

20A 钢热塑性变形的应力-应变本构模型研究

白梅, 张驰, 沈国保

(重庆理工大学 材料科学与工程学院, 重庆 400054)

摘要: **目的** 研究 20A 低碳钢在高温条件下的热变形行为及本构模型。**方法** 采用 Gleeble-1500 型热模拟压缩试验, 研究在不同变形温度及变形速率条件下, 材料的真实应力-应变之间的关系。**结果** 20A 钢属于对温度和应变速率都敏感的材料, 其流变曲线呈现出周期性动态再结晶特征。**结论** 通过对实验数据运用最小二乘法、多元线性回归方法及 Arrhenius 方程处理, 得到了 20A 材料热变形本构模型为 $\sigma = 8.8650 \varepsilon^{0.1445} \dot{\varepsilon}^{0.1283} \exp\left(\frac{3475.23}{T}\right)$, 为 20A 钢塑性加工过程的控制及模拟提供了理论基础。

关键词: 20A 钢; Gleeble-1500 型热模拟; 热变形行为; 本构模型

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2014.04.010

中图分类号: TG142.2

文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2014)04-0052-06

Stress-Strain Constitutive Model for Hot Deformation of 20A Steel

BAI Mei, ZHANG Chi, SHEN Guo-bao

(School of Material Science and Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

ABSTRACT: **Objective** With the purpose of studying the deformation behaviors and the constitutive model of 20A low-carbon steel under the condition of high temperature. **Methods** A hot compression test for 20A steel was performed by using Gleeble-1500 thermal simulation-mechanical simulator under the condition of different deformation temperature and deformation rate to study the actual stress-strain relationship. **Results** The results showed that 20A steel was sensitive to the temperature and strain rate, and the rheological curves showed periodic characteristics of dynamic recrystallization. **Conclusion** The thermal deformation constitutive model ($\sigma = 8.8650 \varepsilon^{0.1445} \dot{\varepsilon}^{0.1283} \exp\left(\frac{3475.23}{T}\right)$) of 20 A steel was established by numerical analysis, multivariate linear regression method and Arrhenius equation, which can provide guidance for the control and simulation of plastic deformation of 20A steel.

KEY WORDS: 20A steel; Gleeble-1500 thermal simulation; hot deformation behavior; constitutive model

本构模型是加工过程中精确塑性成形控制的最基本的数学模型, 其为变形温度、变形速率、应变速率和材料本身的函数, 即 $S=f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T, \alpha)^{[1]}$ 。在金

属塑性成形时, 制定合理的工艺参数范围, 对成形后零件的组织性能有着重要的影响, 这就要求从事压力加工的工作者们在制定材料成形工艺方案时, 有

收稿日期: 2014-06-02

基金项目: 重庆市重庆理工大学研究生创新基金项目(YCX2013209)

作者简介: 白梅(1989—), 女, 重庆人, 硕士研究生, 主要从事金属材料轧制方向的研究。

必要对材料本身做相关的研究,了解不同变形条件对材料应力-应变的影响规律,这对于控制和改善材料的组织性能及合理选择加工工艺参数,具有重要的意义^[2]。

目前,相关的学者对低碳钢做了不少研究^[3-6],王猛和李龙飞等人^[7]研究了低碳钢 Q235 在 700 ℃ 和 0.01 s⁻¹ 条件下金属的变形过程,并没有研究材料在高温条件下的变形行为。吕学星、李锋等人^[8]对普碳钢 Q235 的应力应变关系曲线进行了研究分析,并没有建立钢的本构模型。计云萍、金自力等人^[9]针对 Fe-3% Si 钢结合 CSP 生产线工艺特点,通过热模拟实验研究了材料在热轧过程中的再结晶行为,但这套理论结果不能广泛应用于其他材料及工艺。文中借助 Gleeble-1500 型热模拟实验机进行压缩实验,研究并分析 20A 钢材料在高温(800 ~ 1000 ℃)和不同变形速率(0.1, 1, 10, 20 s⁻¹)条件下对应的应力-应变曲线特性,从而建立 20A 钢的高温变形本构模型,为正确制定轧制生产工艺及合理选择轧机设备提供理论参考。

