

Pb-Mg-Al 合金的热变形行为与加工图

段永华, 孙 勇, 何建洪, 方东升, 郭中正

(昆明理工大学 材料科学与工程学院 云南省新材料制备与加工重点实验室, 昆明 650093)

摘 要: 采用 Gleeble-1500 热模拟试验机研究 Pb-Mg-Al 合金在变形温度 453~613 K、应变速率 $0.01\sim 1\text{ s}^{-1}$ 条件下的热压缩流变行为, 计算应力指数和变形激活能, 采用 Zener-Hollomon 参数法构建合金的高温变形的本构关系, 基于 Murty 准则, 建立 Pb-Mg-Al 合金的加工图。结果表明: Pb-Mg-Al 合金为正应变速率敏感材料; 该合金的热压缩变形流变应力行为可用双曲正弦函数本构方程和 Zener-Hollomon 参数来描述, 其平均变形激活能为 149.524 4 kJ/mol; 从加工图分析并结合激活能, 确定 Pb-Mg-Al 合金的最优变形温度和应变速率分别为 533 K 和 0.1 s^{-1} 。

关键词: Pb-Mg-Al 合金; 本构关系; 变形激活能; 加工图

中图分类号: TG301

文献标志码: A

Hot deformation behavior and processing map of Pb-Mg-Al alloy

DUAN Yong-hua, SUN Yong, HE Jian-hong, FANG Dong-sheng, GUO Zhong-zheng

(Key Laboratory of Advanced Materials of Yunnan Province, Faculty of Material Science and Engineering,
Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: The flow stress behaviors and the deformation microstructure of hot compressed Pb-Mg-Al alloy were investigated by hot compressive tests on Gleeble-1500 thermo-simulation machine in the temperature range of 453–613 K and strain rates range of $0.01\sim 1\text{ s}^{-1}$. The stress exponent and deformation activation at elevated temperatures were calculated. The constitutive relationship of the Pb-Mg-Al alloy during hot compression deformation at high temperatures was obtained by introducing Zener-Hollomon parameter. Based on Murty criterion, the processing map for the Pb-Mg-Al alloy was obtained. The results show that Pb-Mg-Al alloy is sensitive to strain rate. The hot deformation behavior can be described by a constitutive equation in hyperbolic sine function and Zener-Hollomon parameter. The average hot deformation activation energy of Pb-Mg-Al alloy is 149.524 4 kJ/mol. The optimal processing parameters derived from processing map and activation energy are 533 K in temperature and 0.1 s^{-1} in strain rate.

Key words: Pb-Mg-Al alloy; constitutive relationship; deformation activation energy; processing map

铅及其合金具有优越的摩擦性能、低生产成本和高抗蚀性, 已在阳极板、X 射线屏蔽材料和铅酸蓄电池等相关工业领域获得了广泛应用^[1-3]。而铅及其合金强度偏低, 室温下即能发生回复, 传统强化方法不可能使其强度得到大幅提升。大多数传统的铅合金是以固溶体为基的第二相颗粒增强材料^[4-6], 但它仍然无法满足结构材料的要求。因此, 为了获得强度和硬度较

高的新型铅基合金, 满足结构功能一体化的要求, 本文作者所在课题组通过添加 Mg 和 Al 等元素, 制备出新型的 Pb-Mg-Al 合金, 由于其中含有大量金属间化合物, 其强度得到大幅提升^[7], 且 X 线、 γ 线屏蔽效果优异, 如果在该合金中添加一定量的 B 元素而制备成 Pb-Mg-Al-B 合金, 则具有中子和射线的综合屏蔽效果, 可应用在核屏蔽领域^[8]。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50871049); 昆明理工大学引进人才科研启动基金项目(KKSY201251033); 昆明理工大学重点实验室开放基金资助项目(ZD2010021D)

收稿日期: 2012-03-09; **修订日期:** 2012-09-12

通信作者: 段永华, 讲师, 博士; 电话: 0871-5136698; E-mail: duanyh@kmust.edu.cn

近年来,国内外对铅基 Pb-Mg-Al 合金的研究较少,主要集中在含 Pb、Al 的镁基合金^[9-12],目前未见对铅基 Pb-Mg-Al 合金在高温不同应变速率条件下的变形行为研究的报道。由于 Pb-Mg-Al 合金所含的金属间化合物脆性较大,导致合金塑性加工成形困难,成为其实用化的障碍。因此,有必要研究 Pb-Mg-Al 合金的热变形行为,探讨其塑变成形机制,这对正确设计其制备加工工艺,实现成形加工过程的精确控制十分重要。本文作者针对 Pb-Mg-Al 合金进行热压缩实验,研究该合金热变形时流变应力与变形温度、应变速率的关系,建立合金热变形的加工图,为合理制定该合金的热加工工艺提供理论依据。

1 实验

实验所用材料为 Pb-Mg-Al 合金,其化学成分(质量分数,%)为: Pb 54, Mg 36, Al 10。将铸锭加工成直径 8 mm、长 12 mm 的圆柱形压缩试样,要求试样表面光洁,两端平行且光滑,没有裂纹等缺陷。采用 Gleeble-1500 热模拟试验机进行热压缩实验。在试样两端均匀涂敷含石墨的固体润滑剂以减少压缩时试样与压头之间的摩擦。在本实验中,采用的 Mg-Pb-Al 合金熔点约为 694 K,故选择变形温度分别为 453、493、533、573 和 613 K,压缩前试样在变形温度下保温 3 min 以保证试样内外温度均匀一致,之后进行压缩,变形量为 40%,变形速率分别为 0.01、0.1 和 1.0 s⁻¹。

