

挤压态 Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE 镁合金的高温拉伸变形行为

周明扬, 苏鑫鑫, 任凌宝, 尹冬弟, 权高峰, 张英波

(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)

摘要: 研究了热挤压态 Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE 镁合金的高温拉伸变形行为和微观组织演变, 分析了该合金在温度为 623~723 K, 应变速率为 10^{-4} ~ 10^{-2} s $^{-1}$ 条件下的流变应力随温度和应变速率的变化, 归纳了温度、应变速率与流变应力的关系。研究表明: 温度和应变速率是影响流变应力的主要因素, 在变形过程中, 流变应力随变形温度的升高和应变速率的降低而减小。在本实验条件下, 该合金的变形本构方程可用双曲正弦函数 $\dot{\epsilon} = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp(-Q/RT)$ 来描述, 应力指数 $n=3.286$, 激活能 $Q=238$ kJ/mol, 表明该合金的高温塑性变形机制主要是位错滑移和攀移。

关键词: 挤压态 Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE 镁合金; 高温拉伸; 流变应力; 本构方程; 微观组织

中图分类号: TG146.2 2

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)08-2149-07

进入 21 世纪, 随着现代工业对轻质高效、节能环保的要求越来越高, 镁合金以其轻质、减震、电磁屏蔽、易回收以及资源广泛等多项优势在交通运输装备、3C 产品、航空航天结构等领域得到越来越广泛的应用, 已可以觉察到“以镁代钢、以镁代铝”的发展趋势^[1,2]。研究表明^[3-5], 稀土元素能提高镁合金的强度和耐热性能, 然而过多地加入稀土元素会提高镁合金的成本, 减小其应用范围。Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE 镁合金是一种新开发的高强度、大塑性镁合金, 在 AZ33 镁合金的基础上加入少量稀土元素改良而成, 具有低成本、高强度以及大塑性等优势, 在高性能承载结构件领域具有广阔的应用前景。

镁合金金属密排六方结构, 室温下滑移系少, 变形困难, 在变形过程中易产生损伤或缺陷, 因而目前变形镁合金的成型方法主要是热成型。研究变形镁合金在高温下的塑性流变行为, 能更好地理解 and 掌握镁合金的高温变形机制, 同时能促进镁合金的热塑性成型数值模拟研究的深化及加工成型工艺的优化, 从而促进变形镁合金在各个领域的应用。Ren 等^[6]研究了挤压态 AZ80 镁合金在 573~673 K、 10^{-4} ~ 10^{-2} s $^{-1}$ 条件下的高温拉伸变形行为, 建立了基于双曲正弦模型的本构关系, 并研究了高温变形过程中的微观组织演变。王孟君等^[7]对 AZ31 镁合金的高温变形行为进行了研究, 建立了加工图, 并分析了该合金的高温变形机制。Wu 等^[8]研究了 AZ61 镁合金的高温压缩行为, 建立了加工图, 并计算了该合金

的应变激活能。王宏伟等^[9]研究了 Mg-6.3Zn-0.7Zr-0.9Y-0.3Nd 镁合金的高温压缩变形行为, 分析了添加稀土元素对 ZK60 镁合金高温变形的影响, 并采用 Zener-Hollomon 参数法构建了该合金高温塑性变形的本构关系。

目前, 对于 AZ 系镁合金高温性能的研究较多, 然而对于含稀土并且兼具高强、高韧、耐热耐蚀等优良综合性能的新型镁合金研究很少, 鉴于此, 本研究通过对挤压态 Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE 镁合金进行高温拉伸实验和微观组织观察, 研究了该合金在低应变速率下的高温拉伸行为和微观组织演变, 通过实验所得峰值应力、应变速率与温度的关系数据建立了高温变形本构方程, 根据变形激活能推断了该合金的主要高温变形机制, 为该合金的热塑性成型数值模拟及热成型加工提供研究基础。

1 实验

本实验所用 Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE 镁合金是由成都青元泛镁科技有限公司研制的一种高强、高韧、耐热耐蚀的新型镁合金材料, 供货状态为铸态, 采用电感耦合等离子体光谱分析仪测试所得化学成分如表 1 所示。将铸坯在 673 K 下均匀化处理 10 h, 然后在挤压机上进行挤压, 挤压温度为 673 K, 挤压比为 43, 挤压速度为 2~5 m/min, 得到直径为 14 mm 的挤压棒材。随后将挤压棒材加工为如图 1 所示的高温拉伸试样。在配有加热

