

# Cu 含量及热处理工艺对铸造 Al-Si 合金力学和耐磨性能影响

郑海鹏, 李俭英, 蔡增辉, 于忠军, 李勇军

(中国航发哈尔滨东安发动机有限公司, 黑龙江哈尔滨 150066)

**摘要:** 为提高铸造Al-Si合金的综合性能, 探讨了Cu含量及热处理工艺对合金力学和耐磨性能的影响。以ZL114A合金为例, 加入不同含量的Cu元素, 调整Mg和Ti元素进行复合微合金化处理, 结合Er元素的细化变质技术, 设计了三种不同成分的铸造Al-Si合金。对合金试样进行了快速热处理, 包括固溶处理及时效处理, 并测试了合金布氏硬度、拉伸性能和耐磨性能。研究发现: 相较于Cu含量为0和0.5%的试样, 添加1.0%Cu的合金试样的高温抗拉强度和布氏硬度达到最高水平。当固溶温度为540 °C, 固溶时间14 h时, 试样的力学性能最佳, 硬度达到HBS110以上、抗拉强度达到360 MPa以上; 时效温度为160 °C, 时效时间为12 h时, 合金的硬度、抗拉强度和耐磨性均处于最优状态。

**关键词:** 铸造Al-Si合金; 化学成分; 热处理工艺; 固溶处理; 时效处理; 布氏硬度

## 作者简介:

郑海鹏(1990-), 男, 高级工程师, 博士生, 主要研究方向: 高性能镁、铝合金材料开发及其精密铸造技术。电话: 18845076135

中图分类号: TG146

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)04-0487-07

## 基金项目:

中国航发自主创新专项资金项目: 熔模精铸高强铝合金直升机承力机匣轻量化技术应用研究(ZZCX-2021-033)。

## 收稿日期:

2025-01-23 收到初稿,  
2024-02-21 收到修订稿。

铸造Al-Si合金作为一种轻质高强度材料, 目前广泛应用于各大行业<sup>[1]</sup>。为了满足不同应用场景下对材料性能的多样化需求, 大量科研人员不断探索, 通过在Al-Si合金中添加多种合金元素, 实现对合金微观结构的精细调控, 进而提升其综合性能<sup>[2-3]</sup>。通过添加不同合金元素, 不仅能够形成固溶强化和析出强化效应, 还能优化合金的相组成, 使其在特定环境下展现出更优异的性能。

除了合金成分的优化设计, 热处理工艺也是改善Al-Si合金性能不可或缺的一环<sup>[4]</sup>。通过固溶处理和时效处理等热处理步骤, 可以有效改善合金质量, 优化合金性能。为此, 优化热处理工艺参数, 能够开发出具有更高性能的Al-Si合金材料。

目前, 有较多学者对Al-Si合金成分设计及热处理工艺参数进行研究, 例如: 张明山等人研究了铸造Al-Si-Cu-Mg合金热处理工艺优化方法。该方法通过模拟计算预测了铸造Al-Si-Cu-Mg合金在不同热处理条件下的相变行为和析出相特征, 进而优化了热处理工艺参数<sup>[5]</sup>。该方法通过理论计算与试验验证相结合的方式, 有效改善合金力学性能。然而, CALPHAD方法的应用受限于其计算模型的精确度和实际材料体系的复杂性, 当合金成分较为复杂时, 其优化后的热处理工艺参数无法保障良好的处理效果。熊俊杰等人研究了高性能Al-Si-Cu-Mg铸造合金成分和热处理工艺, 该方法通过大量的试验数据, 建立了成分与性能之间的数学模型, 为合金的成分设计和热处理工艺优化提供了科学依据<sup>[6]</sup>。尽管这种方法在揭示成分与性能关系方面具有显著优势, 但其优化后的工艺参数无法有效提升合金材料的耐磨损性。李刚等人探究了热处理工艺对铸造Al-Mg-Si-Sc-Zr合金组织与性能的影响<sup>[7]</sup>, 该方法采用微观组织观察与力学性能测试相结合的方法, 深入分析了热处理过程中合金的相变行为、析出相形态以及晶粒尺寸的演变规律, 能够直观地揭示热处理工艺对合金微观组织和性能的影响机制, 但受限于观察手段和分析技术的精度, 对于某些细微结构或复杂相变过程的解析可能存在不足, 导致热处理后的合金力学性能无法达到可靠标准。文献[8]中研究了选择性激光熔化制备Al-12Si合金的热处理后残余应力和显微组织因素, 该方法制备了不同Al-12Si合金, 并研究了热处理后合金的残余应力, 然而, 该

