

## 35CrMo 钢高温流变行为及其本构方程

胡希磊<sup>1</sup>, 韩鹏彪<sup>1</sup>, 鲁素玲<sup>1</sup>, 孟致安<sup>1</sup>, 王同会<sup>2</sup>, 王浩<sup>2</sup>

(1.河北科技大学材料科学与工程学院,河北石家庄 050018;2.巨力索具股份有限公司,河北保定 072550)

**摘要:**为了更好地描述 35CrMo 钢应力-应变关系,建立材料的本构模型,采用 Gleeble3800 热模拟试验机对热轧后的 35CrMo 钢进行了热模拟高温压缩实验,研究了 35CrMo 钢在变形温度为 800,900,1 000,1 100,1 200 °C,应变速率分别为 0.01,0.1,1,10 s<sup>-1</sup> 的条件下,变形温度和应变速率对材料流变应力的影响。实验结果表明:35CrMo 钢高温变形时存在动态回复型与动态再结晶型两种应力-应变关系,通过求解材料临界应变与峰值应变的关系,间接建立了 35CrMo 钢峰值应力本构方程,并验证了其准确性。所提出的本构方程可以较好地描述 35CrMo 钢热变形条件下的应力-应变关系,对于 35CrMo 钢的热成形工艺设计及数值模拟工作具有基础理论意义。

**关键词:**黑色金属及其合金;35CrMo 钢;热变形;本构方程;热模拟实验

中图分类号:TG136.2 文献标志码:A

## High temperature flow behavior and constitutive model of 35CrMo steel

HU Xilei<sup>1</sup>, HAN Pengbiao<sup>1</sup>, LU Suling<sup>1</sup>, MENG Zhi'an<sup>1</sup>, WANG Tonghui<sup>2</sup>, WANG Hao<sup>2</sup>

(1.School of Material Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 2.Juli Sling Company Limited, Baoding, Hebei 072550, China)

**Abstract:** In order to describe the stress-strain relationship of 35CrMo steel and establish constitutive model of material, the high temperature thermal simulation compression experiment of hot rolled 35CrMo steel is conducted by the Gleeble3800 thermal simulation machine, the effect of deformation temperature and strain rate on the material flow stress of 35CrMo steel is studied under the condition that the deformation temperature is 800, 900, 1 000, 1 100, 1 200 °C and the strain rate are 0.01, 0.1, 1, 10 s<sup>-1</sup>. The experimental results show that there are two stress-strain relationships, dynamic recovery and dynamic recrystallization, in the high-temperature deformation of 35CrMo steel. The constitutive equation of 35CrMo steel peak stress is established indirectly by calculating the relationship between critical strain and peak strain, and the accuracy of the constitutive equation is verified. This constitutive equation can well describe the stress-strain relationship under the thermal deformation condition of 35CrMo steel, and it has basic theoretical significance for guiding the thermal forming process design and numerical simulation of 35CrMo steel.

收稿日期:2019-04-26;修回日期:2019-05-30;责任编辑:陈书欣

基金项目:河北省科技计划重点项目(15211804D)

第一作者简介:胡希磊(1993—),男(满族),河北承德人,硕士研究生,主要从事金属塑性加工方面的研究。

通信作者:韩鹏彪教授。E-mail:hpb68@163.com

胡希磊,韩鹏彪,鲁素玲,等.35CrMo 钢高温流变行为及其本构方程[J].河北科技大学学报,2019,40(4):351-358.

HU Xilei, HAN Pengbiao, LU Suling, et al. High temperature flow behavior and constitutive model of 35CrMo steel[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2019, 40(4): 351-358.

**Keywords:** ferrous metals and their alloys; 35CrMo steel; thermal deformation; constitutive equations; thermal simulation experiment

材料的高温流变本构方程是有限元模拟时计算物体应力-应变关系的基础,是提高模拟精度、计算力能参数、合理制定锻造工艺的关键<sup>[1-2]</sup>。35CrMo钢为合金结构钢,具有较高的抗冲击韧性、疲劳强度以及静力强度,淬透性高,具有良好的综合性能<sup>[3]</sup>,可用于生产各种承受冲击、弯扭、高载荷的设备零件及各种大型受力构件,在钢结构、工程机械和船舶制造等领域有广泛应用。目前,已经有很多关于35CrMo钢热变形行为的研究<sup>[4-8]</sup>,然而关于建立热轧后35CrMo钢高温流变本构方程的文章鲜有报道。通过35CrMo钢高温压缩热模拟实验,研究变形温度和变形速率对35CrMo钢流动应力的影响,建立了35CrMo钢高温变形条件下双曲正弦形式的Arrhenius本构方程,为后续反挤压成形过程模拟提供了模型参数。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验材料

