微量 Mn、Ti、Cr 对 Al-Zn-Mg-Cu-Zr 合金组织和性能的影响①

康喜，尹登峰，徐宏宇，王震
（中南大学 材料科学与工程学院，湖南 长沙 410083）

摘　要：通过室温拉伸、晶间腐蚀和电化学腐蚀等实验，结合金相显微镜、扫描电镜、透射电镜等表征手段研究复合添加 Mn、Ti、Cr 对 Al-Zn-Mg-Cu-Zr 合金组织和性能的影响。结果表明，复合添加 Mn、Ti、Cr 可以抑制合金再结晶，促进 η′相细小弥散析出，使晶界析出相从链状连续分布变为条状不连续分布，从而提高合金屈服强度、抗拉强度和延伸率，减小晶间腐蚀深度，降低腐蚀电流密度，增加极化电阻，使合金力学性能和抗腐蚀性能得到增强。

关键词：Al-Zn-Mg-Cu；微合金化；固溶处理；时效；微观组织；析出相；析出强化；力学性能；腐蚀性能
中图分类号：TB302　　**文献标志码**：A　　doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.01.029
文章编号：0253-6099(2026)01-0175-06

Effects of Trace Mn, Ti and Cr on Microstructures and Properties of Al-Zn-Mg-Cu-Zr Alloys

KANG Xi, YIN Dengfeng, XU Hongyu, WANG Zhen
(*School of Materials Science and Engineering*, *Central South University*, *Changsha* 410083, *Hunan*, *China*)

Abstract: The effects of addition of Mn, Ti and Cr on microstructures and properties of Al-Zn-Mg-Cu-Zr alloys were investigated by performing room-temperature tensile test, intergranular corrosion test and electrochemical corrosion test, combined with microstructural characterization techniques such as optical microscopy, scanning electron microscopy and transmission electron microscopy. The results demonstrate that additions of Mn, Ti and Cr can effectively inhibit alloy recrystallization and promote fine and dispersed precipitation of η′ phase. This leads to grain boundary precipitates in a continuous chain-like distribution changed to be discontinuously distributed in a line. Consequently, the yield strength, tensile strength and elongation of the alloys are improved, and the depth of intergranular corrosion and the corrosion current density are reduced; meanwhile the polarization resistance is increased. It is shown that both mechanical properties and corrosion resistance of alloys are significantly enhanced.

Key words: Al-Zn-Mg-Cu; microalloying; solution treatment; aging; microstructure; precipitated phase; precipitation hardening; mechanical property; corrosion resistance

Al-Zn-Mg-Cu 合金具有高的比强度和断裂韧性，被广泛应用在航空航天等领域，但由于其合金化程度高，组织析出行为复杂，对腐蚀开裂行为有较高的敏感性[1-2]。通过多元微合金化向合金中添加微量元素可以抑制合金再结晶和改变时效析出相形貌，从而提高合金的力学性能和耐腐蚀性能[3]。Zr 是 Al-Zn-Mg-Cu 合金中常用的微量元素，热处理过程中析出的 $L1_2$ 型弥散 Al_3Zr 可以阻碍位错移动和抑制再结晶，提高合金的强度和抗腐蚀性能[4]。有研究表明，合金中 Zr 含量（质量分数，下同）为 0.10%～0.12%时，可以显著提高合金的力学性能和抗腐蚀性能[5]；Ti 会进入 Al_3Zr 中，形成 $Al_3(Zr,Ti)$ 弥散相，其抑制再结晶效果强于单独添加 Zr 或 Ti[6]。文献[7]研究发现，Zr、Ti 会在 Al-Zn-Mg-Cu合金中偏聚，导致其抑制再结晶效果下降，合金耐腐蚀性能比单独添加 Zr 时明显下降，复合添加 Mn、Cr 后，Zr、Ti 的偏析情况得到明显改善，复合添加 Zr、Mn、Ti、Cr 的合金在固溶处理后仍保持完全变形态组织，但 Mn+Cr 含量高于 0.6%时，抑制再结晶的

① **收稿日期**：2025-08-15
基金项目：广东省科技计划项目(0214B090903012)；徐州市科技项目(KC20006)
作者简介：康喜(2001—)，男，湖南湘西人，硕士研究生，主要研究方向为 Al-Zn-Mg-Cu 合金的组织和性能。E-mail:1852754816@qq.com
通信作者：尹登峰(1966—)，男，湖南株洲人，博士，教授，主要从事铝合金性能研究。E-mail:dfyin@126.com

