

## Q355B 钢热变形行为及应变补偿型本构方程

侯 东<sup>1,2</sup>, 聂京凯<sup>1,2</sup>, 韩 钰<sup>1,2</sup>, 陈国宏<sup>3</sup>, 刘晓圣<sup>1,2</sup>, 姬 军<sup>1,2</sup>

(1. 国网智能电网研究院有限公司 先进输电技术全国重点实验室, 北京 102209;

2. 国网智能电网研究院有限公司 电工新材料研究所, 北京 102209;

3. 国网安徽省电力有限公司, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 在 Gleeble-3500 热模拟实验机上进行等温热拉伸实验, 研究了 Q355B 钢在变形温度为 500~1100 °C 和应变速率为 0.001~0.1 s<sup>-1</sup> 条件下的热变形行为及微观组织演变, 并建立了本构方程。结果表明, Q355B 钢的微观组织主要由铁素体和珠光体组成, 随着变形温度的升高, 珠光体体积分数增加, 且组织形貌逐步由低温带状演变为中温等轴状及高温魏氏形貌。Q355B 钢的流动行为敏感于应变速率和变形温度, 其流动应力随着变形温度的升高或应变速率的降低显著降低。此外, 流动应力曲线在高温 (1100 °C) 及低应变速率 (0.001 和 0.01 s<sup>-1</sup>) 时为动态再结晶型, 而在低温及高应变速率下则为动态回复型。考虑应变补偿的 Arrhenius 双曲正弦本构方程的预测精度较高, 可较好地拟合不同变形条件下 Q355B 钢的流动行为。各变形条件下的相关系数均在 91% 以上, 相对平均误差均不超过 13.4%。

**关键词:** Q355B 钢; 热变形; 微观组织; 应变补偿; 本构方程

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.03.030

**中图分类号:** TG142.1; TM201.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2024) 03-0240-11

## Thermal deformation behavior and strain-compensated constitutive equation of Q355B steel

Hou Dong<sup>1,2</sup>, Nie Jingkai<sup>1,2</sup>, Han Yu<sup>1,2</sup>, Chen Guohong<sup>3</sup>, Liu Xiaosheng<sup>1,2</sup>, Ji Jun<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology, State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China; 2. Department of Electrical Engineering New Materials, State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China; 3. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230009, China)

**Abstract:** The isothermal thermal tensile test was conducted by Gleeble-3500 thermal simulation machine, and the thermal deformation behavior and microstructure evolution of Q355B steel at the deformation temperature of 500–1100 °C and the strain rate of 0.001–0.1 s<sup>-1</sup> were studied to establish the constitutive equation. The results show that the microstructure of Q355B steel is mainly composed of ferrite and pearlite. With the increasing of deformation temperature, the volume fraction of pearlite increases, and the microstructure morphology gradually evolves from low temperature band to medium temperature equiaxed and high temperature widmanstatten morphology. The flow behavior of Q355B steel is sensitive to strain rate and deformation temperature, and its flow stress decreases significantly with the increasing of deformation temperature or the decreasing of strain rate. In addition, the flow stress curve is dynamic recrystallization type at the high temperature of 1100 °C and the low strain rates of 0.001 and 0.01 s<sup>-1</sup>, while it is a dynamic recovery type at low temperature and high strain rate. The Arrhenius hyperbolic sine constitutive equation considering strain compensation has high prediction accuracy and can better fit the flow behavior of Q355B steel under different deformation strains. The correlation coefficients under different deformation conditions are all more than 91%, and the average absolute relative errors are all less than 13.4%.

**Key words:** Q355B steel; thermal deformation; microstructure; strain compensated; constitutive equation

我国能源禀赋特征决定了大规模“西电东送、北电南供”势在必行, 而特高压输电是我国高电

压、大容量、远距离电力输送与电网互联的重要手段<sup>[1]</sup>。Q355B 钢是一种低碳微合金高强度钢, 拥有强度高、韧性好、冷热复合加工稳定性好等优点, 在特高压换流站、变电站建设中被广泛应用<sup>[2]</sup>。火灾为影响电力设备可靠运行的安全隐患之一, 火灾形成的非均匀温度场会对其金属结构力学性能产生未知的影响, 过火后的服役可靠性难以评价<sup>[3]</sup>。因

收稿日期: 2023-12-23; 修订日期: 2024-03-15

基金项目: 国家电网公司总部科技项目 (5500-202158330A-0-0-00)

作者简介: 侯 东 (1990-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: hd61140161@163.com

此，探索火灾时电站安全设备的高温力学性能及组织演变规律，并建立描述材料高温流变行为的本构方程对于预测灾后设备的安全使用具有重大的理论指导价值。

目前，众多学者<sup>[4-11]</sup>对微合金高强钢的高温力学性能进行了研究，发现其高温变形行为十分复杂，变形过程中同时存在应变硬化和动态软化两个相反的过程。其中，工业纯铁和铁素体钢等高层错能金属因易发生位错攀移与交滑移，因此，动态回复（Dynamic Recovery，DRV）为其主要热变形机理<sup>[12]</sup>。而对于  $\gamma$ -Fe 和奥氏体钢等中低层错能金属的高温变形机理则主要以动态再结晶（Dynamic Recrystallization，DRX）为主，且再结晶过程伴随明显的新晶形核和长大阶段<sup>[13]</sup>。Hu Y 等<sup>[8]</sup>研究了 6%Si 高硅奥氏体钢在变形温度为 1000~1200 ℃、应变速率为 0.01~10 s<sup>-1</sup> 时的热变形行为和软化机理，发现 DRX 为其热变形软化机理。然而，由于变形温度的不同，DRX 机制也不尽相同，在 1150 ℃ 时不连续动态再结晶（Discontinuous Dynamic Recrystallization，DDRX）为其主要软化机制，而在 1100~1150 ℃ 时连续动态再结晶（Continuous Dynamic Rerystallization，CDRX）则为其主要软化机制。Xu S G 等<sup>[10]</sup>在 7Mo 超级奥氏体不锈钢的高温变形行为与动态软化机制研究时基于热加工图发现，1030~1200 ℃ 及 0.001~0.07 s<sup>-1</sup> 为其最佳变形工艺窗口；此外，随着变形温度的升高或应变速率的降低，材料动态软化机制逐渐由 DRV 演变为 CDRX 与 DDRX。目前，在亚共析钢热变形研究方面，张秀芝等<sup>[14]</sup>研究了在变形温度为 900~1200 ℃ 和应变速率为 0.005~0.5 s<sup>-1</sup> 时锻态 Q345 钢的热变形行为及 DRX 行为，根据不同变形条件下 Q345 钢的晶粒尺寸，建立了动态再结晶分数模型、晶粒尺寸模型及力学模型等。张健等<sup>[15]</sup>通过热加工模拟实验探索了 Q345 钢的高温变形特点，基于热加工图发现，Q345 钢在变形温度为 975~1100 ℃ 和应变速率为 1~10 s<sup>-1</sup> 条件下易发生 DRX，并具备良好的热加工性能。综上，金属材料的高温变形过程受变形温度、应变速率、变形量和材料自身性质的共同影响。

