



国家出版基金资助项目·“十二五”国家重点图书
航天科学与工程专著系列

FABRICATION TECHNOLOGIES OF NATURAL DIAMOND TOOLS

天然金刚石刀具制造技术

● 孙涛 宗文俊 李增强 编著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



国家出版基金资助项目·“十二五”
航天科学与工程专著系列

FABRICATION TECHNOLOGIES OF NATURAL DIAMOND TOOLS

天然金刚石刀具制造技术

● 孙 涛 宗文俊 李增强 编著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书针对天然金刚石刀具的制造技术,从天然金刚石机械刃磨机理和工艺入手,阐述天然金刚石刀具制造技术的发展趋势,分析天然单晶金刚石的特性,介绍天然金刚石刀具的常规制造方法以及天然金刚石的定向与焊接技术,进行天然金刚石的脆塑转变机械研磨机理分析,提出各向异性晶体材料机械研磨创新工艺,分析天然金刚石刀具的磨损机理,设计新型研磨机床,进行天然金刚石刀具的参数检测技术研究和刀具质量评价标准研究,分析天然金刚石刀具参数对超精密加工表面质量的影响机制并建立刃口极限锋利度理论,介绍超精密切削加工的典型应用等。

本书可作为从事金刚石刀具制造方面研究人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

天然金刚石刀具制造技术/孙涛,宗文俊,李增强编著.
—哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2013.5
ISBN 978-7-5603-3863-7

I. ①天… II. ①孙… ②宗… ③李… III. ①金刚石—
刀具(金属切削)—生产工艺 IV. ①TG729.06

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 289008 号

策划编辑 田 秋
责任编辑 范业婷 刘 瑶
封面设计 高永利
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>
印 刷 哈尔滨市工大节能印刷厂
开 本 787mm×960mm 1/16 印张 19.75 字数 430 千字
版 次 2013 年 5 月第 1 版 2013 年 5 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5603-3863-7
定 价 68.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

序

天然金刚石刀具在国防工业和高技术领域中有广泛应用,天然金刚石刀具可以用于多种材料的超精密切削加工,为各类高精度零件的制造提供重要的技术支撑。由于天然金刚石是世界上最硬的物质,并且由于它的各向异性,将其制造成刃口锋利的切削刀具极其困难。天然金刚石刀具的制造技术是当前国际国内先进制造领域的重要前沿技术之一。

哈尔滨工业大学很早就开展了超精密金刚石切削工艺和金刚石刀具制造和刃磨技术的研究。本书作者孙涛等已从事本领域的科研攻关工作十几年,对金刚石刀具制造技术和理论已有较深入全面的研究和掌握,在这样的背景下完成本书的撰写工作。

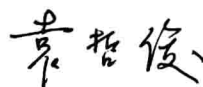
《天然金刚石刀具制造技术》一书的各章节结构安排合理,围绕各关键技术逐步展开,叙述清晰。本书既涵盖了金刚石刀具国内外研究的前沿热点理论成果与关键技术难题资料,又概括了作者多年积累的该领域科学研究理论成果见解和实际制造刃磨技术经验,对于从事本领域科技工作的读者,具有很好的参考价值 and 指导意义。

本书对天然金刚石刀具的制造技术和理论进行了全面的分析和阐述。由于国际上对天然金刚石的研磨理论有多种学术见解,本书作者做了一定评述,并给出了自己的研究成果和见解。该书综述了天然金刚石刀具制造技术的国内外发展现状及其在超精密切削加工技术中的重要地位,并对天然金刚石刀具制造中的关键技术进行了简要概述;讲述了天然金刚石晶体分类与选料、晶体定向、晶体切割和金刚石刀头的固定方法;讲述了金刚石刀具的设计与加工制造方法,并针对实际应用情况,介绍几种典型金刚石刀具的设计方案;讲述分析了天然金刚石晶体的机械研磨理论,分析叙述了机械研磨的微观机理和分子动力学模型,晶体表层材料在机械研磨过程中的脆塑转变去除机理,以及晶体机械研磨效率的各向异性评价与表述;讲述了天然金刚石刀具刃磨机床的设计与制造,介绍了典型的