效果会减弱。

本文制备了 Al-Zn-Mg-Cu-Zr 和 Al-Zn-Mg-Cu-Zr-Mn-Ti-Cr 两种合金,研究复合添加 Mn、Ti、Cr 对 Al-Zn-Mg-Cu-Zr 合金显微组织、力学性能和抗腐蚀性能的影响,可为开发耐蚀高强铝合金提供理论支持。

1 实验材料及方法

实验原料包括纯 Al、纯 Mg、纯 Zn 和中间合金 Al-50%Cu、Al-4% Zr、Al-10% Mn、Al-5% Cr、Al-3% Ti。原料在 800 ℃电阻炉中熔化,然后在 760 ℃下浇铸形成 150 mm×100 mm×35 mm 的铸锭。铸锭经过切头铣面后进行 420 ℃×8 h+460 ℃×36 h 的均匀化处理,然后在 440 ℃下保温 2 h 后进行热轧处理,变形量为 80%,热轧态合金在 440 ℃下去应力退火 2 h 后进行冷轧,变形量为 50%。将冷轧态铝合金板材进行 455 ℃×2 h 的固溶处理,然后室温水淬,最后经过 120 ℃×24 h 时效处理得到 2 组样品,分别命名为 1 号合金和 2 号合金。合金化学成分如表 1 所示。

表 1 实验合金化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of tested alloys %

合金名称	Zn	Mg	Cu	Zr	Mn	Ti	Cr	Al
1 号合金	7.9	2.05	2.42	0.12				余量
2 号合金	8.2	2.12	2.24	0.14	0.32	0.15	0.14	余量

按照 GB/T 228.1—2021 标准制备拉伸样品,样品尺寸如图 1 所示。合金室温拉伸实验在 Instorn 3369 型拉伸机上进行,拉伸速率为 2 mm/min。

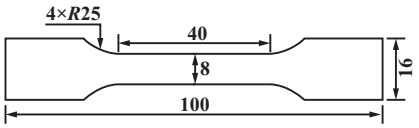


图 1 室温拉伸样品尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Schematic diagram of tensile specimen

合金晶间腐蚀测试参考 GB/T 7998—2023 标准,通过光学显微镜观察合金不同位置腐蚀深度。

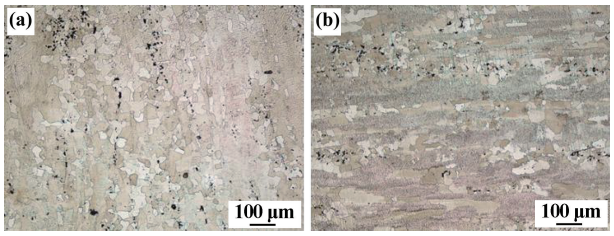
电化学实验在 Multi autolab M204 电化学工作站中进行,三电极系统分别以铂片作为对电极、饱和甘汞作为参比电极、表面积 1 cm^2 的被测试样品作为工作电极,测试溶液为 3.5% NaCl 溶液。在-1~-0.1 V 范围内以 0.1 mV/s 的扫描速率测试样品极化曲线。在 10 mHz~100 kHz 频率范围内开路电位状态下进行电化学阻抗谱实验。

固溶态合金经过磨样抛光后通过徕卡 DM4 M 型金相显微镜和 TESCAN MIRA4 LMH 型扫描电镜观察其显微组织;时效态样品研磨至 70 μm 后通过 Tenupol-5 型电解双喷仪制备透射电镜试样,双喷液为 25%HNO_3+75%CH_3OH 溶液,电解双喷温度保持在-30 ℃左右,工作电流和电压分别为 70 mA 和 25 V,最后在 JEM-F200 场发射透射电镜下观察其显微组织。

2 实验结果与分析

2.1 固溶态合金显微组织

图 2 为 2 种固溶态合金的金相组织。从图 2 可以发现,2 种合金经过固溶淬火后,1 号合金发生了明显的再结晶,轧制态的拉长晶粒大部分转变成等轴状晶粒,只保留少量纤维状组织;2 号合金部分晶粒发生再结晶,大部分金相组织保留纤维状。