在本构方程构建方面，采用经验公式拟合的唯象型本构模型，拟合参数少、简单易用，被广泛用于无取向电工钢<sup>[16-17]</sup>、EA4T 钢<sup>[18]</sup>、ZL114A 铝合金<sup>[19]</sup>、Ti6Al4V 钛合金<sup>[20]</sup>和 TC20 钛合金<sup>[21]</sup>等材料的高温变形本构模型的建立。其中，Johnson-Cook 和 Arrhenius 模型为最常见的唯象型本构模型。杨东

等<sup>[20]</sup>考虑变形温度与应变速率耦合作用及绝热温升的影响，建立了可准确预测 Ti6Al4V 钛合金动力学行为的修正 Johnson-Cook 模型。曹建国等<sup>[17]</sup>通过改进的 Arrhenius 型框架，建立了描述无取向电工钢热轧制过程加工硬化与软化机制的统一本构关系。毛欢等<sup>[21]</sup>采用基于应变补偿的 Arrhenius 模型探究了 TC20 钛合金的热压缩行为。

然而，目前针对 Q355B 钢板的高温变形行为及本构模型的研究相对较少，为此，本文对轧态 Q355B 钢板在变形温度为 500~1100 ℃、应变速率为 0.001~0.1 s<sup>-1</sup> 条件下进行热模拟拉伸实验，分析不同变形温度及应变速率对 Q355B 钢的流动应力、峰值应力、伸长率、加工硬性行为、应变速率敏感性指数等力学行为及微观组织演变的影响，建立考虑应变补偿的 Arrhenius 本构模型，为火灾后变电站/换流站 Q355B 钢的使用提供依据。

## 1 实验材料及方法

本实验所用材料为轧制态 Q355B 钢板，其主要化学成分如表 1 所示。利用线切割沿板料轧制方向制备拉伸试样，其尺寸如图 1 所示，其中标距段长度为 40 mm、宽度为 6 mm、厚度为 4 mm。采用 Gleeble-1500 热模拟实验机进行高温拉伸实验，以 10 ℃·s<sup>-1</sup> 的升温速度将试样分别加热至 500、650、800、950 和 1100 ℃，初始拉伸应变速率分别设置为 0.001、0.01 和 0.1 s<sup>-1</sup>，实验结束后立即进行淬火处理以保留试样的高温变形组织。在距离试样断口 10~15 mm 处切取金相试样，以拉伸方向-横向为观察面进行微观组织观察。采用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液对抛光后的试样进行约 10~15 s 的腐蚀，并利用日本 OLYMPUS GX51 型光学显微镜观察其组织演变特征。

表 1 轧制态 Q355B 钢的化学成分（%，质量分数）

Table 1 Chemical compositions of rolled Q355B steel  
(%, mass fraction)

C	Si	Mn	P	Cr	S	Ni	Ti	V	Fe
0.16	≤0.17	≤0.33	≤0.02	0.03	≤0.004	0.01	0.043	0.003	余量

## 2 实验结果及分析

### 2.1 不同变形参数下 Q355B 钢的微观组织演变

图 2 为 Q355B 钢在应变速率为 0.01 s<sup>-1</sup> 及不同

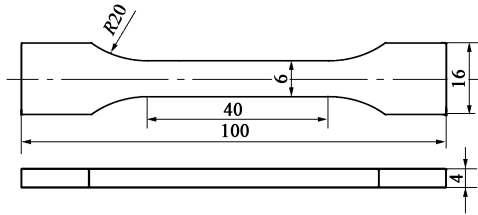


图 1 板状拉伸试样尺寸

Fig. 1 Sizes of plate tensile specimen

变形温度条件下的微观组织。Q355B 钢原始组织主要包括铁素体和珠光体。在低温 500 和 650 ℃ 变形后，Q355B 钢的微观组织主要由铁素体（浅色）和珠光体（深色）相间分布构成的带状组织，且珠

光体沿轧制方向呈层片状分布。随着变形温度升高至 800 ℃，铁素体和珠光体形态、晶粒尺寸及相体积分数均发生显著改变，带状组织消失，取而代之的是均匀分布的铁素体和珠光体等轴状混晶组织。带状组织的退化是常规球化退火与亚球化退火两种机制共同作用的结果<sup>[22-23]</sup>。此外，随着变形温度的升高，珠光体晶粒尺寸增大，相体积分数增加。当变形温度升高至 950 和 1100 ℃ 时，试样变形后组织为珠光体、块状铁素体和魏氏组织，其中魏氏组织中的铁素体形态呈现为片状或羽毛状，且在奥氏体晶界处向晶粒内部生长。这是因为：在 900 ℃ 以上变形时 Q355B 钢的原始组织完全转化为奥氏体，奥

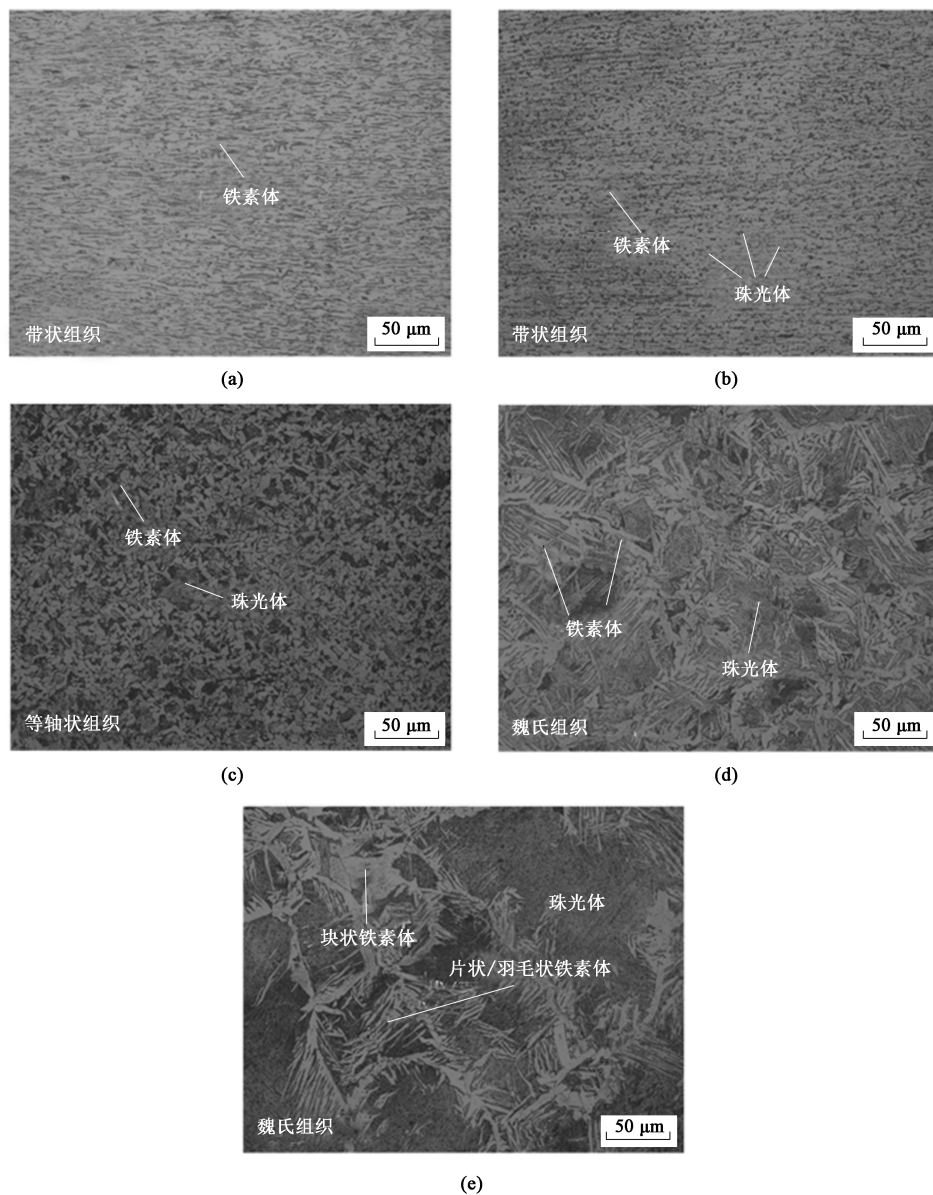


图 2 应变速率为  $0.01 \text{ s}^{-1}$  时 Q355B 钢在不同变形温度下的微观组织  
(a) 500 ℃ (b) 650 ℃ (c) 800 ℃ (d) 950 ℃ (e) 1100 ℃

