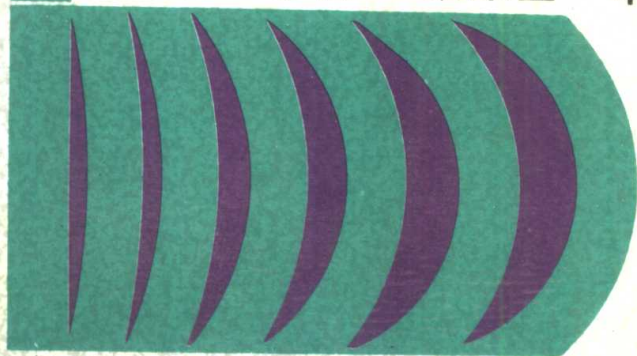


NEW DEVELOPMENTS
IN MECHANICS
OF CUTTING

切削力学新篇

刘培德 等著 胡荣生 审校



大连理工大学出版社

切削力学新篇

刘培德 等著
胡荣生 审校

大连理工大学出版社

(辽)新登字 16 号

内 容 提 要

本书主要介绍著者近十年来关于金属切削原理和石材加工机理学科在切削力学方面的科研成果。全书共分十一章,内容包括:国内外切削力学研究概况;金属切削力学新模型;非自由切削时流屑角与切削力的预报;带负倒棱刀具切削过程剪切角的预报;切屑卷曲折断机理;金属材料的动态力学性能;金属切削过程动态特性的研究;压电石英动态切削测力仪的研制;研究金属切削过程变形的实验技术;岩石切削加工;岩石锯切和磨削加工。本书重点阐述科学研究的思维方法和实验方法,以及力学在切削过程研究中的应用。

本书可作为高等工科院校机制专业研究生的教科书及教师的参考书,也为工厂和研究部门提供了新的科研技术资料。

切 削 力 学 新 篇

Qiexiao Lixue Xinpian

刘培德 著

胡荣生 审校

大连理工大学出版社出版发行 (邮政编码:116024)

大连理工大学印刷厂印刷

开本:850×1168 1/32 印张:9 $\frac{3}{8}$ 字数:232 千字

1991 年 11 月第 1 版 1991 年 11 月第 1 次印刷

印数:0001—1500 册

责任编辑:方延明 责任校对:杜祖诚

封面设计:葛 明

ISBN7-5611-0440-5/TH·12 定价:3.14 元

前 言

人类从事金属切削加工已有二三百年的历史,但切削加工成为一门学科却不过一百多年,而它的理论研究的迅速发展只不过是近几十年的事。这是由于人类对物质文明需求的提高,促进了生产与科技事业的发展,特别是宇航事业的发展要求机械工业向高度自动化、精密化发展,并能解决难加工材料的加工问题。这促使人们对切削机理进行深入的研究,很好地掌握切削过程中诸物理现象的变化规律,以提高生产功效与加工精度。举例来说,在柔性加工系统中,要求能很好地控制切削力、刀具磨损与破损、切屑控制与尺寸精度等问题,以保证加工系统顺利进行工作;控制的可靠性要求在线检测与预报的可靠性,而预报的可靠性又依赖于对切削机理的深入掌握,不但在定性上能正确判断,而且在定量上能准确预报。

大连理工大学机械系切削原理与刀具教研室自 1981 年以来在刘培德教授领导下进行了一系列研究工作,取得了可喜的成果。本书对其主要成果作扼要的介绍,借以在同行间相互交流,并引导青年学者作进一步的开拓性研究。参加研究工作的主要有:胡荣生教授、孙宝元副教授、吴雪松副教授(博士)、张弘毅讲师(博士)、王敏杰讲师(博士)、王成勇博士、李享德博士、王平硕士等。

全书共分十一章。第一章介绍国内外金属切削原理研究的概况,着重介绍金属切削过程力学模型的研究进展,因为它是本学科的研究基础。同时对非金属切削机理,主要是岩石切削作简要的介绍。第二章针对当今金属切削模型的不完善处,介绍了著者及其研究生提出的新模型,它的特点以及实验验证的结论。根据这个新模型可以对正交切削时剪切角及切削力进行准确的预报。第三章发

