

## 基于摩擦修正的 SCM920 钢高温本构方程

兰 毅, 龚红英, 尤 晋, 吴 玥, 杨靖琪, 邱文字

(上海工程技术大学 材料科学与工程学院, 上海 201620)

**摘要:** 在变形温度为 800~1000 °C、应变速率为 0.1~1.0 s<sup>-1</sup> 条件下, 采用 Gleeble-3800 热模拟试验机对 SCM920 钢进行压缩量为 60% 的热压缩试验, 获得其高温应力-应变曲线, 通过计算膨胀系数判断出摩擦效应对流动应力产生的影响较大, 并对该曲线进行摩擦修正。基于 Arrhenius 方程以及 Zener-Hollomon 方程, 构建出适用于 SCM920 钢的双曲正弦本构方程, 并在此基础上借助 Deform-3D 有限元软件对不同变形条件下的热压缩过程进行数值模拟, 研究变形温度和应变速率对应力和应变的影响。结果表明: SCM920 钢的流动应力随应变速率的降低和变形温度的上升显著降低; 摩擦效应对流动应力产生的影响较大, 且随着变形程度的增加而逐渐增大; 摩擦修正前后, 应力-应变曲线的整体趋势一致; 变形温度的升高能有效降低流动应力, 提高金属的变形能力, 应变速率的提高增大了最大主应力且提高了试样的应力变化梯度。

**关键词:** 热压缩; 应力-应变曲线; 摩擦修正; 本构模型; Deform-3D

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.04.030

**中图分类号:** TG386

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2025) 04-0248-09

## High-temperature constitutive equations of SCM920 steel based on friction correction

Lan Yi, Gong Hongying, You Jin, Wu Yue, Yang Jingqi, Qiu Wenyu

(School of Materials Science and Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** Under the conditions of the deformation temperature of 800–1000 °C and the strain rate of 0.1–1 s<sup>-1</sup>, a hot compression test of SCM920 steel with a compression amount of 60% was conducted by thermal simulation test machine Gleeble-3800 to obtain its high-temperature stress-strain curves. Then, by calculating the coefficient of expansion, it was determined that the friction effect had a significant impact on the flow stress, and the curve was corrected by friction. Furthermore, based on the Arrhenius equation and the Zener-Hollomon equation, a hyperbolic sine constitutive equation suitable for SCM920 steel was constructed, and on this basis, the hot compression process under different deformation conditions was numerically simulated by finite element software Deform-3D to research the influences of deformation temperature and strain rate on stress and strain. The results show that the flow stress of SCM920 steel significantly decreases with the decreasing of strain rate and the increasing of deformation temperature, and the friction effect has a significant impact on the flow stress and gradually increases with the increasing of deformation degree. The overall trend of the stress-strain curve is consistent before and after friction correction. The increase of deformation temperature effectively reduces the flow stress and improves the deformation capacity of metal, and the increase of strain rate increases the maximum principal stress and enhances the stress change gradient of specimen.

**Key words:** hot compression; stress-strain curve; friction correction; constitutive model; Deform-3D

SCM920 钢是一种合金钢, 常被用于制造变速器齿轮或行星齿轮。为了发挥材料优异的力学性能,

齿轮的制造过程通常包含热处理、热锻挤以及表面处理等工艺。工程师们在工艺设计阶段可采用有限元数值模拟技术对成形工艺进行初步判断, 但需要依靠材料的本构模型建立精准的材料模型。

为构建 SCM920 钢高温变形的本构方程并开展后续有限元模拟, 采用热模拟试验机对圆柱试样进行热压缩试验以获取其高温应力-应变曲线。需指出的是, 热模拟过程中所测得的应力-应变数据未考虑端面摩擦的影响, 而实际试验中试样端面与压头之间存在摩擦作用, 易导致应变分布不均, 进而

**收稿日期:** 2024-02-29; **修订日期:** 2024-05-16

**基金项目:** 上海市自然科学基金资助项目 (20ZR1422700); 上海工程技术大学校企合作资助项目 (0235-E4-6000-24-0143-(24) CL-021)

**作者简介:** 兰 毅 (2000-), 男, 硕士研究生

**E-mail:** 1102274170@qq.com

**通信作者:** 龚红英 (1974-), 女, 博士, 教授

**E-mail:** ghyyw@163.com

使应力-应变曲线产生偏差<sup>[1]</sup>。针对该问题,许多学者做出了相应研究,如 Mahender T 等<sup>[2]</sup>通过等温热压缩试验获取了 Al 2014+2wt% TiB<sub>2</sub> 复合材料的数据,结合响应面法、遗传算法和人工神经网络构建出 3 种本构模型并进行对比,通过使用标准统计参数验证了高次回归方程适合描述非线性本构关系,但并未解决摩擦所带来的干扰问题。Chen G X 等<sup>[3]</sup>通过高温压缩试验研究了 M50 钢的热变形特性,在 Arrhenius 型本构方程的基础上建立了 9 阶应变补偿本构方程并构建出了 M50 钢的加工图,结合光学显微镜和电子背散射衍射研究了再结晶变化,证明了应变速率、温度与再结晶间的关系。Song C N 等<sup>[4]</sup>在 Gleeble-3500 热模拟试验机上进行了变形温度为 850~1050 ℃ 和应变速率为 0.05~1 s<sup>-1</sup> 条件下的热压缩试验,研究了无取向电工钢的热变形行为;确定了奥氏体区、铁素体区和奥氏体-铁素体两相区的相变范围;基于应力-应变数据,采用粒子群优化和深度神经网络方法,建立了包含相变的高温本构关系。Sani S A 等<sup>[5]</sup>基于 Arrhenius 双曲正弦本构方程和动态再结晶机制对铸造镁合金 (Mg-Al-Ca) 的高温流动行为进行了建模和预测,结果表明,该模型在低应变速率和高温条件下的预测精度较高,但在高应变速率和低温条件下因受孪晶效应影响预测精度有所下降。