2 结果与讨论

2.1 Pb-Mg-Al 合金的流变应力分析

图 1 所示为 Pb-Mg-Al 合金在不同应变速率和变形温度下的高温压缩变形真应力—应变曲线。从图 1 可以看出,在变形温度为 533~613 K、应变速率为 0.01~0.1 s⁻¹ 的变形条件下,合金呈现明显的稳态流变特征,即在一定的应变速率变形温度下,当真应变超过一定值后,真应变的增加对真应力的影响不大。

Pb-Mg-Al 合金在相同的应变速率下,随着变形温度的升高,真应力均降低。这是因为随着温度的升高,Pb-Mg-Al 合金中各金属原子热振动的振幅增大,各原子间的相互作用力减弱使最有效的塑性变形机理同时作用创造条件,滑移阻力减小,新滑移不断产生,使变形抗力降低;此外,高温下合金的动态再结晶引起

的软化程度也随温度的升高而增大,从而导致合金的真应力降低。Pb-Mg-Al 合金在同一应变速率下,流变应力先随应变的增加迅速升高,但随着应变量的增加,应力—应变曲线呈现逐渐下降的趋势。

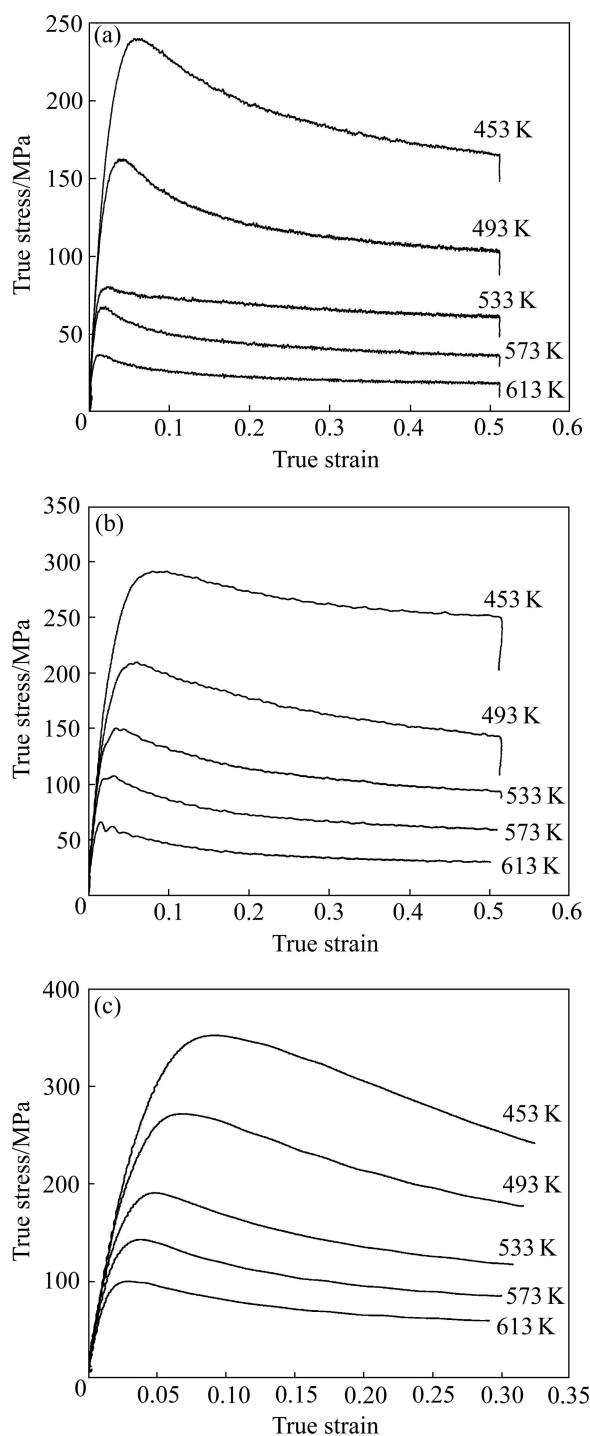


图 1 Pb-Mg-Al 合金在不同变形条件下的热压缩变形真应力—应变曲线

Fig. 1 True stress—true strain curves of Pb-Mg-Al alloy during hot compression deformation at high temperatures and strain rates of 0.01 s⁻¹ (a), 0.1 s⁻¹ (b) and 1 s⁻¹ (c)

表1 所列为不同变形条件下 Pb-Mg-Al 合金的峰值流变应力。表1 表明, 在同一应变温度下, 峰值流变应力随着应变速率的增大而增大, 说明合金在该实验条件下具有正的应变速率敏感性, 即应变速率越大, 温度越低, 合金达到稳态变形越困难。这主要是因为 Pb-Mg-Al 合金在变形过程中, 由于应变速率越大, 导致单位应变的变形时间缩短, 位错数量增加; 同时, 由动态再结晶所提供的软化时间缩短, 变形并未充分完成, 提高了合金变形的临界切应力。

表1 Pb-Mg-Al 合金不同变形条件下的峰值流变应力

Table 1 Peak flow stress of Pb-Mg-Al alloys under different deformation conditions

$\dot{\epsilon}/s^{-1}$	Peak flow stress/MPa				
	453 K	493 K	533 K	573 K	613 K
0.01	240.28	162.63	80.57	67.77	36.84
0.1	291.24	209.81	150.36	107.49	66.00
1	352.75	272.23	191.00	143.15	100.19

2.2 Pb-Mg-Al 合金的本构方程

金属和合金的热变形是一个受热激活控制的过程, 可以通过应变速率 $\dot{\epsilon}$ 、温度 T 和流变应力 σ 之间的关系来描述其流变行为。对应变速率 $\dot{\epsilon}$ 、温度 T 和流变应力 σ 之间的数学表达式的研究结果主要有以下3种。

