

理论与实验研究

## 基于应变补偿及修正的 Q460NH 高强耐候钢本构方程

刘佩钰<sup>1,2</sup>, 孟智娟<sup>3</sup>, 刘子健<sup>1,2</sup>, 杜宇康<sup>1,2</sup>, 赵 亮<sup>1,4</sup>, 麻浩曦<sup>1,4</sup>, 马立东<sup>1,4</sup>

(1. 太原科技大学 太原重型机械装备协同创新中心, 山西 太原 030024; 2. 太原科技大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024;  
3. 太原科技大学 应用科学学院, 山西 太原 030024; 4. 太原科技大学 机械工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:** 为分析 Q460NH 钢的高温变形行为, 利用 Gleeble-3800 热模拟实验机进行变形温度为 600~900 ℃、应变速率为 0.01~10 s<sup>-1</sup>、变形量为 60% 的热压缩实验。将 Zener-Hollomon 参数与材料参数函数导入 Arrhenius 方程, 建立了  $Q$ 、 $A$ 、 $n$ 、 $\alpha$  与真应变的本构关系的 Arrhenius 双曲正弦方程。考虑真应变对流动应力及 700~800 ℃ 下实验误差的影响, 对本构方程进行修正, 用八阶多项式建立表示真应变和材料参数关系的数学模型, 进一步建立了包含变形温度、应变速率及应变相关的 Q460NH 钢的高温变形本构方程。为了检验该本构方程计算所得理论值的有效性, 对计算所得理论值和实验数据进行了对比及平均误差分析, 相关系数  $r$  值为 0.956、平均相对误差  $AARE$  值仅为 7.23%。结果表明: 修正后的本构方程计算得到的应力理论值和实验数据吻合较好, 具有较高的准确性。

**关键词:** Q460NH; 高强耐候钢; 本构方程; 实验误差修正; 应变补偿

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.03.036

**中图分类号:** TG306

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 03-0219-08

## Constitutive equation of Q460NH high-strength weathering steel based on strain compensation and modification

Liu Peiyu<sup>1,2</sup>, Meng Zhijuan<sup>3</sup>, Liu Zijian<sup>1,2</sup>, Du Yukang<sup>1,2</sup>, Zhao Liang<sup>1,4</sup>, Ma Haoxi<sup>1,4</sup>, Ma Lidong<sup>1,4</sup>

(1. Coordinative Innovation Center of Taiyuan Heavy Machinery Equipment, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China; 3. School of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China; 4. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** In order to analyze the high-temperature deformation behavior of Q460NH steel, the thermal compression experiment was carried out by Gleeble-3800 thermal simulation experimental machine with the experimental temperature of 600–900 ℃, the strain rate of 0.01–10 s<sup>-1</sup> and the deformation amount of 60%, and the Arrhenius hyperbolic sine equation of the constitutive relationship between  $Q$ ,  $A$ ,  $n$ ,  $\alpha$  and true strain was established by importing the function of Zener-Hollomon parameters and material parameters into the Arrhenius equation. Then, considering the influence of true strain on flow stress and experimental error at 700–800 ℃, the constitutive equation was modified, and the mathematical model representing the relationship between true strain and material parameters was established by an eighth-order polynomial. Furthermore, the high-temperature deformation constitutive equation of Q460NH steel including deformation temperature, strain rate and strain correlation was established. In order to verify the validity of the theoretical values calculated by the constitutive equation, the calculated theoretical values and the experimental data were compared, and the average error was analyzed with the correlation coefficient  $r$  value of 0.956 and  $AARE$  value only of 7.23%. The results show that the theoretical stress value calculated by the modified constitutive equation is in good agreement with the experimental data and has a high accuracy.

**Key words:** Q460NH; high-strength weathering steel; constitutive equation; experimental error correction; strain compensation

通过长期的实践应用表明, 高强耐候钢的力学

性能突出、耐腐蚀性较强, 主要以钢结构的形式应用于建筑、桥梁、风电、军工等领域, 前景不可估量。现阶段, 钢结构形式主要由热轧或板带钢拼焊而成, 产品质量良莠不齐、塑性差、变形抗力大<sup>[1-6]</sup>。近年, 各企业及研究单位分别采用增大变形量、减少成形道次及高温成形的方式来提高产品质量<sup>[7]</sup>, 因此, 关于 Q460NH 高强耐候钢更为准确的本构方程可以为前期模拟及后期生产提供保障。

收稿日期: 2020-11-18; 修订日期: 2021-02-27

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB1308700); 山西省应用基础研究计划 (20191D111244, 20191D211311); 山西省科技重大专项 (20181102016)

作者简介: 刘佩钰 (1995-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1121260670@qq.com

通信作者: 马立东 (1980-), 男, 博士, 教授

E-mail: mald@tyust.edu.cn

为解决上述现状及问题，各专家学者对不同的金属材料性能展开了研究。施刚等<sup>[8]</sup>对 Q460D 钢进行了单调和循环加载实验，得到了不同加载制度下的应力-应变关系，逐步求解 Q460D 钢的循环加载本构模型参数。王卫永等<sup>[9]</sup>采用恒温拉伸法和振动法对 Q460 钢材在高温下的强度和弹性模量进行了实验研究，得出了 Q460 钢的结构相比普通钢具有较好的抗火性能。Wang W 等<sup>[10]</sup>进行了高温 Q460 钢的性能测试，低于 500 ℃ 时，Q460 钢材的强度和弹性模量保持为常温下的 80%，而较高的拉伸应变率会降低强度和弹性模量。当温度超过 500 ℃ 时，力学性能的降低因子会显著下降，而较高的拉伸应变率会产生较高的强度和弹性模量。以上研究更加证实了 Q460 钢在今后钢结构中的前景，其高温本构模型的建立十分重要。

