34Cr2Ni2Mo 合金结构钢热本构方程研究

胡丰泽[1]，林军[2,3]，陈文[3]，康凤[2,3]，胡传凯[2,3]，黄树海[2,3]，陈强[2,3]

（1.海军装备部，山西 大同 037036；2.国防科技工业精密塑性成形技术研究应用中心，重庆 400039；3.中国兵器工业第五九研究所，重庆 400039）

摘要：目的 基于实测的流动应力曲线，构建可用于热成形模拟的 34Cr2Ni2Mo 合金结构钢高精度本构方程。**方法** 采用热模拟试验测试该材料的流动应力曲线，在动态再结晶的条件下，构建了基于物理机制的热本构方程，通过曲线拟合获得了本构方程参数。**结果** 热模拟试验测试的流动应力曲线具有明显的动态再结晶现象，构建的本构方程包括流动应力、屈服/饱和/临界/稳态应力、发生 50%再结晶的时间等内变量计算方程，在参数拟合后对其误差分析表明，本构方程计算的流动应力偏差控制在±15 MPa 以内。**结论** 34Cr2Ni2Mo 合金结构钢本构方程能够较为准确的描述该钢在热成形过程的流动应力变化特征，具有较强的数值稳定性和外延拓展性。

关键词：34Cr2Ni2Mo 钢；流动应力；内变量；本构方程

DOI：10.3969/j.issn.1674-6457.2016.06.013

中图分类号：TG142.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-6457 (2016)06-0070-06

Constitutive Equation of 34Cr2Ni2Mo Alloy Structural Steel for Hot Working

HU Feng-ze[1], *LIN Jun*[2,3], *CHEN Wen*[3], *KANG Feng*[2,3], *HU Chuan-kai*[2,3], *HUANG Shu-hai*[2,3], *CHEN Qiang*[2,3]

(1.Navy Equipment Department, Datong 037036, China; 2.National Research and Application Center of Precise Forming, Chongqing 400039, China; 3.Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: The work aims to build the high-precision constitutive equation of 34Cr2Ni2Mo alloy structural steel used to simulate thermal forming based on the measured flow stress curves. The flow stress curves of the material were tested through the thermal simulation. The hot constitutive equation was built based on the physical mechanism under the conditions of dynamic recrystallization. The parameters of constitutive equation were obtained through curve fitting. The flow stress curves of the material tested through thermal simulation had obvious dynamic recrystallization. The constitutive equation included equations of internal variables, such as flow stress, yield/saturated/critical/steady stress and the time for occurrence of 50% recrystallization. After parameter fitting, the error analysis indicated that the flow stress deviation calculated by the constitutive equation should be controlled within ±15 MPa. The constitutive equation of 34Cr2Ni2Mo alloy structural steel can describe the change features of flow stress in the of forming process of the steel in a relatively correct manner, which is of good numerical stability and extensionality.

KEY WORDS: 34Cr2Ni2Mo steel; flow stress; internal variable; constitutive equation

34Cr2Ni2Mo 钢是一种高强合金结构钢，淬透性好，具有优异的综合力学性能，常用于重型柴油发动机曲轴[1]、连杆[2]及其他重载零件。在这些重载零部件制造的整个工序中，采用精密成形工艺加

收稿日期：2016-10-25

作者简介：胡丰泽（1971—），男，山西大同人，高级工程师，主要研究方向为军用柴油发动机设计开发与质量监督。

通讯作者：林军（1980—），男，江苏人，博士，高级工程师，主要研究方向为精密塑性成形工艺与工装、计算塑性力学等。

工出余量小、性能优的锻坯，与自由锻相比，具有节约原材料、减少后续加工工序的优点。为了使成形工艺满足实际生产需求，常采用有限元模拟技术验证和优化工艺，有限元模拟技术呈现出不可替代的作用[3—5]。为了使得有限元模拟结果具有一定的参考价值，本构方程是最为关键的一个模型，本构方程的精度直接决定了有限元模拟结果的精度。

