

铣削大理石切削参数对 PCD 刀具磨损的影响

闫海鹏¹, 吴玉厚²

(1.沈阳建筑大学 机械工程学院, 沈阳 110168;

2.高档石材数控加工装备与技术国家地方联合工程实验室, 沈阳 110168)

摘要:目的 探索 PCD 刀具磨损机理, 以延长刀具使用寿命。方法 设计正交试验, 研究不同加工参数切削大理石对刀具磨损的影响情况。分析主轴转速、进给速度与切削深度对 PCD 刀具磨损量的影响规律, 以优化切削参数来减小刀具磨损量。根据经验公式, 建立单位时间刀具磨损量和固定行程磨损量模型。通过对试验过程刀具振动情况记录, 结合刀具实际磨损情况, 给出了刀具磨损等级。结果 主轴转速的提高可以减少刀具磨损量, 进给速度的增大会加剧刀具磨损, 而切削深度小于 1 mm 时, 其对刀具磨损量的影响很小, 但切削深度大于 1 mm 时, 继续增大切削深度会使刀具快速磨损。利用预测模型能够很好地对刀具磨损情况进行预判, 根据磨损等级, 得出刀具与机床发生共振时磨损最为严重, 在刀具表面产生了明显的犁沟、磨损以及金刚石颗粒脱落。结论 在实际加工中, 通过提高主轴转速、降低进给速度以及减小切削深度有助于增强刀具的耐用度, 避开共振切削参数可以有效降低刀具磨损, 主轴转速、进给速度、切削深度分别为 12000 r/min、500 mm/min、0.5 mm 时的切削效果较佳, 有最小的刀具磨损量。

关键词: PCD 刀具; 大理石加工; 磨损机理; 切削参数; 磨损量; 刀具寿命; 预测模型

中图分类号: TG714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)07-0245-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.07.040

Effects of Cutting Parameters for Marble Milling on Wear of PCD Cutters

YAN Hai-peng¹, WU Yu-hou²

(1.School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China;

2.National-Local Joint Engineering Laboratory of NC Machining Equipment and Technology of High-grade Stone, Shenyang 110168, China)

ABSTRACT: The work aims to prolong service life of cutters by exploring wear mechanism of PCD cutters. Orthogonal experiment was designed to study effects of cutting marble provided with different processing parameters on abrasion of cutters. Law of influence of spindle speed, feed rate and cutting depth on abrasion loss of PCD cutters was analyzed to reduce abrasion loss of PCD cutters by optimizing cutting parameters. Then a model of abrasion loss of PCD cutters and fixed stroke abrasion loss in unit time was established based on empirical formula. Abrasion grade of cutters was given based on records of cutter vibration during the tests and actual abrasion loss of cutters. Increase of spindle speed could reduce abrasion loss while that of feeding speed would intensify abrasion loss. It had slight effect on abrasion loss when cutting depth was below 1 mm. However, increase

收稿日期: 2017-01-25; 修订日期: 2017-03-09

Received: 2017-01-25; Revised: 2017-03-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51375317)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51375317)

作者简介: 闫海鹏(1987—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为脆性材料加工。

Biography: YAN Hai-peng(1987—), Male, Doctoral candidate, Research focus: brittle materials processing.

通讯作者: 吴玉厚 (1955—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为脆性材料加工、主轴系统。

Corresponding author: WU Yu-hou(1955—), Male, Doctor, Professor, Research focus: brittle materials processing and spindle system.

of the cutting depth would lead to rapid abrasion of cutters when cutting depth was over 1 mm. The prediction model could predict abrasion of cutters well. The abrasion was the most serious when cutters resonated with machine tools according to abrasion grade, hence obvious furrow, abrasion and falling off of diamond particles were observed on the surface of cutters. During actual processing, durability of cutters can be enhanced by improving spindle speed, reducing feeding speed and decreasing cutting depth. Abrasion of cutters can be effectively reduced by avoiding resonant cutting parameters, better cutting effects and minimum abrasion loss are obtained at the spindle speed of 12000 r/min, feed rate of 500 mm/min and cutting depth of 0.5 mm.