1 实验材料与方法

实验材料为低碳钢 20A 热轧棒材,其化学成分见表 1。

表 1 实验用 20A 钢的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of the 20A steel used in the experiments

材料	C	Si	Mn	P	S	Cr
20A	0.17 ~ 0.23	0.17 ~ 0.37	0.35 ~ 0.65	≤0.030	≤0.030	0.25

热模拟试验材料是将尺寸为 $\phi 200 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 的连铸坯切割加工成标准试样,试样尺寸为 $\phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 。热压缩模拟实验工艺方案示意图见图 1。为了保证获得均匀化的原始晶粒组织,首先将材料以 10 ℃/s 的速度加热到 1170 ℃,保温 2 min,再以 5 ℃/s 的冷却速度分别冷至 800, 850, 900, 950, 1000 ℃,并保温 2 min,以使试样内部温度得以均匀化,接着以不同的变形速率(0.1, 1, 10, 20 s⁻¹) 在热模拟压缩试验机上测出对应材料的应力、应变值,其最大压缩变形量设为 60%,压缩变形结束后,应立即淬火,使试样快速冷却至室

温,从而保留高温组织^[10]。

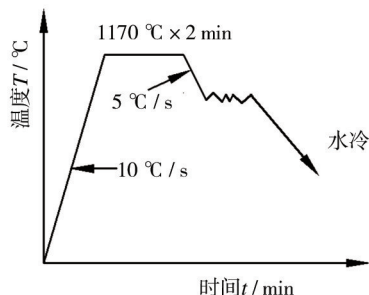


图 1 热模拟压缩实验方案

Fig. 1 The program of thermal simulating hot compression

2 实验结果与分析

根据热模拟实验方案测得的应变速率为 0.1, 1, 10, 20 s⁻¹, 不同温度下的变形抗力曲线, 见图 2 和图 3。图 2 所示分别为 20A 钢在不同变形速度下的 σ - ε 曲线。图中显示随着温度上升, 流变应力大体呈下降趋势。显然, 变形温度对材料高温变形抗力有显著的影响。在低温阶段, 由于钢的低延展性和高硬度, 流变应力较大, 如图中显示, 在 800 ℃ 和 850 ℃ 时应力较大。随着温度的上升, 尤其在变形起始阶段, 流变应力急剧下降; 随着变形量的继续增加, 由于加工硬化占主导作用, 使金属内部晶格畸变得不到完全恢复, 变形阻力越来越大, 导致流变应力增大。所有成形温度条件下, 变形抗力均达到某一峰值应力后, 呈下降趋势或保持稳态, 如图 2a 最为明显, 这说明 20A 钢在这一阶段发生加工硬化的同时, 伴随着动态回复、再结晶过程, 表现出流变应力行为的软化机制。

当材料以 0.1 s⁻¹ 和 1 s⁻¹ 应变速率变形时, 20A 钢的应力-应变曲线较为光滑, 且波动较小, 为稳态型; 随着应变量的增大, 变形抗力达到极限值时有缓慢下降的趋势, 即在这一阶段发生了动态再结晶, 如图 2a, b 所示。而当应变速率大于 1 s⁻¹ 变形时, 变形抗力曲线出现波动; 当变形速率以 20 s⁻¹ 变形时, 变形抗力曲线呈周期性波动, 这说明变形速度的大小影响材料的再结晶行为; 最终由变形造成的硬化与再结晶引起的软化相互作用达到动态平衡。当变形速度继续增加时, 将会由稳态动态再结晶变为周期型动态再结晶, 如图 2c 和 d 所示。

