



基于有限元理论的 金属切削机理研究

王大中 万 蕾 吴淑晶◎著

非
外
借



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

基于有限元理论的 金属切削机理研究

王大中 万 蕾 吴淑晶 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书主要基于金属切削有限元仿真方法,初步探讨金属切削机理。主要研究内容包括金属切削基本理论及有限元仿真方法,金属切削死区的形成机理,材料硬化对切屑形成影响规律,切屑锯齿化程度与表面质量,切削润滑条件对表面质量的影响等。

本书可为从事切削理论研究的科技人员、机械科学与工程及其相关专业的师生提供学习参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

基于有限元理论的金属切削机理研究/王大中,万蕾,吴淑晶著. —北京:电子工业出版社,2018.3
ISBN 978-7-121-33785-7

I. ①基… II. ①王… ②万… ③吴… III. ①金属切削—理论研究 IV. ①TG501.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 039906 号

策划编辑:刘小琳

责任编辑:杨秋奎 特约编辑:白天明

印 刷:三河市华成印务有限公司

装 订:三河市华成印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:710×1000 1/16 印张:12 字数:200 千字

版 次:2018 年 3 月第 1 版

印 次:2018 年 3 月第 1 次印刷

定 价:59.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: liuxl@phei.com.cn, (010) 88254694。

P R E F A C E

前 言

金属切削加工是一个复杂的非稳态变化过程，具有大变形、热力耦合作用明显等特征。近百年来，许多学者在这一领域做了大量的工作，对切削加工技术的发展起到了促进作用，现在还有许多不为我们所知的理论需要探索，如切削过程中多因素非线性相互作用机理、基于热力学理论的刀具磨损机理、镗削颤振产生机理等。目前，有限元仿真已能解决金属成形仿真的相关问题，随着有限元分析软件的不断发展和成熟，对金属切削过程的研究已经从单因素试验进入多因素试验，从简单的静态观测进入复杂的动态观测，从宏观研究过渡到微观研究。有限元模拟仿真不仅形象、直观，而且能很好地反映切削过程中各个参数的变化状态。模拟仿真技术的进一步发展，将为金属切削有限元仿真研究带来更广阔的空间。

本书综合作者多年从事金属切削的理论研究成果，借鉴本领域大量国内外文献资料，系统阐述近年来作者在本领域的最新研究成果。全书由 8 章构成：第 1 章是全书的绪论，主要考察基于有限元理论的金属切削机理研究的现状，回顾金属切削有限元理论成果及存在的不足，展望发展方向，阐述本书理论研究的基本问题；第 2 章阐述金属切削基本理论，包括切削力、切削热、表面质量等相关理论问题；第 3 章进行金属切削有限元理论基本问题的探讨，为后续研究奠定基础；第 4 章讨论金属切削过程中死区形成机理，包括稳态加工中不同刀尖形态有限元仿真分析，以及摩擦条件对金属切削过程中死区形成影响的

有限元分析；第5章开展材料硬化对切屑形成影响的研究；第6章是切屑锯齿化程度研究；第7章研究金属干湿切削加工的有限元仿真问题，通过二维和三维仿真分析，探讨不同切削条件下切削机理，开展已加工表面质量研究；第8章是全书的总结与展望。

本书在成稿过程中得到了国内外同仁的大力支持。著者要特别感谢上海交通大学陈明教授，哈尔滨理工大学刘献礼教授，华侨大学黄辉教授，东北大学朱立达教授等给予的大力帮助。在成稿过程中，高亚运、赵岗、张鹏飞、张嘉嘉、孔超、印佳慧等研究生都做了大量的工作，在此一并致谢。感谢上海工程技术大学学术专著出版基金的资助，使得本书得以出版。

本书可作为机械科学与工程及其相关专业研究生的教材或参考书使用，也可供从事相关领域研究的广大工程技术人员和科技工作者参考。因成书时间仓促，错误之处在所难免，请同行给予批评指正。

