

大口径激光发射系统卷帘式窗口密封特性分析

任天赐^{1,2}, 邵 帅¹, 孟令武^{1,2}, 汪 奎^{1,2}

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 基于 600 mm 口径的某激光发射系统, 提出了一种卷帘覆盖压紧式密封方法, 卷帘采用卷曲收放结构, 通过电机驱动卷轴转动带动同步带运动, 同时利用弹性拉紧机构拉紧卷帘, 使卷帘在收放运动过程中一直保持紧贴密封平面来达到密封效果。通过理论分析与有限元建模仿真, 对其密封特性进行了分析, 得出密封平面的结构形式是影响密封性能的主要因素。通过分析比较, 选取 PVC 作为卷帘材料。设计的结构为密封凸起平面形式, 卷帘厚度为 0.5 mm, 结构边缘带有 30°倒角。对其密封特性进行有限元仿真分析, 得出卷帘中心挠度为 6.269 mm。在设计指标所允许的极限载荷下卷帘所受应力远小于材料拉伸强度, 不会破坏。满足密封要求。

关键词: 激光光学; 强激光; 卷帘式密封; 覆盖压紧; 有限元分析

中图分类号: TN243 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0506005

Analysis of sealing characteristics of rolling blinds window for large aperture laser emission system

Ren Tianci^{1,2}, Shao Shuai¹, Meng Lingwu^{1,2}, Wang Kui^{1,2}

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on a laser emission system of aperture 600 mm, a rolling blinds sealing method was presented. For the rolling blinds, a curly replay structure was applied to drive the synchronous belt through the motor drive roll. At the same time, the rolling blinds was tightened by the elastic tightening mechanism to keep the blinds close to the seal plane to achieve the sealing effect. By theoretical analysis and numerical simulation of Finite Element Analysis, the sealing characteristics were studied. It can be concluded that the structure of the seal plane are the main factors affecting the sealing performance. By analysis and comparison, PVC is selected to be the material for rolling blinds. The designed structure is a sealed protuberance with a chamfering of 30° and thickness of rolling blinds is 0.5 mm. The Finite Element Analysis of the sealing characteristics shows that the center deflection of the rolling blinds is 6.269 mm. Under the limit load allowed by the design requirements, the stress of the rolling blinds is far

收稿日期: 2018-12-05; 修订日期: 2019-01-03

基金项目: 吉林省科技发展计划(Y731UC170)

作者简介: 任天赐(1993-), 男, 硕士生, 主要从事激光发射系统内通道密封技术方面的研究。Email: rentc2016@163.com

导师简介: 邵帅(1978-), 女, 研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事光机结构设计方面的研究。Email: shaoshuaiciomp@163.com

less than the tensile strength of the material and will not be destroyed. The designed window satisfies the sealing requirements.

Key words: laser optics; high power laser; rolling blinds seal; coverage constraint; Finite Element Analysis

0 引言

光学表面沾染导致的光学元件破坏已成为限制激光发射系统发展的一个重要因素^[1-2]。因此,为了保护激光发射系统的内部元件,增强系统的环境适应性,保证设备的使用寿命和可靠性,必须将发射系统内部元件与外界环境隔离开来。目前常用的解决办法是在激光发射系统末端形成隔离窗口,通过窗口阻挡外界污染物。

依据工作原理,窗口类型分为晶体窗口和气动窗口两种。对于口径较小的激光发射系统,两种密封方式都可以满足要求。然而,对于大口径激光发射系统,其窗口密封较为困难^[3-9]。这是由于满足要求的晶体材料较少且不易加工,加工晶体窗口技术难度大、成本高,而气动窗口密封气体分布不均、浪费大。因此,需研制一种新型密封来平衡窗口系统稳定性和经济性。

目前国内外关于大口径激光发射系统密封窗口的研究成果较少见诸报道,主要是中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的刘旭堂等人结合晶体、气动窗口的优点提出的新型窗口^[10]。但该窗口系统复杂、结构笨重。

文中提出一种新型卷帘覆盖压紧密封窗口结构。卷帘采用卷曲收放结构,通过电机驱动卷轴转动带动同步带运动,同时利用弹性拉紧机构拉紧卷帘,使卷帘在收放运动过程中一直保持紧贴密封平面来达到密封效果。通过理论分析,并利用 ABAQUS 软件进行有限元建模仿真,对其密封特性进行了分析,得出卷帘中心挠度及密封平面的结构形式是影响密封性能的主要因素。分析结果表明,窗口设计满足密封要求。

