

加热与热处理

## T5 热处理对 Mg-Gd-Y-Zr 合金筒形件拉压 不对称性的影响

李梦媛, 刘楚明, 张冬冬, 万迎春, 蒋树农, 陈志永

(中南大学 材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘要:** 通过力学性能测试、背散射电子衍射、X 射线衍射、透射电子表征等手段分析大尺寸 Mg-9.17Gd-1.98Y-0.43Zr-0.11Ag 镁合金筒形件的组织性能不均匀性和拉压不对称性, 并通过时效处理调控合金组织, 提高材料力学性能。研究发现: 从内部到外部, 筒形件组织呈不均匀分布, 平均晶粒尺寸从 12.9  $\mu\text{m}$  粗化至 20.1  $\mu\text{m}$ , 抗拉强度从 327 MPa 降至 280 MPa, 屈服强度从 223 MPa 降至 157 MPa。经 225  $^{\circ}\text{C} \times 21$  h 峰时效处理后,  $\beta'$  相作为主要析出相, 抑制了压缩载荷下孪晶的产生, 大幅提高了筒形件的强度并降低其伸长率, 压缩屈服强度和拉伸屈服强度的比值从内部到外部分别为 1.06、1.17 和 1.02。T5 热处理后筒形件内部的力学性能最好, 抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 407 MPa、293 MPa 和 12%。

**关键词:** 热处理; 拉压不对称性; Mg-Gd-Y-Zr 合金; 力学性能;  $\beta'$  析出相; 时效处理

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.12.029

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 12-0193-07

## Influence of T5 heat treatment on tension-compression asymmetry for Mg-Gd-Y-Zr-Ag alloy cylindrical parts

Li Mengyuan, Liu Chuming, Zhang Dongdong, Wan Yingchun, Jiang Shunong, Chen Zhiyong

(School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The inhomogeneity of microstructure and the properties and the tension-compression asymmetry for large-sized Mg-9.17Gd-1.98Y-0.43Zr-0.11Ag magnesium alloy cylindrical part were analyzed by mechanical property testing, backscattered electron diffraction, X-ray diffraction and transmission electron characterization, and the mechanical properties of material were improved by aging treatment to regulate the alloy microstructure. The results show that from the inside to the outside, the microstructure of cylinder part is unevenly distributed, the average grain size is coarsened from 12.9  $\mu\text{m}$  to 20.1  $\mu\text{m}$ , the tensile strength is reduced from 327 MPa to 280 MPa, and the yield strength is reduced from 223 MPa to 157 MPa. After peak aging at 225  $^{\circ}\text{C} \times 21$  h, as the main precipitation phase,  $\beta'$  phase inhibits the generation of twins under compression load, greatly increases the strength of cylinder part and reduces its elongation, and the ratio of compressive yield strength to tensile yield strength is 1.06, 1.17 and 1.02 from the inside to the outside, respectively. After T5 heat treatment, the internal mechanical properties of cylindrical part are the best with the tensile strength of 407 MPa, the yield strength of 293 MPa and the elongation of 12%.

**Key words:** heat treatment; tension-compression asymmetry; Mg-Gd-Y-Zr alloy; mechanical properties;  $\beta'$  precipitate phase; aging treatment

镁合金的密度低、比强度高, 作为最轻的金属结构材料之一, 其在交通和航空航天领域具有广阔的应用前景。特别地, 相较于 Mg-Al-Zn 系镁合金,

Mg-Gd-Y(-Zn)-Zr 系合金经热加工和热处理后具有极好的综合力学性能, 因此, 在轻量化等方面扮演着日益重要的角色。

通过挤压、轧制、锻造等热加工工艺, 合金组织更加致密, 晶粒尺寸得到明显细化<sup>[1-5]</sup>。而在后续时效过程中,  $\beta'$ (Mg<sub>7</sub>(Gd, Y)) 相作为 Mg-Gd-Y-Zr 系合金的析出强化相, 可显著提高合金的硬度和强度<sup>[6-9]</sup>。Homma T 等<sup>[10]</sup>通过挤压和时效处理, 成功制备出抗拉强度  $R_m$  为 542 MPa、拉伸屈服强度

收稿日期: 2021-12-20; 修订日期: 2022-03-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51574291, 51874367)

作者简介: 李梦媛 (1997-), 女, 硕士研究生

E-mail: 1015704955@qq.com

通信作者: 刘楚明 (1960-), 男, 博士, 教授

E-mail: cmliu@csu.edu.cn

$R_{eL}$  为 473 MPa、伸长率  $A$  为 8.0% 的超高强 Mg-1.8Gd-1.8Y-0.7Zn-0.2Zr (%) (原子分数) 合金。Xu C 等<sup>[11]</sup>通过热轧和时效获得的 Mg-8.2Gd-3.8Y-1.0Zn-0.4Zr (%) (质量分数) 合金的  $R_m$ 、 $R_{eL}$  和  $A$  分别为 517 MPa、426 MPa 和 4.5%。