著者

2017年12月

CONTENTS

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 金属切削有限元仿真研究现状及发展趋势	1
1.1.1 金属切削有限元建模研究现状	1
1.1.2 金属切削有限元仿真研究进展	5
1.1.3 金属切削有限元仿真研究发展趋势	8
1.2 本书主要内容	9
参考文献	10
第 2 章 切削理论基础	15
2.1 金属切削变形	15
2.1.1 切屑类型	15
2.1.2 切屑卷曲	17
2.1.3 切削变形规律	23
2.2 切削力	26
2.2.1 二维切削	26
2.2.2 三维切削	28
2.2.3 切削力变化规律	30
2.3 切削热	32
2.3.1 切削热的产生与传递	33
2.3.2 切削热变化规律	35

2.4	刀具的失效	38
2.4.1	刀具磨损	39
2.4.2	刀具破损	40
2.4.3	刀具耐用度	41
2.5	已加工表面质量	44
2.5.1	表面粗糙度	46
2.5.2	表层硬化	47
2.5.3	残余应力	48
2.6	本章小结	50
	参考文献	52
第3章	有限元仿真方法	58
3.1	金属切削模型	58
3.1.1	材料模型	59
3.1.2	几何模型	60
3.1.3	摩擦模型	62
3.1.4	剪切区域模型	65
3.2	有限元方法求解步骤	65
3.2.1	基本思想	65
3.2.2	求解步骤	66
3.2.3	分析过程	68
3.3	金属切削有限元方法	69
3.3.1	拉格朗日有限元方法	70
3.3.2	欧拉有限元方法	71
3.3.3	任意拉格朗日-欧拉有限元方法	71
3.4	有限元建模中的几个问题	73
3.4.1	分离准则	73
3.4.2	其他准则	77
3.4.3	热传导方程	78
3.5	本章小结	79

参考文献	80
第4章 金属切削死区形成机理研究	83
4.1 引言	83
4.2 刀具形态有限元仿真	87
4.2.1 有限元模型建立	88
4.2.2 速度场分析	93
4.2.3 应力场及温度场	94
4.2.4 残余应力的分布	96
4.2.5 切削力与进给力	97
4.3 稳态摩擦死区形成机理	98
4.3.1 切削死区形成	98
4.3.2 切削速度影响分析	100
4.3.3 稳态摩擦强度	102
4.3.4 有限元网格划分	102
4.4 动态摩擦死区形成机理	104
4.4.1 有限元建模	107
4.4.2 摩擦条件类型	108
4.4.3 静态摩擦规律分析	109
4.4.4 动态摩擦规律分析	113
4.5 本章小结	115
参考文献	116
第5章 材料硬化对切屑形成影响的研究	122
5.1 引言	122
5.2 材料硬化率几何模型	124
5.3 拉格朗日有限元模型	126
5.4 非稳态切削条件下有限元仿真研究	128
5.4.1 切屑形态分析	128
5.4.2 切屑的形成过程	131

5.4.3	材料硬化率分析	131
5.4.4	应变场及温度场	132
5.4.5	应力场及温度场	133
5.4.6	切削力与切削能量	134
5.5	本章小结	135
	参考文献	136
第 6 章	切屑锯齿化程度研究	139
6.1	引言	139
6.2	锯齿状切屑形成机理研究	143
6.2.1	有限元模型构建	143
6.2.2	锯齿状切屑的形成	144
6.2.3	模拟仿真分析	146
6.3	切屑锯齿化程度与表面质量研究	151
6.3.1	切屑锯齿化程度	151
6.3.2	切屑锯齿化程度系数	152
6.3.3	已加工表面质量	155
6.4	本章小结	157
	参考文献	158
第 7 章	切削润滑条件对表面质量影响研究	161
7.1	引言	161
7.2	二维切削仿真研究	164
7.2.1	二维切削模型与切削形态分析	164
7.2.2	切削力与切削温度	166
7.2.3	工件表面应力的变化分析	167
7.3	三维切削仿真研究	169
7.3.1	三维切削模型与切屑形态的对比分析	169
7.3.2	切削力与切削温度	171
7.3.3	工件表面应力的变化分析	173

