

Effect of T6 Heat Treatment on Microstructure and Properties of Extruded Al-Si-xEr Alloy

Juan Zhao, Xiaoli Cui, Hongwei Cui, Hui Ye

School of Materials Science and Engineering, Shandong University of Technology, Zibo Shandong
Email: 1044535311@qq.com

Received: Nov. 21st, 2019; accepted: Dec. 4th, 2019; published: Dec. 11th, 2019

Abstract

In order to change the size, quantity and distribution of the second phase of Al-Si alloy and improve the electrical and mechanical properties of the alloy, Al-4Si, Al-4Si-0.5Er and Al-4Si-1Er alloy were prepared by using rare earth element Er as alloying element. The influence of rare earth Er and T6 heat treatment on the microstructure, phase composition, electrical and mechanical properties of extruded Al-4Si, Al-4Si-0.5Er and Al-4Si-1Er alloys was studied by means of optical metallographic microscope (OM), field emission scanning electron microscope (SEM), four-electrode method for measuring resistance, universal tensile testing machine, micro-hardness tester and other methods and equipment. The results show that the rare earth element Er is beneficial to the conversion of Si from the solid solution state to the precipitation state, increasing the type and quantity of the second phase, reducing the size of the second phase, improving the mechanical properties of the alloy, and maintaining the conductivity. The phase composition of the alloy is: α -Al, eutectic silicon, ErSi_2 , Al_3Er . After T6 heat treatment, the second phase of the alloy structure precipitates more fully. The overall performance of the Al-4Si-1Er alloy is the highest, the conductivity increases from 52.92% IACS to 54.96% IACS, increased by 4%, tensile strength is 103.5 MPa, elongation is 34.5%, and hardness is 40.5 HV.

Keywords

Rare Earth Er, T6 Heat Treatment, Al_3Er , Electrical Conductivity

T6热处理对挤压态Al-Si-xEr合金组织及性能的影响

赵娟, 崔晓丽, 崔红卫, 叶辉

山东理工大学材料科学与工程学院, 山东 淄博

Email: 1044535311@qq.com

收稿日期: 2019年11月21日; 录用日期: 2019年12月4日; 发布日期: 2019年12月11日

摘要

为改变Al-Si合金的第二相尺寸、数量、分布,改善合金的电学和力学性能,本文选用稀土元素Er作为合金元素,制备了Al-4Si、Al-4Si-0.5Er、Al-4Si-1Er合金。通过光学金相显微镜(OM)、场发射扫描电镜(SEM)、四电极法测电阻、万能拉伸试验机、显微硬度计等方法 and 设备,探究了稀土Er及T6热处理对挤压态Al-4Si、Al-4Si-0.5Er、Al-4Si-1Er合金的微观组织、相组成、电学和力学性能的影响。结果表明:稀土元素Er有利于Si由固溶态转变成析出态,增加了第二相种类和数量,减小了第二相尺寸,提高了合金的力学性能,且导电率保持稳定,合金的相组成为: α -Al、共晶硅、ErSi₂、Al₃Er; T6热处理后,合金组织中第二相析出更加充分,Al-4Si-1Er合金的综合性能达到最高,导电率由52.92% IACS上升至 54.96% IACS,提高了4%,抗拉强度为103.5 MPa,伸长率为34.5%,硬度为40.5 HV。

关键词

稀土Er, T6热处理, Al₃Er, 导电率

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

1. 引言

铝及铝合金具有熔点低、密度小、导电、导热性能好以及易加工等特点,被广泛应用于汽车、航空航天、船舶以及日常生活中[1] [2]。Al-Si 系合金因铸造性、可焊接性、导电导热性较好,常被用作架空输电线[3] [4] [5]。铸造铝合金组织中共晶硅的形态呈板片状,这种形态严重割裂组织,对合金力学性能影响较大,经过研究发现,在合金中添加稀土可以改变共晶硅的形貌,将其由板片状改为颗粒状,进而提高合金性能[6]。

