



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

ATOMIC FORCE MICROSCOPE BASED NANO MECHANICAL
MACHINING AND NANO MEASUREMENT TECHNIQUES

基于原子力显微镜的纳米机械加工与检测技术

● 董申 孙涛 闫永达 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·

航天科学与工程专著系列

ATOMIC FORCE MICROSCOPE BASED NANO MECHANICAL
MACHINING AND NANO MEASUREMENT TECHNIQUES

基于原子力显微镜的纳米机械加工与检测技术

● 董 申 孙 涛 闫永达 著



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

内 容 简 介

基于原子力显微镜(AFM)的纳米机械加工与检测技术是近年来飞速发展的一个研究领域。本书主要把作者课题组近年来的相关研究工作做了一个阶段性的归纳和总结,内容包括:纳米机械加工表面的微观形貌检测方法;纳米机械加工表层形成机理;基于 AFM 的纳米机械加工技术;基于 AFM 的工程应用。

本书对从事纳米加工技术、纳米检测技术以及超精密加工工艺等的研究人员有重要的参考价值,同时也可作为机械类研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

基于原子力显微镜的纳米机械加工与检测技术/董申,孙涛,
闫永达著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2012.12

ISBN 978-7-5603-3861-3

I. ①基… II. ①董… ②孙… ③闫… III. ①原子力学—显微镜—应用—纳米材料—金属切削 ②原子力学—显微镜—应用—
纳米材料—检测 IV. ①TG5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 289014 号

责任编辑 田 秋 孙连嵩

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 黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 19 字数 456 千字

版 次 2012 年 12 月第 1 版 2012 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-3861-3

定 价 68.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

扫描隧道显微镜(STM)及原子力显微镜(AFM)的发明和应用极大地推动了纳米科学与技术的发展,同时也帮助各学科的研究进入到纳米尺度范围,促使很多学科学术研究有了质的变化。受其启发,我们于1996年购买了第一台国产AFM,开始借助AFM开展超精密加工和微纳结构加工与检测方面的研究,至今已有15名博士、11名硕士及两名博士后从事这些方面的研究,先后发表了100多篇论文,并完成了他们的学位论文。纳米机械加工与检测工作涉及很多学科领域,特别是在纳米尺度和瞬态过程中的奇特现象与效应更需量子力学等基础理论的指导,由于本人的学识所限,感觉我们的研究尚处于入门的初级阶段,而且涉及面多而杂,甚至有的只是一些想法和计划。总之尚有不少遗憾之处。但我的学生确实也做了一些开创性的工作,在和他们和哈工大出版社的催促和鼓励下,我决定组织留校的有关博士把他们在“基于原子力显微镜的纳米机械加工与检测技术”方面的有关研究,做阶段性的归纳和总结,作为抛砖引玉出一本专著,供有关学生、教师以及科技工作者参考,并欢迎大家批评指正。

本书把我们的研究工作分4篇共11章介绍给大家。第1篇介绍纳米机械加工表面形貌方面的研究。超精密加工的表面质量是我们一直研究的重要问题之一,特别是微观形貌包含了所有影响因素作用的结果,例如多维运动耦合的影响。如何才能把我们需要的信息从表面微观结构中提取出来,是我们所追求的目标。第1章介绍表面微观形貌的检测方法,在我们所进行的超精密加工大量实验分析结果的基础上,着重研究了AFM检测方法与其他检测方法比较的结果,研究如何充分发挥AFM的优势。第2章介绍三维表面微观形貌的表征与检测方面的研究。三维表面微观形貌如何表征才能显示出我们需要的不同信息是一个极其复杂的理论问题,我们从表面质量预报、优化工艺参数等研究着手为提高加工表面质量做一些研究。

第2篇介绍纳米机械加工表层形成机理方面的研究。随着加工尺度的不断减小,影响因素更为复杂,如何把纳米加工过程准确、清晰和可控地展现,以供研究,是我们解决的问题。第3章介绍了分子动力学计算仿真方法,着重研究加工过程中材料微观组织的变化,探讨随加工尺度的量变,是否会带来不同于宏观的质的改变。第4章利用分子动力学方法研究纳米机械加工时,在晶粒内、晶界上和多晶体间材料的去除过程,其中位错的产生、运动、聚积和消失等变化是关键。从材料组织变化,可以解释一系列纳米机械加工过程的现象和规律。第5章在基于原子力显微镜的机械加工表面质量对比实验基础上,研究了纳米加工亚表层损伤层的计算及预报,特别是当亚表层出现孪晶时,还可能改善亚表层性能。

第3篇介绍基于原子力显微镜的纳米机械加工技术方面的研究。其目的是用AFM来实现纳米精度的三维加工。第6章研究了金刚石针尖在工件表面上与工件表面里的准确位置的检测方法与技术,同时建立基于AFM刻划深度实时控制的微纳米加工系统。第7章突破以往改变工具与工件间空间几何位置,来达到三维形状的加工方法的限制,采用控制工具与工件

