

文章编号 1004-924X(2006)03-0391-05

# 机械刻划长焦距凹面金属光栅的研制

巴音贺希格, 高键翔, 齐向东

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 对大曲率半径(即长焦距)金属基底凹面光栅的机械刻划技术做了研究。为了刻制长焦距凹面光栅, 设计和研制了弹性顶针式光栅刻划刀刀架, 它具有适用于刻划平面光栅和长焦距凹面光栅的双重功能。给出了描述光栅刻划刀圆弧形刀刃曲率半径与凹面光栅曲率半径、光栅口径、金刚石刀头横向尺寸之间关系的数学表达式, 理论分析了光栅刻划刀圆弧形刀刃曲率半径的取值范围, 研制了  $10.6 \mu\text{m}$  激光系统用曲率半径为  $30 \text{ m}$  的凹面金属光栅。检验结果表明, 光栅的槽形质量较好, 光栅的衍射效率可达  $96.8\%$  以上。

**关键词:** 红外激光; 凹面光栅; 光栅刻划刀; 刀架结构

中图分类号: O436.1 文献标识码: A

## Manufacturing for ruling concave metal grating with a long focal length

Bayinheshig, GAO Jian-xiang, QI Xiang-dong

(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

**Abstract:** The ruling technique for concave metal grating with long curvature radius (namely long focal length) was studied. In order to rule the concave grating with a long focal length, a cutter frame with elastic thimble mode was designed and manufactured. It is available not only to plane grating, but also to concave grating with a long focal length. The mathematic expression of the relationship between the curvature radius of circular arc cutting edge of ruling tools for grating and the curvature radius of concave grating, the caliber of grating and the size of transverse direction of bit tool was given. The span of curvature radius of circular arc cutting edge was analyzed theoretically and the concave metal grating with curvature radius of  $30 \text{ m}$  for  $10.6 \mu\text{m}$  laser system was manufactured. The testing results show that the quality of groove is preferable, and the diffraction efficiency is more than  $96.8$  percent.

**Key words:** IR laser; concave grating; ruling tool for grating; cutter frame structure

## 1 引言

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所早在 1958 年就开始进行衍射光栅的研制,是我国最早研制衍射光栅的科研单位,并于 1959 年制造出我国第一台光栅刻划机和第一块衍射光栅<sup>[1-2]</sup>。经过几代科研工作者的不懈努力,最近大功率红外激光系统用长焦距凹面金属光栅的研制达到了实用化程度。

近年来,红外激光器在医疗、工业及国防等部门和研究领域的应用越来越广泛<sup>[3-5]</sup>,具有聚焦成像功能的 10.6  $\mu\text{m}$  大功率  $\text{CO}_2$  激光系统用高效率高损伤阈值金属基底凹面光栅在上述领域有着重要的用途。然而,凹面刻划光栅的制作工艺十分繁杂,除了要具有研制平面刻划光栅的条件和技术外,在硬件设备上还需要设计与研制出专用的金刚石刻划刀刀架结构以及改进金刚石刻划刀几何形状等。因此,10.6  $\mu\text{m}$  激光系统用大曲率半径(即长焦距<sup>[6]</sup>)凹面光栅的成功研制,显示了光栅制作技术的新水平。

## 2 弹性顶针式刻划刀刀架设计

通常刻划平面衍射光栅所用的刀架是以十字弹簧铰链为轴来完成刀具的起落。十字弹簧铰链的允许变形量为 3~6  $\mu\text{m}$ ,若变形量过大,使刀刃的方向与刀桥的运动方向产生偏差,会造成光栅槽面不光滑,衍射效率降低等后果。对于面积为 50 mm $\times$ 50 mm、曲率半径为 30 m 的凹球面(以下简称凹面)光栅基底,由几何定理可知,球缺中心高度为

$$H = \frac{L^2}{4(2R-h)} \approx \frac{L^2}{8R}, \quad (1)$$

式中  $L$  为光栅口径(边长), $R$  为凹面光栅曲率半径。经计算可得  $H \approx 10.4 \mu\text{m}$ ,大于十字弹簧铰链的允许变形量,原有十字弹簧铰链式刀架显然不适合刻划凹面光栅。因此,有必要对原有刀架进行改造,把十字弹簧铰链结构改成弹性顶尖式结构。这种结构的优点是刀具的起落距离大,转动灵活,可以简化金刚石刻刀的调整过程,拓宽光栅刻划机所能刻划的光栅面型种类,具有适用于刻划平面光栅和长焦距凹面光栅的双重功能。