1 密封窗口结构设计

1.1 卷帘开合形式选择

根据窗口的具体使用环境不同,卷帘的开合形式有以下几种不同类型:卷曲收放、折叠收放、直板移动和旋转移动。表 1 总结了不同开合形式的优缺点。

表 1 不同运动形式优缺点

Tab.1 Advantages and disadvantages of different forms of movement

Form of motion	Advantage	Disadvantage
Rolling	Small volume	Pressing mechanism is needed
Direct movement	Large rigidity	Oversize
Folding and collecting	Small volume	Need extra space to place curtains
Rotation movement	Small axial size	Large radial size

文中研究的是车载激光发射系统,激光发射口径为 600 mm。由于车体限制,密封窗口尺寸要求不大于 685 mm×770 mm×100 mm(长×宽×高);同时由于窗口安装于发射转台之上,转台方位俯仰转动速度快,要求窗口质量小于 20 kg。因此卷帘开合形式选择卷曲收放,根据激光发射系统特点,提出了一种新型覆盖压紧密封窗口结构。

1.2 窗口密封原理

卷帘采用卷曲收放结构,通过电机驱动卷轴转动带动同步带运动,同时利用弹性拉紧机构拉紧卷帘,使卷帘在收放运动过程中一直保持紧贴密封平面来达到密封效果。卷曲收放导致适合于卷帘的材料弹性模量较小,使其在相同外部载荷下卷帘中心挠度较大。仅靠材料本身无法保证密封效果,需要一定结构将卷帘压紧在密封平面上,利用摩擦力减小卷帘滑动,降低挠度。

刘旭堂等人设计的密封窗口分为上下两个部分:上端为压紧机构,下端为卷帘运动机构。通过上下联动,在卷帘伸展时利用压紧机构压紧卷帘使其贴合激光密封平面,达到密封效果。

文中设计的覆盖压紧密封是利用弹性压力使覆盖物紧密贴合在被覆盖物表面上,达到密封效果。利用覆盖压紧密封方法有以下特点:去掉卷帘上端压紧机构,使整个窗口的质量减轻一半,但由于缺少上端压紧机构,因此密封压力有所下降,为了保证密封

效果,需要在结构设计上予以补偿。

1.3 密封窗口结构设计

由于采用覆盖压紧密封原理,卷帘无需上端压紧机构,因此窗口结构设计主要为窗口框架设计、卷帘选择以及驱动机构设计。密封窗口主要组成部分有:卷轴、卷帘、电机、同步带、弹性拉紧机构等。如图 1 所示。

窗口工作原理为:卷帘一端固定在卷轴 1 上,另一端通过弹性拉紧机构与卷轴 2 相连;电机扭矩通过齿轮组传递带动卷轴 1 运动,利用同步带传动使两端卷轴同步运动;运动过程中通过弹性拉紧机构变形使卷帘上保持一定拉力 F ,带动卷帘运动;使卷帘始终贴合密封平面达到密封效果。

