

# 水平连铸-连续挤压-拉拔 Al-0.65Mg-0.58Si-0.17Fe 合金 微观组织与性能研究<sup>①</sup>

张瀚<sup>1</sup>, 成祥茂<sup>1</sup>, 陈诚<sup>1</sup>, 蓝淑财<sup>1</sup>, 王锐<sup>2</sup>, 范亚洲<sup>2</sup>, 张永甲<sup>3</sup>, 党朋<sup>3</sup>

(1.广东电网有限责任公司潮州供电局, 广东 潮州 521000; 2.广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510030; 3.上海电缆研究所有限公司, 上海 200093)

**摘要:** 通过水平连铸-连续挤压-拉拔工艺制备了高强度高电导率 Al-0.65Mg-0.58Si-0.17Fe 合金线材, 研究了加工工艺及热处理对合金微观组织、力学性能和电导率的影响。结果表明, 水平连铸-连续挤压工艺提高了合金过饱和固溶度并显著细化了晶粒组织, 拉拔过程引入的高密度位错改变了合金时效热处理过程中 Mg<sub>2</sub>Si 相的析出行为, Al-0.65Mg-0.58Si-0.17Fe 合金经水平连铸-连续挤压-拉拔, 在 155 °C 下时效 3 h, 其拉伸强度和延伸率分别为 335 MPa 和 6.9%, 电导率 55.7%IACS。

**关键词:** Al-Mg-Si 合金; 水平连铸; 连续挤压; 拉拔; 铝合金导线

中图分类号: TG146

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2024.05.035

文章编号: 0253-6099(2024)05-0174-05

## Microstructure and Properties of Al-0.65Mg-0.58Si-0.17Fe Alloy Prepared by Horizontal Continuous Casting, Continuous Extrusion and Drawing Process

ZHANG Han<sup>1</sup>, CHENG Xiangmao<sup>1</sup>, CHEN Cheng<sup>1</sup>, LAN Shucui<sup>1</sup>, WANG Rui<sup>2</sup>, FAN Yazhou<sup>2</sup>,  
ZHANG Yongjia<sup>3</sup>, DANG Peng<sup>3</sup>

(1. Chaozhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Chaozhou 521000, Guangdong, China;  
2. Electric Power Research Institute, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510030, Guangdong, China;  
3. Shanghai Cable Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200093, China)

**Abstract:** High-strength and high-conductivity Al-0.65Mg-0.58Si-0.17Fe alloy wire was prepared by adopting horizontal continuous casting process followed by continuous extrusion and drawing processes, and effects of such processing technique and heat treatment on microstructure, mechanical properties and conductivity of the prepared alloy were investigated. The results show that the processing technique of horizontal continuous casting plus continuous extrusion can improve the solid solubility in supersaturated alloy and lead to significantly grain refinement, and the following drawing process introduces high-dense dislocation, which changes the precipitation behavior of Mg<sub>2</sub>Si phase during the ageing treatment of the alloy. It is shown that Al-0.65Mg-0.58Si-0.17Fe alloy prepared by the processes of horizontal continuous casting, continuous extrusion and drawing is subjected to 3 hours of aging treatment at 155 °C, resulting in its tensile strength of 335 MPa, elongation rate of 6.9%, and electrical conductivity of 55.7%IACS.

**Key words:** Al-Mg-Si alloy; horizontal continuous casting; continuous extrusion; drawing; aluminum alloy wire

Al-Mg-Si 合金因其高强度和良好的导电性在架空输电导线领域得到广泛应用<sup>[1-3]</sup>。作为可热处理强化铝合金, 制备加工方法和热处理工艺对 Al-Mg-Si 合金线材的晶粒尺寸、析出和固溶度等组织特征和力学、电

学性能均具有重要影响<sup>[4-5]</sup>。当前, 国内外生产 Al-Mg-Si 合金导线的工艺主要包括半连续铸造-卧式挤压工艺、连铸连轧工艺和连续铸挤工艺等, 再结合拉拔和热处理工艺优化导线性能。其中卧式挤压工艺生产

① 收稿日期: 2024-04-22

基金项目: 中国南方电网科技项目(GDKJXM20220841)

作者简介: 张瀚(1987—), 男, 广东潮州人, 硕士, 高级工程师, 主要从事高电压及绝缘技术与材料研发工作。E-mail: 1556636161@qq.com