在以往的研究中,随着镁合金部件尺寸的增大,大尺寸构件现阶段仍存在组织和性能不均匀等特点。例如,Zhang D D 等<sup>[12]</sup>和 Zeng G 等<sup>[13]</sup>的研究表明,热环轧过程中变形温度和变形程度的差异致使 Mg-Al-Zn 环件沿壁厚方向存在力学性能各向异性和组织不均匀性。Yu S L 等<sup>[14]</sup>发现 Mg-Gd-Y-Zr 合金环件沿壁厚方向的动态再结晶程度不同,环件内侧的再结晶程度最高。张宗良等<sup>[15]</sup>发现 Mg-Gd-Y-Zr 合金在模锻成形过程中的温度和应变沿变形方向的分布不均匀,导致模锻件在不同部位的晶粒尺寸和织构存在显著差异。

因此,本文拟分析大尺寸 Mg-Gd-Y-Zr-Ag 镁合金筒形件的组织不均匀性,通过测试合金在室温下的力学性能来研究筒形件的拉压不对称性,并通过

时效处理调控合金组织、提高合金的力学性能,从而进一步提高合金的应用范围和使用前景。

## 1 实验过程与方法

本文研究的 VW93M (Mg-9.17Gd-1.98Y-0.43Zr-0.11Ag, %, 质量分数) 镁合金筒形件是通过采用 125 MN 液压机,将原始尺寸为  $\Phi 282 \text{ mm} \times 1620 \text{ mm}$  的坯料,在  $460^\circ\text{C}$  变形温度下一次模锻成形得到的。最终得到的筒形件高度  $H > 900 \text{ mm}$ ,底部直径  $\varphi > \Phi 200 \text{ mm}$ ,顶部厚度  $\delta > 100 \text{ mm}$ 。最终的成形尺寸和取样部位如图 1 所示,其中  $HD$  为高度方向, $CD$  为周向, $ND$  为法向。本文选取筒形件顶部的内 (N 区)、中 (Z 区)、外 (W 区) 3 个位置的样品进行表征测试。所有样品的观察平面均平行于  $HD$ - $CD$  面。模锻成形后,选取顶部内侧 (N 区) 的样品进行时效处理,根据图 2 所示的时效硬化曲线,确定 VW93M 镁合金筒形件的时效制度为  $225^\circ\text{C} \times 21 \text{ h}$ ,将样品在时效处理前后的热处理状态分别命名为 Forged 和 T5。

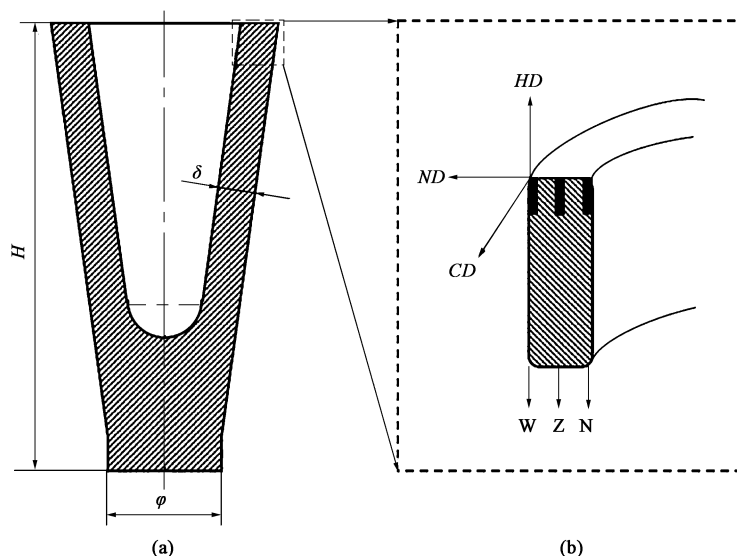


图 1 VW93M 镁合金筒形件的最终成形尺寸 (a) 和取样部位 (b) 示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of final forming sizes (a) and sampling locations (b) for VW93M magnesium alloy cylindrical parts

样品的拉伸性能和压缩性能测试在 Instron 3369 电子万能实验机上进行,夹头的移动速度为  $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,拉伸和压缩方向均平行于  $RD$ 。拉伸样的尺寸为  $\Phi 5 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ ,压缩试样的尺寸为  $\Phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ ,每次试验的平行样不少于 3 根。使用 Rigaku D/max2550 衍射仪 (Cu 靶) 采集物相信息,工作电压为 36 kV,扫描范围为  $20^\circ \sim 80^\circ$ ,扫描速度为  $8(^\circ) \cdot \text{min}^{-1}$ 。测试结束后,使用 Jade6.0 软件进行物相分析。

通过金相砂纸机械研磨试样表面,然后置于 4% 高氯酸 + 96% 乙醇的混合溶液中,在 25 V 和  $-35^\circ\text{C}$  下电解抛光,最终获得表面光亮、上下表面平行的 EBSD 样品。采用 Helios Nanolab 600i 场发射扫描电子显微镜 (SEM) 和电子背散射衍射 (EBSD) 探测器对样品微观结构进行分析。EBSD 的扫描步长为  $2.5 \mu\text{m}$ ,扫描区域面积为  $1000 \mu\text{m} \times 800 \mu\text{m}$ 。使用 Oxford Aztec 软件收集 EBSD 原始数据,使用 Channel 5 软件进行数据分析。