实验采用热轧后的35CrMo钢,其化学成分见表1。

表1 35CrMo钢的化学成分  
Tab.1 Chemical composition of 35CrMo steel

											%
$w(C)$	$w(Si)$	$w(Mn)$	$w(P)$	$w(S)$	$w(Cr)$	$w(Ni)$	$w(Cu)$	$w(Mo)$	$w(Als)$	$w(Al)$	$w(Fe)$
0.35	0.22	0.56	0.019	0.03	0.93	0.10	0.20	0.18	0.017	0.19	余量

### 1.2 实验方法

实验在Gleeble3800热模拟试验机上完成,由于35CrMo钢锻造温度为800~1200℃,实验变形温度设定为800,900,1000,1100,1200℃,应变速率为0.01,0.1,1,10 s<sup>-1</sup>。采用单向压缩,变形量为60%,具体的高温压缩过程如图1所示。试样首先以10℃/s的速度加热到1200℃,保温6 min,再以10℃/s的速度降至变形温度,保温2 min以消除内部温度梯度,然后进行热压缩实验,实验结束后水淬冷却。

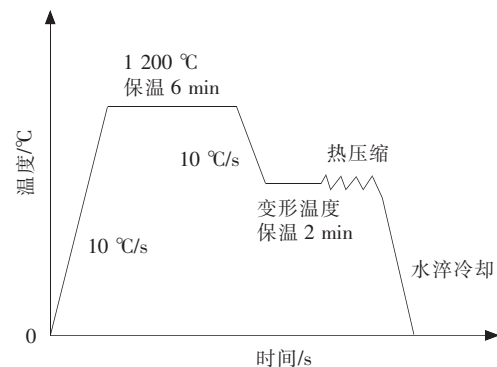


图1 35CrMo钢热压缩实验过程

Fig.1 Thermal compression test process of 35CrMo steel

## 2 实验结果及分析

### 2.1 材料的流变行为

图2为不同温度及应变速率下,35CrMo钢热压缩的真应力-真应变曲线。从图2可以看到在变形初期,真应力-真应变曲线变化趋势基本相同,即真应变不断增加,真应力随之增加并达到峰值;在此之后,真应力-真应变曲线呈现两种不同的变化趋势<sup>[9-10]</sup>。

1)在应变速率为0.01 s<sup>-1</sup>、变形温度为900~1200℃,应变速率为0.1 s<sup>-1</sup>、变形温度为1000~1200℃,应变速率为1 s<sup>-1</sup>、变形温度为1100℃,1200℃,应变速率为10 s<sup>-1</sup>、变形温度为1200℃时,真应力与真应变呈现动态再结晶型曲线关系,即在曲线达到峰值后,真应力随真应变的增加而缓慢降低至某一稳态。这是由于加工硬化的强化作用小于动态回复与动态再结晶的软化作用,因此整体呈现为真应力-真应变曲线的降低。

2)应变速率为0.01 s<sup>-1</sup>、变形温度为800℃,应变速率为0.1 s<sup>-1</sup>、变形温度为800~900℃,应变速率为1 s<sup>-1</sup>、变形温度为800~1000℃,应变速率为10 s<sup>-1</sup>、变形温度为800~1100℃时,真应力与真应变呈现动