扬和扩大了第二章的研究成果,使之可用于非正交切削的一般情况,其中主要解决了流屑角的预报问题,把正交切削时所得的研究成果与流屑角结合起来。实际生产中应用的刀具刃口大多带有负倒棱,它对切削过程有何影响在第四章中加以讨论。第五章运用新的弯矩理论于断屑机理。在搞清切削过程中切屑自然弯曲变形的基础上,又进一步研究断屑台的影响,从而获得在实际生产中切屑变形的全面情况,作为判断切屑断裂的依据。由于在高速切削时切削温度与变形速度的提高影响了被切削材料的机械性能,这不能不影响到预报的准确性,所以在第六章中对金属的动态力学性能专门加以介绍。由于这方面的实验资料非常缺乏,本书介绍了用正交切削进行试验的方法,以及所获得的塑性本构关系。我们还利用切削条件容易控制和变换的特点,采用切削方法研究材料的热塑剪切失稳现象,即产生突发性剪切的现象和条件。金属切削过程实际上是动态过程,也就是说,它的切削力是随时间变化的,当前普遍应用动态数据系统(DDS)来研究它的变化规律。在第七章中我们介绍利用动态数据采集系统对切削过程动态参数进行相关研究的初步成果。

在科学研究中,理论的正确与否取决于实验的结论,而实验之是否可靠又依赖于实验方法与测试手段是否可信。在切削力学研究中,很重要的一环就是切削力的测量与测力仪的研制,我们所用的测力仪是自己研制的多向压电石英测力仪,其质量不仅达到了CIRP的国际标准,有的指标甚至超过了它。孙宝元副教授等对三向石英压电式车削测力仪进行了多年的潜心研究,我们在第八章中专门介绍所研制的新型测力仪。测量切削区变形也是必不可少的研究手段,在第九章中介绍了各种测量切削变形的办法,其中包括人们长期采用的落刀装置,这种装置虽能用来取得切屑根部照片,但使用不方便,又会给切削区带来变形误差。胡荣生教授研制成功一种在线体视显微摄影系统,能显示切削流线,使用方便,很有推广价值。

以上各章主要的研究对象为塑性金属。当前国内外教科书及文献中也都是涉及塑性金属的切削机理。对于脆性金属、非金属,尤其是岩石加工则很少提到。后者的比重近年越来越多,显示了切削加工的发展趋势。著者自 1982 年以来致力于石材加工研究。第十章专门介绍这方面的部分研究成果,包括岩石切削过程及其模型、岩石切削力的实验研究以及岩石切削刀具的研究等。它们和金属切削有明显的不同特征,可以说完全是一个新的学科领域。第十一章介绍岩石磨削加工。因为岩石是脆硬材料,它的加工主要是磨削加工,与切削加工有共同处,也有其特点。本章除介绍岩石的磨削模型与磨削力分析外,着重介绍岩石加工用磨具的研制与磨削参数的选择,以及抛光工艺的研究,对生产应用有参考价值。

本书着重叙述力学在切削过程研究中的应用;本书不拟广泛介绍各家在这方面的观点,而是主要介绍我们自己的研究工作。为了方便读者掌握要领,本书不拟作过于详尽的叙述,必要时可以通过各章所附文献目录进行查阅。本书的目的是从科研技术路线的角度作一概括的、深入浅出的介绍,使青年读者便于掌握切削力学的研究状况、研究方法,有助于选择自己感兴趣的课题,进行深入的研究。本书可作为工科院校机制专业研究生的教科书及教师参考书,也可作为工厂与研究部门的科研技术资料。

本书由中国高校金属切削研究会名誉理事长、博士生导师刘培德教授等著,胡荣生教授审阅。各章的著者为:前言、第一章、第二章—刘培德;第三章、第九章—胡荣生;第四章、第五章—张弘弢;第六章—王敏杰;第七章、第八章—孙宝元;第十章—王成勇;第十一章—李享德。

