

## 34CrNi3MoV 钢的热变形行为

邹志鹏<sup>1</sup>, 徐 东<sup>1,2</sup>, 郑 冰<sup>1,3</sup>, 王怡群<sup>2</sup>, 王学玺<sup>2</sup>, 郑 磊<sup>4,5</sup>

- (1. 河北工程大学 河北省高品质冷锻钢技术创新中心, 河北 邯郸 056038;  
2. 河南中原特钢装备制造有限公司, 河南 济源 459008; 3. 辽宁科技大学 材料与冶金学院, 辽宁 鞍山 114051;  
4. 河北普阳钢铁有限公司, 河北省高韧性风塔钢工程研究中心, 河北 邯郸 056305;  
5. 河北普阳钢铁有限公司, 河北省高塑性耐磨钢板技术创新中心, 河北 邯郸 056305)

**摘要:** 为分析 34CrNi3MoV 钢的热变形行为, 采用 Gleeble-1500 热模拟试验机进行等温热压缩试验, 设置变形温度为 800~1200 °C、应变速率为 0.01~10 s<sup>-1</sup>, 获得相应的流变应力曲线。分析了流变应力对变形参数的敏感性, 计算了不同应变变量下材料参数  $\alpha$ 、 $n$ 、 $Q$  和  $A$  的值, 并利用五阶多项式拟合了各材料参数与应变量的对应关系。采用应变补偿的 Arrhenius 模型对 34CrNi3MoV 钢的高温流动应力本构方程进行回归。结果表明: 34CrNi3MoV 钢在变形温度为 1000~1200 °C、应变速率为 0.01~1 s<sup>-1</sup> 时出现较为明显的动态再结晶曲线特征, 并随着应变速率的降低和变形温度的升高, 峰值应力越明显。本构方程预测的流动应力与试验结果的吻合度较好, 在整个试验范围内的平均相对误差  $R_{av}$  仅为 5.52%, 表明所构建的模型是可靠的。

**关键词:** 34CrNi3MoV 钢; 等温压缩; 流变应力; 本构方程; 应变补偿

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.03.030

**中图分类号:** TG142.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2023) 03-0211-08

## Thermal deformation behavior on 34CrNi3MoV steel

Zou Zhipeng<sup>1</sup>, Xu Dong<sup>1,2</sup>, Zheng Bing<sup>1,3</sup>, Wang Yiqun<sup>2</sup>, Wang Xuexi<sup>2</sup>, Zheng Lei<sup>4,5</sup>

- (1. Technology Innovation Center for High Quality Cold Heading Steel of Hebei Province, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Henan Zhongyuan Special Steel Equipment Manufacturing Co., Ltd., Jiyuan 459008, China;  
3. School of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China;  
4. Engineering Research Center for Wind Tower Steel of High Toughness of Hebei Province, Hebei Puyang Iron and Steel Co., Ltd., Handan 056305, China; 5. Technology Innovation Center for Wear Resistant Steel Plate of High Plasticity and Toughness of Hebei Province, Hebei Puyang Iron and Steel Co., Ltd., Handan 056305, China)

**Abstract:** In order to analyze the thermal deformation behavior of 34CrNi3MoV steel, the isothermal thermal compression tests were conducted on Gleeble-1500 thermo-mechanical simulator with the deformation temperature of 800–1200 °C and the strain rate of 0.01–10 s<sup>-1</sup>, the corresponding rheological stress curves were obtained. Then, the sensitivity of rheological stress to deformation parameters was analyzed, and the values of material parameters  $\alpha$ ,  $n$ ,  $Q$  and  $A$  under different strain amounts were calculated. Furthermore, the corresponding relationship between each material parameter and strain amount was fitted by the fifth-order polynomial, and the high-temperature rheological stress constitutive equation of 34CrNi3MoV steel was regressed by the strain-compensated Arrhenius model. The results show that the dynamic recrystallization curve characteristics of 34CrNi3MoV steel is obvious when the temperature is 1000–1200 °C and the strain rate is 0.01–1 s<sup>-1</sup>, and the peak stress becomes more obvious with the decreasing of strain rate and the increasing of deformation temperature. The rheological stress predicted by the constitutive equation has a high agreement with the test results, and the average relative error  $R_{av}$  in the entire test range is only 5.52%, which indicates that the constructed model is reliable.

**Key words:** 34CrNi3MoV steel; isothermal compression; rheological stress; constitutive equation; strain compensation

34CrNi3MoV 钢具有优良的综合力学性能, 被广

泛用于制造坦克炮和火炮的管身, 以及高压釜等构件, 这些构件均通过锻造加工制作。由于此类构件的尺寸较大, 锻造难度极高, 不合理的热变形工艺将会带来巨大的经济损失。因此, 在正式生产前, 数值模拟仿真技术常常被用于评价和优化大型锻件的热变形工艺<sup>[1-2]</sup>。然而, 仿真结果的可靠性在很大程度上取决于本构方程预测的准确性。由于不同材料对变形参数的敏感性程度不完全相同, 且本构方程为非线性关系, 无法建立普遍适用的数学关系式, 因此, 多种构造方法被提出, 其中常见的有 Arrhenius 模型<sup>[3]</sup>、John-

收稿日期: 2022-05-18; 修订日期: 2022-08-25

基金项目: 国家自然科学基金联合基金资助项目 (NSFC) (U20A20272); 河北省军民科技协同创新专项 (22351001D); 邯郸市科学研究计划重点项目 (21122015004); 河北省高等学校科学技术研究项目 (CXY2023004)

