

学术专著

高速硬态切削加工 及其稳定性研究

陈光军 著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

高速硬态切削加工及其稳定性研究

陈光军 著



机械工业出版社

高速硬态切削具有良好的加工柔性、经济性和环保性能,是一种有利于环境保护的清洁生产工艺和绿色制造技术。全书共分8章,第1章为绪论,第2章为高速切削技术和硬态切削技术概述,第3章为机床颤振的基本理论,第4章为淬硬钢高速精密切削加工切屑形成特征研究,第5章为硬态切削加工系统稳定性极限预测,第6章为稳定性极限预测的实验考证及切削振动分析,第7章为精密硬态切削加工表面粗糙度与塑性侧流研究,第8章为精密硬态切削的多元非线性回归模型与综合优化。

本书可供从事高速硬态切削技术研究的科技人员使用,也可供相关学科的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

高速硬态切削加工及其稳定性研究/陈光军著. —北京:机械工业出版社, 2014.6

ISBN 978-7-111-46973-5

I. ①高… II. ①陈… III. ①高速切削-研究 IV. ①TG506.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第120792号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:周国萍 责任编辑:周国萍 版式设计:赵颖喆

责任校对:张晓蓉 封面设计:路恩中 责任印制:刘 岚

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2014年8月第1版第1次印刷

169mm×239mm · 10.5印张·169千字

0001—2000册

标准书号:ISBN 978-7-111-46973-5

定价:49.00元



凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

策划编辑:(010)88379733

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

淬硬钢是典型的耐磨和难加工材料，淬硬钢工件的粗加工是在淬火前进行的，淬火后再进行磨削精加工。但磨削加工效率低、砂轮及磨削液消耗量大、成本高且切削废液污染程度严重，随着 PCBN 刀具技术的发展和高性能加工机床系统的应用，硬态切削作为淬硬钢最终精加工方法已经成为了现实。淬硬钢的以车代磨是一种有利于环境保护的清洁生产工艺和绿色制造技术，与传统的磨削加工工艺相比，淬硬钢切削加工具有较高的加工柔性和加工效率，可以避免污染和节省能源，还能够获得与磨削相当甚至超过磨削的加工表面质量。目前，对于硬态切削加工还有许多特殊的切削规律需要探索。

本书针对 PCBN 刀具精密车削加工淬硬钢这一研究课题，着重进行了以下几方面的研究：淬硬钢高速精密切削加工切屑形成特征研究、多参数的精密硬态车削过程稳定性极限预测及切削振动分析、精密硬态切削加工表面塑性侧流研究和精密硬态切削的多元非线性回归模型与综合优化。

本书的主要内容是作者在哈尔滨理工大学读博期间在导师刘献礼教授精心指导下完成的，字里行间都倾注了导师的关怀与心血。刘献礼教授严谨的治学态度，精深的学术造诣，巨细入微、求实的工作作风和光明磊落的胸怀使我深受教益和熏陶。严复钢高级工程师、李玉甫高级实验师，文东辉、王宇、陈涛，王义文、岳彩旭、翟元盛、胡景姝、何耿煌、姬生圆、赵兴法、赵忠阳、王艳鑫、丁云鹏、马晶等同志做了大量前期工作，佳木斯大学王玉烁、孔令国作了部分后续补充工作，在这里向他们致以衷心的感谢和崇高的敬意。

本书得到了国家自然科学基金项目（51175227）、黑龙江省高校青年学术骨干支持计划项目（1252G057）的资助。由于时间仓促，作者学识水平及实验条件有限，书中疏漏之处难免，敬请专家、读者不吝批评指正。

陈光军

2014 年 8 月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 淬硬钢精密车削的优点	2
1.3 硬态切削机理的国内外研究现状	3
1.3.1 锯齿形切屑形成机理	4
1.3.2 硬态切削表面完整性的研究	5
1.3.3 切削过程有限元模拟技术国内外研究现状	8
1.4 车削加工稳定性极限预测的研究现状	9
第2章 高速切削技术和硬态切削技术概述	13
2.1 高速切削技术	13
2.1.1 概念	13
2.1.2 理论基础及特点	16
2.1.3 高速切削加工的结构体系	19
2.1.4 相关技术及其发展现状	19
2.2 硬态切削技术	34
2.2.1 硬态切削的概念	34
2.2.2 硬态切削技术的特点	35
2.2.3 高速硬态切削对刀具的要求	36
2.2.4 硬态车削的应用与展望	40
第3章 机床颤振的基本理论	41
3.1 自激振动的基本概念及特点	42
3.1.1 相平面、平衡点、极限环及其稳定性	42
3.1.2 自激振动的特点	45
3.2 速度反馈引起的切削颤振	47
3.2.1 切削过程中的速度反馈机理	48
3.2.2 速度反馈所形成的负阻尼	49
3.2.3 自激振动的能量机理	50
3.2.4 能量平衡与振幅稳定性	52