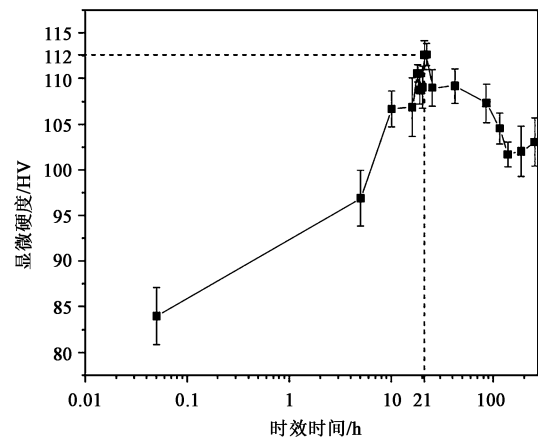


图 2 VW93M 镁合金筒形件在 225 °C 的时效硬化曲线  
Fig. 2 Aging hardening curve of VW93M magnesium alloy cylindrical parts at 225 °C

使用 FEI Titan G2 60-300 扫描透射电子显微镜 (STEM) 获得高角度环形暗场 (HAADF)，工作电压为 300 kV，电子束方向与  $[0001]_{\alpha}$  轴平行。HAADF-STEM 样品的制备过程为：将线切割得到的厚度为 0.5 mm 的薄片研磨至 150  $\mu\text{m}$  左右，利用冲孔机冲出  $\Phi 3\text{ mm}$  圆片，使用 2000# 金相砂纸将圆片机械研磨至 50  $\mu\text{m}$  后，在恒电压 (30 V) 和恒温 ( $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 下，使用 4% 的高氯酸+1% 硝酸+95% 乙醇的混合溶液进行电解双喷；然后使用 Gatan ion-polishing 精密离子抛光系统 (GATAN691) 进行离子抛光后，最终获得 HAADF-STEM 样品。

## 2 结果与讨论

### 2.1 VW93M 镁合金筒形件的力学性能

VW93M 镁合金筒形件作为一种结构部件，其力学性能 (包括抗拉强度  $R_m$ 、屈服强度  $R_{eL}$  和伸长率  $A$ ) 是判断筒形件质量优劣的重要指标。图 3 为 VW93M 镁合金筒形件内 (N 区)、中 (Z 区)、外 (W 区) 3 个部位在时效处理前后的典型的拉伸工程应力-工程应变曲线，表 1 则给出了这 3 个部位在时效处理前后的  $R_m$ 、 $R_{eL}$  和  $A$  的平均值。

在拉伸载荷作用下，VW93M 镁合金筒形件的强度和伸长率从内部至外部均呈下降趋势， $R_m$  分别为 327、293 和 280 MPa， $R_{eL}$  分别为 223、164 和 157 MPa， $A$  分别为 20%、16% 和 15%。经时效处理后，VW93M 镁合金筒形件的强度明显提高，内部的  $R_m$  和  $R_{eL}$  分别为 407 和 293 MPa，中部的  $R_m$  和  $R_{eL}$  分别为 377 和 238 MPa，外部的  $R_m$  和  $R_{eL}$  分别

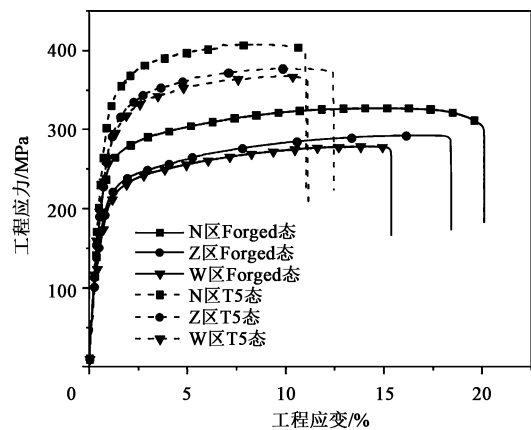


图 3 VW93M 镁合金筒形件的室温拉伸工程应力-工程应变曲线  
Fig. 3 Tensile engineering stress- engineering strain curves of VW93M magnesium alloy cylindrical parts at room temperature

表 1 VW93M 镁合金筒形件的室温拉伸性能

Table 1 Tensile properties of VW93M magnesium alloy cylindrical parts at room temperature

热处理状态	样品位置	$R_m/\text{MPa}$	$R_{eL}/\text{MPa}$	$A/\%$
Forged	N 区	$327\pm 0.5$	$223\pm 4.2$	$20\pm 0.2$
	Z 区	$293\pm 1.3$	$164\pm 2.3$	$16\pm 0.5$
	W 区	$280\pm 1.2$	$157\pm 1.8$	$15\pm 0.1$
T5	N 区	$407\pm 0.3$	$293\pm 19.2$	$12\pm 1.4$
	Z 区	$377\pm 0.4$	$238\pm 1.3$	$12\pm 0.3$
	W 区	$367\pm 0.5$	$224\pm 0.8$	$11\pm 0.7$

