

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2019.01.009

Fe-6.5% Si 钢中温变形过程本构方程

梅瑞斌^{1,2}, 包立¹, 李长生², 刘相华²

(1. 东北大学秦皇岛分校 资源与材料学院, 河北 秦皇岛 066004;
2. 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)

摘 要: 利用 Gleeble 3500 开展了 Fe-6.5% Si (质量分数) 钢在变形温度 300, 400, 500, 600 ℃ 及应变速率为 0.05, 0.5, 5 s⁻¹ 条件下的单道次压缩实验. 在初始均匀塑性变形阶段, 加工硬化作用使流动应力迅速增加, 随着变形继续动态软化机制启动, 流动应力增加量减弱. 随着温度升高和应变速率降低, 应变硬化指数减小. 提出了通过变形温度、应变速率描述应变硬化指数的方法构建 Fe-6.5% Si 钢中温变形过程本构方程. 构建的本构方程对不同变形条件的应力预测结果和实测值吻合良好, 平均相对误差约为 5.35%, 预测精度较高.

关 键 词: Fe-6.5% Si 钢; 应变硬化指数; 流动应力; 中温变形; 本构方程
中图分类号: TG 302 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2019)01-0043-05

Constitutive Equations for Moderate-Temperature Deformation of Fe-6.5% Si Steel

MEI Rui-bin^{1,2}, BAO Li¹, LI Chang-sheng², LIU Xiang-hua²

(1. School of Resources and Materials, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China;
2. State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: MEI Rui-bin, E-mail: meiruibin@neuq.edu.cn)

Abstract: Using Gleeble 3500, the deformation behaviors of a single-pass compression for Fe-6.5% Si steel at temperature ranging from 300 to 600 ℃ and strain rate ranging from 0.05 to 5 s⁻¹ were studied. The flow stress increases dramatically at initial uniform plastic deformation stage due to work hardening, while the increment of flow stress is to be weakened during further deformation when the dynamic softening occurs. The strain hardening index decreases with increasing the temperature and decreasing the strain rate. A new constitutive model of Fe-6.5% Si steel at moderate-temperature deformation was proposed through describing the strain hardening index as the function of temperature and strain rate. The results predicted by this model are in good agreement with the experimental data, with an average relative error about 5.35%.

Key words: Fe-6.5% Si steel; strain hardening index; flow stress; moderate-temperature deformation; constitutive equation

素有“钢铁工艺品”之称的硅钢在高端电子产品领域应用前景广阔^[1-2], 硅质量分数约为 6.5% 时其各项重要性能指标均达到最佳值^[3]. 硅钢既硬又脆使得开发高效的高硅钢轧制技术成为当前 Fe-6.5% Si 钢产品研究的热点和难点之一. Ros-Yanez 等^[4-5] 研究不同硅含量硅钢的热

成形性能, 较低的热变形温度和较高硅含量抑制动态再结晶发生, 再结晶不充分导致冷轧组织和热轧组织近似, 在研究组织演变基础上通过变形温度为 350~1 150 ℃ 热、温轧及后续的冷轧工艺制备出了厚度为 0.4~0.5 mm 的 Fe-6.3% Si 钢薄带材. Liu 等^[6] 在研究 Fe-6.5% Si 钢再结晶组织

收稿日期: 2017-04-29
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); 辽宁省自然科学基金资助项目 (20170520314); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (N172304042).
作者简介: 梅瑞斌 (1979-), 男, 河南登封人, 东北大学秦皇岛分校副教授; 李长生 (1964-), 男, 黑龙江七台河人, 东北大学教授, 博士生导师; 刘相华 (1953-), 男, 黑龙江双鸭山人, 东北大学教授, 博士生导师.

构和磁性能基础上,通过铸轧、热轧、温轧及退火处理制备出了 0.5 mm 厚硅钢薄板. 林均品等^[7]利用 B 元素细化原始铸态组织,然后通过热轧、温轧和冷轧及热处理工艺制备出了厚度为 0.05 ~ 0.3 mm 的 Fe-6.5% Si 钢薄带.

