

固溶处理温度对 ZXAQ3110 镁合金组织及性能的影响

贺 垚¹ 张学拯^{1,2} 何 慕¹ 陈体军^{1,2}

(1. 兰州理工大学材料科学与工程学院, 兰州 730050; 2. 兰州理工大学省部共建有色金属合金加工教育部重点实验室, 兰州 730050)

摘 要 研究了固溶处理温度(425、475 和 525 °C)对触变成形 ZXAQ3110(Mg-3.16Zn-0.97Ca-0.55Al-0.44Ag)镁合金微观组织和力学性能的影响。结果表明,固溶处理使得合金中共晶组织和第二相逐渐溶解,初生 α 颗粒逐渐长大,平均晶粒尺寸增大,再结晶程度增加。随着固溶温度升高,合金强度先升高后下降,475 °C 固溶处理后合金的强塑性获得了更好的协同提升,抗拉强度和伸长率分别为 311 MPa 和 13.6%。同时,建立的相关强化模型表明优良强塑性匹配主要归因于固溶强化、织构强化、晶界强化和位错强化的综合作用,各强化机制的线性叠加与试验值对应,表明该模型能够很好地预测该合金的强度。

关键词 镁合金;触变成形;固溶处理;微观组织;力学性能

中图分类号 TG146.22;TG156

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20240180

Effects of Solution Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of ZXAQ3110 Magnesium Alloy

HE Yao¹, ZHANG Xuezheng^{1,2}, HE Mu¹, CHEN Tijun^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050; 2. Key Laboratory of Non-ferrous Metal Alloys and Processing, Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050)

Abstract: The effects of solution treatment temperatures (425, 475 and 525 °C) on the microstructure and mechanical properties of thixoformed ZXAQ3110(Mg-3.16Zn-0.97Ca-0.55Al-0.44Ag) magnesium alloys were investigated. The results reveal that solid solution treatment can result in the gradual dissolution of eutectic structure and the second phase in the alloy, the gradual growth of primary α phase, and the increase in average grain size and recrystallization degree. As solid solution temperature rises, the strength of the alloy is firstly increased and then decreased. The synergistic improvement in the strength and plasticity of the alloy can be achieved after solid solution treatment at 475 °C, where the tensile strength and elongation are 311 MPa and 13.6%, respectively. Meanwhile, the established correlation strengthening model reveals that the excellent match between strength and plasticity is mainly attributed to the comprehensive effect of solid solution strengthening, texture strengthening, grain boundary strengthening, and dislocation strengthening. The linear superposition of each strengthening mechanism corresponds to experimental values, indicating well prediction for strength of the alloy.

Key Words: Magnesium Alloy, Thixoforming, Solution Treatment, Microstructure, Mechanical Properties

镁合金因其密度小、强度高、弹性模量大、散热好、消振性好、承受冲击载荷能力强、耐有机物和碱腐蚀等

特点,受到研究者的广泛关注^[1-5]。镁合金的应用不仅满足了社会对节约能源和环境保护的要求,同时也为

收稿日期:2024-04-29;修订日期:2024-05-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(2018YFB2001802)

第一作者简介:贺垚,男,1995年出生,硕士研究生, E-mail: 2212064866@qq.com

通信作者:陈体军,男,1971年出生,教授, E-mail: chentj@lut.com

引用格式:贺垚,张学拯,何慕,等. 固溶处理温度对 ZXAQ3110 镁合金组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2025,45(11):1 726-1 733.

HE Y, ZHANG X Z, HE M, et al. Effects of solution temperature on microstructure and mechanical properties of ZXAQ3110 magnesium alloy [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(11): 1 726-1 733.

- [13] 严鹏飞,臧旭,宋体杰,等.电感耦合等离子体原子发射光谱法测定 Ti65 高温钛合金中 16 种元素[J].分析测试学报,2024,43(9): 1 348-1 355.
- [14] 王勇,李子敬,邵国庆,等.微波消解-电感耦合等离子体原子发射光谱法测定钛及钛合金中 19 种元素的含量[J].理化检验-化学分册,2024,60(7):710-717.
- [15] 张环月,季守华,李春艳.X 射线荧光光谱法测定铬、钒、钛共存的钛合金中 12 种元素[J].冶金分析,2014,34(5):30-34.
- [16] 司圳棋,魏科,刘合燕,等.镍基高温合金和精密合金光谱分析标准物质的研制[J].冶金标准化与质量,2023,61(2):7-12.

- [17] 韦建环,高晋峰.碳硫仪用含碳标准物质标准值的溯源性确认[J].武汉理工大学学报,2022,44(7):24-29.
- [18] 赵教育,陈超选,张亚娟,等.TC11 钛合金光谱分析标准物质的研制[J].化学分析计量,2012,21(1):4-6.
- [19] 赵教育,宇文建鹏,陈超选,等.Ti-6Al-4V 钛合金光谱分析标准物质的研制[J].化学分析计量,2007(1):4-7.
- [20] 赵教育,张亚娟,袁满,等.Ti80 钛合金光谱分析标准物质的研制[J].化学分析计量,2015,24(2):16-18.