Fig. 2 Microstructures of Q355B steel at different deformation temperatures with strain rate of  $0.01 \text{ s}^{-1}$

氏体晶粒随着变形温度的升高或变形时间的增加充分长大,粗大的奥氏体晶粒在冷却时转变为与其母相位向关系为  $(110)\alpha// (111)\gamma$  和  $[111]\alpha// [110]\gamma$  的魏氏组织。

## 2.2 不同变形参数下 Q355B 钢的流变行为分析

材料发生塑性变形后体积不变,因此,可以采用式(1)和式(2)将载荷-位移曲线转换为真应力-真应变曲线。

$$\sigma = F(1 + \varepsilon)/s_0 \quad (1)$$

$$\varepsilon = \ln(l/l_0) \quad (2)$$

式中:  $\sigma$  为真应力;  $\varepsilon$  为真应变;  $F$  为拉伸载荷;  $s_0$  为试样初始截面面积;  $l_0$  和  $l$  分别为试样初始及断后标距长度。

不同变形条件下 Q355B 钢的高温拉伸真应力-真应变曲线如图 3 所示。从图 3 可知, Q355B 钢在高温变形时经历弹性变形、应变硬化或稳态流动和

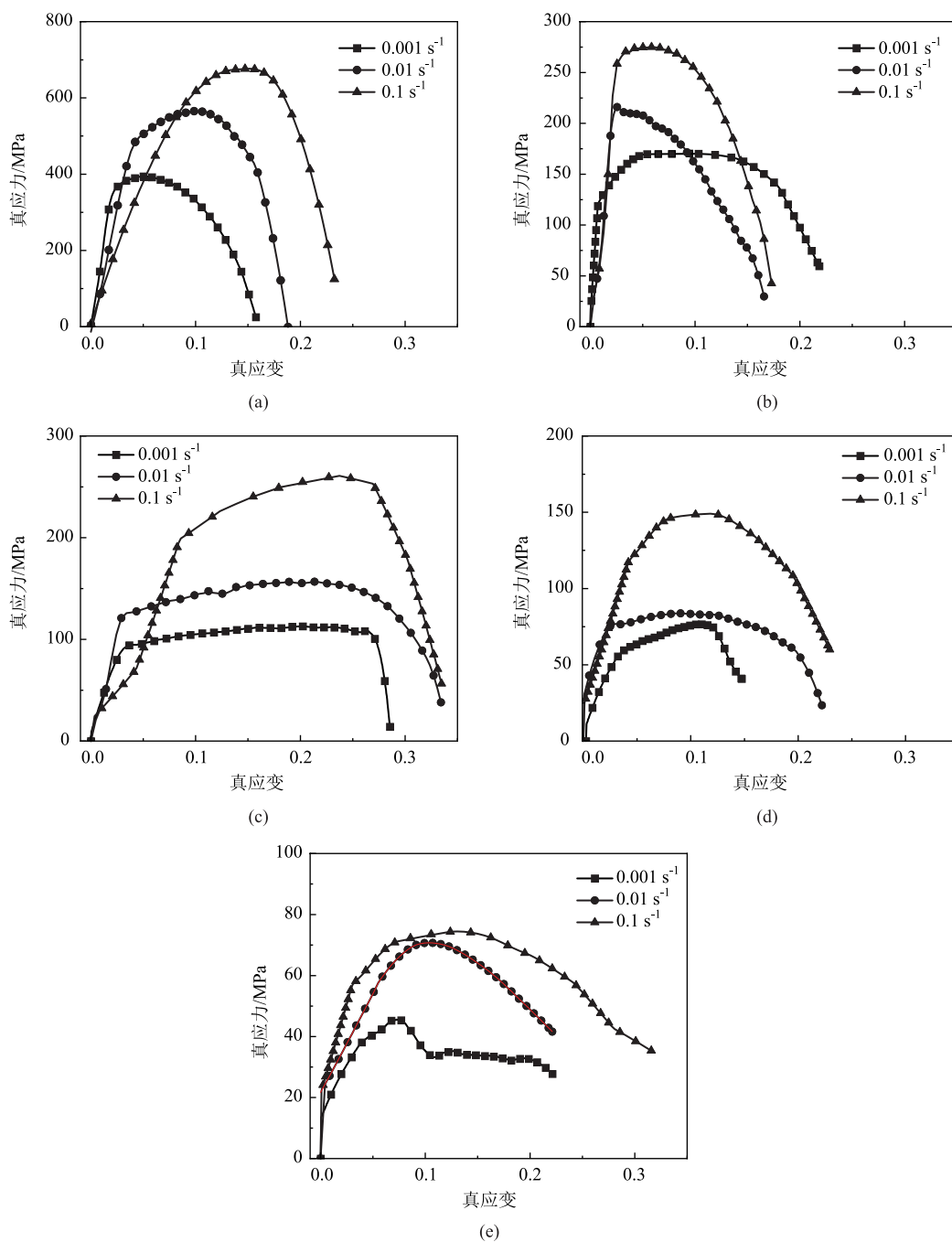


图 3 不同变形温度及应变速率下 Q355B 钢的真应力-真应变曲线

(a) 500 °C (b) 650 °C (c) 800 °C (d) 950 °C (e) 1100 °C

Fig. 3 True stress-true strain curves of Q355B steel at different deformation temperatures and strain rates



流动软化等多个阶段。根据金属塑性变形的基本理论,材料的高温塑性流动行为是加工硬化和流动软化之间博弈的综合结果。在弹性变形阶段,流动应力随着应变的增加迅速增大,相应的真应力-真应变曲线呈线性变化,这与变形引起的位错增殖和塞积有关。当 Q355B 钢达到屈服后,流变曲线斜率迅速减小,材料出现不同程度的应变硬化,流动应力逐渐达到峰值状态。在同一温度下,峰值应力随着应变速率的增加而增大,这与高应变速率下位错增殖速率增加导致位错的塞积、缠结有关。在  $800\text{ }^{\circ}\text{C}-0.001\text{ s}^{-1}$ 、 $800\text{ }^{\circ}\text{C}-0.01\text{ s}^{-1}$  和  $950\text{ }^{\circ}\text{C}-0.01\text{ s}^{-1}$  变形条件下,真应力-真应变曲线呈现出较长周期的稳态流动行为和明显的 DRV 特征,即由位错增殖与晶粒尺寸增加导致的加工硬化作用和以交滑移或攀移方式湮灭位错导致的流动软化作用达到动态平衡状态。而在  $800\text{ }^{\circ}\text{C}-0.1\text{ s}^{-1}$ 、 $950\text{ }^{\circ}\text{C}-0.001\text{ s}^{-1}$  变形条件下,材料表现出明显的应变硬化特征,这与动态回复引起的流动软化作用不足以有效抵消位错增殖引起的加工硬化作用有关。金属学基本理论表明动态回复过程与材料层错能密切相关,而 Q355B 钢属于扩散位错很窄的高层错能金属,变形时位错极易通过交滑移或攀移方式从位错网中解脱导致异号位错相互抵消,位错密度及储能降低导致材料不易发生