为 367 和 224 MPa；但伸长率相较于 Forged 态样品有所下降，从内到外的伸长率分别为 12%、12% 和 11%。

同样地，VW93M 镁合金筒形件在实际服役过程中也可能承受压缩载荷的作用。因此，表 2 给出了 VW93M 镁合金筒形件的不同部位在时效处理前后的压缩屈服强度  $R'_{eL}$ ，及压缩屈服强度和拉伸屈服强度的比值  $R'_{eL}/R_{eL}$ 。筒形件在压缩载荷作用下，从

表 2 VW93M 镁合金筒形件的室温拉压屈服强度不对称性

Table 2 Asymmetry for tensile and compressive yield strength of VW93M magnesium alloy cylindrical parts at room temperature

热处理状态	样品位置	$R'_{eL}/\text{MPa}$	$R_{eL}/\text{MPa}$	$R'_{eL}/R_{eL}$
Forged	N 区	$200\pm 3.9$	$223\pm 4.2$	0.90
	Z 区	$166\pm 1.7$	$164\pm 2.3$	1.01
	W 区	$155\pm 16.0$	$157\pm 1.8$	0.99
T5	N 区	$310\pm 0.9$	$293\pm 19.2$	1.06
	Z 区	$278\pm 2.5$	$238\pm 1.3$	1.17
	W 区	$228\pm 10.5$	$224\pm 0.8$	1.02

内部至外部的压缩屈服强度分别为 200、166 和 155 MPa,  $R'_{eL}/R_{eL}$  分别为 0.90、1.01 和 0.99。经时效处理后, VW93M 镁合金筒形件的压缩屈服强度明显提高。在压缩载荷作用下, 筒形件的内、中、外 3 个部位的压缩屈服强度分别为 310、278 和 228 MPa, 强度增量分别为 110、112 和 73 MPa。从

