学性能表现最佳,最终确定成分为 $Al-9Si-1.5Cu-0.4Mg-0.1Ti$,这个结果也与合金D#成分一致。表4列出了热处理后的合金D#室温及高温力学性能,图14为合金D#室温及高温下的力学应力-应变曲线图,发现通过优化Si、Cu、Ti元素含量得到的合金室温及高温性能均表现良好。

表4 热处理态合金D#的室温及高温平均力学性能
Table 4 Average mechanical properties of the heat-treated alloy D# at room and high temperature

温度	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
室温	422	337	6.2
250 °C (保温1 h)	215	209	9.6

9%含量的Si元素使合金有相对较好的铸造性能,合金凝固温度范围缩小,流动性及补缩性能进一步改善,缩孔、缩松倾向降低,有利于铸件质量的提高。另外硬质的Si相在合金中也是强化相,且高温稳定性较好,所以适量的Si含量可以使合金室温及高温力学性能得到较大改善。加入1.5%含量的Cu元素,一方面在热处理后可以得到弥散分布的 Al_2Cu 相强化合金基体,又不会出现过多的未回溶 Al_2Cu 相残留在晶界导致合金塑性降低,另外,相对较低的Cu/Mg比使 $Q-Al_5Cu_2Mg_8Si_6$ 相形成温度较高合金可具有更好的高温稳定性,更有

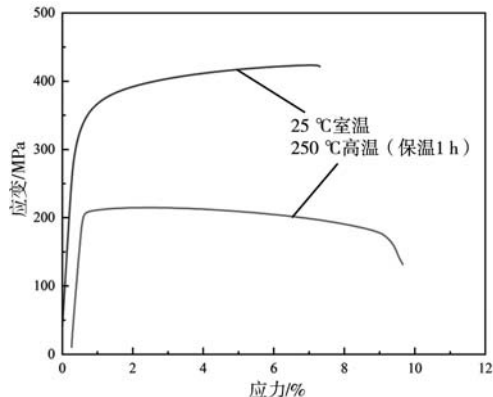


图14 合金D#室温及250 °C高温下的力学应力-应变曲线图
Fig. 14 Mechanical stress-strain curves of the alloy D# at room temperature and 250 °C temperature

利于合金的高温强度,同时也使 $\Pi-Al_8Mg_3FeSi_6$ 相减少,即后续热处理后转变得到的细簇针状 $\beta-Al_5FeSi$ (Cu)相变少,有利于合金的塑性。0.1wt.%含量的Ti元素已经使合金达到很好的晶粒细化效果,抑制了树枝晶的长大且使 $\alpha(Al)$ 向等轴晶转变,这样分布于其间的化学元素偏析范围越小,利于后续热处理。

3 结论

(1) Ti元素的添加对合金有极为显著且优异的晶粒细化效果,当添加0.1%Ti时,二次枝晶臂间距最小,晶粒细化效果最好。

(2) 合金随Si元素含量的增加,分布在 $\alpha(Al)$ 晶界间的Si相从细条带分布逐渐连成大片组织,抗拉强度和屈服强度明显提升,但伸长率先增后减,在Si含量为9%时达到最大;合金随Cu元素含量的增加, θ 相变多且呈带状分布,抗拉强度和屈服强度明显提升,但伸长率在Cu含量为1.5%时达到最高。

(3) 通过正交试验的方法确定了最佳元素含量的合金,其成分为 $Al-9Si-1.5Cu-0.4Mg-0.1Ti$ 。得到的最优合金T6态平均室温力学性能为抗拉强度422 MPa、屈服强度337 MPa、伸长率6.2%;250 °C保温1 h的高温力学性能为抗拉强度215 MPa、屈服强度209 MPa、伸长率9.6%。

参考文献:

- [1] 王祝堂. 中国汽车用铝知多少 [J]. 轻合金加工技术, 2021, 49 (1): 49.
- [2] 王祝堂, 张新华. 汽车用铝合金 [J]. 轻合金加工技术, 2011, 39 (2): 1-14.
- [3] 金敏. 现代轿车发动机铝合金气缸盖发展的新趋势 [J]. 汽车与配件, 2007 (6): 42-43.
- [4] 吴江, 冯志军, 李宇飞, 等. 高强度高韧性D357铝合金材料开发及应用 [C]//中国机械工程学会. 2015中国铸造活动周论文集. 沈阳铸造研究所, 2015: 6.
- [5] Ceschini L, Morri A, Toschi S, et al. Room and high temperature fatigue behaviour of the A354 and C355 (Al-Si-Cu-Mg) alloys: Role of microstructure and heat treatment [J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 653: 129-138.