创建本构模型是为描述材料高温塑性变形过程中流动应力与应变间的关系，对研究金属材料在热塑性变形过程中流动应力随不同实验参数或材料状态参数的动态响应有重要意义，以往的 Arrhenius 模型仅表现出材料的流动应力与变形温度有关。而在实际生产中，应变速率也会对此有影响，当应变发

生变化时，流动应力也会随之改变<sup>[11]</sup>。本文在 Arrhenius 模型的基础上引入了应变补偿，并考虑实验过程对材料性能的影响，进行相应的修正，确保本构模型的准确性。

现阶段，Q460NH 钢具有广泛的应用，但关于 Q460NH 钢热变形方面的研究仍然不多。因此，本文采用 Gleeble-3800 热模拟实验机对 Q460NH 钢材料进行不同变形温度、应变速率的热压缩实验，获得了高温变形状态下变形行为的特性。通过实验数据建立了本构方程，流动应力为双曲线形式，并考虑应变补偿及对实验误差的修正，所建立的本构方程更为准确，对高温变形生产高强耐候钢结构的仿真模拟及实际生产具有重要的指导意义。

1 实验材料及研究方法

1.1 实验材料

实验材料选用高强耐候钢 Q460NH 板材，主要化学成分见表 1。将 Q460NH 钢板材经线切割加工成 Φ10 mm×15 mm 的圆柱形试样。

表 1 Q460NH 钢的元素组成（%，质量分数）

Table 1 Elemental compositions of Q460NH steel（%，mass fraction）

Nb	Ti	Mn	P	Si	S	C	Als	Re	Cu	Al	Cr	N	Ni	Fe
0.025	0.025	1.150	0.014	0.320	0.014	0.140	0.025	0.025	1.150	0.014	0.320	0.014	0.140	余量

1.2 实验方法

采用 Gleeble-3800 热模拟实验机进行单道次压缩实验。实验前，为提高实验数据的可靠性，需要减少热模拟实验机两侧压头因摩擦对实验结果产生的影响，首先，对试样两头部位进行打磨；然后，在试样的两头部位添加高温专用润滑油并且粘贴石墨片，以进一步降低摩擦力。将试样以 10 ℃·s<sup>-1</sup> 的加热速度加热至 1000 ℃，保温 180 s，使组织均匀化；随后，以 10 ℃·s<sup>-1</sup> 的冷却速度冷却至变形温度（650、700、750、800 和 900 ℃）。为排除实验中试样内部温度梯度的影响，实验中采取保温 30 s 后压头压下，Q460NH 钢材变形后的降温方式采用水冷，使试样温度极速降低至室温，实验工艺如图 1 所示。其中， $T$  为变形温度， $\epsilon$  为变形量， $\dot{\epsilon}$  为应变速率，分别为 0.01、0.1、1 和 10 s<sup>-1</sup>，变形量为 60%（真应变量为 0.92）。

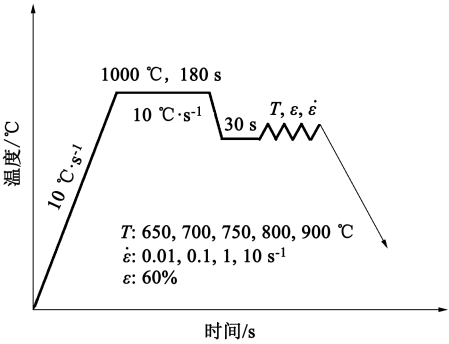


图 1 热压缩实验工艺图

Fig. 1 Process diagram of thermal compression experiment

2 实验结果及讨论

2.1 Q460NH 钢的变形行为

图 2 为实验 Q460NH 钢在不同变形温度、不同应变速率条件下所得的真应力-真应变曲线。分析图 2 中曲线可知：在高温状况下，Q460NH 钢的真应变随

真应力的变化均呈非线性, 在压缩变形的初期, 真应力快速增大, 当真应变继续增大时, 真应力增长缓慢, 达到极值后不再增长。其中, 当变形程度继续增大时, 可以分为两种情况: (1) 变形程度继续增大, 真应力也随之增大, 之后保持稳定, 没有出现明显的

真应力极值; (2) 随变形程度加深, 真应力先缓慢增长, 达到某一极值后不断地减小至稳定阶段。真应力与真应变表现为这两种特性是由于: 不断增大的变形程度导致 Q460NH 钢在高温下压缩变形时产生了动态再结晶或动态回复等流动软化的现象<sup>[12]</sup>。