技术制备的合金材料在热处理后抗拉强度有所不足。

基于上述分析,本研究通过合理的化学成分设计和优化热处理工艺,提高Al-Si合金的应用质量。

## 1 铸造Al-Si合金成分设计与性能分析

铸造Al-Si合金的化学成分设计与最佳热处理工艺是提升其力学性能和耐磨损性能的关键,对于满足特定应用需求具有重要意义<sup>[9]</sup>。为此,分别设计不同化学成分的铸造Al-Si合金,并分析不同热处理工艺对合金的影响。

### 1.1 铸造 Al-Si 合金化学成分设计

#### 1.1.1 合金的成分设计

基于Al-Si合金的铸造工艺,通过引入Mg、Cu和Ti等合金元素进行复合微合金化处理,并结合Er元素的细化变质技术,设计出三种铸造Al-Si合金,每种合金化学成分如下。

表1 试验用合金成分  
Tab. 1 Compositions of test alloys  $w_B/\%$

成分	编号		
	合金A	合金B	合金C
Si	7.0	7.0	7.0
Mg	0.3	0.3	0.3
Ti	0.2	0.2	0.2
Fe	0.1	0.1	0.1
Cu	0	0.5	1.0
Er	0.2	0.2	0.2
Al	余量	余量	余量

#### 1.1.2 铸造Al-Si合金试样制备

铸造Al-Si合金试样的制备流程遵循了有色金属铸造手册的基本指导,但鉴于Mg、Cu、Ti和Er等元素的添加,本研究根据合金的具体特性对制备步骤进行了针对性的调整与优化。整个制备过程主要通过以下步骤实现。

**试验原料准备。**本试验选取了多种原材料,包括工业纯铝、Al-20Si、Al-50Mg和Al-40Cu等。为了精确配制目标合金,根据每种原材料的化学成分,详细计算了所需各元素的质量。

**熔炼前期准备。**为确保熔炼过程的高效与安全,原料需切割成适宜坩埚大小的小块,以促进加热均匀并充分利用坩埚空间。原料表面需经过彻底清洗并干燥,以避免杂质影响合金质量<sup>[10-11]</sup>。所有与合金熔体直接接触的熔炼工具,均须经过严格的预处理,包括去除灰尘与锈迹,并涂覆由九水硅酸钠和氧化锌特制的防护涂料<sup>[12]</sup>。石墨坩埚在使用前需预热至300℃进行烘

焙,以进一步确保其稳定性,并仔细检查坩埚表面,确保无裂纹存在。

**合金熔炼。**将装有工业纯铝与Al-Si中间合金的石墨坩埚置于坩埚电阻炉内,Al-Si中间合金应置于纯铝块之下。随后,加热至750℃,并保持此温度直至所有合金完全熔化<sup>[13]</sup>。之后,降温至720℃,加入其他中间合金,之后保温15 min,以促进合金成分的均匀分布<sup>[14]</sup>。随后,使用搅拌棒对熔体进行充分搅拌。接下来,向熔体中加入占合金总质量0.5%的精炼剂进行精炼除气操作,同时持续搅拌铝液。

完成精炼后,关闭炉盖并再次静置保温15~20 min,使熔体进一步均匀化。之后,加入Er元素进行细化变质处理。将预先准备好的Er元素(通常以Er的中间合金形式存在)加入到熔体中,加入量根据合金成分设计确定(本研究中为0.2wt%)。加入后,继续保持熔体在一定温度下(如720℃)保温一段时间(如510 min),以确保Er元素充分溶解并发挥其细化变质作用。最后,利用扒渣勺仔细清除表面的浮渣。

**合金试样浇注。**选用尺寸为35 mm×35 mm×200 mm的金属型模具进行浇注。浇注操作前,金属模具需经过特殊处理,包括喷刷专用涂料并预热至300℃,以确保浇注过程的顺利进行及合金试样的质量<sup>[15]</sup>。随后,从熔炼炉中迅速取出已精炼并处理好的铝液,立即浇入金属模具中,待冷却后,即可得到条形合金试样。

