

铝合金 6061 - T6 高速切削物理仿真材料本构模型\*

徐道春<sup>1</sup> 冯平法<sup>2</sup> 郁鼎文<sup>2</sup> 吴志军<sup>2</sup>

(1. 北京林业大学工学院, 北京 100083; 2. 清华大学精密仪器与机械学系, 北京 100084)

【摘要】 在分离式 Hopkinson 压杆实验(SHPB)和准静态压缩实验装置上对铝合金 6061 - T6 进行了高温(20 ~ 500℃)高应变率(达 10<sup>4</sup>/s)下的动、静态力学性能实验,在获得应变强化、应变率强化和热软化效应曲线的基础上,修正了经典的 JC(Johnson - Cook)方程,并在仿真模型中验证了所得 MJC 方程的有效性。研究表明:铝合金 6061 - T6 材料流变应力随应变和应变率的升高而升高,随变形温度升高而降低;提出的 JC 修正方程较 JC 方程具有更高的本构关系描述精度;所获得的铝合金 6061 - T6 材料本构方程,为该材料高速切削物理仿真提供了精确的动、静态材料模型参数。

关键词: 分离式 Hopkinson 压杆技术 应变强化 应变率强化 热软化效应

中图分类号: TG711; TG506.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)12-0273-05

Constitutive Model of Physical Simulation in High Speed Cutting  
for Al6061 - T6

Xu Daochun<sup>1</sup> Feng Pingfa<sup>2</sup> Yu Dingwen<sup>2</sup> Wu Zhijun<sup>2</sup>

(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract

The quasi-static and dynamic mechanical properties experiment of Al6061 - T6 in high temperature (20 ~ 500℃) and high strain rate (up to 10<sup>4</sup>/s) was carried out on the quasi-static press and split Hopkinson press bar (SHPB) equipment. Then the effect curves of strain hardening, strain rate strengthening and thermal softening were obtained. According to these curves, the classic JC (Johnson - Cook) equation was modified. Furthermore, the modified JC equation was validated in the high speed cutting physical simulation model. The results showed that the Al6061 - T6 flow stress increased with the increasing of strain and strain rate, and obviously decreased with the increasing of deformation temperature. The description accuracy of the modified JC equation was higher than the JC equation. The obtained Al6061 - T6 constitutive equation can provide important material parameters for physical simulation models of its high speed machining process.

Key words SHPB, Strain hardening, Strain rate strengthening, Thermal softening

引言

铝合金 6061 - T6 材料具有高强度质量比、可加工性、可焊性和抗腐蚀性能高等特点,在航空固定装置、汽车轮毂和硬盘驱动架等<sup>[1]</sup>领域具

有广泛应用。高温和高应变速率下的材料本构模型是高速切削物理仿真模型的核心技术参数,是仿真精度的保障。高温是指材料初融温度到熔点之间的温度范围,高应变率是指 10<sup>2</sup> ~ 10<sup>4</sup>/s 的范围。在高应变率和高温范围内,分离式

收稿日期: 2012 - 05 - 07 修回日期: 2012 - 05 - 26

\* 国家自然科学基金资助项目(50975153)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(TD2011 - 26)和北京林业大学青年教师科研启动基金资助项目(BLX2011018)

作者简介: 徐道春,讲师,博士,主要从事高速切削物理仿真研究,E-mail: xudaochun@bjfu.edu.cn

Hopkinson 压杆技术 (SHPB) 是当今国内外最广泛的金属材料塑性流动行为研究手段。国内学者李玉龙等<sup>[2]</sup> 2005 年研制出带有同步组装的 Hopkinson 冲击杆系统。

文献[3~5]采用 Hopkinson 冲击杆实验方法分别获得了铝合金 7050、Al-Mg-Sc 合金、LF6R、LF21M、LY12CZ、LC4CS 等材料的本构关系。在高速切削过程中,工件材料在切削区内的变形有着高温和高应变的特点<sup>[6]</sup>,本文采用 Hopkinson 冲击杆实验装置<sup>[2]</sup>对铝合金 6061-T6 材料进行高温和高应变率下的变形实验,并研究该材料高速切削物理仿真用的本构模型。