通信作者: 王锐(1988—), 男, 湖北潜江人, 硕士, 高级工程师, 主要从事架空输电线路运行技术与高压试验研究。E-mail: rickwangrui@126.com

效率低、成本高和质量差;连铸连轧工艺较复杂、工序控制难度大;由于需要控制凝固速率,连续铸挤工艺中铸挤轮的转速较低,生产效率低<sup>[6-9]</sup>。本文在水平连铸以及连续挤压工艺基础上,提出“水平连铸-连续挤压-拉拔”新工艺制备 Al-0.65Mg-0.58Si-0.17Fe 合金导线,为高性能铝合金导线工业化生产提供参考。

## 1 实验材料与方法

合金成分为 Al-0.65Mg-0.58Si-0.17Fe(元素含量为质量分数, %),通过水平连铸工艺制备直径 15 mm 的圆杆铸坯,铸造温度 690~730 ℃;采用 LJ300 连续挤压机将铸坯圆杆挤压成直径 9.5 mm 的杆材,挤压轮转速 18 r/min,挤压出口温度 440~480 ℃,挤压后通过水冷方式将杆材快速冷却至 40~60 ℃ 后进行收卷;随后在室温下对杆材进行拉拔,获得直径 3.4 mm 的线材;最后合金线材在 155 ℃ 下时效热处理 0~12 h。

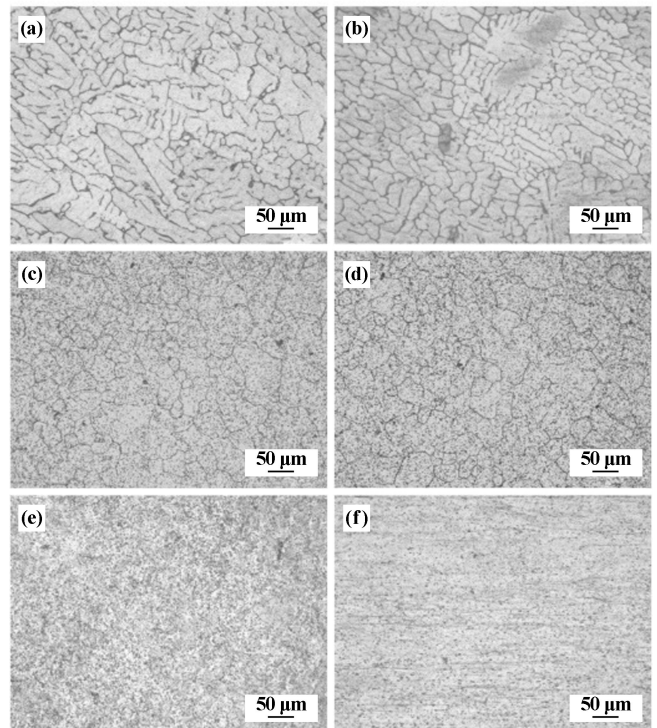
显微硬度测量在 HVS-1000 型数显维氏显微硬度计上进行,施加载荷为 100 g,加载时间 15 s。根据 GB/T 228.1—2021 标准制备拉伸试样,拉伸速度 1 mm/min;采用 FEI-Quanta 200 环境扫描电镜分析拉伸试样的断口形貌。采用 QJ-44 型直流双臂电桥进行电导率测试,测试试样标距 1 000 mm,实验温度 20 ℃。金相试样经过磨平和抛光后,采用混合酸溶液(1 mL HF+5 mL HCl+15 mL HNO<sub>3</sub>+75 mL H<sub>2</sub>O)浸蚀,并在 Axiovert 40 显微镜上进行观察。TEM 样品采用 30% 硝酸+70% 甲醇溶液进行双喷电解,温度约 -20 ℃,电压 12~15 V,电流约 120 mA,随后在 Tecnai G2 F20 S-TWIN 型透射电子显微镜下观察样品形貌。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 金相组织分析

