

## 07MnNiMoDR 钢热轧变形本构方程及轧制力预测

汪后明<sup>1</sup>, 张计谋<sup>1</sup>, 王 振<sup>1</sup>, 陈旭鹏<sup>2</sup>, 石润坤<sup>2</sup>, 许晓嫦<sup>2</sup>

(1. 湖南华菱湘潭钢铁有限公司, 湖南 湘潭 411101; 2. 中南大学 材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘要:** 轧制力的预测是热轧工艺能够顺利进行的重要前提步骤。为预测热轧过程中轧制力的大小, 采用热模拟试验机对 07MnNiMoDR 钢进行了单道次热压缩实验, 获得了温度为 850~1150 ℃、应变速率为 0.1~10 s<sup>-1</sup>、真应变为 0.9 条件下的高温流变行为, 分析了不同变形条件下 07MnNiMoDR 钢的动态再结晶及动态回复行为, 并基于 Arrhenius 方程及变形机理建立了其热轧本构方程。利用材料性能分析软件 JMatPro 计算了 07MnNiMoDR 钢的温度场参数; 基于高温热轧本构方程及温度场参数, 通过有限元分析软件 Deform-3D 对热轧过程进行模拟, 验证了轧制力预测的准确度。结果表明: 所建立的 07MnNiMoDR 钢的本构方程及温度参数, 对预测轧制力具有良好的预测精度,  $R$  值为 0.9875。

**关键词:** 07MnNiMoDR 钢; 热轧变形; 本构方程; 轧制力; 温度场参数

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.02.021

中图分类号: TG335

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 02-0172-10

## Hot rolling deformation constitutive equation and rolling force prediction of 07MnNiMoDR steel

Wang Houming<sup>1</sup>, Zhang Jimou<sup>1</sup>, Wang Zhen<sup>1</sup>, Chen Xupeng<sup>2</sup>, Shi Runkun<sup>2</sup>, Xu Xiaochang<sup>2</sup>

(1. Hunan Valin Xiangtan Iron & Steel Co., Ltd., Xiangtan 411101, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The prediction of rolling force is an important prerequisite for the smooth running of hot rolling process. Therefore, in order to predict the rolling force in the hot rolling process, the single-pass hot compression test of 07MnNiMoDR steel was conducted by thermal simulation test machine to obtain the high temperature rheological behavior under the conditions of the deformation temperature of 850–1150 ℃, the strain rate of 0.1–10 s<sup>-1</sup> and the true strain of 0.9. Then, the dynamic recrystallization and dynamic recovery behavior of materials under different deformation conditions were analyzed, and based on Arrhenius equation and deformation mechanism, the hot rolling constitutive equation of experimental steel was established. Furthermore, the temperature field parameters of 07MnNiMoDR steel were calculated by the material property analysis software JMatPro, and based on the high temperature rolling constitutive equation and temperature parameters, the prediction accuracy of rolling force was verified by software Deform-3D. The results show that established constitutive equation and temperature parameters of 07MnNiMoDR steel have good prediction accuracy for predicting rolling force with an  $R$  value of 0.9875.

**Key words:** 07MnNiMoDR steel; hot rolling deformation; constitutive equation; rolling force; temperature field parameters

热连轧是板带材生产的重要方式之一, 提高连轧过程的生产效率及板材的质量是工业生产过程中的重点课题, 其中轧制力的预测尤为关键<sup>[1]</sup>。目前, 轧制力预测的主要研究方法包括有限元法、改进的数学解析法及神经网络学习法<sup>[2]</sup>。数学解析法主要有斯通模型 (M. D. Stone)、采利柯夫模型、卡

尔曼模型和奥罗万模型等<sup>[3]</sup>, 通过研究轧制过程中摩擦条件、加功率、辊径等影响因素对单位压力的影响, 进而对轧制力预测模型进行改进<sup>[4]</sup>。相比于数学解析法, 神经网络学习法对轧制力的预测有着更高的预测精度<sup>[5-6]</sup>, 尤其是神经网络学习技术与轧制力模型相结合的方法, 但其需要在大量实验数据的基础上才能实现较高的预测精度<sup>[7]</sup>。有限元法在复杂变形时的轧制力预测方面有较大的优势, 材料参数确定后可用于不同加工方式的轧制力计算。吕明桦<sup>[8]</sup>使用有限元分析软件 Deform 预测了大型环件轧制时的轧制力, 为实际工业生产提供了理论依据。He Q Q 等<sup>[9]</sup>预测了多道次轧制生产 H 型钢时

收稿日期: 2023-06-07; 修订日期: 2023-09-22

作者简介: 汪后明 (1982-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: hnxgwanghm@163.com

通信作者: 许晓嫦 (1963-), 女, 博士, 教授

E-mail: xuxiaochang@csu.edu.cn

轧制力的大小，并验证了预测精度。Dema R R 等<sup>[10]</sup>使用有限元方法预测了轧制力大小，结果表明预测误差小于 5 %。汪建武等<sup>[11]</sup>利用材料的本构关系建立了材料的相关参数，预测了轧制过程中轧制力的大小，印证了使用本构方程建立材料参数的可行性。Kumar A 等<sup>[12]</sup>使用 Gleeble-3500 实验机生成材料参数并进行了轧制力预测的有限元模拟，实验值与预测值吻合良好。但文献 [11] 和文献 [12] 均未给出建立材料参数的过程。

模拟计算热轧过程前需建立材料参数，主要涉及温度场参数、高温变形行为、摩擦及润滑条件。高温流变本构方程常被用来描述材料高温变形过程，预估变形过程中应变、变形速率、温度与应力之间的关系，适合用于描述中厚钢板热轧过程的变形行为。本构方程的建立同样有多种方法，常见的主要有唯象型、物理型和神经网络型，均能较好地预估应力和应变关系<sup>[13]</sup>。李荣斌等<sup>[14]</sup>进行了热压缩实验，基于 Arrhenius 方程建立了峰值应力的本构方程，很好地描述了变形速率-温度-峰值应力之间的关系。陈雷等<sup>[15]</sup>基于 Arrhenius 方程，考虑了温度补偿、应变量补偿和应变速率补偿，对 0.05~0.69 应变下所有模型参数进行了 5 次多项式拟合，描述了速率-温度-应变-峰值应力的关系。刘艳芳等<sup>[16]</sup>基于 Avrami 方程和位错密度理论建立了本构方程，描述了所有变形条件下的高温变形行为。目前，大部分对本构方程的研究均停留在本构方程的建立上，