#### 1.1.3 热处理工艺设计

试验中,采用KSL-1100X型箱式电阻炉对合金试样实施快速热处理,主要包括固溶处理及时效处理。

本试验设计的固溶处理温度梯度为520℃、530℃及540℃,固溶时长区间为12~16 h。为确保处理效果,合金的淬火转移时间被严格控制在10 s以内,同时水淬温度在60~80℃。此外,固溶处理后的试样在室温下的停留时间尽量缩短,以避免自然时效对试验结果产生不必要的影响<sup>[16]</sup>。

时效处理的效果受时效温度与时间的共同影响,这两者直接决定了析出相的尺寸、数量及其在基体中的分布情况。因此,本试验选定140℃、150℃及160℃作为时效温度,并设置了从0~16 h不等的的时间梯度。

通过这一系列试验条件的设定,深入探究不同热处理工艺对合金组织结构及性能的具体影响,从而获取最优的热处理工艺参数。

## 1.2 组织分析及性能测试方法

在铸造Al-Si合金化学成分设计与热处理后,为评估合金设计质量以及热处理工艺效果,采用如下测试手段,对合金性能展开测试。

### 1.2.1 金相显微组织分析

对合金试样进行预处理，这一过程在变速金相磨样机上完成。起始时，采用200目的粗砂纸以低速（300 r/min）来磨平试样的表面。随后，换用800目和1 200目的砂纸，并提升至中速（400 r/min）进行粗磨。进一步地使用1 500目和2 000目的砂纸对试样进行细磨。之后，通过侵蚀处理制备金相试样，用以揭示合金的微观组织结构。本研究采用凯勒试剂（Keller's reagent）作为侵蚀剂，其成分比例（体积分数）通常为1%氢氟酸（HF）、1.5%盐酸（HCl）、2.5%硝酸（HNO<sub>3</sub>）和95%水。将抛光后的试样浸入凯勒试剂中侵蚀15 s。侵蚀完成后，立即用流动的清水冲洗试样，随后用无水乙醇脱水并吹干。最后，利用Axio Scope A1型金相显微镜观察试样的显微组织。

### 1.2.2 布氏硬度测试

采用布氏硬度计作为主要测试设备。从合金铸件中截取厚度为8 mm的块状试样，并对其进行打磨，确保其平整光洁。利用直径为 $D$ （mm）的硬质合金球在试样表面施加力 $F$ ，施加完成后，测量试样表面压痕直径 $d$ ，并通过以下方式计算试样布氏硬度值：

$$HBS = \frac{0.102 \times 2F}{\pi D \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \quad (1)$$

在本试验中，设定载荷为31.25 N，保压时间为15 s。

为确保测试结果的准确性和可靠性，每个试样上至少进行5次硬度打点测试，打点位置应均匀分布在试样的不同区域，以避免局部组织差异对测试结果的影响。

数据处理方法如下：

准确测量每次硬度测试所得的压痕直径，并记录数据。根据布氏硬度计算公式，将每次测量的压痕直径代入公式（1）进行计算，得到每个打点的硬度值。统计分析所有硬度值，计算平均值和标准差，以评估测试结果的稳定性和一致性。如存在异常硬度值（即

偏离平均值较大的数据点），将其剔除。

### 1.2.3 拉伸性能测试

通过型号为INSTRON 5566的万能材料试验机测试拉伸性能。利用线切割设备，从不同状态的铸件中制备出标准拉伸试样，尺寸为30 mm × 30 mm × 3 mm，对每个试样进行标距的标记。随后，在室温条件下，以恒定的拉伸速度（2 mm/min）对标记好的试样进行拉伸测试，测定合金的抗拉强度、屈服强度以及伸长率。为确保测试结果的可靠性，每组合金至少准备3个重复试样进行测试，并取平均值作为最终结果。如果测试结果之间存在较大差异，则增加试样数量或重新进行测试，以确保数据的准确性。

### 1.2.4 耐磨性能测试

利用高温摩擦磨损试验机，测试试样耐磨性。耐磨性试样为圆柱体，直径10 mm，高度10 mm，重复试样个数为5个。测试过程设置转速为200 r/min，磨损载荷选定为500 N，磨损时间为15 min。摩擦副采用的是经过调制处理的45#钢盘。利用精密天平分别测量了试样在试验前后的质量，根据这些数据计算出了每个试样的磨损量 $\Delta m$ ，则试样磨损率 $K$ 的计算公式如下：

$$K = \frac{\Delta m}{F \times T} \times 100\% \quad (2)$$

式中： $F$ 表示磨损载荷， $T$ 表示磨损时间。

## 2 试验结果分析

### 2.1 不同化学成分铸造 Al-Si 合金性能分析

（1）3种铸造Al-Si合金显微组织分析。由于3种铸造Al-Si合金中的Cu含量有所不同，因此本文对三种不同合金的显微组织结构展开分析，以此评估Cu含量对合金的影响，从而获取最佳铸造Al-Si合金成分，分析结果如图1所示。