图 1 为 Al-0.65Mg-0.58Si-0.17Fe 合金水平连铸、连续挤压及拉拔状态的金相组织图。图 1(a)~(b) 显示水平连铸合金由按一定取向生长的较大柱状晶和无特定取向的细小等轴晶组成,柱状枝晶之间可以观察到一定的元素偏析,其分布特征包括网状、条状和颗粒状等,同时可以观察到取向大致相同的细小等轴晶。连续挤压后的合金组织主要由等轴晶组成(见图 1(c)~(d)),合金在连续挤压过程中因受到连续的剪切力作用,晶粒被挤碎并随着挤压的进行温度逐渐升高而发生动态再结晶现象,进而使晶粒组织变得更均匀和细小。合金经过拉拔成线材后,如图 1(e)~(f) 所示,等轴晶粒在径向和周向被压缩,在轴向(拉拔方向)被拉

长,从而获得了细长的晶粒组织。



(a),(b) 水平连铸合金;(c),(d) 连续挤压合金;(e),(f) 拉拔合金  
其中(a),(c),(e)为横截面,(b),(d),(f)为纵截面

图 1 不同状态 Al-0.65Mg-0.58Si-0.17Fe 合金金相组织

### 2.2 XRD 相成分分析

图 2 为水平连铸、连续挤压、拉拔和时效后 Al-0.65Mg-0.58Si-0.17Fe 合金 XRD 图谱。水平连铸合金中没有发现 Mg<sub>2</sub>Si 相衍射峰,但存在少量难溶的 Al<sub>5</sub>FeSi 和 Al<sub>9</sub>Si 相。经过连续挤压变形后,由于挤压过程高温作用,Al<sub>5</sub>FeSi 和 Al<sub>9</sub>Si 相逐渐细化和减少,实现了部分在线固溶的作用<sup>[2-4]</sup>。拉拔变形因在室温下进行,其物相组成与挤压态合金类似,合金 XRD 图谱峰强度变化主要是拉拔织构所致。经过峰值时效热处理(155 ℃/3 h),合金中固溶原子逐渐脱溶析出形成 Mg<sub>2</sub>Si 相,有利于提高合金的强度<sup>[2,4-5]</sup>。

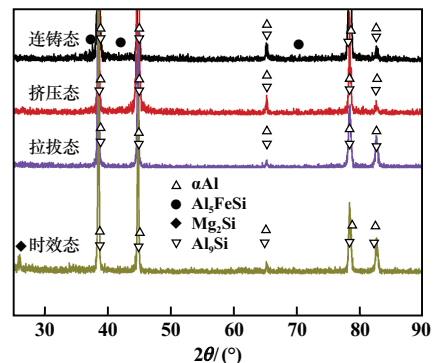
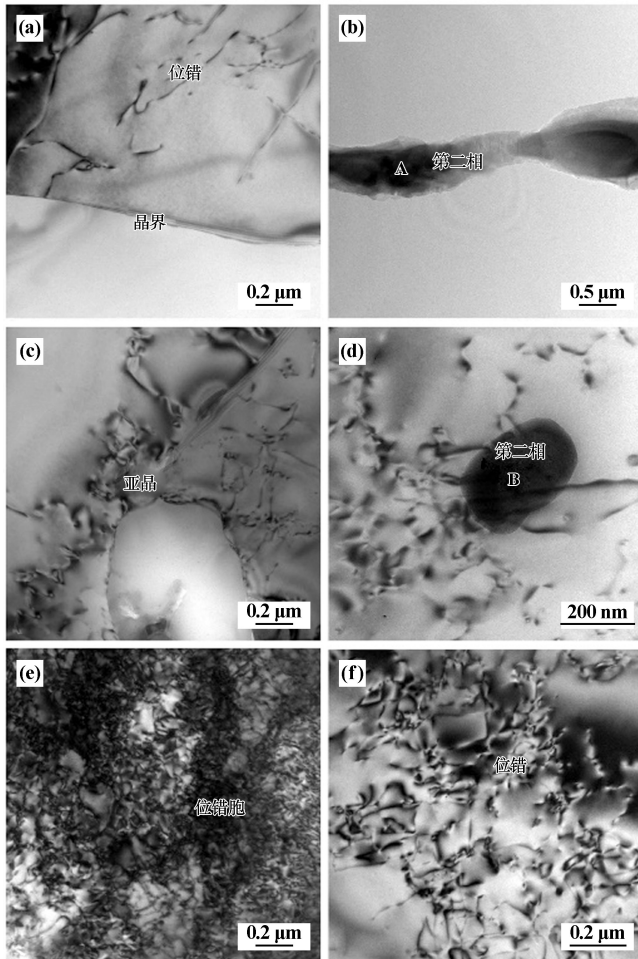


