

# 硅橡胶柱面菲涅耳太阳聚光透镜成型工艺研究

贾付云 马勉军 孙燕杰 罗崇泰 黄良甫

(兰州物理研究所,兰州 730000)

**摘 要** 研究用空间级柔性透明硅橡胶材料制作线聚焦柱面菲涅耳太阳聚光透镜的成型工艺。结果表明,模具的精度对硅橡胶透镜的光学效率有决定性作用,在采用高精度拼接式模具和严格控制工艺流程的条件下,硅橡胶透镜光学效率可达 85 % 以上。

**关键词** 硅橡胶透镜,菲涅耳太阳聚光透镜,成型工艺

## Modelling Technology of Cylindrical Fresnel Light Concentrating Silicone Lenses

Jia Fuyun Ma Mianjun Sun Yanjie Luo Chongtai Huang Liangfu

(Physics Institute of Lanzhou, Lanzhou 730000)

**Abstract** Modelling technology of cylindrical fresnel light concentrating silicone lenses is investigated. Experimental results show that the optical efficiency of silicone lenses depends greatly on precision of molding plate. 85 % of optical efficiency of the silicone lenses (0.8 mm thick) can be achieved with high-precision joint molding plate and under strict process control.

**Key words** Silicone lens, Fresnel light concentrating lens, Modelling technology

### 1 前言

为适应空间技术对聚光太阳能电池阵轻量化的要求,采用轻质材料制造光学透镜是一种有效的方法。空间级柔性透明硅橡胶因密度小(约  $1.1 \text{ g/cm}^3$ ),兼具优良的光学性能和空间环境适应性能<sup>[1]</sup>,国外已多次将其用作太阳聚光透镜材料在空间进行试验验证和应用<sup>[2,3]</sup>。目前国内尚未见到用硅橡胶材料作透镜的报道。本文根据菲涅耳太阳聚光透镜的理论分析和工艺要求<sup>[4]</sup>,着重研究了硅橡胶柱面菲涅耳太阳聚光透镜的成型工艺问题。

### 2 透镜轮廓

柱面菲涅耳太阳聚光透镜的轮廓见图 1。图中透镜边缘显示的槽沟是一个个尖劈透镜元。透镜轮廓可采用等弧段或等齿高设计,但一般采用等弧段设计。

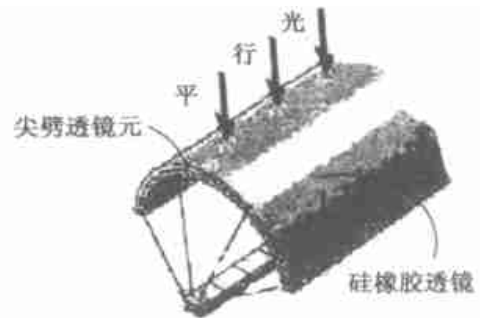


图 1 硅橡胶柱面菲涅耳聚光透镜

Fig. 1 Profile of cylindrical fresnel light concentrating silicone lens

### 3 透镜模具制作

#### 3.1 模具精度要求

透镜模具凹模的轮廓尺寸由透镜柱面轮廓尺寸

收稿日期:2002 - 05 - 20;修回日期:2002 - 09 - 27

贾付云,1976 出生,博士研究生,主要从事空间级透明硅橡胶材料的研究工作  
宇航材料工艺 2003 年 第 1 期

展开成平面透镜相对应尺寸获得。透镜轮廓尺寸由图 2 所示的几何学决定。当光线正入射时,对于线聚焦柱面菲涅耳透镜,取一距透镜中心弧度为  $r_i$  的槽沟,即一尖劈透镜单元,可求得偏折角  $\theta_i$ <sup>[5]</sup>:

$$\theta_i = \alpha_i - \beta_i + \arcsin\{n \sin[\alpha_i - \arcsin(\sin \beta_i / n)]\} \quad (1)$$

式中,  $\theta_i$  为在距透镜中心弧度为  $r_i$  的槽沟处出射光线与入射光线的偏折角;  $\beta_i$  为此处光线的入射角;  $N_1$  是光线入射点处法线;  $\alpha_i$  为此槽沟的尖劈顶角。