金属材料本构方程的建模方法主要有基于试验现象和基于物理机制 2 种方法[6]。基于物理机制的本构方程是以热塑性变形过程的变形机理为基础[7]，采用内变量为参数，描述流动应力曲线的变化趋势、坯料内部晶粒与相变的一类本构方程[8]。这类方程能够较为准确的描述热塑性变形过程的再结晶软化现象，广泛应用于碳钢、低合金钢、合金钢等材料的流动应力与微观组织演变过程的描述[9—11]。

文中对 34Cr2Ni2Mo 合金结构钢在 950~ 1150 ℃、应变速率为 0.001~1 s^{-1} 条件下，通过热模拟试验对 34Cr2Ni2Mo 合金结构钢进行流动应力测试，采用物理机制方法构建本构模型，并引入 Zener-Hollomon 参数描述该本构方程的内变量演变规律，通过拟合建立了 34Cr2Ni2Mo 合金结构钢的高精度本构方程，满足热塑性成形工艺模拟的精度要求。

1　热模拟试验材料及方法

34Cr2Ni2Mo 合金结构钢的化学成分主要为 C, Cr, Ni, Mo, Mn, Si, P, S，所占质量分数分别为 0.34%, 1.80%, 1.90%, 0.25%, 0.80%, 0.25%, 0.015%, 0.015%。热模拟试验试样尺寸为 Φ10 mm×12 mm，取自 Φ80 mm 的退火态锻材，其组织见图 1。等温压缩试验在热模拟试验机上进行，试验的温度参数为 950, 1000, 1050, 1100, 1150 ℃，应变速率为 0.001, 0.01, 0.1, 1 s^{-1}，试样加热参数见图 2。试验中试样两端垫上石墨片以增加润滑，所有试样的最终真应变为 0.80。

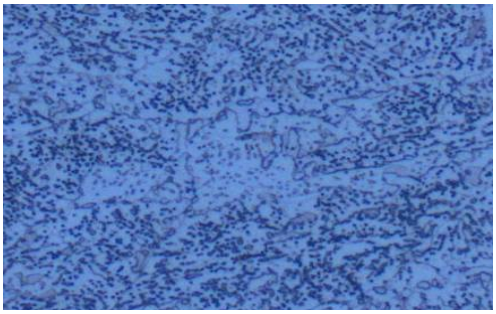


图 1　热模拟试验用 34Cr2Ni2Mo 合金结构钢原始微观组织(500×)

Fig.1 Specimen microstructure of 34Cr2Ni2Mo alloy steel

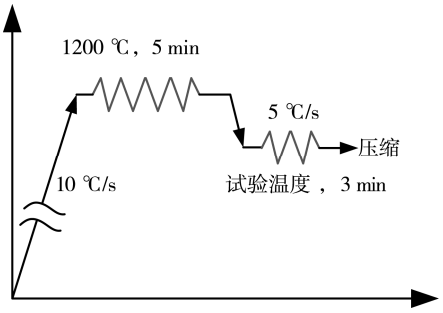


图 2　等温压缩试验过程试样加热参数

Fig.2 Heating parameters for the isothermal compression tests

2　热模拟试验结果

34Cr2Ni2Mo 钢在热模拟试验条件下获得的典型流动应力曲线见图 3，1100 ℃下的流动应力应变曲线见图 3a，变形速率为 0.1 s^{-1} 下的流动应力曲线见图 3b。从图 3 可以看出，34Cr2Ni2Mo 钢在 950~1150 ℃, 0.001~1 s^{-1} 试验条件下，所有曲线均出现了峰值应力现象，该钢的高温软化机制主要是动态再结晶，并且在 1100 ℃, 0.001 s^{-1} 的条件下，呈现了周期性动态再结晶现象。

