

非调制钢 38MnVS6 高温本构模型开发

潘鸿晨

(恒大恒驰新能源汽车研究院(上海)有限公司 上海 200000)

摘要: 采用 Gleeble-3500 热模拟试验机对非调制钢 38MnVS6 在 $900^{\circ}\text{C} \sim 1200^{\circ}\text{C}$ 、应变率为 $0.01 \sim 5/\text{s}$ 进行热压缩实验, 获得其流动应力曲线。采用基于粒子群优化算法确定 Arrhenius 方程参数。统计该模型与实验值之前的相关系数和平均误差, 结果表明, 基于粒子群优化算法能够获取较高精度的本构模型, 更适合于高温成形的仿真模拟。

关键词: 热变形; 本构模型; 流变应力; 非调制钢

0 引言

目前, 有限元技术在热成形过程得到了大量的应用, 有限元仿真技术对工业生产效率有着较大推动作用。有限元仿真的精度依赖于材料的高温本构关系, 因此在通过有限元进行热变形分析之前需建立准确的高温本构关系。所谓本构关系是指应力和应变之间的关系。材料在高温下的内在结构关系往往表现出与应变率有关的模式, 钢材料在高温下的典型应力-应变曲线见图 1。实验得出的钢铁材料在高温下的屈服应力-应变曲线在弹性变形阶段通常是不明显的, 流变应力曲线上开始出现永久应力变化的点通常被定义屈服应力。

钢铁材料在高温下变形时包含硬化、再结晶及回复等变化, 通常使用 Laasraoui 和 Jonas 方法, 具体将高温流变应力曲线划分成两个阶段:

(1) 加工硬化-动态回复阶段, 图 1 显示了流动应力曲线的前一部分。主要的变形机制是加工硬化和动态恢复之间的相互作用, 产生于高温下钢铁变形的初始阶段, 流变应力随应力增加而迅速增加。

(2) 动态再结晶阶段: 这个阶段继续变形, 当变形达到临界值应变时, 此刻钢材料的微观结构发生动态再结晶的变化, 需要注意的是随着变形的增加, 随之的流变应力值增加较慢。而为了维持这一变化, 持续施加载荷, 动态再结晶的分数也随着增加, 在达到峰值应力后, 该点的流变应力开始下降, 最后达到稳定状态, 通常称为稳定应力。如果材料在变形过程中动态再结晶不发生, 在变形过程中, 钢铁材料的内部加工硬化和动态反向软化机制的相互作用达到平衡, 此时流变应力曲线达到饱和, 如图 1 中的虚线轨迹所示。该应力通常被称为饱和应力。由于钢铁材料中与高温有关的流变应力和变形的复杂性, 很难用一个单一的方程式来模拟其高温内部结构。现在唯象本构模型中普遍接受的做法是根据实验结果的两个阶段分别建立本构模型, 这样也能够反映材料在高温变形下微观组织的变化特征。由于临界应变和峰值应变的值非常接近, 因此可认为在应变达到最大应变之前的硬化和动态恢复阶段, 以及达到最大应变之后的动态再结晶阶段, 据此构建分段模型。然而, 现有技术存在一些重要问题:

(1) 对不同温度和应变速率进行处理时, 较难提取合

适的特征值, 从而影响高温本构模型的预测精度。

(2) 由于高温本构模型为分段函数形式表示, 现有技术不能有效确定不同温度及应变速率下的分段点。

(3) 当前技术无法完全利用在温度和压力下不同情况下的高温流变应力曲线, 从而无法获得高温本构的统一模型参数, 故导致无法有效预测不同温度和压力下的应力应变曲线, 同样当前的标定方法效率不高, 不能保证精度。

本文以非调制钢 38MnVS6 为例, 采用 Gleeble-3500 热模拟试验机对非调制钢 38MnVS6 在 900°C 、 1000°C 、 1100°C 及 1200°C 、应变率为 $0.01/\text{s}$ 、 $0.1/\text{s}$ 、 $1/\text{s}$ 及 $5/\text{s}$ 进行热压缩实验, 获得其流动应力曲线。提出通过基于粒子群优化算法建立其高温本构模型方法, 该方法能够快速高效的确定高温本构模型参数。