图 2 不同状态 Al-0.65Mg-0.58Si-0.17Fe 合金 XRD 图谱

### 2.3 TEM 组织分析

图3为水平连铸、连续挤压和拉拔后 Al-0.65Mg-0.58Si-0.17Fe 合金 TEM 组织图。在水平连铸杆坯中(图3(a)~(b)),主要为平直晶界和快速冷却过程形成的少量位错,同时观察到一些粗大难溶第二相,其呈长条状分布在晶界处,EDS 结果(表1)显示这些第二相主要为  $Al_3FeSi$  相,与图2结果基本吻合。连续挤压过程强烈的剪切变形使粗大第二相被剪碎(成分未明显变化,如图3(c)~(d)所示),部分第二相钉扎再结晶晶粒并形成更细小的亚晶,同时第二相有利于阻碍位错,使其周围累积较高密度的位错。拉拔变形后(图3(e)~(f)),室温条件下主要为位错的大量增殖,回复速率慢,导致位错密度大大增加,冷变形的大小决定了位错的累积量。随着变形量逐渐增大,位错密度



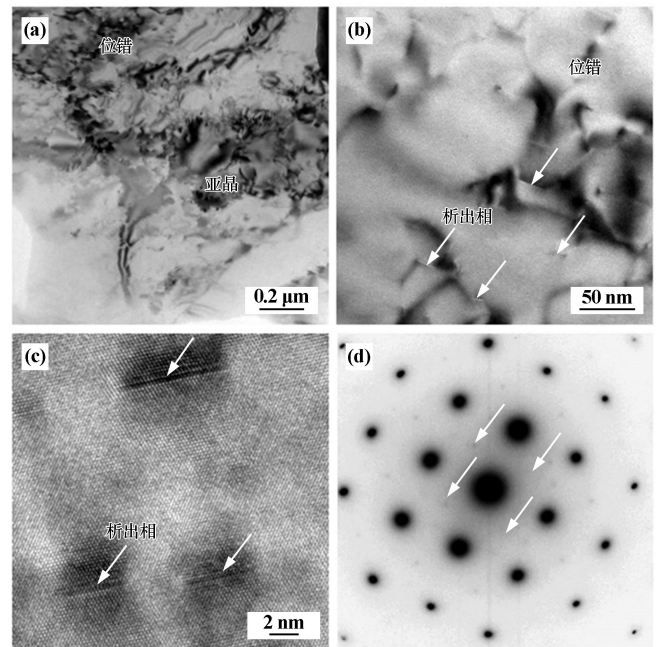
(a), (b) 水平连铸合金; (c), (d) 连续挤压合金; (e), (f) 拉拔合金  
图3 不同状态 Al-0.65Mg-0.58Si-0.17Fe 合金 TEM 组织

表1 图3中第二相粒子的 EDS 分析结果(质量分数) %

标记号	Mg	Fe	Si	Al
A	7.5	16.2	19.1	余量
B	2.3	21.2	25.9	余量

大量增加,使大量位错高度缠结进而出现胞状位错,当位错胞逐渐增加后难以清晰观察到晶界,同时位错相互作用有利于提高合金的强度。

拉拔后的合金线材具有较高密度的位错,在后续时效热处理过程中 Mg, Si 等原子容易在位错、亚晶界及晶界处形核,同时位错可以起到“管道”扩散效应,提高合金元素扩散速率,进而改变合金的析出行为<sup>[6-7]</sup>。图4为 155 °C/3 h 峰值时效状态合金的 TEM 组织。由图4可知,余量中存在较高的位错密度,同时大量细小的针状  $\beta''$  ( $Mg_2Si$ ) 相逐渐析出,其长度方向尺寸 6~20 nm,宽度方向尺寸 0.5~1.5 nm。高分辨图片(图4(c))显示,  $Mg_2Si$  相与铝合金基体呈现共格关系,在拉伸过程中位错运动需切割  $Mg_2Si$  相,导致阻力增加,进而使强度提升。