1) 低应力条件下, 金属的流变可以用指数模型来描述^[13]:

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \exp[-Q/(RT)] \quad (1)$$

2) 高应力条件下, 金属的流变可以用幂指数模型来描述^[14-15]:

$$\dot{\epsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp[-Q/(RT)] \quad (2)$$

3) 所有应力状态下, 金属的流变可以用双曲正弦函数来描述^[16]:

$$\dot{\epsilon} = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp[-Q/(RT)] \quad (3)$$

式中: A_1 、 A_2 、 A 、 n_1 、 n 、 α 和 β 均为与温度无关的材料常数, 且 $\alpha=\beta/n_1$; Q 为激活能; R 为摩尔气体常数; T 为变形温度; σ 为流变应力。

ZENER 和 HOLLOMON^[17]于 1944 年提出并验证了应变速率和温度的关系可用一项参数 Z 表示, 称为 Z 参数或 Zener-Hollomon 参数, 其定义如下:

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

对式(1)~(4)分别取自然对数可得:

低应力条件下,

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_1 - Q/(RT) + n_1 \ln \sigma \quad (5)$$

高应力条件下,

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_2 - Q/(RT) + \beta\sigma \quad (6)$$

所有应力状态下,

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A - Q/(RT) + n \ln[\sinh(\alpha\sigma)] \quad (7)$$

$$\ln Z = \ln A + n \ln[\sinh(\alpha\sigma)] \quad (8)$$

由式(5)~(7)可知, 温度一定时, n_1 和 β 分别为 $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$ 和 $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$ 曲线的斜率, 采用一元线性回归处理, 可得 $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$ 和 $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$ 曲线。通过 $\alpha=\beta/n_1$ 关系式可算出不同温度下的参数 α , 将 α 代入式(7), 用线性回归绘制 $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 和 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1/T$ 关系曲线, 如图2所示。

对式(7)进行偏微分可得到变形激活能 Q 为

$$Q = R \left\{ \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]} \right\}_T \left\{ \frac{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial (1/T)} \right\}_{\dot{\epsilon}} \quad (9)$$

将 R 值和 $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 曲线斜率以及 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1/T$ 曲线斜率代入式(9), 求得相应变形温度和应变速率下 Pb-Mg-Al 合金的变形激活能, 见表2, 其平均变形激活能 $Q=149.524 \text{ kJ/mol}$ 。此 Pb-Mg-Al 合金的激活能远高于 Pb-Sb 合金的激活能 63 kJ/mol ^[18]以及 Pb-Sn 共晶合金的激活能 81.1 kJ/mol ^[19], 说明 Pb-Mg-Al 合金与传统的 Pb 基合金的热变形机理不同。在 Pb-Mg-Al 合金中, 由于元素 Mg 和 Al 的添加, 铅基体被包含共价键的 Mg_2Pb 金属间化合物基体所取代, 并且形成了大量弥散分布的胞状 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 颗粒^[7]。金属化合物 Mg_2Pb 基体中不同原子间存在强键合的共价键^[20]以及晶体结构的低对称性, 导致原子合位错在高温下的可动性降低; 同时, $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 颗粒在金属变形过程中会阻碍位错的运动, 在其周围生成位错钉扎区, 抑制位错的运动, 使位错交滑移和攀移所需要的能量增加, 提高了位错动态恢复所需的能量。

将所求的平均变形激活能、不同变形条件下的 Z 值、相对应的稳态流变应力 σ 一起代入式(8), 绘出 $\ln Z$ 与 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 之间的曲线, 如图3所示。图3表明, 温度补偿应变速率 Z 的自然对数和流变应力 σ 的双曲正弦项的自然对数之间满足线性关系, 说明可用包含

