



采用非接触式预热对模压红外透镜雾斑的影响

豆猛猛 阿达依·谢尔亚孜旦

Effect of non-contact preheating on fog spots of molded infrared lenses

DOU Mengmeng, ADAYI · Xieeryazidan

引用本文:

豆猛猛, 阿达依·谢尔亚孜旦. 采用非接触式预热对模压红外透镜雾斑的影响[J]. 应用光学, 2024, 45(2): 300–306. DOI: 10.5768/JAO202445.0201004

DOU Mengmeng, ADAYI · Xieeryazidan . Effect of non-contact preheating on fog spots of molded infrared lenses[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(2): 300–306. DOI: 10.5768/JAO202445.0201004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0201004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[标准球面透镜的几何特性与误差分析](#)

Geometric characteristics and error analysis of standard spherical lens

应用光学. 2020, 41(4): 858–868 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0405002>

[鱼眼镜头光学系统的非球面优化设计](#)

Aspheric optimization design of fisheye lens optical system

应用光学. 2019, 40(5): 863–870 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0505001>

[特大非球面度离轴非球面补偿器结构设计与装调](#)

Structure design and assembling of compensator for off-axis aspheric surface with large asphericity

应用光学. 2017, 38(4): 639–643 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0405003>

[近红外偏振无关超透镜研究](#)

Research on near-infrared polarization-independent metalens

应用光学. 2020, 41(3): 591–596 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0305001>

[近红外超透镜的设计与制备](#)

Design and fabrication of near-infrared metalens

应用光学. 2021, 42(6): 1102–1106 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0604002>

[用于人体姿态估计传感的菲涅尔透镜设计](#)

Fresnel lens design for human posture estimation sensing

应用光学. 2020, 41(3): 597–602 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0305002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号:1002-2082 (2024) 02-0300-07

采用非接触式预热对模压红外透镜雾斑的影响

豆猛猛, 阿达依·谢尔亚孜旦

(新疆大学 智能制造现代产业学院, 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要: 非球面红外透镜模压成型时, 通过提高成型阶段温度可缩短透镜压切时间, 从而提高模压效率, 但易在透镜表面产生雾斑, 像造透镜不良。本文通过对透镜雾斑的形成机理进行分析, 采用一种非接触式预热模压工艺降低透镜雾斑的形成, 并在多站式模压机上进行模压实验, 使用能谱仪对雾斑的元素进行检测和分析。在本次模压实验中采用非接触式预热方式, 当预热间隙为 1 mm 时将成型温度由 206℃ 提升至 211℃, 透镜表面无雾斑生成, 并使压切时间缩短了 21 s。实验结果表明, 在多站式模压中采用非接触式预热方式, 可以有效消除透镜雾斑的形成。检测结果表明, 成型阶段透镜材料的挥发对雾斑的形成起主导作用。

关键词: 非球面; 红外透镜; 模压成型; 预热压力; 透镜雾斑

中图分类号: TN205; TH162

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0201004

Effect of non-contact preheating on fog spots of molded infrared lenses

DOU Mengmeng, ADAIYI·Xieeryazidan

(School of Intelligent Manufacturing and Modern Industry, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

Abstract: When the aspheric infrared lens is molded, the lens press-cutting time can be shortened by increasing the temperature of the molding stage, thus improving the molding efficiency. However, it is easy to produce the fog spots on the lens surface, like a bad lens. Through the analysis of the formation mechanism of lens fog spots, a non-contact preheating molding process was adopted to reduce the formation of it, and the molding experiments were carried out on a multi-station molding press, in which the elements of fog spots were detected and analyzed by using an energy spectrometer. In this molding experiment, the non-contact preheating method was used to increase the molding temperature from 206℃ to 211℃ when the preheating gap was 1 mm, with no fog spots formed on the lens surface, and the press-cutting time was shortened by 21 s. The results show that the non-contact preheating method in the multi-station molding press can effectively eliminate the formation of lens fog spots. The test results show that the volatilization of the lens material in the molding stage plays a dominant role in the formation of fog spots.

