

文章编号 1004-924X(2015)10-2843-09

基于应变梯度理论的光栅铝膜本构关系表征 及纳米压痕实验

丁健生, 史国权*, 石广丰

(长春理工大学 机电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要:基于应变梯度理论,提出了一种玻璃基底光栅铝膜本构关系的表征方法。建立了包含基底参数和铝膜参数的本构关系数学模型,并逐一表征了相关参数。进行了 79 g/mm 中阶梯光栅铝膜的纳米压痕实验,验证了上述本构关系表征过程的正确性。提出了光栅薄膜材料和基底材料都具有尺度效应的假设,并应用纳米压痕实验对铝膜的尺度效应和基底效应进行了实验表征。对光栅铝膜压痕实验与含基底压深实验的结果进行了比较,结果显示,在有无基底条件下,压痕结果在应力方向上相差 0.8 倍,在应变方向上相差 3 倍。进行了光栅刻划实验,结果显示压痕实验对刻划实验具有重要的指导作用。研究过程及研究表明:理论分析和两种实验可有效地分析光栅刻划过程,有助于在实际光栅刻划过程中减小误差,对光栅刻划的工艺过程具有较好的理论指导意义。

关键词:光栅刻划;光栅铝膜;玻璃基底;本构关系;纳米压痕

中图分类号:O436.1;TN305.7 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152310.2843

Characterization of constitutive relationship for grating aluminum based on strain gradient and its nano-indentation

Ding Jian-sheng, Shi Guo-quan*, Shi Guang-feng

(College of Mechanical and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130012, China)

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

Abstract: Based on strain gradient theory, a characterization method to describe the constitutive relationship of an aluminum grating with the glass substrate is proposed. A mathematical model is established including the constitutive relationship of the glass substrate and the aluminum film parameters and the corresponding parameters are characterized. In order to verify the accuracy of the proposed constitutive relationship, the nano-indentation experiment of the 79 g/mm echelle aluminum grating is carried out. It proposes an assumption that the grating film and substrate materials have the size effect, then performs a nano-indentation experiment to verify the size effect and the substrate effect for the aluminum film. As compared with grating aluminium film experiments, the results on the nano-indentation under the conditions with and without substrates show the differences for 0.8 times in the direction of stress and 3 times in the direction of strain. A grating ruling experiment is also car-

收稿日期:2015-05-08;修订日期:2015-07-24.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51075042, No. 51405031)

ried out, and the results indicate that the indentation experiment has an important guiding role for the ruling experiment. The research process and results show that theoretical analysis and two kinds of experiments can effectively help to analyze the grating ruling process and reduce the errors of grating ruling. The method provides a good theoretical guidance for the process of the grating ruling.

Key words: grating ruling; grating aluminum film; glass substrate; constitutive relationship; nano-indentation

1 引言

衍射光栅作为一种精密的光学元件,其上有规则的配置着线、缝或槽,使光源通过衍射和干涉,经透镜聚焦作用形成光谱,被广泛应用于光谱分析等科学领域^[1]。光栅机械刻划是衍射光栅制造的重要手段,在制作光栅母板等方面具有不可替代的地位^[2-3]。长期以来,国内的光栅机械刻划制造是在未掌握光栅膜层力学性能的前提下通过多次金刚石刻划刀的试刻而不断调整刻划工艺参数来实现的。这种俗称“试错法”的方法不仅浪费大量的工艺生产成本和时间,更重要的是带有盲目性,缺乏理论指导和依据。因此光栅铝膜的本构关系是光栅塑性成形的主要因素,准确表征光栅刻划过程中的弹塑性本构关系是指导光栅刻划工艺、改进镀膜工艺的关键。

关于光栅铝膜本构表征方法和纳米压痕技术的研究主要有:K. -D. Bouzakis 等人应用有限元仿真和纳米压痕实验关系曲线获得了涂层材料的弹塑性应力-应变关系^[4-6],但未能建立铝膜的准确本构关系模型。周益春等人在深入考虑基底和尺度效应的前提下,应用纳米压痕检测的方法表征了薄膜材料的应力-应变本构关系^[7],但针对特定铝膜的本构模型未进行深入分析。马德军对金属薄膜的弹塑性关系进行了研究,应用纳米压痕技术进行了数值模拟和实验验证,并分析了基底和压头之间的尺度关系^[8]。此外,Oliver W C、Gabriella Bolzon、A. Biabangard Oskouyi^[9-13]等人也对材料的本构关系进行了研究,通过对相关研究方法和技术的分析,光栅铝膜刻划过程中本构关系研究主要涉及两方面内容:一是基于仿真的数值模拟,主要应用前人经典模型,即只要模型准确,仿真结果即较为理想,从而揭示材料本身的弹塑性关系。但模型特点多为一般性,未见有在考虑特定基底和尺度效应的前提下针对铝膜光栅