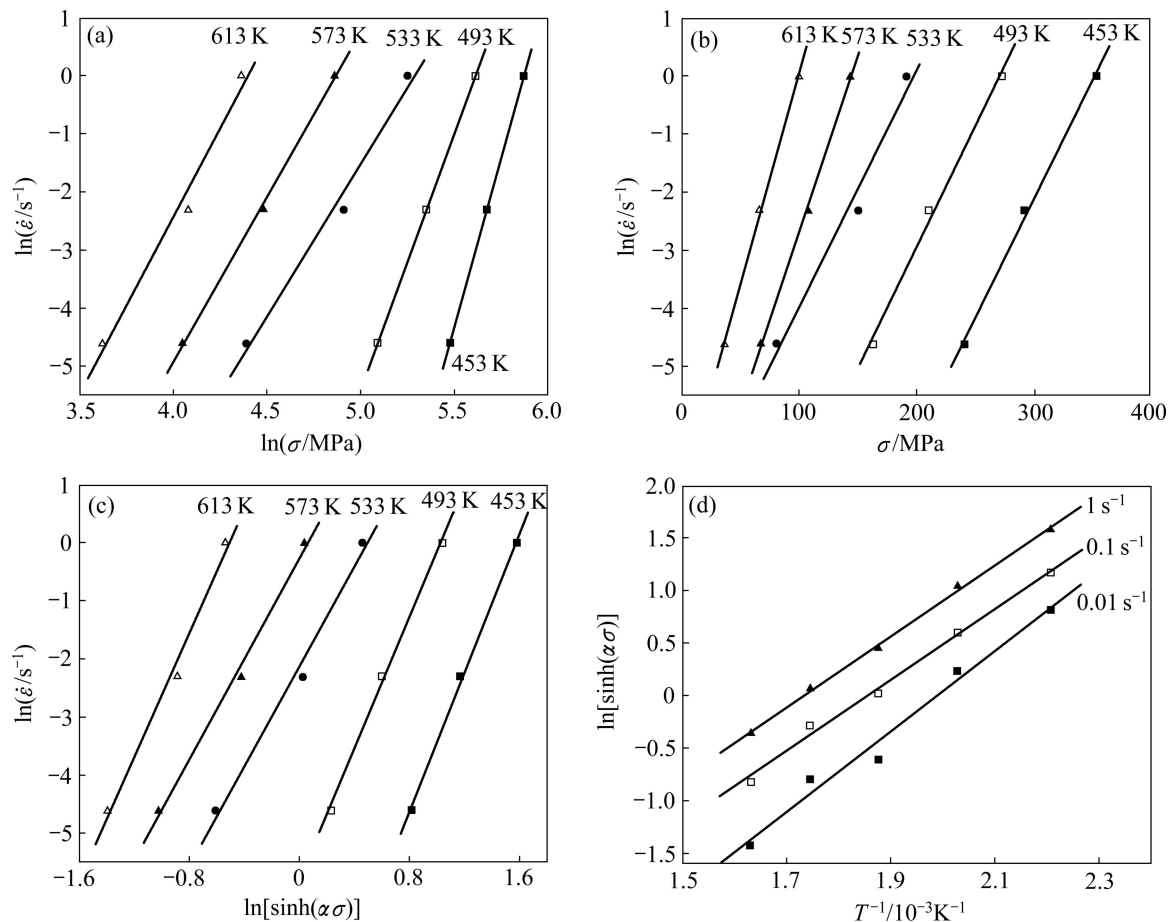


图 2 Pb-Mg-Al 合金的流变应力与应变速率、变形温度的关系

Fig. 2 Relationships among strain rate, flow stress and deformation temperature of Pb-Mg-Al alloy: (a) $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$; (b) $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$; (c) $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$; (d) $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1/T$

表 2 Pb-Mg-Al 合金不同变形条件下的变形激活能

Table 2 Activation energy (Q) of Pb-Mg-Al alloys under different deformation conditions

$\dot{\epsilon}/s^{-1}$	$Q/(kJ \cdot mol^{-1})$				
	453 K	493 K	533 K	573 K	613 K
0.01	192.029 3	180.865 5	131.959 2	137.475 6	169.569 6
0.1	169.055 7	159.227 5	116.172 1	121.028 6	149.283 0
1	169.400 5	159.552 3	116.409 1	121.275 4	149.587 5

Arrhenius 项的 Z 参数来描述 Pb-Mg-Al 合金在高温压缩变形时的流变应力行为。对图 3 采用一元线性回归分析, 可得结构因子 $A=4.0741 \times 10^{13} s^{-1}$ 。综上所述, Pb-Mg-Al 合金材料常数的求解结果为变形激活能 $Q=149.524 4 kJ/mol$, 应力水平指数 $n=5.0246$, 应力水平参数 $\alpha=0.006 465 MPa^{-1}$, 结构因子 $A=4.0741 \times 10^{13} s^{-1}$ 。将求得的 Q 、 α 、 n 、 A 等材料参数代入式(3), 得

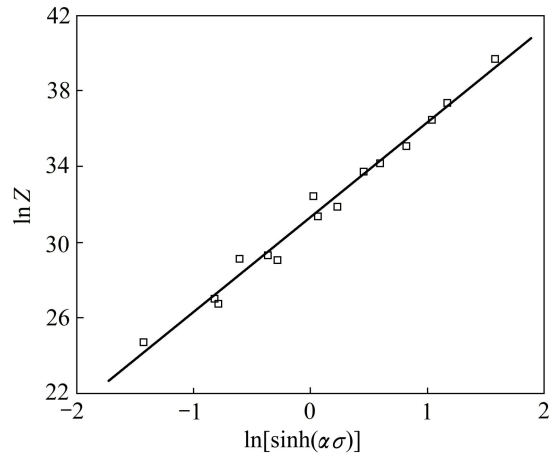


图 3 Pb-Mg-Al 合金的流变应力与 Z 参数的关系

Fig.3 Relationship between Zener-Hollomon parameter and flow stress of Pb-Mg-Al alloy

到 Pb-Mg-Al 合金热压缩时的流变本构方程如下:

$$\dot{\epsilon} = 4.0741 \times 10^{13} [\sinh(0.006 465 \sigma)]^{5.024 6}.$$

$$\exp[-149524/(RT)] \quad (10)$$

根据双曲正弦函数的定义, 可以将流变应力 σ 表述为 Zener-Hollomon 参数 Z 的函数^[21]:

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{A} \right)^{1/n} + \left[\left(\frac{Z}{A} \right)^{2/n} + 1 \right]^{1/2} \right\} \quad (11)$$

将 Q 值代入式(4)可得 Z 参数的表达式:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{149524}{RT}\right) \quad (12)$$

高温稳态流变应力对应变不敏感, 因此忽略应变的影响, 将 α 和 n 值代入式(11), 可得用 Z 参数表示的峰值应力 σ 、应变速率 $\dot{\epsilon}$ 和温度 T 的本构关系式:

$$\sigma = \frac{1}{0.006465} \cdot \ln \left\{ \left(\frac{Z}{4.0741 \times 10^{13}} \right)^{\frac{1}{5.0246}} + \left[\left(\frac{Z}{4.0741 \times 10^{13}} \right)^{\frac{2}{5.0246}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (13)$$