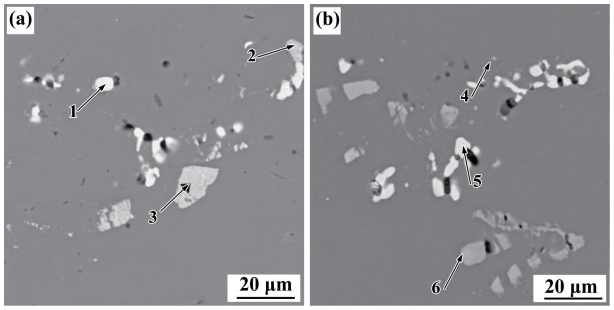


(a) 1 号合金; (b) 2 号合金

图 2 固溶态合金的金相组织

Fig. 2 Metallographic structure of solution heat treated alloys

图 3 为 2 种固溶态合金的 SEM 图像。经过固溶处理后,大部分非平衡相已经回溶到 Al 基体中。对残余的第二相进行 EDS 能谱分析,结果如表 2 所示。2 种合金的白色残余第二相为 T 相(AlZnMgCu),灰色点状相为 S 相(Al_2CuMg),1 号合金的粗大灰色块状相为 Al_7Cu_2Fe 相,2 号合金的灰色块状相为 $Al_7(Cu,Mn)Fe$ 相,Mn 元素会取代 Al_7Cu_2Fe 相中的部分 Cu 元素。



(a) 1 号合金; (b) 2 号合金

图 3 固溶态合金的 SEM 图像

Fig. 3 SEM images of solution heat treated alloys

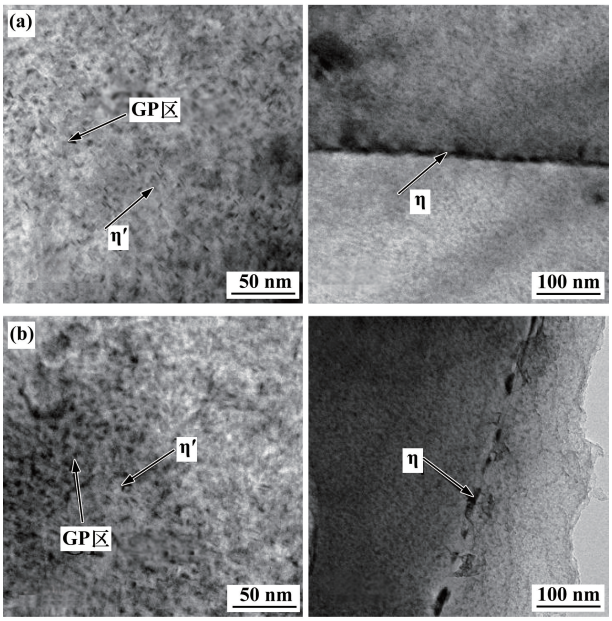
2.2 时效态合金 TEM 组织

图 4 为 2 种合金经过时效处理后的 TEM 图像。

表 2　合金固溶态 EDS 能谱分析成分(原子分数)

Table 2　EDS analysis of solution heat treated alloy　%

位点	Al	Zn	Mg	Cu	Zr	Mn	Ti	Cr	Fe
1	24.7	24.2	32.4	18.6	0	0	0	0	0.1
2	50.7	2.3	23.1	23.7	0	0	0	0	0.1
3	69.6	1.1	0	19.8	0.1	0	0	0	9.4
4	48.6	3.5	24.5	23.2	0	0.1	0	0	0.1
5	31.5	29.3	31.5	14.1	0	0.1	0	0	0.1
6	74.9	1.8	1.3	4.6	0.1	1.9	0	0.1	15.3



(a) 1 号合金;(b) 2 号合金

图 4　时效态合金 TEM 图像

Fig. 4　TEM images of aged alloys

从图 4 可以发现,合金晶内有球状和棒状两种形态的析出相,其中球状析出相为 GP 区,棒状析出相为 η′相,晶界析出相为 η 相。1 号合金 GP 区直径为 4.1 nm,η′相长度和宽度分别为 5.4 nm 和 1.8 nm;晶界析出相呈链状连续分布,尺寸为 20.44 nm;2 号合金 GP 区直径为 4.5 nm,η′相长度和宽度分别为 5.7 nm 和 1.3 nm,晶界析出相不连续,尺寸为 21.62 nm。表明添加 Mn、Ti、Cr 可以细化 η′相,促进 η′相的析出,增大晶界析出相的尺寸和间距。