间的力,实现了工件三维结构纳米精度的加工。

第4篇介绍基于原子力显微镜的应用方面的研究。第8章介绍了利用AFM把自下而上与自上而下的方法组合在一起,针对软材料进行三维微纳结构的加工方法研究。第9章介绍AFM的针尖大小与形状对加工检测精度有很大影响,为此,我们研究了把碳纳米管连接到AFM微悬臂上的方法,以及与传统针尖对比的检测实验。特别对软材料(生物材料)效果十分明显。第10章针对国家重大需求,研究了微小球体表面形貌及其真球度等的检测方法、检测装置及实验和应用结果。第11章介绍利用AFM检测人体细胞机械特性的方法,研究正常与病变细胞组织与其机械特性间的关系,探索定量诊断疾病和预报的可能。

本书由董申、孙涛、闫永达等撰写,具体分工如下:第1篇由孙涛教授、陈建超博士撰写;第2篇由张俊杰博士撰写;第3篇的第6章由胡振江副教授撰写,第7章由闫永达教授撰写;第4篇的第8、9章由曹永智副教授撰写,第10章由赵学森副教授撰写,第11章由王景贺研究员撰写。全书由董申负责统稿。

在本书即将出版之际,首先我要感谢在研究生培养过程和在工作过程中给予我们帮助的人,他们是:哈尔滨工业大学的谭久彬、梁迎春、甘阳、李钰、王铀、冉啟文、费维栋教授,南京大学的赵建伟教授,南京航空航天大学的郭万林教授,黑龙江大学的袁福龙教授,哈尔滨医科大学的傅松滨教授,中科院力学所的赵亚溥、魏宇杰研究员,中国工程物理研究院的唐永建研究员,黄燕华、高党忠副研究员,美国南卡罗来纳大学的李晓东教授,德国鲁尔波鸿大学的A. 哈特迈尔教授,以及北京科瑞利通科技发展有限公司的董友等。

其次,我要感谢国家自然科学基金委员会。自1986年以来,我们一直不断得到基金的支持,特别是重点项目“微纳米加工表层形成机理及相关技术基础”直接支持我们这一方向的研究。而且在这一方向从事研究的17位博士生,除刚毕业或在国外工作的以外,都获得一项以上自己负责的自然科学基金资助。其中有多人分别获得“全国百名优秀博士学位论文”、“新世纪人才”、“德国洪堡基金”、“优秀青年科学基金”、“青年拔尖人才支持计划”等支持或荣誉,这些都离不开自然科学基金的资助。

我还要感谢哈尔滨工业大学出版社的唐余勇教授,是他的鼓励和支持才使我下决心组织出版这本专著,也是他的帮助才得以使从未写过书的我们能够顺利出版这本专著。

最后,我感谢所有帮助过我的人,特别是参加本著作编写工作的人。

著者 董申 孙涛 闫永达
于哈尔滨工业大学
2012年元月

目 录

第 1 篇 纳米机械加工表面的微观形貌检测方法

第 1 章 纳米机械加工表面微观形貌检测方法	3
1.1 表面微观形貌的评价方法与评价体系	3
1.2 超光滑表面微观形貌检测仪器分析与选择	6
1.2.1 触针式表面测量技术	6
1.2.2 光学式表面测量技术	7
1.2.3 扫描显微镜表面测量技术	8
1.3 表面微观形貌的检测与结果分析	10
1.3.1 典型表面微观形貌测量仪器	11
1.3.2 表面形貌的检测实验	12
1.3.3 表面形貌检测结果分析	13
1.4 纳米机械加工表面形貌测量技术发展	19
参考文献	20
第 2 章 三维表面微观形貌的表征与检测	22
2.1 三维表面微观形貌的检测技术与国际标准表征	22
2.1.1 三维表面测量和分析中涉及的几个问题	23
2.1.2 三维表面形貌的表征参数	25
2.2 三维表面微观形貌的谱矩表征	25
2.3 轮廓/表面功率谱密度理论及应用	27
2.3.1 功率谱密度定义及其计算方法	27
2.3.2 应用功率谱密度理论对比不同测量仪器结果	28
2.3.3 应用功率谱密度理论研究超精密加工工艺	30
2.4 三维表面微观形貌的分形表征及应用	36
2.4.1 三维分形维数的计算	36
2.4.2 几种工程表面的分形维数测量	37
2.5 原子力显微镜的采样条件参数优化	38
2.5.1 方法描述	38
2.5.2 应用频谱分析确定采样条件的实验	39
2.5.3 应用频谱分析确定合理采样条件的步骤	43
参考文献	43

