

TB6 合金热压缩流变应力行为

闫飞昊, 李士凯, 王美娇, 杨 辉

(中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 洛阳 471039)

摘 要: 在变形温度 700~860 °C、应变速率 0.001~1 s⁻¹ 下, 对 TB6 合金进行热压缩变形, 以研究 TB6 合金的热压缩流变应力行为。研究温度、变形量、应变速率等因素对 TB6 热变形流变应力的影响, 建立了 TB6 合金热变形流变应力的本构模型方程。结果表明: 合金在热压缩过程中, 流变应力随着应变的增大而增加, 达到峰值应力后逐渐趋于平稳; 应力峰值随着应变速率的增大而增大, 随着温度的升高而呈减小趋势。

关键词: TB6 合金; 热压缩; 流变应力; 本构方程

中图分类号: TF146.4

文献标志码: A

Flow stress behavior of TB6 titanium alloy during hot compression deformation at elevated temperature

YAN Fei-hao, LI Shi-kai, WANG Mei-jiao, YANG Hui

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

Abstract: The flow stress behavior of TB6 titanium alloy during hot compression deformation was studied by thermal simulation at deformation temperature from 700 °C to 860 °C and the strain rate from 0.001 s⁻¹ to 1 s⁻¹. The influence of temperature, strain rate and strain rate on the flow stress behavior during hot deformation was described, and the constitutive equation of the plastic deformation of TB6 alloy was obtained. The results show that the flow stress increases with the increase of strain and tends to be constant after a peak value. The peak stress increases with the increase of strain rate, and tends to decrease with the increase of deformation temperature.

Key words: TB6 titanium alloy; hot compression deformation; flow stress; constitutive equation

TB6 合金名义成分为 Ti-10V-2Fe-3Al, 是美国钛金属公司于 20 世纪 70 年代初研制成功的高强、高韧、并具有优良热加工性的近 β 钛合金。它适用于生产锻件、棒材、板材等, 可用于 316 °C 以下工作的发动机和飞机构件^[1-3]。波音飞机公司 20 世纪开始使用这种新材料研制飞机用锻件, 并将 TB6 合金与当时已普遍使用的 TC4 合金进行了全面的对比。这种合金的突出优点为其 β 转变温度在 793~815 °C 范围内, 比 TC4 合金的低约 200 °C; 在相变点附近锻造的流动应力, 相当于 TiC4 合金在 935 °C 时锻造的流动应力, 因此等温变形时对模具材料的要求比 TC4 合金低, 非常适合于热模锻造或等温锻造^[4-5]。

TB6 合金比强度高, 能有效地减轻构件质量。通过热模锻、等温锻造等手段加工出的飞机机身、机翼、

起落架等结构件, 可代替同等强度的 30CrMnSiA 结构钢, 减轻质量约 40%; 代替 TC4 合金可减轻结构质量约 20%^[6-7], 从而降低成本。因此对 TB6 合金的研制与加工手段的研究引起了世界各国的关注。本文作者对 TB6 合金进行了热压缩变形试验, 研究材料的流动应力与热力参数之间的关系及材料对热力参数的动态响应特征, 对 TB6 合金热加工工艺的合理制定具有科学和实际的指导意义。

1 实验

1.1 实验材料

热模拟压缩实验所用材料为直径 130 mm 的 TB6

钛合金锻轧棒材,其化学成分见表1,原始组织为 β 基体 + α 等轴组织。将该棒料切割加工成 $d\ 8\ \text{mm} \times 12\ \text{mm}$ 的小棒料进行实验。

表1 TB6合金棒材化学成分

Table 1 Chemical composition of TB6 alloy (mass fraction, %)

Ti	Al	V	Fe	C	N	H	O
Bal.	3.28	9.91	2.09	0.030	0.005	0.001 4	0.101

1.2 实验方案

根据合金实测相变点(790~800 °C)及钛合金热加工中的 β 锻造、近 β 锻造和($\alpha+\beta$)锻造,拟定钛合金的热变形温度。

应变速率的选取主要根据设备所能达到的应变速率来确定。同时钛合金变形量要避免2%~12%的临界变形量,同时也不能超过85%的变形量,以避免晶粒粗大^[8]。综上,研究TB6合金的热模拟压缩实验方案参数选择如下:

- 1) 变形温度:700, 740, 780, 820, 860 °C;
- 2) 应变速率:0.001, 0.01, 0.1, $1\ \text{s}^{-1}$;
- 3) 变形程度:最大应力真应变为0.9;
- 4) 冷却方式:空冷。

2 结果与分析

2.1 真应力—应变曲线图

根据金属塑性变形特征,假设材料在压缩变形过程中体积不变。根据计算机记录的载荷、位移数据可求出试样压缩变形过程总应变 $\varepsilon=0.9$ 时的真应力—真应变曲线,如图1所示。

由图1可知,在实验温度范围内TB6合金的高温流变曲线比较平直,说明TB6合金具有良好的高温变形能力。

2.2 热压缩过程流变应力分析

1) 随着变形程度的增加,TB6合金的流动应力很快达到峰值,随后降低。

2) TB6合金几乎在压缩变形时的所有变形条件下均出现稳态流动特征,即在一定变形温度和应变速率条件下,当压缩真应变超过一定值后,随着应变量的增大,流动应力的变化减小,并趋于稳定值。

3) 随着变形温度的升高和应变速率的减小,TB6合金的流动应力降低。

4) 在相同变形程度下,流动应力与变形温度有强烈的依赖关系,它随变形温度的升高而减小,但不是简单的线性关系。这是因为随着变形温度的升高,原子热振动的振幅增大,原子间的结合力降低,同时变形温度升高时滑移阻力降低,并有新的滑移系产生,使变形过程中的软化作用加强,因而变形时的流动应力呈渐减趋势。在相同变形程度下,流动应力随应变速率的增加而增加。

5) 当变形温度高于780 °C时,即在相变点(800 °C)附近及以上温度,各个应变速率下的流动应力随应变增加缓慢减小,随后趋于定值。在变形程度较小的情况下进入稳态流动阶段,并且在相同变形温度下的所有应变速率对应的应力—应变曲线趋于平行。这是因为即使在较高应变速率下,变形温度对应变速率的补偿作用使合金能较早的进入稳态变形阶段。当变形温度低于780 °C时,各个应变速率下的流动应力随应变增加先以较快速度减小再缓慢减小,随后趋于定值,进入稳态流动阶段。这是因为变形温度对应变速率补偿效果不明显,TB6合金进入稳态流动阶段所需的变形量较大。此外,当应变速率高于 $0.1\ \text{s}^{-1}$ 时,应力随应变变化显著,降低幅度较大。从实验结果可以看出,应变速率对TB6合金进入稳态流动阶段所需的变形程度影响较大。合金高温变形过程中稳态应力与变形参数之间的关系如图2所示。

6) 在本实验变形温度和应变速率范围内,TB6合金有应力峰值出现。峰值应力的大小对估算最大变形载荷具有重要作用。TB6合金高温变形过程中的峰值应力与变形参数之间的关系如图3所示。从图3可以看出,TB6合金的峰值应力对应变速率比较敏感。当温度较高(大于780 °C)、应变速率较小时,变形温度对峰值应力的影响较小;当应变速率较大时,变形温度对峰值应力的影响较大。

TB6合金高温变形时分过渡变形(非稳态)和稳态变形两个阶段。从金属高温塑性变形的物理本质来看,在过渡阶段,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。随着变形程度的增大,合金中的空位浓度增大,位错的攀移在过渡变形的中后期也参与软化过程,位错克服障碍力的能力增强,合金变形时硬化和软化的平衡向低硬化指数方向变化,应力—应变曲线趋于平衡。

当软化和硬化之间达到动态平衡时,变形进入稳态流动阶段。随着应变速率的增加,单位应力所需的时间缩短,位错产生、运动的数目增大,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