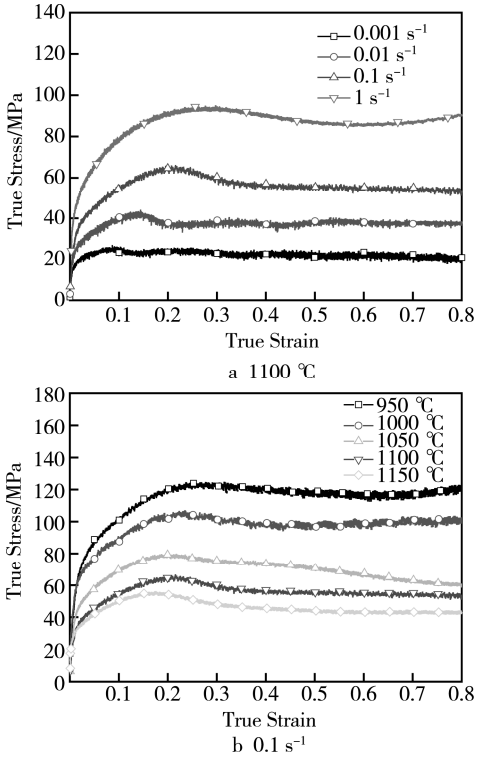


图 3　34Cr2Ni2Mo 合金结构钢流动应力曲线

Fig.3 Flow stress curves of 34Cr2Ni2Mo alloy steel

3　34Cr2Ni2Mo 钢热本构方程

本构方程能否准确描述热模拟试验获得的流

动应力曲线，是开展有限元模拟的必备基础。文中本构方程采用 Sah 推荐的流动应力计算方程[12]，并采用了临界应力 σ_c 作为判断是否产生动态再结晶的判断条件，所以本构方程分为 2 个部分：

1) 当流动应力 σ 小于再结晶发生的临界应力 σ_c 时，流动应力计算方程为：

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon}=\frac{\mu}{B}\left(1-\left(\frac{\sigma-\sigma_y}{\sigma_s-\sigma_y}\right)^2\right)\frac{\sigma_s-\sigma_y}{\sigma-\sigma_y} \tag{1}$$

式中：μ/B 为绝热环境下的材料强化率；μ 为剪切弹性模量；B 为模型独立参数；σ_y 为屈服应力；σ_s 为饱和应力。

2) 当流动应力 σ 大于再结晶发生的临界应力 σ_c 时，流动应力计算方程由下列公式组成。首先定义再结晶比例计算公式为：

$$X=\frac{\sigma_\varepsilon-\sigma}{\sigma_s-\sigma_{sd}} \tag{2}$$

式中：σ_{sd} 为稳态应力；σ_ε 为强化应力，其计算公式为：

$$\frac{d\sigma_\varepsilon}{d\varepsilon}=\frac{\mu}{A}\left(1-\left(\frac{\sigma_\varepsilon-\sigma_y}{\sigma_s-\sigma_y}\right)^2\right)\frac{\sigma_s-\sigma_y}{\sigma_\varepsilon-\sigma_y} \tag{3}$$

产生动态再结晶后的流动应力计算方程[8]为：

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon}=\frac{\mu}{A}\frac{1-\left(\frac{\sigma_\varepsilon-\sigma_y+X\Delta\sigma}{\sigma_s-\sigma_y}\right)^2}{\frac{\sigma_s-\sigma_y}{\sigma_\varepsilon-\sigma_y}}-$$

$$\Delta\sigma\frac{\ln 2}{\dot{\varepsilon}t_{50}^{n_{Av}}}n_{Av}\left(1-X\right)\left[\frac{-t_{50}^{n_{Av}}\ln\left(1-X\right)}{\ln 2}\right]^{1-\frac{1}{n_{Av}}} \tag{4}$$

式中：$\dot{\varepsilon}$ 为变形速率；t_{50} 为发生 50%的动态再结晶的时间；n_{Av} 为模型参数。

式(1—4)中的 σ_y, σ_c, σ_s, σ_{sd} 这 4 个应力参数的统一采用 Sellars-Tegart-Garofalo(STN)方程[7]，其计算公式为：

$$\sigma=\frac{1}{\alpha}\operatorname{arsinh}\left(\frac{Z}{A}\right)^{\frac{1}{n}}+\sigma_0 \tag{5}$$

