

Mn 添加对 Al-Zr 合金微观组织和性能的影响

陈保安^{1,2} 韩 钰^{1,2} 王瑞红³ 李梦琳^{1,2} 杨长龙⁴ 祝志祥^{1,2} 隋合斌⁴ 迟 铖^{1,2} 马洪峰⁴
(1.国网智能电网研究院有限公司先进输电技术国家重点实验室;2.国网智能电网研究院有限公司电工新材料研究所;3.西安理工大学材料科学与工程学院;4.国网辽宁省电力有限公司营口供电公司)

摘 要 对比研究了 Mn 含量(0.16%, 0.88%)对 Al-0.18Zr 合金铸态、轧制态和时效态微观组织、力学性能和电学性能的影响。结果表明,Mn 抑制了铸态 Al-0.18Zr 合金中 Al₃Zr 纳米沉淀相的时效析出,其主要原因是 Mn 溶质原子与空位结合更紧密,通过捕获大部分过饱和空位,显著降低了 Al₃Zr 相的形核析出。Al-0.18Zr 合金在轧态下时效与铸态下时效相比,硬度略有降低,但是电导率明显提高。Mn 含量为 0.88%的 Al-0.18Zr 合金在轧态下时效,其硬度和电导率均远大于铸态下时效的性能;与轧态 Al-0.18Zr 合金相比,轧态 Al-0.18Zr-0.88Mn 合金时效后硬度提高了 70%以上,表现出了较好的强化效果,而且热稳定性提升,在 350 ℃下长时间热暴露后仍具有较高的硬度。

关键词 Al-Zr 合金;Mn 添加;微观组织;力学性能;电导率

中图分类号 TG146.21;TG113.25 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.08.019 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**

Effects of Mn Addition on Microstructure and Properties of Al-Zr Alloy

Chen Baoan^{1,2}, Han Yu^{1,2}, Wang Ruihong³, Li Menglin^{1,2}, Yang Changlong⁴, Zhu Zhixiang^{1,2},
Sui Heshi⁴, Chi Cheng^{1,2}, Ma Hongfeng⁴

(1. State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology, State Grid Smart Grid Research Institute Co.,Ltd.; 2. Department of Electrical Engineering New Materials, State Grid Smart Grid Research Institute Co.,Ltd.; 3. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology;
4. Yingkou Electric Power Supply Company, State Grid Liaoning Electric Power Supply Co.,Ltd.)

Abstract: Effects of Mn addition(0.16% and 0.88%) on microstructure, mechanical properties, electrical property of as-cast, as-rolled and as-aged Al-0.18Zr alloys were investigated comparatively. The results indicate that Al₃Zr nano-precipitation in as-cast Al-0.18Zr alloy is effectively inhibited by Mn, which is attributed to supersaturated vacancies captured by stronger bonding between Mn atoms and vacancies rather than promoting Al₃Zr nucleation. Compared with that of as-cast Al-0.18Zr alloy, the hardness of as-rolled alloy is slightly reduced, while conductivity is increased significantly upon aging treatment. However, both the hardness and conductivity of as-rolled Al-0.18Zr alloy with 0.88% Mn addition are far greater than those of as-cast ones upon aging treatment. In comparison with as-rolled Al-0.18Zr alloy, the hardness of as-rolled Al-0.18Zr-0.88Mn alloy is raised by above 70% after aging treatment, presenting desirable strengthening effect with enhancement of thermal stability, and high hardness retains after heat exposure at 350 ℃ for long time.

Key Words: Al-Zr Alloy, Mn Addition, Microstructure, Mechanical Properties, Conductivity

大容量、远距离输电技术和特高压技术的发展,对架空输电导线的容量等级、耐热性能、服役可靠性、耐蚀性能等提出了更高的要求,而开发先进的导电材料是实现电力系统安全高效运行的基础。目前常用的架空铝绞线的电导率和耐热性能难以满足远距离、大容量、低损耗的要求^[1]。现有的钢芯铝绞线采用硬铝导体材料,

耐热性差、同时载流量低,对于远距离输电、城网及农网改造工程而言,为了扩大输电系统,采用现有的钢芯铝绞线必须增大导线截面,需要更换全部杆塔、重新进行建造,一方面花费巨大,另一方面在居民密集区很难实现^[2]。因此,使用耐热型铝合金导线,以更换相同截面积增容导线的方式以加大传输容量成为了简便有效的

收稿日期:2022-10-08;修改稿收到日期:2022-12-13
基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(5500-202028257A-0-0-00)
第一作者简介:陈保安,男,1981 年出生,正高级工程师,北京(102209),E-mail:dzcba@163.com
引用格式:陈保安,韩钰,王瑞红,等. Mn 添加对 Al-Zr 合金微观组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(8): 1 111-1 116.
CHEN B A, HAN Y, WANG R H, et al. Effects of Mn Addition on Microstructure and Properties of Al-Zr Alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(8): 1 111-1 116.