Key words: aspheric; infrared lens; compression molding; preheating pressure; lens fog spots

引言

红外透镜被广泛应用于热成像领域, 采用非球面的红外透镜不仅能够提高光学系统的成像质量, 而且能够减少透镜的使用数量^[1]。与单点金刚石车的非球面红外透镜加工方式相比, 采用多站式模压对非球面红外透镜加工, 具有众多优点, 如

成本低、污染少、效率高等特点, 更适合大批量非球面透镜生产^[2]。在模压过程中, 通过提高成型阶段温度可以缩短透镜压切时间, 提高模压效率, 但易在透镜表面产生雾斑, 像造透镜不良。

一些学者对于透镜雾斑的形成做出了相关研究, 例如, KLOCKE F 等人的研究表明, 模压成型室

收稿日期: 2023-08-07; 修回日期: 2023-08-22

基金项目: 国家自然科学基金 (51665056); 自治区科研创新项目 (XJ2023G049)

作者简介: 豆猛猛 (1993—), 男, 硕士, 主要从事先进制造, 精密成型研究。E-mail: doummxj@126.com

通信作者: 阿达依·谢尔亚孜旦 (1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事先进制造, 特种加工等研究。E-mail: adayxj@163.com

内残留的氧气在高温下会与透镜和模具涂层反应, 在透镜表面形成氧化物沉积^[3]; ZHOU T F 等人研究表明, 高温条件下会导致透镜材料挥发异常, 形成严重的透镜表面附着物, 降低了透镜表面质量^[4]; 林常规等人的实验表明, 模压成型温度较高时, 模压后透镜中心区域呈现雾状缺陷, 通过降低成型温度可以改善这种缺陷^[5]。以上研究都是针对模压成型阶段温度对透镜雾斑形成的影响, 表明了透镜雾斑的形成与高温下透镜材料氧化和挥发有关, 通过降低模压成型温度能够将透镜雾斑去除。成型温度降低会增加透镜每站的模压时间, 并易造成红外透镜在形成压力下产生碎裂^[6-9]。因此, 需要对降低透镜雾斑的模压工艺做进一步研究。

本文对透镜雾斑形成的机理进行分析, 并根据透镜雾斑影响因素对模压工艺进行优化和试验验证, 以达到缩短模压时间的同时, 能够降低或去除模压红外透镜雾斑的产生。

1 雾斑形成机理与分析

在多站式模压中, 模具中的销材在氮气环境下经过 3 个站位的预热、2 个站位的成型和 2 个站位的冷却, 最终成为透镜, 多站式模压透镜流程图如图 1 所示。

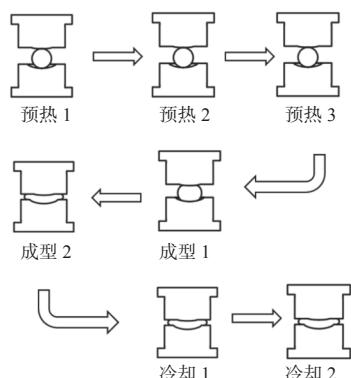


图 1 多站式模压透镜流程图

Fig. 1 Flow chart of multi-station molded lenses

多站式模压机可放入多组模具, 模压时模具在每个站位停留的时间是同步相等的, 模压整个流程的总时间是模具在每个站位停留时间的总和。每站的停留时间由销材在成型 2 时模具将其压塑成透镜形状的压切时间所决定, 模具在每站停留时间的设定不能低于成型 2 的压切时间。当模具处于成型 2 时, 销材温度达到最高, 提高成型 2 的

温度可以缩短透镜所需要的压切时间。当压切时间缩短时, 相应地对于模具在每站停留时间的设定便可以做出适当的降低调整, 此时模压整个流程的总时间便会大幅降低。

红外材料含有的砷、硒等物质在加热过程中易发生氧化和挥发, 当提高成型 2 温度时, 会加快红外材料的氧化与挥发。氧化物和挥发物分别在透镜表面生成和冷却沉积, 最终在透镜表面形成雾状斑点。由于成型 2 阶段透镜中心区域温度较高, 因此透镜中心的材料氧化与挥发严重。此外, 透镜与模具的接触面也会阻碍挥发物质的扩散。在成型 2 压切过程中, 透镜中心与模具长时间接触, 会加剧挥发物质在透镜中心积累。受不均温度和中心接触面的影响, 雾斑会形成在透镜的中心区域。

