

17Cr2Ni2MoVNb 和 20Cr2Ni4A 齿轮钢的热变形行为

董明振^{1,2}, 闫永明², 欧阳雪枚¹, 袁伍丰³, 阳仁奇³, 杨少朋^{2,4}

(1. 湘潭大学 材料科学与工程学院, 湖南 湘潭 411105; 2. 钢铁研究总院 特殊钢研究所, 北京 100081;

3. 江麓机电集团有限公司, 湖南 湘潭 411100; 4. 马鞍山钢铁股份有限公司 技术中心 马鞍山 243003)

摘要: 利用 Gleeble-3800 热模拟试验机, 研究了 17Cr2Ni2MoVNb 和 20Cr2Ni4A 齿轮钢的热变形行为。利用加工硬化曲线, 计算了两种齿轮钢的热变形激活能, 构建了本构方程。结果表明: 两种齿轮钢在低应变速率下, 均表现出明显的动态再结晶; 而在高应变速率下, 20Cr2Ni4A 钢在 1000 °C 时表现为动态回复, 而 17Cr2Ni2MoVNb 钢在 1000~1150 °C 时均表现为动态回复。在相同变形条件下, 17Cr2Ni2MoVNb 钢的峰值应力和临界应力均高于 20Cr2Ni4A 钢; 20Cr2Ni4A 钢和 17Cr2Ni2MoVNb 钢的热变形激活能分别为 324 和 374 kJ·mol⁻¹。两种齿轮钢之间的应力特征值和热变形激活能之间的差异主要是由于 Ni、Mo 和 Nb 元素的含量差异对动态再结晶有不同程度的影响而导致的。在低应变速率下, 两种齿轮钢可选的变形温度相同; 在高应变速率下, 17Cr2Ni2MoVNb 钢的加工温度选择可高于 20Cr2Ni4A 钢的加工温度 100 °C 以上的温度。

关键词: 齿轮钢; 高温变形; 热变形激活能; Zener-Hollomon 参数; 动态再结晶

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.09.034

中图分类号: TG142

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 09-0230-08

Thermal deformation behavior of 17Cr2Ni2MoVNb and 20Cr2Ni4A gear steels

Dong Mingzhen^{1,2}, Yan Yongming², Ouyang Xuemei¹, Yuan Wufeng³, Yang Renqi³, Yang Shaopeng^{2,4}

(1. College of Materials Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;

2. Institute of Special Steels, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China;

3. Jianglu Electromechanical Group Co., Ltd., Xiangtan 411100, China;

4. Technology Center, Maanshan Iron and Steel Co., Ltd., Maanshan 243003, China)

Abstract: The thermal deformation behavior of 17Cr2Ni2MoVNb and 20Cr2Ni4A gear steels were studied by Gleeble-3800 thermal simulation test machine, respectively, and the thermal deformation activation energy for the two kinds of gear steels was calculated to construct the constitutive equation by the work hardening curves. The results show that the two kinds of gear steels exhibit obvious dynamic recrystallization at low strain rate, while at high strain rate, 20Cr2Ni4A steel exhibits dynamic recovery at 1000 °C and 17Cr2Ni2MoVNb steel exhibits dynamic recovery at 1000 – 1150 °C. Under the same deformation conditions, the peak stress and critical stress of 17Cr2Ni2MoVNb steel are higher than those of 20Cr2Ni4A steel, and the thermal deformation activation energy of 17Cr2Ni2MoVNb and 20Cr2Ni4A steels are 374 and 324 kJ·mol⁻¹, respectively. The difference between the stress characteristic values and the thermal deformation activation energy between the two kinds of gear steels is mainly due to the different contents of Ni, Mo and Nb, which have different effects on dynamic recrystallization. At low strain rate, the optional deformation temperature for the two kinds of gear steels is the same, while at high strain rate, the processing temperature of 17Cr2Ni2MoVNb steel can be selected to be more than 100 °C higher than that of 20Cr2Ni4A steel.

Key words: gear steel; high temperature deformation; hot deformation activation energy; Zener-Hollomon parameter; dynamic recrystallization

20Cr2Ni4A 是一种典型的齿轮钢, 常用于制造高铁、风电等重载齿轮。不过, 20Cr2Ni4A 钢因含

有较多的 Ni, 导致渗碳层残余奥氏体的含量高、硬度波动大, 同时渗碳变形大、疲劳性能不高。17Cr2Ni2MoVNb 是近期研制的一种细晶粒高性能重载齿轮钢, 其渗碳热处理变形小、疲劳性能明显优于 20Cr2Ni4A 钢, 具有良好的应用前景^[1]。本构方程是关于应力、应变、应变速率和变形温度的数学模型, 同时也是优化热加工工艺参数来控制组织和性能的基础^[2]。前期对 17Cr2Ni2MoVNb 齿轮钢的研

收稿日期: 2021-08-24; 修订日期: 2021-11-26

基金项目: 国家重点专项 (20T60860B)

作者简介: 董明振 (1996-), 男, 硕士研究生

E-mail: dongmz0126@163.com

通信作者: 闫永明 (1986-), 男, 博士, 高级工程师

E-mail: yanyongming@nccast.com

究主要集中在晶粒长大动力学、渗碳工艺以及疲劳性能等方面,而对热加工工艺的研究不多^[3-4]。本文通过对 17Cr2Ni2MoVNb 钢和 20Cr2Ni4A 钢进行热压缩变形试验,对比研究了变形温度和变形速率对流变应力的影响,构建了两钢的本构方程及不同变形条件下的特征值与 Zener-Hollomon 参数之间的关系,为其热加工工艺提供指导。