1 实验方法与材料

实验装置如图 1a 所示,空气压缩机经进气阀给气缸前后气室充气达到预定气压,关闭进气阀后打

内高压气体进入炮管将子弹发射出去,撞入射杆,形成脉冲入射波,入射波经试件时,一分为二,一部分返回入射杆形成反射波,一部分继续前行进入透射杆形成透射波,在入射杆和透射杆上粘贴应变片分别记录入射波、反射波和透射波的波形,在进行高温实验时,加热炉为试件加热到指定温度。该装置的实验应变速率可稳定地达到 10<sup>4</sup>/s,对于较软的金属材料(铜、镁)可达到 10<sup>5</sup>/s;实验温度可达到 1 000℃。图 1b 为冲击实验前后的试件,尺寸 φ6×4,图 1c 为静态性能实验采用的 CSS 型电子万能实验机装置,可测得常温准静态(0.001/s)下的应力-应变曲线。图 1d 为静态压缩实验试件,尺寸 φ10×16。实验材料为铝合金 6061-T6,其化学成分:硅 0.4%~0.8%,铁 0.7%,铜 0.15%~0.4%,锰 0.15%,锌 0.25%,镁 0.8%~1.2%,铬 0.04%~0.35%,钛 0.15%,其他元素 0.15%,其余为铝;T6 表示热处理方式(固溶处理后人工时效)。

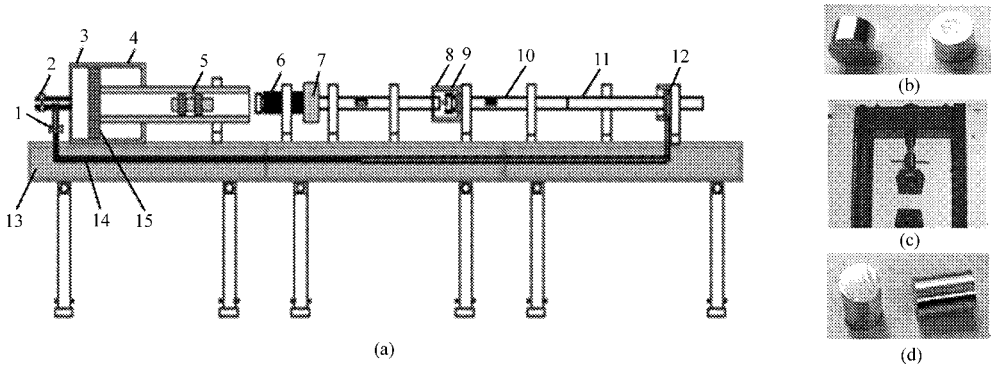


图 1 本构关系实验装置与铝合金 6061-T6 试件

Fig. 1 Separate Hopkinson pressure bar experimental apparatus and Al6061-T6 specimens

(a) Hopkinson 冲击杆实验装置 (b) 冲击杆实验试件 (c) 静态压缩实验装置 (d) 静态压缩实验试件

1. 出气阀 2. 进气阀 3. 后气室 4. 前气室 5. 子弹(冲击杆) 6. 入射杆 7. 反射块 8. 加热炉 9. 试件 10. 透射杆 11. 同步杆 12. 阻尼 13. 底座 14. 气管 15. 活塞

2 结果与讨论

2.1 动静态应力-应变曲线

金属材料塑性本构方程基本形式为

σ=f(ε,ε',T<sub>1</sub>) (1)

式中 σ——流变应力 ε——应变  
ε'——应变率 T<sub>1</sub>——温度

该公式反映流变应力对应变、应变率及变形温度的动态响应。用不同本构方程来描述同一种材料的流变特性,效果不同。目前描述金属变形的常用本构方程有: Bodner 方程<sup>[7]</sup>、Follansbee-Kocks 方程<sup>[8]</sup>、Zerilli-Armstrong 方程<sup>[9]</sup>和 Johnson-Cook 方程<sup>[10]</sup>。其中 Johnson-Cook 方程(简称 JC 方程)综合考虑了应变、应变率和热效应因素,形式简洁,适合于各种晶体结构材料<sup>[3~4,11]</sup>,其基本形式为

