



燕山大学
YANSHAN UNIVERSITY

基于原子显微镜的微纳刻划加工 虚拟仿真实验

帮助文件

版权所有©燕山大学

最近更新：2021年2月1日

目 录

1. 实验概述.....	3
2. 实验原理.....	4
2.1 实验仪器概述.....	4
2.2 原子力显微镜的工作模式及原理.....	9
2.3 基于原子力显微镜的微纳刻划加工原理.....	11
3. 学习方法及实验流程说明.....	15
3.1 学习方法.....	15
3.2 实验交互性操作流程说明.....	15
4. 软件操作说明.....	25
5. 软件操作运行环境与要求.....	26
6. 常见问题解决方法与问题反馈.....	27

1. 实验概述

按照课程培养目标，超精密加工技术课程实验项目选取先进的集成了微纳加工测量一体化技术的原子力显微镜作为实验设备，学生基于此设备开展微纳米级刻划加工工艺探索实践，是课程教学中学生直接接触前沿技术、洞悉前沿趋势不可或缺的一环。但是，由于原子力显微镜设备及探针实验耗材昂贵，而且设备紧凑，精度高，操作熟练程度要求极高，涉及高危险（设备安全）、高成本等问题，在实际授课中仅能采用教师作现场讲解和示范操作、学生现场观摩的形式开展教学，学生参与度低、教学信息量小，学生无法自主探索创新，实际的教学效果较差，不能满足以学生为中心理念新工科人才的培养需求。

为破解上述课程实验教学难题，借助现代信息技术建设了本虚拟仿真实验系统，通过合理开展虚拟实验，达到如下目的：

（1）掌握原子力显微镜的结构特征和工作原理，利用虚拟仿真实验平台实现低成本、低消耗的实验搭建（耗材装配与调整），帮助学生进一步加深对设备机械结构和设计特点的理解；

（2）熟练掌握原子力显微镜基本成像参数控制方法，培养学生对于微纳米尺度结构检测技术的整体认知，培养学生运用理论知识分析超精密加工领域问题的能力；

（3）熟练掌握微纳刻划加工的工艺方法，培养学生对于超精密切削原理的认知，培养学生运用理论知识分析问题、解决工程实际问题的能力；

（4）提升学生对理论知识的理解和运用能力，通过绘制加工表面质量与加工工艺参数关系曲线的实验过程，对刻划工艺特点有更加直观的印象，提升学生理论联系实际的能力；

（5）促进学生在交互实验中主动探索，突破习惯性认知方式，学生自主规划设计实验，获得相应结果，完成深度分析并提出结论，培养勇于创新探索的能力；

（6）加深对虚拟实验操作及相关理论知识的理解，帮助学生掌握机械类相关专业的实验方法，训练学生在实验中获取知识的能力，培养学生的创新能力和动手能力；

（7）打破学生获取知识的时间、空间限制，以学生的需求出发，允许学生根据个人需求多视角、多形式、多次数完成实验，充分调动学生参与实验教学的积极性和主动性。

2. 实验原理

基于原子力显微镜的微纳刻划加工实验涉及到：刻划设备搭建（探针准备）、形貌扫描测量、刻划加工以及刻划前和刻划后形貌分析等多个单元过程。整个实验过程包括设备认知、实验搭建、测量操作、加工操作等环节。各环节的详细原理如下：

2.1 实验仪器概述

原子力显微镜（英文名称：Atomic Force Microscopy，简称为 AFM）是由 IBM 苏黎世实验室的德裔物理学家 Gerd Binnig 与斯坦福大学的 Calvin Quate 于 1985 年所发明的高精度测量仪器。在此之前的 1981 年，同样是在 IBM 苏黎世实验室，Gerd Binnig 与他的导师 Heinrich Rohrer 创造性地将超导隧道效应与新型显微镜的发明联系在一起，发明了第一种可以在原子分辨率水平上呈现表面真实形貌的仪器——扫描隧道显微镜（英文名称：Scanning Tunneling Microscopy，简称为 STM）。

STM 采用极细的探针逼近样品表面，通过检测探针与样品间隧道电流的变化获得表面形貌。基于 STM 通过控制探针针尖与样品表面之间的相互作用（力、磁、热、光、点），相继出现了 AFM、磁力显微镜（MFM）、静电力显微镜（EFM）、近场光学显微镜（SNOM）等一系列研究从原子尺度到微米范围的材料表面特性的仪器。这些仪器被人们统称为扫描探针显微镜（英文名称：Scanning Probe Microscopy，简称 SPM）。目前较多的生产厂商将 SPM 技术集成于一台仪器上，通过更换不同的探头实现相应的技术功能。本次实验所用的 CSPM5500 型 SPM 就是将 STM 与 AFM 集成于一体。但 AFM 由于具有既能用于研究导体和半导体材料，也可以对绝缘体材料进行研究的优势，使得该仪器的应用范围极其广泛。本部分将介绍原子力显微镜的基本理论知识。

2.1.1 原子力显微镜的基本结构

原子力显微镜主要由四个部分组成：探针 (probe/tips)，压电扫描系统 (scanners)、力检测部分 (detection mechanism)、反馈系统 (feedback systems)，如图 2-1 所示。

(1) 探针

探针是原子力显微镜的关键部件之一，它直接与样品表面进行接触用于感知样品的表面特性。根据制造材料的不同，探针可分为两种基本类型：氮化硅探针 (silicon nitride) 与硅探针 (silicon)，两种类型探针的整体外观如图 2-2 所示，由于探针

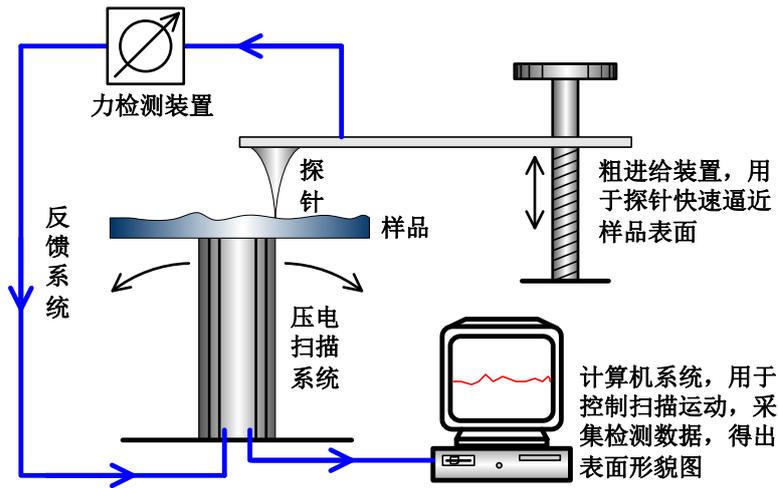


图 2-1 原子力显微镜结构简图

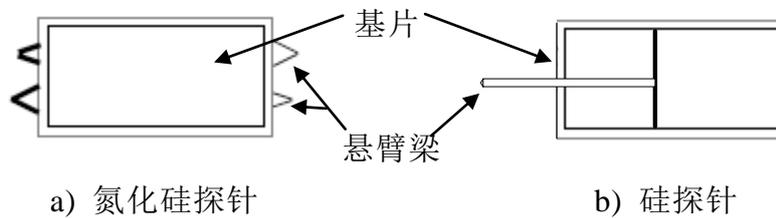


图 2-2 原子力显微镜探针示意图

的悬臂梁和针尖部分较微小，需借助于扫描电子显微镜(SEM)进行观察，如图 2-3 所示。不同类型的探针应用于不同的工作场合，氮化硅探针主要用于接触工作模式（请参阅 3.1 节）测量及轻敲工作模式（请参阅 3.3 节）液体环境内测量，而硅探针主要用于轻敲工作模式测量，但测量力较小的条件下（或采用具有较小弹性系数的较长的悬臂梁时），接触工作模式下也可采用此类探针。

