

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20170525

Fe-6.5%Si钢高温变形过程本构方程

梅瑞斌^{1,2}, 包立², 杜永霞², 张欣², 李长生¹, 刘相华¹

(1. 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学秦皇岛分校资源与材料学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要: 利用 Gleeble 3500 热模拟试验机开展了 Fe-6.5%Si 钢在变形温度为 800、900、1 000、1 100 °C 及应变速率为 0.01、0.1、1、10 s⁻¹ 条件下的单道次压缩试验。初始阶段由于加工硬化作用流动应力迅速增加, 达到峰值后动态软化机制和硬化作用基本相当使流动应力曲线维持在一个较为稳定的状态。基于 Zener-Holloman 参数和线性拟合方法, 利用 Arrhenius 方程建立了 Fe-6.5%Si 钢高温塑性变形本构方程, Fe-6.5%Si 钢热塑性变形的激活能约为 342.2 kJ/mol。构建的 Fe-6.5%Si 钢本构方程对不同条件的流动应力预测结果和实测值吻合良好, 平均相对误差约为 5.31%, 对非样本数据的预测结果相对误差最大约为 10.87%, 构建的本构方程对于 Fe-6.5%Si 钢热轧工艺参数优化和热塑性变形过程数值分析具有较高可靠性和适应性。

关键词: Fe-6.5%Si 钢; 本构方程; 流动应力; 热变形

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2018)06-0098-05

Constitutive equations of Fe-6.5%Si steel at high deformation temperature

MEI Rui-bin^{1,2}, BAO Li², DU Yong-xia², ZHANG Xin², LI Chang-sheng¹, LIU Xiang-hua¹

(1. The State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China; 2. School of Resources and Materials, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, Hebei, China)

Abstract: The deformation behavior of the casted Fe-6.5%Si steel was studied through single-pass compression experiment with temperature range of 800, 900, 1 000, 1 100 °C and strain rate range of 0.01, 0.1, 1, 10 s⁻¹. The flow stress increases to a peak value with work hardening firstly and then keep a steady state in dynamic softening processes. Arrhenius equation model was proposed to describe the constitutive equations of casted Fe-6.5%Si steel by means of the phenomenological representation of stress-strain curves. The hot activation energy of casted Fe-6.5%Si steel is about 342.2 kJ/mol. The predicted results by the developed model are in good agreement with the experimental data, and the average relative error of predicted results is about 5.31%. Furthermore, the maximum relative error of predicted non-sample data is about 10.87%. Therefore, the developed model shows a good capability and higher precision and it is much significant for optimization of hot rolling parameters and numerical simulation of hot deformation of Fe-6.5%Si steel.

Key words: Fe-6.5%Si steel; constitutive equation; flow stress; hot deformation

硅钢素有“钢铁工艺品”之称, 在高频变压器、高速电机等高端电子产品领域具有广阔的应用前景。高硅钢一般是指硅质量分数高于 4.5% 的 Fe-Si 合金, 当硅质量分数增加至 6.5% 左右时, 其电阻率、饱和磁滞伸缩系数、最大磁导率及磁损耗等重要性能达到最佳值^[1]。由于硅质量分数增加使硅钢固溶强化效果增强, 合金变得既硬又脆, 室温塑性能力急剧降低, 日本、俄罗斯等国采用快速凝固法、渗硅、CVD 技术、喷射成形、特殊轧制等方法生产高硅钢产品^[2-4]。

为开发研究高硅钢薄带轧制工艺, 林均品等^[5]利用普通的锻造和轧制设备, 通过加入硼元素来细化原始铸态组织, 提高塑性变形能力, 进而制备出高硅合金 Fe-6.5%Si-B 薄板。梁永锋等^[6]利用热轧+温轧+冷轧方法并结合相关的热处理手段获得了 Fe-6.5%Si 的高硅钢薄板, 有序相的转变和面织构的消失使退火热处理不仅降低高硅钢薄带硬度且也显著降低材料的塑性。LIU H T 等^[7]基于铸轧+热轧+温轧和退火处理获得了 0.5 mm 的 Fe-6.5%Si 的高硅钢薄板, 并研究了再结晶织构和磁性能。Ros-Yanez T 和

