



国家自然科学基金项目成果
江苏省高等教育教改研究课题成果

车削系统 时变力学研究

李顺才 张强 卓士创 李强 著

高等教育出版社



国家自然科学基金项目成果
江苏省高等教育教学改革研究课题成果

车削系统 时变力学研究

李顺才 张强 卓士创 李强 著

高等教育出版社·北京

内容简介

本书以车削系统为研究对象,对车削过程中工件及刀具的车削应力变形、车削振动、车削热的时变力学行为进行了细致的研究。全书分 12 章。第 1 章绪论,介绍车削热、应力、车削振动的研究现状;第 2 章简要介绍时变力学理论,并给出一个应用实例;第 3 章通过奇异函数及时变理论、数值模拟,研究车削工件的应力及变形;第 4 章研究车削工件纵向、横向及扭转振动模态的时变特性;第 5 章通过车削试验研究刀具在不同车削参数、不同车削材料时的振动时变特性;第 6 章介绍刀具磨损状态的监测技术、刀具磨损状态对三向振动的影响;第 7 章介绍车削工件温度场时变特性的试验及数值模拟研究方法;第 8 章介绍车削刀具温度的试验、数值模拟研究方法,以及刀具磨损对其温度的影响;第 9 章通过数值模拟研究车削工件的热-力耦合特性;第 10 章介绍了一套实时同步测量车削热、车削变形及车削振动的试验系统;第 11 章基于第 10 章介绍的试验系统同步得到刀具车削热、刀具三向振动及工件车削变形的时变特性,研究刀具温升与振动的相关性,建立刀具温升与振动的多元回归模型;第 12 章建立车削过程中轴与车床耦合振动的动力学模型,通过数值计算讨论车削过程中车削工件的动力学特性。

本书内容属于力学、机械、材料等工程科学与技术基础学科的交叉领域,可供力学、机械、材料、土木、水利、交通运输等领域的广大科技工作者和高等学校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

车削系统时变力学研究 / 李顺才等著. —北京:

高等教育出版社, 2016. 12

ISBN 978-7-04-046840-3

I. ①车… II. ①李… III. ①车削-时变系统-力学-研究 IV. ①TG51

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 281852 号

策划编辑 徐 可	责任编辑 徐 可	封面设计 张 楠	版式设计 王艳红
插图绘制 杜晓丹	责任校对 李大鹏	责任印制 赵义民	

出版发行 高等教育出版社	网 址 http://www.hep.edu.cn
社 址 北京市西城区德外大街 4 号	http://www.hep.com.cn
邮政编码 100120	网上订购 http://www.hepmall.com.cn
印 刷 北京盛通印刷股份有限公司	http://www.hepmall.com
开 本 787mm×1092mm 1/16	http://www.hepmall.cn
印 张 12.75	
字 数 310 千字	版 次 2016 年 12 月第 1 版
购书热线 010-58581118	印 次 2016 年 12 月第 1 次印刷
咨询电话 400-810-0598	定 价 30.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 46840-00

前 言

车削加工是机械加工的重要方式,是工件与车刀之间进行相对运动去除多余材料的过程。车削过程中,刀具与工件之间由于剪切和挤压的作用发生塑性变形产生大量的车削热,导致刀具和工件温度升高,当刀具及工件的温度分布不均时,刀具与工件组成的系统产生热应力,热应力随车削过程发生变化,并在一定程度上影响车削振动及车削变形;持续的车削力作用于刀具与工件组成的系统引起加工系统发生振动,并与加工系统的固有振动叠加,使得塑性变形区的位置、刀具前刀面与切屑的摩擦特性以及刀具后刀面与工件的摩擦特性发生变化,相应的剪切热及摩擦热发生变化;当刀具及工件发生变形时,作用于加工系统的车削力、摩擦特性及剪切区的大小与位置随之发生变化,进而引发车削热及车削振动发生变化。由此可知,车削系统的热、力、振动之间是相互作用、相互影响的,而车削热、振动及变形对车削加工过程的影响是不可忽视的。

目前已有很多学者对车削过程进行了研究,但由于车削机理高度复杂,在对车削模型做了大量简化后,一般只局限于从理论、试验、数值模拟的角度来分析单一的应力应变、温度场及振动场的变化,与实际加工过程相比,这样的分析存在较大的误差。本书以前人的研究工作为基础,对车削过程中的温度、振动及变形耦合特性进行了研究,并在试验的基础上分析了车削温度及车削振动的时变特性,可以为深入认识车削机理、改善车削加工过程提供指导。

本书第1、3、4、7章由张强、李顺才完成,第2、5章由李顺才、卓士创完成,第6章由李顺才、李巍完成,第8~11章由李顺才、吴明明、李强完成,第12章由厉彦菊、李强完成。

本书的编写和出版得到了国家自然科学基金项目(编号:51227003、51574228)及2015年江苏省高等教育教改研究课题(编号:2015JSJG621)的资助,同时还得到了2016年度徐州市科技计划项目的支持。

本书得到了江苏师范大学机电学院、物电学院,空军勤务学院航空四站系,中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,中国矿业大学力建学院等单位的大力支持和协作,书中涉及的所有车削试验都是在邵明辉老师的全力协作下得以顺利完成,在此对这些单位及个人深表感谢!