(编辑:刘晨辉)

各行业带来了新的发展机遇。然而,镁合金也存在一些缺点,如强度较低、耐磨性能和加工性能不佳等,这些缺点限制了镁合金的进一步应用。因此,开发高性能镁合金体系和新型的镁合金加工工艺成为了一个重要的研究方面。高性能镁合金体系的开发是通过向镁合金基体中引入不同的合金元素来提升镁合金的强度、耐磨性和耐腐蚀性等性能,从而满足更加严苛的应用环境和使用要求。可以通过添加特种合金元素、优化合金成分、改进合金制备工艺等来提高镁合金的性能^[6-8]。此外,应用新型加工方法制造镁合金也是提高其性能和产品品质的重要方式。目前常用的镁合金成形技术有半固态铸造、挤压铸造、压铸、重力铸造和低压铸造等^[9-11]。

热处理可有效调控镁合金中第二相的形状、尺寸和分布,因此其对镁合金的力学性能起着十分重要的作用^[12-13]。LI S 等^[14]研究了退火、T4 和 T6 热处理对 ZWK3 镁合金相变序列的影响,发现析出相与基体存在明显取向关系,T4 和 T6 热处理提升了抗拉强度但降低了伸长率。GUO Y Y 等^[15]研究了热处理对 AZ80M 镁合金组织和力学性能的影响,发现 T4 热处理能够改善显微偏析,T5 热处理后第二相维持网状分布,而 T6 热处理后则析出了微小 β 相。此外,T6 热处理后提升了合金强度和延展性,而 T4 热处理后的合金则表现出最高的延展性。HUANG W Y 等^[16]研究了热处理和预应变对 AZ91-0.5Y 镁合金动态析出和蠕变性能的影响,其中 SP 试样表现出最高的蠕变抗力,这与 $Mg_{17}Al_{12}$ 相的类型和密度有关。预应变引入的孪晶导致球形 $Mg_{17}Al_{12}$ 相增多,促进锥形 $\langle c+a \rangle$ 滑移和孪晶,提升了蠕变性能。XIAN J W 等^[17]研究了热处理对 Al_8Mn_5 和 $Al_{11}Mn_4$ 的晶体学和动力学的影响,发现热处理有助于铝锰化合物与 Mg 基体接触,从而提升腐蚀性能。YUAN G Y 等^[18]研究了 SC(砂型铸造)和 HPDC(压铸)镁合金在 T4 和 T6 热处理前后的热性能,发现 HPDC 合金初始热导率高于 SC 合金,但 T4 热处理降低其热导率,而 T6 处理提高其热导率,揭示了热处理对镁合金热性能的影响机理。因此,研究固溶处理温度对 ZXAQ3110 (Mg-3.16Zn-0.97Ca-0.55Al-0.44Ag, 质量分数,%,下同)镁合金微观组织及力学性能的影响十分必要,其有助于进一步加深对镁合金优良强塑性匹配引发机制的理解。基于此,本研究考察不同温度(425、475 和 525 $^{\circ}\text{C}$)固溶处理对触变成形 ZXAQ3110 镁合金微观组织及元素分配的影响。此外,分析该合金最佳的强塑性匹配并量化各强化因素对合金强度的贡献,旨在为相关研究提供参考。

1 试验材料及方法

首先按照目标合金成分分配比将质量分数为 99.9%

的纯 Mg、Mg-20Ca 以及质量分数均为 99.9% 的纯 Zn、纯 Al、纯 Ag 依次放入坩锅中在 750 $^{\circ}\text{C}$ 熔炼,随后将其浇注到经过 150 $^{\circ}\text{C}$ 预热的圆柱体紫铜模具中。图 1 为 ZXAQ3110 镁合金棒坯的 DSC 分析曲线。结果显示镁合金固液相温度区间为 579~625 $^{\circ}\text{C}$ 。因此为防止加热过程中棒坯发生氧化,首先将管式真空炉先抽真空并通入氩气,然后棒坯在半固态温度 600 $^{\circ}\text{C}$ 保温 60 min 后触变成形,最终获得尺寸为 $\phi 50\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 的 ZXAQ3110 镁合金锭料,其化学成分见表 1。触变成形的 ZXAQ3110 镁合金微观组织见图 2,主要由粗大晶粒及其周围的大量细小晶粒组成,在初生 α 颗粒的晶界处观察到许多第二相存在。此外,KAM 图显示合金内部存在严重的应力集中。拉伸测试表明该合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 300 MPa、190 MPa 和 12%。将触变成形后的 ZXAQ3110 镁合金锭料放入管式真空炉,分别在 425、475 和 525 $^{\circ}\text{C}$ 固溶处理 2 h,后立即水淬。

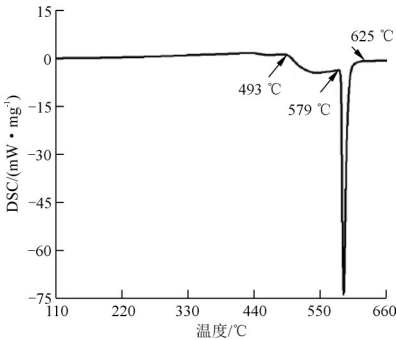


图 1 ZXAQ3110 镁合金棒坯的 DSC 分析

Fig.1 DSC analysis of ZXAQ3110 magnesium alloy billet

表 1 ZXAQ3110 镁合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of ZXAQ3110 magnesium alloy %

w_B				
Zn	Ag	Al	Ca	Mg
2.74	0.70	0.39	0.16	余量

采用线切割在触变成形后的锭料中心处切取金相试样(尺寸为 10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 10 mm),首先采用手工研磨,依次使用 400、800、1 000、1 200、1 500、2 000、3 000 和 5 000 号金相砂纸完成粗磨到精磨的过程,在研磨过程中,每更换一次砂纸将试样旋转 90 $^{\circ}$ 。随后,将研磨好的组织样用高纯度纳米级氧化铝抛光液和阻尼抛光布进行机械抛光,直至表面无划痕。最后进行腐蚀处理,1 号腐蚀剂的组成为 4 mL 的 HNO_3 +96 mL 的无水乙醇,2 号腐蚀剂组成为苦味酸 4.2 g+无水乙醇 70 mL+冰醋酸 10 mL+蒸馏水 10 mL。经过固溶处理的镁合金试样用 1 号和 2 号腐蚀剂的混合腐蚀剂进行腐蚀,腐蚀时间为 5 s 左右,然后马上用无水酒精冲洗,用吹风机吹干。1 号腐蚀剂和 2 号腐蚀剂按照 2:1 的比例混合。采用 LSM 800 型激光共聚焦光学显微镜

