

挤压参数和 Y 含量对 Mg-Y 合金棒材显微组织及拉-压变形行为的影响

黄广号¹, 李欣¹, 尹冬弟¹, 陆嘉伟¹, 周浩², 权高峰¹

(1. 西南交通大学 材料先进技术教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

(2. 北京工业大学, 北京 100022)

摘要: 通过光学显微镜 (OM)、电子背散射 (EBSD) 及单轴拉-压研究了 Y 元素含量 (1%, 5%, 质量分数)、挤压温度 (ET)、挤压比 (ER) 对 Mg-Y 合金挤压棒材显微组织、织构及拉-压变形行为的影响规律。结果表明: 当 Y 含量由 1% 增加到 5% (ET=300 °C, ER=9): 由“双峰”组织变为细小均匀的完全动态再结晶组织; 两种棒材横截面 (ED 面) 和纵剖面 (TD 面) 的平均晶粒尺寸相近, 约为 (14.1±1.9)~(16.5±1.6) μm; 室温拉伸屈服强度 (TYS) 由 173±3 MPa 降低到 125±6 MPa, 但断裂延伸率则由 (11.0±2.1)% 大幅增加到 (31.0±1.2)%, 这主要是由于基面丝织构的显著弱化和织构强度的明显降低 (~53%) 导致; CYS/TYS 由 0.87 变为 1.10, 材料由通常的正拉压不对称性变为反拉压不对称性。当 ER 由 9 增加到 32 (ET=300 °C): Mg-1Y 的 TYS 大幅增加到 (242±1) MPa (~40%), 同时断裂延伸率增加到 (12.9±1.5)% (~17%), 这主要与大挤压比使得动态再结晶趋于完全、晶粒更加细小均匀 (10.1±1.4 μm) 以及基面丝织构的显著弱化 (~75%) 密切相关。增加挤压温度 (300~400 °C) 对 Mg-1Y 棒材 (ER=32) 的晶粒尺寸和拉伸力学性能的影响较小, 但可提高压缩屈服强度 (CYS) 至 (236±9) MPa (~15%), CYS/TYS 由 0.85 增加到 1.02, 材料拉压屈服对称。Y 含量显著影响材料的变形行为, 不同挤压参数的 Mg-1Y 合金棒材均表现出“S”型压缩曲线, 而 Mg-5Y 则无此现象, 变形后组织观察表明“S”型曲线与李晶主导变形密切相关。

关键词: 镁钇合金; 挤压参数; 拉压不对称性; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG146.22

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)09-2861-08

镁合金因其在汽车工业、航空航天及轨道交通领域巨大的轻量化效益, 受到各国研究者的广泛关注, 被誉为“21 世纪绿色工程材料”^[1]。根据加工方式的不同, 镁合金分为铸造镁合金和变形镁合金, 变形镁合金可通过热加工工艺及后续热处理来调控微观组织获得多样化的力学性能^[2], 具有更大的发展潜力^[3]。挤压是镁合金塑性成形的重要方式, 通过挤压可以生产尺寸多样的板、棒、管及型材, 但镁合金密排六方的晶体结构有限的滑移系导致其在挤压后容易形成较强的基面织构, 严重影响其力学性能。

Y 元素的加入能够有效弱化变形镁合金的织构^[4], 材料在变形过程中更多的变形机制启动, $\langle c+a \rangle$ 滑移可协调 c 轴变形塑性得到极大提升^[5]。此外, Y 元素的加入能够显著改善镁合金的高温性能^[6], 稀土镁合金成为高温镁合金研究的一个方向, Yin 等^[7]研发的镁钇基 WGZ115 合金具有优异的高温力学性能。

目前对挤压稀土镁合金的研究多集中在各种复杂成分的镁合金, 由于涉及因素过多不利于厘清工艺-组织-性能等关键因素之间的规律。为了更好的理解稀土镁合金的变形规律, 越来越多的学者开始关注包括 Mg-Y 在内的二元稀土镁合金, 然而挤压参数对 Mg-Y 合金挤压棒材显微组织和力学行为影响的研究还较少。本实验系统地研究了 Y 含量、挤压温度、挤压比对 Mg-Y 合金挤压棒材显微组织、织构及拉-压变形行为的影响规律, 从而为开发下一代高性能 Mg-Y 基变形镁合金奠定试验和理论基础。

1 实验

本实验所用 Mg-xY (1%, 5%, 质量分数) 合金由工业纯镁 (99.99%) 和 Mg-30Y (30%) 中间合金在 CO₂ 和 SF₆ 混合气体保护下在井式电阻炉中熔炼得到铸锭, 实际化学成分为 Mg-0.9Y 和 Mg-4.8Y。将合金铸

收稿日期: 2017-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(青年项目)(51401172, 51601003); 四川省科技计划 (2015HH0012); 中央高校基本科研业务费专项资金 (2682016CX073)

作者简介: 黄广号, 男, 1991 年生, 硕士生, 西南交通大学材料科学与工程学院, 四川 成都 610031, 电话: 028-87634673, E-mail: 1356759721@qq.com

