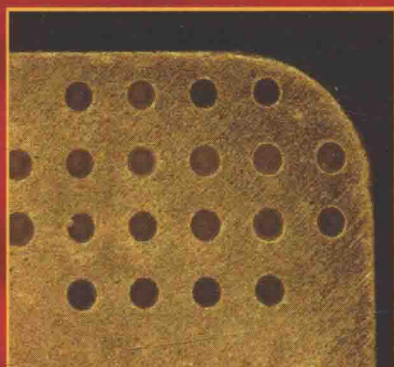




“十二五”国家重点图书出版规划项目
21世纪先进制造技术丛书

微织构刀具及其切削加工

· 邓建新 等 著 ·



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

21世纪先进制造技术丛书

微织构刀具及其切削加工

邓建新 等 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书结合作者多年来从事微织构刀具技术研究的成果撰写而成。在全面分析国内外刀具技术发展现状的基础上,着重论述微织构刀具、软涂层微织构刀具、基体表面织构化涂层刀具、多尺度表面织构刀具的设计理论、制备方法、力学性能、微观结构、切削性能及其减摩抗磨机理。本书兼顾理论和应用两方面,着眼于最新的内容和动向,既有理论分析,又结合实际应用,反映了国内外微织构刀具的最新成果。

本书可供切削理论和切削刀具等领域的技术人员和管理人员参考,也可作为科研人员、高等工科院校教师的科研参考书以及机械类专业研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

微织构刀具及其切削加工/邓建新等著. —北京:科学出版社,2018.5
 (“十二五”国家重点图书出版规划项目;21世纪先进制造技术丛书)
 ISBN 978-7-03-056627-0

I. ①微… II. ①邓… III. ①织构-刀具(金属切削) IV. ①TG71

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第035064号

责任编辑:裴育 赵晓廷 / 责任校对:张小霞

责任印制:师艳茹 / 封面设计:蓝正

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

— 邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

艺堂印刷(天津)有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年5月第一版 开本:720×1000 B5

2018年5月第一次印刷 印张:18

字数:344 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《21 世纪先进制造技术丛书》编委会

主 编 熊有伦(华中科技大学)

编 委 (按姓氏笔画排序)

丁 汉(上海交通大学/华中科技大学)

张宪民(华南理工大学)

王 煜(香港中文大学)

周仲荣(西南交通大学)

王田苗(北京航空航天大学)

赵淳生(南京航空航天大学)

王立鼎(大连理工大学)

查建中(北京交通大学)

王国彪(国家自然科学基金委员会)

柳百成(清华大学)

王越超(中国科学院沈阳自动化研究所)

钟志华(同济大学)

冯 刚(香港城市大学)

顾佩华(汕头大学)

冯培恩(浙江大学)

徐滨士(陆军装甲兵学院)

任露泉(吉林大学)

黄 田(天津大学)

刘洪海(朴次茅斯大学)

黄 真(燕山大学)

江平宇(西安交通大学)

黄 强(北京理工大学)

孙立宁(哈尔滨工业大学)

管晓宏(西安交通大学)

李泽湘(香港科技大学)

雒建斌(清华大学)

李涤尘(西安交通大学)

谭 民(中国科学院自动化研究所)

李涵雄(香港城市大学/中南大学)

谭建荣(浙江大学)

宋玉泉(吉林大学)

熊蔡华(华中科技大学)

张玉茹(北京航空航天大学)

翟婉明(西南交通大学)

《21 世纪先进制造技术丛书》序

21 世纪，先进制造技术呈现出精微化、数字化、信息化、智能化和网络化的显著特点，同时也代表了技术科学综合交叉融合的发展趋势。高技术领域如光电子、纳电子、机器视觉、控制理论、生物医学、航空航天等学科的发展，为先进制造技术提供了更多更好的新理论、新方法和新技术，出现了微纳制造、生物制造和电子制造等先进制造新领域。随着制造学科与信息科学、生命科学、材料科学、管理科学、纳米科技的交叉融合，产生了仿生机械学、纳米摩擦学、制造信息学、制造管理学等新兴交叉科学。21 世纪地球资源和环境面临空前的严峻挑战，要求制造技术比以往任何时候都更重视环境保护、节能减排、循环制造和可持续发展，激发了产品的安全性和绿色度、产品的可拆卸性和再利用、机电装备的再制造等基础研究的开展。