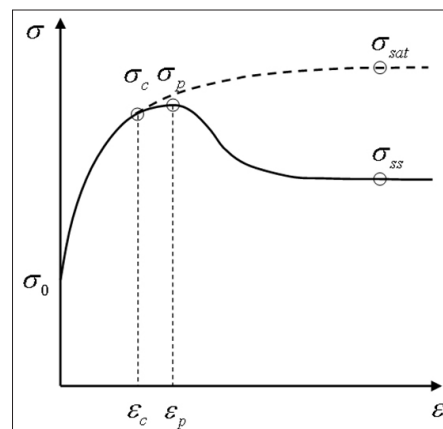


图 1 钢铁材料常见的高温流变应力曲线

1 加工硬化-动态回复阶段的模型

Bergstrom 提出的描述奥氏体高温塑性变形过程的加工硬化和动态回复的形式如下:

$$d\rho/d\varepsilon = U - \Omega\rho \quad (1)$$

(1) 式中, ρ --- 错密度, ε -- 应变, U - 加工硬化, Ω -- 变形动态回复量。

如果与应变无关的量是 U 和 Ω , (1) 式差分方程可求解

$$\text{当 } \varepsilon = 0 \text{ 时, } \rho = \rho_0 \quad (2)$$

因此, 热变形过程的位错密度变化可表示为:

$$\rho = e^{-\Omega\varepsilon} \left((U/\Omega)e^{\Omega\varepsilon} + \rho_0 - U/\Omega \right) \quad (3)$$

利用式 (1) 计算稳态时 ($d\rho/d\varepsilon=0$) 的位错密度, 可得:

$$\rho_{sat} = U / \Omega \quad (4)$$

结合 Honeycombe 提出的关系式, 即经典的应力和位错密度关系:

$$\sigma = \alpha G b \rho^{0.5} \quad (5)$$

(5) 式中, 剪切模量 G , 材料因子 α , Burgers 矢量 b 。

结合式 (3)、(4) 和 (5), 由于奥氏体热变形过程的动态回复导致产生的流变应力的表达式由以下形式给出:

$$\begin{aligned} \sigma &= \alpha G b \rho^{0.5} = \alpha G b \left[e^{-\Omega \varepsilon} \left((U / \Omega) e^{\Omega \varepsilon} + \rho_0 - U / \Omega \right) \right]^{0.5} \\ &= \left[(\alpha G b)^2 \left((U / \Omega) e^{\Omega \varepsilon} + \rho_0 - U / \Omega \right) e^{-\Omega \varepsilon} \right]^{0.5} \\ &= \left[(\alpha G b)^2 (U / \Omega) + (\alpha G b)^2 (\rho_0 - U / \Omega) e^{-\Omega \varepsilon} \right]^{0.5} \\ &= \left\{ (\alpha G b \sqrt{U / \Omega})^2 + \left[(\alpha G b \sqrt{\rho_0})^2 - (\alpha G b \sqrt{U / \Omega})^2 \right] e^{-\Omega \varepsilon} \right\}^{0.5} \quad (6) \\ &= \left\{ (\alpha G b \sqrt{\rho_{sat}})^2 + \left[(\alpha G b \sqrt{\rho_0})^2 - (\alpha G b \sqrt{\rho_{sat}})^2 \right] e^{-\Omega \varepsilon} \right\}^{0.5} \\ &= \left[\sigma_{sat}^2 + (\sigma_0^2 - \sigma_{sat}^2) e^{-\Omega \varepsilon} \right]^{0.5} \quad \varepsilon < \varepsilon_p \end{aligned}$$

或

$$\sigma^2 = \sigma_{sat}^2 + (\sigma_0^2 - \sigma_{sat}^2) e^{-\Omega \varepsilon} \quad (\varepsilon < \varepsilon_p) \quad (7)$$

其中, ε_p 为峰值应变, 代表临界应变, 即发生动态再结晶的表达式为:

$$\varepsilon_p = A Z^m \quad (8)$$

σ_0 为初始应力, 表达式为

$$\sigma_0 = A' Z^{m'} \quad (9)$$

2 传统方法求解动态再结晶模型

2.1 动态再结晶模型

用 Jonson-Mehl-Avrami 方程描述动态再结晶的力学规律:

$$X_{DRX} = 1 - \exp \left(-k \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_p} \right)^n \right) \quad (10)$$