关于本构方程应用的报道较少。

本文针对 07MnNiMoDR 钢中厚板（48 mm）的热连轧生产过程，基于单道次热压缩实验获得了流动应力-应变曲线，采用 Arrhenius 模型建立了 07MnNiMoDR 钢的本构方程，并结合 Avrami 方程及位错密度理论描述了其动态回复及动态再结晶过程的高温变形行为。将本构方程应用于热轧过程轧制力的预测，对有限元模拟用材料参数的建立、本构方程的应用及实际热轧工艺参数的优化具有一定的指导意义。

1 实验及研究方法

实验材料为湖南华菱湘潭钢铁有限公司生产的热轧态 48 mm 厚 07MnNiMoDR 钢板，化学成分见表 1，其成分均在 GB/T 19189—2011<sup>[17]</sup> 范围内。将样品加工成尺寸为  $\Phi 8\text{ mm}\times 12\text{ mm}$  的圆柱形试样，利用 Gleeble-3180 实验机进行单道次热压缩实验，以  $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$  升温至 1150  $^{\circ}\text{C}$  并保温 3 min，分别冷却至 1150、1050、950 和 850  $^{\circ}\text{C}$ ，以  $0.1\sim 10\text{ s}^{-1}$  的应变速率进行热压缩，真应变为 0.9。通过热压缩实验测得 07MnNiMoDR 钢的流动真应力-真应变曲线。为预测 07MnNiMoDR 钢板在热轧过程中的轧制力，根据流动的真应力-真应变曲线建立本构方程以描述 07MnNiMoDR 钢在热轧时变形抗力与温度、应变速率和应变量的关系；使用材料性能分析软件 JMatPro 计算 07MnNiMoDR 钢的弹性模量、热导率和热容参数。

表 1 07MnNiMoDR 钢的化学成分（%，质量分数）  
Table 1 Chemical compositions of 07MnNiMoDR steel（%，mass fraction）

元素	C	Si	Mn	Ni	Mo	Cr	P	S
实测值	0.07	0.19	1.49	0.36	0.25	0.05	0.009	0.002
标准值	≤0.09	0.15~0.40	1.20~1.60	0.30~0.60	0.10~0.30	≤0.30	≤0.0015	≤0.0005

为了验证轧制力预测的准确度，对钢厂中热连轧过程进行建模，模拟计算相同工艺参数下的轧制力。钢厂的热轧工艺为：开轧温度为 1200  $^{\circ}\text{C}$ ，轧辊线速度为  $2000\sim 3000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ，钢坯原厚度为 260 mm，粗轧至厚度为 110 mm，待温度冷却至 860  $^{\circ}\text{C}$  进行精轧，各道次钢坯的厚度分别为 260-240-220-180-140-110-90-75-60-55-50-48 mm。

2 实验结果及分析

2.1 07MnNiMoDR 钢的高温流变真应力-真应变曲线

图 1 为 07MnNiMoDR 钢在温度为 850~1150  $^{\circ}\text{C}$ 、

变形速率为  $0.1\sim 10\text{ s}^{-1}$  下的高温热压缩的真应力-真应变曲线。由图 1 可知，在变形初期，变形量较小，真应力的增加速度较快，为加工硬化阶段。此时位错密度迅速增高，主要受位错滑移机制影响<sup>[18]</sup>。随变形程度的增大，真应力增加速度减小，为动态回复或动态再结晶阶段，此时变形温度较高，空位扩散及位错运动阻力较小，有利于高温奥氏体的动态回复和再结晶的发生，其软化作用减缓了加工硬化引起的硬化<sup>[19]</sup>。当真应变进一步增大，动态软化作用进一步增强，真应力随着真应变的增加而减小或趋于平稳。当变形速率一定时，变形温度越高，真应力越低，临界应变也随之降低，越容易发

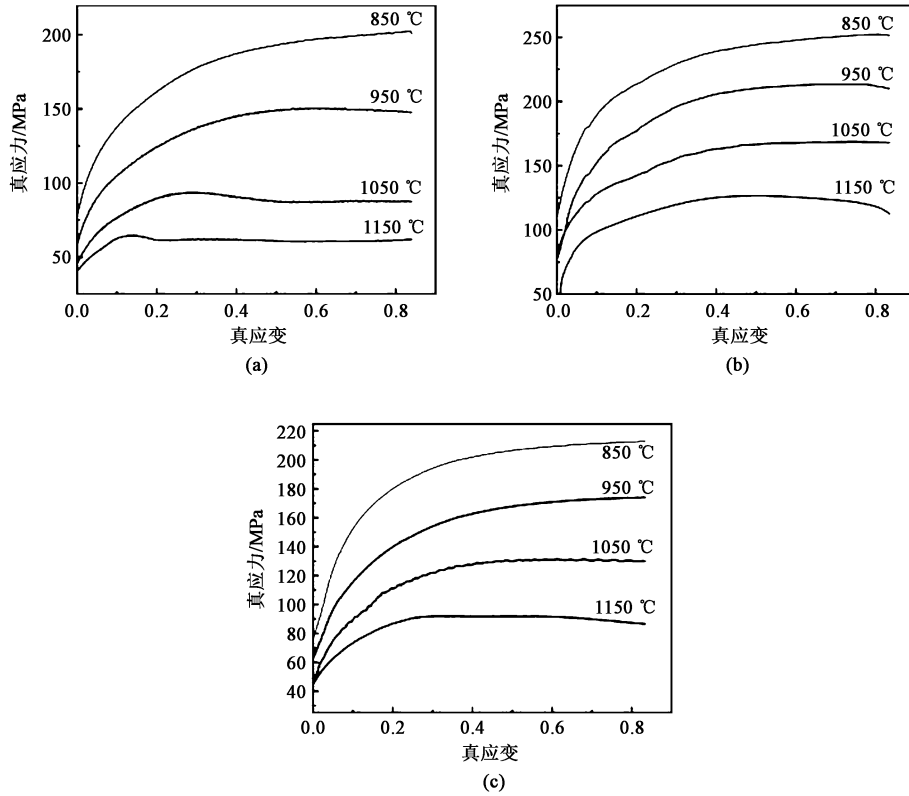


图 1 不同变形条件下 07MnNiMoDR 钢的真应力-真应变曲线

(a)  $0.1 \text{ s}^{-1}$  (b)  $1.0 \text{ s}^{-1}$  (c)  $10.0 \text{ s}^{-1}$ 

Fig. 1 True stress-true strain curves of 07MnNiMoDR steel under different deformation conditions

生动态再结晶。当变形温度一定时,变形速度越高,加工硬化作用越明显。

## 2.2 本构方程的建立

### 2.2.1 稳态应变应力本构方程

07MnNiMoDR 钢的应力值主要受变形温度、变形速率和应变量的影响。变形过程主要发生加工硬化、动态回复软化和动态再结晶软化,可以用轧制热变形本构方程来表达钢材在热轧时的高温流变行为,采用 Arrhenius 本构方程描述高应变量时材料的变形温度与变形速率对流变应力的影响<sup>[20-21]</sup>。表达式为:

$$\dot{\varepsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \quad \alpha\sigma < 0.8 \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \quad \alpha\sigma > 1.2 \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \quad \text{所有应力值} \quad (3)$$

