

Ti6321 合金高温变形行为及流动应力模型

于卫新, 李兆峰, 陈 斌, 杨治军, 蒋 鹏, 李士凯

(中国船舶重工集团公司 第七二五研究所, 洛阳 471039)

摘 要: 在 Gleeble-1500 型热模拟压缩机上对 Ti6321 钛合金在温度为 850~990 °C、应变速率为 0.01~10.0 s⁻¹、变形程度为 60%的条件下进行了热模拟压缩实验。结果表明: Ti6321 合金在变形开始阶段, 流动应力随应变的增加迅速增加至峰值, 随着变形的继续进行流动应力开始下降并逐渐趋于稳定; 变形温度升高和应变速率减小使峰值应力显著降低。利用多元回归分析建立 Ti6321 钛合金在高温变形时的流动应力模型, 模型的计算值与实验数据的平均相对误差为 6.59%, 该模型较好地描述 Ti6321 钛合金在高温变形过程中的流动行为。

关键词: Ti6321 钛合金; 热模拟压缩; 工艺参数; 变形行为; 流动应力模型

中图分类号: TG319

文献标志码: A

High temperature deformation behavior and flow stress model of Ti6321 titanium alloy

YU Wei-xin, LI Zhao-feng, CHEN Bin, YANG Zhi-jun, JIANG Peng, LI Shi-kai

(Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471039, China)

Abstract: The isothermal compression of Ti6321 titanium alloy in the deformation temperature range from 850 to 990 °C, the strain rate range from 0.01 to 10.0 s⁻¹ and the deformation degree of 60% was conducted on a Gleeble-1500 isothermel compressor. The results show that the flow stress of Ti6321 titanium alloy increases quickly with the strain and reaches a peak, then decreases slowly to a near steady value. The peak stress significantly decreases with the increase of deformation temperature and decrease of strain rate. The flow stress model Ti6321 titanium alloy during high temperature deformation was established by using the regression method. The average relative difference between the calculated and experimental flow stress is 6.59%. The flow stress model can efficiently predict the deformation behavior of Ti6321 titanium alloy during high temperature deformation.

Key words: Ti6321 titanium alloy; isothermal compression; processing parameters; high temperature deformation behavior; flow stress model

材料的流动应力模型是联系材料流动应力与锻造热力参数的最基本函数关系, 是进行金属塑性变形工艺设计和控制的基础, 也是利用刚塑性有限元方法对金属加工过程进行数值模拟的前提条件。在塑性加工领域, 研究材料流动应力模型的根本目的在于准确描述流动应力随变形温度、应变和应变速率等参数的变化情况, 以提高工艺设计计算和仿真的精度^[1-8]。

Ti6321 合金是近 α 型船用钛合金, 具有较高的强

度和良好的耐海水腐蚀性。Ti6321 合金属于难变形材料, 采用传统的设计和控制方式, 很难保证产品质量的稳定性。为实现优化和控制锻造热力参数, 必须针对钛合金的成形特点, 建立一种适用于锻造工艺设计和过程控制的流动应力模型。

本文作者通过 Ti6321 钛合金的热模拟压缩实验, 研究了变形工艺参数对 Ti6321 钛合金高温变形时流动应力的影响规律, 并针对 Ti6321 钛合金的成形特

点,利用多元回归分析的方法建立了 Ti6321 钛合金高温变形时的流动应力模型,同时对模型的可靠性进行了验证。

1 实验

实验材料为 Ti6321 合金棒材,其化学成分如表 1 所列。供应态 Ti6321 合金的微观组织形貌如图 1 所示。经测定, $\alpha+\beta\rightarrow\beta$ 相转变温度约为 1 000 ℃。