锭 530 °C，8 h 均匀化处理后车削成 $\Phi 90$ mm 圆柱坯料，坯料预热 2 h 后挤压成 $\Phi 16$ mm 和 $\Phi 30$ mm 的棒材。实验设计：(1) Y 含量分别为 1% 和 5%，挤压温度 (ET) 为 300 °C，挤压比 (ER) 为 9；(2) 挤压温度分别为 300 和 400 °C，Y 含量为 1%，挤压比为 32；(3) 挤压比分别为 9 和 32，Y 含量为 1%，挤压温度为 300 °C。

用 Zeiss 光学显微镜 (OM) 对挤压棒材的横截面 (ED 面) 和纵剖面 (TD 面) (如图 1a 所示) 进行显微组织观察，采用截线法统计平均晶粒尺寸。用配备了 EBSD 探头和自动位向采集系统 (HKL Channel 5) 的扫描电镜进行微区结构分析，为保证统计规律测试区域至少包含约 1000 个晶粒。EBSD 测试试样先用砂纸打磨后机械抛光至镜面，然后用体积比 1:9 的高氯酸乙醇溶液在 -40 °C、4 V 电压下电解抛光 3 min。

力学性能测试取样如图 1b 所示，室温拉伸及压缩实验在 MTS-CMT5105 电子万能试验机上进行，应变速率 $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，拉伸试样标距 18 mm，截面尺寸 2 mm \times 3 mm，压缩试样尺寸为 $\Phi 10$ mm \times 15 mm，每组实验取 3 个平行样，屈服强度 (TYS、CYS)、极限强度 (UTS、UCS) 及断裂应变 (fracture strain) 均取其平均值。

2 结果及讨论

2.1 挤压棒材的显微组织及结构

Mg-1Y、Mg-5Y 合金挤压棒材 (ET=300 °C、ER=9) ED 面及 TD 面的显微组织如图 2。图 2a、2c 所示 Mg-1Y 合金棒材 ED 面、TD 面显微组织中有许多明亮区域如箭头所指区域 A、B，将 A、B 区域放大观察如图 2b、

2d 所示为未动态再结晶的粗大晶粒。ED 面的粗大晶粒形状不规则且杂乱分布，TD 面的粗大晶粒呈长条状平行于挤压方向分布，晶界呈锯齿状，长条状晶粒之间分布着细小的等轴晶。图 2e、2g 所示 Mg-5Y 合金棒材 ED 面和 TD 面显微组织存在极少量未动态再结晶区域，其它区域 (区域 C、D) 为均匀细小的等轴晶 (如图 2f、2h)。分别统计 ED 面、TD 面的平均晶粒尺寸，Mg-1Y 合金棒材 ED 面、TD 面的平均晶粒尺寸分别为 $(16.5 \pm 1.6) \mu\text{m}$ 和 $(15.7 \pm 2.8) \mu\text{m}$ ，Mg-5Y 合金棒材则分别为 $(14.1 \pm 1.9) \mu\text{m}$ 和 $(15.3 \pm 1.4) \mu\text{m}$ 。ET 及 ER 相同时，随 Y 含量增加动态再结晶更加充分，但平均晶粒尺寸变化不明显。对 Mg-Y 合金棒材的研究表明，高 Y 含量促进动态再结晶^[8]，但 RE 含量对 Mg-RE 合金轧制板材晶粒尺寸的影响存在一个临界值^[4]，可以推测对于镁钇合金挤压棒材该 Y 含量临界值小于 1%。

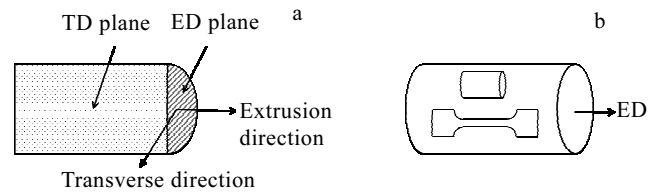


图 1 Mg-Y 合金挤压棒材特征方向及特征面和拉伸压缩试样取样示意图

Fig.1 Illustration for the characteristic directions and planes (a) and schematic of the tensile and compression samples (b) of extruded Mg-Y alloy bars