式中:  $\dot{\varepsilon}$  为应变速率;  $\sigma$  为稳态流变应力或峰值应力;  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A$ 、 $\beta$ 、 $\alpha$ 、 $n$ 、 $n_1$  为模型常数;  $Q$  为变形激活能;  $R$  为气体常数,取  $8.314 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$ ;  $T$  为热力学温度。

使用 Zener-Hollomon 即  $Z$  参数<sup>[21]</sup>来衡量变形温度和应变速率对热变形的影响:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (4)$$

对式 (1) ~ 式 (4) 求偏导并做简化处理可得到:

$$n_1 = \frac{\partial(\ln \dot{\varepsilon})}{\partial(\ln \sigma)} \bigg|_T \quad (5)$$

$$\beta = \frac{\partial(\ln \dot{\varepsilon})}{\partial(\sigma)} \bigg|_T \quad (6)$$

$$n = \frac{\partial(\ln \dot{\varepsilon})}{\partial \{ \ln [\sinh(\alpha\sigma)] \}} \bigg|_T \quad (7)$$

$$Q = Rn \cdot \frac{\partial \{ \ln [\sinh(\alpha\sigma)] \}}{\partial (1000/T)} \bigg|_{\dot{\varepsilon}} \quad (8)$$

$$\ln A = \ln \left\{ \frac{\dot{\varepsilon} \exp[Q/(RT)]}{[\sinh(\alpha\sigma)]^n} \right\} \bigg|_T \quad (9)$$

使用 Origin 软件以及图 1 中的应变、应力、应变速率和温度数据,绘制  $\ln \dot{\varepsilon} - \ln \sigma$ 、 $\ln \dot{\varepsilon} - \sigma$ 、 $\ln [\sinh(\alpha\sigma)] - \ln \dot{\varepsilon}$ 、 $\ln [\sinh(\alpha\sigma)] - 1000/T$ 、 $\ln Z - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$  的关系曲线图并进行一元线性拟合<sup>[22]</sup>,分别得到参数  $n_1$ 、 $\beta$  和  $\alpha$ 、 $n$ 、 $Q$ 、 $A$ ,以及

参数  $Z$ 。带入各参数数值得到 07MnNiMoDR 钢的本构方程:

$$\dot{\varepsilon} = 2.5113 \times 10^{16} [\sinh(0.007582\sigma)]^{6.993} \times \exp\left(-\frac{420889.29}{RT}\right) \quad (10)$$

### 2.2.2 加工硬化及动态回复本构方程

加工硬化阶段及动态回复阶段采用位错密度理论进行描述, 加工硬化过程中位错随变形的增加和消失可以表示为:

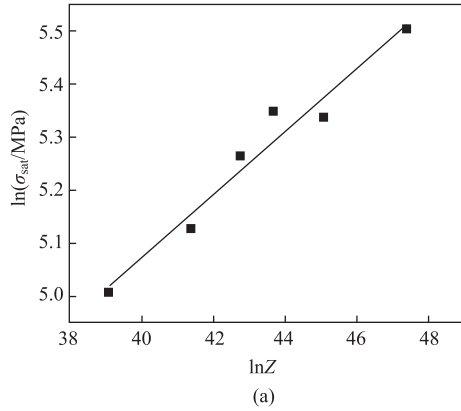
$$\frac{d\rho}{d\varepsilon} = U - \Omega\rho \quad (11)$$

对式 (11) 进行积分, 可得:

$$\rho = \frac{U}{\Omega} = \left(\frac{U}{\Omega} - \rho_0\right) \exp(-\Omega\varepsilon) \quad (12)$$

式中:  $\frac{d\rho}{d\varepsilon}$  为位错密度  $\rho$  随应变  $\varepsilon$  增加的速率;  $U$  为加工硬化过程中位错密度  $\rho$  的增殖, 当应变一定时为常数;  $\Omega\rho$  为位错消失和重排引起的动态回复;  $\Omega$  为动态回复系数; 当真应变为 0 时,  $\rho = \rho_0$ ,  $\rho_0$  为初始屈服应力  $\sigma_0$  下的初始位错密度。

在高温变形期间应力与位错密度的关系如下:



$$\sigma = w\mu b\sqrt{\rho} \quad (13)$$

式中:  $\mu$  为剪切模量;  $b$  为伯氏矢量;  $w$  为材料相关参数。

联立式 (11) ~ 式 (13) 可得:

$$\sigma_{\text{rec}} = [\sigma_{\text{sat}}^2 + (\sigma_0^2 - \sigma_{\text{sat}}^2)e^{-\Omega\varepsilon}]^{0.5} \quad (14)$$

式中:  $\sigma_{\text{rec}}$  为加工硬化-动态回复过程中的流动应力;  $\sigma_{\text{sat}}$  为饱和应力。

变换式 (14) 后:

$$\Omega\varepsilon = \ln\left(\frac{\sigma_{\text{sat}}^2 - \sigma_0^2}{\sigma_{\text{sat}}^2 - \sigma_{\text{rec}}^2}\right) \quad (15)$$

式 (14) 中的  $\sigma_{\text{sat}}$  和  $\sigma_0$  可以从图 1 的真应力-真应变曲线中获得, 通过拟合  $\ln\sigma_{\text{sat}} - \ln Z$  及  $\sigma_0 - \ln Z$  的线性方程建立其与  $Z$  参数的关系, 通过对  $\ln\Omega - \ln Z$  进行线性回归, 可得到动态回复系数  $\Omega$ 。拟合曲线如图 2 所示, 得到表达式为:

$$\sigma_{\text{sat}} = 14.6497021(\ln Z)^{0.05967} \quad (16)$$

$$\sigma_0 = 3.79704\ln Z - 88.55777 \quad (17)$$

$$\Omega = 2231.97026Z^{-0.134} \quad (18)$$

### 2.2.3 动态再结晶过程模型

金属热变形时, 当变形量大于临界应变时, 材

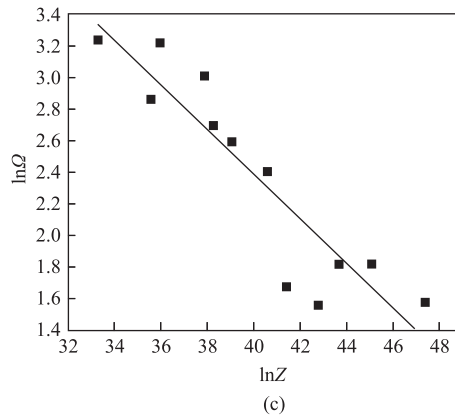
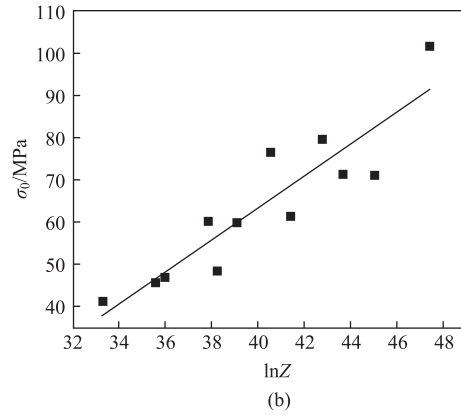


