

文章编号 1004-924X(2013)07-1666-10

衍射光栅机械刻划成槽的预控试验

张宝庆^{1*}, 史国权¹, 石广丰¹, 蔡洪彬¹, 张善文²

(1. 长春理工大学 机电工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

摘要: 由于目前机械刻划衍射光栅加工仍依赖操作者经验, 故存在成槽质量差、无法预控等问题。本文结合铝薄膜蒸镀工艺现状, 采用 X 射线衍射法 (XRD)、扫描电子显微镜法 (SEM) 及纳米压痕实验揭示不同薄膜样本的微观结构与力学属性, 提出了制作衍射光栅的“薄膜分类试刻法”。研究表明, 光栅刻划过程可近似等效为楔体下压过程, 对“低弹性模量类”薄膜, 可采用滑移线场进行解析求解并一次试刻成槽; 对“弹塑性类”薄膜, 可采用有限元模拟实验进行成槽预控。该方法可预先对薄膜甄别分类, 用不同的计算方法确定不同种类薄膜的工装参数, 进而刻划出近乎完美的槽形; 同时减少了试验刻划耗时与浪费, 提高了成槽质量与刻划效率; 为刻划更加精密的光栅奠定了基础。

关键词: 衍射光栅; 机械刻划; 成槽工艺; 预控技术

中图分类号: TN305; O436.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132107.1666

Pre-control of mechanical scratching diffractive grating

ZHANG Bao-qing^{1*}, SHI Guo-quan¹, SHI Guang-feng¹, CAI Hong-bin¹, ZHANG Shan-wen²

(1. College of Mechanical and Electric Engineering, Changchun University of Science & Technology, Changchun 130022, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: z bq@cust.edu.cn

Abstract: As the mechanical scratching of diffraction gratings still depends on the experiences of operators, it gives poor grooved quality and can not be pre-controlled. This paper proposes a diffraction grating production method: film classification test engraving method based on an aluminum thin film deposition process status quo, and reveals the microstructure and mechanical properties of different thin film samples based on X-ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscope (SEM) and nanoindentation experiments. The study results show that the grating ruling can be approximately equivalent to a wedge under the pressure of the process, so that the slip-line field can be used to obtain the solution analytically and carve the slot on time trial for the “low elastic modulus class” film. Moreover, the finite element simulation can be used to pre-control the slot for “elastoplastic class”. The method can implement the pre-classification of the films, and can determine the tool processing parameters for different types of films with different methods. Furthermore, a near-perfect trough is

收稿日期: 2012-11-13; **修订日期:** 2013-03-17.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51075042); 吉林省科技发展计划资助项目 (No. 20080534); 长春理工大学科技创新基金资助项目 (No. 2021000422)

scratched. Experiments show that the time-consuming and pre-engraving test times are reduced and the graving quality and efficiency are improved. The method lays the foundation for improving the characteristics of more sophisticated gratings.

Key words: diffraction grating; mechanical scratching; grooving technology; pre-control

1 引言

衍射光栅是航空、军工等领域各种光谱仪器的核心元件。在制作低刻线密度原刻衍射光栅方面,机械刻划加工方式具有独特的优势,尤其对于红外光栅、中阶梯光栅等特殊光栅,必须采用机械刻划的方式来制作^[1]。机械刻划光栅是利用金刚石刻划刀在镀有金属膜层(如铝膜)的基底上进行挤压、抛光,形成光栅槽形的过程^[2-3]。

光栅机械刻划技术从产生至今已有近200年的历史。目前,世界上技术领先的国家仍是法国、德国、美国和日本等发达国家。在国内,中科院长春光机所于1958年首先开始研制衍射光栅,虽然所研制的产品的性价比较高,但由于发展时间短,其产品与光栅制造大国相比仍很落后。国内现有的衍射光栅机械刻划工艺方法仍与几十年前相同,预控问题仍未解决,在制品的槽形加工时主要依赖操作者经验,正式刻划前需要通过多次、长时间的试刻划与调整,在刀具设计与刻划时加入经验值进行槽形补偿^[4-5],才能获得相对稳定的槽形质量。这种加工方式不但容易损毁刀具,而且试刻划时间长、成本高、浪费大、质量不稳定,所以部分光谱仪器的核心器件仍依赖进口。国内外许多专家学者围绕刻划机研制、金刚石刻划光栅理论、金刚石刻划刀晶面定向与刃磨工艺等方面开展了研究,并取得了一定成果,但关于精确预控制槽形,减少试刻浪费、提高刻划槽形质量与效率的研究却鲜有报道。

针对光栅蒸镀薄膜及刻划工艺现状,本文利用X射线衍射(X-ray Diffraction, XRD)及电子扫描显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)试验真实揭示了不同薄膜样本的微观结构,采用纳米压痕与划痕试验获得了薄膜的力学参数与特征;然后,根据薄膜不同微观结构特征所表现出的力学特性提出了“薄膜分类试刻法”的衍射光栅制作方法。本研究对开展光栅铝膜蒸镀工艺及刻划槽形控制具有重要意义。

