

光学透镜的消杂光黑漆的研究

金轸裕 王海云

摘要: 本文从黑漆消杂光机理的分析入手, 提出了光学透镜消杂光黑漆的配方设计原则, 探讨了研制工艺, 进行了性能的评价。

一、前 言

光学镜头的杂光主要是由不需要的反射和散射产生的。反射主要来源于透镜表面、透镜边缘、边框、可变光阑片和检测器表面, 散射是由透镜的表面和内部的条纹等产生的^[1]。透镜边缘的内反射对整个镜头的杂光有多大影响, 主要取决于透镜的数目与砂磨面的大小。透镜数越多, 砂磨面越大, 则消除透镜边缘的内反射引起的杂光就显得越重要。

消除光学透镜边缘的杂光, 从来都是采用黑色涂料来吸收内反射光的。那么, 怎样配制黑漆才能使其吸光效率高、消杂光效果好, 是值得研究的课题。

我们从黑漆消杂光机理的分析入手, 进行了配方设计, 探讨了工艺, 并开展了性能的评价工作。

二、配方设计原则及配制工艺

在进行配方设计时, 我们主要考虑到如下两条原则, 并由此确定了相应的配制工艺。

1. 选择适当组份及其配比, 以调节黑漆折射率和消光系数, 使黑漆的内反射率最小。

从几何光学的角度分析, 当光从光密到光疏时, 入射角大于临界角, 就会产生全反射。因此, 要避免产生全反射, 就要使黑漆的折射率大于光学透镜的折射率^[2]。

由于黑漆是一种强吸收介质, 所以, 其复折射率同消光系数有关^[3]。

设光对厚度为 l 的黑漆层透过率为 T , 则黑漆的吸收系数 α_i 可由下式表示:

$$\alpha_i = -\frac{\ln T}{l} \quad (1)$$

而黑漆在 $\nu = c \tilde{\nu}$ 的频率下的消光系数 k_i 为

$$k_i = \frac{\alpha_i}{4\pi\nu} \quad (2)$$

如图1所示, 入射角为 θ 的光在折射率为 n_i 的光学玻璃与复折射率为 n_i' 的黑漆界面上发生反射与折射时, 黑漆对玻璃的相对复折射率 n' 与复折射角 α 符合斯涅耳 (Snell) 定律, 即

$$\sin \theta = n' \sin \alpha \quad (3)$$

$$\because n' = \frac{n_i'}{n_i} = \frac{n_i - ik_i}{n_i} = n - ik \quad (4)$$

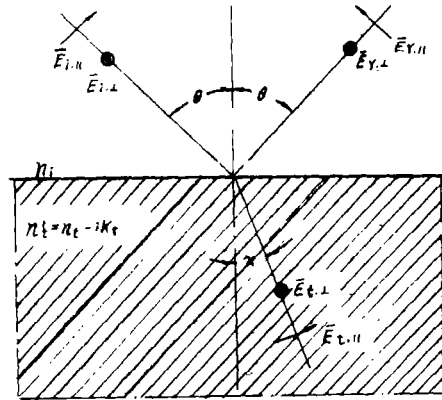


图1 在光学玻璃与黑漆界面上的入射光、反射光和折射光

其中 $n = n_t/n_i$ 为黑漆对光学玻璃的相对实折射率, $k = k_t/n_i$ 为消光系数, 表示黑漆辐射强度的衰减。

设 $\mu = \mu_t/\mu_i$ 为黑漆对于光学玻璃的相对磁导率 (在介质为绝缘材料时, 一般 $\mu = 1$), 那么, 根据菲涅耳(Fresnel)定律, 光在光学玻璃与黑漆界面上的光强反射率^[4]的垂直偏振分量 R_{\perp} 与平行偏振分量 R_{\parallel} 可分别表示为

$$R_{\perp} = \left| \frac{E_{r,\perp}}{E_{i,\perp}} \right|^2 = \left| \frac{\cos \theta - n' \mu \cos \alpha}{\cos \theta + n' \mu \cos \alpha} \right|^2 \quad (5)$$

$$R_{\parallel} = \left| \frac{E_{r,\parallel}}{E_{i,\parallel}} \right|^2 = \left| \frac{n' \mu \cos \theta - \cos \alpha}{n' \mu \cos \theta + \cos \alpha} \right|^2 \quad (6)$$

