

# 冷轧变形对叶轮机叶片 Al-6.5Si-0.8Ti-xSi 合金组织及力学性能的影响

范建华<sup>1</sup>, 徐艳萍<sup>2</sup>, 韩俊召<sup>3</sup>, 李 明<sup>4</sup>

(1. 河南建筑职业技术学院 设备工程系, 河南 郑州 450064; 2. 河南经济贸易技师学院 机械工程系, 河南 新乡 453000;  
3. 浙江天功工程设计有限公司, 浙江 杭州 310002; 4. 河南科技大学 机械工程学院, 河南 郑州 446000)

**摘要:** 对叶轮机叶片用 Al-6.5Si-0.8Ti 合金进行室温拉伸实验并对其进行表征, 研究不同冷轧变形量和添加 Si 元素对合金组织演变及力学性能的影响规律。结果表明: 合金基体组织中形成了大量的网状分布形态, 经过 550 °C+1 h 热处理后, 观察不到白色初生相, 对固溶初生相进行回溶使其重新与基体发生融合; Al-6.5Si-0.8Ti 合金的硬度为 90 HV, 添加 Si 元素的合金试样则具有更高的硬度且时效析出速度明显提升。加入 Si 元素后可以起到明显细化效果, 通过基体位错与析出相获得强化效果。持续退火后, 基体中形成高密度位错, 形成了粒径尺寸接近  $\Phi 150$  nm 的亚晶粒。该研究有助于提高铝合金的成形质量, 为后续工艺优化提供参考。

**关键词:** Al-Si-Ti 合金; 冷轧; 微合金化; 微观组织; 力学性能

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.12.013

**中图分类号:** TG146 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2024) 12-0106-07

## Effect of cold rolling deformation on microstructure and mechanical properties of Al-6.5Si-0.8Ti-xSi alloy for turbine-impeller blades

Fan Jianhua<sup>1</sup>, Xu Yanping<sup>2</sup>, Han Junzhao<sup>3</sup>, Li Ming<sup>4</sup>

(1. Department of Equipment Engineering, Henan Polytechnic of Architecture, Zhengzhou 450064, China;  
2. Department of Mechanical Engineering, Henan Economic and Trade Technician College, Xinxian 453000, China  
3. Zhejiang Tiangong Engineering Design Co., Ltd., Hangzhou 310002, China;  
4. School of Mechanical Engineering, Henan University of Science and Technology, Zhengzhou 446000, China)

**Abstract:** The room temperature tensile test of Al-6.5Si-0.8Ti alloy for turbomachine blade was conducted and characterized to study the influence laws of different cold rolling deformation amounts and addition of Si on the microstructure evolution and mechanical properties. The results show that a large number of network distribution patterns are formed in the matrix of alloy. After heat treatment of 550 °C+1 h, no white primary phase is observed, and the solid solution primary phase is redissolved for fusion with the matrix. The hardness of Al-6.5Si-0.8Ti alloy is 90 HV, while the alloy specimen adding Si element has a higher hardness and the precipitation speed increases significantly. The addition of Si element achieves the significant refinement effect, and the strengthening effect is obtained through the matrix dislocation and precipitated phases. After continuous annealing, high density dislocations are formed in the matrix, resulting in the subgrains with a particle size close to  $\Phi 150$  nm. The research is helpful to improve the forming quality of aluminum alloy and provide reference for subsequent process optimization.

**Key words:** Al-Si-Ti alloy; cold rolling; microalloying; microstructure; mechanical property

快速硬化 Al-Si 合金被广泛用作叶轮机叶片材料, 其优势明显<sup>[1]</sup>。将 Al-Si 合金升温到 440 K 温度下进行热处理会形成初始时效、稳定时效与峰时效

的不同状态<sup>[2]</sup>。处于初始时效阶段时, 合金显微硬度会迅速增大, 占总增量比例超过 60%。进入稳定时效阶段后, 硬度基本不再发生明显变化。经过 270 h 时效处理后进入峰时效状态, 但无法获得明显的析出强化效果, 导致合金应用范围受到较大制约<sup>[3]</sup>。由此可见, 提升 Al-Si 合金的时效响应速度与强化效果是当前急需处理的问题。

微合金化属于改善合金组织结构以及增强力学

收稿日期: 2023-01-04; 修订日期: 2023-04-18

基金项目: NSFC-河南联合基金重点项目 (U1804254)