可见,温轧是 Fe-6.5% Si 钢带材轧制的关键因素,温轧过程的大变形可以有效破坏有序结构,提升塑性变形能力进而有利于后续冷轧工艺^[8],因此构建准确的中温变形本构方程对温轧工艺参数优化具有重要意义. Li 等^[9]基于双曲正弦本构关系及 Arrhenius 项的本构方程^[10-11],通过修正实验过程摩擦影响建立了中碳钢在变形温度为 550 ~ 700 °C 范围内的温变形模型,本构方程预测结果与实测值吻合良好. Li 等^[12]研究了 Fe-6.5% Si 钢在 500 °C,变形速率为 5 s⁻¹ 温变形下的软化机制. 目前,关于 Fe-6.5% Si 钢温变形行为的研究文献相对较少,本文主要开展热轧态 Fe-6.5% Si 钢单道次中温压缩实验,并通过非线性回归和线性拟合法建立中温变形本构方程,对 Fe-6.5% Si 高硅钢温轧工艺优化及中温塑性变形数值分析具有重要意义.

1 实验材料及方法

本文实验用材料为 Fe-6.5% Si 钢热轧板,成分(质量分数,%)为 C 0.021, Si 6.5, Mn 0.037, P 0.017, S 0.005, Al 0.025, Fe 余量. 首先,利用真空熔炼炉熔炼 Fe-6.5% Si 钢铸锭,将铸锭加热到 1 080 °C 并保温 48 h 进行均匀化处理;然后对铸锭进行 3 道次高温轧制,轧制温度为 1 080 °C,热轧最终厚度为 12 mm;热轧后空冷,然后利用磨床对热轧板上下表面进行氧化皮打磨;最后利用线切割从打磨后的热轧板上切割 $\phi 6 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$ 的圆柱试样. 圆柱试样高度方向为热轧板厚度方向. 利用 Gleeble 3500 开展单道次压缩试验. 试验中,试样升温速率为 10 °C/s,达到设定温度时保温 3 min,然后对试样进行不同应变速率压缩. 变形温度分别为 300, 400, 500 和 600 °C,变形速率分别为 0.05, 0.5 和 5 s⁻¹. 图 1 为 500 °C,变形速率 0.05 s⁻¹ 下的压缩结束后试样微观组织. 由图可以看出,低温下硅钢变形以孪生为主,组织主要为变形孪晶,由于压缩量大于塑性变形极限,所以组织内部有较多剪切裂纹,温度越低脆性越显著,塑性变形失效加剧.

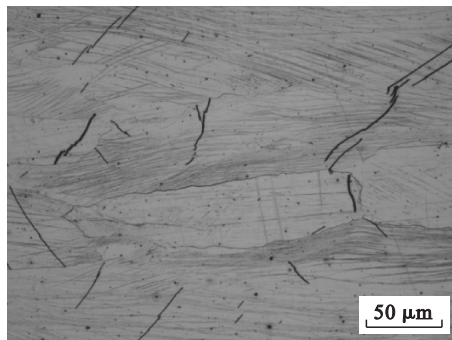


图 1 变形温度为 500 °C,变形速率为 0.05 s⁻¹ 压缩后的组织

Fig. 1 Microstructure after deformation under the temperature of 500 °C and strain rate of 0.05 s⁻¹

2 结果与讨论

2.1 应力-应变曲线

变形程度、变形速度和温度共同支配金属塑性变形过程组织和性能变化. 中低温条件下材料变形过程流动应力曲线一般包括弹性变形、均匀塑性变形、非均匀塑性变形及断裂,材料发生屈服后进入均匀塑性变形,当达到抗拉强度后进入非均匀塑性变形(塑性失稳),直至最后断裂^[13]. Fe-6.5% Si 钢在变形温度为 300 ~ 600 °C,应变速率为 0.05 ~ 5 s⁻¹ 范围内进行单道次压缩过程的真实应力-应变曲线如图 2 所示. 由图可知, Fe-6.5% Si 钢在不同变形条件下的应力-应变曲线变化趋势基本相同. 加工硬化的主导作用使初始阶段流动应力迅速增加,随着应变积累值增加软化机制启动. 温度较低时加工硬化占据主导地位,温度较高为 600 °C 时软化和硬化作用基本相当,流动应力增加到峰值后保持平稳状态. 应变速率相同时,随着变形温度升高,动态软化程度增加,流动应力有所降低. 变形温度较高条件下,应变速率增加,位错移动速率增大,流动应力显著增加;而变形温度较低为 300 °C 时,变形速率增加没有引起流动应力显著增加,这可能是变形速度较快时产生的热效应导致软化程度增加的结果^[13]. 300 ~ 500 °C 变形温度下变形抗力达到峰值后均有不同程度的降低,这是由于试样产生了剪切裂纹导致塑性失效^[13],内部产生了显著裂纹(如图 1 所示). 可见,尽管温变形下高硅钢塑性变形能力相比高温条件下依然有限,但升高温度一定程度上能够有效提高高硅钢塑性极限.

