

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.05.016

聚醚醚酮材料铣削试验

李阳¹,程祥¹,段升富²,刘原勇¹,郑光明¹

(1. 山东理工大学机械工程学院, 山东淄博 255000; 2. 淄博市中心医院后勤供应部, 山东淄博 255000)

摘要: 针对具有强大潜力的人工骨替代材料聚醚醚酮(PEEK)的高效铣削加工,以铣削力为评价指标,进行了单因素及正交铣削试验研究。通过单因素铣削试验,分析了参数与铣削力之间的影响关系。然后,设计并展开正交试验,基于极差分析与方差分析的方法,确定了铣削参数对铣削力的影响主次与影响程度。试验结果表明,铣削力随着三个关键铣削参数的增加均呈现增大的趋势;三个关键铣削参数对铣削力影响程度由大到小依次是径向切深、轴向切深、每齿进给量。分析优化得到,当径向切深为0.5 mm,轴向切深为1.1 mm,每齿进给量为0.08 mm/z时,可以获得最小的铣削力。利用该最优参数组合,对试样进行了铣削加工,其加工质量达到了预期的效果。

关键词: 聚醚醚酮; 铣削力; 正交试验; 极差分析; 方差分析

中图分类号: TG547 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)05-0084-05

Experimental on Milling of PEEK Material

Li Yang¹, Cheng Xiang¹, Duan Shengfu², Liu Yuanyong¹, Zheng Guangming¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2. Department of Logistics Supply, Central Hospital of Zibo, Zibo 255000, China)

Abstract: The single factor and orthogonal milling tests were carried out for the high efficiency milling of polyether ether ketone (PEEK), an artificial bone replacement material with great potential. The relationship between parameters and milling force is analyzed by single factor milling test. Then, based on the method of range analysis and variance analysis, the influence of milling parameters on milling force is determined. The results show that the milling force increases with the increase of three key milling parameters. The influences of the three key milling parameters on the milling force are radial depth of cut, axial depth of cut, and feed per tooth. After analysis and optimization, when radial depth of cut is 0.5 mm, axial depth of cut is 1.1 mm, and feed per tooth is 0.08 mm/z, the minimum milling force can be obtained. Using the optimal parameter combination, the sample was milled, and the machining quality reached the expected effect.

Keywords: polyether ether ketone; milling force; orthogonal experiment; range analysis; variance analysis

现阶段我国人口老龄化现象越来越严重,同时由于交通事故与疾病等客观原因导致了身体骨骼的病变或缺失,对人工骨的需求量越来越大^[1]。部分学者通过仿生人工骨来替代人骨,在很大程度上解决了骨来源紧缺以及疾病传播的问题^[2]。制造人工骨的材料有很多种,其中特种工程塑料聚醚醚酮(PEEK)材料因具备优异的耐磨性、生物相容性、化学稳定性、抗冲击性能、抗疲劳性能等优点成为目前最有前景的人工骨基体材料,可以独立作为人工骨

替代材料来使用^[3-5]。

PEEK材料作为一种工程塑料,与金属的性质不同,力学性能也有很大区别,因此机械加工性就显然不一样,其切削加工有其自身的特点^[6]。杨锦华等^[7]针对工程塑料切削加工的特点,探讨了塑料切削加工形式及其对加工质量的影响,给出了各种塑料切削加工的合理工艺方法。康文利等^[8]分析了工程塑料的性能特点及其对切削加工性的影响,研究了切削参数对工件加工质量和刀具耐用度的影

基金项目: 淄博市校城融合发展计划项目(2017ZBXC189)

通讯作者: 李阳, 硕士, 研究方向为先进制造技术 E-mail: liyang0918@163.com

收稿日期: 2019-02-20

引用格式: 李阳,程祥,段升富,等. 聚醚醚酮材料铣削试验[J]. 工程塑料应用,2019,47(5):84-88.

Li Yang, Cheng Xiang, Duan Shengfu, et al. Experimental on milling of PEEK material[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(5):84-88.