KEY WORDS: PCD cutters; marble processing; wear mechanism; cutting parameters; abrasion loss; cutter life; prediction model

大理石是一种天然建筑装饰石材,具有良好的装饰功能,不仅被广泛应用于墙体装修、地面铺设、室内装饰等,还被加工成文具、器皿、人物肖像、石狮等精美艺术品^[1-2]。但是传统的石材雕刻受纯手工加工制造的限制^[3],严重阻碍了石材加工行业的发展。

随着数控技术、精密制造技术、高速主轴技术和数字化制造技术的发展,国内外相继开发了一批高档异型石材精密加工机床^[4-5]。而聚晶金刚石(PCD)刀具是加工石材的主要刀具^[6],因此对 PCD 刀具的研究显得尤为重要。文献[7]研究了加工制造 PCD 微细铣削刀具的影响因素。文献[8]分析了磨削加工中刀具转速、磨削压力及磨削液等因素对 PCD 刀具磨削质量的影响。文献[9]从刀具磨损、切削力等方面对比了 PCD 刀具和硬质合金刀具的加工性能。文献[10]讨论了 PCD 刀具的磨损形态以及磨损机理。文献[11]进行 Ti6Al4V 高速铣削试验,观察了 PCD 刀具磨损形貌,检测了失效刀具表面的元素分布,研究了刀具后刀面磨损率随着切削速度的变化规律。文献[12]通过切削铸铝棒试验,分析 PCD 刀具后刀面刃磨质量对刀具磨损及使用寿命的影响规律。文献[13]针对切削速度分析了 PCD 刀具切削花岗岩的磨损机制。此外,文献[14]利用神经网络方法建立了刀具磨损量的预测模型,并通过遗传算法对切削参数进行优化。文献[15]构造了基于 LS-SVM 回归算法的刀具磨损量预测模型,能够准确预测刀具磨损量。文献[16]通过有限元分析方法进行刀具磨损量的预测,并借助试验来验证有限元预测模型的可靠性。

为了进一步研究金刚石涂层刀具在高速切削时的破损原因,探讨切削参数对刀具磨损的影响,并进一步确定合理的加工工艺参数,本文通过 PCD 刀具铣削大理石试验,利用单位时间刀具磨损量和固定行程磨损量来度量刀具使用寿命,分析刀具耐用性,并给出经验预测模型,同时通过对比切削试验,讨论了 PCD 刀具的磨损机理,并给出了磨损等级。

1 试验

1.1 试验设备

试验使用的机床为沈阳建筑大学与沈阳机床集

团共同研制的异型石材车铣加工中心(HTM50200)。刀具磨损量的检测设备为精度 0.1 mg 的 FA1004 电子天平,并利用 VHX-1000E 超景深三维显微系统对刀具表面的磨损形貌进行观测。

1.2 试验刀具

试验刀具为 D10 PCD 球头铣刀,采用金属结合剂加工而成,其基体材料为 YT15 硬质合金,金刚石质量分数为 52%,磨料粒度为 45/55。

1.3 试验工件

本试验利用 PCD 刀具加工天然大理石。试验所用大理石各组成成分的质量分数分别为:方解石占 90%,白云石占 6%,石灰石占 1%,蛇纹石占 1%,其他成分占 2%。大理石的体密度为 2700 kg/m³,吸水率为 0.14%,抗弯强度为 10.4 MPa,抗压强度为 1067 MPa。试验采用的冷却方式为外部水冷。

1.4 试验方案

通过 PCD 刀具铣削大理石试验,研究采用不同主轴转速、进给速度和切削深度加工时的刀具磨损情况以及对刀具磨损的影响规律。表 1 列出了本次试验的切削参数。

表 1 试验参数选取
Tab.1 Selection of test parameters

水平	主轴转速 (r·min ⁻¹)	进给线速度 (mm·min ⁻¹)	切削深度 /mm
1	6000	500	0.5
2	9000	1000	1.0
3	12000	1500	1.5

对表 1 中试验参数进行正交试验设计,并利用 PCD 刀具按照试验方案进行铣削试验,通过测量试验前后的刀具质量计算刀具磨损量。

2 结果及分析

2.1 切削参数对刀具磨损的影响

刀具使用寿命一般用耐用度来评价,即刀具磨钝

之前总的使用时间。这里采用单位时间刀具磨损量和固定行程磨损量来度量刀具使用寿命。众所周知，刀具加工工件会产生磨损现象，刀具磨损到一定程度就会产生磨钝，从而不能继续加工工件，因此可用刀具单位时间的磨损量及固定行程磨损量来分析刀具寿命。

