

AZ81-0.5Ca 铸态镁合金流变应力预测模型

李萍¹ 王莹¹ 张清²

(1. 洛阳理工学院土木工程学院, 洛阳 471023; 2. 河南科技大学材料科学与工程学院, 洛阳 471023)

摘要 通过热压缩试验和数据处理对 AZ81-0.5Ca 铸态镁合金在变形温度为 300~450 °C、应变速率为 0.01~1 s⁻¹ 条件下的流变行为进行了研究, 基于双曲正弦形式的本构方程建立了流变应力预测模型并进行了验证。结果表明, 采用该模型预测的峰值流变应力具有较高的精度, 预测值与实测值相关系数为 0.99, 平均相对误差为 3.42%。

关键词 镁合金; 热压缩; 流变应力; 预测模型

中图分类号 TG146.22; TP311

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20240204

Flow Stress Prediction Model of As-cast AZ81-0.5Ca Magnesium Alloy

LI Ping¹, WANG Ying¹, ZHANG Qing²

(1. School of Civil Engineering, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023; 2. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023)

Abstract: The flow behavior of as-cast AZ81-0.5Ca magnesium alloy at deformation temperatures of 300~450 °C and strain rates of 0.01~1 s⁻¹ was investigated by hot compression tests and data processing. Based on a hyperbolic-sine constitutive equation, a prediction model of flow stress was established and verified. The results reveal that the peak flow stress predicted by the model has high accuracy. The correlation coefficient between predicted and measured values is 0.99, and the average relative error is 3.42%.

Key Words: Magnesium Alloy, Hot Compression, Flow Stress, Prediction Model

镁合金按照成形工艺可分为铸造镁合金和变形镁合金, 二者在成分、组织、性能和应用上存在较大差异^[1-2]。由于密排六方结构的镁合金变形能力有限, 易开裂, 很难兼有良好的塑性变形能力和较高的强度, 变形镁合金的推广受到限制^[3-7]。据此可以考虑先通过合金化获得铸态镁合金, 不经热处理而直接进行变形加工, 既可以提高生产效率和降低生产成本, 又可以改善合金强度和拓宽应用范围, 这是一种较为经济的塑性加工方法^[8-9], 也是当今镁合金研发的重要方向。因此, 针对合金化铸态镁合金热加工变形行为的研究得到重视^[10-14]。

AZ81 镁合金是 Mg-Al-Zn 系 (AZ 系) 合金的典型代表之一, 得到广泛的应用^[15-16], 通过合金化和变形可提高强度, 满足更高的设计要求, 拓宽镁合金的应用范围。研究发现, 向镁合金中加入适量的碱土元素 Ca, 可以显著改善其组织和性能^[17-18]。为了进一步改善镁合金的强度, 本研究以 AZ81-0.5Ca 铸态镁合金为对象,

拟在不同条件下进行热压缩试验, 研究其流变行为, 通过数据处理, 建立流变应力预测模型并进行验证, 为铸态镁合金热加工工艺的制订和优化提供参考。

1 试验材料与方法

试验材料为铸态 AZ81-0.5Ca 镁合金, 其化学成分为 Mg-8.0Al-1.0Zn-0.5Ca (质量分数, %, 下同)。合金熔炼在 ZGJL0.01-40-4 感应炉中进行, 采用刚玉坩埚装载原料, 采用体积分数为 1% 的 SF₆+99% 的 CO₂ 混合气体保护熔炼过程。待合金原料熔化后, 先升温到 720 °C, 保温一定时间, 再于预热的金属型中完成浇注, 获得合金铸锭。

将铸锭分割成薄块, 加工成尺寸为 $\phi 10$ mm $\times$ 15 mm 的试样。采用 Gleeble 1500D 热模拟试验机进行热压缩试验。变形温度分别为 300、350、400 和 450 °C, 应变速率 $\dot{\epsilon}$ 分别为 0.01、0.1 和 1 s⁻¹, 最大变形量为 0.7。通过数据处理, 获得流变应力曲线, 基于双曲正弦形式

收稿日期: 2024-05-13; 修订日期: 2024-06-21

基金项目: 河南省科技攻关计划资助项目 (222102230112)

第一作者简介: 李萍, 女, 1978 年出生, 副教授, E-mail: eappol@163.com

通信作者: 张清, 男, 1974 年出生, 教授, E-mail: foxzq@126.com

引用格式: 李萍, 王莹, 张清. AZ81-0.5Ca 铸态镁合金流变应力预测模型[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(9): 1303-1306.

