

轧制工艺对 Mg-10Gd-4.8Y-0.6Zr 合金 显微组织和力学性能的影响

袁武华, 齐欣, 黄巧玲

(湖南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083)

摘要: Mg-10Gd-4.8Y-0.6Zr 铸态合金经 525 °C、16 h 均匀化退火后, 在 500 °C 轧制成总变形量为 84% 的板材, 轧制后在 200 °C 进行时效处理。观察合金的微观组织变化, 并测试合金的力学性能。结果表明: 轧制变形明显细化了晶粒尺寸, 轧制后组织中存在方块相和长条状相; 轧制初期组织中存在大量孪晶, 孪晶能很好地协调塑性变形, 并诱发了孪生动态再结晶; 随着轧制变形量的增大, 孪晶数量减少, 再结晶方式以晶界弓出形核为主。轧制 T5 态合金具有优异的高温力学性能, 200、250、300 和 350 °C 时抗拉强度分别为 392、381、251 和 112 MPa, 350 °C 拉伸时伸长率达到 107.0%。

关键词: Mg-Gd-Y-Zr 合金; 热轧; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

Effect of rolling process on microstructure and mechanical properties of Mg-10Gd-4.8Y-0.6Zr alloy

YUAN Wu-hua, QI Xin, HUANG Qiao-ling

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

Abstract: The as-cast Mg-10Gd-4.8Y-0.6Zr alloy sheets were rolled at 500 °C with 84% total reduction after being homogenized at 525 °C for 16 h and then aged at 200 °C. The microstructures and mechanical properties were investigated. The results show that the grain size can be effectively refined by rolling process, cuboid-shaped phases and strip-shaped phases exist after being rolled. A mass of twins exist after initially being rolled, they can harmonize the plastic deformation and cause twinning-induced DRX. The number of twins decreases with the increase of rolling reduction and the DRX mode turns into grain boundary bulging mechanism. The rolled-T5 alloy has excellent elevated temperature mechanical properties: the tensile strength at 200, 250, 300 and 350 °C are 392, 381, 251 and 112 MPa, respectively, and the elongation at 350 °C can reach 107.0%.

Key words: Mg-Gd-Y-Zr alloy; hot rolling; microstructure; mechanical properties

镁合金是目前实际应用中密度最低的金属结构材料, 具有比强度和比刚度高、阻尼性能优异、电磁屏蔽效果佳等特点^[1]。但是, 镁合金较差的力学性能和塑性变形能力制约了其应用领域。近十几年来, 随着汽车、航空航天及电子领域对高强、耐热和抗蠕变镁合金需求量的日益扩大, 稀土变形镁合金已成为研究的重点^[2-3]。其中, Mg-Gd-Y-Zr 系合金的室温、高温

力学性能及抗高温蠕变性能优异, 明显优于 WE54 和 WE43 合金的^[4-5], 在国外已应用到飞机蒙皮、发动机引擎盖和变速箱壳体等零部件上, 引起各国研究者的关注。

GAO 等^[6-7]研究 Mg-15Gd-5Y-0.5Zr 合金在 525 °C 的固溶行为后发现, 铸态合金大致经历了以下的组织变化: α -Mg+Mg₂(Gd, Y)共晶相 \rightarrow α -Mg+球化 Mg₂(Gd,

Y)相 $\rightarrow\alpha$ -Mg 过饱和固溶体+Mg₂Y₃Gd₂ 方块相。何上明等^[8-9]研究了不同 Gd 含量、热处理工艺及热挤压形变热处理工艺对 Mg-xGd-3Y-Zr 合金组织性能的影响,研制的 GW123K 镁合金热挤压后经冷变形+时效处理后获得了 491 MPa 的最高抗拉强度,同时,提出了该系合金的 4 阶段时效析出序列: SSSS $\rightarrow\beta''$ (DO19) $\rightarrow\beta'$ (CBCO) $\rightarrow\beta_1$ (FCC) $\rightarrow\beta$ (FCC)。张新明等^[10-11]研究了 Mg-9Gd-4Y-0.6Zr 合金挤压 T5 态的力学性能及其在 196~400 °C 的断裂机制。目前,对该类合金轧制变形的研究较少,WANG 等^[12]对挤压态 GW123K 合金进行了总变形量为 92% 的轧制变形,获得了 382 MPa 最高强度。本文作者对铸态 Mg-10Gd-4.8Y-Zr 镁合金经均匀化处理后进行多道次轧制及热处理,研究轧制板材的微观组织变化和力学性能,为进一步研究该合金塑性变形工艺提供参考。