表 1 17Cr2Ni2MoVNb 和 20Cr2Ni4A 钢的化学成分 (%, 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of 17Cr2Ni2MoVNb and 20Cr2Ni4A steels (% , mass fraction)

试验钢	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb	Fe
17Cr2Ni2MoVNb 钢	0.20	0.18	0.58	0.004	0.003	1.69	1.59	0.28	0.032	余量
20Cr2Ni4A 钢	0.19	0.32	0.39	0.005	0.004	1.35	3.57	—	—	余量

将 17Cr2Ni2MoVNb 钢和 20Cr2Ni4A 钢加工成尺寸为 $\Phi 8\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 的待压缩圆柱试样。使用 Gleeble-3800 热模拟试验机进行单向恒温热压缩试验,变形量为 70%。在试样和两端夹头之间加入一层钼片以减小压缩过程中的摩擦。将待压缩圆柱试样以 $10\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 的加热速率加热至 1000、1050、1100 以及 1150 $^{\circ}\text{C}$,保温 180 s,使其组织和成分均匀化。然后分别以 0.01、0.1、1、10 s^{-1} 的应变速率进行等温压缩,如图 1 所示。其中, T 为变形温度, ε 为应变, $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率。

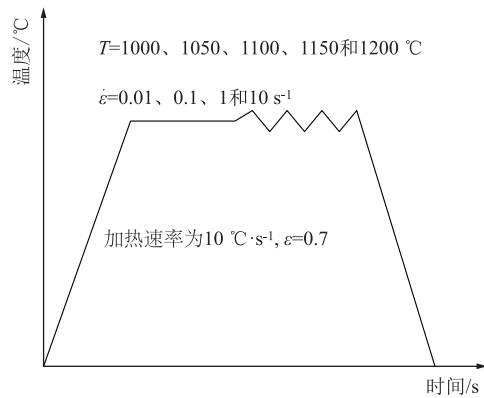


图 1 热变形工艺示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hot deformation process

2 结果分析

2.1 真应力-真应变曲线

20Cr2Ni4A 钢在不同热变形工艺下的真应力-真应变曲线如图 2 所示。20Cr2Ni4A 钢在 0.01 和 0.1 s^{-1} 的低应变速率下,真应力随着真应变的增加迅速达到峰值,随着应变量的增加,真应力-真应变曲线开始下降并逐渐趋于平稳,表现出明显的动

1 试验材料及方法

试验中的 17Cr2Ni2MoVNb 钢和 20Cr2Ni4A 钢(以下简称试验钢)采用宝钢特钢有限公司生产的工业用钢,原材料通过转炉冶炼+真空脱气+连铸制备,最后轧制为 $\Phi 100\text{ mm}$ 的圆棒,具体成分如表 1 所示。

态再结晶行为。在 $\dot{\varepsilon} = 1\text{ s}^{-1}$ 时,真应力-真应变曲线达到峰值时的应变量大。在 1150 $^{\circ}\text{C}$ 变形温度下,在达到峰值后,随着真应变的增加曲线下降至平稳;而在低于 1150 $^{\circ}\text{C}$ 变形温度时,真应力-真应变曲线在达到峰值后,随着真应变的增加一直下降未出现平稳的趋势。在 $\dot{\varepsilon} = 10\text{ s}^{-1}$ 时,4 个变形温度下的真应力-真应变曲线的变化趋势有所差异。在 1000 $^{\circ}\text{C}$ 变形温度时,真应力-真应变曲线一直处于上升阶段,未出现峰值,表现出明显的动态回复行为;在 1000 $^{\circ}\text{C}$ 变形温度以上,真应力-真应变曲线在达到峰值后以较缓的速度开始一直下降。从 20Cr2Ni4A 钢的真应力-真应变曲线看出,随着应变速率的增加,在热变形过程中的动态再结晶行为逐渐变弱;在高应变速率、1000 $^{\circ}\text{C}$ 及以下变形温度时,20Cr2Ni4A 钢的真应力-真应变曲线表现出动态回复行为^[5]。

17Cr2Ni2MoVNb 钢在不同热变形工艺下的真应力-真应变曲线如图 3 所示。17Cr2Ni2MoVNb 钢在 0.01、0.1 和 1 s^{-1} 的应变速率下,真应力的变化趋势与 20Cr2Ni4A 钢相同,表现出明显的动态再结晶行为。而当 $\dot{\varepsilon} = 10\text{ s}^{-1}$ 时,变形温度为 1000~1150 $^{\circ}\text{C}$ 时,真应力-真应变曲线随着应变量的增加一直上升,表现出动态回复行为。

20Cr2Ni4A 钢和 17Cr2Ni2MoVNb 钢在低应变速率下的变化趋势相似,均表现为动态再结晶行为。在高应变速率 $\dot{\varepsilon} = 10\text{ s}^{-1}$ 时,20Cr2Ni4A 钢在高于 1050~1150 $^{\circ}\text{C}$ 的变形温度下的真应力-真应变曲线表现为动态再结晶行为,在 1000 $^{\circ}\text{C}$ 时表现为动态回复;在 1000~1150 $^{\circ}\text{C}$ 的变形温度下,17Cr2Ni2MoVNb 钢的真应力-真应变曲线均表现为动态回复。动态再结晶能够细化晶粒,调整晶粒结构和力学性能^[6]。