作者简介: 邹志鹏 (1987-), 男, 硕士研究生

E-mail: zpz9963@163.com

通信作者: 徐 东 (1984-), 男, 博士, 教授, 博士生导师

E-mail: xudong\_xyz@163.com

son-Cook 模型<sup>[4]</sup>、Norton-Hoff 模型<sup>[5]</sup>、Zerilli-Armstrong 模型<sup>[6]</sup>等。虽然这些本构方程在预测方面比较成功,但仍需进一步提高预测精度。最近,学者们<sup>[7-10]</sup>在 Arrhenius 模型的基础上,利用应变补偿对模型中的各参数进行修正,修正后的 Arrhenius 本构方程具有良好的相关性和推广性。目前,34CrNi3MoV 钢的研究热点主要集中于热处理工艺<sup>[11-12]</sup>,然而对热变形过程的研究鲜有报道。因此,对该钢的热变形行为进行研究并建立本构方程是非常有必要的。

本文以 34CrNi3MoV 钢为研究对象进行了单道次等温压缩试验,分析了流变应力曲线,根据 Arrhenius 模型对 34CrNi3MoV 钢的流动应力本构方程进行了回归,在整个试验范围内,对本构方程的可靠性进行了验证,以期为该钢材的数值模拟仿真及热加工工艺的制定提供一定的参考。

## 1 试验材料和方法

试验材料为工业热轧后的 34CrNi3MoV 钢,压缩试样的规格为  $\Phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ ,化学成分见表 1。压缩过程的工艺图如图 1 所示,试样在电阻加热的作用下,控制升温速率为  $20 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ ,升温至  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  后保温  $180 \text{ s}$ ,确保试样完全奥氏体化,再控制降温速率为  $10 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ ,降温至变形温度,保温  $30 \text{ s}$ ,确保试样温度分布均匀,最终完成压缩试验。压缩过程的变形参数如下:变形温度  $T'$  为  $800$ 、 $900$ 、 $1000$ 、 $1100$  和  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ ,应变速率  $\dot{\epsilon}$  为  $0.01$ 、 $0.1$ 、 $1$  和  $10 \text{ s}^{-1}$ ,最大变形量为  $50\%$  (真应变  $\epsilon$  为  $0.69$ )。压缩后的试样采用水淬处理,通过金相显微镜观察压缩后的晶粒形貌。

表 1 34CrNi3MoV 钢的化学成分 (% , 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of 34CrNi3MoV steel (% , mass fraction)

| C         | Si       | Mn      | Cr      | Ni      | Mo        | V       | Cu          | P            | S            | Fe |
|-----------|----------|---------|---------|---------|-----------|---------|-------------|--------------|--------------|----|
| 0.28~0.35 | 0.15~0.4 | 0.5~0.8 | 1.2~1.5 | 3.0~3.3 | 0.35~0.45 | 0.1~0.2 | $\leq 0.02$ | $\leq 0.015$ | $\leq 0.001$ | 余量 |

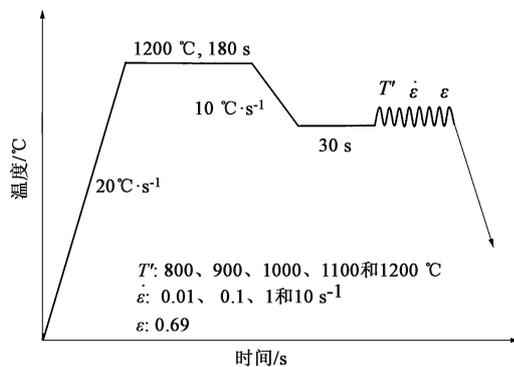


图 1 34CrNi3MoV 钢等温热压缩试验工艺流程图

Fig. 1 Process flow chart of isothermal thermal compression test for 34CrNi3MoV steel

## 2 结果与讨论

### 2.1 流变曲线分析

图 2 为 34CrNi3MoV 钢在压缩试验中获得的真应力-真应变曲线。由图 2a 可以看出:当应变速率为  $0.01 \text{ s}^{-1}$ 、变形温度为  $800 \sim 900 \text{ }^\circ\text{C}$  时,流动应力在整个变形范围内表现为持续增大,但流变应力的增速却随应变的增大呈逐渐减缓的趋势;当变形温度为  $1000 \sim 1200 \text{ }^\circ\text{C}$  时,流动应力随应变量的增大表现为先上升再下降,最后趋于平稳的

趋势,曲线出现了明显的峰值应力。这是因为流变应力是硬化机制和软化机制相互竞争的结果<sup>[13]</sup>。在压缩初期,位错增殖产生加工硬化,使流变应力呈现十分迅速的上升趋势,随后在动态回复(DRV)的作用下,位错被大量消耗、重组,材料内部发生软化,流变应力上升逐渐减缓。当压缩条件满足动态再结晶(DRX)临界条件时,材料内部发生 DRX, 新晶粒的形核和长大使位错密度快速下降,随着应变量的增大,DRX 产生的软化效果增强,当软化占主导作用时,流变应力开始下降。图 2b、图 2c 的变化规律与图 2a 基本一致,对比可以发现,应变速率的减小有利于发生 DRX。从图 2d 看出,在高应变速率下,应力在 DRV 产生后基本保持不变,表现出稳态流变的特征。

从图 2 还可以看出,压缩过程中的流动应力除了与应变有关,变形参数对其影响也十分显著。变形温度升高使原子的热活性增强,促进了位错的运动,同时温度升高也降低了位错迁移的阻力,使材料内部的位错密度下降,表现为应力减小。当变形温度固定不变时,应变速率增大使完成相同变形量所需的时间缩短,增殖的位错来不及迁移,位错密度增大,同时增强了加工硬化效果,从而表现出应力增大。

