

# 铍第1塑性高峰区的流变行为及本构方程

许德美<sup>1</sup>, 李美岁<sup>2</sup>, 李志年<sup>2</sup>, 叶树鹏<sup>2,3</sup>, 何力军<sup>3</sup>, 李峰<sup>2</sup>

(1. 北方民族大学 材料科学与工程学院 粉体材料与特种陶瓷省部共建重点实验室 工业废弃物循环利用及先进材料国际科技合作基地, 宁夏 银川 750021)

(2. 西北稀有金属材料研究院宁夏有限公司 稀有金属特种材料国家重点实验室, 宁夏 石嘴山 753000)

(3. 宁夏大学 宁夏光伏材料重点实验室, 宁夏 银川 750021)

**摘要:** 利用 Instron 5582 万能材料试验机进行等温压缩试验, 获得金属铍在变形温度为 250~450 °C、应变速率为  $10^{-1}\sim 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  条件下的真应力-应变曲线, 研究金属铍第1塑性高峰区的流变行为。结果表明: 实验条件下, 金属铍流变应力随应变速率的增大而增大, 随变形温度的升高而减小, 具有较大的温度敏感性。各变形条件下, 金属铍真应力-应变曲线表现为动态回复曲线特征, 压缩后样品晶粒伸长, 为典型的压力加工组织, 这些研究结果表明动态回复是金属铍第1塑性高峰期变形时的主要软化机制。随着应变量的增加, 金属铍的变形激活能从 244.95 kJ/mol 减少至 166.82 kJ/mol。建立了包含应变量的 Arrhenius 应变补偿本构方程, 预测相对误差 (MRE) 最大为 5.0550%, 相关系数 ( $R$ ) 最小为 0.9899, 能够较准确预测金属铍在第1塑性高峰期压缩变形时的流变应力。

**关键词:** 金属铍; 第1塑性高峰期; 本构方程; 变形激活能

**中图分类号:** TG146.24

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2024)12-3413-09

铍 (Be) 属稀有轻金属, 具有镁的密度, 钨的刚度; 熔点高达 1289 °C, 为镁、铝的近 2 倍; 并且, 铍的核、热、光、声等物理性能也十分优异。这些性能使铍成为一种特殊的功能和结构材料, 在武器、惯性导航、核能、红外光学系统和高能物理等领域铍有着关键且必须的应用, 因此, 铍是国防、航空航天和战略核能等领域关键性、不可替代的材料<sup>[1-4]</sup>。然而, 铍的价格十分昂贵, 大约是黄金价格的 1/10, 成为限制其应用的瓶颈。

造成铍材价格昂贵的主要原因之一是由于其密排六方晶体结构, 滑移少且塑性低, 难以温热加工成型, 故铍产品主要采用粉末冶金成型—机加工的方法生产。然而, 铍对微裂纹十分敏感, 易在机加工过程中突然断裂, 生产成本十分高昂。因此, 开发铍的压力加工技术降低其成本一直以来都是各国铍产业发展的重要目标之一。但我国铍压力加工技术迟迟未能突破, 目前仅能够实现铍轧制生产。

金属铍塑性, 随温度变化有 2 个高峰期, 第 1 个在 400 °C 左右, 第 2 个在 750 °C 左右<sup>[5]</sup>。目前我国金属铍轧制温度位于铍第 2 个塑性高峰期, 即 750 °C 左右, 在此温度区间变形后道次之间退火, 再结晶晶粒组织粗大,

且获得的往往是未完全再结晶组织, 这造成我国铍材轧制产品一直处于低端水平。同时, 形变组织再结晶问题也是我国金属铍挤、冲、锻等压力加工技术开发的主要屏障。前期研究表明金属铍在第 1 个塑性高峰期, 即 350 °C 左右, 形变后退火易获得完全再结晶组织且晶粒组织细化<sup>[6]</sup>。因此, 铍第 1 塑性高峰期变形行为的研究成为我国金属铍压力加工技术开发的关键因素之一。

对工业热变形加工, 基于变形试验结果构建可精确预测流动应力的本构关系模型, 是成形过程数值分析及工艺设计优化的基础。钛合金<sup>[7-12]</sup>, 高强度钢<sup>[7,13-16]</sup>, 高温合金<sup>[7,17-20]</sup>, 高强度铝合金<sup>[7,21-23]</sup>和镁合金<sup>[24]</sup>等的热塑性变形行为及本构关系研究已广泛展开, 并在实践中得到了成功的应用。但目前金属铍的相关研究国内外尚无报道。因此, 本研究通过热压缩试验, 研究金属铍在第 1 塑性高峰区的变形行为, 建立了合适的本构方程。该研究结果不仅为我国金属铍压加技术开发提供基础数据, 改变我国目前轧制产品水平低的现状, 而且对我国铍的挤、冲、锻等成形技术开发具有重要意义。

## 1 实验

实验材料选用工业纯粉末冶金热压铍锭, 化学成

收稿日期: 2023-12-09

基金项目: 国家自然科学基金 (51874246)

作者简介: 许德美, 女, 1973 年生, 博士, 教授, 北方民族大学材料科学与工程学院, 宁夏 银川 750021, E-mail: xdm@nmu.edu.cn

分（质量分数，%）：BeO 0.74，O 0.75，C 0.021，Be<sub>2</sub>C 0.012，Fe 0.12，Si 0.010，Mg 0.0032，Co 0.0014，Mn 0.0028，Ni 0.0032，Al 0.0078，Cr 0.0010，Pb 0.00032，余量 Be，显微组织如图 1 所示，平均晶粒尺寸为 7.6 μm。