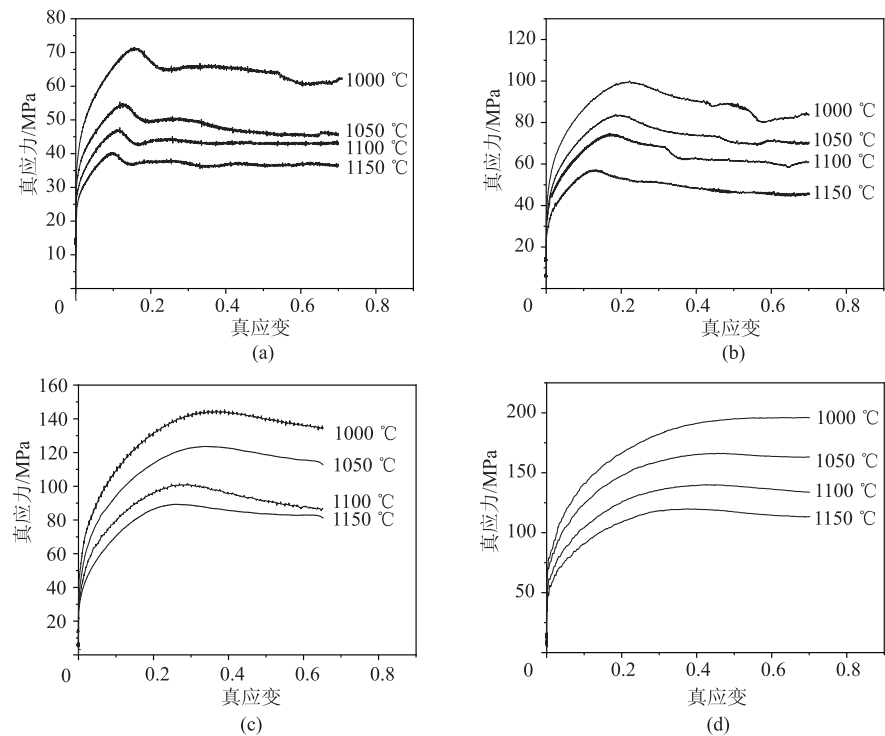


图 2 20Cr2Ni4A 钢在不同应变速率下的真应力-真应变曲线

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

Fig. 2 True stress-true strain curves of 20Cr2Ni4A steel at different strain rates

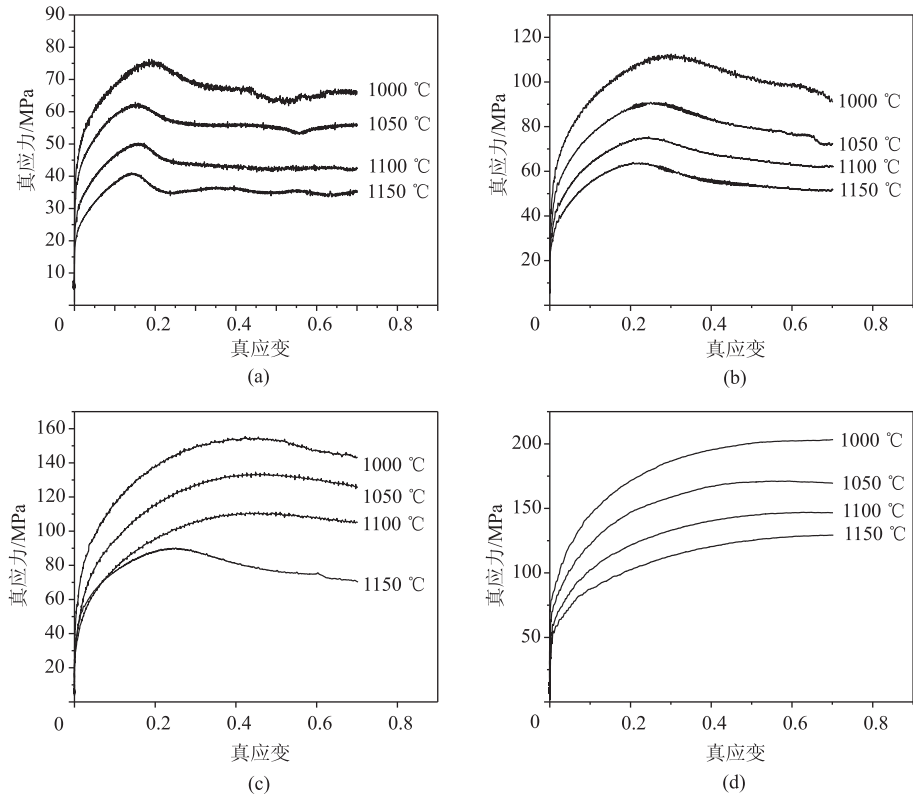


图 3 17Cr2Ni2MoVNb 钢在不同应变速率下的真应力-真应变曲线

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

Fig. 3 True stress-true strain curves of 17Cr2Ni2MoVNb steel at different strain rates

从两种试验钢的真应力-真应变曲线可以看出 20Cr2Ni4A 钢的可加工性能优于 17Cr2Ni2MoVNb 钢。在高应变速率下, 17Cr2Ni2MoVNb 钢的加工温度选择可高于 20Cr2Ni4A 钢的加工温度 100 °C 以上。

2.2 Zener-Hollomon 参数

在热变形过程中, 两种试验钢内部同时进行着加工硬化和动态再结晶, 动态再结晶的软化作用会抵消变形产生的加工硬化。同时, 动态再结晶的起始条件也是构建本构方程的基础。利用真应力-真应变曲线计算加工硬化速率 θ ($\theta = d\sigma/d\varepsilon$, 其中, σ