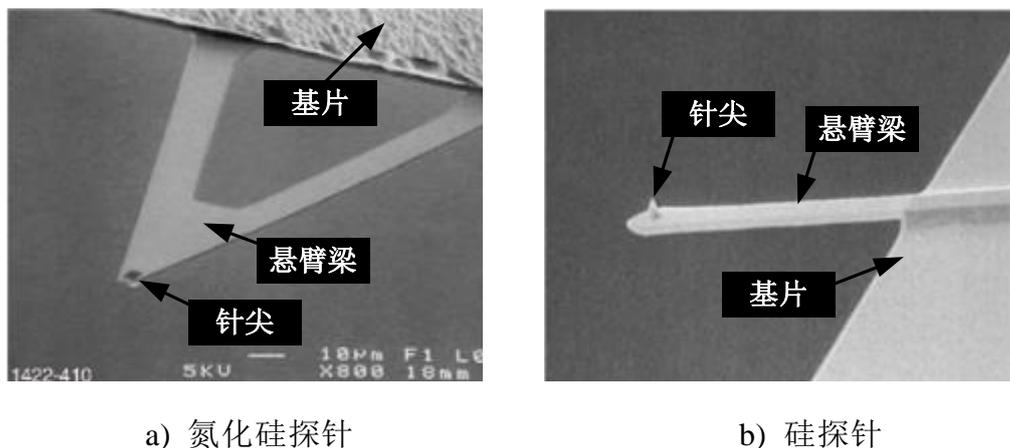


图 2-3 扫描电镜下的探针悬臂梁与针尖

任何一种类型的探针均由基片(substrate)，悬臂梁(cantilever)，针尖(tip)三个主要部分构成，如图 2-2，图 2-3 中所标示部分。

基片 不借助任何仪器用肉眼即可观察到的部分为基片，它是悬臂梁和探针的载体，用于支承连接悬臂梁。在装夹探针时，需用镊子小心地夹持该部分从而将

探针装入探针架。

悬臂梁 悬臂梁位于基片的窄边处，并外延伸出于基片从而形成悬臂梁结构。在悬臂梁的远离基片的一端装有针尖，与针尖所在面相反的一面镀有金质或者铝质的反光镀膜，以用于力检测系统检测悬臂梁的形变。悬臂梁的形式通常为 V 字形(V shaped)或单梁形(beam shaped)，如图 2-3 所示，长度一般为 50~200 μm ，厚度为 0.5~2 μm ，弹性系数为 0.1~100N/m。

两种类型的探针在悬臂梁的形式，数量及反光镀膜的材质方面均有所区别。其中氮化硅探针采用 V 字形，金质镀膜的悬臂梁。其数量一般为四个，即分别在基片两侧存在一大一小的长度分别约为 200 μm 和 100 μm 的悬臂梁——其中较小的（100 μm 长）用于一般精度要求的测量，其中较大的常用于原子级成像等高精度要求的测量。相比而言，硅探针只有一个采用铝质镀膜（或无镀膜）的单梁形悬臂梁，但该类探针的硬度要比氮化硅探针高的多，具有更大的力常数和更高的共振频率，因此该类探针极其适用于轻敲工作模式测量。

针尖 针尖是整个探针最核心部分，在测量过程中针尖将与样品表面发生直接接触。针尖的形状一般为金字塔状四棱锥体 (four-sided pyramid that comes to a point)，如图 2-4 所示，高约 3~15 μm ，其尖端的钝圆半径约为 5~100nm。



图 2-4 针尖的 SEM 图像

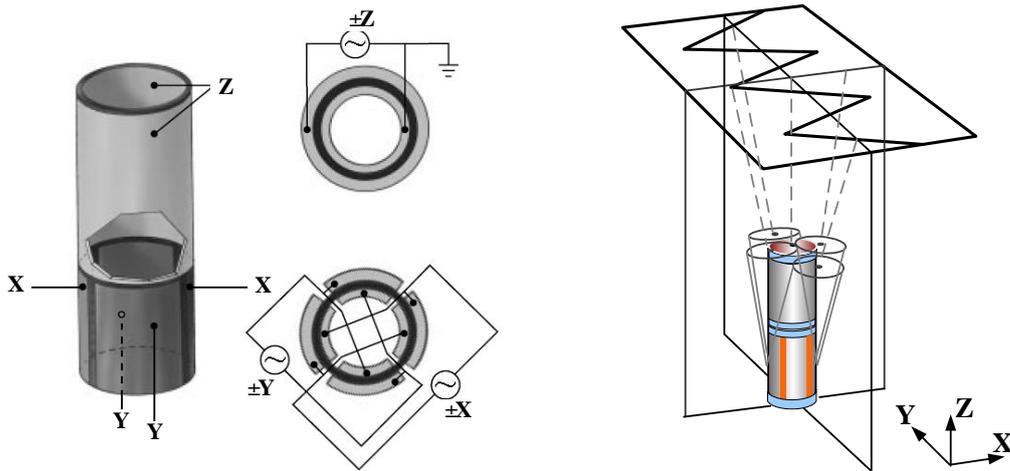
(2) 压电扫描系统

所谓压电即指压电效应，是指某种类型的晶体在受到机械力发生形变时会产生电场，或给晶体加一电场时晶体会产生物理形变的现象。许多化合物的单晶，如石英等都具有压电性质，但目前广泛采用的是多晶陶瓷材料，例如钛酸锆酸铅 [Pb(Ti,Zr)O₃] (简称 PZT) 和钛酸钡等。当在压电陶瓷加上对称电压时，压电陶瓷会按特定的方向伸长或缩短，也就是说，可以通过改变电压来控制压电陶瓷的微小伸缩。而伸长或缩短的尺寸与所加的电压的大小呈线性或接近线性的关系，这样通过压电陶瓷管就可以将 1mv~1000v 的电压信号转换成十几分之一纳米到几微米的位移，从而控制样品对探针的扫描。

目前常用的压电扫描系统使用单管型压电陶瓷管，如图 2-5 a) 所示。陶瓷管的外部电极分成面积相等的四份，内壁为一整体电极，在其中一块电极上施加电

压，陶瓷管的这一部分就会伸展或收缩(由电压的正负和压电陶瓷的极化方向决定)，导致陶瓷管向垂直于管轴的方向弯曲。通过在相邻的两个电极上按一定顺序施加电压就可以实现在 X-Y 方向的相互垂直移动，如图 2-5 b) 所示。在 Z 方向的运动是通过在陶瓷管内壁电极施加电压使陶瓷管整体收缩实现的。陶瓷管外壁的另外两个电极可同时施加相反符号的电压使陶瓷管一侧膨胀，相对的另一侧收缩，增加扫描范围，亦可以加上直流偏置电压，用于调节扫描区域。

值得一提的是压电陶瓷管的安装位置，它既可如图 2-1 所示，安装在样品下，即针尖静止样品在压电扫描系统驱动下移动，又可将压电陶瓷管与针尖相连，达到样品静止针尖在压电扫描系统驱动下移动之目的。



a) 压电扫描管接线图

b) X-Y 向加载电压后在 X-Y 平面上实现栅格扫描

图 2-5 单管型压电陶瓷管

(3) 力检测装置

AFM 系统是利用悬臂梁的上下偏转来检测针尖与样品间相互作用力的变化量。当针尖与样品之间有了相互作用之后，会使得探针的微悬臂摆动，所以当激光照射在悬臂梁的末端时，其反射光在接收器中的位置，如图 2-6 所示，也会因为悬臂上下摆动而移动。激光束在检测器四个象限中的强度差值（偏移量）是上面两个象限总光强（A+B）与下面两个象限总光强（C+D）之差，通过光强的变化来记录光斑位置的变化。

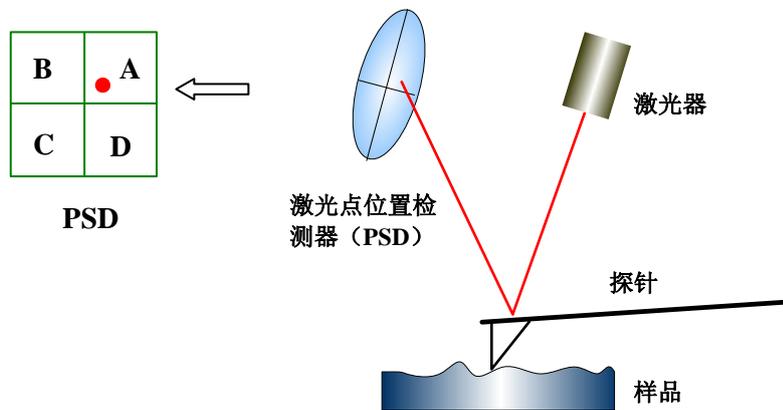


图 2-6 单管型压电陶瓷管

例如，当光强差为零时，光斑在中央位置，表示此时未进针，探针与样品没有接触。当探针与样品接触时，探针与样品原子间斥力作用使得悬臂向上偏转，四象限接收器接收的光强大于零。在扫描过程中，激光点位置检测器(PSD)将偏移量记录下并转换成电的信号，之后传送至反馈系统。