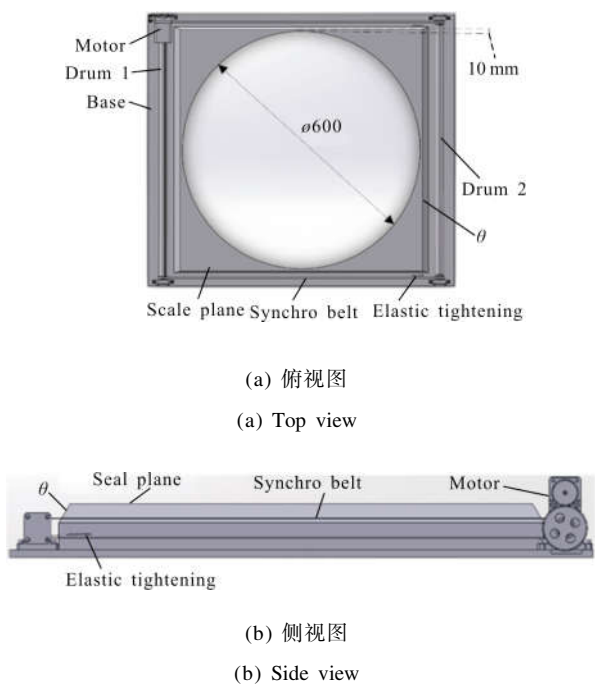


图 1 密封窗口结构图
Fig.1 Diagram of window of sealing structure

为了使拉力 F 可以转化为压力作用在密封平面上,提高密封效果,可设计密封平面结构,使平面凸起高于卷轴平面,并在密封平面凸起四周设计倒角 θ 。当卷帘开启的时候,可以增大卷帘与密封平面间的接触压力,同时卷帘两侧施加弹性拉力 F , F 可分解为分力 F_y, F_x 。 F_y 垂直于密封平面,可以使卷帘压紧在密封平面上; F_x 沿卷帘运动方向的拉力,使卷帘在绷紧。两者共同作用减小中心挠度,达到密封效果。如图 2 所示。

当卷帘与密封平面紧密贴合时窗口才具有密封效果。但由于窗口宽度尺寸限制,卷帘侧边与密封平

面边缘接触宽度最小尺寸只有 10 mm。在外载荷作用下,卷帘中心会产生挠度变形,挠度过大会导致卷帘侧边与密封平面分离,使窗口失去密封能力。因此要对卷帘受力进行分析,找出影响中心挠度的因素。

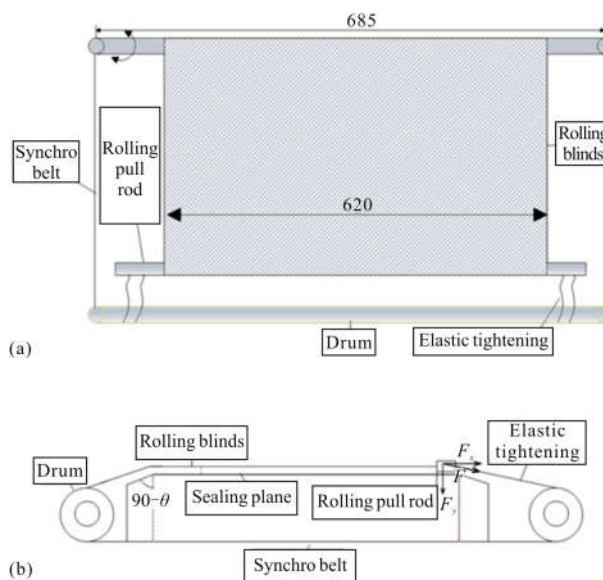


图 2 密封窗口力学模型示意图
Fig.2 Schematic diagram of structural model of seal window

2 卷帘受力变形理论分析

车载激光发射系统在野外环境工作,受到的载荷主要为风载作用。当卷帘中心挠度大于 10 mm 时,卷帘会与密封平面分离,使系统失去密封能力。因此要获得卷帘挠度与载荷关系的数学表达式。卷帘在载荷作用下变形的力学模型如图 3 所示。

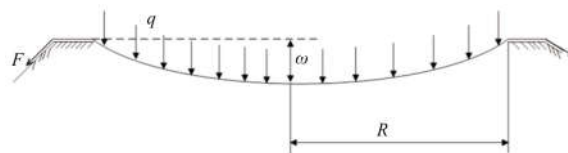


图 3 卷帘受力变形图
Fig.3 Deformation of rolling blinds

由于计算及仿真时需要代入受到的载荷值,因此要获得风速与风压的关系式。根据参考文献[11]有:

$$q=0.5C_D\rho V^2 \quad (1)$$

式中: C_D 为风阻系数,当风速与窗口表面垂直时取 1,为了应对最恶劣情况,文中取 1; V 代表环境平均风

速, 设备要求抗风等级为 8 级大风; ρ 代表空气密度, 取 1.29 kg/m^3 。

为此可以获得外界风速与风载的对应关系, 如表 2 所示。

表 2 风级、风速、风压对应关系

Tab.2 Corresponding relationship among wind grade, wind speed and wind pressure

Wind grade	5	6	7	8
Maximum wind speed/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	10.8	13.9	17.2	20.8
Wind pressure/Pa	75.23	124.62	190.82	279.05

