

T6 处理对热轧态 $\text{Al-}x\text{Cu-0.5Mg-0.7Si}$ 合金组织性能影响

戴翌龙^{1,2} 周 林¹ 郑 革¹ 刘 鑫² 曹少华¹

(1.永固集团股份有限公司;2. 湘潭大学材料科学与工程学院)

摘 要 以 $\text{Al-}x\text{Cu-0.5Mg-0.7Si}$ 铝合金($x=2.5, 1.5, 0.5$)为研究对象,并对每种成分的铝合金分别进行两种处理:只进行热轧制和在热轧制后进行 T6 热处理,旨在探究 Cu 含量及 T6 处理对轧制态 $\text{Al-}x\text{Cu-0.5Mg-0.7Si}$ 铝合金组织和性能的影响。结果表明,添加 Cu 元素,会促使铝合金析出 Al_2Cu 相,提高铝合金的抗拉强度和硬度,但耐腐蚀性会随 Cu 含量的增加而降低。经 T6 处理后,铝合金轧制后的流线组织消失,形成新的无畸变的细等轴晶,同时会析出大量的弥散分布的 Al_2Cu 相,使得铝合金的抗拉强度、塑性、硬度和耐腐蚀性都得到明显提高。

关键词 Al-Cu-Mg-Si 铝合金;热轧;T6 热处理;力学性能

中图分类号 TG146.21;TG166.3 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.03.025

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of T6 Treatment on Microstructure and Properties of Hot-rolled $\text{Al-}x\text{Cu-0.5Mg-0.7Si}$ Alloy

Dai Yilong^{1,2}, Zhou Lin¹, Zheng Ge¹, Liu Xin², Cao Shaohua¹

(1. Yonggu Group Co., Ltd.; 2. School of Materials Science and Engineering, Xiangtan University)

Abstract: Two kinds of treatment (hot rolling and T6 heat treatment after hot rolling) were carried out on $\text{Al-}x\text{Cu-0.5Mg-0.7Si}$ aluminum alloys($x=2.5, 1.5, 0.5$) alloy with different compositions. Effects of Cu content and T6 heat treatment on microstructure and properties of as-rolled $\text{Al-}x\text{Cu-0.5Mg-0.7Si}$ aluminum alloy were investigated. The results indicate that Cu addition promotes the precipitate of Al_2Cu phase in the alloy, thus enhancing tensile strength and hardness, while corrosion resistance is decreased with the increase of Cu content. After T6 heat treatment, the rolled streamline microstructure in the aluminum alloy disappears, forming a new fine equiaxed crystals without distortion, and a large amount of dispersed Al_2Cu phase are precipitated, significantly improving the tensile strength, plasticity, hardness and corrosion resistance of aluminum alloy.

Key Words: Al-Cu-Mg-Si Aluminum Alloy, Hot Rolled, T6 Heat Treatment, Mechanical Properties

按照电力金具的使用功能,产品通常分为悬垂线夹、耐张线夹、连接金具、接续金具、保护金具和拉线金具等几类,用于各种电压等级的输变电工程^[1]。电力金具整体的品质直接影响电网的正常安全运行^[2]。电力金具种类多样,形状各异,且应用环境较差,需具备优良的综合力学性能^[3-4]。电力生产、电力传输等方面在往低碳方向发展,需要在电力传输过程中减少能量损耗,还要减少电力金具生产和使用中环境的污染。目前应用最广泛的电力金具材料为铸铁和铸造铝合金;铸铁金具质量较大,热镀锌环境污染严重,同时产生的闭合磁回路会造成电能损耗^[5-7]。随着铝合金电力金具凸显其在线路中应用的优势后,其相关