1 实验

实验合金为 Mg-10Gd-4.8Y-0.6Zr 合金,采用纯 Mg、Mg-31%Gd、Mg-32%Y 和 Mg-31%Zr 中间合金为原料,在真空熔炼炉中熔炼。熔炼和浇铸时采用 1%SF₆+99%CO₂(体积分数)的混合气体进行保护,熔炼温度为 750~820 °C,浇注温度为 750 °C。铸锭在 525 °C 进行 16 h 的均匀化退火后加工成 15 mm 厚板料,在 d 360 mm \times 600 mm 双辊热轧机上进行轧制。先将板料预热到 500 °C 并保温 30 min,之后以 10%道次压下量进行轧制变形,道次中间在 500 °C 退火 15 min,轧至 2.4 mm 厚,总变形量 84%,轧辊速度为 0.43 m/s,轧辊未预热。轧制后截取试样,在 200 °C 进行时效处理。

金相显微组织用 4XB-II 光学显微镜观察,腐蚀剂为 4%(体积分数)柠檬酸溶液。在 HBRV-187.5 布洛维硬度计上测试硬度,载荷为 625 N,保压时间为 30 s。在 Instron3369 电子万能力学试验机上进行拉伸试验,拉伸速度为 0.5 mm/min。采用 JSM-5000LV 型扫描电镜、EDS 附件和 JEM-3100F 型透射电镜进行显微组织与微区成分分析。

2 结果与讨论

2.1 显微组织

图 1 所示为 Mg-10Gd-4.8Y-0.6Zr 合金铸态和均匀化退火后的金相显微组织。图 2 所示为合金铸态的

SEM 像。表 1 所列图 2 中各点所对应的 EDS 分析结果。从图 1 和 2 中可以看到,合金铸态下 α -Mg 基体含有大量的树枝晶,平均晶粒尺寸为 80 μ m 左右。晶界处不连续分布着岛状的共晶相,据文献[13-14]及 XRD 分析该相为 Mg₂₄(GdY)₅ 相,在 Mg₂₄(GdY)₅ 相两侧分布着大量细针状条纹相,该相在一个晶粒内沿着一个方向或成 120 °C 交叉的两个方向呈有序排列,在不同的晶粒内排列方向不同,与晶粒本身有一定的位向关系。此外,在基体上还有少量富稀土粒子,如图 2 中箭头所示。经过 525 °C、16 h 均匀化处理后,

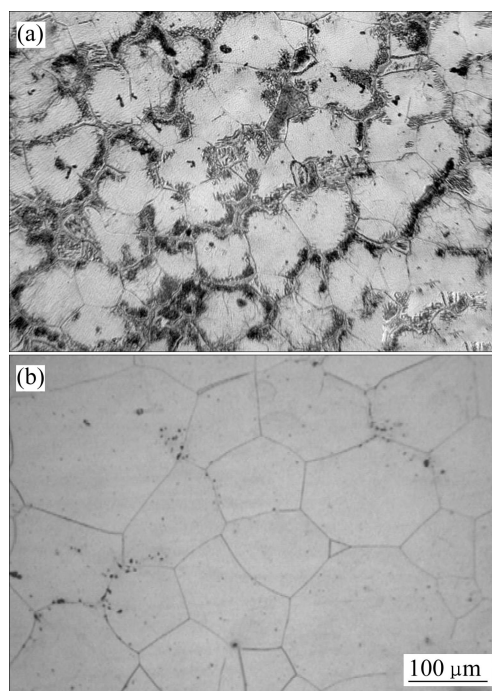


图 1 Mg-10Gd-4.8Y-0.6Zr 合金铸态和均匀化退火后的微观组织

Fig. 1 Microstructures of Mg-10Gd-4.8Y-0.6Zr alloys: (a) As-cast; (b) As-homogenized

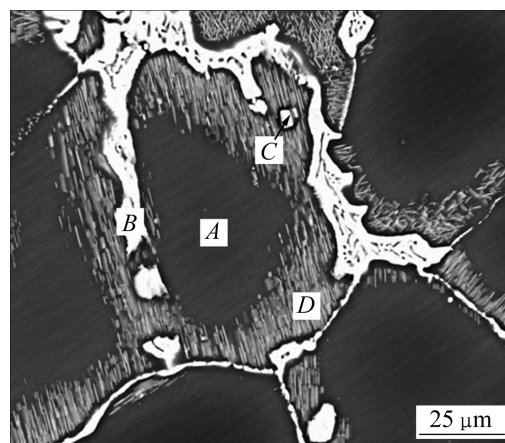


图 2 Mg-10Gd-4.8Y-0.6Zr 铸态合金的 SEM 像

Fig. 2 SEM image of as-cast Mg-10Gd-4.8Y-0.6Zr alloy

表 1 图 2 中各点对应的 EDS 分析

Table 1 EDS results of points shown in Fig. 2

Point	Mole fraction/%			
	Mg	Gd	Y	Zr
A	97.67	01.17	00.86	00.31
B	88.27	07.37	04.04	00.32
C	31.53	26.79	39.71	01.97
D	95.50	02.64	01.51	00.35