收稿日期: 2016-08-20

基金项目: 中央高校基本科研业务费专题研究项目 (SWJTU11ZT30, SWJTU11CX050); 轨道交通国家实验室(筹)重点项目 (2012A0101)

作者简介: 周明扬, 男, 1991 年生, 博士生, 西南交通大学, 四川 成都 610031, 电话: 028-87634673, E-mail: 18782951516@163.com

装置的 WDW3100 微机控制电子万能试验机上进行室温拉伸和高温拉伸试验，其中室温拉伸速度为 1 mm/min，高温拉伸的温度范围为 623~723 K，应变速率范围为 $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。高温拉伸实验结束后，迅速取下试样水冷，继而在距断口 5 mm 处垂直于挤压和拉伸方向取样，然后进行镶样、砂纸打磨、抛光以及腐蚀处理（腐蚀液：5 g 苦味酸+5 g 乙酸+10 mL 蒸馏水+100 mL 乙醇），最后在 Zeiss Lab. A1 蔡司光学显微镜下进行微观组织观察。

2 结果与讨论

2.1 变形条件对挤压态 Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE 镁合金的流变应力的影响

表 2 所示为挤压态 Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE 镁合金的室温力学性能指标，表 3 所示为不同高温拉伸条件下的各组样品的拉伸曲线上的峰值应力 and 断后延伸率。

如表 3 所示，在高温条件下拉伸时，该镁合金的峰值应力相较于室温拉伸显著降低，当温度达到 723 K，应变速率为 10^{-4} s^{-1} 时，峰值应力仅为 9 MPa，比室温时降低了 97%，而延伸率达到 118.6%，比室温时提高了 4.9 倍，表明该合金易于进行热成型加工。图 2 所示为该镁合金的高温拉伸真应力-真应变曲线。在相同温度下，

表 1 Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE 镁合金化学成分

Table 1 Chemical composition of Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE magnesium alloy (wt%)

Al	Zn	Ti	RE*	Impurity	Mg
2.52	2.88	1.0	0.6	<0.02	Bal.

* Mischmetal containing Y, Ce, Nd etc

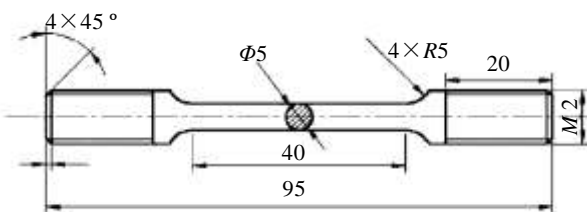


图 1 拉伸试样尺寸

Fig.1 Dimensional drawing of tensile specimen

表 2 挤压态 Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE 镁合金室温力学性能

Table 2 Tensile properties of as-extruded Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE magnesium alloy at room temperature

Tensile strength/MPa	Yield stress/MPa	Elongation/%
305	177	20.1

表 3 挤压态 Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE 镁合金高温拉伸力学性能

Table 3 Tensile properties of as-extruded Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE magnesium alloy at elevated temperatures

Temperature/K	Strain rate/ s^{-1}	Peak stress/MPa	Elongation/%
623	1×10^{-2}	63	55.7
623	1×10^{-3}	48	82.2
623	1×10^{-4}	38	93.2
673	1×10^{-2}	42	60.4
673	1×10^{-3}	27	82.8
673	1×10^{-4}	15	108.2
723	1×10^{-2}	28	62.6
723	1×10^{-3}	15	83.4
723	1×10^{-4}	9	118.6