DRV<sup>[22]</sup>。因此, Q355B 钢在热变形时的软化机制主要为 DRV。在  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}-0.01\text{ s}^{-1}$  和  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}-0.001\text{ s}^{-1}$  变形条件下流动应力曲线表现为 DRV 特征,这是与此温度下 Q355B 钢为单相奥氏体有关。此外,  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}-0.1\text{ s}^{-1}$  变形条件下的流动应力曲线表明,高应变速率可推迟 DRV 的发生。因此, Q355B 钢的流动应力曲线仅在高温及低应变速率下表现出 DRV 特征。

图 4 分别给出了不同变形温度和初始应变速率下 Q355B 钢的峰值应力和断裂伸长率的柱状分布图。显然,峰值应力与应变速率呈正相关,与变形温度呈负相关。如图 4a 所示,当应变速率相同时,随着变形温度的升高,峰值应力快速降低,其主要原因为:高温下材料内部的原子热振动程度变大,位错滑移阻力减小;此外,由 DRV 引起的软化效应也可降低材料流动应力。在同一温度下,位错运动速率随着应变速率的增大而增加,因此,需要更大的作用力以驱动材料变形,即流动应力提高。Q355B 钢的断裂伸长率与变形温度、应变速率的变化规律并非简单的线性相关,如图 4b 所示。在低温 500 和  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,材料断裂伸长率相对较低,最大断裂伸长率约为 26.2%。在高温  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, Q355B 钢的断裂伸长率相对较高,其最大值约为 40%,这可能与此温度下适宜的晶粒尺寸与位错滑移阻力有关。

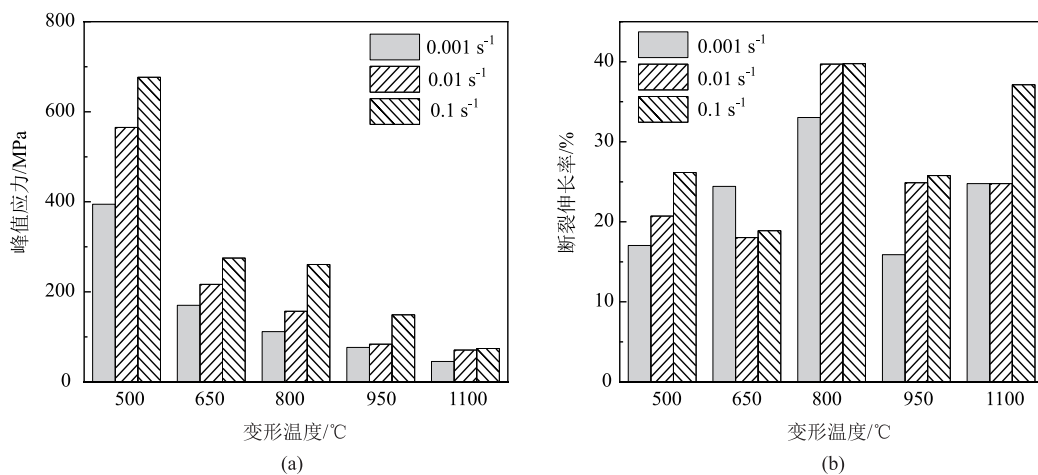


图 4 Q355B 钢的峰值应力 (a) 和断裂伸长率 (b) 柱状图  
Fig. 4 Histograms of peak stress (a) and fracture elongation (b) for Q355B steel

### 2.3 Q355B 钢的应变硬化行为

Q355B 钢在高温塑性变形过程中的瞬时应变硬化现象可用应变硬化率  $\theta$  表示,其计算公式为<sup>[24-25]</sup>:

$$\theta = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (3)$$

正负  $\theta$  值分别表示应变硬化或流动软化行为。

在  $500\text{ }^{\circ}\text{C}-0.001\text{ s}^{-1}$  时, Q355B 钢的真应力-真

应变曲线及相应应变硬化率曲线如图 5 所示。显然,应变硬化率曲线呈现出 3 个明显不同的阶段,而各阶段的  $\theta$  值均随着应变的增加呈下降趋势。其中,阶段 I 和阶段 II 的  $\theta$  值为正值,即应变硬化速率高于流动软化速率,材料表现出应变硬化特征。此外,阶段 I 的初始  $\theta$  值较高,这与位错的大量快速增殖有关。然而,由于动态回复时位错抵消或重排导致

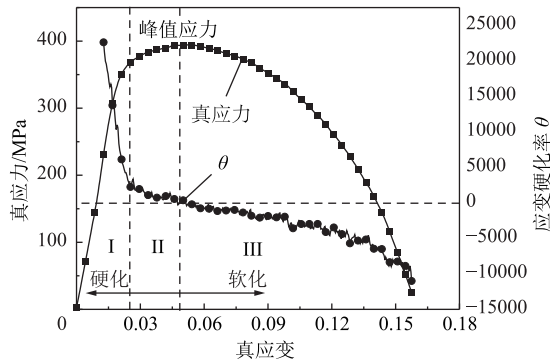


图5 Q355B 钢在 500 °C-0.001 s<sup>-1</sup> 时的真应力-真应变曲线及应变硬化率曲线

Fig. 5 True stress-true strain curve and strain hardening rate curve of Q355B steel at 500 °C-0.001 s<sup>-1</sup>

阶段 I 和 II 的  $\theta$  值随着应变的增加逐渐降低至零。阶段 III 时的  $\theta$  值小于 0, 材料表现为流动软化现象, 这与位错密度降低以及内部损伤导致承载力减小有关。

综合图 3~图 5 可知, Q355B 钢在火灾温度不超过 800 °C 时, 特别是在低温 500 °C 及高应变速率和小应变下具有较好的抵抗高温塑性变形能力。

## 2.4 构建 Q355B 钢高温变形本构方程

Q355B 钢材料在高温变形时受热激活作用控制, 其变形行为可用 Arrhenius 方程来描述。不同应力水平下 Q355B 钢的高温流动应力本构模型可表示为<sup>[26-29]</sup>:

$$\dot{\varepsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \quad \text{低应力状态} (\alpha\sigma < 0.8) \quad (4)$$

$$\dot{\varepsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \quad \text{高应力状态} (\alpha\sigma > 1.2) \quad (5)$$

$$\dot{\varepsilon} = A_3 \sinh(\alpha\sigma)^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \quad \text{所有 } \sigma \quad (6)$$