3.2.5 颤振的阈限	53
3.3 位移延时反馈引起的切削颤振	54
3.3.1 位移反馈、负刚度与静态不稳定性	54
3.3.2 位移的延时反馈	58
3.3.3 金属切削过程中的再生颤振	60
3.4 模态耦合引起的切削颤振	68
3.4.1 模态耦合与模态耦合系统的稳定性	68
3.4.2 金属切削中的模态耦合自激振动	71
第4章 淬硬钢高速精密切削加工切屑形成特征研究	76
4.1 淬硬钢 GCr15 切屑形成的切削实验条件	77
4.2 精密切削淬硬钢 GCr15 的锯齿形切屑微观观察	77
4.2.1 锯齿形切屑齿顶端面微观形貌	77
4.2.2 锯齿形切屑底端面微观形貌	77
4.2.3 锯齿形切屑横断面微观观察	78
4.2.4 锯齿形切屑断裂面微观形貌	79
4.3 淬硬钢精密切削过程绝热剪切行为的有限元模拟与分析	80
4.3.1 淬硬钢精密切削过程二维有限元模型的建立	80
4.3.2 锯齿形切屑形成过程的有限元模拟结果	82
4.4 锯齿形切屑形成过程模型	86
4.5 精密切削淬硬钢 GCr15 的切屑形态研究	86
4.5.1 不同切削速度对切屑形态的影响	87
4.5.2 不同背吃刀量对切屑形态的影响	89
4.5.3 不同进给量对切屑形态的影响	91
4.5.4 带状切屑向锯齿形切屑转变的界限	92
第5章 硬态切削加工系统稳定性极限预测	94
5.1 再生型淬硬钢精密切削系统动力学分析	94
5.1.1 淬硬钢的再生型圆弧刀精密切削颤振系统动力学模型	94
5.1.2 再生型圆弧刀精密切削系统动力学模型的建立	96
5.1.3 淬硬钢精密切削系统稳定性极限分析	96
5.2 稳定性极限的数值仿真方法与动力学参数影响分析	99
5.2.1 硬态切削系统稳定性极限的数值仿真方法	99
5.2.2 切削系统动力学参数对稳定性极限的影响	100
5.3 淬硬钢精密切削系统动力学参数的测量	102
5.3.1 系统阻尼比的测量	103

5.3.2	刚度系数 k 的测量	104
5.3.3	系统固有频率的测量	105
5.3.4	切削刚度系数 k_c 的识别	106
5.3.5	方向系数 u 的识别	112
5.3.6	淬硬钢精密切削的稳定性极限预测结果	113
5.4	淬硬钢精密切削的稳定性极限预测条件	113
5.4.1	不同刀尖圆弧半径的三维稳定性极限预测	113
5.4.2	不同进给量的三维稳定性极限预测	115
5.5	多参数的稳定性极限预测结果分析	116
5.5.1	硬态切削加工中的稳定性极限预测结果影响因素分析	116
5.5.2	振动抑制措施的讨论	117
第6章	稳定性极限预测的实验考证及切削振动分析	118
6.1	淬硬钢精密切削稳定性研究实验切削条件	118
6.2	稳定性极限预测的单切削参数法实验考证	119
6.2.1	单切削参数法实验验证参数选择	119
6.2.2	稳定性极限预测的单切削参数法实验考证结果	120
6.2.3	非颤振状态与切削颤振的加工表面形貌	120
6.3	稳定性极限预测的变背吃刀量法实验考证	121
6.3.1	变背吃刀量法实验原理	121
6.3.2	稳定性极限预测的背吃刀量法实验考证结果	122
6.3.3	变背吃刀量法非颤振向切削颤振状态转变的加工表面形貌	123
6.4	切削振动信号及其谱阵分析	124
6.4.1	空载状态到切削稳定状态过渡过程的刀具振动信号特征	124
6.4.2	平稳切削状态与切削颤振状态的切削振动信号特征	126
6.4.3	动态切削力与振动信号的相关特性分析	128
第7章	精密硬态切削加工表面粗糙度与塑性侧流研究	130
7.1	淬硬钢切削加工表面塑性侧流的形成机理研究	130
7.1.1	淬硬钢切削加工表面塑性侧流三维有限元仿真	130
7.1.2	表面塑性侧流形成过程模型与形成机理	134
7.2	加工表面塑性侧流程度评判标准的建立	134
7.3	淬硬钢切削加工表面侧流数学模型	135
7.3.1	塑性侧流凸峰高度数学模型的建立	135
7.3.2	圆弧刃与直线刃组合的车削表面残留高度几何数学模型建立	137