Ti6321 合金等温热模拟压缩实验在 Gleeble-1500 型热模拟实验机上进行,压缩试样直径×长度为 8 mm×12 mm 的圆柱体,压缩前两端涂抹石墨润滑剂,尽可能减小摩擦的影响。试样采用电频感应加热,压缩过程中由热电偶实时测量温度,通过闭环温控系统实现控温,控温精度为±1.0 ℃。实验过程中,配有微机处理系统的实验机自动采集数据,最后以表格形式输出载荷—行程和应力—应变曲线等数据。实验选择变形温度分别为 850、890、930、960 和 990 ℃,应变速率分别为 0.01、0.1、1.0 和 10.0 s⁻¹,最大变形程度为 60%,压缩后空冷至室温。

表 1 供应态 Ti6321 合金的化学成分
Table 1 Chemical composition of as received Ti6321 alloy (mass fraction, %)

Al	Zr	Mo	Nb	C
6.13	2.06	0.97	2.96	0.010
N	H	O	Ti	
0.005	0.001	0.09	Bal.	

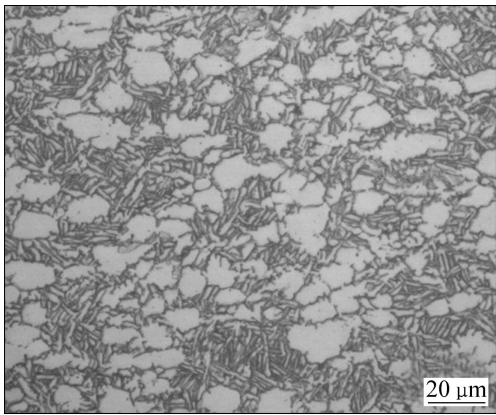


图 1 供应态 Ti6321 合金的微观组织形貌
Fig. 1 Microstructure of as received Ti6321 alloy

2 变形行为分析

图 2 所示为 Ti6321 钛合金在不同温度和应变速率下变形时的流动应力曲线。由图 2 可以看出, Ti6321 钛合金对应变速率和变形温度非常敏感。在给定温度下,随着应变速率的增加,流动应力明显增加。这是因为随着应变速率的增加,单位应变所需的时间缩短,位错产生、运动的数量增大,位错运动速度增加,位错间相互交割的几率也增大,平衡位错浓度增高,从而提高 Ti6321 钛合金变形时的临界切应力^[8-10]。在给定应变速率下,变形温度的上升会导致流动应力的显著降低。这是因为钛合金的热压缩变形是受热激活过程控制的,随着变形温度的升高,变形所需要的位错运动阻力减小,另外,动态回复和动态再结晶等软化机制也得到了加强^[11-14]。

流动应力曲线的特征是变形开始阶段流动应力随应变的增加迅速增加,当应变达到一定值后,流动应力出现一个峰值。在实验的变形温度和应变速率范围内, Ti6321 钛合金都有应力峰值出现。峰值应力对估算最大变形载荷具有重要作用。达到峰值应力后,随着变形的继续进行,流动应力又开始缓慢下降,进入准稳态变形阶段。流动应力行为与变形体内的位错组态密切相关,从金属高温塑性变形的物理本质来看,在变形初期,位错的交滑移为主要软化机制,但它引起的动态软化不足以补偿位错密度增加而带来的硬化,因此流动应力以较快的速度增大。流动应力达到峰值后,随应变增加引起畸变能的增加,从而引起动态回复或再结晶等动态软化现象,导致流动应力曲线逐渐下降,当硬化机制和软化机制趋于平衡时,出现稳态流动阶段^[15]。由图 2 可以看出,当变形温度较低时(850~930 ℃),准稳态阶段流动应力随着应变的增加逐渐下降;而当变形温度较高时(990 ℃),准稳态阶段流动应力随着应变的增加下降幅度较小,趋于一个稳态流动状态。这是因为变形温度较低时,变形初期积聚了较大的畸变能,使得出现峰值应力之后的动态软化机制的作用比加工硬化机制的作用大,这就导致了流动应力逐渐降低;而变形温度较高时,动态软化机制进展的较早较快,使得加工硬化和动态软化机制较快地趋于平衡状态,从而出现稳态流动。Ti6321 钛合金在较高的应变速率下(10 s⁻¹)压缩变形时,应力达到峰值后出现一个明显的应力振荡,这可能是由于较高的应变速率导致了畸变能剧烈增加,从而引起较大程度的动态再结晶所致。