为变形应力), 通过分析 θ 与应力之间的关系, 可以确定 $\theta = 0$ 对应流变应力曲线的峰值应力 σ_p [7]。通常认为, 临界应力 σ_c 为 θ 相对于应力值的二次导数为零的点 ($\partial^2\theta/\partial^2\sigma_c = 0$), 临界应变 ε_c 可由 σ_c 在真应力-真应变曲线上得到。

20Cr2Ni4A 钢的加工硬化曲线如图 4 所示。在相同应变速率下的峰值应力 σ_p 和临界应力 σ_c 随着变形温度的增加逐渐减小; 在相同变形温度下, 试验钢的 σ_p 和 σ_c 值随着应变速率的增大也随之增加。20Cr2Ni4A 钢的热加工难易程度随着应变速率的增大和变形温度的降低而变得困难。

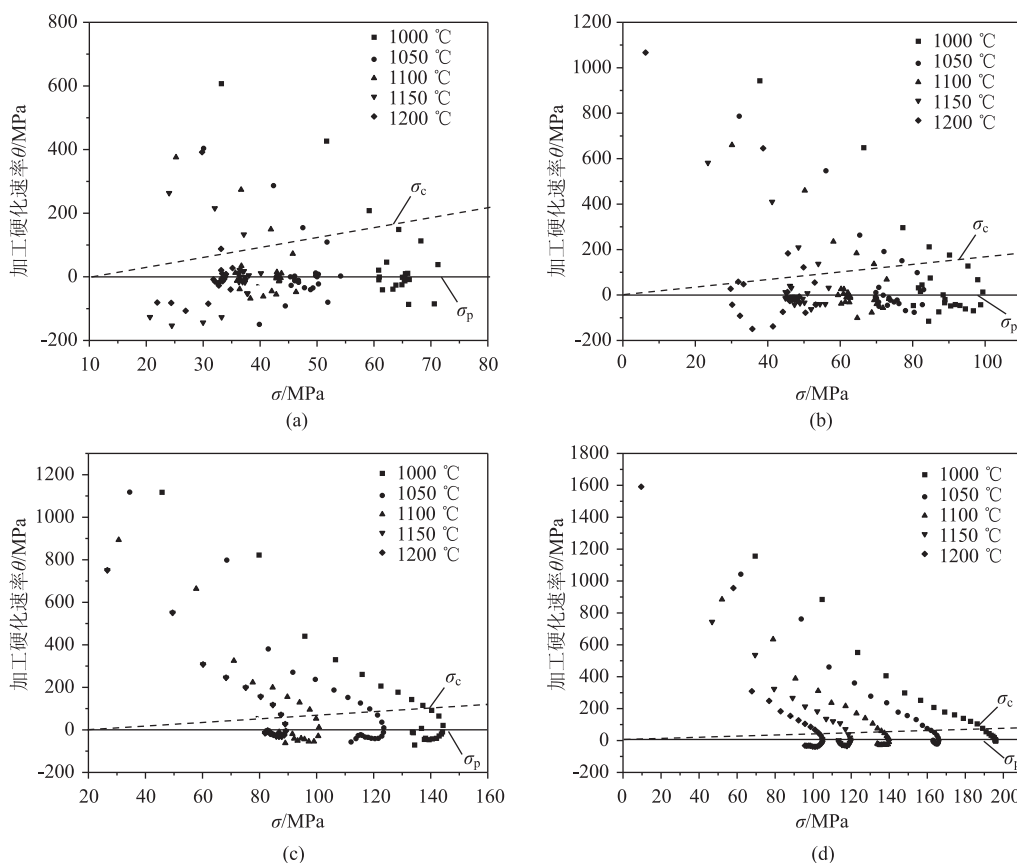


图 4 20Cr2Ni4A 钢在不同变形条件下的加工硬化曲线

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

Fig. 4 Work hardening curves of 20Cr2Ni4A steel at different deformation conditions

17Cr2Ni2MoVNb 钢的加工硬化曲线如图 5 所示。17Cr2Ni2MoVNb 钢的峰值应力 σ_p 和临界应力 σ_c 随着应变速率和变形温度的变化而变化, 与 20Cr2Ni4A 钢相同, 17Cr2Ni2MoVNb 钢的 σ_p 和 σ_c 随着应变速率的增加和变形温度的降低而变大。17Cr2Ni2MoVNb 钢同样适合在低应变速率和高变形温度下进行加工。

在研究动态再结晶 (Dynamic Recrystallization, DRX) 动力学过程中, 研究人员 [8-9] 发现临界应

力 σ_c 、峰值应力 σ_p 、临界应变 ε_c 和峰值应变 ε_p 随 Zener-Hollomon 参数 (Z) 的变化而变化。图 6 为两种试验钢的特征值与 Z 参数之间的关系。可以看出 σ_c 、 σ_p 、 ε_c 和 ε_p 随着 Z 参数的增大而增大。