第2篇 纳米机械加工表层形成机理

第3章 纳米机械加工的分子动力学建模与仿真	47
3.1 晶体铜纳米加工的分子动力学模型	47
3.2 分子动力学基本原理	48
3.2.1 经典牛顿运动方程的求解方法	48
3.2.2 描述原子相互作用的势能函数	49
3.2.3 模拟实验条件的系综	50
3.2.4 其他设置	51
3.3 晶体铜建模技术	52
3.3.1 晶体结构	52
3.3.2 单晶铜建模	53
3.3.3 双晶铜建模	54
3.3.4 纳米晶铜建模	54
3.4 晶体缺陷	55
3.4.1 晶体缺陷分类	55
3.4.2 位错缺陷	56
3.5 晶体缺陷分析技术	57
3.5.1 中心对称参数(CSP)	58
3.5.2 共近邻分析(CNA)	59
3.5.3 Ackland 键角分析(BAD)	59
参考文献	60
第4章 晶体铜纳米机械加工机理	61
4.1 纳米机械加工单晶铜	61
4.1.1 单晶铜纳米机械加工机理	61
4.1.2 其他参数对纳米机械加工单晶铜的影响	66
4.2 纳米机械加工双晶铜	77
4.2.1 包含任意晶界的双晶铜纳米机械加工机理	77
4.2.2 包含孪晶界的双晶铜纳米机械加工机理	81
4.3 纳米机械加工纳米晶体铜	83
4.3.1 全三维纳米晶体铜纳米机械加工机理	83
4.3.2 准三维柱状纳米晶体铜纳米机械加工机理	86
参考文献	88
第5章 纳米机械加工亚表面损伤层的定量预测	89
5.1 晶体铜纳米机械加工亚表面损伤层形成机理	90
5.2 基于单个原子势能的亚表面变形层定量预测	93
5.2.1 原子势能的变化模型	93
5.2.2 基于原子势能的变化模型的亚表面损伤层定量预测	94

5.3 基于纳米压痕的亚表面损伤层定量预测	96
5.3.1 基于纳米压痕的亚表面损伤层的硬度的预测模型	96
5.3.2 基于纳米压痕的亚表面损伤层深度的定量预测	98
5.4 基于孪晶变形的亚表面损伤层的控制及改善	102
5.4.1 纳米晶体铜纳米机械加工中孪晶变形	103
5.4.2 纳米机械加工纳米孪晶铜	107
参考文献	114

第 3 篇 基于 AFM 的纳米机械加工技术

第 6 章 基于原子力显微镜的纳米机械加工技术	117
6.1 AFM 刻划加工的工作模式	117
6.1.1 AFM 工作原理	117
6.1.2 AFM 刻划加工原理	119
6.1.3 恒高刻划加工模式	120
6.1.4 恒力刻划加工模式	121
6.2 AFM 探针针尖位置实时检测及加工深度控制	122
6.2.1 AFM 刻划加工存在的问题	122
6.2.2 AFM 刻划加工深度实时检测方法	123
6.2.3 AFM 刻划加工深度控制方法	130
6.2.4 AFM 微悬臂探针压入样品模型建立	131
6.3 一种基于 AFM 的三维微/纳加工系统	139
6.3.1 总体设计	139
6.3.2 单片机控制器总体设计	141
6.3.3 单片机控制器研制	144
6.3.4 单片机控制器软件实现	147
6.3.5 上位机软件实现	150
参考文献	153
第 7 章 采用 AFM 探针的纳米机械加工机理及工艺	154
7.1 刻划力检测方法	154
7.1.1 悬臂梁 3 个方向弹性常数的确定	155
7.1.2 三方向力的确定方法	157
7.1.3 力表征信号的测量方法	162
7.1.4 刻划过程中力参数的确定实例	165
7.2 AFM 微探针纳米机械刻划加工材料去除机理及实验	169
7.2.1 AFM 探针机械刻划机理	169
7.2.2 探针形状对材料去除形态的影响	170
7.2.3 加工深度和表面质量影响因素研究	171
7.2.4 加工过程刻划力的影响因素研究	177

7.3	微探针加工工艺参数的优化	184
7.4	二维微结构 AFM 探针纳米加工	186
7.4.1	与 AFM 刻划软件加工的对比研究	186
7.4.2	线型结构的加工工艺	187
7.4.3	二维面型结构的加工工艺	188
7.4.4	加工过程其他因素影响	191
7.5	三维微结构 AFM 探针纳米加工	192
7.5.1	基于二维加工工艺的三维微结构加工	192
7.5.2	基于新型纳米加工系统的探针轨迹规划	194
7.5.3	AFM 微探针三维加工过程	195
7.5.4	三维连续曲面微结构微探针加工实例	196
7.6	采用 AFM 探针加工跨尺度微纳结构	201
7.6.1	采用 AFM 探针加工毫米尺度微纳结构的加工装置及加工过程	201
7.6.2	采用 AFM 探针加工毫米尺度微纳结构的加工实例	203
	参考文献	204

