



基于切削过程的“机械制造技术基础” 综合实验

裴宏杰, 沈春根, 樊曙天, 戴亚春, 黄娟

(江苏大学机械工程学院, 镇江 212013)

摘要: 针对当前“机械制造技术基础”切削力和刀具标注角度实验的单一化、碎片化问题, 提出了基于切削过程的综合实验。以机床、刀具、机械加工工艺学及金属切削原理等理论内容为基础, 以切削过程为纽带, 将刀具角度顺延到工作角度、融入绿色先进加工技术、正交试验方法的选择、多评价指标的考量以及融合切削机理的结果分析, 对学生的综合分析问题、解决问题、知行合一的能力得到培养和提高, 初步形成科学、合理、完整的教学体系。

关键词: 机械制造技术基础; 切削过程; 综合实验; 教改

中图分类号: TP75

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20190180

Comprehensive Experiment of “Machinery Manufacturing Technology Foundation” Based on Cutting Process

PEI Hongjie, SHEN Chungen, FAN Shutian, DAI Yachun, HUANG Juan

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: This article explores a comprehensive experiment based on the cutting process to address the issue of simple and fragmented experiments of the cutting force and tool marking angle in the current “Machinery Manufacturing Technology Foundation” course. With the cutting process as a link, and based on theories of machine tools, tools, machining technology and metal cutting principle, a series of improvements have been made to the experimental content, such as the perspective extended to the working perspective, the introduction of green advanced machining technology, the choice of orthogonal test methods, the consideration of multiple evaluation indicators, and the analysis of the results by the fusion cutting mechanism. This course adjustment has proven effective in fostering and improving students' capability to make comprehensive analysis, solve problems, and apply theories to practice. A scientific, reasonable and comprehensive teaching system was initially formed.

Key words: machinery manufacturing technology foundation; machining process; comprehensive experiment; educational reform

“机械设计制造及其自动化”专业的主要目标是培养适应社会发展需要, 具备较扎实的自然科学基础和宽厚的机械专业知识, 具有较强的实践能力、创新意识、国际视野、团队合作精神和良好的沟通能力, 能在机械工程领域从事机械产品研发、设计、制造、项目管理等工作的复合型工程技术人才。实践是检验真理的唯一标准, 学生的实践能力是培养的最终落脚点, 因此在机械工程类本科实验课程方面, 尤其是核心专业基础

课程——机械制造技术基础, 很多高等院校进行了改革与创新^[1-4]。

随着全球范围内掀起的新工业革命浪潮, 引发了经济模式和产业结构的革命性变化, 工科人才需求的素质结构也将随之产生很大变革, 催生了“新工科”和“双一流”建设^[5-6]的迫切需求。在新的时代背景下, 如何贯彻创新型、综合化、全周期工程教育的“新理念”^[7], 本文对机械制造技术基础课内实验教学改革进行了初步探索, 以

收稿日期: 2019-05-20; 修回日期: 2019-09-09

基金项目: 江苏大学高等教育教改研究课题资助项目(2017JGYB013); 教育部产学研合作协同育人项目(201802040083)。

作者简介: 裴宏杰(1972-), 男, 硕士, 副教授, 主要从事智能制造和精密加工方面的研究。

期对培养创新性人才起到作用。

1 原实验教学的问题

江苏大学的机械制造技术基础课内实验学时为10学时,属于机械制造技术类实验模块,包括刀具几何角度测量、切削力测量和分析、专用夹具、计算机辅助误差测量分析和机床主轴回转精度测试5项实验^[8]。

其中刀具几何角度测量实验采用回转工作台式量角台对直头外圆车刀分别测量主偏角 κ_r 、副偏角 κ'_r 、前角 γ_o 、后角 α_o 、刃倾角 λ_s 和副后角 α'_o ,然后利用公式计算出刀尖角 ε_r 、楔角 β_o 和法前角 γ_n 。

切削力测量和分析实验采用Kistler9293A三向压电晶体测力仪,在铣床XK0816上面使用三刃立铣刀铣削铸铝LY104,进行单因素实验。仅考察切削速度 v (4水平)和进给量 f (4水平)对主切削力的影响,进行线性回归并推导出经验公式。