2 光栅机械刻划成槽工艺

2.1 蒸镀及刻划过程

待刻铝薄膜厚度一般在 $1\sim 20\ \mu\text{m}$,利用电阻式蒸镀设备在真空室内蒸发高纯净铝,然后在玻璃与铬复合基底上沉积、冷却后制备成膜。为保证薄膜的厚度及内部组织均匀,须在蒸镀一段时间后进行冷却,反复数次才能镀制完成。

现行的光栅机械刻划是利用金刚石刻划刀在铝薄膜上刻划成槽的过程。受蒸镀工艺及刻划过程等多种因素的影响,试刻划后槽形优劣不一,无规律可循,要想获得理想槽形非常难。因此,刻划前需要长时间的准备,依赖操作人员的经验经过多次试刻划才能得到相对完好的槽形,这样不但对操作人员提出了苛刻的技能要求,也造成了人员、资金的浪费。

薄膜微观结构决定其力学属性及宏观表现,所以有必要了解薄膜微观结构及内在属性,并据此提出刻划光栅槽形控制的有效方法。

2.2 成槽影响因素分析

刻划过程中,成槽质量受多种因素影响。铝薄膜的微观组织及结构是内在影响因素,而刻划机的精度及刀具的结构参数、安装参数及刻划工艺参数(统称为工装参数)等均会对成槽质量产生影响,但孰轻孰重,需仔细甄别,才能提出控制槽形的有效依据。

3 不同薄膜样本微结构及力学性能分析

薄膜的微观结构决定其力学性能,本文从多种薄膜中挑选出4个薄膜样本,进行XRD^[6]无损检测与SEM测试以表征其微观结构;进行纳米压痕测试以表征其力学性能。

3.1 XRD薄膜微结构的测定

从XRD图谱中可知(见图1),衍射峰又尖又强,证明结晶良好。同时量取衍射峰的半峰宽,并

将 4 个样本铝薄膜的最强峰 2θ 值代入 Scherre 公式 $D=K\lambda/\beta\cos\theta$ 中,可计算得到 4 个样本的平均晶粒尺寸,分别为:54.6,42.1,44,37.2 nm。其中, D 为晶粒平均尺寸; K 为常数,取 0.89; λ 为 X 射线波长,为 0.154 06 nm; β 为衍射线半峰宽; θ 为半衍射角。

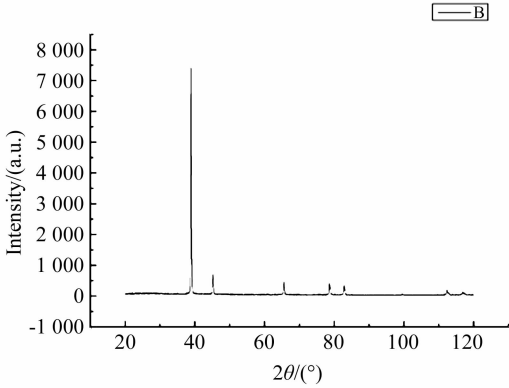


图 1 样本的 XRD 衍射图谱
Fig. 1 XRD patterns for samples

3.2 SEM 薄膜断层结构分析

将 4 个样本薄膜破坏后做断层 SEM 实验以观测薄膜微观组织的结构特征。4 个样本均具备由于间隔冷却而出现的分层现象,但厚度均匀性不同,其中样本四的断层如图 2 所示。薄膜样本四的平均晶粒尺寸为 37.2 nm,分层均匀,每层厚度在 1 μm 左右。样本一的平均晶粒尺寸为 54.6 nm 分层厚度差异较大,且在较厚膜层中观测到约 200 nm 左右的晶粒(如图 3)。此实验证明,准确的间隔冷却可使各分层均匀且有效抑制晶粒生长,起到细化晶粒的作用;而细化的晶粒薄膜,是形成良好塑性材料的先决条件。

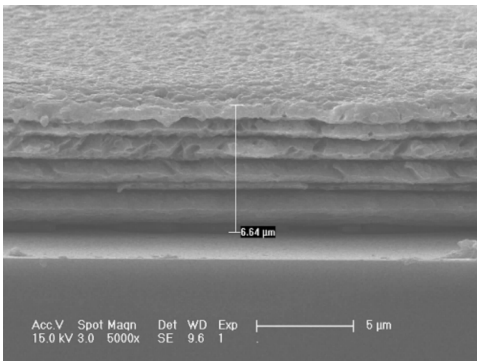


图 2 铝薄膜样本断面 SEM 图
Fig. 2 SEM image of cross-section of aluminum film sample

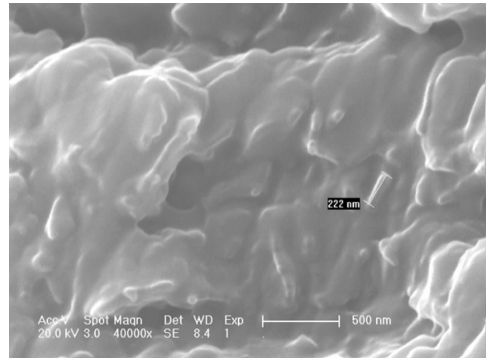


图 3 大尺寸晶粒 SEM 图
Fig. 3 SEM image of large size grain

3.3 力学性能测试分析

针对光栅镀铝膜层的结构特点,采用美国 Hysitron 公司的 TriboIndenter 型低载荷原位纳米力学测试系统进行纳米压痕接触实验^[7](如图 4),以获取所需的重要力学参数,如弹性模量、硬