红外透镜雾斑是由红外材料的氧化和挥发形成, 红外材料在加热过程中会产生少量氧化和挥发, 可以结合透镜雾斑的形成机理对模压透镜的预热阶段温度进行分析。透镜雾斑通常是在较高温度下产生, 模压透镜预热阶段温度相对于成型温度低, 通过调节预热阶段的温度难以实现雾斑去除。由于加工原因, 销材表面会有微裂纹存在, 在微观上模具和销材的接触面并不是绝对的平整接触, 在加热过程中氧气和挥发物质会在接触面的封闭区域内发生氧化和聚集, 销材与模具接触面的微观原理图如图 2 所示。销材在预热阶段时间长, 预热过程中销材温度逐渐升高至转变点温度附近, 此时红外材料硬度逐渐降低。当预热轴上的加热板与模具接触预热时, 加热板与模具之间会存在一定的接触压力, 在预热过程中模具和模具内的销材受热膨胀, 也会对加热板产生一个反向压力。随着预热温度升高, 模具与销材面积不断增加, 并且透镜材料的氧化与挥发加快, 加剧销材与模具接触区域的材料氧化和挥发物质的聚集。通过以上分析可知, 采用一种非接触式预热的模压工艺, 即在模压过程中通过限制预热轴的下降高度, 使预热轴上的加热板与模具之间存在 1 mm 的间隙, 可使预热阶段的加热板不与模具接触, 从而减少预热阶段销材与模具的预热接触面积, 降低预热阶段销材与模具接触区域材料的氧化和挥发物质的积累, 间接使透镜在成型 2 时氧化物与挥发物的积累量降低, 达到降低透镜表面雾斑形成的目的。

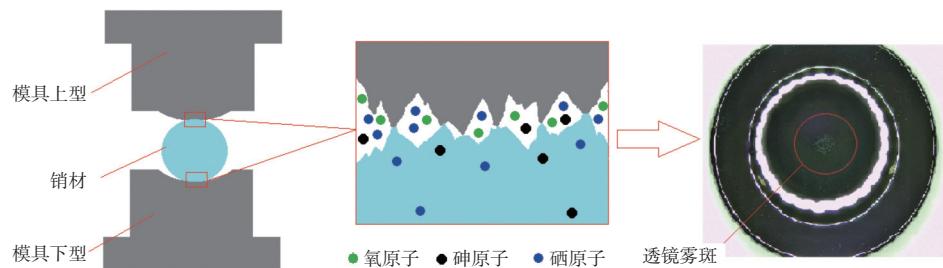


图 2 销材与模具接触面的微观原理图

Fig. 2 Microscopic schematic diagram of contact surface between pin material and mold

2 实验内容

2.1 实验准备

实验选用球形销材, 根据透镜的体积确定销材直径为 8.400 ± 0.005 mm, 选用 Se63-As30-Sb4-Sn3 红外玻璃材料 (IRG204), 材料的转变点温度为 174℃, 软化点温度为 199℃。当材料温度低于转变点温度时, 材料表现为固态特性; 当材料温度处于转变点温度与软化点温度之间时, 表现为黏弹特性; 当材料温度高于软化点温度时, 材料转化为液态特性^[10]。

模压模具由上型、下型、型套和型环组成, 其结构图如图 3 所示。模具材料选用日本 M78 无粘合剂的钨钢。针对选用的红外玻璃材料, 考虑到元素扩散的影响, 模具镀层选择类金刚石镀层, 并且类金刚石镀层在红外透镜模压温度下几乎不发生氧化。

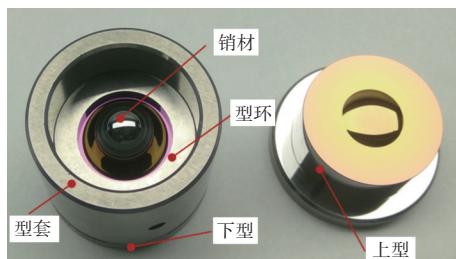


图 3 成型模具结构图

Fig. 3 Structure diagram of forming mold

由于透镜在冷却时会产生收缩, 造成透镜轮廓有误差, 因此需要对模具进行预补偿^[11]。补偿后的模具非球面参数如表 1 所示。

实验选用 7 站式模压机, 模压机由预热 1、预热 2、预热 3、成型 1、成型 2、冷却 1 和冷却 2 共 7 个站位组成。模压机每个站位上方有压力轴, 模压时压力轴下降, 使压力轴上的加热板对模具进行加热、加压, 7 站式模压机设备图如图 4 所示。