图2 07MnNiMoDR 钢热压缩时各参数间的关系

(a)  $\ln\sigma_{\text{sat}} - \ln Z$  (b)  $\sigma_0 - \ln Z$  (c)  $\ln\Omega - \ln Z$

Fig. 2 Relationship between parameters of 07MnNiMoDR steel during hot compression

料内部会在晶界、剪切带及孪晶界等位置形成再结晶晶核, 动态再结晶与临界应变、温度和应变速率有关, 在真应力-真应变曲线上较难直接获得临界应变, 这里引入式 (19) 所示加工硬化率  $\theta$  以确认临界应变<sup>[23]</sup>。

$$\theta = \left( \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right) \Big|_{\dot{\varepsilon}, T} \quad (19)$$

当温度为 950 ℃、应变速率为 0.1 s<sup>-1</sup> 时  $\theta$  与  $\sigma$  关系图如图 3b 所示, 其中拐点对应临界应变  $\varepsilon_c$ ,

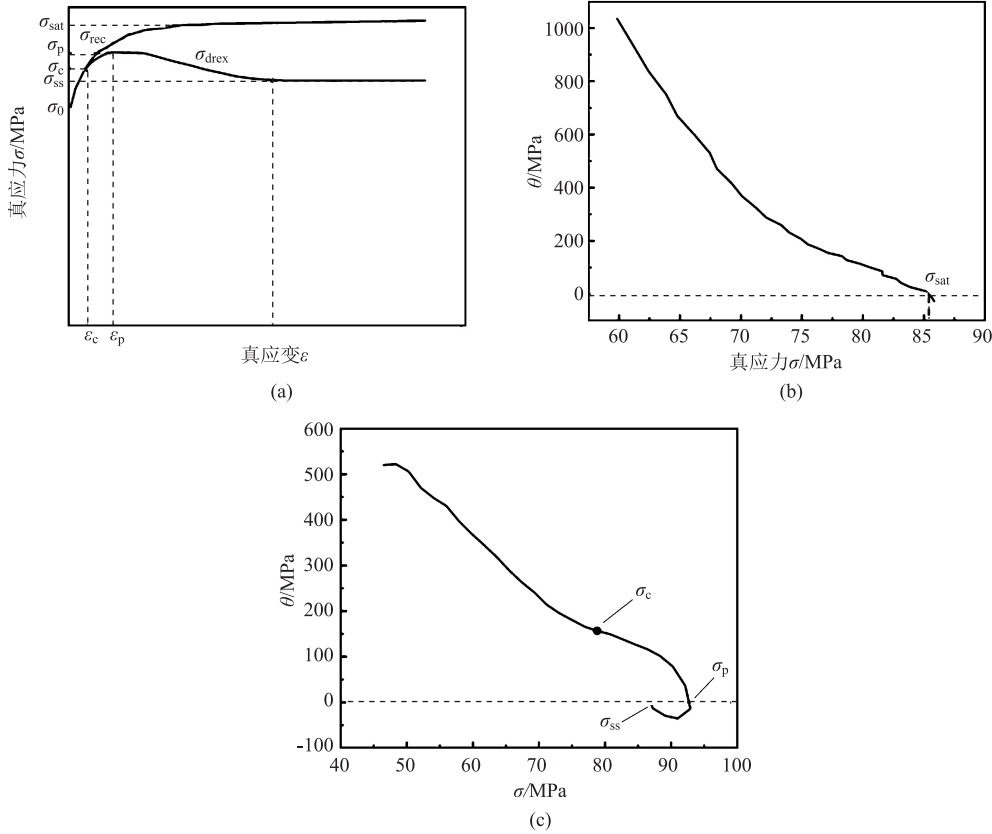


图 3 不同过程中各参数之间的关系

(a) 动态再结晶与动态回复过程的真应力-真应变曲线 (b) 动态回复过程的  $\theta$ - $\sigma$  曲线 (c) 动态再结晶过程的  $\theta$ - $\sigma$  曲线

Fig. 3 Relationship between parameters during different processes

(a) True stress-true strain curves during dynamic recrystallization and dynamic recovery process (b)  $\theta$ - $\sigma$  curve during dynamic recovery process

(c)  $\theta$ - $\sigma$  curve process during dynamic recrystallization process

图 3 中,  $\sigma_{drex}$  为动态再结晶过程中的应力,  $\sigma_{rel}$  为动态回复过程的应力,  $\sigma_p$  和  $\varepsilon_p$  为峰值应力和峰值应变,  $\sigma_c$  和  $\varepsilon_c$  为临界应力和临界应变。 $\varepsilon_p$  与  $\varepsilon_c$  具有线性关系, 分别对  $\ln \varepsilon_p - \ln Z$  和  $\ln \varepsilon_p - \ln \dot{\varepsilon}$  进行一元线性拟合<sup>[16]</sup>, 关系如图 4a 和图 4b 所示, 峰值应变  $\varepsilon_p$  与  $Z$  参数的关系如式 (20) 所示, 得到  $\varepsilon_p$  及  $\varepsilon_c$  的表达式如式 (21) 所示。

$$\varepsilon_p = 0.14563Z^{0.14563} \quad (20)$$

$$\varepsilon_c = 0.57053\varepsilon_p \quad (21)$$

动态再结晶体积分数  $X_{drex}$  可用 JMAK 公式表

做  $\theta=0$  的直线, 可以看到: 当变形温度为 950 ℃、应变速率为 0.1 s<sup>-1</sup> 时有一个交点, 则真应力-真应变曲线为动态回复型, 当曲线与直线相交时, 该点对应真应力-真应变曲线上的  $\sigma_{sat}$ ; 当变形温度为 1050 ℃、应变速率为 0.1 s<sup>-1</sup> 时有两个交点, 则真应力-真应变曲线为动态再结晶型, 曲线与直线相交的点, 分别对应真应力-真应变曲线上的饱和应力  $\sigma_{sat}$  及稳态应力  $\sigma_{ss}$ 。