(a) 位错和亚结构; (b), (c) 析出相; (d) 选区电子衍射图

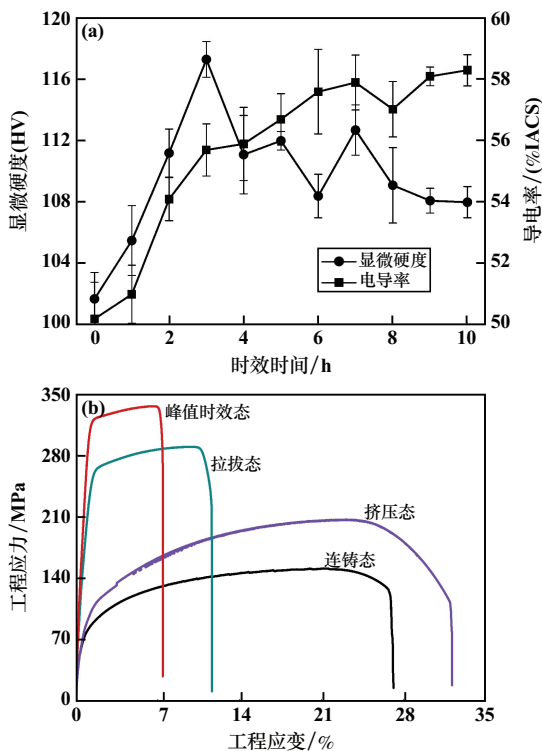
图4 峰值时效状态 Al-0.65Mg-0.58Si-0.17Fe 合金 TEM 组织

### 2.4 性能测试

155 °C下,时效热处理时间对 Al-0.65Mg-0.58Si-0.17Fe 合金拉拔线材显微硬度和电导率的影响见图5(a)。人工时效过程中纳米析出相随着时间增加逐渐生成,这些析出相通过钉扎位错运动提高合金强度,出现时效硬化现象,即随着时效时间延长,硬度逐渐升高,时效时间 3 h 时达到峰值硬度,随后随着时效时间增加,硬度逐渐下降。在时效初期, Mg 和 Si 原子首先在空位处聚集形成原子团簇,随着溶质原子不断脱溶,逐渐形成亚稳  $\beta''$  相。弥散分布的  $\beta''$  相尺寸小且具有较高的弹性应变能,塑性变形过程会阻碍位错滑移,进而增

加合金的强度或硬度<sup>[6-8]</sup>。长时间时效后  $\beta''$ 相逐渐长大或粗化,对位错运动阻力减小,使硬度降低。合金导线的电导率随着时效时间增加先快速升高而后缓慢上升。在铝合金中,原子的自身振动和空位、位错、晶界等缺陷以及外来夹杂原子是引起电导率改变的主要因素,时效过程固溶体中 Mg、Si 原子逐步脱溶形成  $Mg_2Si$  析出相,基体中空位和固溶度同步降低,位错减少,使电子运动阻力降低,因此合金的电导率逐渐升高。

不同状态下 Al-0.65Mg-0.58Si-0.17Fe 合金的拉伸工程应力-应变曲线如图 5(b)所示。水平连铸杆坯的抗拉强度和延伸率分别为 148 MPa 和 27.3%,连续挤压杆材抗拉强度和延伸率分别提高至 206 MPa 和 32.2%,挤压杆材经过进一步拉拔后,其抗拉强度(289 MPa)明显提高但伸长率(11.5%)显著降低。拉拔线材经过 155 °C/3 h 峰值时效后,得到了较好的综合性能,其抗拉强度和延伸率分别达到 335 MPa 和 6.9%,电导率 55.7%IACS。本文合金与已报道相近成分铝合金导线力学性能和电导率对比见表 2。对比表 2 数据发现,本文采用水平连铸-连续挤压-拉拔工艺制备的合金线材具有更优良的综合性能,且省去了挤压前均匀化工序和拉拔前固溶热处理工序,具有流程短、成材率高等优点。



(a) 拉拔态合金 155 °C 时效热处理时间对硬度和电导率的影响;

