

Cr-Mo-B 系机械工程用钢高温 流变行为及热加工图

Hot deformation and processing map of
Cr-Mo-B mechanical engineering steel

孙 挺, 闫永明, 何肖飞, 尉文超, 杜玉婧
(钢铁研究总院 特殊钢研究所, 北京 100081)

SUN Ting, YAN Yong-ming, HE Xiao-fei, YU Wen-chao, DU Yu-jing
(Institute for Special Steels, Central Iron and Steel Research
Institute, Beijing 100081, China)

摘要: 在变形温度为 850~1150℃、应变速率为 0.1~10s⁻¹ 的条件下, 对 Cr-Mo-B 系机械工程用钢进行高温热压缩实验。基于真应力-应变曲线, 建立输入参数为温度、变形速率、应变和输出参数为流变应力的人工神经网络(ANN)模型。结果表明: 神经网络模型的预测精度高, 其预测流变应力的均方根误差为 1.3858。根据动态材料模型理论(DMM), 构建并分析材料在真应变为 0.5 和 0.7 时的热加工图, 确定了最佳热变形工艺参数: 当真应变 $\epsilon=0.5$ 时, 变形温度为 1050~1150℃、应变速率为 0.1~0.4s⁻¹ 区域的功率耗散因子 $\eta \geq 37.20\%$; 当真应变 $\epsilon=0.7$ 时, 变形温度为 1000~1150℃、应变速率为 0.1~0.6s⁻¹ 区域的功率耗散因子 $\eta \geq 35.80\%$ 。

关键词: 机械工程用钢; 本构模型; 神经网络; 热加工图

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2018.000036

中图分类号: TG115.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2019)09-0055-06

Abstract: The hot deformation behavior of Cr-Mo-B mechanical engineering steel was conducted at deformation temperature of 850-1150℃ and strain rates of 0.1-10s⁻¹. The artificial neural network (ANN) model was developed based on the true stress-strain curves, where the input parameters were deformation temperature, strain rate, strain, and flow stress was the output parameter. The results show that the ANN model is accurate in predicting the flow stress, and the root mean square error is 1.3858. Based on the dynamic material model (DMM), the processing maps of the studied alloy at true strains of 0.5 and 0.7 are constructed to recognize optimum hot deformation regions; the optimum region for the strain of 0.5 is at deformation temperature of 1050-1150℃ and strain rate of 0.1-0.4s⁻¹ with a peak power dissipation factor of about 37.20%, and the optimum region for the strain of 0.7 is at deformation temperature of 1000-1150℃ and strain rate of 0.1-0.6s⁻¹ with a peak power dissipation factor of about 35.80%.

Key words: mechanical engineering steel; constitutive model; neural network; processing map

机械工程用钢是被广泛用于各种磨损工况的一类耐磨材料。机械工程用钢的冶炼、铸造、轧制和热处理工艺不断改进, 综合力学性能、耐磨性能和使用寿命都在逐步提高, 广泛地应用于冶金、矿山、建材、电力等各个领域^[1]。但是, 目前由磨损失效造成的材料浪费和经济损失占国民经济总产值的 4% 左右^[2]。因此, 解决磨损和延长部件使用寿命, 开发出高品质、高性能的机械工程用钢材料成为重要研究方向之一。机械工程用钢由于碳含量和合金含量较高, 轧制过程中容易出现各类产品缺陷, 为获得优良的微观组织

和性能, 研究 Cr-Mo-B 系机械工程用钢的热塑性变形机理, 进而确定其合理的热变形工艺参数有着重要的现实意义。

目前, 国内外关于机械工程用钢的研究主要集中在热处理和合金元素对力学性能的影响方面, 然而金属在热加工过程中同时受到变形温度、形变量和应变速率等的显著影响。材料热变形行为的研究在高温合金^[3-7]、镁铝合金^[8-9]、钛合金^[10]中被广泛应用。在耐磨钢领域, 冯文荣^[11]分析了热处理工艺对工程机械用钢组织与性能的影响。在热变形行为模型的构建方

