

# Mo-14Re 合金热变形行为及热加工图

王先俊<sup>1,2</sup>, 杨俊宙<sup>1,2</sup>, 王世臣<sup>1,2</sup>, 王智轩<sup>2,3</sup>, 胡卜亮<sup>1,2</sup>, 王力<sup>1,2</sup>, 白润<sup>1,4</sup>,  
高选乔<sup>4</sup>, 张文<sup>4</sup>, 胡平<sup>1,2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 冶金工程学院, 陕西 西安 710055)

(2. 功能材料加工国家地方联合工程研究中心, 陕西 西安 710055)

(3. 西安建筑科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710055)

(4. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

**摘要:** 利用 Gleeble-3500 热模拟试验机对 Mo-14Re 合金棒料进行了恒应变速率的压缩实验, 研究 Mo-14Re 合金在 1400、1500、1600 °C 和应变速率 0.01、0.1、1、10 s<sup>-1</sup> 时的高温流变行为。研究表明, 在热变形过程中, 流变应力随着变形温度的升高和应变速率的降低而降低, 这是由于加工硬化和动态软化这 2 个竞争机制在不同条件下的相对影响所导致的。基于 Arrhenius 模型和 Zener-Hollomon 函数, 建立了 Mo-14Re 合金的流变应力本构方程, 求得 Mo-14Re 合金的热变形激活能为 588 310 J·mol<sup>-1</sup>。根据所建立的热加工图, 得出 Mo-14Re 合金的合理成形工艺参数为温度在 1400~1600 °C, 应变速率在 0.0089~0.14 s<sup>-1</sup>, 功率耗散系数不低于 0.22。

**关键词:** Mo-14Re 合金; 热变形行为; 本构方程; 热加工图

中图分类号: TG146.4<sup>+</sup>12

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2024)10-2891-06

钼是一种难熔金属, 其熔点高达 2620 °C, 具有很高的强度和硬度, 它在高温环境中表现出较高的强度, 具有良好的导电和导热性能, 以及出色的耐腐蚀性能, 因此, 钼被广泛应用于航空航天、粉末冶金和核工业等领域<sup>[1-4]</sup>。然而, 钼的室温力学性能较差, 如加工性差、焊接性能差、易氧化, 并且存在较高的韧脆转变温度。这导致在使用过程中容易出现脆性断裂现象(低温脆性), 限制了纯钼的应用, 这主要是由过渡金属钼原子最外层和次外层电子半满的电子分布特性导致的<sup>[5]</sup>。金属钼具有较高弹性模量, 良好的塑性, 在纯钼中加入一定量的铼形成“铼效应”, 提高了钼的塑性, 降低了纯钼的韧脆转变温度, 使得钼铼合金具有良好的低温性能。铼的添加也可以提高钼的再结晶温度, 使钼铼(Mo-Re)合金具有优异的高温性能<sup>[6-7]</sup>。相较于纯钼, 钼铼合金具有更优异的抗辐射性能、较高的抗拉强度、良好的延展性和抗热震性能<sup>[8]</sup>。因此, 钼铼合金成为一种具有广泛应用前景的高温难熔金属材料, 在航空航天、核工业等多个领域得到广泛应用, 主要包括发动机喷口、燃烧室衬板、涡轮叶片和航天器结构等<sup>[9-10]</sup>。总之, 钼铼合金作为一种高温难熔金属材料, 在众多领域具备广泛的应用

前景, 其优异的性能特点使其成为许多关键应用中的首选材料之一。本构模型是对材料力学性能的数学描述。一般通过高温拉伸或高温压缩可以获得材料的高温力学性能, 并将高温应力-应变曲线应用于本构模型, 用于预测材料在其他条件下的承载能力。夏雨等人<sup>[11]</sup>结合 Arrhenius 双曲正弦方程并引入 Zener-Hollomon 参数, 构建了纯钼板高温塑性流变应力与变形温度和应变速率之间的本构方程。

