

理论与实验研究

V-Nb 微合金化 Q420B 大规格角钢高温流变应力研究

张明赫¹, 冯运莉¹, 田志伟¹, 尹绍江², 陈春生², 王厚昕³

(1. 华北理工大学 冶金与能源学院, 河北 唐山 063210; 2. 唐山中厚板材有限公司, 河北 唐山 063600;
3. 中信金属宁波能源有限公司, 浙江 宁波 315899)

摘要: 为获得大规格角钢高温变形时的流变应力, 在 Gleeble-3500 热模拟实验机上, 对 V-Nb 微合金化 Q420B 大规格角钢进行了高温单轴压缩实验, 变形温度为 750~1100 °C, 应变速率为 0.1~30 s⁻¹。结果表明, 一定实验条件下, 当变形温度升高时, 实验钢的高温流变应力会随之呈指数函数关系增大; 当应变速率的增大时, 实验钢的高温流变应力会随之呈幂函数关系增大; 随着应变量的增加, 实验钢的高温流变应力先增大而后逐渐达到稳定。根据高温流变应力与变形温度、应变速率以及应变的关系, 构建了 V-Nb 微合金化实验钢的高温流变应力本构方程, 计算值与实测值具有较好的拟合精度, 证明了其可用于实际生产中轧制力的计算。

关键词: V-Nb 微合金化; Q420B 大规格角钢; 热变形; 变形抗力; 高温单轴压缩实验

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.04.030

中图分类号: TG142.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 04-0226-09

Study on high temperature flow stress of V-Nb microalloying Q420B angle steel with large size

Zhang Minghe¹, Feng Yunli¹, Tian Zhiwei¹, Yin Shaojiang², Chen Chunsheng², Wang Houxin³

(1. School of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China;
2. Tangshan Medium Thick Plate Co., Ltd., Tangshan 063600, China;
3. CITIC Metal Ningbo Energy Co., Ltd., Ningbo 315899, China)

Abstract: To obtain the flow stress of large size angle steel during high temperature deformation, the high temperature uniaxial compression experiment of V-Nb microalloying Q420B angle steel with large size were conducted with the deformation temperature of 750~1100 °C and the strain rate of 0.01~30 s⁻¹ on a Gleeble-3500 thermal simulation experiment machine. The results show that under the certain experimental conditions, the high temperature flow stress of the experimental steel increases exponentially with the increasing of deformation temperature, and the high temperature flow stress of the experimental steel increases in a power function with the increasing of strain rate. As the strain amount increases, and the high temperature flow stress of the experimental steel first increases and then gradually reaches stability. Based on the relationship between high temperature flow stress and deformation temperature, strain rate and strain, a high temperature flow stress constitutive equation for V-Nb microalloying experimental steel was constructed. The calculated values have good fitting accuracy with the measured values, which proves that it can be used to calculate the rolling force in the actual production.

Key words: V-Nb microalloying; Q420B angle steel with large size; thermal deformation; deformation resistance; high temperature uniaxial compression experiment

特高压电网的建设项目将显著助力我国国民经济的快速发展。为满足特高压电网的建设项目需求,

大规格高强度角钢在特高压电路上的应用越来越广泛^[1-2]。在国家特高压输变电工程中, 为降低安装铁塔的整体质量并降低铁塔的安装成本, 输电铁塔的钢种牌号已经升级到 Q420 等高强度级别角钢代替强度级别较低的 Q345 角钢^[3-4]。研制具有更高强度的大规格角钢对于我国特高压输变电工程具有重要意义。大规格角钢的轧制成形工艺较为复杂, 其中最为重要的一道工艺为热轧, 因此, 关于大规格角钢热变形过程的研究尤为紧要^[5-7]。

V-Nb 微合金化 Q420B 大规格角钢在控制轧制

收稿日期: 2023-08-14; 修订日期: 2023-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51974134); 河北省自然科学基金资助项目 (E2022209070); 河北省中央引导地方科技发展资金项目 (236Z1003G); 河北省科技重大专项项目 (21281008Z)

作者简介: 张明赫 (1988-), 男, 博士, 副教授

E-mail: mhzhangmse@163.com

通信作者: 冯运莉 (1966-), 女, 博士, 教授

E-mail: tsfengyl@163.com

工艺下，钒中的碳化物、氮化物在奥氏体晶界或者晶内细小弥散析出，可以细化晶粒，获得细小均匀的珠光体团和铁素体晶粒，从而提高钢的综合力学性能^[8-11]。为了研究轧制工艺对 Q420B 大规格角钢组织性能的影响，在 Gleeble-3500 热模拟实验机上进行不同变形参数的单道次压缩实验，研究材料的塑性流变行为^[12-15]，研究 Q420B 大规格角钢的高温流变应力与变形温度、应变速率以及应变的关系。在分析这些影响因素的基础上获得了 Q420B 大规格角钢的热变形本构方程，材料的热变形本构模型能够描述材料的高温流变应力与变形温度、应变速率以及应变之间的关系，是设计热成形工艺的重要依据^[16-17]，通过材料本构关系模型可以为实际生产提供技术参数和理论指导，进而优化和调整 Q420B 大规格角钢的生产工艺^[18-19]。

1 实验材料与方法

本文所用的大规格角钢为唐山中厚板材有限公司生产的 V-Nb 微合金化 Q420B 钢材，其化学成分

如表 1 所示。热模拟实验在 Gleeble-3500 热模拟实验机上进行，试样尺寸为 $\Phi 8\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ 。热模拟变形方案为：先将试样以 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 的开温速率加热至 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，保温 10 min 后以 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速率冷却至变形温度，变形温度范围为 $750\sim 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，中间间隔为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，在 8 个变形温度下执行单道次变形，每个温度下的压下率达到 60%，热模拟实验过程中的应变速率分别为 0.1 、 1 、 10 和 30 s^{-1} ，试样变形后在空气中冷却。