机械制造技术类实验所开设的课内实验以教材涉及的理论知识和基本要求来单独配置,基本属于单一性验证实验,没有将机械制造技术基础课程的主要内容如刀具、切削原理、加工质量、制造工艺和先进制造技术很好的贯通^[9],对学生的综合分析问题、解决问题、知行合一的能力很难有直接性启发,不利于培养学生的创造性思维。

2 实验教学改革的目

切削过程是一个输入输出过程,输入参数为机床、刀具(刀具材料、几何角度)、夹具、工件、切削液(切削液种类、流量、流速、喷射方位等)和切削用量(切削速度、进给量和背吃刀量)等;输出结果为切屑和工件(尺寸、形状、位置、表面粗糙度、波纹度、加工硬化、残余应力和金相组织等)。在切削加工过程中,产生了切削力、切削温度、振动等现象,所以切削力、切削温度、振动等过程参数、输入参数和输出结果之间,是有必然联系的,是紧密相关的。通过这些过程参数变化可以深入地揭示输入参数如何影响输出结果的。

作为技术人员必须通晓输入—过程—输出三者之间的关系,深刻理解其相互作用和影响的加工机理,才能设计出有效、合理的制造工艺,进而高效率、低成本地制造出高质量产品。因此机械制造技术基础实验改革后培养目标是:以机

床、夹具、机械加工工艺学及金属切削原理的理论知识为基础,以切削过程为纽带,通过综合性实验,将知识和实践紧密串联,培养学生掌握学科知识,提高学生的综合实验能力,解决现代企业中的综合性工程技术问题。通过该实验可提高学生分析解决综合性工程技术问题的能力,在今后工作中能快速适应新技术环境的要求。

3 实验教学改革方案

3.1 刀具工作角度的顺延

刀具的几何角度分为标注角度和工作角度。标注角度是以理想的基面、切削平面和正交平面为参考坐标系所确定的角度,忽略了进给运动速度和假定刀具安装正确等,是刀具设计、制造和测量采用的角度;刀具的工作角度以切削过程中实际的基面、切削平面和正交平面为参考系所确定的刀具角度,又称实际角度^[9-11],实际角度需要考虑横向进给运动、轴向进给运动、刀杆中心线偏斜和刀具安装高低等因素。

在实际切削加工中,刀具工作角度会发生变化。为了增加学生的感性认识,在原实验测量车刀标注角度的基础上,增加刀具工作角度的实验部分。同时为了便于对比分析,此实验部分仅考虑刀具安装高低对工作角度的影响。

在车削加工中,一般要求刀尖和主轴回转中心等高。而在实际加工中,刀具安装位置与理想位置总归有误差,使得几何角度发生变化,进而影响切削过程。

实验方案a,如图1(a)所示,刀具偏高安装;实验方案b,如图1(b)所示,刀具等高安装,刀尖与主轴回转中心等高。刀尖高于主轴回转中心1.5 mm,车端面时工件中心会留下直径3 mm的凸台,如图1(c)所示。

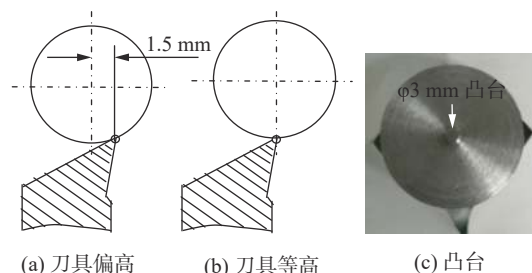


图1 刀具安装位置与工件

刀具安装偏高以后,使得参考坐标系的基面和切削平面方向发生变化,引起工作前角增大,

工作后角减小。工作前角和后角的变化可以通过作图法得到,如图 2 所示^[9],其变化如式(1)~式(3)所示:

$$\gamma_{oe} = \gamma_o \pm \theta \quad (1)$$

$$\alpha_{oe} = \alpha_o \pm \theta \quad (2)$$

$$\tan \theta = \frac{h}{\sqrt{(d_w/2)^2 - h^2}} \cos k_r \quad (3)$$

式中, γ_{oe} 为工作前角, α_{oe} 为工作后角, γ_o 为标注前角, α_o 为标注后角, k_r 为主偏角, h 为偏心高度, d_w 为工件直径, θ 为坐标系偏转角度。

