

织物衍射特性的研究 ——丝袜衍射

刘兆梅¹ 刘希涛² 鹿佳煜² 樊济尧² 雷玉明¹

(¹ 西安交通大学城市学院; ² 西安交通大学城市学院计算机系, 陕西 西安 710018)

摘 要 本文研究了三种典型结构的丝袜在不同外力作用下的显微结构和衍射图案, 希望为光子晶体结构色织物的研究提供参考。基于实验结果建立了三种复杂结构模型, 本文从理论上推出其衍射光强表达式, 并利用软件编程仿真了衍射图案。研究发现: (1) 包芯丝短袜的网格结构可以视为大、小圆孔周期性排列的复杂结构; 天鹅绒短袜的网格结构可以视为大、小矩型孔周期性排列的复杂结构; 水晶丝长袜的网格结构可以视为三角孔和小矩孔周期排列的复杂结构。(2) 当丝袜均匀受力时, 在力比较小的情况下, 只改变孔径的大小, 对孔的形状和衍射图案的形状没有太大影响; 对织构松散的水晶丝长袜来说, 力较大时对孔的大小和孔的形状都有较大的影响。(3) 仿真结果和实验结果吻合较好。本研究对织物组织结构对织物结构色的影响以及织物自身结构色的研究有一定参考价值。

关键词 结构色织物; 织物的衍射; 衍射图案; MATLAB 仿真

STUDY ON THE DIFFRACTION OF FABRICS —STOCKINGS DIFFRACTION

LIU Zhaomei LIU Xitao LU Jiayu FAN Jiyao LEI Yuming

(Xi'an Jiaotong University City College, Xi'an, Shaanxi 710018)

Abstract The microstructures and diffraction patterns of three typical kinds of silk stockings under different external forces were studied in order to provide reference for the study of photonic crystal structure color fabric. Based on the experimental results, three kinds of complex structure models are established, the diffraction intensity expressions are deduced theoretically, and the diffraction patterns are simulated by software. The results show that: (1) the mesh structure of core silk socks can be regarded as a complex structure with large and small circular holes arranged periodically. The mesh structure of velvet socks can be regarded as a complex structure with large and small rectangular holes arranged periodically. The mesh structure of crystal silk stockings can be regarded as a complex structure with periodic arrangement of triangular holes and small rectangular holes. (2) When the stockings are evenly

收稿日期: 2023-11-15

基金项目: 机器人与智能制造陕西省高校工程研究中心基金重点项目(2022GZ05)。

通信作者: 刘兆梅, 西安交通大学城市学院副教授, lmhome@163.com。

引文格式: 刘兆梅, 刘希涛, 鹿佳煜, 等. 织物衍射特性的研究——丝袜衍射[J]. 物理与工程, 2024, 34(4): 191-198.

Cite this article: LIU Z M, LIU X T, LU J Y, et al. Study on the diffraction of fabrics—Stockings diffraction[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(4): 191-198. (in Chinese)

stressed, in the case of relatively small force, only the size of the aperture is changed and the shape of the holes and the shape of the diffraction pattern are not much affected. For the crystal silk stockings with loose texture, the larger force has a greater influence on the size and shape of the holes. (3) The simulation results agree well with the experimental results. This study has some reference value for the study of the influence of fabric structure on fabric structural color and fabric self-structure structural color.

Key words fabric structural color; diffraction of fabric; diffraction pattern; MATLAB simulation

在传统的印染行业中,通常采用化学染料和染色剂进行染色,获得的颜色是化学色,这种方式不仅在生产过程中会对环境造成了污染,而且上染的颜色会随着时间推移出现褪色的情况。与这种化学色相对的结构色具有明亮、颜色多变、不褪色、污染小等优点。结构色是由于物体本身微米级或者纳米级的物理结构(微纳结构)和光线发生干涉、衍射和散射等相互作用而产生的色彩^[1-4]。其中,基于布拉格衍射原理产生结构色的光子晶体结构色织物受到了广泛的关注。光子晶体是由具有不同折射率的材料周期性排列而形成的人工微结构。光子晶体最主要的结构特征为光子带隙。当光子晶体的带隙落在可见光范围内时,某一频率范围的可见光将不能在此周期性结构中传播,而是被反射回来并与其相互作用产生结构色。将微球颗粒自组装到不同的针织物表面可以获得光子晶体结构色织物。文献报道,织物表面结构色可见光反射光谱常出现多波长特征^[5-6],不同材质和组织结构的织物在相同工艺条件下均能出色,但其出色效果不同^[7]。以上研究表明,除光子晶体有序性外,织物本征胞腔或微孔结构及纤维间隙也会影响织物结构色。本项目旨在研究织物自身组织结构的衍射,以及外力对织物的组织结构和衍射特性的影响,为织物自身组织结构对织物结构色的影响和织物自身结构色的研究提供参考。

1 实验方案

研究思路如下。首先,选择合适的织物作为研究对象,综合考虑织物的材质、结构、成本三方面,选择了三种有代表性的丝袜进行研究。其次,制作复杂结构样品,对其衍射特性进行研究,根据衍射特点判断其组织结构。再者,研究外力对丝