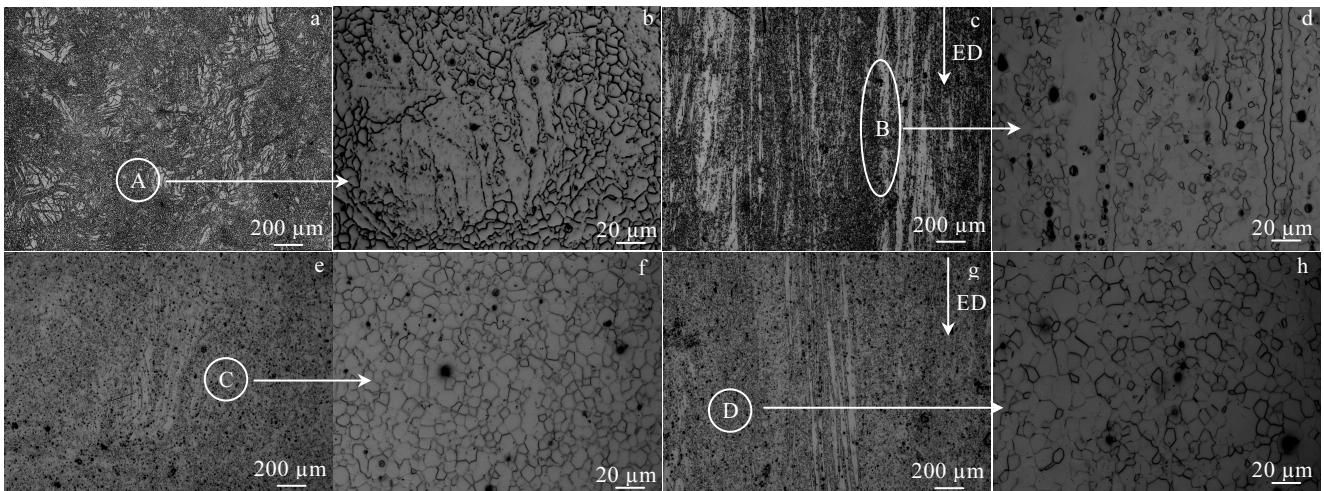


图 2 挤压温度 300 °C、挤压比为 9 时不同 Y 含量 Mg-Y 合金挤压棒材的光学显微组织

Fig.2 Optical micrographs of as-extruded Mg-Y alloy bars extruded at 300 °C with the extrusion ratio of 9: (a) ED and (c) TD plane of Mg-1Y, (b) area A, (d) area B; (e) ED and (g) TD plane of Mg-5Y, (f) area C, (h) area D

图 3 所示不同挤压温度 Mg-1Y 合金棒材(ER=32)的显微组织, 其 ED 面(图 3a、3e)及 TD 面(图 3c、3g)组织比较均匀, 在高倍下观察发现 ED 面(图 3b、3f)呈均匀细小的等轴晶, 而 TD 面(图 3d、3h)则均分布着少量沿挤压方向拉长的晶粒。不同挤压温度的棒材 ED 面、TD 面的平均晶粒尺寸相近, 约为 $(99.2\pm 0.3)\sim(12.2\pm 1.6)\mu\text{m}$, 挤压温度变化对于平均晶粒尺寸无较显著的影响。

对比 ER=9 和 ER=32 时 Mg-1Y 合金挤压棒材(ET=300 °C)的显微组织, ER=9 时 ED 面(图 2b)及 TD 面(图 2d)均有较大的未动态再结晶区域, ER=32 时 ED 面(图 3b)及 TD 面(图 3d)动态再结晶比较完全。随 ER 增大, Mg-1Y 合金棒材 ED 面、TD 面的平均晶粒尺寸由 $(16.5\pm 1.6)\mu\text{m}$ 、 $(15.7\pm 2.8)\mu\text{m}$ 减小到 (10.1 ± 1.4)

μm 、 $(11.5\pm 0.9)\mu\text{m}$ 。挤压比增大动态再结晶更加充分、平均晶粒尺寸明显减小。

不同 Y 含量及挤压参数 Mg-Y 合金挤压棒材 ED 面的{0001}极图如图 4 所示。ET=300°C、ER=9 时 Mg-1Y 合金棒材具有典型的丝织构(如图 4a 所示), 织构强度(Max)达到 13.6, {0001}极集中分布于圆周上两点, 这可能与组织中未动态再结晶的粗大晶粒有关^[9]。随 Y 含量增加, Mg-5Y 合金棒材的织构(如图 4b 所示)明显弱化, 织构强度下降至 6.4, {0001}面向挤压方向旋转。图 4c 所示 Mg-1Y 合金棒材的织构强度下降到 3.3 (对比图 4a), {0001}面向挤压方向旋转, ER 增大动态再结晶更加充分导致织构弱化。图 4d 所示 Mg-1Y 合金棒材的织构(对比图 4c)随着 ER 升高强化, 织构强度增加到 8.6, {0001}极同样较集中地分布于圆周上。