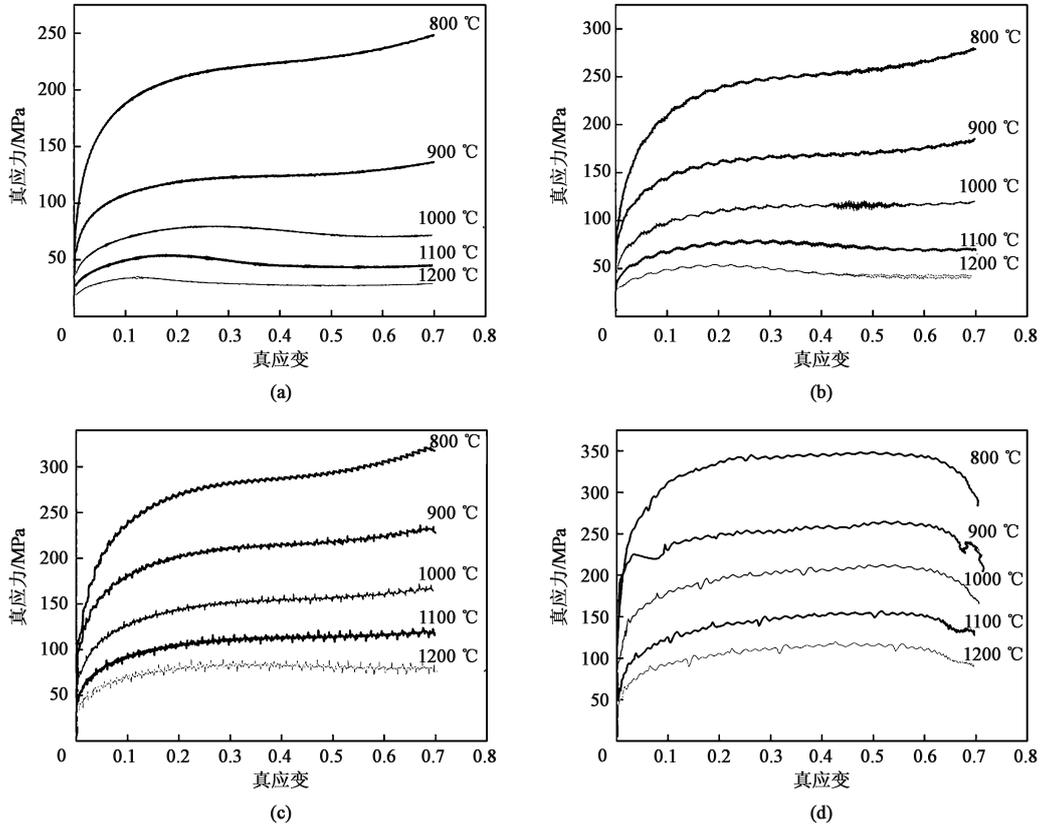


图 2 34CrNi3MoV 钢在不同变形条件下的真应力-真应变曲线

(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>

Fig. 2 True stress-true strain curves of 34CrNi3MoV steel under different deformation conditions

### 2.2 本构方程的建立

金属材料的塑性变形是受激活能控制和影响的。当材料的化学成分固定不变时, 通常采用 Sellars C M 和 Mctegart W J<sup>[14]</sup> 提出的 Arrhenius 模型来描述塑性变形过程中的流动应力, 其表达式为:

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

$$\begin{cases} \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A_1 \sigma^{n_1} & a\sigma \leq 0.8 \\ \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A_2 \exp(\beta\sigma) & a\sigma \geq 1.2 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $Z$  为 Zener-Hollomon 参数;  $\sigma$  为流变应力, MPa;  $\dot{\epsilon}$  为应变速率, s<sup>-1</sup>;  $R$  为气体常数, 为 8.314 J · (mol · K)<sup>-1</sup>;  $Q$  为激活能, (kJ · mol<sup>-1</sup>);  $T$  为绝对温度, K;  $A$ 、 $n$ 、 $n_1$ 、 $\beta$  和  $\alpha$  ( $\alpha = \beta/n_1$ ) 为材料参数;  $A_1$ 、 $A_2$  为材料常数。

不同变形参数下得到的真应力-真应变为离散点, 可以用于对本构方程中各材料参数进行求解, 以真应变等于 0.2 为例, 具体步骤如下。

对式 (2) 中的幂函数和指数函数分别进行对

数处理, 整理后可得:

$$\ln\sigma = \frac{1}{n_1} \ln\dot{\epsilon} + \frac{1}{n_1} \times \frac{Q}{RT} - \frac{1}{n_1} \ln A_1 \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{1}{\beta} \ln\dot{\epsilon} + \frac{1}{\beta} \times \frac{Q}{RT} - \frac{1}{\beta} \ln A_2 \quad (4)$$

由式 (3) 和式 (4) 可以看出, 当不考虑变形温度变化时,  $\ln\sigma - \ln\dot{\epsilon}$  和  $\sigma - \ln\dot{\epsilon}$  呈线性关系, 利用线性拟合后的斜率可以分别求出  $n_1$  和  $\beta$  的值,  $\beta$  与  $n_1$  的比值即为  $\alpha$ 。如图 3 所示, 可以得到  $n_1 = 8.991$ ,  $\beta = 0.0686 \text{ MPa}^{-1}$ , 则  $\alpha = \beta/n_1 = 0.00763 \text{ MPa}^{-1}$ 。

对式 (1) 中双曲正弦函数进行对数处理, 整理后可得:

$$\ln[\sinh(\alpha\sigma)] = \frac{1}{n} \ln\dot{\epsilon} + \frac{Q}{Rn} \times \frac{1}{T} - \frac{1}{n} \ln A \quad (5)$$

将  $\alpha$  代入式 (5) 后, 进行偏微分处理, 可以得到激活能  $Q$  的表达式为:

$$Q = R \left( \frac{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial (1/T)} \Big|_{\dot{\epsilon}} \right) \left( \frac{\partial \ln\dot{\epsilon}}{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]} \Big|_T \right) \quad (6)$$

分别作出  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - \ln\dot{\epsilon}$  和  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] -$