示, 如式 (22) 所示, 其中, 只有模型参数  $K_d$  及  $n_d$  未知, 该值难以通过实验测定。但  $X_{drex}$  有另一种近似表达方式, 如式 (23)<sup>[20]</sup> 所示, 其中  $\sigma_{ss}$  未知, 做  $\sigma_{ss}$  与  $Z$  参数的关系曲线, 如图 4c 所示, 发现  $\sigma_{ss}$  与  $Z$  具有线性关系, 拟合后得到  $\sigma_{ss}$  的表达式如式 (24) 所示。根据图 3 获得的  $\sigma_{sat}$  及  $\sigma_{ss}$  点, 从图 1 中选取 07MnNiMoDR 钢压缩时对应的温度、应变速率、应变量和应力 4 个参数, 带入式 (26), 并对  $\ln[-\ln(1-X_{drex})] - \ln(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_p})$  进行一元线性拟合, 见图 4d, 得到

模型参数  $K_d$  及  $n_d$  分别为 15.42778 及 1.9281。

$$X_{\text{drex}} = 1 - \exp\left[-K_d\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_p}\right)^{n_d}\right], \varepsilon \geq \varepsilon_c \quad (22)$$

$$X_{\text{drex}} = \frac{\sigma_{\text{rec}} - \sigma_{\text{drex}}}{\sigma_{\text{sat}} - \sigma_{\text{ss}}} \quad (23)$$

$$\sigma_{\text{ss}} = 0.59230711694(\ln Z)^{0.14027} \quad (24)$$

对式 (22) 和式 (23) 进行联立可得:

$$\sigma_{\text{drex}} = \sigma_{\text{rec}} - (\sigma_{\text{sat}} - \sigma_{\text{ss}}) \{1 - \exp\left[-K_d\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_p}\right)^{n_d}\right]\}, \quad \varepsilon \geq \varepsilon_c \quad (25)$$

对式 (25) 取两次自然对数得:

$$\ln[-\ln(1 - X_{\text{drex}})] = \ln(K_d) + n_d \times \ln\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_p}\right) \quad (26)$$

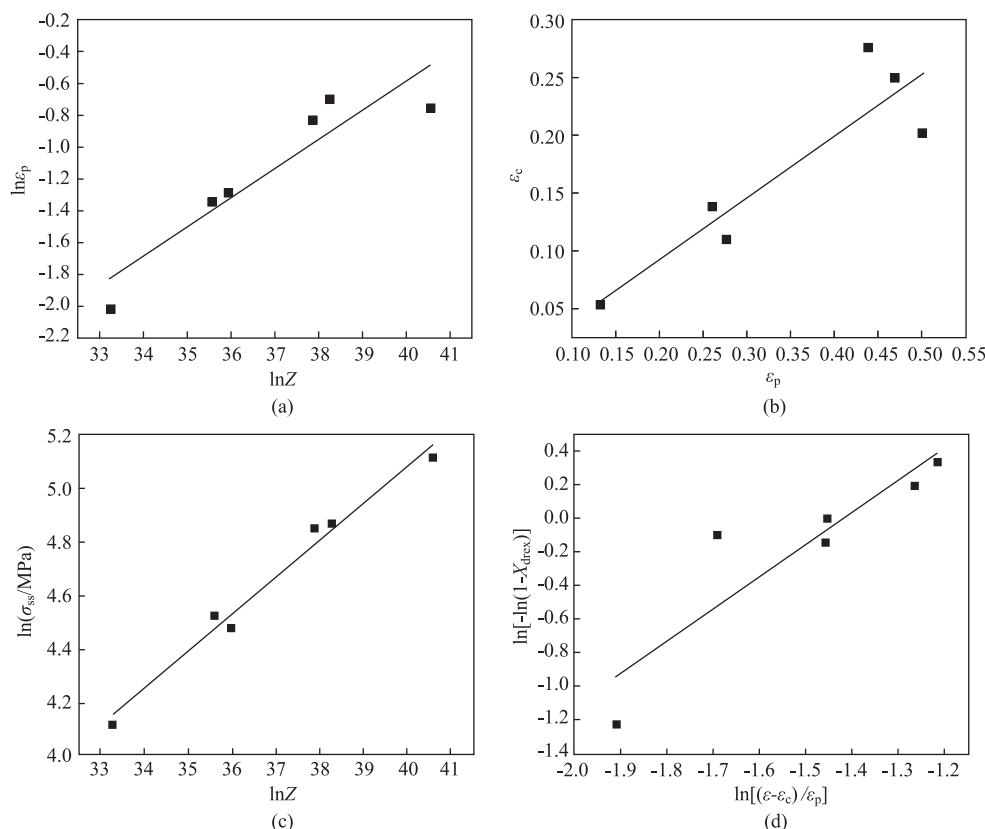


图4 07MnNiMoDR 钢动态再结晶动力学模型各参数间的关系

(a)  $\ln \varepsilon_p - \ln Z$  (b)  $\varepsilon_c - \varepsilon_p$  (c)  $\ln \sigma_{\text{ss}} - \ln Z$  (d)  $\ln[-\ln(1 - X_{\text{drex}})] - \ln\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_p}\right)$

Fig. 4 Relationship between parameters of dynamic recrystallization dynamical model of 07MnNiMoDR steel

根据 07MnNiMoDR 钢的本构方程建立温度为 850~1200 °C、应变速率为 0.1~10 s<sup>-1</sup> 时, 各应变率下的应力值与应变率、温度和应变率之间的关系, 如图 5 所示, 用于有限元计算。

### 2.3 热轧过程有限元模拟参数的建立与轧制力预测

使用材料性能模拟软件 JMatPro 计算 07MnNiMoDR 钢的导热率、热容、弹性模量和泊松比, 如图 6 所示。实际钢板的热轧过程与众多因素相关, 在有限元模拟过程中为了提高效率有必要进行简化, 假设轧辊直径无变化, 不考虑钢板与轧道的传热及在轧道上的运动时间。钢坯的温度场变化主要有钢坯表面与空气进行辐射和对流换热以及钢

坯与轧辊热传导换热。轧辊与钢板的接触换热系数取 5 N · (s · mm · °C)<sup>-1</sup>, 钢板表面与空气的换热系数为 0.02 N · (s · mm · °C)<sup>-1</sup>, 钢板与轧辊的摩擦因数取 0.7。高温时对流换热使钢板的温降与辐射换热相比要低的多, 因此, 可忽略热对流的影响。利用史蒂芬-玻尔兹曼定律可计算材料在高温区间由辐射引起降温的热交换系数  $h_r$  [24], 如式 (27) 所示, 计算结果为 0.73, 模拟计算所用参数见表 2。

$$h_r = CS(T_0^2 + T_{\text{su}}^2)(T_0 + T_{\text{su}}) \quad (27)$$

式中:  $S$  为史蒂芬-玻尔兹曼常数,  $S = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)^{-1}$ ;  $C$  为黑度系数, 取 0.85;  $T_{\text{su}}$ 、 $T_0$  分别为钢坯的表面温度和环境温度。