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏和错误之处,敬请同行专家和广大读者批评指正。

作 者

2016年6月

目 录

第 1 章 绪论	1	第 6 章 刀具磨损状态的监测及其对	
1.1 车削应力和变形研究现状	1	刀具振动的影响	81
1.2 车削温度场的研究现状	3	6.1 刀具状态监测的意义	81
1.3 车削振动研究现状	5	6.2 不同磨损状态下刀具车削振动特性试验	
1.4 车削热-力-振动耦合特性研究	6	研究	81
参考文献	7	6.3 基于小波包的 EMD 分析在车削刀具	
第 2 章 时变力学及应用简介	13	监控中的应用	87
2.1 时变系统及分类	13	6.4 特征融合与 GA-SVM 在刀具监测中的	
2.2 时变系统动力学的热点问题	16	应用研究	93
参考文献	24	6.5 本章小结	96
第 3 章 车削应力及变形的时变特性	27	第 7 章 车削工件温度场时变特性研究 ...	97
3.1 车削轴的几何描述	27	7.1 车削热理论	97
3.2 车削工件弯曲变形的挠曲线微分方程 ...	27	7.2 车削工件温度场的有限元仿真	102
3.3 计算结果及分析	29	7.3 车削工件温度场时变特性试验研究	108
3.4 车削工件有限元模型	32	7.4 本章小结	113
3.5 施加约束与载荷	33	参考文献	114
3.6 车削工件应力及变形的时变特性	35	第 8 章 车削刀具温度场时变特性	
3.7 本章小结	39	研究	115
参考文献	39	8.1 车刀温度的时变特性研究	115
第 4 章 车削工件振动模态的时变特性 ...	40	8.2 刀具磨损状态对刀具温度时变特性	
4.1 纵向振动模态的时变特性	40	的影响	119
4.2 横向弯曲振动模态的时变特性	48	8.3 中等磨损刀具车削温度时变特性研究 ...	124
4.3 扭转振动模态的时变特性	56	8.4 本章小结	132
4.4 本章小结	61	第 9 章 车削热-力特性研究	133
第 5 章 刀具振动时变特性的试验研究 ...	63	9.1 基于 ANSYS 的车削热-力分析方法	133
5.1 刀具振动响应的测试及分析	63	9.2 车削工件热-力分析有限元模型	135
5.2 刀具上、下表面振动响应的时变特性	67	9.3 工件材料特性	136
5.3 刀具三向振动的时变特性	73	9.4 约束与载荷	137
5.4 车削材料对刀具振动特性的影响	75	9.5 车削工件不同截面的温度时变特性	139
5.5 本章小结	80		

9.6 车削工件不同截面进给方向正应力的 时变特性	142	11.1 刀具车削温度-时间曲线	162
9.7 车削工件不同截面切应力的时变 特性	145	11.2 刀具车削三向振动时域与频域特性 ...	166
9.8 本章小结	148	11.3 车削温度与车削振动的相关性分析 ...	170
第 10 章 车削热-变形-振动测试试验 系统	150	11.4 不同车削参数下工件的变形特性	185
10.1 试验设备	150	11.5 本章小结	187
10.2 试验方案	155	第 12 章 车削工件时变边界动力学 特性研究	188
10.3 试验步骤	156	12.1 车削轴的几何描述	188
10.4 本章小结	161	12.2 轴和车床耦合振动模型	189
第 11 章 车削热-振动-变形的相关性 研究	162	12.3 数值计算及分析	191
		12.4 结论	195
		参考文献	196

第1章 绪 论

车削加工是利用工件和刀具的相互作用去除工件多余材料以获得符合尺寸要求产品的一种加工方法。一方面,工件在刀具的剪切挤压作用下,经弹性变形、塑性变形直至形成切屑,刀具与工件、切屑之间彼此存在挤压和摩擦作用,工件表层将产生应力和变形,影响工件的加工精度和疲劳寿命。另一方面,随着车削材料的快速去除,切削产生的能量主要转化成切削热,致使刀具和工件的表面温度升高,这限制了切削速度的提高,影响了加工效率,同时加剧了刀具的磨损,降低了刀具寿命和加工表面质量。此外,车削加工中工件与刀具组成的耦合系统常常发生振动,这种振动导致车削过程不稳定,不仅影响零件的加工精度和表面质量、机床和刀具的使用寿命,而且产生的噪声还会污染环境。为了保证车削工件加工质量和抑制车削加工振动,实际生产中常采用保守的车削用量,限制了机加工效率的提高。对于陶瓷、金刚石和 CBN 等各种新型刀具,由于它们材质较脆,车削振动作用容易导致崩刃现象,严重影响机床和人身安全。

下面简要介绍车削加工研究的现状。

1.1 车削应力和变形研究现状

车削过程是刀具与工件的相互作用下,涉及材料的变形、应力、应变速率和车削温度耦合的复杂过程。1945年,Merchant^[1]建立了早期的剪切平面模型,得到了切削过程的切削力、剪切应力、应变的理论公式。在 Merchant 建立的模型的基础上,1966年,Zorev^[2]研究了高速切削运动,发现切削温度对剪切流动应力的影响比较小。1970年,Von Turkovich^[3]发现切削过程的剪切应力是由材料的位错密度引起的,其对切削温度和剪切流动中应变和应变速率没有影响。1972年,Spaans^[4]通过研究得出切削材料的应变硬化和热软化相互作用,导致剪切流动应力保持不变。