研究也得到重视^[8],其中对纳米改性铝合金材料的研究^[9]得到研究者关注。相对于铁制金具,铝制金具具有很多优点,如密度小、能减轻线路负载、耐腐蚀、在线路中不会产生涡流损耗等。然而铝制金具强度较低,难以满足电力行业要求。现有普通铝合金,如常用的 ZL102、ZL101A 等,其抗拉强度仅为 140 MPa 左右,显著低于国家电网公司对于可锻铸铁金具强度的要求^[10]。因此,研究高强度铝合金金具是积极意义^[11-15]。综上,本研究设计了 3 种不同 Cu 含量的 Al-Cu-Mg-Si 合金,并对其先后进行热轧制和 T6 热处理,以探究 Cu 含量和 T6 处理对铝合金组织性能的影响,旨在为其应用提供参考。

收稿日期:2022-06-27;修改稿收到日期:2022-07-30

基金项目:湖南省科技创新计划资助项目(2020RC2080)

第一作者简介:戴翌龙,男,1989 年出生,讲师,浙江温州(325600),E-mail: daiyilong@xtu.edu.cn

引用格式:戴翌龙,周林,郑革,等. T6 处理对热轧态 $\text{Al-}x\text{Cu-0.5Mg-0.7Si}$ 合金组织性能影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(3):415-419.

DAI Y L, ZHOU L, ZHENG G, et al. Effects of T6 treatment on microstructure and properties of hot-rolled $\text{Al-}x\text{Cu-0.5Mg-0.7Si}$ alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(3):415-419.

1 试验方法

1.1 试验材料

设计并制备了 3 种成分的 Al- x Cu-0.5Mg-0.7Si ($x=0.5$ 、1.5 和 2.5) 铝合金,并对每种成分铝合金进行两种处理:其一,只进行热轧制;其二,在热轧制后进行 T6 热处理。

试验采用工业纯铝、纯铜、纯镁、单质硅为原料,设计并熔炼制备了 3 种不同成分的铝合金,见表 1。按配料比称量好熔炼原料;再进行干燥处理,将称量好的熔炼材料、模具、操作工具放入电阻炉中加热 30 min;将电阻炉温度设置为 800 ℃,待温度到达 800 ℃后,加入铝锭;40 min 后铝锭全部熔化,然后加入用铝箔包裹的纯铜、纯镁、单质硅,静置 15 min 后进行搅拌,使合金熔化更加均匀。熔化完全后关闭加热装置,用铝箔包裹 C₂Cl₆ 除气精炼。最后将金属液表面较为明显的杂质去除,待温度降至 600 ℃后,再将金属液缓慢浇入模具中,在室温下冷却成形,获得铝合金铸锭。

表 1 铝合金试样的化学成分

试样	w _B			
	Cu	Mg	Si	Al
1	2.5	0.5	0.7	余量
2	1.5	0.5	0.7	余量
3	0.5	0.5	0.7	余量

随后在二辊轧机进行 7 道次等温轧制,每道次轧制需控制试验温度在 400 ℃左右,轧制工艺如下:第 1 轧制道次压下率为 25%,第 2~6 轧制道次压下率均为 10%,最后第 7 轧制道次压下率为 15%。随后进行 T6 热处理,在 530 ℃下固溶 2 h,然后进行室温水冷淬火,再进行时效处理,时效处理工艺为 160 ℃×8 h。

1.2 试验方法

1.2.1 微观组织

用线切割机加工成 5 mm×5 mm 的正方形试样,然后用砂纸粗磨使试样表面平整,再对试样进行冷塑镶样,镶样后先经 400、600 和 800 号的砂纸粗磨,使冷镶试样的背面和试样表面平整,再使用水磨机,经 1000、2000 和 5000 号的砂纸精磨后,用颗粒度为 2.5 μm 的抛光剂进行抛光至镜面,然后在装有无水乙醇的烧杯中进行超声波清洗,清理试样表面的杂质。采用 Rigaku Ultima IV 型 X 射线衍射仪对试样进行物相分析,测试速度为 2°/min,测试角度 2θ 范围为 10°~90°,测试温度为室温(25 ℃±2 ℃)。用扫描电镜(SEM)和能谱仪(EDS)对试样表面微观组织进行观察并进行能谱分析。对金相试样在进行抛光后还需采用 Keller 试剂