2.3 变形温度和应变速率对激活能的影响

根据表 2, 变形激活能随变形温度和应变速率的变化曲线如图 4 所示。从图 4 可以看出, 变形激活能间接受到应变速率的影响, 直接受到变形温度的影响^[22]。图 4(a)表明, 应变速率在 $0.01 \sim 0.1 \text{ s}^{-1}$ 区间时, Pb-Mg-Al 合金的变形激活能呈快速下降趋势; 而在应变速率在 $0.1 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ 区间时, 呈缓慢上升趋势。当应变速率为 0.1 s^{-1} 时, 合金的激活能最小, 说明快速变形引起的热效应对其起到了主要作用。当合金的应变速率继续增加时, 合金的激活能略有升高, 说明加工硬化效应不是十分明显。因此, 合金合适的应变速率为 0.1 s^{-1} 。由图 4(b)可知, 随着变形温度升高, 合金的变形激活能呈现先下降后上升的趋势; 合金的变形激活能曲线在应变速率为 0.1 s^{-1} 和 1 s^{-1} 的条件下几乎重合, 表明这两种应变速率对变形机制的影响规律相同。在 533 K 处变形激活能最小, 说明合金在温度为 533 K 时 ($T \approx 0.75 T_m$) 容易发生变形, 这是因为合金在高温下的回复、再结晶以及共晶组织等的软化作用占据了主导地位, 溶质原子等缺陷对位错的阻碍作用占据次要地位, 另外随着温度的升高, 由于溶质原子等对位错钉扎作用减弱而导致的可开动滑移系增加, 以及滑移系的临界切应力下降将使变形抗力下降, 激活能降低^[22]。当变形温度上升至 573 K 时, 该合金的变形激

活能增大, 表明合金在变形过程中位错的运动机制发生了变化。Pb-Mg-Al 合金中所含金属间化合物 Mg_2Pb 和 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 的熔点分别为 824 和 723 K , 在高温下 ($T \geq 573 \text{ K}$), 这两种化合物开始软化, 在合金变形过程中阻碍位错运动的钉扎作用降低; 此外, 由于材料的高温塑性变形激活能接近合金的体积扩散能, 导致大量位错攀移产生^[23], 使得大量的异号位错相抵消, 从而潜在的位错源数量减少, 因此, 要产生新的位错源使塑性变形继续进行, 必然会导致变形激活能的增大^[24]。因此, 从激活能的角度考虑, 结合提高材料变形后的力学性能和减少热裂的目的, 合金合适的加工参数初步如下: 变形温度为 533 K , 应变速率 0.1 s^{-1} 。

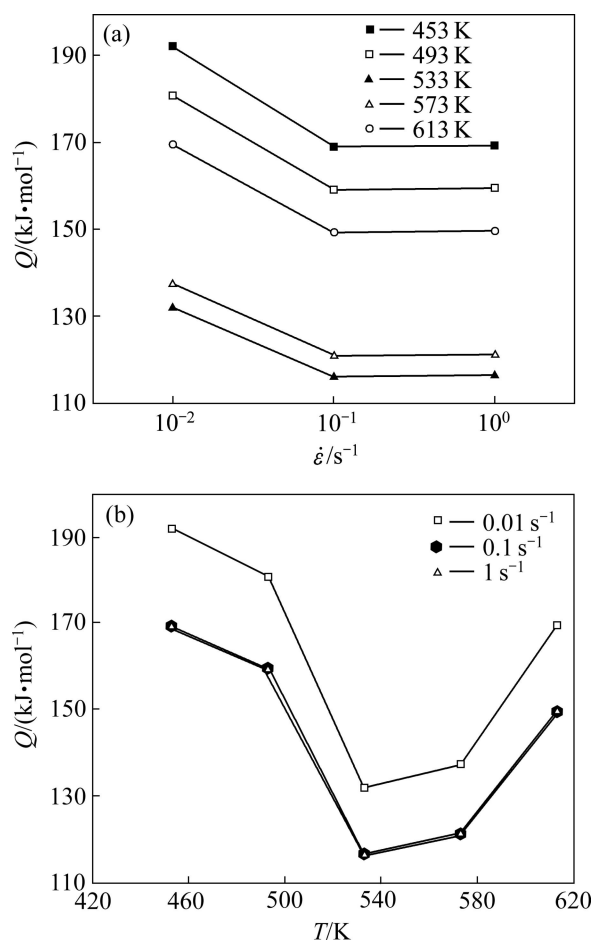


图4 变形速率和变形温度对激活能的影响

Fig. 4 Effects of strain rate (a) and deformation temperature (b) on activation energy

2.4 加工图

2.4.1 理论基础

根据动态材料模型理论, 材料在热加工过程中单位体积内吸收的能量 P 可以分为耗散量 G 和协耗散量 J 两个部分, 如式(14)所示^[25]:

$$P = \sigma \cdot \dot{\varepsilon} = G + J = \int_0^{\dot{\varepsilon}} \sigma d\dot{\varepsilon} + \int_0^{\sigma} \dot{\varepsilon} d\sigma \quad (14)$$

式中:耗散量 G 为材料塑性变形引起的功率消耗,其中大部分转化成粘塑性热,其余以晶体缺陷能的形式存储,协耗散量 J 为材料变形过程中组织演化所消耗的能量。两者瞬时变化之比定义为材料的应变速率敏感指数 m ,以此表示热加工过程中系统能量的瞬时分配比例:

$$m = \frac{dJ}{dG} = \frac{\dot{\varepsilon} d\sigma}{\sigma d\dot{\varepsilon}} = \left(\frac{\partial(\ln \sigma)}{\partial(\ln \dot{\varepsilon})} \right)_{T, \varepsilon} \approx \frac{\Delta \ln \sigma}{\Delta \ln \dot{\varepsilon}} \quad (15)$$