《21 世纪先进制造技术丛书》旨在展示先进制造领域的最新研究成果，促进多学科多领域的交叉融合，推动国际间的学术交流与合作，提升制造学科的学术水平。我们相信，有广大先进制造领域的专家、学者的积极参与和大力支持，以及编委们的共同努力，本丛书将为发展制造科学，推广先进制造技术，增强企业创新能力做出应有的贡献。

先进机器人和先进制造技术一样是多学科交叉融合的产物，在制造业中的应用范围很广，从喷漆、焊接到装配、抛光和修理，成为重要的先进制造装备。机器人操作是将机器人本体及其作业任务整合为一体的学科，已成为智能机器人和智能制造研究的焦点之一，并在机械装配、多指抓取、协调操作和工件夹持等方面取得显著进展，因此，本系列丛书也包含先进机器人的有关著作。

最后，我们衷心地感谢所有关心本丛书并为丛书出版尽力的专家们，感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和资助，感谢广大读者对丛书的厚爱。

熊有伦

华中科技大学

2008年4月

前 言

近年来,摩擦学研究领域提出了一种表面织构的概念,又称表面微织构,已被证明是提高表面摩擦学性能的有效手段。表面织构技术就是通过改变材料表面的物理结构来改善材料表面特性的方法,表面织构是具有一定尺寸和排列的凹坑、凹痕或凸包等图案的点阵。表面织构在机械密封、轴承、计算机硬盘、气缸和活塞环、导轨等机械零部件上的应用研究表明,它具有改善表面润滑状态和减摩抗磨的作用。微织构刀具的研究开始于21世纪初,其主要技术思想是通过在刀具表面的特定位置上加工出表面织构以改善刀具在切削过程中刀-屑接触界面的摩擦润滑状态,冷却润滑介质可在切屑和前刀面剧烈的摩擦作用下通过泵吸作用渗透到这些表面织构中,并在刀-屑接触界面形成稳定的边界润滑层;另外,在刀具的前刀面上引入合理的表面织构,还可减小刀-屑接触面积,改善摩擦和润滑条件,降低切削温度,减轻黏结及扩散等现象,提高刀具的寿命。目前,国内外关于微织构刀具的研究已经取得很多的成果,研究结果均证明了微织构具有提高刀具切削性能的作用。微织构切削刀具是一种极具发展潜力的刀具,已成为当前切削刀具研究领域的研究热点之一。微织构刀具的研究开发为切削刀具的设计提供了新的思路和研究领域,为提高刀具性能开拓了新的途径。深入研究微织构刀具及其减摩抗磨机理,对减小刀具磨损、延长刀具寿命、降低生产成本有重要的实际意义,对丰富和发展切削刀具的设计理论具有重要的学术价值。

本书作者多年来致力于微织构刀具的研究开发及其减摩抗磨机理研究,本书是在总结这些研究成果的基础上撰写而成的,其内容直接取材于作者在国内外专业期刊上发表的学术论文和作者指导的博士研究生的博士论文,涉及多种不同类型微织构刀具的设计理论、制备、性能和应用等。撰写本书的目的在于向读者介绍该领域的最新进展,并在实际应用中推广这些成果,希望能够对推动我国刀具技术的发展和水平的提高起到积极有益的作用。

本书由邓建新、吴泽、连云崧、邢佑强、张克栋、刘亚运、段冉、宋文龙等共同撰写。恩师艾兴院士在百忙之中审阅了书稿全文,提出了许多指导意见。本书的研究先后得到国家自然科学基金(51675311、51375271、51075237)、山东省杰出青年基金(JQ200917)、山东省科技发展计划(2017GGX30115、2014GGX103026)等多项科研项目的资助。在此一并表示衷心的感谢。