式中：α, A, n 为模型参数；σ_0 为热力学温度为 0 K 条件下的应力值。

动态再结晶达到 50%时的时间参数 t_{50} 的计算方程[13]为：

$$t_{50}=D_{50}Z^{-q}\exp\frac{Q}{RT} \tag{6}$$

式中：D_{50}，q 为模型参数。

公式(5—6)中 Z 为 Zener-Hollomon 参数，其计算公式为：

$$Z=\dot{\varepsilon}\exp\frac{Q}{RT} \tag{7}$$

式中：Q 为热变形热激活能；R 为气体常数；T 为热力学温度。

4 本构方程参数拟合

4.1 屈服应力计算方程参数拟合

对于 34Cr2Ni2Mo 钢，其热激活能 Q 为 636.936 kJ/mol[14]。为了获得本构方程的参数，首先依据热模拟获得的流动应力曲线确定其屈服应力 σ_y。采用 5 阶多项式方程对热模拟试验获得的流动应力曲线进行拟合。对于拟合方程来说，当等效应变为 0.005 时的流动应力值作为屈服应力。依据式(5)，将屈服应力 STN 方程的参数进行拟合，结果如公式(8)所示。屈服应力实测值与拟合方程计算值见图 4a，从图 4a 可以看出，试验值与拟合值的偏差在±7.8 MPa 以内。

$$\sigma_y=24.21\times\operatorname{arsinh}\left(\frac{Z}{2.82\times10^{23}}\right)^{\frac{1}{5.74}}+4.23 \tag{8}$$

4.2 临界应力和饱和应力计算方程参数拟合

为了获得临界应力 σ_c 和饱和应力 σ_s 值，可以将这 2 个参数同时处理。采用 Poliak，Jonas 提出的方法[15]确定临界应力和饱和应力。首先对试验获得的流动应力曲线 σ-ε 采用 5 阶多项式进行拟合，将获得的 $\sigma=\sigma(\varepsilon)$ 方程对真实应变 ε 进行求导，$\theta=\partial\sigma/\partial\varepsilon$；再采用该方程计算各真实应变 ε 点对应的 θ 值；再采用 5 阶多项式对 σ-θ 数据进行拟合，并求出 $\partial\theta/\partial\sigma$ 值，求出 $\left(-\partial\theta/\partial\sigma\right)-\sigma$ 的极值，该极值点对应的 σ 即为临界应力。通过此临界应力点，计算 σ-θ 曲线的切线，该切线在 θ=0 时计算获得的 σ 即为饱和应力。依据上述过程，求出了各个流动应力曲线的临界应力 σ_c 和饱和应力 σ_s，依据式(5)，对临界应力 σ_c 和饱和应力 σ_s 的 STN 方程进行拟合，结果见式(10)和(11)。临界应力 σ_c 和饱和应力 σ_s 实测值与拟合方程计算值对比分别见图 4b—c，从图 4b—c 可以看出，试验值与拟合值的偏差分别在±10，±15 MPa 以内。