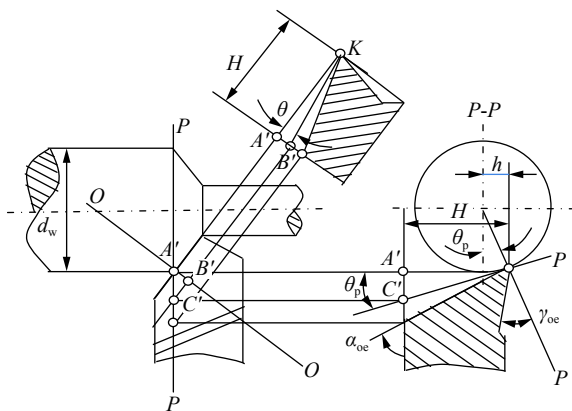


图 2 刀具安装高低对工作角度的影响

将工件直径 d_w , 偏心高度 h 及测量的刀具标注角度 γ_o 、 α_o 和 k_r 分别带入式(1)~式(3), 可分别求得 θ 、刀具工作前角 γ_{oe} 和刀具工作后角 α_{oe} 。

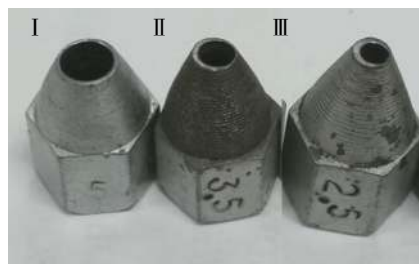
通过此项内容, 把对刀具标注角度测量, 延伸到工作角度,

3.2 绿色先进加工技术的融入

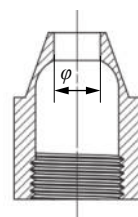
为了增加学生的前沿视野, 同时将可持续发展和环境保护的理念注入意识当中, 在实验中融入了最新的先进绿色加工技术。在传统金属机械加工过程中, 切削液起到冷却、润滑、清洗和防锈等作用。但是, 切削液的大量使用却增加了制造成本, 既破坏生态环境, 又伤害人体健康。基于制造业可持续发展和机械加工绿色化的需要, 提出了“少”“无”切削液绿色加工技术, 如干切削^[12]、微量润滑(minimum quantity lubrication, MQL)^[13]加工技术。MQL 技术在不降低加工质量基础上, 显著减小传统切削液用量, 应用范围日益宽广。

根据相关研究, 在不改变机床机构基础上, 设计了 3 种喷嘴(I、II、III), 实现了不同的切削液用量, 如图 3 所示。I、II、III 喷嘴对应出

口直径 ϕ 分别为 5, 3.5, 2.5 mm。实验设计为变流量, 射流速度为 300 m/min, I、II、III 喷嘴对应的切削液流量分别为 5.9 L/min、2.9 L/min、1.47 L/min。



(a) 外形



(b) 剖面图

图 3 3 种直径喷嘴

第四种供液方式, 采用美国生产的 Accu-Lube 喷雾系统进行微量润滑, 使用可生物降解的植物油, 油量 13 mL/h, 喷嘴位置在主后刀面, 靶距为 20 mm, 如图 4 所示。

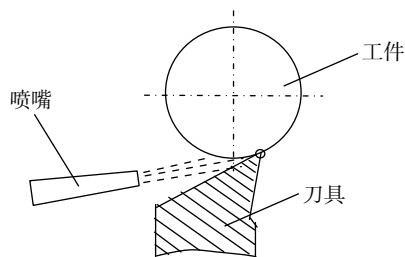


图 4 MQL 供液示意图

3.3 正交试验方法的选择

优化实验设计方法是自然科学研究方法论领域中的一个分支学科, 主要应用于提高实验效率、优化产品设计、改进工艺技术、强化质量管理等方面, 是当代科学技术人员必须掌握的技术方法^[14]。考虑到学生就业后作为技术人员, 面对产品设计或者制造工艺的问题, 都不可避免地会碰到优化设计, 因此加入此训练内容。