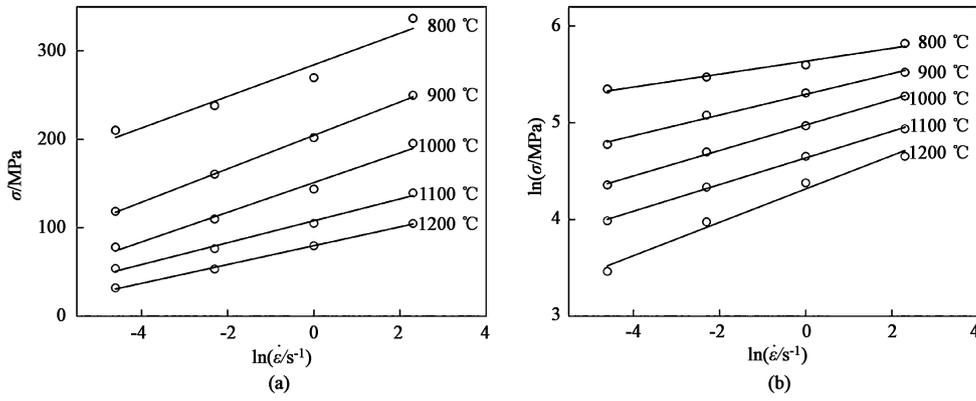


图 3 应变为 0.2 时不同变形温度下  $\sigma$ - $\ln \dot{\epsilon}$  (a) 和  $\ln \sigma$ - $\ln \dot{\epsilon}$  (b) 的拟合图

Fig. 3 Fitting diagrams of  $\sigma$ - $\ln \dot{\epsilon}$  (a) and  $\ln \sigma$ - $\ln \dot{\epsilon}$  (b) under different deformation temperatures at strain of 0.2

1000/T 的拟合图, 如图 4 所示, 利用不同变形参数下拟合直线的平均斜率, 确定 34CrNi3MoV 钢

在真应变等于 0.2 时的热变形激活能  $Q = 397.265 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

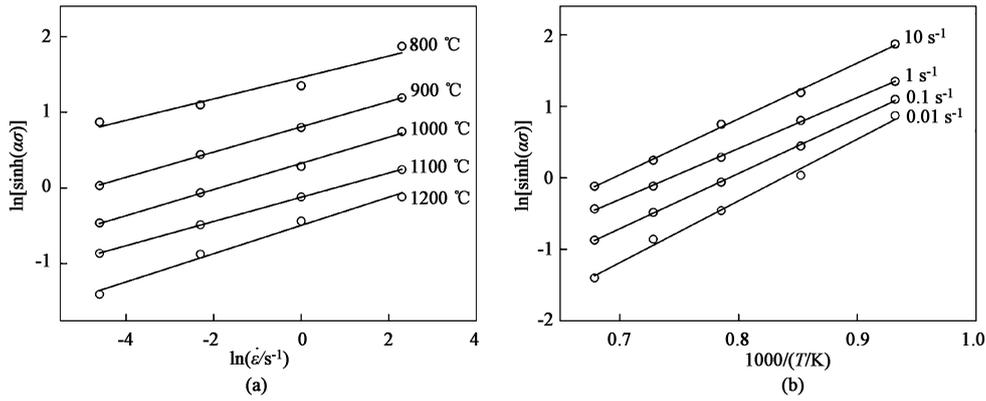


图 4 应变为 0.2 时不同变形参数下  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ - $\ln \dot{\epsilon}$  (a) 和  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ - $1000/T$  (b) 的拟合图

Fig. 4 Fitting diagrams of  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ - $\ln \dot{\epsilon}$  (a) and  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ - $1000/T$  (b) under different deformation parameters at strain of 0.2

将计算得到的激活能  $Q$  代入式 (1), 并对包含  $Z$  参数的方程进行对数处理, 整理后可得:

$$\ln Z = n \ln[\sinh(\alpha\sigma)] + \ln A \quad (7)$$

由式 (7) 可以看出, 线性拟合  $\ln Z$ - $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  关系式中的斜率为  $n$  值、截距为  $\ln A$  值。拟合图如图 5 所示, 可以得到  $n = 6.098$ ,  $\ln A = 35.61$ ,  $A = 2.92 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ 。

将求出的  $\alpha$ 、 $n$ 、 $Q$  和  $A$  等参数代入式 (1) 中的双曲正弦函数, 得到应变量为 0.2 时 34CrNi3MoV 钢的等温热压缩流变应力回归方程为:

$$\dot{\epsilon} \exp\left(\frac{397265}{RT}\right) = 2.92 \times 10^{15} [\sinh(0.00763\sigma)]^{6.098} \quad (8)$$

式 (1) 表明, 在热变形中应变量的变化对流变应力的影响不显著, 因此可以忽略。然而, 在整个变形范围内, 应变量的变化对本构模型中各材料参数

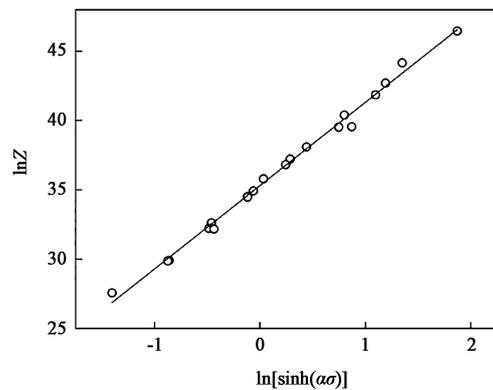


图 5 应变为 0.2 时  $\ln Z$ - $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  的拟合图

Fig. 5 Fitting diagram of  $\ln Z$ - $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  at strain of 0.2