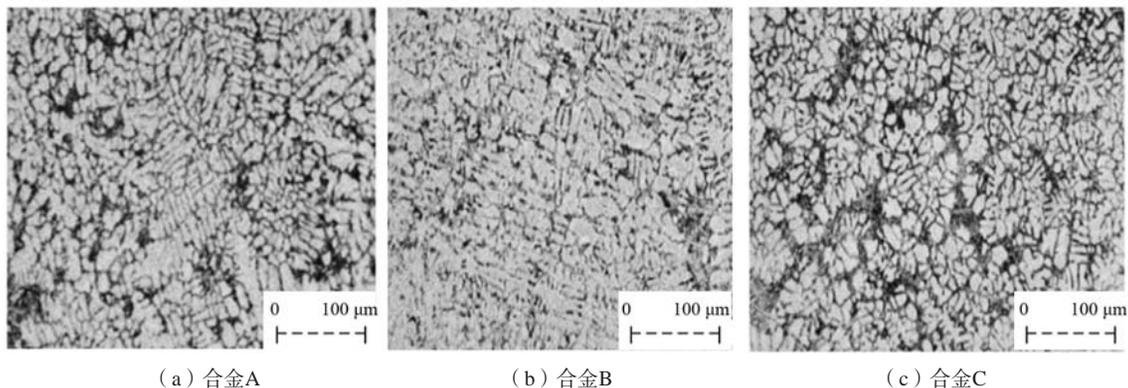


图1 不同合金的金相组织图

Fig. 1 Metallographic structures of different alloys

从图1可以看出,合金A作为未添加Cu元素的Al-Si合金,其中,初生 $\alpha$ -Al相以无规律的树枝晶形态存在,而共晶组织则杂乱地分布在晶界区域。当Cu含量增加至0.5% (合金B)和1.0% (合金C)时,虽然铸态合金的显微组织整体结构变化不大,依然由初生 $\alpha$ -Al相和共晶相组成,但细节上却有所差异。随着Cu元素的加入,初生 $\alpha$ -Al相的树枝晶形态发生了一定程度细化。同时,共晶组织的数量增多,并出现了偏析现象。这种偏析是由于铸件凝固冷却速度较快,导致液相中的原子能够扩散,而固相中的原子来不及扩散,从而引发不平衡结晶,使得合金内部的化学成分分布变得不均匀。尽管Cu元素的含量有所变化,但其对共晶硅的形貌并未产生显著影响。

(2) 3种铸造Al-Si合金力学性能分析。分析3种不同Cu含量合金硬度、抗拉强度、屈服强度以及伸长率,以此评估Cu含量对合金力学性能的影响,分析结果如表2所示。

表2 Al-Si合金力学性能分析  
Tab. 2 Mechanical property analysis of Al-Si alloy

合金编号	抗拉强度 /MPa	布氏硬度 HBS	屈服强度 /MPa	伸长率 /%
合金A	184.64	55.28	326	5.83
合金B	221.46	67.34	341	6.28
合金C	236.42	77.48	367	7.45

通过表2可知,随着Cu含量的增加,合金的抗拉强度、布氏硬度、屈服强度以及伸长率均呈现出显著的提升趋势。合金A力学性能相对较弱。当Cu含量增加至0.5% (合金B)时,合金的抗拉强度提升至221.46 MPa,布氏硬度增加至HBS67.34,屈服强度以及伸长率分别增加至341 MPa、6.28%。进一步增加Cu含量至1.0% (合金C),合金的抗拉强度、布氏硬度、屈服强度以及伸长率分别达到了236.42 MPa、HBS77.48、367 MPa和7.45%,相较于合金A有了大幅度的提升。这一结果表明,Cu元素的加入能够显著提高铸造Al-Si合金的力学性能,特别是硬度和抗拉强度。