将实验材料加工成 Φ8 mm×12 mm 试样，在 Instron 5582 型万能材料试验机上进行等温恒速率压缩实验。应变温度分别为 250、300、350、400 和 450 °C，应变速率分别为 10<sup>-1</sup>、10<sup>-2</sup>、10<sup>-3</sup> 和 10<sup>-4</sup> s<sup>-1</sup>。每个样品热电偶控温以 10 °C/s 的速率加热到变形温度，并在变形温度等温保持 5 min 消除热梯度后再进行压缩。压缩试验结束时，样品高度降低 55%，开炉后水淬。

压缩后试样沿纵向切开，研磨抛光后利用 DMI5000 型金相显微镜偏光观察样品几何中心区域的显微组织。

## 2 结果与讨论

### 2.1 金属铍第 1 塑性高峰区的流变行为

样品在不同应变温度和速率压缩后的真应力-真应变曲线如图 2 所示。从图 2 可以看出，在第 1 塑性高峰区变形，金属铍的流变应力随应变速率的增大而增大，随变形温度的升高而减小，但随温度的升高，

流变应力下降的更为明显。

金属热变形时，加工硬化的同时伴有 2 种软化机制，动态回复和动态再结晶。通常层错能高的金属，不全位错容易会聚成全位错，在高温变形过程中位错易交滑移和攀移发生动态回复，造成剩余储能不足以引发动态再结晶，主要软化机制为动态回复，因此层错能高的金属也被称为动态回复型金属<sup>[25-26]</sup>。动态回复型金属变形时，当动态回复能够与加工硬化平衡形成等轴亚晶时，应力-应变曲线上出现流变应力不随应

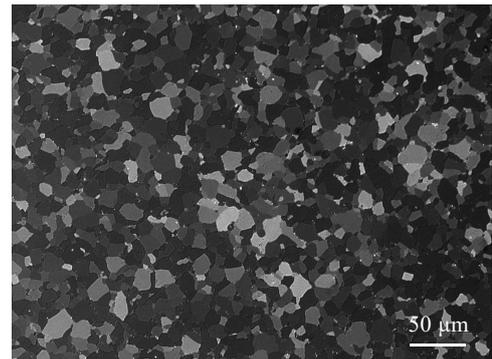


图 1 金属铍压缩前原始 OM 显微组织

Fig.1 OM image of the metal beryllium before compression

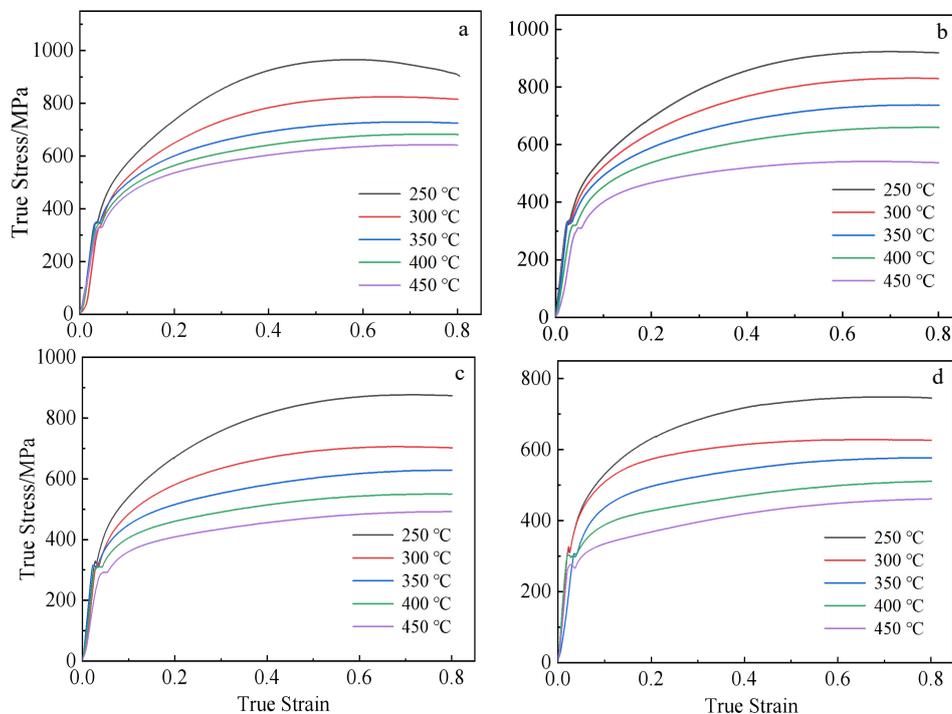


图 2 金属铍第 1 塑性高峰区真应力-真应变曲线

Fig.2 True stress-true strain curves of the metal beryllium in the first plastic peak zone with different strain rates: (a) 10<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>, (b) 10<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, (c) 10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>, and (d) 10<sup>-4</sup> s<sup>-1</sup>

变而变的稳态流变<sup>[27]</sup>。相反，低层错能或中等层错能金属不像高层错能金属那样容易动态回复，因此变形过程中往往难以同步地抵消变形时位错的增殖积累，当位错积累到一定程度后就会促发再结晶形核，即发生动态再结晶。在发生动态再结晶时大量位错被再结晶核心的大角度界面迁移而消除，当这样的软化过程占主导地位时流变应力下降，此时材料的应力-应变曲线表现出峰值应力<sup>[27]</sup>。

金属铍具有非常高的层错能，基面层错能为 173~1000 mJ/cm<sup>2</sup>，柱面层错能约为 ≥1190 mJ/cm<sup>2</sup><sup>[28]</sup>，故通常认为铍是典型的动态回复型金属。从图 2 可以看出，实验条件下，金属铍的真应力-应变曲线均表现出相似的特征，即随着应变量的增加，加工硬化到一定程度后，应力值有下降趋势，但不明显，应力应变曲线表现为动态回复曲线特征。另外，对压缩后样品进行金相分析，所有样品显微组织均为典型的压力加工组织，晶粒伸长，没有发现再结晶组织特征，如图 3 所示。因此，在所选择的第 1 塑性高峰区实验条件下，金属铍变形时主要软化机制是动态回复，这符合铍为高层错能金属易发生动态回复的本质。

