

DOI: 10. 11973/jxgccl240136

## 耐磨钢高温压缩变形的本构模型构建及热加工图

杨哲懿<sup>1,2</sup>, 孟凡志<sup>3</sup>, 杨博<sup>3</sup>, 高磊<sup>1,2</sup>, 王帅<sup>1,2</sup>, 王尊呈<sup>1,2</sup>(1. 海洋装备金属材料及其应用全国重点实验室, 鞍山 114009; 2. 鞍钢集团钢铁研究院  
热轧产品研究所, 鞍山 114009; 3. 鞍钢股份有限公司热轧带钢厂, 鞍山 114021)

**摘 要:** 应用 Gleeble-3800 型热模拟试验机对耐磨钢进行高温(800~1 200 °C)、中等水平应变速率(0.1, 1, 5, 10 s<sup>-1</sup>)下的单道次热压缩变形, 研究了该钢的热压缩变形行为; 根据真应力-真应变数据, 通过引入真应变的影响对传统 Arrhenius 方程改进后建立本构模型, 并将计算结果与试验结果进行对比; 绘制热加工图, 确定合理的加工区间。结果表明: 试验钢的流变应力随着变形温度的升高或应变速率的减小而降低; 随着变形量的增加, 真应力先增加至峰值应力后趋于稳定, 但在高温(不低于 1 100 °C)和低应变速率(0.1 s<sup>-1</sup>)下真应力达到峰值应力后先略微降低后趋于稳定。所建立的本构模型计算得到的真应力与试验结果吻合较好, 平均相对误差为 3.79%, 线性相关系数为 0.997 5, 证明所建立的本构模型能够准确预测试验钢在 800~1 200 °C 变形温度和 0.1~10 s<sup>-1</sup> 应变速率下的高温流变行为; 试验钢在单道次热压缩变形时的合理加工区间为真应变不大于 0.5、应变速率不大于 10 s<sup>-1</sup>、变形温度 900~1 100 °C。

**关键词:** 耐磨钢; 本构模型; 热加工图; 单道次热压缩**中图分类号:** TG142.1**文献标志码:** A**文章编号:** 1000-3738(2025)03-0114-07

## 0 引 言

钢铁材料如今正向着更高强、更耐磨的方向发展, 同时为了追求绿色发展, 耐磨钢产品需求呈现爆发性增长。在热连轧高强钢产品的研发方面, 鞍钢放弃了传统合金化耐磨钢的生产模式, 提出使用控轧控冷(TMCP)工艺, 应用相变强化的机理实现超高强耐磨钢产品的生产<sup>[1]</sup>, 即以低合金碳素钢为基础, 提高硅和铝的含量, 借助 TMCP 工艺精准控制各相体积分数, 冷却后得到铁素体+马氏体+残余奥氏体的多相组织, 以实现耐磨钢的高抗拉低屈强比的综合性能。所生产的耐磨钢在成形性、耐磨性能、焊接性等方面都表现良好, 被广泛应用到搅拌罐壳体及叶片等相关部件<sup>[2]</sup>。

为了确定具体的热连轧工艺, 减少实际生产调试带来的资源浪费, 需要借助数值模拟对材料在不同工艺下的变形行为进行预测, 而数值模拟的基础是基于材料的热变形行为建立材料的本构模型<sup>[3]</sup>。目前, 学者们已经对不同工艺(变形温度、应变速率等)下材料的热变形行为以及本构模型进行了研究<sup>[4]</sup>。耐磨钢主要采用热连轧工艺生产而成, 温度

在 800~1 200 °C, 应变速率为约 10 s<sup>-1</sup> 中等水平, 但是未见在该工艺参数范围内适用于耐磨钢的本构模型<sup>[5]</sup>。作者以鞍钢 2150ASP 生产线生产的耐磨钢为研究对象, 利用单道次热压缩试验研究了该钢在高温中等水平应变速率下的流变行为; 根据热变形过程中的真应力-真应变数据, 引入真应变的影响对传统 Arrhenius 方程进行改进后建立本构模型, 并绘制热加工图, 确定合理的加工区间, 以期为耐磨钢热连轧工艺的制定提供理论指导。