国内外金刚石刀具刃磨设备的性能和使用情况及设计制造中的关键技术,并重点阐述其机械系统和电控系统的设计流程;讲述了天然金刚石刀具机械刃磨工艺技术,介绍了影响切削刃钝圆半径(锋利度)的研磨工艺技术和影响圆弧刀刃精度的成型原理与方法;研究探讨了天然金刚石刀具的极限刃口锋利度,讲述了天然金刚石刀具刃口锋利度和其他刀具参数的检测以及金刚石刀具的质量评价方法等。该书内容丰富,理论分析深入,不仅有国内外的最新成果和资料,同时有自己的实验研究成果和学术见解。

该书是国内外第一本系统全面讲述天然金刚石刀具制造理论和技术的书籍,是一本既有较高学术水平又有实用价值的专著。它是从事超精密切削加工和金刚石刀具制造刃磨工作的科研人员和工程技术人员的一本重要参考书。

哈尔滨工业大学教授



2013 年 4 月 14 日

前 言

天然金刚石具有许多特殊的优异性能,是自然界最坚硬的物质,在工业中得到了广泛应用。利用天然金刚石所制造的刀具精度高、耐磨损、硬度高、化学稳定性好,已被广泛用于有色金属、有机玻璃、特种陶瓷等材料的切削加工,为各类高精度零件的加工生产提供了重要的技术支持。

超精密金刚石车削加工技术已有 50 多年的发展历史,这一技术在航空、航天、生物医学、能源、天文等军工与民用高新技术领域得到了广泛的应用。随着近十几年超精密金刚石车削机床精度的提高和加工工艺研究的深入,天然金刚石刀具的制造与修磨越来越成为必须要解决的关键技术之一。利用金刚石车削可以获得高精度的球面、非球面、自由曲面类光学零件,这类零件的制造精度不仅取决于机床的运动控制精度和稳定的环境因素,同时也取决于圆弧刃金刚石刀具的制造精度和刀具切削工艺参数。由于天然金刚石晶体的各向异性的特征,且在加工中刀刃上各点随晶向有不同程度的磨损,在使用一定时间后需要修磨,才能满足各类形状零件的高精度加工要求,生产企业购买新刀和刀具修磨的费用在加工成本中占有很高的比重,如果不了解天然金刚石的性能、不掌握修磨工艺,修磨后的刀具与新刀相比其指标将大大降低,将影响刀具的继续使用。

由于天然金刚石的高硬度和各向异性的结构特性,使天然金刚石刀具的制造尤为困难。目前天然金刚石刀具的制造方法有多种,高精度天然金刚石刀具制造的成熟工艺方法仍然是机械刃磨方法,刀具制造的主要难点不仅包括刀具的机械刃磨机理与工艺问题,还包括刀具的优化设计、刀具磨削机床性能与精度要求、刀具的检测以及刀具的合理使用等,所以要在理论、工艺、装备、测试、应用等诸多方面了解和掌握相对完整的天然金刚石研磨机理、刀具修磨工艺与检测评价等刀具制造体系,才能更好地使用和应用刀具进行车削工艺研究,低成本、高效加工出各类高精度零件。

哈尔滨工业大学是国内较早从事超精密金刚石车削工艺研究的院校,在超精密金

石车床制造、超精密切削机理与工艺研究、超精密切削环境控制、金刚石刀具研究等方面取得了一定进展。哈尔滨工业大学精密工程研究所是专门从事超精密加工工艺、超精密加工装备、超精密检测等研究的专职研究所,该所的前身机械系精加工研究室成立于1963年,50多年来研制了多台套精密非标设备和精密加工装备,进行了大量精密加工理论与工艺研究。目前设有国防科技工业超精密机械加工技术研究应用中心、教育部“超精密加工与测量技术”创新研究团队和黑龙江省超精密与特种加工重点实验室。近年来共承担精密超精密加工领域国家自然科学基金、国家863计划、预先研究计划、基础科研项目及重大工程项目等80余项,获得省部级科技奖励10余项,发表相关的研究论文800多篇,已经形成了集基础研究、预先研究和工程化研究相结合的科学研究体系。自制和引进了多台超精密金刚石车削加工机床和金刚石刀具刃磨制造与检测设备,开展了金刚石刀具制造的理论、工艺、装备等方面的研究,本书即是在上述工作基础上进行的阶段性总结。