2.3　时效态合金力学性能

图 5 为 2 种合金的室温拉伸曲线,相应的力学性能参数见表 3。由图 5 和表 3 可见,添加 Mn、Ti、Cr 后,合金强度和塑性都得到提高。

2 种合金的拉伸断口形貌如图 6 所示。2 种合金都为沿晶断裂,其中 1 号合金拉伸断口平整,由平面区和少量韧窝组成,韧窝尺寸较小且浅,表明塑性较差;2 号合金断面不平整,韧窝数量和尺寸增加,表明塑性较好。该结果与室温拉伸数据相符。

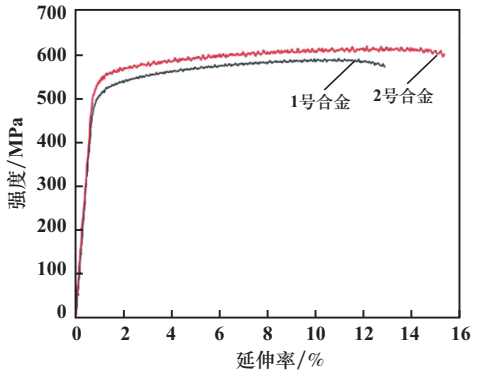


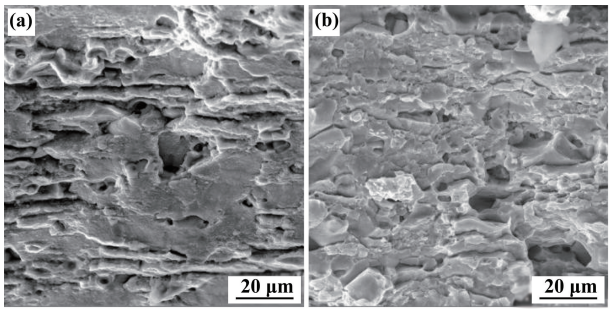
图 5　合金室温拉伸曲线

Fig. 5　Tensile curve of alloy at room temperature

表 3　合金力学性能参数

Table 3　Mechanical properties of alloys

合金名称	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%
1 号合金	561	588	11.91
2 号合金	577	611	14.58



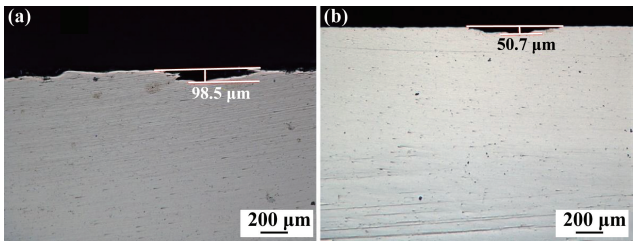
(a) 1 号合金;(b) 2 号合金

图 6　合金室温拉伸断口形貌

Fig. 6　Fracture surface morphology of alloys at room temperature

2.4　时效态合金抗腐蚀性能

图 7 为 2 种合金晶间腐蚀后的纵截面形貌。2 种合金的晶间腐蚀形貌类似,都为半椭圆形,沿晶界腐蚀,其中 1 号合金晶间腐蚀深度为 98.5 μm,2 号合金晶间腐蚀深度为 50.7 μm。结果表明,复合添加 Mn、Ti、Cr 可以提高合金的抗晶间腐蚀性能。