面,李红英等^[12]通过构建传统 Arrhenius 本构方程分析了 T23 钢热变形行为。袁武华等^[13]基于双曲正弦模型,建立了低碳马氏体不锈钢应变量相关的本构关系模型。程明阳等^[14]采用一元线性回归法建立模型,确定复合材料的平均热变形激活能,导出本构方程并建立热加工图。

本工作对铸态 Cr-Mo-B 系机械工程用钢进行高温压缩实验,研究温度为 800~1150℃,应变速率 $\dot{\epsilon}$ 为 0.1~10s⁻¹。基于真应力-真应变曲线,建立人工神经网络 (artificial neural network, ANN) 模型。同时,基于动态材料模型 (DMM) 和 Murthy 失稳判据建立该材料的热加工图,并确定出适合材料的热加工区域。

1 实验材料与方法

实验钢在实验室真空感应炉冶炼,其主要化学成分如表 1 所示。实验样品取材于铸态 Cr-Mo-B 系机械工程用钢。通过线切割制成 $\phi 8\text{mm} \times 15\text{mm}$ 的圆柱体,并对两端面磨光。在 Gleeble-3800 热模拟实验机上进行高温热压缩实验,实验过程中试样两端面涂一层镍基润滑剂,以减少试样与仪器压头之间摩擦。实验过程中变形温度分别为 850,950,1050℃ 和 1150℃,

应变速率分别为 0.1,1s⁻¹ 和 10s⁻¹,每组试样的最大真应变为 0.9。在整个实验过程中试样均处于真空状态,压缩前以 20℃/s 的加热速率升温到 1200℃,保温 5min,得到均匀的奥氏体组织。然后,以 10℃/s 的速率降温至变形温度并保温 30s,以消除实验试样内部的温度梯度。随后,在设定的温度和应变速率下进行等温压缩,变形结束后对试样进行氦气冷却以保留高温变形组织。

表 1 实验钢的化学成分(质量分数/%)
Table 1 Chemical compositions of the test steel
(mass fraction/%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	B	P	S	Fe
0.33	0.55	1.10	1.10	0.46	0.0017	<0.015	<0.005	Bal

2 结果与分析

2.1 流变应力曲线

基于热压缩实验数据,建立了如图 1 所示的真应力-真应变曲线。由图 1 可知,流变应力对变形温度、应变速率和应变较敏感,材料在热压缩过程中发生了明显的动态回复和动态再结晶现象。总体来看,变形过程可分为 3 个阶段:第 1 阶段(加工硬化),由于变形程度较小,晶内储存能低,内部组织只发生了少量的动