卷帘的受力变形模型类似于板的大挠度变形方程^[12-13], 该模型基于以下两个假设: (1) 中面法线在板变形后依然垂直于中面; (2) 变形过程中, 板厚近似不变。变形符合以下公式:

$$D \frac{d}{dr} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} r \frac{dw}{dr} = N_r \frac{dw}{dr} + \frac{qr}{2} \quad (2)$$

$$r \frac{d}{dr} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r^2 N_r) + \frac{Eh}{2} \left(\frac{dw}{dr} \right)^2 = 0 \quad (3)$$

$$N_r = \frac{d}{dr} (r N_r) \quad (4)$$

式中: E 为材料弹性模量; $D = \frac{Eh^3}{12(1-\sigma^2)}$ 为薄板的抗弯系数, σ 为泊松比; h 为薄板厚度; q 为均布载荷大小 (文中主要指风载); w 为沿激光出射方向轴向挠度; N_r 为径向薄膜应力; N_t 为切向薄膜应力; r 为到薄板中心点的距离。虽然卷帘的物理结构不是圆形, 但由于激光发射窗口部分为圆形, 卷帘与窗口平面贴紧, 卷帘在圆形窗口范围内的变形不会受到限制, 因此可以认为卷帘形状为窗口口径大小的圆形薄板, 它们之间的不同通过边界条件修正。根据结构可知, 卷帘一端通过弹性机构拉紧, 为边缘可移夹紧形式。因此边界条件为:

$$\text{当 } r=R \text{ 时, } w=0, \frac{dw}{dr}=0, N_r=0 \quad (5)$$

$$\text{当 } r=0 \text{ 时, } w=w_{\max}, \frac{dw}{dr}=0 \quad (6)$$

为了简化计算, 可以引入以下无量纲参数:

$$x = \frac{R^2 - r^2}{R^2}, W = \sqrt{3(1-\sigma^2)} \frac{w}{h}, S = 3(1-\sigma^2) \frac{R^2 N_r}{Eh^3}$$

$$T = 3(1-\sigma^2) \frac{R^2 N_t}{Eh^3}, Q = \frac{3}{4} (1-\sigma^2) \sqrt{3(1-\sigma^2)} \frac{R^2 q}{Eh^4} \quad (7)$$

将上式代入大挠度方程(2)~(4), 有:

$$\frac{d^2}{dx^2} \left[(1-x) \frac{dW}{dx} \right] = S \frac{dW}{dx} - Q$$

$$\frac{d^2}{dx^2} [(1-x)S] + \frac{1}{2} \left(\frac{dW}{dx} \right)^2 = 0$$

$$T = S - 2(1-x) \frac{dS}{dx} \quad (8)$$

摄动法是求解圆薄板大挠度变形常用的方法, 以薄板中心挠度为摄动参数, 将其余变量转化成关于中心挠度 W_m 的升幂级数。

$$W_m = \sqrt{3(1-\sigma^2)} \left(\frac{w}{h} \right)_{r=0} \quad (9)$$

压力 Q 关于中心挠度 W_m , 径向拉应力 S 关于中心挠度 W_m 的关系式如下:

$$Q = 4W_m + \frac{73}{270} W_m^2 \quad (10)$$

$$S(z) = \frac{1}{2} W_m^2 - \frac{33}{2835} W_m^4 \quad (11)$$

联立方程式可以得到风载 q 和径向拉应力 N_r 关于卷帘变形量 w 的数学表达式:

$$q = \frac{16Eh^3 w}{3(1-\sigma^2)R^4} + \frac{146Ehw^3}{135R^4} \quad (12)$$

$$N_r = \frac{[2835h^2 - 198(1-\sigma^2)w^2]Ew^2}{5670hR^2} \quad (13)$$

可知卷帘中心处的挠度变形量最大, 变形量与卷帘材料的弹性模量 E 、卷帘厚度 h 、外部载荷 q 、预紧力 Q 有关。

在窗口的设计中, 弹性模量 E 由卷帘材料确定; 外部载荷 q 为风载, 由表 2 可知, 风压最大为 279.05 Pa , 为应对最恶劣情况, 风压取 280 Pa ; 公式(12)、(13)是在卷帘受到水平拉力的作用下推导出来的。由于倒角 θ 存在, 拉紧机构产生的拉力 F 分解出的水平力 F_x 可以作为卷帘实际受力模型的预紧力; F_y 作为压力作用, 产生的摩擦力可以减小卷帘滑动。通过仿真分析结构中各参数对中心挠度的影响效果, 可以确定窗口最佳结构形式和卷帘尺寸。