本书共9章。第1章绪论,主要介绍金刚石车削技术中金刚石刀具的作用、天然金刚石刀具制造技术发展是目前刀具制造技术存在的问题等;第2章天然金刚石晶体特性及预处理技术,主要介绍金刚石晶体特性、金刚石的分类与选料、单晶金刚石的切割、定向与焊接等前期预处理技术;第3章金刚石刀具的设计与制造方法,主要针对金刚石刀具的实际应用情况,介绍几种典型金刚石刀具的设计技术、刀具晶面设计准则、金刚石刀具新型制造方法等;第4章金刚石晶体的机械研磨理论,主要介绍金刚石晶体机械研磨的微观机理、机械研磨的分子动力学模型、金刚石晶体的脆塑转变问题、机械研磨的微观解释以及金刚石晶体的各向异性评价等;第5章天然金刚石刀具研磨机床的原理与设计,主要介绍国内外金刚石刀具刃磨设备的设计制造研究现状、国内外典型金刚石刀具刃磨设备的型号与性能、总体设计方法与设计方案、机械与数控系统设计、研磨设备机械结构静动态特性分析、技术指标和误差分析等;第6章金刚石刀具的机械研磨工艺,主要介绍相关工艺参数对刃口锋利度的影响、刃磨工艺参数优选、前后刀面晶向对刃口锋利度的影响、圆弧刃金刚石刀具圆弧精度的研磨工艺等;第7章金刚石刀具的刃口极限锋利度,主要针对机械研磨过程中金刚石刀具微观机械强度问题,介绍金刚石刀具刃口极限锋利度理论及工艺实现等;第8章天然金刚石刀具的参数检测与质量评价,主要介绍金刚石刀具的主要技

术指标测试技术发展、刃口锋利度的检测技术、刀尖圆弧圆度检测技术、前后刀面的粗糙度检测技术以及刀具检测标准体系等;第9章天然金刚石刀具的应用,主要在金刚石刀具切削理论、工艺、机床等基础上,介绍几种金刚石刀具的典型应用。

全书由哈尔滨工业大学精密工程研究所组织撰写。上述第1、9章由孙涛为主撰写,第3、4、6、7章由宗文俊为主撰写,第2、5、8章由李增强为主撰写,并参考了上述三人的博士学位论文相应章节。全书由孙涛统稿。

由于国际上对天然金刚石的研磨理论尚未统一,存在多种学术思想,有多种研磨制造工艺尚需要大量的实验研究和深入的理论分析,因此本书尚有诸多不足和可能的错误之处,敬请同行专家批评指正,以共同提高我国天然金刚石刀具的制造技术水平。希望本书对提高我国超精密金刚石车削加工整体技术水平、满足超精密车削加工用高精度天然金刚石刀具的市场需求和使用,起到一定的积极作用。

本书撰写过程中得到了哈尔滨工业大学机械制造及自动化学科袁哲俊教授、董申教授、航空宇航制造系周明教授的诸多指导,并提出了修改建议,同时得到国家出版基金资助,在此一并表示感谢。