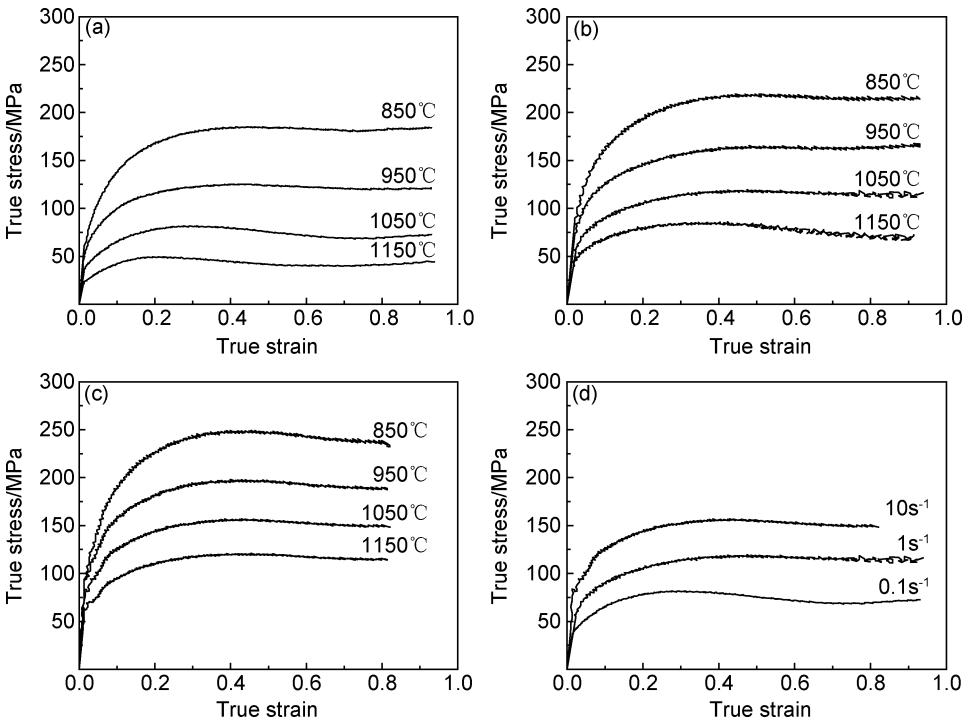


图 1 不同变形条件时 Cr-Mo-B 系机械工程用钢真应力-真应变曲线
(a) $\dot{\epsilon} = 0.1\text{s}^{-1}$; (b) $\dot{\epsilon} = 1\text{s}^{-1}$; (c) $\dot{\epsilon} = 10\text{s}^{-1}$; (d) $T = 1050^\circ\text{C}$

Fig. 1 True stress-strain curves of Cr-Mo-B mechanical engineering steel with different deformation conditions
(a) $\dot{\epsilon} = 0.1\text{s}^{-1}$; (b) $\dot{\epsilon} = 1\text{s}^{-1}$; (c) $\dot{\epsilon} = 10\text{s}^{-1}$; (d) $T = 1050^\circ\text{C}$

态回复,加工硬化作用远大于软化作用,导致流变应力随着应变的增加而迅速升高;第 2 阶段(动态软化),随着变形程度增大,动态再结晶和动态回复带来的软化效应越来越明显,流变应力的升高逐渐减缓至峰值;第 3 阶段(稳态变形),动态回复、动态再结晶带来的软化作用与加工硬化达到动态平衡,真应力-真应变曲线趋于平直。在相同应变下,当温度一定时,随着应变速率的增加,真应力增加,这是位错密度短时间内急剧增加所致的;而当应变速率一定时,随着温度的升高,真应力下降,这是由于温度的升高导致原子间的相互作用减弱,原子的扩散速率加快,位错滑移的阻力变小,但可以看出都不是简单的线性关系。

2.2 人工神经网络模型

人工神经网络模型是一种人工智能系统,具有强大的处理复杂非线性问题的能力。擅长分析输入与输出元素之间内在的多元非线性关系问题,因其极高的准确性而得到越来越多的应用^[15-16]。本工作采用一个三层前馈误差反向传播(back propagation,BP)网络建立 Cr-Mo-B 系机械工程用钢流变应力本构模型,网络模型结构示意图如图 2 所示。BP 算法包括两个过程:信息的正向传递和误差的反向传递。在正向传递过程中,输入信息从输入层经隐含层计算传向输出层,如果在输出层没有得到期望的输出,则计算输出层的误差,然后反向传递。通过网络将误差信号沿原来的连接通路反传回来修改各层神经元的权值和阈值,直至达到期望的目标。根据真应力-真应变曲线,提取不同真应变下真应力值作为数据样本,在数据样本中随机抽出 90%作为神经网络训练数据集,其余作为测试数据集。由于参数 $T, \dot{\epsilon}, \epsilon$ 和 σ 差别很大,在网络训练前需要对 $T, \dot{\epsilon}$ 和 σ 样本进行归一化处理,归一化公式为:

$$X' = \frac{X - 0.95X_{\min}}{1.05X_{\max} - 0.95X_{\min}} \tag{1}$$

$$\dot{\epsilon}' = \frac{(2 + \lg \dot{\epsilon}) - 0.95(2 + \lg \dot{\epsilon}_{\min})}{1.05(2 + \lg \dot{\epsilon}_{\max}) - 0.95(2 + \lg \dot{\epsilon}_{\min})} \tag{2}$$

式中: X' 为归一化后的温度和应力; X 为 T 与 σ 的实验值; $\dot{\epsilon}'$ 为归一化后的应变速率。由于 $\dot{\epsilon}$ 值变化较大(发生数量级的改变),如果采用式(1)对其归一化,归一化后的数据分布集中,不利于神经网络进行学习,为了使其在0~1 范围内分布合理,采用式(2)对应变速率进行归一化。