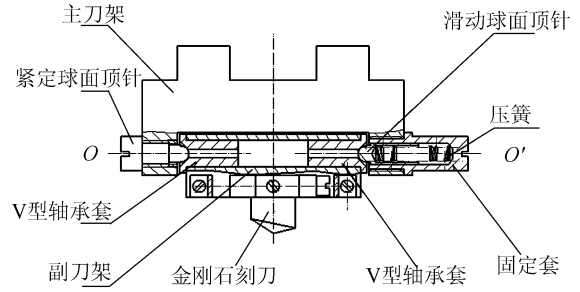


图 1 弹性顶尖式结构刀架主视图

Fig. 1 Front view of cutter frame with elastic thimble mode

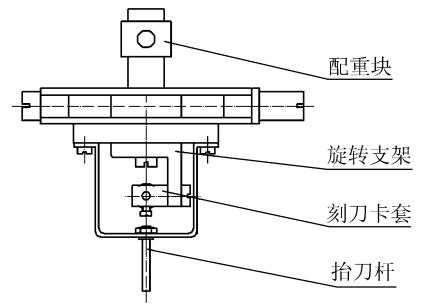


图 2 弹性顶尖式结构刀架俯视图

Fig. 2 Top view of cutter frame with elastic thimble mode

弹性顶针式多功能光栅刻划刀刀架结构如图 1(主视图)和图 2(俯视图)所示。

工作原理:主刀架和副刀架,通过两根同轴球面顶针相联接,副刀架以  $OO'$  为轴转动,从而增大刀具的起落距离,这是此结构的主要设计目的。其中,紧定球面顶针起到定位作用,滑动球面顶针装在与主刀架相连的固定套内,并用压簧联接,因此滑动球面顶针在固定套内可以滑动,主要用来消除主刀架与副刀架之间的间隙和调整副刀架转动的灵活性。在副刀架一端如图 2 所示安装有可旋转支架、刻刀卡套和抬刀杆。金刚石刻刀通过刻刀卡套安装在旋转支架上,旋转支架起到调整光栅闪耀角大小的作用。抬刀杆用来控制金刚石刻刀在刻划过程中的抬刀和落刀。在副刀架另一端的支杆上装有可滑动配重块,通过改变其大小来调整刻划力。

## 3 刻划刀几何形状分析与改进

凹面光栅参数:面积为 50 mm $\times$ 50 mm,曲

率半径为 30 μm,无氧铜基底,闪耀波长  $\lambda=10.6 \mu\text{m}$ ,光栅刻线密度为 100 l/mm,由光栅方程  $2d\sin\theta_1=m\lambda$  求得闪耀角(定向角)  $\theta_1=32^\circ$ ,刀尖角  $\phi=90^\circ$ ,非定向角  $\theta_2=58^\circ$ 。光栅槽形设计与平面光栅相同。

根据三角槽形光栅的物理模型<sup>[2]</sup>可以求出刻槽深度  $h$ (铝膜厚度)的表达式为:

$$h = \frac{\tan\theta_1 \tan\theta_2}{\tan\theta_1 + \tan\theta_2} (d-a), \quad (2)$$