表 1 V-Nb 微合金化 Q420B 钢的化学成分（%，质量分数）

Table 1 Chemical compositions of V-Nb microalloying Q420B steel（%，mass fraction）								
C	Mn	Si	Als	V	Nb	S	P	Fe
0.16	1.40	0.36	0.022	0.04	0.02	0.009	0.020	余量

2 实验结果及讨论

2.1 实验钢真应力-真应变曲线

图 1 为实验钢在应变速率为分别为 0.1 、 1 、

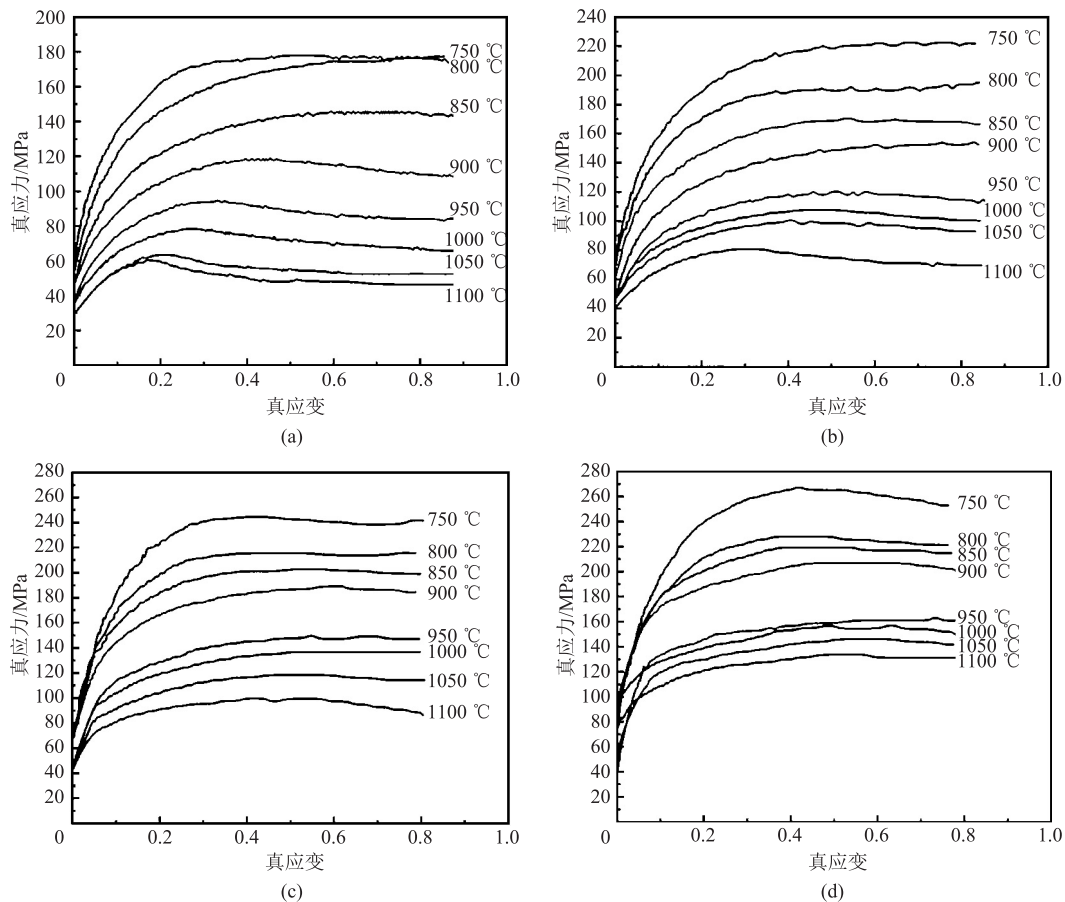


图 1 不同应变速率下实验钢的真应力-真应变曲线

(a) 0.1 s^{-1} (b) 1 s^{-1} (c) 10 s^{-1} (d) 30 s^{-1}

Fig. 1 True stress-true strain curves of experimental steel under different strain rates

10 和 30 s⁻¹ 时不同变形温度下的真应力-真应变曲线。从图 1 可以观察到, 在变形初期, 随着变形程度的增加, 实验钢的高温流变应力也会相应地上升^[20]。图 1a 中, 当应变速率为 0.1 s⁻¹ 时, 随着真应变的进一步增大, 实验钢的高温流变应力均逐步达到一个相对稳定值, 稳定应力值的大小随着变形温度的升高而降低。图 1b 中, 当变形温度为 950~1100 ℃ 时, 随着真应变的增大, 实验钢的高温流变应力先增大而后降低至一稳定的数值, 呈现出动态再结晶曲线的特征; 变形温度为 750~900 ℃ 时, 实验钢的高温流变应力先快速增大而后缓慢增大, 呈现出动态回复曲线的特征。如图 1c 和图 1d 所示, 当应变速率为 10 和 30 s⁻¹, 变形温度为 750 ℃ 时, 实验钢的高温流变曲线呈现出了动态再结晶曲线的特征。

2.2 变形条件对实验钢高温流变应力的影响

2.2.1 变形温度对实验钢高温流变应力的影响

在实验钢变形过程中, 变形温度被认为是影响实验钢高温流变应力的重要因素之一。本实验选取真应变为 0.4, 研究变形温度 T 与应变速率 $\dot{\epsilon}$ 对 V-Nb 微合金化 Q420B 钢的高温流变应力的影响。根据实验钢的真应力-真应变曲线数据, 选取真应变为 0.4 时实验钢在不同应变速率和不同变形温度条件下的高温流变应力值, 结果见表 2。根据表 2 中的数据, 绘制出了变形温度与实验钢真应力的关系曲线, 如图 2 所示。

表 2 真应变为 0.4 时实验钢在不同变形条件下的高温流变应力值 (MPa)

Table 2 High temperature flow stress values of experimental steel under different deformation conditions at true strain of 0.4 (MPa)

