

孔型轧制对钇添加 AZ91D 合金组织及性能的影响

张 明¹ 徐玉陵¹ 张 策²

(1. 宝玛克科技有限公司, 合肥 200039; 2. 河北工业大学材料科学与工程学院, 天津 300130)

摘 要 通过不同孔型轧制工艺成功制备(质量分数,下同)0.5% 钇添加 AZ91D 合金,对比研究了其微观组织、力学性能及耐腐蚀性的变化。结果表明,添加微量 Y 的合金经孔型轧制后晶粒显著细化,其中高温低速轧制试样力学性能最佳(屈服强度为 343 MPa,抗拉强度为 421 MPa,伸长率为 6.9%)。力学性能提高的主要原因是 Y 元素净化熔体、晶粒细化以及元素固溶和金属间化合物形成。但合金经孔型轧制后耐蚀性显著降低,这主要归因于变形过程中 β 相析出产生电化学腐蚀,同时孔型轧制变形产生的位错累积等缺陷也提高了腐蚀敏感性。

关键词 AZ91D 合金;孔型轧制;腐蚀行为;力学性能

中图分类号 TG146.22;TG335

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20250401

Effects of Caliber Rolling on Microstructure and Behavior of AZ91D Alloys With Y Addition

ZHANG Ming¹, XU Yuleng¹, ZHANG Ce²

(1. Baomaik Technology Co., Ltd., Hefei 200039; 2. School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130)

Abstract: AZ91D alloy with 0.5% (mass fraction) yttrium addition was successfully prepared using various caliber rolling processes, and the microstructure evolution, mechanical properties, and corrosion resistance were comparatively investigated. The results reveal that the grain is significantly refined after trace yttrium addition combined with caliber rolling, and specimens subjected to high-temperature and low-speed rolling exhibit desirable mechanical properties, where the yield strength, tensile strength and elongation are 343 MPa, 421 MPa, and 6.9%, respectively. The enhancement in mechanical properties is attributed to synergy of melt purification by Y, grain refinement, solid solution, and formation of intermetallic compounds. However, the as-rolled alloy presents poor corrosion resistance, which arises from the galvanic corrosion caused by precipitation of β phase during deformation, while defects such as dislocation accumulation resulting from caliber rolling deformation also enhance the corrosion susceptibility.

Key Words: AZ91D Alloy, Caliber Rolling, Corrosion Behavior, Mechanical Properties

镁合金具有密度小、比强度和比刚度较高且易于回收再利用,机加工性能与减震性能好等特点,在交通运输、计算机通讯、航空航天、国防安全及消费电子等领域得到重视并有广阔的发展前景^[1-2]。

在铸造镁合金中,AZ91D 因其高 Al 含量(9%,质量分数,下同)而具备优异的铸造流动性、较低的密度和在镁合金体系中相对优良的耐腐蚀性,使其成为目前应用最广泛、产量最大的压铸镁合金牌号^[3-4]。AZ91 合金的变形加工研究,具有一定的工业应用价值。

有研究发现,向 AZ91 中添加适量的 Y 元素可以改善其微观组织,从而提升力学性能^[5]。同时,AZ91

中 β -Mg₁₇Al₁₂相的形貌会对合金产生不同影响,晶间网状 β 相会使合金力学性能下降,而层片状和球状 β 相则可以提高合金的韧性,菱形 β 相则能有效提升合金的强度^[6]。此外,AZ91 在碱性环境中较好的耐蚀性,其基体可形成致密的钝化膜,但溶液中若存在 Cl⁻,表面钝化膜将被破坏进而导致基体被腐蚀,Cl⁻点蚀可形成潜在裂纹源并在应力作用下加速腐蚀^[7-8]。董天顺等^[9]研究发现,在 AZ91 中加入不同含量 Ca 可以改变铸态组织从而提高耐蚀性。但是铸态 AZ91D 镁合金的力学性能较差,限制了其应用范围。因此,如何提高其综合性能成为目前研究的重点。多道次孔型轧制作为一种新

收稿日期:2025-11-03;修订日期:2025-11-25

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(E2025202010);河北省教育厅自然科学基金资助项目(BJK2023075)

第一作者:张明,男,1975 年出生,工程师,E-mail: zhangming@baosteel.com

引用格式:张明,徐玉陵,张策. 孔型轧制对钇添加 AZ91D 合金组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2026,46(10):1 551-1 556.