(1% HF+1.5% HCl+2.5% HNO₃+95% H₂O)(各成分含量均为体积分数)进行腐蚀^[16],然后采用莱卡 DM4000M 智能显微镜观察试样表面的显微组织。

1.2.2 力学性能测试

用线切割机加工拉伸试样,见图 1,然后对试样表面依次用 400、600、800、1000 和 2000 号砂纸打磨,使表面平整,然后用酒精清洗并烘干。采用 Instron 3369 型电子万能试验机进行拉伸测试,拉伸速率为 1 mm/min,测试温度为室温(25 ℃±2 ℃)。

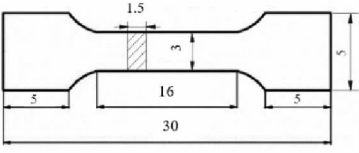


图 1 拉伸试样尺寸
Fig.1 Dimension of tensile specimen

硬度试样用线切割机加工成尺寸为 5 mm×5 mm,然后用砂纸粗磨至表面平整,再进行冷塑镶样,然后进行砂纸粗磨、水磨机精磨、抛光、超声波清洗和烘干。随后采用 HB-3000C 型电子维氏硬度计测试硬度,载荷为 20 N,保载时间为 10 s,在每个试样的同一平行线上选取 5 个测试点,去掉极值后取平均值。

1.2.3 电化学腐蚀测试

采用 ParStat 2273 型三电极体系电化学工作站测量循环阳极极化曲线和电化学阻抗谱。在三电极体系中腐蚀液采用质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液^[17],铝合金试样为工作电极,铂电极为辅助电极,饱和甘汞电极为参比电极。测试试样面积 1 cm²,测试温度为室温(25 ℃±2 ℃),腐蚀液体积为 100 mL,扫描速率为 3 mV/s。测试前,需要将试样表面清洗干净,并在腐蚀液中浸泡 30 min,用以稳定自腐蚀电位;测试时 3 个电极需在腐蚀液中处于同一水平面。

2 试验结果分析

2.1 微观组织

2.1.1 物相分析

图 2 为轧制态、T4 态(530 ℃固溶)、T6 态 Al- x Cu-0.5Mg-0.7Si 铝合金($x=2.5$ 、1.5、0.5)的 X 射线衍射图谱。可以看出,9 组 Al- x Cu-0.5Mg-0.7Si 铝合金的 XRD 图中都存在 Al 相的衍射峰,其中只有 T6 热处理态时 Cu 含量为 1.5% 和 2.5% 的铝合金有 Al₂Cu 相的衍射峰,说明经过 T6 热处理后这两组成分的铝合金能析出大量的 Al₂Cu 第二相。此外,从 530 ℃×2 h 固溶后铝合金的衍射峰看,只存在 Al 相的衍射峰,说明在