第 4 篇 基于 AFM 的工程应用

第 8 章	AFM 与“自组装”相结合的应用	209
8.1	基于机械—化学方法的硅表面可控自组装技术研究	209
8.1.1	硅表面可控自组装单层膜的理论	209
8.1.2	微加工系统的建立及微加工实验研究	210
8.1.3	硅表面可控自组装膜的制备及其验证实验研究	214
8.1.4	硅表面可控自组装膜的应用研究	216
8.2	基于 AFM 的聚二甲硅氧烷(PDMS)自组装及转移印刷微/纳结构	219
8.2.1	PDMS 的化学结构和特性	219
8.2.2	Au/PDMS 自组装褶皱图案的分析	223
8.2.3	调控 Au/PDMS 自组装褶皱图案的实验研究	225
8.3	嵌段共聚物自组装模板的制造	229
8.3.1	嵌段共聚物自组装的理论研究	229
8.3.2	自组装有序纳米微结构的 AFM 表征	231
8.3.3	自组装有序纳米微结构的实验研究	233
	参考文献	237
第 9 章	AFM 碳纳米管探针的制备	238
9.1	AFM 碳纳米管针尖的制作	238
9.1.1	AFM 碳纳米管针尖的制备过程	238
9.1.2	AFM 碳纳米管针尖制备的理论分析	241
9.1.3	AFM 碳纳米管针尖的截断操作	244
9.1.4	碳纳米管针尖的搭接延长操作	244

9.2 AFM 碳纳米管针尖的应用	245
9.2.1 敲击模式和相位成像技术	245
9.2.2 碳纳米管针尖的力曲线研究	246
9.2.3 长程力对针尖检测影响的对比研究	248
9.2.4 毛细力对纳米管针尖和硅针尖的影响研究	249
参考文献	252
第 10 章 AFM 在靶丸检测与加工中的应用	253
10.1 靶丸表面圆周轮廓的评价方法	254
10.1.1 表面粗糙度参数	254
10.1.2 圆度误差	254
10.1.3 球度误差	255
10.1.4 靶丸表面模数功率谱评价	256
10.2 靶丸表面圆周轮廓检测系统研制	258
10.2.1 系统的测量轨迹方案	258
10.2.2 测量系统的组成	260
10.2.3 测量系统的机械结构设计	260
10.2.4 电控系统及软件的研制	262
10.3 靶丸表面圆周轮廓的测量实验	264
10.3.1 正交大圆法测量与评价	264
10.3.2 等间隔经圆法测量与评价	267
10.4 激光靶丸表面的纳米机械加工	269
10.4.1 靶丸充气孔 AFM 加工技术研究	269
10.4.2 靶丸表面 AFM 局部微结构加工实验	271
10.4.3 靶丸表面圆周调制加工实验及再测量研究	271
参考文献	274
第 11 章 基于 AFM 的癌细胞的机械力学特性研究	275
11.1 基于 AFM 癌细胞的静态力学特性的分析	275
11.1.1 AFM 压痕实验的理论计算	275
11.1.2 细胞纳米压痕实验	277
11.1.3 细胞骨架与细胞力学特性的关系	281
11.1.4 癌细胞黏附特性实验	283
11.2 癌细胞动态力学特性的研究	284
11.2.1 小球针尖的制备	284
11.2.2 癌细胞动态特性测量	287
参考文献	289
术语索引	290

第 1 篇

纳米机械加工表面的微观形貌检测方法

随着精密、超精密制造技术的发展,对零件表面加工质量的要求越来越高,在追求和探索各种超精密表面加工新工艺、新方法的同时,对表面质量的检测理论、检测方法与检测仪器提出了更高的要求。表面质量检测理论必须适应各种纳米表面加工工艺研究的新要求,表面质量检测评价方法必须科学合理以适应各类超精密零件的制造水平和使用特性,检测仪器的检测精度必须高于零件加工制造的精度水平才能有效指导加工工艺。目前传统的机械触针接触式、光学干涉非接触方式的表面质量的检测理论与方法已经不能完全适应纳米级表面质量检测的新要求。原子力显微镜发明之后的二十多年里,其在精密工程领域得到了大量应用,成为纳米量级机械加工表面质量与表面形貌检测的重要仪器。一方面,原子力显微镜很好地实现了纳米量级机械加工表面质量的高精度检测,丰富了三维纳米表面形貌的测量理论,更精确地实现了超精密加工表面形貌的仿真和预报;另一方面,由于其表面测量的主要工作原理宏观上与传统的机械触针式测量方法极其相似,因此在目前测量纳米级表面形貌时沿用了传统的测量理论体系。事实上,对于基于原子力显微镜的纳米表面测量,既需要完善测量理论体系,弥补测量方法和仪器表征方面的不足,又需要对原子力显微镜测量纳米表面的测量机制和评价表征方法进行新的探索。