(b) 不同状态 Al-0.65Mg-0.58Si-0.17Fe 合金的拉伸曲线

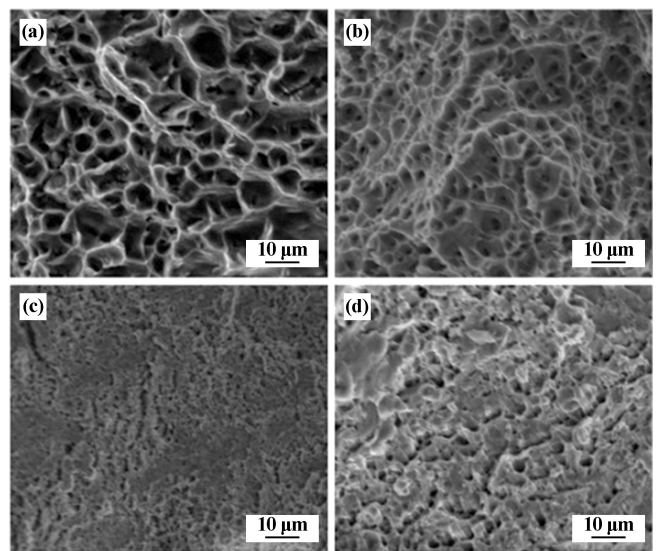
图 5 不同状态下 Al-0.65Mg-0.58Si-0.17Fe 合金的性能

表 2 本文合金与已报道相近成分铝合金导线力学性能和电导率对比

制备工艺	人工时效	抗拉强度/MPa	延伸率/%	20 °C 时的电导率/(%IACS)	参考文献
卧式挤压	175 °C/6 h	311	4.7	56.9	[9]
连铸连轧	175 °C/3 h	305	8.6	55.9	[10]
	175 °C/3 h	345	9.9	54.2	
连续铸挤	160 °C/5 h	305	6.0	55.0	[11]
	—	315	6.3	55.0	
	150 °C/8 h	359	4.5	54.8	[12]
水平连铸-连续挤压-拉拔	155 °C/3 h	335	6.9	55.7	本文

### 2.5 拉伸断口分析

图 6 为不同状态 Al-0.65Mg-0.58Si-0.17Fe 合金拉伸试样的 SEM 断口形貌。水平连铸杆坯拉伸试样断口微观形貌特征为各种尺寸不一的韧窝,尺寸大的韧窝里观察到一些内部裂纹(图 6(a));连续挤压后杆材拉伸断口主要包括等轴尺寸的韧窝(图 6(b));在拉拔线材和峰值时效的线材拉伸断口中观察到混合的韧窝和(准)解理台阶(图 6(c)和(d))。拉伸过程中空洞聚集(包括细小空洞形核、长大、集聚以及断裂)是产生韧窝的重要原因,而析出相的特征会影响韧窝尺寸<sup>[13-16]</sup>。铸造样品中由于细长的  $Al_3FeSi$  相在拉伸时引起周围变形及受力大小不一样进而形成尺寸比较大的椭圆形韧窝,此外,晶粒之间因粗大  $Al_3FeSi$  相的存在容易在拉伸过程优先失效,进而形成内部裂纹<sup>[17]</sup>。连续挤压杆材组织均匀,第二相颗粒更细小、分布更均匀,其断口中韧窝细小且均匀。拉拔样品中



(a) 连铸态; (b) 挤压态; (c) 拉拔态; (d) 峰值时效态

图 6 不同状态 Al-0.65Mg-0.58Si-0.17Fe 合金拉伸试样的 SEM 断口形貌

因为残留了很多冷变形产生的位错及位错缠结,在后续拉伸过程中解理裂纹容易形成,并进一步生长成为(准)解理台阶。在时效线材中,位错处  $Mg_2Si$  析出相在第二相位置阻碍位错运动产生应力集中,进而导致裂纹逐渐在铝基体中萌生,随着变形量增大进一步传播,使其断口特征呈现更显著的(准)解理台阶(图6(d))。

### 3 结 论

1) 采用“水平连铸-连续挤压-拉拔”工艺制备了 Al-0.65Mg-0.58Si-0.17Fe 合金线材,155 °C/3 h 时效热处理后合金的拉伸强度和延伸率分别为 335 MPa 和 6.9%,电导率 55.7%IACS。

2) 水平连铸 Al-0.65Mg-0.58Si-0.17Fe 合金杆坯的组织包括柱状晶以及细小等轴晶;连续挤压可以细化晶粒并使晶粒尺寸更均匀;水平连铸-连续挤压工艺提高过饱和固溶度的同时细化了晶粒组织;拉拔过程引入的高密度位错改变了时效热处理过程中  $Mg_2Si$  相的析出行为,改善了合金的力学性能和电导率。