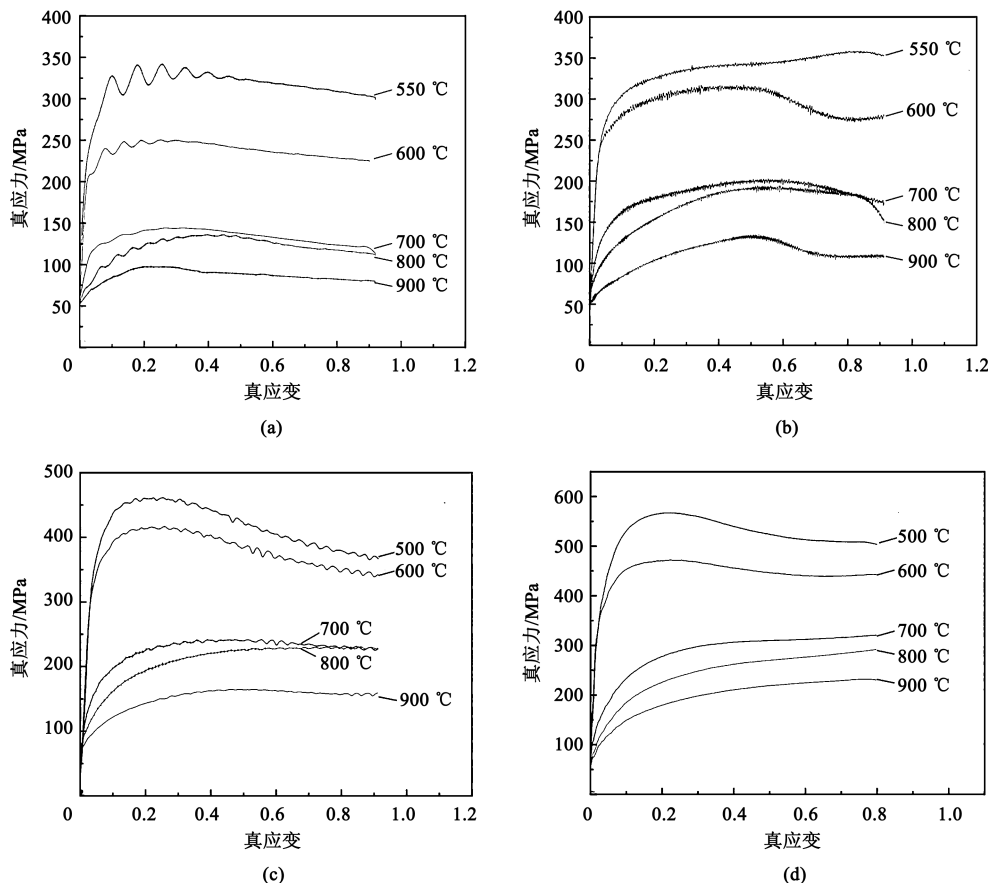


图2 试样在不同变形温度与不同应变速率下的真应力-真应变曲线

(a)  $0.01 \text{ s}^{-1}$  (b)  $0.1 \text{ s}^{-1}$  (c)  $1 \text{ s}^{-1}$  (d)  $10 \text{ s}^{-1}$

Fig. 2 Curves of true stress-true strain for samples at different deformation temperatures and different strain rates

## 2.2 Q460NH 钢热变形本构关系的构建

高温状态下 Q460NH 钢的本构方程是体现其变形行为特性的重要手段, Q460NH 钢变形过程中的真应力和热加工工艺参数的关系也可以通过本构方程体现。同时, 本构方程还是有限元模拟验证中的重要一环, 关系到模型的精确性。

热变形本构方程的建立与变形温度  $T$ 、应变速率  $\dot{\varepsilon}$ 、真应力  $\sigma$  及应变变量  $\varepsilon$  有关。本构关系的数学表达式, 以应变速率  $\dot{\varepsilon}$  表示为以下 2 种形式:

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) & \alpha\sigma < 0.8 \\ \dot{\varepsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) & \alpha\sigma > 0.8 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\dot{\varepsilon}$  为相应的应变速率,  $\text{s}^{-1}$ ;  $\sigma$  为真应力,

MPa;  $Q$  为热变形激活能,  $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ;  $R$  为阿伏伽德罗气体常数,  $R = 8.314 \text{ J} \cdot (\text{K} \cdot \text{mol})^{-1}$ ;  $T$  为绝对变形温度, K;  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A$ 、 $n_1$ 、 $\beta$ 、 $n$  均为不会被温度影响、仅会被材料本身特性影响的参数, 可以通过分析实验所得的真应力-真应变曲线求解出这些常数的大小, 且满足  $\alpha = \beta/n_1$ ,  $\alpha$  为  $n_1$  和  $\beta$  的斜率。

分析高温工况下 Q460NH 钢变形过程中的变形行为, 创建能够描述真应力、 $\dot{\varepsilon}$  和  $T$  之间关系的数学模型:

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

对式 (2) 两边分别取对数得到:

$$\ln Z = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left( \frac{Z}{A} \right)^{1/n} + \left[ \left( \frac{Z}{A} \right)^{2/n} + 1 \right]^{1/2} \right\} \quad (4)$$

式中:  $Z$  为 Zener-Hollomon 参数, 引入  $Z$  是考虑到温度对应变速率的扰动, 对其进行补偿, 这样可以全面考虑两者的影响。

在应变速率为  $0.01 \sim 10 \text{ s}^{-1}$  和变形温度为  $650 \sim 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$  的工况下, 选取 16 个应变点及其对应的真应力来求解相关的材料参数, 从而创建高温工况下 Q460NH 钢的本构方程。为全面体现 Q460NH 钢各参数的计算方式, 采取非典型的应变点。采用 Q460NH 钢应变达到 0.05 时的数据, 以双曲线的数学模型对数据进行解析。分析式 (1) 中  $\sigma$  与  $\dot{\varepsilon}$  的数学关系, 对式 (1) 中的 2 个方程两边同时取自然对数可得:

$$\ln \dot{\varepsilon} = n_1 \ln \sigma + \ln A_1 - \frac{Q}{RT} \quad (5)$$

$$\ln \dot{\varepsilon} = \beta \sigma + \ln A_1 - \frac{Q}{RT} \quad (6)$$

在给定应变值下, 由式 (5) 和式 (6) 所示的方程可得,  $n_1$  和  $\beta$  分别为  $\ln \dot{\varepsilon} - \ln \sigma$  曲线和  $\ln \dot{\varepsilon} - \sigma$  曲线的斜率。凭借 Origin 数据图像处理软件中的线性回归功能可得到直线斜率的平均值, 如图 3 所示, 拟合结果几乎平行, 可以验证之前的解释,  $n_1$  和  $\beta$  与温度无关, 仅与材料本身的特性有关。