晶粒变得粗大, 部分晶粒尺寸超过 200 μm 。岛状共晶组织完全溶解到 $\alpha\text{-Mg}$ 基体中, 晶界清晰, 晶界附近和晶内有方块状相产生, 该相在高温下难以溶解。

图 3 所示为 Mg-10Gd-4.8Y-0.6Zr 合金经轧制后的显微组织。铸锭在 450 $^{\circ}\text{C}$ 热轧开坯时易发生断裂, 断裂方向与厚度方向成 45 $^{\circ}$, 宏观断口均匀、光滑。图 3(a)所示为 450 $^{\circ}\text{C}$ 轧制断裂板材附近的显微组织。由图 3(a)可以看到晶粒被拉长, 内部不均匀分布着大量的细长孪晶, 通常认为这些孪晶是 $\{10\bar{1}1\}$ 压缩孪晶^[15-16], 特别是一些粗晶内部有多组不同取向的孪晶, 这些孪晶相互交割, 在交接处堆积, 引起应力集中。大量孪晶终止于晶界, 在晶界附近造成大量位错塞积, 部分晶粒可以明显看到发生的向板厚方向的扭转。由于应力集中难以有效地通过位错分解和转移松弛, 导致断裂, 说明合金在该温度下塑性变形能力较差, 因此, 将轧制温度提高至 500 $^{\circ}\text{C}$ 。

图 3(b)~(e)所示为 500 $^{\circ}\text{C}$ 、不同变形量(ε)下板材的显微组织。图 3(b)显示 26%压下量时晶粒尺寸没有明显减小, 孪生是主要的变形机制, 几乎所有晶粒内部都有孪晶存在, 一些大晶粒内部产生了较粗大的孪晶, 这些孪晶具有弯曲的晶界。由图 3(b)可以看到, 大部分晶粒内部只有一个方向的孪晶, 只有少量孪晶相交, 许多相邻晶粒内部的孪晶相接或平行, 说明孪晶能很好地调节晶粒的取向并释放应力集中, 激发进一步的滑移, 使滑移和孪生交替进行。在一些晶粒内部可以看到孪晶之间相互反应使晶内出现位错塞积, 孪晶与位错之间交互作用形成锯齿状不规则亚结构, 促进新晶粒的形核, 在晶界和孪晶上可以看到少量的再结晶晶粒。

由图 3(c)可以看到 46%压下量时, 晶粒呈等轴状, 晶粒尺寸变得均匀、细小, 粗大晶粒几乎消失, 大部分晶粒尺寸为 30~50 μm , 还有许多再结晶晶粒尺寸小于 10 μm 。这是由于随着压下量的增大, 变形储能能

增加, 因此再结晶形核驱动力变大, 发生明显的动态再结晶, 同时粗大晶粒被破碎成为细小的晶粒。晶粒内部的孪晶呈短小透镜状, 通常认为这类孪晶是 $\{10\bar{1}2\}$ 拉伸孪晶, 该孪晶对位错滑移所引起的各向异性有一定调节作用。孪晶之间相互交截, 将基体分割开, 孪晶界与运动位错发生反应转变为普通晶界, 形成的小角度晶界可通过不断吸收位错转变成大角度晶界, 可见在变形过程中孪生动态再结晶是一种主要的形核机制。孪晶数量变少, 仅分布在部分晶粒内, 说明位错滑移逐渐取代孪生成为主要变形机制。

由图 3(d)可以看到, 68%压下量时由于更多滑移系启动和晶界扩散能力加强, 晶粒被明显拉长, 晶粒容易相互吞食而长大引起晶粒粗化, 粗大的晶粒晶界发生扭曲, 呈不规则多边形, 晶界上产生细小再结晶晶粒, 正在逐步蚕食粗大晶粒。这类晶粒可能是晶界弓出形核, 由于更多非基面滑移被激活以及晶粒之间形成附加内应力使晶界附近聚集了大量位错, 晶界附近局部区域发生扭曲, 随着原始晶界的迁移, 在晶界所扫过的区域位错快速攀移导致小角度晶界形成, 在小角度晶界上通过不断吸收新的位错引起动态再结晶。