3 有限元法分析各参量对卷帘中心挠度的影响

3.1 有限元分析建模

对于文中研究的结构, 卷帘中心挠度是关键参数, 掌握卷帘受力情况才能较为理想地研究卷帘变

形。卷帘主要受力有：拉紧力 F 分解出的垂直力 F_y 以及水平力 F_x ，通过改变它们的大小即可同时研究倒角 θ 以及预紧力 Q 对中心挠度的影响；卷帘在密封平面滑动会产生摩擦力，摩擦系数取 0.15。垂直力 F_y 主要作用在密封平面边缘，为了便于载荷加载，将垂直力 F_y 等效为压强加载到模型上。有限元分析模型如图 4 所示。Z 方向原点为卷帘拉伸且未受风载时的中心点。

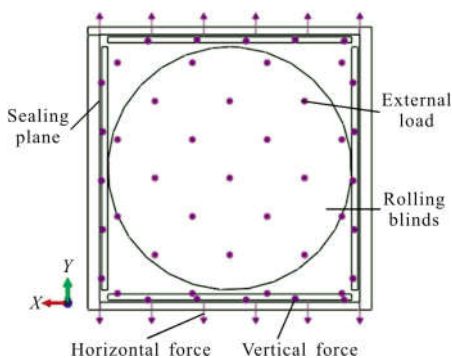


图 4 有限元分析模型

Fig.4 Finite element analysis model

3.2 弹性模量对卷帘中心挠度的影响分析

弹性模量是材料的固有属性，卷帘材料确定后，弹性模量也随之确定。因此分析不同卷帘材料在相同载荷下的变形区别即可体现弹性模量的影响。

窗口需要在 $-40\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内正常工作，因此材料的高低温特性要好；系统在野外工作，湿度

大，腐蚀强，因此要求卷帘材料耐腐蚀；卷帘采用卷曲收放形式，材料的弯曲弹性模量不能太大；为了卷帘不被风载破坏，材料应有一定的拉伸强度。

满足上述要求的卷帘材料有两类：一类是以硅胶布为代表的无弯曲刚度的薄膜材料，其物理性质稳定，弹性模量小。较低的弹性模量使电机负载较小，有助于减小结构尺寸，但为了减小卷帘挠度需要结构设计上提供较大预紧力；另一类是以聚氯乙烯 (PVC)、聚四氟乙烯 (PTFE) 薄板为代表的薄板材料，其弹性模量大，较大的弹性模量使电机负载较大，增大了结构尺寸，不过在相同载荷下卷帘中心挠度小，可以适当减小预紧力。PVC、PTFE 和硅胶布材料属性如表 3 所示。

表 3 材料属性

Tab.3 Material property

Material	Modulus of elasticity/Pa	Density / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Poisson ratio	Tensile strength /MPa
PVC	2.41×10^9	1 300	0.383	45
PTFE	1.30×10^9	2 320	0.4	30
Cloth	7.84×10^6	1 500	0.47	4-15

在厚度为 1 mm，相同外部载荷情况下，不同材料卷帘变形云图如图 5 所示。

通过变形云图可知，卷帘中心挠度最大；不同材料

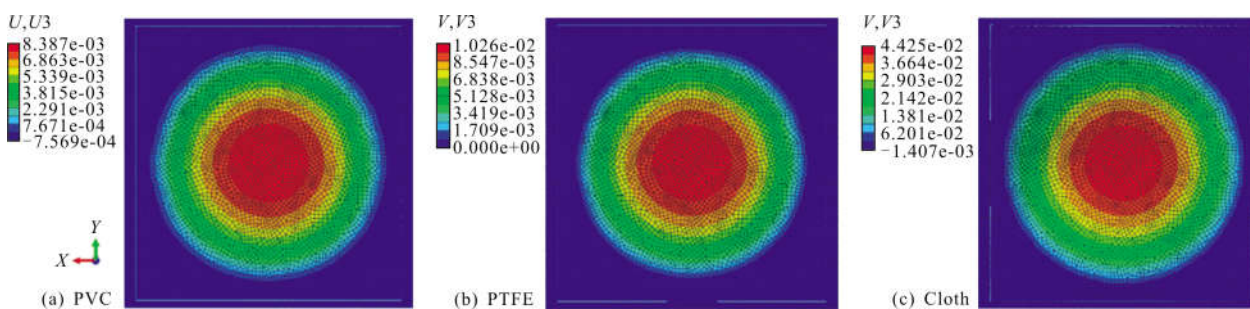


图 5 1 mm 厚度下不同材料卷帘变形云图

Fig.5 Deformation contour of rolling blinds with 1 mm thickness of different materials