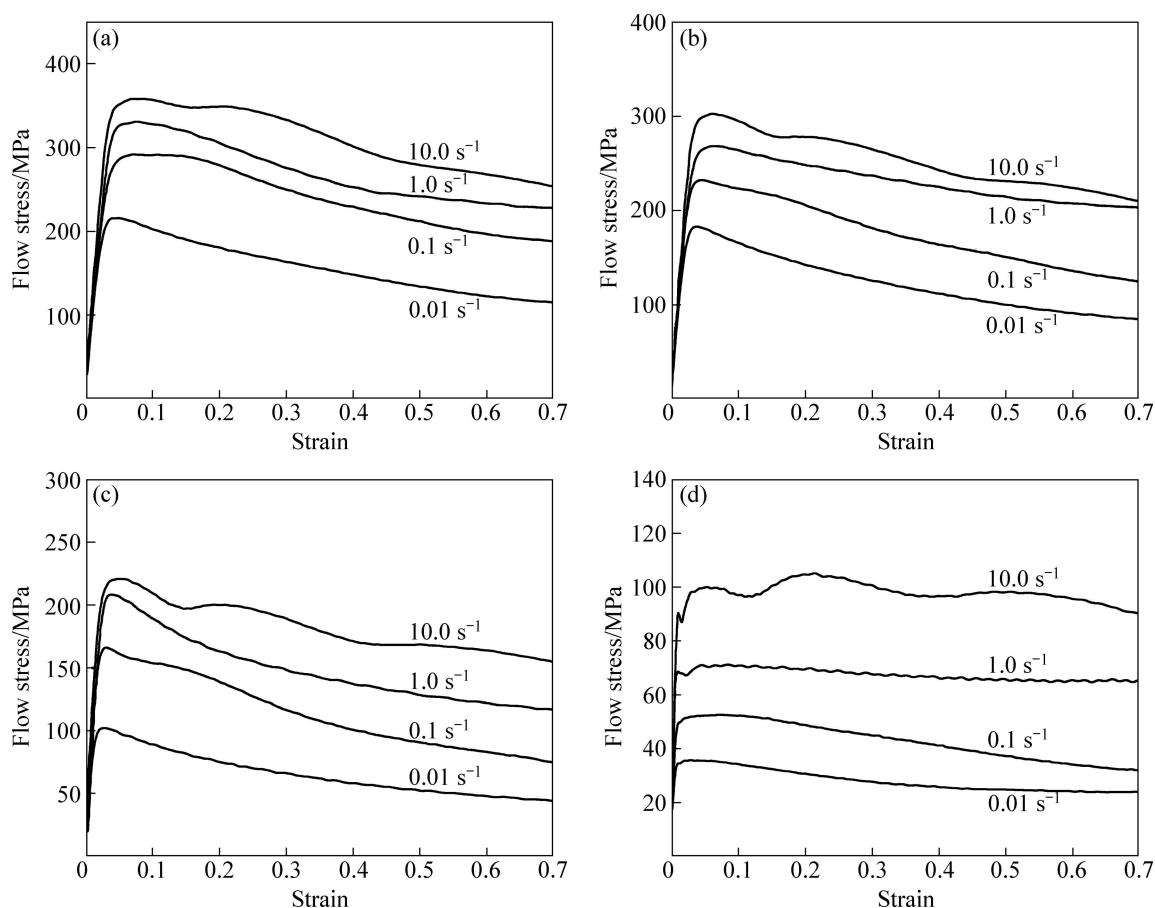


图 2 Ti6321 合金高温压缩变形时的应力—应变曲线

Fig. 2 Stress—strain curves during high temperature isothermal compression of Ti6321 titanium alloy: (a) 850 °C; (b) 890 °C; (c) 930 °C; (d) 990 °C

