

双相 Mg-9Li 合金的热变形行为及热加工图研究

丁赛朋¹ 李瑞红^{1,2,3} 李佳傲¹ 杨礼林^{1,2,3} 王海燕^{1,2,3}

(1. 内蒙古科技大学材料科学与工程学院, 包头 014010; 2. 内蒙古自治区新金属材料重点实验室, 包头 014010; 3. 内蒙古科技大学轻稀土资源绿色提取与高效利用教育部重点实验室, 包头 014010)

摘要 使用 Gleeble-3500 热模拟机对铸态双相 Mg-9Li 合金进行热压缩模拟试验, 获得变形温度为 200~380 °C, 应变速率为 0.01~10 s⁻¹ 时该合金的真应力-真应变曲线, 基于此构建了双曲正弦修正的 Arrhenius 本构模型, 且绘制了热加工图。结果表明, 铸态 Mg-9Li 合金具有正应变速率敏感性, 流变应力随应变速率增大(温度降低)而增大, 随应变速率降低(温度升高)而降低; 合金热变形激活能为 91.9 kJ/mol, 适宜的安全加工区域为变形温度在 315~380 °C、应变速率在 0.16~0.30 s⁻¹ 范围内。

关键词 双相 Mg-9Li 合金; 热变形; 本构模型; 热变形激活能; 热加工图

中图分类号 TG146.22

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20240351

Hot Deformation Behavior and Processing Map of Dual-phase Mg-9Li Alloy

DING Saipeng¹, LI Ruihong^{1,2,3}, LI Jia'ao¹, YANG Lilin^{1,2,3}, WANG Haiyan^{1,2,3}

(1. College of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of New Metal Material, Baotou 014010; 3. Key Laboratory of Green Extraction & Efficient Utilization of Light Rare-Earth Resources, Ministry of Education, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010)

Abstract: Thermal compression simulation tests were carried out on the as-cast duplex Mg-9Li alloy using a Gleeble-3500 thermal simulator to obtain the true stress-true strain curves of the alloy at deformation temperatures ranging from 200 °C to 380 °C and strain rates ranging from 0.01 to 10 s⁻¹. On this basis, a hyperbolic sine modified Arrhenius constitutive model was constructed, and the thermal processing diagrams were plotted. The results reveal that the as-cast Mg-9Li alloy exhibits a positive strain rate sensitivity, and the rheological stress is increased with the increase of strain rate (temperature decending) and decreased with the reduction of strain rate (temperature rising). Meanwhile, the thermal deformation activation energy of the alloy is 91.9 kJ/mol, and the suitable safe processing region is the deformation temperature of 315~380 °C and the strain rate of 0.16~0.30 s⁻¹.

Key Words: Duplex Mg-9Li Alloy, Thermal Deformation, Constitutive Mode, Thermal Deformation Activity Energy, Processing Map

Mg-Li 合金的密度为 1.35~1.65 g/cm³, 是目前实际生产应用中最轻的一种金属结构材料, 且具有优良的阻尼性、电磁屏蔽性以及良好的塑性成型性等特点, 在航空航天和 3C(计算机类、消费类电子产品、通信类)等产业领域的结构轻量化方面具有极好的应用前景^[1]。Mg-9Li 合金为双相合金, Li 元素的加入使其由密排六方结构的单相合金(0~5.7%, 质量分数, 下同)转变为密排六方和体心立方结构混合的双相合金(5.7%~10.3%), 可启动滑移系增多, 使合金塑性变形能力提

升^[2-3]。目前, 商用镁合金大都采用强塑性变形工艺, 而双相 Mg-Li 合金热变形过程会受到温度、应力和变形量的影响, 使其高温变形行为较为复杂。近年来, 为了更好地理解双相 Mg-Li 合金的压缩流动行为和组织演化规律, 优化合金热加工工艺参数, 改善合金性能, 对镁合金的本构模型、热加工图已有较多相关研究。目前应用较为成熟的本构方程模型有 Johnson-Cook^[4]、Arrhenius^[5]、Zerilli-Armstrong^[6] 等, 在其中 Johnson-Cook 和 Arrhenius 本构模型的使用较多。杨海亮等^[7]

收稿日期: 2024-08-28; 修订日期: 2024-10-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52461027); 内蒙古自治区军民融合重点科研项目及软科学研究资助项目(JMZD202304); 内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2024LHMS05054)

第一作者简介: 丁赛朋, 男, 1997 年出生, 硕士研究生, E-mail: spd468317858@163.com

通信作者: 李瑞红, 女, 1984 年出生, 副教授, E-mail: liruihong@imust.edu.cn

引用格式: 丁赛朋, 李瑞红, 李佳傲, 等. 双相 Mg-9Li 合金的热变形行为及热加工图研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(6): 862-867.