表 2 可以看出, 筒形件从内到外,  $R'_{eL}/R_{eL}$  分别为 1.06、1.17 和 1.02。

## 2.2 VW93M 镁合金筒形件的显微组织

分析 VW93M 镁合金筒形件内、中、外 3 个部位的组织差异, 3 个部位的晶体取向、晶粒尺寸等信息如图 4 所示。

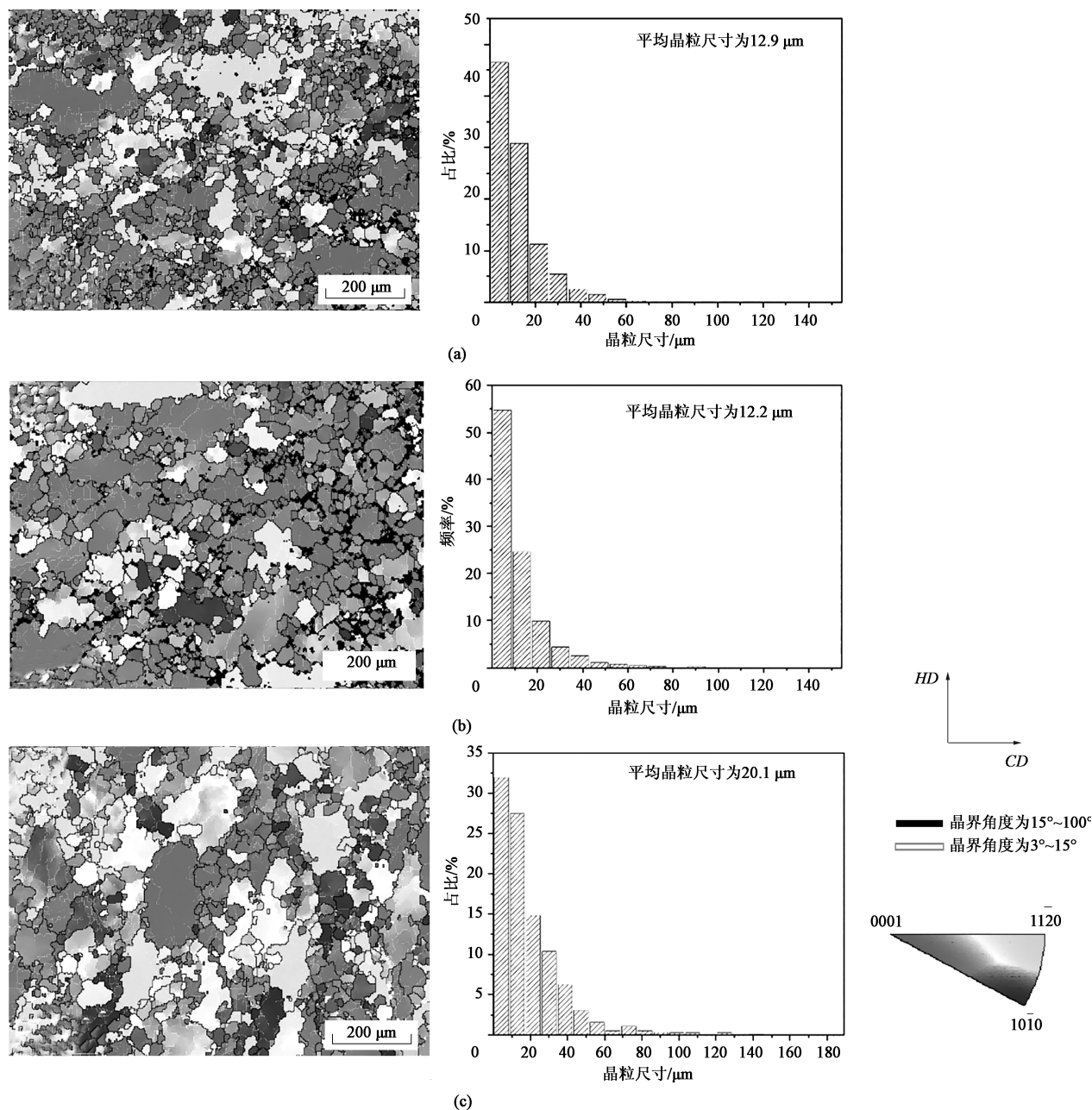


图 4 VW93M 镁合金筒形件不同部位的 IPF 图及晶粒尺寸分布

(a) N 区 (b) Z 区 (c) W 区

Fig. 4 IPF maps and grain size distributions of different positions for VW93M magnesium alloy cylindrical parts

(a) N zone (b) Z zone (c) W zone

从图 4 可以看出: 筒形件的结构特征从内部到外部呈不均匀分布。3 个位置的晶粒尺寸不均匀,

每个部位均由不同数量的未再结晶或未完全再结晶的粗大晶粒和细小再结晶晶粒组成; 并且, 沿壁厚



方向, 晶粒尺寸也发生相应变化, 从内到外的平均晶粒尺寸分别为 12.9、12.2 和 20.1  $\mu\text{m}$ 。

根据 X 射线衍射图谱 (图 5), VW93M 镁合金筒形件的物相主要包含  $\alpha\text{-Mg}$  相。经 225  $^{\circ}\text{C} \times 21 \text{ h}$  峰时效处理后, 合金主要由  $\alpha\text{-Mg}$  基体和  $\beta'$  析出相组成。

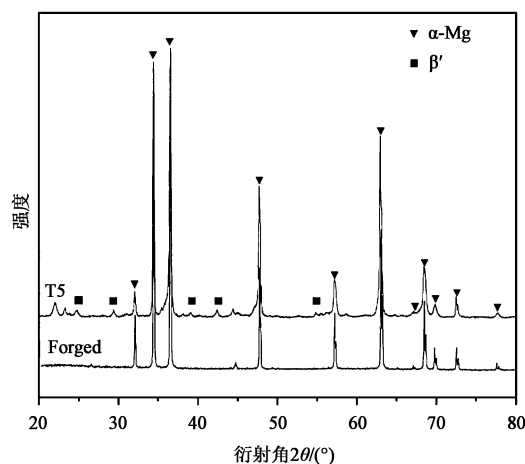


图 5 VW93M 镁合金筒形件的 X 射线衍射图谱

Fig. 5 XRD patterns of VW93M magnesium alloy cylindrical parts

为进一步分析  $\beta'$  相的形貌特征和分布情况, 使用 HAADF-STEM 表征析出相。从图 6a 和图 6b 可以发现, VW93M 镁合金筒形件峰时效析出相呈椭圆状形貌、致密分布, 其长度和宽度分别为 23.86 和 10.86 nm。根据图 6c 的衍射斑点,  $\alpha\text{-Mg}$  基体对应的为比较明锐的斑点; 而在沿镁基体的  $\{10\bar{1}0\}_{\alpha}$  两个衍射斑点之间的 1/4、1/2 和 3/4 的位置处, 即为  $\beta'$  相对应的衍射斑点。因此,  $\alpha\text{-Mg}$  基体和  $\beta'$  析出相的位向关系为  $[001]_{\beta'} // [0001]_{\alpha}$ ,  $(100)_{\beta'} // (11\bar{2}0)_{\alpha}$ 。

### 2.3 VW93M 镁合金筒形件拉压不对称性分析

根据 Valle J 等<sup>[16]</sup> 和 Marko K 等<sup>[17]</sup> 的研究, 变形机制会影响镁合金的工程应力-工程应变曲线。当基面滑移起主导作用时, 加工硬化阶段的硬化率保持不变; 当  $\{10\bar{1}2\}$  孪生起主导作用时, 初始阶段的硬化率很低, 然后随载荷增大, 硬化率迅速增加。从图 3 所示的工程应力-工程应变曲线可以看出, 在拉伸载荷作用下, 主导变形机制为基面滑移。根据图 7 所示的基面施密特因子分布, 从内部至外部的基面施密特因子分别为 0.279、0.289 和 0.324。因此, 由晶粒尺寸分布和施密特因子可以得到, 内部