式中  $a$  为零级面宽度<sup>[2]</sup>,零级面越小,1 级衍射光强度越高,这正是所希望的。假设  $a \approx 0$ ,则由式(2)可知,光栅基底上的铝膜厚度  $h \approx 4.5 \mu\text{m}$ 。光栅刻划是由金刚石刻划刀刃对铝膜的挤压成型过程<sup>[7-8]</sup>,因而刀刃与铝膜不是单点接触。光栅刻划机落刀后,其刻划刀接触铝膜形成的压痕的长度(即刃长)对光栅质量影响很大。由刻划实验可知,刻制线密度为 100 l/mm 的光栅,在 600 倍显微镜下观察时,若刃长在 8~10 mm(实际刃长为 13.3~16.7 μm)范围,则光栅槽形一般会较好。所以,在试刻划过程中,观察刻划刀对铝膜的静态压痕<sup>[6]</sup>是很关键的。

刻划平面光栅所用金刚石刻划刀的形状呈尖劈形,刀尖夹角通常选择在 90~95°之间,刀刃呈直线形(如图 1 所示,侧面呈非对称“V”型),通常刀刃与刻面要保持 1~2°夹角<sup>[6]</sup>。这种刀刃形状的刻划刀不适合刻划凹面光栅。金刚石刻刀要经过落刀→刻划→抬刀三个过程方可刻出一条槽线。对于凹面光栅基底而言,尖劈形刀在落刀处刀刃与凹面切线方向夹角最大,刀刃与基底表面膜层的接触部分最小,因而“刃长”最短;抬刀处刀刃与凹面切线方向夹角最小,刀刃与基底表面膜层的接触部分最大,因而“刃长”最长,结果无法将刃长控制在 13.3~16.7 μm 之间。于是,不仅槽线各处宽窄、深浅不同,更常见的则是刃短处发生“跳刀”现象,无法形成完整的光栅线条。

鉴于此,需把直线形刀刃改成对称圆弧形,这种形状的刀刃与基底表面膜层的接触部分受凹面基底的高度差的影响较小,光栅刻槽形状整齐,槽面光滑,便于保证较高的衍射效率。但是,如下三点原因迫使该实验不得不去研究光栅刻划刀圆弧形刀刃曲率半径的取值规律,它事关凹面光栅刻划的成败。第一,刻划刀系统的重力向下,但是,使光栅表面膜层发生形变的是沿凹面曲率半径方

向的法向分力,显然它要小于重力;第二,对平行于光栅刻线的弧矢剖面(通常称光栅色散面为其子午面)而言,圆弧形刀刃的曲率半径越小越有利于实现作用于凹面基底的法向分力同时沿刀刃的曲率半径方向,从而有益于栅线的形成。但是,金刚石刀头横向尺寸仅为 5 mm 左右,圆弧形刀刃的曲率半径越小磨制工艺越困难,精度越不易保证。第三,从磨制工艺考虑,圆弧形刀刃的曲率半径大则易于加工,但是,由于金刚石刀头横向尺寸约为 5 mm,曲率半径太大则会造成作用于凹面基底的法向分力不能沿刀刃的曲率半径方向,刀刃正面不能很好地接触光栅表面膜层,将会发生“跳刀”现象。因此,找出描述光栅刻划刀圆弧形刀刃曲率半径应满足的数学表达式,分析其取值规律对成功刻划凹面光栅十分重要。

圆弧形刀刃与凹面基底作用过程如图 3 所示,仅考察通过凹面基底中心的弧矢剖面,因为此处光栅边缘与剖面圆弧顶点的高度差最大。图 3 中  $R$  和  $r$  分别为凹面光栅和圆弧形刀刃曲率半径, $L$  为光栅口径, $\Delta$  为金刚石刀头横向尺寸, $\alpha$  为光栅基底曲率中心及刀刃触点连线与铅垂线之间夹角, $\delta$  为刀刃曲率中心及刀刃触点连线与铅垂线之间夹角, $mg$  为刻划负载, $T$  为切向分力, $N$  为挤压铝膜使其发生形变的法向分力。显然,当刻划刀在凹面基底顶点处时“刃长”最长,刻划刀在凹面基底边缘处时“刃长”最短。实验证明,对于曲率半径较大的凹面光栅,可以通过调整刻划负载将其顶点处和边缘处的“刃长”控制在 13.3~16.7 μm 范围之内。对于短焦距凹面光栅,需使用结构比较复杂,摆杆长度与待刻光栅曲率半径相匹配的“摆杆式”刀桥机构,此项技术尚待完善,暂且不作表述。