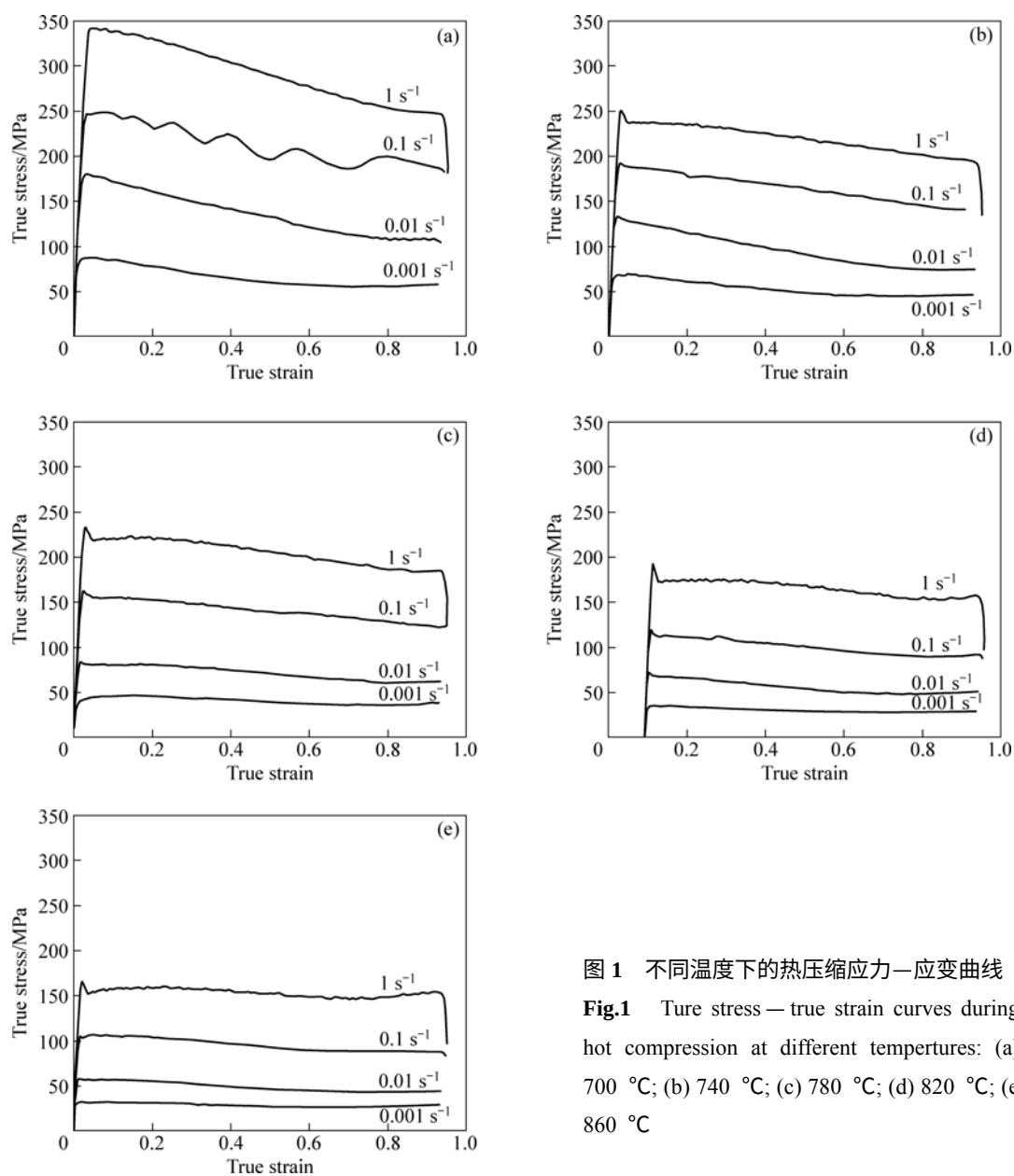


图 1 不同温度下的热压缩应力—应变曲线

Fig.1 True stress—true strain curves during hot compression at different temperatures: (a) 700 °C; (b) 740 °C; (c) 780 °C; (d) 820 °C; (e) 860 °C