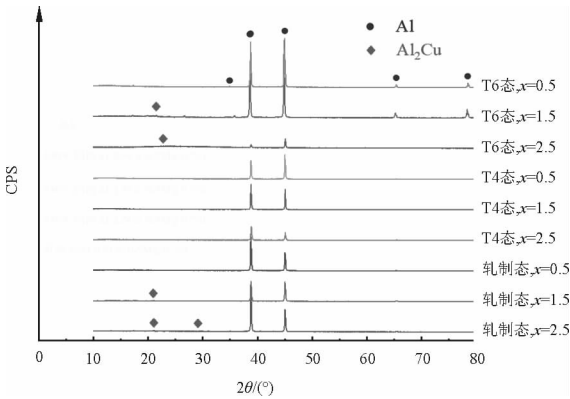


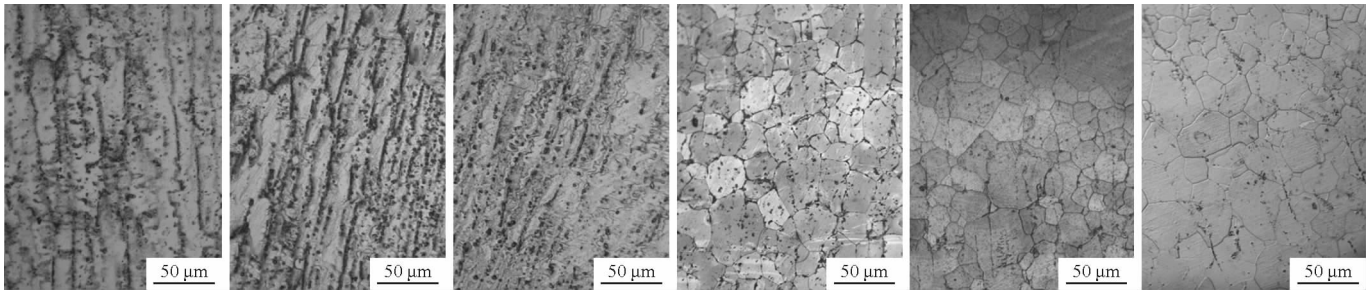
图2 轧制态、T4 态和 T6 态 Al-xCu-0.5Mg-0.7Si 合金的 XRD 图谱

Fig.2 XRD patterns of as-rolled, T4 heat-treated and T6 heat-treated Al-xCu-0.5Mg-0.7Si alloy specimens

此条件下进行的固溶热处理,合金中的第二相能充分固溶,更有利于随后的时效处理;另一方面,无论是轧制态还是 T6 态 Al-0.5Cu-0.5Mg-0.7Si 铝合金都不出现 Al₂Cu 相的衍射峰是因为其 Cu 含量非常少,析出的 Al₂Cu 相很少,导致 XRD 检测不出。

2.1.2 金相组织观察

图 3 为轧制态、T6 态 Al-xCu-0.5Mg-0.7Si 铝合金的金相组织。可以看出,轧制态铝合金不存在树枝晶,其组织主要是纤维组织,具有明显的方向性,沿组织边界有黑色相析出。热轧后存在大量纤维组织,表明热轧过程中对铝合金的再结晶有明显的抑制作用;T6 态铝合金组织主要为细等轴晶,表明铝合金在 T6 热处理后发生了再结晶,合金的基体与析出相更加凸显,合金在



(a) 轧制态, $x=2.5$ (b) 轧制态, $x=1.5$ (c) 轧制态, $x=0.5$ (d) T6 态, $x=2.5$ (e) T6 态, $x=1.5$ (f) T6 态, $x=0.5$

图 3 轧制态和 T6 热处理 Al-xCu-0.5Mg-0.7Si 合金的金相组织

Fig.3 Microstructure of as-rolled and T6 heat-treated Al-xCu-0.5Mg-0.7Si alloys

时效处理后,其晶粒表面或晶界处有黑色相析出,图中灰白色为基体,黑色为析出相。此外,T6 态铝合金析出的第二相(Al₂Cu 相)分布较为均匀弥散,并且合金中 Cu 含量越多,析出的 Al₂Cu 相也越多。

2.1.3 SEM 观察和能谱分析

图 4 为 T6 态 Al-1.5Cu-0.5Mg-0.7Si 铝合金的组织放大图,能谱分析结果见图 5。结合 XRD 的结果可知,图谱 1 为 Al₂Cu 相,图谱 2 为基体 Al 相。

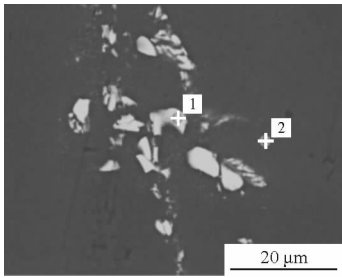
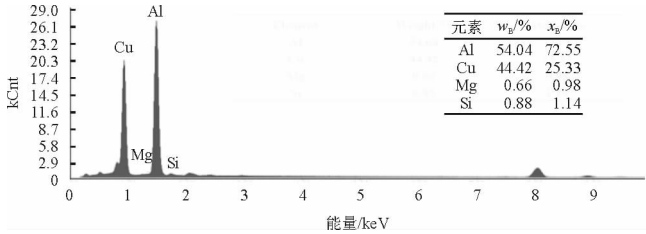