3 流动应力模型

研究表明, 金属热变形过程中流动应力与应变速率之间的关系可用以下 3 种 Arrhenius 型关系描述^[16]:

$$\dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A(\sigma)^n \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A_1 \exp(n_1 \sigma) \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A_2 \sinh(\alpha \sigma)^{n_2} \quad (3)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为真实应变速率(s^{-1}); Q 为变形激活能(kJ/mol); R 为摩尔气体常数($8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); σ 为流动应力(MPa); T 为变形温度(K); n 、 n_1 、 n_2 分别为与应变速率敏感性指数有关的参数; A 、 A_1 、 A_2 、 α 分别为与材料有关的常数。

对式(1)、(2)和(3)两边分别取自然对数后得

$$\ln \sigma = \ln \dot{\varepsilon} / n + Q / (nRT) - \ln A / n \quad (4)$$

$$\sigma = \ln \dot{\varepsilon} / n_1 + Q / (n_1 RT) - \ln A_1 / n_1 \quad (5)$$

$$\ln[\sinh(\alpha \sigma)] = \ln \dot{\varepsilon} / n_2 + Q / (n_2 RT) - \ln A_2 / n_2 \quad (6)$$

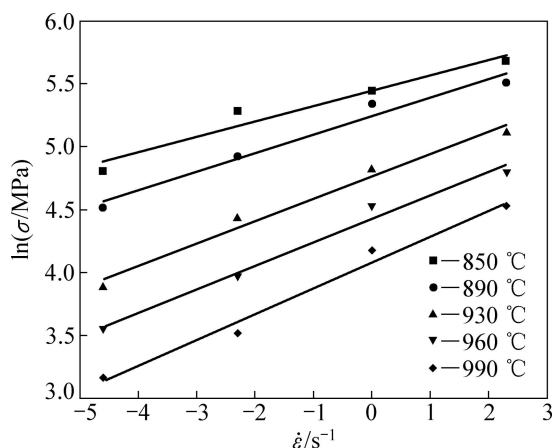
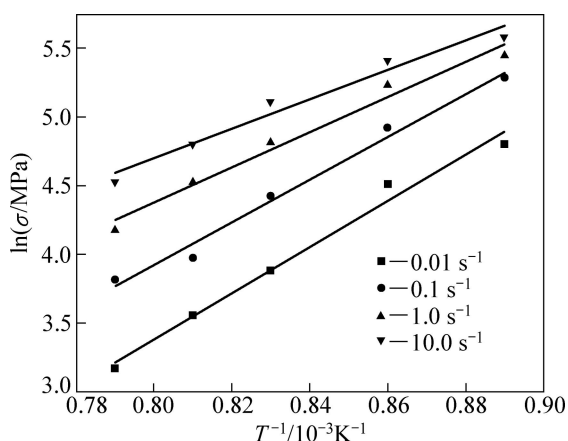
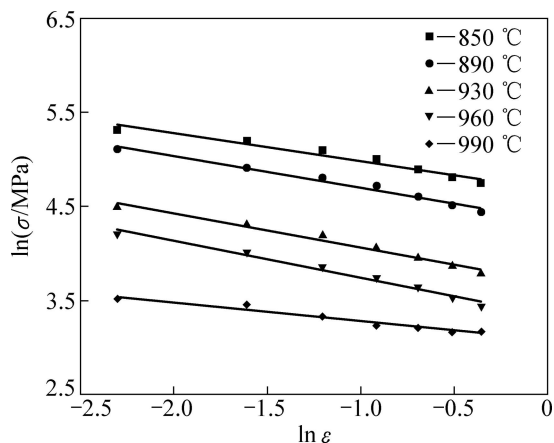
通过对实验数据作图, $\ln \sigma$ 与 $\ln \dot{\varepsilon}$ 和 $1/T$, 关系分别见图 3 和图 4。它们是线性关系, 由图 3 和 4 可见, Ti6321 合金适用于 Arrhenius 型方程中的幂函数方程 (1) 构造其流动应力模型。