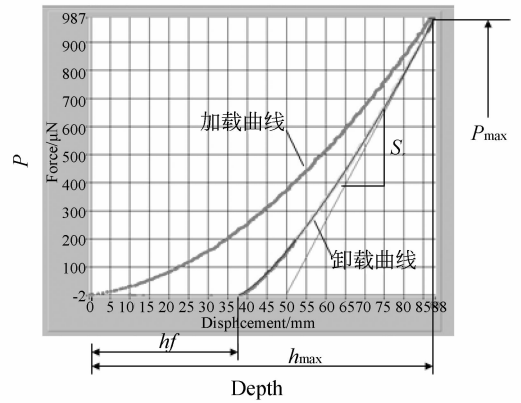


图 4 纳米压入试验中载荷与深度关系
Fig. 4 Relationship of load and depth in nano-indentation test

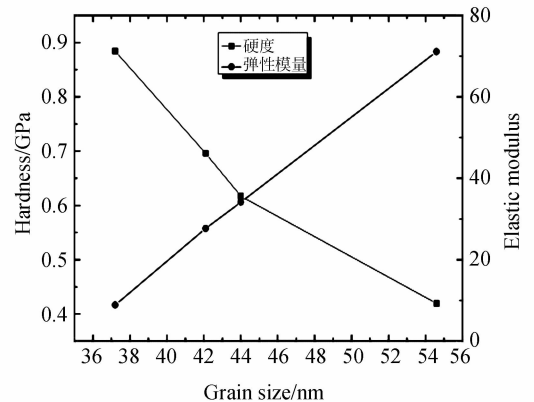


图 5 薄膜晶粒尺寸力学参数对应图
Fig. 5 Mechanical parameters vs. film grain size

度、金刚石与铝膜摩擦系数,应力-应变曲线等。为保证数据的准确性,采用多点测试平均取值的方法,这样可获得 4 个铝薄膜样本各自的弹性模量和硬度^[8]的平均值,如表 1、表 2 所示。图 5 为 4 个样本晶粒尺寸与弹性模量、硬度的关系图。由图可知,随晶粒尺寸的增大,弹性模量单调递增,硬度递减。

表 1 弹性模量平均值

Tab.1 Average of elastic modulus

实验	1	2	3	4	5	平均
E/GPa	39.59	34.13	31.97	27.33	37.42	34.088

表 2 硬度测量平均值

Tab.2 Average of hardness measurement

实验	1	2	3	4	5	6	平均
硬度 /MPa	701.56	647.05	631.28	571.0	543.65	593.59	614.69

由实验结果可知,晶粒尺寸小于 40 nm 的薄膜,弹性模量小、其塑性很好,定义为“低弹性模量类”薄膜;晶粒尺寸大于 40 nm 的薄膜,弹性模量大,定义为“弹塑性类”薄膜。试验表明,低弹性模量类薄膜的形成条件特殊,质地优良,出现几率较少,容易获得光栅刻划工艺参数,可以挑选出来刻划高品质光栅;弹塑性类薄膜由于其力学参数的函数关系错综复杂,要用有限元模拟分析技术来实现预控。

4 刻划槽形控制技术

4.1 工装参数与槽形参数的定义

常用的刻划用尖劈刀结构及所建立的坐标系分别如图 6、图 7 所示。由于槽形受各工装参数影响,须在此坐标系下定义工装参数与槽形参数。

刀具结构参数有刀尖角,定向角,俯仰后倒角,滚转后倒角及刃口半径;刀具安装参数有滚转角,俯仰角,方位角。此外,还包括刻划速度及落刀深度两个参数,共计 10 个工装参数。