把(3)、(4)式代入(5)(6), 并整理得

$$R_{\perp} = \left| \frac{\cos \theta - \mu(n'^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}}{\cos \theta + \mu(n'^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}} \right|^2 = \frac{\cos^2 \theta + \mu^2 A - 2\mu A^{1/2} \cos \theta \cos B}{\cos^2 \theta + \mu^2 A + 2\mu A^{1/2} \cos \theta \cos B} \quad (7)$$

$$R_{\parallel} = \left| \frac{n'^2 \mu \cos \theta - (n'^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}}{n'^2 \mu \cos \theta + (n'^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}} \right|^2$$

$$= \frac{\mu^2 (C^2 + D^2) \cos^2 \theta + A - 2\mu A^{1/2} \cos \theta (C \cos B + D \cos B)}{\mu^2 (C^2 + D^2) \cos^2 \theta + A + 2\mu A^{1/2} \cos \theta (C \cos B + D \cos B)} \quad (8)$$

其中 $A = [(n^2 - k^2 - \sin^2 \theta)^2 + 4n^2 k^2]^{1/2}$

$$B = \frac{1}{2} \arctan \frac{2nk}{n^2 - k^2 - \sin^2 \theta}$$

$$C = n^2 - k^2$$

$$D = 2nk$$

若入射光为非偏振光, 其反射率 R_v 为

$$R_v = \frac{1}{2} (R_{\perp} + R_{\parallel}) \quad (9)$$

而当光垂直入射到光学玻璃与黑漆的界面时, $\theta = 0$, 因此, (7)、(8)式可被简化为

$$R = R_{\perp} = R_{\parallel} = R_v = \left| \frac{1 - \mu n'}{1 + \mu n'} \right|^2 = \left| \frac{(1 - \mu n) + i \mu k}{(1 + \mu n) - i \mu k} \right|^2$$

$$= \frac{(1 - \mu n)^2 - \mu^2 k^2}{(1 + \mu n)^2 + \mu^2 k^2} \quad (10)$$

或

$$n = \frac{1}{\mu} \left\{ \frac{1+R}{1-R} \pm \left[\left(\frac{1+R}{1-R} \right)^2 - 1 - \mu^2 k^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (11)$$

图2表示了(10)式和(11)式所表达的黑漆内反射率R同其相对实折射率n和消光系数k的关系。图中不难看出,对于每一种消光系数k值来说,当黑漆折射率值愈接近于光学玻璃的折射率,因而 $n = \frac{n_1}{n_i}$ 值愈趋近于1时,其内反射率就愈低。同时还可以看出,对每一种消光系数k值,存在一个最低内反射率值 R_{min} ,当消光系数较小时,其 R_{min} 值较小,反之, R_{min} 值就大。

这就是说,配制黑漆时,要选择适当组份及配比,使黑漆具有大于并接近于光学玻璃的折射率,而且使其消光系数尽量小。消光系数k值大,就意味着穿透深度几乎为零以及全反射^[6],这是不可取的。