σ_c 、 σ_p 、 ε_c 和 ε_p 与 Z 参数之间存在线性关系, 其关系如式 (1) 所示:

$$P = C \times Z^K \quad (1)$$

式中: P 为机械性能参数; C 和 K 为与材料化学成

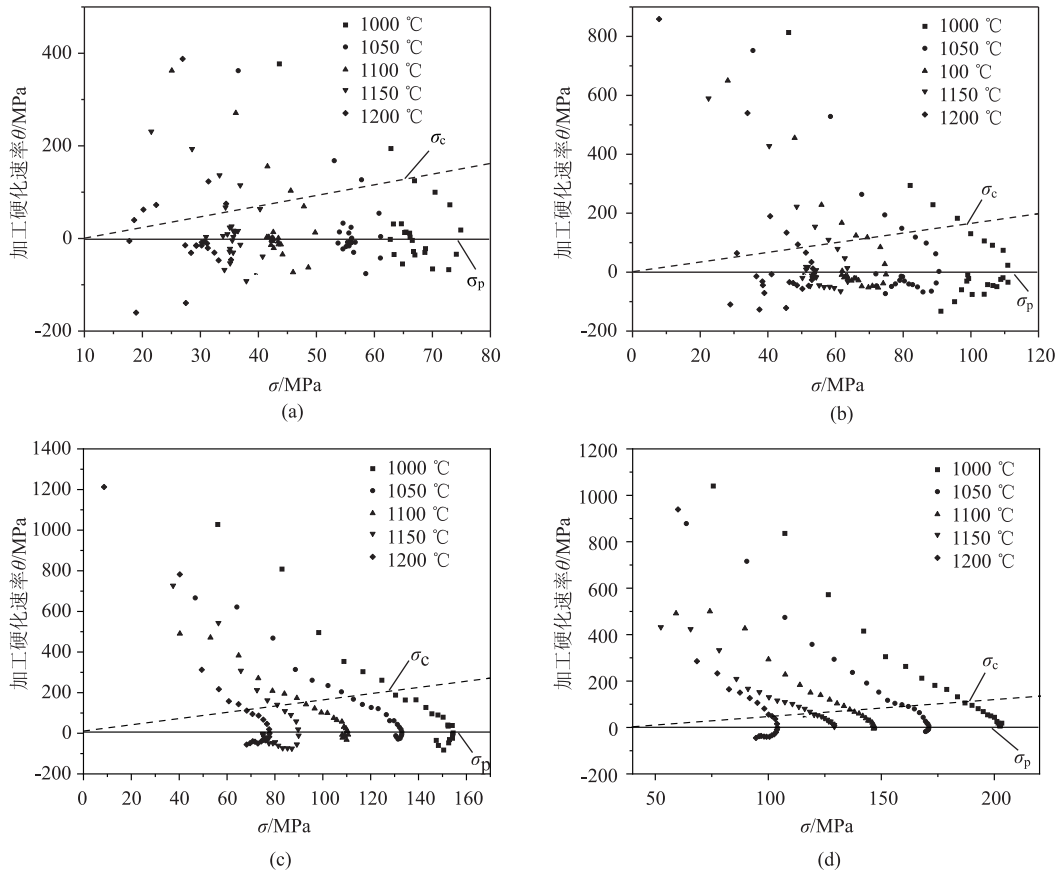
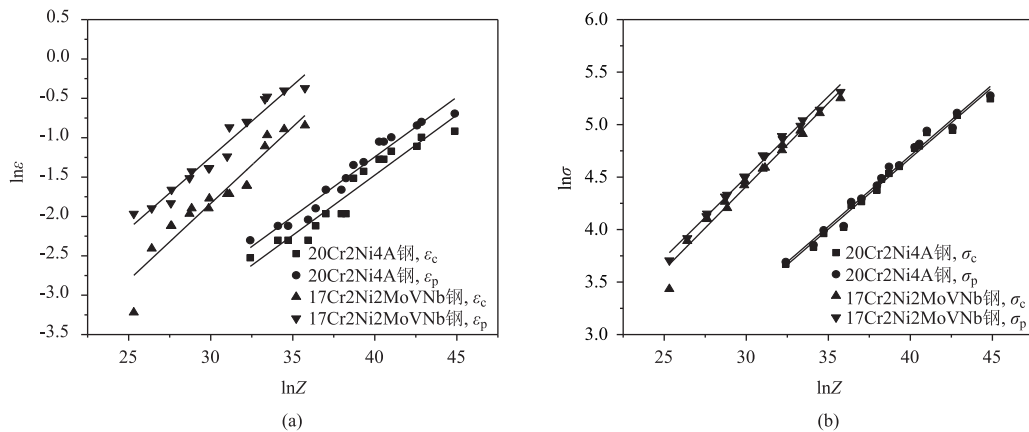


图 5 17Cr2Ni2MoVNb 钢在不同变形条件下的加工硬化曲线

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

Fig. 5 Work hardening curves of 17Cr2Ni2MoVNb steel at different deformation conditions

图 6 两种试验钢的 $\ln \varepsilon$ - $\ln Z$ (a) 和 $\ln \sigma$ - $\ln Z$ (b) 线性关系Fig. 6 Linear relationships between $\ln \varepsilon$ - $\ln Z$ (a) and $\ln \sigma$ - $\ln Z$ (b) for two kinds of test steels

分相关的常数。

对所得曲线进行线性回归分析,得到的特征值与 Z 参数之间的关系如表 2 所示。

根据图 6 和表 2 可以看出, 20Cr2Ni4A 钢的峰值应力 σ_p 和临界应力 σ_c 均小于 17Cr2Ni2MoVNb

钢。两种试验钢中不同含量的 Nb、Mo 和 Ni 元素对 σ_p 和 σ_c 有不同程度的影响。在相同变形条件下, σ_p 和 σ_c 随着 Mo 含量的增加而增加,这主要是由于 Mo 的溶质拖曳作用,降低了晶界迁移率^[10];同时, Mo 会与 C 形成 Mo-C 簇,抑制 C 在奥氏体中的活