式中:  $\dot{\varepsilon}$  为应变速率, s<sup>-1</sup>;  $Q$  为变形激活能, (kJ · mol<sup>-1</sup>);  $T$  为绝对温度, K;  $R$  为气体常数, 为 8.314 J · (mol · K)<sup>-1</sup>;  $n_1$  和  $n$  为应力指数;  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  为材料常数, s<sup>-1</sup>;  $\alpha$  为应力水平参数, MPa<sup>-1</sup>;  $\beta$  为与温度不相关的应变参数, MPa<sup>-1</sup>。  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $n_1$  之间满足  $\alpha = \beta/n_1$ 。

特别地, Zener C 和 Hollomon J H<sup>[30]</sup> 表明材料的流动行为依赖于变形温度和应变速率, 进而提出表征变形温度和应变速率对高温变形过程影响效果的 Zener-Hollomon 参数 ( $Z$  参数), 其表达式为:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp(Q/RT) = A_3 [\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (7)$$

对式 (4) ~ 式 (6) 两边同时取自然对数得到式 (8) ~ 式 (10)。

低应力状态下:

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_1 + n_1 \ln \sigma - \frac{Q}{RT} \quad (8)$$

高应力状态下:

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_2 + \beta \sigma - \frac{Q}{RT} \quad (9)$$

所有应力状态下:

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_3 + n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] - \frac{Q}{RT} \quad (10)$$

由式 (8) 和式 (9) 可看出, 当变形温度固定时,  $\ln \dot{\varepsilon}$  与  $\ln \sigma$ 、 $\ln \dot{\varepsilon}$  与  $\sigma$  分别呈线性关系, 即  $n_1 = \partial \ln \dot{\varepsilon} / \partial \ln \sigma|_T$ ,  $\beta = \partial \ln \dot{\varepsilon} / \partial \sigma|_T$ , 如图 6a 和图 6b 所示。采用线性回归拟合方法分别求得在应变为 0.1 时,  $n_1 = 6.94$ ,  $\beta = 0.0592$  MPa<sup>-1</sup>, 进而求得  $\alpha = 0.008533$  MPa<sup>-1</sup>。由式 (10) 可得,  $n = \{\partial \ln \dot{\varepsilon} / \partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)]\}_T$ , 根据图 6c 中  $\ln \dot{\varepsilon}$  与  $\ln [\sinh(\alpha\sigma)]$  之间的线性关系, 可求得  $n = 3.6716$ 。在一定应变速率下, 式 (10) 对  $1/T$  求导, 可得  $Q/nR = [\partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)] / \partial (1/T)]$ , 并由图 6d 中  $\ln [\sinh(\alpha\sigma)]$  与  $1000/T$  之间的线性关系求解得到变形激活能  $Q = 255.788$  kJ · mol<sup>-1</sup>。对式 (7) 取对数, 可得  $\ln Z = \ln \dot{\varepsilon} + Q/RT = \ln A_3 + n \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ , 由图 6e 中  $\ln Z$  与  $\ln [\sinh(\alpha\sigma)]$  之间的线性关系曲线知其截距为  $\ln A_3$ , 即  $\ln A_3 = 32.8127$ ,  $A_3 = 1.78 \times 10^{14}$  s<sup>-1</sup>。

将以上所求参数代入式 (6), 可得应变为 0.1 时, Q355B 钢的热变形本构模型为:

$$\dot{\varepsilon} = 1.78 \times 10^{14} [\sinh(0.008533\sigma)]^{3.6716} \times \exp(-255.788/RT) \quad (11)$$

## 2.5 应变补偿型本构方程

由真应力-真应变曲线可知, 除变形温度和应变速率外, 应变对 Q355B 钢的流动应力具有显著影响, 然而 Arrhenius 模型中并未引入应变这一参量。因此, 为使所建的本构模型具有更高的预测精度, 考虑应变补偿。类似地, 采用上述方法分别获得应变为 0.05~0.15 之间的  $n_1$ 、 $\beta$ 、 $\alpha$ 、 $n$ 、 $Q$  和  $\ln A_3$  等模型参数值。采用多项式拟合方法描述应变为 0.05、0.08、0.10、0.12 和 0.15 下的  $\alpha$ 、 $n$ 、 $Q$  和  $\ln A_3$  值与应变之间的关系, 经多次拟合发现应变的三次多项式与各参数之间具有良好的相关性, 且决定系数  $R^2$  均在 0.95 以上, 如图 7 所示。因此, 本文研究中各参数与应变之间的相应关系表达式为:

$$\mathbf{M}_\varepsilon \begin{pmatrix} \varepsilon^3 \\ \varepsilon^2 \\ \varepsilon \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha \\ n \\ Q \\ \ln A_3 \end{pmatrix} \quad (12)$$