表 1 模具非球面参数

Table 1 Aspheric parameters of mold

| 参数 | 模具上型 | 模具下型 |
|----------|------------------|------------------|
| C | 36.496 148 | 14.488 376 |
| K | 8.330 227 | 3.901 426 |
| a_2 | 0 | 0 |
| a_4 | 3.052 013 12E-4 | -1.353 314 53E-4 |
| a_6 | 2.836 421 25E-5 | 1.386 427 69E-5 |
| a_8 | -6.267 914 54E-7 | -7.920 436 12E-7 |
| a_{10} | -6.472 563 42E-8 | -1.064 725 46E-9 |
| a_{12} | 3.347 616 5E-9 | 3.610 112 4E-10 |



图 4 7 站式模压机设备图

Fig. 4 Physical drawing of 7-station molding machine

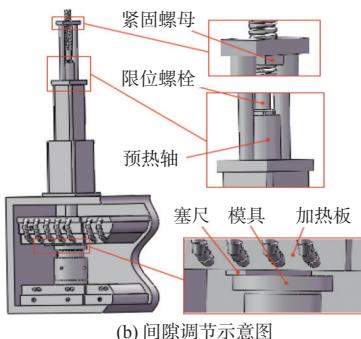
打开模压机的后盖可以看到模压机成型室的内部, 模压机成型室内部结构如图 5(a)所示。此时将装有销材的模具放入成型室内预热站台上, 然后调节设备上方的紧固螺母, 并旋转限位螺栓对预热轴的高度进行调节。在加热板与模具之间使用规格为 1 mm 的塞尺, 通过对限位螺栓反复调节, 最终使预热轴上的加热板与模具之间存在 1 mm 的间隙, 并对预热轴的高度进行测量记录, 依次对预热 1、2、3 轴进行同样的操作, 间隙调节示意图如图 5(b)所示。操作结束后, 将各预热轴调节为加热板与模具接触的初始状态。

模压机初始参数设定为: 氮气流量 70 L/min, 冷却水流量为 10 L/min, 每站模压时间为 200 s, 预

热轴上的加热板与模具为初始接触状态, 各站温度与压力设定如表2所示。



(a) 成型室内部结构



(b) 间隙调节示意图

图5 成型室内部结构及间隙调节示意图

Fig. 5 Internal structure diagram of molding chamber and gap adjustment

表2 各站温度与压力设定

Table 2 Temperature and pressure setting for each station

| 参数 | 预热1 | 预热2 | 预热3 | 成型1 | 成型2 | 冷却1 | 冷却2 |
|---------|-----|-----|-----|------|------|------|-----|
| 上加热温度/℃ | 120 | 150 | 175 | 183 | 200 | 169 | 130 |
| 下加热温度/℃ | 120 | 150 | 175 | 183 | 200 | 172 | 133 |
| 压力/MPa | / | / | / | 0.13 | 0.26 | 0.15 | / |

2.2 实验结果与分析

在模压机初始设定参数下进行透镜试验后, 透镜表面没有雾斑产生。在每个透镜模压试验结束后将成型2的温度上调2℃, 当成型2温度由初始200℃增加到206℃时, 在透镜与模具上型接触面中心区域产生轻微的雾斑, 206℃时透镜表面雾斑如图6所示。当成型2温度为206℃时, 通过透镜的成型压切曲线图图7可知, 此时透镜的压切时间为187 s。

直接将成型2温度提高至216℃, 此时在透镜边缘产生裂纹。这是由于从成型2到冷却阶段温差过大, 造成透镜内应力增大, 使透镜发生碎裂^[12-13]。将成型2温度降低至213℃, 透镜不再发生碎裂, 与成型2在206℃时的透镜表面雾斑相比, 透镜雾斑明显加重。这是由于成型温度的升