LI P, WANG Y, ZHANG Q. Flow stress prediction model of as-cast AZ81-0.5Ca magnesium alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(9): 1303-1306.

的本构方程,建立流变应力预测模型并进行验证。

热压缩变形后,将试样沿纵截面切开,制备金相试样,并用Zeiss Axio VertAl光学显微镜观察其显微组织。此外,在热压缩变形前也制备金相试样,分别采用Zeiss Axio VertAl光学显微镜和D8 Advance X射线衍射仪(XRD)对合金进行显微组织观察和物相分析。

2 试验结果与分析

2.1 流变应力-应变曲线

图1为热压缩变形过程中AZ81-0.5Ca铸态镁合

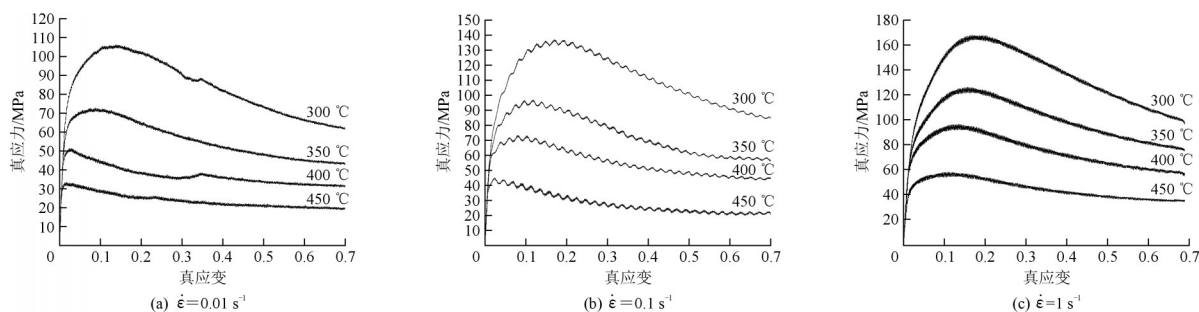


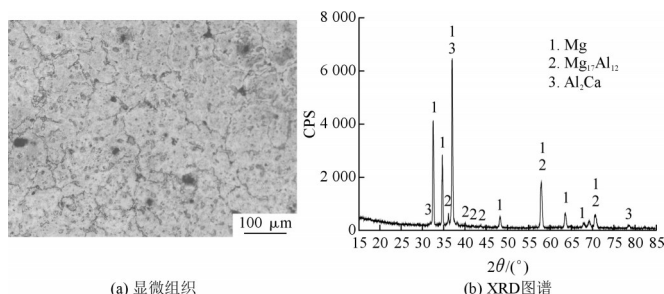
图1 AZ81-0.5Ca合金的真应力-真应变曲线

Fig.1 True stress-strain curves of AZ81-0.5Ca alloy

2.2 显微组织

图2为热压缩变形前AZ81-0.5Ca合金的显微组织和XRD图谱。可以看出,铸态AZ81-0.5Ca合金的组织中存在白色基体(α -Mg)和黑色金属间化合物相(包括 $Mg_{17}Al_{12}$ 和 Al_2Ca)。化合物相在合金的热压缩变形过程中起着重要作用。当变形温度升高时,化合物相的硬度降低,其对合金的硬化作用降低,因此合金的强度和硬度降低。同时,合金的塑性增加,变形能力提高。因此,合金的变形抗力减小,导致流变应力减小。

当应变速率为 0.1 s^{-1} 时,AZ81-0.5Ca镁合金在不同温度下热压缩后的峰值应力和显微组织见图3和图4。可以看出,在相同的应变速率下,合金热压缩后的



(a) 显微组织

(b) XRD图谱

图2 热压缩前AZ81-0.5Ca合金的显微组织和XRD图谱
Fig.2 Microstructure and XRD pattern of AZ81-0.5Ca alloy before hot compression

金的真应力-真应变曲线。可以看出,该合金的流变应力变化具有明显的动态再结晶特征,这是加工硬化和动态再结晶的软化相互作用的结果。在变形初始阶段,随着应变量的增加,加工硬化作用增强,真应力迅速上升;当加工硬化与动态再结晶的软化作用达到平衡时,真应力达到峰值。此后,随着应变量继续增加,动态再结晶的软化作用占据主导地位,真应力逐渐降低。同时,流变应力受变形温度和应变速率影响,随变形温度的升高或应变速率的减小而降低。