动态再结晶的份数应用饱和应力和稳态应力的概念可以定义为:

$$X_{DRX} = \frac{\sigma_{sat} - \sigma}{\sigma_{sat} - \sigma_{ss}} \quad (11)$$

结合 (10) 和 (11) 两式在动态再结晶阶段, 得到了材料的流变学应力表达式:

$$\sigma = \sigma_{sat} - (\sigma_{sat} - \sigma_{ss}) \left\{ 1 - \exp \left[-k \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_p} \right)^n \right] \right\} \quad (\varepsilon \geq \varepsilon_p) \quad (12)$$

因此, 材料在高温下的总的模型可以表示如下:

$$\sigma = \begin{cases} [\sigma_{sat}^2 + (\sigma_0^2 - \sigma_{sat}^2) \cdot \exp(-\Omega \varepsilon)]^{0.5} & \varepsilon < \varepsilon_p \\ \sigma_{sat} - (\sigma_{sat} - \sigma_{ss}) \cdot \left\{ 1 - \exp \left[-k \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_p} \right)^n \right] \right\} & \varepsilon \geq \varepsilon_p \end{cases} \quad (13)$$

具体到某一种材料时, 模型参数可以通过测量的应力-应变曲线的回归得到。

在给定的温度和应变率下, 应力转变为应变的速度称为应变率 θ :

$$\theta = (\partial \sigma / \partial \varepsilon)_{\dot{\varepsilon}, T = \text{Const}} \quad (14)$$

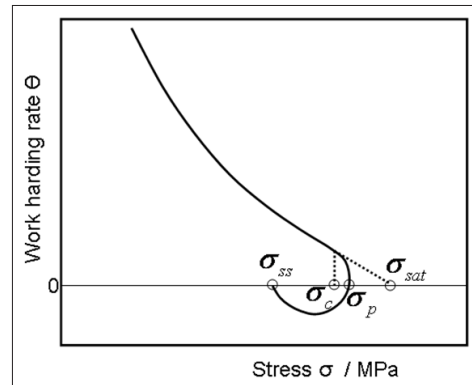


图2 应力和应变曲线的特征值解

通过对应力-应变曲线的微分, 得到相应的曲线, 这就是 θ - σ 曲线, 如上图2, 应力-应变曲线的特征值可以从曲线中得出: 对 θ - σ 曲线进行外推, $\partial \sigma / \partial \varepsilon = 0$ 时为饱和应力 σ_{sat} , σ_p 这是理论值, 在没有动态回复的情况下, 它大于实际值 σ_p , 因此在模型中通过动态恢复参数进行修正, 即通过 Ω 对 σ_{ss} 修正; 以及曲线 θ - σ 的截距和轴线 $\theta = 0$ 是实际的峰值 σ_p 和稳态应力 σ_{ss} 。

2.2 计算形变激活能

塑性变形是钢铁材料的一个热/力激活的过程, 可用双曲线方程描述 σ_{sat} , $\dot{\varepsilon}$, T 关系:

$$\dot{\varepsilon} = A [\sinh(\alpha \sigma_{sat})]^m \exp(-Q / RT) \quad (15)$$

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp[Q / RT] \quad (16)$$

结合 (15) 和 (16) 两式得:

$$Z = A [\sinh(\alpha \sigma_{sat})]^m \quad (17)$$

式中, α 为优化因子, 一般取值在 0.010-0.015 之间, 本研究取为 0.012。

对 (15) 式微分:

$$Q = \frac{\partial \ln [\sinh(\alpha \sigma_{sat})] / \partial \frac{1}{T}}{\partial \ln [\sinh(\alpha \sigma_{sat})] / \partial \ln \dot{\varepsilon}} \bigg|_{\substack{\dot{\varepsilon} = \text{const} \\ T = \text{const}}} = \frac{K_1}{K_2} \quad (18)$$

通过拟合得到了在每个变形率和每个变形温度下的线性图。即: $\frac{1}{T} - \ln [\sinh(\alpha \sigma_{sat})]$ 和 $\ln \dot{\varepsilon} - \ln [\sinh(\alpha \sigma_{sat})]$ 的线性图。