图 8 为衍射光栅机械刻划示意图,刻划后理想槽形的各参数如图 9 所示。 φ 为槽底角; θ_1 为

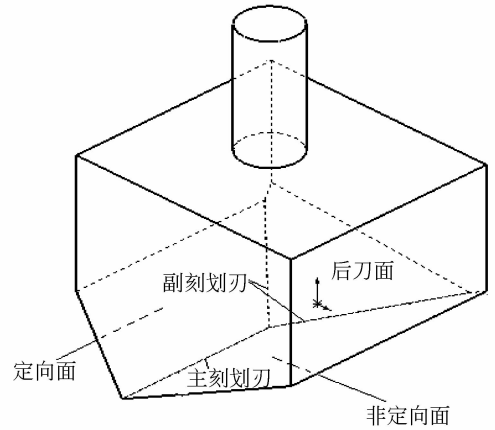


图 6 尖劈刀刀具几何结构

Fig. 6 Geometric structure of sharp chopper

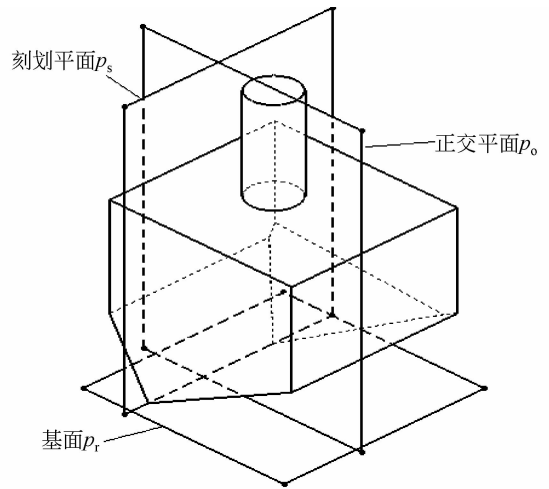


图 7 刀具正交参考平面

Fig. 7 Orthogonal reference plane of tool

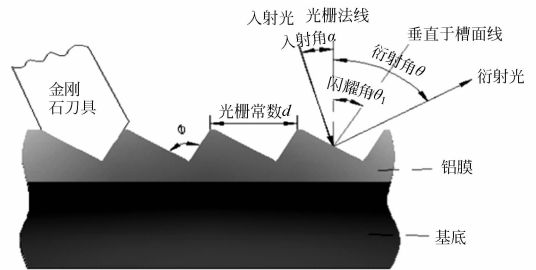


图 8 衍射光栅机械刻划示意图

Fig. 8 Schematic diagram of diffraction grating mechanical scratching

闪耀角; θ_2 为非闪耀角, $\theta_2 = 180^\circ - \theta_1 - \varphi$; d 为光栅常数; b 为槽宽; h 为槽深。由于实际刻划槽形

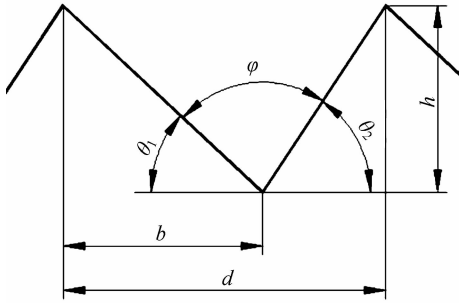


图 9 理想化槽形参数示意图

Fig. 9 Idealized slotted parameters

截面与理想槽形截面不一致,所以实际槽形各参数的度量采用“主要近似法”,即将槽形做几何近似,以代表槽形的主要结构并作为度量依据。

4.2 低弹性模量类铝薄膜刻划槽形的预控

4.2.1 刻划过程分析与转化

由于铝薄膜具备很细的晶粒、且弹性模量小,刻划后几乎无回弹,故只需求出刀具截面在刻划方向上的投影即可。同时观察刻划后两端的槽形,若无材料沿刻划方向流出(见图 10),且多个槽形剖面完全重合(见图 11),此时可将刻划过程转化为楔形片压入过程,即将三维刻划转化为二维平面应变问题;再运用原子力显微镜(AFM)观察槽形断面,将断面图导入 CAD 中,运用面域求和方式对比被挤出材料与去除材料的体积关系,结果如图 12 与表 3 所示。从表 3 可以得到, $S_L/A_L=99.34\%$,即可近似地认为材料的隆起部分与凹陷部分相等,由此可知满足应用滑移线理论的使用条件。

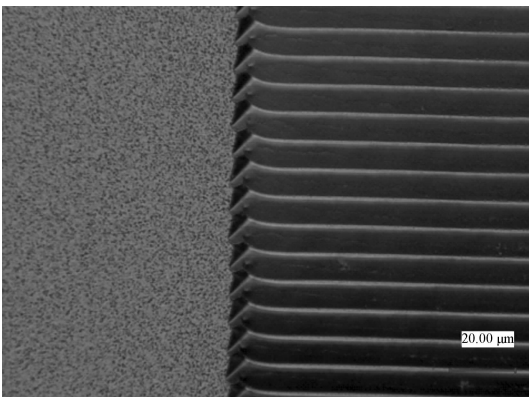


图 10 高倍显微镜下的光栅端面图

Fig. 10 Grating end face with high-powered microscope

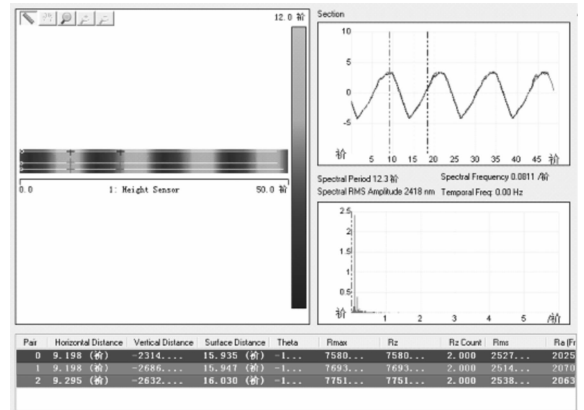


图 11 原子力显微镜下的光栅多截面槽型

Fig. 11 Multi-sectional groove of grating with AFM

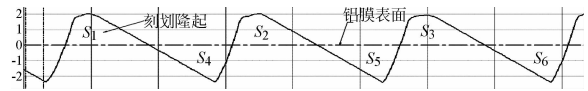


图 12 光栅刻划隆起与凹陷截面图

Fig. 12 Views of grating ruling uplift and depression-section

表 3 刻划隆起与凹陷截面面积

Tab. 3 Sectional areas of uplift and depression

评测项	S_L 隆起截面面积	A_L 凹陷截面面积
1	$S_1=2.093\ 9$	$S_4=2.107\ 0$
2	$S_2=2.087\ 4$	$S_5=2.104\ 6$
3	$S_3=2.096\ 5$	$S_6=2.108\ 2$
平均值	2.092 6	2.106 6