袜组织结构和衍射图案的影响。然后,根据丝袜的网格结构建立模型,从理论上推导出衍射的光强表达式,利用软件进行仿真模拟。最后,将仿真结果与实验结果对照分析,验证模型的合理性,也为研究织物结构色建模提供参考。

1.1 复杂结构的设计与制作

实验器材:塑料瓶盖、包芯丝丝袜(短袜)、水晶丝丝袜(长袜)、天鹅绒丝袜(短袜)、砝码、光学数码显微镜、CCD 相机、透镜、激光器、光具座等。塑料瓶截去瓶身,利用激光切割技术给瓶盖打孔(孔径 2cm),利用另外一个瓶口比样品最宽部分略小一点的瓶子(去底)给丝袜均匀施加外力,最后用打孔的圆口瓶盖对其进行固定。图 1 为施力操作和制作好的衍射样品。

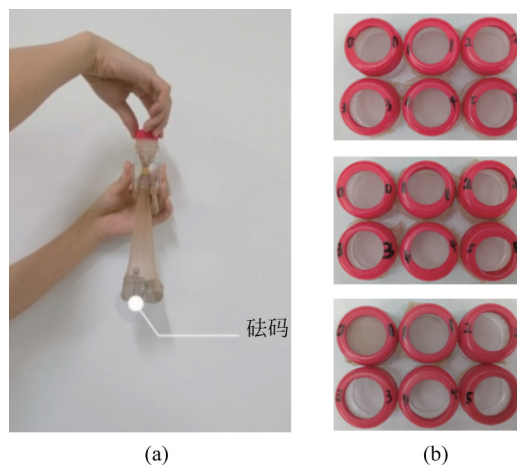


图 1 施力操作和衍射样品
(a) 对丝袜施力操作; (b) 制成的衍射样品

1.2 实验装置的搭建

结合 Solidworks 建模和 3D 打印技术,打印样品底座和支架等,在光具座上搭建衍射实验装置,如图 2 所示。激光经过衍射元件发生衍射成像在观测屏上,然后用 CCD 相机拍照。相机前加透镜主要是为了去掉周围杂光。可以在激光器前

加透镜使入射光更接近平行光,加偏振片减弱光强。也可以在衍射元件后加汇聚透镜,汇聚透镜和观测屏之间距离为汇聚透镜的焦距 f 。

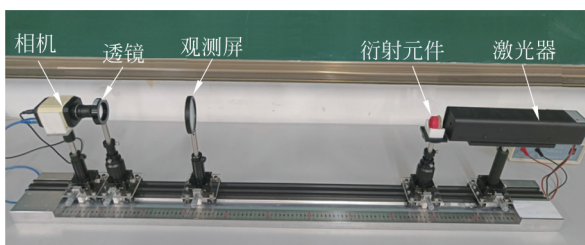


图2 衍射实验装置

2 实验内容及结果分析

2.1 不同种类丝袜的衍射

图3为三种不同种类丝袜的衍射对照图。观察衍射图案(图3(a)),发现包芯丝丝袜的衍射图案为以中心亮斑为中心的同心圆环,类似多圆孔结构的衍射图案;水晶丝丝袜的衍射图案为穿过中心亮斑的三条亮线,类似三角孔的衍射;而天鹅绒丝袜的衍射图案为规则排列的一些亮点,类似多方孔的衍射图案。为了验证这一猜想,我们利用数码显微镜分别观察这三种丝袜的显微结构(图3(b))。由三种丝袜的显微结构(图中标尺为mm尺)可知,包芯丝丝袜的显微结构可以视为大、小圆孔周期排列的复杂结构;水晶丝丝袜的显微结构可以视为大三角孔和小矩孔周期排列的复杂结构;而天鹅绒丝袜的显微结构可以视为大、小矩孔周期排列的复杂结构。这与之前根据衍射图案的猜想较为符合。为了避免实验的偶然性,以及进一步验证猜想的合理性与科学性,接下来将

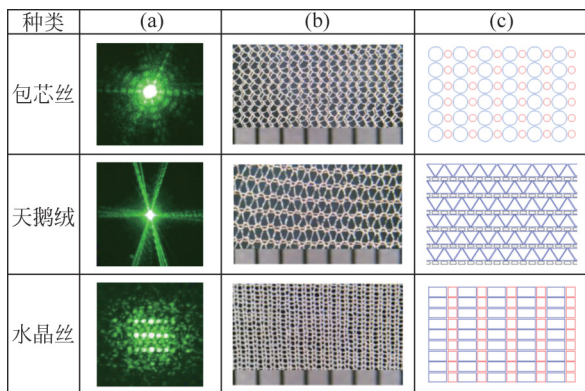


图3 不同种类丝袜衍射对照图

(a) 衍射图案; (b) 显微结构; (c) 仿真模型

对丝袜施加大小不等的力,并对其衍射图案和显微结构进一步研究。

2.2 不同外力作用下丝袜的显微结构和衍射图像

2.2.1 包芯丝丝袜在不同外力作用下的显微结构和衍射图案

图4为不同外力包芯丝丝袜衍射对照图。图4(a)为不同外力作用下包芯丝丝袜的显微结构(图中标尺为mm尺),通过视觉观察发现无论是大圆孔还是小圆孔的孔径均随着外力的增大而增大。为了研究孔径随外力的变化情况,我们利用HiView软件进行定标,测量大小圆孔的孔径,并利用Origin软件绘图。图5分别为包芯丝丝袜孔径和孔径变化率随外力变化关系图。其中孔径变化率 ϵ 的定义为