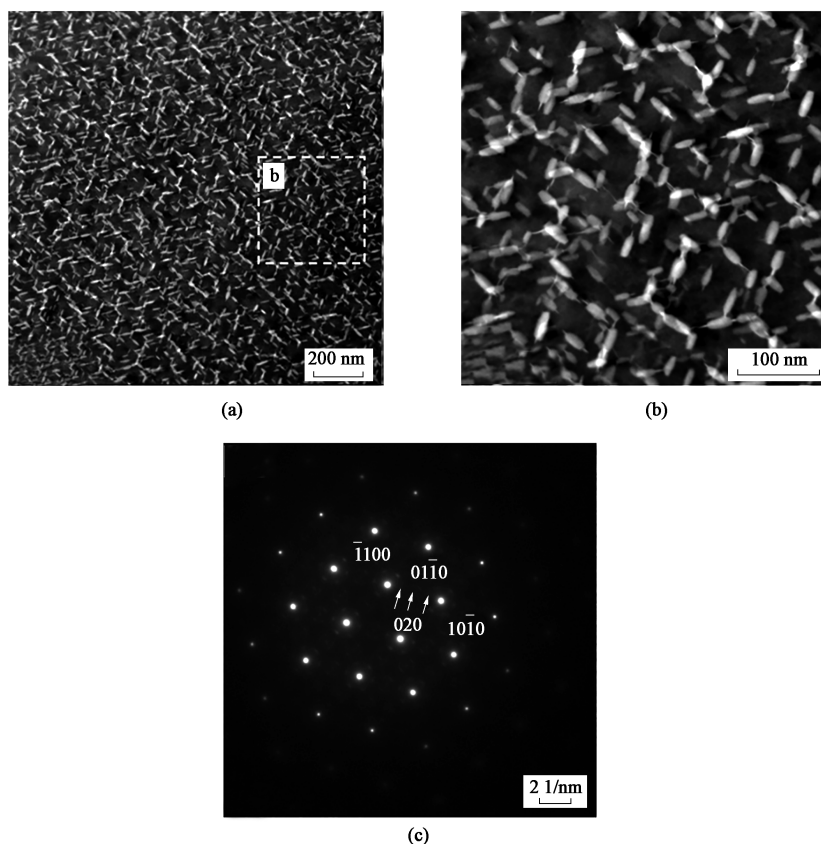


图 6 VW93M 镁合金筒形件在 225  $^{\circ}\text{C}$  峰值时效处理后的透射电子表征 (电子束平行于  $[0001]_{\alpha}$ )

(a)  $\beta'$  析出相 (b) b 处放大图 (c) 选区电子衍射花样

Fig. 6 HAADF-STEM of VW93M magnesium alloy cylindrical parts after peak aging treatment at 225  $^{\circ}\text{C}$  (Electron beam parallel to  $[0001]_{\alpha}$ )

(a)  $\beta'$  precipitates (b) Enlarged image at b position (c) Electron diffraction pattern of selected zone