由图 3(e)终轧 84%变形量时可以看到, 晶粒更加均匀、细小, 板材中出现了比较明显的变形流线, 这些流线阻碍再结晶晶粒的长大, 再结晶晶粒非常细小, 被拉长呈竹节状, 可看到第二相在晶内排列成线, 沿着流线方向分布。对轧制后组织进行 SEM 观察和能谱分析, 结果如图 3(f)和表 2 所示。由图 3(f)和表 2 发现, 轧制态组织主要存在两种不同的相, 方块状相和长条状相。方块状相由均匀化后产生, 尺寸为 1~3 μm , 该相是 Gd、Y 的富集相, Mg 与(GdY)的物质的量比约为 1:1; 条状相由轧制过程中产生, 宽约 1 μm , Mg 与(GdY)的物质的量比约为 3:1, 推测可能是 $\text{Mg}_3(\text{GdY})$ 相^[17]。

图 4(a)和(b)所示分别为合金 46%和 84%轧制变形量下的 TEM 像。从图 4(a)和(b)可以看到, 轧制过程中产生了孪晶, 84%变形量下的孪晶比较细长, 图 4(b)中孪晶宽度为 100~200 nm, 孪晶界平直, 孪晶界两侧存在大量的位错塞积, 这说明孪晶对滑移有阻碍作用, 产生了孪晶硬化现象。46%变形量下的孪晶比较粗大, 图 4(a)中孪晶尺寸为 1 μm 左右, 在孪晶内部存在一些位错线, 说明这种孪晶不仅能阻碍位错滑移, 同时孪晶内部又可以产生滑移以利于释放应力集中, 同时起到硬化和软化作用; 在孪晶内部还存在一些二次孪

