

PCBN 刀具切削高温合金切削力试验分析^{*}

吴明阳, 田兆晖, 于永新, 郝鹏飞, 程耀楠

(哈尔滨理工大学高效切削及刀具国家地方联合工程重点实验室, 哈尔滨 150080)

[摘要] 近些年来, 航空制造业的巨大进步推动了高温合金, 特别是镍基高温合金的高速发展。高温合金材料的难加工问题是目前制造业的难点, 其在切削过程中存在切削力大、切削温度高等现象, 直接影响到工件加工表面质量和刀具使用寿命等, 因此对切削力进行测量和分析是研究高温合金切削加工的有效途径。探究 PCBN 刀具切削高温合金切削力变化规律, 首先阐述高温合金的材料特性及加工特点; 其次设计并进行单因素和正交试验, 探讨负倒棱对切削力的作用和影响规律, 建立切削高温合金切削力预测模型; 最后实现预测模型的优化, 并与试验数据对比验证, 为高温合金工艺参数优化起到参考和借鉴作用。

关键词: 高温合金; 切削力; PCBN 刀具; 切削参数; 试验分析

Experimental Study on Cutting Force in Turning Superalloy by PCBN Cutting Tool

WU Mingyang, TIAN Zhaohui, YU Yongxin, HAO Pengfei, CHENG Yaonan

(The Key Lab of National and Local United Engineering for High-Efficiency Cutting & Tools, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

[ABSTRACT] In recent years, the enormous progress of aeronautical manufacturing has promoted the superalloy industry little by little, especially the rapid development of nickel-based superalloy industry. The hard processing problem of superalloy material is one of the difficulties of manufacturing. And in the process of cutting, there are some phenomenons, such as large cutting force, high cutting temperature which directly affect the surface quality of workpiece and tool life, and so on. Therefore, the research on measurement and analysis of the cutting force is the effective approach of superalloy cutting processing. This article explores the change rule of cutting force in superalloy cutting by the PCBN cutting tool. Firstly, the material properties and processing characteristics of the superalloy are expounded; Secondly, the single factor and orthogonal tests are designed and conducted, which aim to explore the effect and influence rule of the negative chamfer on the cutting force, then the cutting force prediction model of turning superalloy GH4169 by PCBN cutting tool is established and investigated; Finally, the model optimization is finished and compared with experimental data. The above efforts provide certain reference for superalloy technological parameter optimization.

Keywords: Superalloy; Cutting force; PCBN cutting tool; Cutting parameter; Experimental analysis

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2017.22.101

高温合金是以铁、钴、镍为基体, 在高温环境下能承受复杂应力并正常工作的一种合金, 具有良好的热疲劳、热稳定、热强等性能, 其在飞机制造、核能开发、能源化工等多个行业应用广泛。高温合金材料特性要求切削刀具具有较高的耐热性、足够的化学稳定性、优良的导热性能^[1-2]。高温合金又是典型的难加工材料, 在加工中往往产生很大的阻力, 引起机床的振动和刀具的破损等, 进而使工件加工质量和精度降低, 因此对切削过

程中切削力进行测量和分析是十分必要的^[3]。

在高温合金切削力方面, 王殿龙等^[4]设计硬质合金刀具铣削高温合金 K24 试验, 并讨论了切削力与表面完整性的关系, 给出了铣削力经验公式; 杜劲^[5]通过涂层硬质合金刀具加工高温合金 GH4169 揭示了切削力随轴向切削深度、每齿进给量、主轴转速的变化规律; Okafor 等^[6]建立了在乳化液冷却条件下切削 Inconel718 的切削力模型, 并在试验中取得了良好的预测效果; Bhopale 等^[7]在铣削 Inconel718 切削力模型的基础上, 发现较大的刃倾角可以有效降低切削力。

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51475128); 哈尔滨市应用技术与开发项目(2014DB4AG017)。