## 1 试样制备与试验方法

试验材料取自鞍钢 2150ASP 热连轧生产线生产的耐磨钢中间坯, 其化学成分(质量分数/%)为  $\leq 0.15$  C,  $\leq 1.2$  Si,  $\leq 1.75$  Mn,  $\leq 0.015$  P,  $\leq 0.005$  S,  $\leq 0.022$  Ti,  $\leq 0.45$  Al, 余 Fe。在耐磨钢板坯中部区域取样, 并沿厚度方向加工成尺寸为  $\phi 8$  mm $\times$ 15 mm 的圆柱体试样。

在 Gleeble-3800 型热模拟试验机上进行单道次热压缩试验, 试验环境为真空环境。先以 10 °C $\cdot$ s<sup>-1</sup> 的升温速率将试样加热至 1 220 °C, 保温 5 min, 再以 5 °C $\cdot$ s<sup>-1</sup> 的速率降温至变形温度(1 200, 1 100, 1 000, 900, 800 °C)并保温 15 s 后, 采用不同应变速率(0.1, 1, 5, 10 s<sup>-1</sup>)进行压缩变形, 变形量为 70%。

**收稿日期:** 2024-03-17; **修订日期:** 2024-11-01**作者简介:** 杨哲懿(1993—), 男, 辽宁鞍山人, 工程师, 硕士

## 2 结果与讨论

### 2.1 热压缩变形行为

由图1可以看出,试验钢的流变应力随着变形温度的升高而降低,随着应变速率的增加而升高。随着变形量的增加,晶界间位错密度的堆积导致加工硬化,宏观表现为真应力增大;当真应力达到峰值应力后,动态再结晶的软化作用与加工硬化达到平衡状态,当二者持续保持平衡,则宏观表现为随着变形量的增加,真应力几乎保持不变。但是,在高温(不低于1 100 °C)和低应变速率(0.1 s<sup>-1</sup>)条件下,试验钢的动态再结晶软化作用更强,因此随着变形量的增加,真应力达到峰值应力后出现略微降低的现象,随后当软化作用与加工硬化作用平衡后趋于

稳定<sup>[6]</sup>。

### 2.2 本构模型的建立

为准确表征试验钢的真应力、真应变关系,对传统 Arrhenius 方程<sup>[7]</sup>进行改进,即在方程中引入真应变的影响。传统 Arrhenius 方程如下:

$$\dot{\varepsilon} = \begin{cases} A\sigma^{n_1}\exp[-Q/(RT)] & (\alpha\sigma < 0.8) \\ A\exp(\beta\sigma)\exp[-Q/(RT)] & (\alpha\sigma > 1.2) \\ A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp[-Q/(RT)] & (\text{所有应力}) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\dot{\varepsilon}$  为应变速率;  $\sigma$  为真应力, MPa;  $T$  为热力学温度, K;  $R$  为气体常数, 8.314 J·mol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>;  $Q$  为材料激活能, J·mol<sup>-1</sup>;  $n_1$  为应力指数;  $n$  为应变速率敏感系数;  $A, \alpha, \beta$  均为材料常数,  $\alpha = \beta/n_1$ 。

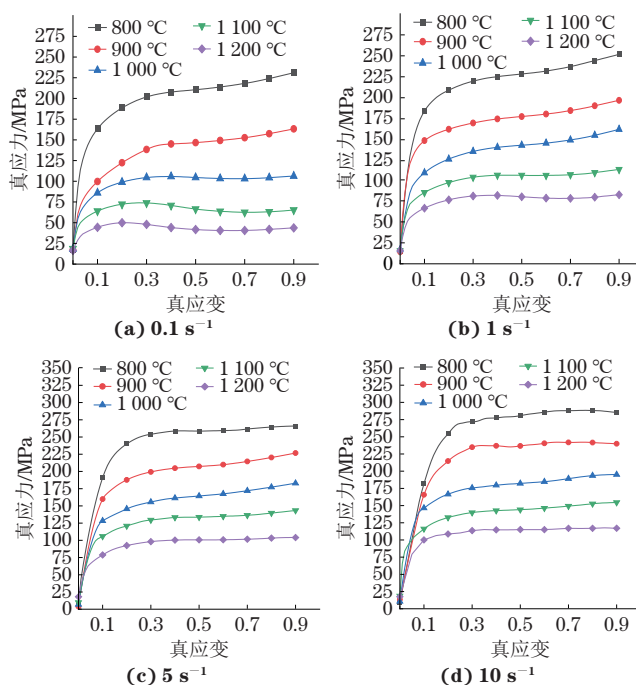


图1 不同应变速率和不同变形温度下试验钢的真应力-真应变曲线

Fig. 1 True stress-true strain curves of test steel under different strain rates and different deformation temperatures