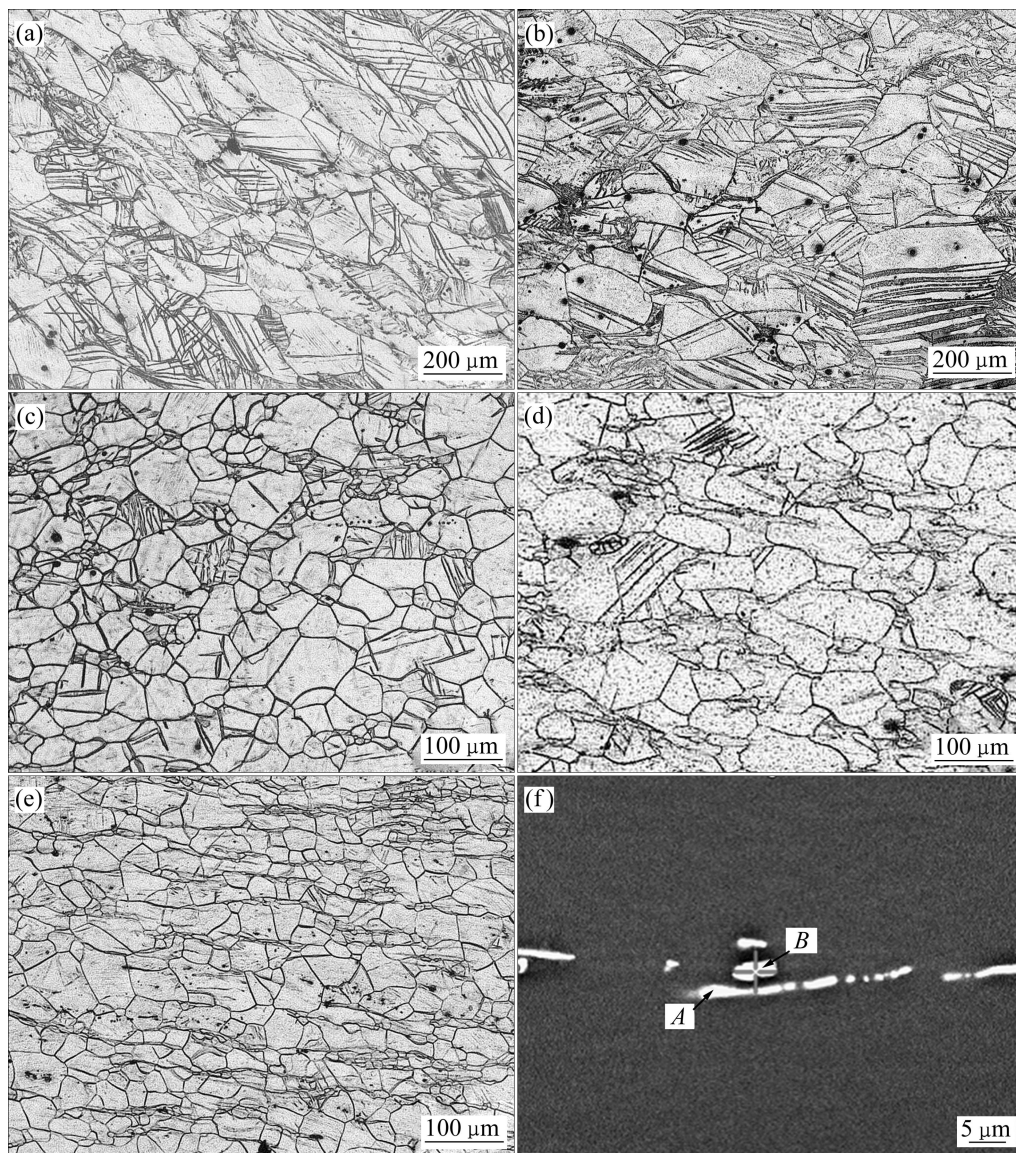


图3 经轧制后Mg-10Gd-4.8Y-0.6Zr合金的微观组织

Fig. 3 Microstructures of as-rolled Mg-10Gd-4.8Y-0.6Zr alloys: (a) Primary rolled at 450 °C; (b) $\epsilon=26\%$, rolled at 500 °C; (c) $\epsilon=46\%$, rolled at 500 °C; (d) $\epsilon=68\%$, rolled at 500 °C; (e) $\epsilon=84\%$, rolled at 500 °C; (f) SEM image of as-rolled alloy

表2 图3(f)中各点对应的EDS分析

Table 2 EDS results of points in Fig. 3(f)

Point	Mole fraction/%			
	Mg	Gd	Y	Zr
A	74.98	8.74	15.81	0.47
B	50.78	16.51	32.04	0.66

晶, 孪晶内部的位错线穿过孪晶并发生反应形成亚晶界, 从而产生了动态再结晶。图4(c)所示为合金轧制后经200 °C、22 h峰值时效后的TEM像。由图4(c)可见, 时效后合金中出现了黑色的椭球状析出相, 尺寸非常细小, 长度为10~20 nm, 宽度为3 nm左右,

析出相与 α -Mg基体界面模糊, 有着很好的共格匹配性。轧制变形使镁合金内部产生了大量位错缠结, 高位错密度促进析出相的析出, 使这些细小的亚稳相在 α -Mg基体中呈高密度、弥散分布, 有效地提高了合金强度。

2.2 力学性能及断口分析

图5所示为合金不同轧制变形量的布氏硬度变化曲线。从图5中可以看到, 轧制初期由于产生了加工硬化, 硬度增加速度很快, 硬度由均匀化处理后的72HB在46%变形量时上升至92.3HB, 此后发生了动态再结晶, 硬度变化平稳, 在68%变形量时甚至略

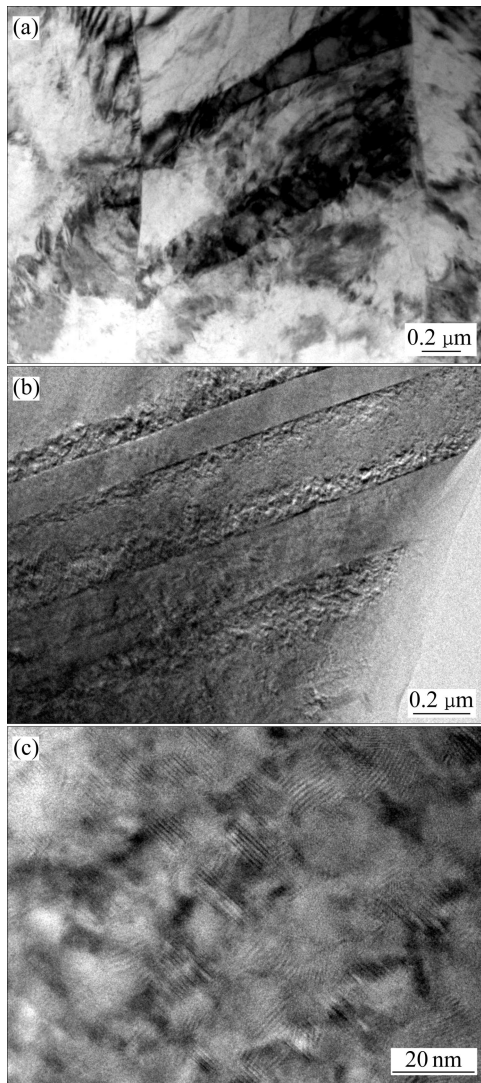


图 4 不同变形量下 Mg-10Gd-4.8Y-0.6Zr 合金的 TEM 像
 Fig. 4 TEM images of Mg-10Gd-4.8Y-0.6Zr alloys:
 (a) $\epsilon=46\%$ rolled; (b) $\epsilon=84\%$ rolled; (c) As-aged