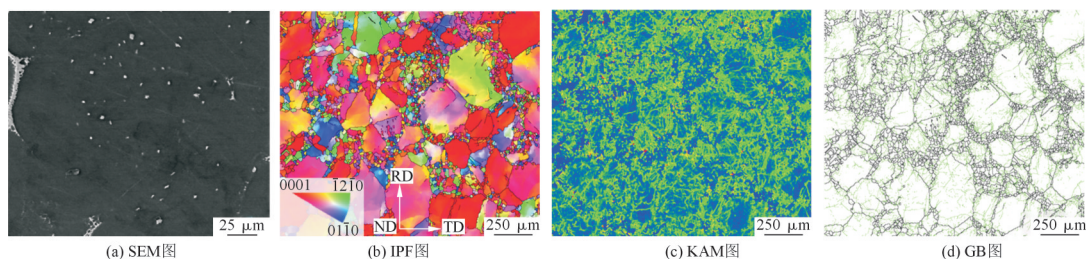


图 2 触变成形 ZXAQ3110 镁合金的微观组织

Fig.2 Microstructure of thixoformed ZXAQ3110 magnesium alloy

(OM)、QUANTA FEG4500 和 ZEISS Sigma300 型扫描电镜 (SEM)、Nordlysmax3 型背散射电子衍射仪 (Electron Back Scatter Diffraction, EBSD)、EPMA1600 型电子探针分析仪 (EPMA) 进行微观组织和结构的观察。拉伸性能测试在 WDW-100D 型电子万能材料拉伸试验机上进行, 试样尺寸示意图见图 3, 拉伸速率为 0.2 mm/min。

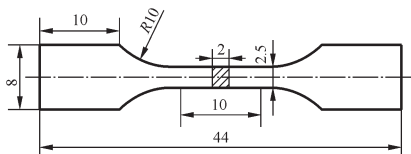


图 3 拉伸试样尺寸示意图

Fig.3 Schematic diagram of tensile specimen

2 试验结果与分析

2.1 固溶温度对镁合金微观组织的影响

图 4 为经 425、475 和 525 °C 固溶处理后 ZXAQ3110 镁合金的微观组织。可以看出, 经过 425 °C 固溶处理后, 晶界处的共晶组织消失, 初生 α 颗粒形成过饱和固

溶体并呈现多边形形状。当固溶温度为 475 °C 时, 初生 α 颗粒进一步长大, 晶间的共晶组织数量和体积逐渐减小, 共晶组织回溶程度进一步加深。随着固溶温度继续升高至 525 °C 时, 初生 α 颗粒圆整度进一步降低, 只剩少量点状共晶组织分散在晶界间。此外, 随着固溶温度升高, 第二相的形态发生了显著变化。当固溶温度从 425 °C 升至 475 °C, 第二相平均尺寸从 2.95 μm 减小至 2.02 μm , 体积分数从 8.66% 减小至 5.46%。525 °C 固溶处理后的合金内部的小尺寸、高密度的第二相完全消失, 说明第二相已经完全回溶。

图 5 和图 6 为经 425、475 和 525 °C 固溶处理后

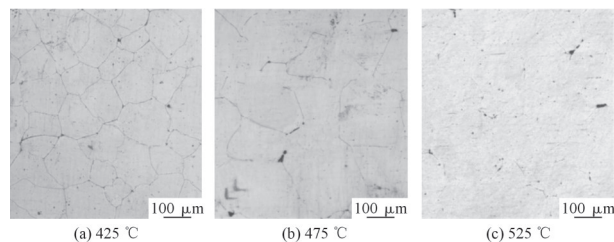


图 4 固溶处理后 ZXAQ3110 镁合金的微观组织

Fig.4 Microstructure of ZXAQ3110 magnesium alloys after solid solution treatment

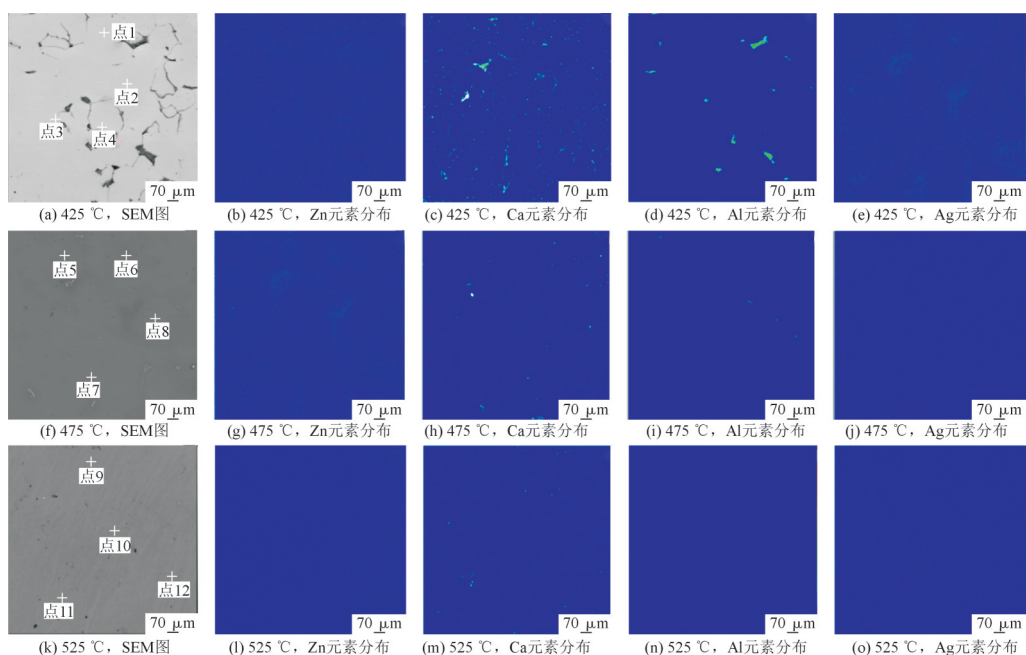


图 5 固溶处理后 ZXAQ3110 镁合金的 SEM 形貌及 EPMA 元素面扫描

Fig.5 SEM morphologies and EPMA surface scanning of ZXAQ3110 magnesium alloys after solution treatment