(a) 1 号合金;(b) 2 号合金

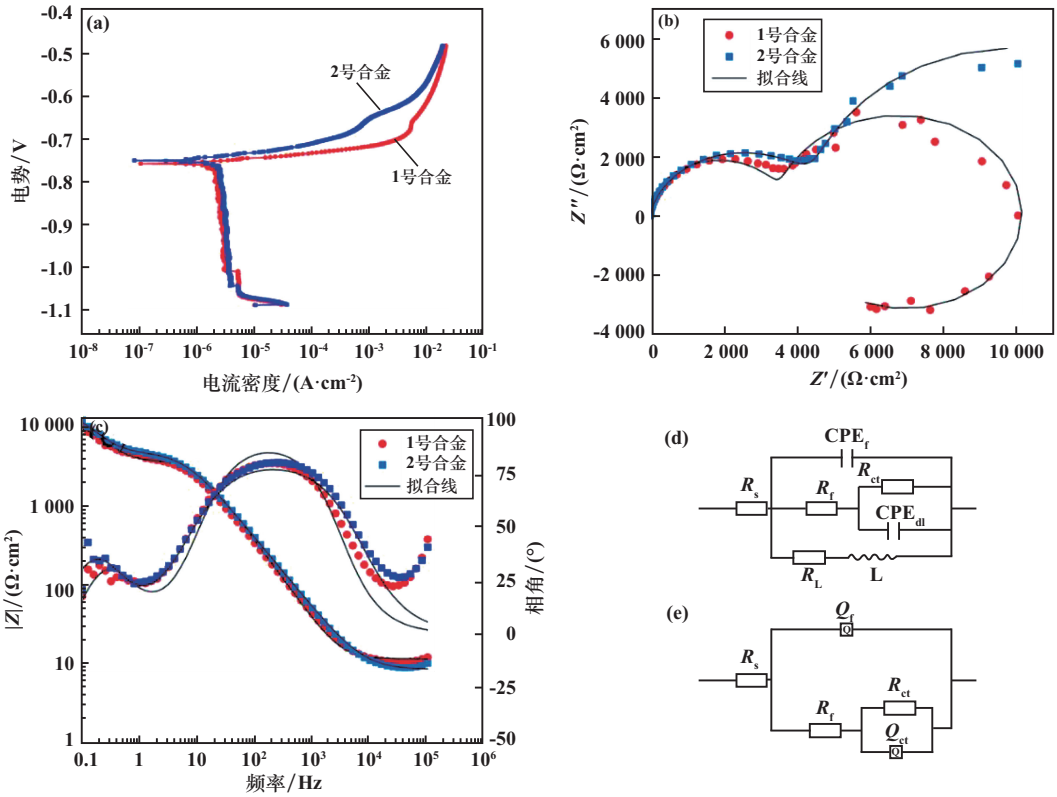
图 7　合金的晶间腐蚀形貌

Fig. 7　Intergranular corrosion morphologies of alloys

2 种合金的极化曲线如图 8(a)所示。从图 8(a)可以看出,2 种合金的腐蚀电位相差不大,但腐蚀电流密度不同。在极化曲线上通过 Tafel 外推法拟合电化学参数,获得 1 号合金和 2 号合金的自腐蚀电位、腐蚀电流密度分别为 -0.755 V、3.941 μA/cm^2 和 -0.747 V、2.450 μA/cm^2。2 号合金的自腐蚀电位和腐蚀电流都小于 1 号合金的相应值。根据法拉第定律,合金的腐蚀电流密度越大,合金的腐蚀速率就越快,相应合金的耐腐蚀性越差[8],表明添加 Mn、Ti、Cr 提高了合金的耐蚀性。

对 2 种合金进行电化学阻抗谱(EIS)分析,得到 2 种合金的 Nyquist 图和 Bode 图,分别如图 8(b)和图 8(c)所示。从图 8(b)可以发现,2 种合金的 Nyquist 图都分别存在 2 个明显的容抗弧,其中在中-高频范围内的容抗弧与电荷转移相关,而中-低频范围内的容抗弧与局部腐蚀过程的电化学反应相关。一般而言,容抗弧半径越大,合金的耐腐蚀性能越好,从图 8(b)可以看出,2 号合金的容抗弧半径大于 1 号合金的容抗弧半径,表明 2 号合金的耐蚀性更好。由图 8(c)可见,2 种合金都分别存在 2 个峰,2 个峰与 Nyquist 图中的 2 个容抗弧相对应,2 号合金的峰值都大于 1 号合金的峰值,同时在图 8(b)中 2 号合金的阻抗模值更高,说明耐蚀性更好,与 Nyquist 图表现出相同的规律。