(4) 反馈系统

原子力显微镜在扫描过程中，由激光点检测器产生的信号作为反馈信号，即内部的调整信号，进入反馈系统。同时在反馈系统中设定一个参考值（Setpoint），通过反馈系统驱使压电陶瓷扫描器做适当的移动，以使得探针与样品之间的作用力稳定在参考值处。如图 2-7 所示，原子力显微镜采用 PID 控制器（即比例-积分-微分控制器）作为反馈系统。PID 控制器由比例控制单元 P、积分控制单元 I 和微分控制单元 D 组成。它的基本工作原理是把收集来的的数据和一个阈值（setpoint）进行比较，将两者的差值即误差信号通过比例增益 K_p ，积分增益 K_i ，和微分增益 K_d 三个参数的调节计算出新的输入值，这个新的输入值的目的是可以让系统的数据达到或者保持在阈值。PID 控制器相当于是扫描探针显微镜的控制中枢。在扫描探针显微镜中，它通过比例调节，积分调节和微分调节来消除误差，使反馈信号重新等于阈值。

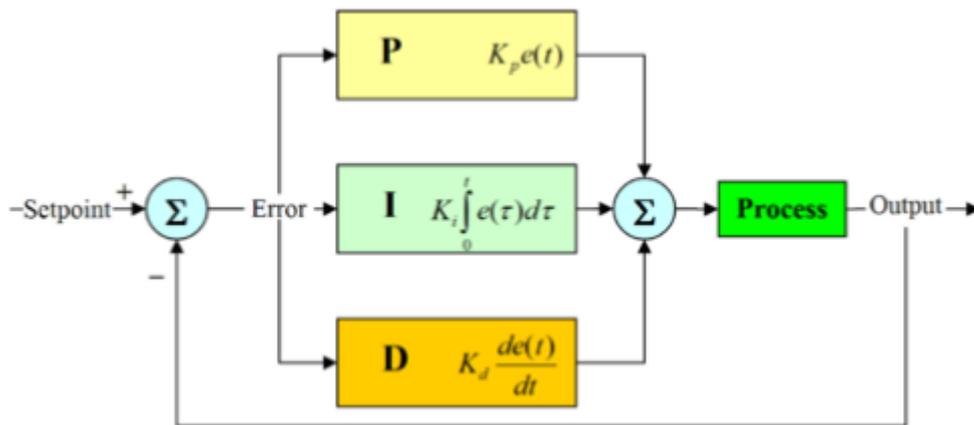
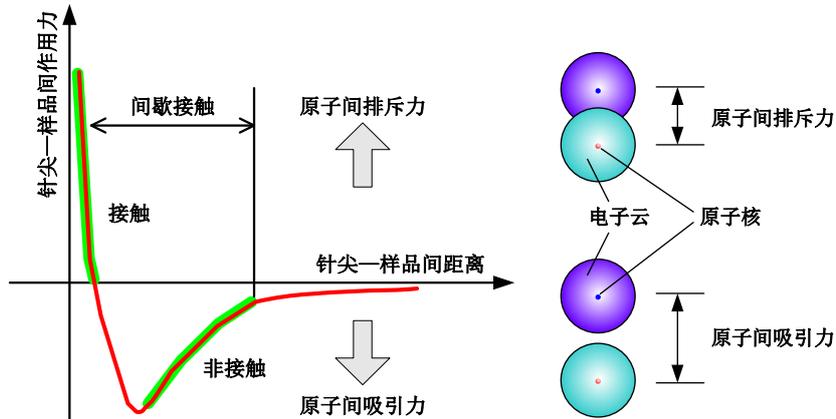


图 2-7 PID 控制器示意图

2.1.2 针尖与样品间相互作用力

原子力显微镜，顾名思义，它是利用探针针尖与样品表面之间相互作用力（原子间的作用力）来呈现样品的表面特性的仪器。针尖与样品之间的作用力会随两者之间距离的改变而变化，其作用力与距离的关系如图 2-8 所示。在图 2-8 分图 a) 中所示曲线右侧区域，针尖与样品保持远离。当针尖与样品逐渐接近时，它们的原子开始轻微的相互吸引。这种吸引作用持续增加直到原子间距足够小以至于他们的电子云开始排斥对方为止。随着间距的进一步减少，电子云的排斥作用逐渐抵消吸引力，合力曲线穿过零点，并最终变为正值（排斥力）。应注意到力曲线在排斥力区间（接触区）的斜率非常大，因此这意味着在针尖与样品保持接触的过程中，针尖

与样品的间距几乎是不可压缩的。因此对针尖施加以更大的作用力时，将会使得样品表面或针尖（或者两者同时）发生形变。



a) 针尖与样品间作用力与距离关系曲线

b) 原子间作用力示意图

图 2-8 针尖与样品之间的相互作用

2.2 原子力显微镜的工作模式及原理

原子力显微镜具有多种工作模式，最为常用的有：接触模式(contact mode)、轻敲模式(tapping mode)、由轻敲模式引申细分出的相位成像模式(phase imaging)以及由接触模式引申细分出的横向力显微模式(LFM, lateral force microscopy)等。各种模式下的工作原理略有差异。（本虚拟仿真系统内默认采用接触模式）

2.2.1 接触模式

在接触式 AFM 模式下扫描时，探针始终与样品接触（探针与样品的距离只有数个埃(0.1nm)）并简单地在样品表面滑动，探针的悬臂梁将在扫描过程中产生形变，其形变量随着样品表面的起伏变化而发生改变。与此同时，反馈电路通过控制扫描头在垂直方向上的移动，使得扫描过程中每个扫描点上悬臂梁的形变保持恒定。将整个扫描区域中每一个扫描点处扫描头的垂直方向位移记录下来，即得到样品表面形貌高度数据，如图 2-9 所示。

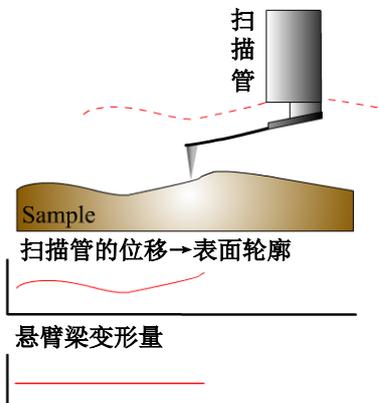


图 2-9 接触工作模式示意图

2.2.2 横向力模式

在接触模式 AFM 中，在扫描过程中，由于探针与样品表面存在横向的相互作用，探针悬臂会发生左右的扭曲。与接触模式类似，这个横向扭曲的大小可以通过激光点位置检测器的左右两个部分（即图 2-6 中 PSD 上的 BC 与 AD 两部分）的光强差反映。

悬臂产生的扭转通常由两种原因产生：表面摩擦力的变化和形貌的起伏。如图 2-9 所示，正向(Trace)扫描时，针尖在经过摩擦系数较大区域时受到较大的摩擦力，使得悬臂梁的在顺时针方向扭转程度加大，离开摩擦系数较大区域后，扭转程度减小。当探针遇到表面较大的起伏时，如图中所示的台阶，此时也使得悬臂扭转角增大，扭转方向为顺时针方向。当 AFM 反向(Retrace)扫描时，在经过表面摩擦系数较大的和高度起伏较大的区域均会发生扭转，但是由于摩擦力的方向总是与运动反向相反的特性，导致在摩擦系数较大的区域的扭转方向与正向扫描时相反，如图 2-10 所示。正是由于摩擦力的特性才使得能够将表面摩擦力的变化和形貌的起伏两者区分开来，AFM 系统通常对正反两向扫描的 LFM 信号进行检测并通过两次信号的对比运算得到表面摩擦力数据。

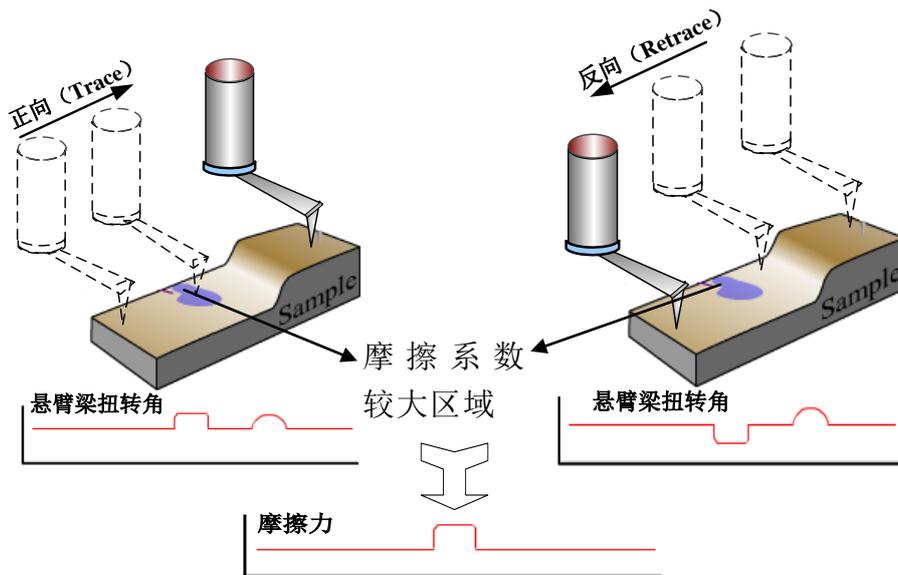


图 2-10 横向力模式示意图

2.2.3 轻敲模式

轻敲模式下 AFM 扫描时，探针针尖与样品的间距通常在几纳米之内。系统驱动硬度较高的悬臂梁在其固有振动频率附近振动（一般为 100~400kHz），振幅在 20nm 以上。扫描过程中，探针针尖在悬臂梁振荡期间间断地与样品接触，悬臂梁的振动幅值因此随着样品表面性质的变化而发生改变。与此同时，反馈电路通过控制扫描头在垂直方向上的移动，使得扫描过程中每个扫描点上悬臂梁的振荡幅值保持恒定。将整个扫描区域中每一个扫描点处扫描头的垂直方向位移记录下来，即得到样品表面形貌高度数据。