### 2.2 金属铍第 1 塑性高峰区流变本构方程

Arrhenius 本构关系模型采用包含变形激活能  $Q$  和温度  $T$  的双曲正弦形式修正，能够很好地概括成形过程中流变力学行为。在建立本构关系的多种数学模型中，Arrhenius 型方程得到了广泛的应用，其方程关系如式 (1) 描述<sup>[29-30]</sup>：

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

式中， $\dot{\epsilon}$  为应变速率 (s<sup>-1</sup>)， $\sigma$  为真实应力 (MPa)， $T$  为变形温度 (K)， $R$  为气体常数，8.314 J·(mol·K)<sup>-1</sup>， $Q$  为热变形激活能 (kJ/mol)。 $A$ ， $n$  和  $\alpha$  均与温度无关的材料常数。

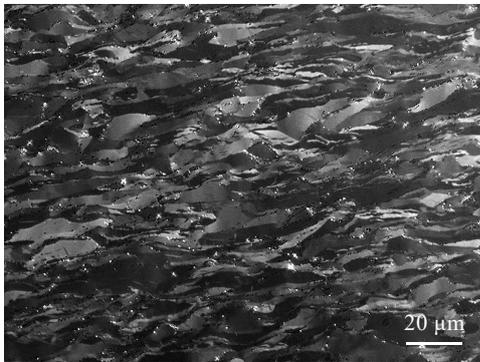


图 3 金属铍 350 °C/10<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>、真应变为 0.8 的 OM 显微组织  
Fig.3 OM image of the metal beryllium hot-compressed at 350 °C with the strain rate of 10<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> under the true strain of 0.8

在低应力水平 ( $\alpha\sigma < 0.8$ )<sup>[29-30]</sup>，与稳态蠕变对应的关系相似，公式 (1) 可以用指数形式表达：

$$\dot{\epsilon} = A_1\sigma^{n_1} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

在高应力水平 ( $\alpha\sigma > 1.2$ )<sup>[29-30]</sup>，公式 (1) 可以用幂指数形式表达：

$$\dot{\epsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (3)$$

式 (2) 和式 (3) 中， $A_1$ ， $A_2$ ， $n_1$  和  $\beta$  均为与温度无关的常数。常数  $\alpha$  和  $n_1$  通过  $\beta = \alpha n_1$  相关联<sup>[29-30]</sup>。

热塑性变形存在热激活过程，应变速率和温度对流变应力的影响用 Zener-Hollomon 参数  $Z$  表示<sup>[29-30]</sup>：

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (4)$$

$Z$  的物理意义是温度补偿变形速率因子，结合式 (1) 可知：

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

由式 (5) 得：

$$\sinh(\alpha\sigma) = \left(\frac{Z}{A}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (6)$$

根据双曲正弦函数的反函数公式：

$$\operatorname{arcsinh}(\alpha\sigma) = \ln[\alpha\sigma + (\alpha^2\sigma^2 + 1)^{1/2}] \quad (7)$$

因此，可将流变应力  $\sigma$  表述成  $Z$  参数的函数：

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{A}\right)^{\frac{1}{n}} + \left[ \left(\frac{Z}{A}\right)^{\frac{2}{n}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (8)$$

由此，求得  $A$ ， $Q$ ， $n$  和  $\alpha$  等材料参数，可知任意变形条件下的流变应力。

本研究采用双曲正弦函数关系对金属铍在第 1 塑性高峰区的流变应力进行分析和模拟。对式 (1)~式 (3) 式两边取自然对数有：

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A + n \ln[\sinh(\alpha\sigma)] - \left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (9)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_1 + n_1 \ln \sigma - \left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (10)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_2 + \beta\sigma - \left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (11)$$

假定在一定的温度下，变形激活能  $Q$  为常数。根据式 (9)~式 (11)，则  $n$ ， $n_1$  和  $\beta$  等于：

$$n = \left. \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]} \right|_T \quad (12)$$

$$n_1 = \left. \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln \sigma} \right|_T \quad (13)$$

$$\beta = \left. \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \sigma} \right|_T \quad (14)$$

以应变 0.5 为例, 绘制  $\ln \dot{\epsilon}$ - $\ln \sigma$  和  $\ln \dot{\epsilon}$ - $\sigma$  关系图, 分别如图 4a 和图 4b 所示, 并进行线性回归, 即可求得  $n_1$  和  $\beta$  值。从图 4a 和图 4b 可以看出,  $\ln \dot{\epsilon}$  与  $\ln \sigma$  和  $\ln \dot{\epsilon}$  与  $\sigma$  线性关系均十分明显。并且, 不同温度下的线性拟合线几乎是平行的, 这表明金属铍在第 1 塑性高峰区变形, 流动应力和应变速率的相关性受温度影响较小。取图 4a 中各直线斜率平均值, 得到  $n_1=22.0364$ ; 取图 4b 中各直线斜率平均值, 得到  $\beta=0.03378 \text{ MPa}^{-1}$ , 根据  $\alpha=\beta/n_1$ , 知  $\alpha=0.001533 \text{ MPa}^{-1}$ 。

同理, 以  $\ln \dot{\epsilon}$  和  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  为坐标作图, 并进行线性回归, 如图 4c 所示, 即可求得为  $n$  值。由图 4c 可知, 相同温度下,  $\ln \dot{\epsilon}$  与  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  呈线性关系, 取图 4c 中各直线斜率平均值, 得  $n=16.5938$ 。