7.3.3 考虑塑性侧流影响的切削加工表面粗糙度数学模型建立	138
7.3.4 塑性侧流凸峰高度及其影响下的表面粗糙度数学模型的 讨论	138
7.4 表面塑性侧流与表面粗糙度的硬态切削实验研究	138
7.4.1 实验条件	138
7.4.2 刀尖圆弧半径对表面塑性侧流的影响	139
7.4.3 进给量对表面塑性侧流的影响	141
7.4.4 精密硬态切削加工表面粗糙度的正交实验优化	143
第8章 精密硬态切削的多元非线性回归模型与综合优化	146
8.1 精密硬态切削过程的多目标优化实验设计	146
8.2 精密硬态切削过程的多元非线性回归综合模型	147
8.2.1 表面粗糙度建模	147
8.2.2 刀具切削行程建模	148
8.2.3 刀具径向振动建模	150
8.4 精密硬态切削过程的多目标优化	151
8.5 优化结果的实验验证	152
参考文献	153

第1章 绪 论

1.1 引言

淬硬钢是典型的耐磨和难加工材料,这类工件经淬火处理后硬度高达 50~65HRC。由于其具有较高的机械强度和抗疲劳磨损能力,因而被广泛应用于轴承、汽车、模具等工业领域。一般情况下,淬硬钢工件的粗加工是在淬火前进行的,在淬火后再进行磨削精加工。但磨削加工效率低、砂轮及磨削液消耗量大、成本高且切削废液污染程度严重。随着 PCBN 刀具技术的发展和高性能加工机床系统的应用,把硬态切削作为淬硬钢最终精加工方法已经成为了现实。淬硬钢的以车代磨是一种有利于环境保护的清洁生产工艺和绿色制造技术,与传统的磨削加工工艺相比,淬硬钢切削加工具有较高的加工柔性和加工效率,可以避免污染和节省能源,还能获得与磨削相当甚至超过磨削的加工表面质量^[1]。20 世纪 80 年代中期以来,国内外相继开始研究加工效率高、加工柔性好、能耗低、污染小的“以车代磨”加工工艺^[2]。

硬态切削加工还有许多特殊的切削规律需要探索,尤其是切削过程稳定性控制和加工表面塑性侧流等方面的理论还缺乏系统的研究工作。

一方面,硬态车削加工工件硬度较高,且采用负倒棱圆弧刃的刀具,使得切削过程的径向切削力大于主切削力,这些因素会造成硬态车削过程容易产生切削振动。切削过程中的振动导致的不稳定切削(切削加工过程出现的强烈振动)对生产效率、加工质量、加工环境、成本以及机床和刀具寿命的影响比普通切削大得多,主要表现在:①对加工质量的影响,刀具相对于工件加工表面的振动会使加工表面产生振痕,降低工件的表面质量和精度,将严重影响被加工零件的使用性能;②对生产效率的影响,有时不得不降低切削用量来避免切削过程中颤振的发生,使

得生产效率得不到应有的提高；③对加工环境的影响，切削过程中发生的高频振动，有时还会伴随产生一种刺耳的尖叫声，造成噪声污染，危害操作者的身心健康；④对机床和刀具寿命的影响，刀具相对于工件振动时，切削截面、切削角度、切削力等均将随之发生周期性的变化，工艺系统的各个组成环节将承受动态载荷的作用，加重刀具磨损，甚至产生崩刃，对人身安全产生威胁，机床连接特性会受到破坏，严重时甚至使切削加工无法继续进行。因此，对精密硬态切削过程的振动产生与抑制的研究是成功实施硬态切削技术的关键问题之一。