对于隐含层单元数的确定,没有准确的理论依据,唯一公认的原则是能与给定样本符合的规模最小的网络就是最优网络结构。本工作通过计算不同隐含层单元数神经网络的训练误差,最终确定隐含

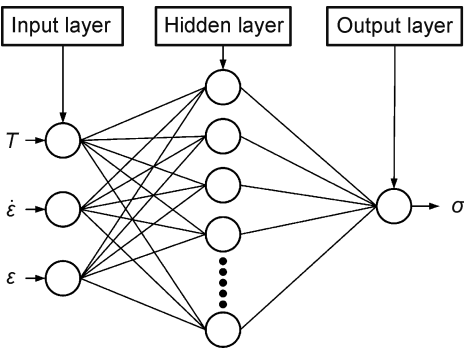


图 2 人工神经网络模型结构
Fig. 2 Architecture of the artificial neural network model

层神经单元个数为 14。输入层和隐藏层之间采用对数 S 型传递函数,隐藏层和输出层则采用线性函数进行传递。网络采用能够自适应调整学习效率的 Levenberg-Marquardt(L-M)算法,训练目标相对误差为 0.0001。

2.3 流变应力模型预测结果与分析

为了验证 ANN 模型的准确度,取不同变形工艺条件下模型的预测应力值和实验值进行对比,如图 3 所示。可以看出,模型预测值在最佳回归线附近,ANN 模型的精度高。为了进一步定量评估模型的准确度,利用相关系数 R 及均方根误差 E_R 对模型进行精确度评价。

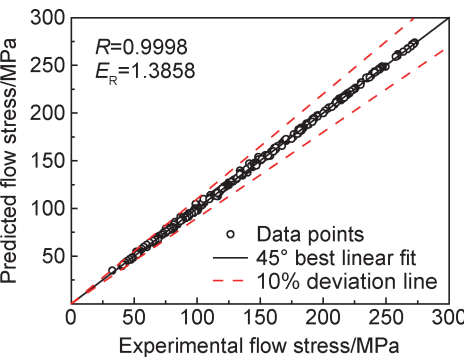


图 3 Cr-Mo-B 系机械工程用钢流变应力实验值与预测值比较
Fig. 3 Comparison between experimental and predicted flow stress of Cr-Mo-B mechanical engineering steel

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} \tag{3}$$

$$E_R = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i - P_i)^2} \tag{4}$$

式中: E_i 为实验值; P_i 为模型计算值; \bar{E} 和 \bar{P} 分别为

E_i 和 P_i 的平均值; N 为样本数。

根据图 3 中的实验值和模型预测值计算 R 和 E_R , 其相关系数及均方根误差分别为 0.9998 和 1.3858。

为了更进一步分析采用 L-M 算法所训练的网络的效果,对网络误差进行统计分析。图 4 为测试样本数据的误差统计分析结果。结果表明,误差服从典型

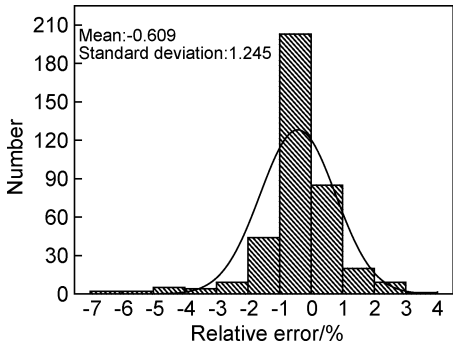


图 4 采用 L-M 算法的 ANN 模型预测误差的统计分析
Fig. 4 Statistical analysis of error of ANN prediction employing L-M algorithm

的 Gaussian 分布,误差平均值接近零。90% 以上的测试样本预测值的误差均在 $\pm 5\%$ 以内,这意味着预测误差的主要来源是实验数据波动,而不能完全归咎于所建立的神经网络模型的预测能力。然而,在实验过程中,由于温度、应变速率和摩擦力等综合因素的影响,流变应力值的波动是不可避免的。

