

大口径反射镜几种轻量化孔结构形式的分析

郭喜庆, 王悦勇

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130021)

摘要: 针对某空间相机的主反射镜, 根据目前的光学器件的加工工艺性, 利用 CAD 技术对反射镜镜体进行有限元建模, 分析了反射镜的几种轻量化孔的结构形式对镜体动、静态刚度的影响, 从而优化出符合反射镜面形精度要求的轻量化孔的最佳结构形式。

关键词: 空间相机; 反射镜; 轻量化孔; 刚度; 结构形式

中图分类号: TP391.72 **文献标识码:** A

1 引言

空间相机是空间遥感的重要有效载荷, 其质量的大小, 直接关系到发射费用的高低, 在保证相机镜头具有较好成像质量的前提下, 应使相机具有最小的质量, 这就要求在满足相机具有足够高的动、静态刚度的条件下, 对相机结构进行最大程度的轻量化。其中主反射镜镜体的轻量化是整个轻量化过程的基本环节。从而优化出符合反射镜面形精度要求的轻量化孔的结构形式。

空间反射镜镜坯轻量化的主要途径有机械法、熔铸法、焊接法以及采用轻质材料(如钼、碳化硅等)来制造反射镜等等。熔铸法和焊接法可以保证反射镜具有较小的壁厚及质量分布均匀合理的轻量化结构形式, 这两种方法加工出来的反射镜的结构刚度比较大, 质量比较轻。轻量化率最高可以达到 70%, 因此, 可以保证反射镜具有较高的面形精度。国外一些大口径的反射镜轻量化大部分采用这两种方法。由于国内技术水平有限, 在熔铸法和焊接法这两方面的技术能力方面还没有摸索出一套切实可行的技术途径, 所以只能采用机械加工的方法进行反射镜的结构轻量化。机械加工方法是在保证反射镜具有足够刚性的前提下, 通过某种机械加工工艺方法去除反射镜上不参与光学系统成像的部分材料, 以达到减轻反射镜重量的目的, 采用机械加工法进行异形盲孔的加工, 有铣钻、超声钻等方法。采用计算机控制的钻铣法

得到了更高的加工效率和更高的轻量化程度及精度的镜坯。根据机械法加工的工艺特性, 本文所讨论的反射镜只能采用背部开式或半封闭式的轻量化孔结构形式。

2 几种轻量化孔结构形式的比较

从结构角度来讲, 一个轻量化蜂窝结构的反射镜的夹层交叉部分在结构上要比相同尺寸的实体镜体更合理。因为, 轻量化镜体是把在中性面上, 对镜体的抗弯刚度贡献很小的那部分材料从实体镜体中去掉, 这样, 虽然减少了对抗弯刚度有贡献的材料, 镜体的抗弯刚度略有下降, 但镜体本身的重量却大大减少了, 镜体的结构比刚度(刚度比重量)有明显的增加。轻量化孔的形状主要有下面几种(见图 1)

其中, 扇形轻量化孔一般应用于带有中心孔的圆形反射镜的轻量化^[1], 本节讨论的反射镜不带有中心孔, 所以不预以讨论, 而圆形轻量化孔只不过是六边形轻量化孔的简化, 同时与六边形孔相比, 具有一定的质量分布不均匀性, 且具有一定的计算误差, 但由于这种形式孔可以做成半封闭式的阶梯孔, 对镜体的抗弯刚度具有一定的贡献, 而其它几种形状的轻量化孔的形式在国内目前只能做成开式结构, 多少会降低镜体的刚度。下面主要针对前三种开式结构的轻量化孔进行分析, 并结合实际加工能力与圆形半封闭轻量化孔进行比较。