光栅刻划时,随着刀具的进给,刀具在铝膜上形成了三角槽形(见图 13)。经过刀尖点沿刻划方向取铝膜的任意截面 A(见图 14),当刻刀沿着刻划方向进给到 L_1 时,刀具在截面 A 投影的三角形的高为 H_1 ;当刻刀进给到 L_2 时,投影三角形的高为 H_2 ;依此类推。当刀具完全刻入铝膜时,便形成了刻划深度与隆起高度。

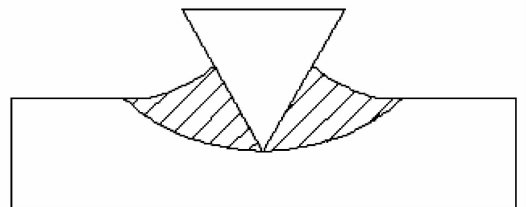


图 13 刻划铝膜的截面变形

Fig. 13 Cross-section of aluminum deformation

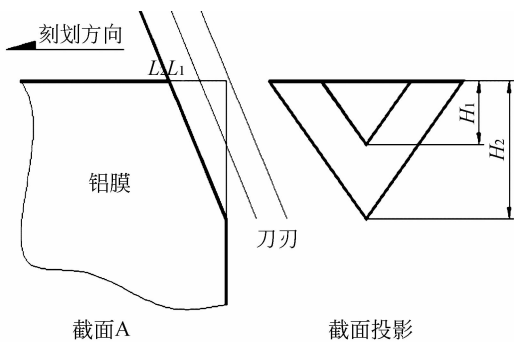


图 14 光栅刻划截面成型原理示意

Fig. 14 Cross-section of grating scratching

在没有调整俯仰角、滚转角与方位角时,建立坐标系,OX 轴为刻划刀刃,在正交平面 OYZ 上投影,角 A 为定向角。OP 为定向面在截面上的投影,当刀具经过俯仰角 α ,滚转角 β ,方位角 θ 后,定向面在平面 OYZ 形成新的投影 OP' 。新的定向角为 A' ,如图 15 所示,OP 为初始投影向量, OP' 为经调整后的投影向量。

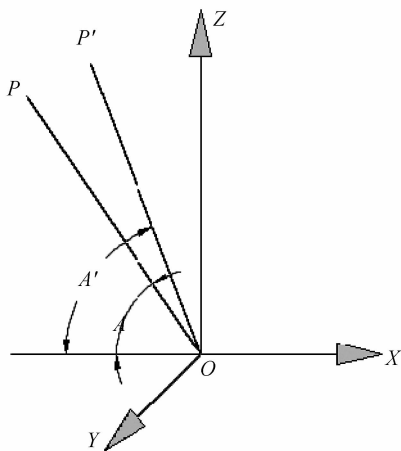


图 15 光栅截面一侧投影图

Fig. 15 Projection map of raster-section side

为求 OP' 的方向余弦,设 OP 的方向余弦为 $(0, \cos A, \sin A)$ 。

经空间变换,推导后解得:

$$\angle A' = \arccot$$

$$\left(\frac{\cos \beta \cos \theta \cos A + \sin \alpha \sin \theta \sin A + \cos \alpha \sin \beta \cos \theta \sin A}{\cos \alpha \cos \beta \sin A - \sin \beta \cos A} \right).$$

(1)

由式(1)得到,光栅刻划实际截面投影与定向角,俯仰角,方位角,滚转角的函数关系。利用这个函数关系,就可以通过调整其中几个参数得到新的投影形状与位置。

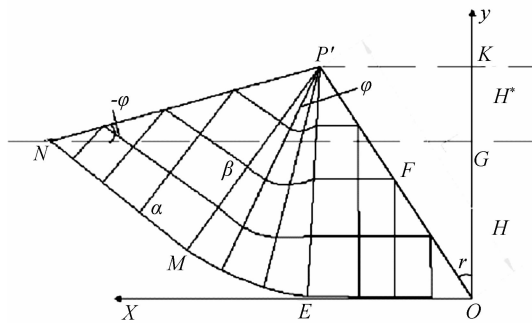


图 16 滑移线场图

Fig. 16 Slip-line field

4.2.2 滑移线场的建立与求解^[9]

根据滑移线场理论,铝膜在经历塑性变形的过程中,塑性区域成几何相似扩展,取单侧塑性变形区域,可近似建立零摩擦系数滑移线场,如图 16 所示。滑移线场的建立分零与非零摩擦系数两种情况,二种场的主要不同之处是 $P'MEO$ 场的形状,当金刚石刻刀与铝膜具有摩擦系数时,区域 $P'MEO$ 将转变为混合应力场。但建场方法及隆起高度 H^* 的求解是一致的,所以这里没有区分的必要。

在 $\triangle OP'K$ 中,有:

$$H^* = L \cos r - H = L \sin(r - \Phi). \quad (2)$$

根据体积不变原理,有:

$$H^2 \tan r = (L \cos r - H) [L \cos(r - \Phi) + (L \cos r - H) \tan r]. \quad (3)$$