作者简介: 范建华 (1981-), 女, 硕士, 讲师

E-mail: fanjianhua0819@163.com

性能的一项重要技术。可以通过调整合金析出相类型、晶体组织形态与尺寸参数来获得更优的力学性能<sup>[4]</sup>。Si 属于铝合金基体内一种含量很高的杂质元素，对 Al-Si-Ti 合金形核析出与长大发挥了关键作用<sup>[5]</sup>。根据相关研究可知，Si 对形核增长区发挥了稳定作用，对 T 相起到抑制作用，并进一步促使 S 相析出。同时，Si 发生微合金化的过程具有提升时效硬化响应的作用，可以促进合金更快析出<sup>[6]</sup>。高 Mg 含量合金中加入 Si 元素后将会生成 Mg<sub>2</sub>Si 相，导致 Si 无法与 Al 基体发生固溶而减弱强化效果<sup>[7]</sup>。以上结果表明，需要对合金中的 Si 含量进行优化调整。杨正斌等<sup>[8]</sup>通过显微镜观察了各个冷轧变形量下的 Al-Mg-Si 合金的微观形貌，结果发现，逐渐提高变形量之后，原有的再结晶织构 Cube {001} <100>转变为具有 Copper {112} <111>取向特点的形变织构。李大林等<sup>[9]</sup>对 3104 铝合金冷轧过程中各部位组织结构与微观形貌变化开展了分析，结果显示，冷轧处理后三机架相对单机架形成了更高密度的位错，同时发生了胞状亚晶与亚晶尺寸偏小的情况。唐玲等<sup>[10]</sup>研究了 Al-8. 8Mg-xSi 合金中不同 Mg<sub>2</sub>Si 含量下铸态凝固组织演化，发现随着 Si 含量的增加，初生 Mg<sub>2</sub>Si 相的数量增加，由八面体多边形向二次枝晶壁较为发达的树枝晶状转变。雷志国等<sup>[11]</sup>对 Al-2Mg-0. 8Cu 合金进行室温拉伸实验，研究了添加 Si 对时效析出行为和力学性能的影响，添加 Si 能加速时效析出动力学和细化 S 相，在冷轧量为 40% 和 Si 含量为 0. 15%（质量分数）时具有最佳的力学性能。

形变时效热处理属于一种低温热处理方式，可以同时发挥时效析出与加工硬化的效果<sup>[12]</sup>。开展形变时效热处理时，可以先通过轧制的方式使基体内产生位错与空位缺陷，由于不同位错之间会发生相互作用，可以将位错理解为固溶原子和基体组织脱溶后生成的扩散通道，获得更高析出相分布密度，并起到明显细化作用<sup>[12]</sup>。本文对经过固溶热处理的 Al-6. 5Si-0. 8Ti 合金实施冷轧，并分析不同冷轧变形量与 Si 含量下合金的组织演变与力学特性。

## 1 实验方法

将 Al-50Cu、Al-27Si、纯 Mg 与高纯铝原料放入石墨粘土坩埚中，并通过电阻加热的方式使其发生熔融，制备得到组成为 Al-6. 5Si-0. 8Ti-xSi 的合金试样。将原料升温至 780 ℃使其熔融，再经过搅拌以及扒渣处理，经过 0. 5 h 静置处理后使用常温状态模具

对熔体进行浇铸，形成尺寸为 100 mm×200 mm×30 mm 的块状铸锭。利用 ICP（Inductively Coupled Plasma）仪对合金元素组成进行测试，各元素含量见表 1。采用差示扫描量热法表征 Al-6. 5Si-0. 8Ti-xSi 合金初生相发生固溶转变的热力学特点，控制升温速率为 10 ℃·min<sup>-1</sup>。对铸锭进行 550 ℃固溶处理 1 h 后水冷，经过冷轧处理后以 175 ℃等温退火，并自然冷却至室温。为方便对各试样进行标识，按照表 1 将合金设置为 0Si、0. 15Si、0. 30Si 与 0. 50Si 共 4 组试样。

表 1 实验样品的化学成分（%，质量分数）  
Table 1 Chemical compositions of test samples  
（%，mass fraction）

类别	组成	Mg	Cu	Si	Al
0Si	Al-6. 5Si-0. 8Ti	2. 00	0. 69	—	余量
0. 15Si	Al-6. 5Si-0. 8Ti-0. 15Si	2. 20	0. 77	0. 15	余量
0. 30Si	Al-6. 5Si-0. 8Ti-0. 30Si	1. 98	0. 90	0. 35	余量
0. 50Si	Al-6. 5Si-0. 8Ti-0. 50Si	1. 90	0. 88	0. 49	余量

对试样进行金相砂纸研磨处理直至 2000#，之后通过 HXD-1000TM/LCD 显微硬度计测定试样的显微硬度。以 100 gf 载荷持续测试 10 s。分别对各样品测试 10 次再计算得到均值。在室温状态下利用 WDW-10E 万能拉伸机对试样开展拉伸测试，共测试 3 个试样并计算均值。选择 JEM-2010 透射显微镜观察试样表面组织，电压为 200 kV。通过电火花线切割获得 10 mm×10 mm×1. 5 mm 片状透射试样，之后通过机械研磨的方法将试样厚度减小至 100 μm，再经过冲压得到 Φ3 mm 外径尺寸的圆片，利用乙醇试剂对双喷试样进行超声清洗，并对试样表面充分吹干待用。

## 2 结果和讨论

### 2.1 初生相

对铸造试样和经过固溶处理的试样进行微观形貌表征与元素含量测试，结果分别如图 1 和图 2 所示。根据图 1 可知，铸态 Al-6. 5Si-0. 8Ti 合金试样的基体组织中形成了大量网状分布形态的白色颗粒，经过 550 ℃固溶处理 1 h 后，上述初生相已经全部消失。对 Al-6. 5Si-0. 8Ti-xSi 合金试样的进行铸造组织观察，可以发现除存在网状与颗粒形态的白色相以外，还可以观察到许多颗粒状的黑色相。随着基体内 Si 含量的提升，黑色相含量也明显增加<sup>[13]</sup>，最终合金初生相与基体达到充分固溶的状态。