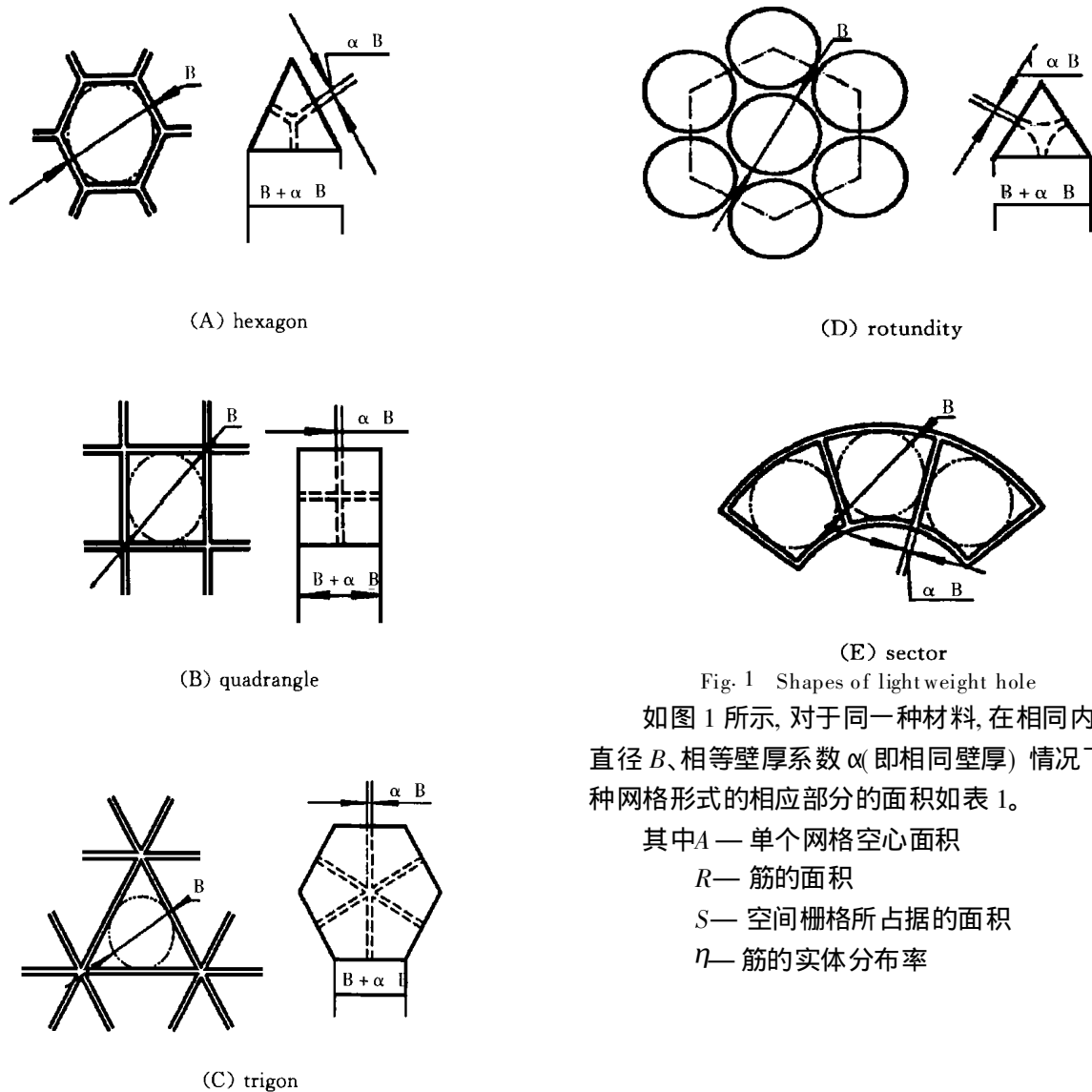


Fig. 1 Shapes of lightweight hole

如图 1 所示, 对于同一种材料, 在相同内切圆直径 B 、相等壁厚系数 α (即相同壁厚) 情况下, 几种网格形式的相应部分的面积如表 1。

其中 A — 单个网格空心面积

R — 筋的面积

S — 空间栅格所占据的面积

η — 筋的实体分布率

Table 1 Parameters of several lightweight holes

	(1) hexagon	(2) quadrangle	(3) trigon	(4) rotundity
A	$\sqrt{3} B^2 / 2$	B^2	$\sqrt{3} B^2 / 4$	$\pi B^2 / 4$
R	$\frac{\sqrt{3} B^2 (2\alpha + \alpha^2)}{4}$	$(2\alpha + \alpha^2) B^2$	$\frac{3 \sqrt{3} (2\alpha + \alpha^2) B^2}{2}$	$(\frac{3}{4} (1 + \alpha)^2 - \frac{\pi}{8}) B^2$
S	$\frac{\sqrt{3} B^2 (1 + \alpha)^2}{4}$	$(1 + \alpha)^2 B^2$	$3 \sqrt{3} (1 + \alpha)^2 B^2$	$\sqrt{3} (1 + \alpha)^2 B^2$
η	$1 - \frac{1}{(1 + \alpha)^2}$	$1 - \frac{1}{(1 + \alpha)^2}$	$1 - \frac{1}{(1 + \alpha)^2}$	$1 - \frac{\sqrt{3} \pi}{6 (1 + \alpha)^2}$
perimeter	$2 \sqrt{3} B$	$4B$	$3 \sqrt{3} B$	πB

由于在使用工程分析软件进行分析过程中,圆形轻量化孔需采用六边形轻量化孔进行简化;如果按最小壁厚进行简化,则 $\frac{\eta_4 - \eta_0}{\eta_1} = \frac{6 - \sqrt{3}\pi}{6(2\alpha + \alpha^2)}$ 即存在简化误差,其大小由 α 取值决定,见表 2。

Table 2 Error analysis of circle and hexagonal hole

α	0.05	0.08	0.10	0.12	0.15	0.20
$\frac{\eta_4 - \eta_0}{\eta_1}$	91%	56%	44%	37%	29%	21%