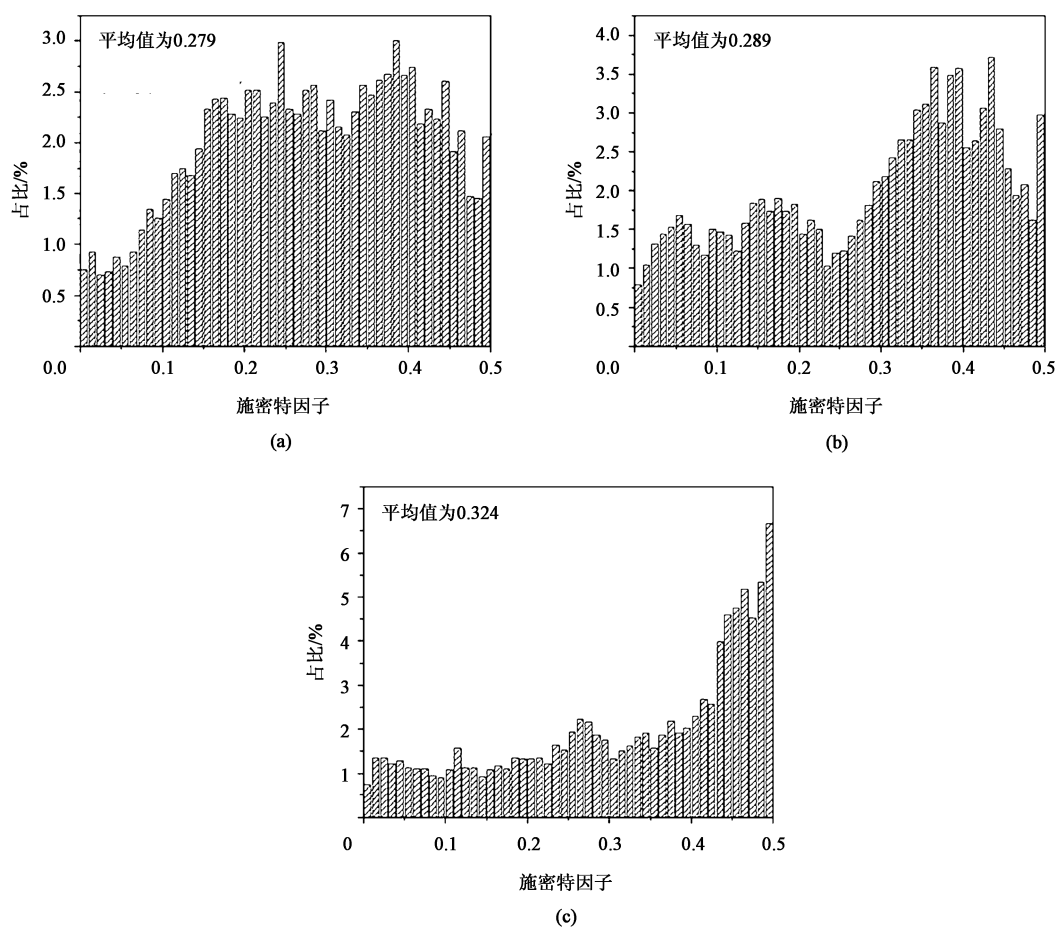


图 7 VW93M 镁合金筒形件的基面施密特因子分布

(a) N 区 (b) Z 区 (c) W 区

Fig. 7 Distributions of Schmid factors in basal planes for VW93M magnesium alloy cylindrical parts

(a) N zone (b) Z zone (c) W zone

的晶粒尺寸最小, 施密特因子最低, 因此内部的屈服强度最高; 而外部的晶粒尺寸和施密特因子最大, 因此外部的屈服强度最低; 而中部的屈服强度则介于内部和外部之间。

根据 Orowan 强化机制, 在拉伸变形过程中, 细小致密分布的  $\beta'$  析出相能够有效阻碍位错滑移, 因此, 峰时效处理后 VW93M 镁合金筒形件的强度明显提高。而因为  $\beta'$  析出相对晶粒内部强度的提升效果更加明显, 即削弱了晶粒内部和晶界的结合力, 使微裂纹更容易在晶界处萌生, 最终导致时效处理后 VW93M 镁合金筒形件的伸长率下降<sup>[18-20]</sup>。并且, 经时效处理后, 由于柱面析出相  $\beta'$  相的析出, VW93M 镁合金筒形件 3 个部位的  $R'_{el}/R_{el}$  均有所增大, 这在时效处理对 Mg-Zn 合金拉压不对称性影响的研究中也有类似报导<sup>[21]</sup>。在压缩过程中, 柱面析出相会降低孪生比例, 不利于孪生的形核和长大。所以, 相较于 Forged 态样品, T5 态样品在压缩载荷

作用下, 孪生更难发生, 因此, 压缩屈服强度更大, 从而使  $R'_{el}/R_{el}$  更大。

### 3 结论

(1) 从内部至外部, 大尺寸 Mg-Gd-Y-Zr-Ag 镁合金筒形件的平均晶粒尺寸从  $12.9 \mu\text{m}$  粗化至  $20.1 \mu\text{m}$ , 抗拉强度从 327 MPa 降至 280 MPa, 屈服强度从 223 MPa 降至 157 MPa。

(2) 经  $225^\circ\text{C} \times 21 \text{ h}$  峰时效处理后,  $\beta'$  相作为主要析出相, 有效阻碍了位错滑移, 从而大幅提高筒形件的强度并降低其伸长率。最终筒形件内部的性能最好, 抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 407 MPa、293 MPa 和 12%。

(3) 由于  $\beta'$  相会抑制压缩载荷作用下孪生现象的发生, 压缩屈服强度和拉伸屈服强度的比值有所增大, 从内部至外部, 其比值分别为 1.06、1.17 和