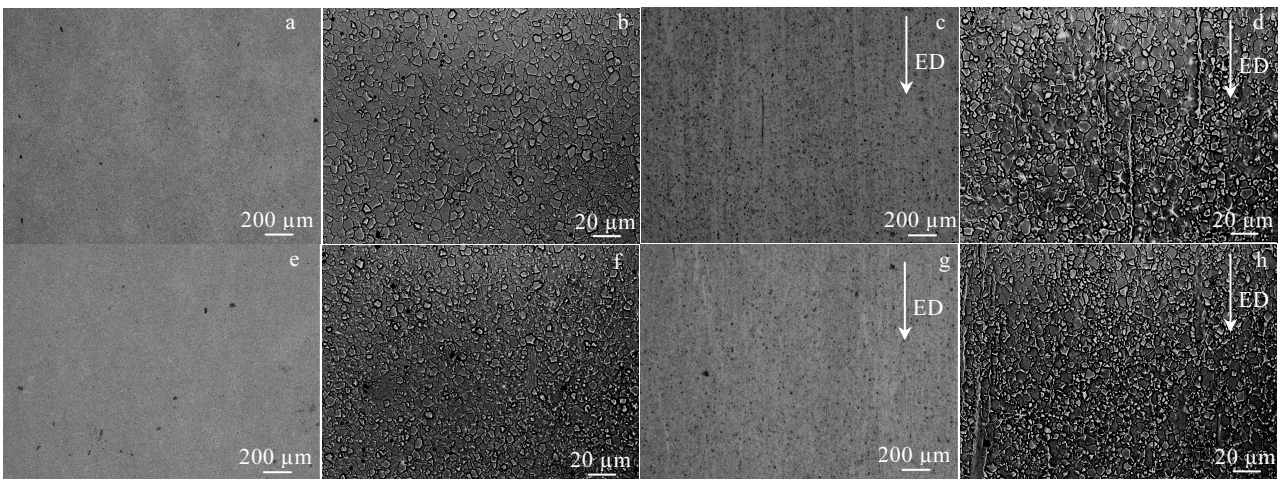


图 3 挤压温度分别为 300 和 400 °C、挤压比为 32 时 Mg-1Y 合金挤压棒材光学显微组织

Fig.3 Optical micrographs of as-extruded Mg-1Y alloy bars extruded at 300 °C(a~d) and 400 °C(e~h) with the extrusion ratio of 32: (a, b, e, f) ED, and (c, d, g, h) TD

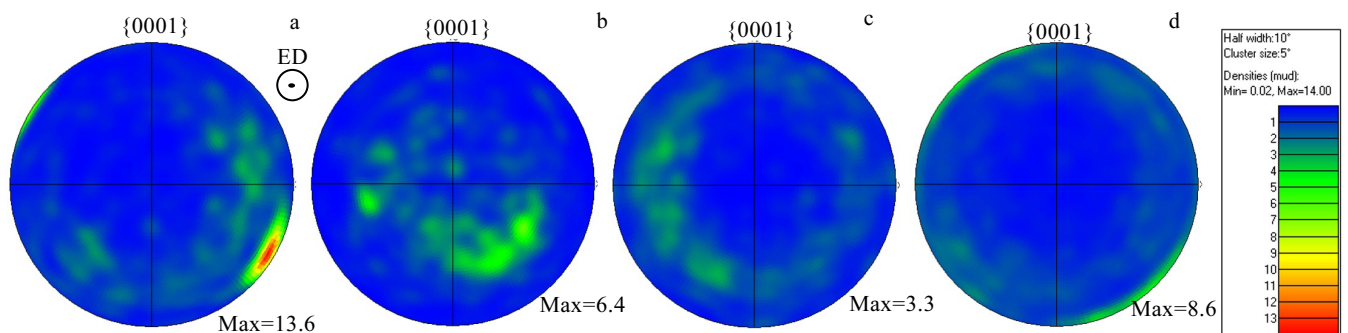


图 4 不同 Y 元素含量及挤压参数 Mg-Y 合金棒材 ED 面的{0001}极图

Fig.4 {0001} pole figures of as-extruded Mg-Y alloy bars with different Y contents and extrusion parameters: Mg-1Y (a) and Mg-5Y (b) alloys extruded at 300 °C with extrusion ratio of 9; Mg-1Y alloy extruded at 300 °C (c) and 400 °C (d) with extrusion ratio of 32

表 1 挤压棒材的力学性能

Table 1 Mechanical properties of the extrusion alloy bars

Alloy	Extrusion parameters		Tensile properties			Compression properties			CYS/TYS
	Extrusion temperature/ °C	Extrusion ratio	TYS /MPa	UTS /MPa	Fracture strain/%	CYS /MPa	UCS /MPa	Fracture strain/%	
Mg-1Y	300	32	242±1	239±2	12.9±1.5	205±13	410±18	15.3±1.5	0.85
Mg-1Y	400	32	232±3	225±8	14.2±1.4	236±9	454±17	13.6±0.2	1.02
Mg-1Y	300	9	173±3	200±3	11.0±2.1	151±3	388±16	15.5±0.8	0.87
Mg-5Y	300	9	125±6	185±1	31.0±1.2	138±2	370±2	26.6±1.8	1.10

2.2 挤压棒材的力学性能

2.2.1 Y 含量对力学性能的影响

表 1 所示 ET=300 °C、ER=9 时, Y 含量由 1% 增加到 5%, TYS、UTS 分别下降 25% 和 7.5%, 而断裂应变由 11.0% 大幅增加到 31.0% (↑181.8%); CYS、UCS 分别下降 8.6%、4.6%, 而断裂应变也由 15.5% 增加到 26.6% (↑71.6%); CYS/TYS 由 0.87 变为 1.10, 材料由通常的正拉压不对称性变为反拉压不对称性。挤压参数相同时, 随 Y 含量增加材料的强度降低而断裂应变大幅提升, 塑性得到了显著改善。

Y 含量不同的平均晶粒尺寸无较大差异, 但织构对材料的性能同样有很大的影响^[10]。随 Y 含量增加, Mg-5Y 合金挤压棒材的织构弱化, Wu 等^[11]对纯镁及镁钇合金挤压棒材的对比研究发现, 随 Y 含量增加材料抗拉伸强度降低而断裂应变增加, 这主要是由于织构弱化。Zhou 等^[12]在 Mg-3Y 挤压棒材拉伸中得到了高达 32% 的断裂应变, 较好的塑性得益于材料在变形过程中多变形机制的协同作用。

