

热处理对 Al-0.7Fe-0.2Sc 合金慢应变腐蚀拉伸性能影响

陈 力 张嘉艺 黄成聪 罗志坚 陈 璞
(江西理工大学材料冶金化学学部)

摘 要 采用慢应变腐蚀拉伸测试、扫描电镜、透射电镜观察等手段,研究了在腐蚀环境(腐蚀剂为 0.1 mol/L Na₂SO₄+0.001 mol/L NaCl 的混合溶液)下不同热处理工艺对 Al-0.7Fe-0.2Sc 合金力学性能和微观组织的影响。结果表明,600 ℃×72 h 固溶+325 ℃×72 h 时效为最优工艺,合金伸长率达到13.8%,抗拉强度为 131.2 MPa;试样断口形貌由韧窝和撕裂棱组成,韧窝尺寸较小、较浅且数量较多。经过固溶时效,除了已经存在的 Al₃Fe 第二相外,还有大量的 Al₃Sc 析出相,这些相钉扎在位错及亚晶界处,阻碍塑性变形,提高了 Al-0.7Fe-0.2Sc 合金的力学性能。

关键词 Al-0.7Fe-0.2Sc 合金;慢应变腐蚀拉伸;断口形貌;伸长率;Al₃Sc 析出相

中图分类号 TG146.21;TG156.99 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.01.020 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Effects of Different Heat Treatments on Slow Strain Corrosion Tensile Properties of Al-0.7Fe-0.2Sc Alloy

Chen Li, Zhang Jiayi, Huang Chengcong, Luo Zhijian, Chen Pu
(Department of Materials Metallurgical Chemistry, Jiangxi University of Science and Technology)

Abstract: Effects of different heat treatment processes on mechanical properties and microstructure of Al-0.7Fe-0.2Sc alloy under corrosive environment(Na₂SO₄+NaCl solution) were investigated by slow strain corrosion tensile test, scanning electron microscope and transmission electron microscope. The results indicate that the optimal process parameters are solid solution at 600 ℃ for 72 h+aging 325 ℃ for 72 h, where the elongation and tensile strength reach up to 13.8% and 131.2 MPa, respectively. After heat treatment, the fracture morphology of the specimens is composed of dimples and tearing edges, and the dimples are smaller, shallower with more quantities. After solution aging, in addition to the Al₃Fe second phase already existing in the solid solution state, large amounts of Al₃Sc precipitates appear, which are pinned at the dislocations and subgrain boundaries, hindering the plastic deformation and improving the tensile properties of Al-0.7Fe-0.2Sc alloy.

Key Words: Al-0.7Fe-0.2Sc Alloy, Slow Strain Corrosion Tensile, Fracture Morphology, Elongation, Al₃Sc Precipitate

纯铝具有密度小、熔点低、塑性高、耐腐蚀性好、导电性能较好等特点,但是强度较低,不能直接用于制造

电缆。8xxx(Al-Fe)系合金是在纯铝基础上发展而来的,与纯铝电缆相比,8xxx 合金添加的合金元素在不降

收稿日期:2022-03-30;**修改稿收到日期:**2022-05-14
基金项目:江西省科技创新国际科技合作资助项目(20212BDH81005);江西省教育厅青年人才资助项目(GJJ210881)
第一作者简介:陈力,女,2002 年出生,硕士研究生,江西赣州(341000),E-mail:2478202816@qq.com
通信作者:张嘉艺,女,1991 年出生,博士,江西赣州(341000),E-mail:jiayizhang21@jxust.edu.cn
引用格式:陈力,张嘉艺,黄成聪,等. 热处理对 Al-0.7Fe-0.2Sc 合金慢应变腐蚀拉伸性能影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(1):98-101.
CHEN L, ZHANG J Y, HUANG C C, et al. Effects of different heat treatments on slow strain corrosion tensile properties of Al-0.7Fe-0.2Sc alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(1):98-101.

[15] WANG Y, BANERJEE D, SU C C, et al. Field kinetic model and computer simulation of precipitation of L12 ordered intermetallics from fcc solid solution[J]. Acta Materialia, 1998, 46(9): 2 983-3 001.