1. 02。

# 参考文献:

- [1] 李永军, 张奎, 李兴刚, 等. 挤压变形对 Mg-5.0Y-7.0Gd-1.3Nd-0.5Zr 合金组织和性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2010, 20 (9): 1692-1697.  
Li Y J, Zang K, Li X G, et al. Influence of extrusion on microstructures and mechanical properties of Mg-5.0Y-7.0Gd-1.3Nd-0.5Zr magnesium alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20 (9): 1692-1697.
- [2] 唐列冲. 双向锻造对 Mg-10Gd-4.8Y-0.6Zr 合金显微组织及力学性能的影响 [D]. 长沙: 中南大学, 2013.  
Tang L C. Microstructures and tensile properties of Mg-10Gd-4.8Y-0.6Zr alloy during two-direction forging [D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [3] 王必正, 高永浩, 刘楚明. 多向锻造及时效对 Mg-Gd-Y-Zr 组织和力学性能的影响 [J]. 兵器材料科学与工程, 2018, 41 (4): 27-31.  
Wang B Z, Gao Y H, Liu C M. Effect of multidirectional forging and ageing treatment on microstructure and mechanical properties of Mg-Gd-Y-Zr alloy [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2018, 41 (4): 27-31.
- [4] 骆俊廷, 赵静启, 李建, 等. 细晶高强度 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金热变形本构方程及组织演变模型 [J]. 中国有色金属学报, 2021, 31 (5): 1214-1226.  
Luo J T, Zhao J Q, Li J, et al. Constitutive equation and microstructure evolution model of fine-grained and high-strength Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloy during hot deformation [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31 (5): 1214-1226.
- [5] 代晓军, 杨西荣, 荆磊, 等. 等通道挤压变形技术制备超细晶镁合金的研究进展 [J]. 稀有金属, 2020, 44 (12): 1325-1332.  
Dai X J, Yang X R, Jing L, et al. Research progress in ultrafine grain magnesium alloy by equal channel angular pressing [J]. Chinese Journal of Rare Metals. 2020, 44 (12): 1325-1332.
- [6] 闫勇, 张星, 李保成. 不同挤压态组织对 Mg-13Gd-4Y-2Zn-0.5Zr 合金时效行为的影响 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (6): 232-235.  
Yan Y, Zhang X, Li B C. Effect of different extruded microstructure on aging behavior of Mg-13Gd-4Y-2Zn-0.5Zr Alloy [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (6): 232-235.
- [7] 沈光明, 顾洪兵, 刘东军, 等. 锻造及热处理对 Mg-8.5Gd-3.2Y-0.4Zr 合金显微组织及力学性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2016, 45 (21): 148-150.  
Shen G M, Gu H B, Liu D J, et al. Effect of forging and heat treatment on microstructure and mechanical properties of Mg-8.5Gd-3.2Y-0.4Zr alloy [J]. Hot Working Technology, 2016, 45 (21): 148-150.
- [8] Zheng J X, Li Z, Tan L D, et al. Precipitation in Mg-Gd-Y-Zr alloy: Atomic-scale insights into structures and transformations [J]. Materials Characterization, 2016, 117: 76-83.
- [9] Liu H, Gao Y, Liu J Z, et al. A simulation study of the shape of  $\beta'$  precipitates in Mg-Y and Mg-Gd alloys [J]. Acta Materialia, 2013, 61 (2): 453-466.
- [10] Homma T, Kunito N, Kamado S. Fabrication of extraordinary high-strength magnesium alloy by hot extrusion [J]. Scripta Materialia, 2009, 61 (6): 644-647.
- [11] Xu C, Zheng M Y, Xu S W. Ultra high-strength Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloy sheets processed by large-strain hot rolling and ageing [J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 547: 93-98.
- [12] Zhang D D, Liu C M, Wan Y C, et al. Microstructure and anisotropy of mechanical properties in ring rolled AZ80-Ag alloy [J]. Journal of Central South University, 2021, 28 (5): 1316-1323.
- [13] Zeng G, Liu C M, Gao Y H, et al. Microstructure and mechanical properties of AZ80-Ag alloy processed by hot ring rolling [J]. Materials Science and Engineering A, 2016, 674: 491-497.
- [14] Yu S L, Liu C M, Gao Y H, et al. Microstructure, texture and mechanical properties of Mg-Gd-Y-Zr alloy annular forging processed by hot ring rolling [J]. Materials Science and Engineering A, 2017, 689: 40-47.
- [15] 张宗良, 刘楚明, 高永浩, 等. Mg-9Gd-3Y-0.6Zr-0.05Ag 镁合金模锻件微观组织及力学性能不均匀性研究 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (2): 206-212.  
Zhang Z L, Liu C M, Gao Y H, et al. Study on inhomogeneity of microstructure and mechanical property for Mg-9Gd-3Y-0.6Zr-0.05Ag magnesium alloy die forgings [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (2): 206-212.
- [16] Valle J, Carreno F, Ruano O A J. Influence of texture and grain size on work hardening and ductility in magnesium-based alloys processed by ECAP and rolling [J]. Acta Materialia, 2007, 54 (16): 4247-4259.
- [17] Marko K, Amanda L, Ryan H, et al. Deformation twinning in AZ31: Influence on strain hardening and texture evolution [J]. Acta Materialia, 2010, 58 (19): 6230-6242.
- [18] Zhang Y, Rong W, Wu Y J, et al. A comparative study of the role of Ag in microstructures and mechanical properties of Mg-Gd and Mg-Y alloys [J]. Materials Science and Engineering A, 2018, 731: 609-622.
- [19] Bhattacharyya J J, Wang F, Mcquade P J, et al. Deformation and fracture behavior of Mg alloy, WE43, after various aging heat treatments [J]. Materials Science and Engineering A, 2017, 705: 79-88.
- [20] Yu Z J, Xu C, Meng J, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of a high strength Mg-11.7Gd-4.9Y-0.3Zr (wt%) alloy prepared by pre-deformation annealing, hot extrusion and ageing [J]. Materials Science and Engineering A, 2017, 703: 348-358.
- [21] Robson J D, Stanford N, Barnett M R. Effect of precipitate shape on slip and twinning in magnesium alloys [J]. Acta Materialia, 2011, 59 (5): 1945-1956.