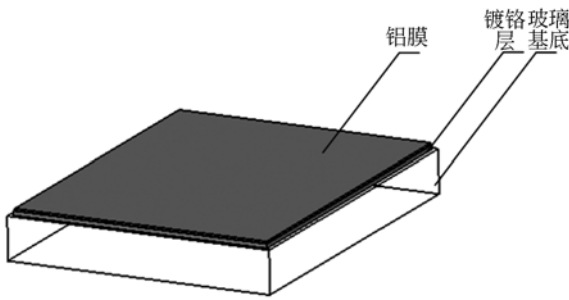
进行本构关系表征方法的研究。二是应用纳米压痕测量进行分析,在此领域相关应用较为成熟,且规律性较强。

在相关研究成果基础上,本文针对玻璃基底的光栅铝膜本构关系表征方法进行分析研究。进行了纳米压痕实验,获得了铝膜的弹塑性关系。进行了光栅刻划实验,验证了光栅尺度效应及其基底特性。研究了光栅的复合膜层结构对表层蒸镀铝膜力学性能的影响机理和作用关系,揭示了尺度效应和基底效应的影响规律,并通过结构优化实现膜层力学性质的基本可控。最后在建立光栅蒸镀铝膜材料弹塑性力学性能求解模型的基础上,准确地表征光栅铝膜的弹塑性本构关系,为光栅镀膜、刻划工艺和精确槽形控制研究提供参考依据。

2 光栅铝膜的刻划技术

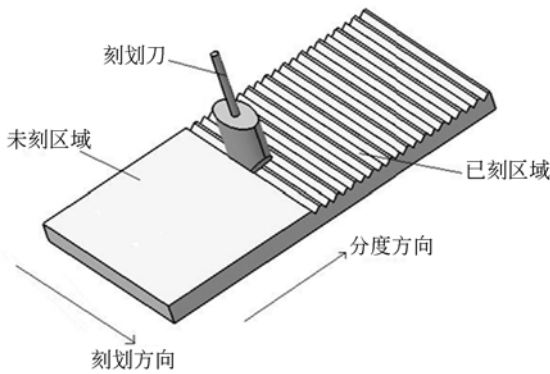
光栅刻划类似于挤压或摩擦抛光成型,不产生切屑,是仅在光栅薄膜上产生变形的过程。目前应用的机械刻划技术中,刻划之前的工作尤为重要,需要应用光学或电子显微镜对刀头形状和材料进行测定、对被刻对象进行深入分析,更为关键的是在刀具接触基坯之前要进行试刻。这些前期工作都是为了使光栅形成准确规则的形状。由于光栅铝膜刻划技术仍不够成熟,因此构建光栅铝膜刻划模型较为困难,且受限因素较多。目前较为先进的研究方法多是应用纳米压痕技术来指导刻划,但系统地将铝膜特性和基底特性尺度效应考虑进模型中的应用方法并不多见。针对光栅铝膜的刻划技术,对其被刻对象进行深入分析。光栅基坯主要组成如图 1(a)所示,它由 3 个部分组成:玻璃基底、镀铬层和铝膜。刻划示意如图 1(b)所示。

光栅基底是承载光栅元件的稳定性材料,通常选择热膨胀系数低和化学性能稳定的光学玻璃



(a)光栅基坯组成

(a)Comparison of grating base slab



(b)光栅刻划示意图

(b)Sketch map of grating characterization

图 1 光栅结构及刻划图示

Fig.1 Grating structure and characterization of sketch map

作为光栅基底,以保证在刻划过程中光栅元件的刚度,使基底材料对刻划工艺影响较小。但同时,由于基底材料和光栅材料的相互受力关系,基底特性必然影响薄膜光栅的弹塑性,从而影响刻划或是压痕深度,因此研究光栅铝膜本构关系需考虑基底效应。中间层为镀铬层,厚度约为 $1 \mu\text{m}$,起到黏合玻璃基底和蒸镀铝膜的作用,同时防止光栅机械刻划过程中刀具刻透铝膜而受破坏。最上层即为光栅铝膜,为了减小刻划刀具的磨损,提高光栅表面的反射率,选择纯铝作为蒸镀材料,因为铝膜在较宽的光谱范围内具有较高的反射率。在分析研究光栅结构的基础上,针对光栅铝膜本构关系进行分析。