技术之一^[3]。

作为一种代表性的耐热铝合金导线材料,添加微量 Zr 的 Al-Zr 合金受到了越来越多的关注。在导线用 Al-Zr 合金中,通过形成具有高热稳定性、 $L1_2$ 结构的 Al_3Zr 纳米沉淀相颗粒,不仅可以有效地钉扎晶界、抑制晶粒长大从而提高热稳定性,还可以阻止位错运动、产生沉淀相颗粒-位错交互作用来提高材料强度,而 Al_3Zr 纳米沉淀相颗粒与基体之间共格界面的优化调控还可以得到较高的电导率^[4-6]。但是 Zr 在 Al 中的固溶度非常低,因此能够时效析出的 Al_3Zr 纳米沉淀相含量比较低,强化效果有限;在 Zr 添加量较大的情况下,还容易形成含 Zr 的粗大结晶相颗粒,降低了材料的塑性,在导线制备过程中易发生断裂。如何提高 Al-Zr 合金的强度尤其是耐热性,成为了近期的研究热点^[7-10]。

通过改进制备工艺和加工工艺来优化微观组织是改善材料性能的主要方法。JIANG S Y 等^[11]研究表明,导线拉丝前进行时效处理可以获得更高的强度和电导率。其主要原因是拉丝大变形后,材料内部位错、空位等晶体缺陷密度显著增加,在随后的时效处理中将加速 Al_3Zr 纳米沉淀相的析出与长大,导致 Al_3Zr 颗粒粗大且分布不均匀。由此可见,在 Al-Zr 合金中 Al_3Zr 纳米沉淀相的析出受到晶体缺陷的影响,并影响最终性能。除了改进制备和加工工艺外,通过添加微量异质溶质原子以实现复合强化也是改善 Al-Zr 合金性能的可行方法。本研究将在 Al-Zr 合金中添加不同含量 Mn,研究 Mn 原子固溶强化与 Al_3Zr 沉淀强化耦合来提高强度,由此来提高耐热性。选用 Mn 的原因在于:①Mn 在 Al 合金中是一种固溶强化原子,可以作为沉淀强化外的一种额外强化方式存在,对于改善高温强度非常有效^[12];②Mn 在 Al 基体中的扩散速率略高于 Zr 原子,可以通过 Mn 与 Zr 之间原子交互作用来加速 Zr 的扩散并调控 Al_3Zr 纳米沉淀相的析出^[13],并抑制其粗化,达到改善热稳定性的作用。同时本研究还将对比铸态和变形态下 Mn 添加对 Al-Zr 合金微观组织、力学和电学性能的影响,以期对 Al-Zr 合金的组织优化和性能提升提供参考。

1 试验方法

1.1 试验材料

采用纯度为 99.85% (质量分数,下同) 的工业铝锭、Al-5Zr 和 Al-10Mn 中间合金熔炼,将原料按照一定配比置于 Al_2O_3 坩埚中,在 750 ℃ 进行熔炼,经机械搅拌后浇注到石墨型中,分别制备 Al-Zr 和 Al-Zr-Mn 合金,见表 1。铸态合金经过 600 ℃ × 4 h 固溶后,一部分在

350 ℃ 下直接时效 5~70 h;另一部分材料,经过 6 道次热轧制成 $\phi 9.5$ mm 的铝合金杆,随后在 350 ℃ 下时效 5~70 h。

表 1 不同 Mn 含量下合金的化学成分

Tab.1 Chemical compositions of alloys with various Mn

合金	contents				%
	Mn	Zr	Fe	Si	
AZ	—	0.18	0.09	0.04	余量
AZM-I	0.16	0.18	0.07	0.02	余量
AZM-II	0.88	0.18	0.06	0.01	余量