(1)式表明,在距透镜中心弧度为  $r_i$  的槽沟位置,已知单元槽沟弧度和透镜折射率  $n$ ,依据透镜设计参数求得所需的偏折角  $\theta_i$ ,就可以迭代求解此位置槽沟确定的尖劈顶角  $\alpha_i$ 。

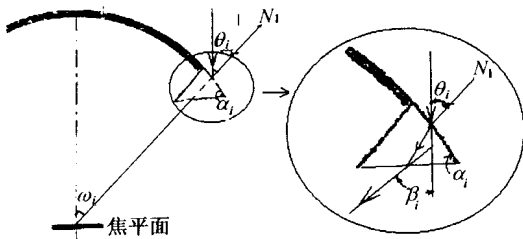


图 2 线聚焦柱面菲涅耳透镜尖劈透镜单元折射光学  
Fig. 2 Dioptrics of cylindrical fresnel lens unit

依据(1)式计算结果和文献[4]中对透镜成型与安装工艺要求,确定模具精度要求如下:尖劈尺寸精度优于  $0.5 \mu\text{m}$ ,角精度优于  $5'$ ,表面粗糙度  $R_a$  低于  $0.04 \mu\text{m}$ ,面形精度要求达到微米级,尖劈根部和尖劈顶部圆弧半径小于  $0.5 \mu\text{m}$ 。

### 3.2 透镜模具加工

模具是硅橡胶透镜成型的基本保障。线聚焦柱面菲涅耳透镜作为光学元件,对模具尺寸和面形精度要求极高。模具基材、切削刀具、车削方法、机床控制和模具表面处理对成型后硅橡胶透镜的光学效率有重要影响。经过不断试验和改进,优选的模具加工工艺如下。

(1) 采用天然单晶金刚石作为切削刀具

天然单晶金刚石切削刀具具有硬度高、磨损率小、锋利性好、摩擦系数极小、导热性好、膨胀系数小等特点,适合透镜模具精密微结构加工。刀具应具有精确的几何特性,在设计、制作时,刀尖圆弧半径的确定要考虑刀尖稳定性和强度,刀具需经过仔细的抛光。

(2) 采用硬质铜合金作为透镜模具基材  
铜材作为精密模具的优选材料,与金刚石刀具的亲性好。为尽可能消除透镜模具微结构的不规则性,在 H62 基础上掺杂其它材料,以提高其硬度。

(3) 采用曲面展开法获得透镜模具直线条  
将硬质铜合金板材夹在曲率半径足够大的圆面上,用单晶金刚石刀具车削出透镜模具齿形;然后将曲面模板伸展成平面。这种工艺手段,可获得较大的切削速率,提高表面粗糙度,且车削平稳,不易发生崩刀现象,模具齿形精度高。

(4) 采用辅以光学校准装置的精密数控机床  
机床主轴的径向和轴向跳动精度应优于  $0.1 \mu\text{m}$ 。在透镜模具加工过程中,为消除积累误差和补偿刀具的磨损,需采用光学系统加以校准。

(5) 采用模板拼接法,以消除刀具磨损误差  
当从模板中心向边缘车削成型时,金刚石刀具的磨损非常严重。为消除模板边缘齿形误差,单边加工,然后拼接成整体。

(6) 透镜模具表面处理  
透镜模具的表面处理是为进一步提高表面粗糙度,提高模具寿命,易于硅橡胶脱膜。通过表面处理,可有效地消除模具表面的周期性微波面金刚石刀痕,提高模具齿形强度和硬度,降低模具和硅橡胶的浸润性,方法是在模具表面镀敷厚  $0.1 \mu\text{m} \sim 0.2 \mu\text{m}$  的镍膜。