以上学者主要在剪切平面模型基础上研究了切削过程中的应力和变形,得到了很多有意义的结论。从20世纪80年代起,人们开始通过试验方法测试切削过程的动态应力、应变等情况。切削过程应力、应变的测试主要通过 SHPB 装置实现。SHPB 试验技术原理是利用一维应力波理论,通过测定压杆上的应变来推导材料的应力-应变关系。试件安装于输入杆和输出杆之间,撞击杆对输入杆进行撞击产生应力波,应力波进入输入杆以输入波传播到杆的另一端,之后,部分作为反射应力波返回,部分传输到试件并对其作用,使试件产生塑性变形。部分传输到试件的应力波通过试件传入到输出杆,作为输出波在输出杆中传播。通过应变片对杆中的输入波、反射波

和输出波的应变进行测试,利用一维波动理论计算得到试件的应力-应变关系。

众多学者在依据 SHPB 试验技术测得的应力、应变试验数据的基础上建立了切削应力的本构方程(如表 1-1 所示)。Oxley^[5]通过 SHPB 试验方法建立了大应变、高应变速率条件下的平均流动应力切削模型,并指出该模型的本构方程适用的应变、应变速率和温度范围。Xie^[6]在考虑材料的应变硬化、应变速率和热软化的条件下建立了切削过程计算应力的 PL 本构方程。Johnson 和 Cook 基于等效流动应力和塑性变形理论,并通过试验论证,提出了 Johnson-Cook 模型^[7],描述了剪切应力与应变的关系。Zerilli et al^[8]在 Johnson-Cook 模型的基础上,并利用晶体结构的位错理论,建立了切削加工中流动应力计算模型(ZA 模型)。Yoshino 和 Shirakashi^[9]在考虑应变、应变速率和温度影响下,建立了更加复杂的计算流动应力本构模型。

表 1-1 切削应力的本构方程

本构模型	本构方程	系数
Johnson-Cook (JC)	$\bar{\sigma} = (A + B \bar{\varepsilon}^n) \left(1 + c \ln \frac{\bar{\varepsilon}}{\varepsilon_0} \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0} \right)^m \right]$	A, B, C, m, n
Power Law (PL)	$\bar{\sigma} = \sigma_0 \bar{\varepsilon}^n \left(\frac{\bar{\varepsilon}}{\varepsilon_0} \right)^m \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-v}$	σ_0, m, n, v
Zerilli-Armstrong (ZA)	$\bar{\sigma} = C_0 + C_1 \exp \left(-C_2 T + C_3 T \ln \frac{\bar{\varepsilon}}{\varepsilon_0} \right) + C_4 \bar{\varepsilon}^n$	C_0, C_1, C_2, C_3, C_4
Oxley	$\bar{\sigma} = \sigma_0(T, \bar{\varepsilon}) \bar{\varepsilon}^{n(T, \bar{\varepsilon})}$	$\sigma_0(T, \bar{\varepsilon}), n(T, \bar{\varepsilon})$

由于车削过程的复杂性和试验技术的局限性,近年来许多学者在切削本构模型的基础上运用有限元数值模拟车削过程应力、应变规律。Sartkulvanich et al^[10]基于 JC 模型并将系数 m 假设为 1,采用有限元软件模拟了不同切削材料的切削过程,模拟得到切削应力与理论值误差在合理误差范围内。Shatla et al^[11]运用 Oxley 模型和金属正交切削试验确定了 JC 本构方程的系数,然后基于 JC 模型采用有限元方法仿真了 P20 和 H13 钢的切削过程,模拟得到的切削应力值与试验值非常吻合。Moufki et al^[12]在考虑材料的应变硬化、应变速率影响下,利用 PL 模型模拟了 AISI 1018 钢的正交切削过程的应力和应变规律。Jaspers et al^[13]通过有限元软件模拟了 JC 模型和 ZA 模型的适用性,通过 SHPB 试验验证,得出 AISI 1045 钢适合采用 ZA 模型仿真,而 AA 6082-T6 型铝采用 JC 模型得出的结果更准确。

我国学者在车削应力和变形数值模拟方面也进行了大量的研究。2005 年,山东大学的王素玉等^[14]采用弹塑性变形理论及数值模拟技术,建立了高速切削条件下正交切削的数值模型,模拟了切削过程中切削区应力、应变场的变化过程。2008 年,上海交通大学的张东进^[15]运用拉格朗日-欧拉(ALE)自适应网格重划分(adaptive remeshing)及分离线技术建立了切削模型,研究了剪切区的应力、应变规律。2009 年,上海交通大学的张晓辉^[16]通过 JC 本构模型分析了金属在第

一变形区内高温、高应变率条件下的 Mises 流动应力特性。2010 年,西华大学的韦联等^[17]基于材料变形的弹塑性理论、热力耦合理论以及 Usui 磨损模型,采用有限元方法对车削过程进行仿真,得出了在不同切削用量下切削力的变化规律、切削过程中刀具中切削应力的分布情况以及刀具表面切削热的分布情况。2012 年,湖北工业大学的周现柳等^[18]基于 Johnson-Cook 模型,运用 ANSYS/LS-DYNA 有限元分析软件对 WC 硬质合金刀具切削 45 钢的过程进行了有限元仿真,研究了切削应力的变化过程,并对切削速度、切削厚度和刀具前角对切削力的影响进行了分析。