在该模式下扫描成像时，针尖对样品进行“敲击”，因此两者间只有瞬间接触。这样便克服了接触模式中因针尖被拖过样品而受到摩擦力、粘附力、静电力等的影响，并有效的克服了扫描过程中针尖划伤样品的缺点，适合于柔软或吸附样品的检测，特别适合检测有生命的生物样品。

2.2.4 相位成像模式

在轻敲模式 AFM 中，除了检测探针振动的振幅变化外，还可以通过检测驱动悬臂梁探针振动的信号源的相位角与悬臂梁探针实际振动的相位角之差的变化（也称为相移）来成像，如图 2-11 所示。引起该相移的因素很多，如样品的组分、硬度、粘弹性质等。因此利用相位成像模式(相位移模式)，可以在纳米尺度上获得样品表面局域性质的丰富信息。迄今相位成像模式已成为原子力显微镜的一种重要检测技术。

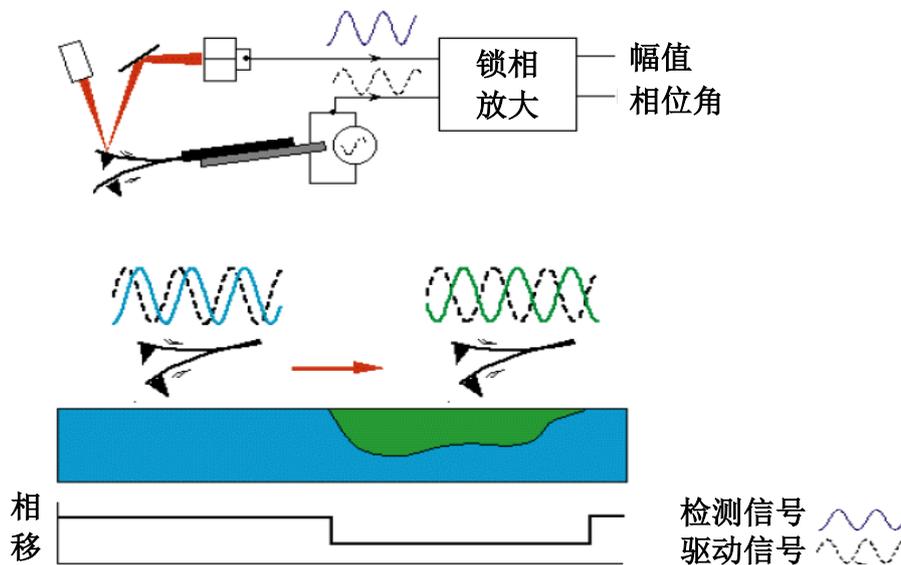


图 2-11 相位成像模式示意图

2.3 基于原子力显微镜的微纳刻划加工原理

基于原子力显微镜（Atomic Force Microscope, AFM）的微纳米刻划加工技术已经成功地应用于纳米加工领域，并且实现了微米尺度、纳米精度复杂三维结构的加工。实际上，AFM 系统是由一个很软的弹性微悬臂带动针尖运动实现纳米精度加工的弹性工艺系统，如图 2-12(a)所示。在 AFM 纳米机械加工过程中将 AFM 探针看成为一个微小的刀具对样品表面进行刻划，通常在接触模式下实现加工。该弹性工艺系统具有如下优点：①系统刚度小，作用在样品上的力小，可以进行纳米精度的机械加工；②通过控制探针作用于表面上的力，在实现纳米精度加工过程的同时，使探针具有跟踪表面的特性，可以减小由于安装误差及部件的运动误差等对微结构加工精度的影响；③通过改变系统的刚度，可以实现加工检测一体化。

2.3.1 基于原子力显微镜的刻划加工的一般原理

如图 2-12(a)所示, AFM 探针施加在样品上恒定的垂直载荷(F_N)是通过调节 AFM 扫描陶瓷管竖直方向的位移使刻划过程中探针微悬臂变形量保持不变来实现的。AFM 探针在样品表面上施加一个相对较大的垂直载荷 F_N (通常为几百纳牛到几百微牛), 使被加工的样品材料产生塑性形变实现样品材料的去除, 如图 1(b)所示, 去除的材料会沿着 AFM 探针刻划方向产生堆积或形成切屑, 由此加工获得微纳米尺度的形貌结构。本虚拟仿真实验系统被加工样品选用聚甲基丙烯酸甲酯 (poly-methyl methacrylate, PMMA), 在其表面上需完成加工前后形貌结构测量、刻划加工及工艺分析等操作, 所加工的微纳刻划浮雕方坑结构如图 2-13 所示。

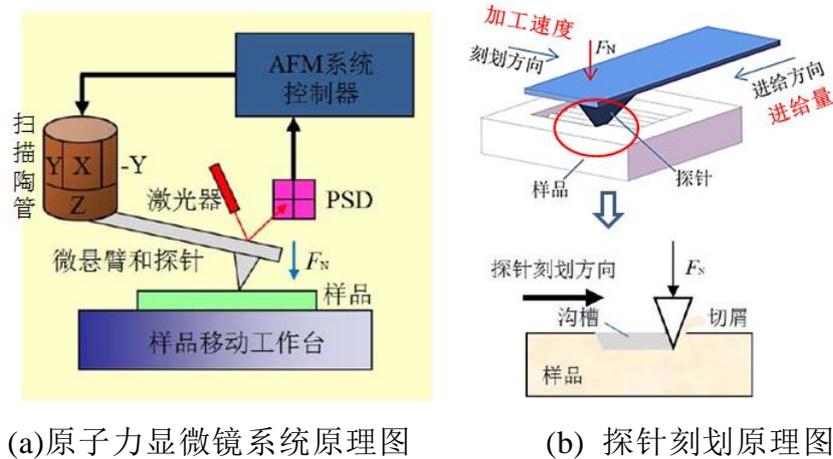


图 2-12 基于原子力显微镜的微纳刻划加工原理示意图

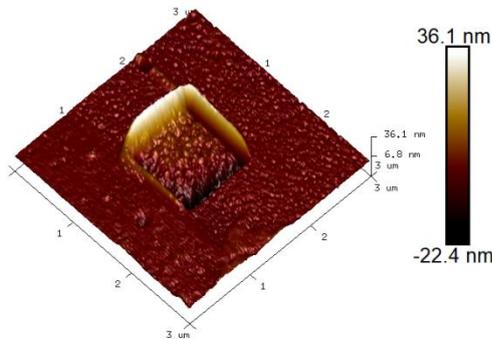


图 2-13 PMMA 表面上微纳刻划加工典型方坑三维图

2.3.2 微纳米刻划切削原理与刻划表面粗糙度模型

微纳刻划加工遵循基本的超精密切削原理, 如图 2-14 所示, 在微纳刻划塑性材料 (如实验中的 PMMA) 时, 探针面向左侧待加工区域的主切削刃和前刀面的主要任务是去除材料, 切削层在前刀面的挤压作用下发生剪切滑移和塑性变形, 然后形成切屑沿前刀面流出。前刀面的形状直接影响塑性变形的程度、切屑的卷曲形式和切屑刀具之间的摩擦特性, 并直接对切削力、切削温度、切屑的折断方式和加工表面质量造成显著影响。