2.3 建立流变应力特征值模型

对 (17) 式取对数:

$$\ln Z = \ln A + m \ln [\sinh(\alpha \sigma_{sat})] \quad (19)$$

$$\sigma_{sat} = \frac{1}{\alpha} \sinh^{-1} \left[(Z/A)^{1/m} \right] \quad (20)$$

可得线性回归:

$$\sigma_{sat} = 83.33 \sinh^{-1} (3.6 \times 10^{-3} Z^{0.216}) \quad (21)$$

同理可得:

$$\sigma_{ss} = 83.33 \sinh^{-1} (2.8 \times 10^{-3} Z^{0.219}) \quad (22)$$

实验数据表明, 初始应力和峰值强度呈负相关, 即温

度的升高应力和峰值强度降低,后又随着增加是应力速度提升,因此初始电压和峰值强度可以表示为:

$$\varepsilon_p = A d_0^q Z^m \quad (8)$$

$$\sigma_0 = A' d_0^{q'} Z^{m'} \quad (9)$$

2.4 建立动态回复模型参数

如前所述,流变应力在加工硬化和动态回复阶段的表现形式如下:

$$\sigma^2 = \sigma_{sat}^2 + (\sigma_0^2 - \sigma_{sat}^2) e^{-\Omega \varepsilon} \quad (7)$$

考虑动态回复是一个与变形温度和应变率有关的过程,所以动态回复系数 Ω 可看作是一个与变形温度和应变率有关的量,对所得 Ω 值进行非线性回归。

2.5 建立动态再结晶模型参数

根据线性回归,得到的数值 n 和与温度 k 呈负相关,随着温度的增加而减少,随着应变率的增加而增加,因此,可构造 n 和 k 的形式如下:

$$n = A_1 Z^{m_1} \quad (23)$$

$$k = A_2 Z^{m_2} \quad (24)$$

通过对实验数据回归得到。

3 基于约束粒子群优化算法求解

3.1 高温本构模型选取及求解过程

使用粒子群算法来优化相关材料本体的参数,粒子群的数量设定为 500 个。

粒子的速度 $v[i]$ 和位置 $present[i]$ 计算公式如下:

$$v[i] = w \times v[i] + c1 \times rand() \times (pbest[i] - present[i]) + c2 \times rand() \times (gbest[i] - present[i])$$

$$present[i] = present[i] + v[i]$$

其中,惯性权重 w 为 0.7368,第一学习因子 $c1$ 为 1.5926,第二学习因子 $c2$ 为 1.2962, $pbest[i]$ 为个体最优, $gbest[i]$ 为全局最优。

适应度函数 $fitness$ 计算公式如下:

$$fitness = \sum_{i=1}^n |f_1(\varepsilon_p, T, \dot{\varepsilon}) - f_2(\varepsilon_p, T, \dot{\varepsilon})|$$

其中, $f_1(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon})$ 和 $f_2(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon})$ 分别是由材料本构方程计算的应力值和测量值。

一种基于有限粒子群算法的高温流变应力曲线处理和预测方法,步骤如下:

步骤 1: 输入一系列温度和应变率的原始流动应力应变数据;

步骤 2: 对曲线进行光滑处理;

步骤 3: 基于高温流变应力曲线确定其特征值上下限范围,进而反求出参数范围;

步骤 4: 选择与应变率有关的材料本构方程。

步骤 5: 应用粒子群算法来优化材料本构方程的参数。

步骤 6: 相关本构成方程中的参数表达。

步骤 7: 根据材料的高温构成模型的参数,预测任何温度下或不同应变率下的应力-应变曲线。

3.2 求解非调制钢 38MnVS6 高温本构模型

本研究采用 $\phi 6 \times 10$ mm 的圆柱体试样,在 Gleeble 3500 热力模拟试验机上实测了非调制钢 38MnVS6 在温度为 $00 \sim 1200^\circ\text{C}$,应变速率为 $0.001 \sim 10$ /s 之间的应力-应变曲线。