由于微织构刀具尚处在发展之中,加之作者的水平 and 实践经验有限,书中难免存在疏漏之处,恳请读者提出宝贵意见,以便于进一步完善。

邓建新

目 录

《21 世纪先进制造技术丛书》序

前言

第 1 章 微织构刀具的理论基础	1
1.1 微织构刀具的概念	1
1.2 刀具表面微织构的制备方法	2
1.3 微织构刀具切削力的理论分析	6
1.4 微织构刀具切削温度的理论分析	9
1.5 软涂层微织构刀具的概念	11
1.6 软涂层对微织构刀具切削力和切削温度的影响	13
1.7 本章小结	13
第 2 章 微织构刀具的设计与制备	14
2.1 微织构刀具的设计	14
2.1.1 刀具表面微织构位置的确定	14
2.1.2 刀具表面微织构的结构设计	15
2.1.3 微织构结构设计的有限元建模	16
2.1.4 微织构结构参数的确定	18
2.2 硬质合金刀具表面微织构的激光加工	25
2.2.1 激光织构化技术原理	25
2.2.2 激光诱导刀具表面微织构的形成机制	28
2.2.3 硬质合金刀具表面微织构的制备	29
2.3 微织构对硬质合金刀具材料摩擦磨损特性的影响	30
2.3.1 试验方法	30
2.3.2 微织构硬质合金试样的摩擦磨损特性	32
2.4 微织构刀具的切削性能研究	41
2.4.1 试验方法	41
2.4.2 微织构刀具的切削性能	41
2.4.3 微织构刀具改善切削加工的作用机理	45
2.5 本章小结	47
第 3 章 软涂层微织构刀具的研究	49
3.1 软涂层材料与刀具基体材料的匹配研究	49

3.1.1	软涂层材料与基体材料的化学相容性分析	49
3.1.2	软涂层材料与基体材料的物理相容性分析	50
3.1.3	软涂层刀具的结构	56
3.2	刀具表面微织构的制备技术研究	56
3.2.1	刀具表面微织构的制备工艺	56
3.2.2	飞秒激光加工微织构的工艺参数优化	57
3.2.3	微织构刀具的制备	77
3.3	微织构表面软涂层的制备及性能研究	78
3.3.1	软涂层的制备工艺	78
3.3.2	WS ₂ 软涂层的性能测试方法	79
3.3.3	软涂层制备工艺参数的优化	81
3.3.4	软涂层微织构刀具的制备	97
3.4	软涂层微织构刀具的切削性能研究	99
3.4.1	试验方法	99
3.4.2	软涂层微织构刀具的切削性能	100
3.4.3	软涂层微织构刀具的作用机理	111
3.5	本章小结	113
第4章	基体表面织构化 TiAlN 涂层刀具的研究	115
4.1	基体表面织构化 TiAlN 涂层刀具的概念	115
4.2	TiAlN 涂层刀具基体表面微纳织构的制备	118
4.2.1	TiAlN 涂层刀具基体材料的确定	118
4.2.2	基体表面微纳织构的制备工艺	119
4.3	基体表面织构化对 TiAlN 涂层微观结构及力学性能的影响研究	132
4.3.1	基体表面织构化 TiAlN 涂层刀具的制备	132
4.3.2	TiAlN 涂层性能测试方法	136
4.3.3	基体表面织构化对 TiAlN 涂层性能的影响	138
4.3.4	基体表面织构化提高 TiAlN 涂层结合强度的机理	152
4.4	基体表面织构化 TiAlN 涂层的摩擦磨损特性	163
4.4.1	试验方法	163
4.4.2	基体表面织构化对 TiAlN 涂层摩擦磨损性能的影响	166
4.5	基体表面织构化 TiAlN 涂层刀具的切削性能研究	182
4.5.1	试验方法	182
4.5.2	基体表面织构化 TiAlN 涂层刀具的切削性能	183
4.5.3	基体表面织构化改善 TiAlN 涂层刀具切削性能的机理	194
4.6	本章小结	197

第 5 章 多尺度表面织构陶瓷刀具的研究	199
5.1 多尺度表面织构陶瓷刀具的概念和设计思路	199
5.2 陶瓷刀具多尺度表面织构的制备工艺	201
5.2.1 纳秒激光诱导陶瓷刀具表面微织构的制备工艺	201
5.2.2 飞秒激光诱导陶瓷刀具表面纳织构的制备工艺	203
5.2.3 纳秒激光诱导陶瓷刀具表面微织构的工艺参数优化	204
5.2.4 飞秒激光诱导陶瓷刀具表面纳织构的工艺参数优化	218
5.3 多尺度表面织构陶瓷刀具的制备	227
5.3.1 表面织构陶瓷刀具制备	227
5.3.2 润滑剂的优选及其添加方式	228
5.4 多尺度表面织构陶瓷刀具的摩擦磨损特性研究	231
5.4.1 多尺度表面织构陶瓷刀具的摩擦磨损试验方案	231
5.4.2 微织构对陶瓷刀具材料表面摩擦磨损性能的影响	231
5.4.3 纳织构对陶瓷刀具材料表面摩擦磨损性能的影响	239
5.5 多尺度表面织构陶瓷刀具的切削性能研究	251
5.5.1 刀-屑接触界面的理论模型	251
5.5.2 试验方法	254
5.5.3 多尺度表面织构陶瓷刀具的切削性能及减摩机理	255
5.6 本章小结	268
参考文献	269