本研究利用 Gleeble-3800 热模拟试验机在变形温度为 800~1000 ℃、应变速率为 0.1~1 s<sup>-1</sup> 条件下对 Φ8 mm×12 mm 的 SCM920 钢圆柱试样进行高温压缩试验,获取材料在高温下的应力-应变曲线。通过镦粗变形力计算出真应力、真应变,并对高温真应力-真应变曲线进行摩擦修正。结合 Arrhenius 方程以及 Zener-Hollomon 方程,构建出适用于 SCM920 钢的双曲正弦本构方程,并利用 Deform-3D 进行等温锻造数值模拟,为 SCM920 钢的热加工应用和工艺优化提供了科学依据。

### 1 热压缩试验

采用熔炼分析 SCM920 钢的成分,结果如表 1 所示。将坯料制成 Φ8 mm×12 mm 的圆柱试样,采用 Gleeble-3800 热模拟试验机对试样进行等温压缩试验。为了减少摩擦的影响,在样品两端添加钼片,并采用热电偶检测温度的变化。试验流程如下:试样以 30 ℃·s<sup>-1</sup> 的加热速度加热至 1200 ℃,保温 5 min 后,以 5 ℃·s<sup>-1</sup> 的冷却速度冷却至 800、900、1000 ℃ 共 3 种试验温度,在应变速率分别为 0.1 和 1.0 s<sup>-1</sup> 条件下进行 60% 压缩试验,试验结束后立即水淬以保留组织。热压缩试验方案如图 1 所示。

表 1 SCM920 钢的化学成分 (%, 质量分数)  
Table 1 Chemical compositions of SCM920 steel (% , mass fraction)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Nb	H
0.17~0.21	≤0.15	0.60~0.85	≤0.020	≤0.030	≤0.25	1.25~1.45	0.55~0.65	≤0.30	0.015~0.035	≤0.0002

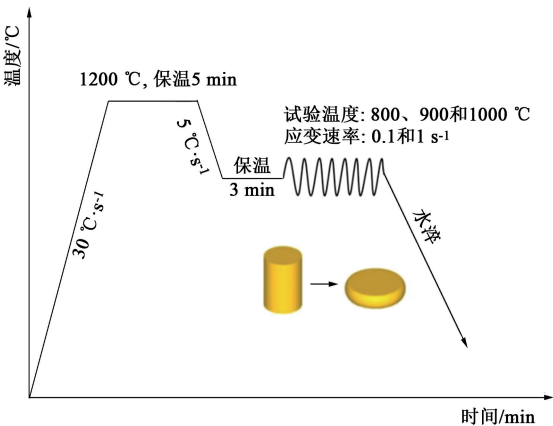


图 1 SCM920 钢的热压缩流程  
Fig. 1 Hot compression flow of SCM920 steel

### 2 试验结果与讨论

#### 2.1 真应力-真应变曲线特征分析

SCM920 钢在不同变形条件下的真应力-应变曲线如图 2 和图 3 所示。由图 2 可知,在恒定应变速率下,材料的真应力随着变形温度的升高而明显降低,反映出高温对降低材料流动应力的显著影响<sup>[6]</sup>。这一现象可能与高温下原子活动的增强有关,其降低了位错移动的阻力,从而使得材料更容易发生塑性变形,导致真应力下降。同时,变形温度的升高促进了材料的动态软化过程,材料发生动态再结晶和动态回复<sup>[7]</sup>,减弱了加工硬化效应,进