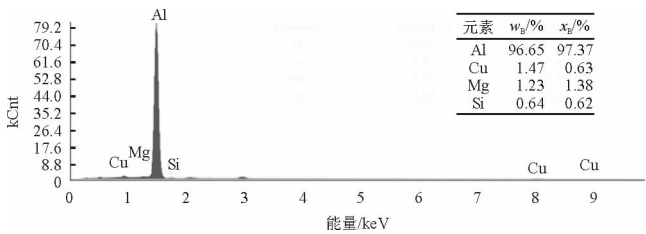
图 4 T6 态 Al-1.5Cu-0.5Mg-0.7Si 铝合金 SEM 图

Fig.4 SEM images of T6 heat-treated Al-1.5Cu-0.5Mg-0.7Si aluminum alloy

图 6 为轧制态、T6 态 Al-xCu-0.5Mg-0.7Si 铝合金的 SEM 组织。对照 EDS 分析结果,可以看出深色的基体相是 Al 相,少量的白色相是 Al₂Cu 相。



(a) 谱图 1



(b) 谱图 2

图 5 图 4 中相应位置的 EDS 分析结果

Fig.5 EDS analysis results of corresponding positions in Fig.4

对比分析可知,经过热轧制后的铝合金,不存在比较粗大的网状 Al₂Cu 相,可清晰看到碎裂的 Al₂Cu 相,并且 Al₂Cu 相的分布主要是沿着轧制的方向分布。此外,Cu 含量越低,其 Al₂Cu 相破碎效果越好。另一方面,经 T6 热处理后的铝合金,存在明显的 Al₂Cu 相析出,其 Al₂Cu 相分布较为弥散,且 Cu 含量越高,Al₂Cu

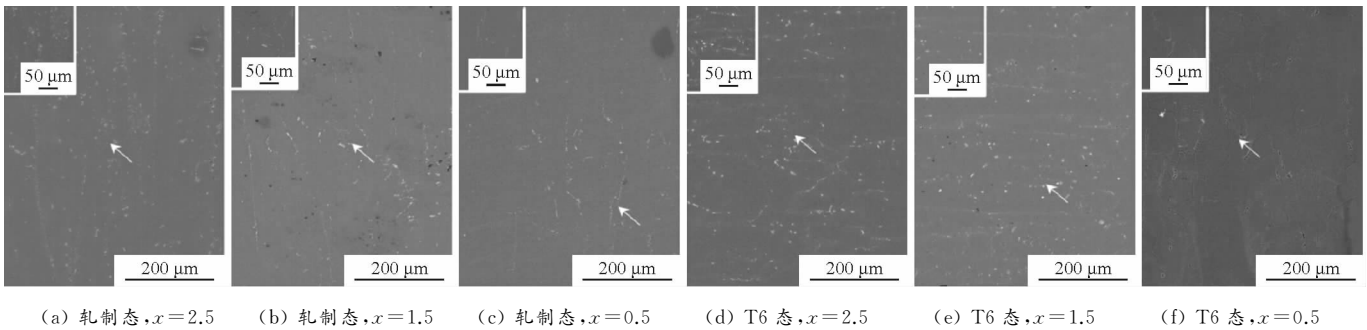


图 6 轧制和 T6 态 Al-xCu-0.5Mg-0.7Si 合金的 SEM 形貌

Fig.6 SEM images of as-rolled and T6 heat-treated Al-xCu-0.5Mg-0.7Si alloys

相析出越多。T6 态 Al-0.5Cu-0.5Mg-0.7Si 铝合金试样进行了腐蚀,因为 Cu 含量很少,可以看出只有少量的 Al_2Cu 相在晶界处析出。对比分析轧制态和 T6 态铝合金的扫描电镜图可知,同一成分的铝合金经 T6 热处理后, Al_2Cu 相的析出明显增多,且分布更加弥散均匀。