Mg-1Y 合金棒材(ET=300 °C、ER=9)具有典型的丝织构(如图 4a), 当沿 ED 方向压缩时有利于拉伸孪生的发生, 而沿 ED 方向拉伸时拉伸孪生受到抑制, 拉伸孪生的产生导致屈服强度降低, CYS/TYS 小于 1, 材料表现出正的拉压不对称性。随 Y 含量增加, Mg-5Y 合金棒材的织构弱化(如图 4b), 沿 ED 方向加载时 c 轴不是单一的拉应力或压应力状态, 应力方向的改变不会产生显著地诱导或者抑制拉伸孪生发生作用。Stanford 等^[13]发现 Y 含量升高可以抑制 Mg-Y 合金变形过程中孪生的产生, 故 Mg-5Y 合金棒材与 Mg-1Y 合金棒材的拉压不对称性有较大的差异。

2.2.2 挤压温度对力学性能的影响

当 ER=32、ET 从 300 °C 增加到 400 °C 时, Mg-1Y 合金挤压棒材的 TYS、UTS 分别下降了 4.1% 和 5.9%, 断裂应变由 12.9% 增加到 14.2% (↑10.1%); 而 CYS、UCS 分别上升了 15.1% 和 10.7%, 断裂应变由 15.3% 下降到 13.6% (↓11.1%); CYS/TYS 由 0.85 变为 1.02, 材料拉压屈服对称。

挤压温度不同时两种材料的平均晶粒尺寸相近而织构则有较大差别。图 4c、4d 所示 300 °C 挤压棒材的织构较 400 °C 挤压棒材明显弱化, 沿 ED 方向加载时更利于基面滑移启动其屈服强度应该较低而塑性更好。实验中 300 °C 挤压棒材的 CYS 更低而断裂应变更高, 但 TYS 反而更高而断裂应变更低, 可见影响强度及塑性的因素较复杂。影响拉压不对称性的因素有晶粒尺寸、织构、热处理(析出相)、加载方向等^[14], 随挤压温度升高晶粒尺寸相近而织构明显不同, 材料的拉压不对称性消失可能与织构的变化有关。

2.2.3 挤压比对力学性能的影响

ET=300 °C 时 ER 从 9 增加到 32, Mg-1Y 合金挤压棒材的 TYS、UTS 分别增加了 39.9% 和 19.5%, 断裂应变由 11.0% 增加到 12.9% (↑17.3%); CYS、UCS 分别增加 35.7% 和 5.7%, 断裂应变略微降低。挤压比增大平均晶粒尺寸明显减小, 晶粒尺寸减小则晶界面面积增加, 材料在变形过程中晶界能够起到阻碍位错运动的作用而提高强度, 拉伸及压缩屈服强度均有显著提升。

2.2.4 拉伸及压缩变形行为

Mg-Y 合金挤压棒材的室温拉伸及压缩工程应力-应变曲线如图 5 所示, ET=300 °C、ER=9 时 Mg-1Y 合金挤压棒材拉伸曲线的加工硬化阶段较短, 断裂应变最低; Mg-5Y 合金棒材在拉伸及压缩变形中均有很长的加工硬化阶段, 断裂应变最大。ER=32 的 Mg-1Y 合金棒材的拉伸曲线均无明显的加工硬化, 开始发生塑性变形时强度即达到最大, 随着应变的继续增加应力均下降约 10 MPa, 之后应力几乎保持不变而应变不断增加。Zhang 等^[15]报道过较大的晶粒尺寸及较低的位错密度更利于变形过程中位错聚集从而导致加工硬化。本实验中 ER=9 的 Mg-1Y 合金棒材在拉伸实验中有明显的加工硬化, ER=32 的棒材挤压成形后材料中高密度的位错抑制变形过程中的位错聚集从而抑制了加工硬化。

图 5b 所示 Mg-1Y 合金挤压棒材压缩曲线均呈 S 型, 应力-应变曲线具有 S 型特征的材料在变形过程是

由 {10 $\bar{1}2$ } 拉伸孪生变形机制主导, 大量拉伸孪生发生后材料能维持在一个较低的应力下发生塑性流变, Chen 等^[16]对压缩变形前后组织进行 XRD 宏观织构分析直接证明了 S 型压缩曲线与拉伸孪生的关系。

2.3 变形后组织

Mg-1Y、Mg-5Y 合金挤压棒材(ET=300℃、ER=9)变形后的显微组织如图 6 所示。Mg-1Y 合金压缩变形后(图 6b)出现了大量的孪晶, 与挤压态相比组织细化明显。Mg-1Y 合金挤压棒材具有较强的丝织结构, 沿 ED 方向压缩时 c 轴受到拉应力满足拉伸孪生发生的应力条件。Somekawa 等^[17]对挤压 Mg-0.05Y 合金进行了压缩原位观察, 0.035 的应变时孪生大量产生, 而当应变达到 0.165 时组织已明显细化。Mg-5Y 合金拉伸变形后(图 6c)晶粒沿载荷方向拉长且晶内有孪晶产生; 压缩后(图 6d)晶粒沿垂直于载荷方向拉长, 未见孪晶出现。