原子力显微镜测量的不足是因为探针悬臂测量系统实际上是偏载的、柔性的,其探针与表面之间的接触力在纳牛量级因而宏观上认为是准接触的测量方式,测量范围往往小于传统表面粗糙度测量的取样长度和评定长度。原子力显微镜的优势是纵向与横向测量分辨率在纳米甚至亚纳米量级,可以更精确地在三维方向上得到表面微观形貌和表面特征。为此,在国际国内广泛采用原子力显微镜进行超精密加工表面质量检测的新形式下,必须建立相应测量理论体系、完善纳米级表面质量评价方法。本篇在对各类超精密零件表面测量大量实验研究基础上,对纳米表面各类测量方法特别是原子力显微镜测量方法进行了分析和讨论,旨在为今后纳米表面质量测量理论体系的建立提供有用的基础研究素材。

本篇通过对各类精密表面测量仪器的测量原理、方法、仪器结构的研究,通过测量仪器数

据的对比和分析,了解和掌握原子力显微镜(Atomic Force Microscope, AFM)及其测量理论方法,通过分析触针式轮廓仪、干涉显微镜和原子力显微镜三种常用于检测超光滑表面微观形貌的测量仪器,剖析仪器的测量原理、仪器性能、形成的误差、空间分辨率及适用范围等,并利用这三种仪器进行不同材料、不同加工方法的超精密加工样件的测量,得到样件的表面微观形貌图及表面粗糙度参数值。通过对测量结果的分析,得出各类型仪器的适用规律,通过分析说明 AFM 测量方法更能反映样件表面纳米精度三维形貌。

通过上述纳米机械加工表面微观形貌的各类检测仪器与方法的对比,明确基于原子力显微镜的纳米加工表面检测的基础理论、基本方法、仪器技术等问题,从三维测量角度建立纳米加工表面原子力显微镜检测的基本概念、模型、测量方法,通过对微观形貌的 AFM 三维检测,发现超精密加工中的问题。总结三维表面形貌评价体系中各参数的定义和计算方法,对评定基准产生、滤波和校准量块等一系列相关问题进行讨论。三维测量和二维测量所提取的表面信息不同,测量参数值也不同;实验结果的分析对比表明,一般三维粗糙度测量值比二维测量值大。在研究三维表面微观形貌的谱矩特征基础上,系统地提出三维表面粗糙度参数的谱矩表达方式。对微纳米表面和表层完整性的评价性能的建议也具有较强的启迪作用。

在未来的工作中,AFM 不仅可以检测复杂的三维表面微观形貌,可以从三维信息中用小波等方法提取规律性的误差,还可以建立测量结果与超精密制造(各种加工方法加工工艺)之间的因果关系,预报表面质量及指导加工制造的工艺,特别是如何根据表面测量数据深入了解加工工艺及预报加工表面的质量等,为纳米级机械加工检测技术提供理论指导。这些工作将为原子力显微镜提供更广泛的应用空间。

第 1 章 纳米机械加工表面微观形貌检测方法

针对精密工程领域纳米级机械加工表面的检测技术问题,本章评述被加工材料纳米加工表面质量的检测评价方法、评价理论体系、检测仪器、表面表征方法、表面预测的发展。通过各类检测仪器对实际零件的典型检测实例,分析和说明纳米级表面质量测量的重要性、其测量理论与方法的内涵。通过表面质量的测量仪器测量方法的对比,分析指出原子力显微镜测量的检测能力、参数指标和技术优势。虽然原子力显微镜在应用上还存在一些理论与技术问题,但其将成为未来超精密纳米加工表面检测的重要手段之一。

1.1 表面微观形貌的评价方法与评价体系

表面微观形貌是指表面的微观几何特性,也称为表面拓扑图像(Surface Topography),具体指表面所具有的微观几何形状信息,并人为地依据波动间距的大小将其滤波分离出对应于大波动间距的形状误差、对应于微小波动间距的表面粗糙度以及介于两者之间的波纹度三类信息分别加以研究^[1]。就机械加工表面而言,表面微观形貌是由机械加工过程中的各种加工工序产生的,在很大程度上决定了所制零件的使用性能,直接影响机械系统的摩擦磨损特性、接触刚度、疲劳强度、传动精度、导电、导热和抗腐蚀性等,进一步影响产品质量及可靠性。近些年来,由于工业和科学技术的快速发展,对表面形貌提出了越来越高的要求。因此表面形貌的检测越来越引起人们的重视,特别是超精密表面形貌测量技术成为近些年来最受关注的课题之一。