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0}$$

其中, L 为孔径尺寸, L_0 为不受力时的尺寸。

由图5可知,随外力不断增大,大、小圆孔的孔径呈现增大的趋势,外力增加1N,大、小孔径的平均变化率大约为8%。孔径出现波动主要原因是固定丝袜时张力有所改变,丝袜受力后孔径变化不均匀,而测量时选择的圆孔不同导致。图4

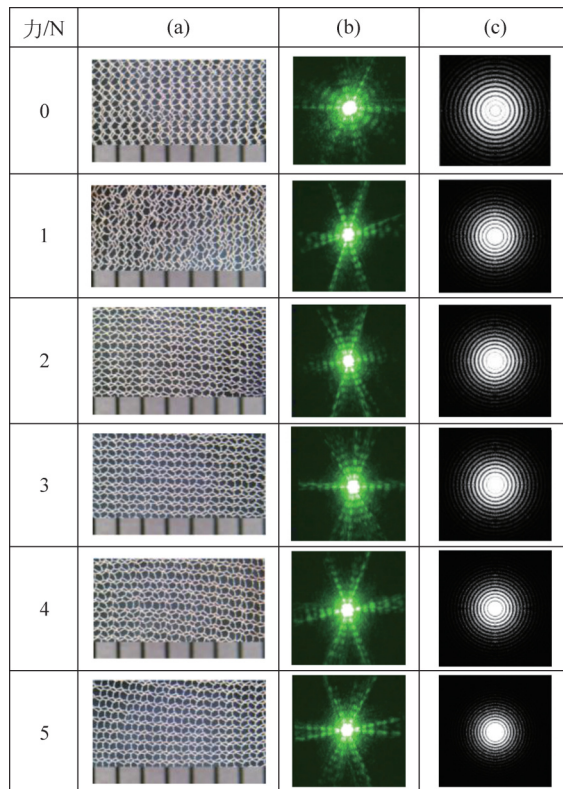


图4 不同外力包芯丝丝袜衍射对照图

(a) 显微结构; (b) 衍射图案; (c) 仿真图案

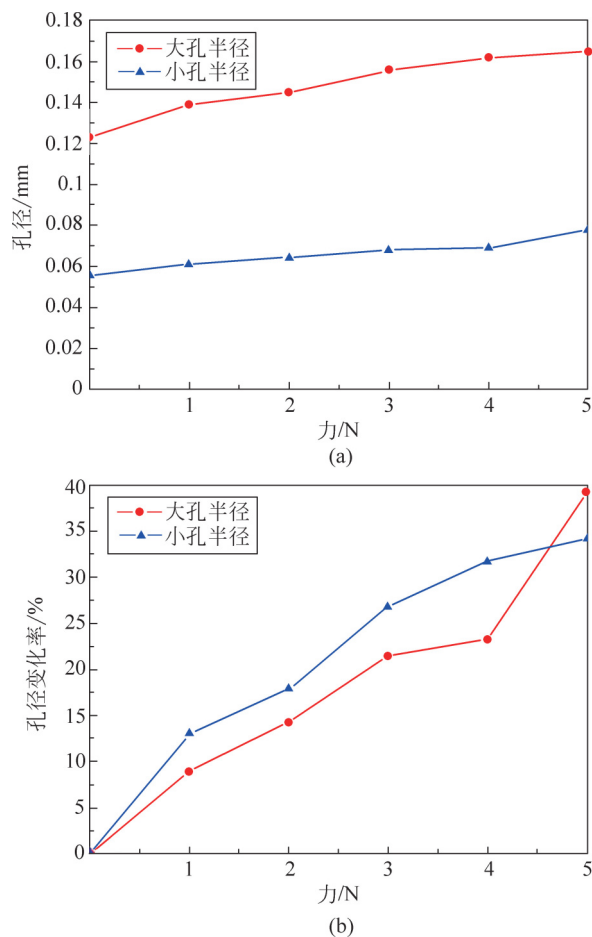


图5 包芯丝丝袜孔径

(a) 和孔径变化率; (b) 随外力变化图线

(b)为包芯丝丝袜在不同外力作用下的衍射图像。由图可知,衍射图像为中心亮斑周围明暗相间的同心圆环,且由中心向四周发射无数条很细的亮线。随着包芯丝丝袜受到的拉力增大,其衍射图像逐渐由明暗相间的同心圆环转变为由三条很亮的衍射光束穿过的同心圆环,这是由于包芯丝丝袜的网孔结构并非标准的圆,受力后丝袜的网格结构发生了改变。