考虑温度和应变速率对变形激活能的影响, 对式 (9) 求偏微分得:

$$Q = R \left\{ \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]} \right\}_T \left\{ \frac{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial (1/T)} \right\}_{\dot{\epsilon}} \quad (15)$$

将式 (12) 代入式 (15), 并设  $S = \partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)] / \partial (1/T)$ ,

则式 (15) 简化为:

$$Q = RnS \quad (16)$$

以  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  和  $1000/T$  为坐标作图, 并进行线性回归, 如图 4d 所示, 即可求得为  $S$  值。从图 4d 可知, 在相同应变速率下,  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  和  $1000/T$  呈线性关系, 取图 4d 中各直线斜率平均值, 得  $S=1.281175$ 。将  $n$  和  $S$  值代入公式 (16) 得  $Q=176.75 \text{ kJ/mol}$ 。

将  $Q$  值和变形条件代入式 (4) 求出  $Z$  值。并对式 (5) 两边取对数得:

$$\ln Z = \ln A + n \ln[\sinh(\alpha\sigma)] \quad (17)$$

绘制  $\ln Z$ - $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  关系图并进行线性拟合, 如图 5 所示。由式 (17) 可知图 5 中直线的斜率即为应力指数  $n$ , 而其截距为  $\ln A$ , 故由拟合结果知  $\ln A=25.92629$ , 得材料常数  $A=1.8182 \times 10^{11}$ 。从图 5 还可知  $\ln Z$ - $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  皮尔森线性相关系数  $R$  为 0.9904, 这表明: 金属铍在第 1 塑性高峰区的塑形流动应力应变行为可以用  $Z$  参数描述, 即金属铍在第 1 塑性高峰区的形变受热激活控制。

将  $A$ 、 $Q$ 、 $n$  和  $\alpha$  材料参数代入式 (1), 得到金属铍第 1 塑性高峰区应变为 0.50 时用双曲正弦函数修正的 Arrhenius 流变应力本构方程:

$$\dot{\epsilon} = 1.8182 \times 10^{11} [(\sinh(0.001533 \sigma))]^{16.5938} \exp\left(-\frac{176.75}{RT}\right) \quad (\epsilon=0.50) \quad (18)$$

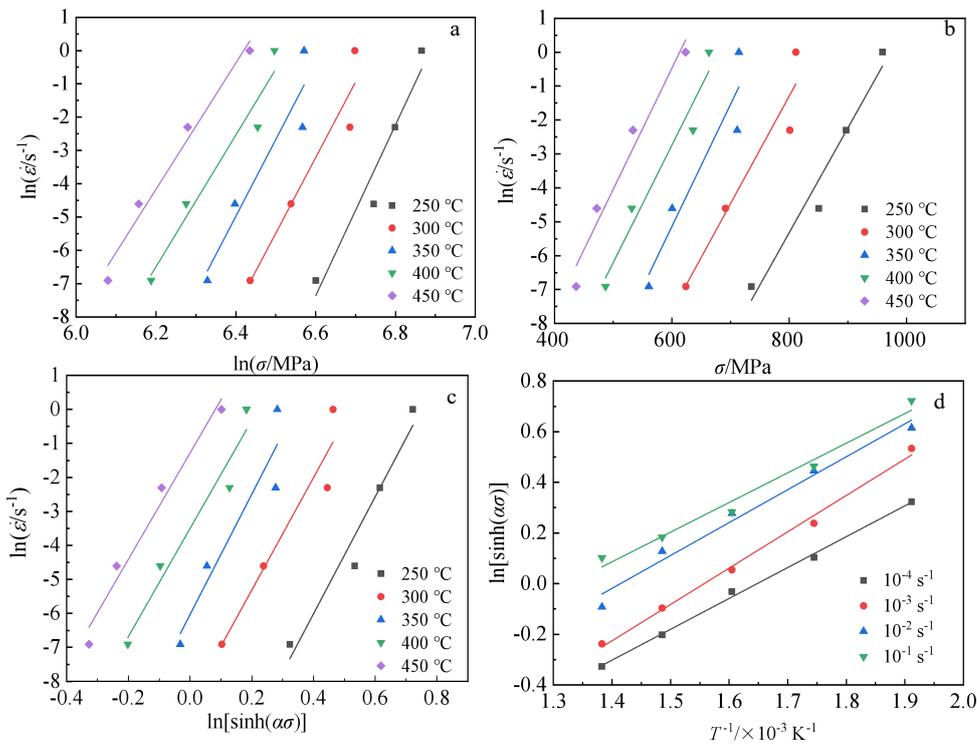


图 4 金属铍  $\ln \dot{\epsilon}$ - $\ln \sigma$ 、 $\ln \dot{\epsilon}$ - $\sigma$ 、 $\ln \dot{\epsilon}$ - $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  和  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ - $T^{-1}$  关系曲线

Fig. 4  $\ln \dot{\epsilon}$ - $\ln \sigma$  (a),  $\ln \dot{\epsilon}$ - $\sigma$  (b),  $\ln \dot{\epsilon}$ - $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  (c), and  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ - $T^{-1}$  (d) curves of the metal beryllium

从式 (1) 可知, 传统的 Arrhenius 型本构模型没有考虑应变变量的影响, 故本构方程 (18) 不能反映应力随应变的变化情况。为了解决该模型在预测流变应力时存在的这一缺陷, 更准确地预测金属铍在第 1 塑性高峰区的流变行为, 本研究在 Arrhenius 本构模型的基础上进行应变补偿。重复式 (9) ~ 式 (16) 所描述的分析过程, 求解应变从 0.1~0.8 每间隔 0.05 条件下 Arrhenius 本构模型中的  $\alpha$ 、 $n$ 、 $Q$  和  $\ln A$  材料参数, 其结果如表 1 所示。