各挤压棒材拉伸后的断口形貌如图 7 所示, 4 种材料的拉伸断口呈现两种断裂特征。图 7a 所示 ER=9 的 Mg-1Y 合金棒材的拉伸断口由少量解理面及大量的撕裂棱组成, 其断裂方式介于脆性断裂和韧性断裂之间; 图 7b、7c、7d 所示另外 3 种棒材的拉伸断口主要由韧窝组成, 为韧性断裂; Y 含量增加及 ER 增大改善了材料的塑性。图 8 所示为各挤压棒材压缩后的断口形貌, 压缩断口均由大的解理面及小韧窝组成, 表明材料在剪切变形作用下发生断裂^[8]。

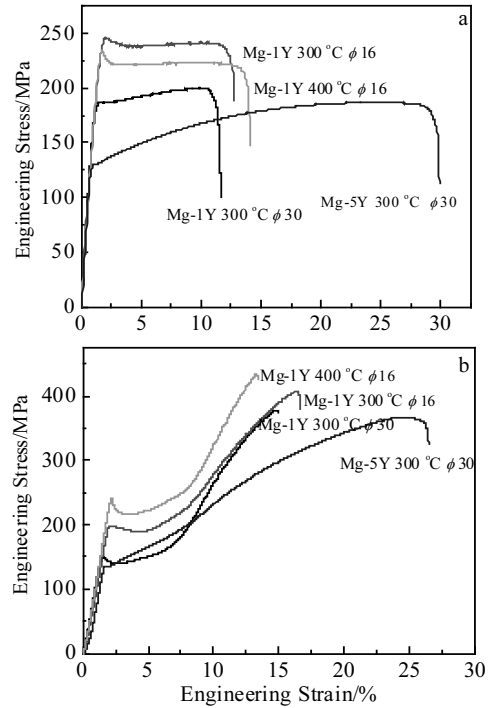


图 5 Mg-Y 合金挤压棒材的拉伸及压缩工程应力-应变曲线
Fig.5 Tensile (a) and compression (b) engineering stress-strain curves of extruded Mg-Y alloy bars

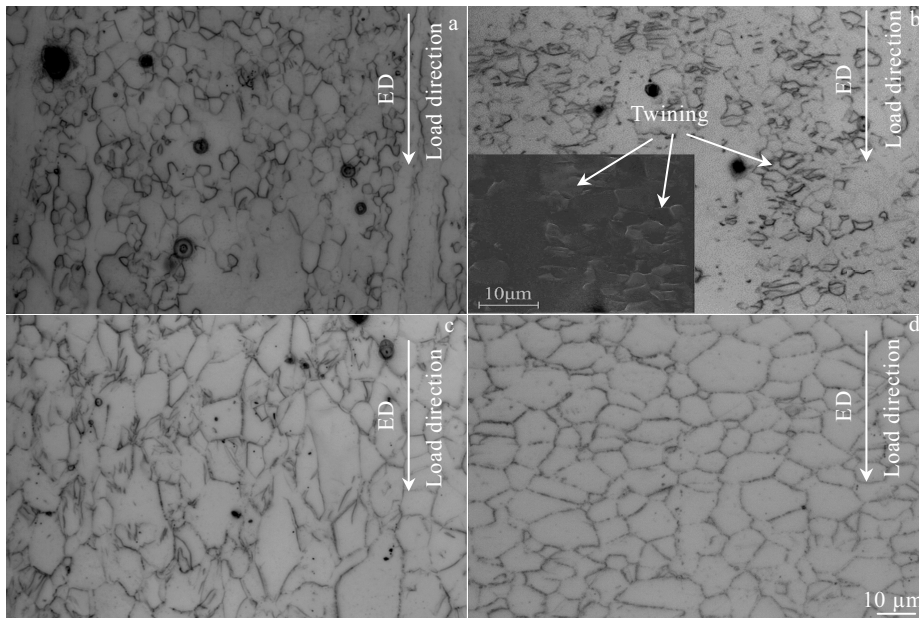


图 6 Mg-Y 合金挤压棒材变形后的显微组织

Fig.6 Deformation microstructures of Mg-Y alloy bars extruded at 300 °C with extrusion ratio of 9: (a) tension and (b) compression of Mg-1Y alloy; (c) tension and (d) compression of Mg-5Y alloy