用 Origin 数据图像软件处理上述过程, 并求得直线斜率的平均值, 即最终的  $n_1$  和  $\beta$  值:  $n_1 = 7.03036$ ,  $\beta = 0.0407 \text{ MPa}^{-1}$ , 则  $\alpha = \beta / n_1 = 0.005791 \text{ MPa}^{-1}$ 。

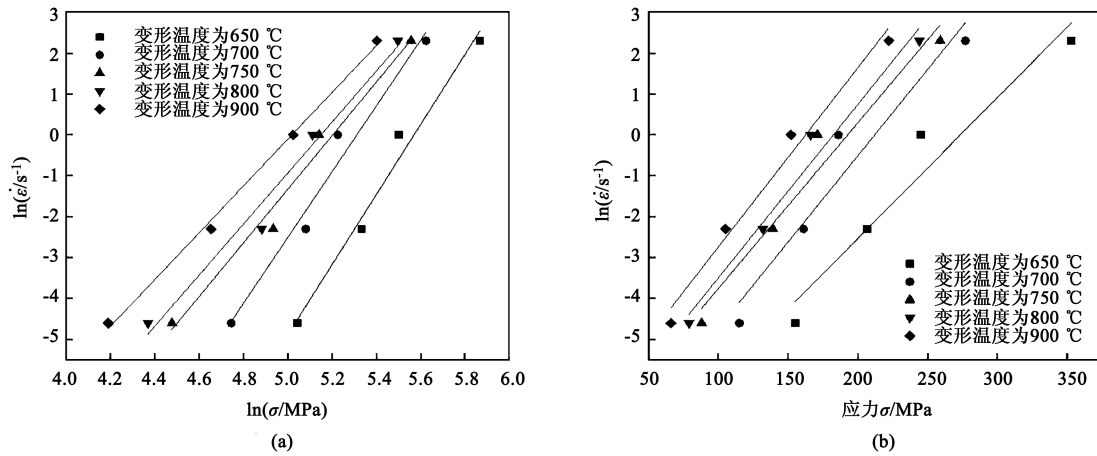


图 3  $\ln \sigma - \ln \dot{\varepsilon}$  (a) 和  $\sigma - \ln \dot{\varepsilon}$  (b) 的关系曲线

Fig. 3 Relationship curves of  $\ln \sigma - \ln \dot{\varepsilon}$  (a) 和  $\sigma - \ln \dot{\varepsilon}$  (b)

对于所有的应力水平, 把双曲线函数代入式 (1) 第 1 个方程中, 得到:

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

$$\ln [\sinh(\alpha \sigma)] = \frac{1}{n} \ln \dot{\varepsilon} - \frac{1}{n} A + \frac{Q}{nRT} \quad (8)$$

对式 (7) 两边取对数并作图求  $\ln [\sinh(\alpha \sigma)] - \ln \dot{\varepsilon}$  和  $\ln [\sinh(\alpha \sigma)] - 1/T$  的平均斜率 (图 4), 可以计算得到  $n$  和  $Q$  的值, 其值分别为 5.209582 和  $145.88 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

代入  $\alpha$  与  $Q$  的求解值, 式 (3) 中  $\ln Z$  和  $\ln [\sinh(\alpha \sigma)]$  的关系曲线如图 5 所示。  $\ln A$  是良好线性拟合直线的截距, 其值为 15.3312, 则得到  $A$  值为  $4552559 \text{ s}^{-1}$ 。

通过对 Q460NH 高强耐候钢各材料参数的求解方式可以发现,  $\alpha(\varepsilon)$ 、 $n(\varepsilon)$ 、 $Q(\varepsilon)$ 、 $A(\varepsilon)$  均同真应变的大小存在映射, 想要精确地建立体现 Q460NH 钢的变形特性的本构方程, 有必要综合考虑各真应变的大小对其流动应力大小的扰动。借鉴其他学者对类似材料的研究<sup>[13-14]</sup>, 确定以 0.05~0.8 为具有参考价值的真应变范围, 真应变每增大 0.05 则取一次数据, 这样做不仅可以减少繁复的计算, 还能够保证所取数据计算出的结果具有有效性和准确性。取 16 个应变点处的数据, 分别计算本构方程的各参数, 整理结果如表 2 所示, 并构建八次多项式, 对式 (9) 进行拟合。