尽管学者们对高温合金切削力进行了大量研究,但大部分试验采用硬质合金刀具,并且对高温合金切削力建立预测模型及模型参数优化的研究不多,探讨PCBN刀具负倒棱对切削力影响趋势的相关文献更是少见。相关研究证明PCBN刀具是较为理想的切削高温合金刀具,能够承受1000℃以上的高温,切削层材料发生软化时仍有较高的硬度、较好的耐磨性,与此同时,PCBN刀具属于脆性材料,负倒棱对其切削性能影响显著^[8-9]。综上,本文设计并进行PCBN刀具车削高温合金GH4169试验,探讨负倒棱对切削力的作用情况,建立切削力预测模型并对其检验,进而从残差出发分析模型的可行性,为高温合金工艺参数优化提供一定的参考和借鉴。

1 高温合金切削力试验

1.1 试验条件

试验采用大连机床厂CKA6150数控车床,主轴最大转速2000r/min;Kistler9275B三向测力仪,配套Kistler5070A电荷放大器;选取倒棱宽度0.15mm、刀尖圆弧半径0.8mm的PCBN刀具,倒棱角度分别为-15°、-20°、-25°;试件材料选用GH4169,规格Φ56mm×280mm。

高温合金GH4169是一种多元素金属,含有Cr、Mo、Ti、Al、Fe等,主要元素质量分数见表1。另外特殊金相结构如金属化合物、碳化物使高温合金综合性能良好,GH4169的物理力学性能见表2。

Kistler9275B三向测力仪与车刀刀杆固定,依次接出Kistler5070A电荷放大器、DHDAS动态信号采集分析系统、计算机,模拟信号转换成数字量后在计算机中保存、处理、打印,数据采集系统如图1所示。

1.2 试验方案及测量结果

通过单因素试验,探究负倒棱对切削力影响状况,了解其作用显著范围,在此基础上进行多因素正交试验。参考相关文献[10-11]和实际生产经验,设计单因素试验和三因素四水平正交试验,干式切削GH4169,切

表1 GH4169主要成分及质量分数 %

Ni	Cr	Mo	Ti	Al	Co	C	Fe
53.5	18.96	3.14	0.79	0.43	0.09	0.07	余量

表2 GH4169的物理力学性能

拉伸强度 / MPa	屈服强度 / MPa	延长率 / %	弹性模量 / GPa	硬度 (HRC)
1372	830	14.6	199	41

削方案及测量结果见表3和表4,切削合力 $F_{\text{合}}$ 由切削分力计算可得。

2 试验结果与讨论

2.1 单因素试验结果分析

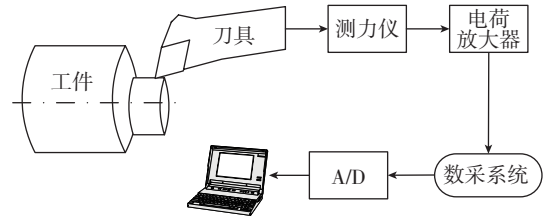


图1 数据采集系统

Fig.1 Data acquisition system

表3 单因素试验方案

序号	切削速度 $v_c/(m \cdot \text{min}^{-1})$	进给量 $f/(mm \cdot r^{-1})$	切削深度 a_p/mm
1~5	70、100、130、160、190	0.15	0.1
6~10	160	0.05、0.1、0.15、0.2、0.25	0.1
11~15	160	0.15	0.05、0.1、0.15、0.2、0.25

表4 正交试验表及测量结果

序号	切削速度 $v_c/(m \cdot \text{min}^{-1})$	进给量 $f/(mm \cdot r^{-1})$	切削深度 a_p/mm	切削合力 $F_{\text{合}}/N$
1	80	0.08	0.10	107.25
2	80	0.10	0.15	162.83
3	80	0.12	0.20	228.95
4	80	0.14	0.25	351.43
5	100	0.08	0.15	142.33
6	100	0.10	0.10	196.13
7	100	0.12	0.25	293.94
8	100	0.14	0.20	320.31
9	120	0.08	0.20	167.29
10	120	0.10	0.25	278.45
11	120	0.12	0.10	144.35
12	120	0.14	0.15	264.97
13	140	0.08	0.25	239.75
14	140	0.10	0.20	182.73
15	140	0.12	0.15	193.56
16	140	0.14	0.10	163.70