3 光栅铝膜本构关系的表征

光栅铝膜的本构关系是指光栅在生产应用的前期,需要针对光栅本身材料特性和刻划机理进行理论分析,构建光栅刻划过程中材料本身呈现

出的力与变形关系及相互之间尺度效应的数学物理模型,从而指导光栅刻划。

首先,建立材料学基本应力-应变经典关系模型:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & \sigma \leq \sigma_y \\ R\varepsilon^n & \sigma > \sigma_y \end{cases}, \quad (1)$$

式中: σ 为应力-应变屈服强度; E 为弹性模量,其中包括光栅弹性模量 E_f 和基底弹性模量 E_s ; R 为强化系数,其中包括铝膜强化系数 R_f 和基底强化系数 R_s ; σ_y 为光栅屈服强度,其中包括铝膜屈服强度 σ_{yf} 和基底屈服强度 σ_{ys} ; n 为应变硬化指数,其中包括铝膜应变硬化指数 n_f 和基底应变硬化指数 n_s 。

根据文献[7]、[8]及应变梯度理论可知,材料结构具有一定尺度效应特性。针对光栅铝膜,可以判断尺度效应不仅存在于光栅本身,在应力作用下,基底同样具有尺度效应,并且二者相互存在耦合关系,即基底效应可影响到铝膜尺度效应。因此,分析求解其中参数的尺度,是研究光栅铝膜的关键。

根据材料应力-应变关系,分别构建应力尺度模型和应变尺度模型。载荷 F 与应变 x 可以表征为:

$$F = f(\sigma_{yf}, n_f, E_f, \nu_f, \sigma_{ys}, n_s, E_s, \nu_s, h_f, h), \quad (2)$$

$$x = X(\sigma_{yf}, n_f, E_f, \nu_f, \sigma_{ys}, n_s, E_s, \nu_s, h_f, h), \quad (3)$$

式中: ν_f 为膜材料泊松比, ν_s 为基底材料泊松比; h_f 为铝膜厚度, h 为刻划深度。为了具体的描述式(2)中各参数关系,针对刻划过程载荷及刻深的关系和机理进行分析可知,应变梯度理论可直接反映材料尺度效应,于是引入应变梯度理论,由变形梯度:

$$f(X) = x'(X) = \delta + u'(X), \quad (4)$$

其中: δ 为张量,为系统应变关键因素,则应变梯度与系统呈线性函数关系。则可将梯度公式写成:

$$f(X) = \sum_{i=1}^n \left[\delta_{(1)i} + \frac{\partial^n u}{\partial X^i} \right] + \sum_{i=1}^n \left[\delta_{(2)i} + \frac{\partial^{n-1} u}{\partial X^i} \right] + \dots + \sum_{i=1}^n \left[\delta_{(n-1)i} + \frac{\partial u}{\partial X^i} \right] + \sum_{i=1}^n \left[\delta_{(n)i} + \frac{\partial^0 u}{\partial X^i} \right]. \quad (5)$$

结合泰勒展开公式,引入光栅铝膜刻划参数,去掉高次项,建立的基于应变梯度的光栅刻划本构关系模型为:

$$\begin{cases} \sigma'_{ij} = 2\mu \varepsilon''_{ij} + \kappa \varepsilon'_m \delta_{ij} \\ \sigma'_{ij} = 2\mu l_{cs}^2 x''_{ij} + \kappa_1 l_{cs}^2 x'_m \delta_{ij} \end{cases}. \quad (6)$$

进一步将铝膜弹性模量与系统参数建立联系:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma'_{ij} &= \frac{2 \sum_e \epsilon''_{ij}}{3E_e} + \frac{2 \sum_e \epsilon''_{ij} E'_e}{3E_e} - \frac{2 \sum_e \epsilon''_{ij}}{3E_e^2} E'_e + \kappa_i \epsilon'_m \delta_{ij} \\ m'_{ij} &= \frac{2 \sum_e l_{cs}^2 x''_{ij}}{3E_e} + \frac{2 \sum_e l_{cs}^2 x''_{ij} E'_e}{3E_e} - \frac{2 \sum_e l_{cs}^2 x'_{ij}}{3E_e^2} E'_e + \\ &\quad \kappa_i l_{cs}^2 x'_m \delta_{ij} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