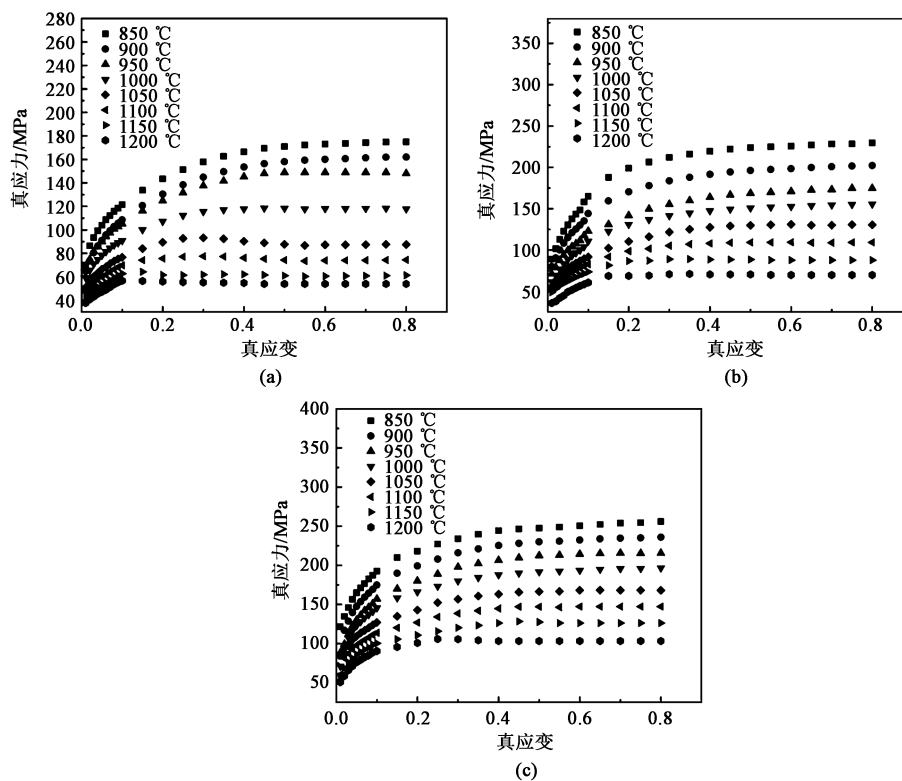


图 5 07MnNiMoDR 钢本构方程的验证

(a)  $0.1 \text{ s}^{-1}$  (b)  $1 \text{ s}^{-1}$  (c)  $10 \text{ s}^{-1}$ 

Fig. 5 Verification of constitutive equation for 07MnNiMoDR steel

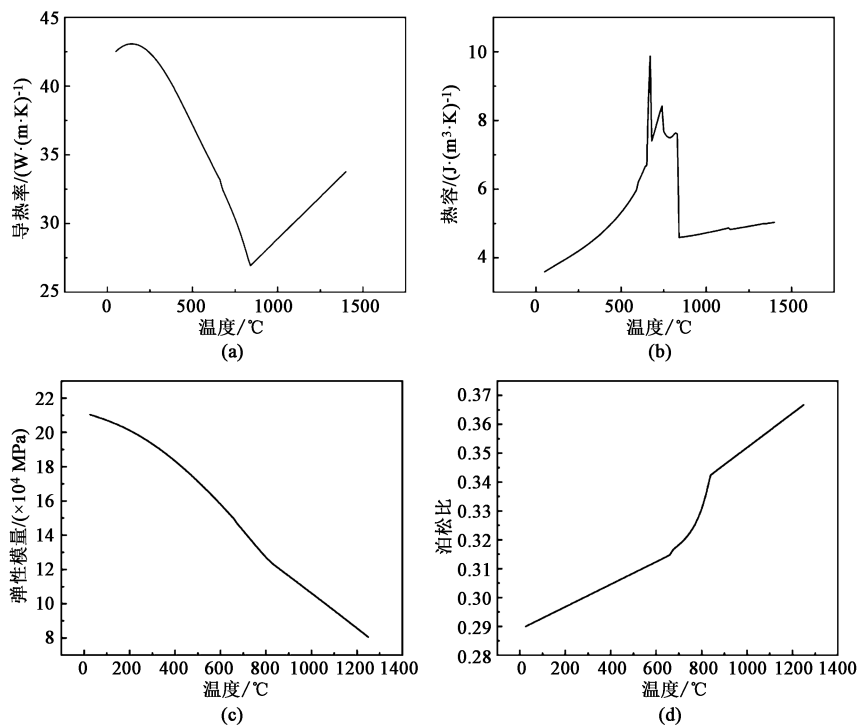


图 6 07MnNiMoDR 钢的温度场参数

(a) 导热率 (b) 热容 (c) 弹性模量 (d) 泊松比

Fig. 6 Temperature field parameters of 07MnNiMoDR steel

(a) Thermal conductivity (b) Heat capacity (c) Modulus of elasticity (d) Poisson's ratio

表2 模拟计算的参数信息

参数	取值或表达式
加工硬化动态回复型流动应力	$\sigma_{\text{rec}} = [\sigma_{\text{sat}}^2 + (\sigma_0^2 - \sigma_{\text{sat}}^2) e^{-\Omega \varepsilon}]^{0.5}$ , $\sigma_{\text{sat}} = 14.6497021 (\ln Z)^{0.05967}$ , $\sigma_0 = 3.79704 \ln Z - 88.55777$ , $\Omega = 2231.97026 Z^{-0.134}$ , $Z = \dot{\varepsilon} \exp (420889.29 / RT)$
动态再结晶型流动应力	$\varepsilon_p = 0.14563 Z^{0.14563}$ , $\varepsilon_c = 0.57053 \varepsilon_p$ , $\sigma_{\text{ss}} = 0.59230711694 (\ln Z)^{0.14027}$ , $\sigma_{\text{drx}} = \sigma_{\text{rec}} - (\sigma_{\text{sat}} - \sigma_{\text{ss}} \left\{ 1 - \exp \left[ -15.42778 \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_p} \right)^{1.9281} \right] \right\})$ , $\varepsilon \geq \varepsilon_c$ , $\sigma_0 = 3.79704 \ln Z - 88.55777$ , $\sigma_{\text{rec}} = [\sigma_{\text{sat}}^2 + (\sigma_0^2 - \sigma_{\text{sat}}^2) e^{-\Omega \varepsilon}]^{0.5}$ , $\sigma_{\text{sat}} = 14.6497021 (\ln Z)^{0.05967}$ , $\Omega = 2231.97026 Z^{-0.134}$ , $Z = \dot{\varepsilon} \exp (420889.29 / RT)$
导热率、热容、弹性模量、泊松比	图 6a~图 6d
热辐射系数	0.73
与空气换热系数/(N·(s·mm·℃) <sup>-1</sup> )	0.02
与轧辊换热系数/(N·(s·mm·℃) <sup>-1</sup> )	5
轧辊与钢坯摩擦系数	0.7
网格/个	41239

