

· 产品研发 ·



汽车前轴用贝氏体非调质钢 25MnCrVS 的热压缩变形行为

周发明¹, 朱国军¹, 赵佑旭¹, 胡涛麟², 倪燕红³, 葛锐²

(1 湖北三环车桥有限公司, 襄阳 441700; 2 武汉科技大学, 武汉 430080;

3 高品质特殊钢湖北省重点实验室, 黄石 435001)

摘要: 贝氏体非调质钢在高强韧结构部件领域具有广阔的应用前景。其在传统 Mn-Cr 系贝氏体非调质钢的基础上, 通过添加少量 Ni 元素, 研制了一种新型贝氏体非调质钢。钢中多元素协同调控赋予了材料潜在的性能优势, 但需要制定合理的锻压工艺来激活这些潜力。通过在 Gleeble-3500 热模拟试验机上完成了不同温度 (950 ~ 1 150 °C) 和不同应变速率 (0.01 ~ 10 s⁻¹) 下的高温压缩试验, 研究了该种贝氏体非调质钢的热变形行为。建立了含 Z 参数的 Arrhenius 本构方程, 可以很好预测其高温流变行为。基于动态材料模型及微观组织验证, 建立了在 0.7 真应变下的热加工图。所得最优的热加工工艺变形温度为 1 050~1 150 °C, 应变速率为 0.01 ~ 0.22 s⁻¹。热锻的应变速率应低于 0.22 s⁻¹ 来规避变形过程的流变失稳现象。

关键词: 非调质钢; 热压缩; 本构方程; 热加工图; 微观结构

DOI: 10.20057/j.1003-8620.2025-00156 **中图分类号:** TG 142

Research on Hot Compression Deformation Behavior of Bainitic Non-Quenched and Tempered Steel 25MnCrVS for Automobile Front Axle

Zhou Faming¹, Zhu Guojun¹, Zhao Youxu¹, Hu Taolin², Ni Yanhong³, Ge Rui²

(1 Hubei Sanhuan Axle Co., Ltd., Xiangyang 441700, China; 2 Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430080, China; 3 Hubei Provincial Key Laboratory of High-quality Special Steel, Huangshi 435001, China)

Abstract: Bainitic non-quenched and tempered steel has broad application prospects in the field of high-strength and tough structural components. On the basis of traditional Mn-Cr series bainitic non-quenched and tempered steel, a new type of bainitic non-quenched and tempered steel has been developed by adding small amounts of Ni and V elements. The synergistic control of multiple elements in steel gives the potential performance advantages of the material, but it is necessary to develop a reasonable forging process to activate these potentials. The high-temperature compression tests under different temperatures (950 °C-1 150 °C) and different strain rates (0.01 s⁻¹-10 s⁻¹) were carried out on the Gleeble-3500 thermal simulation testing machine to study the hot deformation behavior of this bainitic non-quenched and tempered steel. Furthermore, an Arrhenius constitutive equation containing the Z parameter was established, which can well predict its high-temperature flow behavior. In addition, based on the dynamic material model and microstructure verification, a hot working diagram under a true strain of 0.7 was established. The obtained optimal hot working process range was as follows, the deformation temperature range was 1 050 °C-1 150 °C, and the strain rate range was 0.01 s⁻¹-0.22 s⁻¹. The strain rate of hot forging should be lower than 0.22 s⁻¹ to avoid the flow instability phenomenon during the deformation process.