1.2 试验方法

金相试样经过打磨、抛光后,采用 1 mL HF 和 200 mL H_2O 的混合腐蚀液进行浸蚀,在 DMI5000M 显微镜下观察试样晶粒尺寸大小。透射电镜试样先在砂纸上进行打磨,直至其厚度约为 60 μm ,然后冲成为 $\phi 3$ mm 的金属圆薄片,并在磁力驱动双喷射电解减薄器中距试样边界 0.6 mm 处喷出薄区。其中,双喷射时的电解液采用体积分数为 25% 的硝酸甲醇溶液,同时,用液氮降温,使得电解液的温度低于 -25 ℃,在 JEM-2100F 型透射电镜(TEM)下进行观察合金组织,电解电压控制在 12~15 V,电流则处于 30~50 mA 之间。

不同工艺处理的材料分别经过粗磨、细磨以及抛光,在 Wilson VH3100 显微维氏硬度计下进行硬度测试,载荷和加载时间分别为 0.49 N 和 10 s。通过 Sigma Check2 涡流电导率测试仪测得试样的电导率。

2 试验结果及讨论

2.1 微观组织

图 1 为铸态和轧态 AZ、AZM-I 和 AZM-II 合金的金相组织。可以看出,铸态 AZ 合金和铸态 AZM-I 晶粒较粗大,二者晶粒尺寸差别不大。铸态 AZM-II 合金的晶粒尺寸明显细化,平均尺寸约为 800 μm ,出现了尺寸约为 200 μm 的较小晶粒,且存在枝晶偏析现象。可以看出较高含量 Mn 添加后在凝固过程中成分偏析严重,同时由于 Mn 在 Al 中的固溶度低,在晶界处易先形成粗大的化合物,成为异质形核的核心,而使得晶粒发生细化。

将铸态 AZ、AZM-I 和 AZM-II 合金在 520 ℃ 下加热 40 min 后进行轧制,将截面为 20 mm × 20 mm 的棒轧制成直径约为 9.5 mm 圆棒。经过大变形量的轧制后,合金晶粒尺寸变小,同时内部出现大量缺陷(见图 2)。对轧态合金的横截面进行透射观察,见图 1d~图 1f。根据透射图像对横截面晶粒尺寸进行统计分析,3 种轧态合金的横截面晶粒尺寸统计结果分别见图

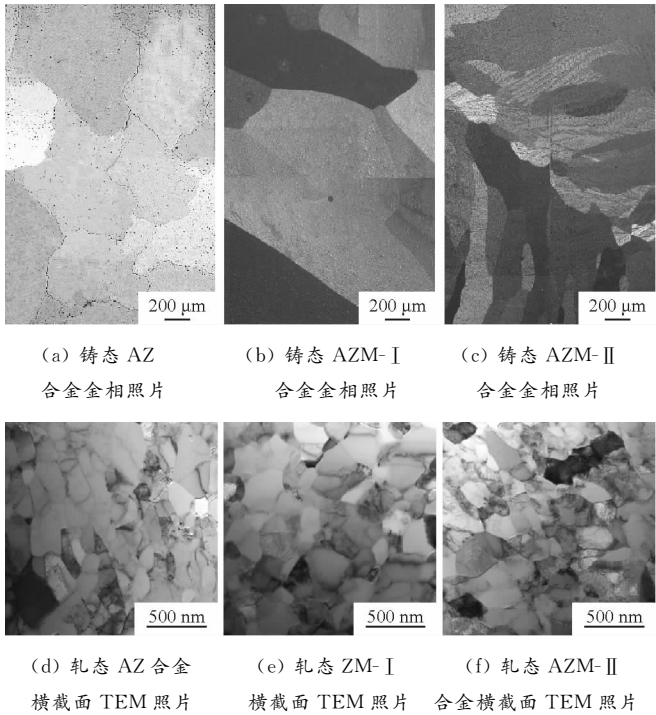


图 1 3 种合金不同状态的显微组织

Fig.1 Microstructure of alloys under different states

3. 可以看出,轧态 AZ、AZM- I 和 AZM- II 合金的平均晶粒尺寸约为 0.5、0.4 和 0.3 μm ,即随着 Mn 含量增加,合金的晶粒尺寸略有减小。这主要是在回复再结晶过程中,Mn 原子添加起到了诱发晶粒形核、阻碍晶界迁移/运动的作用;另一方面,Mn添加还细化了铸态