由于本书的写作是一种新的尝试,学科的发展日新月异,书中难免有不足之处,敬希读者提出宝贵意见。

刘培德

1990 年 8 月

目 录

前 言

第一章 国内外切削力学研究概况	1
§ 1.1 金属切削	1
§ 1.2 岩石切削	9
参考文献	10
第二章 金属切削力学新模型	12
§ 2.1 新模型的提出	12
§ 2.2 弯矩存在的论据	13
§ 2.3 切削弯矩的计算	22
§ 2.4 剪切角的预报	24
§ 2.5 切削力的预报	27
参考文献	29
第三章 非自由切削时流屑角与切削力的预报	30
§ 3.1 新的流屑角理论	32
§ 3.2 非自由切削时切削力的预报理论	41
§ 3.3 流屑角与切削力预报的实验验证	48
参考文献	56
第四章 带负倒棱刀具切削过程剪切角的预报	57
§ 4.1 研究刃口带负倒棱刀具切削过程的意义	57
§ 4.2 刀具刃口带有负倒棱的切削模型	57
§ 4.3 刀具刃口消耗能量表达式的推导	61
§ 4.4 切削过程总能量表达式	65
§ 4.5 实验验证及负倒棱对剪切角的影响	66
参考文献	69

第五章 切屑卷曲折断机理	70
§ 5.1 国内外研究概况简介.....	70
§ 5.2 切屑自然卷曲半径的理论计算.....	72
§ 5.3 断屑台(槽)对切削过程的影响.....	75
§ 5.4 带状切屑在高速流动状态中的 弯曲折断规律	86
参考文献	93
第六章 金属材料的动态力学性能	95
§ 6.1 研究金属材料动态力学性能的意义.....	95
§ 6.2 采用正交切削方法研究金属材料动态力学性能	97
§ 6.3 金属材料的动态塑性本构关系	107
§ 6.4 金属材料切削过程中的热塑剪切失稳	110
参考文献.....	120
第七章 金属切削过程动态特性的研究.....	124
§ 7.1 研究金属切削过程动态参数的意义	124
§ 7.2 动态数据系统(DDS)法在动态 切削过程的应用	125
§ 7.3 动态切削力与切削深度等参数的相关性	139
§ 7.4 动态切削力的频域识别	146
参考文献.....	156
第八章 压电石英动态切削测力仪的研制.....	158
§ 8.1 压电动态切削测力仪设计原理	160
§ 8.2 压电测力仪性能标定	173
参考文献.....	183
第九章 研究金属切削过程变形的实验技术.....	184
§ 9.1 切削变形的测量方法	184
§ 9.2 切削变形在线瞬态体视显微摄影系统	194

§ 9.3 剪切角与第一变形区厚度测量方法与结果	196
参考文献	200
第十章 岩石切削加工	202
§ 10.1 国内外岩石切削机理研究情况综述	202
§ 10.2 岩石切削过程及其模型	205
§ 10.3 岩石切削力实验研究	217
§ 10.4 岩石切削刀具切削性能研究	227
参考文献	231
第十一章 岩石锯切和磨削加工	235
§ 11.1 岩石磨削机理	235
§ 11.2 以金刚石圆锯片锯切岩石	244
§ 11.3 以金刚石锯条锯切岩石	259
§ 11.4 以磨具磨削岩石	265
§ 11.5 岩石的抛光	278
参考文献	285

第一章 国内外切削力学研究概况

§ 1.1 金 属 切 削

虽然早在 1870 年俄国学者基麦(Тиме)就已开始进行切削理论的研究工作,提出塑性金属的切削过程是挤压的观点,但由于测力等手段当时尚未具备,未能作进一步的研究。1907 年美国泰勒(Taylor)发表了《金属切削技艺》(On the Art of Cutting Metals)一书,提出了著名的切削速度与刀具耐用度关系式,对生产应用产生了重大影响。泰勒等人发明的高速工具钢,对切削水平的提高也是一个新时期的标志。1945 年美国学者麦钱特(Merchant)发表了金属切削过程力学(Mechanics of the Metal Cutting Process)的著名论文^[1],提出了塑性金属切削是剪切过程的力学模型(图 1-1),推导了切削力与切削参数的关系式,并用最小功原理求出了剪切角的理论公式。他的研究引起了当代许多学者的兴趣,纷纷对剪切角公式的理论推导、剪切角与变形的关系以及切削速度对切屑变形的影响等作了深入的研究。美国学者李-谢弗(Lee-Shaffer),苏联学者佐列夫(Зорев),澳大利亚学者奥克斯利(P. L. B. Oxley),日本学者臼井英治(E. Usui)以及华裔学者赵佩之(B. T. Chao)等都各自做出了一定的贡献。1930 年前后发明了硬质合金,这对切削水平的提高又是一个划时代的里程碑,金属切削理论亦随着完善起来。至今麦钱特的切削力学模型及泰勒的切削速度公式仍为人们广泛应用。