ZXAQ3110 镁合金的 EPMA 结果和元素分布。每个区域取 4 个点进行点扫描,其中 2 个点位于晶内,2 个点位于晶界,取其平均值。当固溶温度为 425 °C 时,观察到大量第二相存在,主要沿晶界分布。Zn 和 Ag 元素在合金内部均匀分布,而 Ca 和 Al 元素主要富集在第二相中。由图 6 可知,Zn、Ca、Al 和 Ag 元素浓度分别为 2.773%、0.212%、0.447% 和 0.738%。当固溶温度升高至 475 °C,可以观察到合金内部仅存在少量第二相,溶质原子的热运动加剧,扩散能量升高,更多的溶质原子扩散至镁合金基体中,Zn、Ca、Al 和 Ag 元素浓度迅速升高至 2.833%、0.238%、0.474% 和 0.863%。当固溶温度进一步升高至 525 °C,第二相基本消失,基体中溶质原子趋于饱和,Ag 元素溶质原子浓度提高至 0.899%,而其余元素浓度则保持稳定。

图 7 为经 425、475 和 525 °C 固溶处理后 ZXAQ3110 镁合金的 IPF 图和对应的晶粒尺寸图。可以看出,当固溶温度为 425 °C 时,合金内部晶粒尺寸分布不均匀,其平均晶粒尺寸为 48.15 μm。在大尺寸的再结晶晶粒周围观察到许多细小晶粒,这是由于此时固溶温度较低,

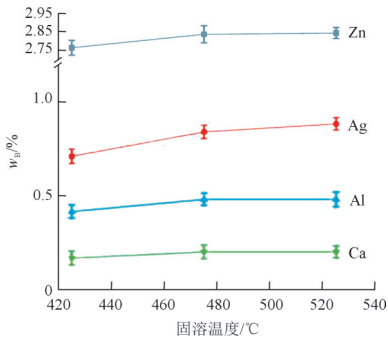


图 6 固溶处理后 ZXAQ3110 镁合金溶质原子浓度
Fig.6 Solute atomic concentration in ZXAQ3110 magnesium alloys after solid solution treatment

只有部分晶粒获得了足够的能量发生了完全再结晶,大部分晶粒依然保持固溶处理前的形态。当固溶温度升高至 475 °C 时,镁合金的晶粒尺寸增大,其平均晶粒尺寸为 84.85 μm。同时,晶粒尺寸分布更加均匀,大部分晶粒已经再结晶。随着固溶温度继续提升至 525 °C 时,镁合金内部细小的变形晶粒完全消失,只观察到了完全再结晶的粗大晶粒,其平均晶粒尺寸增大至 115.82 μm,这是由于高温为再结晶的发生提供了足够的能量。

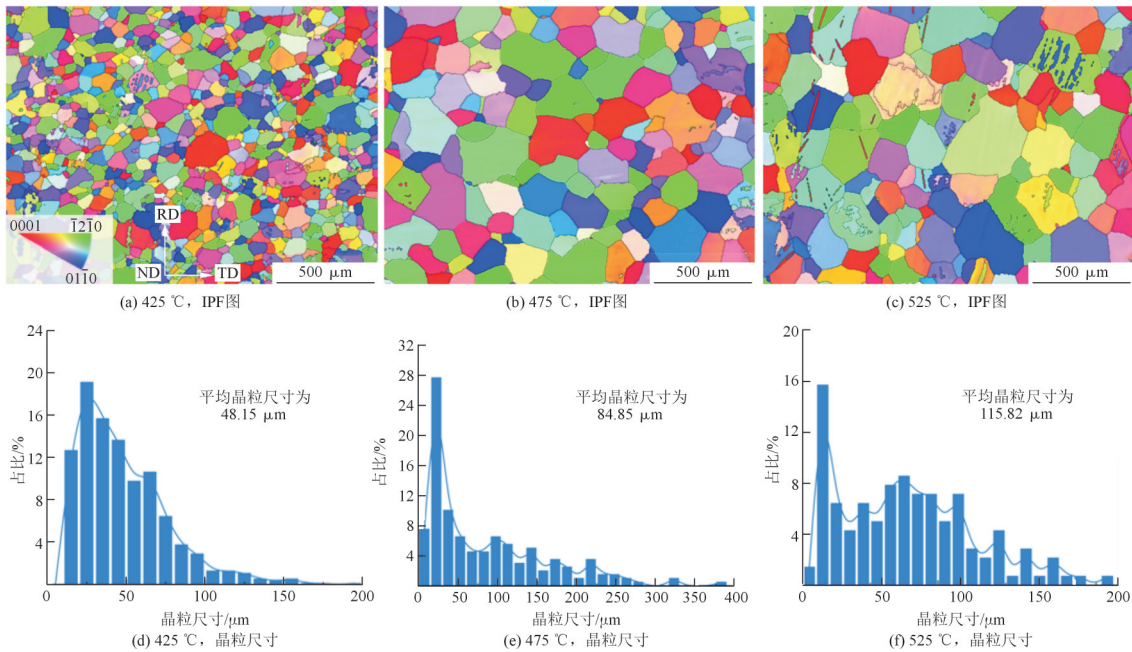


图 7 固溶处理后 ZXAQ3110 镁合金的 IPF 图和对应该晶粒尺寸
Fig.7 IPF maps and corresponding grain size of ZXAQ3110 magnesium alloys after solid solution treatment

图 8 为经 425、475 和 525 °C 固溶处理后 ZXAQ3110 镁合金的 KAM 图。可以看出,当固溶温度为 425、475 和 525 °C 时,镁合金的 KAM 值分别为 0.33、0.31 和 0.22 rad。随着固溶温度升高,镁合金的 KAM 值逐渐降低,表明合金内部的应力集中被缓解。通过合金的局部平均取向差,可以进一步统计出合金内部的位错密度,这直接关系到镁合金的强化作用。镁合金位错