ZHANG M, XU Y L, ZHANG C. Effects of caliber rolling on microstructure and behavior of AZ91D alloys with Y addition[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(10): 1 551-1 556.

型的大塑性变形手段,可使应变不断累积,促进动态再结晶细化粗大晶粒,破碎并均匀化第二相,从而改善材料的力学性能。但目前有关该工艺在镁合金中应用的报道较少,该工艺是否能够有效调控镁合金微观组织,提升综合性能仍未阐明。本研究系统对比研究 AZ91D 及 AZ91D+0.5Y 两种镁合金在不同孔型轧制后的显微组织、力学性能及耐腐蚀性能,旨在为相关研究提供参考。

1 试验过程与方法

试验用原材料为 AZ91D 合金、Mg-30Y 中间合金。采用重力铸造制备了名义成分为 Mg-9Al-1Zn (AZ91D)、Mg-9Al-1Zn-0.5Y (AZW910) 的合金,通过光谱测得实际成分为 Mg-8.82Al-0.89Zn 和 Mg-8.73Al-0.91Zn-0.45Y。将原料置于不锈钢坩埚中,利用 RJ2-30-9 型井式电阻炉加热至 750 ℃并保温,使原料充分熔融混合,以体积分数分别为 0.5%、99.5% 的 SF₆、CO₂ 混合气体作为保护气氛,待原料完全熔化后且熔体温度为 730 ℃时,浇注到预热至 200 ℃的圆柱模具中。孔型轧制前对铸锭在氩气气氛保护下热处理,通过 Pandat 相图计算及相关文献^[10-11]确定热处理条件:AZ91D 合金在 400 ℃下保温 24 h,AZW910 合金在 420 ℃下保温 24 h。热处理后对试样机加工为 $\phi 35$ mm×120 mm 的圆棒。孔型轧制工艺为^[12-14]轧制 8 道次,累积应变量为 75%,为使试样均匀变形,每道次轧制后将试样沿轴旋转 90°再进入下一道次变形,最后一道次轧制结束进行两次矫直后空冷,试样棒截面最终是边长为 15.8 mm,角度为 102°的菱形。孔型轧制工艺见表 1,孔型轧制示意图见图 1。

表 1 合金孔型轧制变形参数

Tab.1 Caliber rolling parameters of alloys

编号	温度/℃	速率/(m·s ⁻¹)	轧制通道顺序	变形量/%	终轧温度/℃
a	250	0.5	1→2→...→8→8	75	192
b	350	0.2		75	275

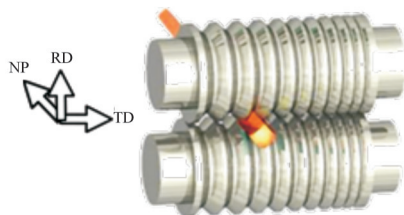


图 1 孔型轧机示意图

Fig.1 Schematic diagram of caliber rolling equipment

沿平行轧制方向试样芯部取 10 mm×10 mm×8 mm 试块,依次用 400~2 000 目砂纸打磨后抛光,采用

由 4.2 g 苦味酸+10 mL 冰乙酸+70 mL 酒精+10 mL 蒸馏水配置的溶液进行金相腐蚀,腐蚀时间为 28 s。采用 OLYCIAM3 金相分析系统(OM)、Smart Lab 型 X 射线衍射仪(XRD),以及 JSM-6510A 六硼化钨扫描电镜(SEM)进行微观组织表征。参照 GB/T 228.1-2023 加工拉伸试样,其示意图见图 2。选用 UTM5105G 电子万能试验机分别对铸态、轧制态两种合金进行室温拉伸试验,拉伸速率为 1.5 mm/min。腐蚀质量损失试验参考 ASTM G31 进行,其中铸态试样芯部取 50 mm×25 mm×3 mm 薄片,轧制态试样沿轧制方向取 15 mm×25 mm×3 mm 薄片,将每个试样在室温下于 1 L 的质量分数为 3.5% NaCl 溶液中浸泡 36 h。浸泡后试样用铬酸和硝酸银的混合液(200 g/L 的 CrO₃+10 g/L 的 AgNO₃)清洗,并用蒸馏水冲洗吹干称重,计算不同状态试样室温浸泡腐蚀速率;电化学测试采用 CHI760e 电化学工作站,其中饱和甘汞电极(SCE)为参比电机,铂片电极为对电极,试样为工作电极。铸态试样尺寸为 10 mm×10 mm×8 mm,轧制态试样尺寸为 20 mm×15 mm×3 mm,试样打磨后在 pH 为 7.5 的 3.5% NaCl 溶液中测定动电位极化曲线,试验温度为(25±0.5) ℃,动电位扫描速度为 0.005 V/s,扫描区间为(-2~0) V,从阴极极化开始。

