

锻造

基于 Deform 的金属锻造过程的晶粒度分析研究

胡光明¹, 刘旺玉², 林伟强²

(1. 广东工程职业技术学院 机电工程系, 广东 广州 510520;

2. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641)

摘要: 晶粒细化是控制金属材料组织的最重要、最基本的方法。本文利用 Deform 软件对船用大型长轴类锻件的锻造过程进行数值模拟, 改变锻打方法, 分析晶粒细化的变化趋势。模拟结果表明: 随着接砧量的增加, 晶粒尺寸变小; 随着压下率的增大, 晶粒尺寸先减小后增大, 当压下率为 12.5% 时, 晶粒尺寸趋于最小。因此, 通过改进锻打工艺可以有效促进大型锻件的晶粒细化, 提高锻件质量。

关键词: Deform; 锻造; 晶粒细化; 数值模拟

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3940.2013.03.001

中图分类号: TG142.25; TG316.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-3940 (2013) 03-0003-05

Grain size analysis of metal forging process based on Deform

HU Guang-ming¹, LIU Wang-yu², LIN Wei-qiang²

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineer, Guangdong Polytechnic College, Guangzhou 510520, China;

2. School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Grain refinement is the most important and the most basic method to control the structure of metal materials. Using software Deform, the forging process of large marine shaft forgings was simulated, and through changing forging method, the change trend of grain refinement was analyzed. The results show that with the increase of overlapping length, the grain size decreases; with the increase of forging percentage, the grain size decreases first and then increases, when forging percentage is 12.5%, the grain size is almost the smallest. So the grain refinement can be promoted effectively and the forging quality can be improved by improving forging technology for large forgings.

Keywords: Deform; forging; grain refining; numerical simulation

35CrMo 钢是常用的锻件材料, 钢中含有较高的合金元素, 以弥散质点分布在铁素体基体上, 强化了铁素体, 也提高铁素体的再结晶温度^[1]。另外, 大锻件的加热速度受截面尺寸的限制, 只能缓慢升温, 即使是热装炉, 也不会超过 $50\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ ^[1-2], 这为片状奥氏体充分发展提供了条件, 故使得 35CrMo 钢大锻件具有遗传倾向, 即晶粒难以细化。

目前, 针对减弱钢中组织遗传, 晶粒细化途径主要有: 三次高温正火工艺、奥氏体相变硬化再结晶法、中速加热工艺、退火成平衡组织法、临界区高温正火工艺和多次高温回火工艺等^[3]。几乎所有这些细化途径都着眼于“促进粒状奥氏体发展和减少针状奥氏体形成”这一基本指导思想^[4]。

本文结合广州造船有限公司铸锻分厂的实际锻造生产加热工艺, 基于 Deform 软件对大型锻件的加热规范进行数值模拟, 就接砧量、压下率对晶粒尺寸的影响进行研究, 得出大锻件在锻造过程中通过优化锻打工艺细化晶粒的方法, 对实际生产具有直接指导意义。

1 研究对象

本文研究某船用中间轴锻件 (图 1), 下料重量为 6 t、采用 8 t 的 35CrMo 八角钢锭锯切开, 锻造工序包括倒棱、滚圆、内凹 V 型砧多次分段拔长等^[5-6]。



图 1 某船用中间轴锻造现场

Fig 1 Marine intermediate shaft forging scene

收稿日期: 2013-01-19; 修订日期: 2013-04-09

基金项目: 2010~2012 年度广东省第二批重大科技专项立项资助项目 (2009A080304004)

作者简介: 胡光明 (1972—), 男, 工程硕士, 高级讲师

电子信箱: hgm92122@163.com

船用锻件尺寸较大, 锻造过程复杂, 文中主要对接砧量、压下率对晶粒尺寸的影响进行研究, 找出晶粒细化的方法, 从而提高锻件的机械性能和力学性能。

2 再结晶理论模型

再结晶是一个热激活过程, 再结晶动力学模型大都采用 Johnson Mehl-Avrami (JMA) 方程来表述^[7], 即:

$$f = 1 - \exp(-bt^n) \quad (1)$$

式中: f 为再结晶分数; b 为实验常数; t 为时间; n 为常数。

2.1 动态再结晶动力学模型

在热变形过程中高温流变应力决定于变形温度和变形速率, 可用方程 (2) 表示^[8-9]:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = B \exp(\beta\sigma) \quad (2)$$