表 2 20Cr2Ni4A 钢和 17Cr2Ni2MoVNB 钢的特征值和 Z 参数的关系

Table 2 Relationship between characteristic values and Z parameters of 20Cr2Ni4A and 17Cr2Ni2MoVNB steels

关系	20Cr2Ni4A 钢	17Cr2Ni2MoVNB 钢
$\ln \varepsilon_c - \ln Z$	$\varepsilon_c = 1.1409Z^{1.2011}$	$\varepsilon_c = 1.1391Z^{0.1947}$
$\ln \varepsilon_p - \ln Z$	$\varepsilon_p = 1.1464Z^{0.1518}$	$\varepsilon_p = 1.1606Z^{0.1822}$
$\ln \sigma_c - \ln Z$	$\sigma_c = 0.4816Z^{0.1353}$	$\sigma_c = 1.4158Z^{0.1586}$
$\ln \sigma_p - \ln Z$	$\sigma_p = 0.4951Z^{0.1352}$	$\sigma_p = 0.8967Z^{0.1536}$

性,从而减少 NbC 析出,使更多含量的 Nb 发生固溶,固溶的 Nb 对动态再结晶的抑制效果更为显著, σ_p 和 σ_c 也随之提高^[11]。20Cr2Ni4A 钢中较高含量的 Ni 元素会降低热加工过程中的 σ_p 值,降低材料的热变形难度^[12]。两种试验钢之间的元素种类及含量的差别导致了 17Cr2Ni2MoVNB 钢的 σ_p 和 σ_c 大于 20Cr2Ni4A 钢。

2.3 本构方程

Z 参数是表示变形温度和应变速率对材料热加工性能的影响的重要参数^[13]。如图 7 所示,两种试验钢的应变硬化指数 n 和热变形激活能 Q 值,可分别通过 $\ln \dot{\varepsilon} - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ 和 $\ln [\sinh(\alpha\sigma)] - T^{-1}$ 之间的线性关系得到。通过图 7e 和图 7f 中 $\ln Z$ 和 $\ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ 的关系得到 20Cr2Ni4A 钢的 $\ln A = 38.69$ 和 17Cr2Ni2MoVNB 的 $\ln A = 27.12$, 其中, A 为不同应力水平下材料的相关系数, α 为应力水平参数。

在热加工过程中,变形温度和应变速率直接影响材料的流动应力, Z 参数可以联系三者之间的关系,其表达式为^[14]:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

$\dot{\varepsilon}$ 在不同应力水平下的表达式不同,见式 (3):

$$\dot{\varepsilon} = \begin{cases} A_1 \sigma^{n_1} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), & \alpha\sigma < 0.8 \\ A_2 \exp(\beta\sigma) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), & \alpha\sigma > 1.2 \\ A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), & \text{所有 } \sigma \end{cases} \quad (3)$$

式中: A_1 、 A_2 为不同应力水平下材料的相关系数; σ 为变形应力, MPa; R 为摩尔气体常数, 取为 $8.314 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$; T 为变形温度, K; β 、 n_1 和 n 为材料常数; α 为应力水平参数, $\alpha = \beta/n_1$ 。

利用真应力-真应变曲线中的峰值应力建立了

两种试验钢的 Arrhenius 本构方程, 表达式分别如式 (4) 和式 (5) 所示, 其中, 17Cr2Ni2MoVNB 钢的热变形激活能为 $374 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 20Cr2Ni4A 钢的热变形激活能为 $324 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

17Cr2Ni2MoVNB 钢:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{374407}{RT}\right) = 6.2093 \times 10^{16} [\sinh(0.0101\sigma)]^{7.5044} \quad (4)$$

20Cr2Ni4A 钢:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{323920}{RT}\right) = 2.1841 \times 10^{15} [\sinh(0.0108\sigma)]^{7.166} \quad (5)$$

20Cr2Ni4A 钢的热变形激活能较 17Cr2Ni2MoVNB 钢降低 $50 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 主要为两种试验钢的元素含量不同所导致的, 合金元素 Ni、Mo 和 Nb 会降低 Fe 的自扩散性, 并相应地提高热变形激活能。在添加相同含量的元素的情况下, 不同元素对钢的热变形激活能有不同程度的影响, 合金元素对 Q 的影响顺序为 $\text{Nb} < \text{Mo} < \text{Ni}$ ^[12,15]。17Cr2Ni2MoVNB 钢中 Mo 和 Nb 的含量较 20Cr2Ni4A 钢分别高 0.2% 和 0.03%, Ni 的含量低 2%。在微合金钢中添加 0.2% 的 Mo, 钢的热变形激活能提高 $35 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ^[15]; 在高温下, 发生固溶的 Nb 的质量分数每增加 1%, 可使得钢的热变形激活能提高 $1600 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ($Q = (322.9 \pm 8.4) + (1599.9 \pm 137.7) [\text{Nb}] (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$), 其中 $[\text{Nb}]$ 为 Nb 的质量分数^[16], 17Cr2Ni2MoVNB 钢中 Nb 使变形激活能提高 $50 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$; 随着 Ni 含量降低约 2%, 热变形激活能也会相应降低 $80 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ^[12]。同时, Nb 对激活能的影响主要在于固溶于奥氏体的含量, Nb 的固溶含量不仅与 Nb 含量有关, 还与 C 含量有一定关系。随着 C 含量的增加, Nb 的固溶含量越多, 对变形激活能的提高作用越明显^[17]。由于 Ni、Mo 和 Nb 元素及其不同含量对热变形激活能有不同程度的影响, 导致 20Cr2Ni4A 钢的热变形激活能低于 17Cr2Ni2MoVNB 钢。