## 2.2 最佳热处理工艺分析

通过上述研究发现,合金C的化学成分配比具有更好的力学性能,为此,对合金C进行最佳热处理工艺分析。

### 2.2.1 固溶处理工艺分析

(1) 硬度分析。对合金C进行固溶处理,分析试样在固溶过程中硬度变化,分析结果如图2所示。

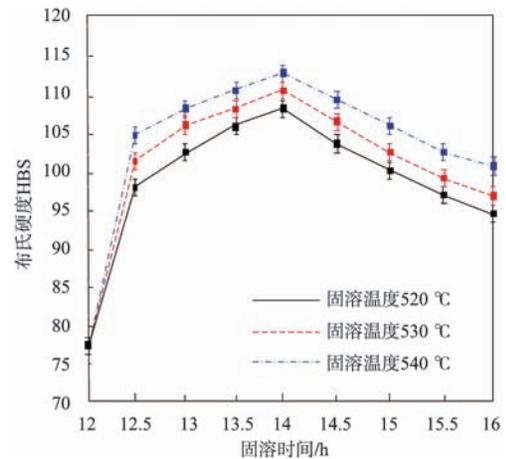


图2 试样固溶过程中硬度变化分析  
Fig. 2 Analysis of hardness change of sample during solid solution

根据图2中合金C试样在不同固溶温度及固溶时间下的硬度变化分析结果,可以发现,当固溶温度达到540 °C时,任意固溶时间下,试样的硬度均达到较高水平。当固溶温度设定为540 °C,固溶时间达到14 h时,合金C的硬度值达到了最高点,此时试样布氏硬度达到HBS110以上。这表明在此条件下,试样的固溶处理效果最为显著,合金的硬度得到了有效提升。这是因为固溶处理过程中,合金元素在基体中的溶解和扩散。当固溶温度达到540 °C时,合金元素在Al-Si合金基体中的溶解度增加,这些元素能够更有效地溶解并扩散到基体中,形成固溶体。固溶体的形成会导致晶格畸变,从而增加位错密度和晶格应力,进而提高了合金的硬度。

(2) 抗拉强度分析。分析合金C试样在不同固溶条件下的抗拉强度变化,分析结果如图3所示。

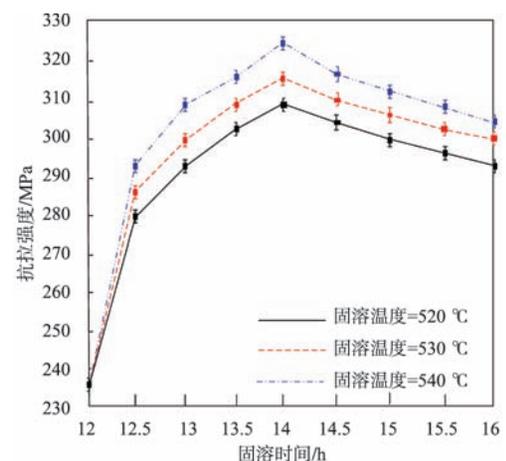


图3 试样固溶过程中抗拉强度分析  
Fig. 3 Tensile strength analysis of sample during solution process

通过图3分析可知,在固溶温度为540 ℃且固溶时间为14 h的条件下,试样的抗拉强度达到了320 MPa以上,处于最高水平。当固溶温度降低至530 ℃时,虽然抗拉强度相较于540 ℃条件下有所降低,但仍然保持在一个相对较高的水平,表明此温度下的固溶处理效果依然较为显著。然而,当固溶温度进一步降低至520 ℃时,试样的抗拉强度明显减弱,成为三种条件中最差的一种。这表明在此温度下进行固溶处理,合金的强化效果不够理想,力学性能的提升有限。为此,在固溶温度540 ℃、固溶时间14 h下可以获得最高抗拉强度。

抗拉强度的提升主要归因于固溶强化和晶粒细化。在540 ℃的固溶温度下,合金元素的有效溶解和扩散形成了强烈的固溶强化效应,提高了合金的抗拉强度。同时,固溶处理过程中的高温有助于促进晶粒的细化和均匀化,减少了晶界处的缺陷和应力集中,从而提高了合金的力学性能和抗拉强度。当固溶温度降低时,合金元素的溶解度减小,固溶强化效果减弱,导致抗拉强度降低。