图 3 是不同应变速率下最大变形抗力随温度变

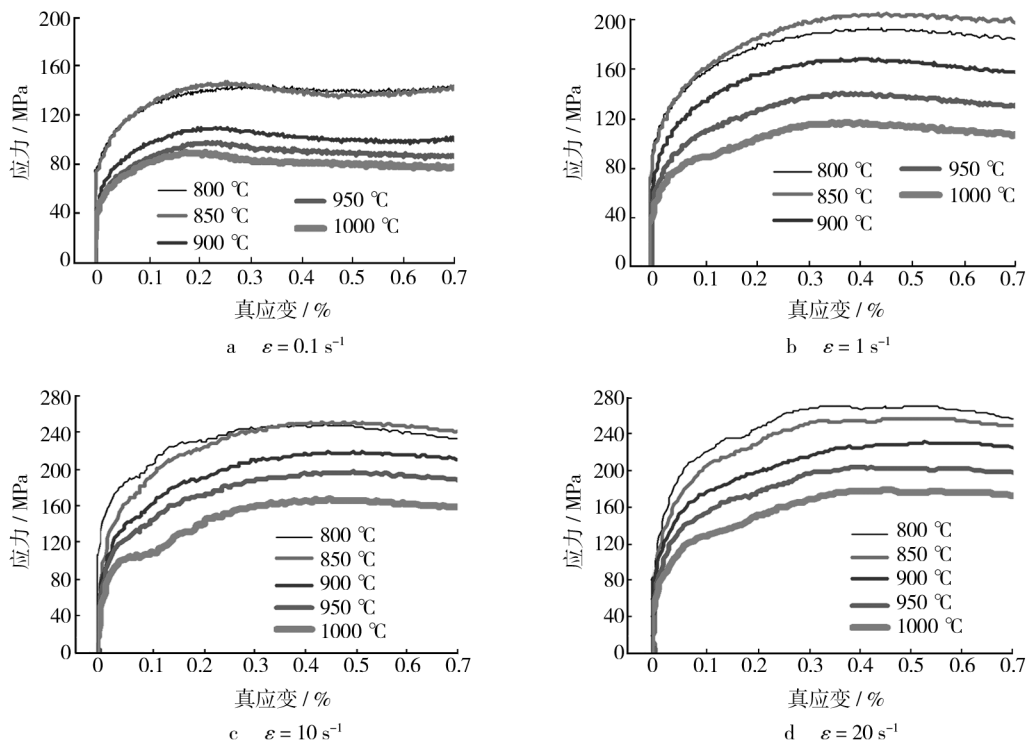


图2 不同应变速率下20A钢真应力-应变曲线

Fig. 2 Actual stress-strain curves for 20A steel at different compressive strain rates

化的分布情况。图3显示,当应变速率低于 20 s^{-1} 时,在相对低温阶段,其流变应力随温度上升反而升高,在 850 °C 时候的流变应力,比 800 °C 的要高,如图3中曲线所示。

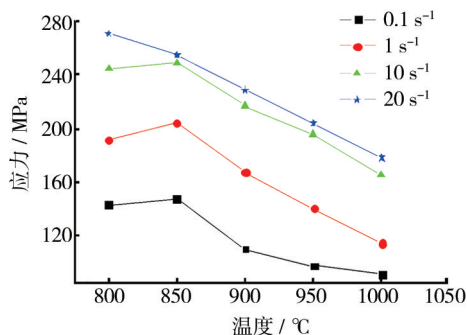


图3 20A钢峰值应力分布曲线

Fig. 3 The peak value stress distribution of 20A steel

图4所示分别为在相同温度条件下,变形速度对20A钢变形抗力的影响。图4中变化曲线显示,变形抗力随应变速率的升高而递减,其递减过程基本呈幂函数关系。显然,应变速率对材料高温变形抗力有明显的影

响,从而得到20A钢是一个对应变

3 20A钢热变形本构模型的建立

根据 Sellars 和 Tegart 通过实验研究提出的 Arrhenius 模型,该模型包含变形激活能 Q 和温度 T 的模型,得到金属的高温变形是一个复杂的热激活过程^[11]。材料的变形抗力受变形温度、变形速率和材料性能等因素的影响,它们之间的关系符合双曲正弦函数关系,即变形抗力(σ)、变形速率($\dot{\epsilon}$)和温度(T)之间的关系可用 Arrhenics 表示^[13-14]:

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

式中: $\dot{\epsilon}$ 为应变速率; A 为结构因子; σ 为流变应力; n 为应力指数; Q 为变形激活能; R 为气体常数, $R=8.315\text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为热力学温度。