优化实验设计方法很多, 诸如正交试验法、回归分析法、均匀设计法、因子设计法、响应曲面法等。正交实验法是利用数理统计学与正交性原理进行合理安排实验的一种科学方法, 均衡抽样, 能够通过较少的实验次数, 可以得到因子的

影响规律及最优的方案。另外正交实验结果重复性好,适用面宽,可靠性高,配置容易,分析简便等优点,因此选择多因素的正交实验方法。

首先选择切削用量,即切削速度、进给量和背吃刀量,这是机械加工工艺中最灵活而且是最重要的因素。实验目的是为了让学生深刻理解切削机理,因此切削用量水平的确定,让学生翻阅工艺手册,经老师的确认,确定出相应的参数水平。

另外,基于绿色先进切削技术和刀具安装高度,增加冷却方式和工作角度这两个因素。相应的水平实例如表1所示,正交实验实例如表2所示, $L_{16}(4^4 \times 2^1)$, 16次实验,4个四水平的因素和一个两水平的因素,属于混合正交表,表中A为切削速度 $v(\text{m/min})$, B为进给量 $f(\text{mm/r})$, C为背吃刀量 $a_p(\text{mm})$, D为冷却液流量 $Q(\text{L/min})$, E为刀具工作角度($^\circ$)。

表1 机械制造技术基础切削实验因素-水平实例表

因素水平	A	B	C	D	E
1	150	0.02	0.05	5.9	$\gamma_o 8^\circ, \alpha_o 7^\circ$
2	250	0.03	0.1	2.9	$\gamma_{oe} 8.64^\circ, \alpha_{oe} 6.3^\circ$
3	350	0.04	0.15	1.47	
4	450	0.05	0.2	13 mL/h(MQL)	

表2 机械制造技术基础正交切削实验实例表

序号	A	B	C	D	E	F_x/N	F_z/N	F_y/N	$T/^\circ\text{C}$	$R_a/\mu\text{m}$	ξ
1	1	1	1	1	1	15.5	30.6	20.7	105.5	0.468	4.92
2	1	2	2	2	1	36.7	38.4	22.6	110.6	0.613	1.84
3	1	3	3	3	2	37.5	57.6	34.0	115.7	0.647	2.28
4	1	4	4	4	2	50.2	70.0	38.8	125.6	0.702	2.25
5	2	1	2	3	2	33.6	35.6	32.8	120.8	0.428	2.38
6	2	2	1	4	2	28.7	30.6	30.7	115.5	0.538	1.90
7	2	3	4	1	1	42.7	65.3	45.0	128.3	0.571	3.67
8	2	4	3	2	1	36.7	55.7	40.0	135.5	0.561	1.90
9	3	1	3	4	1	28.7	35.1	21.1	138.8	0.568	1.84
10	3	2	4	3	1	51.8	70.2	41.9	133.4	0.476	2.59
11	3	3	1	2	2	20.4	21.9	21.8	136.3	0.621	2.07
12	3	4	2	1	2	50.2	65.8	39.8	125.5	0.806	2.76
13	4	1	4	2	2	26.4	36.9	33.7	168.1	0.435	2.35
14	4	2	3	1	2	34.5	55.0	42.8	174.3	0.568	1.76
15	4	3	2	4	1	26.3	41.7	28.2	153.6	0.305	2.28
16	4	4	1	3	1	27.6	30.0	23.7	167.4	0.613	1.66

采用 SPSS、Minitab 等软件进行正交实验设计,并进行极差分析。

3.4 多评价指标的考量

为了培养学生分析问题及解决问题的能力,避免知其然而不知其所以然的现象。在选择评价指标时,一方面要考虑生产目的是为了获得高质量的产品;另一方面也要考虑高质量产品是如何获得的。因此把最常用的加工质量参数(表面粗糙度)、切削过程参数(切削力和切削温度)以及反应切削实质的切屑变形系数作为评价指标。