由于两种试验钢之间的元素含量差异, 导致在相同变形工艺参数下, 20Cr2Ni4A 钢的峰值应力、临界应力和热变形激活能均低于 17Cr2Ni2MoVNB 钢。表明了相同的变形条件下, 20Cr2Ni4A 钢的热加工难度要小于 17Cr2Ni2MoVNB 钢。17Cr2Ni2MoVNB 钢中的 Nb 起到抑制动态再结晶和提高热变形激活能的作用, 并不利于热加工性能。但 Nb 在钢中具有细化晶粒的作用, 同时高温下可以有效抑制组织晶粒长大^[16], 对热加工后的组织

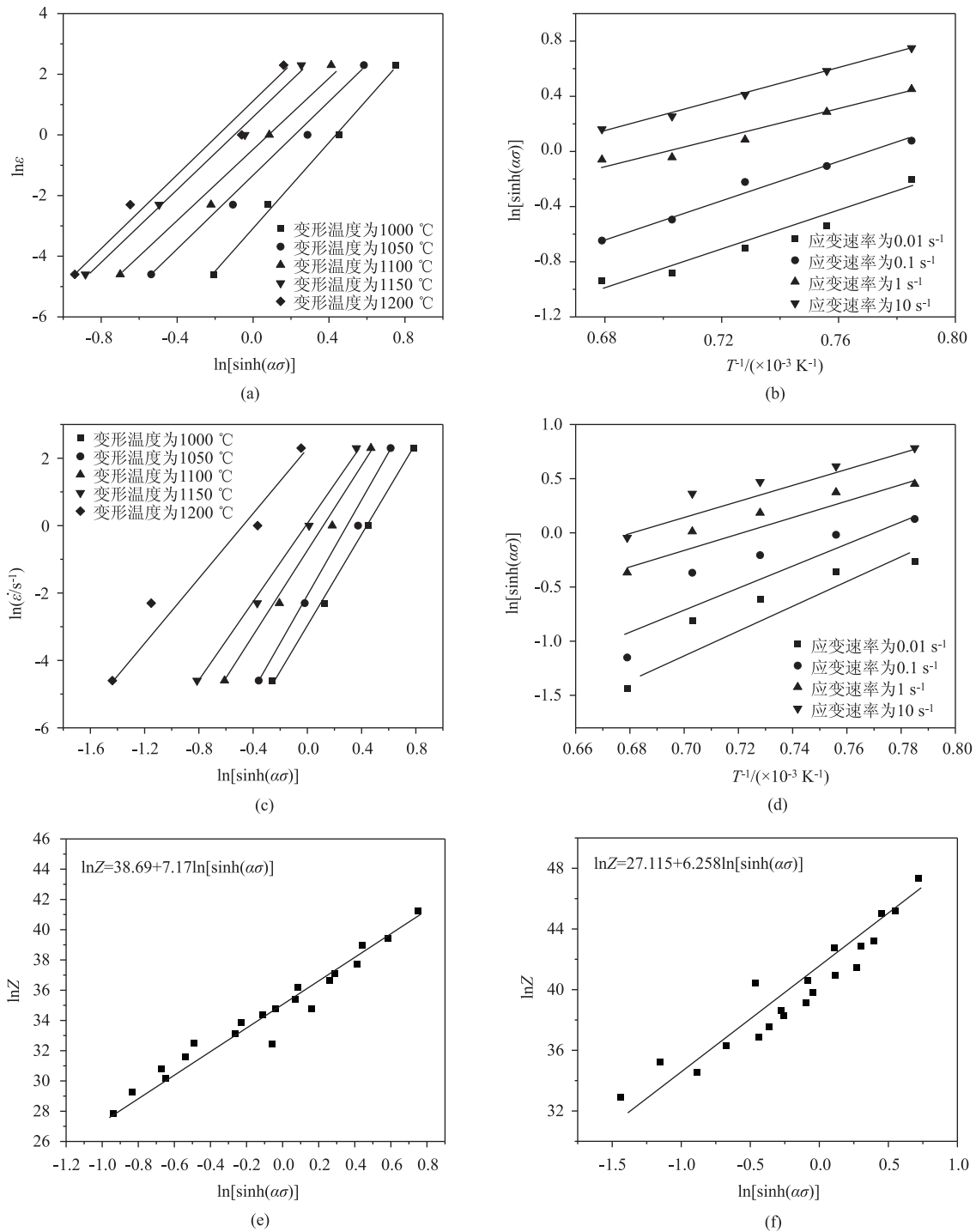


图 7 20Cr2Ni4A 钢和 17Cr2Ni2MoVNb 钢的线性关系

(a) 20Cr2Ni4A, $\ln \dot{\epsilon} - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ (b) 20Cr2Ni4A, $\ln [\sinh(\alpha\sigma)] - T^{-1}$ (c) 17Cr2Ni2MoVNb, $\ln \dot{\epsilon} - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$
 (d) 17Cr2Ni2MoVNb, $\ln [\sinh(\alpha\sigma)] - T^{-1}$ (e) 20Cr2Ni4A, $\ln Z - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ (f) 17Cr2Ni2MoVNb, $\ln Z - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$