Arrhenius 方程忽略了应变对流动应力的影响。但在高温条件下等效应变 ε 在塑性变形过程中也是一个不可忽略的路径变量。由热压缩流动应力曲线可知应变对流动应力有明显的影 响, 因此在流动应力模型中显示塑性应变项极有必要。通过对实验数据作图, $\ln \sigma$ 还与 $\ln \varepsilon$ 的关系见图 5。

考虑变形程度对流动应力的影响, 通常用以下公式来表示:

$$\sigma = f_1(\dot{\varepsilon}, T) \cdot f(\varepsilon) \quad (7)$$

$f(\varepsilon)$ 的形式根据图 5 对数应力与对数应变成线性

图3 对数应力与对数应变速率关系($\varepsilon=0.6$)Fig. 3 Variations of flow stress with strain rate ($\varepsilon=0.6$)图4 对数应力与温度倒数的关系($\varepsilon=0.6$)Fig. 4 Variations of flow stress with deformation temperature ($\varepsilon=0.6$)图5 对数应力与对数应变关系($\dot{\varepsilon}=1.0 \text{ s}^{-1}$)Fig. 5 Variations of flow stress with strain ($\dot{\varepsilon}=1.0 \text{ s}^{-1}$)

关系, 对于 Ti6321 钛合金流动应力模型表示为:

$$\varepsilon^m \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A_2 \sigma^n \quad (8)$$

式中: m 为与材料有关的常数。

将幂函数方程(8)两边取对数后整理成为

$$\ln \sigma = -\frac{\ln A_2}{n} + \frac{1}{n} \left(\ln \dot{\varepsilon} + \frac{Q}{RT} \right) + \frac{m}{n} \ln \varepsilon \quad (9)$$

引入 Z - H 参数, 式(9)可写成:

$$\ln \sigma = A + B \ln Z + C \ln \varepsilon \quad (10)$$

式中: $Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right)$, A 、 B 、 C 分别为材料常数。

为了准确地描述 Ti6321 钛合金高温塑性变形时的变形行为, 改进后的流动应力模型为

$$\ln \sigma = B_0 + B_1 \ln Z + B_2 (\ln Z)^2 + B_3 (\ln Z)^3 + B_4 \ln \varepsilon \quad (11)$$

式中: B_0 、 B_1 、 B_2 、 B_3 和 B_4 为待定材料参数。

建立 Z - H 参数表示的流动应力模型, 必须要确定变形激活能。

对式(1)两边取对数, 整理得:

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A + n \ln \sigma - \frac{Q}{RT} \quad (12)$$

$\dot{\varepsilon}$ 保持不变时, 对式(12)两边求偏导, 整理得:

$$Q = nR \left. \frac{\partial \ln \sigma}{\partial (1/T)} \right|_{\dot{\varepsilon}} \approx nR \left. \frac{\Delta \ln \sigma}{\Delta (1/T)} \right|_{\dot{\varepsilon}} \quad (13)$$

根据不可逆过程热力学, 变形温度和应变率恒定时, 流动应力 σ 与应变率 $\dot{\varepsilon}$ 的关系为:

$$\sigma = C \dot{\varepsilon}^m \Big|_{\varepsilon, T} \quad (14)$$

式中: m 为应变率敏感性指数, C 为常数。

对式(14)两边取对数, 整理得:

$$\ln \sigma = \ln C + m \ln \dot{\varepsilon} \Big|_{\varepsilon, T} \quad (15)$$

对式(3~8)两边求偏导, 又因 $n=1/m$, 整理可得:

$$n = \left. \frac{\partial \ln \dot{\varepsilon}}{\partial \ln \sigma} \right|_{\varepsilon, T} \approx \left. \frac{\Delta \ln \dot{\varepsilon}}{\Delta \ln \sigma} \right|_{\varepsilon, T} \quad (16)$$