式中: σ_{ij} 为铝膜受到的应力, ϵ_{ij} 为应变, μ , l 及 δ 为系统参数。这样在对式(2)和(3)中涉及的屈服应力和模量参数就有了较好的计算指导作用,减小了由于选择参数不确定带来的误差或错误数值。

由于实验测得的刻划硬度基本不随深度变化,应变梯度效应对刻划实验的硬度影响较小。在这种情况下,拟合得到的屈服应力和幂硬化指数值将不随拟合点的选择而变化。显然对于每个不同的深度 h 都有一个对应的载荷值 F ; 对于每个刻划深度 h , 都有屈服应力 σ , 因此写成一般式,即可由应变梯度和刻划深度联合表征局部载荷关系:

$$\sigma_{yf} = \sigma_{\max} (h/h_{\max})^a, \quad (8)$$

其中: σ_{\max} 为局部最大刻划载荷, h_{\max} 为最大刻划深度, a 为幂指数, 而 a 值只与膜应变硬化指数 n_f 有关, 针对特定铝膜可以确定相应数值。研究对象为 79 g/mm 中阶梯光栅铝膜, 铝膜下还有一层厚约 1 μm 的薄膜镀铬, 因此 n_f 值为 [0.1, 0.3], a 值为 [1.5, 2.4]。式(2)中根据 Buckingham 定理, 解得:

$$E_f^{b-1} = \frac{1}{\sigma_{yf}^{b-1} n_f^b v^{b-1}}. \quad (9)$$

根据经验, 式(2)中 v_f 为 0.33, v_s 为 0.13~0.3, 由于是玻璃基底, 为块状结构, 因此取偏大值, 为 0.23。由于基底材料相对于铝膜的强度较大, 因此只考虑发生弹性变形:

$$\sigma_{ys} = \sigma_{yf} \frac{E_s}{E_f}. \quad (10)$$

至此, 表征了式(2)、(3)参数, 并分别建立了可求解各自独立的模型, 最终可综合表征应力-应变关系。综上分析, 光栅系统体现尺度函数关系的量仅为 h_f 和 h , 其它参数关系与应力关系一致。而铝膜厚度 h_f 为可知, 因此只需确定刻划深度 h , 这也是问题研究的关键。

通过纳米压痕检测技术来模拟瞬时刻划光栅

铝膜深度和刻划力之间的应力应变关系, 从而验证基于应变梯度的刻深与刻划力之间关系的正确性, 同时也反映基底效应对刻划力的影响。此问题需结合纳米压痕技术联合解决。由纳米压入实验表征方法, 通过分析所记录的加载与卸载过程中的载荷-位移曲线来确定材料参数, 使用 Berkovich 压头进行分析, 则表征关系为:

$$S = \frac{dp}{dh} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \beta \sqrt{AE}, \quad (11)$$

式中, S 为载荷变化率, 即初始阶段曲线斜率, β 为与压头几何形状常数, 对于 Berkovich 压头, β 为 1.1, A 为横截面积。

用幂函数的形式来描述卸载曲线:

$$F = \alpha(h - h_f)^m, \quad (12)$$

式中: α , h_f , m 为常数。 m 通常为 1.2~1.6。

由于 Oliver 和 Pharr 等人针对不同形状的压头提出了一种改进方法用来确定接触深度:

$$h_c = h'_{\max} - \zeta \frac{F_{\max}}{dp/dh}, \quad (13)$$

式中: h'_{\max} 为最大压痕深度, F_{\max} 为最大压痕载荷, ζ 为与压头形状常数。对数据进行数值拟合, 即可表征膜材料的力学性能尺度关系, 从而反观对比刻划过程经验曲线, 即可验证研究过程的正确性。

4 铝膜的纳米压痕实验

纳米压痕过程主要反映压痕深度 h 和所受载荷之间的关系, 而这一问题本身没有固定模型, 需要通过离散点进行分析。离散点数据来源于之前的实测实验, 需要对数据进行分析与处理, 再进行检验实验, 从而规划压痕深度 h 和所受载荷的关系模型, 并证明基底和尺度效应。

由于光栅包括铝膜和基底两部分, 因此, 二者都具有一定的尺度效应, 需分别对压痕深度所体现出的尺度效应进行分析。针对压痕过程中的基底效应, 使压痕载荷必须控制在一定范围内, 即要大于铝膜临界屈服强度 σ_{yf} , 并小于基底临界屈服强度 σ_{ys} , 这样在压痕过程中既能保证使铝膜发生弹性形变, 又能不致将铝膜压透而接触到基底。实验试样中薄膜厚度约 10 μm , 玻璃基底代号为 K60 \times 50, 尺寸长 \times 宽 \times 厚为 60 mm \times 50 mm \times 15 mm, 实验条件如图 2 所示。