高加快了红外材料的氧化和物质挥发, 使透镜雾斑加重, 213℃时透镜表面雾斑如图8所示。

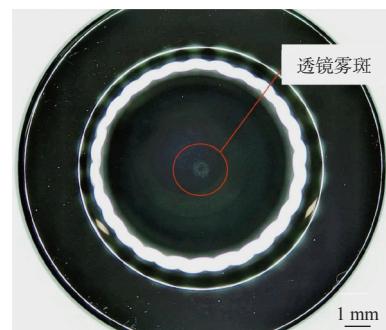


图6 206℃时透镜表面雾斑

Fig. 6 Fog spots on lens surface at 206°C

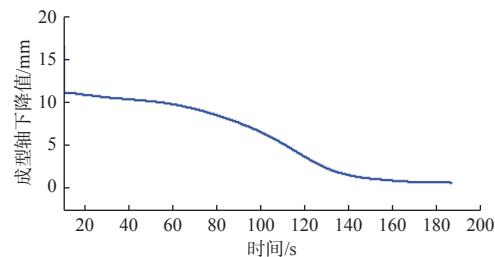


图7 206℃时透镜压切曲线图

Fig. 7 Lens press-cutting curve at 206°C

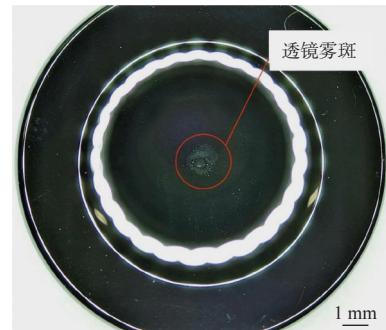


图8 213℃时透镜表面雾斑

Fig. 8 Fog spots on lens surface at 213°C

保持成型2温度为213℃, 将所有预热轴的高度调节至加热板与模具之间有1 mm间隙的高度处, 此时预热轴上的加热板与模具之间存在间隙, 形成非接触式预热方式。再次对透镜进行模压, 此时透镜的表面雾斑区域明显降低, 213℃时采用非接触预热透镜表面雾斑如图9所示。图9说明采用非接触式预热方式可以对红外透镜雾斑的形成产生影响。

将成型2温度由213℃降低至211℃后, 再次进行模压试验, 模压结束后透镜表面雾斑消失,

211℃ 时采用非接触预热透镜表面如图 10 所示。将本次试验结果与成型 2 温度为 206℃ 时试验结果进行对比, 可以看出采用非接触式预热方式, 将成型 2 温度由 206℃ 升高至 211℃ 时, 透镜不会产生雾斑。211℃ 采用非接触预热透镜压切曲线图如图 11 所示。从图 11 可以看出, 此时成型 2 的压切时间为 166 s, 与 206℃ 时成型 2 的压切时间 187 s 相比, 时间缩短了 21 s。当成型温度升高到 211℃ 时, 加快了透镜材料的软化, 缩短了透镜的压切时间。