第 1 章 微织构刀具的理论基础

本章主要介绍微织构刀具的概念和刀具表面微织构的制备方法,并分析微织构对刀具切削加工过程中切削力和切削温度的影响;然后介绍软涂层微织构刀具的概念以及软涂层对微织构刀具切削力和切削温度的影响。

1.1 微织构刀具的概念

近年来,摩擦学研究领域提出了一种表面织构(surface texturing)的概念,又称表面微织构,已被证明是提高表面摩擦学性能的有效手段。表面织构技术就是通过改变材料表面的物理结构来改善材料表面特性的方法,表面织构是具有一定尺寸和排列的凹坑、凹痕或凸包等图案的点阵。表面织构在机械密封、切削刀具、轴承、计算机硬盘、气缸和活塞环、导轨等机械零部件上的应用研究表明,它具有改善表面润滑状态和减摩抗磨的作用。表面织构的作用主要表现在:在流体润滑下,每一个凹坑都相当于一个流体动压润滑轴承,在摩擦副相互运动过程中,增强了流体动压力,促进摩擦副表面形成流体动压润滑,进而提高摩擦副表面的承载力和润滑油膜刚度,实现减摩抗磨的作用;在边界润滑下,随着表面的磨损和变形,凹坑的体积缩小导致凹坑中存储的油液流出,形成挤压膜,在相对滑动过程中,存储在凹坑中的润滑油在摩擦力的作用下流出凹坑,起到对周围表面的润滑作用;在干摩擦下,表面织构能起到储存和容纳磨屑的作用,减少由于磨屑的犁沟作用而产生的高摩擦磨损。大量的研究表明,在不同的润滑状态下,表面织构的减摩机理并不相同。表面微织构的类型、分布、尺寸对摩擦副的摩擦学性能有重要影响,设计加工出合理的表面微织构才能有效地改善摩擦副的摩擦磨损性能,起到更好的减摩抗磨效果。

摩擦学与仿生学的研究表明,高性能的表面织构可以实现良好的减摩、抗黏结功能并提高耐磨性,这给刀具减摩抗磨带来了新的研究方向,也提供了理论依据。微织构刀具(micro-textured tools)是指在刀具表面(前刀面或后刀面)的特定位置上加工出具有一定尺寸、形状的微纳结构阵列(图 1-1),以改善刀具在切削过程中刀-屑接触界面的摩擦润滑状态。一方面,刀具表面的微织构可以存储切削液或润滑剂,可在刀-屑接触界面形成稳定的边界润滑层(图 1-2);另一方面,在刀具刀面上引入合理的表面织构还可以减小刀-屑接触面积,改善摩擦、润滑和散热条件,从而降低切削温度,减轻冷焊、黏结及扩散等现象,延长刀具的寿命。目前,微织构刀

具的研究虽然处于起步阶段,但是国内外关于微织构刀具的研究已经取得了一定的成果,研究结果均证明了微织构具有提高刀具切削性能的作用。微织构切削刀具是一种极具发展潜力的刀具,已成为当前切削刀具研究领域的研究热点之一。