图 1-1 表示麦钱特的切削力学模型。刀具前刀面上作用着摩擦力 F_f 与法向力 F_n , 其合力为 F_r 。在切屑剪切面上有剪切力 F_s 及

法向力 F_{ns} ，此二力的合力与 F_r 相平衡。

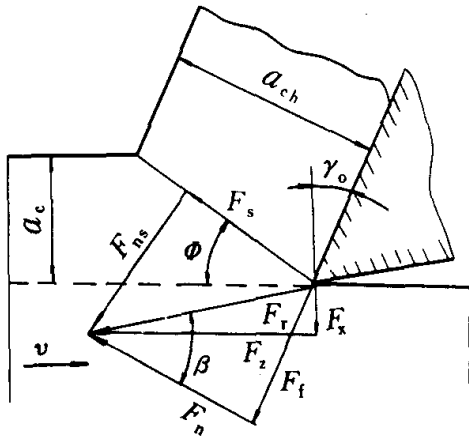


图 1-1 麦钱特切削力学模型

由图可知，剪切面上的剪切力 F_s 与切削合力 F_r 的关系为：

$$F_s = F_r \cos(\Phi + \beta - \gamma_0) \quad (1-1)$$

$$F_s = \tau_s A_s = \frac{\tau_s A_c}{\sin \Phi} \quad (1-2)$$

式中

Φ —— 剪切角；

β —— 切屑与刀具前刀面间的平均摩擦角；

γ_0 —— 刀具的主前角；

τ_s —— 工件材料的名义剪切强度；

A_s —— 剪切平面面积；

A_c —— 切削截面积。

由式(1-1)与(1-2)得：

$$F_r = \frac{\tau_s A_c}{\sin \Phi} \cdot \frac{1}{\cos(\Phi + \beta - \gamma_0)} \quad (1-3)$$

根据几何关系，切削速度方向的切削分力 F_z 公式为

$$F_z = F_r \cos(\beta - \gamma_0) \quad (1-4)$$

由此得

$$F_z = \frac{\tau_s A_c}{\sin \Phi} \cdot \frac{\cos(\beta - \gamma_0)}{\cos(\Phi + \beta - \gamma_0)} \quad (1-5)$$

将 F_z 对 Φ 微分并令其等于零，可求出 F_z 为最小值时的 Φ 值，这个所求的值为：

$$2\Phi + \beta - \gamma_0 = \pi/2 \quad (1-6)$$

公式(1-6)就是麦钱特剪切角公式。

对切削机理的研究人们首先感兴趣的是切削力的大小，而切

李-谢弗根据塑性理论也提出了一个力学模型,如图 1-2 所示。图中 ABC 为三角形塑性区。剪切平面 AB 的方向代表其中一组滑移线的方向,另一组与它正交。AC 可认为是自由表面。因最大剪应力方向与自由表面成 45° , 故 $\angle CAB = \frac{\pi}{4}$ 。滑移线 CD 与切削合力 F_r 的方向也成 45° , 故

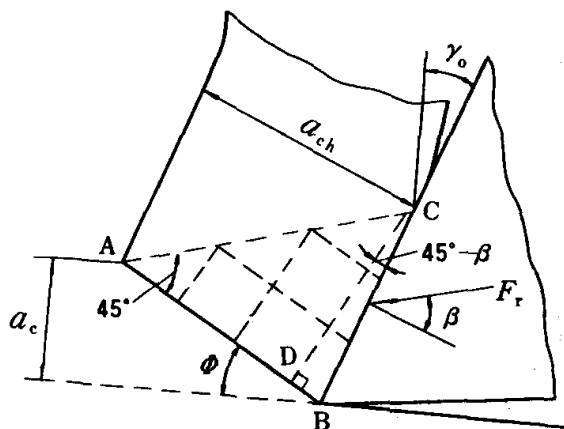


图 1-2 李-谢弗力学模型

$$\angle BCD = \left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) - \frac{\pi}{4} = \frac{\pi}{4} - \beta$$