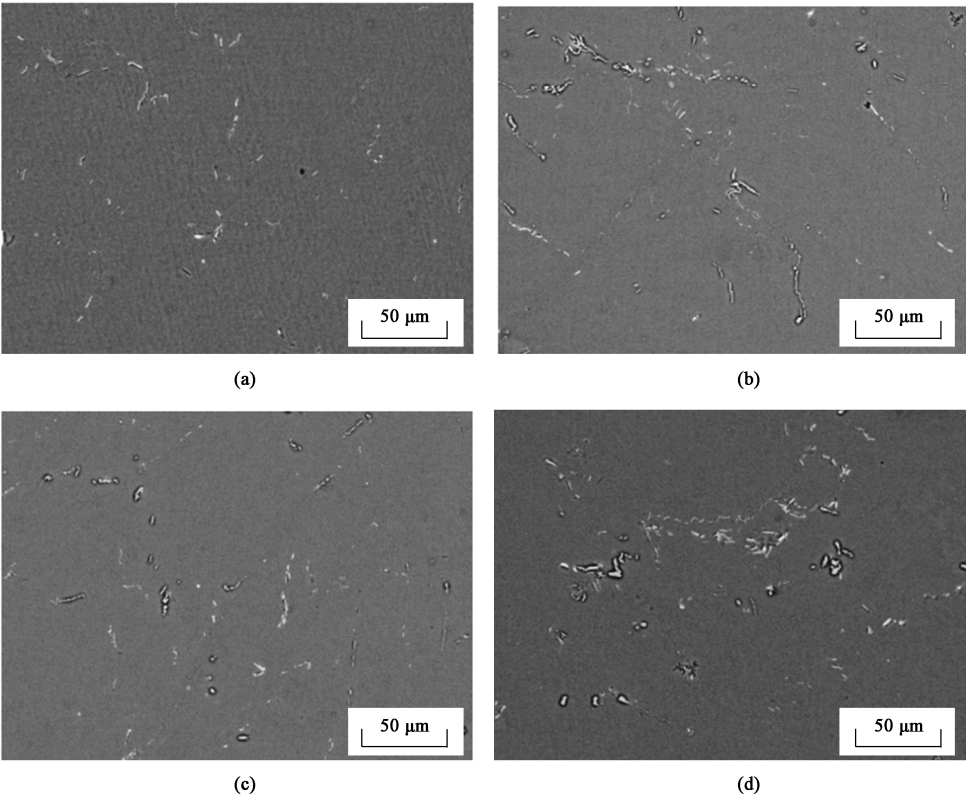


图 1 铸态 Al-6.5Si-0.8Ti-xSi 合金试样的显微组织  
(a) 0Si (b) 0.15Si (c) 0.30Si (d) 0.50Si  
Fig. 1 Microstructures of as-cast Al-6.5Si-0.8Ti-xSi alloy samples