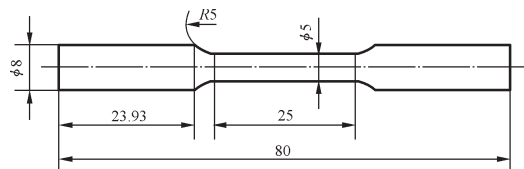


图 2 拉伸试样尺寸示意图

Fig.2 Schematic diagram of tensile specimen dimensions

2 试验结果与讨论

2.1 微观组织

图 3 为 AZ91D 和 AZW910 两种合金在不同孔型轧制参数下的微观组织。由图 3a 和图 3b 可见,AZ91D 合金主要由 α -Mg 基体相和不规则粗大 β 相(绿色矩形区域)组成,而 AZW910 合金主要由基体 α -Mg 相和球状或棒状 β 相(红色圆形区域)组成。此外,经孔型轧制变形后大晶粒被破碎,合金发生不完全再结晶,仍存在大量残余变形晶粒(黄色箭头),组织具有明显方向性,且均与轧制方向一致。在 250 ℃轧制时由于轧辊温度较低,轧制过程中试样温降很快,故合金发生不完全动态再结晶。从图 3c 和图 3d 可以发现,在高温低速轧制后合金晶粒更细小均匀。高温有利于位错运动和晶界迁移,低速变形为再结晶提供了充足的时间,因此在高温低速下合金发生了完全动态再结晶,在晶粒细化的同时,颗粒状第二相伴随再结晶析出并弥散分布^[15-18]。Y

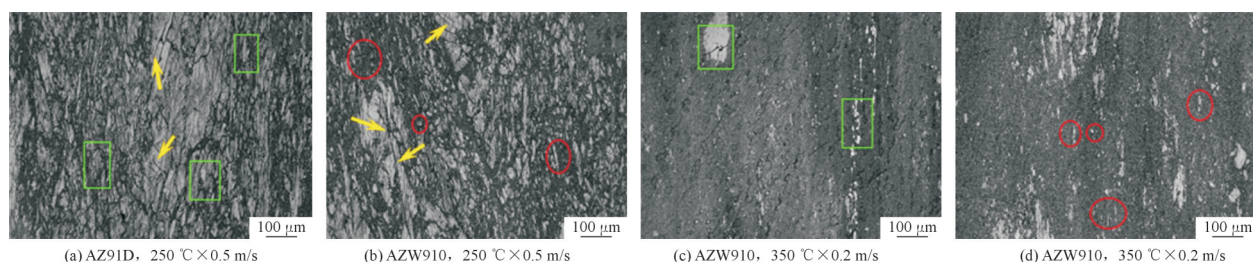


图3 不同孔型轧制参数下 AZ91D 和 AZW910 合金的微观组织形貌

Fig.3 Microstructure of as-rolled AZ91D and AZW910 alloys under various rolling conditions

添加后微观组织中可见许多棒状或颗粒状析出相并沿轧制方向(RD)平行分布。

图4为 AZ91D 和 AZW910 两种合金固溶态和轧制态 XRD 物相分析。由图 4a 可知,固溶处理后两种合金中只存在 α -Mg 基体相衍射峰,说明两种合金固溶良

好。从图 4 发现,相比于固溶态,采用孔型轧制后出现了新的 β - $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相衍射峰,表明 β 相是在变形和再结晶过程中动态析出的。此外,合金中并未检测出含 Y 的析出相,其原因可能是该元素添加量较少,并没有形成金属间化合物,只固溶于基体中。