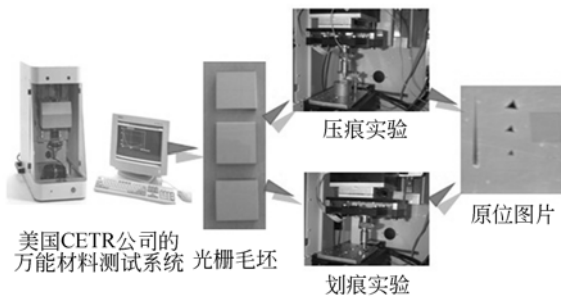


图 2 压痕实验条件

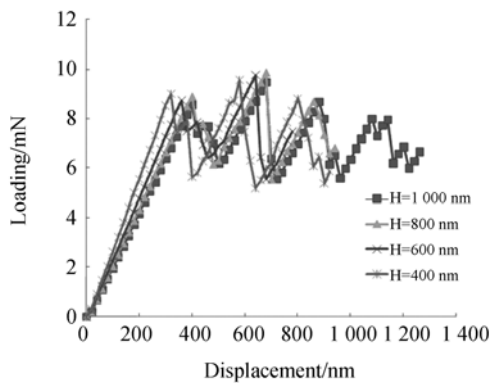
Fig. 2 Indentation test conditions

初次实验,目的是通过离散数据表征本构关系,所以已知数据点为铝膜的压痕经验数据,这部分实验并没有真实体现基底特性,只是反映铝膜的应力-应变关系,并且只考虑加载过程的实验数据,如表 1 所示。根据表 1 进行位移-载荷曲线的分析,实验设备采用美国 Agilent 公司的原位纳米压痕仪 Nano Indenter G200。可以看出,该过程可以用系统刚度公式表征应用系统刚度特性。应用残差法对刚度数据进行处理计算和拟合,提高精度,得到数据曲线如图 3 所示。

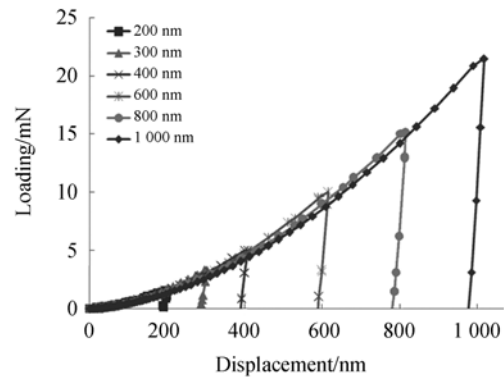
表 1 部分实测数据点

Tab. 1 Part of measured data points

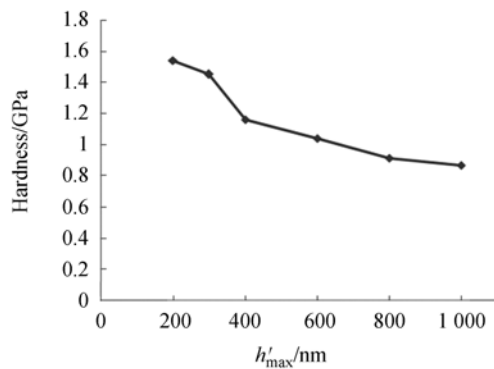
序号	压深/nm	临界载荷/mN
1	312.536 6	8.54
2	394.410 9	8.87
3	616.097 9	8.72
4	763.879	8.99
5	1019.285 8	8.71



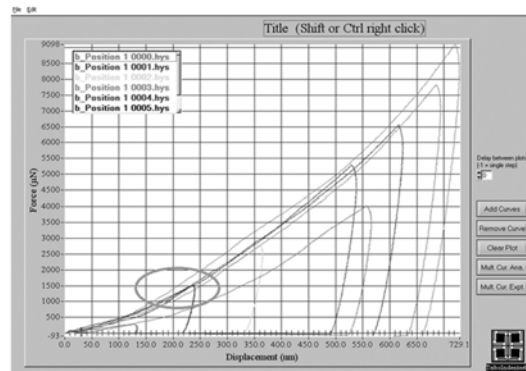
(a)



(b)



(c)



(d)