我们通过选用不同折射率的成膜物质、体质颜料、分散剂以及稳定剂,以调节黑漆的折射率。

我们选用的主要成膜物质是折射率为1.54、光谱特性如图3、图4所示的一种合成树脂。

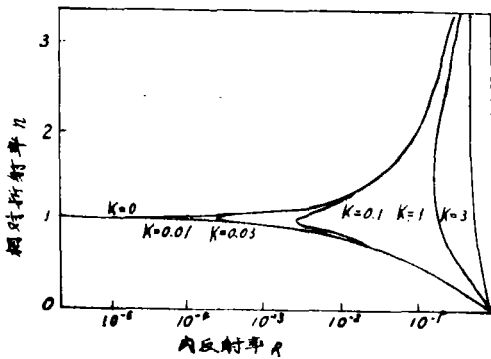


图2 光垂直入射时,在不同消光系数下,黑漆相对实折射率和内反射率的关系

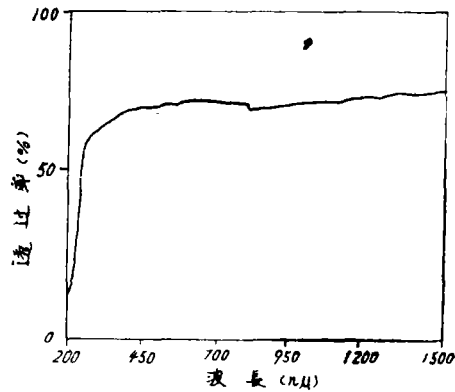


图3 所用成膜物质的紫外、可见光谱图

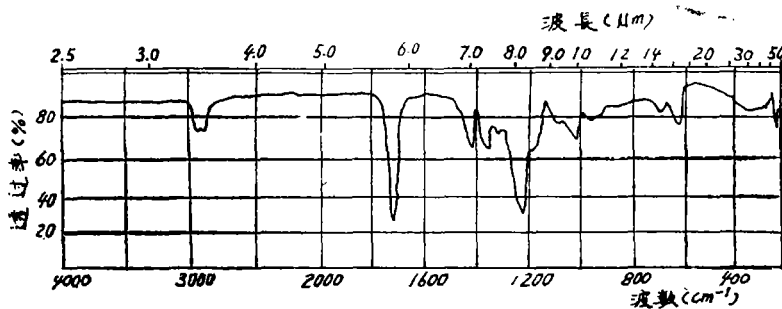


图4 所用成膜物质的红外光谱图

除此而外，我们还选用了其他类型的成膜物质（见后）。

2. 从配方和工艺，使黑漆颗粒细。

从物理光学角度看，当透镜材料的折射率大于黑漆的折射率（即 $n_i > n$ ），入射角 θ 大于临界角 θ_c 时，光要渗透到第二介质后，再回到第一介质，进行全反射。渗透光的强度分布与渗透深度的关系，是由 $\exp\left\{-\frac{4\pi}{\lambda}\left[\left(\frac{n_i}{n}\right)^2\sin^2\theta-1\right]^{\frac{1}{2}}Z\right\}$ 表示的曲线^[5]。式中， θ 为光在光学玻璃与黑漆界面上的入射角， Z 为光由界面向黑漆的渗透深度， λ 为入射光波长。

这种渗透光的强度，当 $Z = \frac{1}{5}\lambda$ 时，已衰减至入射光强度的30%左右。因此，可以说，黑漆的颗粒小于 $\frac{1}{5}\lambda$ ，就能把渗透光全部吸收，而不致使其重反射到第一介质。

为使黑漆颗粒细，我们采取了如下两种措施：

其一，配方上采用了既起到载色体作用，也起到粒径小于 $\frac{1}{5}\lambda$ 的吸收体作用的成膜物质。同时加了一种染料。

其二，为使颗粒充分分散，在配方中加入分散剂和反絮凝剂。因为黑漆的粒径越小，反而易于出现分散性差、絮凝现象严重的弊病。

3. 选用适量的光谱吸收剂，以使黑漆具有光谱吸收特性。

三、黑漆性能的评价

1. 黑漆内反射率的测试

测黑漆的内反射率，是直接评价黑漆性能，以调整其配方的行之有效的办法。我们采用三角棱镜制取样品，分别测得了入射角分别为 45° 及 60° 时的黑漆光强反射率的垂直偏振分量和平行偏振分量。测试的基本方法是把各种黑漆分别涂于 45° 及 60° 的三角棱镜的斜面上，分别射入垂直和平行偏振光，测得有无黑漆时的光电流强度之比，即 I/I_0 为内反射率。

图5为测试装置框图。

表1和表2分别列举了各种黑漆在入射角为 45° 和 60° 时的平行偏振和垂直偏振内反射率。

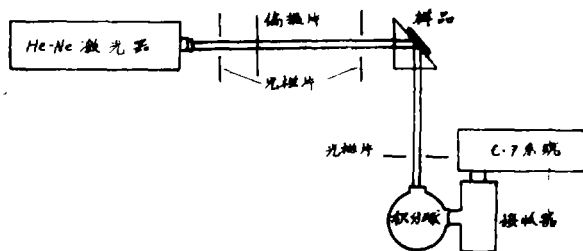


图5 内反射率测试装置框图

表1 各种黑漆在入射角为 45° 时的内反射率

黑漆配方号	平行偏振光			垂直偏振光		
	\bar{I}	I_0	R_{\parallel}	\bar{I}	I_0	R_{\perp}
1	2.01×10^{-2}	199.11	1.01×10^{-4}	4.00×10^{-2}	4.71	8.48×10^{-3}
2	3.41×10^{-2}	199.11	1.71×10^{-4}	2.24×10^{-2}	4.71	4.76×10^{-3}
3	9.55×10^{-3}	212.47	4.49×10^{-5}	1.54×10^{-2}	4.50	3.42×10^{-3}
4	3.89×10^{-3}	193.00	2.02×10^{-5}	7.57×10^{-3}	6.38	1.19×10^{-3}
5	2.48×10^{-2}	212.47	1.17×10^{-4}	3.63×10^{-2}	4.50	8.06×10^{-3}
6	1.76×10^{-2}	212.47	8.30×10^{-5}	1.87×10^{-2}	4.50	4.15×10^{-3}
“甘光”漆 (注)	4.52×10^{-2}	199.11	2.27×10^{-4}	4.81×10^{-2}	4.71	1.02×10^{-2}