变形温度 $T/^\circ\text{C}$	高温流变应力 σ			
	$\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$	$\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$	$\dot{\epsilon} = 10 \text{ s}^{-1}$	$\dot{\epsilon} = 30 \text{ s}^{-1}$
750	174.869	214.292	245.268	264.481
800	165.459	188.292	216.339	227.008
850	138.951	157.472	201.913	218.484
900	118.066	143.191	184.631	203.033
950	92.590	117.157	144.809	156.858
1000	74.459	106.202	133.238	152.596
1050	56.213	98.753	117.309	141.585
1100	50.787	78.449	98.525	128.831

通过观察图 2 可以得出, 当变形温度上升时, 实验钢对应的高温流变应力会迅速降低。其主要原

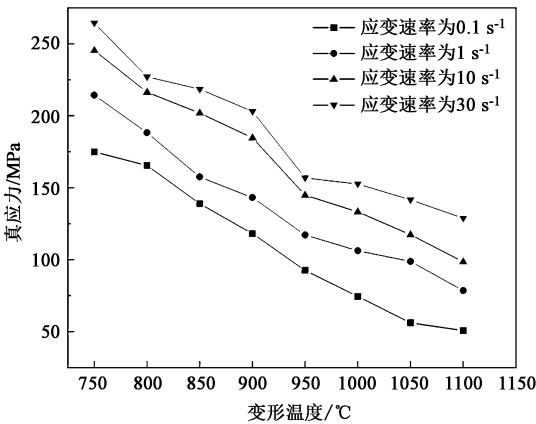


图 2 真应变为 0.4 的实验钢的真应力与变形温度的关系曲线
Fig. 2 Relationship curves between true stress and deformation temperature for experimental steel at true strain of 0.4

因有以下几方面:

(1) 随着变形温度的升高, 更有利于发生动态回复和动态再结晶, 这增强了软化的效果, 导致实验钢在塑性变形过程中的加工硬化作用减弱^[21]; 同时, 回复作用使空位、间隙原子和其他点缺陷减少, 削弱了它们对位错的钉扎作用, 从而使位错滑移时所需要的临界切应力降低, 位错运动更加容易进行, 进而使得高温流变应力降低。

(2) 当变形温度上升时, 实验钢中原子的振动会变得更加剧烈, 内部原子的动能逐渐增大, 实验钢原子之间的结合力逐渐减弱, 这种情况会导致实验钢的原子一直处于不稳定的状态, 当受到外加载荷的作用时, 位错易于沿施密特因子最大的方向移动, 从而使得实验钢的塑性增强, 实验钢的高温流变应力降低。同时, 当变形温度很高时, 可能会有新的滑移系产生, 降低滑移阻力, 从而不断产生、开动交滑移和新滑移系; 当应力较低时也可能会有变形发生, 即高温流变应力降低^[22]。

(3) 随着变形温度的升高, 金属的组织从多相状态转为单相状态, 这可能会导致基体中的第二相粒子再次溶解, 从而使晶粒朝着更有利于塑性的方向演变^[23], 这些因素均会导致高温流变应力降低。

结合表 2 和图 2, 还可以进一步观察到, 相较于变形温度为 1000~1100 ℃, 当变形温度为 750~1000 ℃ 时, 实验钢的高温流变应力随着变形温度的变化更为显著。这是因为: 实验钢进行了 V-Nb 微合金化, 在低温条件下变形时除了实验钢自身材料强度较高温时的强度高外, 析出的较细小的钒的碳化物颗粒以及铌的碳化物颗粒弥散分布, 对位错的

钉扎作用很强，细小的碳化物颗粒对较低温度下变形的实验钢起到了析出强化的作用。钒和铌的碳化物在奥氏体中随着温度变化的固溶度积为：

$$\lg\{[V][C]\}_\gamma = 6.72 - 9500/T \tag{1}$$

$$\lg\{[Nb][C]\}_\gamma = 2.96 - 7510/T \tag{2}$$

式中：[V]、[Nb]、[C] 分别为处于固溶状态下的钒、铌、碳元素的质量百分数； T 为变形温度，K。

计算可得钒的碳化物的固溶温度大约为 812 ℃，铌的碳化物的固溶温度大约为 986 ℃^[19]。在变形温度超过 1000 ℃ 的情况下，钒和铌基本能够固溶于奥氏体基体中，从而使得实验钢的高温流变应力不会因为温度的波动而有太大的变化。

对表 2 中实验钢的高温流变应力 σ 取对数后得到表 3，根据表 3 中的数据得到了 $\ln\sigma$ 与变形温度 T 的关系曲线，见图 3。图 3 中的实线为实际计算值，虚线为拟合关系曲线。由图 3 可以看出，当变形温度一定时， $\ln\sigma$ 随着应变速率的升高而增大，而当应变速率一定时，随着变形温度的升高， $\ln\sigma$ 快速降低，高温流变应力与变形温度关系可以通过式 (3) 表示，两边取自然对数后，得到高温流变应力 σ 与变形温度 T 之间的关系（式 (4)）。

$$\sigma = Ae^{BT} \tag{3}$$

$$\ln\sigma = \alpha T + \beta \tag{4}$$

式中： A 和 B 为常数，取决于变形条件和变形材料； α 和 β 为回归系数，取决于实验材料^[21-22]。

2.2.2 应变速率对实验钢高温流变应力的影响

根据图 1 中实验钢的真应力-真应变曲线，选取了真应变为 0.4 时不同变形温度及应变速率下实验

表 3 真应变为 0.4 时实验钢在不同变形温度下的 $\ln\sigma$ 值
Table 3 Values of $\ln\sigma$ for experimental steel under different deformation temperatures at true strain of 0.4

变形温度 $T/^\circ\text{C}$	$\ln(\sigma/\text{MPa})$			
	$\dot{\varepsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$	$\dot{\varepsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$	$\dot{\varepsilon} = 10 \text{ s}^{-1}$	$\dot{\varepsilon} = 30 \text{ s}^{-1}$
750	5.164	5.367	5.502	5.578
800	5.109	5.238	5.377	5.425
850	4.934	5.059	5.308	5.387
900	4.771	4.964	5.218	5.313
950	4.528	4.764	4.975	5.055
1000	4.310	4.665	4.892	5.028
1050	4.029	4.593	4.765	4.953
1100	3.928	4.362	4.590	4.858