DING S P, LI R H, LI J A, et al. Hot deformation behavior and processing map of dual-phase Mg-9Li alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(6): 862-867.

利用数值模拟揭示 Mg-Li 合金在高应变速率下的成形性能,建立了 LA103(Mg-10Li-3Al)合金在高应变速率下激光冲击成形的本构模型和成形极限图(FLD),提出了适用于激光冲击成形的高应变速率敏感的 Johnson-Cook(JC)本构模型;姜炳春等^[8]利用多元回归法构建了基于应变的 LZ92(Mg-9Li-2Zn)合金流变应力预测模型,并和试验结果进行对比,证明该模型预测流变应力的精度较高,平均相对误差为 6.73%,相关系数为 0.98;SHALBAFI M 等^[9]对挤压态 Mg-10Li-1Zn 合金进行热压缩试验,建立了高温下的 Arrhenius 本构模型,从方程得到幂律应力指数值在 4.8~5.2 范围内,表明在热变形过程中位错攀移是主要变形机制;张奇等^[10]对 AZ91(Mg-9Al-1Zn)镁合金进行了单向热压缩试验,建立热加工图进行分析,得出适宜该合金的加工工艺参数在 300~402 °C,应变速率在 0.01~0.1 s⁻¹ 之间;支盛兴等^[11]基于 DMM 理论,通过叠加功率耗散图和失稳图得到挤压态 AZ40 镁合金的热加工图,并结合组织分析确定其最优锻造工艺为 300 °C,应变速率为 0.1 s⁻¹。也有研究者构建了 LA43M^[12]、Mg-RE-Zn^[13]、AZ80^[14]、ZX115^[15]、Mg-3.5Li-6Al^[16] 等材料的 Arrhenius 本构模型,预测结果可靠,对探究 Mg-Li 合金变形机制和适宜的热加工工艺有较好的参考价值。

双相 Mg-Li 合金的变形协调机制较为复杂,工艺参数控制困难,结合本构模型和热加工图对其热变形行为继续进行研究,可以为合金的工业化应用提供一定指导。上述研究中的合金均为三元或多元 Mg-Li 合金,因其他元素的加入对 Mg-Li 合金的热变形行为影响较为复杂,因此,本研究选择 Mg-9Li 二元合金,仅考虑双相组织在热变形行为中的相互作用,采用 Gleeble-3500 型热模拟试验机对铸态双相 Mg-9Li 合金进行热压缩试验,研究该合金在不同温度和应变速率下的流变应力行为;基于真应力-真应变数据构建了该合金的 Arrhenius 本构方程模型并绘制热加工图,分析该合金适宜的热加工工艺,旨在为 Mg-Li 合金的实际生产和应用制定合适的热加工工艺提供参考。

1 试样制备与方法

试验用 Mg-9Li 合金铸锭由氩气保护下,在 ZG-25 型真空感应熔炼炉制备所得,使用原料为工业纯镁(99.9%,质量分数,下同),Mg-20Li 中间合金,预热炉膛至 150 °C 后,将称量好的原料迅速放入熔炼炉坩埚中,抽真空至真空度为 $(1.0\sim 2.0)\times 10^{-2}$ Pa 后,通入氩气至炉内使气压至 8×10^4 Pa 左右开始熔炼,持续升温至 720 °C 静置 20 min,将熔体浇入金属型,静置待其冷却后取出。采用 AGILENT730 型电感耦合等离子体发射

光谱仪(ICP-AES)对制备的合金进行成分测定,结果显示 Li 含量为 9.2%,余量为 Mg。对合金铸锭进行 300 °C×5 h 均匀化热处理,然后通过线切割制备 $\phi 10$ mm×12 mm 的试样,并将试样表面打磨光滑,防止氧化皮对试验结果造成影响,随后进行热压缩模拟试验。