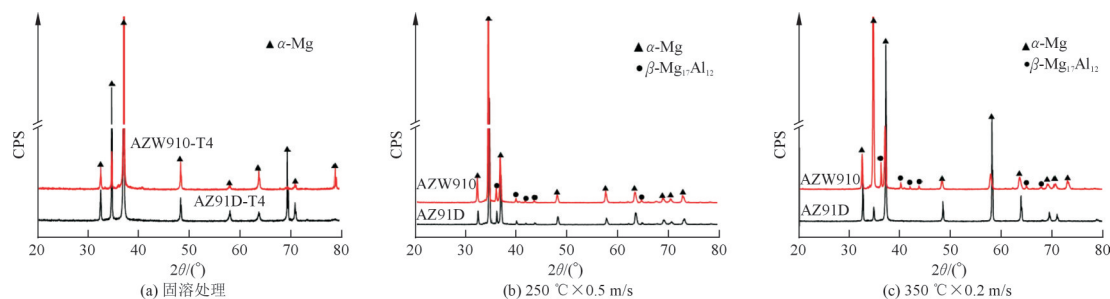


图4 固溶处理和孔型轧制变形后的 XRD 图谱

Fig.4 XRD patterns of alloys after solid solution and caliber rolling

2.2 力学性能

图 5 为 AZ91D、AZW910 在铸态和轧制状态下的室温拉伸曲线。由图 5a 可见,两种合金铸态的弹性应变很小,没有明显屈服点。在拉伸阶段,应力值匀速上升。随应变继续增加,拉伸曲线逐渐平缓,并出现加工硬化,直至试棒断裂。表 2 为 AZ91D 和 AZW910 合金铸态和轧制态下的室温力学性能。可以看出,AZ91D 合金添加 Y 后抗拉强度、屈服强度均有所增加,伸长率也同步提高。一方面 Y 元素的添加能够净化熔体、减少杂质,提高铸锭质量,从而减少在拉伸过程中由夹杂处萌生的裂纹源;另一方面 Y 元素还能细化晶粒产生细晶强化,弥散分布的第二相可以钉扎晶界,抑制晶界

滑移,阻碍位错运动,部分固溶在基体中的 Y 元素则能产生固溶强化效果^[19-20]。

由图 5b 和图 5c 可见,不同温度和速度下轧制态合金的拉伸曲线出现不同程度锯齿波动,其原因可能是在拉伸过程中存在孪生协调变形^[21]。随着晶粒细化,孪生更加困难,曲线锯齿波动减少,这与图 3 组织观察结果一致。与铸态合金相比,变形后合金强度得到显著提升。轧制过程中动态再结晶使得合金晶粒度明显降低,提高了晶界强化作用,使得合金屈服强度增加;多道次累积变形使位错逐渐累积,位错间的交互作用增强,使得位错运动越来越困难,从而提高合金的强度^[22-23]。细晶强化和位错强化是变形后合金强度上升的主要原因。

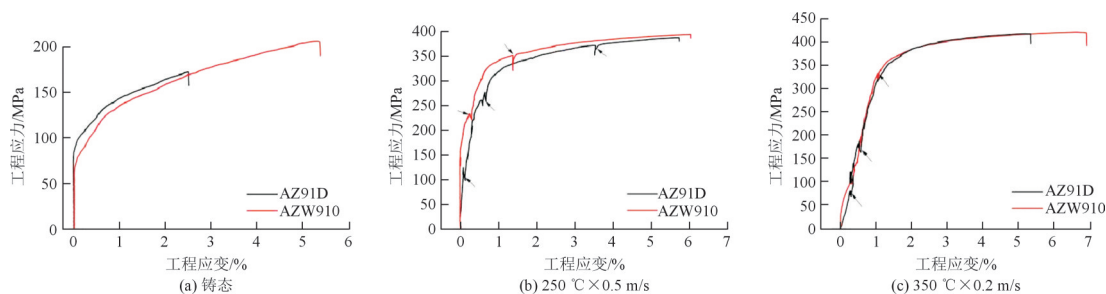


图5 AZ91D、AZW910 在铸态和轧制状态下的室温拉伸曲线

Fig.5 Engineering stress-strain curves of AZ91D and AZW910 alloys in as-cast and as-rolled condition at room temperature

结合图 5 和表 2 可知,同参数孔型轧制工艺下两种合金力学性能差别不大,主要是两种合金的变形量基本相同,由变形引起的晶粒细化程度差异较小。由于 Y 添加量较低,其产生的固溶强化和析出强化影响较小,故两种合金的力学曲线相似。但是对比两种工艺轧制的力学性能,发现高温低速试样的强度更高,这主要是由于高温低速轧制时合金晶粒得到充分细化,从而使力学性能得到显著提高^[24]。