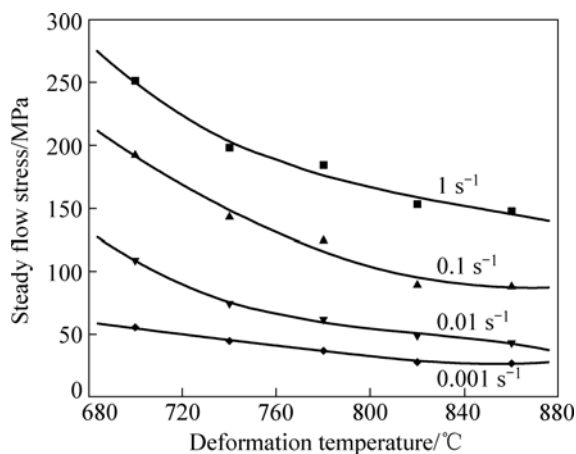


图 2 TB6 合金高温变形过程中的稳态应力

Fig.2 Steady-state stress of TB6 alloy during hot deformation

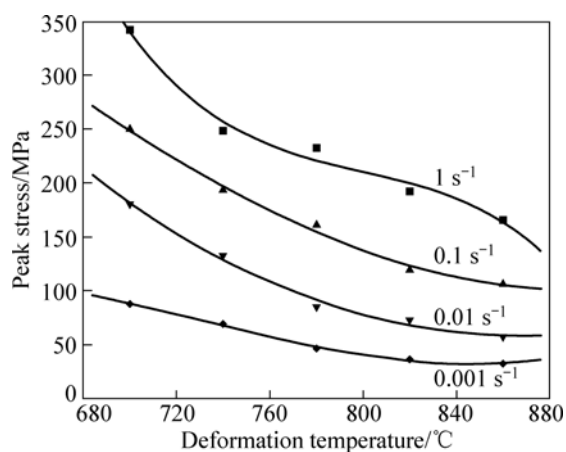


图 3 TB6 合金高温变形过程中的峰值应力

Fig.3 Peak stress of TB6 alloy during hot deformation

度增高,从而提高合金变形时的临界切应力。同时,实现由动态回复等提供的软化时间及实现完全塑性变形的时间也缩短。这时,只有在更高变形温度下才可能提供足够大的软化速度及平衡因应变速率增加而引起的硬化速率增大。因此,随着应变速率的增加,相应以相同过渡变形量进入稳态变形阶段所需的变形温度也就升高。

2.3 流变应力方程的建立

高、低应力状况时稳态流动应力与应变速率、变形温度之间的关系遵从3种Arrhenius型关系,即指数函数型、幂函数型和双曲正弦型关系^[9-12]:

$$\dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A_1 \exp(n_1 \sigma) \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A_2 (\sigma)^{n_2} \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A_3 \sin(\alpha \sigma)^{n_3} \quad (3)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为真实应变速率; Q 为变形激活能; R 为摩尔气体常数(8.315 4 kJ/mol); σ 为流动应力(MPa); T 为变形温度(K); n_1, n_2, n_3 为与应变速率敏感性指数有关的参数; A_1, A_2, A_3, α 为与材料有关的常数。

将上述3种方程式两边取对数后,均可表示为统一的表达式:

$$f(\sigma) = A + B \ln \dot{\varepsilon} + \frac{C}{T} \quad (4)$$

式中 A, B, C 为各方程中的相应系数项。

由式(4)可知,对于给定的等效应变速率或变形温度, $f(\sigma)$ 是 $1/T$ 或 $\ln \dot{\varepsilon}$ 的线性函数。

$\ln \sigma$ 与 $\ln \dot{\varepsilon}$ 成线性关系,如图4所示;另 $\ln \sigma$ 与 $1/T$ 也成线性关系,如图5所示。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,通常可表示为

$$\sigma = f_1\left(\dot{\varepsilon}, T\right) f(\varepsilon) \quad (5)$$

由实验数据可知, $\ln \sigma$ 与 $\ln \varepsilon$ 基本成线性关系,即: $\ln \sigma = k \ln \varepsilon$ ($\sigma = \varepsilon^k$), 即为 $f(\varepsilon)$ 的表达式,将此方程代入式(5),则TB6合金流动应力模型表示为

$$\varepsilon^k \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A_2 \sigma^n \quad (7)$$