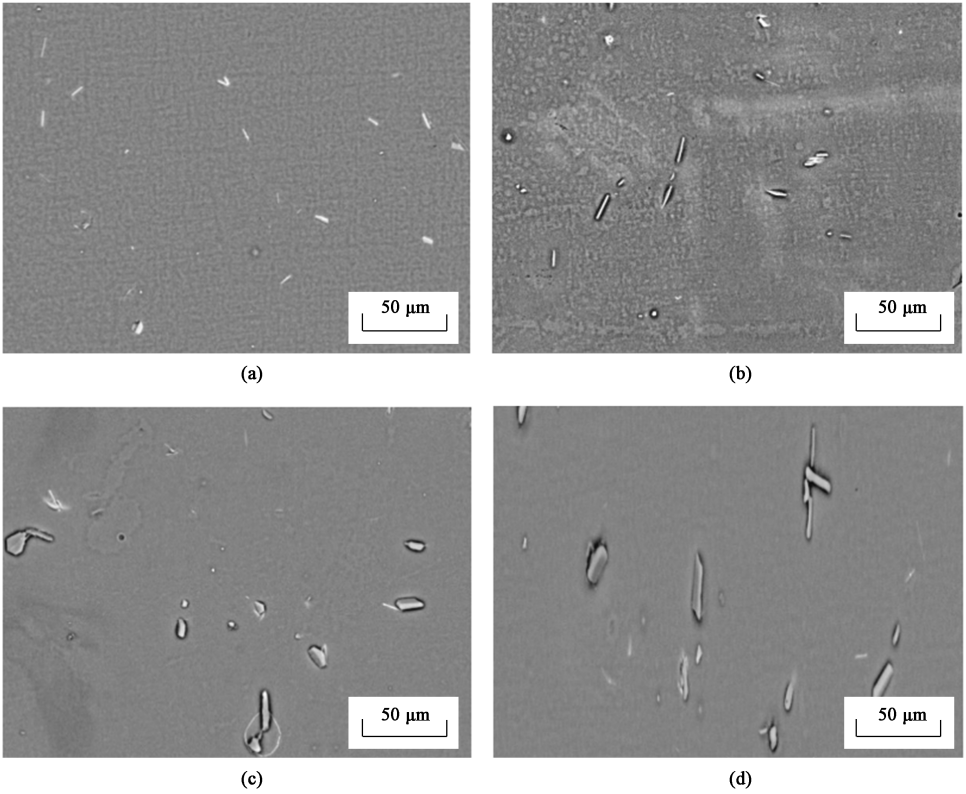


图 2 固溶态 Al-6.5Si-0.8Ti-xSi 合金试样的显微组织  
(a) 0Si (b) 0.15Si (c) 0.30Si (d) 0.50Si  
Fig. 2 Microstructures of Al-6.5Si-0.8Ti-xSi alloy samples in solid solution state

铸态 Al-6.5Si-0.8Ti-0.50Si 合金中存在白色与黑色的初生相。经固溶后（图 2），观察不到白色初生相，只存在黑色初生相。测试黑色初生相能谱数据可知，Mg 原子与 Si 原子的个数比接近 2 : 1，可以判断其组成为  $Mg_2Si$ ；测试白色初生相能谱数据可知，Mg 原子与 Cu 原子的个数比接近 1 : 1，可以

判断其组成为  $Al_2CuMg$ 。合金试样的扫描电镜图（Scanning Electron Microscope，SEM）和对应的能谱分析（Energy Dispersive Spectroscopy，EDS）见图 3 和表 3。对固溶初生相进行回溶使其重新与基体发生融合，当 Si 含量比例达到 0.5 时出现基体过饱和的现象，剩余初生  $Mg_2Si$  相则无法继续固溶至基体内。

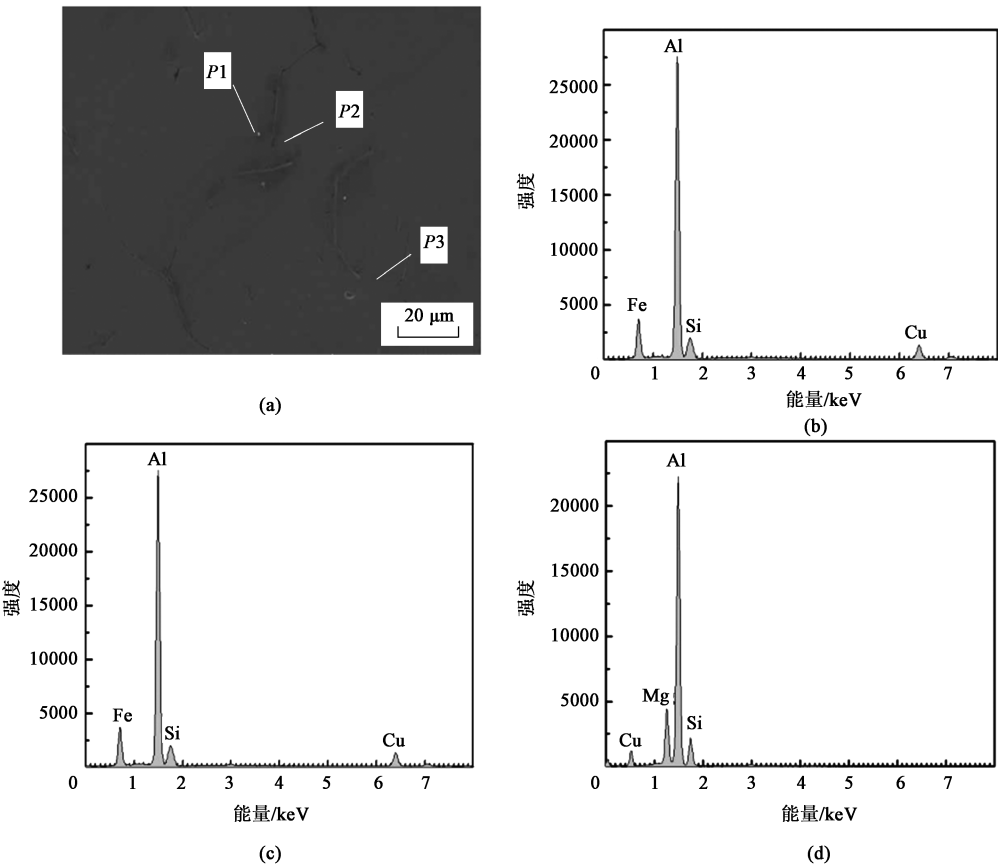


图 3 Al-6.5Si-0.8Ti-0.50Si 合金试样经固溶后的初生相的 SEM 和 EDS 结果  
(a) SEM (b) P1, EDS (c) P2, EDS (d) P3, EDS

Fig. 3 SEM and EDS results of primary phase for Al-6.5Si-0.8Ti-0.50Si alloy sample after solid solution