另一方面，作为精加工方法，某些条件的硬态切削加工表面依然存在较严重的塑性侧流，会影响加工表面的完整性和其使用性能，并会大大增大表面粗糙度值。国内外学者对硬态切削加工表面的完整性研究大多集中在表面残余应力状态控制、表面白层的成因等方面，对塑性侧流生成规律与抑制措施的研究将丰富硬态切削理论，并将成为推进硬态切削技术应用的重要内容和关键问题之一。

本书将以上述问题为重点，介绍高速条件下的精密硬态切削研究。

1.2 淬硬钢精密车削的优点

与传统的硬材料的磨削加工相比，用车削方式完成淬硬钢精加工即最终加工具有以下优点：

1. 加工质量好

切除相同体积所消耗的能量仅为磨削的 20%，因此产生的切削热较少，加工表面不易引起烧伤和微小裂纹，易于保持工件表面性能的完整性，如图 1-1 所示，可以获得和磨削相当的加工表面粗糙度值和尺寸精度，而在白层和表面残余应力分布等方面比磨削更有优势。

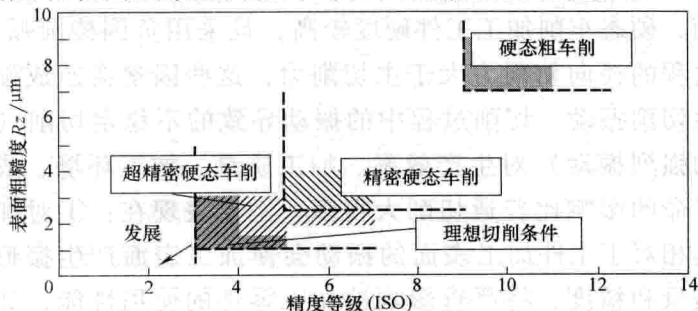


图 1-1 硬态切削表面粗糙度和精度等级

2. 洁净, 绿色

切削加工中的环保问题日益严峻, 磨削加工产生的废液和废弃物越来越难以处理和清除, 而且对人体有害, 而硬态切削无须加切削液, 意义重大。

3. 加工效率高, 经济效益好

切削效率高、加工时间短; 设备投资费用小 (车磨投资是磨床的 $1/3 \sim 1/2$, 而且占地面积小, 其他辅助系统的费用也低), 可降低加工成本。

4. 可提高加工柔性

一次装夹可完成多表面的加工, 突破了砂轮磨削的限制, 通过改变切削刃及走刀方式可以加工出几何形状各异的工件。

1.3 硬态切削机理的国内外研究现状

根据参考文献 [3] 的研究成果, 工件硬度 50HRC 是硬切削的硬度界限, 大于这个硬度时, 会产生金属软化效应, 而且切削温度的变化具有独特的规律, 并由此导致切削力、已加工表面残余应力分布和白层的产生情况发生变化。硬态切削机理有别于一般的金属切削理论。

从 20 世纪 70 年代起, 学者们就开始对硬材料的切屑形成机理进行研究, 到 20 世纪 80 年代初期, 学者们提出硬态切削概念并开始进行相关机理的研究。20 世纪 90 年代以后, 美国、日本等国家, 以及欧洲的学者都相继开展对 PCBN 刀具硬态切削机理的研究, 我国学者随后也开展了对硬态切削机理的研究工作。国内外的代表人物见表 1-1。