图 5 为不同变形条件时 Cr-Mo-B 系机械工程用钢流变应力实验值与预测值比较。可以看出,ANN 模型预测结果与实验流变应力曲线相符。ANN 模型能够精确地反映该合金的流变行为,对锻造等热成型工艺中温度、变形速率、应变参数的制定更具参考价值。这种方法避免了常规回归方法只能描述特定区域流变行为的缺陷。该模型的缺点是,不能得出一个直观的数学表达式,并且训练精度受到样本数据值的影响。在实际应用中,需要经历一段时间的自学习。但随着人工神经网络技术的发展,在进行数值模拟和工程应用时可以直接运用所得到的 ANN 模型。

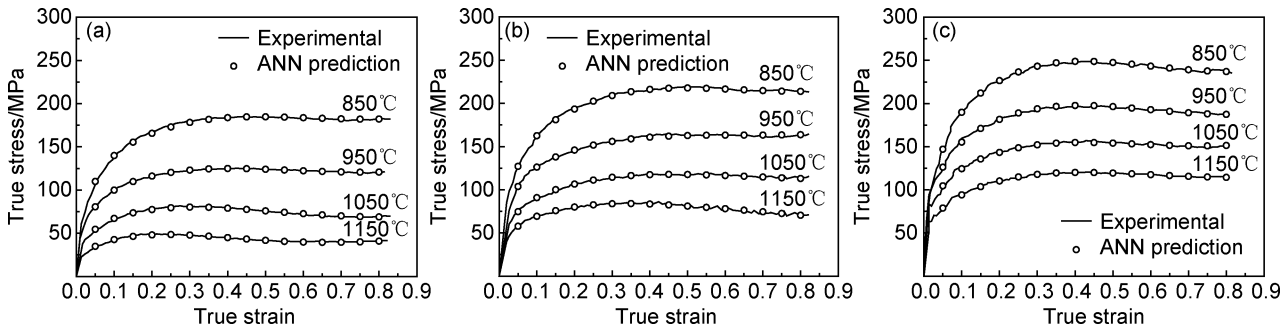


图 5 不同变形条件时 Cr-Mo-B 系机械工程用钢流变应力实验值与预测值比较
(a) $\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$; (b) $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$; (c) $\dot{\epsilon} = 10 \text{ s}^{-1}$

Fig. 5 Comparison between experimental and predicted flow stress of Cr-Mo-B mechanical engineering steel with different deformation conditions
(a) $\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$; (b) $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$; (c) $\dot{\epsilon} = 10 \text{ s}^{-1}$

2.4 动态材料模型热加工图

根据大塑性变形连续介质力学、物理系统模型和不可逆力学理论,Prasad 等^[17]提出了基于动态材料模型理论的热加工图,可较准确地分析材料在不同变形温度和应变速率下的微观组织演化,同时也可获得热变形时的安全区和危险区,现已被广泛应用于材料高温变形机制的分析与热变形工艺的制定,如钛合金、镁铝合金和不锈钢等金属材料^[18-20]。根据动态材料模型理论,材料在加工过程中单位时间、单位体积内所获得的能量 P 由转化为热量的功率耗散量 G 和组织演化的功率耗散协量 J 组成。

$$P = \sigma \dot{\epsilon} = G + J = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d\dot{\epsilon} + \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma \tag{5}$$

热变形过程中,在恒定的温度与应变速率下变形

材料的本构方程可表示为:

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m \tag{6}$$

式中: K 为常数,与实验条件无关; m 为应变速率敏感性指数,其中,

$$m = \left(\frac{\partial J}{\partial G} \right)_{\epsilon, T} = \frac{\partial P}{\partial G} \frac{\partial J}{\partial P} = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \tag{7}$$

当处于理想线性耗散($m=1$)状况时,此时 J 具有最大值 $J_{\max} = P/2$ 。人们把 J/J_{\max} 定义为耗散效率因子 η ,其数学表达式如式(8)所示。耗散效率因子是与材料内部显微组织演化直接相关的参数,其随变形温度和应变速率的变化关系即构成了功率耗散图。

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{P - G}{P/2} = 2 \left(1 - \frac{1}{\sigma \dot{\epsilon}} \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma \right) \tag{8}$$