变形云图具有相似的变化规律：卷帘中心挠度最大，并依次减小；变形量与弹性模量为反相关关系，PVC、PTFE，硅胶布变形量分别为 8.387、10.260、44.250 mm 为了达到较好的密封效果，需减小中心挠度。硅胶布弹性模量太低，挠度过大；PTFE 摩擦系数极低，摩擦

力小，对减小挠度不利，最终卷帘材料选择 PVC。

3.3 卷帘厚度对中心挠度的影响分析

厚度增加会提高卷帘的弯曲模量，减小卷帘在同样外部载荷下的变形可降低中心挠度；但厚度的增加必然导致卷帘自重增加，当卷帘半径较大时，自

重的增加对中心挠度的影响不能忽略。因此需要通过分析 PVC 薄板在 0.2~1.2 mm 厚度范围内的中心挠度变化,获得变化规律,以便确定最佳卷帘厚度。仿真分析结果如表 4 所示。

表 4 不同厚度 PVC 卷帘的变形结果

Tab.4 Deformation results of PVC rolling blinds with different thicknesses

Curtain thickness /mm	Central deflection /mm	Thickness change rate S1	Change rate of deflection S2	S1/S2
0.2	15.305	-	-	-
0.4	12.112	100%	20.86%	4.79
0.6	10.450	200%	31.72%	6.30
0.8	8.294	300%	45.81%	5.55
1.0	8.587	400%	43.89%	9.11
1.2	9.105	500%	40.51%	12.34

由图 6 可知,中心挠度随着卷帘厚度增加,呈现出先下降后上升的趋势。中心挠度刚开始随着卷帘厚度的增加而减小,且卷帘厚度较小时,曲线较陡,说明厚度较小时,增加卷帘厚度可以显著提高密封能力;当卷帘厚度达到某一极限(在当前载荷条件下为 0.8 mm)时,厚度的增加反而导致中心挠度上升,这是因为卷帘半径较大,当厚度过大时,卷帘自重无法忽略。

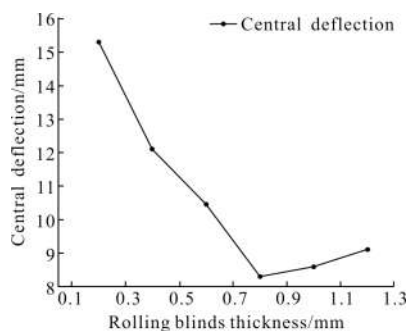


图 6 卷帘厚度与中心挠度的关系

Fig.6 Relationship between thickness of the rolling blinds and the central deflection

因此,在选择卷帘时,需要选择合适的卷帘厚度,同时卷帘通过电机驱动缠绕在卷轴上,较小的卷帘厚度有利于减小对电机的扭矩要求,减少电机体

积。根据工程经验,卷帘厚度取 0.5 mm。

3.4 预紧力对卷帘中心挠度的影响分析

理论分析可知预紧力会对中心挠度产生影响。由于密封平面四周存在倒角 θ , F 分解出的水平力 F_x 为预紧力 Q ,使卷帘绷紧;垂直力 F_y 作用于密封平面四周,可提高卷帘与密封平面间的摩擦力,降低卷帘挠度。结构设计中的倒角对中心挠度的影响可以通过改变 F_x 以及 F_y 的值来间接研究。为了控制变量,将垂直力 F_y 固定为一定值 30 N,以压强(10 000 pa)的形式施加到模型上,通过改变水平力 F_x ,研究预紧力 Q 和倒角 θ 对中心挠度的影响。

为此,变化水平力 F_x 的值,同时为了更好的找出规律,卷帘取不同厚度对比分析。仿真结果如表 5 所示。

表 5 厚度分别为 0.5, 1 mm 下 PVC 卷帘在不同水平力下的挠度

Tab.5 Deflection of PVC rolling blinds under different horizontal forces with thickness of 0.5, 1 mm