表 3 Al-6.5Si-0.8Ti-0.50Si 合金试样经固溶后的残留初生相的能谱结果

Table 3 EDS results of residual primary phase for Al-6.5Si-0.8Ti-0.50Si alloy sample after solid solution

测试点	Al	Mg	Si	Cu	初生相
P1	70.15	14.89	6.64	12.63	$Al_2CuMg$
P2	69.14	18.68	11.97	0.12	$Mg_2Si$
P3	46.31	32.18	18.26	0.09	$Mg_2Si$

2.2 力学性能

将上述固溶态 Al-6.5Si-0.8Ti-xSi 合金以不同变形量进行冷轧处理，之后继续升温至 175 ℃ 进行等温退火，得到图 4 所示的硬度测试结果。根据图 4a

可知，Al-6.5Si-0.8Ti 合金达到了 90 HV 的硬度值，添加 Si 元素后合金试样的硬度值升高。这是由于 Si 与基体发生固溶后会出现明显的固溶强化现象。逐渐提高固溶含量后，强化效果也得到显著提升，对试样进行冷轧处理会形成不均匀的组织结构，导致固溶强化效应受到一定抑制<sup>[14]</sup>。对 Al-6.5Si-0.8Ti 合金进行退火处理时，会产生不同的硬度变化过程。初始阶段，合金硬度迅速增大，经过 0.5 h 退火后达到最大值 114 HV，硬度值提高了 24 HV；将退火时间增加至 8 h 时，合金硬度处于基本恒定的状态，形成一个平稳的平台；将退火时间增加至 16 h 时，合金达到峰值硬度 118 HV。

加入 Si 元素后，Al-6.5Si-0.8Ti 合金保持了相



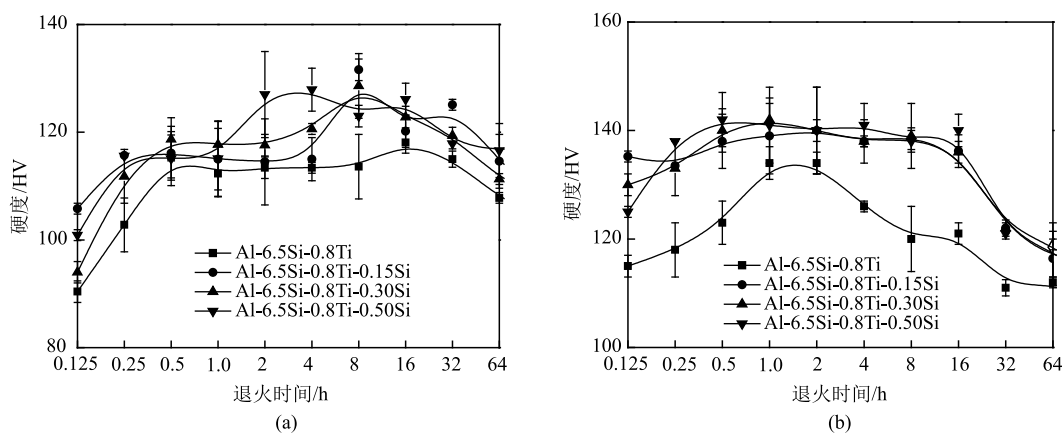


图 4 不同轧制变形量下 Al-6.5Si-0.8Ti-xSi 合金的硬度分布

(a) 40% (b) 80%

Fig. 4 Hardness distributions of Al-6.5Si-0.8Ti-xSi alloy under different deformation amounts of rolling

近的硬度变化趋势,但加入 Si 可以在更短时间内达到硬度极大值与峰值硬度。其中,0.15Si 合金试样在 15 min 时达到极大硬度,此时达到硬度峰值时间缩短为 8 h。进一步增大 Si 的加入量后,试样硬度达到极大值的时间未发生改变,但更早达到硬度峰值点。0.50Si 合金试样除了能够在 4 h 内达到硬度峰值以外,还形成了持续时间为 16 h 的硬度峰值平台。通过分析显微硬度参数变化特征可知,在合金基体中加入 Si 元素后将会促使时效析出速度的明显提升。

对 80% 变形量冷轧得到的 Al-6.5Si-0.8Ti-xSi 合金进行 175 °C 退火后,得到图 4b 所示的硬度曲线。由图 4b 可以发现,相对 40% 轧制变形量的试样,经过冷轧处理后,轧制变形量 80% 的 Al-6.5Si-0.8Ti 合金获得了更大的硬度,经过大变形冷轧处理后发生了位错密度的快速增大,从而产生显著的加工硬

化现象。加入的 Si 元素可以起到明显的固溶强化以及加工硬化的效果,两者叠加后获得了更优的增强性能。经过 0.5 h 退火后 Al-6.5Si-0.8Ti 合金的硬度只提高了 8 HV,经过 1 h 退火后达到峰值硬度,相对轧制变形量为 40% 的试样需要 16 h 才能达到峰值硬度,所需的时间明显缩短,因此,提高轧制变形量有助于更快完成析出响应。轧制变形量为 80% 时,加入 Si 元素后将更快地完成时效析出。对 0.15Si 合金进行 1 h 退火后合金硬度处于峰值水平,经过 16 h 退火后发生过时效转变。