式中: k 为与材料有关的常数。

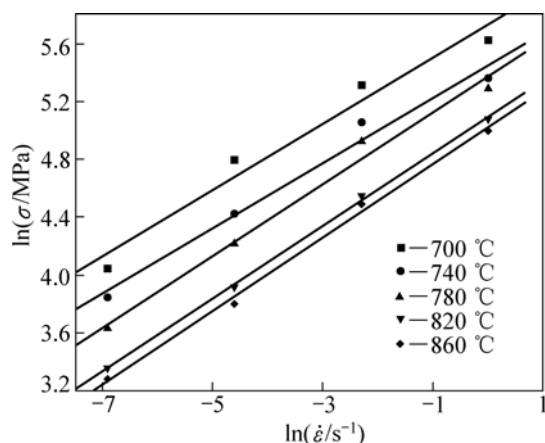


图4 $\ln \sigma$ 与 $\ln \dot{\varepsilon}$ 关系曲线($\varepsilon=0.6$)

Fig.4 Curves of $\ln \sigma$ vs $\ln \dot{\varepsilon}$ ($\varepsilon=0.6$)

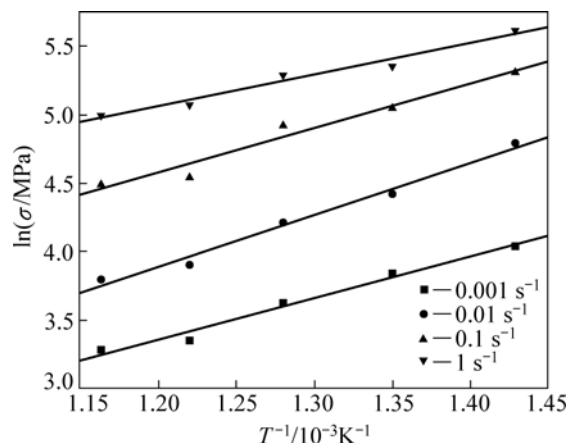


图5 $\ln \sigma$ 与 $1/T$ 的关系曲线($\varepsilon=0.6$)

Fig.5 Curves of $\ln \sigma$ vs $1/T$ ($\varepsilon=0.6$)

将幂函数方程(7)进行对数处理后整理成

$$\ln \sigma = -\frac{\ln A_2}{n} + \frac{1}{n} \left(\ln \dot{\varepsilon} + \frac{Q}{RT} \right) + \frac{k}{n} \ln \varepsilon \quad (8)$$

式(8)可写为

$$\ln \sigma = B_1 + \frac{B_2}{T} + B_3 \ln \dot{\varepsilon} + B_4 \ln \varepsilon \quad (9)$$

式中: B_1, B_2, B_3, B_4 为待定系数。

采用最小二乘法对式(9)进行多元回归分析^[13-15],即可确定式中的待定系数。由于TB6合金是应变速率敏感型合金,考虑应变速率的显著影响,拟合过程中对应变速率进行分段拟合,各系数的拟合结果见表2。

将表中回归系数代入式(9)得TB6合金得本构方程为

$$\ln \sigma = 1.11668 + 3203.88693T^{-1} + 0.23199 \ln \dot{\varepsilon} - 0.13249 \ln \varepsilon \quad (10)$$

表 2 TB6 合金本构方程回归系数值

Table 2 Regression coefficient of TB6 alloy constitutive equations

B_1	B_2	B_3	B_4
1.116 68	3 203.889 63	0.231 99	-0.132 49

3 结论

TB6 合金是热敏感型和应变速率敏感型合金。在 TB6 合金热变形过程中, 流变应力到达峰值之前, 应力随应变量的增加呈近直线关系迅速增大; 到达流变应力峰值点后, 流变应力随应变量的增大而呈现逐渐降低的趋势。

TB6 合金在热变形过程中, 当变形温度一定时, 随应变速率的升高, 流变应力的峰值点呈上升趋势; 在应变速率一定时, 随变形温度的升高, 流变应力峰值点呈下降趋势。从变形温度、应变速率和应变对 TB6 合金流动应力影响的角度来看, 较佳的变形工艺参数范围是: 变形温度大于 780 °C, 应变速率为 0.01–0.001 s⁻¹ 左右。