图 3 压痕结果

Fig. 3 Indentation results

从图 3(a)中可以看到,不同压深下的载荷-位移曲线形状大致相似。经历了弹性变形时的线性阶段和发生塑性变形之后的震荡阶段。由表 1 可知,临界载荷稳定在 8.72~8.87 mN,上下波动小于 3%,这说明只需比较小的压深就可以达到临界载荷,使材料发生塑性变形。随着压深增大,载荷出现震荡,后达到第一个载荷波谷。载荷继

续随着压深线性增加,在载荷-位移曲线上就表现为载荷不断出现波峰、波谷的变化。之后,压深稳定增加即表征为 3(b),产生卸载曲线。同时得到硬度值曲线 3(c)。最终,获得整个压痕过程的加载-卸载曲线,如图 3(d)所示。可以看出曲线形态较为理想,能够较好地反映纳米压痕过程,该曲线对接下来带有基底的光栅压痕实验具有一定指导作用,并可形成对比,以验证前文分析的正确性。

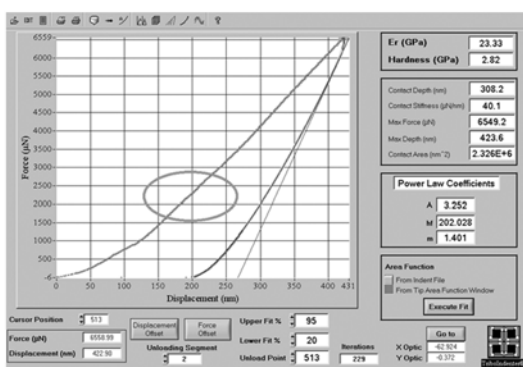
依据文献[10]、[11],压痕过程中具有“刚性衬底”特性,即“压深/薄膜厚度比” $< 1/100$,因此在实验数据应用过程中剔除了大于比值部分,剔除数据作为考虑基底条件的实验验证。进一步进行带有基底材料的光栅压痕实验,实验结果如表 2 和图 4 所示。

表 2 带有玻璃基底的光栅纳米压痕检测结果

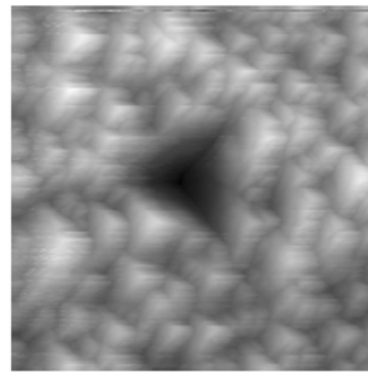
Tab. 2 Nanoindentation test results of grating with a glass substrate

测试结果	弹性模量 /GPa	硬度值 /GPa	变形 /nm	载荷 /mN
1	109.079	0.314	310.695	0.758
2	97.892	0.331	308.869	0.787
3	46.934	0.361	304.669	0.814
4	91.249	0.349	308.502	0.825

实验分析:比较图 3、图 4 压深与载荷曲线,可以看出,在整体效果上,第一次实验过程较为理想,为铝膜压痕实验,第二次带有基底的压痕实验状态出现变化。在小压深条件下,在约 75 nm 处都出现了不同程度的波动,随着压深加大,在约



(a) 载荷曲线图示
(a) Curve of load



(b) 实验后材料反映的压头形状
(b) Press head shape of materials

图 4 带有玻璃基底的光栅压痕结果

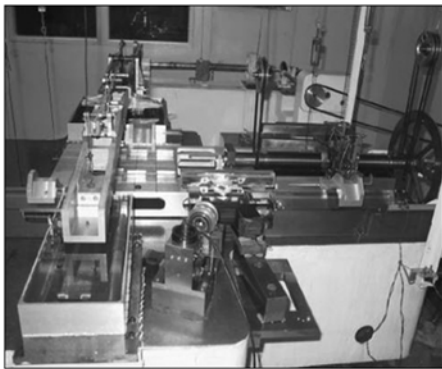
Fig. 4 Indentation results of grating with a glass substrate

200 nm 处又出现一次异常。但在约 350 nm 时刻,无基底实验中铝膜受力变化较大,而有基底条件则表现较为稳定,相差约为 0.8 倍。在卸载过程中,无基底卸载较快,在压深方向卸载不大。有基底的卸载过程卸载较长,卸载至约 200 nm,相差近 3 倍。这是由于在加载过程中,压痕深度随载荷增加而增加,卸载过程两种情况出现较大差异,“刚性衬底”材料卸载较快速,曲线陡峭,由式(12)和(13)能够表征。而带有基底材料的光栅,卸载曲线较为缓慢,从图 4 中的卸载细线可以看出,距离理想卸载曲线还存在差异,这说明,在同样的条件下,只改变了基底特性,压痕结果产生差异,说明玻璃基底对压痕过程起到了影响,即前文说明的应变梯度下的尺度效应。