3.4.1 切削力

刀具切入金属引起金属材料发生变形所受到的抗力叫作切削力。切削力一方面源于切削过程中弹塑性变形产生的抗力;另一方面来源于克服摩擦所产生的抗力。切削力常作为衡量加工效果好坏的评价指标,可以在同等条件下进行参数对比,同时也是机床、夹具和刀具设计的基本依据。因此确定切削力为切削实验的一个评价指标。

切削力测量方法主要有应变式、压电式、光纤光栅式、电容式、电流式等方法。压电式传感器具有良好的静态和动态特性,频率响应与瞬态

响应良好,工作频带宽,动态测量误差小,分辨率高,灵敏度高,受力变形小,体积小,主要适用于灵敏度和刚度要求较高的动态测试。采用瑞士奇士乐公司的 Kistler9293A 三向动态压电式测力仪以及 Dewe6.3 数据采集与处理系统。国内大连理工大学的压电测力仪及北方工业大学的应变式测力仪,性价比高。

通常将切削力正交分解成 3 个力,分别为主切削力 F_z 、进给力 F_x 和背向力 F_y 。测力仪同时测量出 3 个分力。由于实验因素对 3 个切削分力的影响规律不同,为了便于学生理解其切削机理,将 3 个分力的均方根值作为具体的评价指标。

3.4.2 切削温度

金属在切削过程中,切削热的产生主要来源于刀具/金属材料之间剧烈摩擦以及金属材料变形产生的热量。切削温度会影响刀具耐用度及工件表面质量等。当前没有切削温度测量实验,考虑到切削热对切削过程的影响较大,确定切削温度为切削过程的一个评价指标。

根据所用传感器的不同,切削温度测量方法主要有热电偶法、红外测温法、红外热像仪、增强 CCD 相机法等方法。

热电偶法属于接触式测温,结构比较简单,测量精度较高。但因测温仪器与被测介质需要进行充分的热交换,所以存在测温的延迟现象。该方法包括自然热电偶法、人工热电偶法和半人工热电偶法。其中自然热电偶法,使用刀具和工件作为热电极,但只能测出切削区域的平均温度,无法测得切削区域指定点的温度,也不能捕捉瞬态温度分布;人工和半人工热电偶法,均可测量加工刀具以及工件上任意点的温度,可动态测量,也可以获得加工对象指定区域的温度场分布,但需要对工件或者刀具打微小孔,其中人工热电偶将两根不同材料的热电偶丝埋入孔中,半人工热电偶法采用单根导线连接。对于自然热电偶和半人工热电偶,当刀具和工件材料变化后,切削温度-毫伏值曲线需重新标定,人工热电偶只需标定一次。

红外热像仪测温法属于非接触式测量,可以测量切削区域温度场,测量直观、简便,可远距离非接触监测等优点,文中实验采用红外测温法测量切削温度。

测试仪器为德国生产的 Optris PI 在线红外热

像仪,温度测量范围为 $-20\sim 900^{\circ}\text{C}$,以温度场中的最高温度为监测温度值。国内 FOTRIC 公司也有相应的在线热像仪,以及优利德、海康威视等的手持式热像仪。

3.4.3 表面粗糙度

表面粗糙度是指加工表面的微观不平度,是评价工件已加工表面质量的最主要参数之一,是反映零件表面上微观几何形状误差的一个重要指标。表面粗糙度对于机械零件的耐磨性、耐蚀性、抗疲劳特性及密封性等具有很大影响。粗糙度根据维度又可以分为二维表面粗糙度和三维表面粗糙度,其中二维表面粗糙度评价指标包括轮廓算术平均偏差 R_a 、微观不平度十点高度 R_z 、轮廓最大高度 R_y 。在目前实际生产图纸中,零件都会有表面粗糙度要求,并且一般采用 R_a ,因此实验采用轮廓算术平均偏差 R_a 作为评价指标。