第 1 章

绪 论

金属切削研究主要集中在高速切削、精密切削、硬切削、干切削等领域,围绕切削过程的物理建模和动态仿真是其中的研究热点之一^[1],从事该方面的研究可以为提高加工效率、降低成本提供理论支持,亦可指导切削加工生产实践。随着计算机科学的发展,自动控制及建模理论在金属切削中得到广泛应用,金属切削加工的研究重点逐步转向计算机技术和自动控制技术相结合的交叉领域,这必将为金属切削基础理论的研究开拓新的方向。

1.1 金属切削有限元仿真研究现状及发展趋势

1.1.1 金属切削有限元建模研究现状

有限元法(Finite Element Method, FEM)是随着计算机科学的发展而成长起来的一种现代计算方法,最初用于飞机结构的矩阵分析,其基本思想是将一个连续体离散成有限个单元,采用能量原理研究单元及其集合的平衡条件,并以计算机为工具进行数值求解^[2]。在金属切削领域,最初通过建立简单的剪切角解析模型,对切屑形成过程中和刀具前角之间的关系开展研究^[3-4],随后应用于金属切削

工艺的模拟仿真。文献[5-6]为了研究残余应力的影响,建立摩擦力随应力变化的切削有限元模型,同时采用金属切削二维模型和三维模型,并将三维模型研究列为重点。Yen^[7]建立热—弹—塑正交切削模型,得以完成刀刃的几何形状对切屑形态、切削力、切削温度及应力分布影响的研究。该方案利用有限元软件对PCBN刀具正交切削淬硬钢GCr15条件下,开展锯齿状切屑产生过程的模拟仿真工作,取得了良好效果。文献[8]所建立的模型采用剪切失效和单元删除准则以及网格自适应技术,有效地解决了由于材料大变形导致严重的单元扭曲与交错、高应变集中区域的单元奇异问题。上述成果为金属切削有限元仿真研究注入了新的活力。

随着模拟技术的进一步发展,研究人员对使用有限元法模拟金属切削过程的研究仍在不断深入,如塑性金属材料高速切削过程中存在绝热剪切行为,绝热剪切带内的应变、应变率分布规律是研究高速切削绝热剪切带特性的基础。对此,文献[9]建立Ti6Al4V热—位移耦合平面应变二维切削模型,为三维有限元建模奠定了基础。在三维建模方面,Buchkremer等^[10]提出一个新的断裂模型,并应用于45钢断屑的三维有限元仿真中。而陈明等^[11]在考虑刀屑间的摩擦和刀具的磨损及温度和应变率对应力的影响基础上,建立了金属切削的三维模型。该研究认为,高速切削过程中切削温度对刀具磨损、工件加工表面完整性及加工精度有极大的影响,应用有限元法对高速铣削铝合金薄壁件过程中工件与刀具接触面温度、工件内部的温度分布进行三维仿真研究。通过红外热像仪对不同主轴转速下工件表面温度的测量,验证了仿真结果与试验结果比较接近。得出在高速切削铝合金过程中,随着切削速度的增加,刀具与工件接触区的温度变化存在二次效应,促进了有限元建模由二维向三维发展。在纳米陶瓷刀具三维模拟仿真方面,文献[12]建立一种新型的纳米陶瓷刀具寿命模型,并深入研究了刀具形状、刀具前角以及其他切削参数对刀具磨损寿命的影响,同时构建基于纳米陶瓷刀具有限元模拟的初步刀具寿命预测模型和评估系统,该模型可以为硬态切削提供指导。文献[13]针对镍基合金Inconel 718钻孔对刀具磨损情况展开有限元仿真研究,在三维有限元软件中插入子程序,仿真预测数据与刀具实际磨损数据相吻合。

目前,有限元仿真软件种类很多,如ABAQUS、MARC、DYNA、DEFORM、ADVANTEDGE等商业有限元软件为实现大型项目的有限元分析、计算提供了良

好的前后处理和求解环境。表 1.1 为部分软件的比较。

表 1.1 常用的切削过程仿真软件比较^[14]