近年来, 针对钼铼合金的力学性能<sup>[12-13]</sup>、热处理、焊接工艺<sup>[14-15]</sup>等方面进行了广泛的研究。但是针对钼铼合金的热变形行为研究并不系统。Huang 等人<sup>[16]</sup>研究了 Mo-42Re 合金在 1200、1350、和 1500 K 下单一应变速率下的单轴压缩变形和组织演变。Tian 等人<sup>[17]</sup>用热压缩法研究了 TZM-1.0%ZrO<sub>2</sub> 合金在 1000~1600 °C 和 0.005~1 s<sup>-1</sup> 的热变形行为。但是对钼铼合金在不同温度和不同应变速率下的热变形行为却少有研究。

基于动态材料模型所建立的热加工图能够比较准确地反映材料在热变形过程中的组织演变行为及失稳情况, 可实现对金属材料塑性变形工艺参数的优选。王法等人<sup>[18]</sup>通过构建热加工图得到了均匀化态 GH4151 合

收稿日期: 2023-10-17

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3705400); 陕西省创新能力支持计划科技创新团队项目(2022TD-30); 西安市科技计划(2023JH-GXRC-0020); 陕西省高校青年创新团队(2019-2022); 中国博士后科学基金(2023T160503)

作者简介: 王先俊, 男, 2000 年生, 硕士生, 西安建筑科技大学冶金工程学院, 陕西 西安 710055, E-mail: wxj1228@xauat.edu.cn

金的安全变形区间为 1060~1090 °C, 0.1~0.2 s<sup>-1</sup>, 及 1060~1070 °C, 0.1~1 s<sup>-1</sup>。王玉凤等人<sup>[19]</sup>根据动态材料模型建立了钼金属的热加工图, 确定了热变形时的流变失稳区。到目前为止, 在已发表的文献中对钼铼合金的热加工图却鲜有研究, 为了确定钼铼合金的塑性变形热加工工艺, 有必要研究该合金变形的稳定性。辛甜等人<sup>[20]</sup>综述了不同铼含量对钼铼合金性能影响研究发现, 当铼含量为 14%时, 钼铼合金具有优异的加工性能, 同时存在铼固溶强化作用。

基于以上问题, 本工作选用 Mo-14Re 合金为材料, 通过高温压缩实验对 Mo-14Re 合金的热变形行为进行了系统的研究, 构建了基于 Zener-Hollomon 参数的 Arrhenius 本构方程, 并且在 Arrhenius 模型的基础上建立了动态材料模型的热加工图, 以期 Mo-14Re 合金的热加工工艺参数的制定和优化提供参考依据。

## 1 实验

本研究使用的 Mo-14Re 合金通过粉末冶金法进行制备。具体工艺步骤如下: 首先, 将钼粉和铼粉充分混合, 确保混合均匀。然后, 在 180 MPa 的压力下进行冷等静压成形, 以确保材料的致密性。接下来, 在 2200 °C 的氢气氛围中进行高温烧结 80 min, 使混合粉末颗粒间相互结合, 形成钼铼合金坯料。最后, 在 1300 °C 下对坯料进行锻造, 使其转变为 Mo-14Re 合金棒材。

采用 Gleeble-3500 热模拟试验机对 Mo-14Re 合金棒料进行了恒应变速率的压缩实验。实验条件包括不同温

度和应变速率, 并对实验数据进行处理以得到 Mo-14Re 合金的真应力-真应变曲线。实验温度分别为 1400、1500 和 1600 °C, 应变速率分别为 0.01、0.1、1 和 10 s<sup>-1</sup>, 应变量为 0.6。通过在不同实验条件下记录实验数据, 可以得到真应力和真应变值。

## 2 结果与分析

### 2.1 Mo-14Re 合金的流变应力

图 1 显示了 Mo-14Re 合金在不同变形温度和应变速率下的真应力-真应变曲线。在变形早期, 由于显著的加工硬化和强烈的位错积累, 流变应力上升。随着变形温度的升高, 流变应力通常会减小。这是由于高温下, 材料的热激活作用增强, 原子的热振动增大, 位错运动更加活跃。这使得位错容易发生运动和湮灭, 从而降低了位错密度, 减弱了材料的内部阻力, 导致流变应力降低。随着应变速率的增加, 流变应力通常会增加。此外, 高应变速率条件下, 动态软化作用相对较弱, 因为动态回复和动态再结晶的程度较低。高应变速率使得材料在短时间内发生大量变形, 材料无法及时进行动态回复与再结晶, 即便高温为原子运动和位错扩散提供了驱动力, 但仍然不足以抵消位错增殖而产生的加工硬化效应, 这导致材料的流变应力增加。综合而言, 较高的变形温度和较低的应变速率会导致较低的流变应力, 而较低的变形温度和较高的应变速率会导致较高的流变应力。这是由于加工硬化和动态软化这 2 个竞争机制在不同条件下的相对影响所导致的。图 2 为 Mo-14Re 合金在不同变形温度