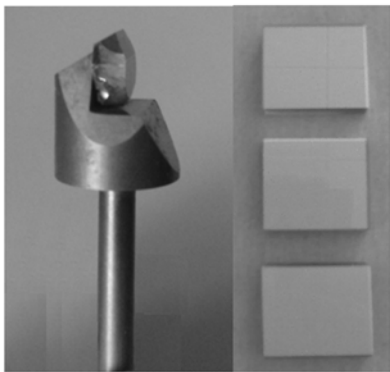
在加载过程中,都经历了初始加载、中期震荡和稳定加载的过程。在初始阶段,载荷较小,但压痕深度较为明显,这是由于压痕刚刚超过临界载荷开始实验;在中期阶段,发现载荷并没有大幅提升,但压深却一直在继续,材料自身既表现出回弹特性,又同时表现出拓展性能;第三阶段,载荷提升较快,但压深增长速度放缓,这是由于材料尺度效应逐渐接近临界状态。回弹特性在图 4 中,压痕深度约为 180 nm 处得以清楚体现,同时,随着载荷的增加,回弹特性逐渐减弱,这时又体现出基底效应。在图 4 中,带有玻璃基底的光栅,加载过程更为平稳,这说明,铝膜在加载过程中,自身特性逐渐减弱,基底特性逐渐得以表征。

5 光栅铝膜刻划实验

纳米压痕实验后,总结了实验结果数据及光栅材料应力-应变本构关系,进一步确定了光栅刻划过程中的因素、水平和指标。以刻划过程中的刻刀角度、刻槽深度及刻槽宽度为主要控制对象,验证了本构特性规律,突出刻划过程中的基底及尺度效应。



(a)刻划实验平台
(a)Experiment platform



(b)刻刀 (c)光栅试样
(b)Graver (c)Grating sample

图 5 光栅刻划实验平台

Fig. 5 Grating experiment platform

光栅刻划平台如图 5 所示。在刻划光栅工艺中,以制作面积为 $410\text{ mm} \times 614\text{ mm}$ 的 79 g/mm 中阶梯光栅为例,完成整个刻划过程刀具的行程约为 19.89 km 。在进行正式光栅刻划过程之前需要进行试刻。将金刚石刻刀装在刀架上,以刀尖为基准,依次调整各方向角度,将刀架固定在

光栅刻划机上,然后将毛坯(铝膜,玻璃基底)固定在载物台上,加载力值,进行刻划,依次进行后续光栅的刻划实验。

槽形质量如图 6 所示。

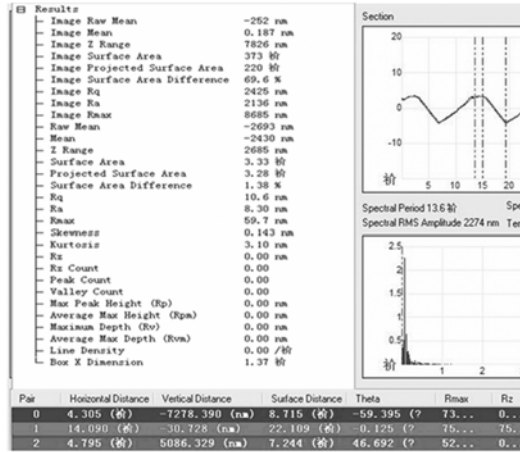


图 6 光栅槽形及粗糙度

Fig. 6 Groove shape and roughness of grating

可以看到槽宽为 $14.090\text{ }\mu\text{m}$,槽深为 $7.278\text{ }\mu\text{m}$,主刻划角为 59.395° ,副刻划角为 46.692° ,由此可计算得到槽底角为 73.913° 。各道槽的槽面较平整,无弯曲现象,但在相邻槽之间出现了较大的平台区,即零级面。与加载时槽形各项指标的对比显示,在负载逐渐加大时,槽宽逐渐变大,槽深也逐渐变大,槽底角逐渐变小,而角度变化为非线性规律。由此可知,负载对光栅槽形表面粗糙度没有较大的影响,进一步可知:光栅表面整体弯曲变形使表面粗糙度增大,这种弯曲变形是由铝膜刻划后存在的弹性势能释放引起的,从而验证了基底的尺度效应。