$$\angle \Phi = \angle \text{BCD} + \gamma_0 = \frac{\pi}{4} - \beta + \gamma_0.$$

$$\Phi + \beta - \gamma_0 = \frac{\pi}{4} \quad (1-7)$$

式(1-7)即李-谢弗剪切角公式。

公式(1-6)和(1-7)都定性地说明 ϕ 和 $(\beta - \gamma_0)$ 之间存在线性关系:当 $\beta - \gamma_0$ 值增加, ϕ 角减小,这已为实验所证明。但无论公式(1-6)或(1-7), ϕ 角的计算值和实验结果都有较大出入,如图 1-3 所示。

究其原因,在切削力学模型方面有许多欠完善处:

1. 麦钱特把切削区的剪切滑移现象假设成是在单一剪切平面上产生的,这不符合实际情况。许多学者如苏联的佐列夫,澳大

利亚的奥克斯利以及日本的中山一雄(Nakayama)等都以自己实验论证了这一假设的不足。佐列夫提出了扇形的第一变形区形式,奥克斯利则把它简化为平行四边形。在低速切削时这一假设与实际不符尤为明显,所以单一剪切平面只能作为假想的或名义的剪

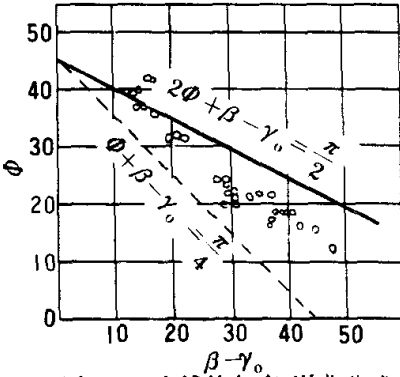


图 1-3 麦钱特与李-谢弗公式
与实验比较

切平面,是一种简单化的表示方法。

2. 把前刀面上切屑与刀具的摩擦作为一般服从库仑定律的外摩擦来处理,也是不符合实际情况的。实验证明在刀尖附近由于压力大、温度高,切屑常被粘结在刀刃上,沿前刀面上切屑的流动只能在粘结层之上剪切滑移,它们之间的摩擦是内摩擦,与材料的剪切强度和粘结

面积大小有关,在不同切削条件下材料的变形程度与产生的温度都影响材料剪切强度和内摩擦阻力的大小,因此用一般外摩擦的规律来处理前刀面上的摩擦情况是不合适的。在前刀面上接触长度内,既有内摩擦部分,也有外摩擦部分,在这二部分上的正应力与剪应力分布各不相同。这二部分的长度以及应力分布是值得研究的重要问题。

3. 在麦钱特的力学模型中把切屑作为单元体,在前刀面上有一作用合力 F_t , 它由摩擦力 F_f 与正压力 F_n 组成;在剪切面上也有一个合力,它由剪切面上的剪切力 F_s 和正压力 F_{ns} 组成,二个合力的大小相等、方向相反,并且假设为共线,满足了力的平衡条件。这个模型被大量实验证明,基本上是可用的,但又是不完善的,不能解释切屑何以弯曲这个基本事实。1961 年阿尔伯莱特(Albrecht)曾经提出一个观点⁽²⁾,认为前刀面上对切屑的作用合力与剪切面上的抗力大小相等、方向相反,但不共线,组成一个弯矩。这一观点可以从力学角度解释切屑何以弯曲这一事实,可惜他未能提供任何实验证明他的观点,因而未被人们所重视,断屑机理也长期没有

突破,停留在经验的阶段。弯矩的存在而且还影响名义剪切平面的形状,因而也将影响刃前区的应力状态。本书著者自 1981 年起领导研究生研究这一问题,到 1988 年已取得较满意的成果,为完善切削力学模型和开拓断屑机理做出一定贡献。

4. 金属切削过程中的变形与其材料性质有关,随材料塑性的大小而异,而金属的属性如强度与延伸率等是随切削条件变化的。切削条件影响金属的变形、变形速度以及切削温度诸因素,材料的物理机械性质也随之变化。在预报剪切角和切削力时也应考虑切削变形、变形速度以及切削温度对被切材料性能的影响,否则预报将不准确。可是这方面的资料十分缺乏,需要我们去研究,大连理工大学胡荣生教授和王敏杰博士在国家自然科学基金资助下近年做了不少工作。