对式(1)等式两边同时取对数得:

$$\ln \sigma = \frac{1}{n} \ln \dot{\epsilon} + \frac{Q}{nRT} - \frac{1}{n} \ln A \quad (2)$$

式(2)表明:当 $\dot{\epsilon}$ 值一定时, $\ln \sigma$ 与 $1/T$ 呈线性关系,温度为定值时, $\ln \sigma$ 与 $\ln \dot{\epsilon}$ 呈线性关系,如图5和6曲线所示。在相同的 $\dot{\epsilon}$ 和 T 下, $\ln \sigma$ 和 $\ln \epsilon$

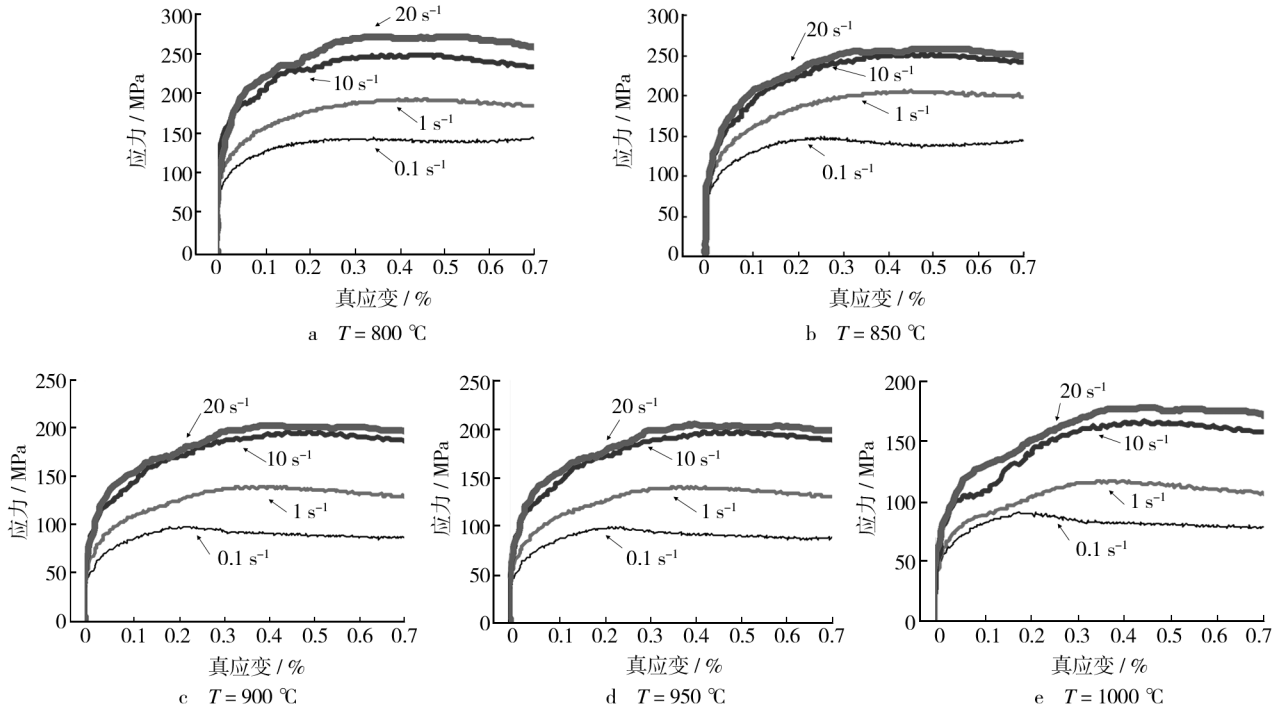


图4 不同温度下的20A 钢真应力-应变曲线

Fig. 4 Actual stress-strain curves for 20 steel at different compressive temperatures