表面微观形貌评定的核心在于对表面形貌信息的准确提取以及实现将此形貌信息对应于表面使用性能的量化评定^[1]。传统的对表面微观形貌识别与评定的研究主要集中于表面粗糙度的测量与评定。表面粗糙度是表面微观形貌组成部分中波动间距最小的,具有细微纹理的细微几何结构特征。当然“细微”的定义(波动间距)也是相对于工件的尺寸大小来确定的,例如在球轴承滚子(直径大于几十毫米)认为是粗糙度(波动间距小于 0.8 mm)的信息,在微小球体(直径介于几百微米至几毫米之间)上则只能看作是表面形状误差信息。所以随着仪器仪表的微小型化,现有的表面粗糙度评定方法显然已经不能与之适应。因此表面粗糙度的研究在经历了定性综合评定阶段和定量、标准化参数评定阶段之后,亟须进入定量高水平检测阶段^[2]。

1933 年 E. J. Abbott 和 E. A. Firestone 提出,用在轮廓截面的各个深度上支撑面变化率的关系曲线,即轮廓支撑长度率曲线来表征表面的几何特性^[3];1936 年 G. Schmaltz 在《技术表面学》专著中,提出用轮廓全高 H ,平均高度 h_m ,以及形状因子 $K = h_m/H$ 作为表面粗糙度的评定参数,并提出优先选用的数值系列^[4]。但粗糙度评定参数及其数值的使用真正成为一个被广泛接受的标准还是从 20 世纪 40 年代各国发布相应的国家标准以后开始的。首先是美国在 1940

年发布了 ASAB46.1 国家标准,之后又经过几次修订,成为现行标准 ANSI/ASME B46.1—1988《表面结构 表面粗糙度、表面波纹度和加工纹理》,该标准采用中线制,并将 R_a 作为主参数;接着前苏联在 1945 年发布了 GOST 2789—1945《表面光洁度、表面微观几何形状、分级和表示法》国家标准,而后经过了 3 次修订成为 GOST 2789—1973《表面粗糙度参数和特征》,该标准也采用中线制,并规定了包括轮廓均方根偏差(即现在的 R_a)在内的 6 个评定参数及其相应的参数值。另外,其他工业发达国家的标准大多是在 20 世纪 50 年代制定的,如联邦德国在 1952 年 2 月发布了 DIN4760 和 DIN4762 有关表面粗糙度的评定参数和术语等方面的标准等。我国最早的表面粗糙度国家标准是于 1955 年颁布的 JS B0601—1955^[3,4]。

以上各国早期标准的内容比较简单,在一些测量原则及与测量结果相关的评定条件方面的研究也都不够深入,使用或推荐的参数较少,不同标准下的参数间的对比十分困难,由此给国际贸易和各国学术界间的合作带来了很大的障碍。进入 20 世纪 70 年代,国际标准化组织成立了第 57 委员会(ISO/TC 57)负责制定表面特征有关标准。该委员会协调其成员国相继完成了 ISO 产品几何量技术规范(GPS)国际标准。各成员国也相继将其采纳为蓝本来制定相应的国家标准,如我国参照 ISO 468—1983 制定了 GB/T 1031—2009^[5]。自此各个国家各自为政的局面得到极大地改观。

为充分完整地反映表面微观几何形状的特性,各国用来研究或纳入标准的评定参数已达到 30 余个,分为表面粗糙度的纵向评定参数、横向评定参数、形状评定参数和综合评定参数。由于表面形貌本身的复杂性以及将表面形貌信息与表面使用性能对应起来的尝试,各种不同的参数相继被提出并加入到原有的标准中,这些参数有的在内容上有交叉、重复,有的只反映非常特殊的应用情况,还有一些参数其内在含义相互之间是矛盾的。参数的数量不断增多,形成了所谓的“参数爆炸”的局面^[1]。显然,这种情况非常不利于表面形貌评定学科的发展,给工业界实际的应用也带来了很大的困扰。这一问题已经引起了业界广泛的重视,许多学者已经提出了各种解决方法,然而到目前为止还没有完善的解决方案^[6]。

此外,上述标准只是针对二维的表面微观形貌的评定,而表面从本质上讲是三维的,二维曲线轮廓无法真实反映表面的所有特征,由二维轮廓得出的评定参数也因此无法真实地反映表面的功能特性。于是,取得表面的真实三维信息,并进而提出反映表面功能特性的三维评定参数就成为当今表面计量领域的研究热点和发展趋势。K. J. Stout 等人提出按不同的表征特性将参数划分为幅度参数、空间参数、综合参数和功能参数四大类(共 14 个参数)^[7]。目前基于中线制的三维评定国际标准 ISO 25178 已经在 ISO/TC 213 委员会进行评议,各国的学者也在积极研究其他的三维评定标准。近年来随着表面形貌研究的深入,又出现了许多新的评价表面形貌的方法,如使用分形几何 Weierstrass—Mandelbrot 函数模拟轮廓曲线评定表面形貌的分形法,Motif 法,特定功能参数集法,功率谱密度法,以及利用小波变换方法来分析表征表面形貌等。