表 1-1 硬态切削机理国内外研究的学者代表人物

国家	代表人
美国	美国普渡大学工业工程学院 M. M. BARASH 教授 ^[4] 和 C. R. LIU 教授 ^[5] 、美国 OKLAHOMA 大学工程学院 Y. MATSUMOTO 教授 ^[6,7] 、美国国家工艺和标准研究院 M. A. DAVIS 教授 ^[8] 、Y. K. CHOU 博士 ^[9]
德国	HANNOVER 大学生产工程和机床研究所 H. K. TÖNSHOFF 教授 ^[10] 和 ACHEN 工业大学 W. KÖNIG 教授 ^[11]
加拿大	MCMASTER 大学机械工程系 M. A. ELBESTAWI 教授 ^[12]
法国	GÉRARD POULACHON 博士 ^[13]
英国	DE BEERS 工业金刚石公司技术经理 M. A. FLEMING ^[14] 、伯明翰大学机械工程与制造学院 DAVID K. ASPINWALL 教授 ^[15] 、M. C. SHAW 教授 ^[16]
巴西	ABRÃO MENDES 博士 ^[15]
日本	鸿野雄一郎 ^[17] 、喜田义宏 ^[18] 、新谷一博 ^[19] 、大谷敏昭 ^[20]
中国	哈尔滨工业大学袁哲俊教授 ^[21,22] 和韩荣第教授 ^[23] 、大连理工大学张弘弢教授 ^[24] 、王敏杰教授 ^[25] 等, 哈尔滨理工大学刘献礼教授 ^[26,27] 、北京航空航天大学陈五一教授 ^[28] 、郑州新亚超硬材料有限公司江晓乐 ^[29] 、广西大学吴湘宁 ^[30] 等

国内外的学者在此方面的研究主要为刀具磨损、切削力、金属软化效应、冷却润滑技术和表面完整性方面,对切屑形成机理、已加工表面质量和切削过程优化等方面的研究才刚刚起步,而对表面侧流现象则少有研究,对硬车削过程稳定性的研究未见报道。

1.3.1 锯齿形切屑形成机理

目前,锯齿形切屑的形成机理在学术界并无统一的观点,主要有两大理论体系:绝热剪切理论和周期性断裂理论。

1. 绝热剪切理论

Komanduri 等是锯齿形切屑形成绝热剪切理论的最早提出者。他认为,锯齿形切屑形成过程可分为两个阶段,突变性剪切断裂是第一阶段,在这个阶段,发生绝热剪切失稳而导致了沿剪切面剪切断裂;材料隆起形成切屑是第二阶段,在这个阶段,在刀具的作用下,被切材料受力并产生少量塑性变形而隆起,最后形成切屑片段^[31,32]。Davies 等人认为,切削速度增大达到一定的临界值,破坏了动平衡状态,发生绝热剪切而形成锯齿形切屑^[33,34]。T. J. Burns 对淬硬钢的切屑形态进行了研究,他认为随着切削速度的增加,切屑会由连续切屑向锯齿形切屑转变,低速时产生带状切屑,高速时产生锯齿切屑,随着切削速度的变化,锯齿形切屑形态的变化比较有规律^[35]。Hou 认为第一变形区的温度软化和应变强化作用下产生热塑性剪切失稳是锯齿形切屑生成的原因^[36]。Barry J 和 Byrne G 研究了淬硬钢 BS817M40 车削时锯齿形切屑的形成机理,其研究结果支持绝热剪切理论,并指出绝热剪切带起始于刀尖处,一直延伸到工件自由表面,如图 1-2 所示^[37]。

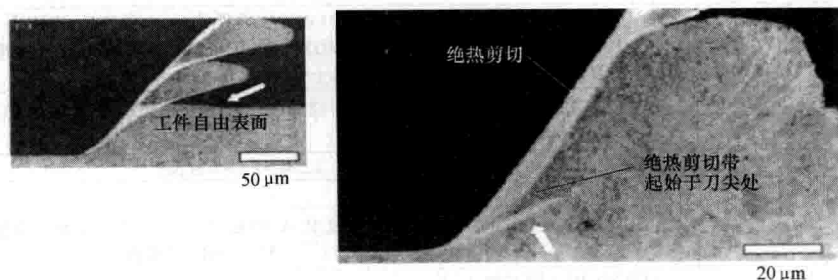


图 1-2 通过快速落刀实验得到绝热剪切带

大连理工大学的王敏杰教授和段春争博士等人研究了硬态切削中锯

齿形切屑形成过程的绝热剪切行为,在经历了马氏体相变、碳化物析出及动态再结晶过程后形成了绝热剪切带^[38,40]。哈尔滨理工大学的刘献礼教授和大连理工大学的文东辉博士对淬硬轴承钢 GCr15 进行了切削试验研究,指出生成锯齿形切屑的临界硬度为 50HRC^[3,41]。广东工业大学的王成勇教授和秦哲博士建立了锯齿形切屑形成的几何模型,指出锯齿形切屑的变形程度决定了淬硬钢加工的难易程度,并对锯齿形切屑的变形规律进行了探讨^[42]。南京航空航天大学的何宁教授对高强度钢正交切削的绝热剪切行为进行了相关的实验研究^[43]。