采用 5 次多元线性回归拟合的方法建立各材料参数与应变之间的函数关系, 函数关系表达式如下:

$$\begin{aligned} \alpha_{(\varepsilon)} &= 0.0028 - 0.01106\varepsilon + 0.04319\varepsilon^2 - 0.08741\varepsilon^3 \\ &\quad + 0.08706\varepsilon^4 - 0.03358\varepsilon^5 \\ n_{(\varepsilon)} &= 53.82826 - 236.20028\varepsilon + 528.90802\varepsilon^2 \\ &\quad - 435.43663\varepsilon^3 - 16.76929\varepsilon^4 + 132.33715\varepsilon^5 \quad (19) \\ Q_{(\varepsilon)} &= 286.17164 - 353.91792\varepsilon - 803.09059\varepsilon^2 \\ &\quad + 4916.38549\varepsilon^3 - 7286.72201\varepsilon^4 + 3497.43765\varepsilon^5 \\ \ln A_{(\varepsilon)} &= 44.29275 - 27.5259\varepsilon - 348.47529\varepsilon^2 \\ &\quad + 1363.05145\varepsilon^3 - 1823.52625\varepsilon^4 + 835.82694\varepsilon^5 \end{aligned}$$

图 6 是  $\alpha$ 、 $n$ 、 $Q$  和  $\ln A$  材料参数与应变之间的拟合关系曲线。由图 6 可知, 5 次多项式能够很好地拟合  $\alpha$ 、 $n$ 、 $Q$  和  $A$  材料参数随应变变量的变化。

将材料参数  $\alpha$ 、 $n$ 、 $Q$  和  $A$  与应变之间的函数关系式 (19) 嵌入到式 (8) 中, 得到金属铍第 1 塑性高峰区 (变形温度为 250~450 °C, 变形速率为  $10^{-1} \sim 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ) 压缩变形用  $Z$  参数表达的应变补偿本构模型, 其表达式为:

$$\sigma = \frac{1}{\alpha_{(\varepsilon)}} \ln \left\{ \left( \frac{Z}{A_{(\varepsilon)}} \right)^{\frac{1}{n_{(\varepsilon)}}} + \left[ \left( \frac{Z}{A_{(\varepsilon)}} \right)^{\frac{2}{n_{(\varepsilon)}}} + 1 \right]^{1/2} \right\} \quad (20)$$

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q_{(\varepsilon)}}{RT}\right) \quad (21)$$

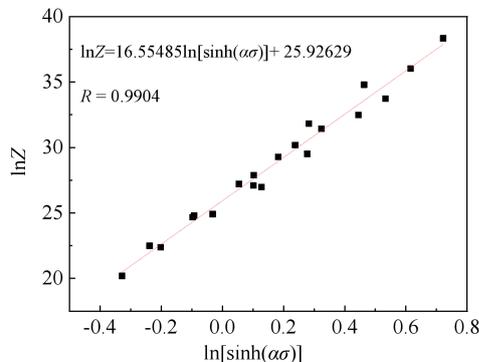


图 5 金属铍  $\ln Z$  与  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  关系曲线

Fig.5  $\ln Z$ - $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  curve of the metal beryllium

表 1 不同应变下的材料参数

Table 1 Parameters of material at different strains				
True strain, $\varepsilon$	$\alpha$	$Q/\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$	$n$	$\ln A$
0.10	0.002051	244.95	34.8172	38.843
0.15	0.001850	233.30	29.4650	37.064
0.20	0.001744	210.62	24.0616	32.858
0.25	0.001683	196.25	20.7446	30.010
0.30	0.001638	188.98	18.9124	28.512
0.35	0.001601	184.69	17.8564	27.627
0.40	0.001572	181.79	17.2290	27.009
0.45	0.001551	179.20	16.8346	26.435
0.50	0.001533	176.75	16.5938	25.925
0.55	0.001519	174.81	16.4884	25.518
0.60	0.001509	173.10	16.4532	25.175
0.65	0.001502	171.58	16.4886	24.865
0.70	0.001499	170.08	16.5860	24.559
0.75	0.001497	168.90	16.7320	24.336
0.80	0.001501	166.82	16.8278	23.925

为了验证所建立的具有应变补偿的本构模型的准确性, 将预测值与实验值进行比较, 如图 7 所示。由图 7 可知, 预测流动应力在整个应变范围内都能良好地遵循实验曲线。另外, 采用相关系数 ( $R$ ) 和平均相对误差 (MRE) 对包含应变参量的 Arrhenius 本构模型定量预测精度进行评价,  $R$  和 MRE 表述为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (\sigma_{e_i} - \bar{\sigma}_e)(\sigma_{p_i} - \bar{\sigma}_p)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\sigma_{e_i} - \bar{\sigma}_e)^2 \sum_{i=1}^N (\sigma_{p_i} - \bar{\sigma}_p)^2}} \quad (22)$$

$$\text{MRE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\sigma_{e_i} - \sigma_{p_i}}{\sigma_{e_i}} \right| \quad (23)$$

式中,  $N$  为研究样本个数,  $\sigma_{e_i}$  为流变应力实验值,  $\sigma_{p_i}$  为流变应力预测值,  $\bar{\sigma}_e$  为平均流变应力实验值,  $\bar{\sigma}_p$  为平均流变应力预测值。表 2 是各变形条件下预测值与实验值的相关系数和平均相对误差。由表 2 可知, 相对误差最大为 5.0550%, 相关系数最小为 0.9899, 表明建立的应变补偿本构方程对金属铍在第 1 塑性高峰区压缩变形行为具有良好的预测性。