一步导致真应力降低。

复受限, 软化效应减弱, 而加工硬化效应占主导,

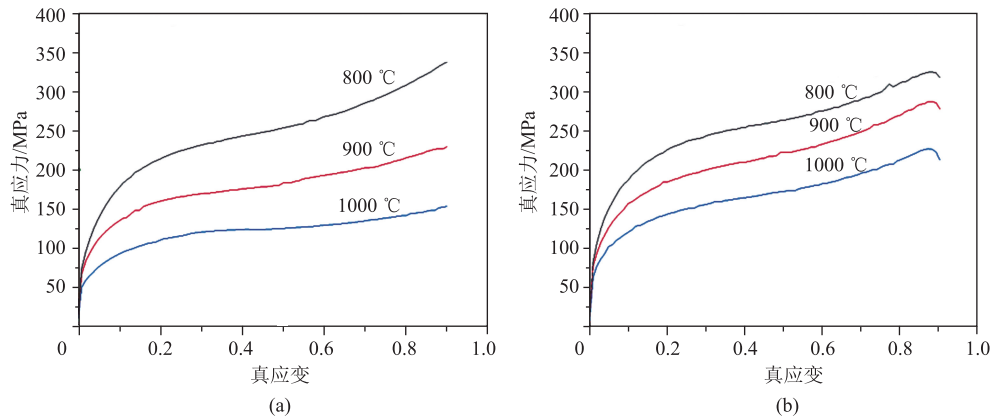


图 2 不同应变速率下 SCM920 钢的真应力-真应变曲线

(a)  $0.1 \text{ s}^{-1}$  (b)  $1.0 \text{ s}^{-1}$

Fig. 2 True stress-true strain curves of SCM920 steel at different strain rates

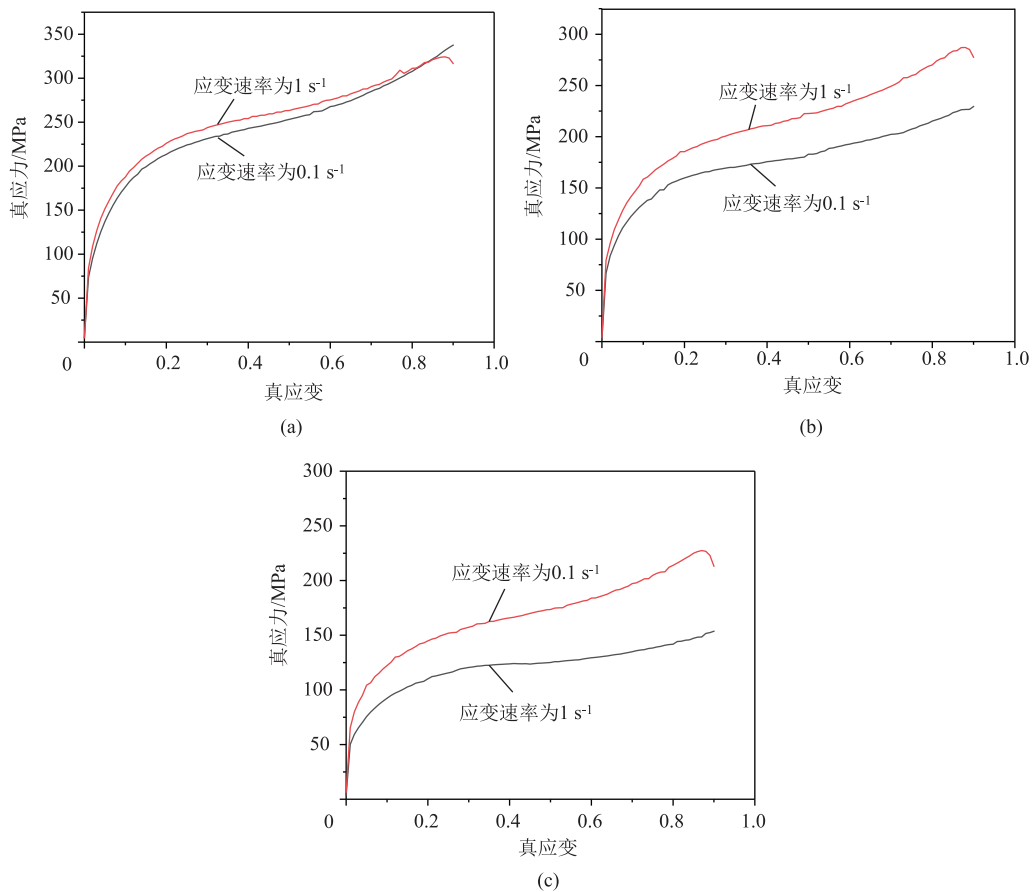


图 3 不同变形温度下 SCM920 钢的真应力-真应变曲线

(a)  $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (b)  $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (c)  $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 3 True stress-true strain curves of SCM920 steel at different deformation temperatures

图 3 为 SCM920 钢在变形温度为 800、900 和 1000  $^{\circ}\text{C}$  下的真应力-真应变曲线。由图 3 可知, 在相同变形温度下, 峰值真应力随应变速率的增加而升高。这主要归因于较高应变速率下材料的动态回

从而提高了材料的流动应力水平<sup>[8-9]</sup>。

## 2.2 流动应力的摩擦修正

图 4 为试样在压缩试验前后的尺寸变化图。其中,  $H_0$  和  $R_0$  为圆柱试样初始高度和半径,  $H_f$ 、 $R_M$

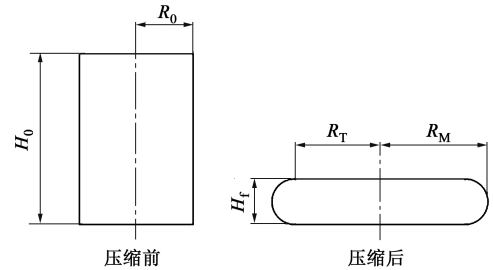


图 4 压缩试验前后试样形状示意图  
Fig. 4 Schematic diagram of sample shape before and after compression test

和  $R_T$  为试样压缩后的高度、鼓肚处最大半径和端面半径。使用 Gleeble-3800 热模拟试验机获得的应力和应变数据是在假定均匀变形的条件下得到的。在该情况下，可以利用膨胀系数<sup>[10]</sup>来评估所得到的应力-应变曲线，并据此判断是否需要对其进行修正。膨胀系数  $B$  的计算公式如下：

$$B = \frac{H_f R_M^2}{H_0 R_0^2}$$

(1)

当  $1.0 < B < 1.1$  时，摩擦效应对流动应力产生的影响较小，可以忽略；当  $B \geq 1.1$  时，试验中摩擦力对流动应力产生的影响较大，需要对其进行摩擦修正<sup>[11-12]</sup>。

通过测量压缩后试样的几何尺寸来计算膨胀系数，结果如表 2 所示。由表 2 可知，所有变形条件下的膨胀系数均大于 1.1，表明摩擦效应显著，需对应力-应变曲线进行摩擦修正。

为了能较为准确地反映出高温下材料的变形行为，本文采用镦粗变形力计算真实流动应力<sup>[11,13]</sup>，其表达式如下：

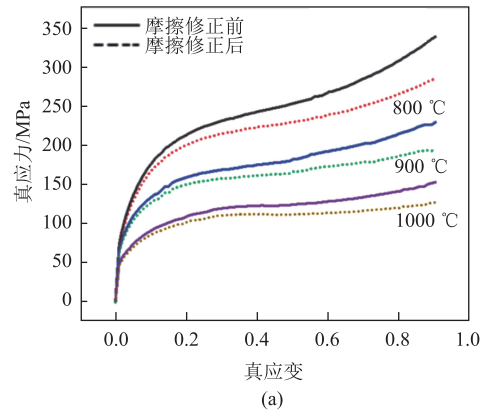


表 2 不同变形条件下的膨胀系数

Table 2 Expansion coefficients under different deformation conditions

变形温度/℃	应变速率/s <sup>-1</sup>	
	0.1	1.0
800	1.142	1.132
900	1.136	1.139
1000	1.153	1.146

$$\sigma_f = \frac{\sigma_0 C^2}{2(\exp(C) - C - 1)}$$

(2)