切削刃磨出一定宽度、带负前角的倒棱对 PCBN 刀具提升切削效果作用显著,能降低崩刃机率,提高刀具使用率,倒棱处楔角还能有效降低切削热。倒棱宽度选择与切削用量和工件材料性能有关,试验主要探讨在不同切削用量下倒棱角度对切削力影响。

切削用量变化时,切削力随倒棱角度变化趋势如图 2 所示,三向切削力中径向力最大,主切削力次之,轴向力最小。其原因是:在切削过程中楔角增大,刀具对高温合金材料的推挤作用加剧,后刀面与高温合金材料之间的熨压作用强于剪切作用,从而使径向力大于其他两个分力。同时,在切削刃上磨出负倒棱,弹、塑性变形和摩擦阻力从刀尖转移到倒棱处,迫使被切金属的变形加大,切削力有一定程度增加。

对于径向力来说,在 15°~25° 范围内,随着倒棱角度的增加,径向力基本也在增大,主切削力、轴向力也具有相同的变化规律。分析其原因是:倒棱角度增大,楔角增加,虽然散热条件和刃口强度提高,但是刀具锋利程度下降,切削卷曲但不易折断,致使切削力增加。

2.2 PCBN 刀具切削高温合金切削力预测模型

依据金属切削原理,PCBN 刀具切削高温合金切削力预测模型为:

$$F = C_F v_c^{x^F} a_p^{y^F} f^{z^F} \quad (1)$$

式中, C_F 是常数且大小取决于加工条件; v_c 为切削速度, m/min; a_p 为切削深度, mm; f 为进给量, mm/r; x^F 、 y^F 、 z^F 分别为切削速度、进给量、切削深度的指数。

切削力预测模型是由多个自变量通过回归分析遴选最优组合共同来预测或估计因变量。对公式(1)两边取对数得:

$$\lg F = \lg C_F + x^F \lg v_c + y^F \lg a_p + z^F \lg f \quad (2)$$

设 $y = \lg F$, $x_1 = \lg v_c$, $x_2 = \lg a_p$, $x_3 = \lg f$, $b_0 = \lg C_F$, $b_1 = x^F$, $b_2 = y^F$, $b_3 = z^F$ 。可将公式(2)转化成:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 \quad (3)$$

将正交试验表中 $F_{合}$ 代入公式(3)中,得到多元线性回归方程:

$$\begin{cases} y_1 = b_0 + b_1 x_{0101} + b_2 x_{0201} + b_3 x_{0301} \\ y_2 = b_0 + b_1 x_{0102} + b_2 x_{0202} + b_3 x_{0302} \\ \dots \\ y_8 = b_0 + b_1 x_{0108} + b_2 x_{0208} + b_3 x_{0308} \\ \dots \\ y_{16} = b_0 + b_1 x_{0116} + b_2 x_{0216} + b_3 x_{0316} \end{cases} \quad (4)$$

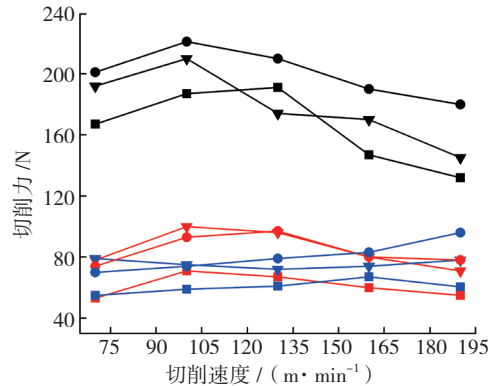
则公式(4)可以表示为:

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{15} \\ y_{16} \end{pmatrix} \quad b = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} \quad (5)$$

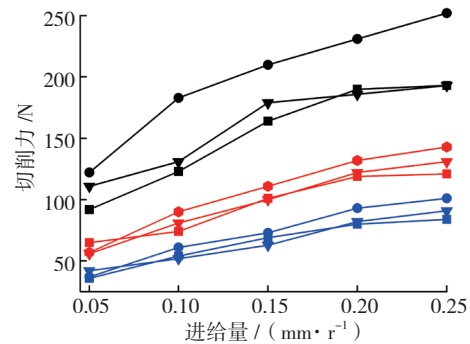
$$Y = \begin{pmatrix} 1 & x_{0101} & x_{0101} & x_{0301} \\ 1 & x_{0102} & x_{0102} & x_{0302} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{0102} & x_{0215} & x_{0315} \\ 1 & x_{0102} & x_{0216} & x_{0316} \end{pmatrix} \quad (6)$$