MURTY 等^[26]认为,当材料处于理想线性耗散状态时,协耗散量 J 达到最大值 $J_{\max}$,可以用式(16)表示,功率耗散因子 η 可以用式(17)表示,其物理意义为材料成形过程中显微组织演变所耗散的能量与线性耗散能量的关系,在二维平面上由等功率耗散因子 η 轮廓曲线构成功率耗散图。

$$J = J_{\max} = \frac{P}{2} = \frac{\sigma \dot{\varepsilon}}{2} \quad (16)$$

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{m+1} \quad (17)$$

根据大塑性变形极大值原理, MURTY 等^[26]提出了一种对任意流变应力—应变关系都适用的失稳评判准则,失稳系数 ξ 与应变速率敏感指数 m 有关,如式(18)所示:

$$\xi = \frac{\partial \ln \left(\frac{m}{m+1} \right)}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} + m < 0 \quad (18)$$

根据式(17)和(18),分别绘出材料的耗散图和失稳图,将二者叠加即可得到热加工图。对于金属材料而言,加工图包含安全区、流变失稳区及危险区,在材料安全加工区域内, η 值越大,表明能量耗散状态越低,材料的加工性能越好。

2.4.2 加工图分析

图 5 所示为应变量为 0.4 时 Pb-Mg-Al 合金的热加工图,图中等高线上的数值代表功率耗散效率因子 η ,阴影部分代表热加工失稳区。图 6 所示为不同变形条件下 Pb-Mg-Al 合金的显微组织。由图 5 可以看出,应变量为 0.4 的加工图存在 1 个失稳区,该失稳区的变形温度为 595~620 K、应变速率为 0.13~1 s⁻¹。当变形条件处于该失稳区时,由于应变速率较高,塑性变

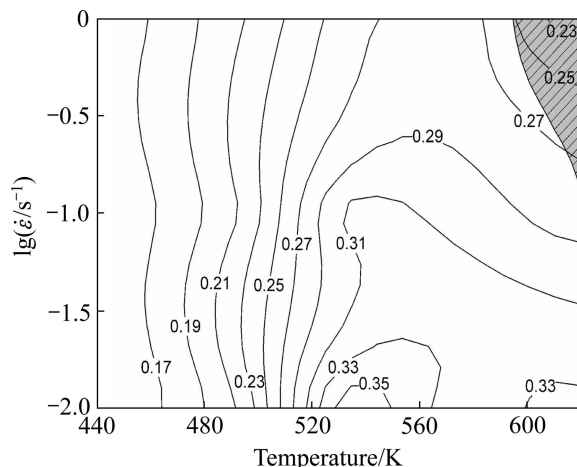


图 5 应变量为 0.4 时 Pb-Mg-Al 合金的加工图

Fig. 5 Processing map of Pb-Mg-Al alloy at true strain of 0.4

形产生的热量不能及时向周围传递,变形向一个局部区域集中,从而发生热塑失稳,产生绝热剪切变形,同样也可能产生流变失稳。由图 6(a)可以看出,组织中存在明显的绝热剪切带,其形成方向与压缩方向呈一定角度,绝热剪切带之间具有一定间隔,呈稀疏状分布。

当变形温度低于 530 K、应变速率小于 0.1 s⁻¹ 时,随变形温度和应变速率的降低, Pb-Mg-Al 合金的功率耗散效率急剧下降。功率耗散效率急剧下降,对应着热加工性能急剧恶化,表明该区域是合金的加工危险区,不适合进行热变形^[27]。图 6(b)所示为加工危险区对应的金相组织,可以看出,实验合金晶粒明显粗化,变形温度越高、应变速率越低,晶粒粗化越严重,合金的变形协调性越差,在大应变情况下可能产生加工裂纹,因此,在实际选择热加工参数时应予避免。

以往研究表明,功率耗散效率越高,越容易发生动态再结晶^[28],动态再结晶可导致流变软化并形成稳态流变,有利于材料的热变形。图 6(c)所示为在 533 K、0.1 s⁻¹ 变形条件下的显微组织,可以看出,晶粒明显细化,随着变形温度的升高,当变形温度为 573 K 时,如图 6(d)所示,动态再结晶进行得更充分,再结晶组织更明显,出现了再结晶后的晶粒长大。由图 5 可以看出,当变形温度为 518~594 K、应变速率为 0.01~0.168 s⁻¹ 时,功率耗散效率均大于 30%,最大值达到了 35%,说明在此变形条件下较易发生动态再结晶,因此,518~594 K 的变形温度和 0.01~0.168 s⁻¹ 的应变速率为 Pb-Mg-Al 合金的最佳热加工参数区。