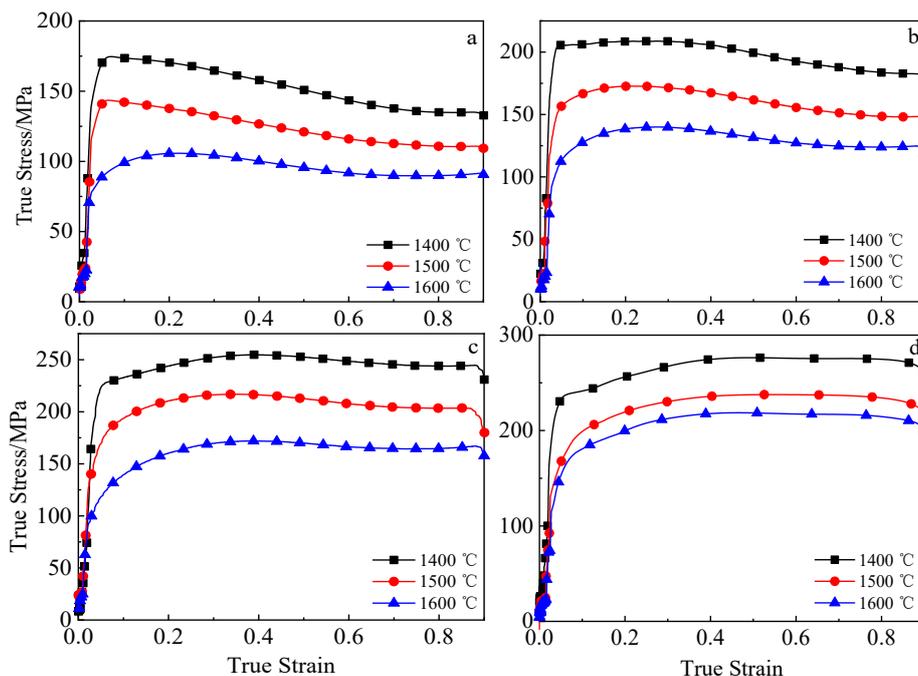


图 1 Mo-14Re 合金在不同应变速率和温度下的真应力-真应变曲线

Fig.1 True stress-true strain curves of Mo-14Re alloy at different temperatures and strain rates: (a) 0.01 s<sup>-1</sup>; (b) 0.1 s<sup>-1</sup>; (c) 1 s<sup>-1</sup>; (d) 10 s<sup>-1</sup>

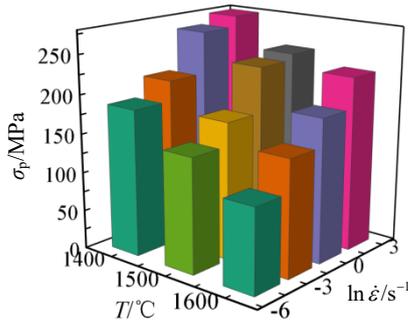


图 2 不同变形温度和应变速率下 Mo-14Re 合金的峰值应力  
Fig.2 Peak stress of Mo-14Re alloy at different deformation temperatures and strain rates

和应变速率下所对应的峰值应力 (σ<sub>p</sub>) 三维柱状图。由图可知, 当变形温度恒定时, 应变速率越高, 峰值应力越大; 当应变速率恒定时, 变形温度越低, 峰值应力越大。

2.2 Mo-14Re 合金的流变应力本构方程

建立本构方程对研究 Mo-14Re 合金高温压缩变形行为具有重要意义。通常采用 Arrhenius 本构方程来描述流变应力和变形温度、应变速率之间的关系<sup>[21]</sup>, 并引入 Zener-Hollomon 参数来描述材料的高温流变行为<sup>[22]</sup>。该模型是基于双曲正弦函数的基础上建立的, 其表达式为:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