2.2 抗拉强度和维氏硬度

图 7 和图 8 分别为轧制态和 T6 态 Al-xCu-0.5Mg-0.7Si 合金的力学性能和维氏硬度。从图 7 可以看出,合金经 T6 处理后的伸长率不低于 26%,而轧制态铝合金的伸长率最高仅 12.9%,说明经 T6 处理后,Al-xCu-0.5Mg-0.7Si 合金的塑性明显提高。主要原因是合金经 T6 处理后,原有的轧制态组织消失,形成新的无畸变的

细等轴晶,在发生形变时不易造成应力集中,从而提高合金塑性。

与轧制态 Al-xCu-0.5Mg-0.7Si 合金相比,铝合金经 T6 处理后,其抗拉强度分别从 280、275 和 248 MPa 增加到 360、326 和 300 MPa(见图 7);硬度(HV)分别从 332.15、325.16 和 314.18 增加到 522.28、444.23 和 416.80(见图 8)。可以看出,经过 T6 处理的铝合金的抗拉强度和维氏硬度得到明显提高,合金经 T6 热处理后除造成细晶强化外,还会析出大量弥散分布的 Al_2Cu 相,造成合金强化。因此,T6 热处理能显著增加 Al-xCu-0.5Mg-0.7Si 合金的抗拉强度和硬度。

对 T6 处理 Al-xCu-0.5Mg-0.7Si 铝合金来说,随 Cu 含量的增加,合金的抗拉强度从 300 MPa 提高到 360 MPa,硬度(HV)从 416.80 提高到 522.28;而对轧制态 Al-xCu-0.5Mg-0.7Si 铝合金,Cu 含量升高时,其抗拉强度和维氏硬度只有少量的提高。对 T6 处理的铝合金,随 Cu 含量增高,时效后析出 Al_2Cu 相有明显增多,但轧制态铝合金,析出的 Al_2Cu 相数量相差不大。因此,Cu 含量的增加能提高铝合金的抗拉强度和硬度,并且能显著提高 T6 态铝合金的抗拉强度和硬度。

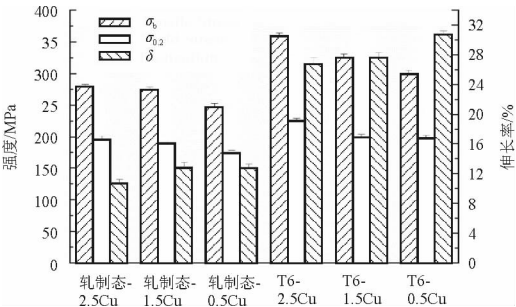


图 7 轧制态和 T6 热处理 Al-xCu-0.5Mg-0.7Si 合金的力学性能

Fig.7 Mechanical properties of as-rolled and T6 heat-treated Al-xCu-0.5Mg-0.7Si alloys

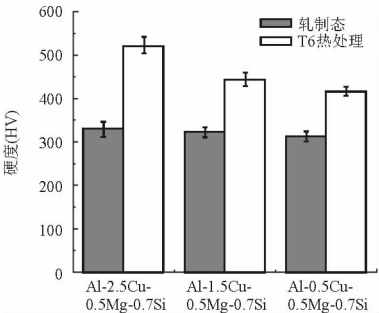


图 8 轧制态和 T6 热处理 Al-xCu-0.5Mg-0.7Si 合金硬度

Fig.8 Vickers hardness of as-rolled and T6 heat-treated Al-xCu-0.5Mg-0.7Si alloys