编著者

2013年3月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 天然金刚石刀具对超精密车削加工的重要作用	1
1.1.1 金刚石刀具刃口锋利度对超精密车削加工的重要作用与影响	1
1.1.2 金刚石刀具刀刃几何形状对超精密车削加工的影响	3
1.1.3 金刚石刀具刀刃轮廓精度对超精密车削加工的影响	5
1.1.4 金刚石刀具刀刃微观质量对超精密车削加工的影响	6
1.2 天然金刚石刀具制造技术的发展	7
1.2.1 天然金刚石刀具的制造方法和主要技术指标	7
1.2.2 天然金刚石刀具制造技术的发展	9
1.2.3 天然金刚石刀具应用技术的发展	13
1.3 天然金刚石刀具制造中的关键问题	14
1.3.1 天然金刚石刀具刃磨理论方面的关键问题	15
1.3.2 天然金刚石刀具的设计技术	16
1.3.3 金刚石刀具刃磨的关键工艺技术问题	17
1.3.4 天然金刚石刀具刃磨机床的问题	18
1.3.5 天然金刚石刀具检测与评价方面存在的问题	19
1.3.6 天然金刚石刀具微观应用领域存在的问题	20
参考文献	21
第 2 章 天然金刚石晶体特性及预处理技术	25
2.1 天然金刚石晶体特性	25

2.1.1	物理化学性质	25
2.1.2	晶体学特性	27
2.2	天然金刚石的分类与选料	31
2.2.1	金刚石的分类	31
2.2.2	选料原则	34
2.3	天然金刚石的定向	35
2.3.1	人工目测晶体定向	35
2.3.2	激光晶体定向	37
2.3.3	X射线晶体定向	40
2.4	天然金刚石的切割	43
2.4.1	劈割	43
2.4.2	锯切	44
2.4.3	激光切割	44
2.5	天然金刚石的装卡	46
2.5.1	机械夹持法	47
2.5.2	粘结法	47
2.5.3	镶嵌法	48
2.5.4	粉末冶金法	49
2.5.5	钎焊法	49
	参考文献	54
第3章	金刚石刀具的设计与制造方法	55
3.1	金刚石刀具的几何形状设计	55
3.2	金刚石刀具的晶面设计准则	59
3.3	金刚石刀具的传统制造方法及优缺点	66
3.4	金刚石刀具的新型制造方法	72
	参考文献	76

第 4 章 金刚石晶体的机械研磨理论	80
4.1 金刚石晶体的机械研磨理论与学说	80
4.2 机械研磨过程的分子动力学仿真模拟	85
4.2.1 仿真模型的建立	85
4.2.2 动态研磨力的分布	89
4.3 金刚石晶体的脆塑转变机理	91
4.3.1 机理学说的提出	91
4.3.2 实验验证	94
4.4 金刚石晶体研磨碎屑的相变问题	99
4.5 金刚石晶体的各向异性评价	101
4.5.1 金刚石晶体中 PBC	101
4.5.2 各向异性评价模型	104
4.5.3 不同单形中的晶面及其磨削方向	105
4.6 材料去除率的比值模型	107
4.6.1 材料去除率比值和难磨比值的定义	107
4.6.2 (100)前刀面上的材料去除率比值模型	108
4.6.3 (110)前刀面上的材料去除率比值模型	110
参考文献	113
第 5 章 天然金刚石刀具研磨机床的设计与制造	118
5.1 天然金刚石刀具对研磨设备的要求	119
5.2 天然金刚石刀具研磨机的发展	119
5.3 天然金刚石刀具研磨机设计方法和步骤	124
5.4 天然金刚石刀具研磨机的机械系统设计	128
5.4.1 研磨机功能分析和整体设计	128
5.4.2 总功能分解	129
5.4.3 两种类型后刀面的研磨	130

5.4.4 原理解组合	133
5.5 总体结构设计方案	135
5.5.1 总体布置的设计	135
5.5.2 坐标系的定义	135
5.5.3 总体参数的确定	137
5.6 研磨机的误差初步分析与建模	139
5.6.1 研磨机的拓扑结构	139
5.6.2 研磨机误差分析	142
5.6.3 空间误差模型	149
5.6.4 误差分配	151
5.7 动力学分析	153
5.7.1 有限元模型的建立	153
5.7.2 结合面处理	154
5.7.3 网格划分	156
5.7.4 载荷加载及求解	156
5.7.5 观察结果	157
5.8 三维外形设计	159
5.9 控制系统的开发	160
5.9.1 电气系统总体方案	160
5.9.2 各轴系控制方案	161
5.9.3 软件功能模块划分	163
5.9.4 软件总体结构设计	163
5.9.5 数据流设计	165
5.10 其他辅助设计	166
参考文献	167