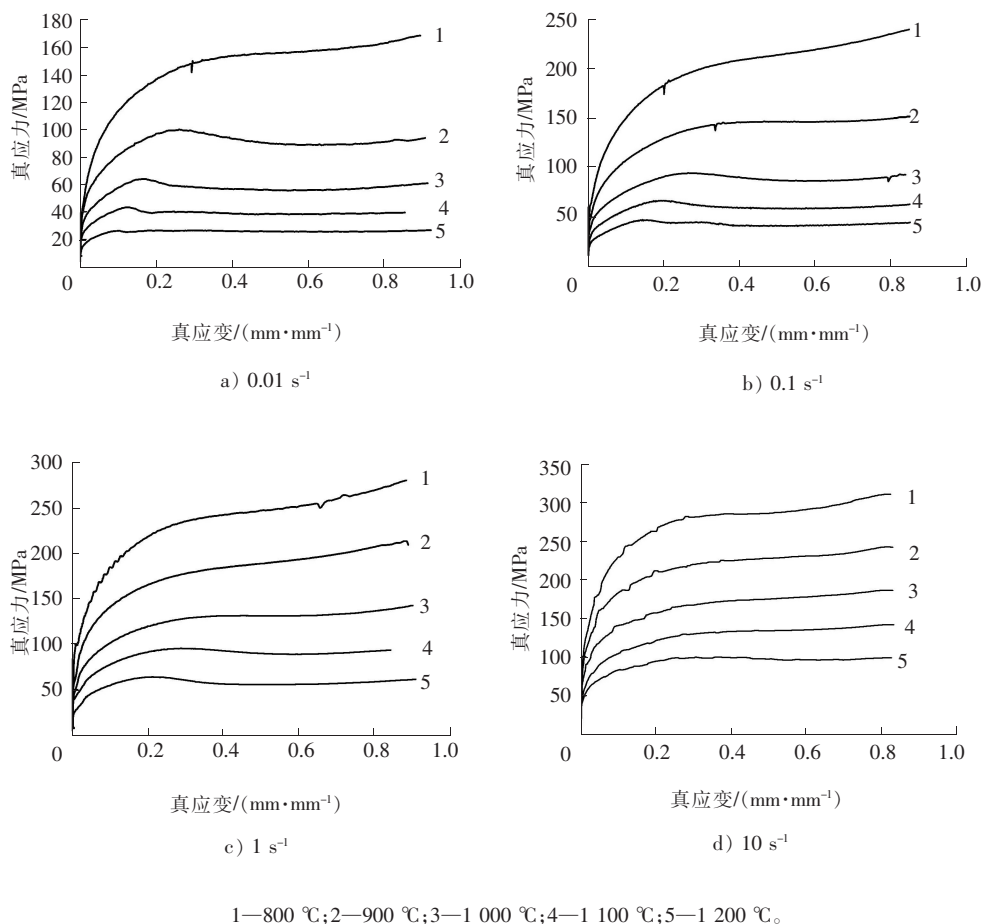


图 2 不同变形条件下 35CrMo 钢热压缩真应力-真应变曲线  
 Fig.2 True stress-true strain curve of 35CrMo steel under different deformation conditions

态回复型曲线关系。其峰值应力随着真应变的增大而继续增大,这说明变形体内加工硬化的强化作用要大于动态回复的软化作用,曲线持续上升。

动态回复型真应力-真应变曲线不存在明显的应力峰值,需借助求取曲线临界应变  $\epsilon_c$  的方式间接建立 35CrMo 钢高温变形条件下的峰值应力本构方程<sup>[10]</sup>。通过求取动态再结晶临界应变  $\epsilon_c$ ,再根据临界应变  $\epsilon_c = \alpha \epsilon_p$ <sup>[11-12]</sup> (其中  $\epsilon_p$  为峰值应变,  $\alpha$  为相关系数),获得动态再结晶型的峰值应变  $\epsilon_p$ 。

### 2.2 临界应变的确定

临界应变  $\epsilon_c$  由材料加工硬化率  $\theta$  与真应变  $\sigma$  的变化规律来确定。SELLARS<sup>[12]</sup>指出变形材料在化学成分、原始晶粒恒定的条件下,动态再结晶临界条件仅与变形条件(应变温度  $T$  和应变速率  $\dot{\epsilon}$ )有关。陈学文等<sup>[13]</sup>和 POLIAK 等<sup>[14]</sup>认为材料发生再结晶时,其  $\theta$ - $\sigma$  曲线所呈现的拐点就是临界应变  $\epsilon_c$ 。动态再结晶临界条件的计算方法有很多,其中 POLIAK 等<sup>[14]</sup>和王一成等<sup>[15]</sup>根据热力学不可逆原理的动力学临界条件提出,将达到应力-应变曲线峰值点前的  $\theta$ - $\sigma$  散点图进行三次多项式拟合,即:

$$\theta = A\sigma^3 + B\sigma^2 + C\sigma + D, \tag{1}$$

式中  $A, B, C, D$  为给定变形条件的常数。对式(1)微分,可以得到  $\theta$  对  $\sigma$  的一次、二次微分函数表达式,即:

$$\frac{d\theta}{d\sigma} = 3A\sigma^2 + 2B\sigma + C, \tag{2}$$

$$\frac{d^2\theta}{d\sigma^2} = 6A\sigma + 2B. \tag{3}$$

将动态再结晶临界条件  $\frac{d^2\theta}{d\sigma^2}=0$  代入式(3)得临界应力

$$\sigma_c = -\frac{B}{3A}, \quad (4)$$

临界应力所对应的应变即为临界应变  $\epsilon_c$ 。

以应变速率为  $10 \text{ s}^{-1}$  为例,具体介绍求取不同温度下临界应变过程。

将应变速率为  $10 \text{ s}^{-1}$  达到应力-应变曲线峰值点前的  $\theta-\sigma$  散点图进行三次多项式拟合,拟合曲线如图3所示,三次拟合方程如表2所示,将方程中的系数  $A, B$  代入式(4)即得到应变速率为  $10 \text{ s}^{-1}$  不同温度下的临界应力,根据热压缩实验数据得到相应的临界应变(见表3)。

表2 应变速率  $10 \text{ s}^{-1}$  条件下 35CrMo 钢的  $\theta-\sigma$  三次多项式拟合方程  
Tab.2 Cubic fitting equation between  $\theta$  and  $\sigma$  of 35CrMo steel in  $10 \text{ s}^{-1}$  strain rate

温度/°C	三次多项式拟合方程	$-\frac{B}{3A}$
800	$\theta=13\ 612.729\ 06-0.000\ 643\ 63\ \sigma^3+0.498\ 43\ \sigma^2-137.499\ 83\ \sigma$	258.13
900	$\theta=48.749\ 57+0.001\ 09\ \sigma^3-0.492\ 75\ \sigma^2+55.607\ 75\ \sigma$	150.69
1 000	$\theta=-978.336\ 31+0.001\ 98\ \sigma^3-0.711\ 63\ \sigma^2+69.791\ 35\ \sigma$	119.80
1 100	$\theta=12\ 725.444\ 85-0.007\ 67\ \sigma^3+2.664\ 22\ \sigma^2-314.208\ 21\ \sigma$	115.78
1 200	$\theta=6\ 860.705\ 85-0.009\ 89\ \sigma^3+2.515\ 72\ \sigma^2-221.223\ 68\ \sigma$	84.79

表3 应变速率  $10 \text{ s}^{-1}$  条件下 35CrMo 钢的临界应变  
Tab.3 Critical strain of 35CrMo steel under the condition that strain rate is  $10 \text{ s}^{-1}$

温度/°C	800	900	1 000	1 100	1 200
临界应变	0.178	0.056	0.054	0.164	0.125

### 2.3 峰值应变与临界应变的关系

动态再结晶型曲线存在峰值应力,根据热模拟数据,取得不同温度及变形速率下的峰值应变,并将峰值应变与求得的临界应变进行线性拟合,其线性关系曲线如图4所示,曲线斜率即为临界应变与峰值应变的相关系数  $\alpha$  为 0.387 54。

### 2.4 本构方程的建立

对于一定化学成分的材料,在高温热变形过程中,其流变应力  $\sigma$  与变形温度  $T$ 、应变速率  $\dot{\epsilon}$  相关<sup>[10,16-18]</sup>。不同应力水平下,应变速率与流变应力呈现两种关系。

低应力水平时( $\alpha\sigma < 0.8$ ),流变应力和应变速率呈指数关系:

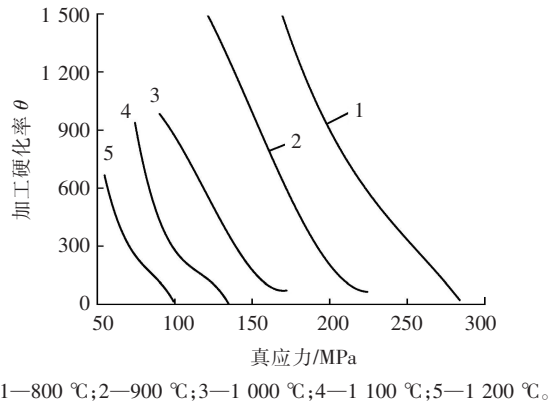


图3 应变速率  $10 \text{ s}^{-1}$  条件下 35CrMo 钢的拟合曲线

Fig.3 Fitted curve of 35CrMo steel in  $10 \text{ s}^{-1}$  strain rate

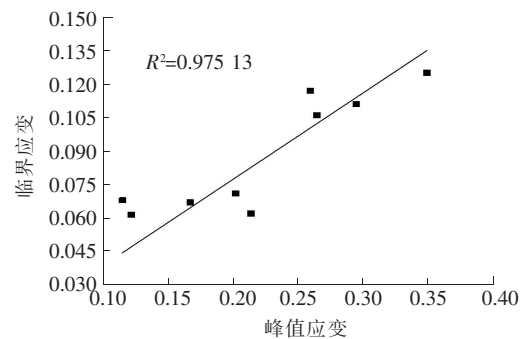


图4 临界应变与峰值应变的线性关系

Fig.4 Linear relationship between critical strain and peak strain

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (5)$$

高应力水平时( $\alpha\sigma > 1.2$ ),流变应力和应变速率呈现幂指数关系:

$$\dot{\epsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (6)$$

在整个应力范围内流变应力和应变速率呈现双曲正弦 Arrhenius 函数关系:

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (7)$$

式中: $\dot{\epsilon}$  为应变速率,  $s^{-1}$ ;  $\sigma$  为流变应力, MPa;  $Q$  为变形激活能, kJ/mol;  $R$  为摩尔气体常数,  $R = 8.314$  J/(K · mol);  $T$  为热力学温度, K;  $A_1, A_2, A, n_1, \beta, n$  为常数, 且满足  $\alpha = \beta/n_1$ 。

同时,材料在高温塑性变形时,应变速率受热激活过程控制,流变应力  $\sigma$ 、应变速率  $\dot{\epsilon}$  和变形温度  $T$  的关系如下<sup>[19-21]</sup>:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (8)$$

式中: $Z$  为 Zener-Hollomon 参数,即温度补偿的应变速率因子。

### 2.4.1 材料常数的确定

对式(5)和式(6)两边分别取对数得到:

$$\ln \dot{\epsilon} = n_1 \ln \sigma + \ln A_1 - \frac{Q}{RT} \quad (9)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \beta\sigma + \ln A_2 - \frac{Q}{RT} \quad (10)$$

通过线性拟合分别得到了不同变形条件下  $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$  和  $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$  关系曲线如图 5 和图 6 所示,曲线斜率平均值  $n_1 = 7.759 802, \beta = 0.075 358$ , 因此  $\alpha = \beta/n_1 = 0.009 711 33$ 。

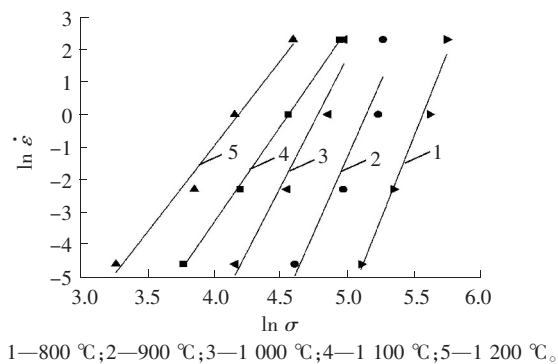


图 5 不同变形条件下 35CrMo 钢  $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$  线性关系

Fig.5 Linear relationship between  $\ln \dot{\epsilon}$  and  $\ln \sigma$  of 35CrMo steel under different deformation conditions

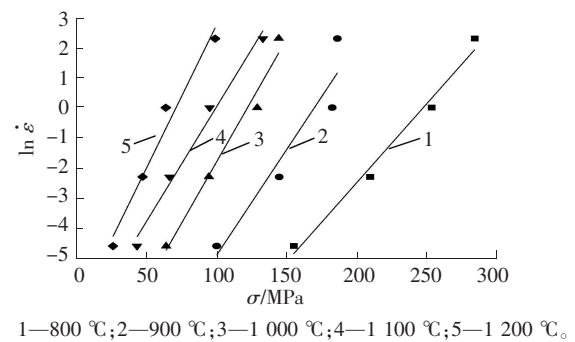


图 6 不同变形条件下 35CrMo 钢  $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$  线性关系

Fig.6 Linear relationship between  $\ln \dot{\epsilon}$  and  $\sigma$  of 35CrMo steel under different deformation conditions

对式(7)两边分别取对数整理可得:

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

通过线性拟合得到不同变形条件下  $\ln \dot{\epsilon} - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$  关系曲线如图 7 所示,其斜率平均值  $n = 5.525 056$ 。

### 2.4.2 变形激活能的确定

当变形速率一定时,整理式(8)可得:

$$\ln[\sinh(\alpha\sigma)] = \frac{\ln A - \ln \dot{\epsilon}}{n} + \frac{Q}{nR} \frac{1}{T}, \quad (12)$$

得到不同变形条件下 35CrMo 钢  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]-1/T$  线性关系如图 8 所示, 求出其斜率的平均值为

$$\frac{Q}{nR} = 8.031\ 397\ 5. \quad (13)$$

将摩尔气体常数  $R$  与硬化指数  $n$  代入式(13) 得到变形激活能  $Q=368.924\ 8\ \text{kJ/mol}$ .