响,提出了加工不同的工程塑料时合理选择切削参数的原则。吴红等^[9]用 TiB₂ 涂层硬质合金铣刀和金刚石涂层硬质合金铣刀分别对碳纤维增强塑性材料进行铣削加工试验,通过扫描电子显微镜、三维视频显微镜等研究了两种涂层刀具的磨损形态和磨损机理。王胜等^[10]对尼龙材料进行平面铣削加工试验,研究结果表面,在铣削尼龙的过程中,合理选取铣削深度、每齿进给量、主轴转速等工艺参数,能使尼龙产品的平滑度及平行度达到加工的高精度要求,实现尼龙的高速和高质量的铣削加工。吕福顺等^[11]利用 PEEK 材料进行了 3D 打印及铣削试验研究,利用试验所得到的最优打印参数和合理铣削参数,对人体脊椎骨模型进行 3D 打印及铣削加工,实现了 PEEK 材料人工骨的高质量加工。孟繁杰等^[12]对聚甲基丙烯酸甲酯材料进行了微细铣削试验研究,构建了微细铣削时表面粗糙度与铣削参数之间的回归模型,并通过试验进行了验证。王伟等^[13]采用 Deform 建立了碳纤维复合材料的本构模型和三维铣削加工的有限元模型,探究了径向切深对立式铣刀三个方向的铣削力、工件的表面加工质量、切削温度和切削分离的情况,解决了碳纤维复合材料的加工难题。

为了弥补针对 PEEK 材料铣削加工研究的不足,提高 PEEK 材料工件的加工质量,笔者以铣削力作为评价指标,基于单因素试验法和正交试验法,通过铣削试验研究了 PEEK 材料铣削过程中关键铣削参数对铣削力的影响规律以及影响主次,并获得铣削 PEEK 材料的最优参数组合。

1 实验部分

试验所用机床为 3D 打印与铣削复合机床,如图 1 所示。机床采用 MACH3 控制系统,既能实现精密的铣削加工,又可实现精密的 3D 打印^[14]。

采用直径为 5 mm 的四刃硬质合金立铣刀,

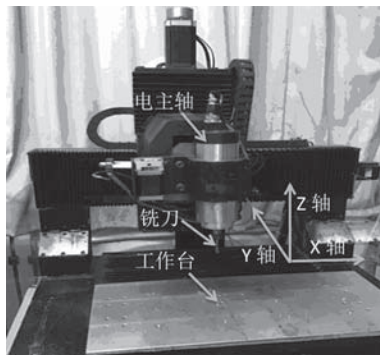


图 1 3D 打印与铣削复合机床

具体参数如表 1 所示。所用工件为长 50 mm、宽 30 mm、高 20 mm 的块状 PEEK 材料,工件材料的物理及力学属性如表 2 所示。

表 1 铣刀相关参数

材料	直径/mm	涂层	螺旋角/(°)	刃数/刃	硬度 HRC
钨钢	5	TiAlN	35	4	45~50

表 2 PEEK 材料物理及力学属性

弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)	热膨胀系数/K ⁻¹	热导率/[W·(m·K) ⁻¹]	比热容/[J·(kg·K) ⁻¹]
3900	0.4	1310	5×10 ⁻⁵	0.24	1850

使用由 Kistler 测力仪组成的铣削力测量系统对铣削过程产生的铣削力进行测量并记录,测力仪硬件部分包括 9257B 压电原理测力计、1687B5 信号输出电缆、5070A10100 四通道电荷放大器、1500Axx-CN 信号输出电缆和 DEWE43A 数据采集系统,如图 2 所示。软件部分由 DEWESOFT 软件组成,进行铣削力的实时测量、记录与后处理分析。