T6 热处理是指固溶热处理后进行人工时效的状态。合金中的第二相在保温的过程中充分溶解形成固溶体,人工时效后第二相充分析出,这将有利于合金电学力学性能的提高。稀土具有独特的电子结构,能与大多数元素形成稳定的化合物,达到净化基体、强化合金的作用[7]。我国稀土资源比较丰富,早在60年代研究者们就开始了稀土铝合金应用的研究,最早应用于高强高导的铝合金导线中。近年来学者们对稀土变质的研究越来越热,邢泽炳[8]等人研究了稀土元素 Er 对 Al-Mg、Al-Zn 系列合金力学性能的影响,发现稀土可以使铸态组织从枝状晶变为等轴晶,晶间晶内化合物减少,第二相析出减少,提高该合金的抗应力腐蚀性;刘同辉[9]等人认为 Al-Er-Cu 合金在 200℃ 等温退火或冷轧后退火 200℃~300℃ 时,合金强度和导电率达到最高,其中 Al₂Cu 相的析出有利于提高合金导电性。张二庆[10]等人对比研究了 Al-Er 和 Al-Zr 冷轧后退火组织和性能的变化,发现 Er、Zr 原子的析出都会提高合金导电率,但是 Al-Er 合金析出的二次相对合金增强作用较强。本文主要将 Er 作为合金元素加入到亚共晶 Al-Si 合金中,制备了 Al-4Si、Al-4Si-0.5Er、Al-4Si-1Er 三种合金,并探究 T6 热处理工艺对合金的显微组织、相组成、力学及电学性能的影响,为研究高强高导 Al-Si 合金提供依据。

2. 实验材料及方法

2.1. 实验材料

实验合金的成分如表 1 所示。原材料采用纯铝 99.99% (质量分数, 下同), Al-20% Si、Al-11% Er 中间合金, 在坩埚电阻炉中用石墨坩埚熔炼。熔炼前先将模具和原料在 200℃ 下预热, 熔炼时先加入纯铝和 Al-20% Si 中间合金, 等完全融化后在 720℃~730℃ 保温 10 min, 进行扒渣, 再加入 Al-11% Er 中间合金, 融化后进行二次扒渣, 最后浇模具中, 冷却成型后取出, 铸锭尺寸为 Φ 100 mm \times 200 mm。将浇铸完成的圆锭, 进行热挤压, 挤压前将圆锭在 400℃ 下保温 1.5 h, 挤压比为 139, 挤压速率 1 m/min, 挤压成直径为 8.46 mm 圆杆。

Table 1. Nominal composition of alloys/%

表 1. 合金的名义成分/%

Alloy	Si	Er	Al
Al-4Si	4	0	96
Al-4Si-0.5Er	4	0.5	95.5
Al-4Si-1Er	4	1.0	95

2.2. 测试方法

将试样镶嵌后, 分别在 240#、600#、1000#、1200#、1500#、2000#砂纸上打磨, 然后用 MgO 抛光剂进行抛光, 抛光后采用 Axio Scope A1 蔡司金相显微镜、FEI Quanta250 型扫描电镜(SEM)及其附件能谱仪(EDS)分析合金显微组织及成分, 用四电极法测电阻率, 通过计算得出导电率, 用 Instron5969 万能拉伸试验机测拉伸强度、伸长率, 标距为 25 mm, 速率为 2 mm/min, 测 3 次取均值。最后用 HVS-50 显微硬度计测合金硬度, 载荷 300 g, 保持时间 15 s, 测 3 次取均值。根据文献调研[11], T6 热处理条件下对 Al-Si 合金性能影响较佳, 可以均匀组织, 改善硅颗粒的分布。因此设计了如下工艺: 固溶 500℃ \times 1 h 后水淬, 人工时效 220℃ \times 1 h、3 h、8 h、12 h、24 h。