现代测量技术和计算机技术的发展,使测量和描述表面微观形貌更为简单方便。目前,表面微观形貌测量技术与仪器技术主要有两个分支:一是以触针法为代表的接触测量法;另一种是非接触测量法,主要是通过光学技术/电子来获得表面形貌的信息。另外近几年发展起来的扫描隧道显微技术和原子力显微技术也被用来作为测量超光滑表面微观形貌的工具,使得表面形貌测量技术达到了分子、原子尺度。表 1.1 中给出了影响仪器空间分辨率的主要因素。

表 1.2 所示为现有的表面形貌测量方法及分辨率^[1]。表 1.3 所示为表面形貌测量新的扫描探针显微镜(Scanning Probe Microscope,SPM)方法及分辨率。

表 1.1 仪器分辨率的影响因素^[1,8,9]

测量仪器与方法	纵向分辨率	横向分辨率
触针式仪器	电和机械的噪声	触针针尖半径和触针压力
光切法	光截层的宽度	照明光的波长
光学探针法	电和机械的噪声	光探针的光点尺寸
干涉法	条纹的相对宽度和间距	照明光的波长和物镜的数值孔径
电子显微镜法,包括扫描电子显微镜及透射电子显微镜	接收与计算等高线能力,测量时所选用的放大倍率和特定倾角(尚未实现量化)	电子透镜像差,电子束光点尺寸以及电子或其他发射物形成的区域总尺寸

表 1.2 表面形貌测量方法、特征和技术参数^[1,2,4,6,8,9]

测量方法		仪器型号	主要特征	纵向分辨率	横向分辨率
接触法	机械触针法	触针轮廓仪	金刚石触针与被测表面接触并沿表面横向移动,记录触针的垂直位移,可溯源	0.01 μm	0.2 μm
	光切法	光切显微镜	光切原理	0.05~1 μm	20 μm
非接触方法	光学探针法	三角法	基于传统三角测距原理	0.5 μm	3 μm
		离焦误差检测法	检测表面微观形貌对物镜焦点的偏离量,把离焦量转为电信号	0.1 nm	1 μm
		共焦扫描探针仪	被测表面微观起伏偏离物镜焦点时给出误差信号控制探针扫描,保持共焦状态	1.5 nm	1 μm
		外差干涉仪	光频调制和相位测量	0.5 nm	0.73 μm
	全积分散射法	全积分散射计	测量散射损失,直接给出均方根 Rq 值	0.2 nm	—
	干涉显微镜法	相移扫描干涉显微镜	直接测量干涉场相移分布	0.1 nm	0.5~1 μm
		白光干涉显微镜	采用白光光源,结构类似于 Mirau 干涉仪	0.1 nm	微米级
		微分干涉相衬显微镜	采用显微镜分辨率极限以下的剪切干涉技术直接测量表面轮廓的差分	1 nm	0.4 μm
		双焦干涉显微镜	共光路系统,干涉共模抑制技术	2 nm	2 μm

续表 1.2

测量方法		仪器型号	主要特征	纵向分辨率	横向分辨率
非接触方法	电子显微镜法	扫描电子显微镜法	从二次电子图像获取表面三维信息	未量化	0.4~0.9 nm
		透射电子显微镜 (TEM)	波长为 0.005 36~0.003 70 nm,比可见光波长小十几万倍	未量化	点分辨率 0.3~0.5 nm 晶格分辨率 50 pm

表 1.3 表面形貌 SPM 测量方法、特征和技术参数^[1]

测量方法		仪器型号	主要特征	纵向分辨率	横向分辨率
表面检测新技术	扫描探针显微镜法	扫描隧道显微镜 (STM)	利用量子力学的隧道效应理论,通过控制触针与表面隧道电流检测表面形貌	0.01 nm	0.1 nm
		原子力显微镜 (AFM)	利用触针与表面的原子间作用力,检测表面形貌	分辨率比 STM 略低	
		扫描近场光学显微镜方法 (SNOM)	基于近场光学理论的新方法,突破了传统光学系统中存在的光学成像空间分辨率的衍射极限,具有普通光学显微镜无法达到的纳米量级的空间分辨率	20 nm	20 nm