利用 MATLAB 求解方程,在输入刻划深度为 H 时,得到 Φ 和 L ,进而求出 H^* 。

所以,对于低弹性模量类铝薄膜,只要根据工装参数及刻划深度,便可得到理想槽形。

4.3 弹塑性铝薄膜刻划槽形预控

有限元模拟分析技术作为解决复杂工程技术问题的有效途径,在解决金属弹塑性变形问题上,可提供许多诸如应力、应变、温度场等最直观的数据与信息。由于光栅刻划中弹塑性类铝膜的变形是几何非线性与材料非线性的问题,故采用材料试验与有限元模拟相结合的手段是解决此类问题的有效方法。德国 Carl Zeiss 公司曾使用类似的方法对机械刻划光栅的成槽过程进行模拟优化,得到了超过 85% 理论闪耀效率的衍射光栅。

4.3.1 有限元模拟分析与数据处理

采用大型、通用金属成型有限元软件 DEFORM 进行模拟分析^[10]。

由于刻划刀为金刚石材料,其强度、硬度远高于铝膜材料,将它设为刚性材料;铝膜在刻划过程中发生塑性变形并伴有非线性弹性变形,将它设为弹塑性材料。

为解决运算精度与模拟时间的矛盾,对刻划刀作用铝膜处采用局部细化网格与自动重划网格设定,如图 17 所示。这样在保证运算精度的同时,又能保证每次模拟运算时长,使后面的正交实验具有可行性。

拟实设定刀具、材料模型及材料力学参数、边界条件等进行刻划模拟,模拟后对槽形作剖切分析,剖切结果及槽形参数测量如图 18 所示。

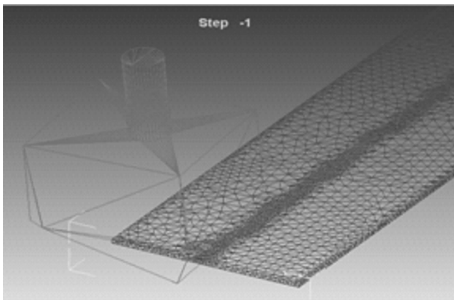


图 17 局部细化网格图
Fig. 17 Locally refined mesh

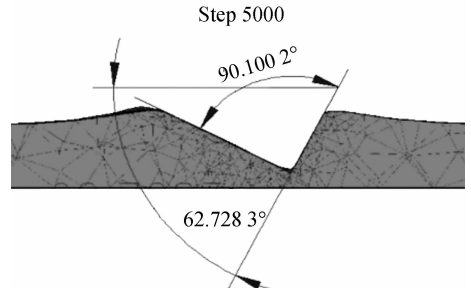


图 18 槽形参数测量图(槽底角与闪耀角)
Fig. 18 Measurement of trough parameter (groove bottom angle and blazed angle)

4.3.2 光栅刻划正交试验分析

为分析各工装参数对槽形的影响,对各影响因素取不同的水平进行正交试验^[11]。正交试验具有试验次数少、试验效率高、试验效果好等优点。光栅机械刻划过程中对槽形产生影响的因素有刀尖角、定向角等 10 个因素。水平数选的越多,规律曲线越趋于真实可信;但水平数过多,正交试验的次数过多,因此,综合考虑正交模拟试验的所需时间与可信程度,采用正交试验法并按照 $L_{50}(5^{11})$ 进行正交模拟试验,部分结果如表 4 所示。

表 4 正交模拟试验结果表

Tab. 4 Test results of orthogonal simulation

试验	A 刀尖角	B 定向角	C 俯仰后倒角	D 滚转后倒角	E 刻划深度	F 刻划速度	G 刀口半径	H 滚转角	I 俯仰角	J 方位角	槽宽/ μm	闪耀角/ $^\circ$	定向面槽深/ μm	非定向面槽深/ μm	槽底角/ $^\circ$
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4.07	61.90	2.43	2.46	75.28
2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	6.60	62.68	3.78	3.15	76.67
49	5	4	3	5	5	3	1	2	2	1	20.87	64.98	5.11	6.23	95.48
50	5	5	4	1	1	4	2	3	3	2	10.53	67.21	2.50	2.60	96.40

4.3.3 影响光栅槽形主次因素分析

刻划后的光栅槽形包含多个重要参数,每一个参数的极差分析均可按同一方法进行。所以以光栅槽形重要参数之一槽底角为评测指标,说明工装各参数对它的影响。正交试验结果显示各因素不同水平下槽底角值之和以及其极差值,如表 5 所示。

I - V 分别代表各影响因素的水平对应, R 代表因素的极差,即每个因素 I - V 中最大值与最小值之差。R 值越大,表明因素对试验指标的影响越显著。由表 5 可知,对槽底角影响最大的因素为刀