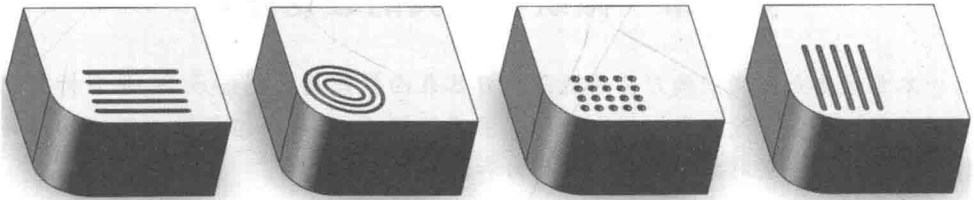


图 1-1 微织构刀具示意图

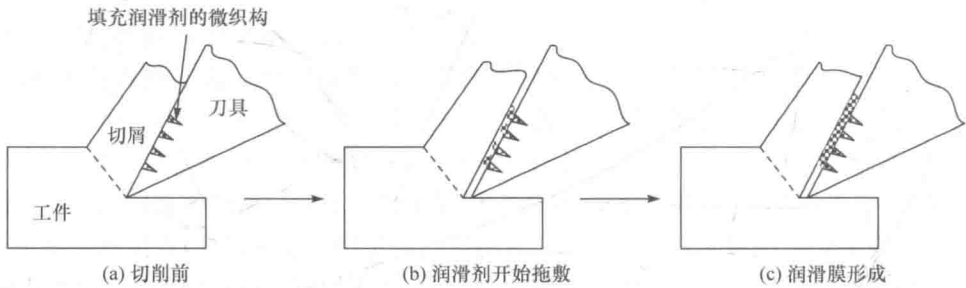


图 1-2 微织构刀具切削加工时形成润滑膜示意图

1.2 刀具表面微织构的制备方法

目前,刀具表面微织构的制备方法主要有:激光加工、微细电火花加工、离子束加工、电子束刻蚀、电化学加工、光刻技术、表面喷丸处理、超声加工、化学刻蚀技术等,其中以激光加工应用最为广泛。图 1-3~图 1-13 为不同方法制备的刀具表面微织构形貌。

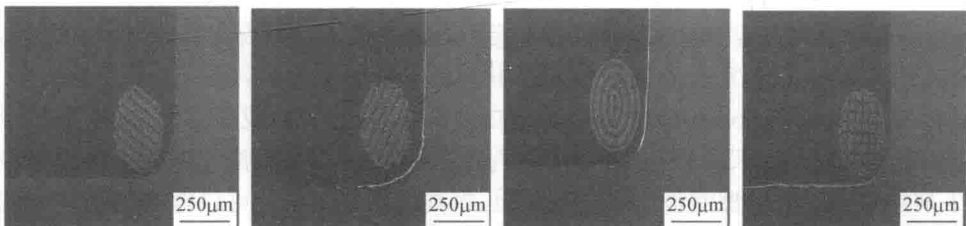


图 1-3 硬质合金刀具表面纳秒激光加工的微织构形貌

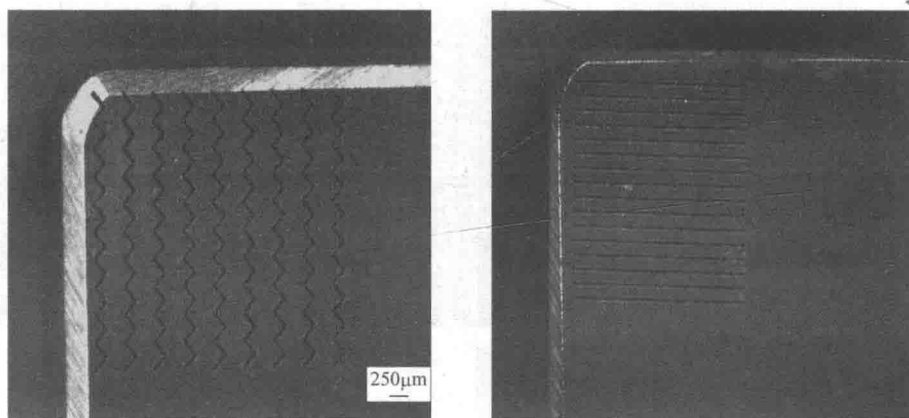


图 1-4 陶瓷刀具表面纳秒激光加工的微结构形貌

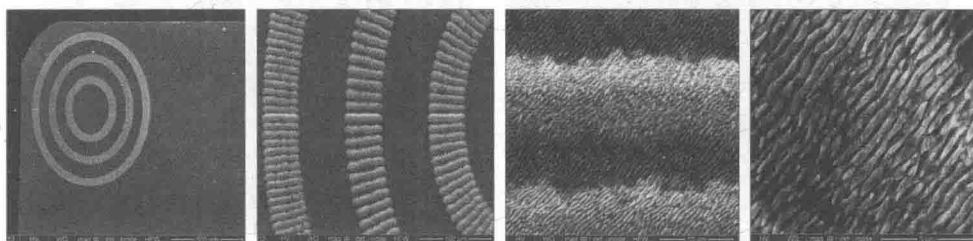
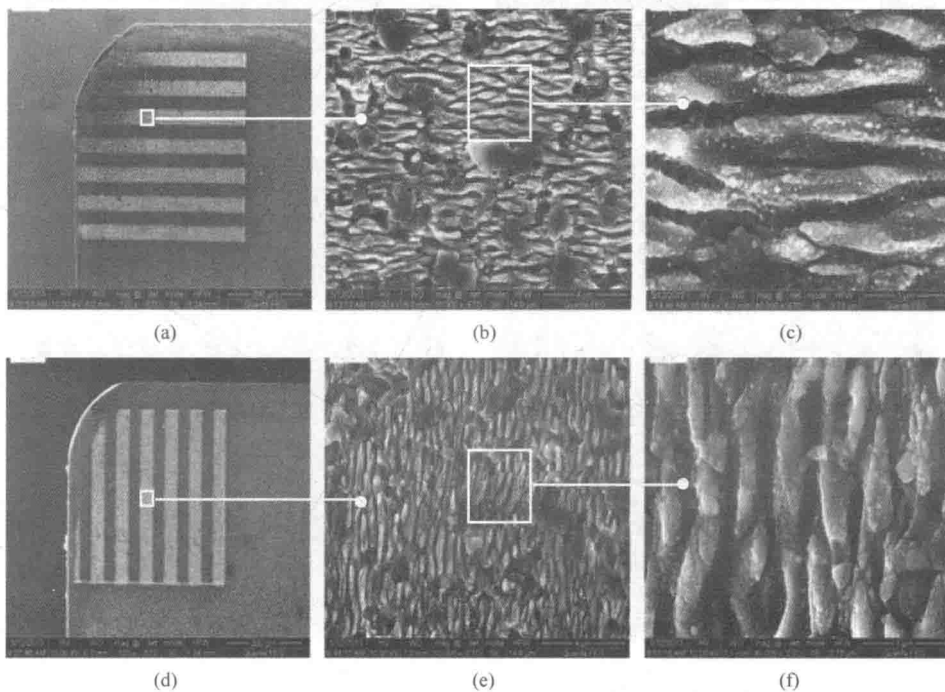