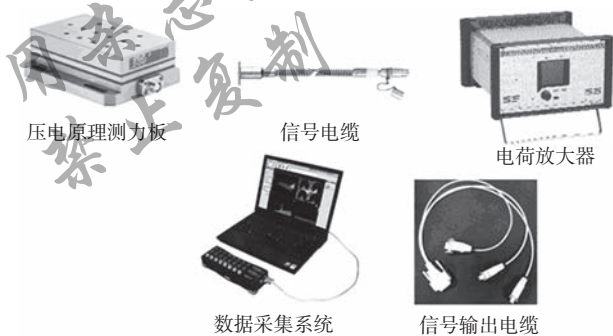


图 2 测力仪硬件部分组成

2 单因素试验

2.1 试验设计

由于 PEEK 材料属于典型的塑形材料,切削力会引起较大的弹塑性变形,因此,试验指标为铣削加工过程中产生的铣削力,选取的关键铣削因素为径向切深 (a_e)、轴向切深 (a_p) 和每齿进给量 (f_z)。首先采用单因素试验法,获取适合铣削的三个因素的参数范围,然后为每个因素选取四个水平值进行正交试验设计,通过正交试验的结果,识别出各因素参数对铣削力的影响程度及显著性,进而优化 PEEK 材料铣削的参数组合^[15]。

单因素试验分成三组进行,每组试验在一个工件上完成。每个铣削试验进行之前在工件的上表面预铣削一个沟槽,沟槽的宽度为 5 mm,深度为对应试验的轴向切深,因此,每次试验可由铣刀一次往复进给铣削完成,如图 3 所示。三组单因素试验选择的铣削参数如表 3 所示。

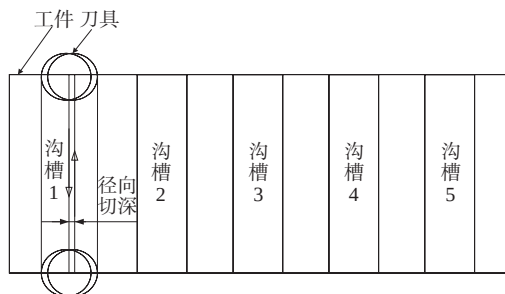


图3 铣刀走刀路线

表3 单因素试验铣削参数

组数	不变因素 1	不变因素 2	可变因素
1	$a_p=0.4$ mm	$f_z=0.05$ mm/z	$a_e=0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5$ mm
2	$a_e=0.4$ mm	$f_z=0.05$ mm/z	$a_p=0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5$ mm
3	$a_e=0.4$ mm	$a_p=0.4$ mm	$f_z=0.04, 0.07, 0.10, 0.13, 0.16$ mm/z

2.2 试验结果及分析

单因素试验结束后,将试验中铣削力的数据导出,进行数据处理,求出三个方向铣削力的合力,三组试验中,铣削力与铣削参数的关系分别如图4、图5、图6所示。

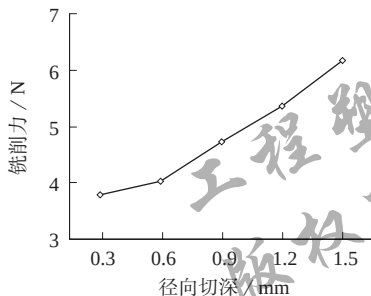


图4 铣削力与径向切深的关系

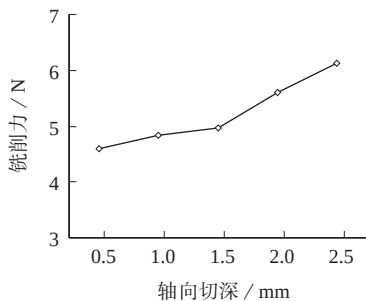


图5 铣削力与轴向切深的关系

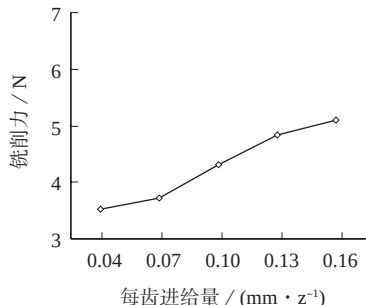


图6 铣削力与每齿进给量的关系

从图4可以看出,随着径向切深的增大,铣削力不断增大。当径向切深从0.3 mm增大到0.6 mm时,铣削力增量较小;当径向切深从0.6 mm增大到1.5 mm时,铣削力增量较大。因此,正交试验中径向切深在0.6 mm附近取值。

从图5可以看出,随着轴向切深的增大,铣削力不断增大。当轴向切深从0.5 mm增大到1.5 mm时,铣削力增量较小;当轴向切深从1.5 mm增大到2.5 mm时,铣削力增量较大。因此,正交试验中轴向切深在1.5 mm附近取值。