显微组织随变形温度的变化而变化。 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热压缩后,显微组织中的晶粒呈扁平状,大部分晶粒发生变形,变形组织的方向性明显。在 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,合金的显微组织仍显示为变形晶粒,变形组织的方向性更加明显。当温度为 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,显微组织中大晶粒周围出现小晶粒,发生明显的动态再结晶,但变形组织仍占较高比例。在 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,显微组织中出现一些新的等轴晶粒。此时合金发生明显的动态再结晶,加工硬化现象不明显,所以流变应力较低。

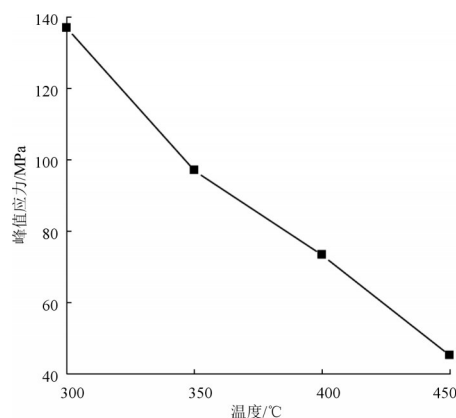
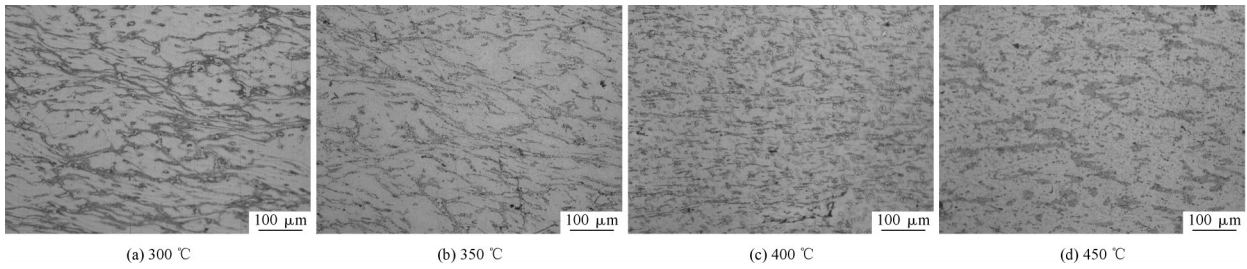


图3 AZ81-0.5Ca合金在 0.1 s^{-1} 和不同温度下热压缩后的峰值应力

Fig.3 Peak stress of AZ81-0.5Ca alloy after hot compression at 0.1 s^{-1} and different temperatures

图4 AZ81-0.5Ca合金在 0.1 s^{-1} 和不同温度下热压缩后的显微组织Fig.4 Microstructure of AZ81-0.5Ca alloy after hot compression at 0.1 s^{-1} and different temperatures

2.3 流变应力模型的建立

流变应力预测模型的建立,对于获得描述铸态镁合金材料变形的基本信息具有重要意义。流变应力 σ 、变形温度 T 及应变速率 $\dot{\epsilon}$ 之间满足Arrhenius关系,SELLARSCM等^[19-20]提出了一种双曲正弦形式的本构方程为:

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

式中,常数 A 、 α 、 n 均与变形温度无关; A 为结构因子; α 为应力水平参数; n 为应力指数; Q 为热变形激活能, kJ/mol; R 为摩尔气体常数, $8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

常数 $\alpha = \beta/n_1$,其中 n_1 和 β 是分别根据 $\ln\dot{\epsilon} - \ln\sigma$ 和 $\ln\dot{\epsilon} - \sigma$ 的关系线性拟合得到的斜率。本试验中,根据流变应力与应变速率的关系(见图5),经过线性拟合计算得出 $\alpha = 0.014$ 。

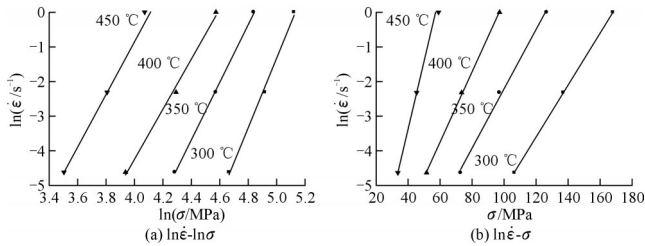


图5 流变应力与应变速率的关系

Fig.5 Relationship between flow stress and strain rate

假定热变形激活能与变形温度无关,对式(1)两边取对数,可以得到:

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] - Q/(RT) \quad (2)$$

根据 $\ln\dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 和 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1/T$ 的关系线性拟合得到的斜率分别记为 n 和 b ,见图6。由此可以推出热变形激活能的表达式为:

$$Q = R \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)]} \bigg|_T \frac{\partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial (1/T)} \bigg|_{\dot{\epsilon}} = Rnb \quad (3)$$

根据流变应力与应变速率、变形温度的关系分别求出斜率,可得 $n = 5.625$, $b = 4.180$ 。将 R 、 n 、 b 的值代入式(3),可以得到试验合金的热变形激活能 $Q = 195.4 \text{ kJ/mol}$ 。

在变形条件相同的情况下,本试验合金的热变形激活能要高于挤压态AZ81镁合金($Q = 182.17 \text{ kJ/mol}$)^[4]。分析原因,应该与碱土元素Ca加入后生成高熔点的

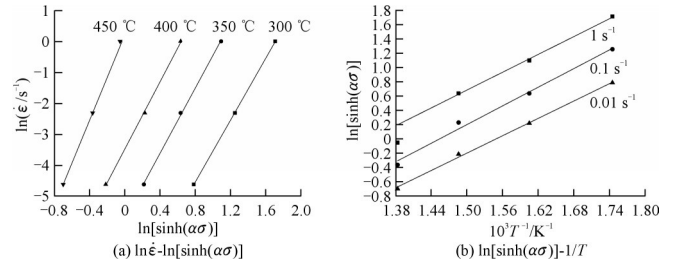


图6 流变应力与应变速率、温度的关系

Fig.6 Relationship between flow stress and strain rate or temperature

Al_2Ca 导致合金硬度升高和变形抗力增大有关。

Zener-Hollomon参数,可将变形温度 T 的影响及应变速率 $\dot{\epsilon}$ 的影响合并为一个参数,简称 Z 参数,且有

$$Z = \dot{\epsilon} \exp [Q/(RT)] = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (4)$$

对式(4)两边取对数,可得:

$$\ln Z = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] \quad (5)$$

根据流变应力与 Z 参数的关系,经过线性回归分析,可以得出 $\ln A = 31.798$,进而得出 $A = 6.453 \times 10^{13}$ 。

将上述各参数代入式(1),得到本试验铸态镁合金的热压缩本构方程为:

$$\dot{\epsilon} = 6.453 \times 10^{13} [\sinh(0.014\sigma)]^{5.625} \times \exp [-195400/(RT)] \quad (6)$$

与铸态AZ31-1Sm合金的本构方程^[5]相比较,该本构方程应力指数更小,热变形激活能更大,应与合金中Al含量不同有关;与铸态AZ81-0.5Sb合金的本构方程^[12]相比较,应力指数相近,热变形激活能降低,应与所加合金化元素的种类不同有关。

将式(1)、式(4)联立,根据双曲正弦函数的反函数公式,可以推导出流变应力 σ 与 Z 参数的关系:

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{A} \right)^{\frac{1}{n}} + \left[\left(\frac{Z}{A} \right)^{\frac{2}{n}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (7)$$

将参数 α 、 n 、 A 的值代入式(7),可得本试验铸态镁合金流变应力的预测模型为:

$$\sigma = \frac{1}{0.014} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{6.453 \times 10^{13}} \right)^{\frac{1}{5.625}} + \left[\left(\frac{Z}{6.453 \times 10^{13}} \right)^{\frac{2}{5.625}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (8)$$

式中, $Z = \dot{\epsilon} \exp [195400/(RT)]$ 。

2.4 流变应力模型的验证

根据流变应力本构模型,对该合金在不同变形温度 and 不同应变速率下的峰值流变应力进行预测。图 7 为峰值应力预测值与实测值比较。可以看出,除个别数据点外,峰值流变应力的预测值与实测值非常接近,二者的线性回归相关系数为 0.99,平均相对误差为 3.42%。这说明采用该模型预测的峰值流变应力具有较高的精度,能够满足工程计算的可靠性要求。