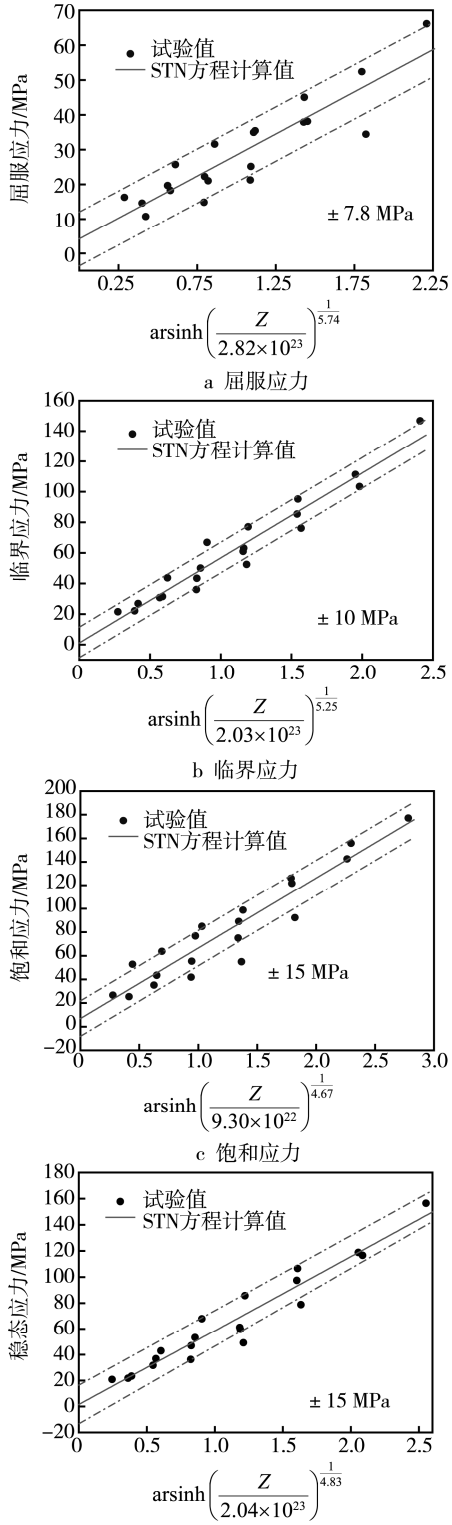


图 4　应力内变量实测值与拟合值对比

Fig.4 Comparison of stress between the experiment and STN model

$$\sigma_c = 55.60\times\text{arsinh}\left(\frac{Z}{2.03\times10^{23}}\right)^{\frac{1}{5.25}} + 1.25 \tag{9}$$

$$\sigma_s = 59.67\times\text{arsinh}\left(\frac{Z}{9.30\times10^{22}}\right)^{\frac{1}{4.67}} + 6.85 \tag{10}$$

4.3　稳态应力计算方程参数拟合

稳态应力值一般为流动应力曲线的峰值应力后的一个极小应力，考虑到热模拟试验获得的部分流动应力曲线呈现了循环再结晶的现象，因此文中采用流动应力曲线在峰值应力后的第 1 个下波点作为稳态应力，这样即可获得各个流动应力曲线的稳态应力，对各个试验参数获得的稳态应力 σ_{sd} 拟合后获得的计算方程见式(11)，从试验值和拟合方程计算值对比图(见图 4d)来看，偏差控制在±15 MPa 以内。

$$\sigma_{sd} = 57.01\times\text{arsinh}\left(\frac{Z}{2.04\times10^{23}}\right)^{\frac{1}{4.83}} + 1.58 \tag{11}$$

4.4　产生动态再结晶 50%的时间参数计算方程参数拟合

依据确定的屈服应力 σ_y、临界应力 σ_c、饱和应力 σ_s 和稳态应力 σ_{sd} 可以计算出再结晶 50%时所需要的时间。依据式(6)拟合获得的 t_{50} 计算方程见式(12)。计算值和拟合值之间的对比见图 5，可以看出拟合方程能够较为准确的表征了 50%的再结晶时间。

$$t_{50} = 0.0088\times Z^{-0.93}\times\exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \tag{12}$$

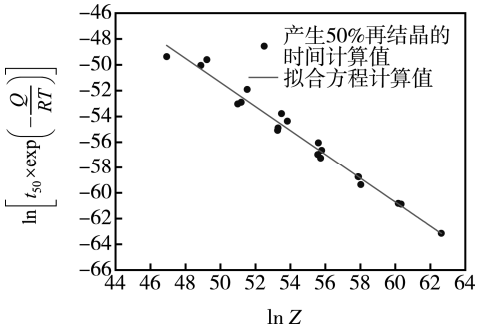


图 5　基于热模拟曲线的 50%动态再结晶时间计算值与拟合方程计算值对比

Fig.5 Comparison for time of 50% dynamic recrystallization between the experiment and the model