材料的应变速率敏感性指数是变化的,但是在应

变速率较低的情况下,可近似认为 m 是不变的,所以可以用式(8)与式(9)求解。

$$G = \int_0^\epsilon \sigma d\epsilon = \int_0^{\epsilon_0} \sigma d\epsilon + \int_{\epsilon_0}^\epsilon \sigma d\epsilon = \left[\frac{\sigma \epsilon}{m+1} \right]_{\epsilon=\epsilon_0} + \int_{\epsilon_0}^\epsilon \sigma d\epsilon$$

(9)

由于在加工失稳区(危险区)的耗散效率因子可能也会很高,所以, η 大不代表材料的可加工性能好。根据镍基超合金的热变形行为推导出任意一种应力-应变速率曲线的失稳判据:

$$2m < \eta \leq 0$$

(10)

失稳参数 $\xi(\epsilon)$ 可以用来表示热塑性变形时的连续失稳判据(式(11)),其随变形温度和应变速率的变化关系即构成了流变失稳图。

$$\xi(\epsilon) = \frac{2m}{\eta} - 1 < 0$$

(11)

在热压缩实验中,每组样品最大真应变为 0.9,此时部分样品已经破坏失稳(如图 1(c),(d)真应力-真应变曲线所示)。然而在实际工程应用中,不应该采取过高的单次变形量,因此对于热加工图的构建,取用不失稳变形范围内的中等变形量($\epsilon=0.5$)和较大变形量($\epsilon=0.7$)两个实验点进行研究。将应变为 0.5 和 0.7

的功率耗散图与流变失稳图叠加可得到材料的热加工图,如图 6 所示,等值线的数字代表功率耗散因子 η ,灰色区域为流变失稳区。由图 6 可知,Cr-Mo-B 系机械工程用钢功率耗散较大值主要分布在高温低应变速率的范围内($0.1\sim 1s^{-1}$),而流变失稳区主要集中在低温高应变速率和高温高应变速率内,并且随着应变的增大,流变失稳区向低应变速率区域扩大。这是因为,当温度较低时,原子的扩散能力较弱,晶内储存能较低,位错的运动和晶界的迁移缓慢,动态再结晶难以形核和长大;当温度较高时,由于应变速率较大,位错密度在短时间内急剧攀升,合金内形成大量的变形能,在变形过程中产生的热量难以及时散出,容易形成绝热剪切带,出现绝热剪切效应,使得合金产生流变失稳现象。一般认为在热加工的安全区域,功率耗散因子 η 越大,材料的热加工性能越好,越容易获得均匀细小的动态再结晶组织,因此具有较高功率耗散效率因子的稳态变形区间可作为最佳的变形工艺参数。当应变 $\epsilon=0.5$ 时,变形温度为 $1050\sim 1150^{\circ}C$ 、应变速率为 $0.1\sim 0.4s^{-1}$ 区域,功率耗散因子 $\eta\geq 37.20\%$;当应变 $\epsilon=0.7$ 时,变形温度为 $1000\sim 1150^{\circ}C$ 、应变速率为 $0.1\sim 0.6s^{-1}$ 区域,功率耗散因子 $\eta\geq 35.80\%$ 。

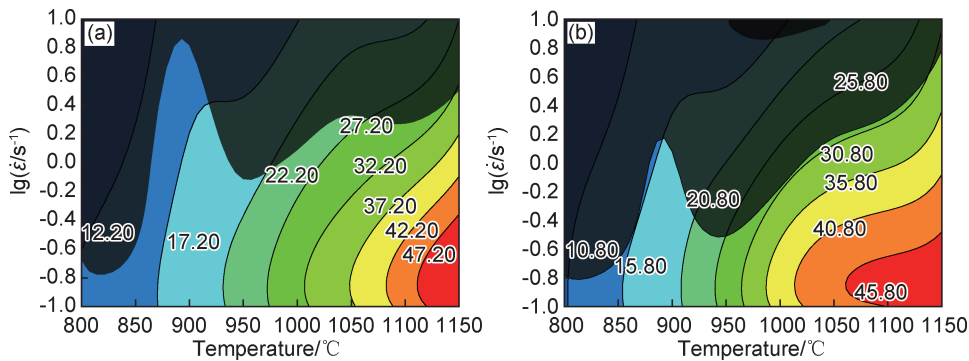


图 6 不同应变下 Cr-Mo-B 系机械工程用钢的热加工图 (a) $\epsilon=0.5$;(b) $\epsilon=0.7$
Fig. 6 Processing maps for Cr-Mo-B mechanical engineering steel at different strains (a) $\epsilon=0.5$;(b) $\epsilon=0.7$