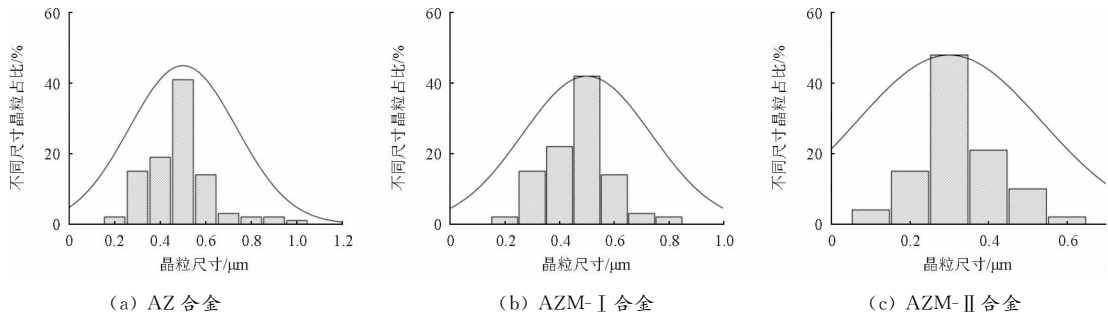


图 3 3 种合金轧态横截面晶粒尺寸的统计结果

Fig.3 Statistics of cross-section grain size of as-rolled alloys

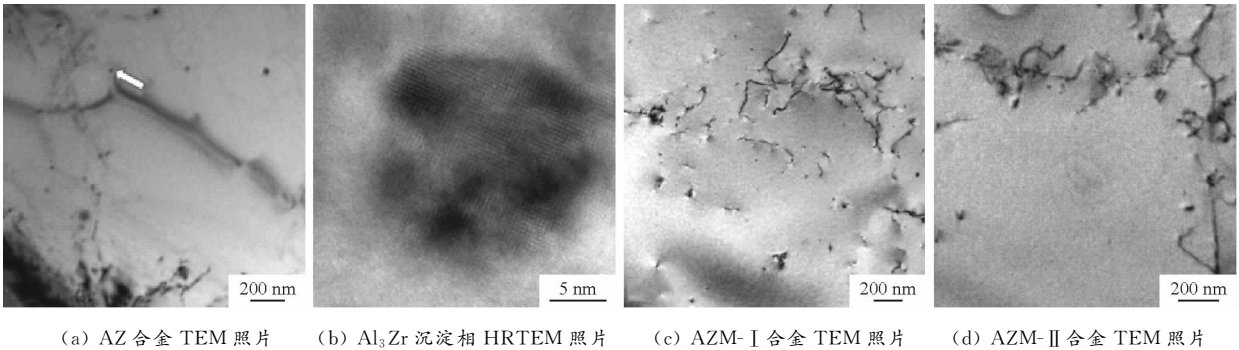


图 4 350 $^{\circ}\text{C} \times 75 \text{ h}$ 时效后 3 种合金的 TEM 组织

Fig.4 TEM images of alloys aged at 350 $^{\circ}\text{C}$ for 75 h

晶粒尺寸,因此在轧制变形后相应地晶粒尺寸也较小。
350 $^{\circ}\text{C} \times 75 \text{ h}$ 时效后 3 种合金的 TEM 组织见图 4。可以发现,AZ 合金晶粒内部有明显的黑色圆形区域(见图 4a),放大后发现该黑色区域的结构与 Al 基体不同(见图 4b)。经过标定后确定该颗粒为典型的 Al_3Zr 析出相,在三维空间形貌近似为球状。AZM- I 合金晶粒内部也有少量细小的黑色圆形区域(见图 4c),但放大后发现该区域仍然是 Al 基体结构,且存在大量晶格畸变,表明该区域只发生了元素偏聚,还未形成新的晶体结构;而 AZM- II 合金晶粒内部也有少量细小的黑色圆形区域(同样是畸变的 Al 基体结构),但是与 AZM- I 合金相比,这些区域的数量更少。TEM 微观组织的对比分析表明,铸态合金直接进行350 $^{\circ}\text{C}$ 时效

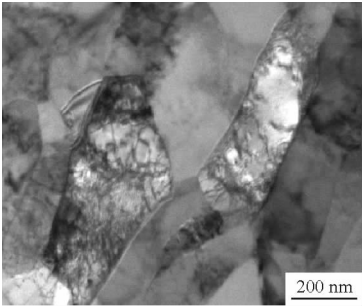


图 2 典型的 AZM- II 合金纵截面 TEM 照片显示晶内高密度位错

Fig.2 Representative longitudinal Al-section TEM images of AZM- II alloys showing intergranular dislocations