也呈线性关系,如图7所示。可见20A 低碳钢符合Arrhenius 模型。

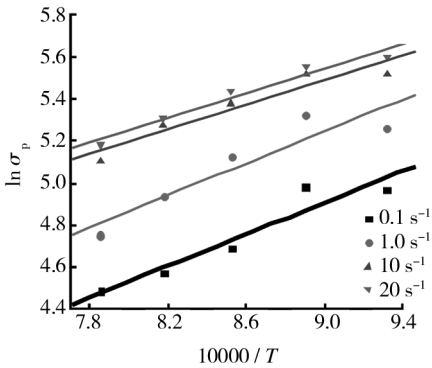


图5 20A 钢 $\ln \sigma_p$ 与 $1/T(\times 10^4)$ 的线性关系

Fig. 5 The linear dependence of $\ln \sigma_p$ on $1/T$

为了使结果更为准确,对模型进行合理的处理及修正才能得到较高精度的金属流动方程。材料流动时的变形抗力与加热温度、变形速率及变形程度可以用如下关系表达^[15]:

$$\sigma = C \varepsilon^k \dot{\varepsilon}^m \exp(\beta/T) \quad (3)$$

式中: ε 为应变程度, $\beta = -Q/nR$ 。

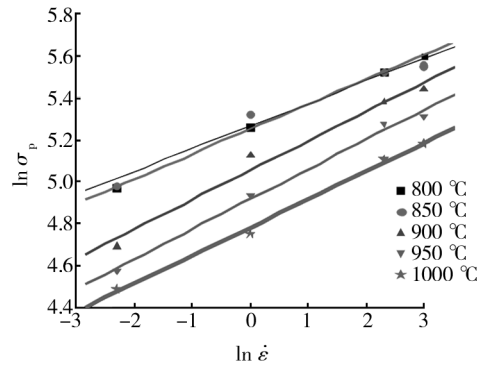


图6 20A 钢 $\ln \sigma_p$ 与 $\ln \dot{\varepsilon}$ 的线性关系

Fig. 6 The linear dependence of $\ln \sigma_p$ on $\ln \dot{\varepsilon}$

对式(3)等式两边分别求对数得:

$$\ln \sigma = \ln C + k \ln \varepsilon + m \ln \dot{\varepsilon} + \frac{\beta}{T} \quad (4)$$

根据最小二乘原理,对式(4)进行多元线性回归分析,得出各常数值为:

$m = 0.1283$; $\beta = 3475.23$; $k = 0.1445$; $d = \ln C = 8.8650$; 复相关系数 R 为 0.9475, 因此线性回归效果比较好。

得到20A 钢本构方程为:

$$\sigma = 8.8650 \varepsilon^{0.1445} \dot{\varepsilon}^{0.1283} \exp\left(\frac{3475.23}{T}\right)$$

运用 origin 软件自带的 Mathematica 数学工具处理本构方程,图8所示为根据该本构方程得出的流变应力拟合值与实测值之间的比较曲线。可见,拟合值与各点实测值吻合较好。

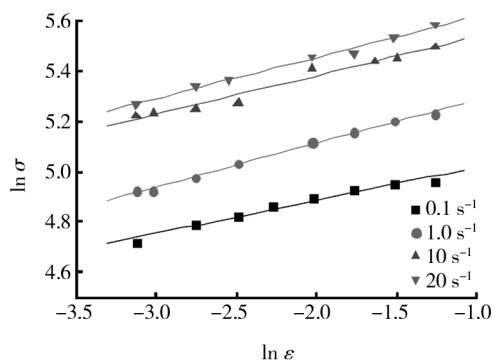


图7 20A钢 $\ln \sigma$ 与 $\ln \varepsilon$ 的线性关系

Fig. 7 The linear dependence of $\ln \sigma$ on $\ln \varepsilon$

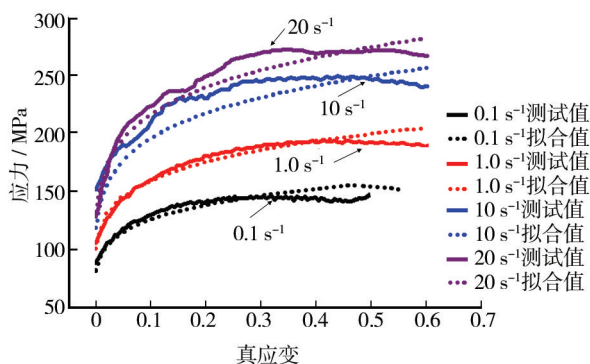


图8 20A钢本构方程曲线与测试曲线对比

Fig. 8 The dependence of constitutive equation curve on measured curve

4 结论

1) 由热模拟压缩试验发现,20A钢属于应变速率敏感材料,即在恒定变形温度下,变形速度增加,变形速度由稳态动态再结晶变为周期型动态再结晶,流变应力随着变形速度的增加而降低。