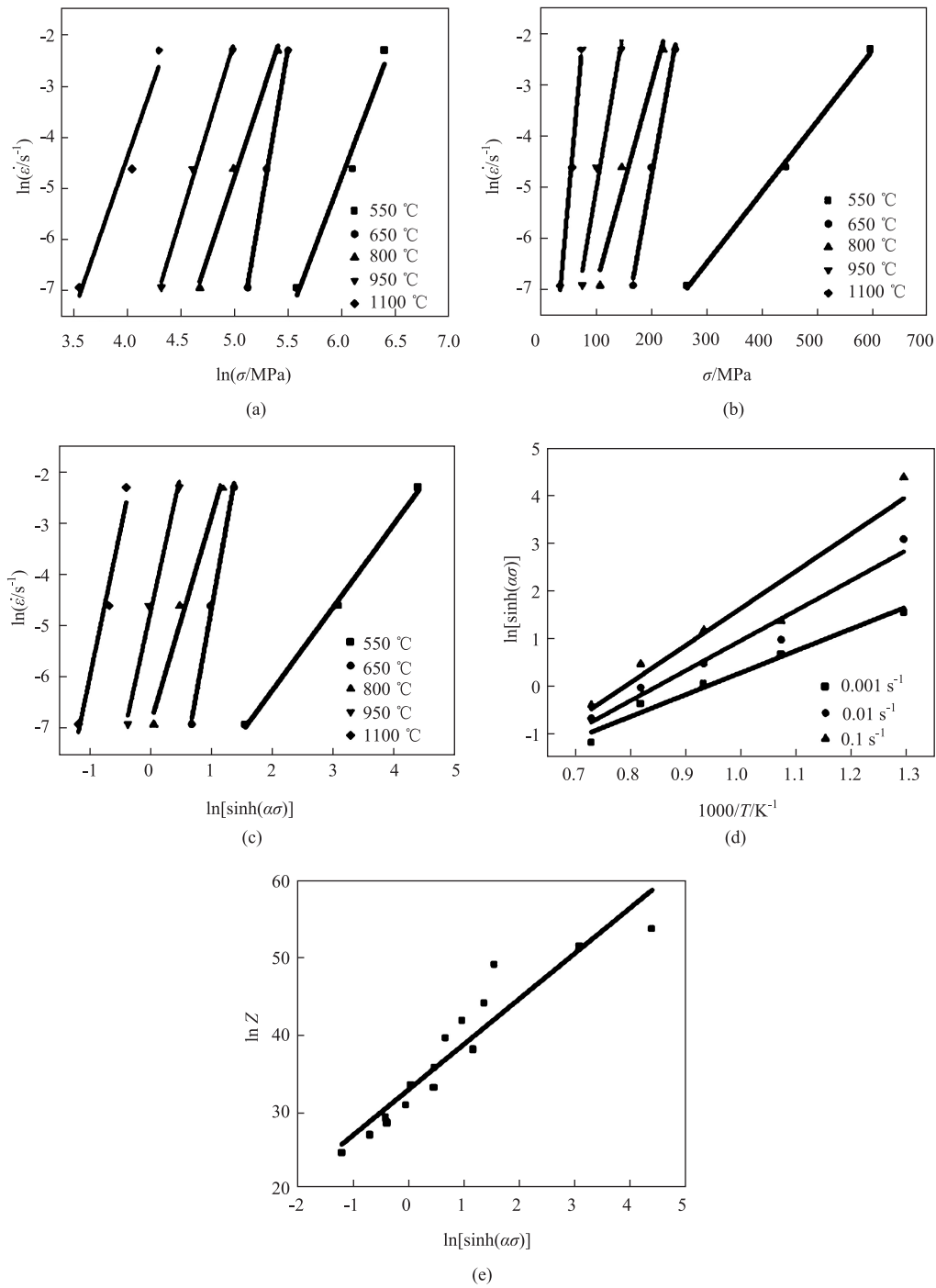


图6 Q355B 钢在应变为 0.1 时的线性拟合曲线

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

Fig. 6 Linear fitting curves of Q355B steel at strain of 0.1

式中:  $M_\epsilon$  为与应变无关的应变系数矩阵, 它可用于描述应变对材料参数的影响。经拟合获得  $M_\epsilon$  为:

$$M_\epsilon = \begin{pmatrix} 5.32619 & -1.89115 & 0.1459 & 0.0052 \\ 12615.58 & -3508.923 & 255.6967 & 1.13139 \\ 1025578.6 & -302960.7 & 25606.52 & 290.78 \\ 87390.167 & -26083.93 & 2159.9 & 17.61 \end{pmatrix} \quad (13)$$

结合式 (6)、式 (12) 和式 (13), 建立考虑应变补偿的 Q355B 钢流动行为的新本构方程如下:

$$\sigma = \frac{1}{\alpha(\epsilon)} \operatorname{arsinh} \left\{ \exp \left[ \frac{1}{n(\epsilon)} (\ln \dot{\epsilon} - \ln A_3(\epsilon) + \frac{Q(\epsilon)}{RT}) \right] \right\} \quad (14)$$

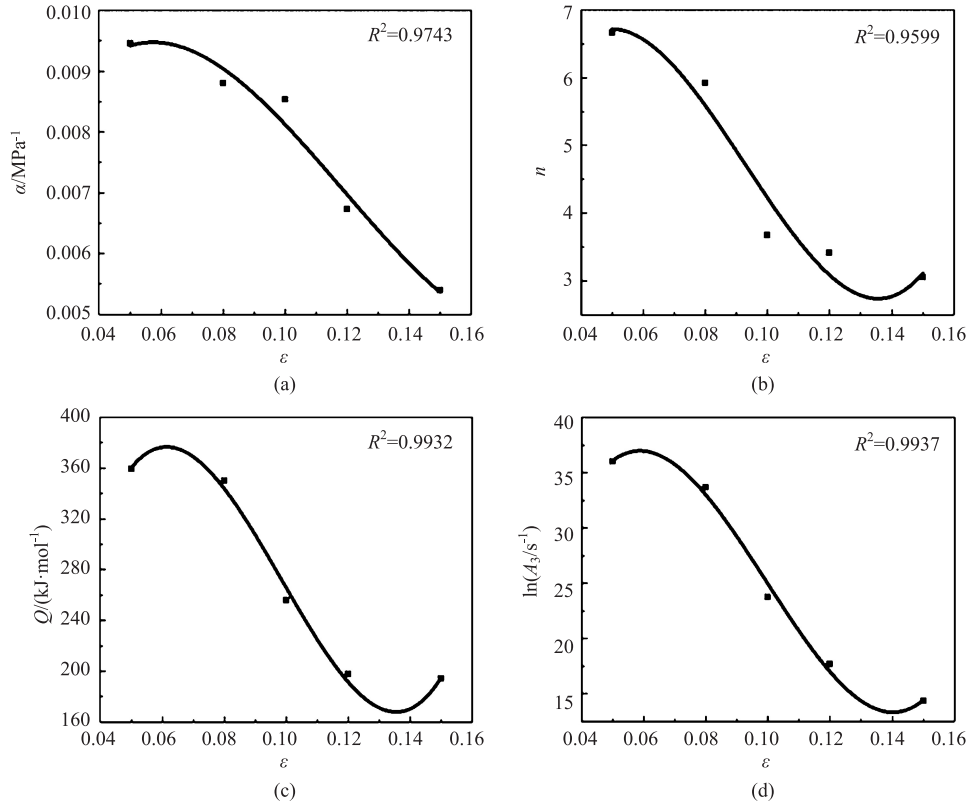


图7 各参数与应变的关系拟合  
(a)  $\alpha$  (b)  $n$  (c)  $Q$  (d)  $\ln A_3$

Fig. 7 Relation fitting of each parameter and strain

## 2.6 本构方程预测精度分析

图8给出了预测值和实验值的对比结果,在变形温度为500~1100℃和应变速率为0.001~0.1 s<sup>-1</sup>条件下,预测值由本构方程(式(14))获得。结果表明,本研究所建立的考虑应变补偿的本构模型可较好地预测Q355B钢的流变行为,特别是在较高温度和较大应变速率条件下。

采用相关系数 $R_{ij}$ 和平均相对误差 $AARE$ 等指标评估本文所建立的应变补偿型本构方程的预测精度。其中, $R_{ij}$ 用于评估预测值和实验值之间的相关关系,其值越趋近1本构方程预测精度越高; $AARE$ 用来衡量预测值与实验值之间误差,其值越小表明本构方程预测精度越好。 $R_{ij}$ 和 $AARE$ 的计算公式为:

$$\left\{ \begin{aligned} R_{ij} &= \frac{\sum_{k=1}^N (E_{ijk} - \bar{E})(P_{ijk} - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{k=1}^N (E_{ijk} - \bar{E})^2} \sqrt{\sum_{k=1}^N (P_{ijk} - \bar{P})^2}} \times 100\% \\ AARE &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left| \frac{E_{ijk} - P_{ijk}}{E_{ijk}} \right| \times 100\% \end{aligned} \right. \quad (15)$$

$i \in [1, 5], j \in [1, 3]$

式中: $N$ 为单条应力-应变曲线的数据点个数; $i$ 、 $j$ 和 $k$ 分别为不同的变形温度水平、应变速率水平和应变点; $E_{ijk}$ 和 $P_{ijk}$ 分别表示温度水平 $i$ 和应变速率水平 $j$ 条件下,应变点 $k$ 时流动应力的实验值和计算值; $\bar{E}$ 和 $\bar{P}$ 分别为 $E_{ijk}$ 和 $P_{ijk}$ 的平均值。

不同变形温度和应变速率下的 $R_{ij}$ 和 $AARE$ 变化曲线分别如图9a和图9b所示。可见, $R_{ij}$ 均在91.13%~99.95%之间,即本构方程的预测值与实验数据间相关性较强。各变形条件下的平均相对误差 $AARE$ 主要在5.9%~13.4%之间,最大平均相对误差不超过15%。因此,所建立的考虑应变补偿的本构方程具有相对较高的预测效果,可用于描述Q355B钢在热变形时的流动行为。