(即  $\alpha$ 、 $n$ 、 $Q$  和  $\ln A$ ) 有显著影响。本文利用上述求解方法, 计算得到了不同应变变量 (0.05~0.65, 间隔为 0.05) 下的各材料参数的值, 结果如表 2 所示。

表 2 34CrNi3MoV 钢各应变下的材料参数值  
Table 2 Values of material parameters for 34CrNi3MoV steel under various strains

| $\varepsilon$ | $\alpha/\text{MPa}^{-1}$ | $n$    | $Q/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$ | $\ln(A/\text{s}^{-1})$ |
|---------------|--------------------------|--------|---------------------------------------|------------------------|
| 0.05          | 0.009944                 | 5.7761 | 379.92                                | 33.764                 |
| 0.10          | 0.008639                 | 6.1444 | 399.31                                | 35.617                 |
| 0.15          | 0.008025                 | 6.1780 | 400.64                                | 35.808                 |
| 0.20          | 0.007632                 | 6.0987 | 397.26                                | 35.612                 |
| 0.25          | 0.007391                 | 6.0374 | 395.41                                | 35.579                 |
| 0.30          | 0.007241                 | 5.9732 | 393.76                                | 35.561                 |
| 0.35          | 0.007136                 | 5.8782 | 391.13                                | 35.429                 |
| 0.40          | 0.007058                 | 5.7819 | 389.12                                | 35.330                 |
| 0.45          | 0.007005                 | 5.7278 | 389.81                                | 35.462                 |
| 0.50          | 0.006962                 | 5.7262 | 393.86                                | 35.892                 |
| 0.55          | 0.006919                 | 5.7823 | 402.76                                | 36.763                 |
| 0.60          | 0.006912                 | 5.9594 | 422.39                                | 38.596                 |
| 0.65          | 0.006994                 | 6.5675 | 476.99                                | 43.699                 |

通过表 2 可以发现, 各材料参数的值随应变量的变化产生较大波动。因此, 考虑应变补偿可以更准确地描述各材料参数的大小。本文运用五次多项式函数拟合材料参数, 如式 (9) 所示。拟合图如图 6 所示, 相关系数  $R^2$  均大于 0.99, 说明各材料参数的拟合精度较高。多项式函数的系数值见表 3。

$$\begin{cases} \alpha = \alpha_0 + \alpha_1\varepsilon + \alpha_2\varepsilon^2 + \alpha_3\varepsilon^3 + \alpha_4\varepsilon^4 + \alpha_5\varepsilon^5 \\ n = n_0 + n_1\varepsilon + n_2\varepsilon^2 + n_3\varepsilon^3 + n_4\varepsilon^4 + n_5\varepsilon^5 \\ Q = q_0 + q_1\varepsilon + q_2\varepsilon^2 + q_3\varepsilon^3 + q_4\varepsilon^4 + q_5\varepsilon^5 \\ \ln A = \ln A_0 + \ln A_1\varepsilon + \ln A_2\varepsilon^2 + \ln A_3\varepsilon^3 + \ln A_4\varepsilon^4 + \ln A_5\varepsilon^5 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\alpha_0$ 、 $n_0$ 、 $q_0$ 、 $\ln A_0$  为常数项;  $\alpha_i$ 、 $n_i$ 、 $q_i$ 、 $\ln A_i$  ( $i=1, 2, 3, 4, 5$ ) 分别为式 (9) 中多项式的第  $i$  次项系数。

将 Arrhenius 方程进行转化, 用  $Z$  参数对  $\sigma$  进行描述, 并将各材料参数运用应变补偿进行修正, 得到 34CrNi3MoV 钢的本构方程, 其表达式为:

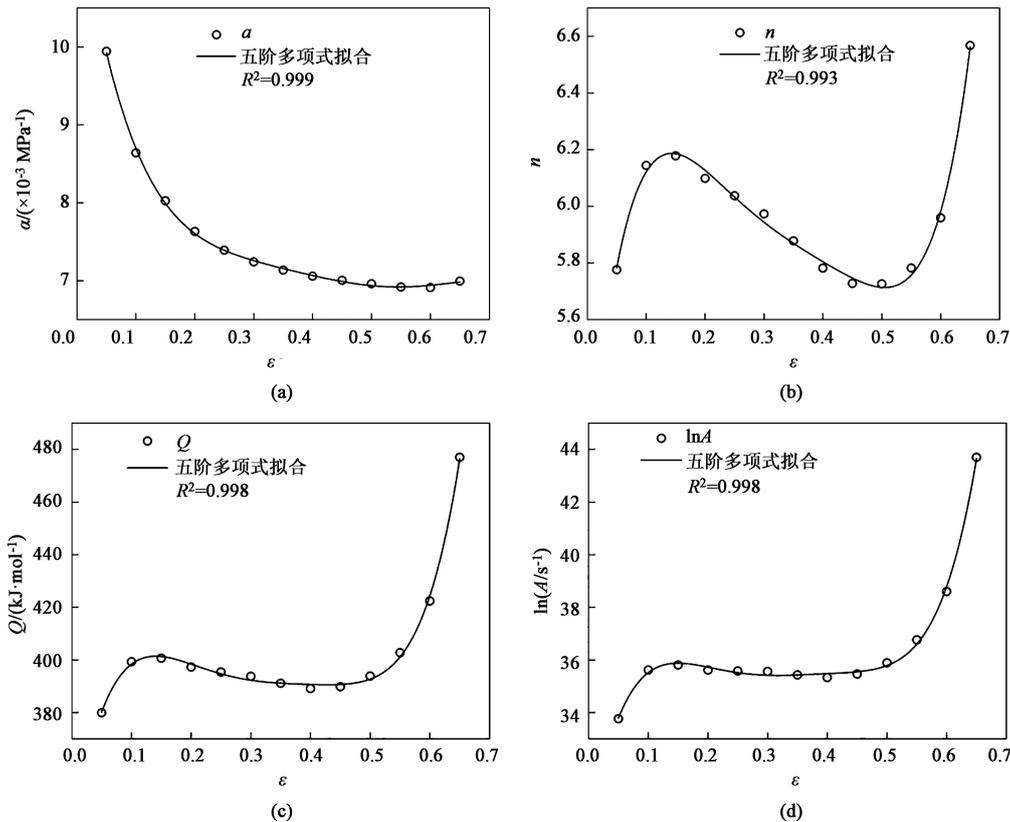


图 6  $\alpha$ 、 $n$ 、 $Q$ 、 $\ln A$  与应变的拟合图

(a)  $\alpha$ - $\varepsilon$  (b)  $n$ - $\varepsilon$  (c)  $Q$ - $\varepsilon$  (d)  $\ln A$ - $\varepsilon$