3. 结果与讨论

3.1. 显微组织

图 1 是 T6 热处理前后合金金相组织。图 1(a)为挤压态 Al-4Si 合金的金相组织, 挤压处理后, 共晶硅不再呈板片状、针状, 而是呈短棒状、颗粒状分散在基体中, 不再偏聚在晶界处。图 1(b)、图 1(c)分别是挤压态 Al-4Si-0.5Er、Al-4Si-1Er 合金的金相组织, 从中可以看出, 随着 Er 含量的增加, 合金组织中的第二相数量逐渐增加, 尺寸逐渐减小, 且分布更加密集。主要原因是稀土 Er 与合金中的 Si、Al 形成新相, 从而增加了第二相的数量, 其中稀土 Er 与基体结合析出第二相是面心立方结构, 便与基体形成共格界面, 可促进非匀质形核, 进而细化晶粒。

图 1(d)为 Al-4Si 合金经过固溶 500℃ 保温 1 h 后水淬, 人工时效 220℃ 保温 24 h 后的金相组织。第二相数量增多, 弥散的分布在基体中。此时经过长时间的时效后, 固溶在基体中的 Si 充分析出, 将对合金导电率产生有利的影响。图 1(e)、图 1(f)分别是 T6 态 Al-4Si-0.5Er、Al-4Si-1Er 合金的金相组织, 随着 Er 含量的增加, 合金组织中的第二相数量仍逐渐增加, 且呈弥散分布, 尺寸逐渐均匀。