在真应变  $\varepsilon$  为 0.1 条件下对式(1)两侧同时取自然对数,对不同变形温度下的  $\ln \dot{\varepsilon} - \ln \sigma$  和  $\ln \dot{\varepsilon} - \sigma$  进行线性拟合,结果如图2所示。计算拟合直线斜率的平均值,得到  $n_1 = 0.093$ ,  $\beta = 11.48$ , 进而得到  $\alpha = 0.0081$ 。对  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - \ln \dot{\varepsilon}$  和  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1000/T$  进行线性拟合,结果如图3所示。计算拟合直线斜率的平均值,得到  $n = 8.3311$ ,  $Q = 328\,363.4 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

Zener-Hollomon 提出了用变形温度和应变速率来表述高温变形条件对材料组织影响的数学模型,并定义  $Z$  参数为变形速率与温度的补偿因子<sup>[8]</sup>,结合

Arrhenius 方程得到:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp[Q/(RT)] = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (2)$$

将式(2)两侧取自然对数后,对  $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  进行线性拟合,结果如图4所示。通过求取纵轴截距得到  $\ln A = 24.93$ , 进而得到  $A = 2.576 \times 10^{22}$ 。

由此得到真应力为 0.1 条件下的本构方程:

$$\dot{\varepsilon} = 2.58 \times 10^{22} [\sinh(0.0081\sigma)]^{8.33} \exp[-328363.4/(RT)] \quad (3)$$

同理,参照上述推演过程对真应变为 0.2~0.9 条件下的模型参数进行求解,结果如表1所示。利用

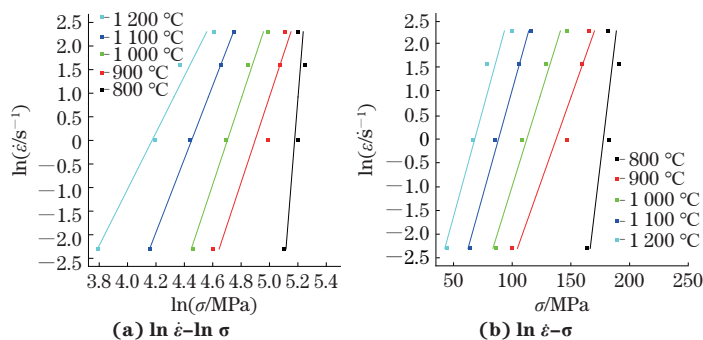


图2  $\ln \dot{\varepsilon}$ - $\ln \sigma$ 和 $\ln \dot{\varepsilon}$ - $\sigma$ 线性拟合曲线

Fig. 2  $\ln \dot{\varepsilon}$ - $\ln \sigma$  (a) and  $\ln \dot{\varepsilon}$ - $\sigma$  (b) linear-fitted curves

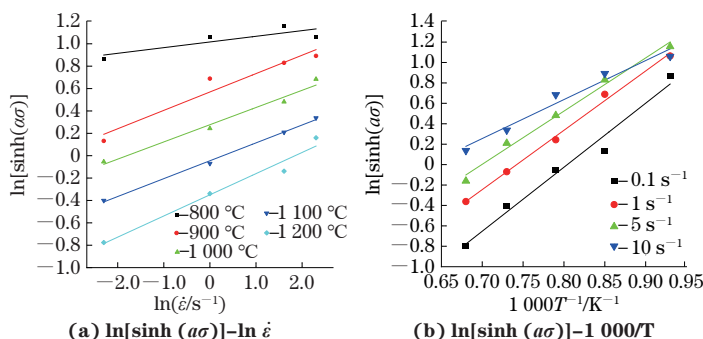


图3  $\ln [\sinh (\alpha \sigma)]$ - $\ln \dot{\varepsilon}$ 和 $\ln [\sinh (\alpha \sigma)]$ - $1000 / T$ 线性拟合曲线

Fig. 3  $\ln [\sinh (\alpha \sigma)]$ - $\ln \dot{\varepsilon}$  (a) and  $\ln [\sinh (\alpha \sigma)]$ - $1000 / T$  (b) linear-fitted curves