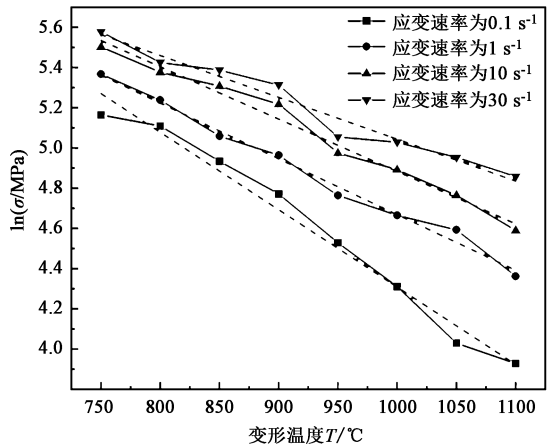


图 3 真应变 0.4 时实验钢 $\ln\sigma$ 与变形温度 T 的关系曲线
Fig. 3 Relationship curves between $\ln\sigma$ and deformation temperature T at true strain of 0.4

钢的高温流变应力，见表 4。根据表 4 中的数据绘制高温流变应力与应变速率的关系曲线，见图 4。

表 4 真应变为 0.4 的实验钢在不同变形条件下的高温流变应力值 (MPa)
Table 4 High temperature flow stress values of experimental steel under different deformation conditions at true strain of 0.4 (MPa)

$\dot{\varepsilon}/\text{s}^{-1}$	高温流变应力 σ							
	750 ℃	800 ℃	850 ℃	900 ℃	950 ℃	1000 ℃	1050 ℃	1100 ℃
0.1	174.869	165.459	138.951	118.066	92.590	74.459	56.213	50.787
1	214.292	188.292	157.472	143.191	117.157	106.202	98.753	78.449
10	245.268	216.339	201.913	184.631	144.809	133.238	117.309	98.525
30	264.481	227.008	218.484	203.033	156.858	152.596	141.585	128.831

通过观察图 4 可知，在 8 个变形温度下，实验钢的高温流变应力值随应变速率的变化呈相同的变化趋势。在热模拟实验过程中，应变速率由 0.1 s^{-1} 增加至 1 s^{-1} 时，实验钢高温流变应力的增幅较为明

显，之后应变速率继续增加至 30 s^{-1} 时，实验钢的高温流变应力的增幅变得较为缓慢^[23-25]。发生这种实验现象的可能的原因有以下几个方面。

(1) 实验钢在高温变形时动态加工硬化和动态

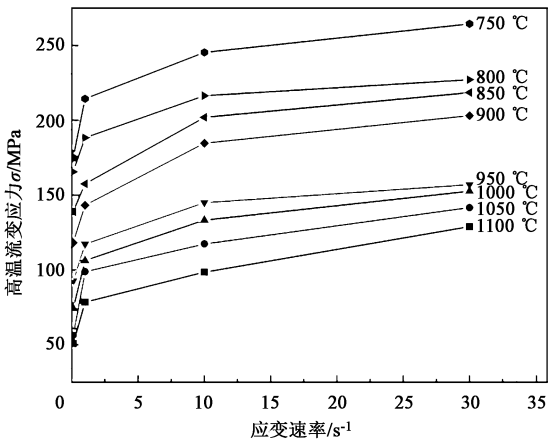


图 4 不同变形温度下实验钢的高温流变应力与应变速率的关系曲线
Fig. 4 Relationship curves between high temperature flow stress of experimental steel and strain rate under different deformation temperatures

软化并存，应变速率增大后塑性变形时间不足，金属动态回复和动态再结晶所引起的软化的时间相对减少，在这种情况下，实验钢的软化速率小于硬化

速率，导致实验钢的高温流变应力增大^[20,23]。

(2) 随着应变速率的增加，实验钢内部更多的位错同时移动，位错移动的速度加快，位错滑移的切应力提高，从而提高高温流变应力。

(3) 实验钢在应变量较小的变形初期，实验钢内的位错增殖较快，使其加工硬化率随着应变速率的增加而快速增大；随着变形的持续进行，当应变速率增大至一定程度时，此时塑性变形中实验钢的变形能大部分会转化为热^[25]，而且变形持续时间较短，热量散不出去，由于这种温度效应，实验钢内部的温度升高，所以，使得实验钢的加工硬化速率的增加程度逐渐变缓^[26]。

(4) 应变速率的变化也会引起摩擦因数的变化，从而影响变高温流变应力的大小。

对表 4 中的各变形温度下不同应变速率值 $\dot{\epsilon}$ 和其对应的高温流变应力值 σ 取自然对数后得到表 5。基于表 5 中的数据，绘制得到 $\ln\sigma$ 与 $\ln\dot{\epsilon}$ 的关系曲线图，如图 5 所示，其中实线为实际计算值，虚线为拟合关系曲线。

表 5 真应变为 0.4 时各变形温度下的 $\ln\sigma$ 和 $\ln\dot{\epsilon}$ 值

Table 5 Values of $\ln\sigma$ and $\ln\dot{\epsilon}$ under different deformation temperatures at true strain of 0.4

$\ln(\dot{\epsilon}/s^{-1})$	$\ln(\sigma/MPa)$							
	750 °C	800 °C	850 °C	900 °C	950 °C	1000 °C	1050 °C	1100 °C
-2.303	5.164	5.109	4.934	4.771	4.528	4.310	4.029	3.928
0.000	5.367	5.238	5.059	4.964	4.764	4.665	4.593	4.362
2.303	5.502	5.377	5.308	5.218	4.975	4.892	4.765	4.590
3.401	5.578	5.425	5.387	5.313	5.055	5.028	4.953	4.859