对式(8)两边同时取对数可得:

$$\ln Z = \ln A + n \ln[\sinh(\alpha\sigma)]. \quad (14)$$

将不同温度下的变形速率和变形激活能代入式(8)得到  $Z$  值. 绘制  $\ln Z-\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  拟合曲线如图 9 所示, 线性回归直线截距为  $\ln A = 32.347\ 45$ , 因此结构因子  $A=1.117\ 68 \times 10^{14}$ .

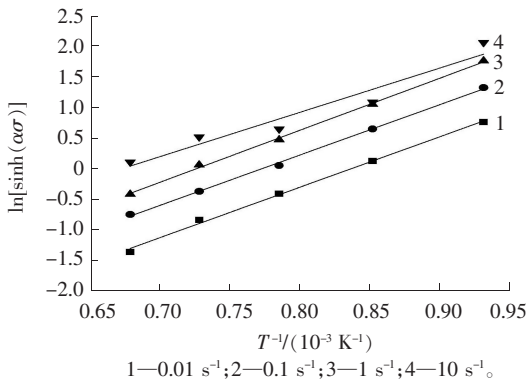


图 8 不同变形条件下 35CrMo 钢  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]-1/T$  线性关系

Fig.8 Linear relationship between  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  and  $1/T$  of 35CrMo steel under different deformation conditions

### 2.4.3 本构方程的确定

将以上所求参数代入式(7), 即得到热轧后 35CrMo 钢本构方程, 如下:

$$\dot{\epsilon} = 1.117\ 68 \times 10^{14} [\sinh(0.009\ 7\sigma)]^{5.525\ 056} \exp\left(-\frac{368\ 925}{RT}\right). \quad (15)$$

### 2.5 本构方程验证

35CrMo 钢本构方程也可表示为如下形式:

$$\sigma = \ln \left\{ \left[ \frac{\dot{\epsilon} \exp\left(\frac{368\ 925}{RT}\right)}{1.117\ 68 \times 10^{14}} \right]^{0.180\ 99} + \left[ \left( \frac{\dot{\epsilon} \exp\left(\frac{368\ 925}{RT}\right)}{1.117\ 68 \times 10^{14}} \right)^{0.361\ 98} + 1 \right]^{0.5} \right\}. \quad (16)$$

为了验证构建的 35CrMo 钢的双曲正弦形式 Arrhenius 本构方程的准确性和可靠性, 利用所建立的本构方程, 计算出不同变形条件下的峰值应力理论值, 并计算出实验值与计算值的相对误差. 峰值应力实验值与计算值统计表见表 4, 其中相对误差最大值为 5.14%, 说明本文所建立的本构方程可以较好地描述 35CrMo 钢热变形条件下的应力-应变关系.

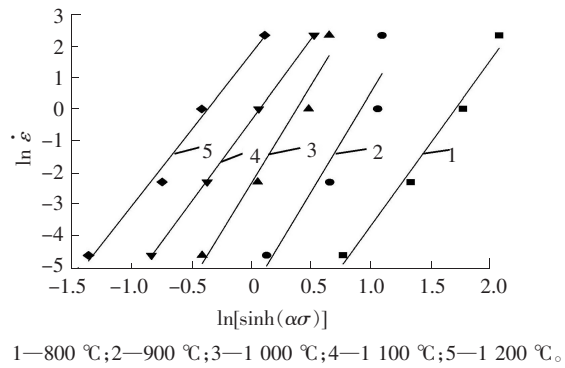


图 7 不同变形条件下 35CrMo 钢  $\ln \dot{\epsilon}-\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  线性关系

Fig.7 Linear relationship between  $\ln \dot{\epsilon}$  and  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  of 35CrMo steel under different deformation conditions