4.5　本构方程的其他参数计算

本构方程还有 3 个基本参数，首先是剪切模量值，其计算公式为：

$$\mu(T) = 92\ 000 - 40.05T \tag{13}$$

另外 2 个分别是模型参数 B 和 n_{Av}，为了确保本构方程描述的精度，其取值分别为 117 和 2.48。

5 本构方程精度与拓展性评价

依据上述确定的 34Cr2Ni2Mo 钢本构方程参数，分析该本构方程的精度，本构方程计算的流动应力曲线与热模拟试验曲线的对比见图 6。从图 6 可以看出，各个内变量参数在代入本构方程之后，相互之间的误差有了一定的抵消，计算值与试验值偏差控制在±15 MPa 以内，这对于精密塑性成形工艺的制定具有极为重要的意义。

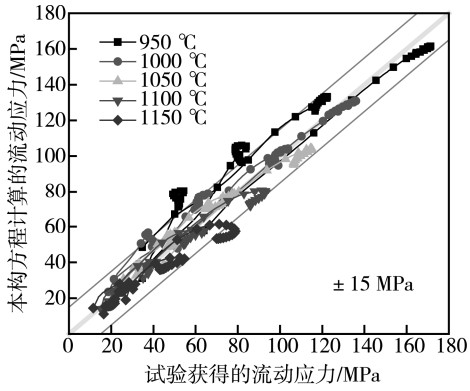
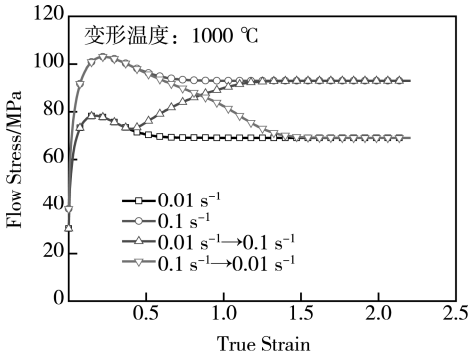


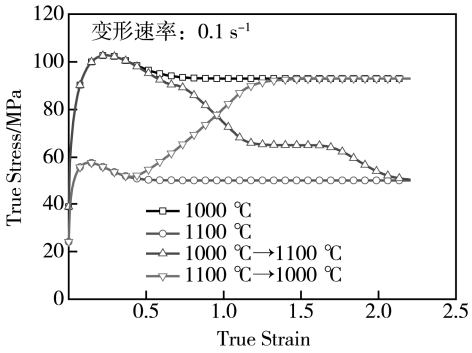
图 6 本构方程计算的流动应力与试验获得的流动应力对比分析

Fig.6 Comparison of flow stress between the experimental work and constitutive model

文中本构方程在温度不变，变速率流动应力的曲线和速率不变，变温度流动应力的曲线见图 7。



a 定温变形率流动应力曲线



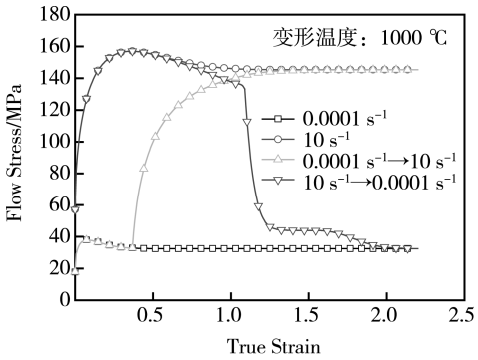
b 定速率变温流动应力曲线

图 7 本构方程稳定性分析

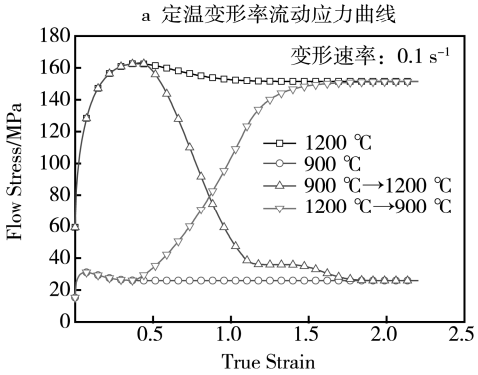
Fig.7 Stability analysis of the constitutive model