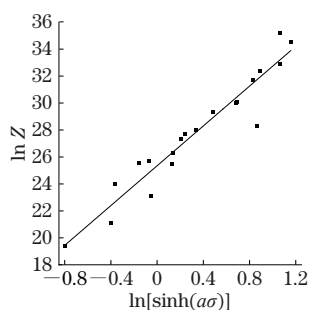


图4  $\ln Z$ - $\ln [\sinh (\alpha \sigma)]$ 线性拟合曲线

Fig. 4  $\ln Z$ - $\ln [\sinh (\alpha \sigma)]$  linear-fitted curve

表1 不同真应变下的本构模型参数

Table 1 Constitutive model parameters under different true strains

真应变	$\alpha$	$n$	$Q / (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	$A$
0.1	0.008 1	8.33	328 363.4	$2.58 \times 10^{22}$
0.2	0.007 5	6.56	297 935.7	$2.35 \times 10^{17}$
0.3	0.007 0	6.38	297 075.0	$1.82 \times 10^{17}$
0.4	0.006 9	6.28	299 123.2	$2.90 \times 10^{17}$
0.5	0.006 8	6.15	298 841.8	$3.36 \times 10^{17}$
0.6	0.006 7	6.00	297 640.3	$2.84 \times 10^{17}$
0.7	0.006 5	6.08	302 700.1	$8.91 \times 10^{17}$
0.8	0.006 3	6.45	318 719.0	$2.00 \times 10^{19}$
0.9	0.006 1	7.20	349 336.2	$8.54 \times 10^{21}$

四次多项式对不同模型参数与真应变的关系进行拟合,拟合结果如图5所示,拟合公式如下:

$$\begin{cases} \alpha = 0.013 - 0.047\varepsilon + 0.142\varepsilon^2 - 0.172\varepsilon^3 - 0.073\varepsilon^4 \\ n = 7.87 - 17.37\varepsilon + 56.17\varepsilon^2 - 79.88\varepsilon^3 + 40.33\varepsilon^4 \\ Q = 349\,522 - 846\,807\varepsilon + 3\,139\,329\varepsilon^2 - 4\,567\,357\varepsilon^3 + 2\,312\,237\varepsilon^4 \\ A = 7.64 \times 10^{11} - 9.1 \times 10^{12}\varepsilon + 3.8 \times 10^{13}\varepsilon^2 - 6.26 \times 10^{13}\varepsilon^3 + 3.52 \times 10^{13}\varepsilon^4 \end{cases} \quad (4)$$

结合式(1)与式(4)即可得到试验钢的本构模型,从而预测其流变行为。将模型预测结果与试验结果进行对比,由图6可以看出,模型预测结果与试验结果吻合较好,真应力的平均相对误差为3.79%。为了使预测结果和试验结果的对比更直观,将真应力预测值与试验值进行线性拟合,结果如图7所示,计算得到线性相关系数 $R$ 为0.997 5。线性相关系数越靠近1,说明二者的正线性相关性越强<sup>[9]</sup>。可知,预测值与试验值具有明显的线性正相关。综上,所建立的本构模型能够准确预测耐磨钢的高温流变行为。