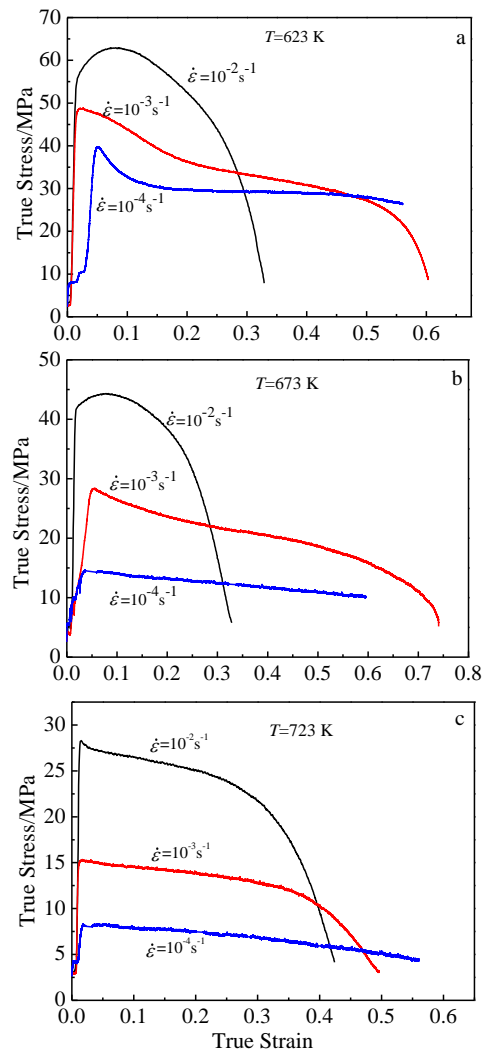


图 2 挤压态 Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE 镁合金高温拉伸真应力-真应变曲线

Fig.2 True stress-true strain curves of as-extruded Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE magnesium alloy at elevated temperatures: (a) 623 K, (b) 673 K, and (c) 723 K

低应变速率下的试样具有更低的应力峰值和更好的稳态流变特性。在高应变速率 $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 下, 温度为 623、673 K 时, 应力值在达到峰值应力之前有一段缓慢增长区, 而当温度升到 723 K 时, 应力值迅速达到峰值, 没有出现增长变缓现象, 而且对应的应变量减小, 原因是温度的升高使得材料的晶内位错的滑移和攀移以及晶界的转动和滑动作用增强, 促使材料快速软化。

图 3 和图 4 分别表示温度和应变速率与峰值应力的关系。由图 3 可知, 在相同的应变速率下, 峰值应力随温度的升高而降低, 其原因在于随着温度的升高, 锥面滑移系和柱面滑移系的临界分切应力降低, 使得位错的滑移变得容易。从图 4 可以看出, 在相同温度下, 峰值应力随应变速率的降低而降低, 因为较高的应变速率在晶内产生较高的位错密度, 产生应变速率硬化, 当应变速率较低时能为新晶粒的形核和长大提供更多的时间, 从而促进动态再结晶的进行, 增大软化作用。

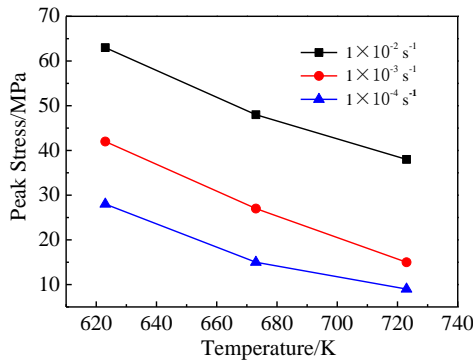


图 3 温度对挤压态 Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE 镁合金的峰值应力的影响

Fig.3 Effect of temperature on the peak stress of as-extruded Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE magnesium alloy at various strain rates

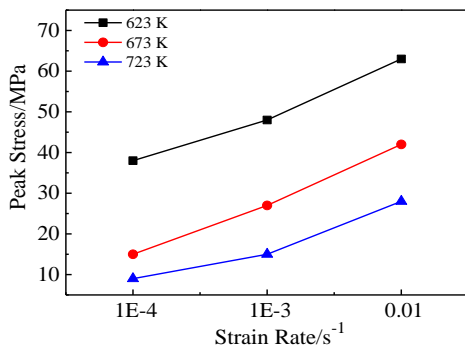


图 4 应变速率对挤压态 Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE 镁合金的峰值应力的影响

Fig.4 Effect of strain rate on the peak stress of as-extruded Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE magnesium alloy at various test temperatures

2.2 挤压态 Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE 镁合金高温拉伸过程的组织演变

铸态和挤压态 Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE 镁合金的原始组织如图 5 所示, 从图中可以看出铸态 Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE 镁合金晶粒粗大, 第二相呈点块状分散分布于晶界和晶内。经过挤压后, 第二相基本溶入基体内, 晶粒尺寸显著细化, 经截线法测定其平均晶粒尺寸为 $15 \mu\text{m}$ 。