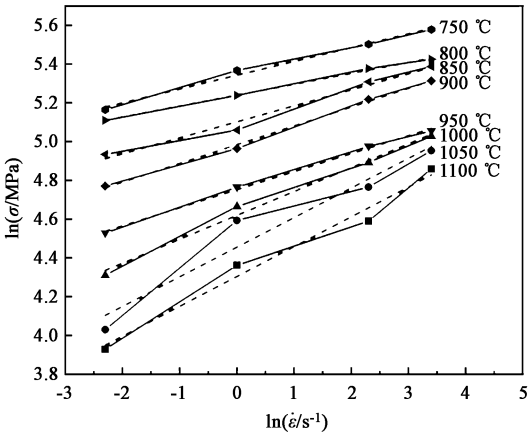


图 5 不同变形温度下 $\ln\sigma$ 和 $\ln\dot{\epsilon}$ 关系曲线
Fig. 5 Relationship curves between $\ln\sigma$ and $\ln\dot{\epsilon}$ under different deformation temperatures

由图 5 可知，在同一变形温度下，随着 $\ln\dot{\epsilon}$ 的增加， $\ln\sigma$ 线性增大。实验钢的高温流变应力与应

变速率的关系可用式 (5) 拟合：

$$\ln\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) = m \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \tag{5}$$

式中： σ_0 、 $\dot{\epsilon}_0$ 分别为实验中选取的参考高温流变应力和参考应变速率； m 为应变速率敏感指数，与变形温度有关^[21]。

2.2.3 应变变量对实验钢高温流变应力的影响

由图 1 可知，实验钢在应变量较小时，随着实验钢变形程度的增加，实验钢的高温流变应力显著增加^[21]，随着变形程度的进一步增大，实验钢的高温流变应力增加至一定值之后，真应力-真应变曲线会呈现 3 种情况：(1) 真应力-真应变曲线出现较平稳的应力值而未出现峰值；(2) 真应力-真应变曲线出现明显的峰值后，再降低至一个较稳定的值；(3) 真应力-真应变曲线出现峰值后降低，但是未出现明显的稳定值。这是因为：在变形初期，

实验钢内部的位错密度会随着应变的增加而增大,位错组态发生变化,晶粒内形成位错塞积、缠结、割阶等,进一步提高了实验钢的高温流变应力^[27];继续增大变形程度,会发生动态回复,产生一定程度的软化作用,可以抵消部分由于位错密度增加而引起的加工硬化作用,使得实验钢的高温流变应力的增加趋势变得缓慢,最终达到一个稳定值;随着变形程度的增加,形变产生的形变储能进一步增大,可以驱使实验钢发生动态再结晶,完成动态再结晶的实验钢晶粒内的位错密度降低,使得实验钢的高温流变应力显著降低,直至动态再结晶完成后,实验钢的高温流变应力下降至最小值,最终趋向于某一稳定值,说明材料内部大部分晶粒完成了再结晶。

有关研究表明^[28],在应力-应变曲线中,随着应变量的增加,在实验钢的高温流变应力未出现峰值的情况下,高温流变应力 σ 与应变变量 ε 之间的关系可以用式 (6) 表示。

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \varepsilon^n \quad (6)$$

式中: n 为应变硬化指数。

但在高温流变应力出现峰值的情况下,其关系变得复杂,可以用式 (7) 表示。

$$\frac{\sigma}{\sigma_1} = \alpha_2 \left(\frac{\varepsilon}{0.4} \right)^{\alpha_1} - (\alpha_2 - 1) \frac{\varepsilon}{0.4} \quad (7)$$

式中: α_1 、 α_2 为拟合过程中的回归系数; σ_1 为选取应变量为 0.4 时的高温流变应力。

2.3 实验钢高温流变应力本构模型

自 20 世纪 50 年代起,国内外研究人员就逐步开始对高温流变应力模型进行一系列的研究,对比分析已经建立的数学本构模型,在全方位考虑变形温度、应变速率和应变变量等多个变量对高温流变应力影响的情况下^[29],周纪华-管克智构建的高温流变应力本构模型具有更为有广泛的适用性^[30-32],其表达式为:

$$\sigma = \sigma_0 \exp(\alpha_1 T + \alpha_2) \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{10} \right)^{(\alpha_3 T + \alpha_4)} \times \left[\alpha_6 \left(\frac{\varepsilon}{0.4} \right)^{\alpha_5} - (\alpha_6 - 1) \frac{\varepsilon}{0.4} \right] \quad (8)$$

式中: σ_0 为选区的参考高温流变应力, MPa, 即实验钢在变形温度为 1000 °C、应变为 0.4、应变速率为 10 s⁻¹ 时的高温流变应力值; α_3 、 α_4 、 α_5 、 α_6 为拟合过程中的回归系数,其大小取决于所用的实验材料。

本实验通过 Origin 软件进行回归系数的拟合,实验钢的高温流变应力本构方程的回归系数参见表 6。

表 6 实验钢高温流变应力本构模型中的回归系数

Table 6 Regression coefficients in high temperature flow stress constitutive model of experimental steel

回归系数	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6
数值	-2.231	2.889	0.268	-0.216	0.374	1.442

将拟合得到的回归系数代入至式 (9), 整理得到 V-Nb 微合金化 Q420B 大规格角钢的高温流变应力数学模型为:

$$\sigma = 133.238 \times \exp(-2.231T + 2.889) \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{10} \right)^{(0.268T - 0.216)} \times \left[1.442 \left(\frac{\varepsilon}{10} \right)^{0.374} - 0.442 \frac{\varepsilon}{0.4} \right] \quad (9)$$

图 6 为高温流变应力实测值与计算值的对比示意图。从图 6 可以看出, 计算值和实测值之间存在一定的误差, 但是总体来讲, 实测值的曲线与计算值的曲线的吻合效果较好。所建立的实验钢的高温流变应力本构模型的相关系数 R 为 0.988。

根据回归理论, 剩余标准偏差 S_y 为:

$$S_y = \sqrt{\frac{Q}{N - M - 1}} = \sqrt{\frac{2333925.32183}{39034 - 6 - 1}} = 7.733 \quad (10)$$