的密度(ρ)可通过下式计算^[19]:

$$\rho = \frac{2\Delta\theta}{\mu b} \tag{1}$$

式中, $\Delta\theta$ 为镁合金平均 KAM 值,rad; μ 为 EBSD 测试步长,0.24 μm; b 为伯氏矢量,其值为 3.21×10^{-10} m。由式(1)计算得固溶温度为 425、475 和 525 °C 时镁合金的位错密度分别为 8.51×10^9 、 8.05×10^9 和 $5.71 \times$

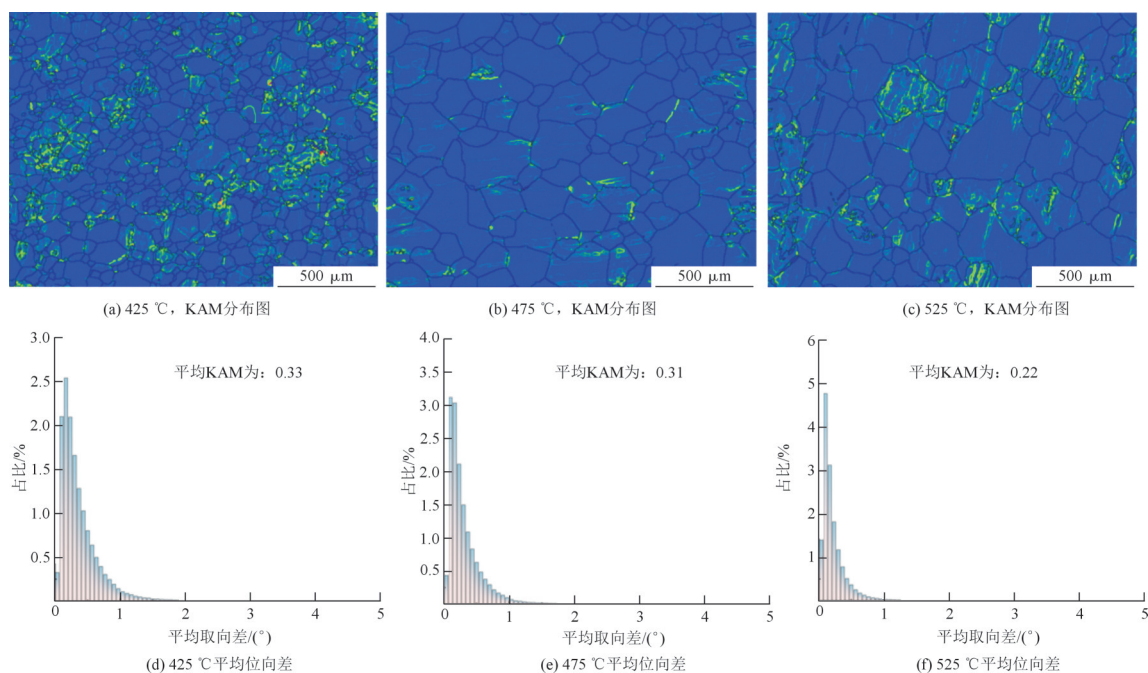


图8 固溶处理后 ZXAQ3110 镁合金的局部错配角分析

Fig.8 Local misorientation analysis of ZXAQ3110 magnesium alloys after solid solution treatment

10^9 m^{-2} 。由此可见,随着固溶温度升高,ZXAQ3110 镁合金的位错密度逐渐降低,合金内部的应力集中现象逐渐消失。

图 9 为经 425、475 和 525 °C 固溶处理后 ZXAQ3110 镁合金的再结晶度图。可以看出,当固溶温度为 425 °C 时,由于温度较低,再结晶驱动力较低,晶粒没有得到充分的能量进行重排和长大,再结晶晶粒占比为 56.97%。当固溶温度升高至 475 °C 时,内部

储能较低的变形晶粒获得足够的能量进行再结晶,再结晶晶粒占比升高至 62.17%。当固溶温度升高至 525 °C 时,由于固溶温度过高,导致了镁合金晶粒的重排、长大以及组织取向的改变,再结晶晶粒的比例升高至 68.07%,而亚晶的比例降低至 31.62%。在这一过程中,部分亚晶结构转化为再结晶晶粒,导致晶粒粗化。同时,晶界和位错的数量减少,导致镁合金的强度降低。