图 6 为不同状态下 AZ91D 和 AZW910 合金的拉伸断口形貌。由图 6a 和图 6d 可见,两种铸态合金断口表面均存在微裂纹,断口主要由大量韧窝和部分解理面组成,表现为韧脆混合断裂,其中 AZ91D 合金的断口韧

表 2 AZ91D 和 AZW910 铸态和轧制态下的室温力学性能
Tab.2 Mechanical properties of AZ91D and AZW910 alloys in as-cast and as-rolled states at room temperature

条件	合金	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%
铸态	AZ91D	172	92	3.1
	AZW910	206	93	5.3
250 °C×0.5 m/s	AZ91D	394	245	8.9
	AZW910	395	278	6.0
350 °C×0.2 m/s	AZ91D	417	342	5.3
	AZW910	421	343	6.9

窝浅且数量较少,部分区域呈现准解理断裂。AZW910 合金断口表现为大量细小且均匀的韧窝,裂纹数量较少,韧性断裂占主导,因此塑性比铸态 AZ91D 更好。

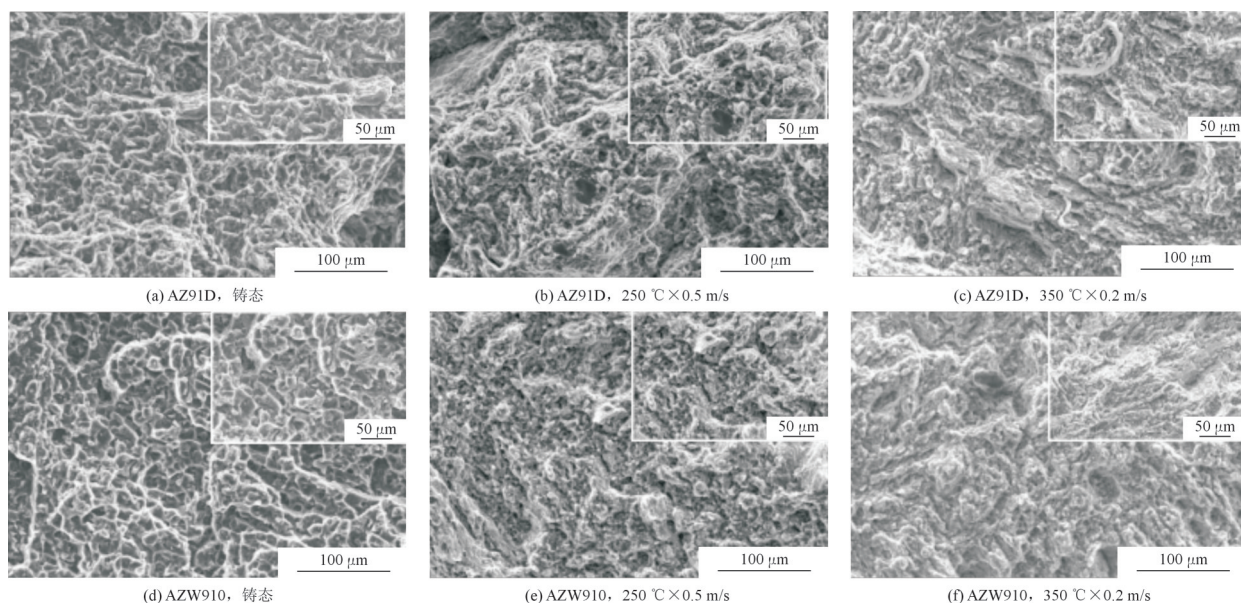


图 6 不同状态下 AZ91D 和 AZW910 微观断口形貌铸态

Fig.6 Fracture morphologies of AZ91D and AZW910 alloys under various conditions

由图 6b 和图 6e 可知,250 °C×0.5 m/s 变形后合金拉伸断裂均为韧性断裂,韧窝细小密集,与铸态合金相比,其断口可见微裂纹减少。轧制过程中 Y 变形速率较快,且轧辊处于室温,与试棒接触后导致其快速降温,因此合金再结晶程度较低,第二相动态析出减少。对比两种合金断口可以发现,添加 Y 前后合金断口形貌差异不显著,这是由于添加量较少,其对 AZ91D 镁合金断裂方式影响较小。