F_x/N	Change rate of F_x	Rolling blinds thickness 0.5 mm		Rolling blinds thickness 1.0 mm	
		Central deflection /mm	Change rate of deflection	Central deflection /mm	Change rate of deflection
0	-	9.505	-	5.861	-
10	100%	9.474	0.326 1%	5.843	0.307 1%
20	200%	9.443	0.652 3%	5.825	0.614 2%
30	300%	9.412	0.978 4%	5.807	0.921 3%
40	400%	9.381	1.304 6%	5.789	1.228 5%
50	500%	9.35	1.630 7%	5.772	1.518 5%
60	600%	9.32	1.946 3%	5.754	1.825 6%
100	1 000%	9.197	3.240 4%	5.684	3.020 0%

从图 7 可以得出以下结论:随着水平力 F_x 的增大,中心挠度越来越小,且曲线斜率几乎不变,说明两者基本是等比例变化;在不同的卷帘厚度下,曲线的变化形式基本一致,说明变化关系与卷帘厚度无关;当卷帘较厚时,曲线变化较慢,说明厚度较大时,相同比例变化的外力引起的挠度变化较小。因此设

计的结构在满足系统基本要求之外, 可以考虑提供较大的预紧力, 同时使角度 θ 应尽可能小。

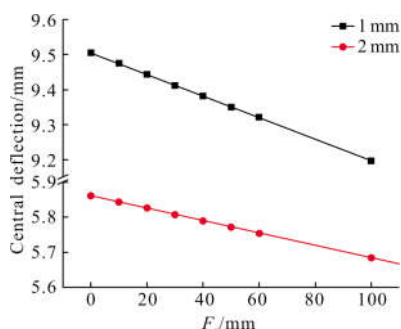


图 7 不同厚度下, 中心挠度与水平力 F_x 的关系

Fig.7 Relationship between the central deflection and the horizontal force F_x with different thickness

3.5 系统参数的确定

通过以上分析, 可最终确定系统卷帘材料为PVC薄板, 厚度为 0.5 mm; 窗口机械部分选用铝合金材料; 由于密封平面与卷轴水平、垂直距离有关, 为了提高卷帘接触面积, 倒角 θ 设为 30° ; 由于受弹性拉紧机构变形距离限制, 弹性拉紧机构设计拉力为 50 N。在这些边界条件下, 卷帘受载变形的有限元分析结果如图 8 所示。

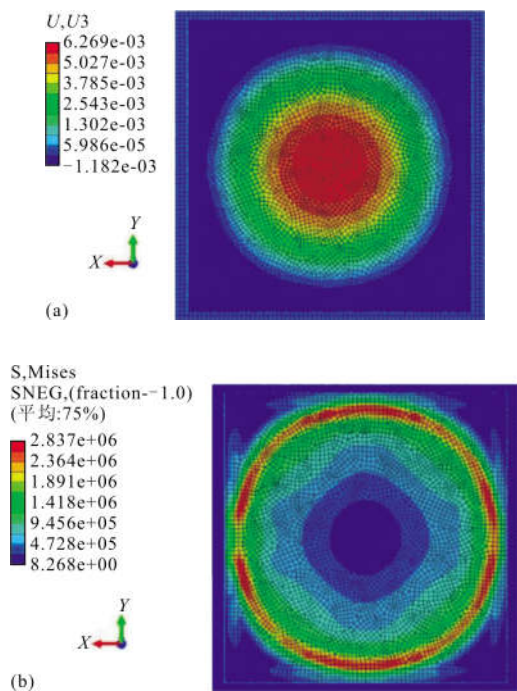


图 8 有限元分析结果。(a)中心挠度云图,(b)应力云图

Fig.8 Result of finite element analysis. (a) central deflection contour map, (b) stress contour map

由图 8 可知, 卷帘挠度最大值出现在卷帘中心, 为 6.269 mm, 小于设计要求 10 mm; 卷帘最大应力为 2.837 MPa, 远小于材料拉伸强度 45 MPa, 不会断裂。设计方案可以满足密封要求。