2.2.2 天鹅绒丝袜在不同外力作用下的显微结构和衍射图案

图6为不同外力天鹅绒丝袜衍射对照图。图6(a)为不同外力作用下天鹅绒丝袜的显微结构(图中标尺为mm尺),通过视觉观察发现,无论是大矩孔还是小矩孔随着外力的增大,孔的长和宽都是在增大的,而且孔径变化较明显。对此利用HiView软件定标测量大、小矩孔的孔径,并利用Origin软件绘图。图7分别为天鹅绒丝袜孔径和

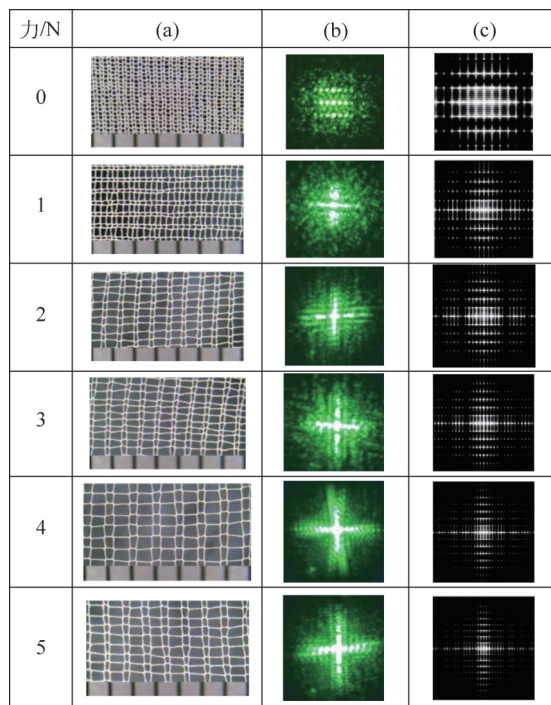


图6 不同外力天鹅绒丝袜衍射对照图

(a) 显微结构; (b) 衍射图案; (c) 仿真图案

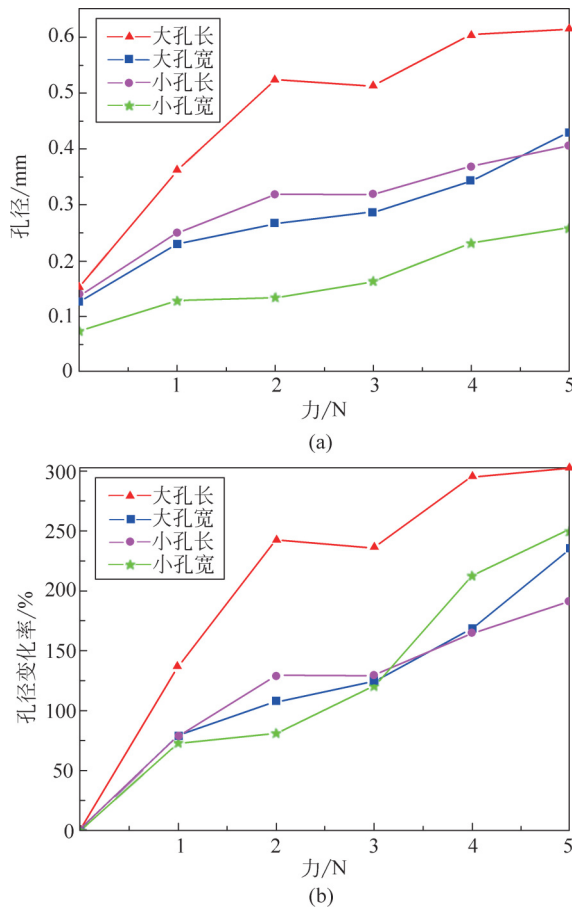


图7 天鹅绒丝袜孔径和孔径变化率随外力变化关系图

(a) 孔径; (b) 孔径变化率

孔径变化率随外力变化关系图。由图可知,随着外力的不断增大,大小孔的长和宽分别都呈现增大的趋势,并且大孔宽和小孔长两者的长度几乎相同。大孔长边的变化更快一些,外力增加 1N,大孔长边的平均变化率大约为 60%。而其余三者的变化稍缓一些,外力增加 1N,平均变化率大约为 40%~50%。图 6(b)为天鹅绒丝袜在不同外力作用下的衍射图像。由图可知,外力为 0N 时,衍射图案类似多方孔的衍射图案,因为不受力时大小矩孔尺寸相差不大,近似方孔结构;随着天鹅绒丝袜受到的拉力增大,大小矩孔尺寸差别明显,其衍射图像越来越接近多矩孔的衍射图案。衍射图案不够清晰可能是观测距离不够条纹分不清,或天鹅绒材质纤维不光滑导致。

2.2.3 水晶丝丝袜在不同外力作用下的显微结构和衍射图案

图 8 为不同外力水晶丝丝袜衍射对照图。图 8(a)为水晶丝丝袜在不同外力作用下的显微结构(图中标尺为 mm 尺)。对比不同外力作用下水晶丝丝袜的显微结构,发现随着施加外力的不断增大孔径明显增大,而且孔的形状也会发生改变。在水晶丝丝袜受外力比较小时其显微结构图近似