高温拉伸后, 断口附近微观组织见图 6。其中, 图 6a~6c 为同一温度 (623 K), 不同应变速率下的组织。该合金在 623 K 下拉伸时, 出现了细小的再结晶晶粒, 随着应变速率的提高, 试样中发生动态再结晶的区域减少。另外, 应变速率的加快使再结晶晶粒没有足够的时间长大。再结晶晶粒的增长与温度有着密切的关系。图 6c~6e 所示为同一应变速率 (10^{-4} s^{-1})、不同温度下的组织图片。随着温度的升高, 晶粒发生了较明显的长大, 在 673 K 时, 平均晶粒尺寸达到了 $45 \mu\text{m}$ 。从图 6e 中可以看出, 随着温度的进一步升高, 平均晶粒尺寸并没有进一步增加, 可能是因为温度过高, 空洞的形核、长大和聚合影响了晶界的迁移, 抑制了晶粒的增长。

2.3 挤压态 Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE 镁合金高温拉伸本构关系的建立

材料的高温变形本构方程反映的是其流变应力与热力学参数之间的关系, 也是用于计算机模拟热加工过程的基础, 对于热加工过程的参数优化具有重要意义。

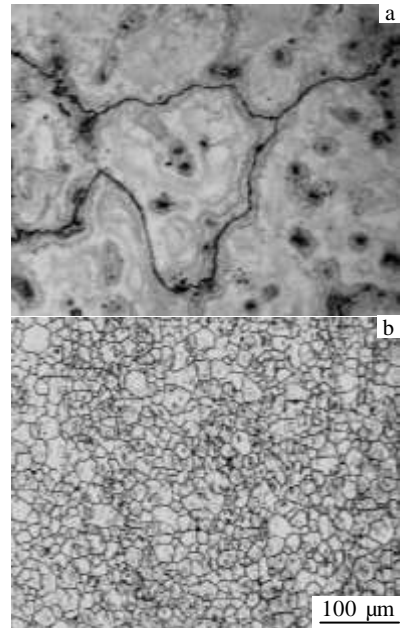


图 5 Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE 合金原始微观组织

Fig.5 Microstructures of the Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE magnesium alloy: (a) as-cast and (b) as-extruded

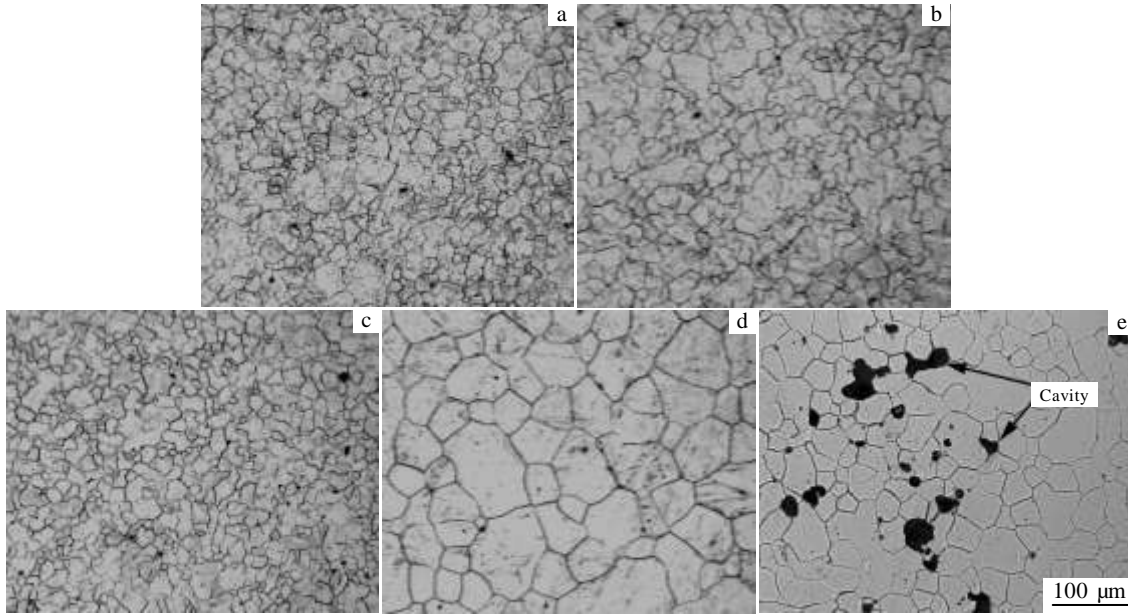


图 6 Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE 合金高温拉伸微观组织

Fig.6 Microstructures of the Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE magnesium alloy after high temperature tensile test: (a) 623 K, 10^{-2} s^{-1} , (b) 623 K, 10^{-3} s^{-1} , (c) 623 K, 10^{-4} s^{-1} , (d) 673 K, 10^{-4} s^{-1} , and (e) 723 K, 10^{-4} s^{-1}