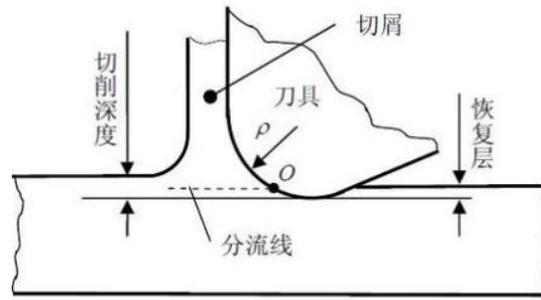


图 2-14 刻划切削原理

刻划用探针为三棱锥结构，如图 2-15 所示。探针在不同刻划方向加工，如图 2-16 所示，前刀面和后刀面的交线形成的切削刃形状各异。虽然理想的切削刃为直线，但是从微观看是曲线。如图 3 所示，该曲线的形状可以近似用与其在不同位置的法平面相交成交线的平均曲率半径来反映，称其为刃口半径 ρ 。切削时刃前区的应力状态十分复杂，应力集中造成材料中位错集中，导致材料产生塑性变形和滑移分离，一部分材料成为切屑沿前刀面流出，另一部分材料经后刀面熨压留在已加工表面。因为两部分材料运动方向不同，必然使刀具刃口前材料呈拉伸状态，拉应力使刃前区材料的抗剪能力下降，在刀刃的直接作用下，材料产生滑移分离。切削层材料被通过分流点 O 且平行于已加工表面的分流线分为两部分，分流线以上的材料沿前刀面流出，分流线以下的塑性变形层被 O 点以下的刀刃熨压后成为已加工表面。经过熨压以后，刀刃下方的材料产生严重的压缩变形，对已加工表面质量产生直接影响。

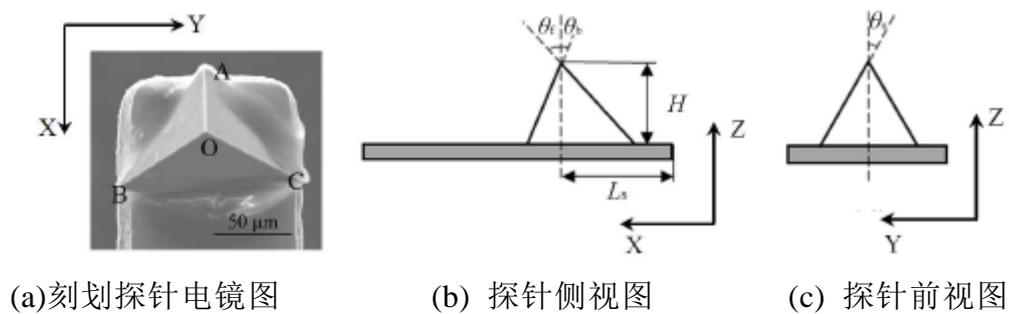
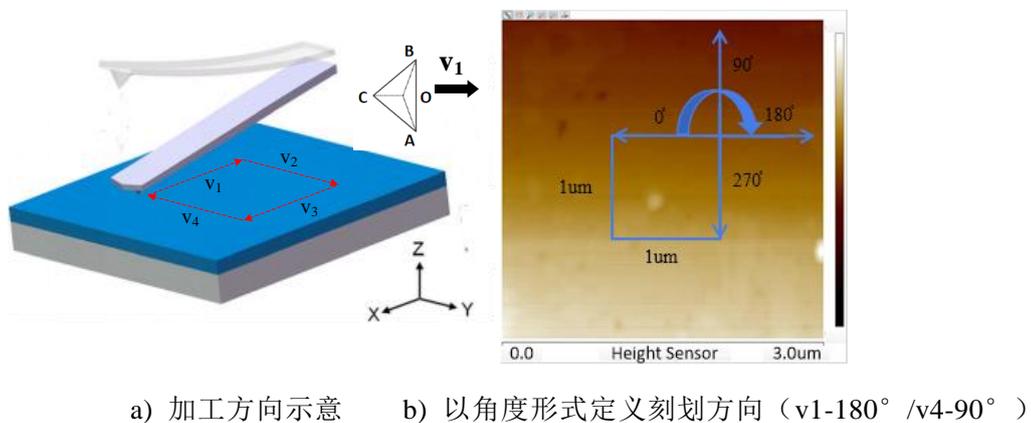


图 2-15 用于刻划的探针



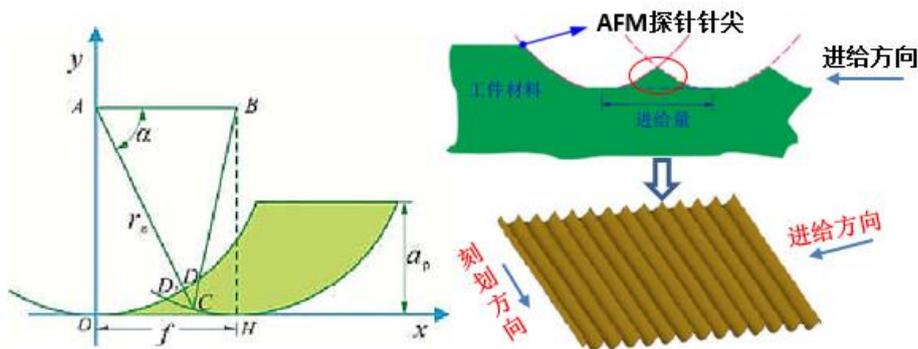
a) 加工方向示意 b) 以角度形式定义刻划方向 (v_1-180° / v_4-90°)

图 2-16 刻划方向的定义

刻划加工后形成的表面粗糙度与工件的材料、刀具的几何形状、润滑方法以及选用的切削深度密切相关。剪切、滑移和断裂被认为是影响切屑形成的几个主要因素。微纳刻划时只要有切屑产生，就可以把该过程模型化为材料沿着与水平面倾斜一定角度的平面被刀具剪切的过程，在已加工表面上形成的峰、谷高度随刀具刃口锋锐轮廓的变化而变化。最小切削厚度的存在使小于一定切削深度的工件材料不能被切除，如图 2-17(a)所示，相邻两刻划路径相交所示部分为在加工表面上残留的区域，称为 *spanzipfel* 残留区。基于该机理，图 2-17(b)为微纳刻划表面粗糙度的经典模型，该模型的粗糙度公式称为 *spanzipfel* 公式，

$$R_{th} = \frac{f^2}{8r_e} + \frac{h_{Dmin}}{2} \left(1 + \frac{r_e h_{Dmin}}{f^2} \right) \quad (1)$$

式中 R_{th} —— 表面粗糙度峰谷值 (nm);
 f —— 进给量 (nm)，即相邻两条刻划路径之间的距离;
 r_e —— 刀尖圆弧半径 (nm);
 h_{Dmin} —— 最小切削厚度 (nm)。



(a) Spanzipfel 表面粗糙度模型 (b) 刻划去除材料后粗糙度形成示意图

图 2-17 基于原子力显微镜的微纳刻划加工表面形貌形成原理

当使用同一探针在不同的刻划加工速度、进给量下刻划样品时 r_e 可视作定值，但 h_{Dmin} 因加工速度的不同将发生材料弹性回复和塑性侧流现象而差异显著，此外，不同的刻划方向造成 r_e 存在差异，也是导致不同刻划参数下刻划所得方坑表面形貌产生差异的主要原因。在虚拟仿真实验系统内，学生通过控制加工速度、进给量、加工方向探索刻划加工对表面形貌的影响规律，能够加深对上述超精密切削原理的认知。

3. 学习方法及实验流程说明

3.1 学习方法

本项目瞄准一流课程“高阶性、创新性和挑战度”标准，设计了以“尝试-改进反复训练”为核心的实验方法。学生可在预习不充分、甚至对知识一无所知的情况下，简单查看系统帮助文件、引导视频之后在系统的引导下就可开展实验中操作部分的内容。在引导下操作结束后，可进入操作考核环节，学生学习情况在此环节得到验证与反馈。如果实验者准备不足，或者对知识尚未理解透彻，很难得到理想的分数。为获得较好成绩，仍可进行二次、甚至多次尝试，思索之前遇到的问题，寻求答案。

在反复实验中，学生可自主设计实验方案，全面摸索工艺参数对刻划加工质量的影响规律，深刻理解超精密切削原理。而且为减少学生的重复性工作负担，学生的实验过程、实验结果由系统自动记录，学生只需键入基于实验结果的实验结果分析及结论，即可生成实验报告，简便快捷。

尝试-改进的实验方法也高度契合了机械工程专业的专业属性，因为在机械设计过程中就有反复地进行初选-应用-校核-改进的迭代逻辑。实验方法符合专业内学生的做事风格，能够广泛被学生认同和接受。

3.2 实验交互性操作流程说明

通过三维建模技术，设置了逼真的虚拟实验环境和实验设备，学生可在整个场景和情景中进行交互性操作 40 步。学生可按上述实验方法自主反复进行操作训练。操作时可按系统提示推进操作，对于已熟悉操作的同学，可以忽略系统提示完成操作。仿真实验中的关键交互步骤设置了两种反馈形式：（1）正确性判断反馈，如实验装置的搭建，设备初始参数的设置等，只有操作顺序正确才可以进行下一步的操作，包括在操作环节还设置了考核节点，正确性也可同时通过分值反馈体现；（2）实验参数设置反馈，如果设置参数超限等，系统可继续工作，但是会得到相应的失败结果，学生可根据结果提示改进设置实验参数继续完成实验。