Key Words: Non-quenched and Tempered Steel; Thermal Compression; Constitutive Equation; Thermal Processing Map; Microstructure

锻压成形作为制造业不可或缺的加工方式, 广泛应用于汽车、机械、船舶等领域结构部件的加工制造; 节能环保是锻压行业未来可持续发展的重要方向。我国锻压行业普遍采用的高温锻压、淬火与回火调质、车铣精加工等传统生产工艺, 流程冗长,

能耗及碳排放高。同时, 零件调质过程中变形严重、易开裂, 成品率低。国外研究与应用表明, 采用非调质钢进行精密锻压成型、并结合在线热处理一体化工艺的短流程制造新技术, 可很好地解决了上述痛点问题^[1-2]。非调质钢锻件在欧美市场的汽车

基金项目: 湖北省重点研发计划资助项目(2023BCB080)

作者简介: 周发明(1975-), 男, 本科, 高级工程师; **E-mail:** zfm75730@163.com; **收稿日期:** 2025-06-27

通信作者: 葛锐(1982-), 男, 博士, 教授; **E-mail:** gerui@wust.edu.cn

发动机曲轴、连杆、前轴等非承载部件已批量应用；其主要采用珠光体+铁素体型非调质中碳钢来制造，锻件抗拉强度级别通常处于 650~800 MPa 之间。然而，对于商用与客车车桥、转向节等承载型零部件，因服役条件恶劣载荷大，其制造非调质钢锻件的强度级别高达 800 MPa 以上，则需用贝氏体型或马氏体型非调质钢进行加工制造^[2-4]。

贝氏体型非调质钢是通过添加 Mo、Ni、W、B 等贝氏体相区扩大元素，以使其在较宽泛的冷速范围内能够得到强韧性配合良好的贝氏体组织；其主要分为 Mo-B 系、Mn-B 系、Mn-Si-Mo 系等^[5]。胡芳忠等^[6]研究了 Mn-Cr 系贝氏体非调质钢中的 V、Ti 微合金化元素对其组织及力学性能的影响；Liu 等^[7]指出 V 对贝氏体非调质钢抗疲劳性能具有积极影响；Bacalhau 等^[8]阐明了 Ni 元素对于提升贝氏体非调质钢的低温韧性和淬透性的作用机制。综上，为了获得高强韧的贝氏体非调质钢，需实现合适元素调控和热机械加工工艺参数匹配，进而获得强韧性优异的组织结构。同时，现有的金属材料热变形行为研究表明^[9-10]，应变速率、热变形温度将显著影响材料的微观组织变化。安治国等^[11]研究了汽车前轴贝氏体非调质钢的连续冷却转变规律，发现在高于 0.1 °C/s 冷速均能得到贝氏体组织，且随着冷速增大材料硬度增加。目前，微合金化与合理的控轧控冷工艺结合是材料组织性能改善的重要环节，实际热变形过程中材料复杂的流变行为仍需要进一步详细阐明。

通过研究汽车前轴用微合金化贝氏体非调质钢 25MnCrVS 的热变形行为，分析热变形温度和应变速率对实验钢的流变应力的影响规律。建立了实验钢含 Z 参数的 Arrhenius 本构方程，并基于 DMM 模型，构建了热加工图；结合材料微观组织变化分析了其高温变形机制。相关成果可为非调质钢 25MnCrVS 锻压工艺制定和应用实践提供重要参考。

1 实验材料及方法

实验材料选用一种新型微合金化贝氏体型非调质钢(25MnCrVS)；该材料主要在 Mn-Cr 系非调质钢基础上增加了 Ni 元素，以期提高材料的综合力学性能。其化学成分见表 1。

通过线切割将试样制成 $\phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 的圆柱体试样，并采用 Gleeble-3800 热模拟试验进行高温压缩实验。具体的压缩工艺如下：设置变形温度为

表 1 25MnCrVS 钢的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of 25MnCrVS steel %										
C	Si	Mn	P	S	V	Cr	Ni	Al	N	O
0.25	0.36	1.96	0.014	0.043	0.11	0.56	0.12	0.12	0.05	0.02

950、1 000、1 050、1 100、1 150 °C，升温的速率为 10 °C/s，保温 1 min；以恒定变形速率(0.01、0.10、1、10 s⁻¹)，将试样压缩至原始长度的 50%。全程记录热压缩过程中的应力、应变数据，用于后续分析处理。