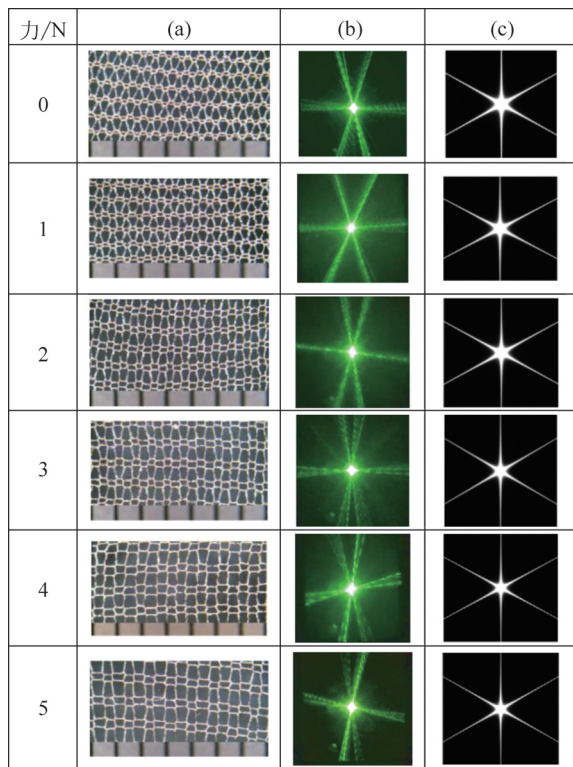


图 8 不同外力水晶丝丝袜衍射对照图

(a) 显微结构; (b) 衍射图案; (c) 仿真图案

看成小矩孔和三角孔周期排列的复杂结构,而受外力比较大(超过 4N)时,其显微结构更接近大、小矩孔周期排列的复杂结构。利用 HiView 软件进行标定,粗略测量孔径(按小矩孔和正三角孔处理),并利用 Origin 软件绘图。图 9 分别为水晶丝丝袜孔径和孔径变化率随外力变化关系图。由图可知,随着外力增大,三角孔和矩孔的边长均呈现增大的趋势。对于三角孔而言,它边长的变化程度较为平缓,外力增加 1N,平均变化率大约为 10%;而矩孔长和宽的变化程度都较快,外力增加 1N,平均变化率接近 60%。图 8(b)为水晶丝丝袜在不同外力作用下的衍射图像。由图可知,水晶丝丝袜的衍射图案呈现出以中心亮斑向周围发射的三条很亮的射线,这是多三角孔衍射的结果。当把观测距离拉远后可以看到原来中心亮斑处呈现出多矩孔的衍射图案,证实水晶丝丝袜显微结构可以看成矩孔和三角孔周期排列的复杂结构。

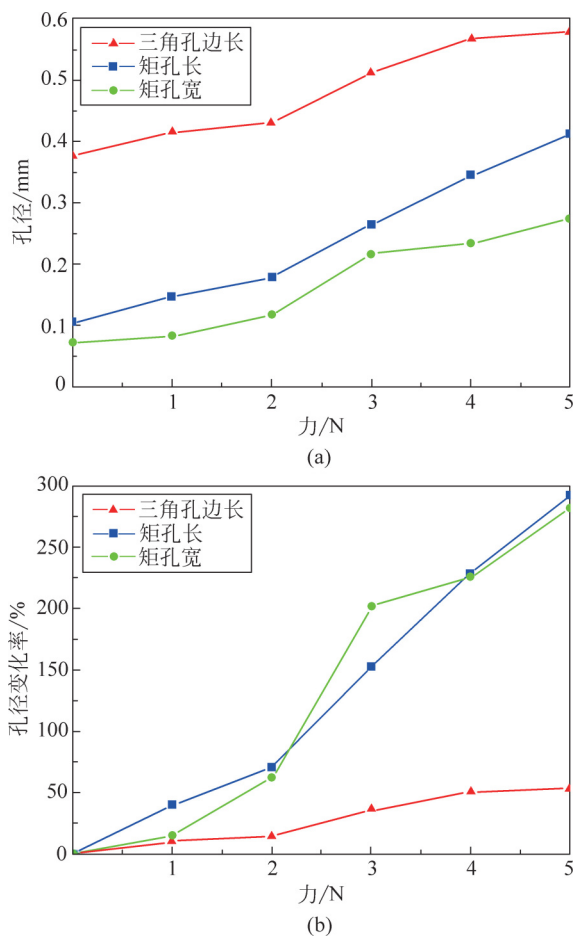


图 9 水晶丝丝袜孔径和孔径变化率随外力变化关系图

(a) 孔径; (b) 孔径变化率

通过前面对三种丝袜在不同外力作用下显微

结构和衍射图案的研究发现,当给三种丝袜沿周围均匀施加外力时,在力比较小的情况下,只改变孔径的大小,对孔的形状和衍射图案的形状没有太大影响。对织构松散的水晶丝长袜来说,力较大时对孔的大小和形状都有较大的影响。

3 建模与仿真

本部分统一从一维光栅衍射的光强公式出发,推出三种复杂结构的光强表达式,然后用 MATLAB 编程仿真相应的复杂结构的衍射图案,并与实验得到的衍射图案进行对照分析,验证得到的实验结论。