软件名称	主要算法	特 点	CAE 模块	适用领域
ABAQUS	以 Lagrange 算法为主, 兼有 ALE 和 Euler 算法	精于非线性问题的求解, 可分析复杂的固体力学和结构力学系统; 可模拟任意几何形状零件的力学和多物理场分析	Standard, Expicit, CAE, Design	机 械 加 工、冶金、 土木材料加 工等
MARC	Lagrange 算法	可处理各种线性、非线性结构分析、模态分析、动力响应分析、静动接触分析、小破坏分析等	Mentat, Parallet, Hexmesh	核 电、国 防、航天、 汽车、船舶 等
DYNA	以 Lagrange 算法为主, 兼有 ALE 和 Euler 算法	可求解非线性结构的高速碰撞、爆炸和金属成型等, 可分析接触非线性、冲击载荷非线性和材料非线性问题	基本分析、动力分 析、非线性分析、热 传导	汽车安全 设计、武器 系统设计、 金属成型等
DEFORM	Newton-Raphson 与 Expicit 算法	能够进行环境内综合建模、成型、热传导和成型设备特征模拟分析仿真, 适用于热冷温成型	数据分析输入、网 格划分和再划分、数 据传递计算	锻造、轧 制、挤压、 冷镦、拉伸、 压塑等
ADVANTEDGE	Lagrange 算法	操作简单, 可处理各种线性和非线性结构分析, 耦合热力学的时间积分, 可分析残余应力, 稳态分析, 切屑断裂分析, 针对剪切区有较好的分析能力	自适应网格划分, 用户自定义刀具和材料, 可以进行刀具磨损和涂层的分析	车、锯、 拉削、铣削、 钻削、开孔、 切槽、钻孔 等

上述软件应用方面, 文献[15]基于 DEFORM 仿真软件建立了 GH4169 高温合金高速车削的有限元模型, 采用四因素三水平正交试验方法研究切削用量和刀具几何参数对切削力的影响规律, 并建立了切削力经验公式。该项研究结果表明, 高速车削对切削力影响最大的参数是背吃刀量, 其次是进给量和前角, 影响最小

的是刀尖圆弧半径。刀尖圆弧半径增大时切削力变化不大,该研究推荐进给量 0.2mm/r、背吃刀量 0.4mm、前角 10°、刀尖圆弧半径 0.2mm 为最佳组合参数,为切削实践提供定量化的指导。文献[16]分别采用 ADVANTEDGE 和 DEFORM 软件,对钛合金 Ti6Al4V 的车削加工过程进行三维有限元仿真,分析总结出切削热在刀具、切屑及工件上的分布规律,给出了不同车削速度下刀具前后刀面温度分布图。将两个软件的仿真结果进行对比分析,为深入研究切削机理提供了有价值的参考数据。文献[17]则采用 ABAQUS 软件,基于刀具边缘半径效应,考虑热力学性能和工件材料特性,开展微端铣削力的有限元法预测研究。该研究利用有限元的仿真软件,完成微端铣削过程中特定的切削力对铣削的影响程度的科学分析,具有一定的现实意义。工程实践中采用另一有限元软件 DEFORM,模拟 PCBN 刀具硬态切削 GCr15 的三维正交切削与斜角切削过程,通过改变刃倾角、切削速度和进给量,探讨切削力和切削温度的变化规律,仿真结果与试验结果具有较好的一致性^[18]。

以钛合金 Ti6Al4V 为代表的难加工材料是有限元建模研究的热点, Ti6Al4V 与多数刀具材料容易发生化学反应,其较低的导热性能容易造成切削区域高温,对其开展刀具温度分布预测的研究具有重要意义。为研究 Ti6Al4V 铣削过程中温度变化规律,提高有限元仿真的准确性,文献[19]建立一种螺旋双刃切削有限元模型,提出构建航空钛合金切削过程中材料本构模型的新方法,获得了切削温度的变化曲线值。结果表明,切削温度最高值分布在刀-屑耦合面,更接近切削刃,刀具前刀面温度高于侧面。研究结果还显示, Ti6Al4V 在高温下对断裂及腐蚀具有较好的抵抗能力,这也是难加工材料钛合金在工业上得到广泛应用的原因。针对不同的切削方式,文献[20]采用有限元法,研究逆铣条件(速度、进给量、背吃刀量)对硬质合金刀具前刀面温度分布的影响。该研究考虑计算运行时间,建立一种独立的热传导模型,采取不同的冷却方案,分析铣齿脱离工件后的热传导的进程,预测铣齿接触工件的温度分布规律,为选择铣削 Ti6Al4V 的最佳切削条件,以及刀具冷却方法提供有效的帮助与指导。