将试样置于持续的水流下依次使用 200、400、600、800、1 000 和 1 200 号砂纸进行打磨。采用 AXIO VERT A1 型光学显微镜,对试样进行金相组织观察。腐蚀剂采用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液,腐蚀 5 s。采用 Gleeble-3500 型热模拟试验机对合金试样热变形行为进行研究。为了确保合金在预设温度下变形,设计工艺流程见图 1,以 5 °C/s 加热试样,分别至 200、260、320 和 380 °C,随后保温 180 s,使试样受热均匀,再分别以 0.01、0.1、1 和 10 s⁻¹ 的应变速率进行热压缩变形,最大真应变为 0.8,压缩变形结束后立即水冷。

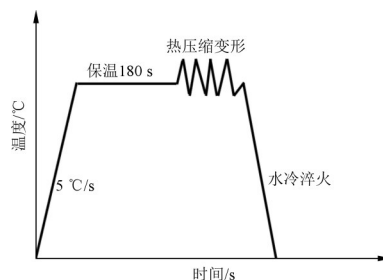


图1 热压缩试验工艺流程

Fig.1 Flow chart of thermal compression test process

2 试验结果与讨论

2.1 热变形行为

图2为 Mg-9Li 合金在不同温度和应变速率下的真应力(σ)-真应变(ϵ)曲线。可以看出,在变形初期,随真应变增加,合金的流变应力急剧上升,之后上升速率趋于平缓并最终保持稳定,呈现稳态流变特征。这种变化趋势是由于在变形初期应变量较小,位错塞积速率较快,位错在晶体中的密度增加导致加工硬化现象显著,即位错之间相互干扰和阻碍增加,使得材料的流变应力迅速增加。随着变形量增加,动态软化效应开始显现,会导致位错的密度和塞积速率减小,从而使流变应力的增加趋于饱和或减缓,且在变形量增加后,位错相互作用趋于饱和,导致新的位错生成速率减慢,从而减缓加工硬化率的增加。由于动态软化和加工硬化之间相互抵消,导致曲线上升趋势减缓乃至趋于稳定,在此过程中出现了 PLC 效应(合金在一定的塑性变形条件下会出现明显的“塑性不稳定”现象,也被称作锯齿屈服现象,主要表现为应力-应变曲线上的锯齿状波动^[17]),这与变形过程中位错的运动及其与溶质原子间的作用有关。

图3为合金在不同变形条件下的峰值应力(σ_p)变化曲线。可以看出,峰值应力对变形温度和应变速率

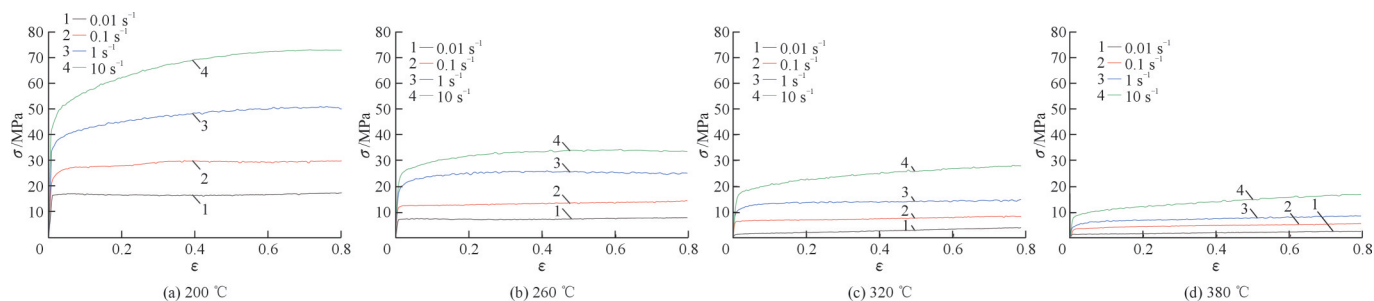


图2 Mg-9Li合金在不同温度和应变率下的真应力-真应变曲线

Fig.2 True stress-true strain curves of Mg-9Li alloy at different temperatures and strain rates