从图6可以看出,随着每齿进给量的不断增大,铣削力不断增大。当每齿进给量从0.04 mm/z增大到0.07 mm/z时,铣削力增量较小;当每齿进给量从0.07 mm/z增大到0.16 mm/z时,铣削力增量较大。因此,正交试验中每齿进给量在0.07 mm/z附近取值。

单因素试验中,切削力随着三个关键铣削参数的增加,均呈现整体上升的趋势。随着铣削参数的增大,刀具切削厚度或深度不断增大,使得单位时间内刀具切除材料的体积增大,导致变形抗力增大,因此铣削力增大^[16]。具体分析三组单因素试验结果的趋势图,发现随着参数的增大,铣削力的增长趋势都是由缓到急。这说明铣削PEEK材料时,在一定范围内增大铣削参数,既不会导致铣削力的急剧增长而影响加工质量,还能提高加工效率。

3 正交优化试验

3.1 正交试验设计及结果

基于单因素试验的结果,现选取如表4所示的因素及水平进行正交试验。

表4 正交试验因素及水平

试验水平	a_e / mm	a_p / mm	f_z / (mm · z ⁻¹)
1	0.5	1.1	0.06
2	0.6	1.3	0.07
3	0.7	1.5	0.08
4	0.8	1.7	0.09

试验选用 $L_{16}(4^5)$ 正交表来设计正交试验,具体方案如表5所示。

正交试验分成4组进行,每组试验在一个工件上完成。每个铣削试验进行之前在工件的上表面预铣一个沟槽,沟槽的宽度为5 mm,深度为对应试验的轴向切深,因此每个试验可由铣刀一次往复进给铣削完成,如图7所示。正交试验结束后,将试验中铣削力的数据导出,进行数据处理,求出三个方向铣削力的合力,结果见表5。

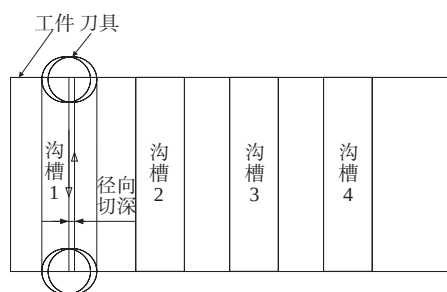


图7 铣刀走刀路线

表5 正交试验表及结果

试验编号	a_e/mm	a_p/mm	$f_z/(\text{mm} \cdot \text{z}^{-1})$	铣削力 / N
1	0.5	1.1	0.06	5.315
2	0.5	1.3	0.07	6.986
3	0.5	1.5	0.08	6.541
4	0.5	1.7	0.09	7.268
5	0.6	1.1	0.07	5.807
6	0.6	1.3	0.06	7.877
7	0.6	1.5	0.09	8.365
8	0.6	1.7	0.08	8.809
9	0.7	1.1	0.08	6.344
10	0.7	1.3	0.09	9.508
11	0.7	1.5	0.06	9.208
12	0.7	1.7	0.07	9.507
13	0.8	1.1	0.09	8.563
14	0.8	1.3	0.08	9.819
15	0.8	1.5	0.07	9.897
16	0.8	1.7	0.06	10.064

3.2 极差分析

对表5中的试验数据铣削力值进行极差分析,分析结果如表6所示。根据极差值 R 的大小,可以判断出各因素对试验指标的影响因素主次。由表6中的极差值比较可得径向切深(3.058)>轴向切深(2.405)>每齿进给量(0.548),所以试验中对铣削力影响最大的因素是径向切深,其次是轴向切深,影响最小的因素是每齿进给量。以各因素水平为横坐标,铣削力的平均值 k_i 为纵坐标,绘制各因素与铣削力的趋势图,如图8所示。

表6 试验数据的极差分析

项目	a_e	a_p	f_z
K_1	26.110	26.029	32.464
K_2	30.858	34.190	32.197
K_3	34.567	34.011	31.513
K_4	38.343	35.648	33.704
k_1	6.528	6.507	8.116
k_2	7.715	8.548	8.049
k_3	8.642	8.503	7.878
k_4	9.586	8.912	8.426
R	3.058	2.405	0.548