由图 6c 和图 6f 可知,350 °C×0.2 m/s 变形后,两种合金拉伸断裂形式均为韧性断裂,相比于 250 °C×0.5 m/s 孔型轧制试样,其表面韧窝更深且数量更多,韧窝处可见大量第二相质点。变形后由于析出强化、细晶强化和加工硬化,合金的强度和伸长率均得到明显提高。

2.3 腐蚀性能

图 7 为铸态和孔型轧制态 AZ91D、AZW910 室温

浸泡 36 h 腐蚀速率图。可以看出,经孔型轧制变形后合金的耐蚀性整体比铸态合金差,腐蚀速率大幅增大。同时,350 °C×0.2 m/s 合金的腐蚀速率显著高于 250 °C×0.5 m/s 合金的。这是因为一方面高温低速变形后仍存在残余应力和位错累积,尽管合金力学性能

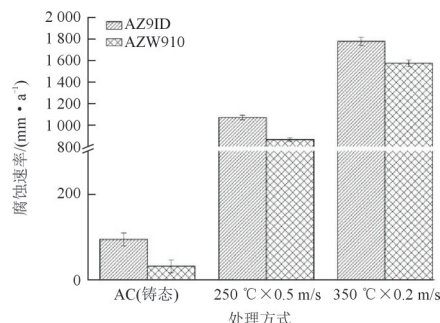


图 7 铸态和孔型轧制态 AZ91D、AZW910 室温浸泡 36 h 腐蚀速率对比

Fig.7 Corrosion rate of as-cast and as-rolled AZ91D and AZW910 alloys after immersion test for 36 h

得到改善,但是缺陷也会同时提高合金的腐蚀敏感性;另一方面,高温低速变形后,合金析出大量 β 相,Al的电极电位要比Mg的高很多,故基体相充当了阳极, β 相作为阴极加速了腐蚀。添加Y后腐蚀速率有所降低,其原因可能是:一方面Y元素加入降低了 α 相与 β 相的电位差,同时细化了 α 相和 β 相,使得 β 相相对于 α 相腐蚀作用减缓;另一方面,Y元素可能会形成少量 Al_8Mn_4Y 金属间化合物和 $Mg_{17}Al_{12}$ 存在竞争关系,从而减少了 β

相的负面作用。综上,轧制过程中产生的累积位错等缺陷是导致腐蚀速率上升的主要原因。

图8为AZ91D和AZW910两种合金不同变形状态的极化曲线。表3为两种合金不同状态下的极化曲线拟合结果。可以发现,铸态AZW910合金的自腐蚀电流密度更小,耐蚀性更好。孔型轧制变形后合金的自腐蚀电流密度比铸态合金高了一个数量级,说明轧制变形后合金更易腐蚀,这也与浸泡试验结果一致。

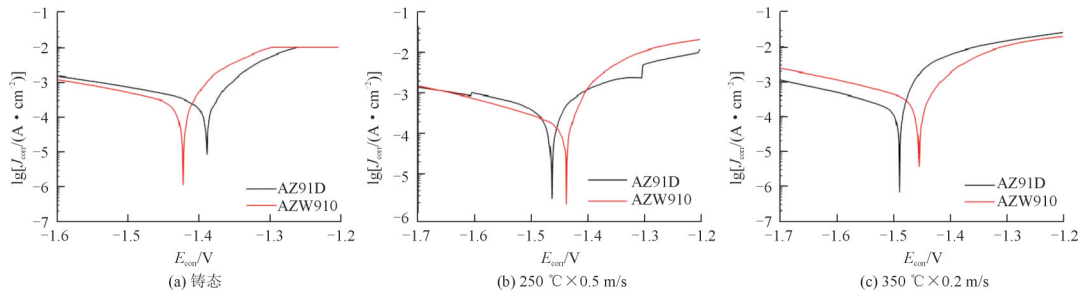


图8 AZ91D和AZW910在铸态、孔型轧制变形后的极化曲线
Fig.8 Polarization curves of as-cast and as-rolled AZ91D and AZW910 alloys

表3 两种合金不同状态下的极化曲线拟合结果

Tab.3 Fitting results of polarization curves of alloys under various conditions

条件	合金	$J_{corr}/(A \cdot cm^{-2})$	$E_{corr}/V_{vs.SCE}$
AC(铸态)	AZ91D	1.13×10^{-4}	-1.389
	AZW910	7.60×10^{-5}	-1.424
250 °C × 0.5 m/s	AZ91D	5.13×10^{-3}	-1.468
	AZW910	9.60×10^{-4}	-1.441
350 °C × 0.2 m/s	AZ91D	6.13×10^{-3}	-1.487
	AZW910	2.67×10^{-3}	-1.467