基金项目: 河北省自然科学基金-钢铁联合基金资助项目(E2014501114, E2018501016); 辽宁省自然科学博士启动基金资助项目(20170520314); 中央高校基本科研业务专项资金资助项目(N172304042)

作者简介: 梅瑞斌(1979—), 男, 博士, 副教授; **E-mail:** meirb1999@gmail.com; **收稿日期:** 2017-10-27

Fischer O 等^[8-9]研究了硅质量分数为 3% 和 6.5% 硅钢的热加工性能, 热轧温度降低使其动态再结晶发生迟缓, 随着硅质量分数增加, 可能由于织构取向性增强使这种现象更为明显, 由于动态再结晶不充分, 冷轧组织和热轧组织近似, 退火中产生二次再结晶, 织构减弱, 在此基础上利用热轧+冷轧方法制备出 0.4 mm 高硅钢薄带。Calvillo P R 等^[10]研究了硅质量分数为 4.6% 的高硅钢室温塑性变形行为和组织演变, 结果表明: 接近屈服阶段, 应变速率敏感指数为负值, 当应变超过 0.04 时, 该值逐渐变为正值, 变形中产生孪晶和部分滑移, 变形初始阶段, 孪晶在平行于变形面的 {111} 面晶粒内发生, 后期整个晶粒均发生孪晶。

钢铁薄带材产品通常经历热轧和冷轧等轧制过程, 构建准确的热变形本构方程对热轧工艺参数优化及热塑性变形过程数值模拟研究具有重要意义。Sellars C M 等^[11]建立了描述铝、镍、铜、钢材料热加工行为的双曲正弦本构关系。Mcqueen H J 等^[12]研究了本构方程中的描述了金属热加工过程峰值应力和应变关系 Arrhenius 项。LIN Y C 和 LI H Y 等^[13-14]基于修正 Johnson Cook 模型^[15]建立了高强钢和 28CrMnMoV 钢的热变形本构方程, 并通过试验验证了该方程的准确性。Guo J H 等^[16]基于修正 Voce 模型采用峰值应力、上升和下降系数描述了较宽应变范围下材料流动关系。Ebrahimi R 等^[17]基于 IF 钢实际流变应力应变曲线采用指数函数法描述了峰值应力到稳态应力之间的应力应变关系。神经网络模型^[18]和应变补偿的 Arrhenius 方程模型^[19-20]也成功应用于 XC45、42CrMo 及 P91 等钢铁材料塑性变形过程热变形本构方程构建。

高硅钢的室温脆性和低塑性使热轧成为高硅钢薄带材轧制制备的关键工艺, 热变形过程流变行为对 Fe-6.5%Si 钢热轧工艺甚至热塑性变形行为理论研究和数值分析及优化至关重要, 然而, 目前关于高硅钢特别是 Fe-6.5%Si 钢材料的流变应力研究报道较少。因此, 本文主要研究铸态 Fe-6.5%Si 钢不同变形温度和变形速率下单道次热压缩试验, 基于应力应变曲线和 Arrhenius 方程构建了高温条件下铸态 Fe-6.5%Si 钢的热变形本构方程模型, 该研究对高硅钢热轧及铸轧工艺参数分析优化和热塑性变形过程数值模拟工作开展具有重要的理论和实际意义。

1 试验材料及方法

本试验所用原材料为熔炼的 Fe-6.5%Si 钢铸锭, 主要组织成分见表 1。为减轻原始材料中存在的成分偏析缺陷, 尽量避免材料组织缺陷对试验结果造成的影响, 将铸锭加热到 1 080 °C 保温 48 h 进行均匀化处理, 均匀化处理后将铸锭切割为 $\phi 10 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 圆柱试样利用 Gleeble 3500 进行单道次等温热压缩试验。单道次热压缩过程中, 首先以 5 °C/s 速率升温, 当温度达到规定变形温度后对试样进行 3 min 保温, 然后以不同的应变速率对试样进行压缩。热压缩试验温度分别为 800、900、1 000 和 1 100 °C, 变形速率分别为 0.01、0.1、1 和 10 s⁻¹。为验证建立方程的可靠性和适应性, 又分别进行了变形温度为 800 °C 及变形速率分别为 0.05、0.5 和 5 s⁻¹ 的压缩试验。