### 4 透镜成型

透镜采用精密浇注成型。在模具加工达到设计精度后,欲制得无缺陷(如气泡、裂纹等)的硅橡胶透镜,对成型工艺流程的严格控制尤为重要。图 3 是透镜的成型工艺流程图。

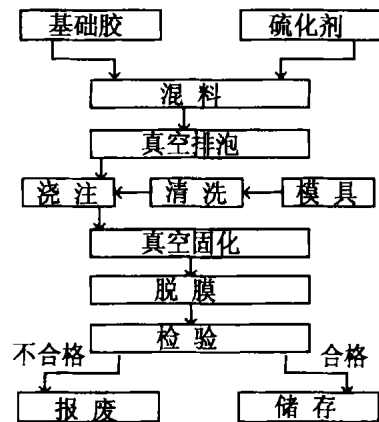


图 3 硅橡胶透镜成型工艺流程

Fig. 3 Modeling flowsheet of silicone lens

需注意的是:成型时,硅凝胶组分须在洁净真空条件下充分混合、排泡,在恒温环境中硫化成型,硫化工艺参数(时间、温度、压力等)要匹配。

## 5 透镜光学性能测试

采用平行光管(发散半角小于1°)对所做柱面菲涅耳硅橡胶透镜若干样品进行了测试。测试条件为:色温2856 K、卤钨灯光源,50 mm × 60 mm 光栅,10 mm × 60 mm Si 聚光太阳能电池,拼接式或整体式透镜模具。表1列出了样品测试结果,表明光学效率可达85%以上。

表1 硅橡胶柱面菲涅耳太阳聚光透镜样品测试结果<sup>1)</sup>

Tab.1 Optical efficiency of silicone lens

样品编号	有效孔径/mm	曲率半径/mm	光学效率/%
1 <sup>#</sup> (P)	50	60	85.0
2 <sup>#</sup> (P)	50	60	84.2
3 <sup>#</sup> (P-H)	50	60	84.0
4 <sup>#</sup> (Z)	50	60	80.8
5 <sup>#</sup> (Z-H)	50	60	80.8
6 <sup>#</sup> (P)	50	70	87.0

注:1)P指用拼接模具;Z指用整块模具;H指加少量硅油。

## 6 结论

(1)采用单点金刚石刀具车削加工技术和曲面展开法,可制得高精度透镜模具;模具表面镀膜,既提高了模具表面粗糙度和寿命,又便于透镜脱膜。

(2)硅橡胶柱面菲涅耳太阳聚光透镜样品测试结果表明,光学效率可达85%以上。通过对透镜成型误差分析,改进透镜模具加工工艺,透镜的光学效率将还会有所提高。

## 参考文献

- 1 O'Neil M J, Piszczor M F. Inflatable lenses for space photovoltaic concentrator arrays [J]. In: 26th PVSC, Anaheim, 1997; CA:853~854
- 2 Eskenazi M I, Murphy D M. Present and near-term SCAR-LET technology [J]. In: 36th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 1998
- 3 黄良甫. 空间聚光太阳能电池阵技术新进展. 空间飞行器总体技术学术交流会, 2000:365~367
- 4 黄良甫, 罗崇泰, 马勉军等. 硅橡胶柱面菲涅耳透镜的设计和制作. 中国空间技术研究院兰州物理研究所2002年学术交流文集, 2002:271~274
- 5 张明, 黄良甫, 罗崇泰等. 空间用平板形菲涅耳透镜的设计和光学效率研究. 光电工程, 2001;28(5):18

(编辑 任涛)

# 金属材料热变形防护润滑剂

本成果是以硼硅酸盐玻璃为固体基料,以改性有机硅丙烯酸树脂为粘结剂,以水为溶剂配制而成的水悬浮液,用于高温合金、钛合金及不锈钢热变形锻件毛坯上,可起防护、润滑和绝热作用,也可做金属材料热处理保护涂料用。

作为金属材料热变形防护润滑剂其起始软化温度应当比金属表面发生剧烈氧化的温度低;流动点则应与金属材料热变形温度相当(或高于50~100);高温时的浸润角<30°,摩擦系数对于钢件及钛合金小于0.1,对于高温合金及其它难变形合金为0.2~0.3。

该产品综合性能已达到国外同类产品水平,环境污染少,工艺使用方便等方面优于国外同类产品;已在高温合金、钛合金及不锈钢零件的精锻、挤压、大型模锻件模锻及等温超塑成形工艺上成功应用。

本防护润滑剂是一种特种功能材料。在金属材料高温状态下(热变形或热处理时)使用,具有防止氧化、渗氢,减少贫化层深度起润滑作用;降低摩擦系数,减少设备能量消耗,提高模具使用寿命,减小锻件的加工余量、提高锻件精度、超绝热作用和促进金属变形新工艺的实现等多种功能,其经济效益显著,社会效益很大。

(北京航空材料研究院,010-6255662)

·李连清·