[16] STEINBACH I, APEL M. Multi phase field model for solid state transformation with elastic strain[J]. Physica, 2006, D217(2): 153-160.

[17] KIM S G, KIM W T, SUZUKI T. Phase-field model for binary alloys[J]. Physical Review, 1999, E60(6): 7 186-7 197.

[18] LUKÁŠ P, ČADEK J, ŠUSTEK V, et al. Creep of CMSX-4 single crystals of different orientations in tension and compression [J]. Materials Science & Engineering, 1996, A208(2): 149-157.

[19] YU Z, WANG X M, YUE Z F, et al. Visco-plasticity phase-field simulation of the mechanical property and rafting behavior in nickel-based superalloys[J]. Intermetallics, 2020, 125: 106 884.

[20] DING Q, LI S, CHEN L Q, et al. Re segregation at interfacial dislocation network in a nickel-based superalloy[J]. Acta Materialia, 2018, 154: 137-146.

(编辑:彭瑾)

低导电性的同时可显著改善其力学性能,在电力传输领域得到应用^[1,2],中强度铝合金作为一种节能导线,具有高电导率与足够强度,能满足中低压电线电缆的需求^[3~6]。Al-Fe 合金作为一种新的铝合金体系^[7,8],既保持了质轻的特点,又因为 Al₃Fe 等金属间化合物的存在,使合金具有耐高温、耐磨、耐腐蚀以及良好的抗蠕变性能等^[9]。

由于 Al-Fe 合金中 Al₃Fe 第二相粗大且分布不均,容易造成偏析,导致性能下降,所以在 Al-Fe 合金中添加适量的微量元素来改善其性能^[10,11]。胡晓梅等^[12]研究发现,在 Al-Fe-Cu 合金中加入 La 和 Zr 能使其电导率达到 36.02 MS/m,抗拉强度为 125.0 MPa,伸长率为 13.4%。杨荣凯等^[13]研究了不同铸造及挤压工艺下合金元素对 Al-Fe 合金微观组织及抗压蠕变等力学性能的影响,发现添加 Zr 和 Cu 均可提高挤压棒材的抗压蠕变性能。谭国寅等^[14]研究发现,双零铝箔随着轧制过程的进行,块状第二相粒子在轧制剪应力的作用下被拉长,同时在拉长的块状第二相粒子周围富集了许多从基体上脱落的球形小颗粒第二相粒子。导致第二相颗粒溶解球化的主要原因是扩散,高密度的位错及空位等晶体缺陷是第二相粒子回溶的主要通道。王海生等^[15]研究了 Cu 和形变热处理对 Al-0.7Fe 合金性能的影响,发现随着退火温度提高,Al-0.7Fe-0.2Cu 合金的塑性显著提高,达到 31.3%。王剑等^[16]对制备高性能 Al-Fe 合金的核心问题-细化富 Fe 相及提升 Fe 含量进行讨论,并指出合金元素的引入方式与液态环境的精确调控是 Al-Fe 合金未来的研究重点。因此,在铝合金中添加稀土元素,可以细化晶粒,改善合金组织,进而提高合金的强度和韧性^[17~19]。Sc 通常加入到铝合金中来细化组织^[20~22]。Sc 在铝合金凝固过程中会析出 Al₃Sc 第二相,细化铸态合金晶粒,次生 Al₃Sc 相通常在热处理后生成,起弥散强化作用,且有抑制合金再结晶作用^[23,24]。所以,通过设计合适的热处理工艺,能够改善合金的微观结构,从而提高其综合性能^[25~27]。目前,对于含 Sc 的 Al-Fe 合金的性能研究报道较少,且该体系合金应力腐蚀性能缺乏系统和深入研究。

Al-0.7Fe-0.2Sc 合金使用环境复杂、多变,长期暴露在空中并会受到酸雨的腐蚀,易产生应力腐蚀开裂,在安全方面存在严重隐患^[28~30]。实际生产中,可以通过调控合金成分、优化形变热处理工艺达到提高铝合金电缆抗应力腐蚀的能力。因此,本课题采用慢应力腐蚀拉伸测试、扫描电镜、透射电镜等手段,研究热处理对 Al-0.7Fe-0.2Sc 合金的慢应变腐蚀组织及拉伸性能的影响,为 Al-0.7Fe-0.2Sc 合金在电力电缆行业的应用提供参考。