针对以上问题,许多学者做了很多有益的工作,使预报的可靠性提高了。其中最突出的是澳大利亚奥克斯利教授和日本白井英治教授所做的研究工作。

奥克斯利的研究提出了以下几点新见解⁽³⁾:

1. 考虑了金属切削过程中速度的连续性,提出了平行界面剪切区模型(图 1-4)。

2. 考虑了在塑性变形过程中材料流动应力随变形而强化的特性,应用了扩大的汉基(Hencky)方程式来计算滑移线上的正应力分布。

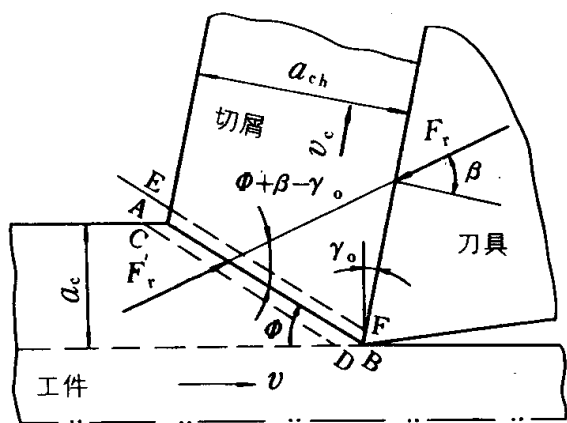


图 1-4 平行界面剪切区模型

3. 并考虑了变形速度及切削温度对材料性质的影响。

4. 综合考虑了剪切面上变形与前刀面上变形的相互影响。

白井英治教授的研究工作有以下一些特点^[4]：

1. 也考虑了切削变形、变形速度以及切削温度对加工材料性质的影响,但具体算法与奥克斯利的有所不同。

2. 同时考虑了剪切面与前刀面上因变形而产生的各种现象的相互联系。

3. 利用有限元法模拟分析正交切削过程,用计算机求解正交切削状态下的剪切角、应变、应力、温度及切削力。

4. 对三元切削过程也作了预报。

他们二人对理论预报值在一定切削条件下也作了实验验证,取得了较好的吻合,都有可取之处。但从以上对麦钱特模型分析所提出的四个方面不足之处来看,都不够全面,特别是他们的力学模型不能解释切屑之所以卷曲的机理,没有根据实际情况假设前刀面上的应力分布状况,同时理论计算太复杂,实际应用不便。

国内从事于这方面研究工作的主要是大连理工大学机械系刀具教研室的同志。1981年在刘培德教授领导下提出了正交切削时刃前区应力分析的新模型。在这个模型中我们认为作用在切屑剪切面上的力与前刀面上作用于切屑的力,二者大小相等,相互平行,但不一定共线,这就产生了一个弯矩,使切屑自然卷曲。吴雪松博士在他的论文研究期间,以图象-塑性法(Visio-Plasticity)在极低速度情况下进行实验验证,不但肯定了这个弯矩设想的正确性,而且发现了在不同切削条件下这个弯矩的变化规律。一个很有趣的发现是:这个弯矩可以为正,也可以为负。正弯矩即促使切屑自然弯曲的方向,而负弯矩则反之。接着我们又在高速切削范围验证了这个模型的正确性。根据这个模型的刃前区应力计算,我们可以判断在一定切削条件下所得的切屑是连续的,还是间断的。考虑弯矩这个因素,则计算的应力值与切屑类型相符合,否则,则有许多情况与事实不符。吴雪松博士并用这个理论控制切屑参数,解决了大连耐酸泵厂不锈钢精车时的断屑问题,获得了专利。这一研究成果是对麦钱特切削模型的重大改进,我们的论文“正交切削时刃前区

应力分析的新模型”被意大利机械工业杂志译成意文,发表在IMU-Rivista dell' industria meccanica 1983年第三期和工程文摘上^[5]。1961年阿尔伯莱特在美国机械工程师学会杂志上提出的设想被证实了,切屑卷曲的原因从力学角度得到了解释。这同时对断屑机理也是个突破,我们不仅考虑了断屑台的作用,而且从根本上考虑了切削过程中切屑变形对断屑的影响^[6]。