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

$$f(\sigma) = \begin{cases} \sigma^{n_1} & (\alpha\sigma < 0.8) \\ \exp(\beta\sigma) & (\alpha\sigma > 1.2) \\ [\sinh(\alpha\sigma)]^n & \end{cases} \quad (3)$$

式中: A、n、n<sub>1</sub>、β、α (α=β/n<sub>1</sub>) 为材料常数; Q 为变形激活能 (J·mol<sup>-1</sup>); T 为绝对温度 (K); f(σ) 为应力相关函数; ε̇ 为应变速率 (s<sup>-1</sup>); σ 为流变应力 (MPa); R 为气体常数 (8.314 J·mol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>), Z 为 Zener-Hollomon 参数, 温度补偿应变速率因子代表了温度和应变速率对变形的综合影响。

把式 (3) 代入式 (2) 进行变形, 可以得到如下方程:

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (\alpha\sigma < 0.8) \quad (4)$$

$$\dot{\epsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (\alpha\sigma > 1.2) \quad (5)$$

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (6)$$

式中, A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub> 为材料常数。

对公式 (4) (5) 取对数并同时求偏导可得:

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_1 + n_1 \ln \sigma - \frac{Q}{RT} \quad (7)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_2 + \beta\alpha - \frac{Q}{RT} \quad (8)$$

当温度是常数时, 可以得到 n<sub>1</sub> 和 β 的表达式, 如下:

$$n_1 = \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln \sigma} \quad (9)$$

$$\beta = \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \sigma} \quad (10)$$

将峰值应力数值代入式 (9) 和式 (10), 进行拟合得到 β 和 n<sub>1</sub> 值, 如图 3a 和 3b 所示, 图中曲线的斜率的平均值分别为 n<sub>1</sub> 和 β, 求得 n<sub>1</sub>=12.35, β=0.063。α 可由 α=β/n<sub>1</sub> 得出, 则 α=0.0051, 如表 1 所示。

对式 (6) 两边取对数可得:

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A - \frac{Q}{RT} + n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] \quad (11)$$

可得:

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

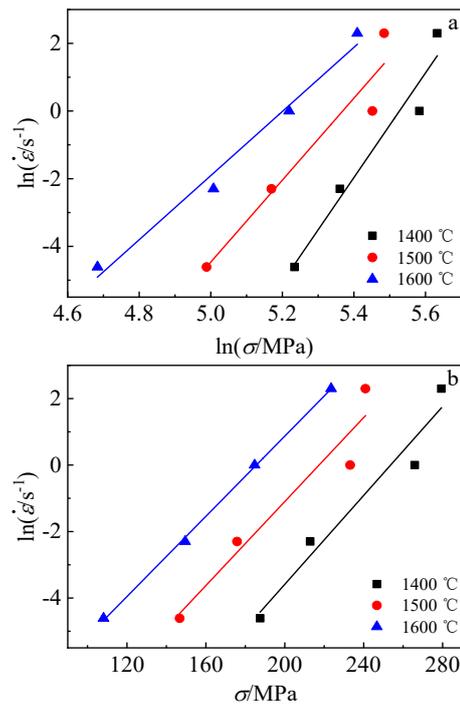


图 3 不同变形温度下应变速率和流变应力之间的关系曲线  
Fig.3 Relationship curves between strain rate and flow stress at different temperatures: (a) ln ε̇ - ln σ; (b) ln ε̇ - σ

表 1 参数 n<sub>1</sub>、β 拟合结果

Table 1 Fitting results of parameter n <sub>1</sub> and β				
Parameter	1400 °C	1500 °C	1600 °C	Average
n <sub>1</sub>	15.46	12.11	9.48	12.35
β	0.07	0.06	0.06	0.063
α	-	-	-	0.0051

由式(11)可知,在变形温度一定时,假设 Mo-14Re 合金在热变形过程中的变形激活能  $Q$  保持不变,拟合得到  $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  的关系曲线,如图 4a 所示,曲线平均斜率为  $n$ ,求解得出  $n=9.323$ ,如表 2 所示。

在应变速率一定时,假设变形激活能不随温度变化,对式(11)变形可得:

$$Q = Rn \frac{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial (1/T)} \quad (13)$$