实验流程如图 3-1 所示，实验流程包括如下交互性操作步骤：

步骤 1：登录项目网站 <http://ysu.rofall.net/virexp/>（见图 3-2），进入网站了解项目描述、特色、网络要求等相关信息。从网站左侧菜单获取实验指导书。注册用户可点击右上角“登录”按钮登录系统，访问答疑室、查看实验成绩。

点击操作实验，主界面可选择直接开始实验。点击页面右上角可全屏呈现实验界面。熟悉界面操作，按住鼠标左键可进行 360 度自主漫游，鼠标滚轮可实现视图缩放功能。（见图 3-3）

步骤 2：进入实验后弹出实验原理、实验目的和实验任务介绍。鼠标点击任意一项弹出图文展示（见图 3-4）

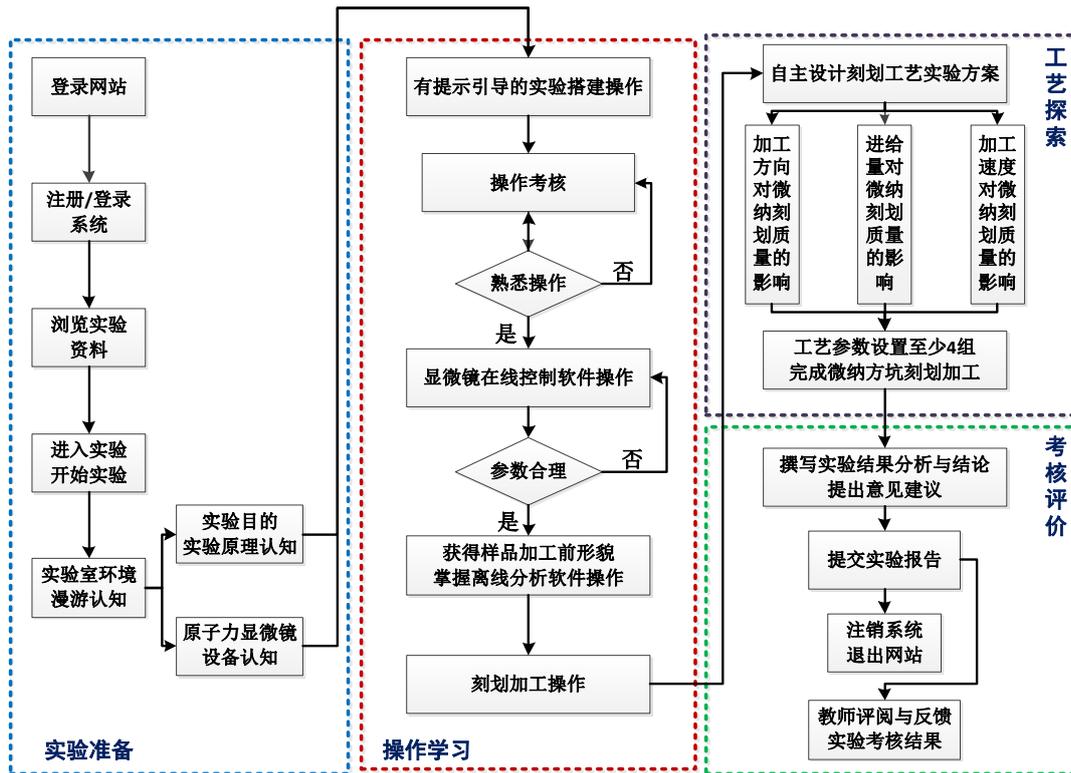


图 3-1 实验项目操作流程



图 3-2 项目网站截图



图 3-3 实验项目界面截图



图 3-4 实验原理与实验目的的认知界面截图

步骤 3: 点击“设备认知”后进入设备认知界面。鼠标点击任意文字框即可获得设备详情，此步骤包括 8 项认知点击操作。（图 3-5）



图 3-5 实验设备认知界面截图

步骤 4: 点击所有设备认知文字框后进入硬件搭建操作环节。（图 3-6）

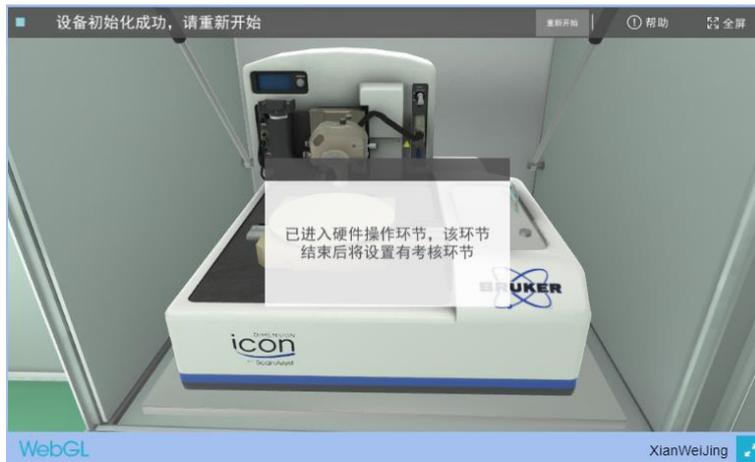


图 3-6 硬件搭建环节欢迎界面截图

步骤 5: 按提示完成样品装载，包括拿起镊子、夹取并移动样品、打开负压吸附固定样品 3 项操作。可随时点击右上角“重新开始”按钮重复练习操作。(图 3-7)

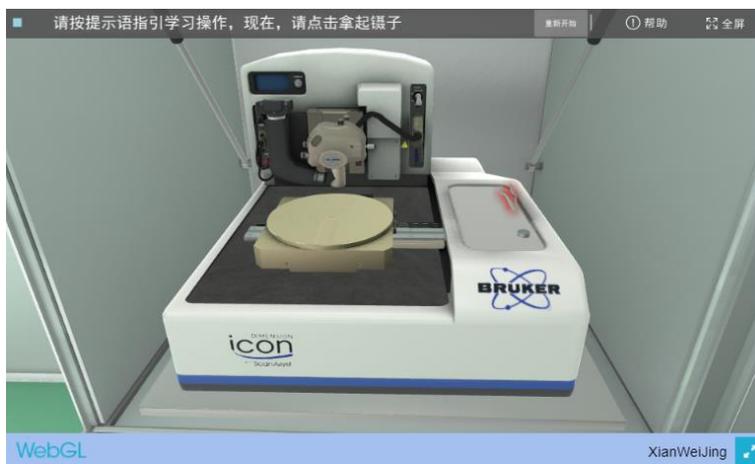


图 3-7 带有引导的样品装载操作界面截图

步骤 6: 按提示完成针尖的装载，包括打开探针夹、拿起镊子，夹取并移动探针、探针夹上方弹簧片复位固定、旋松扫描器固定旋钮、抬起扫描头、拿起探针夹、安装在扫描器接口上、复位扫描头、旋紧扫描器固定按钮等 10 项操作。(图 3-8)



图 3-8 带有引导的针尖安装操作界面截图

步骤 7: 进入考核环节，考核步骤 5 和 6 的学习效果。考核分值 20 分，考核中操作错误一次扣 2 分，可随时点击右上角“重新开始”按钮重复考核操作，考核分值以最后一次操作分值为准。点击返回，重复提示操作练习。（图 3-9）



图 3-9 操作考核欢迎界面截图

步骤 8: 考核结束后，进入软件操作学习，按提示打开在线控制软件，完成实验模式选择、设备初始化操作。（见图 3-10）



图 3-10 软件操作界面截图

步骤 9: 按提示完成探针参数设置。（图 3-11）

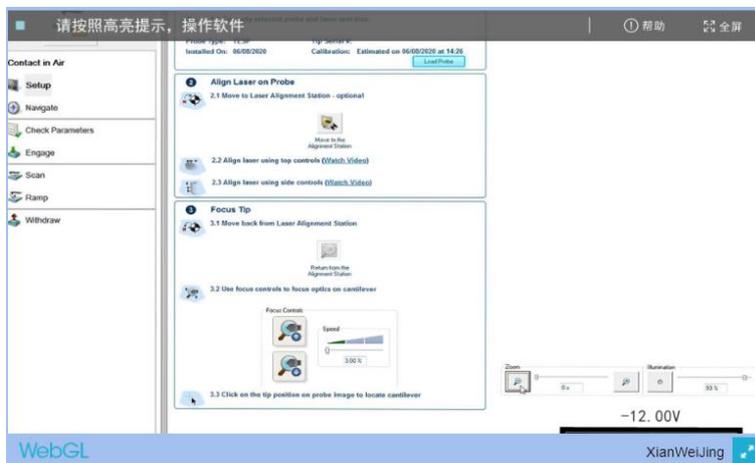


图 3-11 探针参数设置界面截图

步骤 10: 按提示完成激光器位姿调整设置。(见图 3-12)