借鉴高温工况下合金本构方程研究领域的常用方法, 材料常数和真应变值的拟合采用八阶多项式时误差最小。

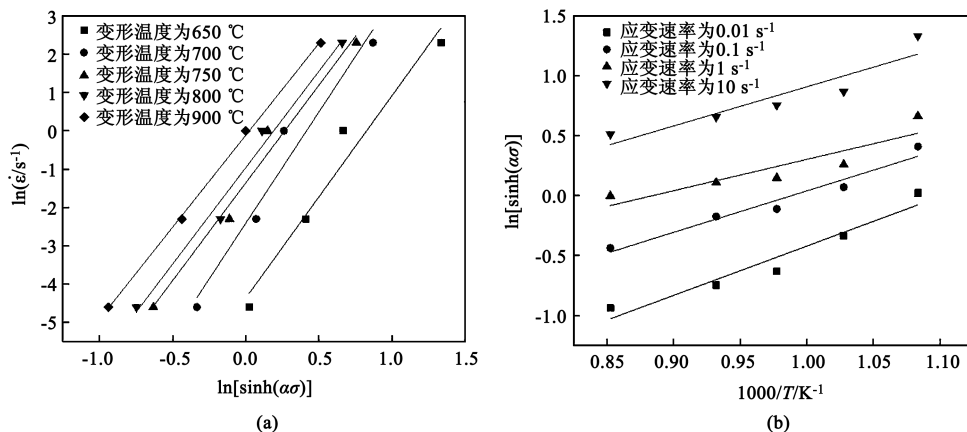
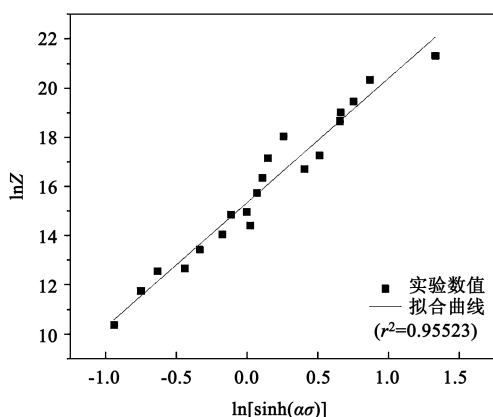
图4  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - \ln\dot{\varepsilon}$  (a) 和  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1/T$  (b) 的关系曲线Fig. 4 Relationship curves of  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - \ln\dot{\varepsilon}$  (a) and  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1/T$  (b)图5 真应变为 0.5 时的  $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  曲线Fig. 5  $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  curve at true strain of 0.5

表2 Q460NH 钢各真应变下的材料参数  $\alpha$ 、 $n$ 、 $Q$ 、 $\ln A$  的值  
Table 2 Values of material parameters  $\alpha$ ,  $n$ ,  $Q$  and  $\ln A$  for Q460NH steel under various true strains

真应变	$\alpha$	$n$	$Q$	$\ln A$
0.05	0.008980	6.574366	275.8755	29.12263
0.10	0.007391	6.465730	249.0709	28.00284
0.15	0.006785	6.241172	178.9537	20.01287
0.20	0.006350	6.095783	193.4800	18.85754
0.25	0.006124	6.076858	177.2439	18.50025
0.30	0.005955	5.847523	175.2058	18.30864
0.35	0.005916	5.821870	148.0059	16.46812
0.40	0.005775	5.770550	157.8915	16.37436
0.45	0.005746	5.744960	158.1634	15.98461
0.50	0.005791	5.209582	145.8800	15.33120
0.55	0.005742	5.475408	151.4118	15.59749
0.60	0.005742	5.215498	143.9257	15.07962
0.65	0.005736	5.154983	141.0187	14.95007
0.70	0.005751	4.946507	136.6253	14.63797
0.75	0.005733	4.810415	131.1634	14.20888
0.80	0.005723	4.707355	131.1114	13.74782

拟合结果如图 6 所示。图 6a~图 6d 分别表示 Q460NH 钢的材料常数  $\alpha$ 、 $n$ 、 $Q$ 、 $\ln A$  与真应变的拟合情况。各曲线的相关系数  $r$  分别为 0.9995、0.9939、0.9979、0.9953，这表明该曲线能够准确地表征 Q460NH 钢的材料参数与真应变的关系。整理各曲线的相关系数，将其带入式 (9)，获得如表 3 所示的结果。

$$\left\{ \begin{aligned} \alpha &= B_0 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2 + B_3\varepsilon^3 + B_4\varepsilon^4 + B_5\varepsilon^5 + \\ &\quad B_6\varepsilon^6 + B_7\varepsilon^7 + B_8\varepsilon^8 \\ n &= C_0 + C_1\varepsilon + C_2\varepsilon^2 + C_3\varepsilon^3 + C_4\varepsilon^4 + C_5\varepsilon^5 + \\ &\quad C_6\varepsilon^6 + C_7\varepsilon^7 + C_8\varepsilon^8 \\ Q &= D_0 + D_1\varepsilon + D_2\varepsilon^2 + D_3\varepsilon^3 + D_4\varepsilon^4 + D_5\varepsilon^5 + \\ &\quad D_6\varepsilon^6 + D_7\varepsilon^7 + D_8\varepsilon^8 \\ \ln A &= E_0 + E_1\varepsilon + E_2\varepsilon^2 + E_3\varepsilon^3 + E_4\varepsilon^4 + E_5\varepsilon^5 + \\ &\quad E_6\varepsilon^6 + E_7\varepsilon^7 + E_8\varepsilon^8 \end{aligned} \right. \quad (9)$$

通过应变补偿模型计算不同真应变的本构方程参数，利用式 (10) 对整个变形范围的真应力进行预测。

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp\left[\frac{Q}{R(T)}\right] \quad (10)$$

$$\sigma = \frac{1}{\alpha(\varepsilon)} \ln\left\{ \left(\frac{Z(\varepsilon)}{A(\varepsilon)}\right)^{\frac{1}{n(\varepsilon)}} + \left[\left(\frac{Z(\varepsilon)}{A(\varepsilon)}\right)^{\frac{2}{n(\varepsilon)}} + 1\right] \right\} \quad (11)$$

### 2.3 本构方程的修正

将 Q460NH 钢真应力的预测值与实验值进行对比分析，需对  $700\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， $\dot{\varepsilon} \leq 0.1$  工况下本构模型计算的理论值加以修正<sup>[15]</sup>。基于以下两个