表面粗糙度测量采用日本三丰公司生产的 MITUTOYO SJ201 粗糙度仪,分别测量 5 段的 R_a 值,计算出平均值作为表面粗糙度。国内吉泰科仪检测设备有限公司也有对应的 TR200 分体式粗糙度仪。

3.4.4 切屑变形系数

切屑变形系数是切削加工过程中金属变形程度的量度,反映了切削力、切削温度、刀具磨损以及已加工表面质量等物理现象的本质^[10]。因此选择变形系数作为一个评价指标。切屑变形系数为切屑厚度 a_{ch} 与切削层厚度 a_c 之比:

$$\xi = a_{ch}/a_c \quad (4)$$

在车削加工中,切削层厚度 a_c 如图 5 所示,其大小为:

$$a_c = f \sin k_r \quad (5)$$

式中, f 为进给量, k_r 为主偏角。

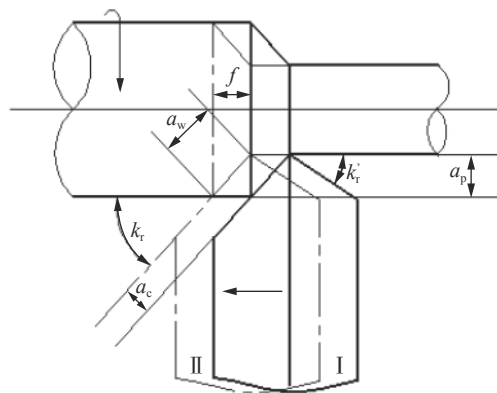


图 5 切削层参数

切屑厚度测量采用日本三丰公司生产的 MITUTOYO 0~25 mm 的数显千分尺, 分别对切屑测量 5 个点, 计算出平均值作为切屑厚度值, 然后计算得出切屑变形系数, 以揭示切削过程相关的机理作用。

切屑变形是一个非常复杂的非线性问题。可以采用有限元方法, 从虚拟原理出发, 使用应力与其共轭应变得到非线性方程组, 采用增量法求解, 对切屑变形进行仿真分析。

3.5 融合切削机理的结果分析

要求学生利用 SPSS、Minitab 等软件计算出

极差值, 并绘出影响各指标的主效应图, 如图 6 所示。加工目的是获得满足质量的产品, 因此选择表面粗糙度为根本目标, 结合切削机理, 将切削力、切削温度和切屑变形等参数用来深刻揭示切削用量、切削液用量和刀具角度对表面粗糙度影响的本質, 从而让学生能够贯穿从现象到机理, 从输入到输出, 从理解到掌握, 从知识到实践的全过程, 真正提高其解决切削加工工艺问题的能力。