1 试验方法

试验原材料为商业纯铝(99.7%,质量分数,下同)、Al-20Fe、Al-5Sc 中间合金。将纯铝置于 760 ℃ 的井式电阻炉中熔炼,随后分别加入 Al-20Fe、Al-5Sc 中间合金,在 720 ℃ 下浇注成 Al-0.7Fe-0.2Sc 铸锭。将铸锭热挤压成棒材,并将棒材置于空气炉中于 520 ℃ 下均匀化加热 15 h 后取出,制备应力腐蚀试样(见图 1)。将制备所得的 Al-0.7Fe-0.2Sc 合金试样分为 5 组,并进行不同热处理,见表 1。应力腐蚀试验在 NFKK50 慢拉伸应力腐蚀试验机上进行,应变速率为 $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,腐蚀液为 0.1 mol/L 的 Na₂SO₄ 与 0.001 mol/L 的 NaCl 的混合溶液。试样 A 在空气中进行拉伸(无腐蚀液浸泡);试样 B~E 浸泡在 50 ℃ 的腐蚀液中进行慢应力拉伸试验(模拟电缆通电下的真实服役状态);记录 5 组试样的伸长率和抗拉强度。试样的拉伸断口经过无水乙醇和超声波清洗后采用 Zeiss ΣIGMA 型场发射扫描电镜(SEM)进行观察。把试样用线切割机切成 $\phi 5 \text{ mm}$ 圆片,用砂纸细磨至 60~80 μm ,将其冲孔成 $\phi 3 \text{ mm}$ 薄片,将试样进行电解双喷(双喷液为硝酸和甲醇混合液),然后采用 Tecnai G2 20 200kV 透射电镜(TEM)进行观察。

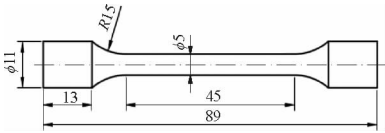


图 1 慢拉伸应力腐蚀试验试样尺寸
Fig.1 Dimension of specimen for slow tensile stress corrosion test

表 1 拉伸试样的热处理工艺

Tab.1 Heat treatment process of tensile specimen	
试样	工艺
A	无热处理(原始态)
B	600 ℃×72 h 固溶+水冷
C	600 ℃×72 h 固溶+水冷+325 ℃×5 h 时效+水冷
D	600 ℃×72 h 固溶+水冷+325 ℃×72 h 时效+水冷
E	600 ℃×72 h 固溶+水冷+325 ℃×288 h 时效+水冷

2 试验结果与讨论

2.1 应力腐蚀测试

图 2 为 5 组试样慢应力腐蚀拉伸曲线,表 2 为 5 组试样的力学性能。可以看出,4 组热处理试样抗拉强度(σ_b)皆高于原始态试样。经过固溶和时效处理后的 3 组试样伸长率(δ)都高于无热处理和仅固溶的试样,说明固溶+时效能提高 Al-0.7Fe-0.2Sc 合金的力学性能。合金在 600 ℃×72 h 固溶+325 ℃×72 h 时效后抗拉

强度为 131.2 MPa、伸长率为 13.8%；在 600 ℃×72 h 固溶后伸长率为 4.1%，抗拉强度明显高于无固溶处理试样；经 600 ℃×72 h 固溶+325 ℃×5 h 时效后抗拉强度与固溶态接近，但是伸长率显著提升。值得注意的是，经 600 ℃×72 h 固溶+325 ℃×288 h 时效后，抗拉强度和伸长率都比时效 72 h 的试样更低，说明长时间时效不利于提高合金的力学性能。由此可见，经 600 ℃×72 h 固溶+325 ℃×72 h 时效为最优工艺，使 Al-0.7Fe-0.2Sc 合金拥有良好的力学性能。