## 3 结论

(1) Q355B钢的流动行为敏感于变形温度和应变速率,流动应力随着变形温度的升高或应变速率的降低而减小。真应力-真应变曲线在较低的变形温度及较高的应变速率下呈动态回复特征,反之则表现为动态再结晶特征。



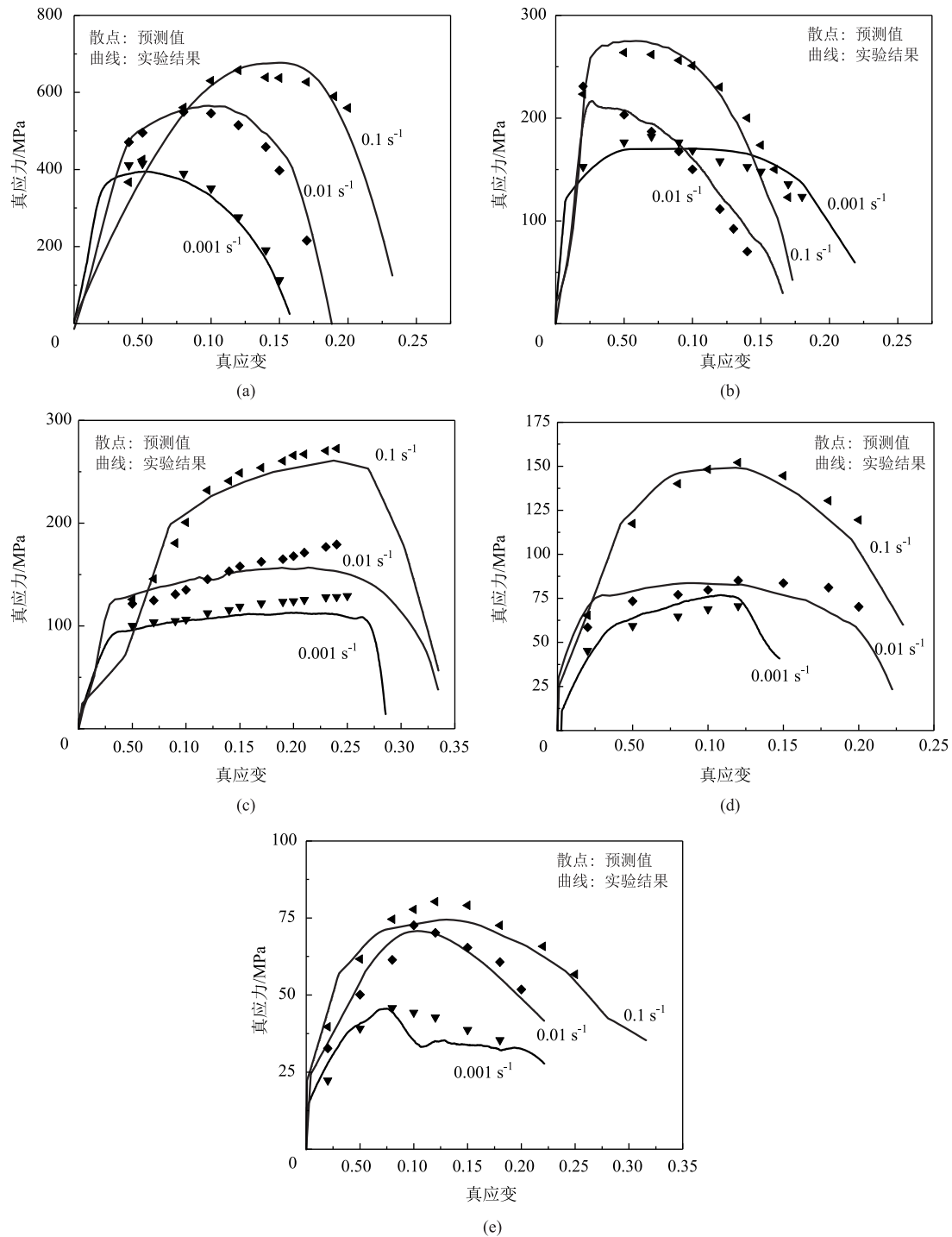


图 8 不同变形温度下预测值与实验结果对比

(a) 500 °C (b) 650 °C (c) 800 °C (d) 950 °C (e) 1100 °C

Fig. 8 Comparison between predicted values and experimental results at different deformation temperatures

(2) 变形温度对 Q355B 钢的微观组织具有决定性影响。在变形温度不超过 800 °C 时, 材料组织主要为铁素体和珠光体混晶组织, 且组织形貌及珠光体体积分数随着变形温度的升高显著变化。在高温 950 °C 以上变形后, 试样组织为珠光体与块状或羽毛状铁素体构成的魏氏组织。

(3) 建立了 Q355B 钢在变形温度为 500 ~ 1100 °C 和应变速率为 0.001 ~ 0.1 s<sup>-1</sup> 条件下考虑应变补偿的本构方程, 流动应力预测值与实验值的相关系数在 91.13% ~ 99.95% 之间, 平均相对误差在 5.9% ~ 13.4% 之间, 说明建立的应变补偿型本构方程具有较高的预测精度。

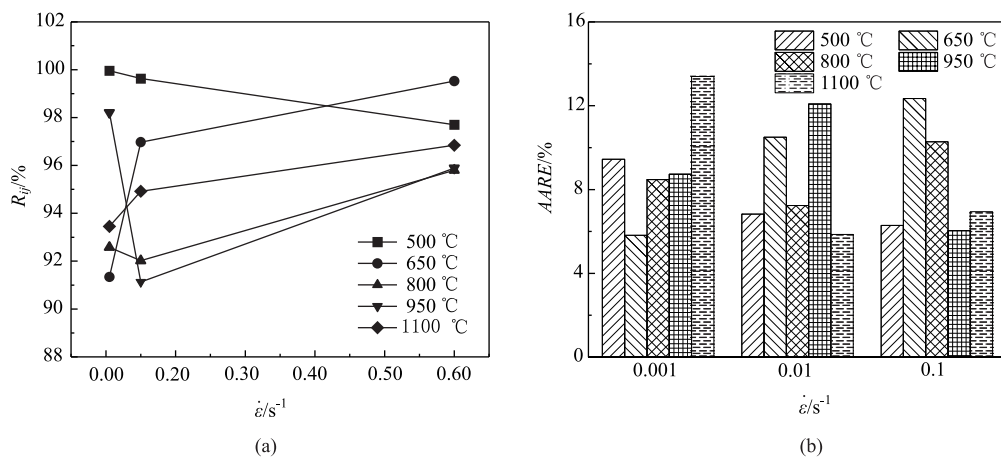


图9 考虑应变补偿的本构方程的预测误差分析

(a)  $R_y$  (b) AARE

Fig. 9 Prediction errors analysis for constitutive equation considering strain compensation