图 1-5 硬质合金刀具表面飞秒激光加工的微结构形貌



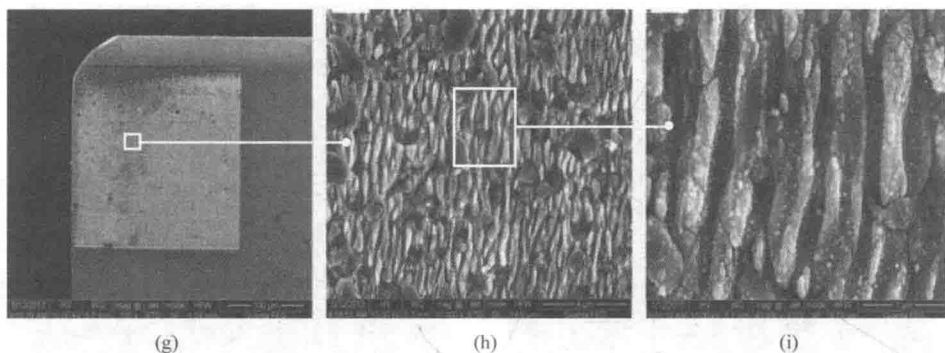


图 1-6 陶瓷刀具表面飞秒激光加工的微织构形貌

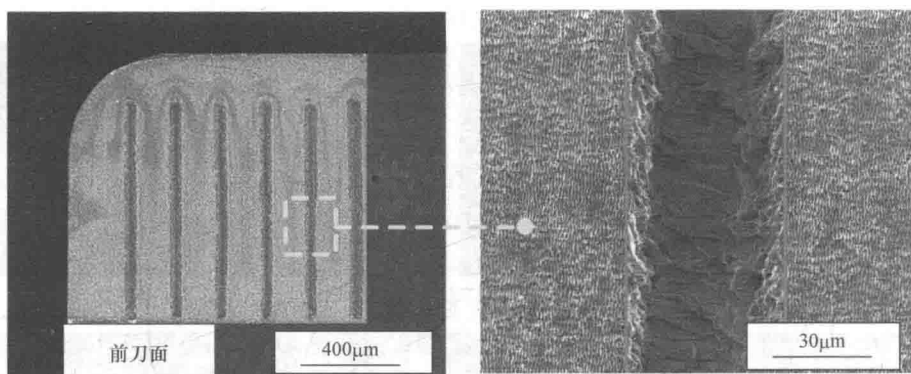


图 1-7 硬质合金刀具表面激光加工的微纳复合织构形貌

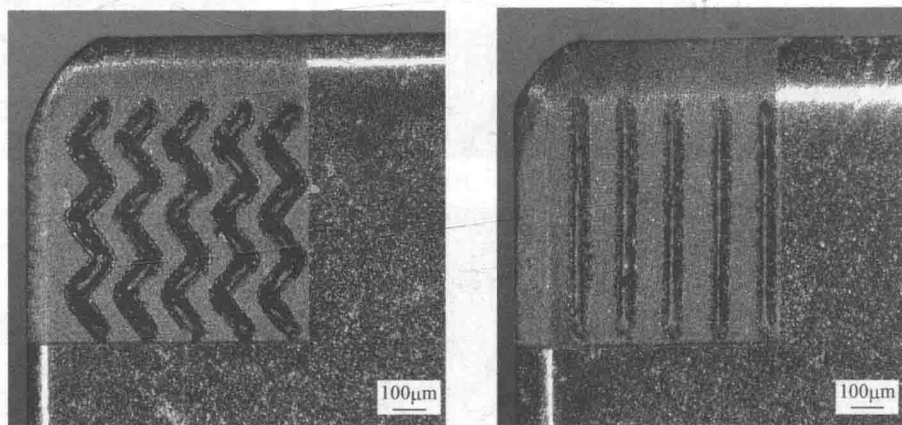