式中： $\sigma_f$  为摩擦修正后的真实流动应力； $\sigma_0$  为热模拟试验机上获取的应力； $C$  为材料常数， $C = \frac{2\mu R'}{H_f}$ ； $\mu$  为摩擦因数； $R'$  为镦粗变形后的试样半径， $R' = R_0 \sqrt{H_0/H_f}$ 。

摩擦因数  $\mu$  的表达式如下<sup>[14]</sup>：

$$\mu = \frac{(R'/H_f)b}{\frac{4}{\sqrt{3}} - \frac{2b}{3\sqrt{3}}}$$

(3)

式中： $b$  为几何形变修正因子， $b = 4 \frac{\Delta R H_f}{R' \Delta H}$ ； $\Delta H = H_0 - H_f$ ； $\Delta R = R_M - R_T$ ； $R_T = \sqrt{3 \frac{H_0}{H_f} R_0^2 - 2R_M^2}$ 。

将测量数据代入式 (3) 计算出摩擦因数  $\mu$ ，然后再代入式 (2) 中求解出真应力-真应变曲线。修正前后的曲线如图 5 所示，由图 5 可知，摩擦修正前后真应力-真应变曲线的变化趋势是一致的，且试验得到的真应力始终大于摩擦修正后的真应力，并且随着真应变的增加，两者之间的差值逐渐增大。由此可以推断，摩擦对真应力-真应变曲线的影响

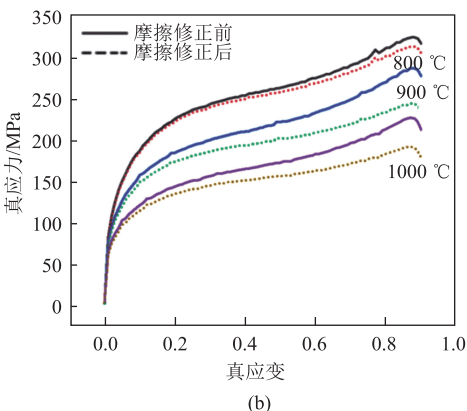


图 5 不同变形条件下摩擦修正前后的真应力-真应变曲线  
(a) 0.1 s<sup>-1</sup> (b) 1.0 s<sup>-1</sup>

Fig. 5 True stress-true strain curves before and after friction correction under different deformation conditions

随变形程度的增加而增大,这是因为随着压缩程度的逐渐增大,试样与上下压头之间在两端面的接触面积持续增大,导致摩擦作用增强,摩擦效应越大,摩擦对真应力的影响就越大。

### 3 本构方程构建

采用双曲正弦形式的 Arrhenius 方程<sup>[15-17]</sup>来表达变形温度  $T$ 、应变速率  $\dot{\varepsilon}$  和流动应力  $\sigma$  之间的关系,其表达式如下:

$$\dot{\varepsilon} = AF(\sigma) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (4)$$

$$F(\sigma) = \begin{cases} \sigma^{n_1} & \alpha\sigma < 0.8 \\ \exp(\beta\sigma) & \alpha\sigma > 1.2 \\ [\sinh(\alpha\sigma)]^n & \text{所有 } \sigma \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\dot{\varepsilon}$  为应变速率,  $s^{-1}$ ;  $Q$  为材料的应变激活能,  $(kJ \cdot mol^{-1})$ ;  $R$  为气体常数, 取值为  $8.314 J \cdot (mol \cdot K)^{-1}$ ;  $A$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $n$ 、 $n_1$  为系数, 且  $\alpha = \beta/n_1$ 。

为了更加准确地描述变形温度和应变速率对材料热变形过程的影响, 引入 Zener-Hollomon 方程<sup>[18]</sup>, 其表达式如下:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (6)$$

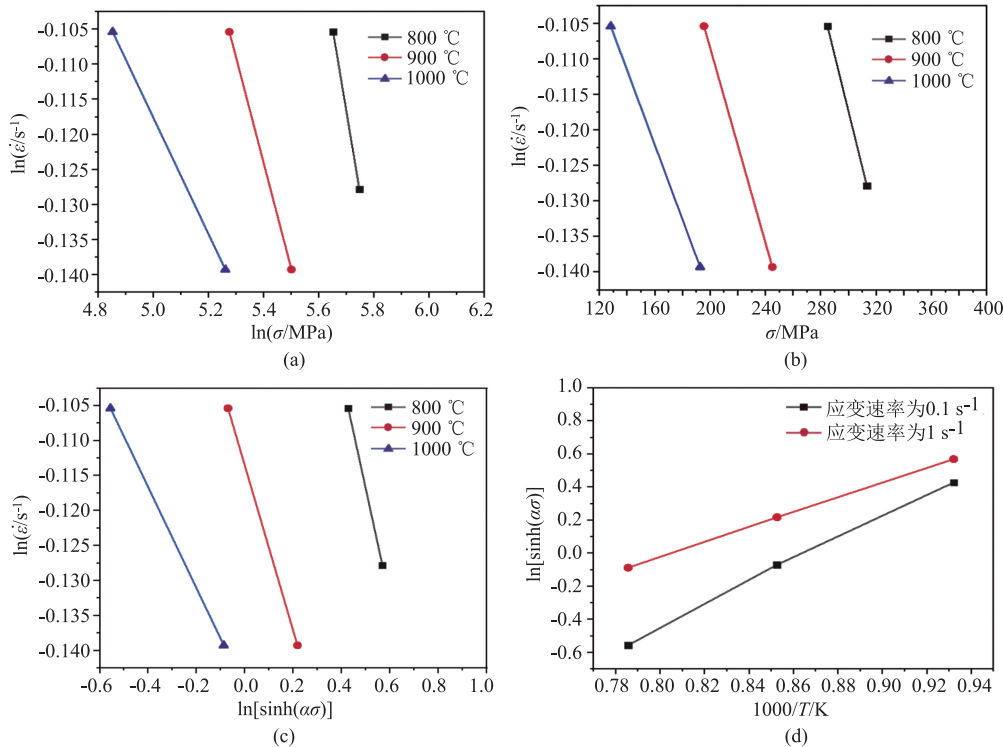


图 6 SCM920 钢的材料常数的线性拟合曲线

(a)  $\ln \dot{\varepsilon} - \ln \sigma$  (b)  $\ln \dot{\varepsilon} - \sigma$  (c)  $\ln \dot{\varepsilon} - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$  (d)  $\ln [\sinh(\alpha\sigma)] - 1000/T$