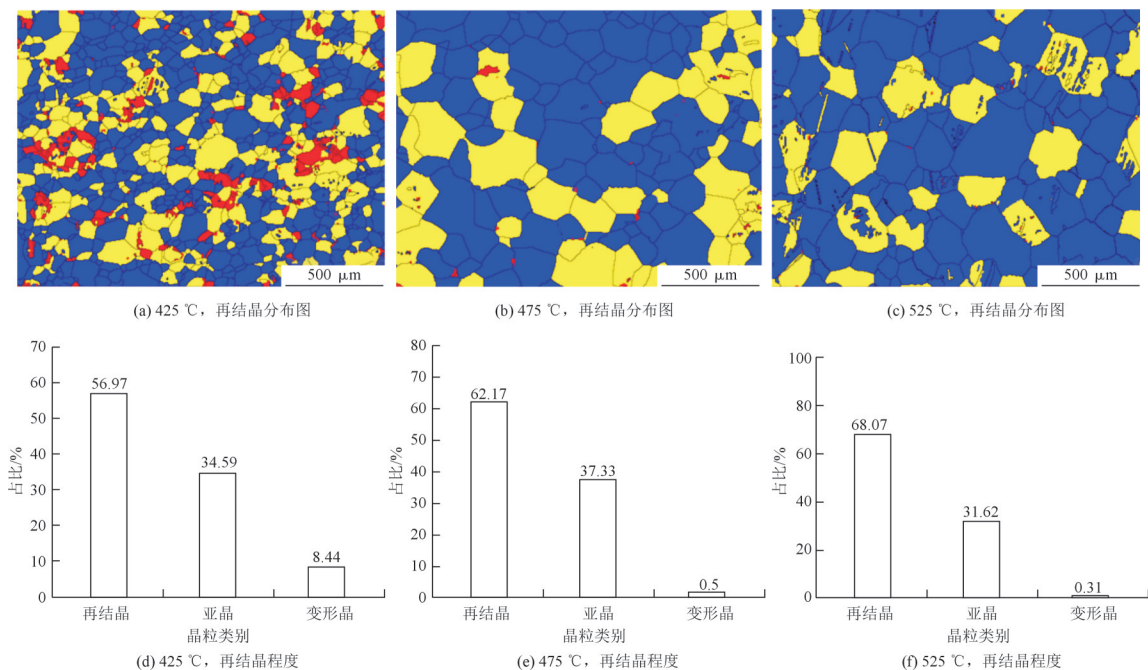


图9 固溶处理后 ZXAQ3110 镁合金的再结晶分布及晶粒占比

Fig.9 Recrystallization distribution and grain percentage of ZXAQ3110 magnesium alloys after solid solution treatment

2.2 固溶温度对镁合金力学性能的影响

图10为经425、475和525℃固溶处理后ZXAQ3110镁合金的力学性能。可以发现,随着镁合金的固溶温度由425℃升高到525℃,镁合金的抗拉强度、伸长率呈先升高后降低的趋势,屈服强度呈逐渐降低的趋势。镁合金的抗拉强度和伸长率经475℃固溶处理后出现最大值,分别为311 MPa、13.6%。值得注意的是,屈服强度和抗拉强度变化趋势并不一致,并且475℃固溶处理后合金获得了最大的屈强比,这得益于其内部弥散分布的细小第二相阻碍位错运动提高了抗拉强度,同时避免了晶粒过于粗大而急剧降低屈服强度。

图11为经425、475和525℃固溶处理后ZXAQ3110镁合金的拉伸断口形貌。可以看出,当固溶温度低于475℃时,合金的断口形貌表现出明显的脆性断裂的特征。在解理面上可以观察到一定数量的裂纹、孔洞和凹坑,对合金的力学性能不利。此外,存在大量的穿晶

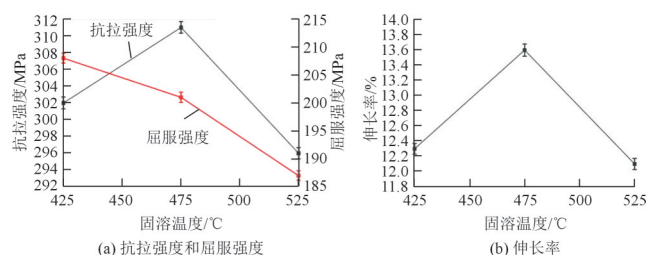


图10 固溶处理后ZXAQ3110镁合金的力学性能

Fig.10 Mechanical properties of ZXAQ3110 magnesium alloys after solid solution treatment

断裂和沿晶断裂的共同特征。当固溶温度为475℃时,断口的解理面周围存在不同方向的撕裂棱,同时仍存在少部分韧窝,合金的断口形貌呈混合型断裂特征。因此在475℃时,合金的强度和塑性增强。然而,当固溶温度达到525℃时,断口表面的韧窝几乎消失,出现大量大面积的解理台阶,显微裂纹的数量也逐渐增加,断口表面较为平整,断裂处具有明显的沿晶断裂特征。因此,当固溶温度超过475℃后,合金的强度和塑性逐渐降低。

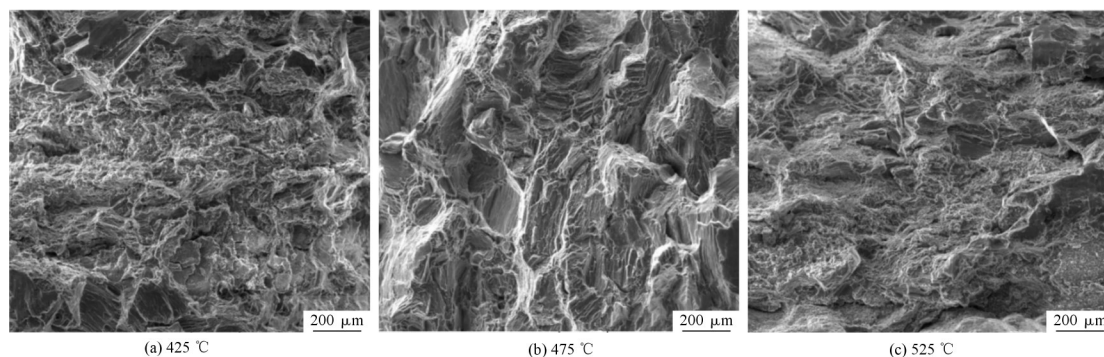


图11 不同固溶处理温度镁合金拉伸断口SEM形貌

Fig.11 SEM morphologies of tensile fracture of ZXAQ3110 magnesium alloys after solid solution treatment

2.3 固溶处理对镁合金力学性能的强韧化机制

固溶处理会导致第二相溶解,元素固溶度进一步增加。溶质原子扩散引起了晶格畸变,阻碍位错运动从而提高合金的力学性能。固溶强化对合金屈服强度的贡献 σ_{ss} 可以通过下式计算^[20]:

$$\sigma_{ss} = \frac{3.1\epsilon Gc^{\frac{1}{2}}}{700} \quad (2)$$

式中, G 为基体的剪切模量,Mg为 1.66×10^4 MPa^[21]; ϵ 为常数,Mg通常取0.74^[22]; c 为溶质的摩尔分数。

由于合金内部Zn原子固溶度最大,且其与基体原子直径差达到 5.2×10^{-11} m,因此Zn原子对合金固溶强化影响最大。通过式(2)计算得到经425、475和525℃固溶处理镁合金的固溶强化值分别为147.17、143.62和144.34 MPa。