Fig. 6 Fitting diagrams of  $\alpha$ ,  $n$ ,  $Q$ ,  $\ln A$  and strain

表 3 Arrhenius 模型拟合材料常数  $\alpha$ 、 $n$ 、 $Q$  和  $\ln A$  的多项式系数

Table 3 Polynomial coefficients of material constants  $\alpha$ ,  $n$ ,  $Q$  and  $\ln A$  fitted by Arrhenius model

| $\alpha$            | $n$             | $q$               | $\ln A$              |
|---------------------|-----------------|-------------------|----------------------|
| $\alpha_0 = 0.012$  | $n_0 = 4.94$    | $q_0 = 331.78$    | $\ln A_0 = 29.34$    |
| $\alpha_1 = -0.051$ | $n_1 = 23.95$   | $q_1 = 1401.47$   | $\ln A_1 = 128.32$   |
| $\alpha_2 = 0.230$  | $n_2 = -165.05$ | $q_2 = -10233.34$ | $\ln A_2 = -929.03$  |
| $\alpha_3 = -0.536$ | $n_3 = 508.75$  | $q_3 = 33725.26$  | $\ln A_3 = 3091.22$  |
| $v_4 = 0.614$       | $n_4 = -757.67$ | $q_4 = -52745.07$ | $\ln A_4 = -4875.81$ |
| $\alpha_5 = -0.272$ | $n_5 = 442.31$  | $q_5 = 31981.48$  | $\ln A_5 = 2972.06$  |

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma &= \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left( \frac{Z}{A} \right)^{\frac{1}{n}} + \left[ \left( \frac{Z}{A} \right)^{\frac{2}{n}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \\ Z &= \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) \\ \alpha &= 0.012 - 0.051\epsilon + 0.230\epsilon^2 - 0.536\epsilon^3 + 0.614\epsilon^4 - 0.272\epsilon^5 \\ n &= 4.94 + 23.95\epsilon - 165.05\epsilon^2 + 508.75\epsilon^3 - 757.67\epsilon^4 + 442.31\epsilon^5 \\ Q &= 331.78 + 1401.47\epsilon - 10233.34\epsilon^2 + 33725.26\epsilon^3 - 52745.07\epsilon^4 + 31981\epsilon^5 \\ \ln A &= 29.34 + 128.32\epsilon - 929.03\epsilon^2 + 3091.22\epsilon^3 - 4875.81\epsilon^4 + 2972.06\epsilon^5 \end{aligned} \right. \quad (10)$$

2.3 本构方程的验证

为验证 34CrNi3MoV 钢的本构方程在试验范围内预测的准确性，将应变的值 (0.05~0.65，间隔为 0.05) 代入式 (10)，计算各变形参数下的预测

应力值，并与试验应力值进行对比，结果如图 7 所示。可以看出，在变形温度为 800 °C、应变速率为 0.01 s<sup>-1</sup> 时，本构方程计算的预测值与试验所得的应力值存在一定量的偏差，其余变形条件下两者的