研究发现^[10-13], 镁合金在高温状态下发生塑性变形时,其峰值应力及稳态应力等与温度和应变速率的关系可以用以下关系式加以描述:

$$\dot{\epsilon} = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

式中, A 与 α 是与材料相关的常数, σ 是应力(本文计算采用的是峰值应力), n 为应力指数, $n=1/m$, m 为应变速率敏感指数, Q 是变形激活能, R 是摩尔气体常数 ($8.314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$), T 为绝对温度。

Zener-Hollomon 参数是研究高温变形的重要参数,由其定义可知,

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) \quad (2)$$

联立式 (1)、(2) 可得

$$Z = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (3)$$

下面利用上一节已有的数据进行本构方程的求解,首先进行参数 α 的确定。

研究表明^[14], 在高应力条件(通常 $\alpha\sigma > 1.2$) 和低应力条件 ($\alpha\sigma < 0.8$) 下, 根据双曲正弦函数的泰勒级数展开分别可得:

$$\dot{\epsilon} = A_1 \exp(\beta\sigma) \exp(-Q/RT) \quad (4)$$

$$\dot{\epsilon} = A_2 \sigma^{n'} \exp(-Q/RT) \quad (5)$$

以上两式中的 A_1 、 A_2 、 n' 和 β 均为与材料相关的常数, 与温度无关, 且 $\alpha = \beta/n'$ 。当温度一定时, 由式 (4) 和式 (5) 分别可得:

$$1/\beta = (\partial\sigma/\partial\ln\dot{\epsilon})_T \quad (6)$$

$$1/n' = (\partial\ln\sigma/\partial\ln\dot{\epsilon})_T \quad (7)$$

依据高应力下的式 (6), 以 $\sigma - \ln\dot{\epsilon}$ 做图(如图 7a 所示), 并利用最小二乘法对该曲线进行线性拟合, 根据低应力下的式 (7), 以 $\ln\sigma - \ln\dot{\epsilon}$ 做图(如图 7b 所示), 同样利用最小二乘法进行拟合。其中 $1/\beta$ 取图 7a 中较高应力下的直线的斜率, $1/n'$ 取图 7b 中较低应力直线的斜率得到, 从而得出 $\alpha=0.0511 \text{ MPa}^{-1}$ 。

在确定了参数 α 之后, 应力指数 n 和变形激活能 Q 可分别由以下两式求得:

$$1/n = m = \{\partial[\ln\sinh(\alpha\sigma)]/(\partial\ln\dot{\epsilon})\}_T \quad (8)$$

$$Q = nR\{\partial[\ln\sinh(\alpha\sigma)]/\partial(1/T)\}_\dot{\epsilon} \quad (9)$$

分别以 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - \ln\dot{\epsilon}$ (图 8a 所示) 和 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1/T$ (图 8b 所示) 做图, 并对其进行线性拟合, 由线性拟合的直线斜率的平均值可以得到应力指数 $n=3.286$, 变形激活能 $Q=238 \text{ kJ/mol}$ 。

最后根据式 (3) 求解常数 A , 对其两边取对数得:

$$\ln Z = n \ln[\sinh(\alpha\sigma)] + \ln A \quad (10)$$

以 $\ln Z - n \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 做图, 如图 9 所示, 对曲线进行线性拟合, 由上式可知, 曲线的截距即为 A 的值, 则求得 $A=2.25 \times 10^{14}$ 。

综上所述, 可以得出挤压态 Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE 镁合金的本构方程为:

$$\dot{\epsilon} = 2.25 \times 10^{14} [\sinh(0.0511\sigma)]^{3.286} \exp\left(-2.38 \times \frac{10^5}{RT}\right) \quad (11)$$