由图 3 不难看出,只有当刻划负载的法向分力始终同时通过光栅基底曲率中心及刀刃触点连线和刀刃曲率中心及刀刃触点连线,即  $\delta=\alpha$  时,才能符合刻划要求。以图 3 左侧情形为例,由于金刚石刀头横向尺寸确定,因而当  $\delta < \delta_0$  时,刀刃正面无法接触凹面基底,不能够刻出光栅槽形,由此可以得到刻划凹面光栅的一个基本条件,即

$$\delta \geq \alpha_{\max}, \quad (3)$$

不妨称  $\delta_0 = \alpha_{\max}$  为圆弧形刀刃临界张角,称与此对应的  $r_0$  为圆弧形刀刃临界曲率半径,这里  $\alpha_{\max}$  为光栅基底曲率中心及光栅边缘连线与铅垂线之

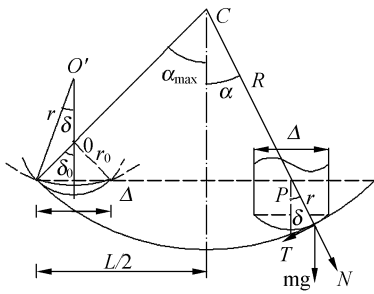


图 3 圆弧形刀刃刻划凹面光栅示意图

Fig. 3 Sketch map of ruled concave grating by circular arc cutting edge

间夹角。根据图 3 和上述分析,得到描述光栅刻划刀圆弧形刀刃曲率半径与凹面光栅曲率半径(其焦距与曲率半径成正比<sup>[6]</sup>)、光栅口径、金刚石刀头横向尺寸之间关系的数学表达式如下:

$$r \leq \frac{\Delta}{L}, \quad (4)$$

可见,圆弧形刀刃临界曲率半径为:

$$r_0 = \frac{\Delta}{L}, \quad (5)$$

由于  $\Delta = 5 \text{ mm}$ ,  $L = 50 \text{ mm}$ ,  $R = 30 \text{ m}$ ,故圆弧形刀刃临界曲率半径  $r_0 = 3 \text{ m}$ ,即圆弧形刀刃的曲率半径取值范围为小于  $3 \text{ m}$ 。

图 4 和图 5 分别为  $10.6 \mu\text{m}$  激光系统用  $30 \text{ m}$  曲率半径金属基底凹面成品光栅的原子力

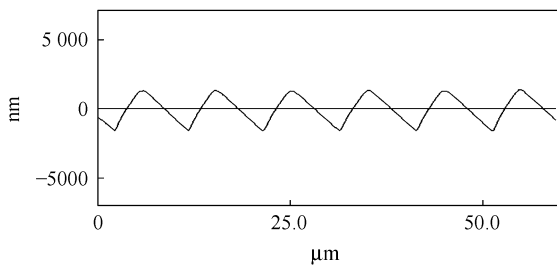


图 4 成品光栅的原子力显微镜剖面分析

Fig. 4 Section plane AFM of finished grating

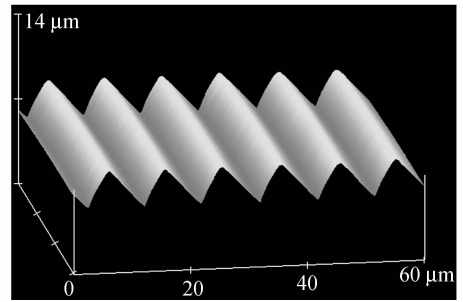


图 5 成品光栅的原子力显微镜三维形貌图

Fig. 5 Three dimension AFM of finished grating

显微镜剖面图和三维形貌图。可以看出,光栅脊线很锐,基本达到“全槽”,衍射效率必然会很高。利用实验室现有设备,对  $\text{CO}_2$  激光束不做扩束,直接做光栅局部表面(光斑覆盖面积等于  $\text{CO}_2$  激光器所发出光束的  $0.85 \text{ m}$  处截面)衍射效率的多点测试,经检验在 Littrow 安装下光栅的一级衍射效率平均值达到  $96.8\%$ 。