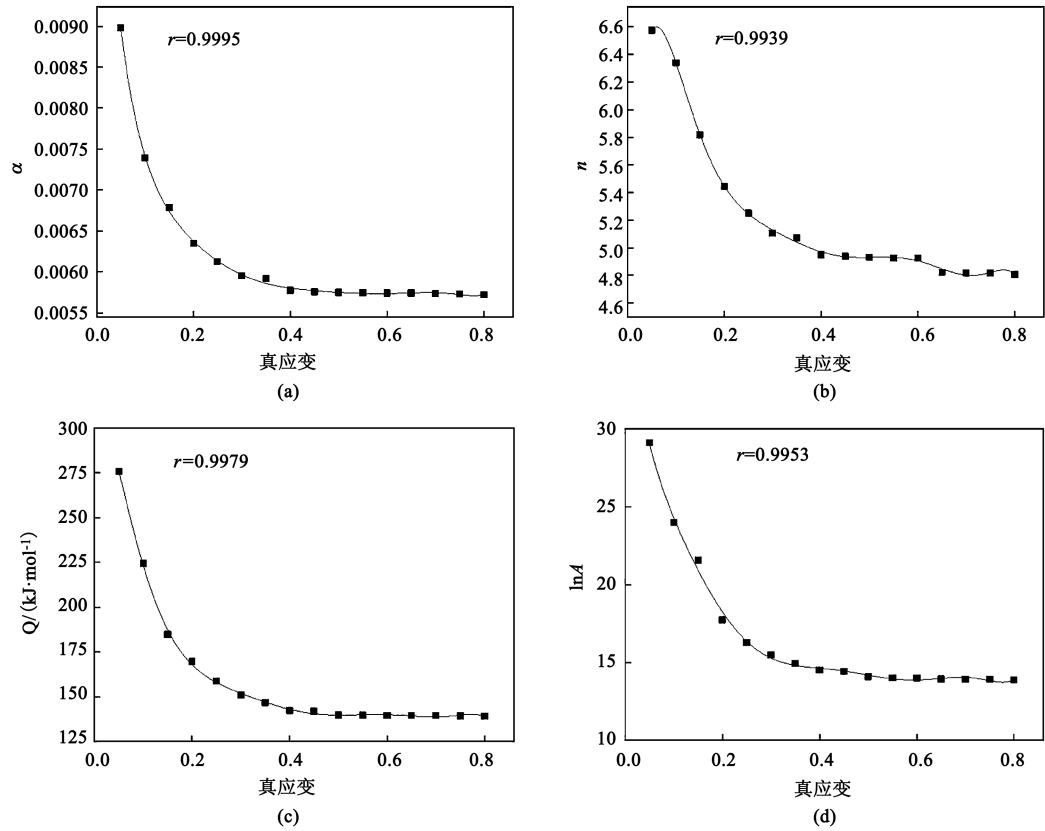


图 6 Q460NH 钢材料参数与真应变的关系曲线  
(a)  $\alpha$ - $\varepsilon$  (b)  $n$ - $\varepsilon$  (c)  $Q$ - $\varepsilon$  (d)  $\ln A$ - $\varepsilon$

Fig. 6 Relationship curves of material parameters and true strain for Q460NH steel

表 3 Q460NH 钢的材料参数  $\alpha$ 、 $n$ 、 $Q$ 、 $\ln A$  与真应变拟合的多项式系数

Table 3 Polynomial coefficients of fitting material parameters  $\alpha$ ,  $n$ ,  $Q$ ,  $\ln A$  and true strain for Q460NH steel

$\alpha$ - $\varepsilon$ 多项式	$n$ - $\varepsilon$ 多项式	$Q$ - $\varepsilon$ 多项式	$\ln A$ - $\varepsilon$ 多项式
系数 数值	系数 数值	系数 数值	系数 数值
$B_0$ 0.01278	$C_0$ 1.11 $\times 10$	$D_0$ 2.10	$E_0$ 4.05 $\times 10^{-5}$
$B_1$ -0.11388	$C_1$ 1.98 $\times 10^2$	$D_1$ 80.1	$E_1$ 0.0112
$B_2$ 0.96778	$C_2$ 2.64 $\times 10^3$	$D_2$ 1040	$E_2$ 0.172
$B_3$ -4.93382	$C_3$ 1.66 $\times 10^4$	$D_3$ 6580	$E_3$ 1.19
$B_4$ 15.48582	$C_4$ 5.68 $\times 10^4$	$D_4$ 23500	$E_4$ 4.52
$B_5$ 30.03249	$C_5$ 1.13 $\times 10^5$	$D_5$ 49300	$E_5$ 9.95
$B_6$ 35.00616	$C_6$ 1.31 $\times 10^5$	$D_6$ 60600	$E_6$ 12.7
$B_7$ 22.44767	$C_7$ 8.15 $\times 10^4$	$D_7$ 40300	$E_7$ 8.69
$B_8$ 6.07846	$C_8$ 2.12 $\times 10^4$	$D_8$ 11200	$E_8$ 2.47

方面进行修正：(1) 即使在试样两头添加了润滑油和石墨片，热模拟实验中试样和模具间的摩擦也不会完全消失；(2) 应变速率为 0.01 和 0.1 s<sup>-1</sup> 时，分别在应变温度 700、750 和 800 ℃ 的 6 种工

况下进行实验，压缩阶段试样的温度波动比其他工况大，不能保持在设定温度。由实验设备记录可知，采用以上工况进行压缩变形的时间较长，温度会有所降低，达不到预设温度时，模拟机对试样进行加热，加热至温度高于设定温度后再降低，温度出现波动。