1.2 车削温度场的研究现状

车削过程中,随着车削材料的快速去除,切削产生的能量主要转化成切削热,致使刀具和工件的表面温度升高,这既限制了切削速度的提高,影响了加工效率,同时加剧了刀具的磨损,影响刀具寿命和加工表面质量。关于车削热产生的机理,国外学者认为主要是由刀具与切屑、工件的摩擦引起。1799 年,Rumford 在制造铜炮时把工件、刀具和切屑浸入水中,并测量了由投入的机械能所造成的温升。Merchant 和 Pispianem 在早期研究切削功耗、切削的几何形状和切削参数关系的文献中^[19-21],把切屑的形成认为是在一个简单的剪切平面上,前刀面产生的热量采用经典摩擦理论处理,仅考虑刀具后刀面上的磨损,文献揭示了切削热量与刀具前角和切削速度等参数的关系。然而,Zorev^[22]指出剪切作用不能被视为简单的平面问题,同样,刀具前刀面的摩擦是十分复杂的,因为刀具表面的应力作用,不能简单地将刀具与工件间的摩擦利用经典的摩擦理论处理。随着金属预测理论的发展,Fenton et al^[23]考虑材料的应变、应变速率和流动性能的影响,建立了刀-屑摩擦模型,预测刀具和工件的温度分布。Shaw^[24]研究了切削过程积屑瘤产生的机理,研究表明积屑瘤的尺寸和稳定性由刀具切削接触区域的温度控制,当形成积屑瘤时,切屑运动产生的热量位于刀具后刀面一小段距离之上。Wu et al^[25]通过三维有限元法建立了稳态切屑过程的热塑性模型,研究了工件和刀具的应力、变形和温度分布。Moufki et al^[26]建立了斜角切削过程的热力耦合模型,考虑材料的应变率相关、应变硬化和热软化,可以对切削力、切屑流动方向等参数进行预测。

由于车削温度的复杂性,试验研究是一种重要手段。刀具-工件热电偶法^[24]是用来测试车削温度最常用的一种方法。这种方法明确显示切削用量(如切削速度和进给速度)对切削热的影响,但测出值不是很准确。在该方法中,利用热-电偶测量切削过程中刀具和工件产生的电动势,切削区域形成热接点,而电气连接到刀具和工件的部分形成冷接点。冷、热接点温度不同,在电路中产生电流,使电路中电流表偏转,这一现象称为温差电效应,相应的电势称为温差热电势。根据 Stephenson^[27]的研究,这种方法测得的是刀具与工件交界面处的平均热电势。

Hirao^[28]利用不同于刀具与工件的金属导线材料来测量刀具后刀面的温度。将绝缘导线插入工件的小直径孔中,随着工件材料去除,这根导线也将被加工,这时通过在导线和刀具之间形成的热电偶来测量刀具后刀面的温度。这种测试方法得到刀具后刀面的温度受切削速度、进给

速率和切削深度影响很小,通过该方法得到的温度一般低于热电偶方法。此种方法的缺点是切削区会触碰热电偶,产生误差。

Kato et al^[29]利用具有固定熔点的细微粒子来测试刀具内部温度分布。将刀具分成两个对称的部分,并排放置于切屑流动方向,细微粒子分散放于刀具分割面一侧,刀具放在一起切削。通过使用不同的粉末,观察熔融区域的范围,得到刀具温度分布。使用这种方法的测试结果显示,切削温度主要集中在切削刃上,持续约 1~2 分钟,逐渐消散于远离切削刃的某一点,获得的温度梯度与使用其他方法测得的结果有稍微的差异。

近年来,使用温度传感器测量切削过程中加工表面的温度得到广泛的应用^[30]。使用温度传感器测量切削温度具有测量精度高、测量范围广、使用方便的特点。使用该方法必须是在干燥的条件下,测量温度只能是加工表面以下切削刃区域。其他的温度测量方法还有辐射温度计法、热敏电阻法、量热计法等。

金属切削是一个高度非线性和耦合变形的过程,切屑接触区塑性流动致使工件局部过热和温度快速上升,理论分析和试验方法研究车削温度有一定局限性。随着有限元技术计算精度提高,有限元数值模拟在研究刀具、工件温度变化方面取得了很多成果。1973 年,klamecki^[31]建立早期三维切屑成形过程的仿真。1982 年,Usui et al^[32]建立了稳态切削过程切屑成形的有限元模型。然而,他们的模型是基于经验数据,并假定材料无变形,不能准确模拟切削过程。1983 年,Stevenson et al^[33]在绝热条件下考虑了应变速率、流动应力影响,建立了有限元模型。1984 年,Iwata et al^[34]在有限元建模中考虑了切屑与刀具前刀面之间的摩擦作用,但限制了非常低的切削速度和应变速率,并假定变形为刚塑性变形。而后,Strenkowski et al^[35,36]综合了早期的有限元模拟切削过程成果,他们使用通用有限元程序,并采用更新的拉格朗日模型模拟正交金属切削过程。他们提出了基于塑性应变的大小切屑分离准则,模拟了从切削初期阶段到稳定状态的过程,得到了切削力、切屑的几何形状、工件的塑性变形及残余应力分布。1990 年,Strenkowski et al^[37]利用欧拉方法模拟了金属稳态切削过程,得到切屑的几何形状和温度分布。1991 年,Komvopoulos et al^[38]考虑了工件材料的塑性流动特性、刀具、工件接触区的摩擦特性、刀具的磨损等,基于几何分离准则模拟了切削成形过程。