2. 周期性断裂理论

Shaw 和 Vyas 提出了周期性断裂理论,认为切屑从工件自由表面向切削刃扩展的周期性整体断裂是锯齿状切屑的形成原因^[44,45]。Poulachon G 等实验研究了车削淬硬钢 100Cr6 时锯齿形切屑形成的机理,结论支持锯齿形切屑形成的周期性断裂理论,把整个锯齿形切屑形成的过程分为了 4 个阶段,如图 1-3 所示^[46]。Konig 等对车削淬硬钢时锯齿形切屑形成机理进行了研究,研究结论支持锯齿形切屑形成的周期性断裂理论^[47]。

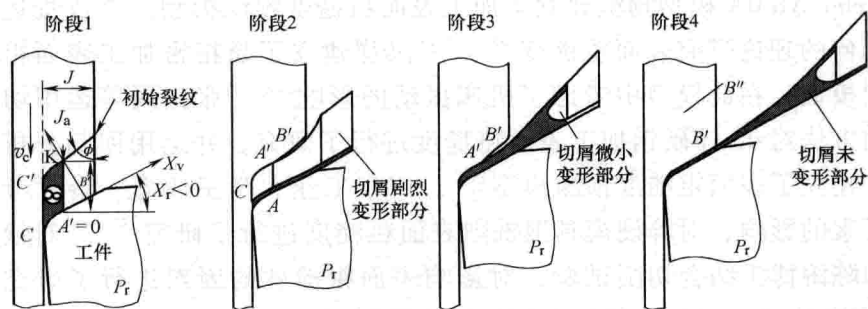


图 1-3 锯齿形切屑形成的不同阶段

1.3.2 硬态切削表面完整性的研究

目前国内外学者对硬态切削表面完整性的研究主要集中在切削表面粗糙度、残余应力的分布、白层的组织形态等方面。

1.3.2.1 硬态切削表面粗糙度的研究

Thiele 等人用 PCBN 刀具对 AISI52100 钢进行硬态切削实验,研究了各切削参数和刀具参数对表面粗糙度的影响。研究表明,在所有参数中刀尖圆弧半径对加工表面粗糙度的影响是最显著的,刀具刀尖圆弧

半径大,则表面粗糙度值小^[48]。W. Grzesik 建立表面粗糙度方程,他采用的是最小切削厚度方法^[49]。Singh 等人对影响硬态切削表面粗糙度的因素进行了研究。研究表明,进给率、刀尖圆弧半径和切削速度对表面粗糙度的影响显著,影响程度依次减弱。对表面粗糙度影响较小的是刀具前角^[50]。Z. Khan. B. Praad、C. F. Cheung、Jiuinn-long 都对表面粗糙度进行了研究,Z. Khan. B. Praad 采用模拟退火的方法^[51],C. F. Cheung 采用多尺度分析方法^[52],Jiuinn-long 采用 FFT 变化模拟的方法^[53]。O. B. Abouelatta 对影响表面粗糙度的因素进行了研究,研究表明,刀具几何参数、进给量和刀具-工件间振动是影响表面粗糙度的主要因素^[54]。P. V. S. Surech 采用遗传算法优化的方法,建立了加工曲面表面粗糙度的数学模型^[55]。P. G. Benardos 对表面粗糙度进行了预测方法的综述,进行了深入的相关理论研究,并进行了切削试验,结合试验数据进行了基于人工神经网络方法的优化^[56]。

在国内,许多学者也进行了相关表面粗糙度研究工作。李丽伟博士^[57]对加工表面粗糙度的影响因素进行了分析,用小波分析方法及 Wavelet-ARMA 模型预测建立了加工表面粗糙度预测模型。李成贵运用分形几何的理论研究表面粗糙度^[58]。王洪祥建立了超精密加工表面粗糙度预测模型,在此模型中考虑了机床振动的影响^[59]。张玉周等运用切削试验的方法对 45 淬硬钢加工表面粗糙度进行了研究,并运用回归分析的方法,建立了表面粗糙度预测模型^[60]。广东工业大学王成勇、秦哲考虑振动因素的影响,对淬硬模具钢铣削表面粗糙度进行了研究^[42]。刘献礼教授和陈涛博士结合切削试验,对影响表面粗糙度的因素进行了研究,运用 RSM 法建立了硬态切削表面粗糙度预测模型,并通过试验验证了模型的准确性^[61,62]。