式中: Z 为 Zener-Hollomon 参数, 其物理意义是温度补偿的应变速率因子; Q 为变形激活能; R 为气体常数; T 为变形温度; σ 为应力; B 、 β 为常数。在不同变形条件下可以算出近似的变形激活能为 $378.2 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

2.2 静态再结晶动力学模型

通常按照 Avrami 方程来研究静态再结晶动力学^[8-9], 即:

$$f_s = 1 - \exp\left[-0.693\left(\frac{t}{t_{0.5}}\right)^n\right] \quad (3)$$

式中: f_s 为再结晶率; t 为静态再结晶所需时间; $t_{0.5}$ 为完成 50% 体积分数的静态再结晶所需时间。

钢种的化学成分对静态再结晶有显著的影响, 这主要是通过化学成分对激活能 Q_{rex} 的影响来实现的。再结晶完成后, 晶粒长大尺寸可由时间 t 和绝对温度 T 来决定。可用方程 (4) 来描述^[8-9]:

$$d = d_{\text{SR}} + 4.8 \times 10^{12} \times t \times \exp\left(\frac{-8.998 \times 10^6}{RT}\right) \quad (4)$$

式中: d 为晶粒长大尺寸; d_{SR} 为静态再结晶晶粒尺寸。

3 Deform 软件模拟

Deform 软件是一套基于有限元的工艺仿真系统软件, 主要用于分析金属成形及相关工业的各种成形工艺和热处理工艺。在此基于再结晶理论基础, 对 Deform 进行二次开发, 模拟不同锻压工艺对晶粒尺寸的影响。

图 2 为锻件所选用的钢锭尺寸, 如图 2 所示进

行建模, 材料设为 35CrMo 钢。

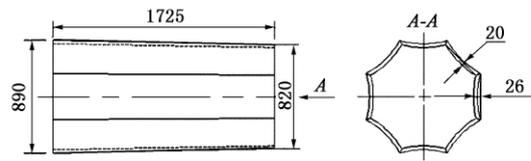


图 2 锯去冒口和底部后的钢锭

Fig. 2 Resection of both sides of steel ingot

3.1 接砧量对晶粒尺寸的影响

坯料的端部变形时, 应保证有足够的被压缩长度和较大的压缩量, 端部拔长锻打长度应满足下列规定。对圆形截面的坯料, 如图 3 所示: 锻打长度 $A > 0.3D$ ^[10]。

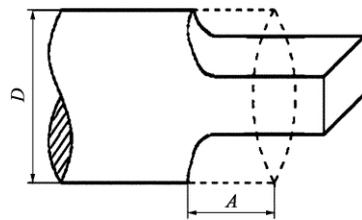


图 3 端部拔长时的锻打长度

Fig. 3 Forging length of end part stretched

在端部锻打的时候, 端部压料长度应大于直径的 0.3 倍。在第 1 火锻打钢锭过程中平砧与端部的压料长度满足:

$$L_{\text{端接触}} > 0.3D_{\text{端部}} = 0.3 \times 890 = 267 \text{ mm}$$

实际生产时, 工厂所用的砧宽 $L = 300 \text{ mm}$, 所以分别选取砧宽为 270, 290, 310 和 330 mm 进行模拟, 模拟结果如图 4 所示。

选取离坯料与上砧接触面距离为 0, 100, 200, 300 和 400 mm 处的点为代表, 初始晶粒度为 $100 \mu\text{m}$ 进行数据处理, 获得接砧量对晶粒尺寸的影响, 如图 5 所示。

从图 5 看出, 随着接砧量的增加, 晶粒尺寸有减小的趋势。这是因为, 当变形量超过临界变形程度时, 会诱发再结晶过程, 使得位错密度低的新晶粒, 逐渐取代已变形的高位错密度的变形晶粒, 从而使得晶粒变细。

3.2 压下率对晶粒尺寸的影响

图 6 为广州造船厂关于 35CrMo 大型锻件的加热规范, 工厂原来的始锻温度定在 $1220 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 但通过实践和理论研究证明, 35CrMo 始锻温度在 $1220 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右有可能会发生过热^[11], 故把模拟的始锻温度定在 $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