表 1 Fe-6.5%Si 钢组织成分

Table 1 Chemical composition of Fe-6.5%Si steel %						
C	Si	Mn	P	S	Al	Fe
0.021	6.5	0.037	0.017	0.005	0.025	余量

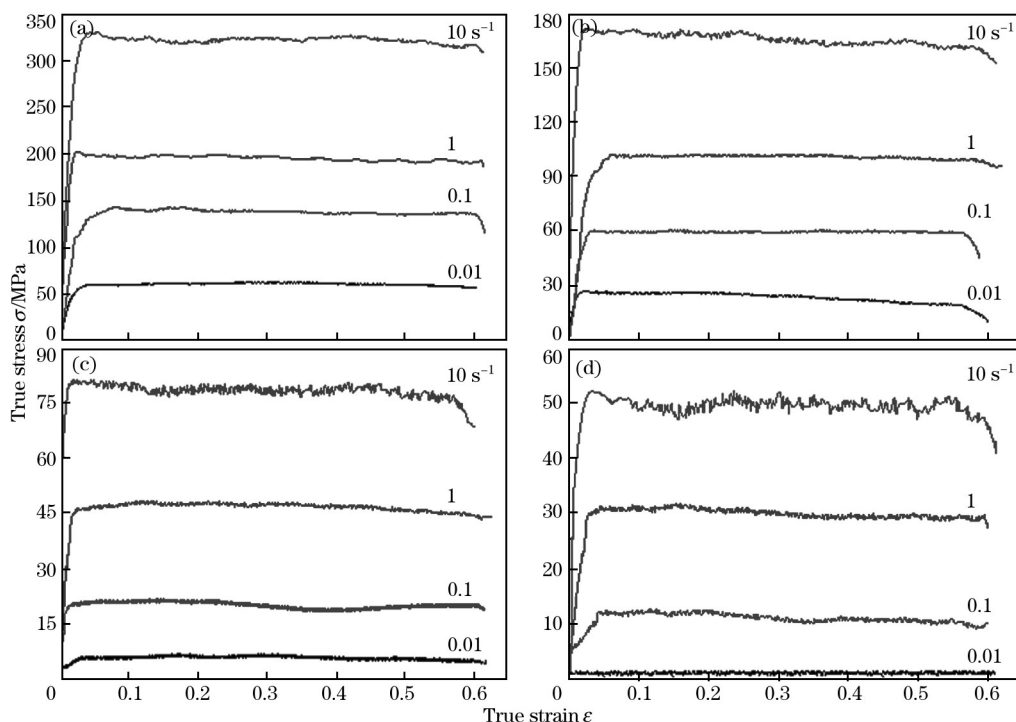
2 结果及讨论

2.1 应力-应变曲线

在热加工过程中, 由于变形的作用使金属组织发生加工硬化和动态软化, 金属层错能高低通常决定了动态软化方式, 层错能高的易于发生动态回复, 而层错能低的则发生动态再结晶。Fe-6.5%Si 钢高温热压缩过程真实应力-应变曲线如图 1 所示。由图可知变形初始阶段由于加工硬化主导作用使流动应力迅速增加, 在极小的变形范围内达到峰值。达到峰值后动态软化机制和加工硬化基本保持平衡, 随着应变继续增加流动应力保持一定的稳定状态。随着温度升高和变形速率降低弹性变形阶段显著缩短, 流动应力峰值明显降低。依据铸态 Fe-6.5%Si 钢热变形真实应力-应变曲线特点可以简化为理想刚塑性模型, 峰值应力采用 Arrhenius 方程进行描述。