4 结论

大口径激光发射系统卷帘式密封窗口的密封性能主要取决于密封卷帘的中心挠度。通过对卷帘材料弹性模量 E 、卷帘厚度 h 、弹性拉紧机构提供的拉力 F 、密封平面倒角 θ 进行分析, 得到以下结论: (1) 在相同外部载荷条件下, 适当提高卷帘材料弹性模量 E 有助于增加密封效果; (2) 卷帘厚度 h 较小时, 提高卷帘厚度可以很好地提高密封效果, 但卷帘厚度过大时, 密封效果反而下降, 这是由于大口径时, 无法忽略卷帘自重; (3) 提高预紧力 F 或降低密封平面 θ 有助于提高密封效果。因此, 可以选择卷帘材料为 PVC, 卷帘厚度 0.5 mm, 预紧力 50 N, 同时在选择密封平面倒角 θ 时, 应该在满足接触区域的前提下, 尽量选择较小的倒角 θ , 文中取 30° 。对确定参数后的结构进行有限元仿真, 结果表明可以满足密封要求。

参考文献:

- [1] Baker L R. Opto-mechanical systems design [J]. *Journal of Modern Optics*, 1986, 33(11): 1335-1336.
- [2] Feng Feng, He Shaobo, Yuan Xiaodong, et al. Progress in research on damage characteristics of optical elements induced by pollutants [J]. *Laser and Infrared*, 2012, 42(10): 1098-1102. (in Chinese)
冯峰, 贺少勃, 袁晓东, 等. 污染物致光学元件损伤特性研究进展[J]. *激光与红外*, 2012, 42(10): 1098-1102.
- [3] Liu Tianhua, Jiang Zongfu, Liu Zejin, et al. Method of evaluating optical quality of aerodynamic windows for high energy [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(2): 193-196. (in Chinese)
刘天华, 姜宗福, 刘泽金, 等. 高能激光器气动窗口光束质量的评价方法探讨[J]. *强激光与粒子束*, 2002, 14(2): 193-196.
- [4] Fan Da, Ming Xing, Liu Xinyue, et al. Thermal optical analysis and design of optical window in high altitude and high-speed environment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0818001. (in Chinese)
范达, 明星, 刘昕悦, 等. 高空高速环境热光学分析及光学窗口设计[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(8): 0818001.

- [5] Feng Zhiqing, Bai Lan, Zhang Zengbao, et al. Thermal deformation compensation of high energy laser reflector [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(8): 1781–1787. (in Chinese)
冯志庆, 白兰, 张增宝, 等. 高能激光反射镜热变形补偿[J]. 光学精密工程 2010, 18(8): 1781–1787.
- [6] David V. Laser weapons development by 2023 [R]. U.S: Department of Defense Information/FIND, 2016.
- [7] Zhang Kuo, Chen Fei, Li Ruolan, et al. Analysis on thermal performance of output window in high power CO₂ laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0205005. (in Chinese)
张阔, 陈飞, 李若澜, 等. 大功率 CO₂ 激光器输出窗口热性能分析[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(2): 0205005.
- [8] Li Yiyong, Wang Jianhua, Li Zhi. Development trend of high-energy laser weapons [J]. *Journal of Ordnance and Equipment Engineering*, 2017, 38(6): 1–6. (in Chinese)
李怡勇, 王建华, 李智. 高能激光武器发展态势[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(6): 1–6.
- [9] Peng Yufeng, Sheng Zhaoxia, Zhang Hu, et al. Influence of thermal deformations of the output windows of high-power laser systems on beam characteristics [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(35): 6465–6472.
- [10] Liu Xutang, Gao Yunguo, Shao Shuai, et al. Design and test of high energy laser emission window of large aperture and wide band [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(7): 1834–1841. (in Chinese)
刘旭堂, 高云国, 邵帅, 等. 大口径宽波段高能激光发射窗口的设计与测试[J]. 光学精密工程, 2014, 22(7): 1834–1841.
- [11] Zhou Chao, Yang Hongbo, Wu Xiaoxia, et al. Wind load analysis of 1.2 m telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 889–893. (in Chinese)
周超, 杨洪波, 吴小霞, 等. 1.2 m 望远镜风载作用分析[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(5): 889–893.
- [12] Wu Jianliang. Axisymmetric large deflection problem of pretension thin films [D]. Chongqing: Chongqing University, 2009: 20–30. (in Chinese)
吴建梁. 受预张力薄膜的轴对称大挠度问题[D]. 重庆: 重庆大学, 2009: 20–30.
- [13] Qian Weichang, Ye Kaiyuan. Large deflection problems of circular thin plates [J]. *Acta Physica Sinica*, 1954(3): 209–238. (in Chinese)
钱伟长, 叶开沅. 圆薄板大挠度问题 [J]. 物理学报, 1954(3): 209–238.