尖角,最小的为俯仰角。

同理,可以得到各工装参数对其它槽形参数影响的排列顺序。

I. 以闪耀角为判断指标,各个因素影响的主次顺序为: H-B-J-I-C-G-K-F-D-E-A;

II. 以槽宽为判断指标,各因素影响的主次顺序为: A-E-H-B-J-C-K-F-D-I-G;

III. 以定向面槽深为判断指标,各因素影响的主次顺序为: E-J-I-G-K-H-F-B-D-C-A;

IV. 以非定向面槽深为判断指标,各因素影响

的主次顺序为: E-I-A-J-F-H-G-D-B-K-C。

根据各因素对槽形参数影响的程度,在刻划时可以有选择地进行调整,以节省刻划时间,减少浪

费。继续研究各因素对槽形的影响规律,可建立基于有限元模拟实验的槽形各参数的经验数学模型,用于指导光栅刻划工艺。

表 5 各因素对槽底角影响规律统计表

Tab. 5 Influence of factors on bottom of groove angle

水平	刀尖角(A)	定向角(B)	俯仰后倒角(C)	滚转后倒角(D)	刻划深度(E)	刻划速度(F)	刻划半径(G)	滚转角(H)	俯仰角(I)	方位角(J)
I	794.92	873.68	882.14	885.05	881.96	885.36	877.25	879.95	897.34	865.88
II	820.39	883.6	892.33	878.75	886.5	888.29	880.84	885.9	879.27	869.98
III	886.85	894.75	878.3	883.52	883.79	874.61	882.74	887.26	876.27	884.2
IV	924.58	882.83	883.19	878.36	886.16	878.75	883.05	881.89	878.42	890.6
V	987.42	879.3	878.2	888.48	875.75	887.15	890.28	879.19	882.86	903.5
R	192.5	21.07	14.13	10.12	10.75	13.68	13.03	8.07	6.59	37.62

5 光栅刻划试验

为真实反映不同类薄膜刻划后的特征表现,分别对低弹性模量类与弹塑性类薄膜做刻划试验。

图 19 为低弹性模量类薄膜样本一次试刻划成槽试验。从图中可见,成槽质量好,槽形与刀具在槽形断面上的投影一致,完全满足槽形使用要求。

图 20 为弹塑性类薄膜样本刻划试验,槽形的非线性与图 19 区别明显,与有限元模拟结果的预测相符。

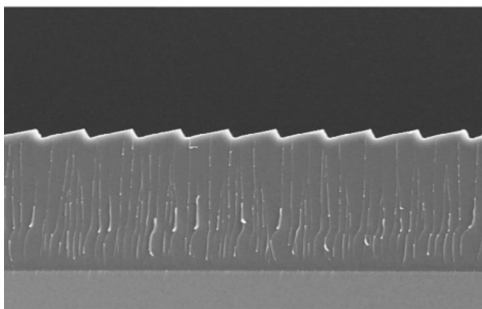
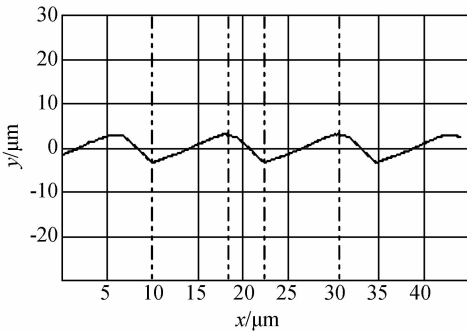


图 19 原子力显微镜下轮廓线及实物断面图(低弹性模量类)

Fig. 19 Contour diagram and sectional view with AFM(low elastic modulus)

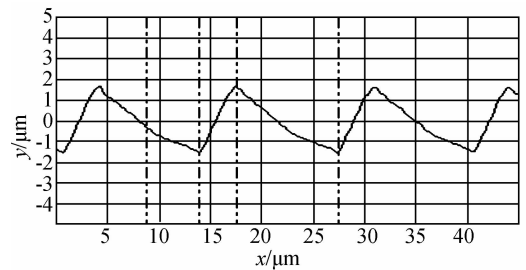


图 20 原子力显微镜下轮廓线图(弹塑性类)

Fig. 20 Contour diagram with AFM(elasto-plastic type)

大量刻划实践证明,刻划过程中不但存在一次刻划成槽质量好,软、硬适中、无回弹的铝薄膜(低弹性模量类膜),也存在刻划后有较大回弹表现的铝薄膜(弹塑性类膜);同时还有极硬铝薄膜与极软铝薄膜的表现。极硬铝薄膜在刻划中表现出刻刀易磨损、刻不动现象;极软铝薄膜表现为刻划成槽难,有堆软现象。此现象说明,薄膜的微观结构与组织对薄膜的力学性能有非常大的影响。

6 结 论

本文对衍射光栅机械刻划工艺开展了研究。通过对薄膜微观结构及力学性能分析发现,平均晶粒尺寸与硬度及弹性模量有关,且硬度与弹性模量之间存在一个最优参考范围。刻划试验表明,采用薄膜分类刻划法,运用滑移线场理论对刻划成槽隆起高度进行求解,运用有限元模拟结合试验设计的研究手段对弹塑性铝薄膜刻划槽形进行预控,是提高光栅刻槽质量的有效方法。

该方法在有效地鉴别薄膜的同时,也带动了薄膜蒸镀工艺的发展,对光栅刻划成槽控制起到积极的作用。

该技术将滑移线场理论、有限元模拟与材料测试分析技术相结合,并通过试验设计将其应用于光栅机械刻划工艺分析中,有效改进了国内光栅刻划工艺槽形预控技术,缩短了在该技术领域我国与发达国家的差距。薄膜分类试刻法对确定最优工艺方案,提高刻划工艺水平,指导镀膜工艺,同时减少试刻划过程中的浪费,避免刀具损毁,进而提高机械刻划光栅的品质具有深远意义。