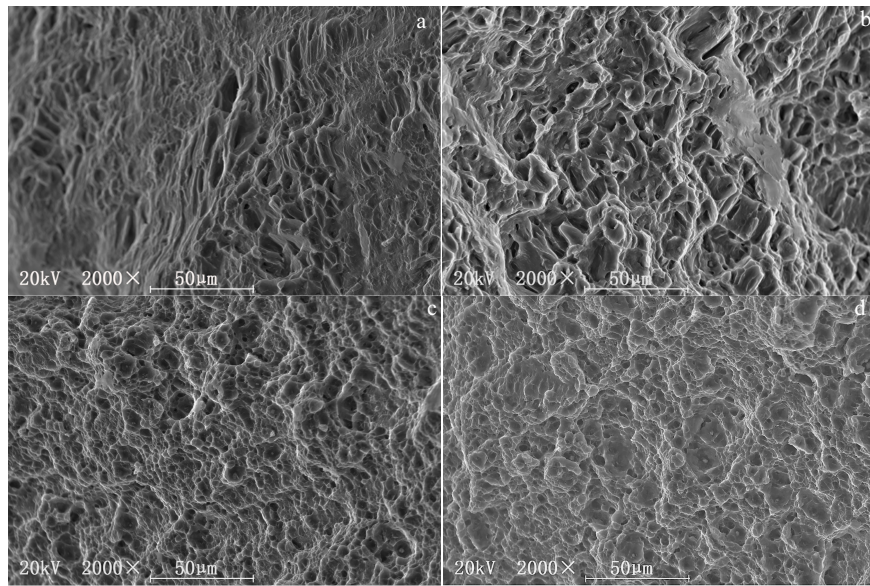


图 7 Mg-Y 合金挤压棒材拉伸断口形貌

Fig.7 Tensile fracture morphologies of extruded Mg-Y alloy bars: (a) Mg-1Y and (b) Mg-5Y alloy extruded at 300 °C with extrusion ratio of 9; Mg-1Y alloy extruded at (c) 300 °C and (d) 400 °C with extrusion ratio of 32

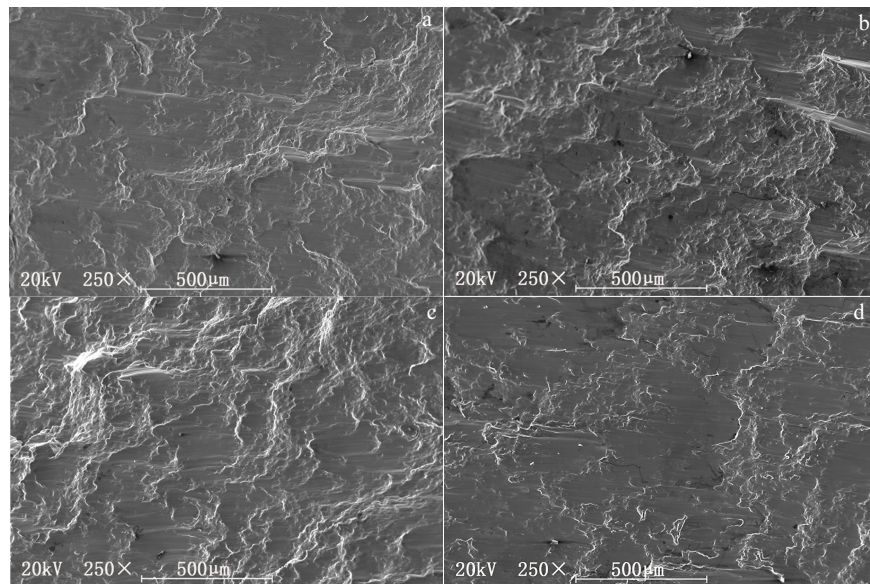


图 8 Mg-Y 合金挤压棒材压缩断口形貌

Fig.8 Compression fracture morphologies of extruded Mg-Y alloy bars: (a) Mg-1Y and (b) Mg-5Y alloy extruded at 300 °C with extrusion ratio of 9; Mg-1Y alloy extruded at (c) 300 °C and (d) 400 °C with extrusion ratio of 32

3 结 论

1) 当 Y 含量由 1% 增加到 5%，Mg-Y 合金挤压棒材(ET=300 °C、ER=9)的组织由“双峰”组织变为细小

均匀的全动态再结晶组织; 两种棒材 ED 面和 TD 面的平均晶粒尺寸相近, 约为 $(14.1\pm 1.9)\sim(16.5\pm 1.6)\mu\text{m}$; TYS 由 $173\pm 3\text{MPa}$ 降低到 $(125\pm 6)\text{MPa}$, 但断裂延伸率则由 $(11.0\pm 2.1)\%$ 显著增加到了 $(31.0\pm 1.2)\%$, 这主要是由于基面丝织构的显著弱化和织构强度的明显降低($\sim 53\%$)材料在变形过程中多种变形机制协调作用导致; 此外, 随 Y 含量增加 CYS/TYS 由 0.87 变为 1.10, 材料由通常的正拉压不对称性变为反拉压不对称性。

2) 当 ER 由 9 增加到 32($ET=300\text{ }^\circ\text{C}$), Mg-1Y 合金棒材的动态再结晶趋于完全、晶粒更加细小均匀($\sim 10.1\pm 1.4\mu\text{m}$), 基面丝织构显著弱化($\sim 75\%$)。同时材料的 TYS 大幅增加到 $(242\pm 1)\text{MPa}$ ($\sim 40\%$), 断裂延伸率增加到 $(12.9\pm 1.5)\%$ ($\sim 17\%$)。挤压温度从 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 增加到 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 对 Mg-1Y 棒材(ER=32)的晶粒尺寸和拉伸力学性能的影响较小, 但可提高 CYS 至 $(236\pm 9)\text{MPa}$ ($\sim 15\%$), CYS/TYS 由 0.85 增加到 1.02, 材料拉压屈服对称。

3) Y 含量显著影响材料的变形行为, 各挤压参数不同的 Mg-1Y 合金棒材压缩曲线均呈“S”型, 而 Mg-5Y 则无此现象, 变形后组织观察表明“S”型曲线与孪晶主导变形密切相关。