实验得出 TB6 合金的热变形本构方程为

$$\ln \sigma = 1.11668 + 3203.88693/T + 0.23199 \ln \dot{\varepsilon} - 0.13249 \ln \varepsilon$$

REFERENCES

- [1] 颜鸣皋. 钛合金在航空领域的应用与发展[J]. 航空科学技术, 2007, 2: 1–5.
YAN Ming-gao. Application and development of titanium alloys for aviation[J]. Aeronautical Science and Technology, 2007, 2: 1–5.
- [2] 段庆文. 钛在军事航空领域的战略地位[J]. 钛工业进展, 2002, 6: 28–30.
DUAN Qing-wen. The strategic position of titanium in the military aviation field[J]. Titanium Industry Progress, 2002, 6: 28–30.
- [3] 钱九红. 航空航天用新型钛合金的研究发展及应用[J]. 稀有金属, 2000, 24(3): 218–223.
QIAN Jiu-hong. Application and development of new titanium alloys for aerospace[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2000, 24(3): 218–223.
- [4] 全宏声. Beta 钛合金在航空航天工业中的应用逐步扩大[J]. 材料工程, 1994, 10: 35–40.
QUAN Hong-sheng. The application and expand in the aerospace industry of beta titanium alloys[J]. Journal of Materials Engineering, 1994, 10: 35–40.
- [5] 朱知寿, 王新南, 董路, 曹春晓. 中国航空结构用新型钛合金研究[J]. 钛工业进展, 2007, 24(6): 31–35.
ZHU Zhi-shou, WANG Xin-nan, TONG Lu, CAO Chun-xiao. Studies of new-type titanium alloys for aviation industry application in china[J]. Titanium Industry Progress, 2007, 24(6): 31–35.
- [6] BOYER R R. Design properties of a high-strength titanium alloy Ti-10V-2Fe-3Al[J]. Journal of Metals, 1980, 132(3): 61–65.
- [7] RYDSTAL H, DUERIG T W, BOER C R. Hot-die forging of Ti-10V-2Fe-3Al [J]. Journal of Metals, 1979, 169(7): 641–646.
- [8] BURKE J, MAHRABIAN R. Advances in metal processing[M]. New York: Plenum Press, 1981:133–134.
- [9] JIN Neng-ping, ZHANG Hui, HAN Yi. Hot deformation behavior of 7150 aluminum alloy during compression at elevated temperature[J]. Materials Characterization, 2009, 60: 530–536.
- [10] SHI H, MCLAREN A J, SHILLARS C M. Constitutive equations for high temperature flow stress of aluminum alloys[J]. Materials Science and Technology, 1997, 13(3): 210–216.
- [11] 林高用, 张辉, 郭武强. 7075 铝合金热压缩变形流变应力[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(3): 313–316.
LIN Gao-yong, ZHANG Hui, GUO Wu-qiang. Flow stress of 7075 aluminum alloy during hot compression deformation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(3): 313–316.
- [12] 蒙春标, 张辉, 吴文祥. 3104 铝合金高温热压缩变形流变行为研究[J]. 热加工工艺, 2008, 37(5): 1–4.
MENG Chun-biao, ZHANG Hui, WU Wen-xiang. Study on flow behavior of 3104 aluminum alloy during hot compression deformation at elevated temperature[J]. Hot Working Technology, 2008, 37(5): 1–4.
- [13] LIN Y. A new approach to fuzzy-neural system modeling[J]. IEEE Transactions on System, 1995, 3(2): 190–198.
- [14] JUANG C F, LIN C.T. A on-line self-constructing neural fuzzy inference network for system modeling[J]. IEEE Transactions on System, 1998, 5(2): 12–32.
- [15] KIM J, KASABOV N. Adaptive neuro-fuzzy inference systems and their application to nonlinear dynamical systems[J]. Neural Networks, 1999, 12: 1301–1319.

(编辑 袁赛前)