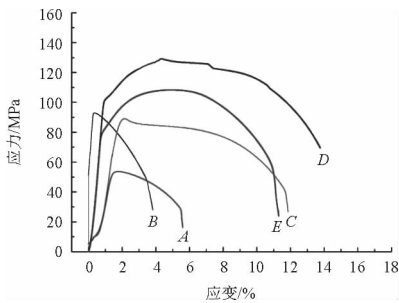
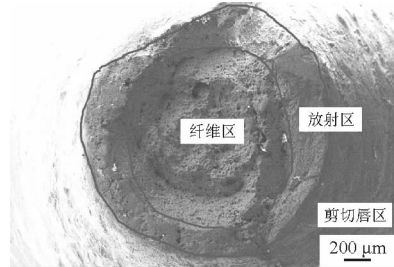
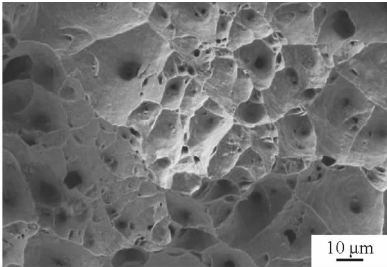


图 2 5 组试样慢应力腐蚀拉伸曲线

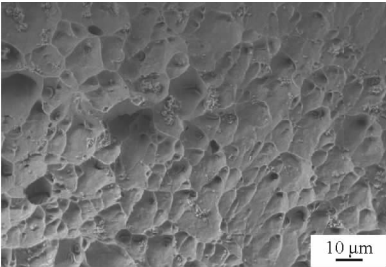
Fig.2 Slow stress corrosion tensile curves of five groups of specimens



(a) 无腐蚀空拉,低倍



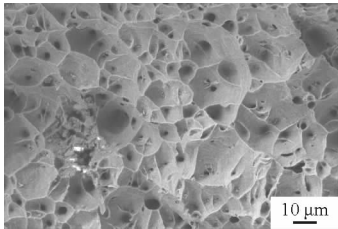
(b) 无腐蚀空拉,高倍



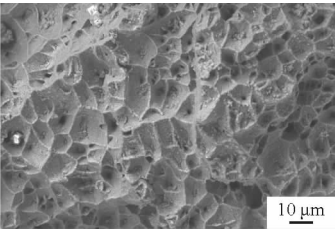
(c) 腐蚀拉伸断口纤维区

图 3 无固溶处理试样慢应力拉伸断口形貌

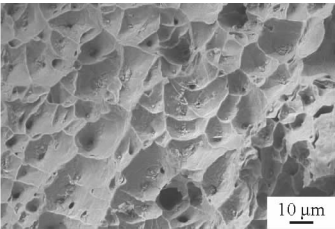
Fig.3 SEM morphologies of slow stress tensile fracture of specimens without solid solution treatment



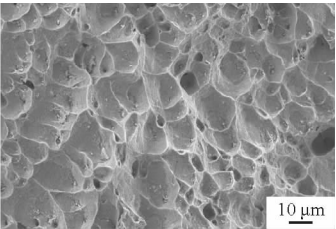
(a) 固溶态



(b) 325 ℃×5 h



(c) 325 ℃×72 h



(d) 325 ℃×288 h

图 4 经 600 ℃×72 h 固溶后,不同时效时间下拉断口纤维区微观形貌组织

Fig.4 SEM morphologies of tensile specimens in fracture fiber region with solouation at 600 ℃ for 72 h and different aging time

可以明显看出,经过热处理后,断口韧窝尺寸较大、较深且数量更少。无热处理的试样(见图 3c)断口夹杂物或第二相粒子尺寸小且密集,经过固溶后的试样(见图 4a)夹杂物和第二相粒子基本消失,可见这些颗粒已经回溶至基体。随着时效时间延长,韧窝逐渐变大且深,见图 4c 和图 4d。在 325 ℃×72 h 时效后的韧窝最深,见图 4c,所以试样 D 的伸长率更好。

表 2 5 组试样的力学性能

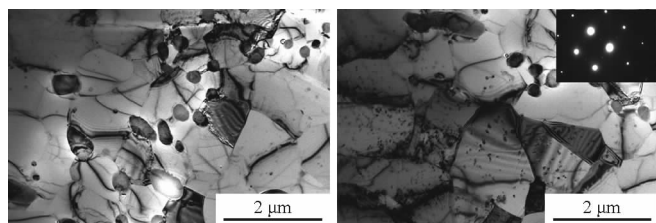
Tab.2 Mechanical properties of five groups of specimens		
试样	抗拉强度(σ_b)/MPa	伸长率(δ)/%
A	53.8	5.6
B	92.8	4.1
C	91.6	11.9
D	131.2	13.8
E	108.5	11.4