(注) “甘光”漆: 指目前国内广泛使用的甘肃光学仪器厂和甘肃油漆厂涂料工业研究所共同研制的消杂光漆

表2 各种黑漆在入射角为 60° 时的内反射率

黑漆配方号	平行偏振光			垂直偏振光		
	\bar{I}	I_0	R_{\parallel}	\bar{I}	I_0	R_{\perp}
1	1.06×10^{-2}	4.91	2.15×10^{-3}	1.08×10^{-1}	5.92	1.83×10^{-2}
2	9.10×10^{-3}	4.91	1.85×10^{-3}	9.28×10^{-2}	5.92	1.57×10^{-2}
3	7.88×10^{-3}	4.91	1.61×10^{-3}	5.59×10^{-2}	5.92	9.43×10^{-3}
4	2.91×10^{-3}	4.91	5.93×10^{-4}	2.06×10^{-2}	5.92	3.47×10^{-3}
5	6.13×10^{-3}	4.91	1.26×10^{-3}	4.84×10^{-2}	5.92	8.17×10^{-3}
6	6.81×10^{-3}	4.91	1.39×10^{-3}	5.16×10^{-2}	5.92	8.71×10^{-3}
7	4.00×10^{-3}	1.37	2.92×10^{-3}	4.18×10^{-2}	4.64	9.00×10^{-3}
8	9.00×10^{-4}	1.37	6.47×10^{-4}	1.09×10^{-2}	4.64	2.36×10^{-3}

表3 用UV-210测试的各种黑漆的内反射率

黑漆配方号	R(%)	黑漆配方号	R(%)
1	2.22—2.33	6	2.10—2.20
2	2.17—2.30	7	2.05—2.15
3	2.20—2.30	8	1.48—1.60
4	2.05—2.10	“甘光”漆	2.38—2.50
5	2.40—2.50		

由表1、表2可以看出配方4号漆和配方8号漆的内反射率值比较低, 说明这两种漆有良好的消杂光效果。

内反射率的上述测试结果, 均未包含漫反射的因素。我们用UV-210型分光光度计测了

上述各种黑漆对400nm—800nm波长入射光的内反射率。这种测试是包含漫反射的,其结果同上述情况相吻合,仍可看出配方4号漆和配方8号漆具有较低的内反射率。表3列举了UV—210的测试结果。

图6比较了三种黑漆的内反射率。

2. 黑漆消杂光性能的测试

这是以往测黑漆消杂光性能的唯一方法,但此法只供两种漆的比较,因为所测杂光值是镜头所有系统杂光因素的综合值。要比较两种漆的消杂光性能,就要固定其他所有因素,只改变黑漆的种类,以比较所测杂光值的大小。测试是用本所研制的杂光系数测试仪进行的。

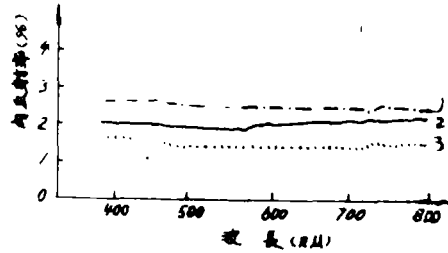


图6 三种黑漆内反射率的比较

1—“甘光”漆 2—配方4漆号 3—配方8号漆

①在“老20×1*”变焦距镜头上的杂光值。

测试条件: 无穷远测试, 被测镜头与准直物镜距离0.5m。表4为测试结果。

表4 两种黑漆在“老20×1*”镜头中的消杂光性能的比较

黑漆配方号	黑目标尺寸	长短焦距	光 圈	杂 光 值
“甘光”漆	0.8mm	25mm	5.4	4.0%
	0.8mm	25mm	5.6	3.0%
	1.95mm	250mm	5.4	8.0%
	1.95mm	250mm	5.6	6.7%
配方9	0.78mm	25mm	4.0	3.1%
	0.78mm	25mm	5.6	3.4%
	1.95mm	250mm	4.0	4.8%
	1.95mm	250mm	5.6	5.0%