式中: Q 为残差平方和; N 为实验数据组数; M 为待定回归系数个数^[18]。

通过查阅 t 分布表可得, 当 $\alpha = 0.05$ 即犯错概率为 5% 时, $t_{0.05}^{39034} = 1.645$, $t_{0.05}^{39034} \times S_y = 1.645 \times 7.733 \text{ MPa} = 12.721 \text{ MPa}$ 。所建立的本构模型的预测精度为 ($\sigma \pm 12.721$) MPa, 即实验钢的高温流变应力 σ 有 95% 的可能性落在 ($\sigma - 12.721$) $< \sigma < (\sigma + 12.721)$ 范围内, 说明所建立的高温流变应力本构模型能够较好地预测实验钢的高温流变应力。

3 结论

(1) 利用 Gleeble-3500 热模拟实验机, 对 V-Nb 微合金化 Q420B 大规格角钢的高温变形行为进行深入探究, 分析变形工艺参数对实验钢高温流变应力的影响。随着变形温度的升高, 实验钢的高温流变应力下降, 两者之间呈较好的指数函数关系; 实验钢的高温流变应力随着应变速率升高而增大, 实验钢的高温流变应力与应变速率呈幂函数关系; 随着变形程度的增加, 实验钢的高温流变应力先增大而后逐步达到相对稳态, 实验钢的高温流变应力与应变变量之间呈非线性关系。

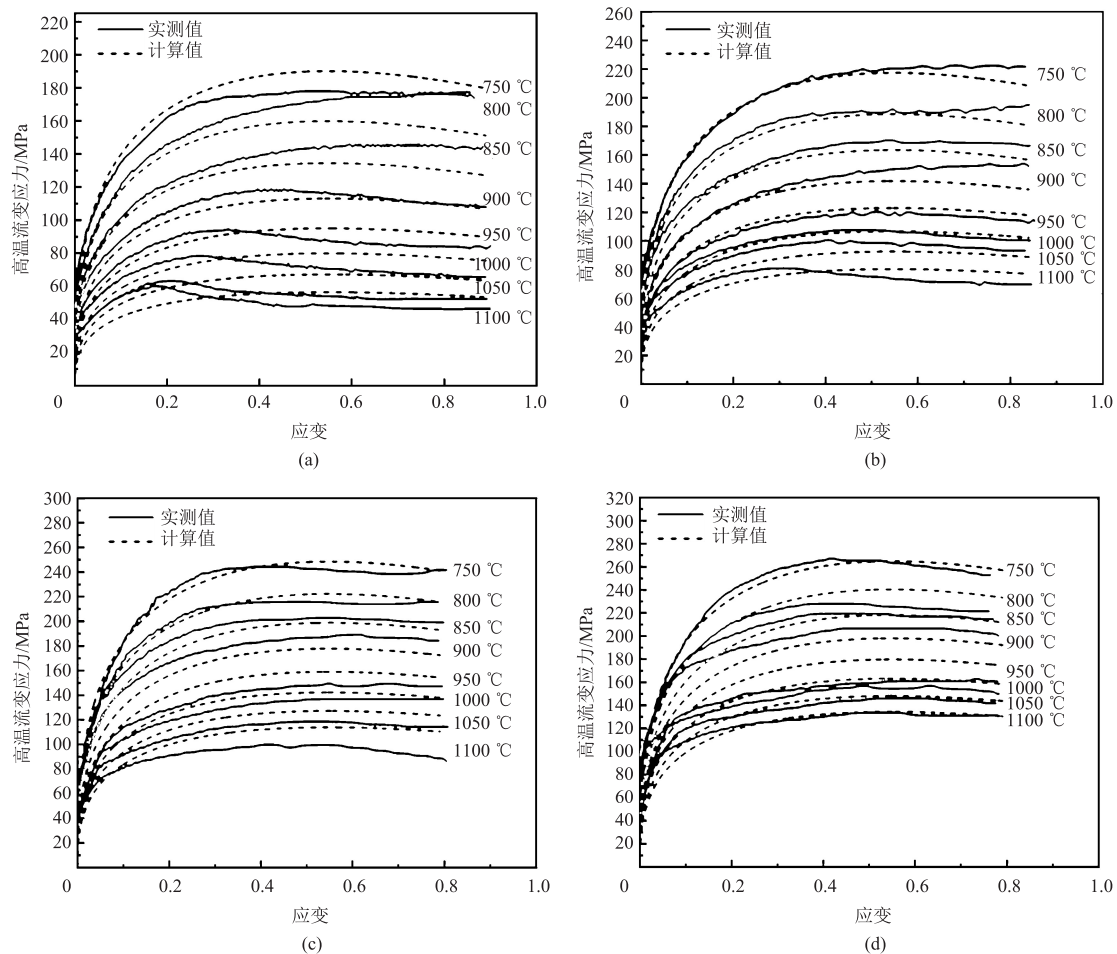


图 6 实验钢高温流变应力计算值与实测值对比

(a) $\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$ (b) $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$ (c) $\dot{\epsilon} = 10 \text{ s}^{-1}$ (d) $\dot{\epsilon} = 30 \text{ s}^{-1}$

Fig. 6 Comparison between calculated and experimental values of high temperature flow stress for experimental steel

(2) 构建了综合考虑变形温度、应变速率和应变变量的 V-Nb 微合金化 Q420B 大规格角钢的高温流变应力本构模型。根据本构模型得到的计算值与实测值具有较好的拟合精度, 可用于 V-Nb 微合金化 Q420B 大规格角钢实际生产中轧制力的计算。

参考文献:

- [1] 黄璜, 李清华, 孟宪乔, 等. Q420 大规格角钢在 $\pm 800 \text{ kV}$ 特高压杆塔中的应用 [J]. 电力建设, 2010, 31 (6): 65-69.
Huang H, Li Q H, Meng X Q, et al. Application on Q420 large width angle steel in $\pm 800 \text{ kV}$ UHV transmission tower [J]. Electric Power Construction, 2010, 31 (6): 65-69.
- [2] 常建伟, 徐德录, 张磊, 等. 输电铁塔用钢及其焊接技术 [J]. 热加工工艺, 2011, 40 (15): 148-151.
Chang J W, Xu D L, Zhang L, et al. Characteristics and welding technology of steel used for transmission line tower [J]. Hot Working Technology, 2011, 40 (15): 148-151.
- [3] 陈亮, 冯运莉, 李杰, 等. 铁塔用 Q420B 大规格角钢的组织

与性能研究 [J]. 热加工工艺, 2016, 45 (25): 101-107.