正交试验结果如表 2 所示。其各组试验的累计加工行程均为 100 m。

表 2 正交试验结果
Tab.2 Orthogonal experimental results

序号	主轴转速/(r·min ⁻¹)	进给线速度/(mm·min ⁻¹)	切削深度/mm	单位时间磨损量/(mg·min ⁻¹)	固定行程磨损量/mg
1	6000	500	0.5	0.0055	1.1
2	6000	1000	1.0	0.0310	3.1
3	6000	1500	1.5	0.2040	13.6
4	9000	500	1.0	0.0095	1.9
5	9000	1000	1.5	0.0910	9.1
6	9000	1500	0.5	0.0615	4.1
7	12000	500	1.5	0.0245	4.9
8	12000	1000	0.5	0.0080	0.8
9	12000	1500	1.0	0.0570	3.8

分析表 2 的实验结果，第 8 组试验的固定行程磨损量及单位时间磨损量均最小，而第 3 组试验的固定行程磨损量及单位时间磨损量均最大，且磨损量较其他组试验大很多。这说明第 8 组试验的切削参数最优，可以有效减小刀具磨损，有利于增加刀具切削时限。因此从刀具使用寿命角度考虑，在实际加工中应该选择第 8 组试验参数组合，而尽量避免采用第 3 组试验的切削参数组合。

刀具磨损量随切削参数变化曲线如图 1 所示。从图中可以看出，随着切削参数的变化，固定行程磨损量与单位时间磨损量变化趋势基本一致，即提高主轴转速能够使固定行程磨损量与单位时间磨损量都减小；降低进给速度、减小切削深度也都会减少固定行程磨损量和单位时间磨损量。继续分析图 1c 还能够得到，在切削深度小于 1 mm 时，其增加几乎不影响刀具磨损量的改变，即基本不影响刀具使用寿命，但将切削深度增大到 1 mm 后，其值的变化对刀具磨损量的影响将变得非常敏感。因此切削深度较大时将刀具产生较大的影响，并且有可能造成严重磨损。

此外，结合实际情况与理论知识，进一步分析图

1，主轴转速的增加可降低刀具磨损量是因为随着主轴转速的提高缩短了刀具单个颗粒的切削时间，致使切削力得到了降低，从而使刀具的磨损量得到减少。增大进给速度加大了 PCD 刀具的进给方向吃刀量，因此将增大刀具受力，进而加剧了刀具磨损。切屑速度较小（小于 1 mm）时，刀具轴向与工件之间有较小的切削接触面积，受到的切削力也较小，且散热较快，所以对刀具磨损量的影响较小；但当切削深度较大（大于 1 mm）时，若继续增加切削深度，则将使刀具参与切削的磨料颗粒数增多，导致接触区域产生剧烈的摩擦挤压现象，使刀具加速磨损，同时刀具轴向与工件接触面积增大，导致加工产生的热量不易散发，切削温度升高，并将烧伤刀具表面及工件表面。

综合上述分析，从刀具的使用角度来考虑，加工过程中的主轴转速越高越有益于提高刀具寿命，进给速度越低对刀具表面越好，而切削深度应该适当选择较小值。依据本文试验参数分析，如果加工参数选择为主轴转速 12000 r/min、进给速度 500 mm/min、切削深度 0.5 mm，那么刀具磨损量应该会比第 8 组试验切削参数得到的值还要小。经试验验证，此切削参