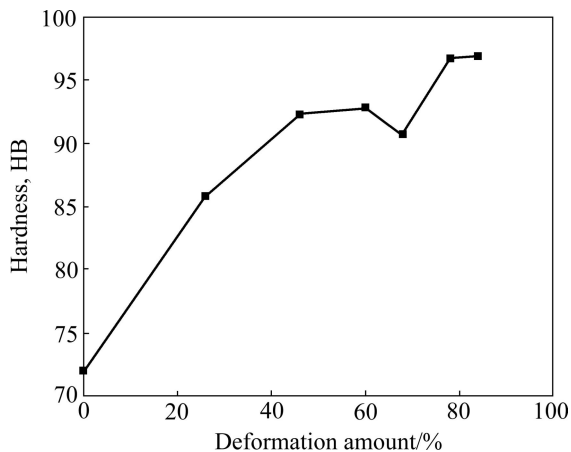


图 5 Mg-10Gd-4.8Y-0.6Zr 合金不同轧制变形量的布氏硬度
 Fig. 5 Brinell hardness of Mg-10Gd-4.8Y-0.6Zr alloys at different deformation amounts

有下降, 这可能是由于动态再结晶软化作用以及部分晶粒长大所致, 84%终变形后硬度达到 97HB。

轧制后合金抗拉强度为 300 MPa, 伸长率仅为 2.61%, 而经固溶处理后合金的抗拉强度和伸长率分别为 139 MPa 和 6.5%, 可见轧制变形有显著的强化作用, 但经轧制后合金的塑性较差。对轧制后板材进行 200 °C、22 h 时效处理, 峰值时效后合金的拉伸性能如表 3 所列。由表 3 可见, 合金在室温下抗拉强度为 374 MPa, 伸长率仅为 2.2%; 200 °C 时抗拉强度达到 392 MPa, 超过了室温时的抗拉强度, 这可能是由于在较高温度下原子扩散速率增加, 激活了更多变形机制, 及时释放了应力, 缓解了合金的脆性断裂。250 °C 时抗拉强度仍达 381 MPa, 强度下降很少, 但伸长率明显提高, 达到 6.0%; 300 °C 时强度下降到 251 MPa, 伸长率大幅提高至 38.5%, 合金耐热性能明显下降; 350 °C 时强度急剧下降, 仅为 112 MPa, 已达到了耐热极限, 但合金具有超塑性, 伸长率达到 107.0%。

表 3 Mg-10Gd-4.8Y-0.6Zr 合金的拉伸性能

Table 3 Tensile properties of Mg-10Gd-4.8Y-0.6Zr alloys

Test temperature/°C	σ_b /MPa	δ /%
25	374	2.2
200	392	2.7
250	381	6.0
300	251	38.5
350	112	107.0

图 6 所示为轧制 T5 态合金在不同温度下拉伸的断口形貌。200 °C 时的断裂特征为典型的穿晶解理断裂, 断口主要由大而光滑的解理面组成, 部分晶粒内有孪晶存在。250 °C 时断口上可以看到较多的撕裂棱, 解理面内可看到明显的河流花样和解理台阶, 还有少量的韧窝和剪切唇, 断裂方式为准解理断裂。300 °C 时断口有明显的颈缩, 断口上可以看到大量的韧窝, 还有少量解理面, 在晶界特别是晶界交汇处有大量撕裂棱, 这是由于高温时较多滑移系被激活, 晶界强度下降, 晶粒沿着拉伸方向被拉长, 裂纹在晶界三角点处形核、长大和汇集, 导致沿晶断裂, 断裂方式为微孔聚集型断裂和准解理断裂混合方式。350 °C 时断口上全部是韧窝和撕裂棱, 韧窝分布很密且尺寸宽大, 其断裂方式是典型的微孔聚集型韧性断裂。