2.2 断口观察

图 3 为原始态试样慢应变拉伸断口形貌。由图 3a 可见,试样为韧性断裂,断口呈杯锥状,其断口分为纤维区、放射区、剪切唇区。根据这 3 个区域的比例可初步判断材料的性能:纤维区越大,韧性越好;放射区越大,脆性越大。可以看出,空拉断口韧窝较深,分布较散,经过腐蚀断口纤维区韧窝尺寸变小,且数量明显增加,存在大量夹杂物或第二相粒子。

图 4 为经 600 ℃×72 h 固溶,不同时间时效后试样的拉伸断口纤维区微观组织。可以看出,断口形貌主要由许多大小不一的断裂韧窝和撕裂棱组成,对比图 3c

尺寸约为 40 nm。从图 5b 右上角的衍射斑点能发现 Al_3Sc 析出相的超晶格斑点。这些析出相几乎没有在试样 B 中观察到, Al_3Sc 析出相大部分钉扎在位错及亚晶界处。在试样 D 中, 有 Al_3Fe 第二相和 Al_3Sc 析出相共同析出, 进一步阻碍位错及亚晶界移动, 所以试样 D 的力学性能远高于试样 B。经过 $325\text{ }^\circ\text{C} \times 72\text{ h}$ 时效后, 基体中析出了 Al_3Sc 析出相, 这些相起到弥散强化作用, 这也是提高抗腐蚀拉伸性能的主要原因。



(a) 试样 B

(b) 试样 D

图 5 慢应变腐蚀拉伸后试样 B 和 D 的 TEM 形貌

Fig.5 TEM morphologies of specimen B and D after slow strain corrosion tension

3 结 论

(1)慢应变速率拉伸试验中, Al-0.7Fe-0.2Sc 合金在固溶时效处理过程中, 长时间时效不利于提高其力学性能, 经 $600\text{ }^\circ\text{C} \times 72\text{ h}$ 固溶 + $325\text{ }^\circ\text{C} \times 72\text{ h}$ 时效后, 合金具有最好的力学性能。

(2)经固溶时效处理后, Al-0.7Fe-0.2Sc 合金断口韧窝多且密, 韧窝尺寸较小; 时效时间延长对其有一定的影响, 使韧窝逐渐变得大且深, 塑韧性提高。

(3)从 TEM 形貌分析可以观察到, 固溶时效处理的 Al-0.7Fe-0.2Sc 合金 Al_3Fe 第二相和 Al_3Sc 析出相共同析出, 这些相阻碍位错及亚晶界移动, 起到弥散强化作用。

参 考 文 献

- [1] 菅晓君, 张明山, 王俊升. 热处理工艺对 6061 铝合金硬度和导电率的影响[J]. 材料热处理学报, 2019, 40(1): 83-90.
- [2] 李龙彬, 李素琴, 楼瑞祥, 等. 民用飞机铝导体线缆试验验证标准研究[J]. 航空标准化与质量, 2021(1): 10-13, 36.
- [3] 谢莉杰. 铝合金电缆发展趋势及应用的研究[J]. 质量技术监督研究, 2018(1): 25-29.
- [4] 梁经龙, 刘杰, 黄位华. 铝合金电缆与铜电缆不同排布方式下稳态载流量对比分析[J]. 山西电力, 2020(4): 22-27.
- [5] 黄崇祺. 电工用铝和铝合金在电缆工业中的应用与前景[J]. 中国金属通报, 2012(34): 16-19.
- [6] 闫志恒. 高导电率导线技术经济比较及导电率影响因素研究[D]. 河北保定: 华北电力大学, 2016.
- [7] 陈迪, 李成栋, 赵晓冬. 铝合金在电力传输领域的研究及应用[J]. 材料导报, 2013, 27(15): 145-148.