### 2.2.2 时效处理工艺分析

(1) 硬度分析。分析合金C试样在不同时效处理时间以及三种时效温度下的硬度变化,分析结果如图4所示。

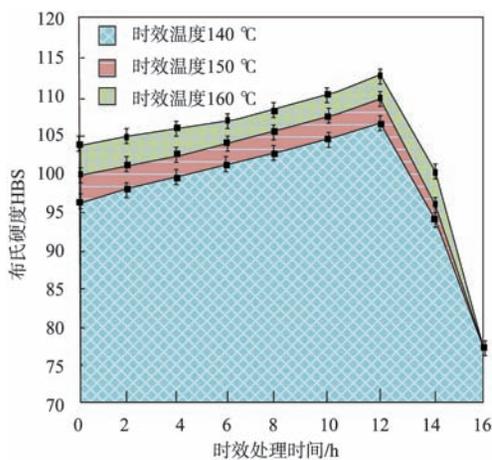


图4 时效处理下试样抗拉强度变化分析

Fig. 4 Analysis of tensile strength change of sample under aging treatment

通过图4分析可知,在时效温度为160 ℃的条件下,该试样的硬度达到HBS110以上。这一结果表明,在此温度下进行时效处理,合金的硬度可以得到有效改善。当时效温度降低至150 ℃时,虽然合金的硬度相较于160 ℃条件下有所降低,但仍然能够有效提升合金的硬度,这表明150 ℃下的时效处理对合金硬度的提升仍然具有一定的贡献。当时效温度下降至140 ℃时,合

金的硬度明显减弱,在三种温度中保持最低,这表明在该温度下进行时效处理,合金的硬度提升效果不够明显。为此,时效温度160 ℃是获得最高硬度的最优工艺参数,在该温度下进行12 h的时效处理,可以使合金达到最高的硬度水平。

时效处理过程中,合金的硬度提升主要归因于析出强化。在160 ℃的时效温度下,合金中的溶质原子会析出形成细小的第二相颗粒。这些颗粒在基体中起到了弥散强化的作用,通过阻碍位错的移动和增殖,提高了合金的硬度。当时效温度降低时,析出相的形成速率和数量可能减少,导致析出强化效果减弱,硬度降低。

(2) 抗拉强度分析。分析所选合金试样在不同时效处理温度及时间下的抗拉强度变化,分析结果如图5所示。

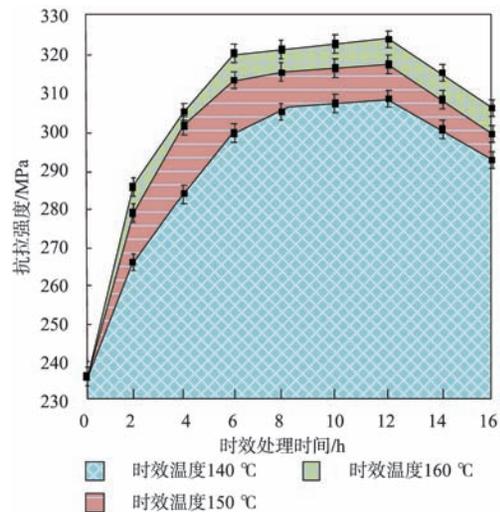


图5 时效处理下试样抗拉强度变化分析

Fig. 5 Analysis of tensile strength change of sample under aging treatment

通过图5可知,当试样开始经过时效处理后,其抗拉强度迅速上升,当时效处理时间达到12 h时,在不同时效温度下,试样的抗拉强度均达到较高水平。在时效处理温度为160 ℃的条件下,试样抗拉强度达到较高水平,当在该温度下经过12 h时效处理时,抗拉强度处于320 MPa以上,当时效处理温度降低至150 ℃时,合金试样的抗拉强度最高保持在310~320 MPa之间,当时效处理温度进一步降低至140 ℃时,合金试样的抗拉强度最高仅达到310 MPa左右。因此,在时效温度为160 ℃时,抗拉强度在固溶时间为12 h时达到了最高值,进一步验证了时效处理温度和时间对合金试样抗拉强度的显著影响。

抗拉强度的提升同样与析出强化有关。在160 ℃的

时效温度下,析出相的形成和分布更为均匀和细小,这些析出相在基体中起到了有效弥散强化作用,提高了合金的抗拉强度。同时,长时间的时效处理有助于析出相的更充分析出和稳定化,进一步提升了抗拉强度。当时效温度降低时,析出相的形成和分布可能受到影响,导致析出强化效果减弱,抗拉强度降低。

(3) 耐磨性能分析。通过上述研究表明,当时效处理时间为12 h时,试样力学性能达到良好效果,为充分评估时效温度对试样的影响,本研究将时效处理时间设定为12 h,分析在该处理时间下,不同时效温度处理后试样的磨损量变化,以此评估不同时效处理温度对合金试样耐磨性的影响,分析结果如表3所示。