变形激活能是热变形过程中表征原子重新排列难易程度的参量。Jonas 等<sup>[31]</sup>认为, 以动态回复为主的合金  $Q$  值较小, 而较大的  $Q$  值则表明合金在热变形过程中易发生动态再结晶。由表 1 可知, 在第 1 塑性高峰区变形, 金属铍的变形激活能为 166.82~244.95 kJ/mol。

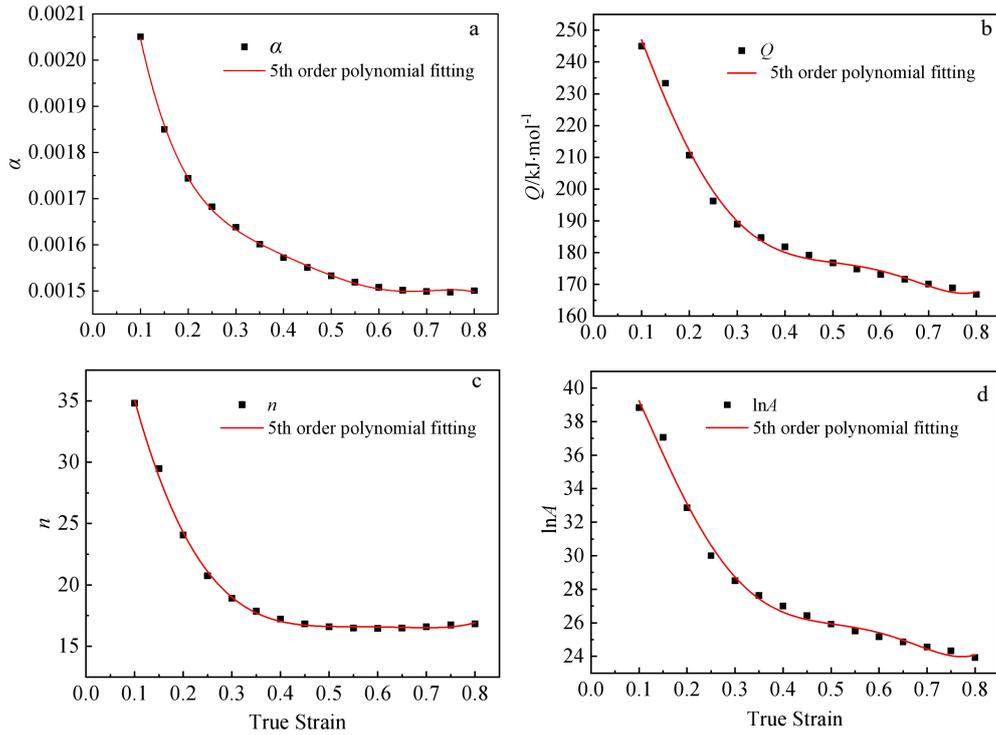


图 6 材料参数 $\alpha$ 、 $Q$ 、 $n$ 和 $\ln A$ 与应变的多项式拟合关系

Fig.6 Polynomial fitting relationships of material parameters  $\alpha$  (a),  $Q$  (b),  $n$  (c), and  $\ln A$  (d) with respect to true strain

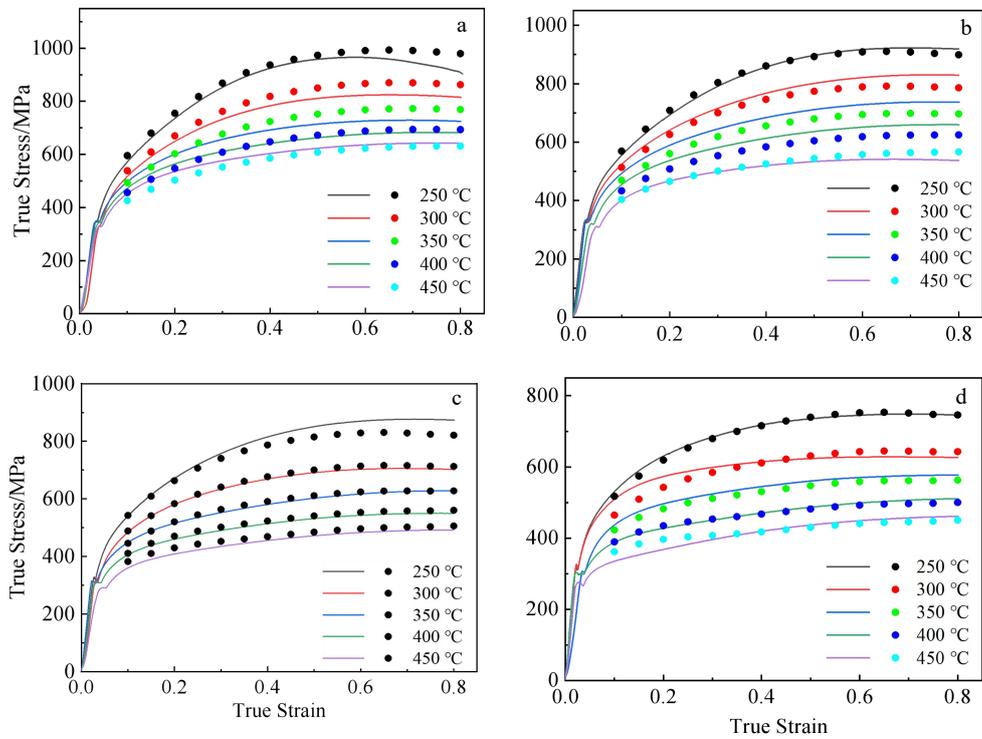


图 7 金属铍第 1 塑性高峰区真应力-应变曲线 (实线) 及本构模型预测结果 (点)

Fig.7 Comparisons between experimental curves (lines) and predicted values (dots) of the metal beryllium in the first plastic peak zone at the strain rate of  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$  (a),  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  (b),  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  (c), and  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  (d)