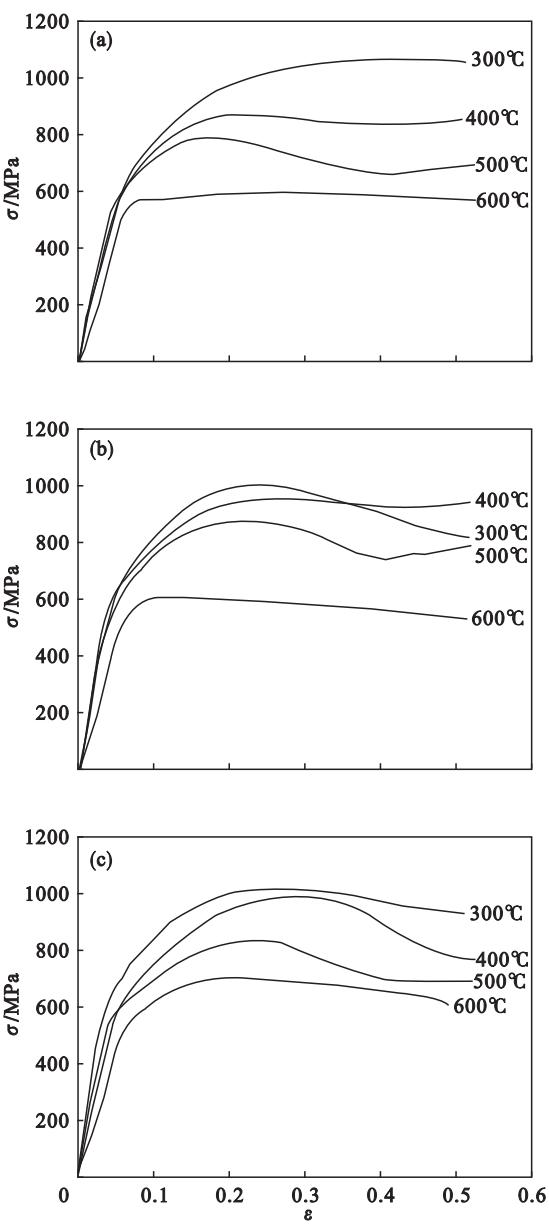


图 2 不同温度和应变速率条件下 Fe-6.5% Si 钢应力-应变曲线

Fig. 2 True stress-strain curves of Fe-6.5% Si steel deformed at different temperatures and strain rates

(a)—0.05 s⁻¹; (b)—0.5 s⁻¹; (c)—5 s⁻¹.

2.2 本构方程建立及验证

金属材料的流动应力受化学成分、组织、变形条件及加工硬化、动态软化等过程的影响。目前还没有普遍适用各种影响因素的金属变形的本构方程,通常以经验公式为基础,主要考虑温度、变形程度和变形速度 3 个主要影响因素。基于加工硬化,利用钢铁材料冷变形应变积累模型构建 Fe-6.5% Si 钢均匀塑性阶段的本构方程^[14]。

$$\sigma = A \cdot \varepsilon^m.$$
 (1)

对式(1)两边分别取对数后可得

$$\ln \sigma = \ln A + m \ln \varepsilon.$$
 (2)

其中: σ 为流动应力 (MPa); ε 为应变; A 为材料系数; $m = \partial \ln \sigma / \partial \ln \varepsilon$ 为应变硬化指数,通过 $\ln \sigma - \ln \varepsilon$ 关系曲线的斜率获得。

图 3 所示为不同应力应变曲线应变硬化指数。可以看出最小线性拟合方差 R 约为 0.956,拟合度较高,结果可靠。随着温度升高,动态软化机制加剧导致应变硬化指数 m 值降低。中温变形条件下软化机制主要为动态回复^[13],应变速率降低能够给动态软化提供足够时间,因此应变硬化指数降低,但与变形温度相比应变速率对硬化指数影响较弱。