经过拟合得到  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1000/T$  的关系曲线如图 4b 所示,曲线斜率平均值即为  $Q/(nR)$ ,再将  $n$  和  $R$  代入即得  $Q=588\,310\text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}$ ,如表 3 所示。

将式(6)代入式(1)可得:

$$Z = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (14)$$

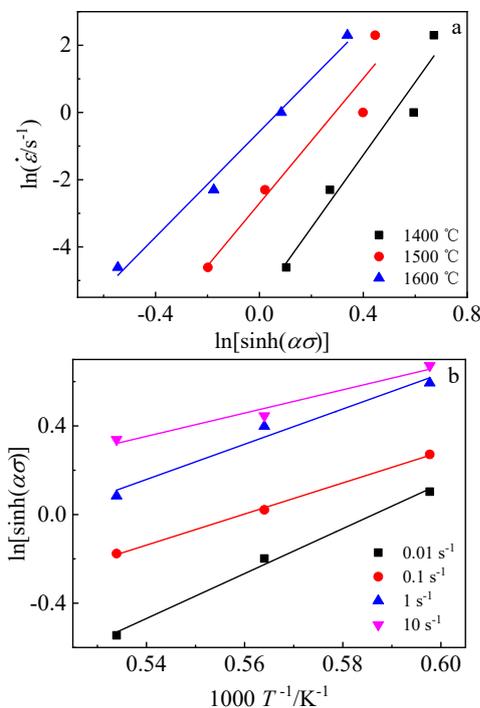


图 4  $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  和  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1000/T$  关系曲线

Fig.4 Relationship curves of  $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  (a) and  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1000/T$  (b)

表 2 参数  $n$  拟合结果

Table 2 Fitting results of parameter  $n$

Parameter	1400 °C	1500 °C	1600 °C	Average
$n$	10.83	9.3	7.84	9.323

表 3 参数  $Q/(nR)$  拟合结果

Table 3 Fitting result of parameter  $Q/(nR)$

Parameter	0.01 s <sup>-1</sup>	0.1 s <sup>-1</sup>	1 s <sup>-1</sup>	10 s <sup>-1</sup>	Average
$Q/(nR)$	10.14	7.02	7.95	5.25	7.59

对式(14)两边取对数可得:

$$\ln Z = \ln A + n \ln[\sinh(\alpha\sigma)] \quad (15)$$

在不同变形条件下的  $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  线性拟合曲线如图 5 所示,经过拟合之后得到  $A=2.41 \times 10^{16}$  (截距即为  $\ln A$  值,其值为 37.72)。

所有参数的计算结果汇总如表 4 所示,将其所有参数代入式(6)可得 Mo-14Re 合金的热变形本构方程,如下:

$$\dot{\epsilon} = 2.41 \times 10^{16} [\sinh(0.0051\sigma)]^{9.323} \exp\left(-\frac{588310}{RT}\right) \quad (16)$$

为了验证 Mo-14Re 合金的本构模型的精确度,将各应变速率和变形温度代入本构方程,求出各变形条件下应力预测值,预测值与实验值对比结果如图 6 所示。由图可知,实验值与预测值具有良好的线性相关性。同时采用线性相关系数和平均相对误差  $e_{AARE}$  验证本构方程的准确性,由图中散点值拟合计算得出两者相关系数  $r^2=0.98$ ,平均相对误差值  $e_{AARE}$  为 7%,即在不同的变形

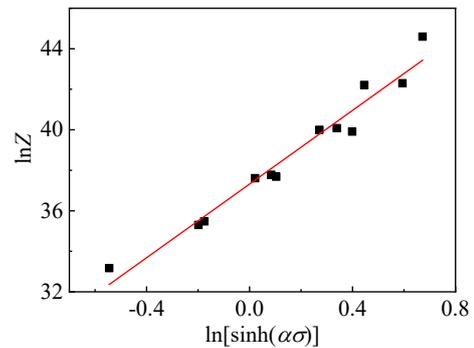


图 5  $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  线性拟合曲线

Fig.5 Linear fitting curve of  $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$