2 实验结果

图 1 是实验钢高温热压缩变形的应力应变曲线。变形过程的初始阶段，加工硬化效应导致材料应力急剧增加；随后在高温的动态软化机制作用下，曲线中应力增加速率减缓，当应变累计到临界值时，材料发生动态回复和动态再结晶。实验钢的流变应力对应变速率尤其敏感；当应变速率高于 1 s⁻¹ 时，流变应力曲线呈现出加工硬化特征，流变应力逐渐增大。应变速率 0.1 s⁻¹ 的材料曲线呈现典型的动态回复特征；即随着应变增加，材料应力最终趋于稳定。当应变速率降低至 0.01 s⁻¹ 时，此时的应变速率较慢，动态再结晶过程得以更加充分地进行；实验钢压缩曲线呈现典型的动态再结晶特征，即流变应力随应变增大出现下降趋势，随后趋于稳定。

表 2 统计了不同应变速率和变形温度下实验钢的峰值应力。相同变形温度条件下，实验钢的峰值应力随着应变速率的增加而增加。材料在热压缩过程中，动态软化机制在低应变率下有更多的时间去充分发挥作用，对应的峰值应力明显低于高应变率结果。

3 分析讨论

3.1 本构方程

在对材料的热塑性研究中，流变应力是描述高温变形的一项重要力学指标。当材料确定了成分和变形量后，变形温度、应变速率和流动应力之间关系可通过 Sellars 和 Tegart 提出的 Arrhenius 本构关系模型如式(1)^[12]。

$$\dot{\varepsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma_p)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (\text{for all } \sigma) \quad (1)$$

式中， $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率，s⁻¹； σ_p 为峰值应力，MPa；Q 为热变形激活能，kJ/mol；R 为标准摩尔气体常数(8.314 J/mol/K)；T 为热变形温度，K。

Zener 和 Hollomon^[13]通过加入温度补偿速率因

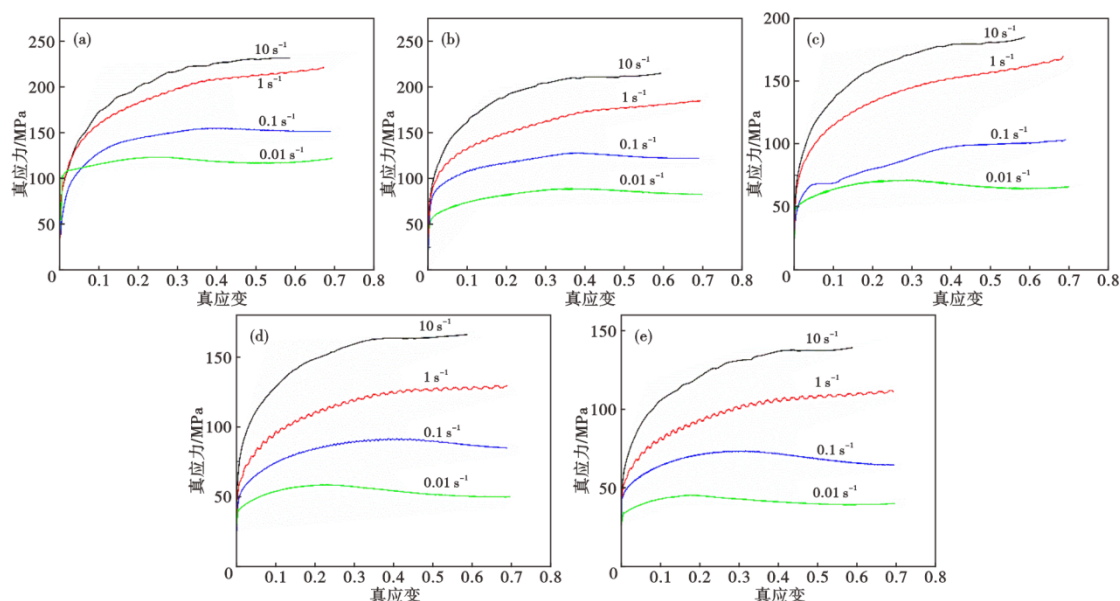


图 1 25MnCrVS 钢高温压缩应力应变曲线 (a) T=950 °C, (b) T=1 000 °C, (c) T=1 050 °C, (d) T=1 100 °C, (e) T=1 150 °C