图 7a 为所建立的热轧过程钢坯及轧辊模型，轧辊直径为  $\Phi 1160$  mm，设置为刚体。取钢坯的 1/2 模型进行计算，对称面为 XZ 平面，设置为塑性体，网格划分情况如图 7b 所示。推块的作用是给钢坯水

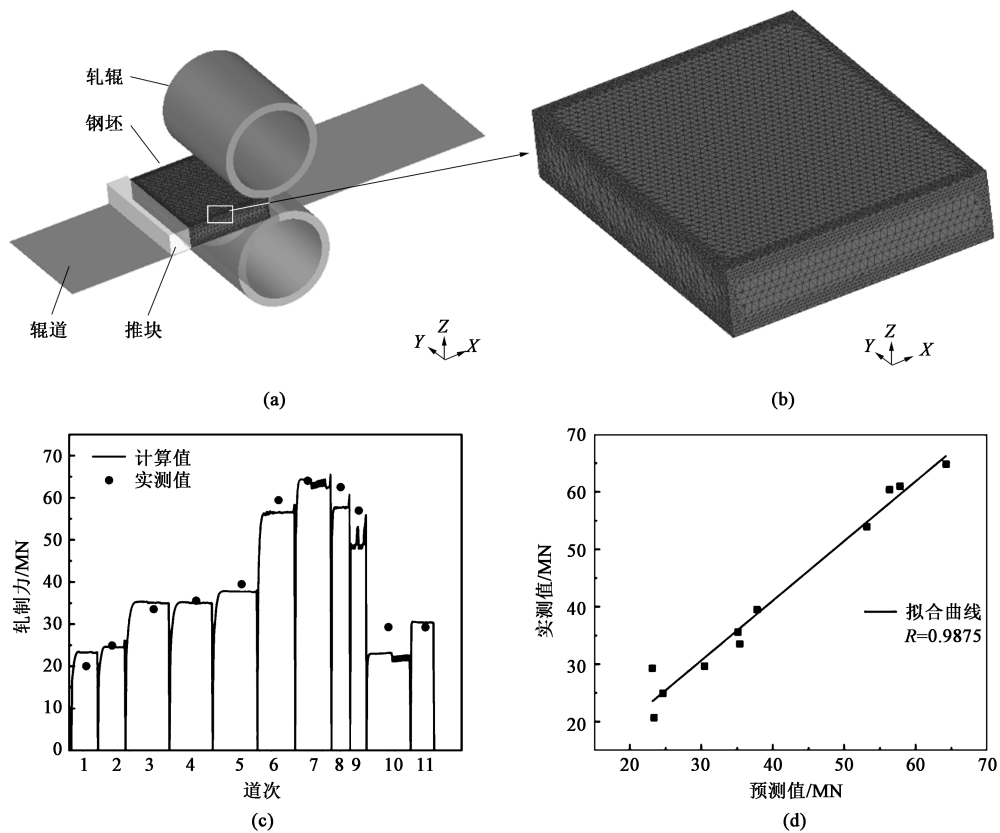


图 7 07MnNiMoDR 钢热轧模拟结果

(a) 热轧模型 (b) 坯料网格划分情况 (c) 轧制力 (d) 相关性分析

Fig. 7 Simulation results of hot rolling for 07MnNiMoDR steel

(a) Model of hot rolling (b) Grid division of billet (c) Rolling force (d) Correlation analysis

平初速度。计算结果及实测结果如图 7c 所示, 可以看到模拟的轧制力分别为 23.41、24.64、35.37、35.12、37.81、56.37、64.28、57.82、53.18、23.16 和 30.46 MN, 实际过程的轧制力分别为 20.68、24.92、33.53、35.57、39.47、59.4、64.04、62.53、56.94、29.27 和 29.22 MN, 相关性系数  $R$  值为 0.9875。根据表 2 所示的 07MnNiMoDR 钢的材料参数及热轧工艺进行热轧过程模拟, 预测值与实测值有较大相关性, 认为所建立的本构方程及模拟计算结果有较高的准确性。

### 3 结 论

(1) 建立了 07MnNiMoDR 钢在应变速率为  $0.1 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ 、变形温度为  $850 \sim 1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下的高温变形本构方程。

(2) 计算了 07MnNiMoDR 钢的热导率、热容、弹性模量和泊松比。

(3) 所建立的 07MnNiMoDR 钢的本构方程及温度场参数对热轧过程轧制力的预测具有较好的准确性, 预测值与实测值的相关性较强,  $R$  值为 0.9875, 满足优化轧制工艺时对轧制力预测的需求。