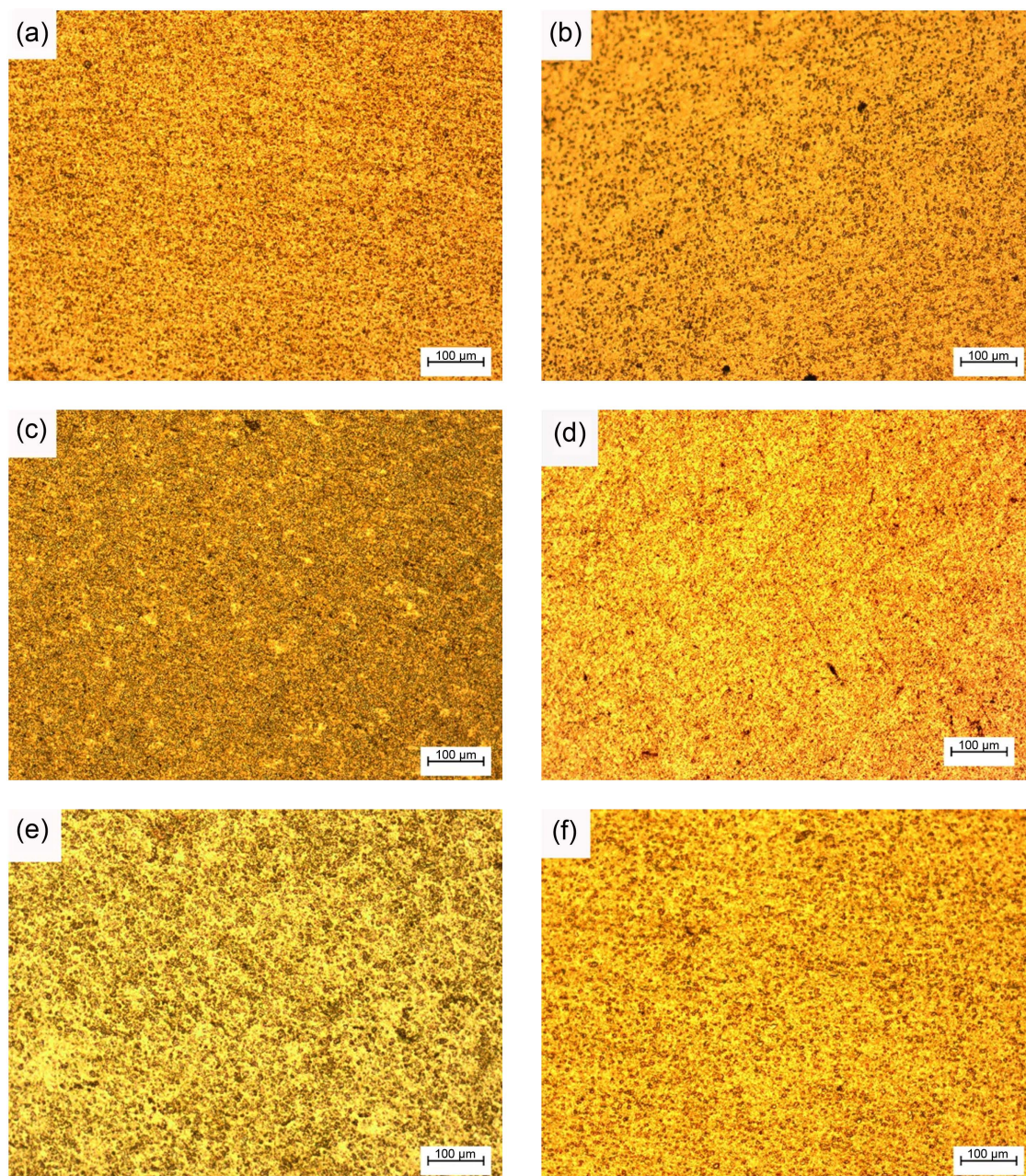


Figure 1. Metallographic structure of alloy before and after T6 heat treatment. (a) As-extruded Al-4Si; (b) As-extruded Al-4Si-0.5Er; (c) As-extruded Al-4Si-1Er; (d) T6 state Al-4Si; (e) T6 state Al-4Si-0.5Er; (f) T6 state Al-4Si-1Er

图 1. T6 热处理前后合金金相组织。(a) 挤压态 Al-4Si; (b) 挤压态 Al-4Si-0.5Er; (c) 挤压态 Al-4Si-1Er; (d) T6 态 Al-4Si; (e) T6 态 Al-4Si-0.5Er; (f) T6 态 Al-4Si-1Er

图 2 为 T6 态 Al-4Si-0.5Er、Al-4Si-1Er 合金的背散射电子图，原子序数越大，背散射电子越亮，可以初步判断图 2 中亮白色部分是含 Er 第二相，灰色块状物为共晶硅相，其余部分为 α -Al 相。表 2 是图 2 中合金 A、B、C、D 各点对应的 EDS 分析结果及各原子百分比，首先对 A 处进行点分析，通过 EDS 能谱发现(表 2)，该位置 Er、Si 原子比接近 1:2，可以认为形成了 ErSi_2 二元相，由于硅铝二元金属间化合物的生成焓较低[12]，故优先形成。该位置 Al、Er 原子比明显大于 3:1，是因为 Er 的添加量较低，受基体 Al 的影响较大，可能形成极少量的 Al_3Er ，大部分是 Er 在 Al 中形成的固溶体。B 点主要元素是 Al、

Si, 是分布在基体中的共晶硅, 呈不规则的块状且尺寸不均。对 C 处进行 EDS 分析, 合金中可能存在的相为 Al_3Er 、共晶硅。除了含有 Al、Er、Si 外还有少量 Fe 元素, 可能是稀土 Er 的净化作用, 使合金中杂质元素由固溶态转为析出态, 降低对电子的散射, 进而达到提高导电率的效果。D 点 Al 元素占主体, 还有少量的 Si, 该处是少量的 Si 固溶在 Al 基体中。从图 2(b)上看共晶硅尺寸有所减少, 说明 1% Er 对合金共晶硅细化效果较好。

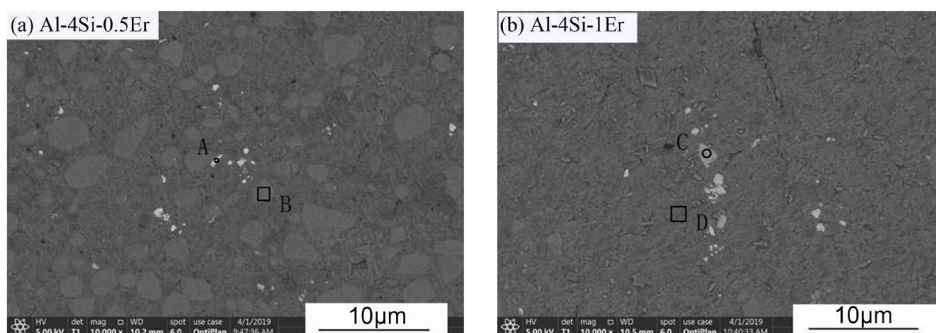


Figure 2. Backscattered electron diagrams of T6 state Al-4Si-0.5 Er and Al-4Si-1 Er alloys
图 2. T6 态 Al-4Si-0.5Er、Al-4Si-1Er 合金的背散射电子图