Fig. 1 Stress-strain curves of 25MnCrVS steel under high-temperature compression (a) T=950 °C, (b) T=1 000 °C, (c) T=1 050 °C, (d) T=1 100 °C, (e) T=1 150 °C

表 2. 25 MnCrVS 钢的峰值应力

Table 2 Peak stresses of the 25MnCrVS steel

应变速率/s ⁻¹	变形温度/°C				
	950/ MPa	1 000/ MPa	1 050/ MPa	1 100/ MPa	1 150/ MPa
10	235.1	223.9	185.8	171.1	141.3
1	224.2	186.7	171.1	133.0	113.6
0.1	154.7	128.1	103.5	91.6	75.2
0.01	123.4	89.3	71.1	58.7	45.6

子,修正了变形速率和变形温度对材料热变形行为的影响,其考虑外部加工条件(T、 $\dot{\epsilon}$)对加工过程中流变应力的表达式如式 2。

$$Z = A [\sinh(\alpha\sigma_p)]^n \quad (2)$$

式中, n 、 α 和 A 均为材料常数,只与材料本身性质相关。

通过对公式(1)和式(2)实施对数运算,分别可得到式(3)、式(4)。

$$\ln\dot{\epsilon} = \ln A - \frac{Q}{RT} + n \ln [\sinh(\alpha\sigma_p)] \quad (3)$$

$$\ln Z = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha\sigma_p)] \quad (4)$$

通过等式(3)和式(4)可知,在变形温度恒定的前提下, σ_p 和 $\ln\dot{\epsilon}$, $\ln\sigma_p$ 和 $\ln\alpha$ 之间均具有线性关系。借助线性拟合手段,对热压缩进程中的数据加以处理可得 α 、 n 、 A 等材料特征参数。其中, α 和应变速率 $\dot{\epsilon}$ 以及峰值应力 σ_p 之间关系如式(5)。

$$\alpha = \frac{\left[\frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \sigma_p} \right]_T}{\left[\frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln \sigma_p} \right]_T} \quad (5)$$

以 0.7 应变变量构建本构方程,提取压缩试验结果中应变速率($\dot{\epsilon}$)及峰值应力(σ_p)的值,绘制不同变形速率下 σ_p - $\ln\dot{\epsilon}$ 以及 $\ln\sigma_p$ - $\ln\alpha$ 的线性拟合关系。图 2(a) 和 (b) 为 σ_p - $\ln\dot{\epsilon}$ 与 $\ln\sigma_p$ - $\ln\alpha$ 的线性拟合结果,根据式(5), σ_p - $\ln\dot{\epsilon}$ 与 $\ln\sigma_p$ - $\ln\alpha$ 图像中斜率之比为特征参数 α 。

应变速率恒定时, $\ln [\sinh(\alpha\sigma_p)] - 1/T$ 为线性关系。热变形激活能 Q 可表述为式(6)-式(8)。

$$Q = nR \left[\frac{\partial \ln (\sinh(\alpha\sigma_p))}{\partial \left(\frac{1}{T} \right)} \right]_{\dot{\epsilon}} = nRS \quad (6)$$

其中

$$S = \left[\frac{\partial \ln (\sinh(\alpha\sigma_p))}{\partial \left(\frac{1}{T} \right)} \right]_{\dot{\epsilon}} \quad (7)$$

$$n = \left[\frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln (\sinh(\alpha\sigma_p))} \right]_T \quad (8)$$