表 2 各变形条件下预测值与实验值的相关系数 ( $R$ ) 和平均相对误差 (MRE)

**Table 2 Correlation coefficient ( $R$ ) and mean relative error (MRE) under different deformation conditions**

Strain rate/s <sup>-1</sup>	Temperature/°C	MRE/%	$R$
10 <sup>-1</sup>	250	3.0866	0.9909
	300	4.6268	0.9991
	350	4.0677	0.9985
	400	1.7764	0.9987
	450	3.4221	0.9981
10 <sup>-2</sup>	250	1.3958	0.9979
	300	3.2985	0.9979
	350	4.6778	0.9990
	400	5.0550	0.9996
	450	2.1201	0.9899
10 <sup>-3</sup>	250	3.4476	0.9971
	300	1.1144	0.9999
	350	1.0616	0.9950
	400	1.8019	0.9994
	450	3.1315	0.9991
10 <sup>-4</sup>	250	0.8691	0.9993
	300	3.0309	0.9916
	350	2.5509	0.9996
	400	1.1712	0.9961
	450	3.3364	0.9904

相比于易发生动态再结晶的金属, 如 304 不锈钢热变形激活能为 490 kJ/mol<sup>[32]</sup>, TC2 钛合金为 456 kJ/mol<sup>[33]</sup>, In718 高温合金为 300~450 kJ/mol<sup>[34]</sup>, U720Li 高温合金为 552.8 kJ/mol<sup>[35]</sup>等。金属铍的变形激活能较小, 更接近于典型的动态回复型金属, 如纯铝热变形激活能 142 kJ/mol<sup>[36]</sup>。因此, 从变形激活能的大小来看, 金属铍也是更容易发生动态回复, 符合金属铍高层错能易发生回复的本性。

但是随着应变量的增加, 金属铍的热变形激活能从 244.95 kJ/mol 减少至 166.82 kJ/mol, 表明第 1 塑性高峰区变形, 金属铍的软化机制受动态再结晶的影响。另外, 金属铍的自扩散激活能为 161.5 kJ/mol<sup>[37]</sup>。通常认为金属的变形激活能与其自扩散激活能数值相当时, 热变形机制主要为动态回复; 当变形激活能大于自扩散激活能时, 金属的热变形可能会有动态再结晶发生。第 1 塑性高峰区变形时, 金属铍的热变形激活能大于自扩散激活能, 这也意味着金属铍在第 1 塑性高峰区热变形时可能发生动态再结晶。长期以来,

由于缺乏对金属铍热变形行为的研究, 往往仅从铍层错能高判断, 认为金属铍热变形时难以发生动态再结晶, 有关金属铍动态再结晶的研究没得到重视。从变形激活的减少金属铍第 1 塑性高峰区热变形软化机制受动态再结晶的影响, 将非常有益于促进金属铍动态再结晶研究, 改变目前我国金属铍产业完全靠静态再结晶进行压力加工的现状。

### 3 结 论

1) 金属铍在第 1 塑性高峰区压缩变形, 流变应力随应变速率的增大而增大, 随变形温度的升高而减小, 具有较大的温度敏感性。

2) 金属铍在第 1 塑性高峰区压缩变形, 真应力-应变曲线表现为动态回复曲线特征。压缩后样品晶粒伸长, 为典型的压力加工组织。动态回复是金属铍第 1 塑性高峰区变形时的主要软化机制。

3) 金属铍第 1 塑性高峰区压缩变形, 随着应变量的增加, 变形激活能从 244.95 kJ/mol 减少至 166.82 kJ/mol。

4) 在 Arrhenius 型本构模型的基础上, 采用多元线性回归拟合的方法建立了材料参数  $\alpha$ 、 $n$ 、 $Q$  和  $A$  材料参数与应变之间的函数关系, 得到了包含应变量的应变补偿 Arrhenius 本构模型, 该模型可用于预测金属铍第 1 塑性高峰区压缩变形时的流变应力, 预测相对误差 (MRE) 最大为 5.0550%, 相关系数 ( $R$ ) 最小为 0.9899。

### 参考文献 References

- [1] Goldberg A. *Atomic, Crystal, Elastic, Thermal, Nuclear, and Other Properties of Beryllium*, UCRL-TR-224850[R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 2006
- [2] Xu Demei(许德美), Qin Gaowu(秦高梧), Li Feng(李峰) et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2014, 24(5): 1212
- [3] Haws W J. *Journal of Metals*[J], 2000, 52(5): 35
- [4] Stonehouse A J. *Journal of Vacuum Science and Technology A*[J], 1986, 4(3): 1163
- [5] Nie Dajun(聂大钧). *Beryllium Powder Metallurgy and Process Technology*(铍粉末冶金与加工技术)[M]. Beijing: Education and Textbook Editorial office of China Nonferrous Metals Industry Corporation, 1986: 112
- [6] Xu Demei(许德美), Li Meisui(李美岁), Dai Yanming(代彦明) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(8): 2971