在温度场控制理论研究方面,文献[21]建立了反映温度场分布的超声振动铣削有限元模型。对比常规铣削与超声振动铣削条件下,刀具温度场的变化特征,

进一步分析振动频率、振幅、铣削速度及每齿进给量等加工参数对铣刀温度的影响。结果表明,施加超声振动后刀具温度明显降低,提高振动频率或振幅有助于降低刀具温度,增大铣削速度或每齿进给量会导致刀具温度上升,当铣削速度接近或超过临界切削速度时,振动辅助切削的优越性会变得更微弱。

金属切削加工过程是一个复杂的非线性弹塑性变形过程,很难应用传统的方法定量地研究切削机理。特别是对超精密加工、高速加工等难以用实验方法得到所需的参数。对金属切削过程进行仿真,可以帮助我们对进给量、背吃刀量、切削速度等工艺参数进行合理选择;可以优化刀具的结构设计,从而减小不利因素对切削力的影响,提高加工效率和工件表面质量,对加工工艺进行优化等。综合上述分析,针对不同材料使用不同有限元软件,在二维或三维状态下开展金属切削有限元建模研究,已经成为当今研究的热点,其一系列的成果促进了金属切削理论的发展。

1.1.2 金属切削有限元仿真研究进展

随着有限元仿真水平的提高,有限元技术的应用越来越广泛,助推了金属切削有限元仿真研究的快速发展。工件表面质量是衡量金属切削加工水平的标志之一,为研究金属材料在正交切削条件下工件表面质量,Mahnama 等^[25]将刀具假定为完全塑性体,分析工件材料的塑性流动、刀具磨损以及刀屑摩擦等特性对切削过程的影响,在改善表面残余应力等方面取得了一定的成果。表面织构在提高刀具切削加工能力方面发挥了积极作用^[22],文献[23]利用 ADVANTEDGE 有限元软件,对表面微孔织构刀具切削钛合金 Ti6Al4V 的性能进行研究,重点考察微孔型刀具前刀面微孔直径、微孔深度、边缘距离(从切削边缘到微孔第一行的距离)和微孔位置排列模式等参数,对切削加工的影响规律。研究显示,微孔型刀具可以降低切削力,从而降低机械加工的能耗,改善表面质量。精密切削过程中,工件微结构变化关系到已加工表面质量问题,已引起业内人士的重视。为此,Li 等建立二维有限元模型,通过正交实验验证该模型的切削力和晶体形状特征。在有限元仿真的基础上,对加工表面的塑性变形进行分析:当进给量保持不变时,随着切削速度增加,应力降低,最大应变速率增加。该项研究结合多晶塑形理论,

对工件表面纹理进行分析和模拟,随着切削速度的提高,纹理密度也随之降低,表面粗糙度值得以下降^[24]。

在提高表面质量的同时,金属切削加工还要兼顾刀具寿命问题,因此我们更关注刀具摩擦对刀具耐用度的影响规律问题。为此,文献[25]采用网格自适应技术,在有限元弹塑性分析的基础上,对动态效应和摩擦接触进行模拟,取得了一系列有价值的仿真数据。另外,为开展非涂层硬质合金刀具磨损的有限元仿真研究,Attanasio^[26]等采用 DEFORM 有限元软件模拟切削过程,在使用基于磨料或刀具扩散磨损机制时,分析刀具磨损模型、识别磨损深度和位置方面还不成熟,特别是刀具磨损模型,要考虑扩散磨损影响等诸多因素,一直是困扰理论研究与生产实践的难题。Attanasio 等采用一种无涂层刀具对 45 钢进行实验研究,验证和校准了有限元模型,同时探索了刀具角度和应力对刀具磨损的影响规律,为提高刀具寿命提供了研究基础。