结合等式(7)和(8), S 值和 n 值分别为

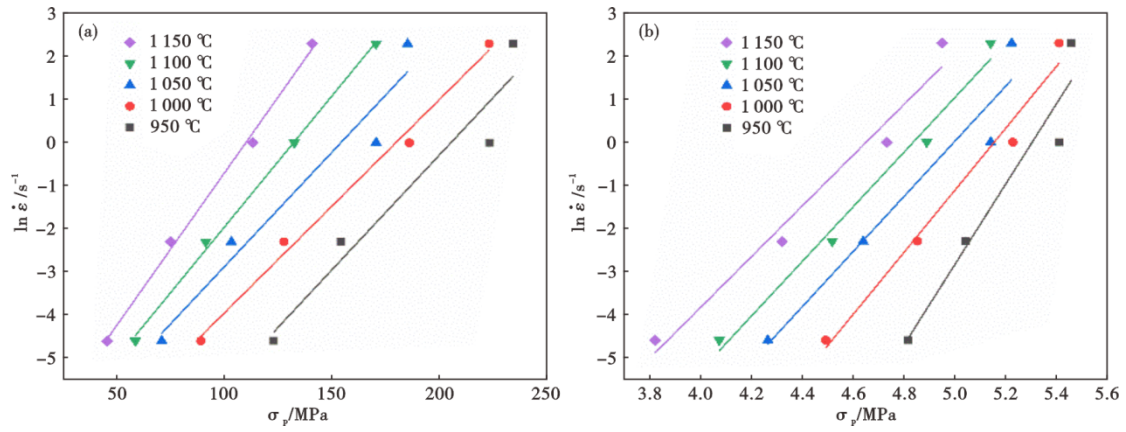


图 2 线性拟合关系图:(a) σ_p - $\ln \dot{\epsilon}$, (b) $\ln \sigma_p$ - $\ln \dot{\epsilon}$
 Fig. 2 Linear fitting relationship diagram : (a) σ_p - $\ln \dot{\epsilon}$, (b) $\ln \sigma_p$ - $\ln \dot{\epsilon}$

$\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)]$ 和 $1/T$ 、 $\ln \dot{\epsilon}$ 和 $\sinh(\alpha\sigma_p)$ 线性拟合后的直线斜率,图 3 (a) (b) 分别为等应变速率下 $\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)]$ 和 $1/T$ 、 $\ln \dot{\epsilon}$ 和 $\sinh(\alpha\sigma_p)$ 函数拟合关系图。将拟合曲线斜率的平均值 S 和 n 代入式(6)后,可得热变形激活能 Q 。经计算,新型贝氏体非调质钢的热变形激活能为 356.47 kJ/mol。其中, Q 值描述了热变形的激活势垒,反映了材料热变形过程阻力的大小。

将等式(2)代入到等式(1)后求解,可得 Z 因子表达式如式(9)。

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (9)$$

根据式(4),经 $\ln Z$ 与 $\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)]$ 线性拟合处理后,联立式(7)后可得热变形因子 Z 。

图 4 为 $\ln Z$ - $\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)]$ 的函数拟合关系图,可求得特征参数 $A=1.2616 \times 10^{13}$, $n=5.11$ 。结果具

有较好的线性关系,置信区间为 97.7%。

将上述求得的 Q, A, α, n 代入式(1)后,可得新型 T23 钢的热压缩本构方程如式(10)所示。

$$\dot{\epsilon} = 1.2616 \times 10^{13} \left[\sinh(0.008 \sigma_p) \right]^{5.11} \exp\left(- \frac{356574}{RT} \right) \quad (10)$$

峰值应力与 Z 因子间存在式(11)关联。

$$Z = 1.2616 \times 10^{13} \left[\sinh(0.008 \sigma_p) \right]^{5.11} \quad (11)$$

经整理推导式(1),可得流变应力与 Z 参数的关系式如下:

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{A} \right)^{\frac{1}{n}} + \sqrt{\left(\frac{Z}{A} \right)^{\frac{2}{n}} + 1} \right\} \quad (12)$$