处理时,未添加 Mn 的 AZ 合金中析出了纳米 Al_3Zr 沉淀相颗粒,但是 Mn 添加后却抑制了 Al_3Zr 析出相的形成。

Mn 添加后抑制 Al_3Zr 纳米颗粒析出的可能原因是:一方面时效析出需要空位进行协调^[14],在二元 Al-Zr 合金中只有 Zr 一种固溶原子,淬火生成的过饱和空位易于被 Zr 捕获,并在时效温度下促进 Al_3Zr 相形核;而在 Al-Zr-Mn 合金中,Mn 与空位更容易结合^[15],夺取了更多空位,导致 Al_3Zr 相难以形核。对 Mn 的时效析出而言,主要是形成 Al_6Mn ,但是该相单独形核非常困难,一般是与 Fe、Si 等元素一起析出,形成 $\text{Al}_6(\text{Mn}, \text{Fe}, \text{Si})$ 相。本研究所用合金中 Fe、Si 含量较低,且容易在晶界处偏聚,因此 Mn 添加后虽然抑制了 Al_3Zr 相的析出,但也没有形成 Al_6Mn 相。另一方面,也可能是 Mn 原子与 Zr 原子(甚至加上空位一起)形成了稳定的溶质原子复合体或者溶质原子-空位复合体,将 Zr 原子稳定在了固溶体内。

3 种轧态合金分别在 $350\text{ }^{\circ}\text{C} \times 40\text{ h}$ 时效处理后的微观组织见图 5。可以看出,在 3 种时效的轧态合金中,晶内析出的纳米颗粒非常少,但是在晶界上可以观察到明显的纳米颗粒析出,见图 5a 和图 5c 中箭头处以及图 5e 方框处。AZ 和 AZM-I 合金中的晶界析出相颗粒确定为 Al_2Zr ,而 AZM-II 合金中的晶界析出相则为 Al_6Mn ,表 2 中的成分分析结果也证明了图 5c 和图 5e 中晶界析出相成分分别与 Al_2Zr 和 Al_6Mn 相近。轧态合金经历了大变形,位错、空位等内部晶体缺陷显著增大,整体能量升高,将导致溶质原子固溶度增大^[16],而本研究中 3 种合金的溶质原子含量都比较低,因此晶内析出非常少。同时在大变形的金属中晶界通常为大角晶界,具有极高的能量,容易导致溶质原子偏聚在晶界上引发晶界析出^[17]。在时效的轧态 AZ 和 AZM-I 合金中,晶界 Al_2Zr 的析出是 Zr 在晶界偏聚的结果,而在时效的轧态 AZM-II 合金中,Mn 在晶界的偏聚导致了明显的晶界 Al_6Mn 相析出。

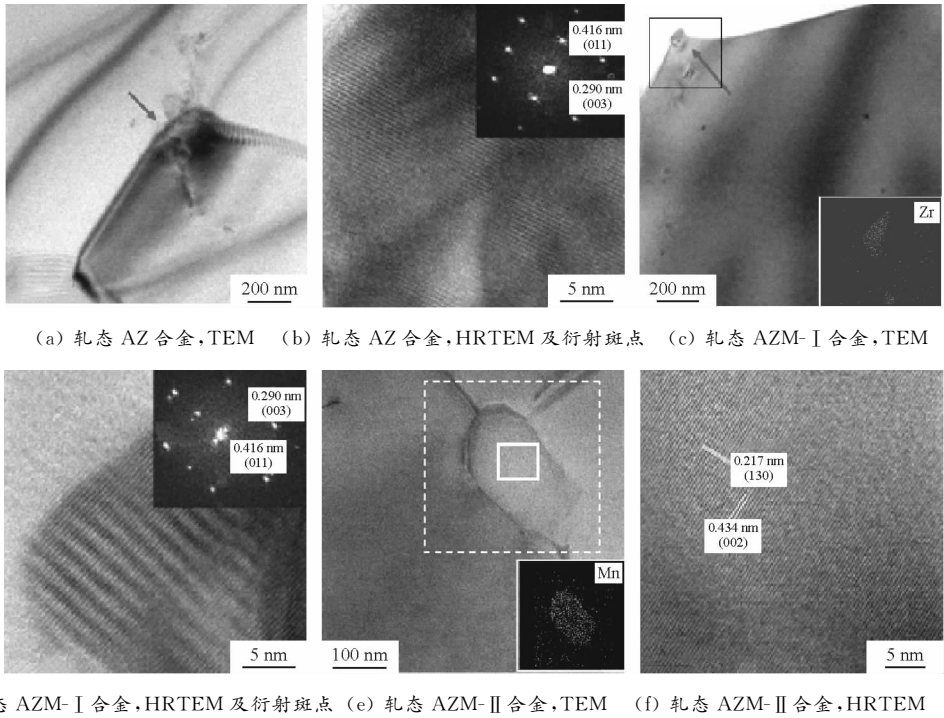


图 5 $350\text{ }^{\circ}\text{C} \times 40\text{ h}$ 时效后 3 种轧态合金的 TEM 照片、HRTEM 照片及衍射斑点