3 结论

- (1)Cr-Mo-B 系机械工程用钢在变形温度为 $850\sim 1150^{\circ}C$ 、应变速率为 $0.1\sim 10s^{-1}$ 的条件下,真应力-真应变曲线表现为典型的加工硬化和动态回复型,变形温度与应变速率对其流变应力有较大影响。
- (2)基于热压缩实验数据,借助人工神经网络构架出 Cr-Mo-B 系机械工程用钢高温流变应力模型。ANN 模型对该合金流变行为的预测准确度高,其相关系数及均方根误差分别为 0.9998 和 1.3858。
- (3)加工图由功率耗散图和失稳图叠加而得,根据加工图可以确定该合金在不同应变条件下的最佳变形

区:当 $\epsilon=0.5$ 时,变形温度为 $1050\sim 1150^{\circ}C$ 、应变速率为 $0.1\sim 0.4s^{-1}$ 区域,功率耗散因子 $\eta\geq 37.20\%$;当 $\epsilon=0.7$ 时,变形温度为 $1000\sim 1150^{\circ}C$ 、应变速率为 $0.1\sim 0.6s^{-1}$ 区域,功率耗散因子 $\eta\geq 35.80\%$ 。

参考文献

[1] 刘军刚,袁林,王伟,等. 耐磨钢生产研究现状与分析[J]. 山东冶金,2011(2):7-9.
LIU J G, YUAN L, WANG W, et al. Production situation and analysis of abrasion resisting steel[J]. Shandong Metallurgy, 2011 (2): 7-9.

[2] 张宇斌,秦洁. 高强度耐磨钢板的生产现状及发展[J]. 世界钢铁, 2009(6):23-26.