Fig. 6 Linear fitting curves of material constants for SCM920 steel

式中:  $Z$  为 Zener-Hollomon 参数。

为了求取  $n$ 、 $n_1$ 、 $\alpha$  和  $\beta$  的值, 将 Arrhenius 方程代入 Zener-Hollomon 方程并对方程两端同时取对数, 可得如下:

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

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_2 + \beta \sigma - Q/RT \quad (8)$$

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] - Q/RT \quad (9)$$

由式 (7) ~ 式 (9) 可知, 通过对  $\ln \dot{\varepsilon} - \ln \sigma$  和  $\ln \dot{\varepsilon} - \sigma$  进行线性拟合, 拟合出的直线取其斜率的平均数即可求出  $n_1$  值与  $\beta$  值。通过等式  $\alpha = \beta/n_1$ , 可以求出  $\alpha$  值。

由式 (9) 可知, 在  $T$  或  $\dot{\varepsilon}$  一定的情况下, 通过对式 (9) 进行偏微分可得以下方程:

$$n = \left\{ \frac{\partial \ln \dot{\varepsilon}}{\partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)]} \right\}_T \quad (10)$$

$$Q = Rn \left\{ \frac{\partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial [1/T]} \right\}_{\dot{\varepsilon}} \quad (11)$$

由式 (10) 和式 (11) 可知, 在  $T$  或  $\dot{\varepsilon}$  为定值的情况下, 通过对  $\ln \dot{\varepsilon} - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$  和  $\ln [\sinh(\alpha\sigma)] - 1/T$  进行线性拟合, 得出直线的斜率, 该斜率的平均数即为  $n$  值与  $Q$  值。SCM920 钢的材料常数的线性拟合曲线如图 6 所示。



根据线性拟合, 分别得到:  $n_1 = 0.1567$ ,  $\beta = 0.007 \text{ MPa}^{-1}$ ,  $\alpha = 0.0043 \text{ MPa}^{-1}$ ,  $n = 2.375$ ,  $Q = 341.543856 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

对式 (5) 两端同时取自然对数, 可以得到另一种不同于式 (7) ~ 式 (9) 的表达形式, 其表达形式为:

$$\ln Z = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha \sigma)] \quad (12)$$

由式 (12) 可知, 通过对  $\ln Z - \ln [\sinh(\alpha \sigma)]$  进行线性拟合, 可得到更为精准的  $n$  值和  $\ln A$  的值。 $\ln A$  代表直线与坐标轴的截距, 由此可求出  $A$  值。通过对 SCM920 钢的峰值应力与应变速率进行拟合, 得出的直线如图 7 所示。

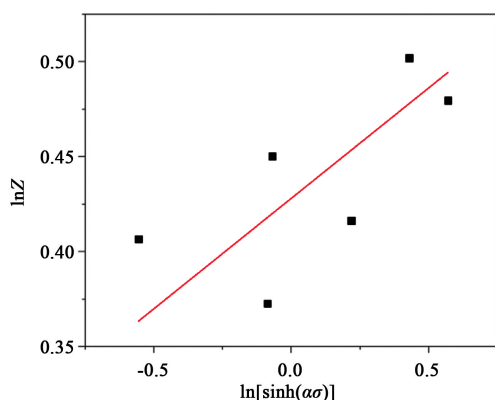


图7  $\ln Z - \ln [\sinh(\alpha \sigma)]$  线性拟合曲线

Fig. 7 Linear fitting curve of  $\ln Z - \ln [\sinh(\alpha \sigma)]$

根据线性拟合可得  $A = 1.5346$ 。综上所述, SCM920 钢的双曲正弦本构方程可表示为:

$$\dot{\varepsilon} = 1.5346 [\sinh(0.0043\sigma)]^{2.375} \cdot \exp\left(-\frac{341543.86}{8.314T}\right) \quad (13)$$

## 4 等温锻造数值模拟

运用 Deform-3D 有限元分析软件对 SCM920 钢的等温热压缩过程进行数值模拟, 研究变形温度和应变速率对变形过程中应力和应变分布的影响。将构建的高温本构方程导入 Deform-3D 材料库, 建立 SCM920 钢的高温力学性能参数模型。通过 SolidWorks 软件建立有限元模型, 将文件格式保存为 STL 格式导入 Deform 软件, 几何模型如图 8 所示, 中间部分为经过四面体网格划分的压缩试样, 上下两部分为刚性压头。

### 4.1 变形温度对等效应变和最大主应力分布的影响

不同变形温度下的等效应变分布如图 9 所示。

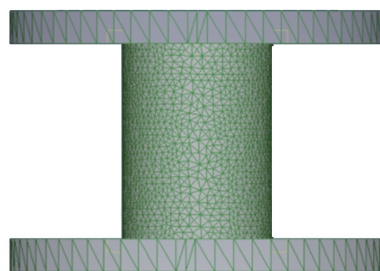


图8 压缩试样的几何模型

Fig. 8 Geometric model of compressed specimen

为了更加直观地观察等效应变的整体差异, 采用剖面图进行分析。由图 9 可以看出, 800、900 和 1000 °C 下等效应变的分布具有一定的相似性。与刚性压头接触的中心区域, 均存在一个低应变区, 通常称为难变形区<sup>[19]</sup>, 这是因为试样表面受到的摩擦阻力较大, 金属流动受到三向压应力, 越靠近压头的中心部分, 金属流动受外层阻碍越大, 变形就越困难。由图 9 可知, 随着变形温度的升高难变形区逐渐减小。摩擦力会随到接触点的距离的增大而减弱, 在试样的中心均存在一个变形程度最大的区域, 称为大变形区, 从大变形区向试样两端和端面应变逐渐减小, 尤其沿着压缩方向应力递减的趋势更加明显。压缩试样外侧均存在一个变形程度居中的鼓形区域, 称为小变形区, 不同温度下小变形区的应变基本相同。