Table 2. EDS analysis results of alloy A, B, C and D and the percentage of atoms in Figure 2

表 2. 图 2 中合金 A、B、C、D 各点对应的 EDS 分析结果及各原子百分比

Area	Atomic Composition/at%			
	Al	Si	Er	Fe
A	86.80	8.27	4.93	0
B	64.03	35.97	0	0
C	79.94	10.90	7.33	1.83
D	99.54	0.46	0	0

3.2. 导电性能

图 3 为 T6 热处理前后合金导电率。挤压态 Al-4Si-1Er 合金导电率最高为 52.92%, 与 Al-4Si 合金导电率几乎相同, 而 Al-4Si-0.5Er 合金的导电率略有降低为 51.39%, 原因是加入 Er 元素后的合金, 形成了新相 ErSi_2 、 Al_3Er , 这个过程需要消耗 Si, 降低了基体中 Si 的固溶量, 并且 Al_3Er 是面心立方晶格, 可与基体形成共格界面, 降低晶格畸变, 但是稀土 Er 的加入, 引入了异质原子, 部分 Er 固溶到基体中, 导致晶格畸变增加, 所以总体表现为导电率保持稳定。

本文合金热处理工艺采用 T6 热处理(500℃固溶 1 h 后水淬 + 220℃时效)。合金 500℃固溶 1 h 后水淬, 保温过程可使过剩的相充分溶解到固溶体中, 形成均匀固溶体, 快速水冷可抑制第二相的析出, 形成过饱和固溶体。人工时效, 使合金中固溶的第二相析出, 均匀弥散的分布在基体中, 均匀组织进而提高合金的力学、电学性能[13]。经过实验后发现, 时效处理可提高合金导电率, 但保温时间对合金导电率影响较小。人工时效后, 合金中固溶的第二相充分析出, 降低了晶格畸变, 导电率升高。Al-4Si-0.5Er 合金随时效时间增加, 先降低后上升, 整体成上升趋势。Al-4Si-1Er 合金随时效时间增加, 导电率先缓慢升高, 后保持稳定。时效 24 h 后 Al-4Si-1Er 合金导电率达到最高 54.96% IACS, 相比于未时效之前的 52.92% IACS 上升了 4%。但是整体低于 Al-4Si 合金的导电率, 是因为热处理后第二相数量增加, 分布更加弥散, 随时效时间的延长, 合金中的 Al_3Er 逐渐球化并长大, 对电子的阻碍作用增强, 综合表现为导电率低。

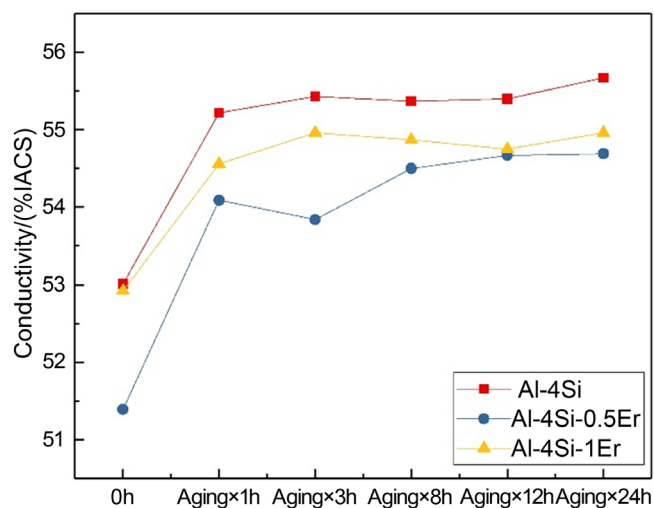


Figure 3. Conductivity of alloy before and after T6 heat treatment
图 3. T6 热处理前后合金导电率