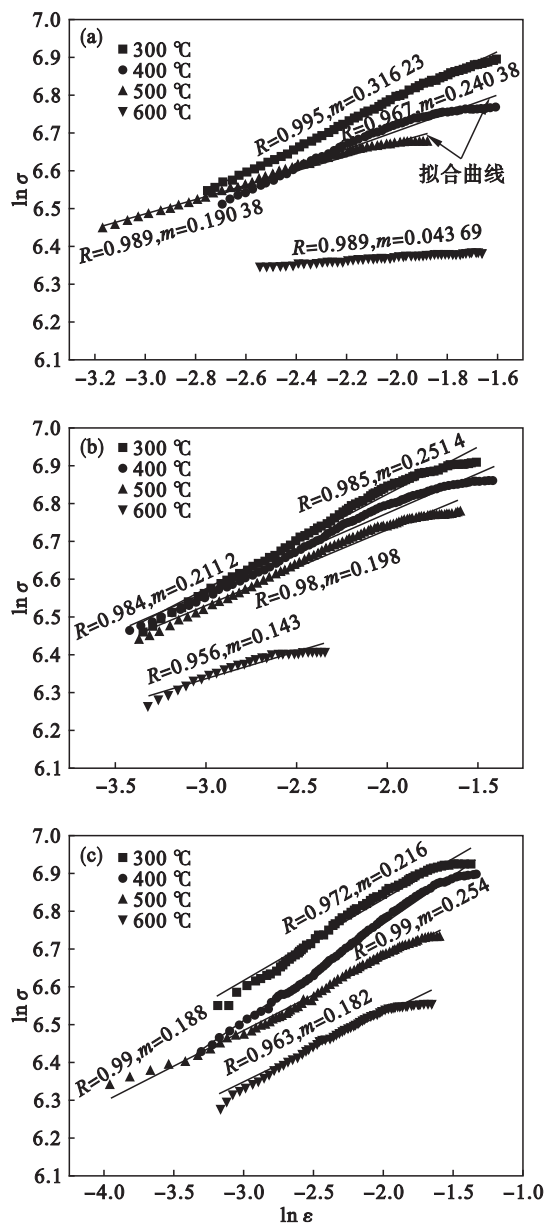


图 3 不同条件下应变硬化指数

Fig. 3 Strain hardening index of deformation under different conditions

(a)—0.05 s⁻¹; (b)—0.5 s⁻¹; (c)—5 s⁻¹.

通过分析应变硬化指数与温度和应变速率之

间的关系变化规律,将应变硬化指数描述为温度和应变速率相关的函数:

$$m = B \cdot \dot{\epsilon}^C \cdot \exp(D/T) . \tag{3}$$

其中: B, C, D 为材料常数, $C = \partial \ln m / \partial \ln \dot{\epsilon}$, $D = \partial \ln m / \partial (1/T)$. 通过 $\ln m$ 和 $\ln \dot{\epsilon}$ 关系曲线拟合直线斜率得到 C 值为 -0.021 (如图 4 所示);通过 $\ln m$ 和 $1/T$ 关系曲线拟合直线斜率平均值得到 D 值为 711 (如图 4 所示). 将所得材料常数 C, D 代入式(3),利用不同条件下应变速率、温度及 m 值求得材料常数 B 为 0.0754 .