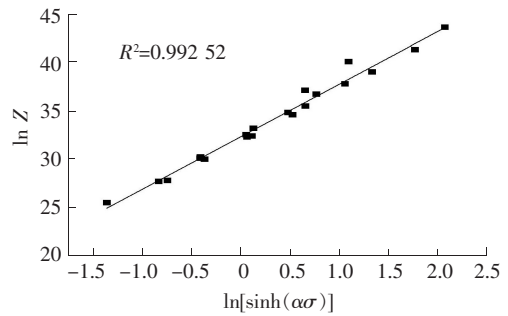


图 9  $\ln Z-\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  线性关系

Fig.9 Linear relationship between  $\ln Z$  and  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$

$$\text{相对误差} = \left| \frac{\text{峰值应力实验值} - \text{峰值应力计算值}}{\text{峰值应力实验值}} \right| \times 100\%。$$

表4 峰值应力实验值与计算值统计表

Tab.4 Statistical table of experimental value and calculated value of peak stress

应变速率/s <sup>-1</sup>	温度/℃	峰值应力实验值/MPa	峰值应力计算值/MPa	误差/%
0.01	900	100.21	102.69	2.47
	1 000	64.12	65.84	2.70
	1 100	43.47	43.21	0.60
	1 200	28.23	29.5	4.5
0.1	1 000	94.59	93.46	1.2
	1 100	66.55	63.40	4.73
	1 200	45.26	44.02	2.74
1	1 100	95.23	90.33	5.14
	1 200	63.89	64.52	0.98
10	1 200	95.02	91.77	3.42

### 3 结 论

1) 临界应变  $\epsilon_c$  与峰值应变  $\epsilon_p$  满足关系:  $\epsilon_c = 0.387\ 54\ \epsilon_p$ ;

2) 35CrMo 钢的变形激活能为 368.925 kJ/mol, 双曲正弦形式 Arrhenius 本构方程:

$$\dot{\epsilon} = 1.117\ 68 \times 10^{14} [\sinh(0.009\ 7\ \sigma)]^{5.525\ 056} \exp\left(-\frac{368\ 925}{RT}\right);$$

3) 利用所建立的本构方程, 计算出不同变形条件下的峰值应力理论值, 同实验值相比较, 相对误差最大值为 5.14%, 说明该本构方程可以很好地描述 35CrMo 钢热变形条件下的应力-应变关系。

4) 主要研究了 35CrMo 钢高温变形条件下的应力-应变关系, 因此该本构方程仅适用于热变形, 对于温变形或冷变形条件下 35CrMo 钢的应力-应变关系还有待进一步研究。

### 参考文献/References:

- [1] 冀晓磊, 韩鹏彪, 鲁素玲, 等. 基于 DEFORM 的索具接头内孔反挤压成形数值模拟[J]. 河北科技大学学报, 2017, 38(4): 383-388.  
JI Xiaolei, HAN Pengbiao, LU Suling, et al. Numerical simulation for inverse extrusion forming of the hole of a rigging joint based on DEFORM[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2017, 38(4): 383-388.
- [2] 肖政兵, 黄元春, 刘宇. 基于微观机理的电磁铸造 35CrMo 钢的高温流变本构方程[J]. 金属热处理, 2017, 42(1): 1-8.  
XIAO Zhengbing, HUANG Yuanchun, LIU Yu. Physically-based constitutive model for high temperature deformation of electromagnetic casted 35CrMo steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42(1): 1-8.
- [3] 黄元春, 王三星, 肖政兵, 等. 不同条件高温压缩变形后 35CrMo 钢的显微组织[J]. 机械工程材料, 2017, 41(6): 84-89.  
HUANG Yuanchun, WANG Sanxing, XIAO Zhengbing, et al. Microstructures of 35CrMo steel after high-temperature compression deformation under different conditions[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2017, 41(6): 84-89.
- [4] 郭会光, 张巧丽, 游晓红, 等. 35CrMo 钢热变形机制的模拟研究[J]. 大型铸锻件, 2000(2): 22-25.  
GUO Huiguang, ZHANG Qiaoli, YOU Xiaohong, et al. Simulated research on hot forming mechanism of 35CrMo steel[J]. Heavy Castings and Forgings, 2000(2): 22-25.
- [5] 张斌, 李波, 张鸿冰. 35CrMo 钢动态再结晶过程数值模拟与试验研究[J]. 锻压技术, 2004(6): 36-39.  
ZHANG Bin, LI Bo, ZHANG Hongbing. Value simulation and experiment study of dynamic re-crystal process of 35CrMo steel[J]. Forging & Stamping Technology, 2004(6): 36-39.
- [6] 王进, 陈军, 张斌, 等. 35CrMo 结构钢热塑性变形流动应力模型[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(11): 1784-1786.  
WANG Jin, CHEN Jun, ZHANG Bin, et al. The flow stress model of 35CrMo structural steel during hot forming[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005, 39(11): 1784-1786.