在此基础上张弘弢博士又继续深入研究,发展了切削弯矩理论,在国内首次用分刀法实验,测定前刀面应力分布情况,并作试验证明了弯矩可正可负这一事实。他研究了弯矩对名义剪切面的影响,使它略微呈上凸形,从而使应力分析更加准确。他创造性地计算了切屑的自然卷曲半径,其论文发表在英国1989年国际机床与制造杂志^[7]。这样,对切屑在切削过程中的自然变形情况得到了较完整的认识。在实际生产中,用平面型前刀面靠切削过程本身断屑的情况是较少的,同时也不一定是理想的。一般的情况是用断屑台加大切屑的弯曲变形,使之折断。而加断屑台后,会在一定程度上影响切削过程,因此我们又进一步研究断屑台对切削过程的影响,发现断屑台的作用不总是使切屑的变形增大。当断屑台距刀刃的宽度和高度足够时,在切削过程中有可能将切屑抬起,减轻它与前刀面的摩擦作用,使切屑的变形和切削力减小。因此断屑台的位置尺寸有一个最佳值,此时除保证断屑作用外刀具的耐用度最高。用我们的断屑理论解决上海宝钢无缝钢管厂在西德产数控车床上螺纹加工的断屑问题,获得了非常满意的结果,其经济效益按原设计产量计算将达每年数千万元,说明金属切削理论基础研究对国民经济具有重大意义^[8]。

金属切削机理的研究,为方便起见,一般都从正交切削入手,然后扩大到非正交切削。后者主要问题是:非正交切削时切屑向何方向排出,也就是流屑角的研究。可以认为,正交切削时有关物理参数的相关规律可以在一定程度上适用于非正交切削时切屑的流出平面内。胡荣生教授1982年在澳大利亚新南威尔斯大学访问

期间曾对这一问题作深入的研究。他研制成功了一种新的在线远视放大测量流屑角的仪器,并在理论推导流屑角公式时考虑副刀刃作用的影响,认为流屑方向应位于切削合力所作用的平面内。实验证明,他的流屑角公式比前人推导的更为准确。这一成果发表在澳大利亚新南威尔斯大学研究报告和英国机械工程师学会学报 1986 年 Vol. 200 No. C2^[9],并得到该大学的奖状。他又把流屑角预报与切削弯矩新模型结合起来,指导研究生王平实现了非正交切削时的切削力预报。为考虑变形、变形速度及切削温度对材料机械性能的影响,他指导博士生王敏杰进行了金属材料的塑性动态力学性能研究,采用了正交切削方法来取得金属材料在大应变、高应变率下的动态力学性能,求得了多种材料的本构关系式,可以用切削试验设备得到应变率高达 $10^5 \sim 10^6 \text{ s}^{-1}$ 的动态力学性能数据,同时开始研究切削过程中存在的热塑剪切失稳现象,并探讨了其产生的临界条件^[10]。

进行切削机理研究,特别是切削力的研究,精密的测力仪是必不可少的手段。过去用的灵敏度较高的应变式测力仪,其主要缺点是刚度不足,如果设计的弹性件刚性较好,则灵敏度又降低了。刚度高、响应快而灵敏度又好的测力仪对切削过程动态的研究尤为必要,所以现在国外多采用压电晶体式测力仪,这种测力仪价格高昂。我校孙宝元副教授、张贻恭副教授等为满足国防工业需要,1977 年以来从事于压电石英晶体力传感器的研究,1979 年研制成功的压电石英测力仪填补了国内空白,至今仍使用得很好。他们继续研制成功了压电石英刀杆式三向车削测力仪,1982 年发表在英国机床设计与研究杂志上(M. T. D. R.) Vol. 22 No. 2^[11]。这期间主要解决了传感器的研制、三向测力仪的结构设计、力学分析与三向补偿器的研究等问题,接着又进一步研究了测力仪结构的优化计算机辅助分析(CAA)、测力仪动态性能指标的提高等问题。1987 年新研制成功的 YDC-Ⅲ 87 型三向压电石英动态切削测力仪,经国家教委组织鉴定,不但完全达到 CIRP-STCC(国际生产工程研究