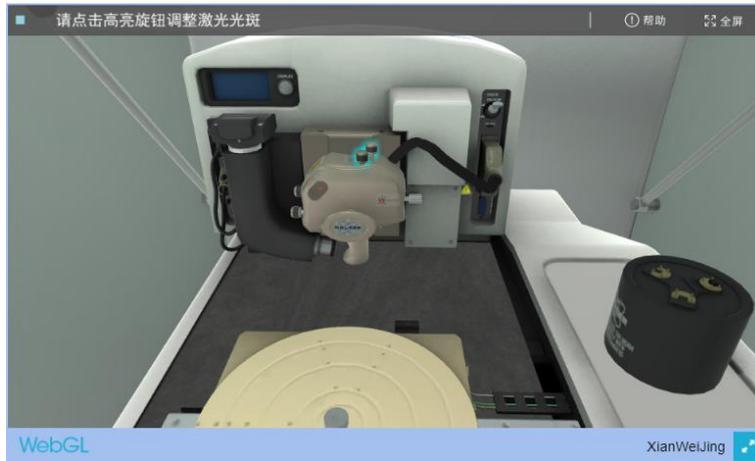


图 3-12 激光器位姿调整界面截图

步骤 11: 按提示完成激光光斑探测器位姿调整。(见图 3-13)

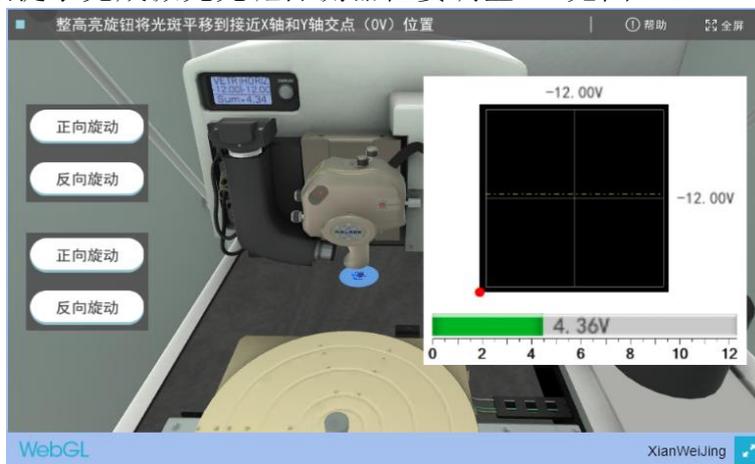


图 3-13 激光光斑探测器位姿调整界面截图

步骤 12: 按提示完成聚焦样品表面选取样品加工区域调整。(见图 3-14)

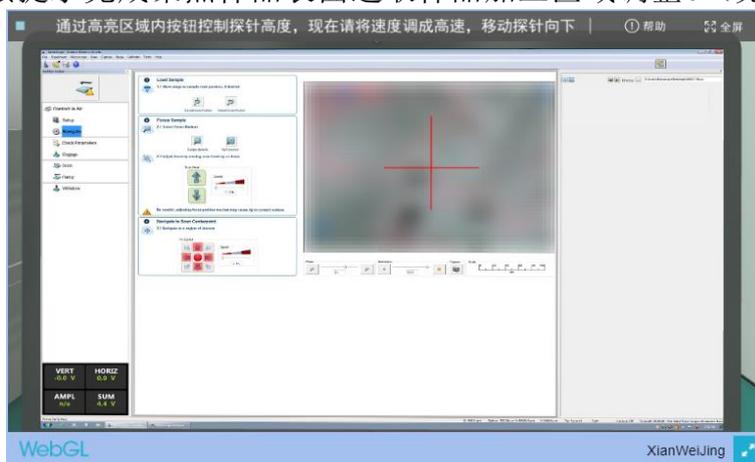


图 3-14 聚焦样品表面选取样品加工区域调整界面截图

步骤 13: 按提示完成扫描参数设置, 如参数不合理, 系统中止运行, 设置合理提示进针操作, 点击进针后开始扫描。(见图 3-15)

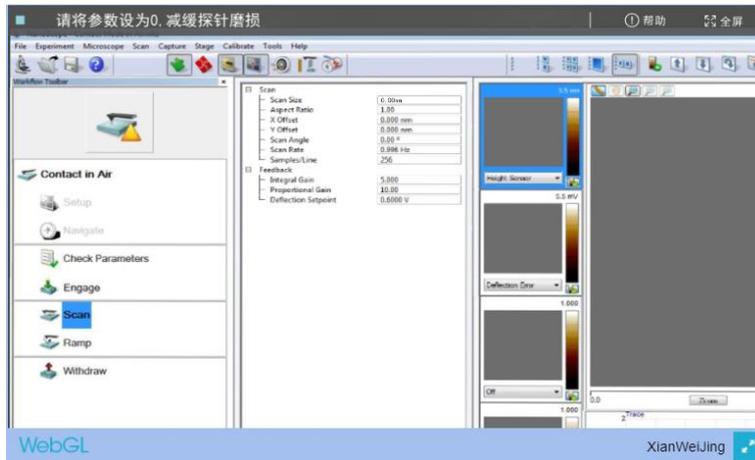


图 3-15 扫描参数设置界面截图

步骤 14: 扫描过程中，按照提示设置扫描调整参数。（见图 3-16）

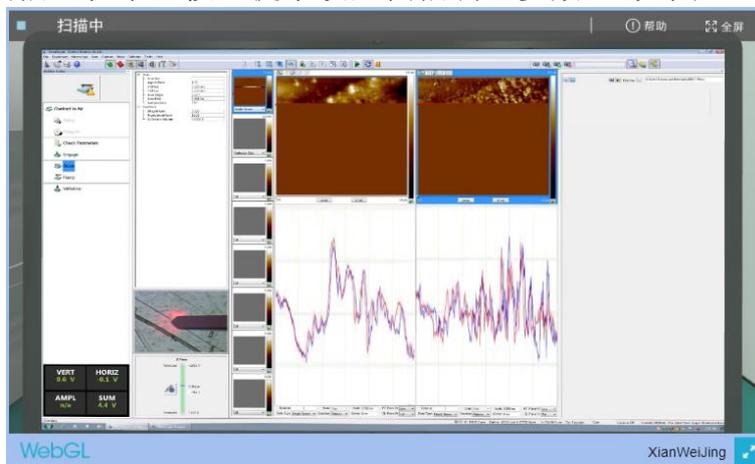


图 3-16 样品表面形貌扫描运行界面截图

步骤 15: 扫描结束，获得样品表面形貌图，按照提示点击测量形貌粗糙度。（见图 3-17）

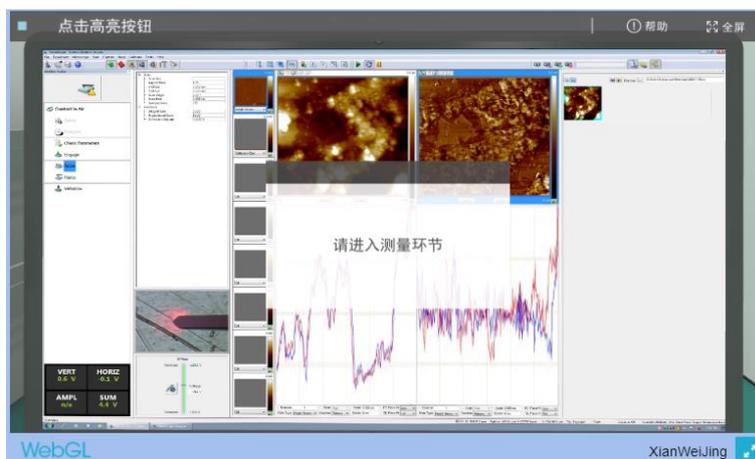


图 3-17 提示点击测量形貌粗糙度界面截图

步骤 16: 按照提示完成测量，右上角按钮退出。（见图 3-18）

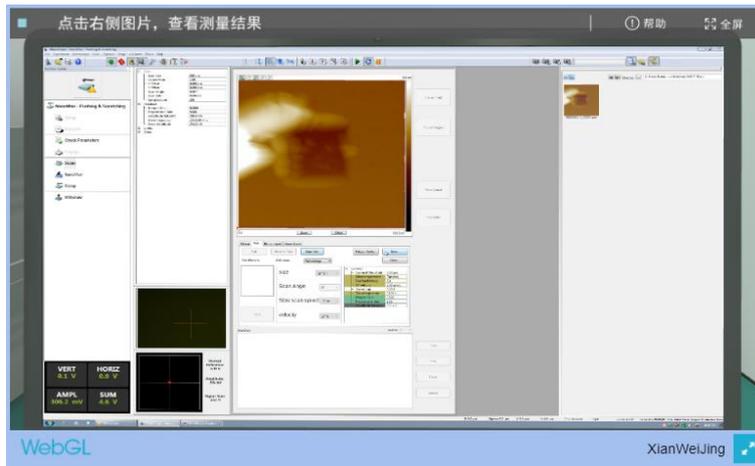


图 3-20 (续) 方坑加工后形貌测量界面

步骤 19: 刻划加工结束, 关闭软件及系统控制器。(见图 3-21)