为提高此本构方程的准确性，根据本构方程预测情况对 700 ℃ ≤  $T$  ≤ 800 ℃， $\dot{\varepsilon}$  ≤ 0.1 的工况进行更正，根据实验温度波动情况，采用本构方程进行计算时，将温度提高 15~25 ℃。根据参数  $Z$  的数学模型可知，必须加入应变速率的扰动。通过改变  $Z$  的数学模型中应变速率的指数大小来弥补方程理论值和实验所测得数据之间的偏差。以 20 ℃ 为温度增量值，并且将应变速率的指数大小设为 0.75，按照双曲线模型本构方程中变形温度与应变速率修正后的数据进行预测，结果更加准确。

Q460NH 钢的高温本构方程如下所示：

$$\sigma = \frac{1}{\alpha(\varepsilon)} \ln \left\{ \left( \frac{Z(\dot{\varepsilon}, \varepsilon)}{A(\varepsilon)} \right)^{\frac{1}{n(\varepsilon)}} + \left[ \left( \frac{Z(\dot{\varepsilon}, \varepsilon)}{A(\varepsilon)} \right)^{\frac{2}{n(\varepsilon)}} + 1 \right] \right\}$$

(12)

$$Z = \begin{cases} \dot{\varepsilon} \exp\left[\frac{Q}{R(T)}\right], & 600\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T < 700\text{ }^{\circ}\text{C}, \\ \dot{\varepsilon} \exp\left[\frac{Q}{R(T + \Delta T)}\right], & 800\text{ }^{\circ}\text{C} < T \leq 900\text{ }^{\circ}\text{C} \\ \dot{\varepsilon}^{\frac{3}{4}} \exp\left[\frac{Q}{R(T + \Delta T)}\right], & 700\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 800\text{ }^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $\Delta T$  为温度增量值。

为了验证修正后的本构方程与高温条件下的 Q460NH 钢的变形行为是否一致, 以本构方程所得的真应力数据为理论值, 以实验所得的真应力数据为实验值, 分析两者之间的关系, 确定理论值是否有效。

## 2.4 本构方程的验证

运用线性拟合公式进行分析, 获得如图 7 所示的拟合结果。由图 7 可知, 实验中测量得到的实验值和经本构方程计算所得的理论值存在很强的相关性, 故引入无偏离的统计参数平均相对误差  $AARE$  (Average Absolute Relative Error) 进一步论证本构方程所得理论值的有效性:

$$AARE = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left| \frac{\sigma_e^i - \bar{\sigma}_e}{\sigma_e^i} \right| \times 100\% \quad (14)$$

式中:  $\sigma_e^i$  为根据实验数据  $i$  得到的真应力,  $i = 1, \dots, k$ ;  $k$  为随机选取的数据的个数;  $\bar{\sigma}_e$  为经本构方程计算得到的真应力的平均值。

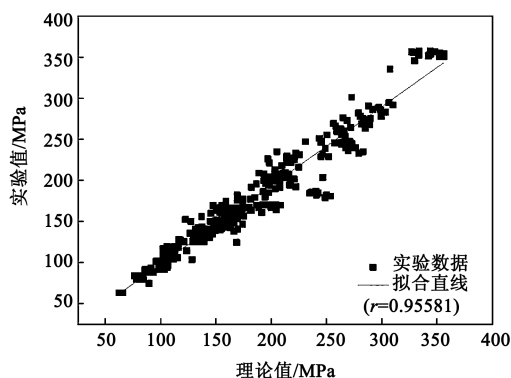


图 7 实验数据与理论数据的相关性

Fig. 7 Correlation between experimental data and theoretical data

八次多项式线性拟合后, 拟合直线与实验数据的相关性为 0.95581,  $AARE$  值为 7.235%, 因此, 可以认为修正后本构方程的误差在可以接受的范围内, 与实验基本符合, 能够为 Q460NH 钢在变形温度为 650~900  $^{\circ}\text{C}$ 、应变速率为 0.01~10  $\text{s}^{-1}$  范围内的热变形生产提供理论指导。

## 3 结论

(1) 在一定应变速率与同等变形量的条件下, Q460NH 高强耐候钢材料的真应力值随变形温度的变化呈负相关的趋势; 在一定变形温度与同等变形量的条件下, 真应力值随应变速率的变化也呈负相关的趋势。

(2) 在与真应力有关的参数中, 真应变发生变化会导致 Q460NH 钢的材料特性随之产生变化, 因此, 结合八阶多项式创建了描述真应变如何影响 Q460NH 钢材料特性的数学模型。

(3) 本构关系考虑实验误差的影响, 对变形温度、应变速率的影响进行了修正, 提高了预测模型的准确性。

(4) 通过分析实验数据和理论数据拟合后所得的结果, 相关系数  $r$  为 0.95581, 证明实验数据和本构计算所得理论值的相关性很强; 而平均相对误差  $AARE$  值仅为 7.23%, 可以证明理论计算值与实际情况的误差在允许的范围内。以这两者作为判断依据, 能够认为本文进行补偿修正后的 Q460NH 高强耐候钢的本构方程能够更好地描述 Q460NH 钢的变形行为。