进而将 α 代入式(10),可构建新型 T23 钢热压缩过程中的流变应力与参数 Z 的关系。

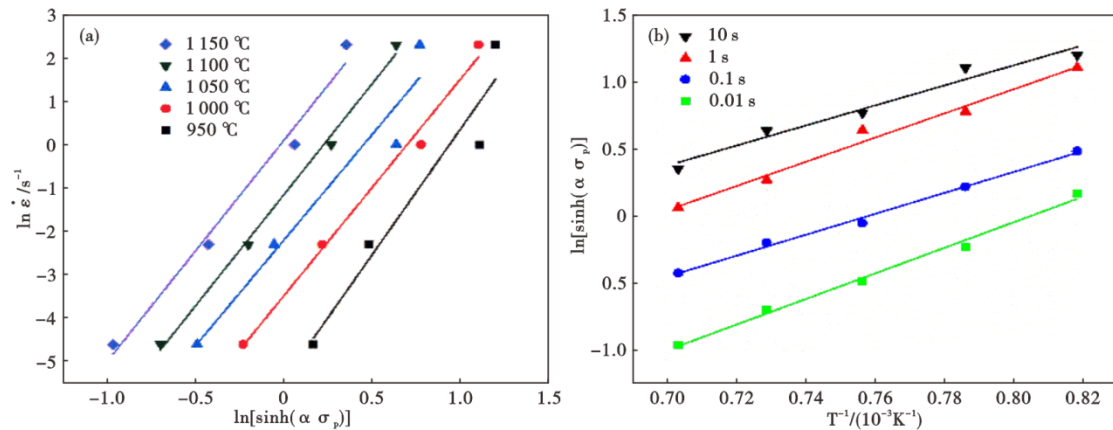


图 3 线性拟合关系图:(a) $\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)]$ - $1/T$, (b) $\ln \dot{\epsilon}$ - $\sinh(\alpha\sigma_p)$
 Fig. 3 Linear fitting relationship diagram : (a) $\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)]$ - $1/T$, (b) $\ln \dot{\epsilon}$ - $\sinh(\alpha\sigma_p)$

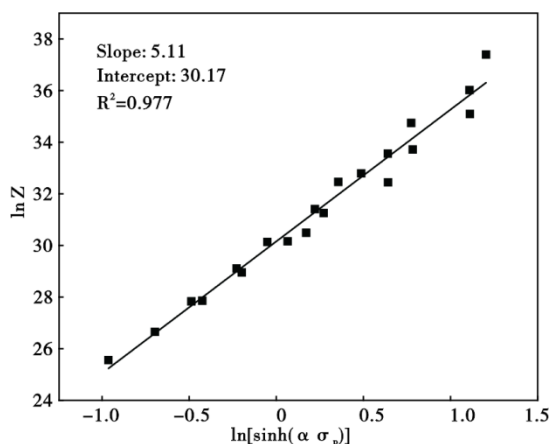


图 4 $\ln Z$ 和 $\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)]$ 之间的线性关系

Fig. 4 Linear relationship between $\ln Z$ and $\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)]$

$$\sigma = \frac{1}{0.008} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{1.2616 \times 10^{13}} \right)^{\frac{1}{5.11}} + \left[\frac{Z}{1.2616 \times 10^{13}} \right]^{\frac{2}{5.11}} + 1 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

3. 2 热加工图及显微组织分析

基于动态材料模型(DMM)理论,热加工图适用于大多数合金系统^[14],通过叠加功率耗散图以及失稳图,构建了如图 5 所示的实验钢的热加工图。图 5 中等高线表示了功率耗散因子百分数,灰色的阴影部分表示材料加工的易失稳区域。由图 5 中热加工图可知,加工工艺区间内出现了两个易失稳区域,失稳区域主要在 950 ~ 1 180 °C, 0.22 ~ 10 s⁻¹ 范围内,对应该区域具有较低的功率耗散因子值 (≤0.26),表明高的应变速率阻碍材料在热变形过程中的组织转变。图 5 中展示较为优异的加工区间