### 2.3 热加工图的绘制

材料的热加工性能是指在塑性变形过程中材料

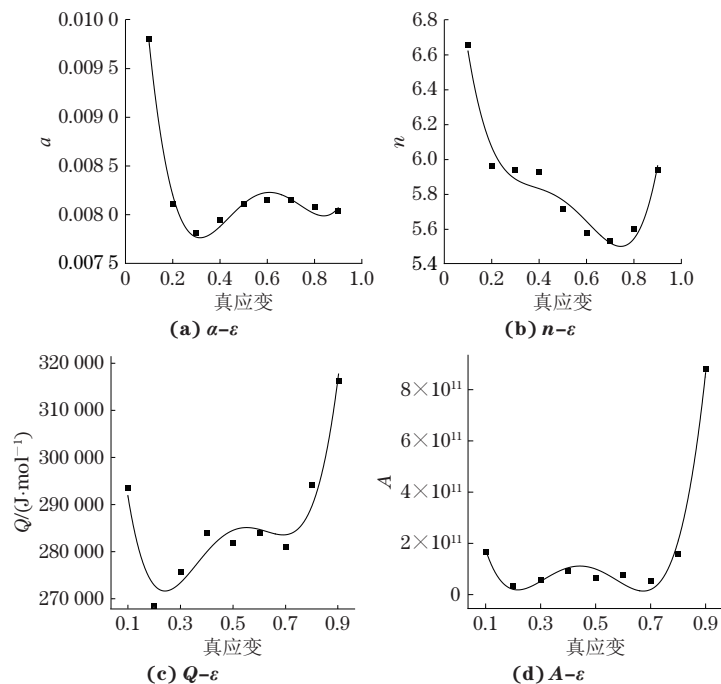


图5 本构模型参数与真应变之间的关系

Fig. 5 Relation between constitutive model parameters and true strains

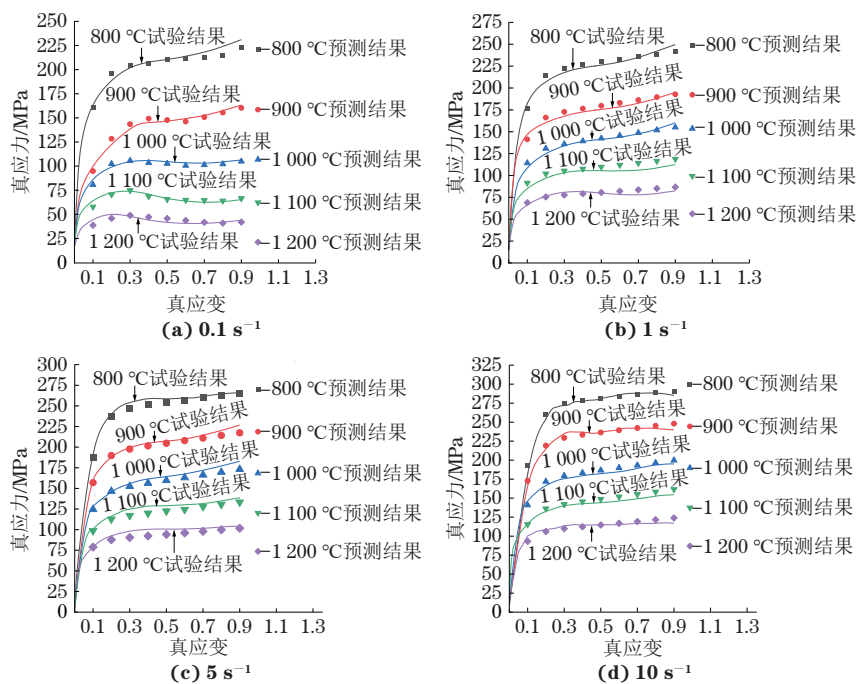


图6 模型预测得到不同变形条件下的真应力-真应变数据与试验所得真应力-真应变曲线的对比

Fig. 6 Comparison between true stress-true strain data obtained from model prediction and experimental true stress-true strain curves under different deformation conditions

不发生失稳破坏所能达到的变形能力。为了描述金属的热变形,常采用材料动态数学模型进行表征,并通过建立热加工图反映金属材料在不同条件下的热加工性能和稳定性<sup>[10]</sup>。基于材料动态理论,在热加工过程中,外界载荷的能量存在2种释放路径:一部

分促使材料发生变形,另一部分促使材料发生组织演变<sup>[11]</sup>。具体的数学表达式如下:

$$P = \sigma \dot{\epsilon} = G + J = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d\dot{\epsilon} + \int_0^{\sigma} \epsilon d\sigma \quad (5)$$

式中:  $P$  为变形时的外界载荷;  $G$  为材料发生塑性变



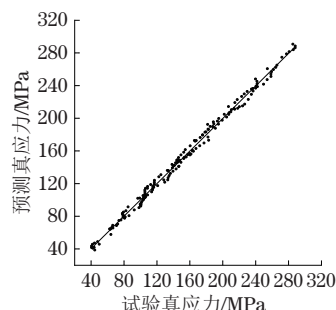


图7 真应力预测值与试验值的线性拟合

Fig. 7 Linear fitting of predicted and test values of true stress

形时所需的能量;  $J$  为材料发生显微组织演变所需的能量。

2种能量释放方式均与应力和应变速率有关,因此提出了应变速率敏感系数<sup>[12]</sup>,用来描述应力和应变速率之间的数学关系:

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m \quad (6)$$

式中:  $K$  为材料变形常数;  $m$  为应变速率敏感系数。

式(6)两边取自然对数及偏导数,可得到应变速率敏感指数表达式:

$$m = \frac{\partial(\ln \sigma)}{\partial(\ln \dot{\epsilon})} \quad (7)$$

功率耗散因子定义为耗散协量和材料理想线性耗散协量的比值,理想耗散状态是当  $m=1$  时的状态,因此功率耗散因子的表达式为

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{m+1} \quad (8)$$

式中:  $\eta$  为功率耗散因子;  $J$  为耗散协量,  $J$ ;  $J_{\max}$  为理想线性耗散协量,  $J$ 。

基于应变速率和变形温度对应的功率耗散因子建立等高线图,即功率耗散图。材料的变形并非是无止境的,高的功率耗散因子说明材料组织演变剧烈,但是若要对材料的加工性能进行评定,则需引入失稳判据 $\xi$ <sup>[13]</sup>:

$$\xi = \frac{\partial \ln \left( \frac{m}{m+1} \right)}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m \quad (9)$$

当  $\xi \leq 0$  时,材料会发生变形失稳。基于失稳判据建立等高线图,即可得到材料的失稳区间图。将材料的功率耗散图和失稳区间图进行叠加,即得到材料的热加工图;根据变形量的大小将多个热加工图叠加则可得到材料的多维度热加工图。当真应变为 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 时,试验钢的三维热加工图如图 8 所示,图中灰色区域为失稳区。由图 8 可以看出,

当真应变为 0.3 时,材料处于小变形应力状态,几乎不发生失稳。在低温低应变速率条件下功率耗散不明显,在高温低应变速率的条件下,功率耗散较明显,这是因为温度升高降低了材料再结晶的驱动力,使得材料易发生再结晶;在高温高应变速率条件下,材料不容易发生再结晶,但容易发生变形失稳。结合应力-应变曲线分析可知,在小变形时载荷释放的主要路径是变形而非显微组织演变<sup>[14]</sup>。当真应变为 0.5 时,材料处于中等变形的应力状态,失稳区开始增多,但此时材料并未发生明显的变形失稳。当真应变大于 0.5 时,材料处于大变形应力状态,失稳区更加明显,说明该条件下不适合进行单道次压缩变形,应采取多道次组合来施加载荷。综上可推断出,在单道次压缩变形时,试验钢合理的变形区间为真应变不大于 0.5、应变速率不大于  $10 \text{ s}^{-1}$ 、变形温度  $900 \sim 1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

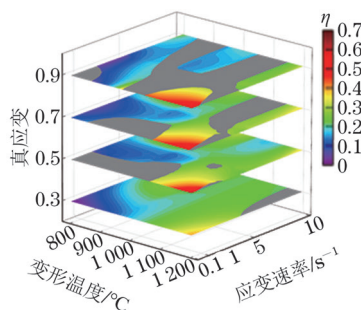


图8 试验钢的三维热加工图

Fig. 8 Three-dimensional hot processing map of test steel

### 3 结 论

(1) 试验钢的流变应力随着变形温度的升高而降低,随着应变速率的增加而升高;随着变形量的增加,真应力先增加至峰值应力后趋于稳定,但在高温(不低于  $1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )和低应变速率( $0.1 \text{ s}^{-1}$ )下真应力达到峰值应力后先略微降低后趋于稳定。

(2) 通过引入真应变的影响对传统 Arrhenius 方程进行改进而建立的本构模型可对试验钢在  $800 \sim 1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$  变形温度和  $0.1 \sim 10 \text{ s}^{-1}$  应变速率下的高温流变行为进行预测,真应力预测值与试验值的平均相对误差约为 3.79%。

(3) 试验钢在单道次热压缩变形时的合理加工区间为真应变不大于 0.5、应变速率不大于  $10 \text{ s}^{-1}$ 、变形温度  $900 \sim 1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

#### 参考文献:

- [1] 涂咏梅,董浩然. 鞍钢 2150 mm ASP 工艺装备特点[J].