Shih et al^[39-42]运用实验和有限元仿真研究了正交金属切削过程。在有限元建模中考虑了大应变、高应变速率和温度等的影响,切削分离标准通过判断切削路径上刀尖与距刀尖最近节点之间的距离是否达到设定值,以此来分离。Majumdar et al^[43]基于多维稳态热扩散方程,考虑加工表面的对流换热系数的热损失和刀具切削接触区的摩擦,建立切削过程有限元模型,得出了不同切削用量下刀具和工件的温度分布。

我国对车削温度的研究起步较晚,一些学者也进行了一些研究。例如,合肥工业大学的程林^[44]基于弹塑性变形理论,通过 ANSYS 软件建立切屑摩擦有限元模型,分析切削过程应力场、温度场的分布,并通过实验验证了有限元仿真结果的正确性。西安理工大学的梁磊^[45]考虑了车削材料的应力应变、应变速率和温度的耦合影响,基于网格重划分技术,建立了金属正交切削过程摩擦有限元模型。华北电力大学的张磊光^[46]基于网格划分及动态自适应网格重划技术,通过

刀具、工件与切屑接触对建立切屑摩擦的三维有限元模型,研究了切屑的形成、温度的分布、刀具的磨损以及切削参数对切削性能的影响。

1.3 车削振动研究现状

国内外对于车削振动研究集中于切削颤振对加工性能的影响。在切削过程中,刀具与工件之间产生剧烈相对振动,称为切削颤振。切削颤振影响加工表面质量,降低刀具的使用寿命。关于切削振动的研究国外已有一百多年的历史。1907年,Taylor^[47]对切削过程振动现象进行了广泛的研究,认为形成不连续切削的周期与工件、刀架或机床的传动机构中的任一部分的固有周期相同,是产生颤振的主要原因之一。Arnold^[48]通过理论分析,并对切削过程进行了大量实验,提出了切削力是速度的函数,并且得出动态切削过程的颤振主要靠车床内部系统激振力产生和维持,而不是由周期外力引起。Tobias et al^[49]首次提出颤振是由于切削过程中不稳定性引起的,认为因振动产生的切屑厚度影响动态切削力,而且增加再生型颤振的振幅屈服,并指出切削深度是影响切削过程中稳定性的主要因素。Tlustý et al^[50]提出了一种正交动态切削系统极限稳定条件预测方法,结果表明,切削深度越大系统越不稳定,动态激振力和振幅越大,更易产生颤振。Tobias^[51]和 Meritt^[52]研究了再生型切削颤振的动态响应和极限稳定性条件,研究成果只适用于正交切削系统,并且切削力方向、切屑厚度不随时间改变。Tobias^[53]指出机床切削系统的振动可分为自由振动、受迫振动和自激振动。自由振动是由于机床部件不平衡引起的冲击和激振产生,自由振动和受迫振动可以很容易地识别和消除;自激振动由加工系统自身特性激励引起,对加工系统危害也最大,颤振就是典型的自激振动。Wiercigroch et al^[54]将自激振动分为初级颤振和二次颤振。初级颤振主要是由刀具、工件摩擦的热机效应耦合作用产生;二次颤振是由工件上的波浪形表面再生产生。再生型振动是最具破坏性的振动,可以通过提前预测或检测避免其发生。Quintana et al^[55]综合了切削振动中颤振的产生机理、分类等,总结了颤振极限稳定性预测、颤振的检测方法。

国内学者对车削振动也进行了大量基础研究。厉彦菊等^[56]利用微分变分原理建立了轴与车床耦合振动的时变动力学模型,通过数值计算,讨论了车削过程中的动力学特性。吴雅等^[57,58]提出了时变金属切削过程的概念,然后采用对信号分段的AR、SETAR模型描述其时变性。研究了时变切削颤振的AR谱、颤振模态的阻尼率、时变系统的特征根和稳态颤振的极限环,揭示了车床的振动特性。文献[59,60]建立了切削振动系统的力学模型,通过理论计算和计算机模拟验证了控制时变刀具角度、进给速度可以有效抑制切削颤振的产生。文献[61,62]分析了时变转速切削过程中系统振动频率和输入、输出能量的变化规律,量化地分析了变速波形对时变转速切削抑振效果的影响。周晓勤等^[63]建立了在时变主轴转速下再生切削系统的时滞动力学模型及递推求解算法,研究了时变主轴转速对再生切削系统动态响应的影响,揭示了再生切削系统动态响应的频率、相继两转切削间的相移和互功率等诸参数对主轴转速依赖的一些新特征。