表 4 各参数计算结果

Table 4 Fitting results of all parameters

$n_1$	$\beta$	$\alpha$	$n$	$Q/\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$	$A$
12.35	0.063	0.0051	9.323	588 310	$2.41 \times 10^{16}$

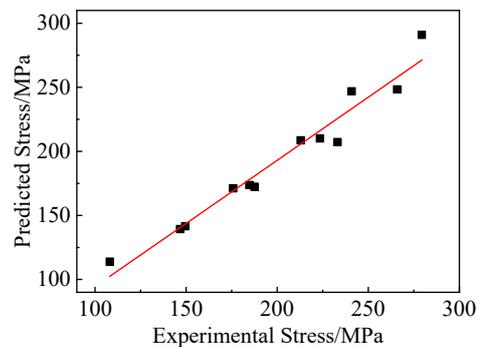


图 6 应力预测值与实验值对比

Fig.6 Comparison between predicted stress values and test values

条件下, Mo-14Re 合金本构方程的应力预测值与实验值吻合度较高。

### 2.3 Mo-14Re 合金热加工图的建立

热加工图是一种用于预测微观组织变化, 寻找适合晶粒度组织的方法, 它能清楚地确定稳定变形区和失稳变形区, 揭示不同区域的微观变形机制, 为避开失稳区获得最佳热加工工艺参数提供重要依据。对于动态材料模型 (DMM) 而言, 高温下总功率  $P$  包括塑性变形功耗  $G$  和微观结构演化功耗  $J$ , 表达式为:

$$P = G + J = \int_0^\sigma \dot{\epsilon} d\sigma + \int_0^\sigma \sigma d\dot{\epsilon} \quad (17)$$

$$G \text{ 和 } J \text{ 的耗散率之间存在关系 } \frac{dJ}{dG} = \frac{\dot{\epsilon} d\sigma}{\sigma d\dot{\epsilon}} = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} = m$$

( $m$  为应变敏感系数), 式中的  $0 < m < 1$ , 表明材料处于稳态流变过程; 对理想塑性变形而言 ( $m=1$ ), 微观组织演变功率可以取得最大值  $J_{\max}=0.5P$ 。能量耗散定律定义为微观组织与总功耗的占比, 引入一个无量纲参数  $\eta$  来反映材料功率耗散特征, 表达式为:

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{P-G}{J_{\max}} \quad (18)$$

将式 (16) 代入式 (18), 可以得到耦合微观组织演变的能量耗散率:

$$\eta = 2 - \frac{2 \int_0^{\dot{\epsilon}} \left\{ \frac{\sinh^{-1} \left[ \frac{\dot{\epsilon}}{2.41 \times 10^{16} \exp(-Q/RT)} \right]}{0.0051} \right\} d\dot{\epsilon}}{\sigma \dot{\epsilon}} \quad (19)$$

在塑性变形中, 连续变形不稳定的判定准则为:

$$\frac{dD_\xi}{d\dot{\epsilon}} < \frac{D_{\xi_p}}{\dot{\epsilon}} \quad (20)$$

式中,  $D_\xi$  为内耗函数,  $D_{\xi_p}$  为塑性变形阶段的内耗函数,  $D_{\xi_p} = \sigma \dot{\epsilon} - \dot{\Psi}$ ;  $\dot{\Psi}$  为亥姆霍兹自由能, 高温变形时  $\dot{\Psi} = R \dot{\epsilon}$ ,  $R$  为比例常数。

因此, 可以得到内耗函数为:

$$D_{\xi_p} = (\sigma - R) \dot{\epsilon} \quad (21)$$

由式 (21) 可以得到流动不稳定性参数为

$$\xi_p = \frac{\partial \ln D_{\xi_p}}{\partial \ln \dot{\epsilon}} - 1 < 0, \text{ 将式 (16) 代入可得:}$$

$$\xi_p = \frac{\partial \ln \left\{ (\sigma - R) 2.41 \times 10^{16} \left[ \sinh(0.0051\sigma) \right]^{9.323} \exp\left(-\frac{588310}{RT}\right) \right\}}{\partial \ln \dot{\epsilon}} - 1 < 0 \quad (22)$$