- ZHANG Y B, QIN J. Current status and development of high strength wear-resistant steel production[J]. World Iron & Steel, 2009(6):23-26.
- [3] 刘昌奎,魏振伟,张佳庆,等.热变形工艺对 FGH96 高温合金 PPB 析出相及组织的影响[J].航空材料学报,2018,38(3):40-45.
LIU C K, WEI Z W, ZHANG J Q, et al. Effect of hot deformation on PPB precipitations and microstructure in P/M superalloy FGH96[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2018, 38(3):40-45.
- [4] 王岩,徐芳泓,曾莉,等.700℃(A-USC)锅炉材料 617B 镍基高温合金热变形及持久行为[J].材料工程,2018,46(7):100-105.
WANG Y, XU F H, ZENG L, et al. Hot deformation and creep rupture behaviors of 617B nickel-base superalloy for 700℃ (A-USC) boilers[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(7):100-105.
- [5] 范爱一,李慧中,梁霄鹏,等.热变形 Ti-45Al-7Nb-0.3W 合金的显微组织与力学性能[J].材料工程,2018,46(7):121-126.
FAN A Y, LI H Z, LIANG X P, et al. Microstructure and mechanical properties of hot deformed Ti-45Al-7Nb-0.3W alloy [J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(7):121-126.
- [6] 黄烁,王磊,张北江,等.GH4706 合金的热变形行为与显微组织演化[J].材料工程,2015,43(2):41-46.
HUANG S, WANG L, ZHANG B J, et al. Hot deformation behavior and microstructure evolution of GH4706 alloy [J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(2):41-46.
- [7] 谢碧君,郭逸丰,徐斌,等.GH984G18 合金热加工图及再结晶图研究[J].材料工程,2016,44(9):16-23.
XIE B J, GUO Y F, XU B, et al. Processing map and recrystallization diagram for GH984G18 alloy [J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(9):16-23.
- [8] 范云强,黄树晖,李志辉,等.Al-Zn-Mg-Cu 合金多道次热变形及固溶处理过程中的晶粒演变[J].航空材料学报,2017,37(2):1-6.
FAN Y Q, HUANG S H, LI Z H, et al. Grain evolution in process of multi-pass hot deformation and solution heat treatment of Al-Zn-Mg-Cu aluminum alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2017, 37(2):1-6.
- [9] 王忠军,付学丹,朱晶,等.ZK60 和 ZK60-1.0Er 镁合金热压缩变形和加工图[J].材料工程,2017,45(3):102-111.
WANG Z J, FU X D, ZHU J, et al. Hot compressive deformation and processing maps of ZK60 and ZK60-1.0Er magnesium alloy [J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(3):102-111.
- [10] 马琳,李伟,白娇娇,等.粉末冶金 Ti-14Mo-2.1Ta-0.9Nb-7Zr 合金热变形行为[J].材料工程,2018,46(10):47-54.
MA L, LI W, BAI J J, et al. Hot deformation behavior of powder metallurgy Ti-14Mo-2.1Ta-0.9Nb-7Zr alloy [J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(10):47-54.
- [11] 冯文荣.热处理工艺对工程机械用钢组织与性能的影响[J].金属热处理,2017,42(6):84-88.
FENG W R. Effect of heat treatment process on microstructure and properties of steel for engineering machinery [J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42(6):84-88.
- [12] 李红英,巫荣海,魏冬冬,等.T23 钢的热变形行为[J].材料热处理学报,2013(1):96-101.
LI H Y, WU R H, WEI D D, et al. Thermal deformation behavior of T23 steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2013(1):96-101.
- [13] 袁武华,龚雪辉,孙永庆,等.0Cr16Ni5Mo 低碳马氏体不锈钢的热变形行为及其热加工图[J].材料工程,2016,44(5):8-14.
YUAN W H, GONG X H, SUN Y Q, et al. Hot deformation behavior and processing map of 0Cr16Ni5Mo low carbon martensitic stainless steel[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(5):8-14.
- [14] 程明阳,郝世明,谢敬佩,等.SiC_p/Al-Cu 复合材料的高温热变形行为[J].材料工程,2017,45(2):17-23.
CHENG M Y, HAO S M, XIE J P, et al. Hot deformation behavior of SiC_p/Al-Cu composite [J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(2):17-23.
- [15] 邹刘峰,鲁世强,董显娟,等.TC4 ELI 钛合金的热变形行为及本构关系研究[J].特种铸造及有色合金,2017(10):1134-1138.
ZOU L F, LU S Q, DONG X J, et al. Hot deformation behavior and constitutive relationship of TC4 ELI Ti alloy [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2017(10):1134-1138.
- [16] YAN J, PAN Q L, LI A D, et al. Flow behavior of Al-6.2Zn-0.70Mg-0.30Mn-0.17Zr alloy during hot compressive deformation based on Arrhenius and ANN models[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(3):638-647.
- [17] PRASAD Y V R K, GEGEL H L, DORAIVELU S M, et al. Modeling of dynamic material behavior in hot deformation: forging of Ti-6242[J]. Metallurgical Transactions A, 1984, 15(10):1883-1892.
- [18] ZHANG C, ZHANG L, SHEN W, et al. Study on constitutive modeling and processing maps for hot deformation of medium carbon Cr-Ni-Mo alloyed steel[J]. Materials & Design, 2016, 90:804-814.
- [19] SUN C, LIU K, WANG Z, et al. Hot deformation behaviors and processing maps of Mg-Zn-Er alloys based on Gleeble-1500 hot compression simulation[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(12):3123-3134.
- [20] RAJPUT S K, CHAUDHARI G P, NATH S K. Characterization of hot deformation behavior of a low carbon steel using processing maps, constitutive equations and Zener-Hollomon parameter[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 237:113-125.

收稿日期:2018-01-09;修订日期:2019-02-25

通讯作者:孙挺(1986—),男,博士研究生,主要从事金属材料组织性能控制方面的研究工作,联系地址:北京市海淀区钢铁研究总院特殊钢研究所(100081),E-mail:suntng@nercast.com

(本文责编:王 晶)