2.2 本构方程建立

在化学成分一定的条件下, 金属材料塑性变形本构方程受变形温度、变形速率和变形程度的影响。Arrhenius 方程在描述热变形过程本构方程时材料参数较少、精度更高使其在钢铁材料热变形本构方程研究中应用更为广泛^[13, 21-22]。金属材料在高



(a) 800 °C; (b) 900 °C; (c) 1000 °C; (d) 1100 °C。

图1 不同条件下Fe-6.5%Si钢真实应力-应变曲线

Fig. 1 True stress-strain curves of Fe-6.5%Si steel

温塑性变形过程中存在热激活过程,其热变形行为可用 Sellars 和 Tegart 提出的包含变形激活能 Q 和变形温度 T 的双曲线正弦形式的 Arrhenius 关系^[11]来描述

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

式中: A 为结构因子, s^{-1} ; α 为应力水平参数, MPa^{-1} ; n 为应力指数; Q 为变形激活能, J/mol ; R 为气体常数, $R = 8.314 J/(mol \cdot K)$; T 为变形温度, K 。温度和应变速率对峰值应力的影响用 Zener-Holloman 参数^[23-24]表述为

$$Z = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n = \dot{\epsilon} \exp[Q/(RT)] \quad (2)$$

在已知温度和应变速率条件下的峰值应力函数可以用 Zener-Holloman 参数描述为

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left[\left(\frac{Z}{A} \right)^{1/n} + \left(\frac{Z}{A} \right)^{2/n} + 1 \right]^{1/2} \quad (3)$$

为得到峰值应力和 Zener-Holloman 参数的关系,低应力条件下 $Z = A_2 \exp(\beta\sigma)$; 高应力条件下 $Z = A_1 \sigma^n$ 。然后对低应力条件下的 $\sinh(\alpha\sigma)$ 式进行泰勒级数展开,高应力条件下忽略 $\sinh(\alpha\sigma)$ 中的 $\exp(\alpha\sigma)$ 项,式(1)可以描述为

$$\begin{cases} \dot{\epsilon} = A_1 \exp(\beta\sigma) \exp(-Q/(RT)) \\ \dot{\epsilon} = A_2 \sigma^n \exp(-Q/(RT)) \end{cases} \quad (4)$$

式中: α 、 β 为材料参数, $A_1 = A/2^{n_1}$, $A_2 = A\alpha^{n_1}$, $\alpha = \beta/n_1$ 。

为了得到这些材料参数,对式(4)两边取对数

$$\begin{cases} \ln \dot{\epsilon} = \ln A_1 - Q/(RT) + \beta\sigma \\ \ln \dot{\epsilon} = \ln A_2 - Q/(RT) + n_1 \ln \sigma \end{cases} \quad (5)$$

根据式(5), $1/\beta$ 和 $1/n_1$ 可以分别通过高温条件下直线 $\sigma - \ln \dot{\epsilon}$ 和 $\ln \sigma - \ln \dot{\epsilon}$ 的斜率得到,然后 α 可以利用公式 $\alpha = \beta/n_1$ 获得。

对式(1)两边取对数得到

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A + n \ln \sinh(\alpha\sigma) - Q/(RT) \quad (6)$$

对式(6)进行微分得到

$$Q = R \left\{ \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)]} \right\}_T \left\{ \frac{\partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial (1/T)} \right\}_{\dot{\epsilon}} \quad (7)$$