Fig.5 TEM, HRTEM and diffraction spots of as-rolled alloys aged at $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 40 h

表 2 图 5 中晶界处析出相的成分

位置	x_{B}		
	Al	Mn	Zr
图 5c	67.35	0.11	32.54
图 5e	86.72	13.27	0.01

2.2 力学性能及电学性能

3 种铸态合金在 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下时效的硬度和电导率随

时效时间的变化曲线见图 6。可以看出,对于 AZ 合金,随着时效时间增加,其显微硬度先增加后降低,时效时间为 30 h 时硬度(HV)达到最高值 29,而电导率的变化趋势与硬度相似。对于 AZM-I 和 AZM-II 合金,其电导率和硬度随时效时间变化不大,表明 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时效处理对 AZM-I 和 AZM-II 合金性能的影响不明显。从 TEM 分析可以看出,由于 AZ 合金内部在时效过程中形成了弥散的 Al_3Zr 析出相,因此其硬度增加,同时

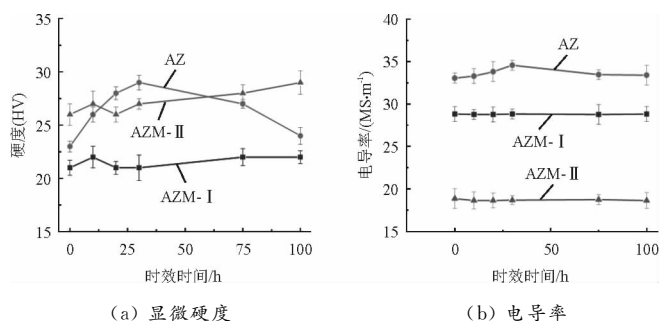


图6 3种铸态合金经350℃时效后的硬度和电导率

Fig.6 Hardness and electric conductivity of as-cast alloys after aging at 350 °C

合金元素固溶度降低,其电导率会升高;而对于添加Mn的AZM-I和AZM-II合金,Zr和Mn仍主要以固溶原子的形式存在,纳米第二相颗粒析出较少,仍以固溶强化为主,因此其硬度和电导率对时效不敏感。

轧态AZ、AZM-I和AZM-II合金在350℃下进行时效处理,其硬度与电导率变化曲线见图7。可见3种合金在时效前期(10h以内)硬度均下降,10h后趋向于稳定。其中AZ轧态合金硬度降幅最大,降低了约40%;而AZM-II合金具有最高的硬度,与AZ和AZM-I合金相比,稳定状态下的硬度均提升了70%以上。时效前期硬度大幅下降的主要原因是:轧制变形态下材料内部位错等晶体缺陷多、晶粒尺寸小,表现出强度、硬度高;在350℃的时效温度下,位错等晶体缺陷将大量湮灭,晶界的高能量状态也促进了晶粒粗化,在这一回复、再结晶的过程中,材料的强度、硬度降低。虽然晶内有少量 Al_3Zr 纳米第二相颗粒析出,但是其强化增量低于晶体缺陷湮灭、晶粒粗化带来的强度降低,因此宏观上表现出时效前期硬度大幅度下降。硬度最终趋向于稳定的主要原因是:晶体缺陷的浓度达到了平衡,同时晶界处第二相颗粒的析出起到了钉扎晶界、阻止晶粒粗化的作用^[18]。AZM-II合金硬度最高与其溶质含量最大有关,一方面晶内固溶强化效果明显,另一方面晶界纳米颗粒的析出稳定了晶界。350℃下时

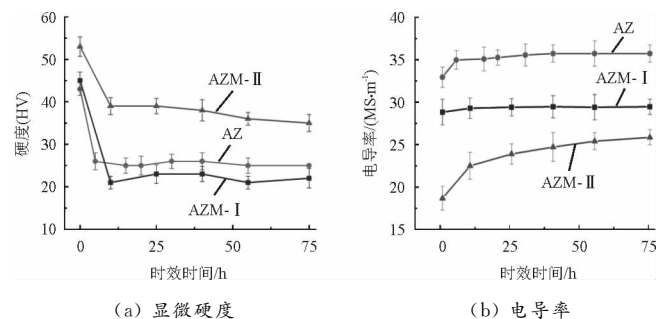


图7 3种轧态合金经350℃时效后的硬度和电导率

Fig.7 Hardness and conductivity of as-rolled alloys after aging at 350 °C

效进入稳定区间后,AZM-II合金的硬度与AZ和AZM-I合金相比有了显著的提高。这一结果表明:①添加适量Mn可以大幅改善Al-Zr合金的强度,尤其是在轧制变形后;②Mn的添加还可以提升Al-Zr合金导线的耐热性,在350℃下热暴露接近80h后仍具有较高的硬度。