## 4 结 论

设计和研制了弹性顶针式多功能光栅刻划刀刀架,它具有适用于刻划平面光栅和长焦距凹面光栅的双重功能,理论分析了光栅刻划刀圆弧形刀刃曲率半径的取值规律。采用弹性顶针式光栅刻划刀刀架和圆弧形刀刃光栅刻划刀,研制了刻线密度为  $100 \text{ l/mm}$  的  $10.6 \mu\text{m}$  激光系统用  $30 \text{ m}$  曲率半径凹面金属光栅。用原子力显微镜作了光栅槽形剖面分析和三维形貌扫描,表明光栅的槽形质量较好,经检验可知,在 Littrow 安装下光栅的一级衍射效率可达到  $96.8\%$  以上。这说明,本文提供的方法对于制作长焦距低刻线密度凹面光栅是适用的。

## 参考文献:

- [1] 梁浩明,庄夔,张庆英,等. 衍射光栅刻划机[J]. 光学学报,1981, 1(1): 51-58.  
LIANG H M, ZHUANG K, ZHANG Q Y, *et al.* The diffraction grating ruling engines [J]. *Acta Optica Sinica*, 1981, 1(1): 51-58. (in Chinese)
- [2] 巴音贺希格,高键翔,齐向东,等.  $9.77 \mu\text{m}$  激光器零级耦合输出选频振荡光栅的设计和研制[J]. 中国激光,2005, 32(3): 301-305.  
BAYANHESHIG, GAO J X, QI X D, *et al.* Design and manufacture for select frequency oscillation grating in the

- zero-order coupling output of 9.77  $\mu\text{m}$  laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(3): 301-305. (in Chinese)
- [3] 田兆硕,王骥,王雨三,等. 光栅选支共电极双通道射频激励波导  $\text{CO}_2$  激光器[J]. 中国激光,2000, 27(11): 961-964.  
TIAN Z S, WANG Q, WANG Y S, *et al.* Study of RF excited waveguide  $\text{CO}_2$  laser with two channels tuned by grating [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, 27(11): 961-964. (in Chinese)
- [4] 田兆硕,王骥,王雨三. 输出可调的光电调 Q 射频激励波导  $\text{CO}_2$  激光器的研究[J]. 中国激光,2001, 28(6): 505-508.  
TIAN Z S, WANG Q, WANG Y S. Study on electrooptically Q-switched RF excited  $\text{CO}_2$  waveguide laser with tunable output [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, 28(6): 505-508. (in Chinese)
- [5] 江东,周鼎富,侯天晋,等. 激光主动成像雷达  $\text{CO}_2$  激光器研究[J]. 中国激光,2002, 29(5): 397-401.  
JIANG D, ZHOU D F, HOU T J, *et al.* Study on  $\text{CO}_2$  laser for active imaging lidar[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, 29(5): 397-401. (in Chinese)
- [6] 祝绍箕,邹海兴,包学诚,等. 衍射光栅[M]. 北京:机械工业出版社,1986:193-242.  
ZHU S J, ZOU H X, BAO X C, *et al.* *Diffraction gratings* [M]. Beijing: Mechanical Industry Publishing Company. 1986:193-242. (in Chinese)
- [7] 李英海. 金刚石衍射光栅刻划刀[J]. 光学精密工程,1996, 4(3): 81-84.  
LI Y H. Super-fine diamond tools for ruling diffraction gratings [J]. *Optics and Precision Engineering*. 1996, 4(3): 81-84. (in Chinese)
- [8] 时轮,郝德阜. 变栅距衍射光栅的原理及应用[J]. 光学精密工程,2001, 19(3): 284-287.  
SHI L, HAO D F. Theory and applications of varied line-space gratings[J]. *Optics and Precision Engineering*. 2001, 19(3): 284-287. (in Chinese)

作者简介:巴音贺希格(1962—),男,博士,主要从事光栅理论研究和分光器件设计与制作研究。E-mail: bayin888@sina.com