- [7] Lin Y C, Chen X M. *Materials & Design*[J], 2011, 32(4): 1733
- [8] Qiu Q, Wang K L, Li X *et al.* *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2021, 15(10): 3078
- [9] Zhong M J, Wang K L, Lu S Q *et al.* *Journal of Iron and Steel Research International*[J], 2021, 28(7): 862
- [10] Li C M, Huang L, Zhao M J *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2021, 814(6): 141231
- [11] Xia Y F, Jiang W, Cheng Q *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2020, 30(1): 134
- [12] Zhu Lin(朱琳), Xu Yong(徐勇), Chen Leping(陈乐平) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(5): 1819
- [13] Yang Y H, Jiang Z Z, Li S X *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2022, 842(5): 142994
- [14] Menapace C, Sartori N, Pellizzari M *et al.* *Journal of Engineering Materials and Technology*[J], 2018, 140(2): 0210016
- [15] Bai J, Huo Y M, He T *et al.* *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2022, 31(10): 8169
- [16] Xia Y N, Zhang C, Zhang L W *et al.* *Journal of Materials Research*[J], 2017, 32(10): 3875
- [17] Wang Tao(王涛), Wan Zhipeng(万志鹏), Sun Yu(孙宇) *et al.* *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2018, 54(1): 83
- [18] Ouyang L X, Luo R, Gui Y W *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2020, 788(6): 139638
- [19] Li H W, Zhuang X L, Lu S *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2022, 894(2): 162489
- [20] Yusaku H, Takehito H, Cheng Y *et al.* *Metallurgical and Materials Transactions*[J], 2023, 54(9): 4456
- [21] Chen Minghe(陈明和), Wang Ning(王宁). *China Mechanical Engineering*(中国机械工程)[J], 2020, 31(8): 997
- [22] Ke Bin, Ye Lingying, Tang Jianguo *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2020, 845(12): 156113
- [23] Li Guisheng, Rui Wenliang, Xu Gaoshan *et al.* *Applied Physics A*[J], 2022, 128(3): 1
- [24] Chen Yongjun, Wang Qudong Lin Jinbao *et al.* *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2023, 25(7-8): 7050
- [25] Li Jian(李见). *Fundamentals of Materials Science and Engineering*(材料科学与工程基础)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006: 207
- [26] Lin Junpin(林均品), An Xiyong(安希庸), Lei Tingquan(雷廷权). *Materials Science and Technology*(材料科学与工艺)[J], 1988, 7(2): 107
- [27] Humphreys F J, Hatherly M. *Recrystallization and Related Annealing Phenomena, 2nd Edition*[M]. Oxford: Elsevier, 2004: 417
- [28] Aldinger F. *Beryllium Science and Technology*[M]. London: Plenum Press, 1979: 1
- [29] Sellars C M, McTegart W J. *Acta Metallurgica*[J], 1966, 14(9): 1136
- [30] Mcqueen H J, Ryan N D. *Materials Science and Engineering A*[J], 2002, 322(1-2): 43
- [31] Jonas J J, Sellars C M, Tegart W J M. *Metallurgical Reviews*[J], 1969, 14(1): 1
- [32] Yao Shuo(姚硕), Chen Zhiying(陈志英), Zhang Ying(张莹) *et al.* *Journal of Shanghai University of Engineering Science*(上海工程技术大学学报)[J], 2022, 36(4): 435
- [33] Li Muze(李沐泽), Bai Chunguang(柏春光), Zhang Zhiqiang(张志强) *et al.* *Chinese Journal of Materials Research*(材料研究学报)[J], 2020, 34(12): 892
- [34] Gujrati R, Gupta C, Jha J S *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2019, 744(1): 638
- [35] Wang Tao, Li Zhao, Fu Shuhong *et al.* *Advanced Materials Research*[J], 2013, 709(6): 143
- [36] Guo Youjie(郭幼节), Li Jinfeng(李劲风), Liu Danyang(刘丹阳) *et al.* *Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2022, 42(5): 15
- [37] Kornienko P A, Nikolaenko A A, Taranenko I A. *Metal Science and Heat Treatment*[J], 1975, 17(1): 56

## Flow Behavior and Constitutive Equation of Metal Beryllium in the First Plastic Peak Zone

Xu Demei<sup>1</sup>, Li Meisui<sup>2</sup>, Li Zhinian<sup>2</sup>, Ye Shupeng<sup>2,3</sup>, He Lijun<sup>3</sup>, Li Feng<sup>2</sup>

(1. International Scientific & Technological Cooperation Base of Industrial Waste Recycling and Advanced Materials, Key Laboratory of Powder Material & Advanced Ceramics, School of Materials Science and Engineering, North Minzu University, Yinchuan 750021, China)

(2. State Key Laboratory for Special Rare Metal Materials, Northwest Rare Metal Materials Research Institute Ningxia Co., Ltd, Shizuishan 753000, China)

(3. Ningxia Key Laboratory of Photovoltaic Materials, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** The true stress-true strain curves of the metal beryllium were obtained under deformation temperature of 250–450 °C and strain rate of  $10^{-1}$ – $10^{-4}$  s<sup>-1</sup> by the isothermal compression testing which was conducted on the Instron 5582 universal material testing machine, and thus flow behavior of the metal beryllium was studied in the first plastic peak zone. The results indicate that the flow stress of the metal beryllium increases with the increase in strain rate and decreases with the increase in deformation temperature under the experimental conditions. Furthermore, the flow stress is more sensitive to the variation of temperature. Under various deformation conditions, the true stress-true strain curves of the metal beryllium show the characteristic of dynamic recovery curve. Moreover, the compressed samples exhibit a typical pressure-working microstructure with elongated grains. These results indicate that dynamic recovery is the main softening mechanism of the metal beryllium during deformation in the first plastic peak zone. The deformation activation energy of the metal beryllium decreases from 244.95 kJ/mol to 166.82 kJ/mol as the strain increase. An Arrhenius strain compensated constitutive equation including strain variables was established. The equation can accurately predict the flow stress of the metal beryllium during compression deformation in the first plastic peak zone, and the maximum mean relative estimation error (MRE) is 5.0550%, and the minimum correlation coefficient (*R*) is 0.9899.

**Key words:** metal beryllium; the first plastic peak zone; constitutive equation; deformation activation energy

---

Corresponding author: Li Feng, Senior Engineer, State Key Laboratory for Special Rare Metal Materials, Northwest Rare Metal Materials Research Institute Ningxia Co., Ltd, Shizuishan 753000, P. R. China, Tel: 0086-952-2098101, E-mail: lifeng@cnmnc.com