当知道 $\dot{\epsilon}$ 、 σ 和 T 中的任意 2 个量时, 可以求出第 3 个量。

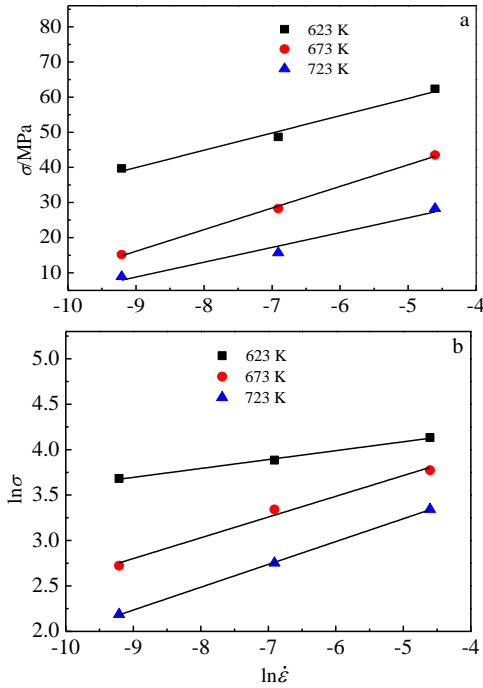


图 7 应力与应变速率的关系

Fig.7 Relationship between stress and strain rate: (a) σ - $\ln \dot{\epsilon}$ and (b) $\ln \sigma$ - $\ln \dot{\epsilon}$

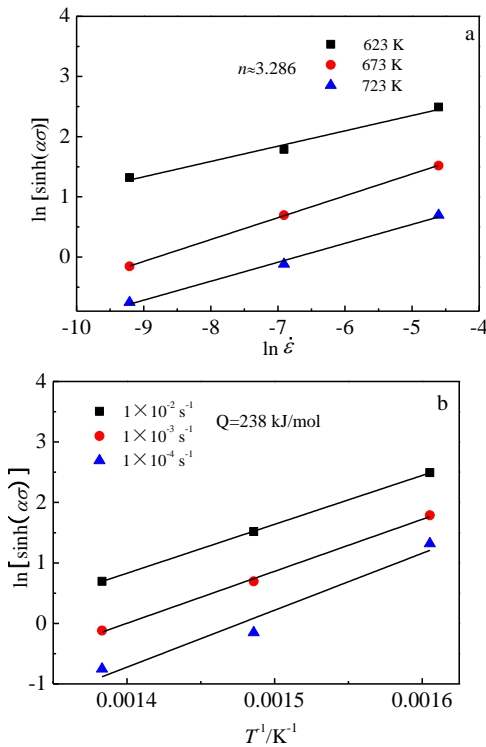


图 8 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 与应变速率及温度的关系

Fig.8 Relationship between $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ - $\ln \dot{\epsilon}$ (a) and $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ - $1/T$ (b)

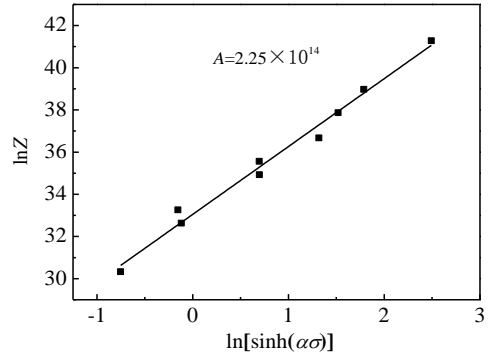


图 9 $\ln Z$ 和 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 的关系

Fig.9 Relationship between $\ln Z$ and $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$

将实验测量值与预测值进行比较,并用下面的式子算出由上一节所得的本构方程的平均误差:

$$\text{平均误差} = \frac{1}{N} \sum_i \left| \frac{\text{测量值} - \text{预测值}}{\text{测量值}} \right| \times 100\% \quad (12)$$

经计算本实验所得的测量值和预测值见表 4,由式(12)计算可得,采用所得的本构方程的预测值与测量值的平均误差为 4.86%,该结果表明上述本构方程能对挤压态 Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE 镁合金的高温变形流变应力进行较精确的预测。

2.4 对变形激活能的分析

根据式(9)可以求得变形激活能的理论值(见表5),变形激活能与温度和应变速率的关系如图10所示。变形激活能的变化反映了变形机制的变化,即激活能曲线的上升或下降表明在变形过程中有新的位错机制参与。从图10中可以看出,该合金的变形激活能在温度低于 673 K 时随着温度的升高而降低,在温度高于 673 K 时随着温度的升高而升高,表明材料在相同应变速率,不同温度下变形时变形机制明显不同;在相同温度

表 4 挤压态 Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE 镁合金峰值应力测量值与预测值

Table 4 Experimental data and calculation value of the peak stress of as-extruded Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE magnesium alloy