图 1-8 陶瓷刀具表面激光加工的微纳复合织构形貌

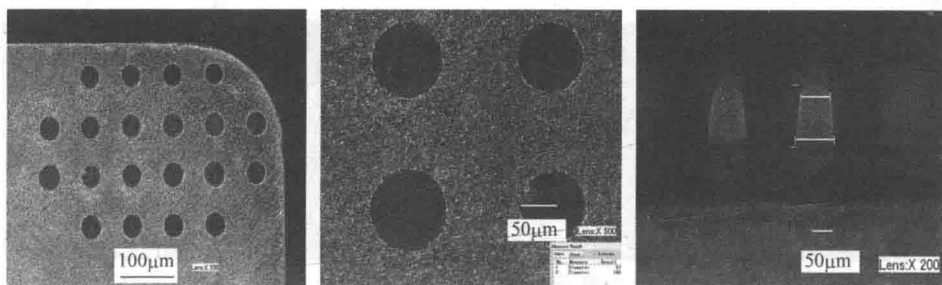


图 1-9 硬质合金刀具表面微细电火花加工的微结构形貌

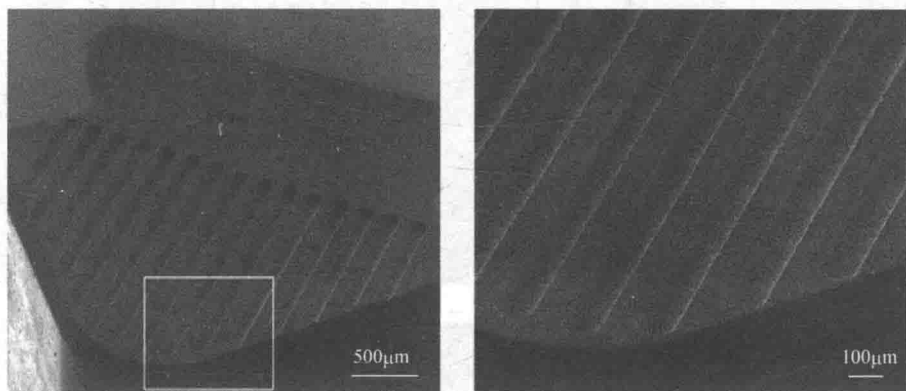
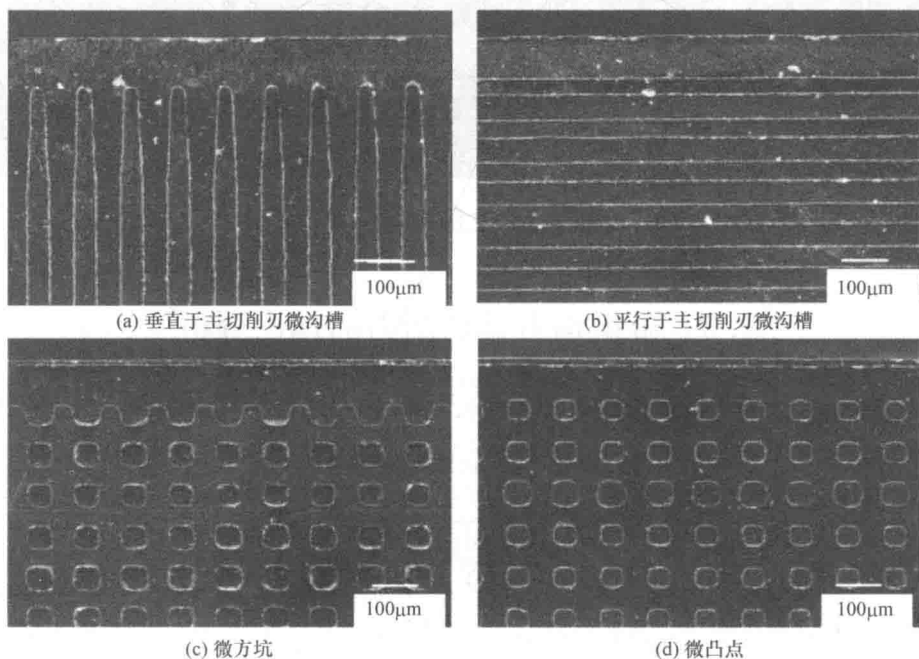