对应力-应变曲线进行微分,得到相应的 $\theta - \sigma$ 曲线,从中可以得出应力-应变曲线的特征值: $\theta - \sigma$ 曲线外推 $\partial \sigma / \partial \varepsilon = 0$ 时的应力值是饱和应力 σ_{sat} ,如果没有发生动态回复, σ_p 理论上会比实际值高。曲线 $\theta - \sigma$ 和轴线 $\theta = 0$ 的交点是实际的峰值 σ_p 和稳态应力 σ_{ss} 。为了得到材料在 $900 \sim 1200^\circ\text{C}$ 下的加工硬化率与应力的关系,对每条应力-应变曲线进行了微分。并进一步获得了不同条件下的特征值 σ_p 、 σ_{sat} 、 σ_{ss} 大致范围,进而求出相关系数取值范围。最终求得本构模型中的参数如下所示:

$$\sigma = \begin{cases} [\sigma_{sat}^2 + (\sigma_0^2 - \sigma_{sat}^2) \exp(-\Omega \varepsilon)]^{0.5} & \varepsilon < \varepsilon_c \\ [\sigma_{sat}^2 + (\sigma_0^2 - \sigma_{sat}^2) \exp(-\Omega \varepsilon)]^{0.5} - (\sigma_{sat} - \sigma_{ss}) \{1 - \exp[-k(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_p})^n]\} & \varepsilon \geq \varepsilon_c \end{cases}$$

$$\sigma_{sat} = 85.4890 \sinh^{-1}(5.6948 \times 10^{-3} Z^{0.1991})$$

$$\sigma_{ss} = 85.4890 \sinh^{-1}(2.1025 \times 10^{-3} Z^{0.2275})$$

$$\varepsilon_p = 1.29 \times 10^{-2} Z^{0.1109} \quad Z = \dot{\varepsilon} \exp[319158/RT] \quad \varepsilon_c = 0.75 \varepsilon_p \quad \sigma_0 = 1.3953 Z^{0.0708}$$

$$\Omega = 11.8161 Z^{-0.0097} \quad k_d = 1.8895 \quad n_d = 2.0782$$

为获得优化的材料本构参数,通过 Matlab 编程实现粒子群算法优化获得的高温本构模型参数,如图 3 所示。基于上述材料本构参数,计算不同温度及应变率下应力-应变曲线和实测曲线相比一致性较好。

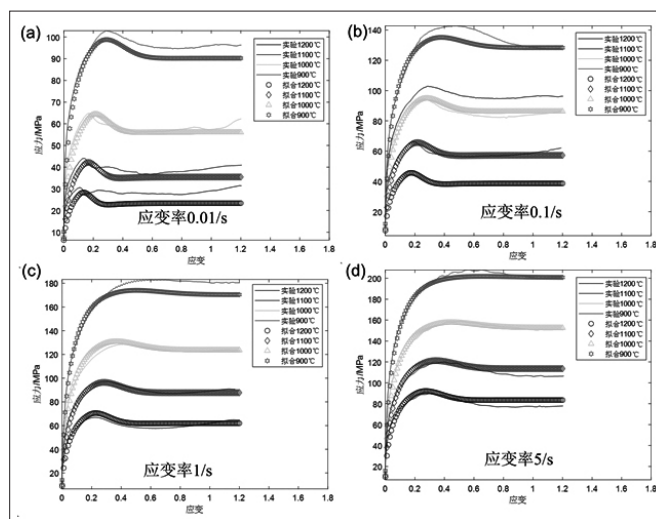


图 3 非调制钢 38MnVS6 应力-应变曲线的实测值和拟合值的比较

4 结语

本文提出了基于粒子群优化算法求解高温本构模型的新思路,以非调制钢 38MnVS6 为例,结果显示粒子群优化算法能够较准确求解出其高温本构模型。该方法基于对不同温度和应变率进行处理,确定特征值范围作为粒子群优化算法约束条件,充分利用不同温度和应变率下的高温流变应力曲线,建立相应的目标函数,通过粒子群优化算法获得高

(下转第 27 页)

法清除。磨具应为仅含碳化硅、氧化铝或金刚石磨料的磨具，该磨具必须是未使用过的或此前仅在 718 合金上使用过的。打磨过程中应避免局部过热，缺陷清除部位与周围表面应平滑过渡。清除缺陷后的尺寸仍应符合交货尺寸的规定。