根据主效应图 6(e), 可得到各因素对表面粗糙度的影响程度, 从大到小依次为——进给量、切削速度、切削液用量、刀具安装高度和背吃刀量。

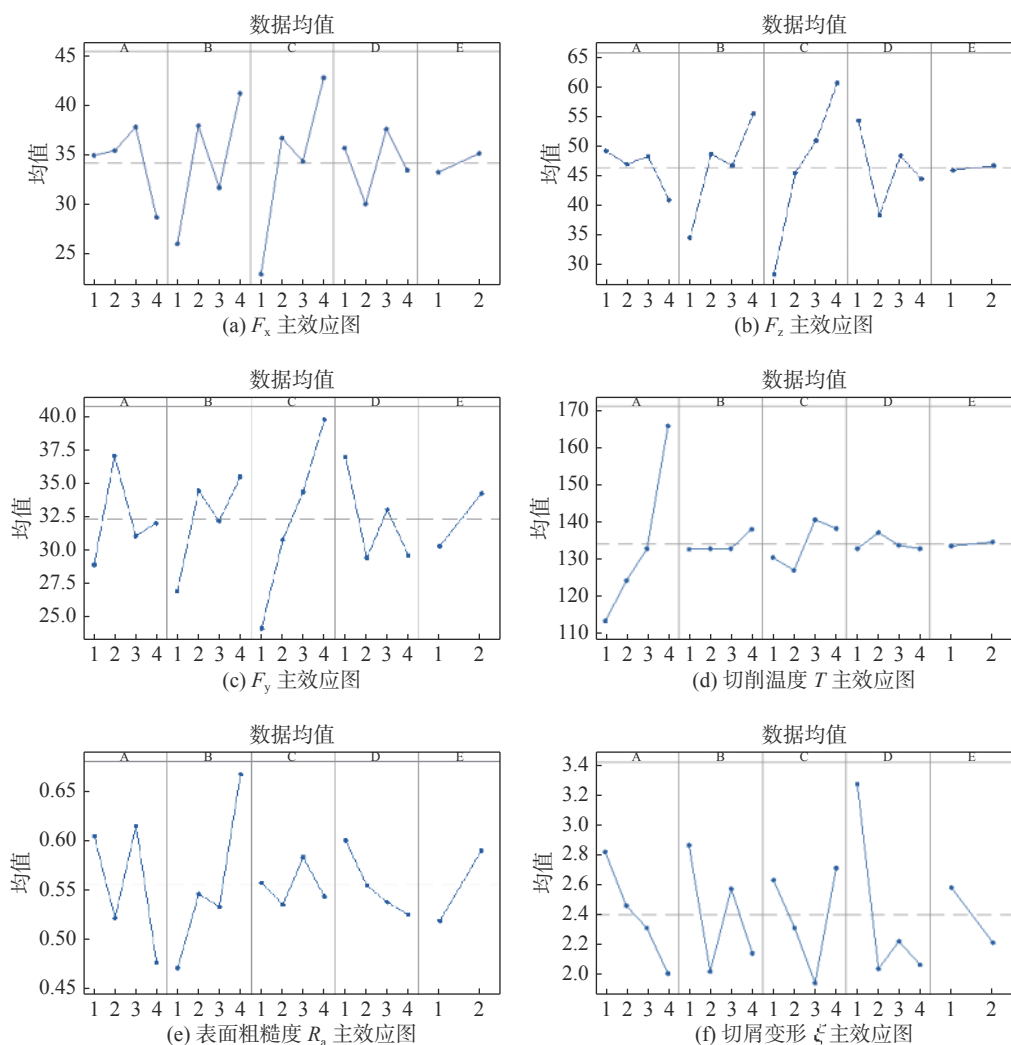


图6 主效应图

1) 切削速度对表面粗糙度的影响

从图 6(e) 可知, 随着切削速度的增大, 表面粗糙度减小。切削速度主要是通过影响材料的物理力学特性而影响表面粗糙度的。根据图 6(f) 可

知, 随着切削速度的提高, 切屑变形减小, 剪切滑移的距离缩短, 使得最终断裂点比较接近, 粗糙度降低; 同时根据图 6(a)~图 6(d) 可知, 随着切削速度的增加, 切削温度升高, 改变了材料的

流动特性,切削力降低,也使得粗糙度减小。

2) 进给量对表面粗糙度的影响

由图 6(e)可知,随着进给量的增大,粗糙度增大。进给量主要是通过几何作用来影响粗糙度,工件表面残留高度与进给量成正比,进给量增大,残留高度增加,粗糙度增大。另一方面,随着进给量增大,切削厚度增大,使得轴向力 F_x 、切向力 F_z 和背向力 F_y 切削力全部增加,如图 6(a)~图 6(c)所示,切屑平均变形减小,如图 6(f)所示,但靠近刀具前刀面的切屑底层变形并没有减小,切削温度的变化较小(如图 6(d)所示),材料流动特性变化不大,对粗糙度影响较小。

3) 背吃刀量对表面粗糙度的影响

由图 6(e)可知,背吃刀量对粗糙度影响较小。切削深度增大,参加去除材料的切削刃长度线性增加,使得轴向力 F_x 、切向力 F_z 和背向力 F_y 切削力全部增加,如图 6(a)~图 6(c)所示,而由于产生的热量和带走的热量基本都成比例增长,切削温度缓慢增加,同时切屑变形在切削刃长度上,如图 6(f)所示,变化不大,综合作用下背吃刀量对粗糙度影响较小。