σ=(a+bε<sup>n</sup>)(1+clnε̄)(1-T<sub>r</sub><sup>m</sup>) (2)  
其中 ε̄=ε'/ε'<sub>0</sub>

T<sub>r</sub>=(T-T<sub>amb</sub>)/(T<sub>melt</sub>-T<sub>amb</sub>)  
式中 a——屈服强度 b——应变强化系数  
c——应变率强化系数  
m——热软化效应指数  
n——应变强化指数  
ε̄——相对应变率 ε'<sub>0</sub>——参考应变率  
T<sub>r</sub>——相对温度 T——变形温度  
T<sub>amb</sub>——室温 T<sub>melt</sub>——材料熔点

图 2 为准静态实验曲线,图 3 为常温变应变率下的应力-应变曲线,图 4 是 ε'为 3 000/s 时不同变形温度下的应力-应变曲线。从图 2 中可看出铝合金 6061-T6 没有明显的压缩屈服点,在应变为 0.08~0.10 后开始拐向平稳塑性变形段,将塑性段

实验结果进行回归所得截距 265 MPa(回归曲线与纵坐标的交点)作为铝合金 6061-T6 常温准静态下的屈服应力。

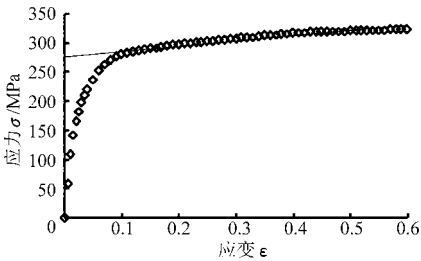


图 2 准静态下的应力-应变曲线(ε'为 0.001/s)

Fig. 2 σ-ε curves of quasi-static

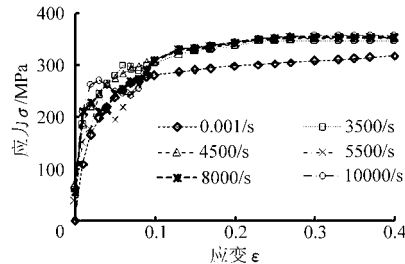


图 3 不同应变率下的应力-应变曲线(T=20℃)

Fig. 3 σ-ε curves of different strain rates

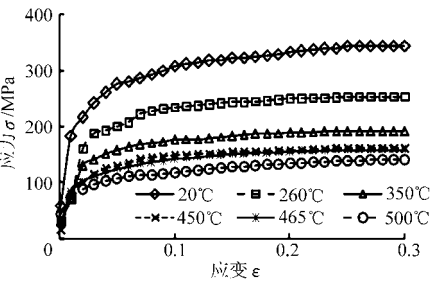


图 4 不同温度下的应力-应变曲线(ε'为 3 000/s)

Fig. 4 σ-ε curves of different temperate

从图 4 中可看出热效应对该材料的流变特性影响明显,流变应力较静态应力要低,表明热软化效应的出现。每种金属材料都有初熔温度,在该温度附近材料流变特性将发生一次跃变,图中 260℃与 350℃流变曲线间有较大跃变,可推断该材料的初熔温度在 260~350℃之间。

2.2 JC 方程修正与效应项获取

为清晰地描述材料的应变强化、应变率强化及热软化效应曲线,将 JC 方程转换为

$$\sigma = \sigma_s K_\epsilon K_{\epsilon'} K_T \tag{3}$$

式中 σ<sub>s</sub>——室温下准静态的屈服强度  
K<sub>ε</sub>、K<sub>ε'</sub>、K<sub>T</sub>——应变强化、应变率强化和热软化效应

在准静态压缩实验中,应变率为 0.001/s,温度为常温,应变率效应和热效应可忽略,即 K<sub>ε'</sub>、K<sub>T</sub> 均为 1。将图 2 中塑性变形段除以 σ<sub>s</sub>(265 MPa),可得到应变强化效应曲线(图 5),应变提高对材料产生