不同变形温度下的最大主应力分布如图 10 所示, 800、900 和 1000 °C 下的最大主应力分布也具有相似的特征。大变形区金属质点在轴向压应力的作用下产生很大的应变, 压应力从大变形区向端面逐渐减小, 向侧面逐渐转化为拉应力。小变形区外侧为自由端面, 受端面摩擦力影响小。大变形区金属向外流动会对小变形区金属产生切向拉应力, 越靠近端面拉应力越大, 且随着变形温度的升高, 难变形区靠近中心区域的最大主应力逐渐降低。总体而言, 变形温度的升高能有效降低金属的变形抗力, 提高一定工况下金属的变形能力<sup>[20]</sup>。

### 4.2 应变速率对等效应变和最大主应力分布的影响

在 1000 °C/1.0 s<sup>-1</sup> 变形条件下的等效应变与最大主应力分布如图 11 所示。与图 10c 中 1000 °C / 0.1 s<sup>-1</sup> 小应变速率相比, 等效应变的分布基本相同, 但 1000 °C / 0.1 s<sup>-1</sup> 条件下, 从难变形区到大变形区的过渡区域, 等效应变值相对提高。对比图 10c 中的最大主应力, 当应变速率增加至 1.0 s<sup>-1</sup> 时, 最大主应力分布基本相同, 但同等位置的压应

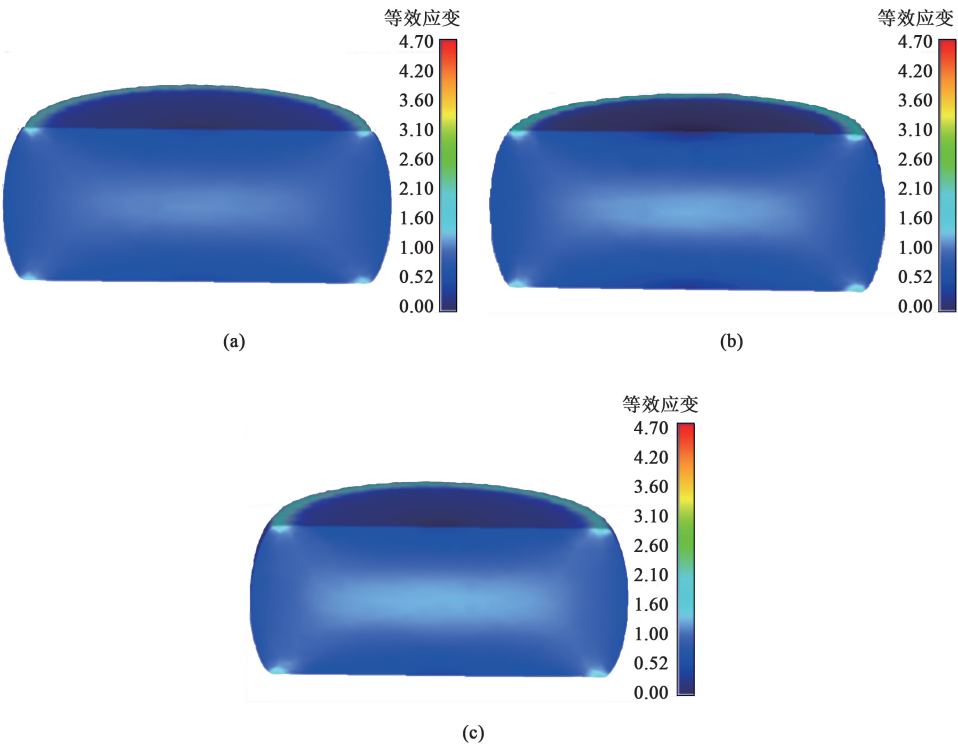


图 9 应变速率为  $0.1\text{ s}^{-1}$  时不同变形温度下的等效应变分布  
(a) 800 °C (b) 900 °C (c) 1000 °C

Fig. 9 Equivalent strain distributions at different deformation temperatures under strain rate of  $0.1\text{ s}^{-1}$