2.3 电化学腐蚀

图 9 为轧制态、T6 态 Al-xCu-0.5Mg-0.7Si 铝合金在 3.5% 的 NaCl 溶液中的动电位极化曲线图,相应的电化学参数见表 2。自腐蚀电位(E)仅反应材料在不同环境中腐蚀的倾向性,自腐蚀电位越正,腐蚀的倾向性越低,而腐蚀电流密度(J)与腐蚀速率成正比,通过腐蚀速率的快慢则可以更进一步表征材料的腐蚀动力学^[18-19]。从图 9 和表 2 可以看出,对同一成分的铝合金,T6 态比热轧态的电流密度要小,表明经 T6 热处理后的铝合金更耐腐蚀;经 T6 热处理后,在合金内部由细小晶粒取代了纤维状晶粒,合金组织变得更加均匀,使得合金内部不易形成电位差较大的腐蚀微电池,从而提高了合金的耐腐蚀能力。此外,对同一处理方式的铝

合金,随 Cu 含量增加,其腐蚀电流密度增加,合金变得更不耐腐蚀。在铝合金中,Al₂Cu 相对 Al 基体是阴极(在腐蚀原电池中为正极),Al₂Cu 相的电位高于 Al 基体,导致铝合金在沉淀相与合金交界处发生腐蚀^[20];Cu 含量越高,在晶界处或沿轧制方向析出的 Al₂Cu 相就越多,随着 Al₂Cu 相的堆积,相间的电位差会扩大,从而降低了合金的电化学稳定性,破坏了 α-Al 基体表面保护膜的连续性,抗腐蚀性能变差^[17],因此 Cu 含量越高,合金耐腐蚀性变差。

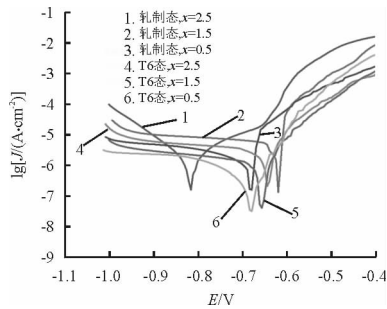


图 9 轧制态和 T6 处理 Al-xCu-0.5Mg-0.7Si 合金的极化曲线

Fig.9 Polarization curves of as-rolled and T6 heat-treated Al-xCu-0.5Mg-0.7Si alloys

综上,在研究的 Al-xCu-0.5Mg-0.7Si 合金中,T6 处理能提升合金耐腐蚀性,Cu 含量增加会降低合金的耐腐蚀性。

表 2 轧制态和 T6 态 Al-xCu-0.5Mg-0.7Si 合金的腐蚀电位和腐蚀电流密度

Tab.2 Corrosion potential and current density of as-rolled and T6 heat-treated Al-xCu-0.5Mg-0.7Si alloys			
合金	状态	E_{corr}/V	$J_{corr}/(\times 10^{-7} A \cdot cm^{-2})$
Al-2.5Cu-0.5Mg-0.7Si	轧制态	-0.82	20.2
Al-1.5Cu-0.5Mg-0.7Si	轧制态	-0.62	8.2
Al-0.5Cu-0.5Mg-0.7Si	轧制态	-0.68	7.80
Al-2.5Cu-0.5Mg-0.7Si	T6 态	-0.64	12.4
Al-1.5Cu-0.5Mg-0.7Si	T6 态	-0.65	4.2
Al-0.5Cu-0.5Mg-0.7Si	T6 态	-0.68	1.86

3 结 论

(1)轧制态 Al-xCu-0.5Mg-0.7Si 铝合金(x=2.5、1.5、0.5)的组织具有明显方向性,存在大量的纤维状晶粒,沿轧制方向有 Al₂Cu 相析出;T6 态 Al-xCu-0.5Mg-0.7Si 铝合金的组织为细等轴晶,晶粒细小均匀,析出的 Al₂Cu 相均匀弥散分布。

(2)增加 Cu 含量和进行 T6 热处理均会提高 Al-xCu-0.5Mg-0.7Si 铝合金的抗拉强度和硬度。此外,经 T6 热处理还能显著提高合金的塑性。T6 态 Al-2.5Cu-0.5Mg-0.7Si 铝合金的抗拉强度、硬度(HV)达到最大值,分别为 360 MPa、552.28,同时,伸长率为 26.8%,具

有良好的塑性。
(3)对于 Al-xCu-0.5Mg-0.7Si 合金,T6 热处理能提升合金的耐腐蚀性,Cu 含量增加会降低合金耐腐蚀性。

参 考 文 献

[1] 邹国林,从怀贤,吕泉根.我国架空输电线路金具技术发展及应用[J].江苏电机工程,2012,31(6):82-84.