表3 不同时效处理温度下试样磨损量分析  
Tab. 3 Wear analysis of samples at different aging temperatures

试样磨损 载荷/N	磨损量/( $\times 10^3 \text{mg}\cdot\text{m}^{-1}$ )		
	140 °C	150 °C	160 °C
1	3.12	3.09	3.04
2	3.45	3.26	3.15
3	3.72	3.63	3.35
4	3.92	3.74	3.57
5	4.23	3.89	3.66
6	4.62	4.15	3.84
7	5.12	4.38	4.25

通过表3分析可知,在相同的时效处理时间(12 h)下,随着时效处理温度的升高,试样的磨损量呈现出逐渐降低的趋势。当时效温度从140 °C升至160 °C时,各载荷条件下的试样磨损量均有不同程度地减少。这表明,在适宜的范围内提高时效处理温度可以增强合金试样的耐磨性。无论在任一时效处理温度下,试样的磨损量均随着磨损载荷的增加而增加。这反映了合金试样在承受更高载荷时,其表面的磨损程度会加剧。然而,在相同的磨损载荷下,经过较高温度的时效处理的试样表现出了更低的磨损量,这进一步证实了提高时效温度对改善合金耐磨性的积极作用。综合考虑时效处理温度和磨损量的关系,可以认为在160 °C下进行12 h的时效处理对于提高该合金试样的耐磨性是最有利的。

耐磨性的提升主要归因于时效处理过程中析出相的形成和合金微观结构的优化。在160 °C的时效温度下,析出相的形成有助于减少合金中的缺陷和应力集中,提高了合金的表面硬度和抗磨损能力。同时,析出相的弥散分布还可以增加合金的塑性变形阻力,从而减少了磨损过程中合金的塑性流失和磨损量。随着时效温度的升高和析出相的充分形成,合金的耐磨性

得到了显著提升。

### 2.3 应力-应变分析

根据上述测试可知,当固溶温度为540 °C、固溶时间为14 h、时效温度为160 °C、时效时间为12 h时,试样的力学性能和耐磨性能达到最优水平,在该条件下,通过型号为INSTRON 5566的万能材料试验机再次对合金试样进行拉伸测试,绘制成应力-应变曲线图,如图6所示。

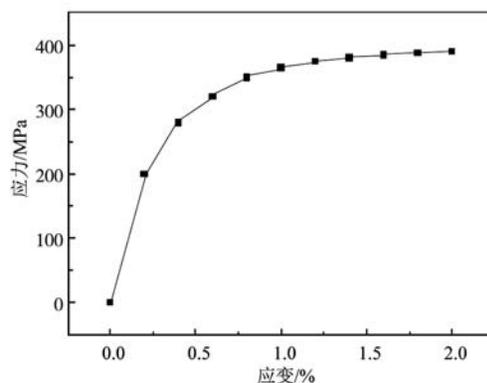


图6 应力-应变曲线图

Fig. 6 Stress-strain curve diagram

从图6中可以看出,应变为0时对应的应力为0,表示试样未发生形变时的初始应力状态。随着应变的增加,应力也逐渐增加,表示试样在受到外力作用下发生形变并抵抗形变的能力增强。在应变达到1.0%左右时,应力达到了一个相对较高的水平(360 MPa以上)。随后,应力继续增加,但增速逐渐放缓,表示试样的形变能力逐渐接近极限。

## 3 结束语

通过向Al-Si合金中引入Mg、Cu和Ti合金元素进行复合微合金化处理,并结合Er元素的细化变质技术,设计出了三种不同Cu含量的铸造Al-Si合金(合金A、合金B、合金C)。

在固溶温度为540 °C,固溶时间为14 h的条件下,合金C的力学性能达到最高水平。在时效温度为160 °C,时效时间为12 h的条件下,试样同样能够保持优异的力学性能。此外,该条件下的合金试样还表现出最佳的耐磨性能,磨损量相对较低。