此外,250 °C × 0.5 m/s的轧制态合金自腐蚀电流密度比350 °C × 0.2 m/s更小,表明合金耐腐蚀性能更好。这间接说明孔型轧制变形后AZ91D镁合金表面氧化膜并无良好钝化效果,而铸态AZW910则存在钝化区,原因在于AZ91合金与腐蚀液接触会形成MgO和 Al_2O_3 ,MgO继续和溶液反应生成 $Mg(OH)_2$,在内层主要由MgO和 Al_2O_3 组成,Y主要起晶粒细化作用,从而在内层形成以 Al_2O_3 为主的钝化层^[25-26]。

3 讨论

研究表明,优化铸态合金力学性能的核心策略聚焦于织构优化、第二相体积分数提升及晶粒尺寸细化^[27]。具体而言,热变形阶段弥散析出的纳米级第二相颗粒对强化贡献尤为突出,其通过钉扎位错运动路径显著提升位错滑移阻力。ZHANG X M等^[28]证实,析出强化效率与第二相颗粒的粒径成反比、与数密度成正比关系。经等通道转角挤压(ECAP)工艺处理后,AZ91D合金内部弥散分布的亚微米级第二相颗粒数密

度达到峰值,由此产生的析出强化效应在对比合金中表现最为显著。

此外,基面滑移系的激活阈值强烈依赖于晶粒 c 轴与外加应力轴的取向关系:当基面法向与应力方向呈正交或平行位向时,Schmid因子趋近于0导致滑移受阻,而当取向差接近45°时,Schmid因子取得极值促使滑移优先启动^[29]。由于AZ91D合金的屈服行为对基面滑移高度敏感,在压缩载荷下其晶粒基面普遍与应力轴形成40°~50°的择优取向,使得滑移系极易激活,最终表现为宏观强度的相对弱化。

4 结论

(1)合金经孔型轧制变形后发生动态再结晶,晶粒显著细化,同时伴随 β 相动态析出,合金力学性能大幅改善,其中以在350 °C × 0.2 m/s时性能最佳;Y元素添加可提高力学性能的原因是Y元素净化熔体,产生固溶强化和析出强化效应。

(2)孔型轧制使两种合金耐蚀性显著降低,其原因在于 β 相析出增多,产生电化学腐蚀;同时,孔型轧制引入大量位错等缺陷也使得合金在溶液中腐蚀敏感性提高,从而加速了腐蚀。

参考文献

[1] 潘复生.高性能变形镁合金及加工技术[M].北京:科学出版社,2007.
[2] 宋江凤,潘复生.加快推进我国镁产业发展的若干思考[J].现代交通与冶金材料,2022,2(6):1-5.
[3] 段汉桥,王立世,蔡启舟,等.稀土对AZ91镁合金耐腐蚀性能的