参考文献 References

- [1] Zhang Jing(张 静), Yuan Fuqing(袁付庆), Huang Hao(黄 浩). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(3): 593
- [2] Li Kaixin(李新凯), Zhang Zhimin(张治民), Zhao Yali(赵亚丽). *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2011, 40(24): 54
- [3] Fu Xuesong(付雪松), Chen Guoqing(陈国清), Wang Zhongqi(王中奇) *et al. Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(8): 1473
- [4] Hantzschke K, Bohlen J, Wendt J *et al. Scripta Materialia*[J], 2010, 63(7): 725
- [5] Sandlöbes S, Friák M, Zaefferer S *et al. Acta Materialia*[J], 2012, 60(6-7): 3011
- [6] Yan Yunqi(闫蕴琪), Zhang Tingjie(张廷杰), Deng Ju(邓 炬) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2004, 33(6): 561
- [7] Yin D D, Wang Q D, Boehlert C J *et al. Metallurgical and Materials Transactions*[J], 2012, 43A(9): 3338
- [8] Tekumalla S, Yang C, Seetharaman S *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2016, 689: 350
- [9] Tong L B, Zheng M Y, Cheng L R *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2013, 569: 48
- [10] Ding Wenjiang(丁文江), Jing Li(靳 丽), Wu Wenxiang(吴文祥) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2011, 21(10): 2371
- [11] Wu B L, Zhao Y H, Du X H *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2010, 527(16-17): 4334
- [12] Zhou N, Zhang Z, Jin L *et al. Materials & Design*[J], 2014, 56: 966
- [13] Stanford N, Marceau R K W, Barnett M R. *Acta Materialia*[J], 2015, 82: 447
- [14] Wei Guangqing(魏光清). *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2014, 43(5): 9
- [15] Zhang B P, Geng L, Huang L J *et al. Scripta Materialia*[J], 2010, 63(10): 1024
- [16] Chen Y, Guo Y B, Gupta M *et al. International Journal of Impact Engineering*[J], 2016, 89: 11
- [17] Somekawa H, Osawa Y, Singh A *et al. Materials Transactions* [J], 2014, 55(1): 182

Effect of Extrusion Parameters and Y Content on the Microstructure and Tension-Compression Deformation Behavior of Extruded Mg-Y Alloy Bars

Huang Guanghao¹, Li Xin¹, Yin Dongdi¹, Lu Jiawei¹, Zhou Hao², Quan Gaofeng¹

(1. Key Laboratory for Advanced Technologies of Materials, The Ministry of Education of China, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

(2. Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: Optical microscope (OM), electron back scattering diffraction (EBSD) and uniaxial tension and compression tests were carried out to investigate the effect of Y content (1wt%, 5wt%), extrusion temperature (ET) and extrusion ratio (ER) on the microstructure, texture and tension-compression deformation behavior of extruded Mg-Y alloy bars. Results show that the grains change from typical bimodal structure to small, homogeneous and fully dynamic recrystallized grains with increasing Y content from 1% to 5% (ET=300 °C, ER=9). The average grain size of cross section (ED plane) and longitudinal section (TD plane) of the two alloy bars are close and approximately $(14.1\pm 1.9)\ \mu\text{m}$ ~ $(16.5\pm 1.6)\ \mu\text{m}$. As a result of dramatically weakened basal plane fiber texture and decreasing texture intensity (~53%), the room temperature tensile yield strength (TYS) decreases from $(173\pm 3)\ \text{MPa}$ to $(125\pm 6)\ \text{MPa}$ while elongation remarkably rises from $(11.0\pm 2.1)\%$ to $(31.0\pm 1.2)\%$. Furthermore, the tension-compression asymmetry changes from common (CYS/TYS=0.8) to inverse (CYS/TYS=1.10) with increasing of Y content. With the extrusion ratio increasing from 9 to 32 (ET=300 °C), the TYS of Mg-1Y alloy bars drastically increases to $(242\pm 1)\ \text{MPa}$ (~40%), and the elongation increases to $(12.9\pm 1.5)\ \text{MPa}$ (~17%), which may be closely related to fully dynamic recrystallization, finer grain size (~ $10.1\pm 1.4\ \mu\text{m}$) and obviously weakened basal plane fiber texture (~75%). The increasing extrusion temperature (300~400 °C) has little effect on grain size and tension mechanical properties of Mg-1Y alloy bars (ER=32) while compression yield strength (CYS) rises to $(236\pm 9)\ \text{MPa}$ (~15%), the value of CYS/TYS changes from 0.85 to 1.02 which means the alloy exhibits tension-compression symmetry. Y content has an obvious influence on the deformation behavior of extruded Mg-Y alloy bars. All of the extruded Mg-1Y alloy bars show sigmoid compression stress-strain curve while no similar phenomenon in Mg-5Y alloy bar is observed. Observation of microstructure after compression suggests that this phenomenon is closely related to twinning dominant deformation mechanism.

Key words: magnesium-yttrium alloy, extrusion parameters, tension-compression asymmetry, microstructure, mechanical properties.

Corresponding author: Yin Dongdi, Ph. D, School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China, Tel: 0086-28-87634673, E-mail: ahnydd@swjtu.edu.cn