Temperature/ K	Strain rate/ s^{-1}	Measured peak stress value/MPa	Predicted peak stress value/ MPa	Error/ %
623	1×10^{-2}	58.85	55.77	5.23
623	1×10^{-3}	47.70	45.10	5.45
623	1×10^{-4}	38.43	36.47	5.11
673	1×10^{-2}	41.72	42.53	1.94
673	1×10^{-3}	26.87	27.64	2.86
673	1×10^{-4}	14.64	15.49	5.3
723	1×10^{-2}	27.88	26.25	5.85
723	1×10^{-3}	15.10	15.77	4.44
723	1×10^{-4}	8.58	9.23	7.58

下, 随着应变速率的增加, 变形激活能逐渐减小, 变形更加容易进行。

Galiyev 等^[15]研究了纯镁及 ZK60 镁合金的高温流变机制, 其研究表明, Zn 元素的加入能显著降低镁的层错能, 从而阻碍了位错的 Friedel 交滑移机制, 使位错攀移成为 ZK60 镁合金高温变形的控制机制, 故与纯镁相比其变形激活能显著提高; Ren 等^[6]研究了 Al 元素对镁合金的变形激活能的影响, 发现变形激活能的增加与 Al 元素含量的增加呈线性关系; 王宏伟等^[9]研究了 Mg-6.3Zn-0.7Zr-0.9Y-0.3Nd 镁合金的高温变形行为, 发现加入少量稀土元素后形成的弥散第二相粒子能阻碍位错运动从而显著提高镁合金的变形激活能。

本实验中 Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE 镁合金的变形激活能 (238 kJ/mol) 显著高于纯镁的自扩散激活能 (135 kJ/mol), 其原因可能是随着 Al、Zn 元素的加入, 镁合金的层错能降低, 从而阻碍了位错的交滑移机制, 位错攀移成为主要的变形机制, 导致应变激活能增加; 另外, 与传统的 AZ 系镁合金相比, 该合金的应变激活能也有较大程度的提高, 其原因可能是稀土元素的加入可以形成细小的弥散粒子 (如图 11 所示), 这些具有较高热稳定性的粒子能够在高温下阻碍位错的运动, 从而进一步提高该合金的变形激活能。

表 5 挤压态 Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE 镁合金不同应变速率和变形温度下的变形激活能

Table 5 Deformation activation energy of as-extruded Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE magnesium alloy at various strain rates and deformation temperatures

$\dot{\epsilon}/s^{-1}$	$Q/kJ\ mol^{-1}$		
	623 K	673 K	723 K
1×10^{-2}	264.1	185.1	213.5
1×10^{-3}	280.7	196.7	226.9
1×10^{-4}	307.5	215.5	248.6

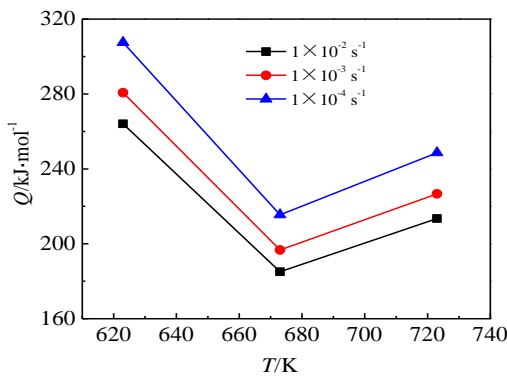


图 10 不同应变速率下挤压态 Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE 镁合金变形激活能与温度的关系

Fig.10 Relationship between deformation activation energy and temperature at different strain rates

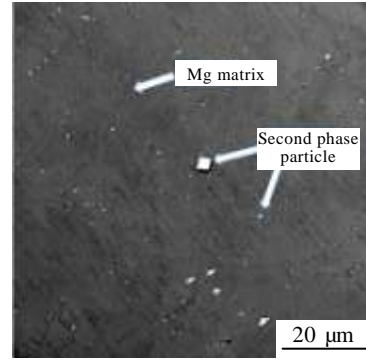


图 11 挤压态 Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE 镁合金在高温拉伸前的 SEM 组织

Fig.11 SEM image of the as-extruded Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE magnesium alloy before hot tensile test

3 结 论

1) 温度和应变速率是影响挤压态 Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE 镁合金流变应力的主要因素, 当温度一定时, 流变应力随应变速率的增加而增加; 当应变速率一定时, 流变应力随温度的升高而减小。在温度高于 673 K、应变速率为 $10^{-4} s^{-1}$ 的条件下, 流变应力达到峰值后立即达到稳态流变的状态。