6 项目成果

项目质量控制过程中，结合合同内容来看，技术文件对性能要求是相当高的，除了常规的常温拉伸试验、硬度试验、冲击试验外，还需要进行 200℃、300℃、400℃ 各温度等级的高温拉伸试验和 649℃ 的高温持久强度试验，经过对热处理的高要求，所有试验均满足合同所附的技术要求。生产材料经检测后，与质量标准相对应，经过质量控制和检验后，材料达到质量标准，合同得以顺利执行。

经此合同的经验积累及成熟技术，我司在镍基合金钢方面产生的直接经济效益已突破 250 万元，使公司在主打的特材紧固件方面更有竞争力，也助推了公司成功通过了“上海市科技小巨人企业”的验收。

在此期间，公司参与了国家标准 GB/T 3098.25-2020、GB/T 3098.24-2020、GB/T 3098.23-2020 的制定，已于 2020 年 10 月 1 日颁布实施。

7 结语

综上所述，镍基合金钢紧固件具有强度高、耐高温的

特点，对于保障有关设施的紧固安全、稳定具有重要意义。但镍基合金钢紧固件的生产过程中，涉及的事项较多，为了确保质量，给予科学合理的生产质量管控具有重要意义，如加强原材料的质量验证，确保工艺流程的可靠等，进而保障紧固件的生产质量。与此同时，紧固件生产完成后，还应进行科学合理的检验工作，以确保紧固件的生产质量符合要求，能够真正保证有关工作的顺利开展。

参考文献：

- [1] 刘双明. 压力容器制造质量控制与监督检验措施研究论述 [J]. 化工管理, 2019,512(05):50-50.
- [2] 孟凯. 压力容器制造质量控制与监督检验措施分析 [J]. 商品与质量, 2019,000(008):167.
- [3] 陈萍. 机械产品质量控制与抽样检验探析 [J]. 数码世界, 2019,168(10):283-283.
- [4] 郭勇. 汽车轮毂机加工质量控制与检验探析 [J]. 卷宗, 2019,009(020):299.
- [5] 杨亚飞. 浅谈紧固件热处理的质量管理 [J]. 商品与质量, 2019,000(023):286-287.

作者简介：张安平（1985-），男，汉族，江苏徐州人，本科，助理工程师，研究方向：质量管理。

（上接第 24 页）

温本构中统一的模型参数。

参考文献：

- [1] 王进，陈军，赵震，等. 非调质钢 F40MnV 高温流动应力模型研究 [J]. 塑性工程学报, 2005, (05): 54-57.
- [2] Su J H, Sun H, Ren F Z, et al. Simulation of microstructure evolution of TA10 titanium alloy based on the Laasraoui-Jonas dislocation density theory[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25(1): 199-205.
- [3] 汪磊. 钢活塞锻造过程的数值模拟分析 [D]. 上海交通大学, 2009.
- [4] 王进. 非调质钢三维复杂热锻造过程多物理场数值模拟研究 [J]. 上海交通大学, 2007.
- [5] Bergström Y. A dislocation model for the stress-strain behaviour of polycrystalline α -Fe with special emphasis on the variation of the densities of mobile and immobile

dislocations[J]. Materials Science & Engineering, 1970, 5(4): 193-200.

- [6] Honeycombe R, Mehl R F. Transformation from austenite in alloy steels[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1976, 7(7): 915-936.
- [7] Málek J. The applicability of Johnson-Mehl-Avrami model in the thermal analysis of the crystallization kinetics of glasses[J]. Thermochimica Acta, 1995, 267: 61-73.
- [8] 金蕾，徐有容. C-Mn 钢热变形行为及其流变应力模型的研究 [J]. 上海大学学报（自然科学版）, 1999, 5(2): 123-127.
- [9] 沈显照，王群杰，肯诺. 一种波导高通滤波器的优化设计 [J]. 火控雷达技术, 2011, 000(004): 70-73.

作者简介：潘鸿晨（1985.02-），男，汉族，江苏连云港人，硕士研究生，工程师，研究方向：金属材料。