2) 20A钢同样也是温度敏感材料,即在恒定应变速率下,随着温度升高,流变应力迅速降低。

3) 按照 Arrhenius 双曲正弦流变应力模型,建立的20A钢的热变形本构方程为:

$$\sigma = 8.8650 \varepsilon^{0.1445} \dot{\varepsilon}^{0.1283} \exp\left(\frac{3475.23}{T}\right)$$

参考文献:

- [1] 徐春,张驰. 金属塑性成形理论[M]. 北京:冶金工业出版社,2009.
XU Chun,ZHANG Chi. Principles of Metal Forming[M]. Beijing:Metallurgical Industry Press,2009.
- [2] 崔军辉,杨合,孙志超. TB6 钛合金热变形行为及本构模型研究[J]. 稀有金属材料与工程,2012, 41(7): 1166—1170.
CUI Jun-hui,YANG He,SUN Zhi-chao. Research on Hot Deformation Behavior and Constitutive Model of Titanium Alloy TB6[J]. Rare metal Materials and Engineering, 2012,41(7):166—1170.
- [3] 赵河山. 低碳钢中形变诱导铁素体相变过程中的应力-应变曲线研究[J]. 宝钢技术,2012(1):48—53.
ZHAO He-shan. Investigation Into the Stress-strain Curve of Deformation-induced Ferrite Transformation in Low Carbon Steel[J]. Baosteel Technology, 2012(1): 48—53.
- [4] KOVAC F, DZUBINSKY M, BORUTA J. Prediction of Low Carbon Steels Behaviour under Hot Rolling Service Conditions[J]. Acta Materialia, 2003, 51(6): 1801—1808.
- [5] ZHANG J D,KWON H C. Micro-cracking of Low Carb on Steel in Hot-forming Processes[J]. Journal of Materials Processing Technology,2005(162-163):447—453.
- [6] 金朝阳,崔振山. 低碳钢热塑性成形过程本构模型[J]. 上海交通大学学报,2010,44(4):437—441.
JIN Zhao-yang,CUI Zhen-shan. Constitutive Model for High Temperature Plastic Deformation of Low Carbon Steel[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University,2010, 44(4):437—441.
- [7] 王猛,李龙飞,杨王,等. 低碳钢中铁素体动态再结晶的粒子激发形核[J]. 北京科技大学学报,2008,30(9):993—996.
WANG Meng,LI Long-fei,YANG Wang, et al. Particle Stimulated Nucleation of Dynamic Recrystallization of Ferrite in a Low Carbon Steel[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2008,30(9):993—996.
- [8] 吕学星,李锋,曹旭东,等. 普碳钢 Q235 的应力-应变曲线研究[J]. 山东冶金,2007,129(1):41—42.
LYU Xue-xing,LI Feng,CAO Xu-dong, et al. Research