3) 水平连铸 Al-0.65Mg-0.58Si-0.17Fe 合金杆坯拉伸断口观察到各种尺寸的韧窝,在尺寸大的韧窝里观察到一些内部裂纹;连续挤压后合金杆材断口形貌主要由细小韧窝组成,且其分布比较均匀;经过拉拔变形后的合金拉伸断口观察到(准)解理台阶;经过峰值时效处理后的合金拉伸断口呈现清晰的(准)解理台阶。

#### 参考文献:

- [1] 周天国,温景林,陈彦博,等. 挤压比对 6201 铝合金半固态连续挤压成形组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2004,14(10): 1683-1688.
- [2] 管仁国,赵占勇,曹富荣,等. 连续流变挤压与热处理对 6201 合金组织性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2011,32(9): 53-57.
- [3] 孟祥超,孙有平,何江美,等. ZL114A 和 6061 异种铝合金激光焊接工艺及接头显微组织和力学性能研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(3): 160-164.
- [4] HU J, ZHANG W, FU D, et al. Improvement of the mechanical properties of Al-Mg-Si alloys with nano-scale precipitates after repetitive

continuous extrusion forming and T8 tempering[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019,8(6): 5950-5960.

- [5] MARTINOVA Z, DAMGALIEV D, HIRSH M. The effect of room temperature pre-ageing on tensile and electrical properties of thermomechanically treated Al-Mg-Si alloy[J]. Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy, 2002,38(1/2): 61-73.
- [6] 吴楠,孙巍,杨旭,等. 合金元素对电池包支架用 Al-Mg-Si 合金性能的影响[J]. 有色金属加工, 2020,49(5): 33-36.
- [7] 豆朋,张瀚,邱灿树,等. 在高压扭转大塑性变形及时效过程中 6201 铝合金组织和硬度的变化规律[J]. 机械工程材料, 2023,47(11): 1-5.
- [8] 赵燕,张宇博,李廷举,等. 稀土元素 La 对 Al-0.5Mg-0.24Si 合金组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021,41(10): 1219-1223.
- [9] KARABAY S. Modification of AA-6201 alloy for manufacturing of high conductivity and extra high conductivity wires with property of high tensile stress after artificial aging heat treatment for all-aluminium alloy conductors[J]. Materials & design, 2006,27(10): 821-832.
- [10] MULAZIMOLU M H, ZALUSKA A, PARAY F, et al. The effect of strontium on the  $Mg_2Si$  precipitation process in 6201 aluminum alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1997,28(6): 1289-1295.
- [11] ZHOU T, JIANG Z, WEN J, et al. On-line aging to improve the tensile strength and conductivity of cold-drawing AA6201 wires[J]. Materials Science Forum, 2007,561: 349-352.
- [12] ZHOU T, JIANG Z, WEN J, et al. Semi-solid continuous casting-extrusion of AA6201 feed rods[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008,485(1): 108-114.
- [13] 王森,李天景,曾一达,等. 6061-T4 铝合金激光焊接接头组织与力学性能研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(1): 141-144.
- [14] 卢兵,王海尧,王胤,等. 电磁铸轧 Al-Mg-Si 合金短流程制备工艺对其组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2023,33(4): 1024-1037.
- [15] 刘惠,付祎磊,陈宗强,等. Fe 含量对 Al-Mg-Si 合金微观组织和力学性能的影响[J]. 航空材料学报, 2023,43(3): 32-41.
- [16] 郑毅,边丽萍,冀宏亮,等. Ca 和 Mn 添加对铸态及热处理态 Al-Mg-Si 合金的微观组织、力学性能和导电性能影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2022,51(11): 4010-4020.
- [17] 林立健,张勇,郑许,等. 分级淬火对 7N65 铝合金微观组织和断裂韧性的影响[J]. 矿冶工程, 2023,43(5): 149-153.

引用本文: 张瀚,成祥茂,陈诚,等. 水平连铸-连续挤压-拉拔 Al-0.65Mg-0.58Si-0.17Fe 合金微观组织与性能研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(5): 174-178.