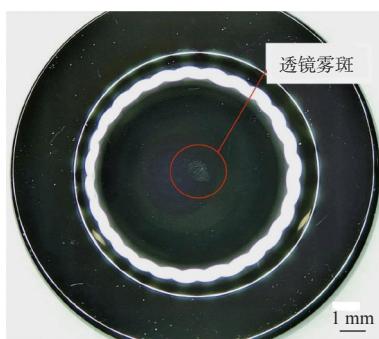


图 9 213℃ 采用非接触预热透镜表面雾斑

Fig. 9 Fog spots on lens surface with non-contact preheating at 213°C

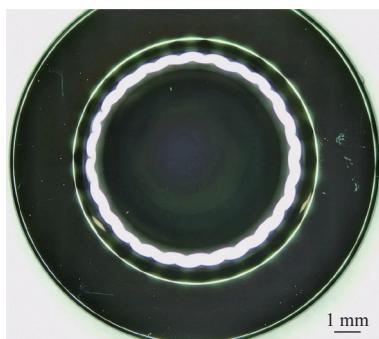


图 10 211℃ 采用非接触预热透镜表面

Fig. 10 Lens surface with non-contact preheating at 211°C

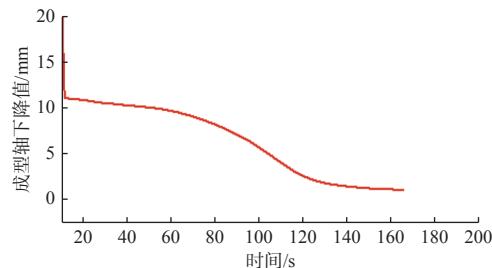


图 11 211℃ 采用非接触预热透镜压切曲线图

Fig. 11 Lens press-cutting curve with non-contact preheating at 211°C

3 雾斑检测与分析

选择上述实验中透镜的雾斑区和非雾斑区进行检测, 分别选取相同大小的区域进行 EDS 的面域元素扫描检测, 通过检测得到透镜非雾斑区面域谱图及元素含量如图 12 所示, 透镜雾斑区面域谱图及元素含量如图 13 所示。通过检测结果可知, 透镜非雾斑区和雾斑区表面都有氧元素, 有氧化物生成。这是由于模具在进入模压机时, 会带入少量的氧气, 在加热下氧气会与销材反应, 生成氧化物^[14-15]。由于氧化物的产生, 使得其他元素的含量比厂家给出的 Se、As、Sb、Sn 元素含量低。通过图 12 和图 13 中元素原子百分比可以看出, 与非雾斑区域相比, 雾斑区域的氧原子百分比降低, As 和 Se 的原子含量明显增加。这是由于氧化物的氧元素来自模压室内的气体, 在成型 2 阶段时透镜中心与模具紧贴, 会阻碍外部氧气进入透镜中心, 限制了氧化物的生成, 此时透镜与模具接触区域材料的挥发物对雾斑的形成占主导作用, 在雾斑区域材料的挥发量大于氧化物的生成量, 导致氧元素含量相对降低。

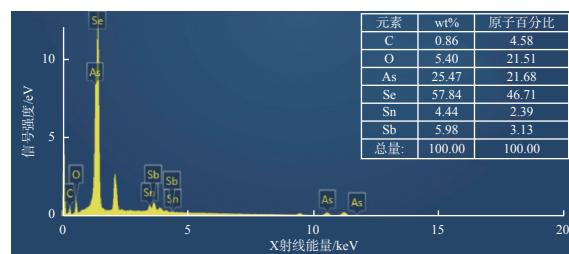


图 12 透镜非雾斑区面域谱图及元素含量

Fig. 12 Surface domain spectra and element content in non-foggy spots region of lens

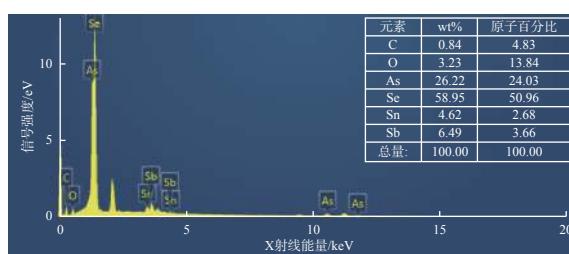


图 13 透镜雾斑区面域谱图及元素含量

Fig. 13 Surface domain spectra and element content in fog spots region of lens

选择透镜非雾斑区和雾斑区做扫描电镜观测, 观测结果如图 14 和图 15 所示。由扫描电镜图片可以看出, 非雾斑区有大量白色颗粒物质均匀分

布, 雾斑区分布有不均匀的白色气泡状物质。根据其形状, 结合上述元素含量进行分析, 可以确定白色气泡状物质是透镜材料挥发物冷却后形成的物质沉积。通过图 14 和图 15 对比可知, 白色气泡状物质是导致雾斑形成的主要因素。

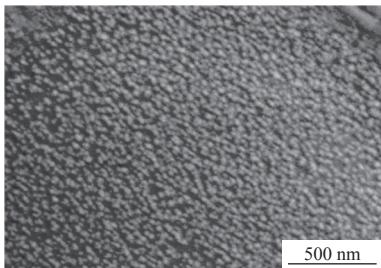


图 14 透镜非雾斑区域

Fig. 14 Lens non-foggy spots region

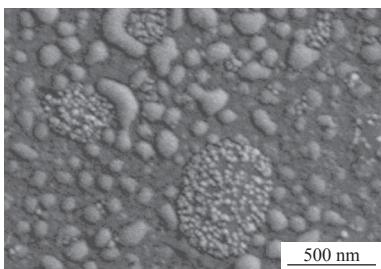


图 15 透镜雾斑区

Fig. 15 Lens fog spots region

4 结论

通过对透镜雾斑形成的机理进行分析, 结合透镜雾斑形成的影响因素, 本文采用一种非接触式预热模压工艺, 通过降低红外透镜销材在预热阶段与模具的接触面积, 减少预热阶段透镜与模具接触区域透镜材料挥发物的积累, 并使不均匀预热面缩小, 以此降低透镜雾斑的形成。在后期实验验证中, 采用接触式预热模压工艺, 当成型 2 温度为 206℃ 时透镜表面开始产生雾斑。采用非接触式预热模压方式, 当预热间隙为 1 mm 时, 成型 2 温度由 206℃ 提升至 211℃, 透镜表面无雾斑形成, 并使压切时间缩短了 21 s。证实了在多站式模压中采用非接触式预热方式, 可以在提高成型 2 温度的同时, 有效消除透镜雾斑的形成, 使前期雾斑形成机理分析的准确性得到了验证。透镜雾斑的元素检测结果表明, 与非雾斑区相比, 雾斑区的氧原子百分比降低, As 和 Se 的原子含量明显增加。透镜与模具接触区域材料的挥发物质对雾斑的形