2) 在本实验条件下, Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE 镁合金的高温变形本构方程可用双曲正弦函数描述, 其表达式为:

$$\dot{\epsilon} = 2.25 \times 10^{14} [\sinh(0.0511\sigma)]^{3.286} \exp\left(-2.38 \times \frac{10^5}{RT}\right)$$

经计算该本构方程的平均误差为 4.86%, 表明该方程能对 Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE 镁合金的高温变形流变应力进行较精确的预测。

3) 基于双曲正弦本构关系模型, 求得 Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE 镁合金在高温下的应变激活能 238 kJ/mol, 应力指数为 3.286, 表明高温下挤压态 Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE 镁合金的主要控制变形机制为位错滑移和攀移。

4) 在本实验条件下, Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE 镁合金变形组织随温度变化较为明显, 在 623~673 K 范围内, 发生了明显的动态再结晶和晶粒长大; 当温度高于 673 K 后, 空洞的形核、长大和聚合影响了晶界迁移, 抑制了再结晶晶粒的长大。

参考文献 References

[1] Robson J D, Stanford N, Barnett M R. *Acta Materialia*[J],

- 2011, 59(5): 1945
- [2] Wang Dong(王 栋), Liu Zhaoming(刘赵铭), Zhang Yingbo(张英波) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(9): 2277
- [3] Li Li, Zhang Xinming. *Materials Science and Engineering A*[J], 2011, 528(3): 1396
- [4] Hantzsche K, Bohlen J, Wendt J *et al. Scripta Materialia*[J], 2010, 63(7): 725
- [5] Zhao Zhenwei, Teng Xinying, Zhou Guorong *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2014, 43(4): 791
- [6] Ren Lingbao, Wu Jing, Quan Gaofeng. *Materials Science and Engineering A*[J], 2014, 612: 278
- [7] Wang Mengjun(王孟君), Jiang Haitao(姜海涛), Ren Jie(任 杰) *et al. Heat Treatment of Metals*(金属热处理)[J], 2008, 33(11): 44
- [8] Wu Hongyu, Yang Jiechen, Liao Jinghao *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2012, 535: 68
- [9] Wang Hongwei(王宏伟), Yi Danqing(易丹青), Wang Bin(王斌) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2010, 20(3): 378
- [10] Wang L X, Fang G, Leeftang M A *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2015, 622: 121
- [11] Yu Dehua. *Materials & Design*[J], 2013, 51: 323
- [12] Xia Xiangsheng, Chen Qiang, Li Jianping *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2014, 610: 203
- [13] Gao Lei, Alan A Luo. *Materials Science and Engineering A*[J], 2013, 560: 492
- [14] Evangelista E, Spigarelli S. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2002, 33(2): 373
- [15] Galiyev A, Sitdikov O, Kaibyshev R. *Materials Transactions* [J], 2003, 44(4): 426
- [8] Wu Hongyu, Yang Jiechen, Liao Jinghao *et al. Materials*

Tensile Deformation Behavior of As-extruded Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE Magnesium Alloy at Elevated Temperature

Zhou Mingyang, Su Xinxin, Ren Lingbao, Yin Dongdi, Quan Gaofeng, Zhang Yingbo

(Key Laboratory for Advanced Technologies of Materials, Ministry of Education of China,

Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The tensile behavior and microstructure evolution of as-extruded Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE magnesium alloy at elevated temperature were investigated by WDW3100 microcomputer control electron universal testing machine and Zeiss microscope, respectively. The variation of flow stress with temperature and strain rate was analyzed in the strain rate range of 10^{-4} ~ 10^{-2} s $^{-1}$ and deformation temperature range of 623~723 K. The relationship of flow stress to temperature and strain rate was also summarized. Results show that temperature and strain rate are the important factors influencing the flow stress. During the process of deformation, the flow stress decreases with the increase of temperature and the decrease of strain rate. Under this experimental condition, the deformation constitutive equation of the alloy can be described by $\dot{\epsilon} = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp(-Q/RT)$. Among them, the stress exponent and the activation energy of the as-extrude alloy are 3.286 and 238 kJ/mol. The most important deformation mechanism of this alloy is dislocation slip and climb.

Key words: as-extruded Mg-3Al-3Zn-1Ti-0.6RE magnesium alloy; elevated temperature tension; flow stress; constitutive equation; microstructure

Corresponding author: Quan Gaofeng, Ph. D., Professor, Institute of Lightweight of Transportation Equipment, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China, Tel: 0086-28-87634673, E-mail: quangf@gmail.com