为定量评估合金的电化学腐蚀行为,使用等效电路对阻抗谱数据进行拟合,1 号合金等效电路图见图 8(d),2 号合金等效电路图见图 8(e)。等效电路图中,R_s 为电解质溶液电阻,R_f 为试样表面形成的氧化膜的电阻,R_{ct}为试样表面的电荷转移电阻。表 4 为 2 种合金电化学阻抗谱数据的拟合参数结果。其中,R_s 值太小,可以忽略不计,极化电阻 R_p($R_p = R_f + R_{ct}$)可以用来综合衡量合金的耐腐蚀性能[9]。由表 3 可知,复合添加 Mn、Ti、Cr 后,合金的极化电阻 R_p 从 10.62 kΩ·cm^2 增至 15.76 kΩ·cm^2,极化电阻的增加意味着合金的腐蚀反应阻力增大,腐蚀速度降低,耐蚀性得到提升,与容抗弧半径具有一致性,表明 2 号合金具有更好的耐蚀性。



(a) 极化曲线;(b) Nyquist 图;(c) Bode 图;(d)~(e) 合金等效电路图

图 8 合金电化学测试曲线

Fig. 8 Electrochemical testing results of alloys

2.5 讨论

合金中添加的 Zr 可以有效抑制再结晶转变[10]。合金中再加入微量 Mn、Ti、Cr 元素后,其中的 Ti 与 Zr 会形成 $Al_3(Zr,Ti)$ 复合核心-壳层结构,与 Al_3Zr 相比,$Al_3(Zr,Ti)$ 与铝基体之间的晶格错配度更小、尺寸更细小,能够更有效地钉扎位错和晶界,提高了抑制再结晶效果,使得合金保留了以小角度晶界为主的纤维状未再结晶组织;但部分 Zr、Ti 会在基体中偏聚,均匀化

表 4　基于 EIS 拟合的合金等效电路主要拟合参数

Table 4　EIS fitting parameters of equivalent circuit for alloys

合金名称	R_s/(Ω·cm²)	R_f/(kΩ·cm²)	R_{ct}/(kΩ·cm²)
1 号合金	11.32	3.75	6.87
2 号合金	8.27	4.99	10.77

过程中析出的 $Al_3(Zr,Ti)$ 不均匀分布[7],导致在 $Al_3(Zr,Ti)$ 弥散相粒子析出密度相对较低的区域发生再结晶,降低合金的再结晶抑制效果;Cr、Mn 与 Al 有较强的亲和力,容易进入因能量起伏和结构起伏形成的原子团簇中,含有 Cr、Mn 的原子团簇结构更稳定、更容易长大,形成新的形核基底,可以降低合金中 Zr、Ti 偏析,提高抑制合金再结晶的能力。

Al-Zn-Mg-Cu 合金的强化机制分为位错切过机制和奥罗万(Orowan)绕过机制,尺寸较小的 GP 区因为强度较低,位错主要通过切过机制与其发生相互作用[11];而强度较高的亚稳 η′相主要通过绕过机制与位错发生相互作用。这两种机制的强化效果[12]可以表示为:

$$\Delta\tau_{切过}=\alpha f^{\frac{1}{2}}r^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

$$\Delta\tau_{绕过}=\beta f^{\frac{1}{2}}r^{-1} \tag{2}$$

式中:α 和 β 均为位错线张力的函数,一般为常数;f 为析出相密度;r 为析出相尺寸半径。

添加 Mn、Ti、Cr 后,η′相尺寸减小,这可能是由于 Mn 与 Cr 吸附于 η′/基体界面,延缓 Zn/Mg 扩散,提高 η′相的热稳定性,延缓了 η′相的长大,同时 Ti 与 Zr 复合添加形成的 $Al_3(Zr,Ti)$ 弥散相对 η′相形核起促进作用[13],能使 η′相得到一定细化,GP 区尺寸增大,使位错切过机制强化效果提高,η′相尺寸减小使奥罗万绕过机制强化效果得到强化,两者相互作用下合金强度得到提高。

众所周知,晶界析出相对合金的晶间腐蚀有重要影响,铝合金的晶界析出相比铝基体的电位低,会作为阳极与铝基体形成电化学电池,连续分布的晶界析出相会成为腐蚀扩展的优先通道,加快合金的腐蚀速度[4,14],因此可以通过减少晶界析出相与基体的电位差和降低沿晶界腐蚀传播速率两种方法来提高合金的抗腐蚀性能[15]。复合添加 Mn、Ti、Cr 后,合金的晶粒再结晶被抑制,晶粒以小角度晶粒为主,抑制了晶界析出相的连续沉淀[16],使晶界析出相从连续分布转变为不连续分布,晶间析出相间距增加,此外 Cr 可能进入 η 相形成 MgZn(Al,Cu,Cr),略微提高其电位,提高合金抗晶间腐蚀性能。