Chen L, Feng Y L, Li J, et al. Microstructure and properties of Q420B large angle steel for iron tower [J]. Hot Working Technology, 2016, 45 (25): 101-107.

- [4] 冯运莉, 刘战英, 陈春生, 等. VN 合金在大规格角钢生产中的应用研究 [J]. 钢铁钒钛, 2004, 25 (2): 40-43.

Feng Y L, Liu Z Y, Chen C S, et al. Application of VN alloy in production of large size angle steel [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2004, 25 (2): 40-43.

- [5] 冯运莉, 段宝美, 胡小明, 等. VN 微合金化 Q420B 大规格角钢连铸坯高温热塑性的研究 [J]. 热加工工艺, 2014, 43 (16): 57-61.

Feng Y L, Duan B M, Hu X M, et al. Study on high-temperature thermal plasticity of V-N microalloying Q420B large width angle steel continuous cast slab [J]. Hot Working Technology, 2014, 43 (16): 57-61.

- [6] 常建伟, 李凤辉, 徐德录, 等. 输电铁塔用角钢韧脆转变温度评价方法研究 [J]. 热加工工艺, 2015, 44 (10): 64-68.

- Chang J W, Li F H, Xu D L, et al. Research on evaluation method of transmission tower angle temperature ductile-brittle transition [J]. Hot Working Technology, 2015, 44 (10): 64-68.
- [7] 张宏亮, 冯光宏, 崔怀周. 大规格 Q420B 热轧角钢轧制中间道次开裂缺陷分析 [J]. 钢铁, 2019, 54 (9): 73-78.
- Zhang H L, Feng G H, Cui H Z. Analysis of crack defects in Q420B angle steel during hot rolling process [J]. Iron and Steel, 2019, 54 (9): 73-78.
- [8] 马壮, 侯振伟, 陈雪慧, 等. Nb 对 V-N 微合金化钢高温热塑性的影响 [J]. 钢铁研究学报, 2022, 34 (10): 1177-1186.
- Ma Z, Hou Z W, Chen X H, et al. Effect of Nb on hot ductility of V-N microalloyed steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2022, 34 (10): 1177-1186.
- [9] 蒲春雷, 姜嫄, 闫洞旭, 等. Nb/V/Ti 微合金化对 20MnSi 钢组织和力学性能影响 [J]. 材料热处理学报, 2023, 44 (7): 99-106.
- Pu C L, Jiang Y, Yan D X, et al. Effect of Nb/V/Ti microalloying on microstructure and mechanical properties of 20MnSi steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2023, 44 (7): 99-106.
- [10] 王亦工, 冯运莉. V-N 微合金化提高低合金结构钢强韧性研究 [J]. 金属热处理, 2005, 30 (9): 27-30.
- Wang Y G, Feng Y L. Strengthening and toughening mechanism of V-N microalloying low alloy structural steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2005, 30 (9): 27-30.
- [11] 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.
- [12] 于永梅, 郭成健, 张小玲, 等. Fe-Si 合金高温变形流变应力的本构模型 [J]. 金属热处理, 2018, 43 (5): 28-33.
- Yu Y M, Guo C J, Zhang X L, et al. Dynamic recovery model of Fe-Si alloy steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2018, 43 (5): 28-33.
- [13] 林潇, 张清东. HC1150/1400MS 马氏体钢的高温本构模型 [J]. 金属热处理, 2017, 42 (10): 197-202.
- Lin X, Zhang Q D. Constitutive model of HC1150/1400MS martensitic steel at high temperature [J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42 (10): 197-202.
- [14] 董彦, 龚志翔, 肖国华. 无取向电工钢的高温塑性变形流动应力 [J]. 钢铁研究学报, 2012, 24 (10): 53-58.
- Dong Y, Gong Z X, Xiao G H. Flow stress of plastic deformation for non orientation electrical steel under high temperature [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2012, 24 (10): 53-58.
- [15] 包卫平, 赵昱臻, 李春明, 等. 纯铁高温高应变速率下的动态本构关系实验研究 [J]. 机械工程学报, 2010, 46 (4): 74-79.
- Bao W P, Zhao Y Z, Li C M, et al. Experimental research on the dynamic constitutive relation of pure iron at elevated temperatures and high strain rates [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46 (4): 74-79.
- [16] 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.
- [17] 蔺永诚, 陈明松, 钟掘. 42CrMo 钢的热压缩流变应力行为 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2008, (3): 549-553.
- Lin Y C, Chen M S, Zhong J. Flow stress behaviors of 42CrMo steel during hot compression [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2008, (3): 549-553.
- [18] 田志伟. 大规格高强度角钢生产工艺与组织性能研究 [D]. 唐山: 华北理工大学, 2016.
- Tian Z W. Production Process and Microstructure Properties of Large Width and High Strength Angle Steel [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2016.
- [19] 冯运莉, 王海蛟, 段宝美, 等. 热轧工艺对 V-N 微合金化 Q420B 大规格角钢组织转变的影响 [J]. 热加工工艺, 2016, 45 (19): 1-5.
- Feng Y L, Wang H J, Duan B M, et al. Effects of hot-rolled process on microstructure transformation of V-N microalloying Q420B large size angle steel [J]. Hot Working Technology, 2016, 45 (19): 1-5.
- [20] 王春刚, 黄秋菊, 李云, 等. 硅锰系 TRIP 钢的变形抗力 [J]. 钢铁研究学报, 2008, (11): 51-54.
- Wang C G, Huang Q J, Li Y, et al. Deformation resistance of SiMn TRIP steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2008, (11): 51-54.
- [21] 赵阳. 微合金非调质钢热变形行为与组织性能研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- Zhao Y. Hot Deformation Behaviors, Microstructures and Properties of Microalloyed Forging Steel [D]. Shenyang: Northeastern University, 2011.
- [22] 方剑. 微合金非调质钢 40Mn2V 变形抗力及再结晶的研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2008.
- Fang J. Research on Deformation Resistance and Recrystallization of Non-quenched and Non-tempered Microalloy Steel 40Mn2V [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2008.
- [23] 王立军, 余伟, 武会宾, 等. 12MnNiVR 钢的高温变形行为及其数学模型 [J]. 金属热处理, 2010, 35 (7): 5-8.
- Wang L J, Yu W, Wu H B, et al. Hot deformation behaviors and mathematical model of 12MnNiVR steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2010, 35 (7): 5-8.
- [24] 李海阳, 纪登鹏, 周晓航, 等. Q345D 钢的热变形抗力研究 [J]. 上海金属, 2018, 40 (2): 19-23.
- Li H Y, Ji D P, Zhou X H, et al. Study on hot deformation re-