6 结 论

本文开展了对带有玻璃基底的光栅铝膜本构关系表征的研究,进行了纳米压痕实验及刻划实验。

研究了基于应变梯度理论的光栅铝膜本构关系表征方法,建立了表征关系,提出了由应变梯度和压头尺度效应联合表征载荷关系的方法,对压痕深度和载荷变化之间的联系具有一定的指导意义。在此基础上,提出了光栅薄膜材料和基底材

料都具有尺度效应的假设,并应用纳米压痕实验分别进行参数指导,实验结果既表现出共性,又同时体现出区别,尤其在卸载过程中,这反映了之前建立本构关系的特征,二者在应力关系上相差 0.8 倍,在应变关系上相差 3 倍。在大压深过程中,基底效应体现更为明显,这也与应变梯度理论相吻合,较好地验证了建立的本构关系模型,有助于在实际应用光栅刻划过程中减小误差。进行了光

栅刻划实验,实验结果表明,刻划中等尺度光栅表面整体粗糙度较好。刻划后获得的光栅出现了表面变形,这是由于基底尺度效应产生的,与之前的理论分析和压痕实验相对应。这种压痕实验指导刻划实验的研究过程,对光栅铝膜本构关系起到了重要的支撑作用,也为光栅精密刻划制造奠定了基础。

参考文献:

- [1] 巴音贺希格,高键翔,齐向东. 10.6"m 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"m laser level output high diffraction efficiency blazed grating developed [J]. *Optoelectronics · Laser*,2004,15(10):1137-1140. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] 李英海. 超精密金刚石刀具——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. Precision Eng.*,1996,4(3):81-84. (in Chinese)
- [4] BOUZAKIS K D, MICHAILEDIS N, ERKENS G. Thin hard coatings stress strain curve determination through a FEM supported evaluation of nanoindentation test results[J]. *Surface and Coatings Technology*. 2001(142-144):102-109.
- [5] BOUZAKIS K D, MICHAILEDIS N. Coating elastic-plastic properties determined by means of nanoindentations and FEM-supported evaluation algorithms [J]. *Thin Solid Films*,2004(469-470):227-232.
- [6] BOUZAKIS K D, MICHAILEDIS N. Indenter surface area and hardness determination by means of a FEM-supported simulation of nanoindentation [J]. *Thin Solid Films*. 2006(494):155-160.
- [7] 章莎,周益春. 应用纳米压痕法测量电沉积镍镀层残余应力的研究[J]. 材料导报,2008,22(2):115-118.
ZHANG SH,ZHOU Y CH. Measurement study of residual stress in electrodeposited nickel coating by instrumented nanoindentation [J]. *Materials Review*,2008,22(2):115-118.
- [8] 马德军,徐可为,何家文. 测定金属薄膜屈服强度的纳米压入法研究[J]. 金属学报,1998,34(6):661-666.
MA D J,XU K W, HE J W. A new method on evaluating the yield strength of metal films using depth-sensing indentation instrument [J]. *Acta Metallurgica Sinica*,1998,34(6):661-666.
- [9] 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):39-44.
SHI G F, SHI G Q, XU ZH W, et al.. Large depth nanoindentation experiment of echelle grating aluminum [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(20):39-44.
- [10] JIRIGALANTU, BAYANHESHIG, QI X D. The research of rigid lapping technique on diamond grating ruling tool [J]. *Advanced Materials Research*,2011(179-180):641-645.
- [11] 张宝庆,史国权,石广丰,等. 衍射光栅机械刻划成槽的预控试验[J]. 光学精密工程,2013,21(7):1666-1675.
ZHANG B Q, SHI G Q, SHI G F, et al.. Pre-con-

- trol of mechanical scratching diffractive grating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21 (7): 1666-1675.
- [12] SHEN Y, LIU D C, LIAN G F, *et al.*. Modeling and control of ultra precision positioning system for a grating ruling machine[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012(110-116): 2647-2654.
- [13] JIN Y, CHU B, ZHU CH G. Design, analysis and control of a precision feeding system of diffraction grating ruling engine [C]. *The 2012 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Taiwan*, 2012.

作者简介:

丁健生(1983—),男,吉林长春人,博士研究生,讲师,2005年于吉林大学获得学士学位,2008年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事精密加工及工业自动化控制方面的研究。E-mail: dingjs@ccut.edu.cn

导师简介:

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,1992年于吉林大学获得硕士学位,1996年于吉林大学获得博士学位,研究方向为精密、超精密加工技术及装备。E-mail: sgq@cust.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)