#### 参考文献:

- [1] 王振华, 刘元铭, 王涛, 等. 粗轧过程中轧制力和宽展的预测与分析 [J]. 钢铁, 2022, 57 (9): 95-102.  
Wang Z H, Liu Y M, Wang T, et al. Prediction and analysis of rolling force and width spread in rough rolling [J]. Iron & Steel, 2022, 57 (9): 95-102.
- [2] 张书荣. 六辊可逆冷轧机全轧程轧制力预测的方法研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2021.  
Zhang S R. Research on Rolling Force Prediction Method of Six-high Reversible Cold Rolling mill [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [3] Bagheripoor M, Bisadi H. Application of artificial neural networks for the prediction of roll force and roll torque in hot strip rolling process [J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37 (7): 593-607.
- [4] 罗晓东, 柳浩, 阳辉, 等. 轧辊转速对 AZ31 环件轧制工艺的影响规律研究 [J]. 兵器材料科学与工程, 2015, 38 (6): 61-64.  
Luo X D, Liu H, Yang H, et al. Effect of roll speed on radial-axial rolling process of AZ31 ring [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2015, 38 (6): 61-64.
- [5] 张坚, 双远华, 胡建华, 等. 基于改进的 BP 神经网络无缝钢管连轧轧制力的预测 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (5): 153-160.  
Zhang J, Shuang Y H, Hu J H, et al. Prediction on rolling force in hot rolling of wide and thick plate based on deep learning [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (5): 153-160.
- [6] 郭金涛, 王龙, 余建波, 等. 基于深度学习的宽厚板热轧轧制力预测 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (7): 167-174.  
Guo J T, Wang L, Yu J B, et al. Prediction on rolling force in hot rolling of wide and thick plate based on deep learning [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (7): 167-174.
- [7] 马威, 李维刚, 赵云涛, 等. 基于深度学习的热连轧轧制力预测 [J]. 钢铁研究学报, 2019, 31 (9): 805-815.  
Ma W, Li W G, Zhao Y T, et al. Prediction of hot-rolled roll force based on deep learning [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2019, 31 (9): 805-815.
- [8] 吕明桦. 大型环件轧制成形模拟与试验研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2019.  
Lyu M H. Simulation and Experimental Study on Rolling Forming of Large Ring [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2019.
- [9] He Q Q, Sun J, Zhao J Y, et al. 3D simulation of h-beam multi-pass hot rolling and microstructure evolution [J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 268-270: 297-300.
- [10] Dema R R, Shapovalov A N, Alontsev V V, et al. Computer simulation and research of the hot rolling process in Deform-3D [J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 19 (23): 12-15.
- [11] 汪建武, 李淑香, 金彪, 等. 6082 铝合金汽车后上控制臂楔横轧轴坯成形模拟研究 [J]. 兵器材料科学与工程, 2022, 45 (6): 70-74.  
Wang J W, Li S X, Jin B, et al. Forming of simulation 6082 aluminum alloy cross wedge rolling shaft for automobile rear upper control arm [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2022, 45 (6): 70-74.
- [12] Kumar A, Rath S, Kumar M. Simulation of plate rolling process using finite element method [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 42: 650-659.
- [13] Li J, Li F G, Cai J, et al. Comparative investigation on the modified Zerilli-Armstrong model and Arrhenius-type model to predict the elevated-temperature flow behaviour of 7050 aluminium alloy [J]. Computational Materials Science, 2013, 71: 56-65.
- [14] 李荣斌, 陈永强, 蒋春霞, 等. 022Cr 钢的热变形行为及热加工图 [J]. 金属热处理, 2020, 45 (7): 51-56.  
Li R B, Chen Y Q, Jiang C X, et al. Hot deformation behavior and processing maps of 022Cr steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45 (7): 51-56.
- [15] 陈雷, 郭晓敏, 贾伟, 等. 航空用近  $\beta$  钛合金 TC18 热变形过

- 程中流变应力预测 [J]. 燕山大学学报, 2018, 42 (6): 486-492.
- Chen L, Guo X M, Jia W, et al. Prediction of flow stress in thermal deformation of near- $\beta$  titanium alloy TC18 for aviation [J]. Journal of Yanshan University, 2018, 42 (6): 486-492.
- [16] 刘艳芳, 冀国良, 李雷, 等. M50NiL 钢热变形过程中的物理型本构方程及微观组织演变 [J]. 材料热处理学报, 2021, 42 (8): 170-179.
- Liu Y F, Ji G L, Li L, et al. A physically-based constitutive model and microstructure evolution of M50NiL steel during hot deformation [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2021, 42 (8): 170-179.
- [17] GB/T 19189—2011, 压力容器用调质高强度钢板 [S].
- GB/T 19189—2011, Quenched and tempered high strength steel plates for pressure vessels [S].
- [18] 向彪, 孙朝远, 陈雷. F22 高强钢的热变形行为与晶粒组织预测 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (9): 144-150.
- Xiang B, Sun C Y, Chen L. Hot deformation behavior and grain structure prediction of F22 high-strength steel [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (9): 144-150.
- [19] 罗锐, 陈乐利, 程晓农, 等. 高温合金 Inconel 617B 的热变形及动态再结晶行为 [J]. 压力容器, 2020, 37 (10): 7-14.
- Luo R, Chen L L, Cheng X N, et al. Thermal deformation and dynamic recrystallization behavior of inconel 617B superalloy [J]. Pressure Vessel Technology, 2020, 37 (10): 7-14.
- [20] 曹辉. 07MnNiMoVDR 压力容器用钢生产工艺与组织性能 [D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
- Cao H. Manufacturing Process, Microstructures and Mechanical Properties of Pressure Vessel Steel 07MnNiMoVDR [D]. Shenyang: Northeastern University, 2012.
- [21] 罗远, 庞玉华, 孙琦, 等. 07MnNiMoDR 板轧制热变形本构方程 [J]. 钢铁研究学报, 2020, 32 (11): 977-983.
- Luo Y, Pang Y H, Sun Q, et al. Constitutive equation for thermal deformation of 07MnNiMoDR plate in rolling [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2020, 32 (11): 977-983.
- [22] Ji G L, Li L, Qin F L, et al. Comparative study of phenomenological constitutive equations for an as-rolled M50NiL steel during hot deformation [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 695: 2389-2399.
- [23] 孙宇, 周琛, 万志鹏, 等. 金属材料动态再结晶模型研究现状 [J]. 材料导报, 2017, 31 (13): 12-16.
- Sun Y, Zhou C, Wan Z P, et al. Current research status of dynamic recrystallization model of metallic materials [J]. Materials Reports, 2017, 31 (13): 12-16.
- [24] 王锡臣. 中厚板轧机轧制参数模型的研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2009.
- Wang X C. Research on Rolling Parameter Model of Plate Mill [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2009.

## “第 20 届国际金属成形会议” 征文通知 (The 20th International Conference on Metal Forming)

第 20 届国际金属成形会议 (The 20th International Conference on Metal Forming) 将于 2024 年 9 月 15-18 日于波兰克拉科夫召开。国际金属成形系列会议由克拉科夫 AGH 科技大学于 1974 年发起, 至今已举办 20 届。2022 年, 中国机械工程学会塑性工程分会和太原理工大学首次以线上+线下混合形式成功举办了“第十九届国际金属成形会议”。在本次第 20 届国际金属成形会议期间, 预计将邀请 6 场大会报告和 200 余场口头报告。中国机械工程学会塑性工程分会拟组织参加本次会议。

**主办单位:** 克拉科夫 AGH 科技大学

**会议网址:** <http://metalfforming.agh.edu.pl/>

### 重要时间节点

- 全文投稿截止时间: 2024 年 1 月 25 日
- 全文接收告知时间: 2024 年 5 月 15 日
- 提前缴费截止时间: 2024 年 6 月 15 日
- 会议召开时间: 2024 年 9 月 14-18 日

### 联系方式

联系人: Anna Smyk, Conference Secretariat, E-mail: [barana@agh.edu.pl](mailto:barana@agh.edu.pl)

联系地址: AGH University Mickiewicza 30, 30-059 Krakow, Poland

tel. +48 12 617 56 99, E-mail: [metalfforming@agh.edu.pl](mailto:metalfforming@agh.edu.pl)

中国机械工程学会塑性工程分会