国内外学者基于试验方法或解析的方法对硬态切削表面粗糙度进行了理论建模,在解析理论建模方法中,有针对刀尖为直线刃切削和圆弧刃切削的理论建模,但圆弧刃和直线刃组合表面粗糙度解析建模方法少见研究。

1.3.2.2 硬态切削残余应力的研究

Dahlman 的研究表明,硬态切削加工表面的残余压应力要更深,其表层残余应力深度是相同去除体积磨削加工的 2 倍以上^[63]。Liu M 和 Barbacki 等人对影响硬态切削表面残余应力分布的因素进行了研究,指出随着进给量的增加,硬态切削表面会形成拉应力,并使得压应力深度增加,

而切削深度对残余应力的影响并不显著^[64,65]。Hua 等人的研究表明,具有倒棱刃口的 PCBN 刀具导圆半径在 0.02 ~ 0.05mm 时,轴承钢的硬态切削表面有比较好的残余应力分布^[66]。Thiele 等人研究了刀具及切削参数对残余应力的影响规律,发现增大切削速度及加剧后面磨损,会使加工表面压应力减小并易生成拉应力,前角、刀尖圆弧半径的增大可增大压应力的深度和振幅^[67]。Umbrello 通过切削参数和刀具几何参数的优化来控制残余应力状态^[68]。上海交通大学陈明教授的研究结果表明,在一定范围内,随着刀具前角增大,工件表面产生残余拉应力的值先增大后减小^[69]。参考文献 [70] 在残余应力预测控制和整体薄壁件加工变形控制方面也取得了一定进展。

1.3.2.3 硬态切削白层的研究

硬态切削表面会生成硬度高、耐蚀性好,但脆性高的白层。目前对其形成机理主要有两种观点:一种观点认为相变是白层的成因,白层是切削过程快速加热和骤然冷却所产生的细晶粒;第二种观点认为白层是由塑性变形而得到的非常规型细晶粒^[71]。

Ramesh 等认为硬态切削轴承钢表面白层的成因在不同切削速度下是不同的,在低速切削时,加工表面剧烈塑性变形使晶粒细化而生成白层组织;在高速切削时,加工表面层在高温和应力的作用下产生相变而生成白层^[72]。Kishawy 和 Chou 等研究了刀具磨损情况对白层深度的影响,研究表明后面磨损量加大会增大白层厚度^[73,74]。Poulachon 等对不同材料的淬硬钢切削表面白层进行了研究,认为工件材料组织结构的精细程度将影响白层的生成难度^[75]。Barry 研究了淬硬钢加工表面白层的微观结构,通过透射电子显微镜观察到白层微观结构和绝热剪切带的结构相似,认为白层形成和绝热剪切过程有关^[76]。Abrao 观察了轴承钢 AISI52100 硬态切削表面和亚表面的组织形态,发现其微观组织由未回火层(白)和过回火层(黑)组成^[77,78]。

张弘毅教授等采用正交试验法分析了 PCBN 刀具硬态切削轴承钢 GCr15 时切削参数等因素对白层的影响规律^[79,80]。徐进的研究表明,切削用量加大以及工件材料硬度增加,会使白层厚度增大,加工过程中切削区的降温手段可以成为抑制白层生成的方法^[81]。文东辉等进行的微观观察表明,硬态切削表面组织是由白层、过渡层和基体材料组成,如图 1-4 所示^[82,83],并指出白层中存在马氏体、奥氏体和碳化物等组织形态,

白层的高硬度是由于超细颗粒和大位错密度导致的,控制后面磨损量可达到控制白层厚度的目的。

1.3.2.4 硬态切削加工表面塑性侧流的研究

切削过程中,一部分被切削材料相对于刀具作侧向的塑性流动,简称为塑性侧流。塑性侧流将对工件表面粗糙度、加工表面完整性及其使用性能产生较大影响。而国内外学者对硬态切削加工表面塑性侧流的研究极少。刘献礼教授和文东辉博士在2002年提出,某些条件下硬切削表面存在较重的塑性侧流现象,并讨论了后面磨损对表面塑性侧流的作用结果,指出当后面磨损量超过0.2mm时,会发生严重塑性侧流^[83,84]。此研究首次提出了硬态切削的塑性侧流问题,该研究具有重要意义,但他们只对侧流进行了定性的研究,没有深入阐述侧流的形成机理,还需要进行硬态切削加工表面塑性侧流量化的研究和侧流对加工表面质量影响的深入研究。