3.3. 力学性能

图 4 是 T6 热处理前后合金的力学性能图, 挤压态 Al-4Si 合金的抗拉强度是 116 MPa, Al-4Si-0.5Er 合金的抗拉强度为 122 MPa, 提高了 5%, 但是伸长率略有降低。Er 元素在合金中的存在形式分为两种, 一种是以固溶态的形式固溶在基体中, 起到固溶强化的效果; 另一种是以含 Er 第二相的形式析出, 起到第二相强化的效果。从组织上看, 含 Er 的第二相以颗粒状为主呈弥散分布, 这对合金强化十分有利, 减弱了对基体的割裂作用, 钉扎位错, 增加变形抗力, 表现为抗拉强度升高。时效处理后合金的力学性能有所下降, 时效后第二相充分析出, 大部分第二相由固溶态转为析出态, 晶格畸变减小, 强化效果减弱。T6 热处理后, Al-4Si 的抗拉强度为 96.8 MPa, Al-4Si-1Er 的抗拉强度为 103.5 MPa, 提高了 7%。

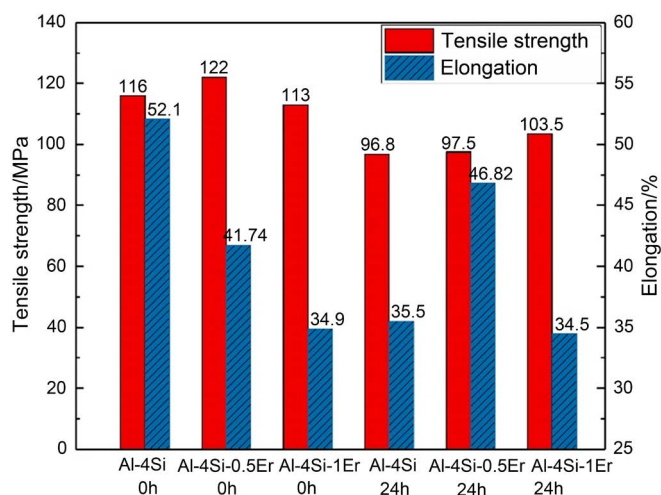


Figure 4. Mechanical properties of alloy before and after T6 heat treatment
图 4. T6 热处理前后合金的力学性能图

图 5 是 T6 热处理前后合金的硬度图, 挤压态合金添加 Er 元素后, 硬度略有降低。挤压态 Al-4Si 合金的硬度最高为 42.6 HV, Al-4Si-0.5Er 合金的硬度为 39.3 HV, Al-4Si-1Er 合金的硬度为 38.8 HV, 降低了 7%左右。T6 热处理后, Al-4Si 合金的硬度最低是 32.87 HV, Al-4Si-0.5Er 合金的硬度最高为 40.5 HV,

上升了 23%，Al-4Si-1Er 合金的硬度为 35.3 HV。T6 热处理后 Al-4Si-0.5Er 合金内部组织更加均匀，第二相颗粒弥散分布，弥散强化效果显著，表现为硬度较该合金挤压态时有所上升。相同热处理状态下，Al-4Si-0.5Er 的硬度是 40.5 HV，比 Al-4Si-1Er 高出 15%，这是因为 Al-4Si-0.5Er 的合金显微组织中，第二相数量较多，弥散强化和第二相强化共同作用，造成的硬度增加。

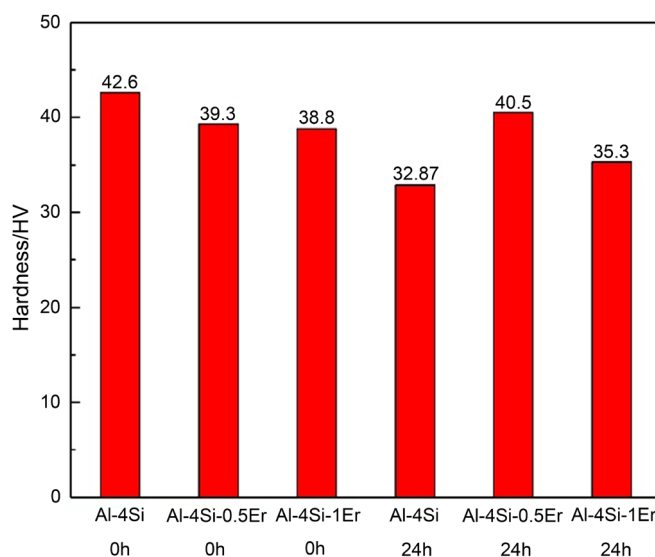


Figure 5. Hardness diagram of alloy before and after T6 heat treatment
图 5. T6 热处理前后合金的硬度图