温度为 1000 ℃，变形速率分别为：0.01 s^{-1}；0.1 s^{-1}；0.01 s^{-1} 增加至 0.1 s^{-1}；0.1 s^{-1} 减少至 0.01 s^{-1} 等 4 种条件下计算其流动应力曲线见图 7a；变形速率为 0.1 s^{-1}，变形温度分别为 1000 ℃；1100 ℃；1000 ℃增加至 1100 ℃；1100 ℃减少至 1000 ℃等 4 种条件下计算其流动应力曲线见图 7b。图 7a 的变形速率和图 7b 的温度在真应变 0.35~1.1 区间内时，呈线性增加或减少。从图 7 可以看出，无论是变速率还是变温度，本构方程均能准确的计算出流动应力值，而且预设最大真应变为 2.2，进一步说明了本构方程在计算流动应力上的稳定性较高。

由于本构方程参数拟合以一定范围内的温度和变形速率下测试获得的流动应力为基础数据，而本构方程需对这个变形参数范围外流动应力曲线具有一定的拓展性。文中本构方程对热模拟试验参数外变形参数的计算结果见图 8，其中，温度恒定为 1000 ℃，变形速率分别为 0.0001 s^{-1}；10 s^{-1}；0.0001 s^{-1} 增加至 10 s^{-1}；10 s^{-1} 减少至 0.0001 s^{-1} 等 4 种条件下计算流动应力曲线，见图 8a。变形速率恒定为 0.1 s^{-1}，变形温度分别为：900 ℃；1200 ℃；900 ℃增加至 1200 ℃；1200 ℃减少至 900 ℃等 4 种条件下计算曲线见图 8b。图 8a 的变形速率和图 8b 的温度在真应变 0.35~1.1 区间内时，呈线性增加或减少。从图 8 可以看出，本构方程能够描述在



a 定温变形率流动应力曲线



b 定速率变温流动应力曲线

图 8 本构方程拓展性分析

Fig.8 Expansibility analysis of the constitutive model

热模拟变形参数以外流动应力曲线，说明了本构方程在计算流动应力上的具备了一定的拓展稳定性。

通过图 7—8 可以看出，本构方程对于热塑性成形工艺模拟中的真实应变、宽温度和变形速率区间具有较强的适应能力。

6　结论

1) 构建了以 SAH 流动应力方程为基础的物理机制本构方程，其内变量为屈服/饱和/临界/稳态应力、发生 50%再结晶的时间等，内变量计算方程均以变形温度和变形速率作为其计算参数。

2) 34Cr2Ni2Mo 钢本构方程内变量方程计算精度较高，计算的流动应力与热模拟试验结果的差值在±15 MPa 以内，表明本构方程有较高的计算精度。

3) 34Cr2Ni2Mo 钢本构方程在描述热模拟试验参数之外的温度、应变、应变速率时无异常波动，流动应力计算值具有较好的外推稳定性和拓展性，适合变形状况较为剧烈的热塑性成形工艺的分析与优化。

参考文献：

[1] 康凤, 杨鄂川, 陈强, 等. 车用曲轴弯曲镦锻成形工艺模拟及试验研究[J]. 锻压技术, 2014, 39(11): 135—138.
KANG Feng, YANG E-chuan, CHEN Qiang, et al. Simulation and Experiment Study on Upset-bending Forging Process of Crankshaft in Automobile[J]. Forging & Stamping Technology, 2014, 39(11): 135—138.