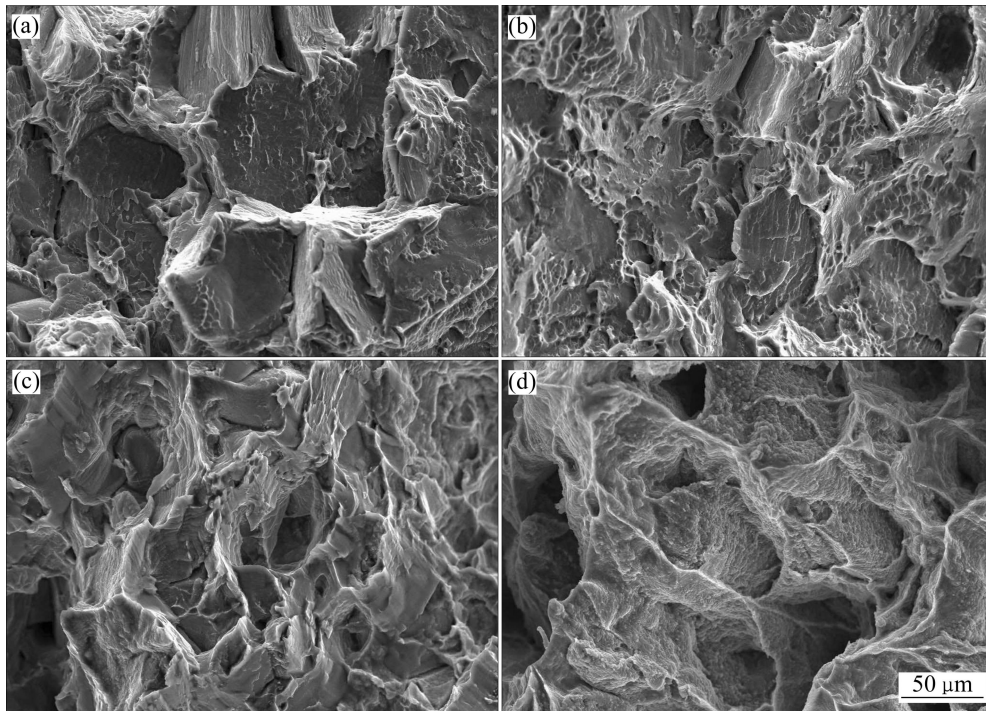


图6 轧制T5态Mg-10Gd-4.8Y-0.6Zr合金在不同温度下的断口SEM像

Fig. 6 SEM images of fractural surfaces of as-rolled T5 Mg-10Gd-4.8Y-0.6Zr alloys at different temperatures: (a) 200 °C; (b) 250 °C; (c) 300 °C; (d) 350 °C

3 结论

1) Mg-10Gd-4.8Y-0.6Zr合金铸态组织中存在大量岛状 $Mg_{24}(GdY)_5$ 相和晶内细针状条纹相。轧制变形后,组织中主要存在两种第二相沿轧制方向排列:方块状相和细条状相,其中方块相在均匀化处理后产生,Mg与GdY的物质的量比约为1:1,长条状相在轧制过程中析出,Mg与(GdY)的物质的量比约为3:1。

2) 轧制初期组织中存在大量孪晶,孪晶能很好地协调塑性变形,并诱发孪生动态再结晶,随着轧制变形量的增大,孪晶数量减少,滑移取代孪生成为主要的变形机制,再结晶方式转变成以晶界弓出形核为主。

3) 经轧制后合金的强度有较大提高,高温力学性能优异,轧制T5态合金在200、250、300和350 °C时抗拉强度分别为392、381、251和112 MPa,350 °C拉伸产生超塑性,伸长率达到107.0%。

4) T5态Mg-10Gd-4.8Y-0.6Zr合金在不同温度下拉伸的断裂机制不同,200 °C时断裂方式为穿晶解理断裂,250 °C时为准解理断裂,300 °C时为微孔聚集型断裂和准解理断裂混合方式,350 °C为典型的微孔聚集型韧性断裂。