通过本文研究,有效设计出具有优异力学性能和耐磨性能的铸造Al-Si合金,并确定了最佳热处理工艺参数。未来可继续对合金成分进行优化,以获取更高质量的合金材料。

## 参考文献:

- [1] PRATHEESH K, MONIKANDAN V V, KUMAR N. Effect of squeeze pressure and strontium addition on tribological and mechanical properties of Al-Si piston alloy with varying amount of Ni [J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2023, 76 (9) : 2343-2351.
- [2] 钱晓明, 章羽, 王昭东, 等. 铸造冷却速率对Al-Mg-Si-Mn耐热铝合金组织及热加工性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2022, 32 (2) : 343-352.
- [3] 刘金辉, 赵海东, 高军民, 等. T5处理对高真空压铸Al-10Si-Cu-Mg-Mn合金组织影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44 (5) : 669-674.
- [4] 卢才璇, 吴昊, 马恒, 等. 过共晶Al-Si合金初生Si的热处理球化研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44 (3) : 372-376.
- [5] 张明山, 田亚强, 郑小平, 等. 基于CALPHAD计算的铸造Al-Si-Cu-Mg合金热处理工艺优化研究 [J]. 材料导报, 2023, 37 (22) : 202-207.
- [6] 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.
- [7] 李刚, 王志平, 陈砚池, 等. 热处理工艺对铸造Al-Mg-Si-Sc-Zr合金组织与性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2024, 53 (5) : 124-128.
- [8] PARK Seonghwan, KIM Sanghoon, LEE Jiyongparkeunhyung. Al-12Si alloy fabricated via selective laser melting: residual stress and microstructural factors after heat treatment [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2024, 33 (5) : 2156-2165.
- [9] 刘岩, 高民强, 杨莉, 等. 半固态挤压铸造Al-Si-Mg-Fe合金的组织与性能 [J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43 (6) : 747-752.
- [10] 刘星, 边丽萍, 侯洁, 等. 固溶处理对Mg-4Li-1Ca-4.1Al-0.5Si合金显微组织和硬度的影响 [J]. 热加工工艺, 2022, 51 (2) : 117-120.
- [11] 孙伟, 万浩, 马海娟, 等. Mn与热处理对Al-10Si-5Cu合金组织和性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44 (5) : 675-679.
- [12] 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.
- [13] 唐鹏, 杨学轩, 于凯来, 等. Ce含量和T6热处理对Al-0.3Fe-0.1Si合金组织与性能的影响 [J]. 铸造, 2023, 72 (11) : 1456-1462.
- [14] 李鑫骥, 傅定发, 汤杰, 等. 高强韧再生Al-1.15Mg-1.02Si-0.7Cu合金组织与性能研究 [J]. 有色金属工程, 2024, 14 (6) : 43-52.
- [15] 陈树梁, 徐雷, 胡元昊, 等. 铝合金预拉伸板残余应力数值模拟方法研究 [J]. 计算机仿真, 2023, 40 (2) : 292-296.
- [16] GAO Chao, ZHANG Bingrong, LI Yinming, et al. Synergistic effect of Zr and Mo on precipitation and high-temperature properties of Al-Si-Cu-Mg alloys [J]. China Foundry, 2024, 21 (1) : 71-81.

## Effect of Cu Content and Heat Treatment Process on Mechanical and Wear Resistance Properties of Cast Al-Si Alloy

ZHENG Hai-peng, LI Jian-ying, CAI Zeng-hui, YU Zhong-jun, LI Yong-jun  
(AECC Harbin Dongan Engine Co., Ltd., Harbin 150066, Heilongjiang, China)

**Abstract:**

In order to improve the comprehensive properties of cast Al-Si alloy, the effects of Cu content and heat treatment on mechanical and wear resistance properties of the alloy were investigated. Taking ZL114A alloy as an example, adding different contents of Cu elements, adjusting Mg and Ti elements for composite microalloying treatment, and combining with Er refinement and modification technology, three kinds of cast Al-Si alloys with different components were designed. Rapid heat treatments were carried out for the alloy samples, including solution treatment and aging treatment, and tested the Brinell hardnesses, tensile properties and wear resistances of the alloys. The research results show that the tensile strength and Brinell hardness of the alloy with 1.0%Cu are the highest compared with the samples with 0 and 0.5% Cu contents. When the solution temperature is set at 540 °C and the solution time reaches 14 h, the mechanical properties of the sample are the best, the hardness is above HBS 110 and the tensile strength is above 360 MPa. When the aging temperature is 160 °C and the aging time is 12 h, the hardness, tensile strength and wear resistance of the alloy are in an optimal state.

**Key words:**

casting Al-Si alloy; chemical composition; heat treatment process; solution treatment; aging treatment; Brinell hardness