由图 5 可知冷轧 Al-6.5Si-0.8Ti-xSi 合金室温下的力学特性参数。根据图 5a 可知,轧制变形量为 40% 时 Al-6.5Si-0.8Ti 合金的抗拉强度为 272 MPa、屈服强度为 260 MPa。由于加入 Si 后合金受到固溶强化作用,0.30Si 合金获得了最大的强度,而 0.50Si 合金的力学强度降低。这是因为在热处理阶

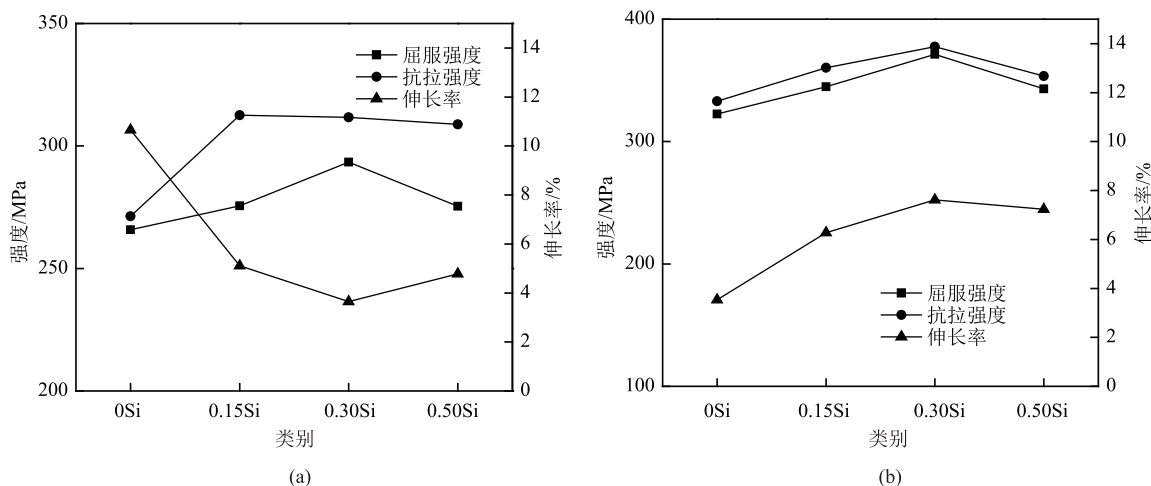


图 5 不同变形量下冷轧 Al-6.5Si-0.8Ti-xSi 合金的力学性能

(a) 40% (b) 80%

Fig. 5 Mechanical properties of cold-rolled Al-6.5Si-0.8Ti-xSi alloy under different deformation amounts

段部分初生相  $\text{Mg}_2\text{Si}$  未固溶, 从而引起应力集中现象, 并造成裂纹缺陷<sup>[15]</sup>, 使试样发生断裂。轧制变形量为 80% 时, Al-6.5Si-0.8Ti 合金试样的强度得到了大幅提升, 产生了众多位错, 从而引起明显的加工硬化效果。根据图 5b 可知, 随着外部载荷增加到裂纹扩展临近应力后, 会促使裂纹进一步扩展, 从而减弱了试样塑性。增大 Si 加入量后, 试样强度进一步提高, 与 40% 轧制变形量时合金强度的变化趋势一致。

### 2.3 组织形貌

通过上述分析, Al-6.5Si-0.8Ti-0.15Si 合金的综合性能比较优秀。在此基础上以 Al-6.5Si-0.8Ti-

0.15Si 合金为例, 80% 轧制变形量和 175 °C 退火条件下, 冷轧 Al-6.5Si-0.8Ti-0.15Si 合金退火处理后的透射电镜 TEM (Transmission Electron Microscope) 图像如图 6 所示。结果显示, 持续退火后, 基体中形成了高密度位错, 同时形成了粒径尺寸接近  $\Phi 150 \text{ nm}$  的亚晶粒。这是由于经过大变形轧制产生大量位错后可以获得更高的变形储能。经过 4 h 退火形成了弥散态的长条状 S 相, 接近 16 nm 的长度。图 6b 显示, 经过 8 h 退火后, 基体组织中产生了众多弥散态棒状 S 相, 长度增加至 23 nm。图 6c 显示, 将退火时间增加至 12 h 后, 基体内 S 相的长度增加到 86 nm, 宽度达到 18 nm。