- sistance of Q345D steel [J]. Shanghai Metals, 2018, 40 (2): 19-23.
- [25] 高威, 鞠传华, 庞志忠. 高强钢变形抗力实验研究 [J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2010, 12 (6): 144-146.
Gao W, Ju C H, Pang Z Z. Experimental study on deformation resistance of high strength steel [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Sciences Edition, 2010, 12 (6): 144-146.
- [26] 李清山, 黄朝滨, 吴如意, 等. 800 MPa 级高强钢的高温热塑性研究 [J]. 上海金属, 2012, 34 (5): 29-32.
Li Q S, Huang C B, Wu R Y, et al. Research on high temperature thermoplasticity of 800 MPa high strength steel [J]. Shanghai Metals, 2012, 34 (5): 29-32.
- [27] 包春玲, 宋鸿武, 乔日金, 等. AZ91D 镁合金挤压成形管材的组织性能研究 [J]. 热加工工艺, 2005, (8): 30-32.
Bao C L, Song H W, Qiao R J, et al. Study on microstructure and mechanical properties of extruded AZ91D alloy pipe [J]. Hot Working Technology, 2005, (8): 30-32.
- [28] Geoffrey Tither, Zhang S H. HSLA Steels: Processing, Properties and Applications [M]. Warrendale, PA: The Minerals, Metals & Materials Society, 1992.
- [29] 周纪华, 管克智. 金属塑性变形阻力 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- Zhou J H, Guan K Z. Metal Plastic Deformation Resistance [M]. Beijing: China Machine Press, 1989.
- [30] 王健, 王宇, 谢红飘, 等. 基于热连轧实测数据的金属材料变形抗力模型 [J]. 塑性工程学报, 2015, 22 (1): 55-60.
Wang J, Wang Y, Xie H B, et al. Deformation resistance model based on measured data of hot rolling [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2015, 22 (1): 55-60.
- [31] 陈继平, 马玉平, 陈汉, 等. 高耐蚀型耐候钢 S450EW 变形抗力模型的研究 [J]. 热加工工艺, 2016, 45 (12): 86-88.
Chen J P, Ma Y P, Chen H, et al. Study on deformation resistance models of high corrosion resistance weather resistance steel S450EW [J]. Hot Working Technology, 2016, 45 (12): 86-88.
- [32] 李小龙, 周敦世, 冯亮. GCr15 轴承钢 130 mm 棒材热连轧过程轧制力的数值模拟和分析 [J]. 特殊钢, 2015, 36 (1): 5-8.
Li X L, Zhou D S, Feng L. Numerical simulation and analysis on rolling force for 130 mm bar of bearing steel GCr15 during hot continuous rolling process [J]. Special Steel, 2015, 36 (1): 5-8.

“2024 中国锻压活动周” 征文通知 (第一轮)

锻压是传统金属成形工艺之一, 是装备制造业的基础。长期以来, 锻压行业的发展水平深刻影响我国装备制造业“四链”的安全稳定。在大力推进新型工业化, 加快建设以科技创新为引领、以先进制造业为骨干的现代化产业体系的进程中, 锻压行业应抢抓机遇, 以科技创新推动产业创新, 从实际出发, 先立后破, 加快培育新质生产力, 激活发展新动能, 促进锻压行业向高端化、智能化、绿色化发展, 为我国加快建设质量强国、制造强国, 实现高水平科技自立自强贡献力量。

为促进锻压行业的学术与技术交流, 加速原创性成果产出, 加强产学研用结合, 加快产业的改造提升, 由中国机械工程学会塑性工程分会主办, 中国机械总院集团北京机电研究所有限公司、北京科技大学、武汉理工大学、精密成形国家工程研究中心等单位联合承办的“2024 中国锻压活动周”(以下简称“活动周”) 拟于 2024 年 10 月 31 日-11 月 3 日在江苏省扬州市召开, 主题为“协同融合, 向‘新’而行”。此次活动周拟设置学术交流、技术/装备/成果展示、产学研用对接活动等多个环节, 同期召开塑性工程分会第十三届二次理事(扩大)会议。

欢迎广大同仁踊跃投稿、积极参会交流!

欢迎各企业、科研院所、机构及优秀成果积极参加技术/装备/成果展览展示!

欢迎各单位积极参与活动协办, 助力活动周成功举办!

一、组织单位

主办单位: 中国机械工程学会塑性工程分会 承办单位(排名不分先后): 中国机械总院集团北京机电研究所有限公司、北京科技大学、武汉理工大学、精密成形国家工程研究中心

协办单位(更多协办单位征集中): 扬州市邗江区人民政府

支持媒体: 《塑性工程学报》、《锻压技术》杂志

二、征文范围

包括但不限于各主题学术交流议题(柔性/特种成形工艺、锻造成形工艺及工装、复杂薄壁构件成形工艺、塑性成形理论、高性能材料设计、制备、表征与应用、高端成形装备及其智能化、青年沙龙)。

(下转第 241 页)