第 6 章 天然金刚石刀具的机械研磨工艺	170
6.1 研磨工艺总体概述	171
6.2 表面粗糙度相关工艺参数对切削刃钝圆半径的影响	171
6.2.1 刀体夹具的往复运动	172
6.2.2 金刚石磨粒尺寸	174
6.3 接触精度相关工艺参数对切削刃钝圆半径的影响	176
6.3.1 刃磨机床振动	178
6.3.2 主轴动平衡精度	181
6.3.3 研磨盘表面预研磨质量	183
6.3.4 研磨速度	185
6.3.5 研磨压力	188
6.4 刃磨工艺参数的优选	190
6.5 前后刀面定向对切削刃钝圆半径的影响	193
6.6 时间序列法分析切削刃钝圆半径的变化规律	200
6.6.1 实验条件与切削刃钝圆半径的原始测量数据	201
6.6.2 测量数据的时间序列分析及其预测模型的建立	201
6.6.3 切削刃钝圆半径时间序列预测模型的应用	206
6.7 金刚石刀具圆弧刃的成型原理与工艺	208
6.7.1 刀刃与研磨盘的接触长度	208
6.7.2 磨削路径	209
6.8 刀尖圆弧研磨方式	210
6.8.1 变研磨压力研磨方式	210
6.8.2 变研磨时间研磨方式	212
参考文献	214
第 7 章 金刚石刀具的刃口极限锋利度	216
7.1 金刚石晶体动态微观机械强度的理论模型	216

7.2 金刚石刀具刃口极限锋利度的理论预测	222
7.2.1 刀具前刀面为(110)晶面的刃口极限锋利度	222
7.2.2 刀具前刀面为(100)晶面的刃口极限锋利度	228
7.3 金刚石刀具刃口极限锋利度的工艺实现	232
7.3.1 工艺实验条件	233
7.3.2 刃磨工艺参数的影响	235
7.3.3 金刚石刀具刃口极限锋利度的实现	240
参考文献	243
第8章 天然金刚石刀具的参数检测与质量评价	245
8.1 天然金刚石刀具的主要技术指标	245
8.2 天然金刚石刀具刃口锋利度检测技术	246
8.2.1 光学显微镜法	247
8.2.2 扫描电子显微镜法	247
8.2.3 切屑法	248
8.2.4 金线压痕法	249
8.2.5 光学散射法	250
8.2.6 改进 SEM 法	250
8.2.7 铜面压痕法	251
8.2.8 白光干涉测量法	252
8.2.9 直接 AFM 法	254
8.2.10 改进 AFM 法	255
8.3 天然金刚石刀具刃口轮廓度检测技术	257
8.3.1 目测法	258
8.3.2 体视显微测量法	258
8.3.3 SEM 测量法	259
8.3.4 圆度仪测量法	260

8.3.5 轮廓仪测量法	261
8.3.6 改进 AFM 法	261
8.3.7 刀具前角对正投影测量的影响	266
8.4 天然金刚石刀具前后刀面粗糙度的检测技术	269
8.4.1 AFM 测量法	269
8.4.2 轮廓仪测量法	270
参考文献	270
第 9 章 天然金刚石刀具的应用	274
9.1 天然金刚石刀具的应用条件	274
9.2 天然金刚石刀具应用中的磨损抑制	276
9.3 天然圆弧刃金刚石刀具的应用	277
9.3.1 圆弧刃金刚石刀具的主要技术指标与选用原则	277
9.3.2 金刚石刀具刀尖圆弧半径的选择方法	278
9.3.3 刀尖圆弧半径补偿算法	280
9.4 天然金刚石尖刀的应用	281
9.4.1 天然金刚石尖刀制造技术的发展	282
9.4.2 天然金刚石微圆弧刀具的技术指标	284
9.4.3 天然金刚石微圆弧刀具的选用原则	285
9.4.4 微圆弧金刚石刀具应用中的主要误差因素	286
9.5 天然金刚石刀具的设计与应用	288
9.5.1 特种异形金刚石刀具的设计与分类	289
9.5.2 特种异形金刚石刀具的制造方法	289
9.5.3 各类特种异形金刚石刀具的应用	291
参考文献	294
名词索引	296