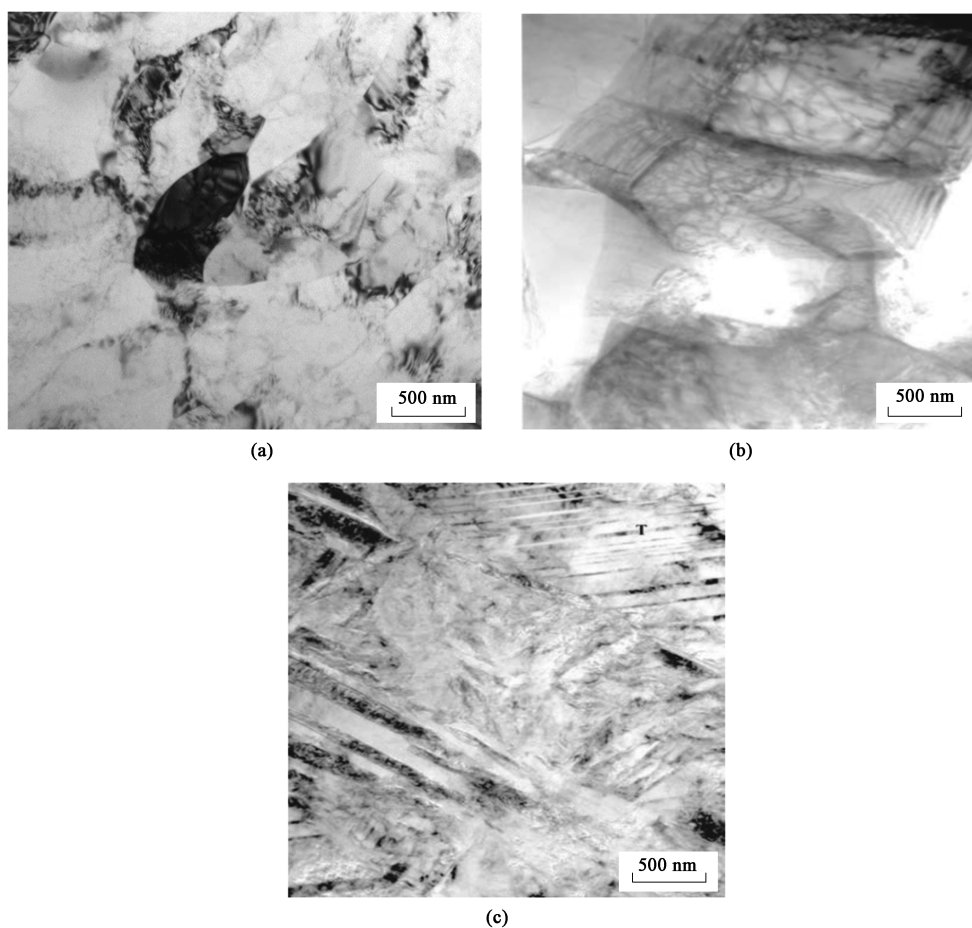


图 6 不同退火时间下 Al-6.5Si-0.8Ti-0.15Si 合金的 TEM 图像

(a) 4 h (b) 8 h (c) 12 h

Fig. 6 TEM images of Al-6.5Si-0.8Ti-0.15Si alloy at different annealing time

在较低的退火温度下依然产生大量位错, 导致变形量 80% 时冷轧 Al-6.5Si-0.8Ti 合金只达到较小的伸长率。与变形量 40% 时冷轧 Al-6.5Si-0.8Ti 合金经过 120 h 退火后的 S 相进行比较, 加入 Si 元素后可以起到明显的细化效果。合金发生了过时效转变, 此时可

以通过基体位错与析出相共同获得强化效果。

## 3 结论

(1) 铸态 Al-6.5Si-0.8Ti 合金基体组织中形成

了大量网状分布形态的白色颗粒, 经过 550 ℃ 固溶处理 1 h 后, 观察不到白色初生相, 只存在黑色初生相, 对固溶初生相进行回溶使其重新与基体发生融合。

(2) Al-6.5Si-0.8Ti 合金的硬度值为 90 HV, 添加 Si 元素后可以提高合金试样的硬度并明显提升时效析出速度。

(3) 持续退火后, 基体中形成高密度位错, 形成了粒径尺寸接近  $\Phi 150$  nm 的亚晶粒。加入 Si 元素后, 可以起到明显的细化效果, 通过基体位错与析出相获得强化效果。