- 轧钢, 2004, 21(6): 63-65.
- TU Y M, DONG H R. Characteristics of technology and equipment of 2 150 mm ASP production line of Angang Group Corporation[J]. Steel Rolling, 2004, 21(6): 63-65.
- [2] 徐世帅, 史乃安, 阎东宇, 等. 鞍钢2150ASP自由程序轧制技术[J]. 钢铁, 2012, 47(3): 42-45.
- XU S S, SHI N A, YAN D Y, et al. Schedule free rolling technology of Ansteel 2150 ASP[J]. Iron & Steel, 2012, 47(3): 42-45.
- [3] 张开铭, 温余远, 王克鲁, 等. Ti-22Al-24Nb合金热变形行为及本构关系[J]. 塑性工程学报, 2022, 29(10): 208-215.
- ZHANG K M, WEN Y Y, WANG K L, et al. Hot deformation behavior and constitutive relation of Ti-22Al-24Nb alloy[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29(10): 208-215.
- [4] 曹建国, 王天聪, 李洪波, 等. 基于Arrhenius改进模型的无取向电工钢高温变形本构关系[J]. 机械工程学报, 2016, 52(4): 90-96.
- CAO J G, WANG T C, LI H B, et al. High-temperature constitutive relationship of non-oriented electrical steel based on modified Arrhenius model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(4): 90-96.
- [5] 陈世佳. 大锻件材料30Cr2Ni4MoV钢的热变形特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- CHEN S J. Study on characteristics of heavy forging material 30Cr2Ni4MoV steel in hot deformation[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [6] 宫润燕. GH4169合金高温塑性变形行为及组织演变规律研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- GONG R Y. Research of microstructure evolution law and hot plastic deformation behavior for alloy GH4169[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
- [7] 罗平. GH4169合金热变形动态再结晶模拟[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- LUO P. Dynamic recrystallization simulation of GH4169 alloy during thermal deformation[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
- [8] 郭鹏程, 叶拓, 曹淑芬, 等. 高应变速率下铸态AM80镁合金的变形行为及数值模拟[J]. 中国机械工程, 2017, 28(6): 739-743.
- GUO P C, YE T, CAO S F, et al. Deformation behavior and numerical simulation of a casting AM80 magnesium alloy under high strain rate loading[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(6): 739-743.
- [9] 郭陈凤. 基于典型相关性分析的多视图学习研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- GUO C F. Research on canonical correlation analysis based multi-view learning[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [10] 韩蔚然, 高永亮, 李猛, 等. 2Ni6Cr5Al2MoV轴承钢热变形行为及热加工图[J]. 金属热处理, 2024, 49(11): 10-16.
- HAN W R, GAO Y L, LI M, et al. Hot deformation behavior and hot processing map of 2Ni6Cr5Al2MoV bearing steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2024, 49(11): 10-16.
- [11] 周军, 李中奎, 张建军, 等. 基于Matlab的热加工图的数值构造方法[J]. 稀有金属, 2007, 31(增刊2): 49-52.
- ZHOU J, LI Z K, ZHANG J J, et al. A numerical computation method for hot processing map based on Matlab[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2007, 31(S2): 49-52.
- [12] 王伟, 王波, 闫华军, 等. 基于等温压缩试验的20Cr2Ni4A钢Johnson-Cook本构模型及热加工图[J]. 热加工工艺, 2020, 49(13): 103-108.
- WANG W, WANG B, YAN H J, et al. Johnson-Cook constitutive model and hot processing map of 20Cr2Ni4A steel based on isothermal compression tests[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(13): 103-108.
- [13] 李亨, 张振威, 李润, 等. 船用曲轴S34MnV钢的物理基参数本构模型及热加工图[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(1): 131-137.
- LI H, ZHANG Z W, LI R, et al. Physically based parameter constitutive model and hot processing map of marine crankshaft S34MnV steel[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28(1): 131-137.
- [14] 丁浩晨, 赵艳君, 韦宗繁, 等. 基于3D热加工图的节镍型高锰奥氏体不锈钢的热变形特性[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(7): 2608-2616.
- DING H C, ZHAO Y J, WEI Z F, et al. Hot deformation characterization of low-Ni austenite stainless steel with high Mn through 3D processing map[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(7): 2608-2616.