1.4 车削热-力-振动耦合特性研究

Mabrouki et al^[64]用有限元软件 ABAQUS/Explicit 模拟了硬切削 AISI 4340 钢时切屑的形成,在考虑热力耦合效应下使用修正的 Johnson-Cook 模型来表达工件的材料性质,对不同切削参数下的切屑和刀具的切削温度及切削力进行了预测。Chang^[65]采用有限元模拟预测倒角硬质合金刀具车削不锈钢时刀尖处的表面温度。Yen et al^[66]用有限元方法模拟了二维直角切削过程中刀具在热力耦合下的表面温度分布和正应力分布,并把模拟预测结果和刀具磨损的经验公式结合,得到了磨损预测值,这个预测值和实验结果吻合得较好。Fazar Akbar et al^[67]用钨基硬质合金刀片正交切削 AISI/SAE 4140 钢,并用红外热像仪测量切削温度,用测力仪测量切削力,在实验数据基础上用有限元方法构建了切削热力耦合有限元模型,研究了在一定切削参数下的切屑形态、热量分配、刀屑界面温度、切削力和刀屑接触长度。C. Dinc et al^[68]用有限元方法预测使用硬质合金刀具正交切削 7075 铝和 AISI 1050 钢时刀具前刀面的温度场和最高温度,并用红外热像仪测量了切削温度,结果表明,模拟值和测量值能够较好地吻合,切削温度的变化符合切削理论。Halil Bil^[69]用三种不同的商用有限元软件 MSC.Marc、Deform2D 和 Thirdwave AdvantEdge 来模拟正交车削 C15 钢。研究表明,在摩擦系数应用正确的情况下,各软件模拟的切屑厚度、剪切角和切削力能够与实际测量的结果很好地吻合,但接触长度值有可能达到 50% 的误差。Grzesik et al^[70]应用切削有限元软件 Thirdwave AdvantEdge 对不同涂层的 P20 刀具切削 AISI 1045 钢进行了二维数值模拟,探讨了刀具前刀面和切屑表面的温度场和最高温度的变化规律。胡韦华等^[71]重点阐述了切削加工过程中塑性变形过程、切屑分离和断裂判定准则、工件与刀具接触和摩擦、切削加工过程中温度场与应力场的热力耦合,以及加工表面层微观组织结构与残余应力的预测等关键技术的研究进展情况。方刚等^[72]阐述了切削过程有限元模拟的关键技术,包括切屑形成、切削加工中的热力耦合、工件与刀具接触和摩擦、切屑分离和断裂准则以及工件残余应力、残余应变的模拟等技术。王和平等^[73]针对淬硬轴承钢的干态车削过程,在 ABAQUS 中建立考虑 PCBN 刀尖半径的热力耦合三维有限元切削模型。尹元德等^[74]运用商业非线性有限元软件 MARC,对金属切削加工过程进行了弹塑性热力耦合模拟,分析了不同刀具前角、切削刃钝圆半径在切削加工过程中对切削力、切削温度、工件残余应力及残余变形量的影响。曹自洋等^[75]为了研究刀具切削刃钝圆对微细切削加工尺寸效应的影响,运用商业有限元分析软件 ABAQUS/Explicit 对考虑切削刃钝圆半径的二维正交切削加工过程进行了热力耦合有限元模拟。曹自洋等^[76]建立微细切削仿真模型,对二维正交切削加工过程进行了热力耦合有限元数值分析。覃孟扬等^[77]对预应力切削的已加工表面残余应力状态进行了热力耦合分析,通过对机械应力和热应力在工件表面分布的叠加,发现了加工表面存在 3 种不同的残余应力类型。吴金炎等^[78]基于有限元理论和热力耦合模型的研究,通过讨论切削过程中的关键技术,包括切削加工有限元方程的建立、构件材料的 Johnson-Cook 本构模型、切屑分离准则、材料断裂准则、接触摩擦模型、切削

热的产生和分布、残余应力的分析和切削力的比较分析等,建立了二维金属切削过程模型,通过采用黏结-滑移摩擦模型,有效地模拟了航空钛合金的切削加工过程,对此类材料加工的切削力、切屑温度以及应力场和应变的分布进行了分析。邓文君等^[79]采用热力耦合、平面应变、连续带状切屑的切削模型,模拟了高强耐磨铝青铜的正交切削加工过程;采用增量步移动刀具的方法,结合有限元分析软件 Marc 的网格重划分功能,模拟了刀具从初始切入到切削力和切削温度达到稳态的切削加工过程,获得了不同切削深度和切削速度下的切屑形态、温度、应力、应变和应变速率的分布,并将模拟计算得到的切削力和切削温度与试验结果进行了比较,两者具有较好的一致性。胡红军等^[80]基于三维热力耦合的有限元模拟和高速切削试验,研究了亚微米陶瓷刀具和普通陶瓷刀具切削 H13 淬硬钢的过程,建立了高速切削的三维有限元模型、磨损模型及求解条件;进行了高速切削试验,并对刀尖的磨损形貌进行分析;分析了亚微米陶瓷刀具和普通陶瓷切削过程中的切削力、切削温度和刀具磨损的演化规律。

总之,关于热-力-振动三者的耦合特性,目前主要集中于车削热和车削应力的耦合研究,且红外测温的方法被广泛应用。对于车削应力的研究主要采用有限元数值模拟。对于车削振动与车削热、车削振动与车削应力的综合研究有待进一步加强。

综上所述,关于车削过程的应力及变形场、温度场和振动及耦合特性,国内外学者从理论分析、数值模拟和试验测试方面都进行了比较深入的研究,得出了许多有价值的结论。但目前从车削系统时变力学角度分析不多,本书主要研究车削系统的热-力-振动时变力学特性,为提高车削加工精度和质量提供依据。

参 考 文 献

- [1] Merchant M E. Mechanics of the metal cutting process[J]. Journal of Applied Physics, 1945, 16: 267-275.
- [2] Zorev N N. Metal Cutting Mechanics[M]. Oxford: Pergamon Press, 1966.
- [3] Von Turkovich B F. Shear stress in metal cutting[J]. Journal of Engineering for Industry, 1970, 92: 151-157.
- [4] Spaans C. Treatise of the streamlines and the stress, strain, and strain rate distributions, and on stability in the primary shear zone in metal cutting[J]. Journal of Engineering for Industry, 1972, 94: 690-696.
- [5] Oxley P L B. Mechanics of Machining, An Analytical Approach to Assessing Machinability[M]. Chichester, England: Ellis Horwood Limited, 1989.
- [6] Xie J Q, Bayoumi A E, Zbib H M. Characterization of chip formation and shear banding in orthogonal machining using finite element analysis[J]. Applied Mechanics Division, 1994, 183: 285-301.