## 参考文献:

- [1] 马为民, 蒲莹, 宫勋. 适应高比例新能源电源外送的特高压直流控制器 [J]. 电网技术, 2023, 47 (3): 1262-1268.  
Ma W M, Pu Y, Gong X. UHVDC current controller for high proportional new energy transmission [J]. Power System Technology, 2023, 47 (3): 1262-1268.
- [2] 王元清, 廖小伟, 张子富, 等. 输电铁塔钢材的低温力学和冲击韧性试验 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47 (12): 70-74.  
Wang Y Q, Liao X W, Zhang Z F, et al. Experimental study on mechanical properties and impact toughness of steel for transmission line towers at low temperatures [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47 (12): 70-74.
- [3] 张佳庆, 黄勇, 周亦夫, 等. 水喷雾作用下特高压换流变压器火灾上部空间温度研究 [J]. 高压电器, 2023, 59 (10): 140-145.  
Zhang J Q, Huang Y, Zhou Y F, et al. Study on temperature of upper space of UHVDC converter transformer fires under action of sprinklers [J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59 (10): 140-145.
- [4] 苟春梅, 董静, 崔丹丹. 34CrNiMo6 钢的高温流变行为及热加工图 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (2): 233-240.  
Gou C M, Dong J, Cui D D. High temperature rheological behavior and thermal processing diagram for 34CrNiMo6 steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (2): 233-240.
- [5] Zhang K, Zhang T H, Zhang M Y, et al. Hot deformation behavior, dynamic recrystallization mechanism and processing maps of Ti-V microalloyed high strength steel [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25: 4201-4215.
- [6] Zhao T, Rong S W, Hao X H, et al. Effect of Nb-V microalloying on hot deformation characteristics and microstructures of Fe-Mn-Al-C austenitic steel [J]. Materials Characterization, 2022, 183: 111595.
- [7] Zhou P W, Song Y R, Jiang H W, et al. Hot deformation behavior and processing maps of BG801 bearing steel [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 18: 3725-3738.
- [8] Hu Y, Wang L H, Ouyang M H, et al. Hot deformation behaviors and dynamic softening mechanism of 6%Si high-silicon austenitic stainless steel [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26: 4263-4281.
- [9] Moon J, Park S J, Lee C H, et al. Influence of microstructure evolution on hot ductility behavior of austenitic Fe-Mn-Al-C light-weight steels during hot tensile deformation [J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 868: 144786.
- [10] Xu S G, He J S, Zhang R Z, et al. Hot deformation behaviors and dynamic softening mechanisms of 7Mo super-austenitic stainless steel with high stacking fault energy [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 23: 1738-1752.
- [11] Wang Y Q, Shen Y F, Jia N, et al. Dynamic recrystallization and constitutive equation of 15Cr-10Mn-Ni-N steel under hot deformation [J]. Materials Today Communications, 2023, 35: 105648.
- [12] 高志玉. 特厚板用 HSLA 钢的热变形行为与组织演变研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2016.  
Gao Z Y. Study on Hot Deformation Behavior and Microstructure Evolution of HSLA Ultra-heavy Plate Steel [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2016.
- [13] Montheillet F, Lurdos O, Damamme G. A grain scale approach for modeling steady-state discontinuous dynamic recrystallization [J]. Acta Materialia, 2009, 57 (5): 1602-1612.
- [14] 张秀芝, 杨仁杰, 李佳, 等. 大型风电法兰用 Q345E 钢动态再结晶行为研究 [J]. 大型铸锻件, 2016, (1): 13-17.  
Zhang X Z, Yang R J, Li J, et al. Research on dynamic recrystallization behavior of Q345E steel for heavy wind power flange [J]. Heavy Castings and Forgings, 2016, (1): 13-17.
- [15] 张健, 赵广辉, 王顺, 等. Q345 钢的热加工性研究 [J]. 重型机械, 2020, (5): 70-74.  
Zhang J, Zhao G H, Wang S, et al. Study on hot workability of Q345 steel [J]. Heavy Machinery, 2020, (5): 70-74.
- [16] 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.

- [17] 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, 102.
- 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, 102.
- [18] 白杰, 霍元明, 何涛, 等. 基于 GA-Arrhenius 本构模型的 EA4T 钢高温变形行为 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (11): 246–253.
- Bai J, Huo Y M, He T, et al. High-temperature deformation behavior for EA4T steel based on GA-Arrhenius constitutive model [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (11): 246–253.
- [19] 谭毅, 杨书仪, 孙要兵, 等. ZL114A 铝合金本构关系与失效准则参数的确定 [J]. 爆炸与冲击, 2024, 44 (1): 013104.
- Tan Y, Yang S Y, Sun Y B, et al. Determination of constitutive relation and fracture criterion parameters for ZL114A aluminum alloy [J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44 (1): 013104.
- [20] 杨东, 姜紫薇, 郑志军. 高温高应变率下钛合金 Ti6Al4V 的动力学行为及本构关系 [J]. 高压物理学报, 2024, 38 (1): 77–87.
- Yang D, Jiang Z W, Zheng Z J. Dynamic behavior and constitutive relationship of titanium alloy Ti6Al4V under high temperature and high strain rate [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2024, 38 (1): 77–87.
- [21] 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 alloy based on strain-compensated Arrhenius model [J]. Foundry Technology, 2018, 39 (9): 1939–1942, 1947.
- [22] 王蕾, 白冰, 王立军, 等. Q345R 钢的热变形特性及组织演化规律研究 [J]. 热加工工艺, 2013, 42 (1): 8–11.
- Wang L, Bai B, Wang L J, et al. Investigation on hot deformation behaviors and microstructure characteristics for Q345R steel [J]. Hot Working Technology, 2013, 42 (1): 8–11.
- [23] Hui W J, Yu T R, Su S H, et al. Behavior in spheroidizing annealing and mechanical properties of medium carbon steel [J]. Iron and Steel, 2005, 40 (9): 60–64.
- [24] Sun J X, Zhang L, Huang Y F, et al. Strain hardening rate and strain rate sensitivity behavior of bcc/fcc-dual-phase tungsten heavy alloy [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2023, 116: 106363.
- [25] Mao W Q, Gao S, Gong W, et al. Quantitatively evaluating respective contribution of austenite and deformation-induced martensite to flow stress, plastic strain, and strain hardening rate in tensile deformed TRIP steel [J]. Acta Materialia, 2023, 256: 119139.
- [26] Cao R Z, Wang W, Ma S B, et al. Arrhenius constitutive model and dynamic recrystallization behavior of 18CrNiMo7-6 steel [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 6334–6347.
- [27] Li F, Zhu C C, Li S J, et al. A comparative study on modified and optimized Zerilli-Armstrong and arrhenius-type constitutive models to predict the hot deformation behavior in 30Si2MnCrMoVE steel [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 20: 3918–3929.
- [28] He A, Wang X T, Xie G L, et al. Modified Arrhenius-type constitutive model and artificial neural network-based model for constitutive relationship of 316LN stainless steel during hot deformation [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2015, 22 (8): 721–729.
- [29] Li H Y, Li Y H, Wang X F, et al. A comparative study on modified Johnson Cook, modified Zerilli-Armstrong and Arrhenius-type constitutive models to predict the hot deformation behavior in 28CrMnMoV steel [J]. Materials & Design, 2013, 49: 493–501.
- [30] Zener C, Hollomon J H. Effect of strain rate upon plastic flow of steel [J]. Journal of Applied Physics, 1944, 15 (1): 22–32.

## 第 20 届国际金属成形会议征文通知

### (The 20<sup>th</sup> International Conference on Metal Forming)

第 20 届国际金属成形会议 (The 20<sup>th</sup> 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+线下相结合的形式成功举办了“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。中国机械工程学会塑性工程分会拟组织参加本次会议。

一、主办单位: 克拉科夫 AGH 科技大学

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

三、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

四、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