[2] 高峰, 林军. 高功率密度发动机连杆热模锻工艺模拟与优化[J]. 精密成形工程, 2015, 7(4): 66—70.
GAO Feng, LIN Jun. Hammer Forging Process Simulation and Optimization of Connecting Rod of High-power-density Engine[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(4): 66—70.

[3] 林军, 李祖荣, 陈强, 等. 具有非加工面的钢质锻件精密成形工艺分析及设计[J]. 精密成形工程, 2012, 4(5): 1—6.
LIN Jun, LI Zu-rong, CHEN Qiang, et al. Analysis and Design of Precision Forging Process of Steel Forge Piece with Non-machined Face[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2012, 4(5): 1—6.

[4] 丁祖宏, 李纪龙, 乔硕, 等. 汽车弯臂锻造工艺改进数值模拟及实验研究[J]. 精密成形工程, 2013, 5(5): 24—28.
DING Zu-hong, LI Ji-long, QIAO Shuo, et al. Numerical Simulation and Experimental Study for Forging Process of Automotive Curved Arm[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2013, 5(5): 24—28.

[5] 刘雅辉, 刘淑梅, 何文涛, 等. 连杆无飞边锻造工艺及模具系统研究[J]. 精密成形工程, 2014, 6(6): 84—87.
LIU Ya-hui, LIU Shu-mei, HE Wen-tao, et al. Flashless Forging Process and Tool System of Connecting Rod[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6(6): 84—87.

[6] LIN Y C, CHEN X M. A Critical Review of Experimental Results and Constitutive Descriptions for Metals and Alloys in Hot Working[J]. Materials & Design, 2011, 32(4): 1733—1759.

[7] SELLARS C M, MCTEGART W J. On the Mechanism of Hot Deformation[J]. Acta Metallurgica, 1966, 14(9): 1136—1138.

[8] BROWN S B, KIM K H, ANAND L. An Internal Variable Constitutive Model for Hot Working of Metals[J]. International Journal of Plasticity, 1989, 5(2): 95—130.

[9] LIN Y C, CHEN M S, ZHONG J. Prediction of 42CrMo Steel Flow Stress at High Temperature and Strain Rate[J]. Mechanics Research Communications, 2008, 35(3): 142—150.

[10] PUCHI-CABRERA E S, STAIA M H, GUÉRIN J D, et al. An Experimental Analysis and Modeling of the Work-softening Transient due to Dynamic Recrystallization[J]. International Journal of Plasticity, 2014, 54(3): 113—131.

[11] 金朝阳, 崔振山. 低碳钢热塑性成形过程本构模型[J]. 上海交通大学学报, 2010(4): 437—441.
JIN Zhao-yang, CUI Zhen-shan, Constitutive Model for High Temperature Plastic Deformation of Low Carbon Steel[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2010 (4): 437—441.

[12] JONAS J J, QUELENNEC X, JIANG L, et al. The Avrami Kinetics of Dynamic Recrystallization[J]. Acta Materialia, 2009, 57(9): 2748—2756.

[13] PUCHI-CABRERA E S, STAIA M H, GUÉRIN J D, et al. Analysis of the Work-hardening Behavior of C-Mn Steels Deformed under Hot-working Conditions[J]. International Journal of Plasticity, 2013, 51(6): 145—160.

[14] 康凤, 杨鄂川, 林军, 等. 曲轴用 34CrNiM06 高强结构钢的热变形行为研究[J]. 材料导报, 2013, 27(4): 49—51.
KANG Feng, YANG E-chuan, LIN Jun, et al. Study on Hot Deformation Behavior of High Strength Construction Steel 34CrNiMo6 for Crankshafts[J]. Materials Review, 2013, 27(4): 49—51.

[15] POLIAK E I, JONAS J J. A One-parameter Approach to Determining the Critical Conditions for the Initiation of Dynamic Recrystallization[J]. Acta Materialia, 1996, 44(1): 127—136.