晶粒的取向分布存在一定规律性的有序结构被称

为织构,这种晶粒的特定取向分布会对该方向上的力学性能产生明显影响。织构强化对合金屈服强度的贡献 σ_{tex} 通过下式进行计算^[23]:

$$\sigma_{tex} = m\tau_0 \quad (3)$$

式中, m 为与织构强度有关的Taylor取向因子,其值约为合金织构强度的6.5倍; τ_0 为基面滑移的临界分切应力,其值约为0.49 MPa。EBSD极图显示镁合金经425、475和525℃固溶处理后的织构强度分别为16.90、12.86和10.40 rad,通过式(3)计算得到织构强化的数值分别为53.83、40.96和33.12 MPa。上述分析表明,提高固溶温度能有效降低合金内部的择优取向,组织均匀程度提高,但会降低合金内部的织构强化效果。

热处理或变形等方式都会使合金晶粒尺寸发生变化。晶粒越细小、晶界数量越多,位错运动受到的阻力也就越大,这导致了晶界强化。晶界强化对合金屈服强度的贡献 σ_{GB} 可以通过下式计算^[24-25]:

$$\sigma_{GB} = Kd^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中, K 为常数, Mg 中通常取 $188 \text{ MPa} \cdot \mu\text{m}^{\frac{1}{2}[26]}$; d 为合金的平均晶粒尺寸, μm 。已知镁合金经 425、475 和 525 °C 固溶处理后的晶粒尺寸分别为 48.150、84.856 和 115.82 μm , 通过式(4)计算得到晶界强化的数值分别为 27.09、20.41 和 17.47 MPa 。

通过 KAM 分析得知加工成形的位错并未完全消除, 这些残存位错仍然会对合金的力学性能产生明显影响。位错引起的 σ_{Dislo} 贡献 σ_{Dislo} 可以由下式计算^[27]:

$$\sigma_{Dislo} = M\alpha Gb\sqrt{\rho_{GND}} \quad (5)$$

式中, M 为泰勒因子, 2.6; α 为常数, $\alpha=0.2$; G 为剪切模量, 25 GPa ^[28]。经 425、475 和 525 °C 固溶处理后镁合金的位错密度分别为 8.51×10^9 、 8.05×10^9 和 $5.71 \times 10^9 \text{ m}^{-2}$, 通过式(5)计算可得出位错强化值分别为 0.22、0.53 和 0.74 MPa 。

通过上述分析, 可知 ZXAQ3110 镁合金的强化机制主要由织构强化(σ_{tex})、晶界强化(σ_{GB})、固溶强化(σ_{ss})和位错强化(σ_{Dislo})贡献。假设以上强化机制之间无交互作用, 可采用线性叠加法计算镁合金的理论屈服强度 σ_T :

$$\sigma_T = \sigma_{tex} + \sigma_{ss} + \sigma_{GB} + \sigma_{Dislo} \quad (6)$$

综上, 可以得出各强化机制对经 425、475 和 525 °C 固溶处理镁合金的理论屈服强度分别为 228.31、205.52 和 195.67 MPa 。可以发现, 对于在不同温度固溶处理后的镁合金, 计算得出的屈服强度与试验值非常接近(见图 12), 一方面可以证明镁合金的强化机制确实源自以上 4 种机制, 另一方面表明该强化模型能够较为准确地预测镁合金经过固溶处理之后的屈服强度。

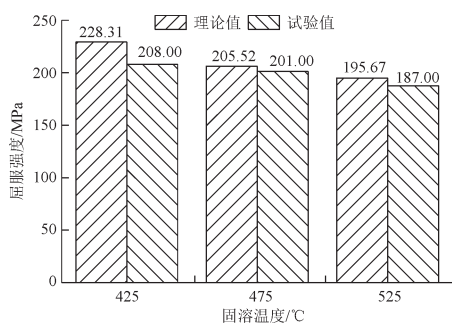


图 12 不同固溶温度镁合金屈服强度理论值与试验值

Fig.12 Theoretical and experimental yield strength of magnesium alloys at different solution temperatures

3 结 论

(1)随着固溶温度升高,ZXAQ3110 镁合金晶界处的共晶组织和晶内第二相都逐渐溶解,第二相平均晶

粒尺寸和体积分数逐渐降低,在 475 °C 后晶内第二相基本完全溶解;固溶温度的升高使初生 α 颗粒逐渐长大,其逐渐合并共晶组织,颗粒圆整度逐渐降低。此外,EBSD 分析表明随着固溶温度升高,合金平均晶粒尺寸从 48.15 μm 增加至 115.82 μm 。

(2)随着固溶温度升高,合金的抗拉强度和伸长率表现出先升高后降低的趋势。经过 475 °C 固溶处理之后,ZXAQ3110 镁合金的强塑性可以获得更好的协同提升。镁合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 311 MPa 、201 MPa 和 13.6%。固溶温度为 475 °C 时,合金的断口形貌呈现出典型的混合断裂特征,解理面周围存在不同方向的撕裂棱,同时也存在少量韧窝。因此,在 475 °C 时,合金的强度和塑性得到增强。

(3)ZXAQ3110 镁合金的优良强塑性匹配引发机制应当归因于固溶强化、织构强化、晶界强化、位错强化等对合金屈服强度的联合贡献。建立的强化模型计算得到经 425、475 和 525 °C 固溶镁合金理论屈服强度分别为 228.31、205.52 和 195.67 MPa ,能够较为准确地预测合金的力学性能。