图 1-10 PCBN 刀具表面电火花加工的微结构形貌



(a) 垂直于主切削刃微沟槽

(b) 平行于主切削刃微沟槽

(c) 微方坑

(d) 微凸点

图 1-11 硬质合金刀具 DLC 涂层表面光刻技术加工的微结构形貌

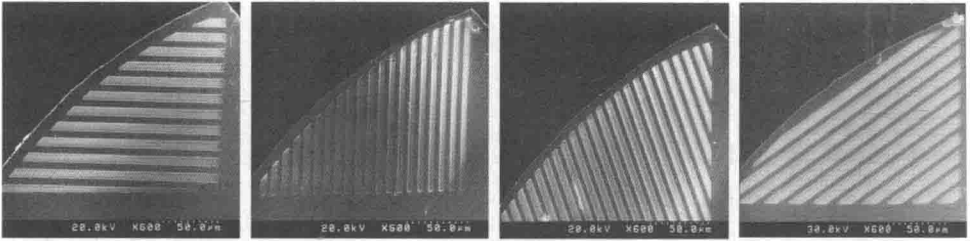


图 1-12 离子束加工铣刀刀面微织构形貌

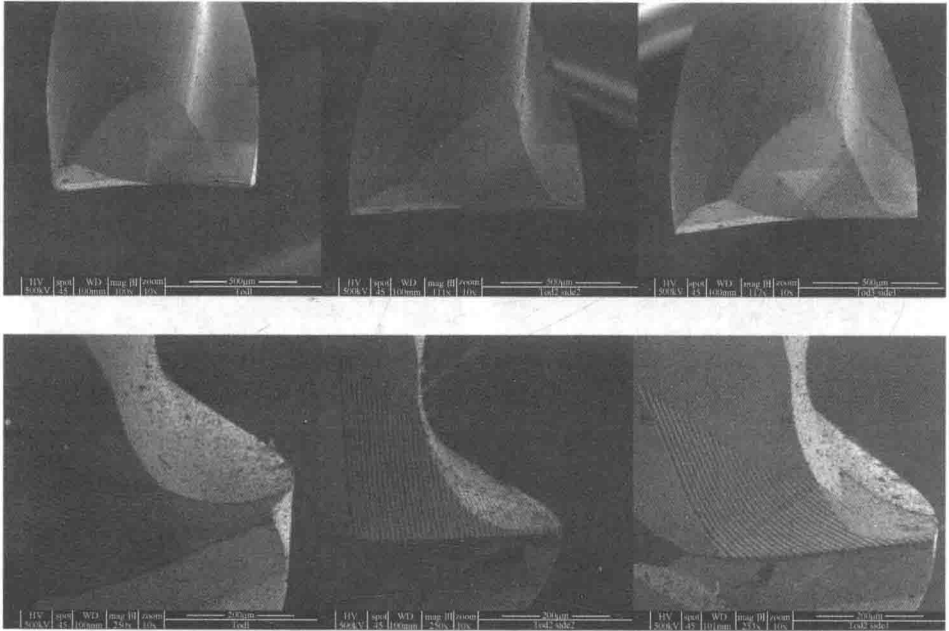


图 1-13 离子束加工铣刀刀面微织构形貌

1.3 微织构刀具切削力的理论分析

刀具表面的受力分布如图 1-14 所示,作用力 F_s 在平面上产生的应力应与所加工材料剪切变形应力 τ_s 相平衡。由此,可以得到

$$F_r = \frac{a_w a_c \tau_s}{\sin \phi \cos \omega} = \frac{a_w a_c \tau_s}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \gamma_0)} \quad (1-1)$$

$$\omega = \phi + \beta - \gamma_0 \quad (1-2)$$

式中, a_w 为切削宽度, a_c 为切削厚度, ϕ 为剪切角, β 为摩擦角, γ_0 为刀具前角, ω 为 F_r 与剪切面的夹角。