较为敏感。当变形温度升高时,峰值应力明显降低,这是由于温度升高,使得合金内能增大,滑移更易开动,因此合金变形更加容易,而在温度为225 °C时,镁合金有新的滑移系启动^[18],因此在200~260 °C之间峰值降低更加明显。当应变速率增大时,可以看出峰值应力随之增加,这是由于应变速率增大时,位错密度增长也会更多,而动态软化效应引起的位错湮灭不能及时抵消增长的位错,位错不断塞积,并且相互阻碍,使得位错运动变得更加困难,导致材料变形更加困难。结合上述分析可知,该合金材料的应变速率敏感性符合正应变速率敏感指数定义^[19],即可判断其为正应变速率敏感指数材料。

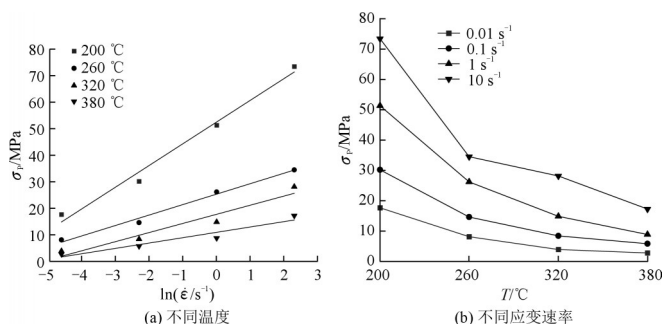


图3 合金在不同变形条件下的峰值应力变化曲线

Fig.3 Peak stress variation curves of alloys under different deformation conditions

2.2 热变形激活能及本构模型

结合试验和有关研究,可知Mg-9Li合金流变应力变化对应变温度和应变速率较为敏感,Arrhenius本构模型通过考虑应力、应变线性关系、应变速率敏感性指数、热变形激活能等将金属材料的热变形过程表达为热激活过程。因此,为了更准确描述Mg-9Li双相合金热变形行为,选择构建Arrhenius本构模型。该模型可将应变速率 $\dot{\epsilon}$ 与流变应力 σ 、变形温度 T 之间的关系以如下3种方式表述:

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (\alpha \leq 0.8) \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon} = A_2 \exp(\beta \sigma) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (\alpha > 1.2) \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha \sigma)]^{n_1} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (\text{通用}) \quad (3)$$

式中, A 、 n 、 n_1 、 α 和 β 都是与温度无关的常数,其中 A 为结构因子, n_1 为应力指数; Q 为热变形激活能; R 为摩尔气体常数,8.314 kJ/mol; T 为热力学温度。 β 和 α 满足关系 $\alpha = \beta/n$,因此对式(1)~式(3)两边分别取自然对数得:

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_1 - \frac{Q}{RT} + n \ln \sigma \quad (4)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_2 - \frac{Q}{RT} + \beta \sigma \quad (5)$$

$$\frac{Q}{RT} = \ln A - \ln \dot{\epsilon} + n_1 \ln [\sinh(\alpha \sigma)] \quad (6)$$

通过计算可得不同温度下 $\ln \dot{\epsilon}$ - σ 和 $\ln \dot{\epsilon}$ - $\ln \sigma$ 的关系,见图4。进行线性回归分析可得出 n 和 β 的值,指数 $n=3.153$,系数 $\beta=0.233$,根据两者与 α 关系,即可得出 $\alpha=0.0738$ 。通过应变速率敏感指数(m)的大小可以从一定程度上描述材料的塑性变形能力。一般超塑性材料的 m 在0.3~0.9范围内, m 可由应力(σ)-应变速率($\dot{\epsilon}$)对数曲线的线性拟合计算得出的斜率表示,计算得出 $m=0.45856$,根据应变速率敏感指数定义(当 m 大于0.4时,材料表现出较强的应变速率敏感性,这表明它可以在高温下有效地吸收能量,并在较高的应变条件下仍然保持良好的塑性^[19]),此结果可一定程度上表明铸态Mg-9Li双相合金材料具备超塑性特征。