参 考 文 献

- [1] 吴晓阳.我国镁资源开发利用现状及发展对策[J].现代矿业, 2023,39(9):33-38,48.
- [2] 唐伟能,莫宁,侯娟.增材制造镁合金技术现状与研究进展[J].金属学报,2023,59(2):205-225.
- [3] LI G, QU W Y, LUO M, et al. Semi-solid processing of aluminum and magnesium alloys: Status, opportunity, and challenge in China [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31 (11): 3 255-3 280.
- [4] ELAMBHARA THI B, KUMAR S D, DHANOOP V U, et al. Novel insights on different treatment of magnesium alloys: A critical review[J]. Heliyon, 2022, 8(11): 11 712.
- [5] 张文毓.耐蚀镁合金研究现状与应用进展[J].全面腐蚀控制, 2019,33(1):6-10.
- [6] 李华成,冯志军,占亮,等.稀土元素在铸造镁合金中的应用及研究进展[J].铸造,2023,72(4):359-364.
- [7] 郑兴伟,袁杰,褚振华.多元稀土镁合金蠕变性能与机理研究进展[J].稀有金属与硬质合金,2020,48(5):55-61.
- [8] XUE N A. Comparison of cold-sprayed coatings of copper-based composite deposited on AZ31B magnesium alloy and 6061 T6 aluminum alloy substrates.[J]. Materials, 2023, 16(14): 16 145 120.
- [9] 赵洁,崔扬,张清,等.Mg-5Sm-(3,4)Gd合金热压缩行为的对比研究[J].中国稀土学报,2024,42(6):1 178-1 186.
- [10] 蒋滨安,周楠,余伟,等.快速凝固/粉末冶金技术制备挤压态 AZ91 合金热加工性能研究[J].材料研究与应用,2023,17(4):605-611.
- [11] 郑宗文,吴海龙,张志坤,等.镁合金铸造技术及其应用[J].中国金属通报,2022(3):76-79.
- [12] LI G, HU J Q, YANG G X, et al. The effect of different heat treatments on stress corrosion cracking of ZK60 magnesium alloy [J]. Materials Today Communications, 2024, 38: 107 866.

- [13] TAOHEED O S, IZMAN SUDIN, AHMED A, et al. Effect of homogenization heat treatment on the microstructure of AZ91 magnesium alloy at different temperatures and ageing times[J]. Journal of Engineering Research, 2023(11):212-218.
- [14] LI S, DONG X P, GUO S R, et al. Phase evolution and strengthening mechanisms in a cast magnesium-zinc-yttrium-zirconium alloy following different heat treatments[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 22:3 270-3 279.
- [15] GUO Y Y, QUAN G F, MERT C, et al. Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of AZ80M magnesium alloy fabricated by wire arc additive manufacturing[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2022(10):1 930-1 940.
- [16] HUANG W Y, HUANG H, LI W, et al. Influence of heat treatment and pre-straining on dynamic precipitation and creep behavior of AZ91-0.5Y magnesium alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2022, A841: 143 049.
- [17] XIAN J W, PENG L, ZENG G, et al. $Al_{11}Mn_4$ formation on Al_8Mn_5 during the solidification and heat treatment of AZ-series magnesium alloys[J]. Materialia, 2021, 19: 101 192.
- [18] YUAN G Y, YOU G Q, BAI S L, et al. Effects of heat treatment on the thermal properties of AZ91D magnesium alloys in different casting processes[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 766: 410-416.
- [19] CHEN T J, JIANG X D, MA Y, et al. Microstructural evolution and phase transformations during partial remelting of AZ91D magnesium alloy refined by SiC [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 497:147-154.
- [20] ZHANG S Q, CHEN T J, CHENG F L, et al. Microstructural evolution and phase transformation during partial remelting of in-situ $Mg_2Si_p/AM60B$ composite [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(6):1 564-1 573.
- [21] TAO J Q. Microstructure evolution of Mg-Gd-Y-Zn-Zr magnesium alloy during partial remelting [J]. Medziagotyra, 2014, 20 (4) : 436-439.
- [22] 林翰. Mg-Al基低成本铸造镁合金的研究与开发[D]. 重庆:重庆大学, 2018.
- [23] GAO L, CHEN R S, HAN E H. Effects of rare-earth elements Gd and Y on the solid solution strengthening of Mg alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 481(1-2):379-384.
- [24] LI C X, WEI J X, JIN J F, et al. The effect of precipitates on the fracture behavior and tensile properties of Mg-14Gd-0.5Zr (wt.%) alloy [J]. Journal of Materials Science Technology, 2024, 180: 226-242.
- [25] MABUCHI M, HIGASHI K. Strengthening mechanisms of Mg-Si alloys [J]. Acta Materialia, 1996, 44:4 611-4 618.
- [26] YANG Z, LI J P, GUO Y C, et al. Precipitation process and effect on mechanical properties of Mg-9Gd-3Y-0.6Zn-0.5Zr alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2007, A454:274-280.
- [27] LIU H, XUE F, BAI J, et al. Microstructure and mechanical properties of a Mg-4Y-4Ni, alloy with long period stacking ordered structure [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, 22(11):3 500-3 506.
- [28] HAO J Q, ZHANG J S, LI B Q, et al. Effects of 14H LPSO phase on the dynamic recrystallization and work hardening behaviors of an extruded Mg-Zn-Y-Mn alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2021, A804: 140 727.

(编辑:张正贺)

《特种铸造及有色合金》征订启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,INSPEC、CA、MA、AJ、JST、Scopus等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国60年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然科学期刊等。

本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料成形的理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,并报道各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术研究和科技信息以及上述内容的国内外发展动向、行业活动、学术会议、消息动态等。

本刊诚征国内外广告,业务范围:铸造及有色合金材料、辅助材料、铸造及相关设备、铸造生产线、测控与控制设备、仪器仪表、计算机应用软件、铸造展会等。

本刊为月刊,标准(大)16开,邮发代号38-109。邮发订价每期20元,全年240元。全国各地邮局均可订阅,也可直接向本刊编辑部邮购,本刊还提供过刊、压铸宝典和年会专刊邮购服务。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址:武汉市江岸区建设大道融玺1001大厦10楼

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024,

85358127

投稿邮箱:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