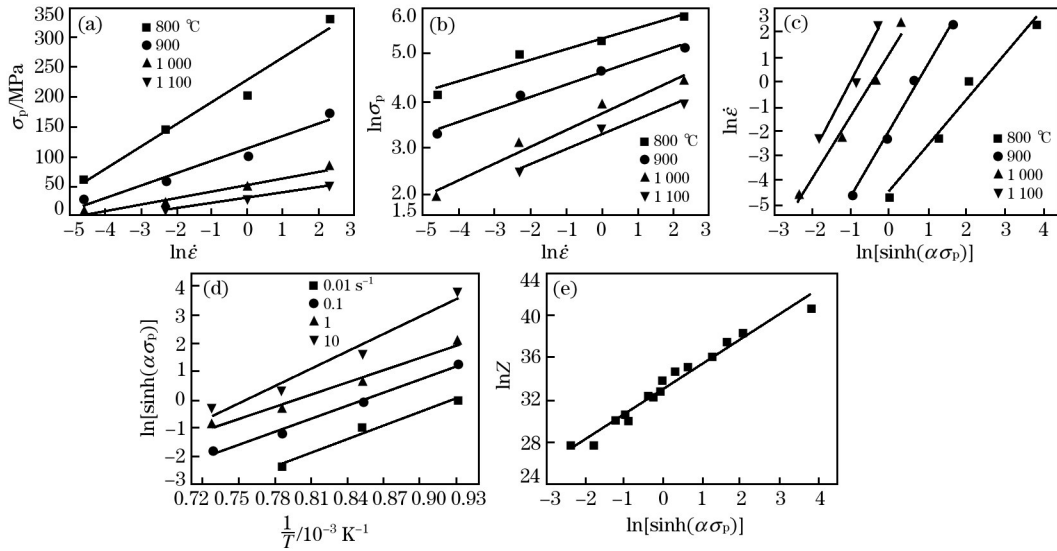
式中: n 为不同温度下 $\ln \dot{\epsilon} - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ 关系曲线的平均斜率值; 变形激活能 Q 等于不同应变速率下 $\ln [\sinh(\alpha\sigma)] - 1/T$ 关系曲线平均斜率值。

对式(2)两边取对数,可以得到

$$\ln Z = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] \quad (8)$$

式中: $\ln A$ 可以通过式(8)和关系曲线 $\ln Z - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ 获得。

图2所示为不同变量之间关系曲线。根据这些曲线可以得到的材料参数分别为: $Q = 342.2 kJ/mol$, $\alpha = 0.013 6 MPa^{-1}$, $\beta = 0.043 3$, $n = 2.495 3$, $\ln A = 30 s^{-1}$ 。



(a) $\ln \dot{\varepsilon} - \sigma_p$; (b) $\ln \dot{\varepsilon} - \ln \sigma_p$; (c) $\ln \dot{\varepsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma_p)]$; (d) $\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)] - 1/T$; (e) $\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)] - \ln Z$.

图2 不同变量之间的关系曲线

Fig. 2 Relationship between different variables

将所得材料参数代入公式(3)可以得到采用 Zener-Holloman 参数描述的 Fe-6.5%Si 钢热变形表达式,见式(9)。

$$\sigma = 73.58 \ln \left\{ \frac{(Z/2.16 \times 10^{14})^{1/2.4953} + 1}{[(Z/2.16 \times 10^{14})^{2/2.4953} + 1]^{1/2}} \right\} \quad (9)$$

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp[342\,200/(RT)]$$

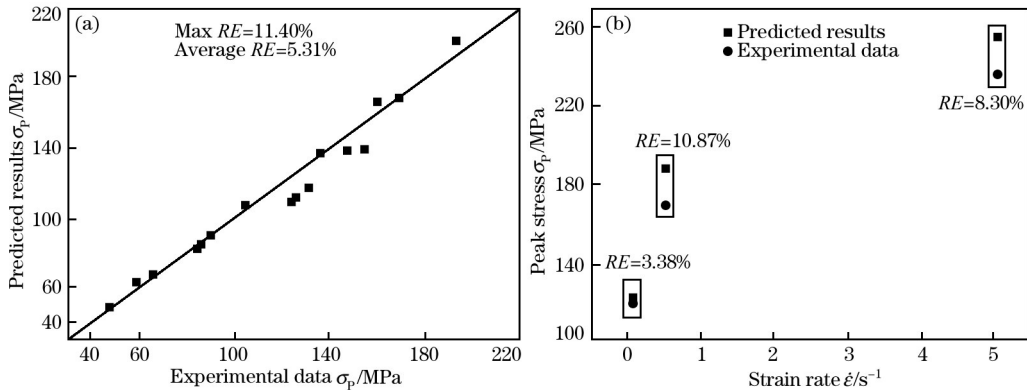
2.3 模型验证

利用构建的本构方程可以计算 Fe-6.5%Si 钢不同热变形条件下的变形抗力,为了验证建立模型的可靠性,基于预测值、试验结果及相对误差进行结果对比和分析。相对误差 RE_i 计算公式为