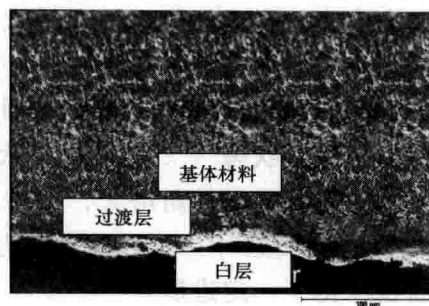


图 1-4 PCBN 刀具硬态切削过程
中轴承钢表面微观结构

1.3.3 切削过程有限元模拟技术国内外研究现状

有限元仿真技术在20世纪70年代被引入到切削加工领域,用来模拟切削过程。1973年,美国的Klamecki最先应用有限元技术对金属切削加工中切屑形成机理进行了系统的研究^[85]。Shi和Guo运用Zener-Hollorn方程材料模型对切削淬硬钢过程进行了仿真,对切削力、切削热以及所生成的锯齿形切屑、白层进行了预测^[86,87]。Ng和Umbrello等运用John-Cook模型建立了切削过程有限元模型,模拟结果与实验结果具有较好的一致性^[88,89]。Flice等和Özel等运用不同切屑摩擦模型进行切削过程的有限元仿真,预测得到切削温度具有较大差异,基于实验验证,应力多项式摩擦模型的预测温度和预测结果相对更准确,而不同切屑摩擦模型得到的切削力和刀屑接触长度变化不大^[90,91,92]。Liu C R在有限元模拟方面也做了大量的研究工作^[93]。

南京航空航天大学何宁对高速切削钛合金切屑形成过程进行了有限

元模拟,揭示了钛合金锯齿状切屑的形成机理^[94,95]。湘潭大学的彭锐涛建立了预应力硬态切削 42CrMo 的正交切削热力耦合有限元模型,得出了不同的预应力对加工表面残余应力的影响关系,并进行了相关的试验验证^[96]。广东工业大学王成勇教授和唐德文博士结合实验研究对淬硬钢切削加工中切屑形成过程,应力、应变分布以及温度梯度分布情况进行了有限元仿真^[97]。南昌大学的闫洪对淬硬钢精车过程中切屑形成规律及流动应力模型进行了热力学耦合的有限元模拟,并考证了切削过程中的工艺参数与工件性能和刀具的影响^[98]。刘献礼教授和王宇博士针对高速精密硬态切削过程,进行有限元仿真,经试验验证,该仿真具有良好的精度^[99]。

国内外学者对材料流动应力本构模型、刀-屑接触摩擦模型及热力耦合作用下硬态切削加工应力、应变场和温度场、切削力、刀具磨损、加工表面残余应力有限元模拟等方面进行了大量的研究工作,但从目前的研究结果来看,因研究条件与切削加工条件的不同,使得实验结果和仿真结果也各不同,都具有一定的适用范围,存在着局限性,试验数据和研究结果不能相互支持和共享。

1.4 车削加工稳定性极限预测的研究现状

切削颤振的预测控制是应用数值仿真模拟的方法预测切削系统的稳定性极限,并据此选用切削参数,使切削过程始终都能在稳定区进行。

近年来,国内外学者在车削颤振预测方面进行了许多的研究工作,美国费城 Temple 大学 Richard Y. Chiou 等人考虑刀具磨损的影响,对细长轴上车槽的切削稳定性极限进行了研究^[100]。图 1-5 是极限切削宽度预测结果与试验考证结果的对比数据,试验结果与预测结果大致相符。

美国宾夕法尼亚州立大学的 Eric-R. Marsh 等人构建了车削系统动力学模型,对切削系统进行了稳定性极限预测,并进行了试验验证,如图 1-6 所示。Eric-R. Marsh 等人的研究工作不足的是,稳定性极限预测与试验考证的参数不同,二者完全不对应。

美国普渡大学的 Bason 等人采用了图 1-7 所示的框架式刀架座结构的试验装置,将刀具系统作为主振系统,根据筋板的变化改变振动系统的刚性,建立了车削系统的动力学模型,进行了系统的稳定性分析,然后对切削系统的稳定性极限进行了预测,采用表面粗糙度 Ra 作为评判参数