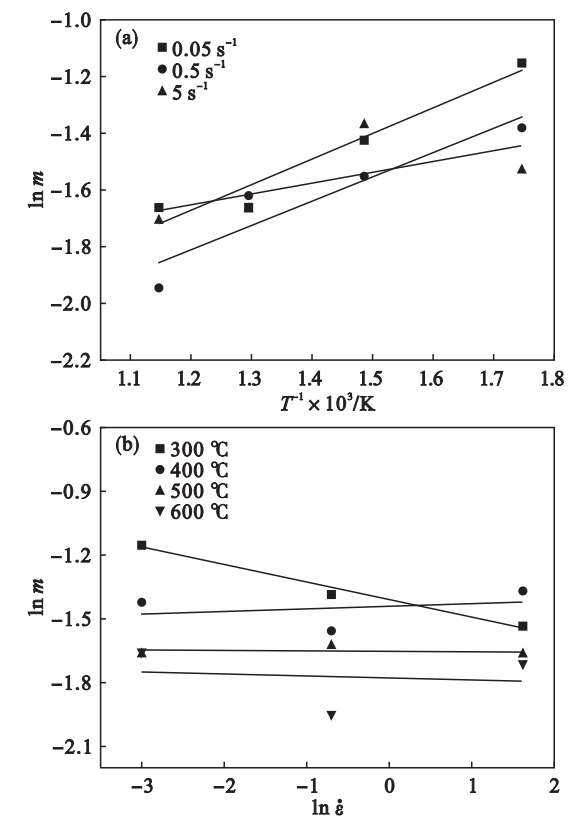


图 4 应变硬化指数与温度和变形速率之间关系曲线
Fig. 4 Strain hardening index varied with temperature and strain rate

(a)— $\ln m - 1/T$; (b)— $\ln m - \ln \dot{\epsilon}$.

利用式(3)计算出不同条件下的 m 值,然后利用式(1)求出不同条件下的 A 值. 不同变形温度和应变速率条件下的 A 值变化如图 5 所示. 可以看出 A 值随着温度升高近似呈线性降低,而受应变速率影响较小,因此将 A 描述为温度函数.

依据材料常数计算结果,Fe - 6.5% Si 钢中温变形的本构方程为

$$\sigma = (2\,674.54 - 2.06T) \epsilon^{0.0754} \dot{\epsilon}^{-0.021} \exp(711/T) . \tag{4}$$

为验证构建的本构方程精度,利用模型对不同条件下的流动应力进行了预测并和实验结果进行了对比. 相对误差计算公式为

$$RE_i = \frac{|E_i - P_i|}{E_i} \times 100\% . \tag{5}$$

其中: E_i 为流动应力实验值; P_i 为流动应力预测值.

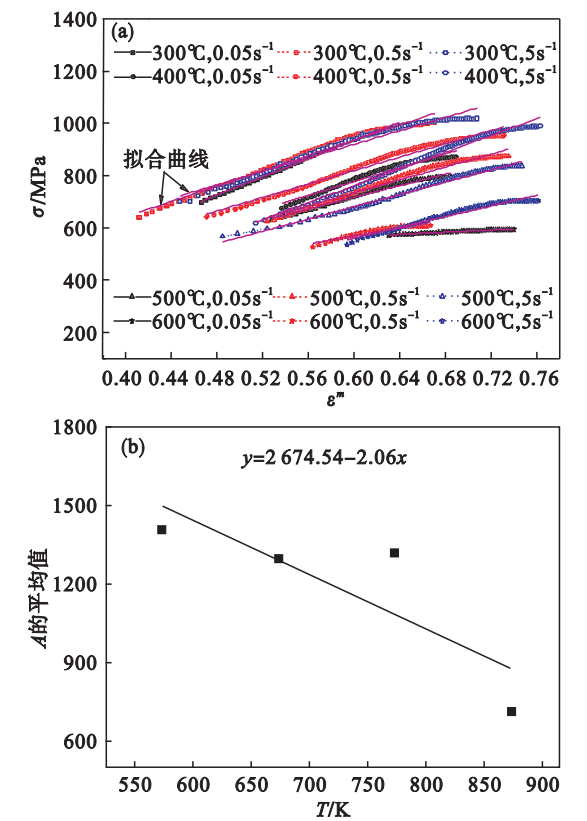


图 5 材料常数 A 值
Fig. 5 Material constant A value

(a)— A 值求解; (b)— A 值随温度变化.

图 6 所示为预测值与实验数据比较结果. 可以看出,预测值与实验结果吻合良好,最大相对误差约 13.27%,平均相对误差约为 5.35%,构建的本构方程预测精度较高,提出的材料常数求解方法比较可靠. 建立的 Fe - 6.5% Si 钢中温变形本

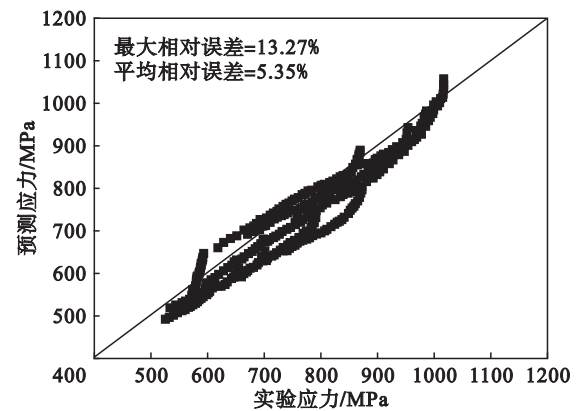


图 6 预测结果与实验数据比较
Fig. 6 Comparison between the predicted results and experimental data