- on the Stress-strain Curve of Plain Carbon Steel Q235 [J]. Shandong Metallurgy, 2007, 129(1): 41—42.
- [9] 计云萍,金自力,李伟,等. Fe-3%Si 钢 CSP 工艺轧制的热模拟试验[J]. 钢铁钒钛, 2011, 32(4): 67—70.
- JI Yun-ping, JIN Zi-li, LI Wei, et al. Study on Thermal Simulation Experiment of CSP Hot Rolling of Fe-3% Si Steel[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2011, 32(4): 67—70.
- [10] 崔忠圻,覃耀春. 金属学与热处理[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.
- CUI Zhong-qi, QIN Yao-chun. Metal Materials and Heat-treatment[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [11] 胡诗超,张恒华,吴晓春,等. 30Cr3MoV 钢热压缩流变应力行为研究[J]. 上海金属, 2011, 33(3): 1—5.
- HU Shi-chao, ZHANG Heng-hua, WU Xiao-chun, et al. Flow Stress Behaviour of 30Cr3MoV Steel During Hot Compression[J]. Shanghai Metals, 2011, 33(3): 1—5.
- [12] 舒滢,曾卫东,周军,等. BT20 合金高温变形行为的研究[J]. 材料科学与工艺, 2005, 13(1): 76—79.
- FU Ying, ZENG Wei-dong, ZHOU Jun, et al. A Study of Hot Deformation Behavior for BT20 Alloy[J]. Material Science and Technology, 2005, 13(1): 76—79.
- [13] 肖远伦,赵军,李祖荣,等. 挤压态 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金热变形行为研究[J]. 精密成形工程, 2014, 6(1): 49—53.
- XIAO Yuan-lun, ZHAO Jun, LI Zu-rong, et al. Hot Deformation Behaviour of Extruded Mg-Gd-Zn-Zr Alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6(1): 49—53.
- [14] 王艳彬,门海豹,陈强,等. MB15-RE 镁合金铸坯在半固态温度下的应力-应变曲线测试与特征分析[J]. 精密成形工程, 2012, 4(3): 5—9.
- WANG Yan-bin, MEN Hai-bao, CHEN Qiang, et al. Experimental Study and Analysis of Stress-strain Curves for the MB15-RE Magnesium Alloy Casting Billet under the Semisolid Conditions[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2012, 4(3): 5—9.
- [15] 上官姝哲,李鑫,鲁世强,等. Ti3Al 基合金高温变形行为及其流动应力模型[J]. 精密成形工程, 2012, 4(6): 41—44.
- SHANGGUAN Shu-zhe, LI Xin, LU Shi-qiang, et al. High Temperature Deformation Behavior and Flow Stress Model of Ti3Al Based Alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2012, 4(6): 41—44.

(上接第 23 页)

- [9] 谭海林,张宜生,桂中祥,等. 奥迪 B 柱热冲压成形热-力-相变耦合仿真分析[J]. 热加工工艺, 2013, 42(1): 67—69.
- TAN Hai-lin, ZHANG Yi-sheng, GUI Zhong-xiang, et al. Simulation Analysis on Thermo-mechanical Metallurgical Coupling of Hot Stamping Audi B-pillar Punching Forming[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(1): 67—69.
- [10] 林建平,孔庆华,徐洲,等. 22MnB5 钢板不等温拉深成形的影响因素研究[J]. 同济大学学报, 2011, 39(4): 567—571.
- LIN Jian-ping, KONG Qing-hua, XU Zhou, et al. Study on Factors of 22MnB5 Steel Isothermal Drawability[J]. Journal of Tongji University, 2011, 39(4): 567—571.
- [11] 刘红生,包军,刑忠文. 高强钢板热冲压成形热力耦合数值模拟[J]. 材料科学与工艺, 2010, 39(11): 103—105.
- LIU Hong-sheng, BAO Jun, XING Zhong-wen. Numerical Simulation on Channel Shape Hot Stamping of 22MnB5 High-strength Sheet Metal Based on Thermo-mechanical Coupled Method[J]. Material Science & Technology, 2010, 39(11): 103—105.
- [12] HE L F, ZHAO G Q, LI H P. et al. Research on Mechanical Properties of 22MnB5 Steel Quenched in a Steel Die[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2011, 16(2): 129—132.
- [13] SLEICHER C A, ROUSE M W. A Convenient Correlation for Heat Transfer to Contact and Variable Property Fluids in Turbulent Pipe Flow[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1975, 18(5): 677—683.
- [14] SOMANI M C, KARJALAINEN L P, ERIKSSON M, et al. Dimensional Changes and Microstructural Evolution in a B-bearing Steel in the Simulated Forming and Quenching Process[C]//ISIJ International 4, 2001, 361—367.
- [15] URETTA A, BRUSCHI S, GHIOTTI A. Investigation of 22MnB5 Formability in Hot Stamping Operations[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 177(1): 396—400.