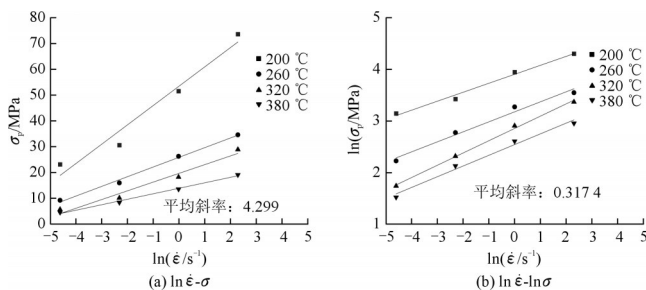

 图4 n, β, m 相关线性拟合关系

 Fig.4 Correlation linear fitting relationship of n, β, m

将上述计算所得结果代入式(4)~式(6)联立求偏导,可得激活能表达式为:

$$Q = R \left\{ \frac{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial(1/T)} \right\}_{\dot{\epsilon}} \left| \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]} \right|_T \quad (7)$$

令式(7)中:

$$\left\{ \frac{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial(1/T)} \right\}_{\dot{\epsilon}} = M$$

$$\left| \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]} \right| = N$$

激活能可表示为:

$$Q = RMN \quad (8)$$

由式(6)可知 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1000/T$ 与 $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 的线性关系, 见图 5, 其线性拟合结果即为 $n_1 = 2.1516$ 。由式(7)可知, 热变形激活能的值与峰值应力及其相应的变形温度以及上述计算所得常数 α 相关, 将对应参数代入即可得该合金的平均热变形激活能 $Q = 91.9 \text{ kJ/mol}$ 。根据合金激活能大小可以从一定程度上判断其塑性变形机理, 已知镁的晶内扩散激活能为 135 kJ/mol , 晶界扩散激活能为 92 kJ/mol , Mg-9Li 合金的平均热变形激活能接近晶界扩散激活能^[20], 据此可以确定晶界扩散控制的晶界滑移是 Mg-9Li 合金的主要塑性变形机制。

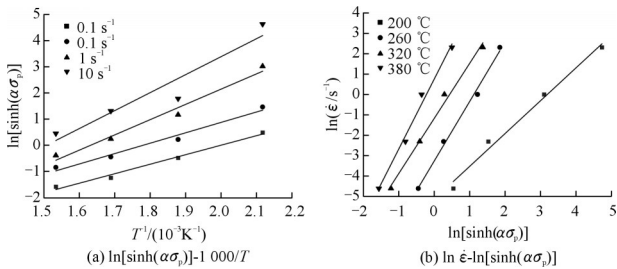


图 5 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - [10^3 T^{-1}]$ 与 $[\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]] - [10^3 T^{-1}]$ 相关线性拟合关系
Fig.5 Correlation linear fitting relationship of $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - [10^3 T^{-1}]$ with $[\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]] - [10^3 T^{-1}]$

应变速率和变形温度对 Mg-9Li 合金流变应力的影响可以用 Zener-Hollomon 参数来表示:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (9)$$

将式(9)两边取对数, 与式(6)结合可得:

$$\ln Z = \ln A + n_1 \ln[\sinh(\alpha\sigma)] \quad (10)$$

绘制 $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 的关系图见图 6, 并进行线性回归分析, 设定应力指数 $n_1 = 2.16$, 可得方程 $\ln Z = 17.347 + 2.16 \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$, 由此可得 $\ln A = 17.347$, 即 $A = 3.417 483 1 \times 10^7$ 。将上述分析所得 Q 、 n_1 、 A 和 α 的值, 见表 1, 带入式(3)中, 即可得到 Mg-9Li 合金的本构模型为:

$$\dot{\epsilon} = 3.417 483 1 \times 10^7 [\sinh(0.073 8\sigma)]^{2.16} \exp[-91 942.03/(RT)]$$

表 1 Arrhenius 本构模型中的材料参数

β	n_1	α	n	A	$Q/(kJ \cdot mol^{-1})$
0.233	2.16	0.073 8	3.153	$3.417 483 1 \times 10^7$	91.9

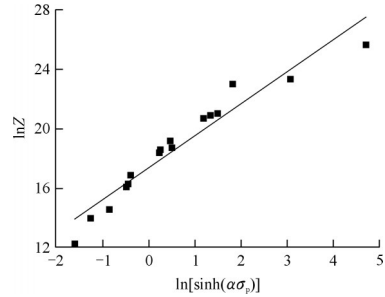


图 6 $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 的线性拟合关系

Fig.6 Linear fitting relationship between $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$