1.2 超光滑表面微观形貌检测仪器分析与选择

目前,超精密表面形貌的测量与评定已成为国内外学者研究的重要方向。由于近年超精密表面测量仪器和测量方法的逐步完善,使得纳米级表面测量技术快速发展起来,但是随之问题也逐渐暴露出来。由于对超精密表面的检测没有统一的标准和测量仪器,用不同测量仪器检测的结果差异很大,无法断定哪一种方法测得的表面形貌更接近真实表面、可信度更高。因此,需要对常用检测超精密表面微观形貌的方法与仪器原理、性能进行分析论述,分析这几种测量仪器的误差成因,空间分辨率及适用范围,以期能找到满足测量要求的仪器,得到比较可靠的测量结果,为准确地测量超精密表面提供依据。目前常用的测量方法有如下 3 种。

1.2.1 触针式表面测量技术

机械触针轮廓仪是开发较早、研究较充分的一种表面轮廓测量仪器^[1],利用具有微小圆弧

半径的金刚石触针与被测表面接触,当触针沿被侧面移动时,被测表面的微观凹凸不平使触针做上下移动,其移动量由与触针组合在一起的位移传感器测量,并与对应的水平位置点数据一起构造出表面的二维轮廓。若再配之以一维工作台,触针即可实现对被测表面的栅格扫描测量,进而获得表面的三维形貌。

机械触针法的优势之一在于其高可靠性,即能够稳定地将触针所感知的表面信息转换为表面形貌。因此,该方法所得的测量结果一直作为评价其他表面测量方法的基准。此外,机械触针法还具有大纵横向测量范围及高纵横向分辨率等优点,如英国 Taylor Hobson 公司于 2008 年研制成功的 Form Talysurf PGI 2540 触针轮廓仪在 25 mm 的纵向测量范围内具备小至 0.2 nm 的纵向分辨率。但是,由于触针法是通过触针获得表面微观轮廓,因此触针的几何状态直接影响着输入信号的真实程度,如图 1.1 所示。美国国家标准技术研究所(National Institute of Standards and Technology, NIST)的研究表明,对于 R_a 小于 300 nm 的超精密加工表面,触针的几何形状将极大地低估测量结果。除此之外,作用在针尖上的测量力将导致表面产生接触弹性变形(也可能是塑性变形,这一变形量取决于测量力、触针的几何状态和被测表面的弹性模量及硬度)。变形的存在必然导致测得轮廓失真,而当接触表面将发生塑性变形时,被测样品表面将被破坏。当然,通过减少测量力能够减小变形量,减弱对表面的损伤,但是当测量力太小时,将不能保证触针能够跟随表面,从而降低了系统的可靠性^[10]。

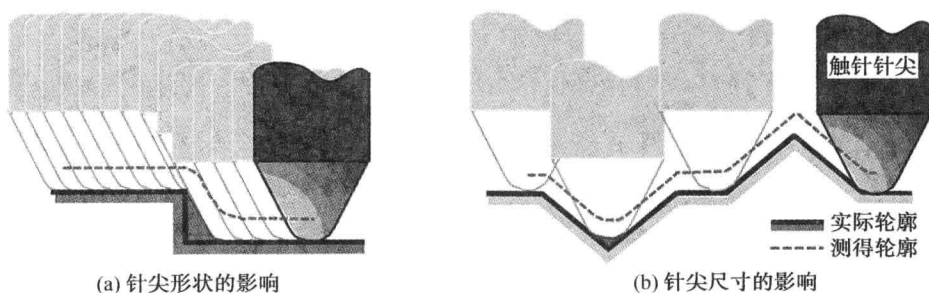


图 1.1 针尖几何形状及其尺寸对测量结果的影响^[1]

1.2.2 光学式表面测量技术

20 世纪 50 年代,光学技术被引入表面形貌测量,实现了非接触测量。光学表面形貌测量法可分为光波干涉法、光散射计量法和聚焦探测法^[11]。

光波干涉法利用标准参考面和被测表面反射的光束产生干涉,由显微镜将被测面的微观轮廓起伏转换为放大的平面干涉条纹,然后通过测量干涉条纹的相对变形来间接完成表面轮廓的测量。干涉法主要有相移干涉法、差分干涉法和白光干涉法 3 种。利用干涉接收的表面测量仪器具有测量信息直观和测量精度高等优点。近年来相移技术在干涉形貌测量中的成功应用,更使干涉技术测量表面形貌的精度和速度有了大幅度提高。但是,由于受到波长周期性的限制,干涉条纹的强弱会随着光程差之间的增加而周期性地变化,它在测量台阶高度超过所用光源波长的四分之一或较粗糙的表面时将显得无能为力。

散射法的测量原理是利用光反射特性和表面粗糙度之间的相互关系。用实验方法测量工件表面的反射或漫射率作为另一种参量的函数,这些参量有入射角、反射角、检测器的接收角、