3.1 包芯丝丝袜衍射图案形成机理

包芯丝短袜的网格结构可以简化成大圆孔和小圆孔周期性排列的复杂结构,此结构可以看成大圆孔光栅和小圆孔光栅的叠加,如图 3(c)所示。对于多圆孔衍射,可以看作是受单圆孔衍射调制的多孔干涉。类比一维光栅衍射可以得到多圆孔衍射的光强分布。

3.1.1 光强公式的推导

1) 一维光栅衍射的光强表达式

一维光栅由多条平行狭缝组成,光栅衍射是受单缝衍射调制的多缝干涉,光栅衍射的光强^[8]表达式为

$$I = I_1 \cdot I_2 = I_0 \cdot \left(\frac{\sin^2 u}{u^2} \right) \cdot \left(\frac{\sin^2 (Nv)}{\sin^2 v} \right) \quad (1)$$

其中,第一项是单个狭缝的衍射光强,第二项是光栅的多条狭缝之间的干涉因子, N 是光栅狭缝的数目。

2) 一维圆孔衍射的光强表达式

如果把光栅的狭缝换成一个个圆孔,光栅衍射屏就变成一维圆孔衍射屏,光栅衍射的光强表达式就成为多圆孔衍射的光强表达式。所以,把式(1)中的单缝衍射光强因子 I_1 换成圆孔衍射因子^[8] $I_1 = I_0 \frac{J_1^2(2m)}{m^2}$,就可以写出一维排列的多圆孔夫琅和费衍射的光强表达式^[9]为

$$I = I_1 \cdot I_2 = I_0 \cdot \left(\frac{J_1^2(2m)}{m^2} \right) \cdot \left(\frac{\sin^2 (Nv)}{\sin^2 v} \right) \quad (2)$$

其中,第一项是单个圆孔的夫琅和费衍射光强,第

二项表示圆孔之间的干涉。 $J_1(m)$ 是 m 的一阶贝塞尔函数, $m = \frac{\pi R \sin \theta}{\lambda}$, R 是衍射圆孔的半径。

$v = \frac{\pi d \sin \theta}{\lambda}$, 其中 d 是相邻的圆孔中心间的距离, N 是圆孔的数目。

3) 二维圆孔衍射的光强表达式

二维多圆孔衍射可以看成两个正交的一维多圆孔衍射的叠加,总的强度分布是两个正交的一维多圆孔衍射光强的乘积,可得二维多圆孔衍射光强表达式为

$$\begin{aligned} I &= I_1 \cdot I_2 \\ &= I_0 \cdot \left(\frac{J_1^2(2m)}{m^2} \right)^2 \cdot \frac{\sin^2 (Nv_1)}{\sin^2 v_1} \cdot \frac{\sin^2 (Nv_2)}{\sin^2 v_2} \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $v_1 = \frac{\pi d_1 \sin \theta}{\lambda}$, $v_2 = \frac{\pi d_2 \sin \theta}{\lambda}$, 两个方向光栅常数不同, I_0 为衍射中心的光强。

4) 大小圆孔周期排列的复杂结构衍射的光强表达式

大小圆孔周期排列的复杂结构衍射,可以视为两个不同孔径的二维圆孔光栅衍射光强的叠加,设大小圆孔的半径分别为 R_1 、 R_2 , 可得出大小圆孔周期性排列的复杂结构衍射光强表达式为

$$\begin{aligned} I &= I_0 \left[\left(\frac{J_1^2(2m_1)}{m_1^2} \right)^2 + \left(\frac{J_1^2(2m_2)}{m_2^2} \right)^2 \right] \cdot \\ &\quad \frac{\sin^2 (Nv_1)}{\sin^2 v_1} \cdot \frac{\sin^2 (Nv_2)}{\sin^2 v_2} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $m_1 = \frac{\pi R_1 \sin \theta}{\lambda}$, $m_2 = \frac{\pi R_2 \sin \theta}{\lambda}$ 。

3.1.2 仿真结果分析

由上述推导出的光强表达式(4),使用 MATLAB 进行编程模拟。模拟时按实验得到的孔径大小、孔径比、孔间距进行编程。图 4(c)为利用 MATLAB 软件模拟得到的包芯丝短袜的衍射图样。由仿真结果可知,仿真图样为中心亮斑周围明暗相间同心圆环,且由中心向四周发射无数条很细的亮线,随着拉力增大孔径变化,条纹变细向中间聚集,这一点和实验结果是吻合的。实验中观察到三条很亮的衍射光束穿过的同心圆环(见图 4(b)),这一点与仿真结果不太符合,主要是因为包芯丝丝袜的网孔并不是标准的圆。不受外力时大孔接近多边形小孔接近椭圆,多边形孔的各