2.3 热加工图

热加工图能够直观地反应材料在不同加工条件下的变形行为, 由功率耗散图和失稳图结合绘制, 可以分为安全加工区域和失稳区域。失稳区域通常是在真应力-真应变曲线上出现的拐点或下降区域, 采用 Prasad 加工失稳判据 $\xi(\dot{\epsilon})$, 为:

$$\xi(\dot{\epsilon}) = \frac{\partial \lg[m/(m+1)]}{\partial \lg \dot{\epsilon}} + m < 0 \quad (11)$$

式中, m 为应变速率敏感指数。

根据式(11), 当 $\xi(\dot{\epsilon}) < 0$, 表示材料的动态软化效应开始显现, 如动态再结晶或动态回复, 导致流变应力的下降或趋于稳定, 材料的塑性变形性能较优, 容易发生动态软化, 因此需要谨慎控制加工参数以避免过度软化或造成材料损伤。综上所述, 在失稳区域内, 加工参数的调整范围可能较小, 需要更加精细地控制; 而在安全加工区域内, 加工参数的调整范围较大, 具有更大的灵活性, 失稳区域和安全加工区域正确区分并合理利用可以有效指导热加工工艺的设计和优化^[21-23]。根据单向热压缩数据绘制得到试验合金在不同真应变下的热加工图见图 7, 灰色区域为热变形失稳区域, 等高线代表功率耗散系数相同。功率耗散系数与合金的变形组织密切相关, 反映了在加工过程中材料能够有效利用能量的能力, 当其值较高时, 表示材料在变形过程中能够高效地将输入能量转化为组织结构变化(如位错运动、晶界滑动、动态再结晶等), 而不是转化为热能或其他形式的能量损失。一般而言, 当其值处于 $0.3 \sim 0.6$ 范围内时, 合金在变形过程中会同时出现加工硬化和动态软化现象, 合理控制功率耗散系数不仅可以促进晶粒细化、提高合金强度和韧性, 还能优化相变过程, 减少缺陷生成, 最终影响合金的整体力学性能^[24]。由图 7 可以看出, 当真应变为 0.2 时, 失稳区域主要集中在

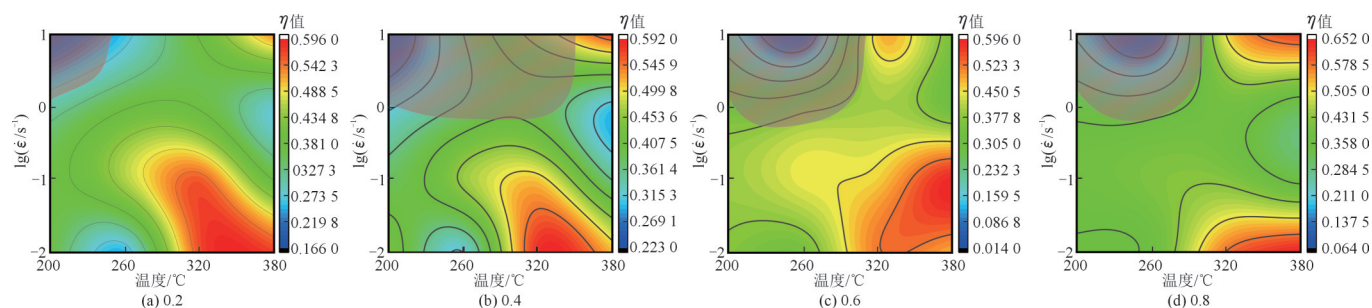


图7 Mg-9Li合金在不同真应变下的热加工图

Fig.7 Thermal processing map of Mg-9Li alloy at different true strains

在高应变速率区域,应变速率为 $1.1 \sim 10 \text{ s}^{-1}$,变形温度为 $200 \sim 250 \text{ }^{\circ}\text{C}$,此时功率耗散系数为 $0.21 \sim 0.30$ 。当真应变为 0.4 时,失稳区域扩大,呈椭圆形,向高温区域扩散,变形温度为 $200 \sim 350 \text{ }^{\circ}\text{C}$,功率耗散系数为 $0.15 \sim 0.42$,应变速率变化不大。当真应变为 0.6 时,失稳区域高温区域部分减小($200 \sim 311 \text{ }^{\circ}\text{C}$),应变速率和功率耗散系数变化不大。当真应变为 0.8 时,失稳区域变化不明显,此时仍呈椭圆形。综合考虑失稳区域主要集中在应变速率为 $0.82 \sim 10 \text{ s}^{-1}$,变形温度为 $200 \sim 328 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。不同真应变下功率耗散系数的峰值约为 0.64 ,出现在应变速率为 0.14 s^{-1} 、变形温度为 $315 \sim 380 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,说明在此条件下合金组织演变所需吸收能量最多,位错的运动和增殖较为活跃,可以有效缓解应力集中。图8为不同功率耗散系数下铸态压缩试样的金相组织。可以看出,在功率耗散系数较高时合金组织变形更加均匀,较少出现沿挤压方向出现大幅度挤压拉长现象。