可见,其误差随 α 取值增大而减小,一般 α 取值在 0.05 至 0.2 之间,在采用先进的熔铸或焊接工艺进行制造加工时 α 可以取 0.05,这样反而会使计算误差较大,国内采用机械加工的方法,采用较大的安全系数情况下,常取 α 为 0.15 至 0.2,这样,由于简化而产生的计算误差也超过了 20%,但是,以国内现有的加工能力,只能对圆孔进行半封闭式的机械加工,而对于六边形,四边形,三角形孔只能进行开式的机械加工,因此,如果采用圆孔半封闭式的轻量化结构,对镜体刚度有一定的增强,是一种可取的方案。

对于其它三种形式(六边形、四边形、三角形)的轻量化孔,在内切圆直径 B 和网格壁厚系数 α 相同的情况下,虽然 η 取值相同,但三角形围成的空心面积所需的边长最长,四边形其次,六边形最小,对于相同直径的圆形镜体,三角形轻量化方式的镜体质量最大,轻量化程度最低,因此,三角形轻量化孔镜体的质量面积密度最大^[2],在其它几何尺寸保持不变的情况下,与三角形轻量化镜体具有相等质量密度的实体镜体的厚度就越大,其面型精度就越高,这可以由以下几点来得到证明:

(1) 由抗弯刚度公式可以证明^[3]:

$$t_s = W/A\rho$$

W/A —— 面积密度

ρ —— 材料密度

t_s —— 等效实体厚度

$$I_s = t_s^3/12$$

I_s —— 单位宽度惯性矩

$$D_s = EI_s/(1 - \nu^2)$$

E —— 材料的弹性模量

D_s —— 镜体的抗弯刚度

ν —— 材料的泊松比

当 t_s 较大时,相应的 I_s 也较大,从而 D_s 较大,镜体本身抵抗外力变形刚度越大,因此自重变形较小,面型精度就较高。

(2) 从下述镜体变形公式也可证明^[4]:

$$\delta_{max} = \frac{C_1 QR^4}{Et_s^3}$$

$$q = \rho \cdot t_s$$

$$\text{即 } \delta_{PV} = \frac{C_1 \rho R^4}{Et_s^2}$$

C_1 —— 与支撑方式有关的常数

ρ —— 材料的密度

R —— 镜体的半径

q —— 自重均布载荷

E —— 材料的弹性模量

t_s —— 实体镜坯厚度

δ_{PV} —— 面型的 PV 值

由公式可见,镜体面型的 PV 值随厚度 t_s 的增大而减小。

从上述三点可以看出,三角形轻量化孔在与六边形及四边形孔保持相同的几何尺寸的情况下,其面型精度要优于后两者,尽管其质量较大,但与后两者相比,增加的重量也不超过 10%。此外,对于前后封闭的对称式及非对称结构,可以采用六边形轻量化孔,而对于本课题所讨论的主镜而言,由于受加工制造能力的限制,只能采用开式结构,这样,对于六边形孔而言,从筋的连续分布角度考虑其刚度要有所下降,四边形孔的稳定性不太好,而只有三角形孔的综合条件较为合理,且具有较好的各向同性。因此使用三角形轻量化孔,也是一种可取的方案。

3 结 束 语

由前述所建议的两种方案,一种为半封闭式的圆形轻量化孔,另一种为开式的三角形轻量化孔,分别对这两种可取方案简化后建模进行分析,结果表明,这两种方案的面型精度和重量都比较接近,但圆形半封闭式的轻量化孔的加工难度还是比开式三角形轻量化孔的加工难度还是比开式三角形轻量化孔的加工难度要大,加工费用也会相应增加,因此,建议采用开式三角形轻量化方案。

参考文献:

- [1] 吴清文. 空间相机中主镜的轻量化技术及其应用[J]. 光学 精密工程, 1997(6): 69- 80.
- [2] Ealey Mark A, Wellman John A. Ultralightweight silicon carbide mirror design [J]. Proc. SPIE, Advanced Materials for Optics and Precision Structures, 1996, 2857: 73- 77.
- [3] Mehta Pravin K. Flexural rigidity characteristics of light-weighted mirrors[J]. Proc. SPIE, Structural Mechanics of Optical Systems II, 1987, 748: 158- 171.
- [4] Pepi John W. Analytical for light weight optics in a gravitational and thermal environment[J]. Proc. SPIE, Structural Mechanics of Optical Systems II, 1987, 748: 172- 179.

Analysis of structural forms of lightweight hole for heavy-caliber mirror

GUO Xi-qing, WANG Yue-yong

(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021, China*)

Abstract: Aiming at the main mirror of certain space camera, the paper analyzes the effect of several structural forms of lightweight hole on dynamic and static rigidity of mirror itself. According to processing method of optical instruments, CAD technology is adopted to set up FEM model of mirror body and then the best structural form of lightweight hole in mirror is optimized.

Key words: space camera; mirrors; lightweight hole; rigidity; structural form

作者简介: 郭喜庆, (1972-), 男, 吉林舒兰人, 1994年毕业于吉林工业大学机械系机械电子工程专业获学士学位, 现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生, 主要从事精密仪器机电一体化研究。