- [7] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[C] // Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics. Hague: [s. n.], 1983:541-547.
- [8] Zerilli F J, Armstrong R W. Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations[J]. Journal of Applied Physics, 1987, 61:1816-1825.
- [9] Yoshino M, Shirakashi T. Flow-stress equation including effects of strain rate and temperature history [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1997, 39(12) :1345-1362.
- [10] Sartkulvanich P, Koppa F, Altan T. Determination of flow stress for metal cutting simulation-a progress report[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 146: 61-71.
- [11] Shatla M, Kerk C, Altan T. Process modeling in machining: Part II Validation and applications of the determined flow stress data[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2001, 41:1659-1680.
- [12] Moufki A, Molinari A, Dudzinski D. Modelling of orthogonal cutting with a temperature dependent friction law[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1998, 46:2103-2138.
- [13] Jaspers S P F C, Dautzenberg J H. Material behaviour in conditions similar to metal cutting: flow stress in the primary shear zone[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 122:322-330.
- [14] 王素玉, 艾兴, 赵军, 等. 正交切削区应力应变场的数值模拟[J]. 工具技术, 2005, 39(11) :25-28.
- [15] 张东进. 切削加工热力耦合建模及其试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [16] 张晓辉. 基于切削过程物理模型的参数优化及其数据库实现[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [17] 韦联, 周利平. 基于 Deform 3D 的金属车削过程仿真[J]. 工具技术, 2010, 44(8) :29-33.
- [18] 周现柳, 华中平, 李婷. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的金属切削技术研究[J]. 软件导刊, 2012, 11(3) :90-91.
- [19] Merchant M E, Field M. Mechanics of formation of the discontinuous chip in metal cutting[M]. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1949.
- [20] Pispanem V. Theory of formation of metal chips[J]. Journal of Applied Physics, 1948(19) : 876-881.
- [21] Merchant M E. Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal cutting and a type 2 chip [J]. Journal of Applied Physics, 1945, 16:5-15.
- [22] Zorev N N. Interrelationship between shear processes occurring along tool face and on shear plane in metal cutting[J]. International Research in Production Engineering, 1963, 9:42-49.
- [23] Fenton R G, Oxley P L B. Mechanisms of orthogonal machining: allowing for the effects of strain rate and temperature on tool-chip friction[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1970, 184:927.
- [24] Shaw M C. Metal Cutting Principles[M]. London: Oxford University Press, 1984:594.

- [25] Wu J S, Dillion O W, Jr., Lu W Y. Thermo-viscoplastic modeling of machining process using a mixed finite element method[J]. Computational methods in materials processing, 1992, 39(61):113-128.
- [26] Moufki A, Devillez A, Dudzinski D, et al. Thermo mechanical modeling of oblique cutting and experimental validation[J]: International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004, 44: 971-989.
- [27] Stephenson D A. Tool-work thermocouple temperature measurements-theory and implementation issues[J]. Journal of Engineering for Industry, 1993(115):432-437.
- [28] Hirao M. Determining temperature distribution on flank face of cutting tool[J]. Journal of Materials Shaping Technology, 1989, 6(3):143-148.
- [29] Kato S, Yamaguchi K, Watanabe Y, et al. Measurement of temperature distribution within tool using powders of constant melting point[J]. Journal of Engineering for Industry, 1976:607-613.
- [30] 刘占强, 黄传真, 万熠, 等. 切削温度测量方法综述[J]. 工具技术, 2002, 36(3):3-6.
- [31] Klamecki B E. Incipient chip formation in metal cutting-A three-dimension finite element analysis [D]. Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign, 1973.
- [32] Usui E, Shirakashi T. Mechanics of machining-from descriptive to predictive theory[M]//On the Art of Cutting Metals-75 Years Later. New York: ASME PED, 1982:13-35.
- [33] Stevenson M G, Cleland D L. High strain tests on two steels using an improved torsional Hopkinson bar apparatus[J]. Mechanical Engineering Transactions, 1981:74-80.
- [34] Iwata K, Osakada K, Terasaka Y. Process modeling of orthogonal cutting by the rigid-plastic finite element method[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1984, 106:132-138.
- [35] Strenkowski J S, Carroll J T. A finite element model of orthogonal metal cutting[J]. Journal of Engineering for Industry, 1985, 107:347-354.
- [36] Carroll J T, Strenkowski J S. Finite element models of orthogonal cutting with application to single point diamond turning[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1988, 30:899-920.
- [37] Strenkowski J S, Moon K J. Finite element prediction of chip geometry and tool/workpiece temperature distributions in orthogonal metal cutting[J]. Journal of Engineering for Industry, 1990, 112:313-318.
- [38] Komvopoulos K, Erpenbeck S A. Finite element modeling of orthogonal metal cutting[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1991, 113:253-267.
- [39] Shih A J, Yang H T Y. Experimental and finite element predictions of the residual stresses due to orthogonal metal cutting[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1993, 36:1487-1507.
- [40] Shih A J. Finite element simulation of orthogonal metal cutting[J]. Journal of Engineering for Industry, 1995, 117:84-93.
- [41] Shih A J. Finite element analysis of orthogonal metal cutting mechanics[J]. International Journal

of Machine Tools and Manufacture, 1996, 36: 255-273.