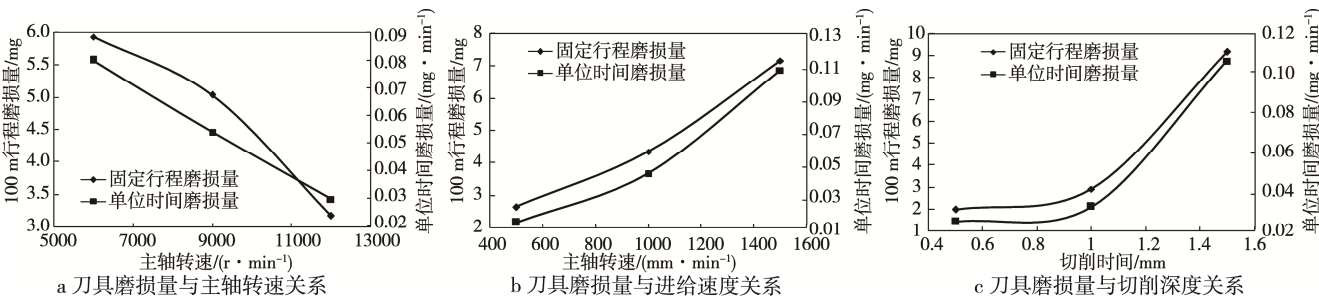


图 1 刀具磨损量与各切削参数关系
Fig.1 Relationships between tool wear and cutting parameters: a) spindle speed, b) feed rate, c) cutting depth

数下的单位时间刀具磨损量为 0.0052 mg/min，小于第 8 组试验值 0.008 mg/min。

2.2 刀具磨损经验公式

为了更好地研究切削参数和刀具磨损量之间的量化关系，以便于根据工艺参数来预测刀具磨损量，从而指导优化切削参数。根据试验结果，本文利用最小二乘原理建立了刀具磨损量的经验预测模型如式（1）和式（2）所示。

$$S_1 = 8.9990 \times 10^{-6} \cdot v_c^{-0.4874} \cdot v_f^{1.8612} \cdot a_p^{1.4819} \quad (1)$$

$$S_2 = 0.8999 \cdot v_c^{-0.4874} \cdot v_f^{0.8612} \cdot a_p^{1.4819} \quad (2)$$

式中， S_1 表示单位时间刀具磨损量，单位为 mg/min； S_2 表示固定行程（100 m）刀具磨损量，单位为 mg；各项指数表示各切削用量对刀具磨损量的影响程度。

通过 F 检验方法对式（1）和式（2）进行显著性检验，检验值 $F1=22.3>F_{0.01}(3,5)=12.1$ ， $F2=13.0>F_{0.01}(3,5)=12.1$ ，检验结果表明显著性较高。此外，从式（1）和式（2）中可以看到，影响单位时间刀具磨损量最大的因素是进给速度，而影响固定行程刀具磨损量最大的因素是切削深度，单位时间刀具磨损量和固定行程刀具磨损量均与切削速度负相关，且受其影响最小。

从表 3 可以看出，经验公式的总体相对误差较大，这是因为试验样本较少，导致最小二乘法回归系数的精度不高，而且在对公式两边取对数转换时也产生了误差传递。但从显著性检验结果来看，该经验公式在一定程度上是可以对刀具磨损量作初步预测的。

表 3 刀具磨损分析结果
Tab.3 Analysis results of tool wear

单位时间磨损量 S_1			固定行程磨损量 S_2		
试验值	计算值	相对误差%	试验值	计算值	相对误差%
0.0055	0.0049	10.91	1.1	0.9794	10.96
0.0310	0.0497	60.32	3.1	4.9696	60.31
0.2040	0.1928	5.49	13.6	12.8506	5.51
0.0095	0.0112	17.89	1.9	2.2452	18.17
0.0910	0.0744	18.24	9.1	7.4378	18.27
0.0615	0.0311	49.43	4.1	2.0704	49.50
0.0245	0.0178	27.35	4.9	3.5588	27.37
0.0080	0.0127	58.75	0.8	1.2691	58.64
0.0570	0.0754	32.28	3.8	5.0263	32.27

2.3 刀具磨损等级

将刀具磨损情况按磨损轻重程度分成 A、B、C、D 四个等级，其中 A 级磨损量最小，D 级磨损最严重。如表 4 所示，根据各试验参数，实时记录了试验过程中刀具的振动情况，并与试验结果对比描述。由表 4 可知，刀具的磨损程度随振动的加剧而增大，即刀具

振动越严重，其磨损也越严重。第 3 组试验的切削参数几乎使机床达到了共振现象，刀具磨损量也最大，因此应避免采用该试验参数组合进行加工，尽量采用第 1、4、8 组的试验切削参数，而最佳的切削参数组合为第 8 组试验参数。