构方程能够应用于温轧或其他中温塑性变形过程数值分析和工艺优化。

3 结 论

1) Fe - 6. 5% Si 钢在中温变形条件下弹性阶段流动应力急剧增加,进入均匀塑性变形区加工硬化作用使流动应力持续增加到峰值。随着应变增加,高硅钢的低温脆性使温度较低时试样出现裂纹并迅速扩展,应力达到峰值后塑性变形逐渐加速失效;温度较高约为 600 ℃时,软化和硬化作用基本保持平衡使流动应力曲线保持平稳状态。均匀塑性变形阶段的应变硬化指数随着温度升高和应变速率降低而减小。

2) 基于变形温度、变形量和变形速度考虑构建了 Fe - 6. 5% Si 钢变形温度为 300 ~ 600 ℃、变形速率为 0. 05 ~ 5 s⁻¹的本构方程,硬化指数随变形温度升高和应变速率降低而减小,提出了应变硬化指数的变形温度和变形速率描述法构建钢铁材料中温变形本构方程。

3) 利用 Fe - 6. 5% Si 钢中温变形本构方程计算的流动应力值与实验结果相比,最大相对误差约 13. 2% ,平均相对误差约 5. 35% ,预测精度较高。该研究对 Fe - 6. 5% Si 钢温轧或其他中温变形过程数值分析和工艺参数优化具有一定理论与实际意义。

参考文献：

[1] Oda Y, Kohno M, Honda A. Recent development of non-oriented electrical steel sheet for automobile electrical devices [J]. *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, 2008, 320 (20) : 2430 - 2435.

[2] 王浩,李长生,蔡殷,等. 球刻痕法对高磁感取向硅钢磁性的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34 (11) : 1571 - 1574.

(Wang Hao, Li Chang-sheng, Cai Ban, et al. Effects of the ball scribing on magnetic properties of high permeability grain-oriented silicon steels [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2013, 34 (11) : 1571 - 1574.)

[3] Ruiz D R, Ros-Yanez T, Vandenberghe R E, et al. Ordering

phenomena in Fe-Si alloys with variable Si-content (0. 2 - 11. 7 wt%) and thermomechanical processing [J]. *Revista De Metalurgia*, 2004, 40 (5) : 374 - 379.

[4] 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 - 137.

[5] Ros-Yanez T, Ruiz D, Barros J, et al. Advances in the production of high-silicon electrical steel by thermomechanical processing and by immersion and diffusion annealing [J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2004, 369 (1/2) : 125 - 130.

[6] 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 - 153.

[7] 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 - 26.

(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*, 2001, 2 (2) : 13 - 26.)

[8] Mo Y, Zhang Z, Pan H, et al. Improved plasticity and cold-rolling workability of Fe - 6. 5wt% Si alloy by warm-rolling with gradually decreasing temperature [J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2016, 32 (5) : 477 - 484.

[9] Li H B, Feng Y L, Yan T, et al. Constitutive model of warm deformation behavior of medium carbon steel [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2016, 23 (9) : 940 - 948.

[10] Sellars C M, McTegart W J. On the mechanism of hot deformation [J]. *Acta Metallurgica*, 1966, 14 : 1136 - 1138.

[11] McQueen H J, Ryan N D. Constitutive analysis in hot working [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2002, 322 : 43 - 63.

[12] Li H, Liang Y F, Yang W, et al. Disorder induced work softening of Fe-6. 5wt% Si alloy during warm deformation [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 628 : 262 - 268.

[13] 彭大暑. 金属塑性加工原理 [M]. 长沙:中南大学出版社, 2004 : 40 - 197.

(Peng Da-shu. Principle of plastic deformation in metals processing [M]. Changsha: Central South University Press, 2004 : 40 - 197.)

[14] 刘相华,胡贤磊,杜林秀,等. 轧制参数计算模型及应用 [M]. 北京:化学工业出版社, 2007 : 34 - 40.

(Liu Xiang-hua, Hu Xian-lei, Du Lin-xiu, et al. Rolling parameter calculation model and its application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007 : 34 - 40.)