②在F—50大孔径电影摄影镜头上的杂光值。

测试条件: 无穷远测试, 光圈: 1.25。

测试结果:

使用“甘光”漆的镜头, 杂光值为2.5%;

使用2号漆的镜头, 杂光值为2.4%。

3. 黑漆粒度的测试

图7是黑漆颗粒的扫描电子显微镜照片, 是用国产DX—3A型扫描电子显微镜放大1000×拍照的。照片中的白点就是黑漆的颗粒。其中0.2μm—0.5μm的颗粒占62%。在3000×时, 可瞬时扫描出0.06μm的颗粒, 但因设备的分辨率及黑漆胶层的复盖, 而一现即逝, 无法拍照。

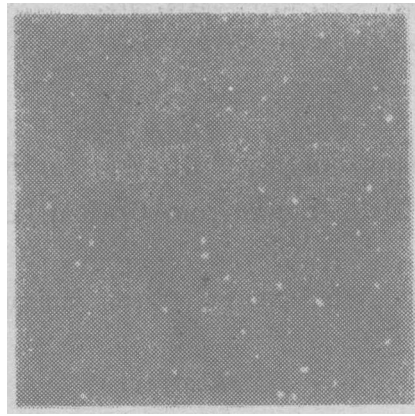


图7 黑漆颗粒的扫描电子显微镜照片

4. 黑漆的其他性能

表干时间(min): 2 (按GB1728—79)

遮盖率(g/m²): 38.5—142 (按GB1726—79)

耐湿热: 一级 (按GB1740—79)

(耐盐雾: 一级 (按GB1771—79)

四、讨论与结论

1. 配方4号漆和配方8号漆同其他配方的漆的主要区别在于这两种配方中均加有0.05% (重量份) 的黑色分散剂, 配方8号漆另加有0.27% 的光谱吸收剂。实验结果表明, 此两种辅助材料使黑漆在可见、紫外区的消杂光性能有了明显的提高。不难看出, 黑漆颗粒的充分分散, 超微颗粒的增加以及光谱吸收剂等, 对黑漆内反射率的降低有显著的作用。

2. 添加到黑漆中的各种材料的光学指数 n 和 k 与黑漆的 n 和 k 有直接的关系。黑漆的光学指数 n 和 k 的测定, 将对这种关系的了解和黑漆配方的设计及其性能的控制, 具有重要的意义。

3. 测试结果表明, 每一种黑漆 R_{\perp} 随着入射角的增大而增大, 这符合 R_{\perp} 随入射角的增大而单调上升的规律。在相同入射角下, R_{\perp} 大于 R_{\parallel} , 而且 45° 入射角的 R_{\parallel} 小于 60° 入射角的 R_{\parallel} , 这可以解释为, 45° 时 R_{\parallel} 在反射率的下降段, 而 60° 时的 R_{\parallel} , 在反射率的上升段, 这一结果也符合 R_{\parallel} 值随入射角的增大, 而先是下降, 然后再上升的规律^[6]。

衷心感谢王占仁、崔敦杰、任建伟、禹炳熙、金锡峰、鲍今是、王笑琴等同志对黑漆性能测试工作的大力协助和郭永廉同志对本工作的支持。

参 考 文 献

- [1] S. Martin, Opt. Acta, 1972, 19, No. 6, 99.
- [2] 金軫裕, 光学机械, 1982, 2, 39.
- [3] W. Leupacher and A. Penzkofer, Appl. Opt., 1984, 23, No. 10, 1554.
- [4] 赵凯华、钟锡华, 《光学》, 北京大学出版社, 1984, 1.

[5] 根岸広和, 松本和也, 特許公報。昭47—32418, 1972.

[6] M. 伽本尼, 《光学物理》, 科学出版社, 1976.

Research on Black Coating for Restraining Stray-Light from Optical Lenses

Jin Zhenyu Wang Haiyun

Abstract

In this paper the design principle of formulation of black coating for restraining stray-light from optical lenses presented, starting with analysing the mechanism of restrain stray-light of the black coating. Then the preparing processes are inquired and the performances of black coating are evaluated.