- [42] Shih A J. Finite element analysis of the rake angle effects in orthogonal metal cutting [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1996, 38: 1-17.
- [43] Majumdar Pradip, Jayaramachandran R, Ganesan S. Finite element analysis of temperature rise in metal cutting processes [J]. Applied Thermal Engineering, 2005 (25): 2152-2168
- [44] 程林. 二维金属切削应力场和温度场的数值模拟 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2004.
- [45] 梁磊. 金属正交切削仿真及实验研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
- [46] 张磊光. 三维金属切削过程的有限元模拟 [D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [47] Taylor F. On the art of cutting metals [M], New York: American Society of Mechanical Engineering, 1907.
- [48] Arnold R N. The mechanism of tool vibration in the cutting of steel [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1946, 154: 261-284.
- [49] Tobias S A, Fishwick W. The chatter of lathe tools under orthogonal cutting conditions [J]. Journal of Engineering for Industry, 1958, 80: 1079-1088.
- [50] Tlustý J, Poláček M. The stability of machine tools against self excited vibrations in machining [C] // Proceedings of the International Research in Production Engineering Conference. New York: [s. n.], 1963: 465-474.
- [51] Tobias S A. Machine Tool Vibration [M]. Glasgow: Blackie and Sons Ltd, 1965.
- [52] Meritt H E. Theory of self-excited machine-tool chatter [J]. Journal of Engineering for Industry, 1965, 87: 447-454.
- [53] Tobias S A. Machine tool vibration research [J]. International Journal of Machine Tool Design and Research, 1961, 1: 1-14.
- [54] Wiercigroch M, Budak E. Sources of nonlinearities, chatter generation and suppression in metal cutting [J]. Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2001, 359: 663-693.
- [55] Quintana G, Ciurana J. Chatter in machining processes: a review [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51: 363-376.
- [56] 厉彦菊, 唐平, 李天珍. 轴车削过程的时变边界动力学分析 [J]. 湖南工程学院学报, 2006, 16(2): 24-27.
- [57] 吴雅, 梅志坚, 杨叔子. 机床切削颤振的定常与时变特性 [J]. 固体力学学报, 1992, 13(3): 271-276.
- [58] 吴雅, 柯石求, 杨叔子. 时变金属切削过程颤振的线性、非线性时序模型 [J]. 振动工程学报, 1991, 4(1): 25-32.
- [59] 杨辅伦, 于骏一, 张海燕. 切削振动的时变刀具角度在线控制 [J]. 吉林工业大学学报, 1994, 2: 27-33.
- [60] 包善斐, 杨辅伦, 王红岩, 等. 时变进给抑制切削颤振的理论分析与实验验证 [J]. 振动工程

学报,1995,8(4):293-301.

- [61] 姜永成,丛娟. 变速波形对时变转速切削抑振效果的影响[J]. 鞍山钢铁学院学报,1999,22(3):167-170.
- [62] 张文杰,王伟,高国利. 时变转速车削抑振效果的能量化分析[J]. 机械设计与制造,1998,2:13-14.
- [63] 周晓勤,孔繁森,王文才,等. 时变主轴转速再生切削系统的动态响应特征[J]. 振动与冲击,2008,27(12):1-8.
- [64] Mabrouki T, Rigal J F. A contribution to a qualitative understanding of thermo-mechanical effects during chip formation in hard turning[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006(176):214-221.
- [65] Chang C S. Prediction of the cutting temperature of stainless steel with chamfered main cutting carbide tools[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007(190):332-341.
- [66] Yen Y C, Sohner J, Weule H, et al. Estimation of tool wear of carbide tool in orthogonal cutting using FEM simulation[J]. Machining Science and Technology, 2002,6(3):467-486.
- [67] Fazar Akbar, Mativenga Paul T, Sheikh M A. An experimental and coupled thermo-mechanical finite element study of heat partition effects in machining[J]. International Journal of Advanced Manufacturing technology, 2010(46):491-507.
- [68] Dinc C, Lazoglou I, Serpenguzel A. Analysis of thermal fields in orthogonal machining with infrared imaging[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008(198):147-154.
- [69] Bil H, Kilic S E, Erman Tekkaya A. A comparison of orthogonal cutting data from experiments with three different finite element models[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004(44):933-944.
- [70] Grzesik W, Bartoszek M, Nieslony P. Finite element modelling of temperature distribution in the cutting zone in turning processes with differently coated tools[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005,(164):1204-1211.
- [71] 胡韦华,王秋成,胡晓冬,等. 切削加工过程数值模拟的研究进展[J]. 南京航空航天大学学报,2005,37(S1):194-198.
- [72] 方刚,曾攀. 切削加工过程数值模拟的研究进展[J]. 力学进展,2001,31(03):394-404.
- [73] 王和平,吴申峰,张雪萍. 高速干切削过程的三维有限元仿真与试验[J]. 机械设计与研究,2011,27(01):56-62.
- [74] 尹元德,李胜祗,金国. 刀具几何参数对切削加工过程的影响[J]. 机械工程师,2006(04):95-97.
- [75] 曹自洋,何宁,李亮. 刀具切削刃钝圆对微细切削加工尺寸效应影响的有限元模拟研究[J]. 机械科学与技术,2009,28(02):186-190.
- [76] 曹自洋,何宁,李亮. 切削温度对微细切削加工影响的有限元分析研究[J]. 工具技术,