将绘制的 0.6 应变下的功率耗散图和失稳图叠加为 DMM 热加工图, 如图 7 所示。图中的深色区域为流变失稳区, 白色区域为加工安全区。失稳区的  $\eta$  值小于安全区的  $\eta$  值, 热加工图的安全区主要集中于 2 个区域:

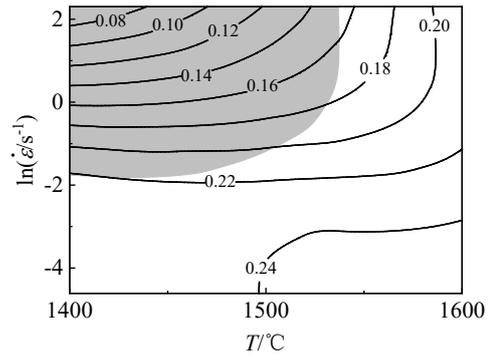


图 7 Mo-14Re 合金的热加工图

Fig.7 Hot processing map of Mo-14Re alloy

(1) 1400~1600 °C,  $\dot{\epsilon}$  为 0.0089~0.14 s<sup>-1</sup>,  $\eta$  值为 0.22~0.24; (2) 1530~1600 °C,  $\dot{\epsilon}$  为 0.14~10 s<sup>-1</sup>,  $\eta$  值为 0.16~0.22。安全区主要分布在高温低应变速率的范围内, 而流变失稳区主要集中在低温高应变速率的范围内, 且应变较低时, 可供安全加工区域很少, 说明在低应变时, 失稳区的加工硬化效应大于动态软化效应而导致该应变下区域不稳定。此外, 随着应变的增大, 流变失稳区向低应变速率的范围扩大。一般认为在热加工的安全区域, 功率耗散因子越大, 材料的热加工性能越好。具有较高功率耗散效率因子的稳态变形区间往往能够获得均匀细小的动态再结晶组织。因此, 这样的区间可以作为最佳的变形工艺参数。根据加工图可以确定该合金在不同应变条件下的最佳变形区: 1400~1600 °C,  $\dot{\epsilon}$  为 0.0089~0.14 s<sup>-1</sup>,  $\eta \geq 0.22$ 。

### 3 结论

1) 构建了基于 Zener-Hollomon 参数的 Arrhenius 本构方程, 构建了 Mo-14Re 合金在 1400~1600 °C 和应变速率 0.01~10 s<sup>-1</sup> 范围内的流变应力本构关系方程, 其热激活能为 588310 J·mol<sup>-1</sup>, 本构方程为:

$$\dot{\epsilon} = 2.41 \times 10^{16} \left[ \sinh(0.0051\sigma) \right]^{9.323} \exp\left(-\frac{588310}{RT}\right)$$

2) 对 Mo-14Re 合金进行了压缩实验, 其结果表明, 当变形温度恒定时, 应变速率越高, 峰值应力越大; 当应变速率恒定时, 变形温度越低, 峰值应力越大。

3) 将 Arrhenius 模型应用于动态材料模型理论, 构建了 Mo-14Re 合金在 1400~1600 °C, 0.01~10 s<sup>-1</sup> 的热加工图, 合理的成形工艺参数为 1400~1600 °C,  $\dot{\epsilon}$  为 0.0089~0.14 s<sup>-1</sup>,  $\eta \geq 0.22$ 。