- [8] 郭磊, 易丹青, 臧冰, 等. 挤压比对 AA8030 铝合金棒材组织及电性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(8): 2 083-2 090.
- [9] 邓显波, 江新洋, 王斌. 铁、铜含量对电缆用 Al-Fe-Cu 合金组织和性能的影响[J]. 轻合金加工技术, 2016, 44(12): 29-35.
- [10] 林肇琦. 新一代铝合金——铝钎合金的发展概况[J]. 材料导报, 1992(3): 10-16.
- [11] NORMAN A F, PRANGNELL P B, MCEWEN R S. The solidification behavior of dilute aluminium-scandium alloys[J]. Acta Materials, 1998, 46-48 (16): 5 715-5 732.
- [12] 胡晓梅, 刘立宁, 苏凤, 等. 电线电缆用 Al-Fe-Cu-0.25La-Zr 耐热合金的导电性能[J]. 金属热处理, 2021, 46(8): 197-200.
- [13] 杨荣凯, 陈冠, 张冰, 等. 电缆用 Al-Fe 合金抗压蠕变及力学性能的工艺研究[J]. 铸造, 2017, 66(10): 1 062-1 066.
- [14] 谭国寅, 岳有成, 杨钢, 等. 1235 超薄双零铝箔坯料中 Al-Fe-Si 第二相粒子在轧制过程中演化行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(4): 979-981.
- [15] 王海生, 闵洁, 王云, 等. 微量 Cu 和形变热处理对 Al-Fe 合金性能的影响[J]. 材料研究学报, 2019, 33(11): 874-880.
- [16] 王剑, 周榆力. Al-Fe 合金组织优化及相关机制研究进展[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2017, 36(6): 73-82.
- [17] 赵俊, 刘志勇, 刘秋平, 等. 稀土 Er 及回归热处理对 7075 铝合金组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(6): 666-669.
- [18] 王丽萍, 康福伟, 郭二军, 等. 单一稀土 Ce, La 和混合稀土在工业纯铝中的作用[J]. 中国稀土学报, 2003(2): 218-221.
- [19] 邢泽炳, 聂祚仁, 季小兰, 等. 微量 Er, Mn 对 Al-Mg 合金组织与性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2006(12): 1 979-1 982.
- [20] 张思平. 含 Sc 铝合金的应用研究新进展与前景展望[J]. 铝加工, 2019(2): 4-9.
- [21] 郑洪, 林顺岩. 铝钎合金的研究与开发[J]. 铝加工, 2005(5): 43-47, 49.
- [22] 潘海成. 微合金化铝铁合金的强化机理[J]. 热加工工艺, 2015, 44(21): 82-84, 87.
- [23] LATHABAL S, LLOYD P G. The effect of scandium on the microstructure, mechanical properties and weldability of a cast Al-Mg alloy[J]. Mater., 2002, 50(17): 4 275-4 292.
- [24] JIANG L, ZHANG Z F, BAI Y L, et al. Study on Sc microalloying and strengthening mechanism of Al-Mg alloy[J]. Crystals, 2022, 12: 673.
- [25] 陈小明, 宋仁国, 唐普洪. 7xxx 系铝合金时效处理研究的新进展[J]. 金属热处理, 2009, 34(12): 73-77.
- [26] 马志锋, 宋伟, 王少华, 等. 时效状态对新型高强铝合金型材力学及腐蚀性能的影响[J]. 金属热处理, 2014, 39(9): 1-5.
- [27] 王凤春, 李志辉, 刘英, 等. 时效处理对 7449 铝合金组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2013, 38(5): 92-95.
- [28] 王玮, 张艳涛, 张德军, 等. 时效工艺对 7B05 铝合金型材抗应力腐蚀性能的影响[J]. 热加工工艺, 2021, 50(22): 132-135.
- [29] 林江波, 宋永伦, 冉国伟, 等. 铝铜系合金焊接接头应力腐蚀开裂与工艺的相关性[J]. 电焊机, 2010, 40(11): 32-36.
- [30] 刘松良, 张亚明, 乔永莲, 等. HA177-2 铝黄铜换热管应力腐蚀开裂[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2017, 29(3): 265-270.

(编辑: 栗万仲)