轧态合金电导率随时效时间的变化趋势大致与硬度趋势相反:AZ和AZM-II合金在时效前期出现了明显的电导率增大,随后AZ合金进入了稳定区,但是AZM-II合金仍然表现出增加的趋势,尽管增幅较小。但是AZM-I合金的电导率则几乎不随时效时间而变化,始终保持在29 MS/m左右。这说明固溶原子的分布状态是决定铝合金导线电导率的最主要因素。在轧态AZM-I合金中,虽然位错等晶体缺陷在时效前期大量湮灭导致了强度、硬度降低,但是少量添加的Zr和Mn溶质原子以固溶态为主,导致了电导率对时效几乎不敏感。轧态AZ和AZM-II合金在时效前期电导率增大的原因主要是晶界析出了纳米第二相颗粒,使得固溶溶质含量降低,减少了点阵畸变对电子传输的散射影响。AZM-II合金的电导率直至约80h时效仍在逐步增大,可能是晶内固溶的Mn原子不断向晶界扩散并偏聚、析出所造成的。相比之下,AZ合金中溶质原子的含量最少,大变形导致的晶内Zr固溶度提高以及晶界Zr析出使得Zr的分布处于一种准平衡状态,难以有更多的晶内Zr原子扩散到晶界上并偏聚、析出,所以AZ合金的电导率在10h后基本保持了稳定。

对比图6和图7可以发现:①AZM-I合金分别在铸态和轧态下进行350℃时效处理,其硬度和电导率几乎一致且对时效时间不敏感,即电导率恒定为29 MS/m,硬度(HV)恒定为20(轧态为稳定区硬度值)。这表明AZM-I合金在铸态和轧态下其所含Zr和Mn原子均主要以固溶形式存在,时效析出量极小;②由于AZM-I合金铸态和轧态的晶粒尺寸和晶体缺陷浓度存在较大的差别,但是时效后最终硬度和电导率几乎一致,进一步说明晶粒尺寸在亚微米以上量级时,铝合金的硬度和电导率对晶粒尺寸均不敏感,同时晶体缺陷如位错对电导率的影响较小,这与其他研究结果一致^[19];③对AZ合金来说,轧态下时效与铸态下时效相比,硬度略有降低(降低约10%),但是电导率提高明显(从33.70 MS/m提高到35.67 MS/m),这与变形态下更大量Zr在晶界析出有关,因为晶界析出对强度、硬度的贡献远小于晶内弥散析出,但是晶界析出消耗了大量固溶原子,对电导率有促进作用;④轧态AZM-II合金与铸态AZM-II合金相比,时效后硬度和电导率同时显著增大,其中硬度提高了30%以上,电导率更提高了40%以

上,表明大变形对 Al-Zr-Mn 合金微观组织调控和综合性能优化具有积极的意义。

3 结 论

(1)Mn 添加抑制了铸态 Al-0.18Zr 合金中 Al_3Zr 纳米沉淀相的时效析出,其主要原因是 Mn 溶质原子与空位结合更紧密,通过捕获大部分过饱和空位,从而显著降低了 Al_3Zr 相的形核析出。

(2)Al-0.18Zr 合金在轧态下时效与铸态下时效相比,硬度略有降低,但是电导率明显提高;而 Al-0.18Zr-0.88Mn 合金在轧态下时效,其硬度和电导率均远大于铸态下时效的性能。

(3)与轧态 Al-0.18Zr 合金相比,轧态 Al-0.18Zr-0.88Mn 合金时效后硬度提高了 70% 以上,表现出了较好的强化效果,而且热稳定性提升,在 350 °C 下长时间热暴露后仍具有较高的硬度。

参 考 文 献

[1] 刘斌,郑秋,党朋,等. 铝合金在架空导线领域的应用及发展[J]. 电线电缆, 2012, 4(1): 10-15.

[2] 陈保安,韩钰,陈新,等. 中强度铝合金导线概述[J]. 热加工工艺, 2015, 44(18): 6-8.