合金的电化学腐蚀主要由合金中第二相(如 Al_7Cu_2Fe 相和 Al_2CuMg 相)与基体之间电位差引起,残余第二相尺寸越大,合金点蚀越容易发生,这是由于粗大第二相充当局部阴极,在残余第二相周围的 Al 基体成为阳极,逐渐开始发生腐蚀溶解,腐蚀后期,粗大第二相周围 Al 基体全部溶解,导致第二相从 Al 基体中脱落,形成点蚀孔洞。合金中加入 Mn、Ti、Cr 后形成的 $Al_7(Cu,Mn)Fe$ 金属间化合物的电位比 Al_7Cu_2Fe 的电位低[17],降低金属化合物的电位,使铝基体与金属间化合物之间的电位差缩小,降低了合金电化学腐蚀倾向。

3　结论

1) 复合添加 Mn、Ti、Cr 后,抑制合金再结晶的效果得到提高,晶内析出相 GP 区尺寸增大,η′相尺寸减小,晶界析出相从连续链状分布变为条状不连续分布。

2) 添加 Mn、Ti、Cr 后,合金屈服强度、抗拉强度和延伸率提高,合金晶间腐蚀深度降低,腐蚀电流密度降低,极化电阻增加,抗腐蚀性能增强。

参考文献(References):

[1] ZOU Y, WU X D, TANG S B, et al. Investigation on microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloys with various Zn/Mg ratios[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021,85:106-117.

[2] 岳露. 固溶淬火处理对 Al-Zn-Mg-Cu-Zr(-Er)合金组织与性能的影响[D]. 长沙:中南大学, 2020.
YUE Lu. Effects of solution quenching treatment on microstructure and properties of Al-Zn-Mg-Cu-Zr(-Er) alloys[D]. Changsha: Central South University, 2020.

[3] CHEN M Y, LIU S D, HE K Z, et al. The effect of precipitate-free zone on mechanical properties in Al-Zn-Mg-Cu aluminum alloy: Strain-induced back stress strengthening[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023,969:172426.

[4] PAN Y L, ZHANG D, LIU H R, et al. Precipitation hardening and intergranular corrosion behavior of novel Al-Mg-Zn(-Cu) alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020,853:157199.

[5] 张文静,任伟才,邓桢桢,等. Zr 元素对超高强铝合金微观组织及力学性能的影响[J]. 有色金属加工, 2013,42(4):8-11.
ZHANG Wenjing, REN Weicai, DENG Zhenzhen, et al. Effect of Zr element on microstructure and mechanical properties of ultra-high strength aluminum alloys[J]. Nonferrous Metal Processing, 2013, 42(4):8-11.

[6] AKUATA C K, BEYSS O, BELKACEMI L T, et al. On the impact of Cr and Ag additions on the grain boundary microchemistry, hydrogen permeability and environmentally assisted cracking mechanism of an Al-Zn-Mg-Cu-Zr 7xxx alloy[J]. Corrosion Science, 2025,246:112759.

[7] 许杰,陈康华,陈送义,等. 微量 Ti、Cr 对 Al-Zn-Mg-Cu-Zr 合金组织与性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2016,21(1):

50-58.
XU Jie, CHEN Kanghua, CHEN Songyi, et al. Effects of trace Ti and Cr on microstructure and properties of Al-Zn-Mg-Cu-Zr alloys[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2016, 21(1):50-58.

[8] YAN X D, ZHAO M C, YANG Y, et al. Improvement of biodegradable and antibacterial properties by solution treatment and micro-arc oxidation (MAO) of a magnesium alloy with a trace of copper[J]. Corrosion Science, 2019,156:125-138.

[9] LI X K, WANG W, WU Y H, et al. Improving the corrosion resistance of 7055 alloy by manipulating passivation film through trace addition of TiB_2 nanoparticles[J]. Applied Surface Science, 2024,656:159722.