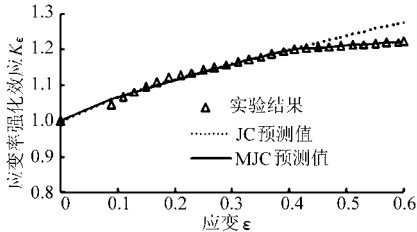


图 5 应变强化效应及其回归曲线

Fig. 5 Strain hardening effect and fitting curves

强化作用。

对该曲线进行回归时发现,应变强化曲线在远端趋向稳定,可见图 5 分段函数和幂函数回归曲线趋势,采用分段函数能更好地预测实验结果,所以有必要对 JC 方程进行修正,文中将其表示成 Modified JC (MJC),回归计算可得:

MJC 方程

$$\begin{cases} \sigma = 265(1 + 0.418\epsilon^{0.798}) & (\epsilon \in (0.06, 0.4]) \\ \sigma = 265(1 + 0.255\epsilon^{0.263}) & (\epsilon \in [0.4, 0.6)) \end{cases}$$

JC 方程

$$\sigma = 265(1 + 0.418\epsilon^{0.798}) \tag{4}$$

将图 3 中的实验数据除以相应 ε 的屈服应力(由式(4)算得),可得 ε=0.1、0.2、0.3 处的强化系数,对其取平均并将应变率转换为 K<sub>ε'</sub>,可得半对数坐标下 K<sub>ε'</sub>-lnε'关系曲线,如图 6 所示。

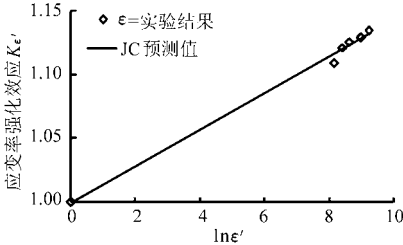


图 6 应变率强化效应回归曲线(K<sub>ε'</sub>=1 处 ε'<sub>0</sub>=1/s)

Fig. 6 Fitting curves of strain rate strengthening effect

图 6 原点处反映出材料的一个固有特性,即在应变率在接近于零的情况下,无应变率强化效应, K<sub>ε'</sub>为 1;由于材料在低应变率段(0.001~1/s)内的强化效应变化微小,可忽略,将应变率 1/s 和 0.001/s 处的强化效应均考虑为 1,那么在图中 lnε'=0(取 ε'<sub>0</sub>=1/s)处 K<sub>ε'</sub>=1。回归分析后可得

$$K_{\epsilon'} = 1 + 0.0143 \ln \epsilon' \tag{5}$$

将图 4 中的实验数据除以相应 ε 和 ε' 下的屈服应力(由式(4)、(5)算得),可得 ε=0.1、0.2、0.3 处的热软化系数,对其取平均,同时取铝合金 6061-T6 熔点为 610℃,可获得图 7 所示曲线。

对图 7 曲线进行回归分析时发现,多项式回归比用 JC 方程中的幂函数回归可获得更高的精度,尤其在高温阶段。对于一种材料热软化来说,在室温至熔点之间,还存在韧脆转变温度和初熔温度。材

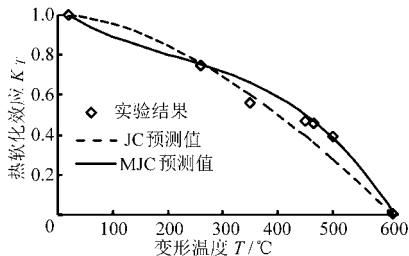


图7 热软化效应回归曲线

Fig.7 Fitting curves of thermal softening effect

料热软化效应在3个温度区段中表现出不同的变化趋势:韧脆效应段、弱软化段和强软化段,可采用分3段的乘幂函数来表达,但会给计算带来麻烦,而多阶多项式能够对这3段不同趋势进行一次性回归,计算将简化,所以本文采用多项式对热软化效应进行描述。最终可得2种热软化效应为:

MJC 方程

$$K_T = 1.0338 - 1.7558 \times 10^{-3} T + 4.5257 \times 10^{-6} T^2 - 7.2 \times 10^{-9} T^3$$

JC 方程

$$K_T = 1 - T_r^{1.753} \tag{6}$$

综上可得修正的JC方程为

$$\sigma = \sigma_s K_\varepsilon (1 + B \ln \dot{\varepsilon}) (C_0 + C_1 T + C_2 T^2 + C_3 T^3) \tag{7}$$