选取上述加热规范, 单次压下率为 5%,

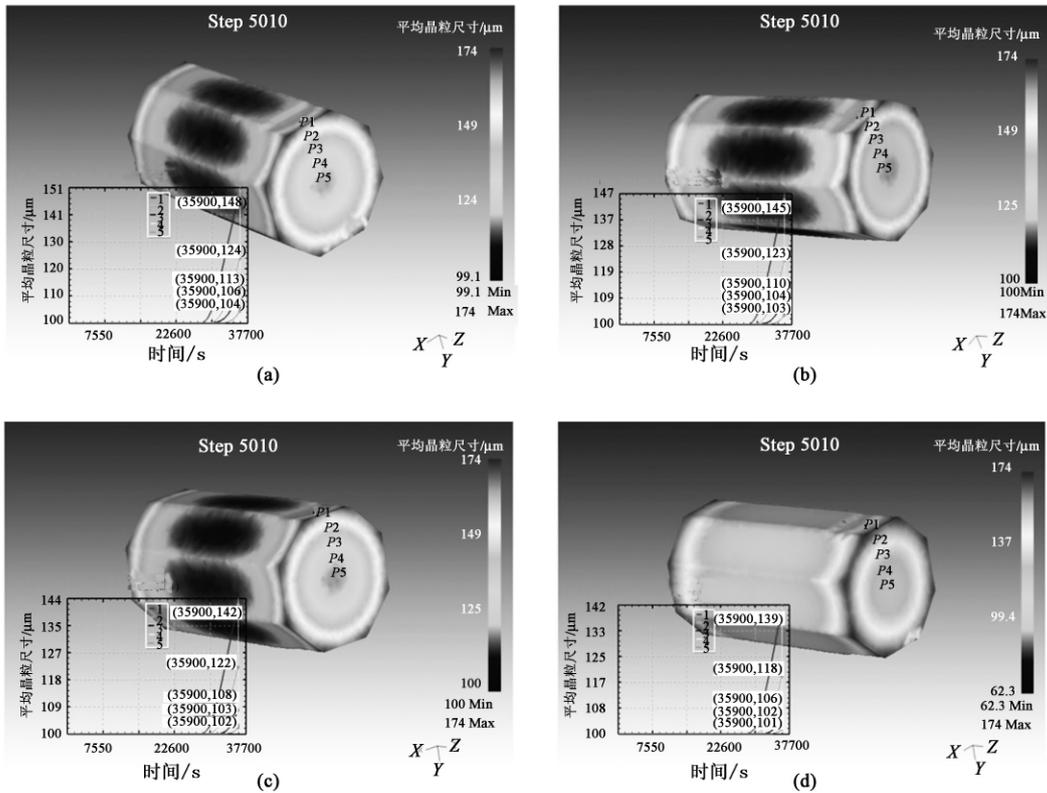


图 4 接砧量模拟结果

(a) 砧宽 $L=270$ mm (b) 砧宽 $L=290$ mm (c) 砧宽 $L=310$ mm (d) 砧宽 $L=330$ mm

Fig. 4 Simulated results of overlapping length

a) Overlapping length=270 mm (b) Overlapping length=290 mm (c) Overlapping length=310 mm (d) Overlapping length=330 mm

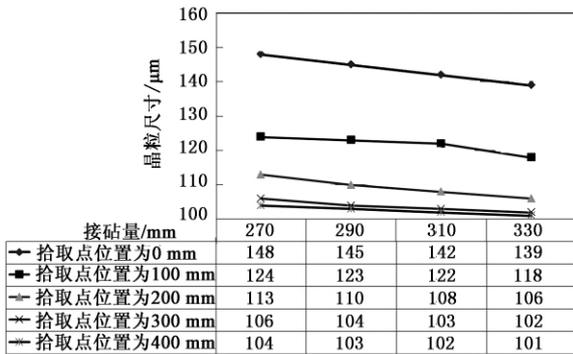


图 5 接砧量对晶粒尺寸的影响

Fig. 5 Influence of overlapping length on grain size

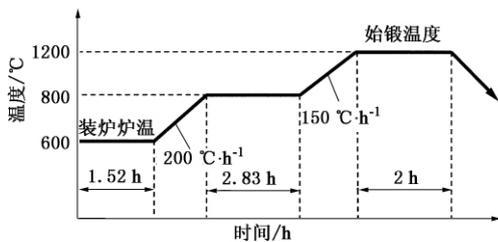


图 6 广州造船厂冷钢锭加热曲线

Fig. 6 Cold steel ingot heating curve of Guangzhou Shipyard

7.5%, 10%, 12.5%, 15%, 接砧量为 280 mm, 进行数值模拟, 模拟结果如图 7 所示。

选取离坯料与上砧接触面距离为 0, 100, 200, 300 和 400 mm 处点为代表, 初始晶粒度为 $100 \mu\text{m}$ 进行数据处理, 获得压下率对晶粒尺寸的影响, 如图 8 所示。