Fig. 7 Linear relationships of 20Cr2Ni4A and 17Cr2Ni2MoVNb steels

和性能的把控至关重要。

3 结论

(1) 17Cr2Ni2MoVNb 钢和 20Cr2Ni4A 钢的真应力-真应变曲线在低应变速率下均表现出明显的动态

再结晶；在高应变速率下，20Cr2Ni4A 钢在 1000 °C 以上的变形温度下表现出动态再结晶行为，而 17Cr2Ni2MoVNb 钢在 1000 ~ 1150 °C 的变形温度下表现出动态回复行为。

(2) 构建了两种试验钢的本构方程，

17Cr2Ni2MoVNb 齿轮钢的本构方程为: $Z = \dot{\epsilon} \times \exp\left(\frac{374407}{RT}\right) = 6.2093 \times 10^{16} [\sinh(0.0101\sigma)]^{7.5044}$;

20Cr2Ni4A 齿轮钢的本构方程为: $Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{323920}{RT}\right) = 2.1841 \times 10^{15} [\sinh(0.0108\sigma)]^{7.166}$ 。

(3) 17Cr2Ni2MoVNb 钢中 Nb 和 Mo 的含量对变形激活能和应力特征值的影响相较于 20Cr2Ni4A 钢中 Ni 的影响更为显著。

参考文献:

- [1] 杜劲峰, 赵文军, 洪振军. 17Cr2Ni2MoVNb 和 20Cr2Ni4A 钢齿轮渗碳质量与弯曲疲劳寿命的试验研究 [J]. 金属热处理, 2014, 39 (7): 12-18.
Du S F, Zhao W J, Hong Z J. Carburizing quality and bending fatigue life of 17Cr2Ni2MoVNb and 20Cr2Ni4A steel gears [J]. Heat Treatment of Metals, 2014, 39 (7): 12-18.
- [2] 伦建伟, 刘伟, 杨洋, 等. 35CrMoV 钢高温塑性变形行为及其本构方程建立 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (3): 216-220.
Lun J W, Liu W, Yang Y, et al. High temperature plastic deformation behavior and constitutive equation establishment of 35CrMoV steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (3): 216-220.
- [3] 张文汉. V-Nb 微合金化齿轮钢及其热处理工艺和力学性能的研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2007.
Zhang W H. A Study on Fabrication, Heat-treatments and Mechanical Properties of V-Nb Microalloyed Gear Steel [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2007.
- [4] 周洪刚, 朱旭, 刘克, 等. 17Cr2Ni2MoVNb 钢的渗碳淬火工艺 [J]. 金属热处理, 2019, 44 (10): 117-121.
Zhou H G, Zhu X, Liu K, et al. Carburizing and quenching process of 17Cr2Ni2MoVNb steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44 (10): 117-121.
- [5] 马潇, 徐乐, 王毛球, 等. 25Cr3Mo3NiNbZr 钢热变形行为及微观组织研究 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (19): 23-29.
Ma X, Xu L, Wang M Q, et al. Study on hot deformation behavior and microstructure of 25Cr3Mo3NiNbZr steel [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (19): 23-29.
- [6] Prasad Y V R K, Seshacharyulu T. Modelling of hot deformation for microstructural control [J]. International Materials Reviews, Taylor & Francis, 1998, 43 (6): 243-258.
- [7] Poliak E I, Jonas J J. A one-parameter approach to determining the critical conditions for the initiation of dynamic recrystallization [J]. Acta Materialia, 1996, 44 (1): 127-136.
- [8] Jonas J J, Quelennec X, Lan J, et al. The Avrami kinetics of dynamic recrystallization [J]. Acta Materialia, 2009, 57 (9): 2748-2756.
- [9] Moreira A, Junior J, Balancin O. Prediction of steel flow stresses under hot working conditions [J]. Materials Research, 2005, 8 (3): 309-315.
- [10] Thomas Schambron, Chen L, Taliah Gooch, et al. Effect of Mo concentration on dynamic recrystallization behavior of low carbon microalloyed steels [J]. Steel Research International, 2013, 84 (12): 1191-1195.
- [11] Mejía I, Salas-Reyes A E, Bedolla-Jacuinde A. Effect of Nb and Mo on the hot ductility behavior of a high-manganese austenitic Fe-21Mn-1.3Al-1.5Si-0.5C TWIP steel [J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 616: 229-239.
- [12] 赵漫漫, 秦森, 冯捷, 等. Al、Ni 对 1Cr9Al(1~3)Ni(1~7)WVNb 钢热变形行为的影响 [J]. 金属学报, 2020, 56 (7): 960-968.
Zhao M M, Qin S, Feng J, et al. Effect of Al and Ni on hot deformation behavior of 1Cr9Al(1~3)Ni(1~7)WVNb steel [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56 (7): 960-968.
- [13] Medina S F, Hernandez C A. General expression of the Zener-Hollomon parameter as a function of the chemical composition of low alloy and microalloyed steels [J]. Acta Materialia, 1996, 44 (1): 137-148.
- [14] Zener C, Hollomon J H. Effect of strain rate upon plastic flow of steel [J]. Journal of Applied Physics, 1944, 15 (1): 22-32.
- [15] Seok M Y, Choi I C, Zhao Y, et al. Microalloying effect on the activation energy of hot deformation [J]. Steel Research International, 2015, 86 (7): 817-820.
- [16] Cao Y, Xiao F, Qiao G, et al. Quantitative research on effects of Nb on hot deformation behaviors of high-Nb microalloyed steels [J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 530: 277-284.
- [17] Mannan P, Kostyrychev A G, Zurob H, et al. Hot deformation behaviour of Ni-30Fe-C and Ni-30Fe-Nb-C model alloys [J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 641: 160-171.