个边衍射形成多条衍射光束穿过同心圆环,受力后小孔类似三角孔,邻近多个三角孔围成大多边形孔(见图4(a)),三条很亮的衍射光束应为多三角孔衍射所致。另外,我们发现一个有趣的现象,衍射中心亮斑并不是随孔径的增加而变小的。对此,我们分别改变大、小圆孔的孔径以及孔径比,仿真多组进行对比实验。结果发现,中心亮斑的大小不仅和大小圆孔的尺寸有关,还和孔径比有关。在孔径比保持不变时,中心亮斑随孔径的增大而变小,而小圆孔半径越大,圆环越细越密(观测距离 f 保持不变)。

3.2 天鹅绒丝袜衍射图像形成机理

天鹅绒短袜的网格结构可以视为大、小矩孔周期性排列的复杂结构。此结构可以看成大矩孔光栅和小矩孔光栅的叠加,如图3(c)所示。二维矩孔光栅其实就是二维正交光栅,可以看成两个正交的一维光栅衍射的叠加,总的强度分布是两个正交的一维光栅的衍射光强的乘积。天鹅绒丝袜的衍射可以看作两个不同尺寸二维矩孔光栅的叠加。

3.2.1 光强公式的推导

1) 二维正交光栅(矩孔光栅)衍射的光强表达式

二维正交光栅衍射的光强分布是两个正交的一维光栅的衍射光强分布的乘积。由一维光栅光强表达式(1)可得,二维正交光栅的光强表达式^[10]为

$$I = I_1 \cdot I_2 = I_0 \cdot \left(\frac{\sin^2 u_1}{u_1^2} \cdot \frac{\sin^2(Nv_1)}{\sin^2 v_1} \right) \cdot \left(\frac{\sin^2 u_2}{u_2^2} \cdot \frac{\sin^2(Nv_2)}{\sin^2 v_2} \right) \quad (5)$$

其中, $u_1 = \frac{\pi b_1 \sin \theta}{\lambda}$, $u_2 = \frac{\pi b_2 \sin \theta}{\lambda}$, b_1, b_2 是衍射矩孔的长和宽。 $v_1 = \frac{\pi d_1 \sin \theta}{\lambda}$, $v_2 = \frac{\pi d_2 \sin \theta}{\lambda}$, d_1, d_2 是两个方向相邻的矩孔中心间的距离, N 是孔的数目。

2) 大小矩孔周期排列的复杂结构衍射的光强表达式

大小矩孔周期性排列的复杂结构,可以看成大矩孔光栅和小矩孔光栅的叠加,可得大小矩孔周期排列的复杂结构衍射的光强表达式

$$I = I_0 \left[\left(\frac{\sin^2 u_1}{u_1^2} \cdot \frac{\sin^2 u_2}{u_2^2} + \frac{\sin^2 u_3}{u_3^2} \cdot \frac{\sin^2 u_4}{u_4^2} \right) \cdot \frac{\sin^2(Nv_1)}{\sin^2 v_1} \cdot \frac{\sin^2(Nv_2)}{\sin^2 v_2} \right] \quad (6)$$

3.2.2 仿真结果分析

由上述推导出的光强表达式(6),使用MATLAB进行编程。模拟时按实验得到的孔径大小、孔径比、孔间距进行编程。图6(c)为利用MATLAB软件仿真得到的天鹅绒短袜的衍射图样。由图可知,外力为0N时,衍射图案是多方孔的衍射图案,因为不受力时,大小矩孔尺寸相差不大,近似为多方孔;随着外力的增大,孔径变大,大小矩孔的尺寸差别明显,呈现多矩孔的衍射图案,且衍射图案向中间聚集,条纹变细变密。将仿真图样图6(c)与实验结果图6(b)对比可看出,仿真结果与实际衍射图案吻合较好,仿真图案可以看到次级大明纹,主要是仿真时 N 设置偏小,调整仿真显示光强可以得到和实验结果几乎一致的衍射图案。

3.3 水晶丝丝袜衍射图像形成机理

水晶丝长袜的网格结构可以视为三角孔和小矩孔周期排列的复杂结构。此结构可以看作大三角孔光栅和小矩孔光栅的叠加,如图3(c)所示。由于矩孔仅影响衍射中心的衍射亮斑(观测距离较远才可以看清),而且前面已经仿真了多矩孔的衍射图案,此处进一步将水晶丝丝袜的网格结构简化成正三角孔光栅结构。而正三角孔光栅可以视为互成 60° 的三个一维光栅的叠加。将一维光栅衍射的光强分别旋转 60° 和 120° 再叠加,即可得到正三角孔光栅的光强分布。

使用MATLAB进行编程,按实验得到的三角孔的孔径大小编程进行仿真。图8(c)为利用MATLAB软件模拟得到的正三角孔光栅的衍射图样。由仿真结果可以看出,仿真图样中心为亮斑,穿过中心向四周发射三条亮线,随着外力增大孔径变大,中心亮斑变小,和实验近距离观测的结果是吻合的。所以将水晶丝长袜的网格进一步简化为多三角孔结构,还是比较合理的。