从图 8 可以看出, 随着压下率的增大, 晶粒尺寸有先减小后增大的趋势, 这是因为变形量超过临界变形程度后, 发生再结晶过程, 使得晶粒变细, 但当变形很大时, 会产生强烈的织构, 晶体物质被破坏, 使再结晶晶粒又迅速长大。另外, 始锻温度为 1220°C 的晶粒尺寸平均比 1200°C 多 $10 \mu\text{m}$, 这是因为加热温度过高, 再加上保温时间过长, 使得奥氏体晶粒粗化。

4 结论

(1) 进行 35CrMo 钢大锻件的生产时, 始锻温度控制在 1200°C 左右比较适宜, 超过 1200°C 奥氏体晶粒有粗化趋势。

(2) 随着接砧量的增加, 晶粒有细化趋势, 但一味增加接砧量会影响锻打效率, 因此在一定范围内增加接砧量有利于晶粒细化。

(3) 增加压下率, 晶粒尺寸先减小后变大, 当

锻造栏目是由北京异辉机电有限公司赞助刊出

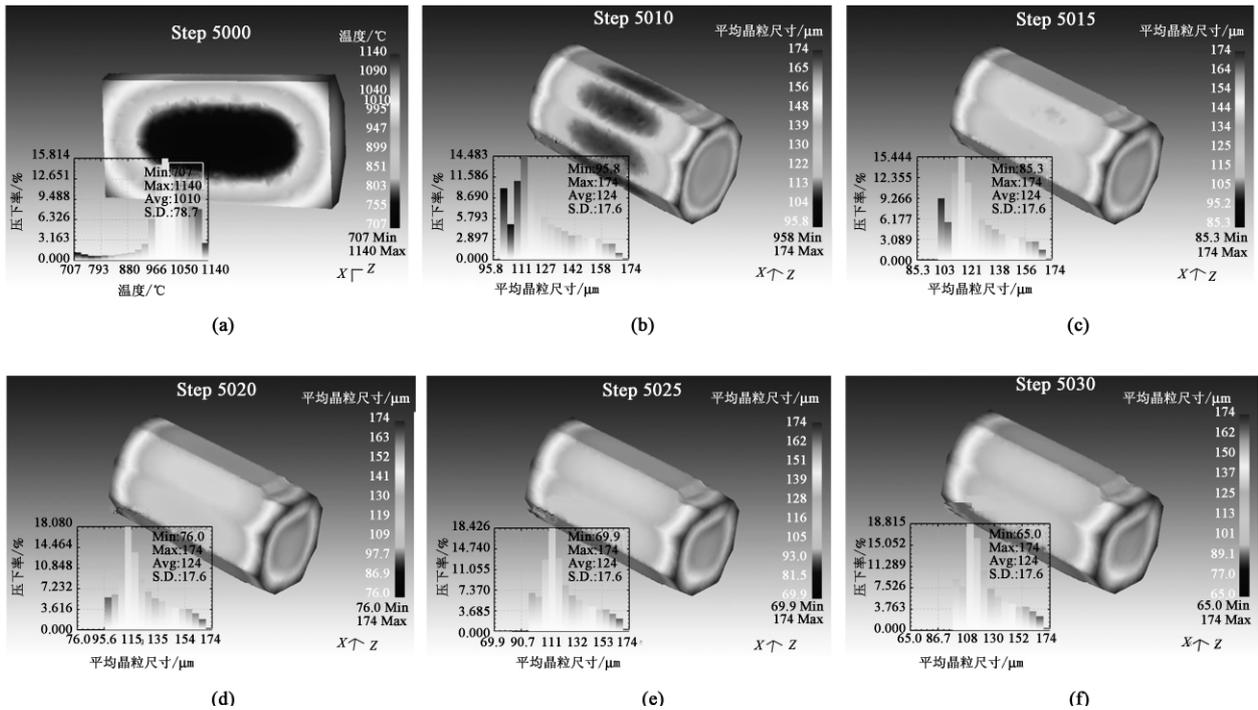


图 7 压下率模拟结果

(a) 始锻温度场 (b) 压下率为 5% 的晶粒尺寸 (c) 压下率为 7.5% 的晶粒尺寸 (d) 压下率为 10% 的晶粒尺寸
 (e) 压下率为 12.5% 的晶粒尺寸 (f) 压下率为 15% 的晶粒尺寸