[10] 黄继武,朱鑫文,赖毅,等. 共格 $Al_3(Sc_{1-x}Zr_x)$ 粒子提升高强铝合金棒材强度和耐蚀性能的机理[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(6):1436-1451.
HUANG Jiwu, ZHU Xinwen, LAI Yi, et al. Mechanism of coherent $Al_3(Sc_{1-x}Zr_x)$ particles in enhancing strength and corrosion resistance of high-strength aluminum alloy rods[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021,31(6):1436-1451.

[11] CHUNG T F, YANG Y L, HUANG B M, et al. Transmission electron microscopy investigation of separated nucleation and in-situ nucleation in AA7050 aluminium alloy[J]. Acta Materialia, 2018, 149:377-387.

[12] ZHENG F L, CHEN H S, WANG W X, et al. Microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu (7075) alloy tubes prepared via power stagger spinning[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023,33(8):2287-2302.

[13] 成义锐,孙小涵,贺永东,等. Sc 对 Al-8.5Zn-2.3Mg-2.4Cu 合金组织与性能的影响[J]. 矿冶工程, 2024,44(5):142-147.
CHENG Yirui, SUN Xiaohan, HE Yongdong, et al. Effect of Sc on microstructure and properties of Al-8.5Zn-2.3Mg-2.4Cu alloy[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(5):142-147.

[14] YUAN D L, CHEN S Y, CHEN K H, et al. Correlations among stress corrosion cracking, grain-boundary microchemistry, and Zn content in high Zn-containing Al-Zn-Mg-Cu alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021,31(8):2220-2231.

[15] FENG L, PAN Q L, WEI L L, et al. Through-thickness inhomogeneity of localized corrosion in 7050-T7451 Al alloy thick plate[J]. Journal of Central South University, 2015,22(7):2423-2434.

[16] XIA P, WANG S C, HUANG H L, et al. Effect of Sc and Zr additions on recrystallization behavior and intergranular corrosion resistance of Al-Zn-Mg-Cu alloys[J]. Materials, 2021,14(19):2545-2557.

[17] 荚利宏,李逸伦,黄粒,等. 铝合金点蚀研究现状[J]. 材料保护, 2022,55(增刊1):77-85.
JIA Jinhong, LI Yilun, HUANG Li, et al. Research status of aluminum alloy pitting corrosion[J]. Materials Protection, 2022,55(S1):77-85.

引用本文:康喜,尹登峰,徐宏宇,等. 微量 Mn、Ti、Cr 对 Al-Zn-Mg-Cu-Zr 合金组织和性能的影响[J]. 矿冶工程, 2026,46(1):175-180.
KANG Xi, YIN Dengfeng, XU Hongyu, et al. Effects of trace Mn, Ti and Cr on microstructure and properties of Al-Zn-Mg-Cu-Zr alloys[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):175-180.

《矿冶工程》征订启事

《矿冶工程》(双月刊)由长沙矿冶研究院有限责任公司、中国金属学会主办,面向国内外公开发行。本刊是中国期刊方阵“双效期刊”、全国中文核心期刊、中国科技核心期刊、CACJ 中国应用型核心期刊,是集学术性和技术性于一体的综合性刊物,已被中国知网(CNKI)、万方数据库、重庆维普资讯、长江文库等全文收录,是国外多家知名检索机构的检索对象。

《矿冶工程》读者对象是采矿、选矿、冶金、材料、地质、化工等系统的有关生产人员、院校师生和管理人员。主要栏目为采矿、选矿、冶金、材料、矿冶行业企业管理等,内容新颖,是开拓、激发创造力的良师益友。

《矿冶工程》编辑部承接彩色、黑白及文字广告业务,欢迎各企事业单位来电来函联络。

《矿冶工程》真诚欢迎新、老订户向全国各地邮局订阅本刊,也可直接向编辑部订阅。邮发代号:42—58,大16开,定价20元/册,全年6册共120元。

地　　址:湖南省长沙市麓山南路966号
邮　　编:410012
电　　话:(0731)88657070/88657176/88657173
传　　真:(0731)88657186
E-mail:kuangyegongchengzz@163.com

联 系 人:黄小芳
开户名称:矿冶工程杂志(长沙)有限公司
开户银行:工商银行长沙左家垅支行
账　　号:1901013009201095502
网　　址:http://www.kygczz.com