表 4 各试验刀具磨损情况
Tab.4 Test tool wear condition

序号	刀具情况	振动情况	磨损等级
1	刀头无明显磨损	微小振动	A
2	涂层浓度降低、 结合剂破坏	有振动	B
3	涂层温度降低、刀柄 温度升高、基体表面 有明显犁沟	振动大、刺耳的 嗡鸣声	D
4	刀头无明显磨损	微小振动	A
5	结合剂破碎、金刚石 粒磨钝、磨平	有振动、嗡鸣声	C
6	涂层浓度降低、结合 剂破坏	有振动	B
7	涂层浓度降低、结合 剂破坏	有振动	B
8	刀头无明显磨损	振动减小、 趋于稳定	A
9	涂层浓度降低、结合 剂破坏	有振动	B

注：表中序号与表 2 中相对应，即各序号试验参数一一对应。

第 3 组试验参数加工大理石后的刀具磨损形貌图如图 2 所示。从图中可以看到刀具表面产生了明显的犁沟、磨损以及金刚石颗粒脱落现象。在铣削加工过程中，刀具磨粒切削与工件表面接触不可避免地会产生摩擦，导致磨粒受到磨损破坏，随着切削过程的继续，最终产生刀具的宏观磨损现象。如果加工参数选择不恰当的话，工件中的硬质颗粒会破坏刀具烧结剂，产生图 2 所示严重的机械犁沟现象，此时机床也

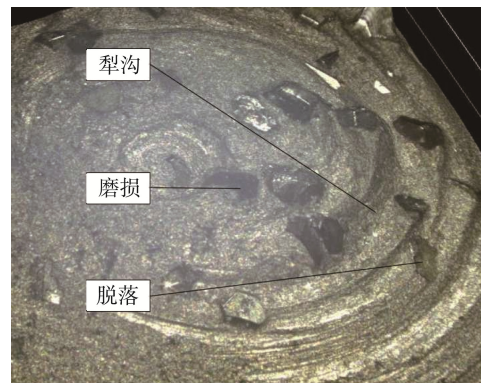


图 2 金刚石涂层刀具表面形貌
Fig.2 Surface topography of diamond coated tool

会产生严重的振动情况,这不仅对零件的加工表面质量造成影响,而且更加加剧了刀具表面的磨损,甚至造成金刚石颗粒的脱落。因此,在利用PCD刀具加工大理石时,选择合理的切削参数不仅能够有效延长刀具使用寿命,还可以在在一定程度上保证加工质量。

3 结论

1) 刀具磨损量随主轴转速的提高而减小,随进给速度的增大而增加。

2) 切削深度小于1 mm时,增加切削深度对刀具磨损的影响非常小,几乎不改变刀具的磨损量;切削深度大于1 mm且继续增大时,将会急剧增加刀具的磨损量。

3) 建立了刀具磨损的经验预测模型,同时分析试验过程中机床振动等情况,给出了刀具磨损等级。当主轴转速在6000 r/min,进给速度与切削深度分别为1500 mm/min和1.5 mm时,机床振动最为强烈,达到共振,刀具磨损也最为严重;而主轴转速达到12000 r/min,进给速度降低至500 mm/min,切削深度减小到0.5 mm时,刀具磨损最小。

4) 在切削大理石过程中,应该选择适当的加工工艺参数,避开机床的共振频率,减少刀具磨损,有利于提高加工效率和刀具使用寿命。

参考文献:

- [1] 王霄京. 中国石材协会郑重宣告——天然大理石可以安全使用[J]. 中国建材, 2014(1): 31—33.
WANG Xiao-jing. China Stone Association Solemn Declaration: Natural Marble Could be Used Safely[J]. China Building Materials, 2014(1): 31—33.
- [2] 闫海鹏, 吴玉厚, 宗宇鹏. CVD涂层刀具高速铣削大理石切削力研究[J]. 制造技术与机床, 2016(3): 24—28.
YAN Hai-peng, WU Yu-hou, ZONG Yu-peng. Research on Cutting Force of High Speed Milling Marble Using CVD Coating Tool[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2016(3): 24—28.
- [3] 张慧. 现代雕刻在室内装饰中的应用[J]. 家具与室内装饰, 2011(7): 32—33.
ZHANG Hui. The Application of Modern Carving in Interior Design[J]. Furniture and Interior Design, 2011(7): 32—33.
- [4] 吴玉厚, 赵德宏, 陆峰, 等. 异型石材制品加工技术与设备发展概述[J]. 石材, 2007(8): 30—33.
WU Yu-hou, ZHAO De-hong, LU Feng, et al. Outline of Development of Processing Technology and Equipment for Special-shaped Stone Products[J]. Stone, 2007(8): 30—33.
- [5] 赵德宏, 张珂, 吴玉厚. 异型石材多功能数控加工中心开发与分析[J]. 机械设计与制造, 2013(5): 156—160.
ZHAO De-hong, ZHANG Ke, WU Yu-hou. Special-shaped Stone CNC Machining Center Multi-functional Design and Analysis[J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(5): 156—160.
- [6] 宋昌才. PCD与PCBN刀具在精密与超精密加工中的应用[J]. 江苏理工大学学报(自然科学版), 2001, 22(4): 54—59.
SONG Chang-cai. The Application of PCD Cutters and PCBN Cutters in Precise and Ultra-Precise Machining[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology(Natural Science), 2001, 22(4): 54—59.
- [7] ZHAN Zhong-bo, LI Liang, HE Ning, et al. An Experimental Study on Grinding Parameters for Manufacturing PCD Micro-milling Tool[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73(9—12): 1799—1806.
- [8] 徐龙, 李嫚, 张弘弢, 等. 影响PCD刀具刃磨质量因素研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2009(2): 44—48.
XU Long, LI Man, ZHANG Hong-tao, et al. Study on Factors Influencing Grinding Quality of PCD Tools[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2009(2): 44—48.
- [9] 冯素玲, 徐九华, 刘鹏, 等. PCD刀具高速铣削TA15钛合金的切削性能[J]. 机械工程材料, 2011, 35(3): 44—48.
FENG Su-ling, XU Jiu-hua, LIU Peng, et al. Cutting Performance of PCD Tool during High Speed Milling of TA15 Titanium Alloy[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2011, 35(3): 44—48.
- [10] 尚自河, 左秀芝. PCD刀具磨损形式分析[J]. 工具技术, 2005, 39(2): 16—19.
SHANG Zi-he, ZUO Xiu-zhi. Analysis of Wearing Form of PCD Tool[J]. Tool Engineering, 2005, 39(2): 16—19.
- [11] LI An-hai, ZHAO Jun, WANG Dong, et al. Failure Mechanisms of A PCD Tool in High-speed Face Milling of Ti-6Al-4V Alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(9—12): 1959—1966.
- [12] 江兆周, 张弘弢, 李嫚, 等. PCD刀具后刀面刃磨质量对切削表面质量及刀具寿命影响的试验研究[J]. 工具技术, 2006, 40(7): 24—26.
JIANG Zhao-zhou, ZHANG Hong-tao, LI Man, et al. Experiment and Study on Influence of Flank Surface Quality of PCD Cutting Tool on Machined Surface Quality and Cutting Tool Life[J]. Tool Engineering, 2006, 40(7): 24—26.
- [13] 刘琨琢, 李勇, 寇自力. PCD刀具连续切削花岗岩的性能研究[J]. 工具技术, 2012, 46(9): 23—26.
LIU Kun-zhuo, LI Yong, KOU Zi-li. Study on Performances of PCD Cutting Tools in Continuous Cutting for Granite[J]. Tool Engineering, 2012, 46(9): 23—26.
- [14] 秦国华, 谢文斌, 王华敏. 基于神经网络与遗传算法的刀具磨损检测与控制[J]. 光学精密工程, 2015, 23(5): 1314—1321.
QIN Guo-hua, XIE Wen-bin, WANG Hua-min. Detection and Control for Tool Wear Based on Neural Network and Genetic Algorithm[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(5): 1314—1321.
- [15] 关山, 闫丽红, 彭昶. LS-SVM回归算法在刀具磨损量预测中的应用[J]. 中国机械工程, 2015, 26(2): 217—222.
GUAN Shan, YAN Li-hong, PENG Chang. Application of Regression Algorithm of LS-SVM in Tool Wear Prediction[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(2): 217—222.
- [16] 孙玉晶, 孙杰, 李剑峰. 钛合金铣削加工刀具磨损有限元预测分析[J]. 机械工程学报, 2016, 52(5): 193—201.
SUN Yu-jing, SUN Jie, LI Jian-feng. Finite Element Analysis on Prediction of Tool Wear in Milling Titanium[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(5): 193—201.