$$RE_i = \frac{|E_i - P_i|}{E_i} \times 100\% \quad (10)$$

式中: E_i 为流动应力试验结果; P_i 为流动应力预测结果。

不同试验条件下峰值应力的预测结果与实测值对比如图3所示。由图可知模型预测结果与实测值吻合良好,最大相对误差约为 11.4%,平均相对误差约为 5.31%,相对误差小于 10%的数据占总数据的 80%以上,模型预测精度较高。同时,在模型构建中尽管没有采用变形温度为 800 °C 和应变速率为 0.05、0.5、5 s^{-1} 的 3 个试样数据,但建立的本构方程模型对该 3 组试验峰值应力预测相对误差分别为 3.38%、10.87%、8.3%,预测精度较高,该模型具有较高的适应能力。因此,构建的本构方程模型可应用于 Fe-6.5%Si 钢热轧工艺参数优化和热塑性变形过程数值模拟分析。



(a) 变形温度为 800~1 100 °C,应变速率为 0.01、0.1、1 和 10 s^{-1} ; (b) 变形温度为 800 °C,应变速率为 0.05、0.5、5 s^{-1} 。

图3 不同试验条件下峰值应力的预测结果与实测值对比

Fig. 3 Comparison of predicted results and experimental data of peak stress under different conditions

3 结论

(1) 加工硬化作用使流动应力在初始阶段急剧增加,随着应变增加,达到峰值应力后由于动态软化和动态硬化作用相当使流动应力曲线基本保持不变。流动应力峰值随着温度升高和变形速率降低而降低。基于 Zener-Hollomon 参数和线性拟合法,利用 Arrhenius 方程建立了 Fe-6.5%Si 钢热塑性变形本构方程。材料参数 Q 为 342.2 kJ/mol, α 为 0.0136 MPa^{-1} , β 为 0.043 3, n 为 2.495 3, $\ln A$ 为 30 s^{-1} 。

(2) 构建的 Fe-6.5%Si 钢本构方程对不同条件下样本数据的流动应力预测结果和实测值吻合良好,最大误差约 11.4%,平均相对误差约 5.31%,超出约 80%的数据计算误差小于 10%;对非样本数据的预测结果相对误差最大约为 10.38%,平均相对误差约 7.52%。构建的本构方程具有较高的可靠性和适应能力,能够有效应用于 Fe-6.5%Si 钢热轧工艺理论分析与数值优化。

参考文献:

- [1] LIU J L, SHA Y H, ZHANG F, et al. Development of {210} <001> recrystallization texture in Fe-6.5wt.%Si thin sheets[J]. Scripta Materialia, 2011, 65(4): 292.
- [2] Viala B, Degauque J, Fagot M, et al. Study of the brittle behaviour of annealed Fe-6.5wt.%Si ribbons produced by planar flow casting[J]. Materials Science and Engineering A, 1996, 212(1): 62.
- [3] Arai K I, Yamashiro Y. Annealing effect on grain texture of cold-rolled 4.5% Si-Fe ribbons prepared by a rapid quenching method[J]. Journal of Applied Physics, 1988, 64(10): 5373.
- [4] Takada Y, Abe M, Masuda S, et al. Commercial scale production of Fe-6.5wt. % Si sheet and its magnetic properties[J]. Journal of Applied Physics, 1988, 64(10): 5367.
- [5] 林均品, 叶丰, 陈国良, 等. 6.5wt%Si 高硅钢冷轧薄板制备工艺、结构和性能[J]. 前沿科学, 2007, 2(2): 13. (LIN Jun-pin, YE Feng, CHEN Guo-liang, et al. Fabrication technology, microstructures and properties of Fe-6.5wt.% Si alloy sheets by cold rolling[J]. Frontier Science, 2007, 2(2): 13.)
- [6] 梁永峰, 林均品, 叶丰, 等. 大变形冷轧 Fe-6.5 % (质量) Si 高硅钢薄板组织性能的研究[J]. 金属功能材料, 2010, 17(2): 43. (LIANG Yong-feng, LIN Jun-pin, YE Feng, et al. Effect of heat treatment on microstructure and properties of heavily cold rolled Fe-6.5 wt%Si alloy sheet[J]. Metallic Functional Materials, 2010, 17(2): 43.)
- [7] LIU H T, LIU Z Y, SUN Y, et al. Development of λ -fiber recrystallization texture and magnetic property in Fe-6.5 wt%Si thin sheet produced by strip casting and warm rolling method[J]. Materials Letters, 2013, 91: 150.
- [8] Ros-Yanez T, Houbaert Y, Fischer O, et al. Production of high silicon steel for electrical applications by thermomechanical processing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 141(1): 132.
- [9] Ros-Yanez T, Houbaert Y, Fischer O, et al. Thermomechanical processing of high Si-steel[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37(4): 2321.
- [10] Calvillo P R, Ros-Yanez T, Ruiz D, et al. Plane strain compression of high silicon steel[J]. Materials Science and Technology, 2006, 22(9): 1105.
- [11] Sellars C M, McTegart W J. On the mechanism of hot deformation[J]. Acta Metallurgica, 1966, 14: 1136.
- [12] McQueen H J, Ryan N D. Constitutive analysis in hot working[J]. Materials Science and Engineering A, 2002, 322: 43.
- [13] 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 and Design, 2013, 49: 493.
- [14] LIN Y C, CHEN X M, LIU G. A modified Johnson-cook model for tensile behaviors of typical high-strength alloy steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527: 6980.
- [15] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21: 31.
- [16] Guo J H, Zhao S D, Murakami R I, et al. Modeling the hot deformation behavior of Al alloy 3003[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 566: 62.
- [17] Ebrahimi R, Zahiri S H, Najafizadeh A. Mathematical modeling of the stress-strain curves of Ti-IF steel at high temperature[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 17: 301.
- [18] CHAI R X, GUO C, YU L. Two flowing stress models for hot deformation of XC45 steel at high temperature[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 534: 101.
- [19] LIN Y C, CHEN M S, ZHANG J. Modeling of flow stress of 42CrMo steel under hot compression[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 499: 88.
- [20] Mandal S, Rakesh V, Sivaprasad P V, et al. Constitutive equations to predict high temperature flow stress in a Ti-modified austenitic stainless steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 500: 114.
- [21] 梁剑雄, 雍岐龙, 张良, 等. 1Cr17Ni1 双相不锈钢的热变形行为及其热加工图[J]. 钢铁, 2016, 51(9): 82. (LIANG Jian-xiong, YONG Qi-long, ZHANG Liang, et al. Hot deformation behavior and its processing map of 1Cr17Ni1 duplex stainless steel[J]. Iron and Steel, 2016, 51(9): 82.)
- [22] 张世伟, 杨明, 梁益龙, 等. 20CrNi2Mo 钢高温变形的本构方程与动态再结晶行为[J]. 钢铁, 2017, 52(8): 97. (ZHANG Shi-wei, YANG Ming, LIANG Yi-long, et al. Constitutive equations and dynamic recrystallization behaviors of 20CrNi2Mo steel at stage of high temperature deformation[J]. Iron and Steel, 2017, 52(8): 97.)
- [23] Zener C, Hollomon J H. Effect of strain rate upon the plastic flow of steel[J]. Journal of Applied Geophysics, 1944, 15(1): 22.
- [24] Shi H, McLaren A J, Sellars C M, et al. Constitutive equations for high temperature flow stress of aluminium alloys[J]. Materials Science and Technology, 1997, 13: 210.