注: K_i 为因素所在列第 i 水平对应的铣削力之和; k_i 为因素所在列第 i 水平对应的铣削力的平均值; R 为各列因素所对应的极差值。

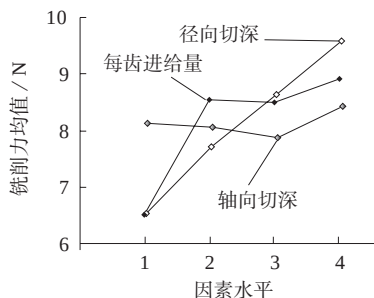


图8 不同因素水平下的铣削力均值

由图8可以看出,随着径向切深的增大,铣削力呈现出不断增大的趋势,变化趋势非常明显;随着轴向切深的增大,铣削力先急剧增大,随后出现了微小下降,最后呈现出增大的趋势,整体上变化趋势明显;随着每齿进给量的增大,铣削力呈现出先减小后增大的趋势,但整体上变化趋势不是很明显。

3.3 方差分析

将表5中的试验数据铣削力值进行方差分析,结果如表7所示。

表7 试验数据的方差分析

差异源	离差平方和	自由度	平均离差平方和	F 值	临界值	显著性
a_e	20.48	3	6.83	34.15	$F_{0.01}(3,6)=9.78$	非常显著
a_p	14.23	3	4.74	23.70	$F_{0.01}(3,6)=9.78$	非常显著
f_z	0.63	3	0.21	1.05	$F_{0.10}(3,6)=3.29$	不显著
误差	1.18	6	0.20			
总和	36.52	15				

从表7可以得出,径向切深和轴向切深对试验结果有非常显著的影响,每齿进给量对试验结果没有显著影响。方差分析的结果与极差分析结果相符,表明了正交优化试验的可靠性。

3.4 优化试验

试验的指标为铣削力,铣削力越小,工件加工质量越高。通过极差分析结果以及图8的趋势图可以得出,在试验工艺系统条件下,获得的最优参数组合为:径向切深0.5 mm,轴向切深1.1 mm,每齿进给量0.08 mm/z。利用获得的最优参数组合,对类下颌骨试样进行铣削加工,如图9所示。由图9可



图9 铣削出的试样

见,产品无明显毛刺,在加工表面多处多次测量表面粗糙度,结果表明,各处的表面粗糙度稳定达到 $Ra1.16 \mu m$,满足人工骨的使用要求。

4 结语

以铣削力为试验指标,针对 PEEK 材料进行了铣削试验研究。通过单因素试验发现:随着三个铣削关键参数的增大,铣削力均呈现出不断增大的趋势;一定参数范围内,选择较大的铣削参数不会造成铣削力的急剧增长。通过正交试验发现:各因素对铣削力的影响程度由大到小依次是径向切深、轴向切深、每齿进给量;径向切深和轴向切深对试验结果有非常显著的影响,每齿进给量对试验结果没有显著的影响。试验结果表明,在实际加工中,可以选取相对较大的每齿进给量,从而提高加工的效率,同时保证加工质量。研究结果为 PEEK 材料的实际铣削加工提供了合理的参数选择指导。