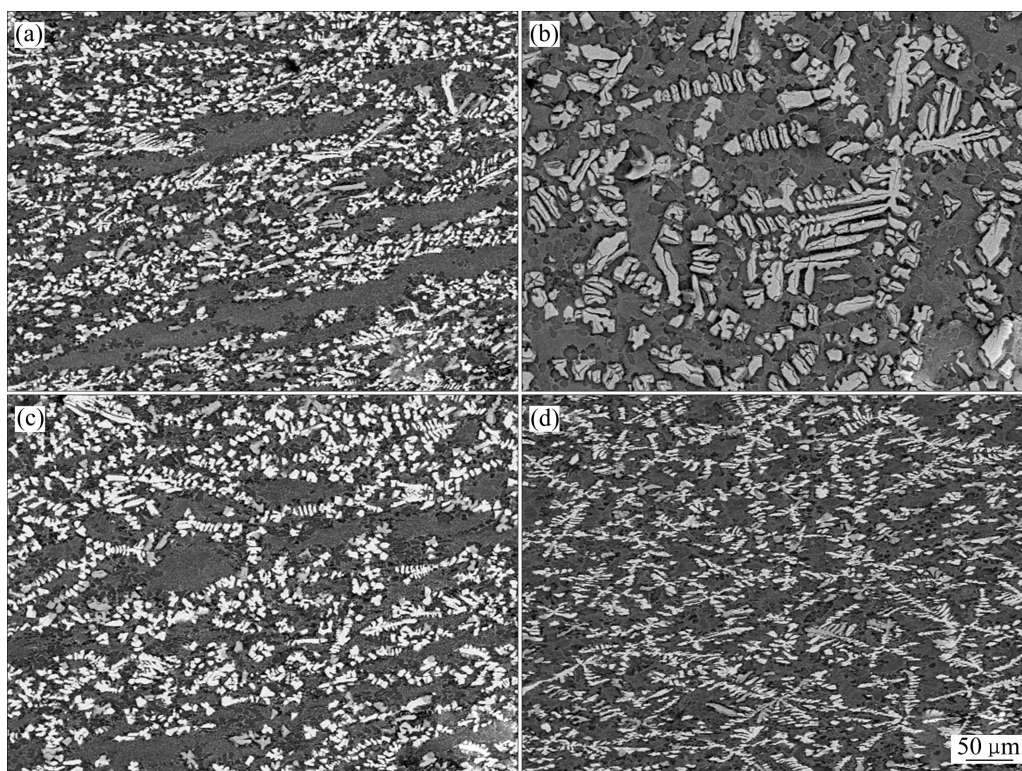


图 6 Pb-Mg-Al 合金在不同变形条件下的显微组织

Fig. 6 Microstructures of Pb-Mg-Al alloy under different deformation conditions: (a) 613 K, 1 s^{-1} ; (b) 493 K, 0.01 s^{-1} ; (c) 533 K, 0.1 s^{-1} ; (d) 573 K, 0.1 s^{-1}

3 结论

1) Pb-Mg-Al 合金高温压缩变形时的流变应力与变形温度和变形速率有关, 流变应力随变形温度的升高而降低, 随变形速率的增大而增大。

2) Pb-Mg-Al 合金的平均变形激活能为 149.5344 kJ/mol。流变应力、变形温度和应变速率之间的关系可用双曲正弦函数的本构方程描述:

$$\dot{\varepsilon} = 4.0741 \times 10^{13} [\sinh(0.006465\sigma)]^{5.0246} \cdot$$

$$\exp[-149524/(RT)];$$

流变应力也可用 Zener-Hollomon 参数来描述:

$$\sigma = \frac{1}{0.006465} \cdot \ln \left\{ \left(\frac{Z}{4.0741 \times 10^{13}} \right)^{\frac{1}{5.0246}} + \left[\left(\frac{Z}{4.0741 \times 10^{13}} \right)^{\frac{2}{5.0246}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}$$

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{149524}{RT}\right)。$$

3) 随着变形温度和应变速率升高, 合金的变形激活能呈现先降后升趋势。通过热加工图分析及显微组织观察结果, 并结合激活能, 可以确定 Pb-Mg-Al 合金的最优的热加工工艺参数为 $T=533 \text{ K}$, $\dot{\varepsilon}=0.1 \text{ s}^{-1}$ 。

REFERENCES

- [1] MOSELY P T. Lead/acid battery myths[J]. Journal of Power Sources, 1996, 59(1): 81-86.
- [2] 杨兰生, 刘黎, 潘颖辉, 艾洪涛. 稀土铅锑合金的性能[J]. 电源技术, 1995, 19(3): 15-18.
YANG Lan-sheng, LIU Li, PAN Yin-hui, AI Hong-tao. Performance of Pb-Sb-RE alloys[J]. Chinese Journal of Power Sources, 1995, 19(3): 15-18.
- [3] ZHONG S, LIU H K, DOU S X, SKYLLAS-KAZACOS M. Evaluation of lead-calcium-tin-aluminum grid alloys for valve-regulated lead/acid batteries[J]. Journal of Power Sources, 1996, 59(1): 123-129.
- [4] 于春田. 金属基复合材料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995:

- 28-29.
- YU Chun-tian. Metallic matrix composites[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1995: 28-29.
- [5] 全明信, 林冠发. 稀土铅基板栅材料的性能研究[J]. 理化检验-物理分册, 2006, 42(4): 60-62.
- TONG Ming-xin, LIN Guan-fa. The study of the properties of the lead-based grid materials with rear earth additive[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2006, 42(4): 60-62.
- [6] 闫焉服, 刘建萍, 史耀武, 夏志东. 银镍金属微细颗粒对锡铅基复合钎料力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(4): 622-626.
- YAN Yan-fu, LIU Jian-ping, SHI Yao-wu, XIA Zhi-dong. Effect of Ag and Ni fine particles on mechanical properties of SnPb composite solder[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(4): 622-626.
- [7] DUAN Y H, SUN Y, PENG M J, GUO Z Z, PEI X Z. Microstructure evolution and mechanical properties of as-cast Pb-Mg-Al alloys[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2012, 21(6): 973-976.
- [8] 段永华, 孙 勇, 郭中正, 何建洪. B对Pb-Mg-Al-B屏蔽功能材料的显微组织与屏蔽性能的影响[J]. 功能材料, 2012, 10(3): 334-337.
- DUAN Yong-hua, SUN Yong, GUO Zhong-zheng, HE Jian-hong. Effects of B on microstructure and shielding properties of Pb-Mg-Al-B shielding functional materials[J]. Journal of Functional Materials, 2012, 10(3): 334-337.
- [9] CACCIAMANI G, BORZONE G, SACCONI A, FERRI R. Heat content of magnesium-lead alloys[J]. Journal of the Less-Common Metals, 1989, 154: 109-113.
- [10] 王瑞吉, 赵浩峰. 热处理对Mg-Pb合金组织和性能的影响[J]. 铸造设备研究, 2007(2): 6-7.
- WANG Rui-ji, ZHAO Hao-feng. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Mg-Pb alloy[J]. Research Studies on Foundry Equipment, 2007(2): 6-7.
- [11] 王乃光, 王日初, 彭超群, 冯 艳, 张翔宇. 热处理对Mg-Al-Pb阳极电化学性能及腐蚀行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(6): 1314-1319.
- WANG Nai-guang, WANG Ri-chu, PENG Chao-qun, FENG Yan, ZHANG Xiang-yu. Influences of heat treatment on electrochemical performances and corrosion behaviors of Mg-Al-Pb anodes[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(6): 1314-1319.
- [12] WANG Nai-guang, WANG Ri-chu, PENG Chao-qun, FENG Yan, ZHANG Xiang-yu. Corrosion behavior of Mg-Al-Pb and Mg-Al-Pb-Zn-Mo alloys in 3.5% NaCl solution[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20: 1936-1943.
- [13] TAKUDA H, FUJIMOTO H, HATTA N. Modeling on flow stress of Mg-Al-Zn alloys at elevated temperatures[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 80/81: 513-516.
- [14] GALIYEV A, KAIBYSHEV R, GOTTSTEIN G. Correlation of plastic deformation and dynamic recrystallization in magnesium alloy ZK60[J]. Acta Materialia, 2001, 49(7): 1199-1207.
- [15] GALIYEV A, KAIBYSHEV R, SAKAI T. Continuous dynamic recrystallization in magnesium alloy[J]. Materials Science Forum, 2003, 419/422: 509-514.
- [16] SELLARS C M, TEG W J. Physical metallurgy of thermo-mechanical processing of steels and other metals[J]. Science Review Methods, 1966, 63: 731-735.
- [17] ZENER C, HOLLOMON J H. Effect of strain-rate upon the plastic flow of steel[J]. Journal of Applied Physics, 1944, 15(1): 22-27.
- [18] MAHMUDI R, GERANMAYEH A R, REZAEI-BAZZAZ A. Impression creep behavior of cast Pb-Sb alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2007, 427(1/2): 124-129.
- [19] KASHYAP B P, MURTY G S. Experimental constitutive relations for the high temperature deformation of a Pb-Sn eutectic alloy[J]. Materials Science and Engineering, 1981, 50(2): 205-213.
- [20] 段永华, 孙 勇, 彭明军, 鲁 俐, 赵如龙. 金属间化合物Mg₂Pb的电子结构和弹性性质[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(10): 1835-1839.
- DUAN Yong-hua, SUN Yong, PENG Ming-jun, LU Li, ZHAO Ru-long. Electronic structure and elastic properties of intermetallics Mg₂Pb[J]. The Chinese journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(10): 1835-1839.
- [21] 孙朝阳, 刘金榕, 李 瑞, 张清东. Incoloy 800H高温变形流动应力预测模型[J]. 金属学报, 2011, 47(2): 191-196.
- SUN Chao-yang, LIU Jin-rong, LI Rui, ZHANG Qing-dong. Constitutive modeling for elevated temperature flow behavior of Incoloy 800H superalloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2011, 47(2): 191-196.
- [22] 凌 闯, 王敬丰, 赵 亮, 潘复生, 朱学纯. 高硅铝合金标准样品的热变形行为[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(5): 833-839.
- LING Chuang, WANG Jing-feng, ZHAO Liang, PAN Fu-sheng, ZHU Xue-chun. Hot deformation behavior of high silicon aluminum alloy as standard sample[J]. The Chinese journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(5): 833-839.
- [23] 郭 强, 严红革, 陈振华, 张 辉. AZ31镁合金高温热压缩变形特性[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(6): 900-906.
- GUO Qiang, YAN Hong-ge, CHEN Zhen-hua, ZHANG Hui. Hot compression deformation behavior of AZ31 magnesium alloy at elevated temperature [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(6): 900-906.
- [24] 王宏伟, 易丹青, 王 斌, 蔡金伶, 钱 锋, 陈缙紫.

- Mg-6.3Zn-0.7Zr-0.9Y-0.3Nd 镁合金的高温塑性变形行为的热压缩模拟[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(3): 378–384.
- WANG Hong-wei, YI Dan-qing, WANG Bin, CAI Jin-ling, QIAN Feng, CHEN Ti-ying. Hot compressive deformation simulation of Mg-6.3Zn-0.7Zr-0.9Y-0.3Nd magnesium alloy at elevated temperatures[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(3): 378–384.
- [25] 李红英, 刘 洋, 胡继东, 曾翠婷, 魏冬冬. ZA27 合金的热变形及加工图[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(2): 365–370.
- LI Hong-ying, LIU Yang, HU Ji-dong, ZENG Cui-ting, WEI Dong-dong. Hot deformation and processing map of ZA27 alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(2): 365–370.
- [26] MURTY S V S N, RAO B N, KASHYAP B P. Instability criteria for hot deformation of materials[J]. International Materials Reviews, 2000, 45(1): 15–26.
- [27] 鞠 泉, 李殿国, 刘国权. 15Cr-25Ni-Fe 基合金高温塑性变形行为的加工图[J]. 金属学报, 2006, 42(2): 218–224.
- JU Quan, LI Dian-guo, LIU Guo-quan. The processing map of hot plastic deformation of a 15Cr-25Ni-Fe base superalloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2006, 42(2): 218–224.
- [28] 孔凡涛, 张树志, 陈玉勇. Ti-46Al-2Cr-4Nb-Y 合金的高温变形及加工图[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(1): s234–s236.
- KONG Fan-tao, ZHANG Shu-zhi, CHEN Yu-yong. Hot deformation and processing map of Ti-46Al-2Cr-4Nb-Y alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(1): s234–s236.

(编辑 龙怀中)