公式(5)和公式(6)可转化为矩阵:

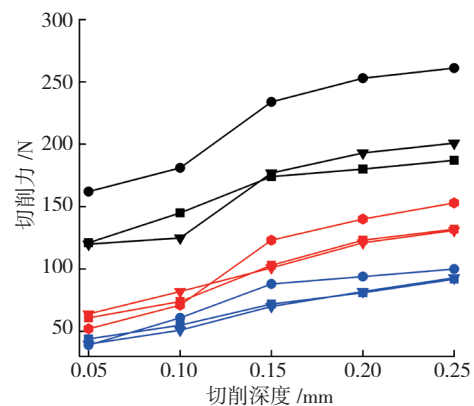
$$Y = Xb \quad (7)$$



(a) 切削速度 - 切削力关系



(b) 进给量 - 切削力关系



(c) 切削深度 - 切削力关系

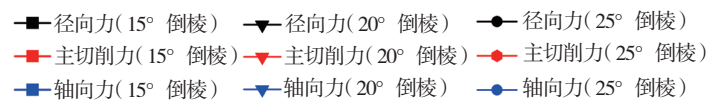


图2 负倒棱对切削力影响

Fig.2 Effect of negative chamfer on cutting force

利用最小二乘法可得^[12]:

$$b = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (8)$$

通过最小二乘法拟合,并以此建立切削力预测模型:

$$F = 5478.98v_c^{-0.034} f^{0.8524} a_p^{0.6842} \quad (9)$$

2.3 切削力预测模型优化

切削环境的复杂性致使基于试验的预测模型难以达到参数空间上的全局最优。试验采集的数据与模型输出往往存在一定的偏差,模型优化能够极小化目标函数,使两者达到最佳拟合程度。而残差能反映出用估计的回归方程去预测试验数据可能引起的误差,进而揭示预测模型与基本假定是否一致。因此,本文从残差出发分析模型可行性,修正人为因素和生产环境干扰因素造成的异常值。

(1) 统计量数值能揭示试验值与预测模型输出相对符合程度,拟合程度好表示模型是有意义的。对预测模型进行检验,包括 R^2 值、 F 检验值、阈值 f ,与显著性概率相关的 p 值,见表5。 R^2 值越靠近1表明预测模型越显著,一般地, $R^2 > 0.95$ 表明显著性水平较高; F 检验值必须足够大,特别是 F 检验值应大于阈值 f ; p 值应该满足小于显著性水平。表5中各项统计量满足条件,说明预测模型有意义。

(2) R^2 值不够理想,表示某些异常点与其他点走向不相吻合,本次预测模型的异常点可以通过残差杠杆(图3)进行识别,根据莱特准则通过残差取值大小可以对异常点进行判断,莱特检验一般适用于样本数量 ≥ 10 的情况,本次试验符合条件,故设定显著性水平为0.05,置信度则为95%,对于残差绝对值 ≥ 0.15 (即3倍显著性水平)的异常点甄别。正交试验第6组即为异常点,如图3(a)所示;剔除后重新计算残差值进行判别,再次发现第13组数据为异常点,如图3(b)所示;两次剔除异常值后残差分布在0点附近均匀分布,即没有发现高杠杆点,代表数据中没有强影响点、异常点,如图3(c)所示。