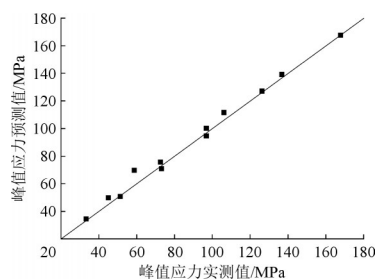


图 7 峰值流变应力预测值和实测值的比较

Fig.7 Comparison of predicted and measured value of peak stress

3 结 论

(1)基于双曲正弦形式的本构方程,建立了 AZ81-0.5Ca 铸态镁合金的热压缩流变应力预测模型,热变形激活能为 195.4 kJ/mol。

(2)经过验证,采用该模型得出的峰值流变应力预测值与实测值相关系数为 0.99,平均相对误差为 3.42%,满足工程的计算要求。

参 考 文 献

- [1] 丁文江. 镁合金科学与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [2] 王渠东. 镁合金及其成形技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [3] 刘庆. 镁合金塑性变形机理研究进展[J]. 金属学报, 2010, 46(11): 1458-1472.
- [4] 曹凤红, 龙思远, COLE G S. 挤压态 AZ81 镁合金的热压缩变形行为[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(6): 1214-1219.
- [5] XU J, LI C X, ZHENG K H, et al. Hot deformation behavior and microstructure of AZ31-1Sm alloy compression at elevated temperatures[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(11): 2572-2575.
- [6] ZHANG Q, ZHU L M, LI Q A. Hot compression behavior of Mg-5Y-0.5Ce-0.5Zr alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(9): 2973-2977.
- [7] 潘复生, 蒋斌. 镁合金塑性加工技术发展及应用[J]. 金属学报, 2021, 57(11): 1362-1379.
- [8] 王慧远, 夏楠, 布如宇, 等. 低合金化高性能变形镁合金研究现状及展望[J]. 金属学报, 2021, 57(11): 1429-1437.
- [9] 吴国华, 童鑫, 眭怀明, 等. 铸造镁稀土合金研究现状及其在航空发动机领域应用展望[J]. 航空制造技术, 2022, 65(3): 14-29.
- [10] 王忠军, 付学丹, 朱晶, 等. ZK60 和 ZK60-1.0Er 镁合金热压缩变

形和加工图[J]. 材料工程, 2017, 45(3): 102-111.

- [11] 尹振入, 卢立伟, 刘晓辉, 等. 预李晶 AQ80 镁合金热压缩本构方程及热加工图[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(8): 1523-1531.
- [12] 张清, 工堂, 李萍, 等. AZ81-0.5Sb 镁合金的热压缩行为[J]. 材料热处理学报, 2019, 40(12): 54-58.
- [13] LIU C L, QUAN G F, ZHOU M Y, et al. Constitutive behavior and processing map of as-cast Mg-8Y-6Gd-2Nd-0.17Zn magnesium alloy compressed at elevated temperatures [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(8): 2591-2598.
- [14] ZHANG L B, LIU G M, HAN T Z, et al. Microstructural evolution and strain-compensated constitutive equation for as-cast Mg-3Sn-1Mn-1La alloy during isothermal compression [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(3): 835-847.
- [15] 李萍, 王莹. Y 对镁合金 AZ81 的细晶强化作用[J]. 稀土, 2015, 36(1): 85-88.
- [16] 张清, 李全安, 陈君, 等. 铈对 AZ81-1.2Y-0.6Sm 合金组织和力学性能的影响[J]. 中国稀土学报, 2016, 34(1): 93-97.
- [17] LI H X, QIN S K, YANG C L, et al. Influence of Ca addition on microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of Mg-2Zn alloy[J]. China Foundry, 2018, 15(5): 363-371.
- [18] DONG T S, LI X B, FU B G, et al. Influence of Ca on microstructure and corrosion resistance of Mg-14Li alloy [J]. China Foundry, 2018, 15(2): 132-138.
- [19] SELLARS C M, MCLEGGART W J. On the mechanism of hot deformation[J]. Acta Metallurgica, 1966, 14(6): 1136-1138.
- [20] 姜炳春, 卢立伟, 文泽军, 等. LZ92 镁锂合金流变应力预测模型 [J]. 材料热处理学报, 2020, 41(9): 147-154.

(编辑:张正贺)

欢迎关注《特种铸造及有色合金》微信公众号矩阵,文章信息、行业研究动态与资讯信息早知道!



特种铸造
(关注铸造及有色合金
领域重要研究成果)



压铸界
(压铸领域最新动态
及研究)



青稞讲堂
(金属领域青年科学家
最新研究成果)



特种铸造及有色
合金杂志
(文章动态时刻关注)