#### 参考文献 References

[1] Zhang Qiang(张 强), Cai Yongfeng(蔡永丰), Li Xiaojing(李晓

- 静) *et al. Powder Metallurgy Technology*(粉末冶金技术)[J], 2023, 41(1): 44
- [2] Bai Xiaodan(柏小丹), Zeng Yi(曾毅), Sun Yuanjun(孙院军). *China Molybdenum Industry*(中国钼业)[J], 2021, 45(6): 12
- [3] Wang J T, Wang J, Li Y J *et al. High Temperature Materials and Processes*[J], 2014, 33(3): 193
- [4] Pan K M, Yang Y P, Wei S Z *et al. Journal of Materials Science & Technology*[J], 2021, 60(1): 113
- [5] Tan Wang(谭望), Chen Chang(陈畅), Wang Mingpu(汪明朴) *et al. Materials Reports*(材料导报)[J], 2007, 21(8): 80
- [6] Tan Shuanbin(谭拴斌), Guo Rangmin(郭让民), Yang Shenghong(杨升红) *et al. Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2003, 27(6): 788
- [7] Huang Hongtao(黄洪涛), Wang Weijun(王卫军), Zhong Wuyue(钟武烨) *et al. Atomic Energy Science and Technology*(原子能科学技术)[J], 2020, 54(3): 505
- [8] Chen Chang(陈畅), Wang Mingpu(汪明朴), Tan Wang(谭望) *et al. Materials Review*(材料导报)[J], 2008, 22(5): 74
- [9] Xu J H, Leonhardt T, Farrell J *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2008, 479(1-2): 76
- [10] Zhang Junliang(张军良), Li Zhongkui(李中奎), Fu Jie(付洁) *et al. China Molybdenum Industry*(中国钼业)[J], 2009, 33(3): 32
- [11] Xia Yu(夏雨), Wang Kuaishu(王快社), Hu Ping(胡平) *et al. Materials Review*(材料导报)[J], 2019, 33(19): 3277
- [12] Xi H H, He P F, Ma G Z *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2019, 378: 124966
- [13] Yu X J, Kumar K S. *Materials Science and Engineering A*[J], 2016, 676: 312
- [14] Zhang R B, Wang G, Fu Z Y *et al. Materials Letters*[J], 2022, 313: 131791
- [15] Zhang L L, Zhang L J, Yang Q J. *Metals*[J], 2022, 12(5): 841
- [16] Huang H T, Li W X, Liu Y *et al. Materials Letters*[J], 2022, 318: 132252
- [17] Tian G L, Xu L J, Fang H *et al. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2023, 117: 106382
- [18] Wang Fa(王法), Jiang He(江河), Dong Jianxin(董建新). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(1): 245
- [19] Wang Yufeng(王玉凤), Li Fuguo(李付国), Zhao Wei(赵伟) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(8): 1358
- [20] Xin Tian(辛甜), Li Yanchao(李延超), Lin Xiaohui(林小辉) *et al. China Molybdenum Industry*(中国钼业)[J], 2022, 46(6): 1
- [21] Lin Y C, Chen M S, Zhong J. *Computational Materials Science*[J], 2008, 42(3): 470
- [22] Zener C, Hollomon J H. *Journal of Applied Physics*[J], 1944, 15(1): 22

## Hot Deformation Behavior and Hot Processing Map of Mo-14Re Alloy

Wang Xianjun<sup>1,2</sup>, Yang Junzhou<sup>1,2</sup>, Wang Shichen<sup>1,2</sup>, Wang Zhixuan<sup>2,3</sup>, Hu Boliang<sup>1,2</sup>, Wang Li<sup>1,2</sup>, Bai Run<sup>1,4</sup>, Gao Xuanqiao<sup>4</sup>, Zhang Wen<sup>4</sup>, Hu Ping<sup>1,2</sup>

(1. College of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

(2. National and Local Joint Engineering Research Center for Functional Materials Processing, Xi'an 710055, China)

(3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

(4. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

**Abstract:** The constant strain rate compression experiments were conducted on Mo-14Re alloy by the Gleeble-3500 thermal simulation testing machine. The rheological behavior of Mo-14Re alloy at 1400, 1500 and 1600 °C, and strain rate of 0.01, 0.1, 1 and 10 s<sup>-1</sup> was studied. The results show that during the hot deformation process, the flow stress decreases with the increase in deformation temperature and the decrease in strain rate, which is due to the relative effect of work hardening and dynamic softening under different conditions. Based on the Arrhenius model and Zener-Hollomon function, a constitutive equation of the flow stress of Mo-14Re alloy is established, and the activation energy for hot deformation of Mo-14Re alloy is obtained to be 588 310 J·mol<sup>-1</sup>. According to the established hot processing map, the reasonable forming process parameters of Mo-14Re alloy are as follows: temperature is 1400 – 1600 °C, the strain rate is 0.0089 – 0.14 s<sup>-1</sup>, and the power dissipation coefficient  $\eta$  is not less than 0.22.

**Key words:** Mo-14Re alloy; hot deformation behavior; constitutive equation; hot processing map

Corresponding author: Hu Ping, Ph. D., Professor, College of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China, E-mail: huping@xauat.edu.cn