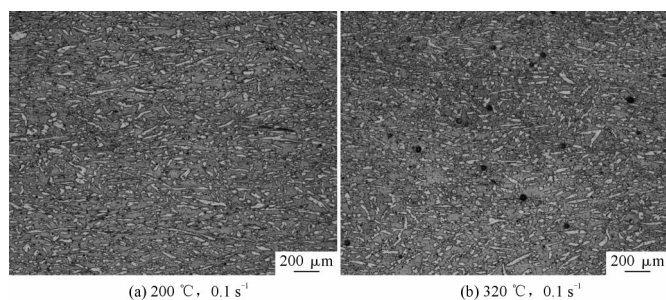


图8 不同功率耗散系数下铸态压缩试样金相组织

Fig.8 Metallographic structure of as-cast compression specimens with different power dissipation coefficients

综合考虑不同应变量下的热加工图,可以看出安全加工区域主要集中在低应变速率区域,而失稳区域主要集中在高应变速率区域。出现这种现象的原因可能是由于在较高应变速率下,材料功率耗散系数较小,材料变形过程中组织演变消耗的能量较少,会产生较多热能,加工时无法及时散热,温度变化较大。因此选择安全加工区域时要远离失稳区,以使材料加工时塑性变形相对稳定。同时为了避免加工过程中温度变化

过大,且使加工参数可调整范围更大,安全加工区域的功率耗散系数要尽可能大。综上所述,选择安全加工区域为变形温度在 $315 \sim 380 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、应变速率在 $0.16 \sim 0.30 \text{ s}^{-1}$ 范围内。

3 结 论

(1)Mg-9Li合金的真应力随应变量增加急剧上升,而后随真应变继续增加上升速率减缓至趋于稳定,该合金为正应变速率敏感指数材料,且具备超塑性特征。流变应力随应变速率增加而上升,随变形温度升高而减小。

(2)合金的热变形激活能为 91.9 kJ/mol ,接近镁的晶界扩散激活能 92 kJ/mol ,构建了双曲正弦修正的Arrhenius本构模型。

(3)Mg-9Li合金的失稳区域主要集中在较高应变速率和较低变形温度区间,应变速率为 $0.82 \sim 10 \text{ s}^{-1}$,变形温度为 $200 \sim 328 \text{ }^{\circ}\text{C}$;安全加工区域可以选择变形温度在 $315 \sim 380 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、应变速率在 $0.16 \sim 0.30 \text{ s}^{-1}$ 范围内。

参 考 文 献

- [1] WU R Z, YAN Y, WANG G, et al. Recent progress in magnesium-lithium alloys[J]. International Materials Reviews, 2015, 60 (2): 65-100.
- [2] 蔡祥, 乔岩欣, 许道奎, 等. 镁锂合金强化行为研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(z2): 374-379.
- [3] KAREWAR S V, GUPTA N, GROH S, et al. Effect of Li on the deformation mechanisms of nanocrystalline hexagonal close packed magnesium [J]. Computational Materials Science, 2017, 126: 252-264.
- [4] SIRIGIRI V K R, GUDIGA V Y, GATTU U S, et al. A review on Johnson-Cook material model [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 62: 3 450-3 456.
- [5] 戴莉莉, 周璟怡, 敬学锐, 等. 基于应变修正 Arrhenius 模型的 Mg-3Al-3Sn-0.3Mn 合金热加工图研究[J]. 精密成形工程, 2024, 16 (2): 10-19.
- [6] SEIF C Y, HAGE I S, HAMADE R F. Extracting HCP Zrill-Armstrong material parameters for magnesium alloy AZ31B from orthogonal cutting tests[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 290: 116 982.