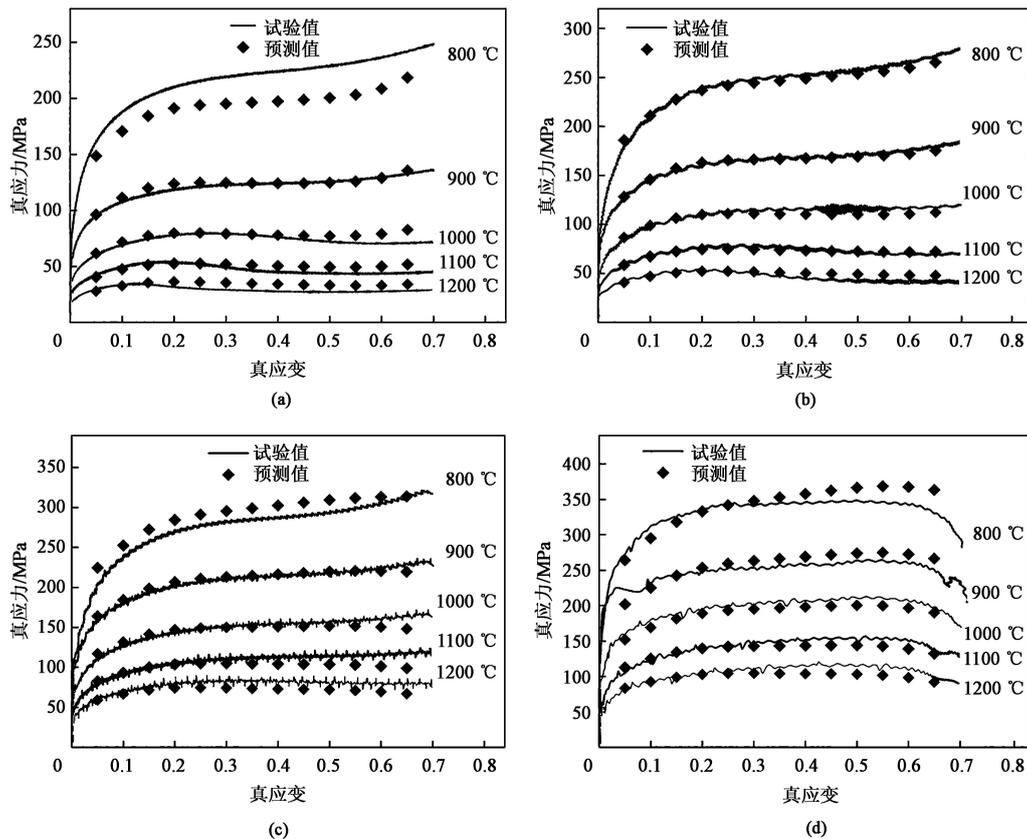


图 7 不同应变速率下模型预测值与试验值比较

(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>

Fig. 7 Comparison between predicted values of model and test values under different strain rates

吻合度较高。

为进一步描述 34CrNi3MoV 钢的本构方程的精确度, 引入相关系数  $R^2$  和平均相对误差  $R_{av}$  进行分析, 表达式如下:

$$R^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (E_j - \bar{E})(P_j - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (E_j - \bar{E})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^N (P_j - \bar{P})^2}} \quad (11)$$

$$R_{av} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left| \frac{E_j - P_j}{E_j} \right| \times 100\% \quad (12)$$

式中:  $E_j$ 、 $P_j$  分别为第  $j$  个试验值和第  $j$  个预测值,  $j=1, 2, 3, \dots, N$ ;  $N$  为试样总数;  $\bar{E}$ 、 $\bar{P}$  为试验值和预测值的平均值。

$R^2$  表示通过本构方程计算的预测值与试验中的应力值之间的线性关系强度。然而, 较高的  $R^2$  值并不一定意味着更好的拟合关系, 因为方程的变化趋势可能有偏差。而  $R_{av}$  可计算两者整体的平均相对误差,  $R_{av}$  值越小, 代表方程的可预测性就越好。如图 8 所示, 拟合了本构方程验证曲线, 发现各离散点基本分布在  $y=x$  附近, 其中,  $R^2$  为 0.994,  $R_{av}$  仅为 5.52%, 说明所构建的本构方程具有较高精度的预测性。

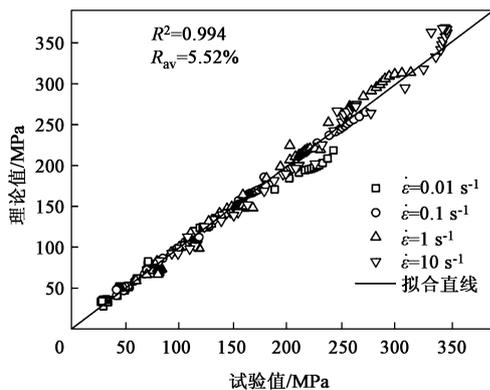


图 8 本构方程验证曲线

Fig. 8 Verification curve of constitutive equation

### 3 结论

(1) 34CrNi3MoV 钢在高温低应变速率时出现明显的 DRX 曲线特征, 说明 DRX 更容易发生在低应变速率和高温度下。此外, 应变速率为  $10 \text{ s}^{-1}$  时, 表现为稳态流变的特征。

(2) 根据 Arrhenius 模型计算了不同应变下材料参数  $\alpha$ 、 $n$ 、 $Q$  和  $\ln A$  的值, 并利用五次多项式拟合

了各材料参数与应变量的对应关系, 在此基础上构建出 34CrNi3MoV 钢的本构方程。

(3) 引入误差分析对 34CrNi3MoV 钢的本构方程进行验证, 通过本构方程得到的流动应力与试验结果较为接近, 其相关系数  $R^2$  为 0.994, 平均相对误差  $R_{av}$  仅为 5.52%。

#### 参考文献:

- [1] 禹兴胜, 武川, 石如星, 等. 55NiCrMoV7 模具钢锻造过程微观组织演化实验与模拟仿真 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (6): 174-184.  
Yu X S, Wu C, Shi R X, et al. Microstructure evolution of 55NiCrMoV7 die steel during forging processing: Experiment and simulation [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (6): 174-184.
- [2] Gan C L, Zhang K H, Qi W J, et al. Constitutive equations for high temperature flow stress prediction of 6063 Al alloy considering compensation of strain [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24 (11): 3486-3491.
- [3] 陈益哲, 庞玉华, 王建国, 等. GH2907 合金热变形本构方程 [J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48 (11): 3577-3584.  
Chen Y Z, Pang Y H, Wang J G, et al. Constitutive equation for hot deformation of GH2907 superalloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48 (11): 3577-3584.
- [4] 张兵, 岳磊, 陈韩锋, 等. 铸态 GH4169 合金热变形行为及三种本构模型对比 [J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50 (1): 212-222.  
Zhang B, Yue L, Chen H F, et al. Hot deformation behavior of as-cast GH4169 alloy and comparison of three constitutive models [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50 (1): 212-222.
- [5] 王巧玲, 唐炳涛, 郑伟. 一种修正的 Norton-Hoff 本构模型及实验验证 [J]. 中国机械工程, 2015, 26 (14): 1978-1982.  
Wang Q L, Tang B T, Zheng W. A modified Norton-Hoff constitutive model and experimental verification [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26 (14): 1978-1982.
- [6] 李全, 金朝阳. 采用改进和优化的 Zerilli-Armstrong 本构模型预测 AZ80 镁合金的高温流动应力 [J]. 中国有色金属学报, 2021, 31 (8): 2091-2100.  
Li Q, Jin C Y. Prediction of high temperature flow stress of AZ80 magnesium alloy by using modified and optimized Zerilli-Armstrong constitutive models [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31 (8): 2091-2100.
- [7] 彭付申, 陈鑫, 袁战伟, 等. W-20Cu 复合材料热变形行为及应变补偿本构模型 [J]. 兵器材料科学与工程, 2021, 44 (6): 41-46.  
Peng F S, Chen X, Yuan Z W, et al. Thermal deformation behavior and strain compensation constitutive model of W-20Cu composites [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2021, 44