复合材料切削是大应变、高应变率的脆性加工过程。切削过程中刀-屑之间的接触及边界条件都呈现出强烈的非线性特征。应用有限元分析软件 ABAQUS 对 SiCp/Al 复合材料薄壁件车削力进行仿真研究,并结合实验数据对相应规律进行分析^[27]。仿真结果表明,在 SiCp/Al 复合材料薄壁件车削过程中,随切削速度的增大,切削分力(轴向力 F_x 、径向力 F_y 、切向力 F_z)均随之增大,只是径向力 F_y 增幅小。随进给量的增大,切削分力都有增大的趋势。随着背吃刀量的增大,切削分力均显著增大,数据显示背吃刀量是影响切削力的主要因素。复合材料研究的另一案例是文献[28]提出使用有限元仿真研究单向玻璃纤维增强塑料的正交加工方法,使用蔡-希尔理论来描述平面应力条件和正交各向异性失效行为的特性,结合自适应网格技术开展研究。数值结果表明该仿真可以实现对切削力的合理预测,体现了切削理论与自动化技术的理论融合。刀具磨损预测方面,文献[29]将实验研究和响应面优化法结合起来,对切削过程进行有限元建模,根据磨损造成刀具的体积损失和磨损尺寸关系,建立侧面磨损速率方程,有效地预测了刀具磨损状况。综上所述,复合材料有限元研究取得了一定的进展,特别是针对 SiCp/Al 的研究成果丰硕^[30-31],但目前对复合材料切削的研究大多停留在切削力、表面损伤等表面现象的研究上,对基体破坏及亚表层损伤机制等方面深层次的研究,还

需要不断深化。

切削热会影响刀具的性能和工件表面质量,切削过程中消耗的能量几乎全部转化为热量,部分热量传递至工件、切屑和刀具中,故要考虑刀具和冷却系统设计以及工件和机床热变形的补偿问题是有意义的。有必要建立一种基于有限元方法的仿真模型,来分析金属干切削过程中的热量分配。该模型利用耦合欧拉-拉格朗日法模拟正交切削,计算工件、切屑和刀具的温度分布规律,作为热量传递至工件速度函数的计算方法^[32]。为获取方肩铣削加工的切削力,选取 AISI304L 材料开展仿真及实验研究,对刀具几何参数、刀屑耦合、摩擦和温度等进行优化,缩短了计算时间^[33]。Li 等^[34]采用有限元法对零件表面质量有显著影响的残余应力进行研究,采用二维热力耦合有限元模型评估已加工表面的残余应力,该模型是基于有效前角和动态切屑形态开发的。传统的纳米陶瓷刀具寿命模型只考虑切削三要素(切削速度、背吃刀量和进给量),而刀具的几何参数、刀具材料及安装方式等因素尚未涉及,使建模产生误差。在金属切削加工中,断屑是衡量金属可切削加工性的重要指标之一,切屑未断会划伤工件已加工表面,阻碍有效的切屑去除。断屑是材料在自由表面断裂引起的,断裂应变受温度和应力状态影响。考虑到这些综合因素的影响,相关有限元仿真的断裂模型是失效的^[35]。

综合考虑刀具圆角影响的 MERCHANT 模型和高速正交切削 Ti6Al4V 实验测量的切削力和切屑几何参数,文献[36]解析求得切屑—刀具—工件摩擦因数,刀具—工件摩擦因数约为刀具—切屑摩擦因数的 3~7 倍,研究克服了现有文献中对切屑—刀具—工件摩擦因数取值的盲目性,仿真切削力与实验值相比误差小于 4.9%,锯齿间距、锯齿高度及其剪切角与实验值误差均小于 5.2%。针对高速加工钛合金 Ti6Al4V 的绝热剪切带问题,文献[10]认为切削速度在 180~3000m/min 范围内,随切削速度提高,切屑绝热剪切带内的应变、应变率先增大后趋于稳定,绝热剪切带变形程度增加直至韧性断裂。这一研究结果有助于准确预测绝热剪切带的断裂并揭示其演化机制,通过利用材料的绝热剪切行为,可控制高速切削过程中的切屑形态,改善 Ti6Al4V 的切削加工性。

刀具几何参数选择和优化涉及诸多因素,Senthilkumar 等^[37]选择刀具形状、后角和刀尖半径等参数对切削过程的影响程度进行分析,刀具形状占 45.27%是最