第 1 章 绪 论

1.1 天然金刚石刀具对超精密车削加工的重要作用

超精密刀具技术是超精密车削加工的关键技术之一,是获得高精度零件形状尺寸和超光滑加工表面的必备条件。金刚石刀具与被加工零件间的切削接触环节包括前刀面、后刀面、圆弧或直线形状的刀刃刃口部分,而切削刃担负着材料超精密切削去除的主要任务,金刚石刀具的几何参数与机械性能直接影响超精密切削过程的稳定性和被加工表面的粗糙度。刀具刃口锋利程度影响最小切削厚度,进一步影响被加工零件的表面质量,刃口形状精度影响被加工零件的面形精度,刀具刃口表面粗糙度在切削过程中将直接被复印到被加工材料的表面,影响被加工零件的表面粗糙度,刀具的微观力学性能也会影响被加工材料表面的微观力学性能。因此,金刚石刀具对于超精密车削加工的质量起着极其重要的作用。

1.1.1 金刚石刀具刃口锋利度对超精密车削加工的重要作用与影响

利用超精密车削加工获取超光滑表面的关键是实现微量切削厚度加工,而这与超精密机床性能、车削加工环境和金刚石刀具的刃口锋利度直接相关,因此必须刃磨制造出极其锋利的天然金刚石刀具,才能实现微量切削厚度加工,以此得到高质量的加工表面。20 世纪 80 年代,日本大阪大学和美国 LLNL 实验室开展了“超精密切削极限加工”的合作

研究,利用大阪金刚石公司特制的金刚石刀具并在 LLNL 实验室 PERL II 超精密机床上实现了 1 nm 最小切削厚度的加工实验。这说明金刚石刀具刃口锋利度是金刚石刀具的重要指标之一。

实际上,在传统意义的超精密加工中,金刚石刀具的刃口锋利度对零件加工表面粗糙度、切削变形、切削力以及对零件表层的硬度与残余应力等都有较大影响^[1],在各类材料的超精密加工工艺研究中,国内外均进行了大量的理论分析与实验研究。

(1) 刃口锋利度对零件加工表面粗糙度的影响。

文献[1]通过超精密车削加工实验,给出了刀具刃口锋利度在选取不同背吃刀量、不同进给量和不同切削速度进行加工实验时获得的表面粗糙度数据。从实验结果可以看出,当选取不同背吃刀量、不同进给量时,刀具刃口锋利度对加工表面的粗糙度有一定影响^[1]。一般情况下认为,除切削速度外,无论切削参数如何变化,刃口锋利度值越小,车削加工的表面质量越高,刀具制造中需要刃磨出锋利的刀具,这对超精密车削加工表面质量的提高起决定性的作用^[2]。

(2) 刃口锋利度对切削变形和切削力的影响。

切削变形的波动会引起车削力变化,不利于稳定加工表面质量。当背吃刀量和进给量较小时,即切削厚度与刀具刃口锋利度处于同一数量级,此时刀具刃口锋利度对切削变形有较大影响^[1]。而在超精密切削加工中,背吃刀量和进给量都极小,刀具刃口锋利度将明显影响切削变形。在背吃刀量很小时(小于 1 μm),刀具刃口锋利度造成的附加变形已经占总切削变形的较大比例^[1,2]。

(3) 刃口锋利度对零件表层硬度与残余应力的影响^[1,2]。

在超精密切削时,为了满足加工表面的显微硬度和残余应力技术指标,须严格控制加