- (6): 41-46.
- [8] 刘庆琦, 卢晔, 张翼飞, 等.  $Al_{19.3}Co_{15}Cr_{15}Ni_{50.7}$  高熵合金的热变形行为 [J]. 金属学报, 2021, 57 (10): 1299-1308.  
Liu Q Q, Lu Y, Zhang Y F, et al. Thermal deformation behavior of  $Al_{19.3}Co_{15}Cr_{15}Ni_{50.7}$  high entropy alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 57 (10): 1299-1308.
- [9] 李红英, 赵菲, 刘丹, 等. 工程机械用 Q1100 钢的热变形应变补偿本构方程 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2020, 51 (3): 608-618.  
Li H Y, Zhao F, Liu D, et al. Thermal deformation strain compensation constitutive equation for Q1100 steel for construction machinery [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2020, 51 (3): 608-618.
- [10] 梅金娜, 薛飞, 吴天栋, 等. FeCrNiMn 高熵合金本构方程的建立 [J]. 材料导报, 2021, 35 (S1): 336-341.  
Mei J N, Xue F, Wu T D, et al. Establishment of constitutive equation of FeCrNiMn high entropy alloy [J]. Materials Reports, 2021, 35 (S1): 336-341.
- [11] 王雅静, 刘宗昌, 段宝玉. 34CrNi3MoV 钢组织细化工艺的研究 [J]. 兵器材料科学与工程, 2013, 36 (1): 128-132.  
Wang Y J, Liu Z C, Duan B Y. Microstructure of refined 34CrNi3MoV steel [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2013, 36 (1): 128-132.
- [12] 赵勇桃, 刘宗昌, 王玉峰. 34CrNi3MoV 钢的混晶及消除措施 [J]. 金属热处理, 2007, 32 (5): 75-77.  
Zhao Y T, Liu Z C, Wang Y F. Mixed grain and elimination measure of 34CrNi3MoV steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2007, 32 (5): 75-77.
- [13] 陈曦, 亓耀国, 史晓楠, 等. IN718Plus 高温合金的动态再结晶行为及模型研究 [J]. 稀有金属, 2019, 43 (12): 1260-1268.  
Chen X, Qi Y G, Shi X N, et al. Behaviors and model of dynamic recrystallization of nickel-based superalloy IN718Plus [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2019, 43 (12): 1260-1268.
- [14] Sellars C M, Mcgertag W J. On the mechanism of hot deformation [J]. Acta Metallurgica, 1996, 14 (9): 11-36.

## 关于开展“锻压企业质量工程师”培训暨锻压标准宣贯工作的通知

各有关单位、各有关人员:

为促进我国锻压企业实行规范化生产, 提高企业生产技术水平、管理水平和市场竞争能力, 满足各企业对质量管理体系和安全生产管理体系的需求, 同时, 提高锻压企业技术人员和质量管理人员对相关国家与行业标准的理解和使用能力, 全国锻压标准化技术委员会经研究决定, 自 2013 年起, 在全国范围内开展“锻压企业质量工程师”的培训与认证工作, 以及锻压标准宣贯工作。为配合此项工作, 本标委会将按“模锻”、“自由锻”、“特种成形”、“冲压”等专题陆续举办相关培训班, 截止目前已成功举办十二期, 取得了很好的效果, 得到广大锻压企业认可和支持。

第十三期“‘锻压企业质量工程师’培训班——模锻工艺与标准”将于 2023 年举办。请各单位尽快报名, 有关事宜通知如下:

### 一、报名条件

具备中专及以上学历的企业负责人、质量主管、安全卫生主管、标准化工作人员和锻压专业技术人员。

符合报名条件的上述人员, 须由本人填写报名表, 并经单位审核同意后方可报名。

### 二、培训内容

- (1) 自动化、智能化精密锻造生产线
- (2) 锻造车间安全生产与环境保护要求
- (4) 模锻工艺过程控制及模锻件质量控制与评定
- (5) 锻后热处理工艺的影响因素及控制要点
- (6) 摩擦与润滑条件对模锻成形的影响
- (7) 影响锻模寿命的因素及如何提高锻模寿命

(3) 锻造生产缺陷及控制措施

(8) 数值模拟技术在精密模锻工艺的应用现状及发展趋势

(9) 企业参观

(10) 考试与测评

### 三、主讲教师

我国锻压领域知名专家、企业负责人、高级工程师、现场管理人员、知名院校教授等。

### 四、培训证书

每人准备 2 寸照片 2 张, 培训考试合格者, 由全国锻压标准化技术委员会颁发资格证书, 有效期 5 年。

### 五、培训时间及地点

1. 培训时间: 2023 年 5 月 19-22 日。
2. 培训地点: 江苏省盐城市。

### 六、报名方式

欲参加培训的学员, 请登录网址 <http://www.fstjournal.net/>, 在下载中心下载回执表, 通过 E-mail 发至全国锻压标准化技术委员会秘书处。

### 七、联络方式

全国锻压标准化技术委员会

联系人: 林玉彤、魏巍、金红

地址: 北京市海淀区学清路 18 号 709 室 (100083)

电话及传真: 010-62920652; 18811346037;  
13439515704

E-mail: [fst\\_linyutong@163.com](mailto:fst_linyutong@163.com);

[dyjsjournal@163.com](mailto:dyjsjournal@163.com);

[duanya2005@126.com](mailto:duanya2005@126.com)

全国锻压标准化技术委员会