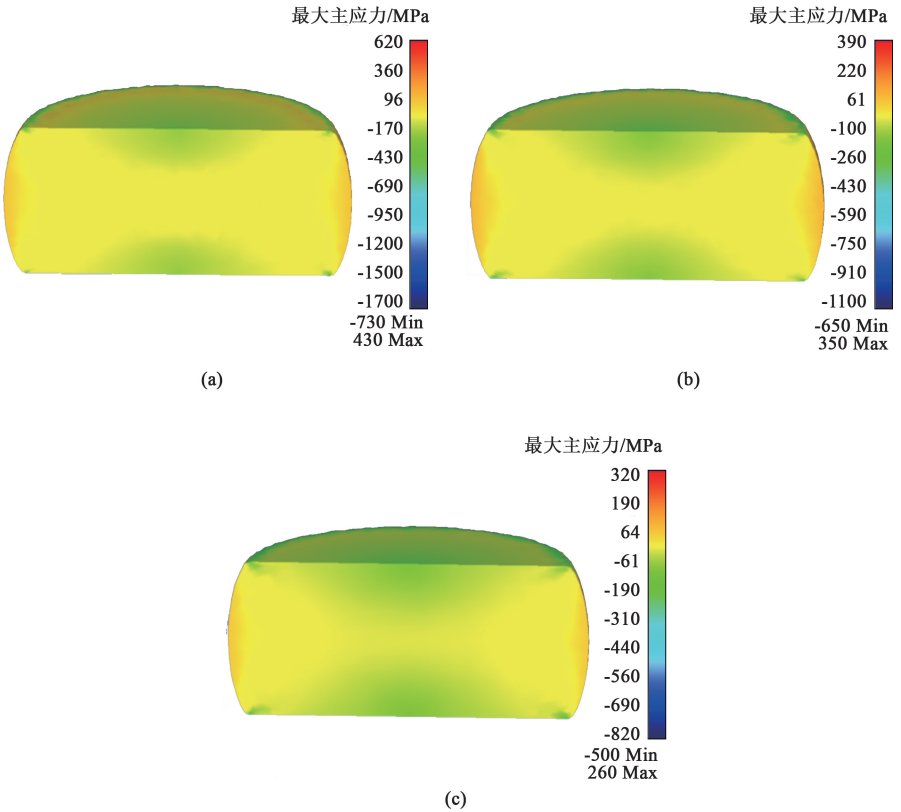


图 10 应变速率为  $0.1\text{ s}^{-1}$  时不同变形温度下的最大主应力分布  
(a) 800 °C (b) 900 °C (c) 1000 °C

Fig. 10 Maximum principal stress distributions at different deformation temperatures under strain rate of  $0.1\text{ s}^{-1}$

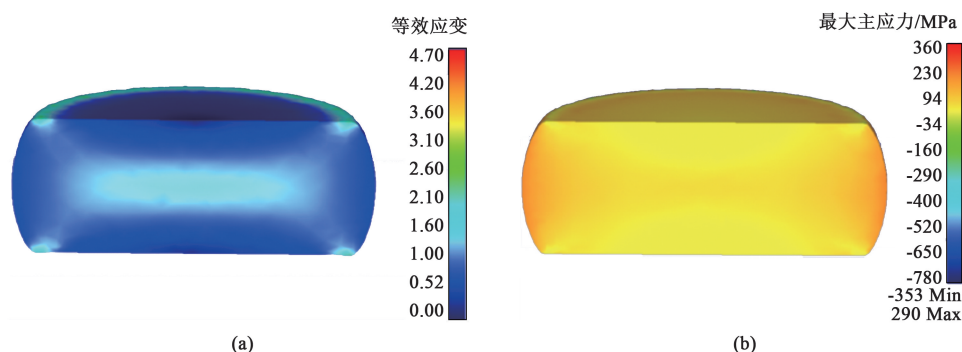


图 11 1000 °C/1.0 s<sup>-1</sup> 变形条件下的等效应变 (a) 和最大主应力 (b) 分布

Fig. 11 Distributions of equivalent strain (a) and maximum principal stress (b) in deformation condition of 1000 °C/1.0 s<sup>-1</sup>

力和拉应力均明显增大。总体而言, 应变速率的提高增大了最大主应力且提高了试样的应力梯度。

## 5 结论

(1) 采用 Gleeble-3800 热模拟试验机对 SCM920 钢进行高温压缩试验, 基于膨胀系数的数值, 判定在热压缩过程中, 摩擦对流动应力产生了显著影响。采用敏粗变形力的方法计算材料的真应力, 并对应力-应变曲线进行修正。

(2) 通过结合 Arrhenius 方程与 Zener-Hollomon 方程对修正后的真应力-真应变曲线进行描述, 获得了 SCM920 钢的双曲正弦本构方程。

(3) 模拟结果表明, 一定应变速率下, 变形温度的提高能有效降低变形抗力, 提高金属的变形能力; 一定的变形温度下, 应变速率的提高会引起应力的提高与应力变化梯度的明显增大。

### 参考文献:

- [1] 刘建宇, 张留军, 张心金, 等. 井口头锻件用 AISI 4140 钢高温热压缩变形行为研究 [J]. 天津理工大学学报, 2021, 37 (2): 30-35.  
Liu J Y, Zhang L J, Zhang X J, et al. Study on high temperature hot compression deformation behaviour of AISI 4140 steel for wellhead head forgings [J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2021, 37 (2): 30-35.
- [2] Mahender T, Balasundar I, Gupta A, et al. Metamodels to describe the high temperature deformation behaviour of Al 2014, 2wt% TiB<sub>2</sub> composite [J]. Advances in Materials and Processing Technologies, 2022, 8 (4): 2097-2109.
- [3] Chen G X, Lu X Y, Yan J, et al. High-temperature deformation behavior of M50 steel [J]. Metals, 2022, 12 (4): 541.
- [4] Song C N, Cao J G, Xiao J, et al. High-temperature constitutive relationship involving phase transformation for non-oriented electrical steel based on PSO-DNN approach [J]. Materials Today

- Communications, 2023, 34: 105210.
- [5] Sani S A, Ebrahimi G R, Vafaenezhad H, et al. Modeling of hot deformation behavior and prediction of flow stress in a magnesium alloy using constitutive equation and artificial neural network (ANN) model [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2018, 6 (2): 134-144.
- [6] 邱仟, 王克鲁, 李鑫, 等. 摩擦效应和温度效应对 SP700 钛合金热压缩流动应力的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42 (1): 59-63.  
Qiu Q, Wang K L, Li X, et al. Influence of friction effect and temperature effect on the flow stress of SP700 titanium alloy in hot compression [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42 (1): 59-63.
- [7] 周靖, 王宝雨, 徐伟力, 等. 耦合损伤的 22MnB5 热变形本构模型 [J]. 北京科技大学学报, 2013, 35 (11): 1450-1457.  
Zhou J, Wang B Y, Xu W L, et al. A 22MnB5 thermal deformation constitutive model with coupled damage [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35 (11): 1450-1457.
- [8] 刘忠煜, 陈雨琳, 柳志铨, 等. 微合金化 8630 钢高温热压缩变形行为研究 [J]. 钢铁研究学报, 2023, 35 (12): 1548-1559.  
Liu Z Y, Chen Y L, Liu Z C, et al. Study on the high-temperature hot compression deformation behavior of microalloyed 8630 steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2023, 35 (12): 1548-1559.
- [9] 李晗, 李晓, 张雪姣, 等. 9Cr3W3Co 钢热变形行为研究 [J]. 大型铸锻件, 2023 (6): 30-34, 39.  
Li H, Li X, Zhang X J, et al. Study on heat deformation behavior of 9Cr3W3Co steel [J]. Heavy Casting and Forging, 2023 (6): 30-34, 39.
- [10] 陈正宗, 刘正东, 包汉生. 耐热合金热压缩修正后本构方程及热加工图 [J]. 钢铁研究学报, 2015, 27 (9): 44-48.  
Chen Z Z, Liu Z D, Bao H S. Modified constitutive equation and hot working diagram of heat-resistant alloys after hot compression [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2015, 27 (9): 44-48.
- [11] 廉学魁, 韩顺, 刘跃, 等. 基于摩擦修正的 GE1014 钢热本构方程及热加工图 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (3): 219-226.