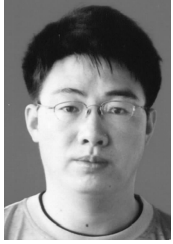
参考文献:

- [1] 王芳,齐向东.高精度控制光电光栅刻划机的光栅外差干涉仪[J]. 激光技术,2008,32(5):474-476.
WANG F, QI X D. High-precision control of a photoelectric grating ruling machine grating heterodyne interferometer [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(5): 474-476. (in Chinese)
- [2] 巴音贺希格,高键翔,齐向东. 10.6 μm 激光器一级输出高衍射效率闪耀光栅的研制[J]. 光电子·激光,2004,15(10):1137-1140.
BAYHXG, GAO J X, QI X D. 10.6 μm laser level output high diffraction efficiency blazed grating developed [J]. *Optoelectronics · Laser*, 2004, 15(10): 1137-1140. (in Chinese)
- [3] 时轮,郝德阜,齐向东.高精度衍射光栅刻划机的最新技术进展[J]. 仪器仪表学报,2001,22(4):438-439.
SHI L, HAO D F, QI X D. Latest technological advances in high-precision diffraction grating ruling machine[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2001, 22(4): 438-439. (in Chinese)
- [4] 李英海,巴音贺希格,齐向东.用于衍射光栅刻划的超精密金刚石刻刀刀的研制[J]. 微细加工技术,2006,12:15-17.
LI Y H, BAYHXG, QI X D. Development of ultra-precision diamond graver for the diffraction grating ruling[J]. *Microfabrication Technology*, 2006, 12: 15-17. (in Chinese)
- [5] 李英海.超精密金刚石石刀具——衍射光栅刻划刀[J]. 光学精密工程,1996,4(3):81-84.
LI Y H. Ultra-precision diamond tools—the diffraction grating characterize knife[J]. *Opt. Preci-*
- sion Eng.*, 1996, 4(3): 81-84. (in Chinese)
- [6] BAUMBACH T, LÜBBERT D, GAILHANOU M. Strain relaxation in surface nano-structures studied by X-ray diffraction methods[J]. *Materials Science and Engineering*, 2000, B69-70: 392-396.
- [7] 石广丰,史国权,徐志伟,等.中阶梯光栅铝膜的大压深纳米压痕试验[J]. 机械工程学报,2012,48(20):26-44.
SHI G F, SHI G Q, XU ZH W, *et al.*. The echelle aluminum pressure deep nanoindentation test [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(20): 26-44. (in Chinese)
- [8] OLIVER W C, PHARRR G M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments [J]. *J. Mater Res.*, 1992, 7(6): 1564-1583.
- [9] 蔡洪彬.尖劈刀刻划衍射光栅的槽形控制研究[D]. 长春:长春理工大学,2013.
CAI H B. *The tip Pidao characterization of the diffraction grating trough control study* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [10] 石广丰,史国权,张垒垒,等.衍射光栅机械刻划过程的有限元仿真分析[J]. 计算机仿真,2012,29(5):103-106.
SHI G F, SHI G Q, ZHANG L L, *et al.*. Finite element simulation analysis of the diffraction grating mechanical scratching process [J]. *Computer Simulation*, 2012, 29(5): 103-106. (in Chinese)
- [11] 史国权,倪坤,宋林森,等.基于有限元与正交试验法的机械刻划光栅研究[J]. 机械设计与研究,2011,27(1):80-82.

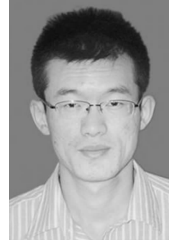
SHI G Q, NI K, SONG L S, *et al.*. Based on mechanical finite element and orthogonal experiment

method ruled gratings [J]. *Machine Design and Research*, 2011, 27(1): 80-82. (in Chinese)

作者简介:



张宝庆(1975—),男,吉林长春人,博士研究生,讲师,2003年于长春工业大学获得硕士学位,研究方向为精密、超精密加工技术。E-mail: zbq@cust.edu.cn



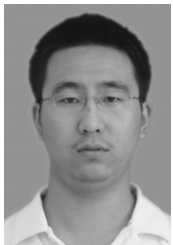
张善文(1980—),吉林通化人,博士,2004年于长春理工大学获得学士学位,2009年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光栅积分理论及光栅刻划工艺的研究。E-mail: zhsh-wen007@sina.com



石广丰(1981—),男,辽宁葫芦岛人,博士,教师,2010年于长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,研究方向为精密、超精密加工技术。E-mail: shiguangfeng@cust.edu.cn



史国权(1965—),男,吉林舒兰人,博士,教授,博士生导师,1989年于吉林工业大学获得学士学位,研究方向为精密、超精密加工技术。E-mail: sgq@cust.edu.cn



蔡洪彬(1987—),男,吉林松原人,硕士研究生,2013年于长春理工大学获得硕士学位,研究方向为精密、超精密加工技术。E-mail: 99633233@qq.com

(版权所有 未经许可 不得转载)