分别由图 3 和图 4 计算出 $\ln \sigma - \ln \dot{\varepsilon}$ 曲线及 $\ln \sigma - 1/T$ 曲线的斜率, 代入式(15)和(16)中, Ti6321 钛合金在两相区的变形激活能为 692.35 kJ/mol。

确定变形激活能后, 对式(11)进行多元回归分析, 各系数的拟合结果见表 2。

表2 Ti6321 合金材料参数

Table 2 Material constants of Ti6321 titanium alloy in Eq. (11)

B_0	B_1	B_2	B_3	B_4
-41.631 5	1.780 6	-0.016 4	2.9731×10^{-5}	-0.100 9

4 模型验证

利用 Ti6321 钛合金在不同变形工艺参数条件下的流动应力数据对流动应力模型进行验证。

图 6 所示为本文所建立的流动应力模型的计算结果与实验数据的对比。从图 6 可以看出, 上述方法确定的流动应力曲线能够达到满意的拟合精度。流动应力模型的计算值与实验数据的平均相对误差为 6.59%。因此本文所建立的 Ti6321 钛合金流动应力模型能够较好地描述 Ti6321 钛合金在高温变形过程中的流动行为。

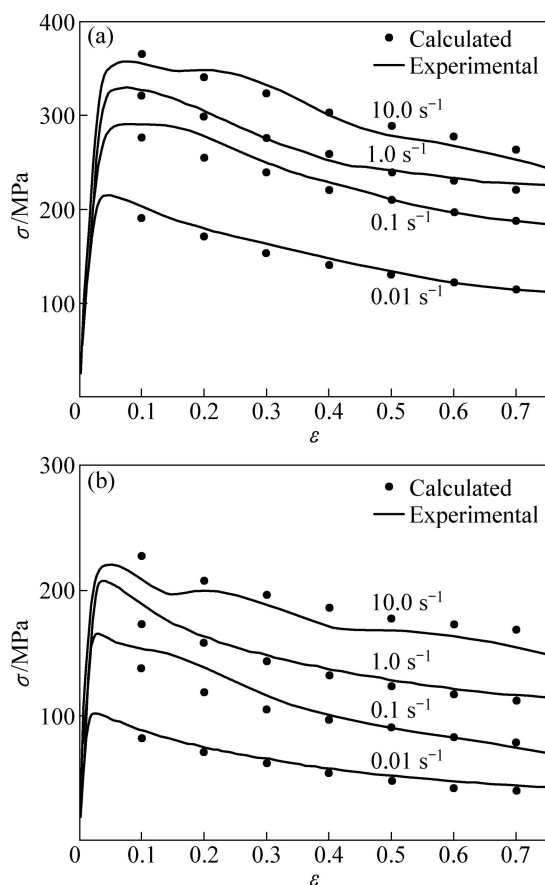


图 6 Ti6321 合金流动应力模型计算结果与实验数据对比
Fig. 6 Comparison of calculated with experimental flow stress of Ti6321 titanium alloy: (a) 850 °C; (b) 930 °C

5 结论

1) Ti6321 钛合金对应变速率和变形温度非常敏感。流动应力随着应变速率的增大和变形温度的升高而增大。流动应力曲线的特征是变形开始阶段流动应

力随应变的增加迅速增加, 当应变达到一定值后, 流动应力出现一个峰值。达到峰值应力后, 随着变形的继续进行, 流动应力又开始缓慢下降, 进入准稳态变形阶段。

2) 利用热模拟压缩实验数据, 建立了 Ti6321 钛合金在高温变形过程中的流动应力模型。该模型的预测精度较高, 计算值与实验数据的平均相对误差为 6.59%, 此模型能够较好地描述 Ti6321 钛合金在高温变形过程中的流动行为。