成占主导作用, 在雾斑区材料的挥发量大于氧化物的生成量, 导致氧元素相对含量降低。

参考文献:

- [1] 陈冉, 薛宇飞, 吴锦鹏, 等. 红外热成像技术在炮膛测温中的应用[J]. *应用光学*, 2022, 43(4): 732-737.
CHEN Ran, XUE Yufei, WU Jinpeng, et al. Application of infrared thermal imaging technology in temperature measurement of gun breech[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(4): 732-737.
- [2] 刘光宇, 房丰洲. 玻璃光学元件精密模压成形技术[J]. *光学学报*, 2023, 43(8): 186-213.
LIU Guangyu, FANG Fengzhou. Precision mold forming technology for glass optical elements[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(8): 186-213.
- [3] KLOCKE F, DAMBON O, ROHWERDER M. Model of coating wear degradation in precision glass molding[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 87(9): 43-49.
- [4] ZHOU T F, ZHANG C. Aspheric lens processing of chalcogenide glass via combined PGM-SPDT process[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 120(4): 5855-5864.
- [5] 林常规, 郭小勇, 王先锋, 等. As_2Se_3 硫系玻璃非球面镜片的精密模压成型[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(7): 137-143.
LIN Changgui, GUO Xiaoyong, WANG Xianfeng, et al. Precision molding of As_2Se_3 sulfur-based glass aspheric lenses[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(7): 137-143.
- [6] 陈国荣, 章向华. 红外夜视仪用精密模压硫系玻璃研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2004, 1(5): 3-7.
CHEN Guorong, ZHANG Xianghua. Research progress on precision molded sulfur glass for infrared night vision devices[J]. *Journal of Silicate*, 2004, 1(5): 3-7.
- [7] 张治国, 孙宇轩. 摩擦系数对非球面玻璃透镜模压成型的影响[J]. *机械设计与制造*, 2019, 10(8): 34-36.
ZHANG Zhiguo, SUN Yuxuan. Influence of friction coefficient on molding of aspheric glass lenses[J]. *Mechanical Design and Manufacturing*, 2019, 10(8): 34-36.
- [8] ZHANG X H, GUIMOND Y, BELLEC Y. Production of complex chalcogenide glass optics by molding for thermal imaging[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2003, 326(7): 519-523.

- [9] CHA D H, PARK H S, HWANG Y, et al. Experimental study of glass molding process and transcription characteristics of mold surface in molding of aspheric of glass lenses[J]. *Optical Review*, 2011, 18(2): 241-242.
- [10] 周琴. 硫系玻璃非球面透镜模压成形仿真及实验研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
- ZHOU Qin. Simulation and experimental research on molding and forming of sulfur-based glass aspheric lens [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018.
- [11] 张云龙, 焦明印, 汪志斌. 衍射光学元件精密模压模具设计及预补偿[J]. *应用光学*, 2022, 43(4): 760-765.
- ZHANG Yunlong, JIAO Mingyin, WANG Zhibin. Design and pre-compensation of precision molding dies for diffractive optical elements[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(4): 760-765.
- [12] 尹韶辉, 王玉方, 朱科军, 等. 微小非球面玻璃透镜超精密模压成形数值模拟 [J]. *光子学报*, 2010, 39(11): 2020-2024.
- YIN Shaohui, WANG Yufang, ZHU Kejun, et al. Numerical simulation of ultra-precision molding of tiny aspherical glass lenses[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(11): 2020-2024.
- [13] 唐昆, 孔明慧, 李雨典, 等. 冷却间隙对小口径双非球面硫系玻璃镜片模压成型质量的影响 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(11): 340-350.
- TANG Kun, KONG Minghui, LI Yudian, et al. Influence of cooling gap on the molding quality of small-diameter double aspherical sulfur glass lenses[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 340-350.
- [14] 朱科军. 光学玻璃透镜模压成形的数值仿真和实验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- ZHU Kejun. Numerical simulation and experimental study of optical glass lens molding [D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [15] WU Y M, CHEN Z J, DU J G, et al. A comprehensive review of theory and technology of glass molding process[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020, 107(3): 2671-2704.