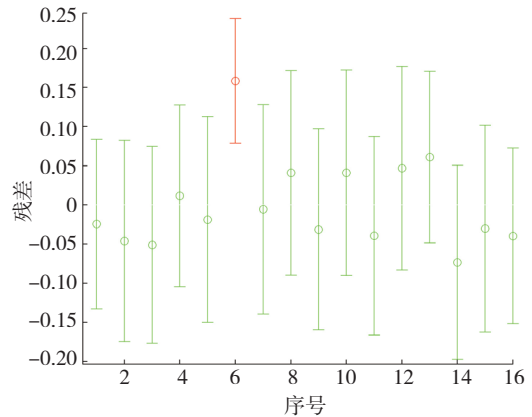
改进后的切削力经验预测模型为:

$$F = 8643.71v_c^{-0.0561} f^{0.9654} a_p^{0.7647} \quad (10)$$

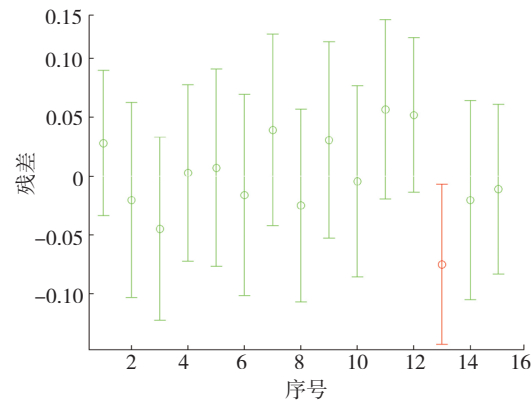
为了更好地对切削力预测模型进行检验,保证切削力预测准确性,在试验参数范围内任意选取3组不同参数组合进行验证,结果如表6所示,与试验值的相对误差如图4所示。通过表6中数据比较可知,切削力模型误差较小;相较而言,预测模型(10)比预测模型(9)误差更小,分析原因是切削过程中加工振动干扰到采集的切削力信号,导致模型(9)误差较大。综上,模型(10)得出的切削力预测结果可以提高预测与实际情况的符合程度。

表5 预测模型输出项

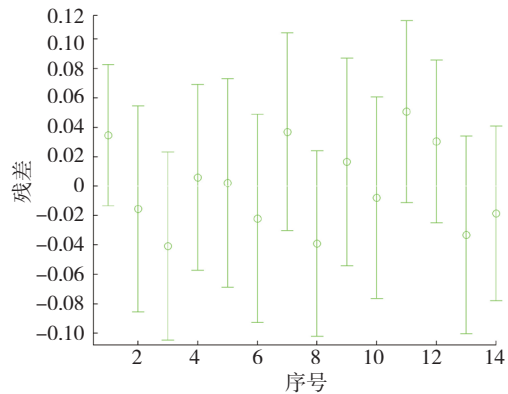
统计量	R^2 值	F 检验值	阈值 f	p 值
输出项	0.8378	20.6660	0.0000	0.0042



(a) 16组数据



(b) 15组数据



(c) 14组数据

图3 残差杠杆图

Fig.3 Residual lever plot

3 结论

本文在单因素和正交试验的基础上研究PCBN刀具负倒棱、切削参数对切削力影响,进而对切削力预测模型的优化与验证进行探究,得出以下结论:

(1) 通过单因素试验发现切削高温合金过程中径向

表6 切削力对比分析表

序号	切削参数	对比	$F_{合}$
1	$v_c=80\text{m/min}$ $f=0.1\text{mm/r}$ $a_p=0.15\text{mm}$	试验值 / N	162.83
		拟合值 / N	181.08
		优化值 / N	171.59
		拟合值和优化值 误差率 / %	11.20 和 5.37
2	$v_c=120\text{m/min}$ $f=0.12\text{mm/r}$ $a_p=0.1\text{mm}$	试验值 / N	144.35
		拟合值 / N	158.08
		优化值 / N	146.69
		拟合值和优化值 误差率 / %	9.51 和 1.61
3	$v_c=140\text{m/min}$ $f=0.12\text{mm/r}$ $a_p=0.15\text{mm}$	试验值 / N	193.56
		拟合值 / N	207.54
		优化值 / N	198.29
		拟合值和优化值 误差率 / %	7.22 和 2.44