REFERENCES

- [1] 李淼泉, 姚晓燕, 罗 皎, 林莺莺, 苏少博, 王海荣. 镍基高温合金 GH4169 高温变形流动应力模型研究[J]. 金属学报, 2007, 43(9): 937-942.
LI Miao-quan, YAO Xiao-yan, LUO Jiao, LIN Ying-ying, SU Shao-bo, WANG Hai-rong. Study of flow stress model of the nickel-based superalloy GH4169 at high temperature deformation[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2007, 43(9): 937-942.
- [2] LU B, OU H, ARMSTRONG C G, RENNIE A. 3D die shape optimisation for net-shape forging of aerofoil blades[J]. Materials and Design, 2009, 30(7): 2490-2500.
- [3] KIM J H, SEMINTIN S L, LEE C S. Constitutive analysis of the high-temperature deformation of Ti-6Al-4V with a transformed microstructure[J]. Acta Materialia, 2003, 51(18): 5613-5626.
- [4] PICU R C, MAJORELL A. Mechanical behavior of Ti-6Al-4V at high and moderate temperatures — Part II: constitutive modeling[J]. Materials Science and Engineering A, 2002, 326(2): 306-316.
- [5] LI X L, LI M Q. A set of microstructure-based constitutive equations in hot forming of a titanium alloy[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material, 2005, 13(5): 435-441.
- [6] PRASAD Y V R K, GEGEL H L, DORAIVELU S M, MALAS J C, MORGAN J T, LARK K A, Barker D R. Modeling of dynamic material behavior in hot deformation: forging of Ti-6242[J]. Metallurgical Transactions A, 1984, 15(10): 1883-1892.
- [7] 马冬威, 李淼泉, 罗 皎, 于卫新, 苏少博, 吴娟利. 基于应变影响的 7A09 铝合金的等热压缩流动应力模型[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(5): 954-960.
MA Dong-wei, LI Miao-quan, LUO Jiao, YU Wei-xin, SU Shao-bo, WU Juan-li. Flow stress model considering contribution of strain in isothermal compression of 7A09 aluminum alloy[J]. The Chinese and Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(5): 954-960.
- [8] KUBIN L P, CANOVA G. The modelling of dislocation patterns[J]. Scripta Metallurgica. 1992, 27(8): 957-962.
- [9] GIESSEN E V D, NEEDLEMAN A. Discrete dislocation

- plasticity: A simple planar model[J]. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 1995, 3(5): 689–735.
- [10] ZBIB H M, RHEE M, HIRTH J P. On plastic deformation and the dynamics of 3D dislocations[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1998, 40(2/3): 113–127.
- [11] SHILKROT L E, MILLER R E, CURTIN W A. Multiscale plasticity modeling: Coupled atomistics and discrete dislocation mechanics[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2004, 52(4): 755–787.
- [12] WALLIN M, CURTIN W A, RISTINMAA M, NEEDLEMAN A. Multi-scale plasticity modeling: Coupled discrete dislocation and continuum crystal plasticity[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2008, 56(11): 3167–3180.
- [13] LIN J, LIU Y, FARRUGIA D C J, ZHOU M. Development of dislocation-based unified material model for simulating microstructure evolution in multipass hot rolling[J]. *Philosophical Magazine*, 2005, 85(18): 1967–1987.
- [14] LI L X, LOU Y, YANG L B, PENG D S, RAO K P. Flow stress behavior and deformation characteristics of Ti-3Al-5V-5Mo compressed at elevated temperatures[J]. *Materials and Design*, 2002, 23(5): 451–457.
- [15] 罗 皎, 李淼泉, 李 宏, 于卫新. TC4 钛合金高温变形行为及其流动应力模型研究[J]. *中国有色金属学报*, 2008, 18(8): 1395–1401.
- LUO Jiao, LI Miao-quan, LI Hong, YU Wei-xin. High temperature deformation behavior and flow stress model of Ti6321 titanium alloy[J]. *The Chinese and Journal of Nonferrous Metals*, 2008, 18(8): 1395–1401.
- [16] 关德林. 晶体的高温塑性变形[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1989.
- GUAN De-lin. High-temperature plastic deformation of the crystal[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1989.

(编辑 赵 俊)