其中  $K_\varepsilon = \begin{cases} 1 + A\varepsilon^n & (\varepsilon_0 < \varepsilon \leq \varepsilon_c) \\ 1 + (A/k_1)\varepsilon^{n/k_2} & (k_1, k_2 > 1; \varepsilon > \varepsilon_c) \end{cases}$

式中  $A, B, C_i$ ——应变强化、应变率强化和热软化效应系数

$k_1, k_2$ ——应变系数

2.3 本构方程在高速切削仿真模型中的验证

综合式(4)~(6)的各效应项可得到铝合金6061-T6的MJC和JC方程,在目前较为成熟的金属切削仿真软件AdvantEdge FEM中验证,所得仿真结果如图8~9所示。图中实验工况为:直角切削;DMG-NEF 400型车床;SECO-SCAC11616H09型刀杆,SECO-CCMT 09T302-F2-HX型刀片,材料接近于国产YG6硬质合金;Kistler 9257B型测力仪;测温采用K型热电偶,结合导热反求法获得前刀面平均温度<sup>[12]</sup>;切削速度100、300、500、700、900、1100、1300、1500和1700 m/min,进给量0.09 mm/r,切宽4 mm。图中AD表示软件自带铝合金6061-T6的本构方程,其屈服应力282 MPa。从图中可看出,本文所得铝合金6061-T6的MJC和JC方程均能够很好地预测主切削力和切削温度随速度的变化趋

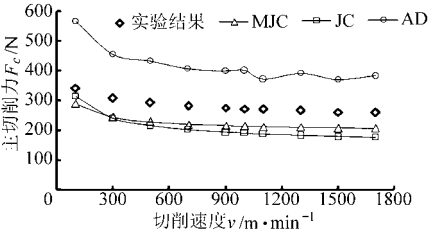


图8 主切削力仿真与实验结果对比

Fig.8 Simulation and experimental results comparison of main cutting force

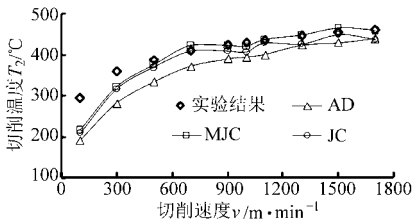


图9 切削温度仿真与实验结果对比

Fig.9 Simulation and experimental results comparison of cutting temperature

势,能够在软件自带的材料方程基础上明显提高主切削力和切削温度的仿真精度。

对所得仿真结果进行误差统计,获得最大仿真误差如表1所示。从中可看出,MJC方程能够更加准确地预测铝合金6061-T6材料的本构关系,主切削力仿真误差可降至20.7%,与JC方程相比明显降低,切削温度仿真误差可降至5%,也优于采用JC方程所得的预测精度。

表1 主切削力和切削温度仿真误差  
Tab.1 Simulation error of main cutting force and cutting temperature %

| 参数         | 方程   |      |      |
|------------|------|------|------|
|            | MJC  | JC   | AD   |
| 主切削力 $F_c$ | 20.7 | 26.9 | 47.4 |
| 切削温度 $T_2$ | 5.0  | 6.8  | 12.0 |

3 结论

- (1) 铝合金6061-T6的流变应力随应变和应变率的升高而升高,随变形温度升高而降低。
- (2) 对于塑性金属材料的本构关系,修正的JC方程较经典JC方程具有更高的描述精度,是对JC方程在高温效应和高应变效应上的有效改进。
- (3) 所得铝合金6061-T6材料本构方程,能准确反映该材料在高温高应变率情况下的动态变形特征,为该材料的高速切削加工有限元仿真提供了材料技术参数。