#### 参考文献:

- [1] 任钰鹏, 刘平, 陈小红, 等. 新型 Al-Mg-Si-RE 合金的热变形行为 [J]. 金属热处理, 2022, 47 (11): 168-177.  
Ren Y P, Liu P, Chen X H, et al. Thermal deformation behavior of new Al-Mg-Si-RE alloys [J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47 (11): 168-177.
- [2] 丁万武, 苟璐珉. 新型 Al-Ti-La 中间合金对亚共晶 Al-7Si 合金显微组织和力学性能的影响 [J]. 有色金属工程, 2022, 12 (11): 7-14.  
Ding W W, Gou L M. Effect of new Al-Ti-La intermediate alloy on microstructure and mechanical properties of hypoeutectic Al-7Si alloy [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12 (11): 7-14.
- [3] 周鹏飞, 贡能军, 陆从相, 等. 挤压铸造 Al-9.5Si-0.45Mg-xCu 合金组织和性能的演变 [J]. 铸造, 2022, 71 (11): 1382-1388.  
Zhou P F, Ben N J, Lu C X, et al. Microstructure and properties evolution of extrusion casting Al-9.5Si-0.45Mg-xCu alloy [J]. Foundry, 2022, 71 (11): 1382-1388.
- [4] 张希杰, 余斌, 刘羽飞, 等. 轧制及退火工艺对 C5100 铜带材组织性能的影响 [J]. 铜业工程, 2023 (2): 114-121.  
Zhang X J, Yu B, Liu Y F, et al. Microstructure and properties of C5100 copper strip with different rolling and annealing processes [J]. Copper Engineering, 2023 (2): 114-121.
- [5] 杨坤义, 廖光明, 胡文杰, 等. 热处理对高导热 Al-11Si 合金性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42 (10): 1274-1278.  
Yang K Y, Liao G M, Hu W J, et al. Effect of heat treatment on properties of Al-11Si alloy with high thermal conductivity [J]. Special Casting and Non-Ferrous Alloys, 2022, 42 (10): 1274-1278.
- [6] 吉全鑫, 杜景红, 张艺, 等. 添加 Yb 和 Zr 对 Al7Si0.3Mg 合金组织及力学性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51 (10): 3580-3587.  
Ji Q X, Du J H, Zhang Y, et al. Effect of addition of Yb and Zr on microstructure and mechanical properties of Al7Si0.3Mg alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51 (10): 3580-3587.
- [7] 张盼, 朱桂花, 吕硕, 等. Al-Si 合金/高钙粉煤灰基高温相变蓄热球的制备及应用性能 [J]. 材料热处理学报, 2022, 43 (9): 30-40.  
Zhang P, Zhu G H, Lyu S, et al. Preparation and application properties of high temperature phase change thermal storage spheres based on Al-Si alloy/high calcium fly ash [J]. Journal of Materials Heat Treatment, 2022, 43 (9): 30-40.
- [8] 杨正斌, 李艳, 黄喆辉, 等. 冷轧变形量对 Al-Mg-Si 合金组织的影响 [J]. 金属热处理, 2020, 45 (3): 122-127.  
Yang Z B, Li Y, Huang Z H, et al. Effect of cold rolling deformation on texture of Al-Mg-Si alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45 (3): 122-127.
- [9] 李大林, 朱鹏程, 张子豪, 等. 热轧与冷轧对 3104 铝合金微观组织演变和亚结构的影响 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (11): 233-239.  
Li D L, Zhu P C, Zhang Z H, et al. Effect of hot and cold rolling on microstructure evolution and substructure of 3104 aluminum alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (11): 233-239.
- [10] 唐玲, 夏鹏举, 李文虎. Si、Mg 添加量对 Al-Mg-Si 合金的显微组织和 Mg<sub>2</sub>Si 相形貌的影响 [J]. 有色金属工程, 2022, 12 (2): 24-30.  
Tang L, Xia P J, Li W H. Effect of Si and Mg additions on microstructure and phase morphology of Mg<sub>2</sub>Si alloy [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12 (2): 24-30.
- [11] 雷志国, 文胜平, 黄晖, 等. 冷轧变形和添加 Si 对 Al-2Mg-0.8Cu (-Si) 合金的组织及力学性能的影响 [J]. 材料研究学报, 2023, 37 (6): 463-471.  
Lei Z G, Wen S P, Huang H, et al. Effect of cold rolling deformation and addition of Si on microstructure and mechanical properties of Al-2Mg-0.8Cu (-Si) alloy [J]. Journal of Materials Research, 2023, 37 (6): 463-471.
- [12] 葛富彪, 胡振光, 谭海军, 等. La 和 Ce 对 Al-3Si-0.5Cu-0.7Fe 合金组织及性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42 (4): 486-491.  
Ge F B, Hu Z G, Tan H J, et al. Effect of La and Ce on microstructure and properties of Al-3Si-0.5Cu-0.7Fe alloy [J]. Special Casting and Non-ferrous Alloys, 2022, 42 (4): 486-491.
- [13] 唐鹏, 于凤洋, 刘倩男, 等. Sb 含量及热处理对 Al-11.5Si-9.5Mg 合金组织与性能的影响 [J]. 稀有金属, 2022, 46 (4): 428-437.  
Tang P, Yu F Y, Liu Q N, et al. Effect of Sb content and heat treatment on microstructure and properties of Al-11.5Si-9.5Mg alloy [J]. Rare Metals, 2022, 46 (4): 428-437.
- [14] 陈安柱, 周鹏飞, 陆从相. 高 Mg 含量对 Al-Si-Cu-Mg 合金凝固过程和组织演变的影响 [J]. 铸造, 2022, 71 (3): 315-322.  
Chen A Z, Zhou P F, Lu C X. Effect of high Mg content on solidification process and microstructure evolution of Al-Si-Cu-Mg alloy [J]. Foundry, 2022, 71 (3): 315-322.
- [15] 郑向博, 李远星, 白玉杰, 等. Al-60Si 合金低温超声波辅助钎焊接头微观组织与力学性能 [J]. 焊接学报, 2022, 43 (2): 94-100, 119-120.  
Zheng X B, Li Y X, Bai Y J, et al. Microstructure and mechanical properties of low temperature ultrasonic assisted brazing joint of Al-60Si alloy [J]. Journal of Welding Technology, 2022, 43 (2): 94-100, 119-120.