Fig. 7 Simulated results of forging percentage

(a) Initial forging temperature (b) Forging percentage=5% (c) Forging percentage=7.5%
 (d) Forging percentage=10% (e) Forging percentage=12.5% (f) Forging percentage=15%

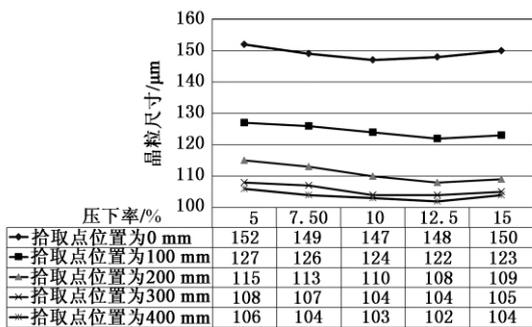


图 8 压下率对晶粒尺寸的影响

Fig. 8 Influence of forging percentage on grain size

压下率取 12.5% 时, 晶粒尺寸趋于最小。

参考文献:

[1] 王健, 李永兵, 金嘉瑜, 等. 26Cr2Ni4MoV 转子钢晶粒细化研究 [J]. 金属热处理, 2011, 26 (2): 18-20.
 Wang J, Li Y B, Jin J Y, et al. Grain refining of 26Cr2Ni4MoV steel for turbine rotors [J]. Heat Treatment of Metals, 2011, 26 (2): 18-20.

[2] 李江. 钢铁材料的晶粒细化研究 [J]. 钢铁技术, 2007, (2): 29-32.
 Li J. Study on grain refinement of steel materials [J]. Iron & Steel Technology, 2007, (2): 29-32.

[3] 程巨强. 热处理对熔模铸造贝氏体钢组织和性能的影响

[J]. 铸造技术, 2005, (1): 22-24.

Cheng J Q. Influence of heat treatment process on mechanical and microstructure of investment casting bainite cast steel [J]. Foundry Technology, 2005, (1): 22-24.

[4] 李新城, 陈光, 张开华. 钢铁材料组织超细化技术研究 [J]. 热加工工艺, 2002, (6): 54-55.
 Li X C, Chen G, Zhang K H. Research on iron and steel material structure ultrafining treatment technology [J]. Hot Working Technology, 2002, (6): 54-55.

[5] 张鹏, 夏琴香, 李哲林, 等. 长轴类大锻件自由锻造工艺研究 [J]. 锻压技术, 2011, 35 (1): 21-25.
 Zhang P, Xia Q X, Li Z L, et al. Research on free-forging process of long-shaft heavy forging [J]. Forging & Stamping Technology, 2011, 35 (1): 21-25.

[6] 夏琴香, 向可, 赵学智, 等. 船用长轴类大锻件锻造工艺方法研究 [J]. 锻压技术, 2013, 37 (1): 12-16.
 Xia Q X, Xiang K, Zhao X Z, et al. Research on forging process and forming quality control of marine long-shaft heavy forging [J]. Forging & Stamping Technology, 2013, 37 (1): 12-16.

[7] 冶金工业信息标准研究院. 世界金属导报 [N]. 2004 (1). 北京: 世界金属导报社, 2004.
 China Metallurgical Information and Standardization Insitute. World Metal Bulletin [N]. 2004 (1). Beijing: The World Metal Bulletin, 2004.