图 3-21 关闭软件 (上) /控制器 (下) 界面截图

步骤 20: 整理实验结果, 分析实验规律, 键入实验原理、实验目的和分析结论, 完成实验报告。实验操作记录、实验结果自动填入实验报告模板。(见图 3-22)

实验报告

创建报告时间: 2020-12-24 07:15:41

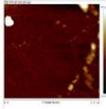
学号: 001
姓名: 体验账号
实验名: 基于原子力显微镜的微纳刻划加工虚拟仿真实验
分数:
实验结束时间:
2020-08-18 12:01:58

1. 实验记录 (满分 60 分)

步骤	操作记录	分值	得分
第 1 步	设备认知: 认知 AFM 主机、隔震台、控制盘、探针组件等	4	4
第 2 步	硬件操作: 原子力显微镜探针装卸、探针校准等基础操作	20	20
第 3 步	软件操作: 打开软件、调整激光点	4	4
第 4 步	软件操作: 设置探针参数、扫描参数、选针	4	4
第 5 步	软件操作: 保存形貌图像、分析图像粗糙度	4	4
第 6 步	软件操作: 进入微纳刻划 NanoScan 模式, 选择加工方向、加工速度、加工进给量任一控制量设置至少 4 种加工参数, 获得相应加工效果 本次实验完成: 加工方向: 0°、90°、180°、270° 加工速度: 1μm/s、5μm/s、20μm/s、50μm/s 加工进给量: 10nm、30nm、50nm、70nm	20	20
第 7 步	完成实验, 关闭软件, 关闭控制盘	4	4

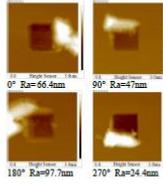
2. 实验结果 (满分 15 分)

2.1 加工方向表面形貌图 (满分 5 分)



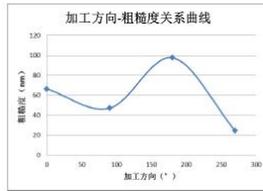
2.2 加工所得方向结构形貌图 (满分 5 分)

控制参数—加工方向
加工参数设置: Z 轴位移设置为 190nm, 加工速度设为 3μm/s, 进给量为 30nm, 探针下降速度设置为 40nm/s, 加工方向分别为 0°、90°、180°、270°, 加工后的图像如下:



2.3 粗糙度测量结果分析 (满分 5 分)

控制参数 (加工方向、加工速度、进给量) 和粗糙度的相关关系



2. 实验分析报告 (满分 25 分)

3.1 实验原理 (满分 5 分)

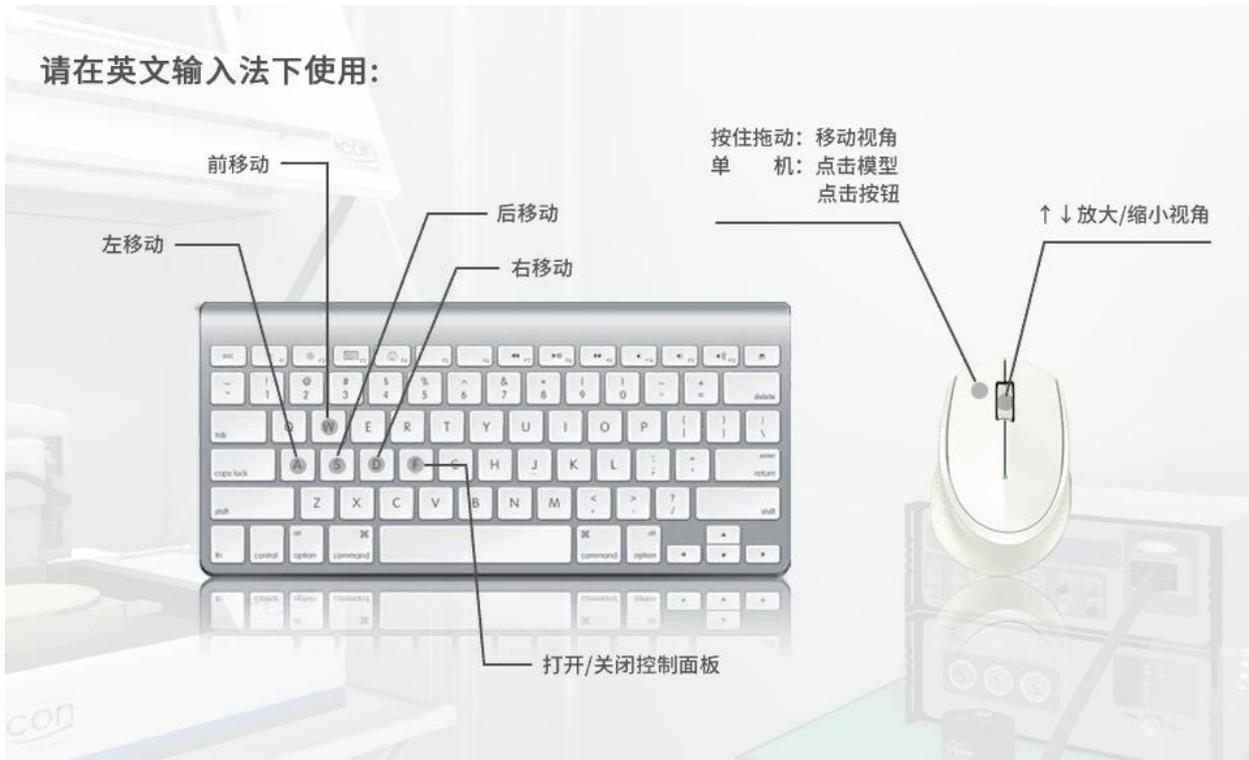
3.2 实验目的 (满分 5 分)

3.3 实验结果分析 (满分 15 分)

4. 对实验的评价和建议 (不占分值)

图 3-22 实验报告截图

4. 软件操作说明



5. 软件操作运行环境与要求

计算机硬件配置要求

计算机硬件配置需求（最低）	计算机硬件配置需求（推荐）
中央处理器： Intel® Core™ i5-7400-3.0GHz-4 核 4 线程	中央处理器： Intel® Core™ i5-8500-3.0GHz-6 核 6 线程
内存： 8GB	内存： 16GB
硬盘空间： 100GB	硬盘空间： 500GB
图形处理器： NVIDIA® GeForce® GTX 960	图形处理器： NVIDIA® GeForce® GTX 1060
显存： 2G 及以上	显存： 4G 及以上
显示器： 16:9 分辨率 1280*720 及以上	显示器： 16:9 分辨率 1920*1080
网络带宽： 10Mbps	网络带宽： 50Mbps
操作系统： Windows 7	操作系统： Windows 10
	浏览器： Chrome、Firefox、遨游、猎豹、360、QQ、搜狗、Edge 等

网络要求

客户端到服务器的带宽要求： 5M-10M

支持 100 个学生同时在线并发访问和请求，如果单个实验被占用，则提示后面进行在线等待，等待前面一个预约实验结束后，进入下一个预约队列。



6. 常见问题解决方法与问题反馈

(1) 实验系统登录问题

问：如何注册、登录实验系统

答：请登录网址<http://ysu.rofall.net/virexp/s/chunk/index.pdf>，查看相关解答。

(2) 实验加载问题

问：无法加载实验系统

答：请尝试更换浏览器，优先推荐使用 Chrome 和 Firefox，其他遨游、猎豹、360、QQ、搜狗、Edge 等。

(3) 实验过程中系统画面卡滞

问：按钮无响应或者系统画面卡滞

答：在提示引导下操作时，按钮无响应时，请注意观察所点击按钮，是否为系统蓝色高亮闪烁处，若是但并无响应，请刷新页面（在硬件操作环节有重新开始按钮，可点击重新开始）。系统画面卡滞，请刷新页面（在硬件操作环节有重新开始按钮，可点击重新开始）。

问题反馈与技术支持：

请发送邮件至 **Email: chenjc@ysu.edu.cn**

或工作日工作时间拨打：**+86-0335-8074646**