4) 切削液用量对表面粗糙度的影响

由图 6(e)可知,随着切削液用量的减小,粗糙度降低。随着切削液用量的减小,其喷射速度增加,使得切削液更容易进入变形区,减小摩擦和变形,如图 6(f)所示,轴向力 F_x 、切向力 F_z 和背向力 F_y 切削力全部减小,如图 6(a)~图 6(c)所示。由于较小切削液用量,冷却作用降低,切削温度缓慢减小。综合作用,切削液减量可以提高表面质量。从实验可知,在不降低甚至提高加工质量基础上,切削液用量是可以显著降低,从而减小环境污染,降低资源消耗。

5) 刀具安装高度对表面粗糙度的影响

由图 6(e)可知,安装高度增大,粗糙度增大。安装高度增大,虽然前角增大,可使变形减小,切削力降低,切削温度降低。但后角降低了 0.7° ,前角增加了 0.64° ,后角影响作用更大。刀具安装较高,后角减小,刀具后刀面与工件表面接触面积增大,摩擦加剧,切削力增大,如图 6(a)~图 6(c)所示,温度升高,如图 6(d)所示,粗糙度增大。

利用图 6,还可以继续分析不同因素对评价指标的影响程度、参数优化等等,这根据实际情况可以增加或者减少。

4 结束语

通过实验改革,把以前的验证性实验拓展为综合性、设计性、实践性实验。由学生根据实验目的,在老师的指导下,进行正交实验设计,构建试验系统,确定实验参数,融合先进制造技术和实践应用工况,应用工程软件,独立进行实验结果分析,将机床、刀具、切削原理、加工工艺等机械制造技术基础的主要内容很好地贯穿于实践当中,提高了学生的分析问题和解决问题的能力,为学生毕业后在单位里独立完成产品设计、制造和检验打下了坚实的基础。

参考文献

- [1] 张树仁,刘薇娜.“机械制造技术基础”课程教学方法的探索与实践[J].中国大学教学,2012(10):65-66.
- [2] 张为民,来燕菁,王家海.“机械制造技术基础”课内实验的设计探索[J].中国电力教育,2010(181):118-119.
- [3] 朱晓翠,李春光,王继利,等.《机械制造技术基础》课程实验教学改革探讨[J].科技视界,2016(4):159.
- [4] 周京博,刘利剑,纪运广.机械制造技术基础实验教学模式的改革与实践[J].教育教学论坛,2017(43):111-112.
- [5] 姜晓坤,朱泓,李志义.面向新工业革命的新工科人才素质结构及培养[J].中国大学教学,2017(12):13-17.
- [6] 雷环,田慧君,王孙禺.“双一流”建设与工程教育研究[J].中国大学教学,2017(12):27-30.
- [7] 中华人民共和国教育部.“新工科”建设复旦共识[EB/OL].[2017-02-18].http://www.moe.gov.cn/s78/A08/moe_74_5/201702/t20170223_297122.html.
- [8] 宋昌才,袁晓明,沈春根,等.机械制造技术综合实验教程[M].2版.镇江:江苏大学出版社,2018.
- [9] 张世昌,李旦,张冠伟.机械制造技术基础[M].3版.北京:高等教育出版社,2014.
- [10] 陈日曜.金属切削原理[M].2版.北京:机械工业出版社,2005.
- [11] SHAN M C. Metal cutting principles[M]. 2nd. New York: Oxford University Press, 2005.
- [12] WEINERT K, INASAKI I, SUTHERLAND J W, et al. Dry machining and minimum quantity lubrication[J]. CIRP Annals, 2004, 53(2): 511-537.
- [13] VISWANATHAN R, RAMESH S, SUBBURAM V. Measurement and optimization of performance characteristics in turning of Mg alloy under dry and MQL conditions[J]. Measurement, 2018(120): 107-113.
- [14] 刘文卿.实验设计[M].北京:清华大学出版社,2005.

编辑 张俊