REFERENCES

- [1] 陈振华, 严红革, 陈吉华, 全亚杰, 王慧敏, 陈鼎. 镁合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
CHEN Zhen-hua, YAN Hong-ge, CHEN Ji-hua, QUAN Ya-jie, WANG Hui-min, CHEN Ding. Magnesium alloys[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [2] LIANG S Q, GUAN D K, CHEN L, GAO Z H, TANG H X, TONG X T, XIAO R. Precipitation and its effect on age-hardening behavior of as-cast Mg-Gd-Y alloy[J]. Materials & Design, 2011, 32(1): 361-364.
- [3] MORDIKE B L. Development of highly creep resistant magnesium alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 117(3): 391-394.
- [4] ANYANWU I A, KAMADO S, KOJIMA Y. Aging characteristics and high temperature tensile properties of Mg-Gd-Y-Zr alloy[J]. Mater Trans, 2001, 42(7): 1206-1211.
- [5] ANYANWU I A, KAMADO S, KOJIMA Y. Creep properties of Mg-Gd-Y-Zr alloy[J]. Mater Trans, 2001, 42(7): 1212-1218.
- [6] GAO Yan, WANG Qu-dong, GU Jin-hai, ZHAO Yang, TONG Yang, KANEDA J. Effects of heat treatments on microstructure and mechanical properties of Mg-15Gd-5Y-0.5Zr alloy[J]. Journal of Rare Earths, 2008, 26(2): 298-302.
- [7] GAO Yan, WANG Qu-dong, GU Jin-hai, ZHAO Yang, TONG Yang. Behavior of Mg-15Gd-5Y-0.5Zr alloy during solution heat

- treatment from 500 to 540 °C[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2007, 459(1/2): 117–123.
- [8] 何上明. Mg-Gd-Y-Zr(-Ca)合金的微观组织演变、性能和断裂行为研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007: 198–206.
HE Shang-ming. Study on the microstructural evolution, properties and fracture behavior of Mg-Gd-Y-Zr(-Ca)alloys[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007: 198–206.
- [9] HE S M, ZENG X Q, PENG L M, GAO X, NIE J F, DING W J. Precipitation in a Mg-10Gd-3Y-0.4Zr(wt.%) alloy during isothermal ageing at 250 °C[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2006, 421(1/2): 309–313.
- [10] 张新明, 肖阳, 陈健美, 蒋浩. 挤压温度对 Mg-9Gd-4Y-0.6Zr 合金组织与力学性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2006, 16(3): 518–523.
ZHANG Xin-ming, XIAO Yang, CHEN Jian-mei, JIANG Hao. Influence of extrusion temperature on microstructures and mechanical properties of Mg-9Gd-4Y-0.6Zr alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2006, 16(3): 518–523.
- [11] 肖阳, 张新明, 陈健美, 蒋浩. Mg-9Gd-4Y-0.6Zr 合金挤压 T5 态的高温组织与力学性能[J]. *中国有色金属学报*, 2006, 16(4): 709–714.
XIAO Yang, ZHANG Xin-ming, CHEN Jian-mei, JIANG Hao. Microstructures and mechanical properties of extruded Mg-9Gd-4Y-0.6Zr-T5 at elevated temperatures[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2006, 16(4): 709–714.
- [12] WANG Rong, DONG Jie, FAN Li-kun, ZHANG Ping, DING Wen-jiang. Microstructure and mechanical properties of rolled Mg-12Gd-3Y-0.4Zr alloy sheets[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2008, 18(1): 189–193.
- [13] LIU X B, CHEN R S, HAN E H. Effects of ageing treatment on microstructures and properties of Mg-Gd-Y-Zr alloys with and without Zn additions[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 465(1/2): 232–238.
- [14] 童炎, 王渠东, 高岩, 顾金海. Mg-13Gd-3Y-0.4Zr 合金热处理工艺优化及其性能[J]. *轻金属*, 2007(3): 45–49.
TONG Yan, WANG Qu-dong, GAO Yan, GU Jin-hai. Heat treatment optimizing and property of Mg-13Gd-3Y-0.4Zr alloy [J]. *Light Metals*, 2007(3): 45–49.
- [15] YANG Q, GHOSH A K. Production of ultrafine-grain microstructure in Mg alloy by alternate biaxial reverse corrugation[J]. *Acta Materialia*, 2006, 54(19): 5147–5158.
- [16] 刘俊伟, 陈振华, 陈鼎, 李贵发. 孪生对热轧 AZ31 镁合金中低温变形行为的影响[J]. *航空材料学报*, 2012, 32(1): 10–14.
LIU Jun-wei, CHEN Zhen-hua, CHEN Ding, LI Gui-fa. Effect of twinning on moderate-temperature deformation behavior of hot-rolled Mg alloy[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2012, 32(1): 10–14.
- [17] LIANG Shu-quan, GUAN Di-kai, TAN Xiao-ping, CHEN Liang, TANG Yan. Effect of isothermal aging on the microstructure and properties of as-cast Mg-Gd-Y-Zr alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2011, 528(3): 1589–1595.

(编辑 陈卫萍)