[3] 章德胜,刘平,刘新宽,等. 高电导率、高强度耐热铝合金导体材料的研究进展[J]. 材料热处理技术, 2012, 41(24): 24-27.

[4] LIU L, JIANG J T, ZHANG B, et al. Enhancement of strength and electrical conductivity for a dilute Al-Sc-Zr alloy via heat treatments and cold drawing[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(6): 962-971.

[5] 陈保安,祝志祥,王瑞红,等. Zr 含量对 Al-Zr 合金时效析出和性能的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(9): 47-52.

[6] 陈保安,赵丽丽,张静媛,等. Y 对 Al-Zr 合金微观组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(1): 68-72.

[7] 张强,韩钰,卢卫疆,等. 微量 Er 对铝合金导线单丝组织性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(4): 367-369.

[8] HOU J P, WANG Q, ZHANG Z J, et al. Nano-scale precipitates: The key to high strength and high conductivity in Al alloy wire[J]. Materials & Design, 2017, 132(1): 148-157.

[9] WEN S P, GAO K Y, HUANG H, et al. Role of Yb and Si on the precipitation hardening and recrystallization of dilute Al-Zr alloys [J]. Journal of Alloys and Compound, 2014, 599(1): 65-70.

[10] 顾静,田园,高海燕,等. Al-Zr-Y 合金的时效析出机制和性能[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(2): 243-251.

[11] JIANG S Y, WANG R H. Manipulating nanostructure to simultaneously improve the electrical conductivity and strength in microalloyed Al-Zr conductors[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 6 202-

6 214.

[12] HATCH J E. Aluminum: Properties and Physical Metallurgy[M]. USA: American Society for Metals, 1984.

[13] KNIPLING K E, DUNAND D C, SEIDMAN D N. Criteria for developing castable, creep-resistant aluminum-based alloys-A review [J]. Zeitschrift fur Metallkunde, 2006, 97(3): 246-265.

[14] MARTIN J W. Precipitation Hardening (Second Edition)[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998.

[15] WOLVERTON C. Solute-vacancy binding in aluminum[J]. Acta Materialia, 2007, 55(11): 5 867-5 872.

[16] RUPERT T J, TREMKLE J C, SCHUH C A. Enhanced solid solution effects on the strength of nanocrystalline alloys[J]. Acta Materialia, 2011, 59(3): 1 619-1 631.

[17] JIANG L, LI J K, CHENG P M, et al. Microalloying ultrafine grained Al alloys with enhanced ductility[J]. Scientific Reports, 2014, 4(1): 3 605-3 610.

[18] SAUVAGE X, ENIKEEV N, VALIEV R, et al. Atomic-scale analysis of the segregation and precipitation mechanisms in a severely deformed Al-Mg alloy[J]. Acta Materialia, 2014, 72(1): 125-136.

[19] SHAO D, ZHANG P, ZHANG J Y, et al. Effect of pre-strain on the solute clustering, mechanical properties, and work-hardening of a naturally aged Al-Cu-Mg alloy[J]. Metallurgical and Materials Transaction, 2017, A48(9): 4 121-4 134.

(编辑:栗万仲)

1~6 月新能源汽车市场占有率 达 28.3%

7 月 11 日,中国汽车工业协会发布 6 月汽车行业经济情况。2023 年 6 月,我国汽车产销分别完成 256.1 万辆和 262.2 万辆,环比分别增长 9.8% 和 10.1%,同比分别增长 2.5% 和 4.8%。其中,乘用车产销分别完成 221.9 万辆和 226.8 万辆,产量同比下降 0.9%,销量同比增长 2.1%。商用车产销分别完成 34.2 万辆和 35.5 万辆,同比分别增长 31.3% 和 26.3%。新能源汽车产销分别完成 78.4 万辆和 80.6 万辆,同比分别增长 32.8% 和 35.2%,市场占有率达 30.7%。

1~6 月,汽车产销分别完成 1 324.8 万辆和 1 323.9 万辆,同比分别增长 9.3% 和 9.8%。其中,乘用车产销分别完成 1128.1 万辆和 1126.8 万辆,同比分别增长 8.1% 和 8.8%。商用车产销分别完成 196.7 万辆和 197.1 万辆,同比分别增长 16.9% 和 15.8%。新能源汽车产销分别完成 378.8 万辆和 374.7 万辆,同比分别增长 42.4% 和 44.1%,市场占有率达到 28.3%。

(摘自压铸周刊)