- [6] TOSCHI S. Optimization of A354 Al-Si-Cu-Mg alloy heat treatment: Effect on microstructure, hardness, and tensile properties of peak aged and overaged alloy [J]. *Metals*, 2018, 8 (11) : 961.
- [7] 唐鹏, 刘裔源, 赵艳君, 等. Si含量和热处理制度对铸造Al-Si合金组织和性能的影响 [J]. *金属热处理*, 2020, 45 (8) : 76–81.
- [8] DONG X, AMIRKHANLOU S, JI S. Formation of strength platform in cast Al-Si-Mg-Cu alloys [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9 (1) : 9582.
- [9] 杨湘杰, 郭洪民, 康跃华, 等. Sc、Ti及短时效热处理对Al-Si合金性能的影响 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2023, 43 (5) : 577–582.
- [10] 陈亚军, 许庆彦, 黄天佑. 铝合金晶粒细化剂研究进展 [J]. *材料导报*, 2006 (12) : 57–61.
- [11] 丁万武, 夏天东, 赵文军, 等. 中间合金中第二相粒子TiC和TiAl₃对纯铝的细化作用 [J]. *中国有色金属学报*, 2009, 19 (6) : 1025–1031.
- [12] BERNSTEIN H. Many mechanisms at work producing grain refinement in light metals [J]. *JOM*, 1952, 4 (9) : 926–930.
- [13] JOHNSON M, BACKERUD L, SIGWORTH G K. Study of the mechanism of grain refinement of aluminum after additions of Ti-and B-containing master alloys [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1993, 24: 481–491.
- [14] SIGWORTH G K, KUHN T A. Grain refinement of aluminum casting alloys [J]. *International Journal of Metalcasting*, 2007, 1 (1) : 31–40.
- [15] ZHENG Y, XIAO W, GE S, et al. Effects of Cu content and Cu/Mg ratio on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Cu-Mg alloys [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 649: 291–296.
- [16] 熊俊杰, 李尹, 冯志军, 等. Al-Si系铸造合金热处理工艺研究进展 [J]. *铸造*, 2022, 71 (5) : 544–550.
- [17] BEROUAL S, BOUMERZOUZ Z, PAILLARD P, et al. Effects of heat treatment and addition of small amounts of Cu and Mg on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Cu and Al-Si-Mg cast alloys [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 784: 1026–1035.
- [18] TIRYAKIOĞLU M, CAMPBELL J, ALEXOPOULOS N D. Quality indices for aluminum alloy castings: A critical review [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2009, 40: 802–811.
- [19] 牛艳萍, 赵禹凯, 王顺成, 等. Si含量对Al-Si-Mg合金铸造流动性、热导率和力学性能的影响 [J]. *铸造*, 2016, 65 (4) : 366–370.
- [20] 宋东福, 王顺成, 周楠, 等. Al-Si合金中富铁相形态及其影响因素研究进展 [J]. *材料工程*, 2016, 44 (5) : 120–128.
- [21] TAYLOR J A, SCHAFFER G B, STJOHN D H. The role of iron in the formation of porosity in Al-Si-Cu-based casting alloys: Part II. A phase-diagram approach [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1999, 30: 1651–1655.
- [22] 陈大辉, 汤进军, 邵红岩, 等. 发动机缸盖用新型Al-Si-Cu-Mg铝合金材料 [J]. *车用发动机*, 2011 (6) : 85–89.
- [23] 熊俊杰, 冯志军, 李宇飞, 等. 高性能Al-Si-Cu-Mg铸造合金成分和热处理工艺设计 [J]. *铸造*, 2023, 72 (6) : 680–687.

Effects of Si, Cu and Ti on the Microstructure and Properties of Hypoeutectic Al-Si Alloys

WANG Yu-xin, XIANG Zhi-lei, LI Lei-zhe, LI Meng, GU Xin-shuo

(School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100020, China)

Abstract:

The effects of Si, Cu and Ti on the microstructure and properties of cast hypoeutectic Al-Si alloys were studied by orthogonal test. The results showed that the as-cast alloy was mainly composed of $\alpha(\text{Al})$, eutectic Si, $\theta\text{-Al}_2\text{Cu}$, $\text{Q-Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ and $\text{II-Al}_6\text{Mg}_3\text{FeSi}_6$ phases. After heat treatment, the $\theta\text{-Al}_2\text{Cu}$ phase precipitated more well-distributed, and the II phase transformed into $\beta\text{-Al}_3\text{FeSi}(\text{Cu})$ phase. The mechanical properties test of cast Al-Si alloy after element regulation and T6 heat treatment showed that when Si content was 9%, Cu content was 1.5%, Ti content was 0.1%, the strength and plastic matching of aluminum alloy treated with T6 (solution holding at 520 °C for 5 h and aging at 180 °C for 4 h) was the best. The tensile strength and elongation of the alloy were 422 MPa and 6.2%, respectively at room temperature, and the high temperature tensile strength and elongation of 250 °C for 1 h were 215 MPa and 9.6%, which provides a certain theoretical guidance for the application and development of cylinder head materials.

Key words:

Al-Si-Cu-Mg alloys; orthogonal test; microstructure; mechanical properties; high temperature performance