# Constitutive Model Establishment and Hot Processing Map of Wear-Resistant Steel in High-Temperature Compression Deformation

YANG Zheyi<sup>1,2</sup>, MENG Fanzhi<sup>3</sup>, YANG Bo<sup>3</sup>, GAO Lei<sup>1,2</sup>, WANG Shuai<sup>1,2</sup>, WANG Zuncheng<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Metallic Materials for Marine Equipment and Application, Anshan 114009, China; 2. Hot Rolling Product Research Institute, Ansteel Group Iron and Steel Research Institute, Anshan 114009, China; 3. Hot-rolled Steel Factory, Ansteel Co., Ltd., Anshan 114021, China)

**Abstract:** The wear-resistant steel was subjected to single pass thermal compression deformation at high temperatures (800–1 200 °C) and medium strain rates (0.1, 1, 5, 10 s<sup>-1</sup>) with Gleeble-3800 thermal simulator. The thermal compression deformation behavior of the steel was studied. According to the true stress-true strain data, the traditional Arrhenius equation was improved by introducing the influence of the true strain, and then the constitutive model was established. The calculated results were compared with test results. The hot processing map was drawn to determine the reasonable processing range. The results show that the flow stress of the test steel decreased with the increase of deformation temperature or the decrease of strain rate. With the increase of deformation, the true stress first increased to the peak stress and then became stable, except at high temperature (not less than 1 100 °C) and low strain rate (0.1 s<sup>-1</sup>), the true stress first decreased slightly after reaching the peak stress and then became stable. The true stress obtained by the established constitutive model was in good agreement with the test results, with the average relative error of 3.79% and the linear correlation coefficient of 0.997 5, indicating that the constitutive model could accurately predict the rheological behavior of the test steel at the deformation temperature of 800–1 200 °C and the strain rate of 0.1–10 s<sup>-1</sup>. The reasonable processing range of the test steel under single pass thermal compression deformation was true strain of no more than 0.5, strain rate of no more than 10 s<sup>-1</sup>, and deformation temperature of 900–1 100 °C.

**Key words:** wear-resistant steel; constitutive model; hot processing map; single pass thermal compression

## 2025年“材料氢致损伤行为与抗氢损伤调控方法”专题征稿启事

氢能作为一种清洁、高效、可持续的二次能源,被视为21世纪最具发展潜力的清洁能源,是人类的战略能源发展方向,是实现碳达峰、碳中和工作最富成效的技术方案之一。氢能在解决能源危机、全球变暖及环境污染等问题方面将发挥重要作用。在氢制取、氢储运、氢利用的过程中,设备所用材料长期在氢环境下工作,会出现性能恶化的现象,尤其是高强金属材料极易在氢环境下发生损伤失效,往往质量分数百万分之几的氢浓度就足以使其发生无预警脆断,这严重影响了材料的使用寿命以及结构的安全可靠性。为了深入探讨材料氢致损伤的内在机制,展示最新的抗氢损伤调控方法及研究成果,推动该领域的学术交流与技术创新,《机械工程材料》于2025年第12期推出“材料氢致损伤行为与抗氢损伤调控方法”专题,现公开征集相关领域的高水平研究论文及综述。

### 征稿范围

- (1) 临氢环境材料性能测试方法;
- (2) 临氢环境材料及部件服役寿命评价方法;
- (3) 临氢环境下材料损伤断裂机理;
- (4) 考虑氢损伤的材料性能预测方法;
- (5) 抗氢损伤防护方法;
- (6) 表面抗氢涂层技术;
- (7) 基于数据驱动的材料抗损伤设计及制造方法。

### 特邀专题主编

孙彬涵(华东理工大学教授); 温建锋(华东理工大学教授)

### 写作要求

综述文章要求能总结材料氢致损伤行为与抗氢损伤调控方法的研究现状并提出前瞻性的发展方向; 研究类文章要求能反映该领域的最新研究成果, 数据详实、方法新颖、理论分析有深度、结果可靠; 模拟类文章要求有相应的试验验证; 应用类文章要求具有实际推广价值, 研究要有系统性, 有理论分析。

### 时间安排

投稿截止时间: 2025年9月30日

出版时间: 2025年12月

### 投稿方式

通过期刊网站 <https://jxgccl.mat-test.com> “投审稿系统”进入投稿页面, 选择《机械工程材料》, 进入“作者投稿”, 按系统要求填写信息, 上传稿件, 请作者备注所投专题。

联系电话: 021-65541496; 021-65556775-368

E-mail: mem@mat-test.com

《机械工程材料》编辑部