4. 结论

1) 稀土元素 Er 有利于 Si 由固溶态转变成析出态，合金中主要相组成为：a-Al、共晶硅、ErSi₂、Al₃Er。增加了第二相种类和数量，第二相尺寸减小，Al-4Si-0.5Er 合金的力学性能达到最佳，抗拉强度为 122 MPa，伸长率为 41.74%，硬度为 39.3 HV。

2) T6 热处理后，合金组织中第二相析出更加充分，Al-4Si-1Er 合金的综合性能达到最高，导电率由 52.92% IACS 上升至 54.96% IACS，提高了 4%，抗拉强度为 103.5 MPa，伸长率为 34.5%，硬度为 40.5 HV。

基金项目

国家自然科学基金项目(51804189)，山东省自然科学基金博士基金项目(ZR2017BEM004)。

参考文献

- [1] 隋育栋. Al-Si-Cu-Ni-Mg 系铸造耐热铝合金组织及其高温性能[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2017: 1-3.
- [2] 罗子康. 试析铝合金应用现状及发展趋势[J]. 中国设备工程, 2019(2): 119-120.
- [3] 张强, 韩钰, 卢卫疆, 陈新, 刘东雨, 陈保安, 祝志祥, 吴观斌. 架空导线用中强铝合金导体材料综述[J]. 热加工工艺, 2016, 45(18): 7-9.
- [4] 谭瑞. 中强高导铝合金线的制备与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2017.
- [5] 黄金磊, 赵毅飞, 郝敏钗. 高导电铝合金线材的制备工艺与性能研究[J]. 铸造技术, 2017, 38(3): 555-558.
- [6] 檀廷佐, 姚正军, 袁灿, 徐军, 魏东博. 稀土钕对亚共晶铝硅合金组织及性能的影响[J]. 机械工程材料, 2012, 36(11): 36-40.
- [7] Murashkin, M.Y., Sabirov, I., Medvedev, A.E., et al. (2016) Mechanical and Electrical Properties of an Ultrafine Grained Al 8.5 wt. % RE (RE = 5.4 wt. % Ce, 3.1 wt. % La) Alloy Processed by Severe Plastic Deformation. *Materials*

& Design, **90**, 433-442. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.163>

- [8] 邢泽炳, 季小兰, 高旭东, 聂祚仁. 微量铈对 Al-4.5Mg-0.7Mn-0.1Zr 合金高温力学性能及组织的影响[J]. 中国稀土学报, 2010, 28(5): 591-595.
- [9] 刘同辉, 文胜平, 李健飞, 陈子勇, 聂祚仁. 退火工艺对冷轧 Al-Er-Cu 合金电导率和硬度的影响[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(6): 31-35.
- [10] 张二庆, 文胜平, 侯杰, 聂祚仁. 退火对冷轧态 Al-0.04Er 和 Al-0.08Zr 合金组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2018, 43(3): 5-9.
- [11] 胡展奎, 池国明. 合金成分及热处理工艺对 Al-Mn-Mg-Si-Fe-Cu 合金组织与性能的影响[J]. 铝加工, 2018(2): 8-14.
- [12] 孙顺平, 易丹青, 陈振湘, 周明哲, 王斌. Er 在 Al-Mg-Si 合金中的存在形式及其热力学分析[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(1): 138-143.
- [13] 崔晓丽. 溶体复合硼化处理及第二相形貌演变对铝合金导电率影响机制的研究[D]: [博士学位论文]. 济南: 山东大学, 2016.