## 参考文献:

- [1] 陈军. 工业建筑钢结构耐久性思考探究——以沿海电厂为例 [J]. 中国住宅设施, 2019, (5): 106-107.  
Chen J. Study on the durability of steel structure of industrial buildings—Taking coastal power plants as an example [J]. China Housing Facilities, 2019, (5): 106-107.
- [2] 周贵禄, 李文农, 郑建建, 等. 方形钢管的应用前景与生产技术 [J]. 钢管, 2004, 33 (1): 1-4.  
Zhou G L, Li W N, Zheng S J, et al. Application prospect and manufacturing technology of square steel tubes [J]. Steel Pipe, 2004, 33 (1): 1-4.
- [3] 郁玆, 陆志华. 建筑用冷弯大规格厚壁方形钢管的成型工艺与性能 [J]. 工程建设与设计, 2005, (1): 25-27.  
Yu H, Lu Z H. Forming process and properties of cold-formed large-size thick walled rectangular steel tubes for construction [J]. Construction & Design for Engineering, 2005, (1): 25-27.
- [4] 彭在美, 刘建伟. 钢结构用方形钢管的市场分析和应用前景 [J]. 钢管, 2005, 34 (6): 10-16.  
Peng Z M, Liu J W. Market survey and estimated application prospects of square steel tubes in steel structure-fabrication industry [J]. Steel Pipe, 2005, 34 (6): 10-16.
- [5] 戴宏胜, 龚曙光, 彭炎荣, 等. 宽板塑性弯曲应变增量中性层的分析 [J]. 塑性工程学报, 2010, 17 (3): 81-84.

- Dai H S, Gong S G, Peng Y R, et al. Study on the strain-increment neutral layer in wide sheet plastic bending [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2010, 17 (3): 81-84.
- [6] 于千. 耐候钢发展现状及展望 [J]. 钢铁研究学报, 2007, (11): 1-4.
- Yu Q. Review and prospect of weathering steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2007, (11): 1-4.
- [7] 晏培杰, 韩静涛, 马越峰. 高强度钢热辊弯成形技术及其发展 [A]. 第十四届中国科协年会第 8 分会场: 钢材深加工研讨会论文集 [C]. 石家庄: 2012.
- Yan P J, Han J T, Ma Y F. Hot roll forming technology of high strength steel and its development [A]. The 8th Session of the 14th Annual Meeting of China Association for Science and Technology [C]. Shijiazhuang: 2012.
- [8] 施刚, 王飞, 戴国欣. Q460D 高强度结构钢材循环加载试验研究 [J]. 土木工程学报, 2012, 45 (7): 48-55.
- Shi G, Wang F, Dai G X. Experimental study of high strength structural steel Q460D under cyclic loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45 (7): 48-55.
- [9] Wang W Y, Liu B, Li G Q. Experimental study on mechanical properties of Q460 high strength steel at elevated temperature [J]. Journal of Disaster Prevention & Mitigation Engineering, 2012, 372 (12): 23-26.
- [10] Wang W, Yan R, Xu L. Effect of tensile-strain rate on mechanical properties of high-strength Q460 steel at elevated temperatures [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32 (7): 04020188.
- [11] 赵广辉, 黄庆学, 周存龙, 等. 15CrMoR 钢热变形本构方程的研究 [J]. 热加工工艺, 2016, 45 (5): 1-6.
- Zhao G H, Huang Q X, Zhou C L, et al. Study on constitutive equation of hot deformation of 15CrMoR steel [J]. Hot Working Technology, 2016, 45 (5): 1-6.
- [12] 麻浩曦. 耐候钢板材热弯曲成形机理研究 [D]. 太原: 太原科技大学, 2020.
- Ma H X. Research on Hot Bending Forming Mechanism of Weathering Steel Sheet [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2020.
- [13] 彭雯雯. 基于累积塑性能的热变形开裂准则及应用研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2015.
- Peng W W. Thermal Deformation Cracking Criterion and Application Research Based on Cumulative Plastic Properties [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnic University, 2015.
- [14] 黄丹. FV520B 马氏体不锈钢热变形行为及热加工图 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
- Huang D. Hot Deformation Behavior and Hot Working Diagram of FV520B Martensitic Stainless Steel [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.
- [15] 万鹏, 王克鲁, 鲁世强, 等. Ti-2.7Cu 合金热变形行为及本构关系研究 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (1): 143-149.
- Wan P, Wang K L, Lu S Q, et al. Study on hot deformation behavior and constitutive equation of Ti-2.7Cu alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (1): 143-149.



### 欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告

1958年创刊。中国机械工业联合会主管，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合办。

全国锻压行业会刊，全国中文核心期刊。中文核心期刊要目总览（北京大学）、中国科学引文数据库（核心版，CSCD）、中国科技期刊引证报告（CJCR）、中国学术期刊文摘数据库（核心版，CSAD-C）、中国学术期刊文摘数据库（英文版）、中国学术期刊综合评价数据库、中国学术期刊（光盘版）、中国知网、万方数字化期刊群、RCCSE中国核心学术期刊、美国剑桥科学文摘（CSA）、美国化学文摘（CA）、日本科学技术振兴机构数据库（JST）、俄罗斯文摘杂志（AJ）。



### 主要栏目

综 述	技 术 交 流
锻 造	节 能 技 术
模 具	摩 擦 与 润 滑
标 准 化	计 算 机 应 用
管 材 成 形	装 备 与 成 套 技 术
板 料 成 形	加 热 与 热 处 理
特 种 成 形	材 料 与 成 形 性 能
测 试 技 术	理 论 与 实 验 研 究

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

金属塑性工程行业专业技术（月刊）期刊 国内外公开发行

地址：北京市海淀区学清路18号《锻压技术》编辑部 100083

电话：010-62920652 82415085

E-mail: fst@263.net (稿件咨询) fst\_linyutong@163.com (广告咨询)

发表文章请登录网站在线投稿 <http://www.fstjournal.net>

- ◆ 国内邮发代号：2-322
- ◆ 国外邮发代号：BM5549
- ◆ 国内定价：25元/册，300元/年
- ◆ 国内刊号：CN 11-1942/TG
- ◆ 国际刊号：ISSN 1000-3940
- ◆ 广告许可证：京海工商广登字20170021号 杂志网站 微信公众号