注: 误差率 = (理论值 - 试验值) / 试验值 \times 100%, 其中理论值分别为拟合值和优化值。

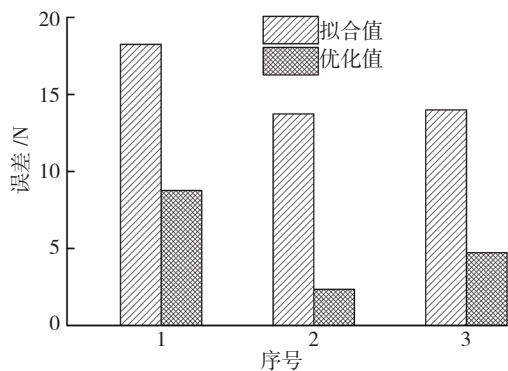


图4 切削力误差对比

Fig.4 Comparison of cutting force deviation

力明显比主切削力、轴向力大; 切削力随PCBN刀具负倒棱变化呈非线性变化, 在实际生产中建议选用 15° 负倒棱, 可以适当减小切削力。

(2) 采用回归分析的方法建立了切削力预测模型, 并通过残差分析优化模型以保证误差在可接受范围内; 对模型准确性进行了验证, 误差均在10%以内, 模型能为切削力预测提供一定的参考。

参考文献

- [1] 陈国良. 高温合金学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988.
CHEN Guoliang. High temperature alloy science[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1988.

[2] SHARMAN A R C, HUGHES J I, RIDGWAY K. The effect of tool nose radius on surface integrity and residual stresses when turning Inconel 718TM[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 216: 123-132.

[3] YAMADA S, MAEDA Y, MOTOYOSHI T, et al. Tool wear characteristics of cylindrical cutting of nickel-based super alloy[J]. Advanced Materials Research, 2016, 1136: 168-172.

[4] 王殿龙, 荀志锋, 庞继有, 等. K24镍基高温合金切削性能试验研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(S1): 190-193.

WANG Dianlong, XUN Zhifeng, PANG Jiyou, et al. An investigation of the machinability of K24 nickel-based super alloy[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(S1): 190-193.

[5] 杜劲. 粉末高温合金FGH95高速切削加工表面完整性研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.

DU Jing. Study on surface integrity of FGH95 high speed machining of powder superalloy[D]. Ji'nan: Shandong University, 2012.

[6] OKAFOR A C, SULTAN A A. Development of a mechanistic cutting force model for wavy-edge bull-nose helical end-milling of inconel 718 under emulsion cooling strategy[J]. Applied Mathematical Modelling, 2016, 40(4): 2637-2660.

[7] BHOPALE N N, PAWADE R S, JOSHI S S, et al. Analysis and modeling of cutting forces in ball end milling of superalloy inconel 718[J]. Journal of the Institution of Engineers Mechanical Engineering Division, 2011, 92: 11-18.

[8] 刘献礼. 聚晶立方氮化硼刀具及其应用[M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1999.

LIU Xianli. Polycrystalline cubic boron nitride tool and its application[M]. Harbin: Heilongjiang Science and Technology Press, 1999.

[9] 任帅民, 李嫚, 张弘毅, 等. PCBN刀具断续切削淬火钢时负倒棱角度对其切削性能的影响[J]. 工具技术, 2010, 44(6): 13-16.

REN Shuaimin, LI Man, ZHANG Hongtao, et al. Effects of PCBN cutting tool's chamfer angle on cutting property during process in interrupted turning hardened steel[J]. Tool Engineering, 2010, 44(6): 13-16.

[10] 刘超, 艾兴, 刘战强, 等. 车削高温合金GH2132时切削力和表面粗糙度的建模与试验分析[J]. 工具技术, 2009, 43(10): 19-21.

LIU Chao, AI Xing, LIU Zhanqiang, et al. Modeling and analysis on cutting force and surface roughness in turning of high temperature alloy GH2132[J]. Tool Engineering, 2009, 43(10): 19-21.

[11] 王博. PCBN刀具切削GH4169试验及仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.

WANG Bo. Experimental and simulation study on cutting GH4169 of PCBN tool[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2016.

[12] 刘志平, 石林英. 最小二乘法原理及其MATLAB实现[J]. 中国西部科技, 2008, 7(17): 33-34.

LIU Zhiping, SHI Linying. The principle of least square algorithm and its achievement by MATLAB[J]. Science and Technology of West China, 2008, 7(17): 33-34.

通讯作者: 吴明阳, 博士、教授, 研究方向为机械加工工艺及装备等, E-mail: hustjxdlgxy@163.com.

(责编 逸飞)