参考文献

- [1] 刘徽,杨先海,程祥,等.人工骨 3D 打印与铣削复合加工研究[J].制造技术与机床,2018(4):22-28.
Liu Hui, Yang Xianhai, Cheng Xiang, et al. Study on combined machining of artificial bone by 3D printing and milling[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2018(4):22-28.
- [2] 高丽花.温度波动下骨骼创伤修复中的聚醚醚酮(PEEK)仿生人工骨 3D 打印技术[J].科技通报,2017,33(2):125-128.
Gao Lihua. 3D printing technology of bionics artificial bone with PEEK in temperature fluctuating bone wound remediation[J]. Bulletin of Science and Technology, 2017, 33(2):125-128.
- [3] 张钰.聚醚醚酮仿生人工骨 3D 打印热力学仿真及试验研究[D].长春:吉林大学,2014.
Zhang Yu. Thermodynamic simulation and experiment of 3D printing of bionic artificial bone with polyetheretherketone (PEEK) [D]. Changchun:Jilin University, 2014.
- [4] 宗倩颖,叶霖,张爱英,等.聚醚醚酮及其复合材料在生物医用领域的应用[J].合成树脂及塑料,2016,33(3):93-96.
Zong Qianying, Ye Lin, Zhang Aiyang, et al. Applications of polyether ether ketone and its composites in biomedical field[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2016, 33(3):93-96.
- [5] 崔小明.特种工程塑料聚醚醚酮的开发与应用[J].工程塑料应用,2004,32(10):63-66.
Cui Xiaoming. Development and application of special engineering plastic polyetheretherketone[J]. Engineering Plastics Application, 2004, 32(10):63-66.
- [6] 王强.酚醛玻璃纤维层压塑料的铣削加工[J].工具技术,2005,39(7):100.
Wang Qiang. Milling of phenolic glass fiber laminated plastics [J]. Tool Engineering, 2005, 39(7):100.
- [7] 杨锦华,何扬清.工程塑料的切削加工工艺[J].工程塑料应用,2001,29(1):20-22.
Yang Jinhua, He Yangqing. Cutting and processing technology of engineering plastics[J]. Engineering Plastics Application, 2001, 29(1):20-22.
- [8] 康文利,范孝良.工程塑料的切削性能研究[J].工具技术,2003,37(10):28-30.
Kang Wenli, Fan Xiaoliang. Research on machinability of engineering plastics[J]. Tool Engineering, 2003, 37(10):28-30.
- [9] 吴红,陈燕,韩胜超.两种铣刀在切削碳纤维增强塑料时的磨损机理[J].机械工程材料,2014,38(12):29-32.
Wu Hong, Chen Yan, Han Shengchao. Wear mechanism of two milling cutters in cutting carbon fiber reinforced plastics [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2014, 38(12):29-32.
- [10] 王胜,吴秀峰,巫少龙.硬质合金铣刀加工塑料尼龙时工件表面质量的影响与优化[J].工具技术,2017(2):67-70.
Wang Sheng, Wu Xiufeng, Wu Shaolong. Effect and optimization to workpiece surface when using carbide cutter machining plastic nylon material[J]. Tool Engineering, 2017(2):67-70.
- [11] 吕福顺,程祥,刘肖肖,等. PEEK 的 3D 打印参数优化及铣削试验研究[J].组合机床与自动化加工技术,2018(3):38-41.
Lyu Fushun, Cheng Xiang, Liu Xiaoxiao, et al. Parameter optimization of 3D printing and milling experiment study for PEEK[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2018(3):38-41.
- [12] 孟繁杰,程祥,李元镇,等. PMMA 微细铣削试验工艺研究[J].机械设计与制造,2017(2):101-104.
Meng Fanjie, Cheng Xiang, Li Yuanzhen, et al. Experimental analysis of PMMA micromilling[J]. Machinery Design & Manufacture, 2017(2):101-104.
- [13] 王伟,王霄,袁豹,等.基于 Deform 的碳纤维复合材料铣削过程有限元分析[J].机械设计与制造工程,2017,46(12):7-12.
Wang Wei, Wang Xiao, Yuan Bao, et al. The finite element analysis on carbon fiber reinforced plastics milling process based on deform[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2017, 46(12):7-12.
- [14] 刘肖肖,吕福顺,刘原勇,等.一种增材与减材复合制造机研究[J].制造技术与机床,2017(6):49-52.
Liu Xiaoxiao, Lyu Fushun, Liu Yuanyong, et al. Research on a composite machine for increasing material and reducing material [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2017(6):49-52.
- [15] 李元镇,程祥,孟繁杰,等. PMMA 微细铣削参数优化试验研究[J].制造技术与机床,2016(2):21-26.
Li Yuanzhen, Cheng Xiang, Meng Fanjie, et al. An experimental study on micro-milling parameters optimization of PMMA[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2016(2):21-26.
- [16] 于英钊,高军,郑光明,等.高速干铣削高强度钢铣削力及表面粗糙度研究[J].组合机床与自动化加工技术,2018,12(12):21-24.
Yu Yingzhao, Gao Jun, Zheng Guangming, et al. Milling forces and surface roughness in high-speed dry milling of high-strength steel[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2018, 12(12):21-24.