- Lian X K, Han S, Liu Y, et al. Thermal constitutive equation and hot working diagram of GE1014 steel based on friction modification [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (3): 219-226.
- [12] 武建国, 安红萍, 刘俐利, 等. 基于摩擦修正的 SA508-3 钢高温本构方程 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (12): 178-182, 190.
- Wu J G, An H P, Liu L L, et al. High-temperature constitutive equation of SA508-3 steel based on friction modification [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (12): 178-182, 190.
- [13] Ebrahimi R, Najafizadeh A. A new method for evaluation of friction in bulk metal forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 152 (2): 136-143.
- [14] Wanjara P, Jahazi M, Monajati H, et al. Hot working behavior of near- $\alpha$  alloy IM1834 [J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 396 (1-2): 50-60.
- [15] Zhou H T, Kong F T, Wang X P, et al. Hot deformation behavior and microstructural evolution of as-forged Ti-44Al-8Nb-(W,B,Y) alloy with nearly lamellar microstructure [J]. Intermetallics, 2017, 81: 62-72.
- [16] 尤黎明, 杜伟, 董晓坤, 等. 基于 Arrhenius 方程氯丁胶管内胶应力-应变曲线预测及其扣压性能的计算仿真 [J]. 青岛科技大学学报 (自然科学版), 2021, 42 (6): 68-73.
- You L M, Du W, Dong X K, et al. Prediction of stress-strain curve of chloroprene rubber tube internal adhesive based on Arrhenius equation and computational simulation of its clamping performance [J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 42 (6): 68-73.
- [17] 毛欢, 韩莹莹. 基于应变补偿 Arrhenius 模型的 TC20 钛合金本构方程研究 [J]. 铸造技术, 2018, 39 (9): 1939-1942, 1947.
- Mao H, Han Y Y. Study on constitutive equations of TC20 titanium alloy based on strain compensation Arrhenius model [J]. Casting Technology, 2018, 39 (9): 1939-1942, 1947.
- [18] Zener C, Hollomon J H. Effect of strain rate upon plastic flow of steel [J]. Journal of Applied Physics, 1944, 15 (1): 22-32.
- [19] 卢金武, 王磊, 范晓杰, 等. TC18 钛合金等温锻造过程的数值模拟 [J]. 湖南有色金属, 2023, 39 (5): 65-68, 83.
- Lu J W, Wang L, Fan X J, et al. Numerical simulation of isothermal forging process of TC18 titanium alloy [J]. Hunan Nonferrous Metals, 2023, 39 (5): 65-68, 83.
- [20] 陶成, 崔霞, 欧阳德来, 等. TC21 钛合金热压缩工艺数值模拟与实验研究 [J]. 塑性工程学报, 2023, 30 (8): 195-201.
- Tao C, Cui X, Ouyang D L, et al. Numerical simulation and experimental research on TC21 titanium alloy hot compression process [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30 (8): 195-201.

## 欢迎订阅《锻压技术》杂志 (月刊)

国内外公开发行, 全国各地邮局均可订阅, 逾期未订上者可与编辑部联系邮购

《锻压技术》杂志 1958 年创刊, 中国机械工业联合会主管、中国机械总院集团北京机电研究所有限公司和中国机械工程学会塑性工程分会主办。本刊是全国锻压行业会刊, 全国中文核心期刊, 被国内外多个著名检索系统收录。突出技术内容, 注重技术和信息相结合, 全面反映锻压行业的技术进步和发展趋势。

**主要栏目:** 综述、锻造、板料成形、管材成形、挤压与拉拔、轧制、特种成形、装备与成套技术、模具、摩擦与润滑、加热与热处理、测试技术、节能技术、材料与成形性能、理论与实验研究、计算机应用、技术交流、标准化、行业信息等。

**读者对象:** 大专院校的师生, 金属塑性成形(锻压)领域的科研、设计、生产部门的工程技术人员以及中等以上文化程度的工人等。

本刊为月刊, 每月 25 日出版, 大 16 开本, 256 页。统一刊号: CN11-1942/TG。邮发代号: 2-322。

(一) 购买期刊: ● 每册定价: 25.00 元; ● 年定价: 300.00 元。

(二) 购买合订本: ● 1991-2011 年合订本 (每本包含全年 1-6 期杂志): 110 元/本;

● 2012-2013 年合订本 (每本包含全年 1-6 期杂志): 140 元/本;

● 2014-2018 年合订本 (上册) (包含上半年 1-6 期杂志)、2014-2018 年合订本 (下册)

(包含下半年 7-12 期杂志): 180 元/本。

直接通过编辑部订阅者, 请与杂志发行部负责人林玉彤联系。并按编辑部地址汇款, 款到后我们会定期寄给您刊物。

**邮局汇款信息:**

地址: 北京市海淀区学清路 18 号北京机电研究所有限公司 709 室

邮编: 100083

收款人: 《锻压技术》编辑部

附言处: 请注明“订阅《锻压技术》”

联系人: 林玉彤 电话: 010-62920652-804

E-mail: fst\_linyutong@163.com

《锻压技术》编辑部