为:变形温度为 1 050 ~ 1 150 °C,应变速率为 0.01 ~ 0.22 s⁻¹。

结合实际生产过程,本研究所用的贝氏体非调质钢主要通过控锻控冷工艺生产,热加工图显示在低于 1 100 °C 下高应变速率下材料的功率耗散系数较低,易于产生加工失稳;当温度高于 1 150 °C 时,功率耗散系数较高,故初锻温度建议高于 1 150 °C 进行,终锻整形工艺温度建议设置在 950~1 050 °C 温度区间,变形速率应低于 0.135 s⁻¹,以避免加工失稳区域。

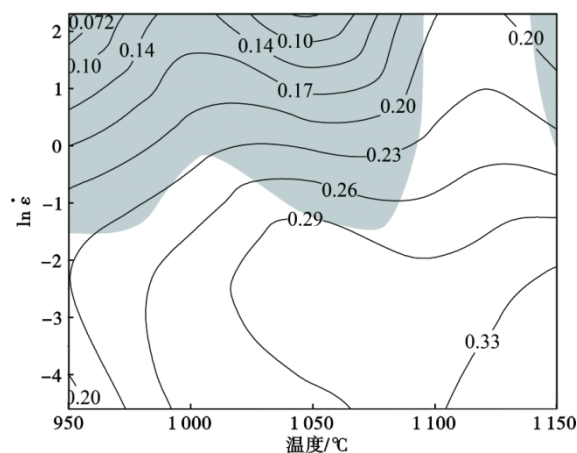


图 5 非调质实验钢的热加工图(真应变为 0.7)

Fig. 5 Hot processing map of the experimental steel (true strain = 0.7)

图 6 为对应压缩工艺下变形后试样的显微组织图片。压缩方向为图中的垂直方向,根据热加工图中的失稳区及高能量耗散区域选取了四个不同工艺试样的微观组织,可见不同工艺下实验钢均形成了典型的板条贝氏体组织。其中,图 6(a)(b)为 10 s⁻¹ 应变速率下以 950、1 150 °C 完成压缩变形,对应的功率耗散值分别为 0.072、0.20。组织均呈现出

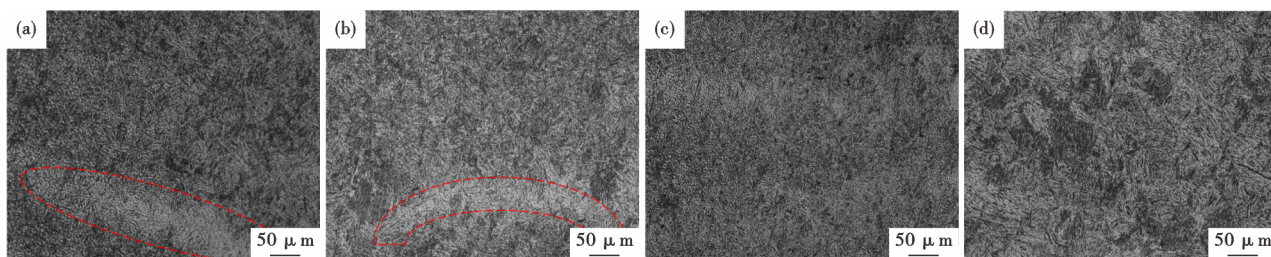


图 6 非调质实验钢的显微组织:(a) T=950 °C, $\dot{\epsilon}=10 \text{ s}^{-1}$; (b) T=1 150 °C, $\dot{\epsilon}=10 \text{ s}^{-1}$; (c) T=1 050 °C, $\dot{\epsilon}=0.01 \text{ s}^{-1}$; (d) T=1 150 °C, $\dot{\epsilon}=0.01 \text{ s}^{-1}$

Fig. 6 Microstructure of non-tempered and tempered experimental steel : (a) T=950 °C, $\dot{\epsilon}=10 \text{ s}^{-1}$; (b) T=1 150 °C, $\dot{\epsilon}=10 \text{ s}^{-1}$; (c) T=1 050 °C, $\dot{\epsilon}=0.01 \text{ s}^{-1}$; (d) T=1 150 °C, $\dot{\epsilon}=0.01 \text{ s}^{-1}$