## 参 考 文 献

- 1 Xu Daochun, Feng Pingfa, Wu Zhijun, et al. Research on warpage deformation of machining cantilever sheet part with combined saw milling tool[J]. Key Engineering Materials, 2009, 407 ~ 408: 528 ~ 532.
- 2 李玉龙, 索涛, 郭伟国, 等. 确定材料在高温高应变率下动态性能的 Hopkinson 杆系统[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(6): 487 ~ 492.  
Li Yulong, Suo Tao, Guo Weiguo, et al. Determination of dynamic behavior of materials at elevated temperatures and high strain rates using Hopkinson bar[J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(6): 487 ~ 492. (in Chinese)
- 3 付秀丽, 艾兴, 万熠, 等. 铝合金 7050 高温流变应力特征及本构方程[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(12): 113 ~ 116.  
Fu Xiuli, Ai Xing, Wan Yi, et al. Flow stress characteristics and constitutive equation at high temperature for 7050 aluminum alloy [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, 28(12): 113 ~ 116. (in Chinese)
- 4 鲁世红, 何宁. 高应变速率下 Al-Mg-Sc 合金压缩变形的流变方程[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(5): 897 ~ 902.  
Lu Shihong, He Ning. Constitutive equation of flow for Al-Mg-Sc alloy under high strain rate [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(5): 897 ~ 902. (in Chinese)
- 5 赵寿根, 何著, 杨嘉陵, 等. 几种航空铝材动态力学性能实验[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(8): 982 ~ 985.  
Zhao Shougen, He Zhu, Yang Jialing, et al. Experiment investigation of dynamic material property of aluminium alloy [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(8): 982 ~ 985. (in Chinese)
- 6 杨奇彪, 刘战强, 曹成铭, 等. 高温合金高速切削锯齿形切屑应变与应变率研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(2): 225 ~ 228.  
Yang Qibiao, Liu Zhanqiang, Cao Chengming, et al. Strain and strain rate of serrated chip generated by high speed cutting of superalloys[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 225 ~ 228. (in Chinese)
- 7 Bonder S R. Constitutive equations for dynamic material behavior in mechanical behavior of materials under dynamic loads [M]. New York: Springer-Verlag, 1968: 176 ~ 190.
- 8 Follansbee P S, Kocks U F. A constitutive description of the deformation of copper based on the use of the mechanical threshold stress as an internal state variable [J]. Acta Metallurgica, 1988, 36(1): 81 ~ 93.
- 9 Zerilli F J, Armstrong R W. Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations [J]. Journal of Applied Physics, 1987, 61(5): 1 816 ~ 1 825.
- 10 Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high rates and high temperatures [C]//Proc. of the 7th International Symposium on Ballistics, the Netherlands, the Hague, 1983: 541 ~ 547.
- 11 鲁世红, 何宁. H13 淬硬钢高应变速率动态性能的实验与本构方程研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(19): 2 383 ~ 2 385.  
Lu Shihong, He Ning. Experimental investigation of the dynamic behavior of hardened steel in high strain rate and parameter fitting of constitutive equation [J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(19): 2 383 ~ 2 385. (in Chinese)
- 12 张京京, 冯平法, 吴志军, 等. 一种借助有限元传热仿真的刀尖点切削温度精确测量方法[J]. 工具技术, 2010, 44(1): 85 ~ 87.  
Zhang Jingjing, Feng Pingfa, Wu Zhijun, et al. Method of precisely measuring tool nose temperature in machining with help of FEM heat transfer analysis [J]. Tool Engineering, 2010, 44(1): 85 ~ 87. (in Chinese)

(上接第 267 页)

- 7 兰国生, 张学良, 丁红钦, 等. 基于分形理论的结合面改进接触模型[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10): 217 ~ 223, 229.  
Lan Guosheng, Zhang Xueliang, Ding Hongqin, et al. Modified contact model of joint interfaces based on fractal theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 217 ~ 223, 229. (in Chinese)
- 8 杨红平, 傅卫平, 师彪, 等. 基于改进粒子群与神经网络的机械结合面法向刚度建模[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 219 ~ 223, 233.  
Yang Hongping, Fu Weiping, Shi Biao, et al. Modeling of machined joints normal stiffness using modified PSO-BP neural network algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 219 ~ 223, 233. (in Chinese)
- 9 Mao Kuanmin, Li Bin, Wu Jun, et al. Stiffness influential factors-based dynamic modeling and its parameter identification method of fixed joints in machine tools[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(2): 156 ~ 164.
- 10 Ahmadian H, Nourmohammadi M. Tool point dynamics prediction by a three-component model utilizing distributed joint interfaces[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(11): 998 ~ 1 005.