4 结语

本项目选择了三种典型结构的丝袜,研究了丝袜在不同外力作用下的显微结构和衍射图案。

基于实验研究结果建立了三种复杂结构模型,从理论上推出其衍射光强表达式,并利用软件编程仿真了衍射图案,进一步验证了实验结果的可靠性。研究发现:(1)包芯丝短袜的网格结构可以视为大圆孔和小圆孔周期性排列的复杂结构;天鹅绒短袜的网格结构可以视为大、小矩孔周期性排列的复杂结构;水晶丝长袜的网格结构可以视为三角孔和小矩孔周期排列的复杂结构。(2)当给不同种类丝袜沿周围均匀施加力时,在力比较小的情况下,只改变孔径的大小,对孔的形状和衍射图案的形状没有太大影响;对织构松散的水晶丝长袜来说,力较大时对孔的大小和孔的形状都有较大的影响。(3)仿真结果和实验结果吻合较好,验证了模型的合理性和实验结果的正确性。本研究对织物自身组织结构对织物结构色的影响研究以及织物自身结构色的研究有一定参考价值。随着纺织材料和纺织工艺发展,或许可以通过控制织物自身结构及其尺寸,想织成什么颜色就织成什么颜色。

参 考 文 献

- [1] DUMANLI A G, SAVIN T. Recent advances in the biomimicry of structural colours[J]. Chemical Society Reviews, 2016, 45(24): 6698-6724.
- [2] LEE J, TERLIER T, JANG Y J, et al. Structural colors and physical properties of elytra in the jewel beetle, *Chrysomela fulgidissima*, using surface analytical techniques[J]. Surface and Interface Analysis, 2020, 52(10): 656-664.
- [3] 陈佳颖,田旭,彭晶晶,等. 针织物表面结构色的构建[J]. 纺织学报, 2020, 41(7): 117-121.
CHEN J Y, TIAN X, PENG J J, et al. Fabrication of structural colors for knitted fabrics[J]. Journal of Textile Research, 2019, 41(7): 117-121. (in Chinese)
- [4] 陈欢欢,高伟洪,陈凯凯,等. 光子晶体结构色纺织材料的制备及应用研究进展[J]. 化工进展, 2022, 41(8): 4327-4340.
CHEN H H, GAO W H, CHEN K K, et al. Research progress on the fabrication and application of textile materials with photonic crystal structural colors[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(8): 4327-4340. (in Chinese)
- [5] 周敬伊,王慧,杨辉宇,等. 光子晶体结构色织物研究进展[J]. 化学通报, 2021, 84(10): 1008-1022.
ZHOU J Y, WANG H, YANG H Y, et al. Research Progress in Photonic Crystal Induced Structural Colored Fabrics[J]. Chemical Bulletin, 201, 84(10): 1008-1022. (in Chinese)
- [6] 郑宏亮,方寅春,王翠娥,等. SiO_2 @PDA 微球结构色织物的制备[J]. 精细化工, 2020, 37(4): 853-859.
ZHENG H L, FANG Y C, WANG C E, et al. Preparation of structural color fabrics of SiO_2 @PDA microspheres[J]. Fine Chemicals, 2019, 37(4): 853-859. (in Chinese)
- [7] 叶丽华,杜文琴. 结构色织物的光学性能[J]. 纺织学报, 2016, 37(8): 83-88.
YE L H, DU W Q. Optical properties of fabric with multiple structural colors[J]. Journal of Textile Research, 2016, 37(8): 83-88. (in Chinese)
- [8] 姚启钧. 光学教程[M]. 北京:高等教育出版社, 1999: 149-151.
- [9] 张永梅. 多圆孔夫琅和费衍射的研究及衍射图样的可视化[J]. 大学物理实验, 2017, 30(5): 63-66.
ZHANG Y M. Study of multi circular holes Fraunhofer diffraction and visualization of diffraction patterns[J]. Physical Experiment of College, 2017, 30(5): 63-66. (in Chinese)
- [10] 于风军. 二维光栅衍射图样的特性分析[J]. 大学物理, 2016, 35(8): 32-35.
YU F J. The characteristic analysis of the diffraction pattern of two-dimensional grating [J]. College Physics, 2016, 35(8): 32-35. (in Chinese)
- [11] 李锋,汪翼云,崔尔杰. 翼型大攻角绕流的数值模拟[J]. 航空学报, 1992(1): 17-22.
LI F, WANG Y Y, CUI J E. Numerical simulation of flow around airfoils at high angles of attack[J]. Acta Aeronautica Sinica, 1992(1): 17-22. (in Chinese)
- [12] 机械工程手册. 1, 基础理论卷[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社, 1996: 59-60.
- [13] HOERNER S F. Fluid-dynamic lift[M]. Hoerner Fluid Dynamic, 1975.
- [14] VITERNA L A, JANETZKE D C. Theoretical and experimental power from large horizontal-axis wind turbines[J]. NASA Technical Memorandum, 1982: 265-280.
- [15] OSTOWARI C, NAIK D. Post stall characteristics of untwisted varying aspect ratio blades with a NACA4415 airfoil section, 1984: 176-194.
- [16] 干尧根. 斜圆锥对数螺旋面方程订正[J]. 建筑机械, 1988(5): 17-18.
YU Y G. Correction of logarithmic helicoid equation of oblique cone[J]. Construction Machinery, 1988(5): 17-18. (in Chinese)

(上接第 190 页)