大尺寸内齿轮冷挤压成形工艺研究

李建平¹, 夏祥生², 万元元², 陶健全², 车路长²

(1. 重庆电子工程职业学院 建筑与材料学院, 重庆 401331; 2. 中国兵器工业第五九研究所, 重庆 400039)

摘要: 对大尺寸内齿轮挤压成形过程进行数值模拟, 系统地研究了坯料尺寸、摩擦系数和坯料入口角对挤压成形性能的影响, 并对挤压成形工艺进行了优化。研究表明: 坯料尺寸、摩擦系数和坯料入口角对挤压成形过程存在显著影响。当坯料内孔直径尺寸介于内齿轮的分度圆直径与冲头齿根圆直径之间时, 内齿轮齿形充填均匀, 齿形饱满。采用优化后的工艺对大尺寸内齿轮进行冷挤压成形试验, 结果表明, 提出的冷挤压成形工艺方案合理可行。

关键词: 大尺寸内齿轮; 冷挤压; 数值模拟

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3940.2013.03.002

中图分类号: TG376.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-3940 (2013) 03-0007-05

Technical research on cold extrusion of large size internal gear

LI Jian-ping¹, XIA Xiang-sheng², WAN Yuan-yuan², TAO Jian-quan², CHE Lu-chang²

(1. Architecture and Materials Institute, Chongqing College of Electronic Engineering, Chongqing 401331, China;
2. No. 59 Institute of China Ordnance Industry, Chongqing 400039, China)

Abstract: The numerical simulation was conducted for the extrusion process of the large size internal gear, and the effects of stock size, friction coefficient and punch inlet angle on extrusion deformation were studied, and extrusion process parameters were optimized. Results show that extrusion performance is affected notably by stock size, friction coefficient and punch inlet angle. When the diameter of stock aperture was between reference diameter of internal gear and the diameter of punch tooth root circle, the internal gear was filled evenly and fully. Cold extrusion test was carried out for the large size internal gear using the optimized parameters obtained. Results show that the technology for cold extrusion of large size internal gear is reasonable.

Keywords: large size internal gear; cold extrusion; numerical simulation

齿轮是应用最为广泛的通用机械零件, 其种类繁多, 有直齿轮、内齿轮、斜齿轮和人字形齿轮等, 形状结构复杂且多样。传统的内齿轮采用机械加工方法生产, 其工艺存在一系列缺点, 如耗费工时多、金属利用率低、成本高等, 而且切齿加工后还需要后续磨削工序, 加工过程中内部金属流线被切断, 使齿轮力学性能变差^[1-2]。内齿轮零件相对于外齿轮

虽然用量较少, 但在汽车、拖拉机以及机床仪器仪表等常用机械中却是一种不可缺少的重要零件。随着其需求的大量增加, 如何进一步改进内齿轮零件的成形工艺, 提高其材料利用率和生产率, 降低能耗和生产成本, 是目前世界各国加工业追求的目标^[3-4]。有研究表明, 采用冷挤压工艺制备内齿轮可以克服机械加工工艺生产内齿轮的缺点^[5-6], 不仅具有节约材料、能源的特点, 而且在降低成本和提高效率等方面都非常显著, 特别是经过这种工艺加工的齿轮, 其内部形成致密而均匀的材料组织, 沿齿形轮廓具有连续而合理的金属流线, 表面形成加工

收稿日期: 2013-02-27; 修订日期: 2013-04-14

作者简介: 李建平 (1964—), 男, 硕士, 副教授

电子信箱: ljp_0425@qq.com

[8] 何宜柱, 陈大宏, 雷廷权, 等. 动态再结晶动力学模型的研究 [J]. 华东冶金学院学报, 1995, (2): 133-138.
He Y Z, Chen D H, Lei T Q, et al. Modelling the kinetics of dynamic recrystallization [J]. Journal of East China University of Metallurgy, 1995, (2): 133-138.

[9] 张鸿冰, 张斌. 两种结构钢的热变形行为及其数学模型 [J]. 钢铁研究学报, 2006, 18 (2): 44-45.
Zhang H B, Zhang B. Hot deformation behavior and mathematical model of two structural steels [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2006, 18 (2): 44-45.

[10] 中国机械工程学会塑性工程学会. 锻压手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
The Plastic Engineering Society of the Chinese Mechanical Engineering Society. Forging Handbook [M]. Beijing: China Machine Press, 2006.

[11] 王健, 肖宏, 张志国. 流变应力逆分析确定静态再结晶动力学模型 [J]. 金属学报, 2008, (7): 837-842.
Wang J, Xiao H, Zhang Z G. Inverse analysis method to determine kinetics model for static recrystallization using flow curves [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, (7): 837-842.