- 影响[J]. 中国机械工程, 2003, 20(14): 1 789-1 793.
- [4] LI Z M, LUO A A, WANG Q, et al. Fatigue characteristics of sand-cast AZ91D magnesium alloy[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2015, 5(1): 1-12.
- [5] WANG S R, GUO P Q, YANG L Y, et al. Corrosion and stress corrosion cracking behavior of X70 pipeline steel in a CO₂-containing solution[J]. Journal of Materials Engineering and Performance[J]. 2009, 18(2): 137-144.
- [6] 时惠英, 陈梓山, 张菊梅, 等. β -Mg₁₇Al₁₂ 相析出形态对 AZ91 镁合金力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2010, 35(1): 42-46.
- [7] 朱立文, 贺秀丽, 卫英慧, 等. 镁合金 AZ31B 在不同 pH 值 NaCl 溶液中的应力腐蚀行为研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(10): 2 481-2 485.
- [8] FENG C, LI M Z, HOU Y, et al. Effect of Ca on corrosion resistance behavior of as-cast AZ91 magnesium alloys[J]. Rare Metal Materials & Engineering, 2015, 44(1): 41-47.
- [9] 董天顺, 郑晓东, 邱长明, 等. 提高 AZ91D 镁合金性能的途径及研究展望[J]. 轻合金加工技术, 2018(2): 1-6.
- [10] 许娟, 李鹏飞, 郭锋. 热处理对 AZ91D 镁合金相结构的影响[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(4): 30-33.
- [11] ZHAO Z D, CHEN Q, WANG Y B, et al. Microstructures and mechanical properties of AZ91D alloys with Y addition[J]. Materials Science & Engineering, 2009, A515(1): 152-161.
- [12] 郑留伟, 梁伟, 王红霞, 等. 热轧参数对铸态 AZ91 镁合金组织与性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(12): 78-83.
- [13] FERDOWSI M R G, MAZINANI M, EBRAHIMI G R. Effects of hot rolling and inter-stage annealing on the microstructure and texture evolution in a partially homogenized AZ91 magnesium alloy[J]. Materials Science & Engineering, 2014, A606: 214-227.
- [14] WANG Y Q, LI M Z, LI C, et al. The effect of Ca on corrosion behavior of heat-treated Mg-Al-Zn alloy[J]. Materials & Corrosion, 2015, 63(6): 497-504.
- [15] CHEN B, LIN D L, JIN L, et al. Equal-channel angular pressing of magnesium alloy AZ91 and its effects on microstructure and mechanical properties[J]. Materials Science & Engineering, 2008, A(483-484): 113-116.
- [16] PÉREZ-PRADO M T, VALLE J A D, RUANO O A. Achieving high strength in commercial Mg cast alloys through large strain rolling[J]. Materials Letters, 2005, 59(26): 3 299-3 303.
- [17] 刘腾, 滕新营, 周国荣, 等. 微量 Y、Er 元素对 AZ91 镁合金微观组织及力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(11): 1 940-1 944.
- [18] XIA M, HUANG Y, CASSINATH Z, et al. Continuous twin screw rheo-extrusion of an AZ91D magnesium alloy[J]. Metallurgical & Materials Transactions, 2012, A43(11): 4 331-4 344.
- [19] 李婷, 杜志伟, 张奎, 等. 稀土镁合金沉淀析出行为研究进展[J]. 材料导报, 2012, 26(21): 96-100.
- [20] ONO N, NOWAK R, MIURA S. Effect of deformation temperature on Hall-Petch relationship registered for polycrystalline magnesium[J]. Materials Letters, 2004, 58(1): 39-43.
- [21] NIE J F, FANG X Y. Periodic segregation of solute atoms in fully coherent twin boundaries[J]. Science, 2013, 340(6 135): 957-960.
- [22] 郑子樵. 材料科学基础[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2013.
- [23] CHEN Q, ZHAO Z, SHU D, et al. Microstructure and mechanical properties of AZ91D magnesium alloy prepared by compound extrusion[J]. Materials Science & Engineering, 2011, A528(10-11): 3 930-3 934.
- [24] HU M L, JI Z S, CHEN X Y. Effect of extrusion ratio on microstructure and mechanical properties of AZ91D magnesium alloy recycled from scraps by hot extrusion[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(6): 987-991.
- [25] SONG G, ATRENS A, WU X, et al. Corrosion behaviour of AZ21, AZ501 and AZ91 in sodium chloride[J]. Corrosion Science, 1998, 40(10): 1 769-1 791.
- [26] 曾荣昌, 柯伟, 徐永波, 等. Mg 合金的最新发展及应用前景[J]. 金属学报, 2001, 37(7): 673-685.
- [27] 彭建, 古东懂, 刘正涛, 等. 时效处理和挤压后预变形工艺对 Mg-Gd 合金组织和力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(2): 30-36.
- [28] ZHANG X M, TANG C P, DENG Y L, et al. Effects of thermal treatment on precipitate shape and mechanical properties of Mg-8Gd-4Y-Nd-Zr alloy[J]. Materials & Design, 2011, 32: 4 994-4 998.
- [29] ZHANG B P, GENG L, HUANG L J, et al. Enhanced mechanical properties in fine-grained Mg-1.0Zn-0.5Ca alloys prepared by extrusion at different temperatures[J]. Scripta Materialia, 2010, 63: 1 024-1 027.

(编辑:张正贺)

《特种铸造及有色合金》征稿启事

《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。

本刊面向国内外广大科技工作者征稿,征稿内容包括: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的成形理论、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,此外还包括各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、新能源材料、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和技术研究成果等。

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 11 楼

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024,

85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