垂直于压缩方向的不均匀变形组织区域,950 °C 工艺中组织晶粒较为细小,在高应变速率下产生的组织变形协调性较差所致;而 1 150 °C 下晶粒长大后组织变形协调性得到优化,不均匀组织变形区域减小。在低应变速率下(0.01s⁻¹) 950 °C 和 1 150 °C 下都呈现出较好的组织均匀性,未发现明显的变形缺陷。微观组织特征与热加工图对应性良好,进一步验证了热加工图对工艺选择的指导重要性。

4 结论

1) 外部加工条件中的应变速率对新型贝氏体非调质钢实验加工过程中的流动应力影响较大。材料的流动应力随应变速率增加、高温变形温度降低而增加。当应变速率高于 1s⁻¹ 时,实验钢在压缩过程中加工硬化特征占据主导作用,高温软化机制

作用效果欠佳,不利于高温锻压工艺进行。

2) 获取了新型贝氏体钢的热变形激活能为 356.47 kJ/mol; 并通过对实验数据进行系统分析与数学推导,成功构建了融入 Z 参数的本构方程为:

$$\sigma = \frac{1}{0.008} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{1.2616 \times 10^{13}} \right)^{\frac{1}{5.11}} + \left[\frac{Z}{1.2616 \times 10^{13}}^{\frac{2}{5.11}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (14)$$

3) 构建了新型微合金化贝氏体非调质钢的热加工图,通过微观组织验证,获得了最佳的热加工工艺窗口:变形温度的区间为 1 050~1 150 °C,应变速率区间为 0.01 ~ 0.22 s⁻¹,可为实际生产提供理论依据。

参考文献

- [1] 罗灶明. 非调质钢的应用及展望[J]. 福建冶金, 2018, 47(4): 52-56.
- [2] 李桂芬, 王琪, 董瀚. 我国非调质钢的发展与应用[J]. 钢铁研究学报, 1994, (1): 93-98.
- [3] 陈蕴博, 马鸣图, 王国栋. 汽车用非调质钢的研究进展[J]. 中国工程科学, 2014, 16(2): 4-17+45.
- [4] 张明, 张剑锋, 林再勇. 低合金高强度紧固件钢研发现状与发展[J]. 特殊钢, 2025, 46(2): 29-37.
- [5] 刘洁, 吴丹, 杨秀娟, 等. 非调质钢的研究现状及发展趋势[J]. 热加工工艺, 2021, 50(23): 1-6+10.
- [6] 胡芳忠. 中碳贝氏体型非调质钢的组织及疲劳破坏行为的研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2013.
- [7] Liu B, Hui W J, Xie Z Q, et al. Effect of vanadium on fatigue performance of a bainitic forging steel [J]. International Journal of Fatigue, 2023, 167: 107398.
- [8] Bacalhau J B, Moreira Afonso C R. Effect of Ni addition on Bainite Microstructure of Low-Carbon Special Bar Quality Steels and its influence on CCT diagrams [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15: 1266-1283.
- [9] 魏海莲. 中低碳微合金钢及 C-Mn-Al(Si) 高强钢的热变形行为研究[D]. 北京:北京科技大学, 2015.
- [10] Abolghasemzadeh M, Pour H S S, Berto F, et al. Modeling of flow stress of bainitic and martensitic functionally graded steels under hot compression [J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 534: 329-338.
- [11] 安治国, 黄艳新, 侯环宇, 等. 汽车前轴用贝氏体型非调质钢连续冷却转变 [J]. 钢铁, 2016, 51(12): 70-73.
- [12] Sellars C M, McTegart W J. On the mechanism of hot deformation. Acta Metallurgica [J], 1966, 14: 1136-1138.
- [13] Zener C, Hollomon J H. Effect of strain rate upon plastic flow of steel [J]. Journal of Applied Physics, 1944, 15(1): 22-32.
- [14] Lu S Q, X Li, KL Wang, XJ Dong, ZX Li, CX Cao. Dynamic material model theory and its application for controlling microstructures and properties of hot worked materials [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 77-85.