- [7] 张斌,张鸿冰.35CrMo 结构钢的热变形行为[J].金属学报,2004,40(10):1109-1114.  
ZHANG Bin, ZHANG Hongbing. Hot deformation behavior of 35CrMo steel[J].Acta Metallurgica Sinica,2004,40(10):1109-1114.
- [8] 叶健松,徐祖耀.35CrMo 钢动态再结晶的实验研究与数值模拟[J].轧钢,2004,21(5):23-27.  
YE Jiansong, XU Zuyao. Experimental research and numerical simulation of dynamic recrystallization of 35CrMo steel[J]. Steel Rolling, 2004,21(5):23-27.
- [9] 杨莉.300M 钢热变形工艺研究[D].焦作:河南理工大学,2016.  
YANG Li. Study on Hot Deformation Process of 300M Steel[D].Jiaozuo:Henan Polytechnic University,2016.
- [10] 章晓婷,黄亮,李建军,等.300M 高强钢高温流变行为及本构方程[J].中南大学学报(自然科学版),2017,48(6):1439-1447.  
ZHANG Xiaoting, HUANG Liang, LI Jianjun, et al. Flow behaviors and constitutive model of 300M high strength steel at elevated temperature[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2017,48(6):1439-1447.
- [11] 黄顺喆,厉勇,王春旭,等.高强渗碳钢高温热变形的本构方程[J].材料热处理学报,2014,35(10):210-217.  
HUANG Shunzhe, LI Yong, WANG Chunxu, et al. Constitutive equations of a high-strength carburizing steel during high temperature thermal deformation[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment,2014,35(10):210-217.
- [12] SELLARS C M. Computer modelling of hot-working processes[J]. Materials Science and Technology, 1985, 1(4):325-332.
- [13] 陈学文,陈天安,周会军,等.45Cr4NiMoV 合金动态再结晶临界应变[J].材料热处理学报,2015,36(1):109-113.  
CHEN Xuewen, CHEN Tianan, ZHOU Huijun, et al. Critical strain of dynamic recrystallization of 45Cr4NiMoV steel[J].Transactions of Materials and Heat Treatment,2015,36(1):109-113.
- [14] 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.
- [15] 王一成,李峰.AISI1215 钢动态再结晶临界应力应变的确定方法[J].安徽工业大学学报(自然科学版),2015,32(1):1-6.  
WANG Yicheng, LI Feng. Methods of determining the critical stress or strain for initiation of dynamic recrystallization in AISI1215 steel [J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science),2015,32(1):1-6.
- [16] JONAS J J, SELLARS C M, TEGART W J M. Strength and structure under hot-working conditions[J]. Metallurgical Reviews, 1969, 14(1):1-24.
- [17] ZENER C, HOLLOWOMON J H. Problems in non-elastic deformation of metals[J]. Journal of Applied Physics, 1946, 17(2):69-82.
- [18] TAKUDA H, FUJIMOTO H, HATTA N. Modelling on flow stress of Mg-Al-Zn alloys at elevated temperatures[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 80:513-516.
- [19] 郝庆乐,韩静涛,宋晶杰,等.高强硼钢高温变形行为及其本构方程的建立[J].金属热处理,2016,41(2):131-135.  
HAO Qingle, HAN Jingtao, SONG Jingjie, et al. Deformation behavior at high temperature and establishment of constitutive equation of high strength boron steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2016,41(2):131-135.
- [20] 谭智林,向嵩.Q690 低碳微合金钢热变形行为及动态再结晶临界应变[J].材料热处理学报,2013,34(5):42-46.  
TAN Zhilin, XIANG Song. Behavior of hot deformation and critical strain for dynamic recrystallization of a Q690 low carbon microalloyed steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2013, 34(5):42-46.
- [21] ZENER C, HOLLOWOMON J H. Effect of strain rate upon plastic flow of steel[J]. Journal of Applied Physics, 1944, 15(1):22-32.