[2] 王晓辉,李新梅,逯平平.强风环境下电力金具的磨损试验与预测[J].热加工工艺,2021,50(16):25-28,32.

[3] 王晓辉,李新梅,逯平平.特高压输电线路电力金具磨损研究现状[J].热加工工艺,2020,49(16):11-14.

[4] 刘小会,周晓慧,叶中飞,等.风荷载作用下输电线路数值模拟及金具失效分析[J].科学技术与工程,2020,20(20):8210-8217.

[5] 季伟,张飞勇,孟繁东,等.高强度铝合金材料电力金具的应用研究[J].浙江电力,2020,39(6):111-114.

[6] 李德,杨艳,张丽娟,等.用增加珠光体方法提高可锻铸铁电力金具的服役寿命[J].辽宁工学院学报,1997(1):28-30.

[7] 陈吉豫.可锻铸铁电力金具热裂和冷裂及防止[J].四川电力技术,1993(6):44-47.

[8] 黄应敏,邹科敏,许翠珊,等.高导电性能铝合金在新型电力金具制造中的应用研究[J].合成材料老化与应用,2021,50(4):53-57.

[9] 蔡炜,王利民,何卫,等.一种纳米碳合金材料及基于该材料制备的电力金具.中国专利:CN107881374A,2018-04-06[P].

[10] 党乐,郭金刚,崔亚茹,等.架空输电线路金具材料研究现状及发展[J].电气技术,2022,23(4):1-6.

[11] 万建成,董玉明,刘龙,等.3类节能导线性能对比与适用范围[J].中国电力,2016,49(1):102-108,165.

[12] 田承.试论输电线路金具的节能降耗[J].民营科技,2017(9):25-26.

[13] SIDDQUI R A, ABDULLAH H A, AL-BELUSHI K R. Influence of aging parameters on the mechanical properties of 6063 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 102 (1-3): 234-240.

[14] 陈忠伟,介万奇. Mg 含量对 Al-Si-Mg 铸造合金微观组织与力学性能的影响[J].材料科学与工程学报,2004(5):647-652.

[15] 何立子,陈彦博,崔建忠,等. Cu 含量对一种新型 Al-Mg-Si 合金晶间腐蚀的影响[J].腐蚀科学与防护技术,2004(3):129-133.

[16] MOY C K S, WEISS M, XIA J, et al. Influence of heat treatment on the microstructure, texture and formability of 2024 aluminum alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2012, A552: 48-60.

[17] 崔国明,李兴霞,范鹏,等. Cu 和 Mg 对 Al-7Si 铸造合金耐腐蚀性能的影响[J].铸造技术,2013,34(3):266-268.

[18] 刘桐源.热处理对轧制态 7150 铝合金的组织及腐蚀各向异性的影响[D].沈阳:沈阳工业大学,2020.

[19] HOU S, ZHANG D, PAN Y, et al. Dependence of microstructure, mechanical properties, and inter-granular corrosion behavior of Al-5.1Mg-3.0Zn-0.15Cu alloys with high temperature pre-treatment[J]. Materials Characterization, 2020, 168: 110 512.

[20] GRILLI R, BAKER M A, CASTLE J E, et al. Localized corrosion of a 2219 aluminum alloy exposed to a 3.5% NaCl solution[J]. Corrosion Science, 2010, 52(9): 2 855-2 866.

(编辑:栗万仲)