

# 光学透镜的消杂光黑漆

金 轸 裕

## 前 言

从事光学仪器设计、装调的人们十分关心光学透镜的消杂光问题。光学透镜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<sup>[1]</sup>。有人<sup>[2]</sup>把透镜杂光的来源归纳为八种，有人<sup>[3]</sup>归纳为三种，但都包括透镜边缘的反射引起的杂光。杂光对所有成像系统都有影响，尤其当物空间中所注意的区域比起产生杂光的区域有较低照度时，杂光就显得特别重要<sup>[1]</sup>。当透镜数目较多，并且有如图 1 所示的较大的砂磨斜面 $f$ 时，透镜边缘产生的杂光尤为突出。

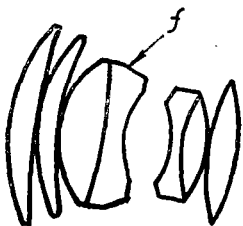


图 1 容易从透镜边缘产生内反射的光学系统

示的数值精度降低。

为消除光学透镜边缘的杂光，国内曾经使用过普通的无光黑漆，但这种黑漆漆层厚度不均匀，溶于酒精、乙醚，消光效果又差。1971年甘肃光学仪器厂和甘肃油漆厂涂料工业研究所研制了透镜边缘用消杂光黑漆<sup>[6]</sup>，给一些搞光学仪器的研究单位和工厂解决了急需。上海光学仪器厂和上海光机所也相继配制了透镜边缘消杂光黑漆，1980年，上海光学仪器厂发表了一篇关于透镜边缘消杂光黑漆的报告<sup>[7]</sup>。

在英国，通常用市场上容易买得到的一些无光黑漆作为透镜边缘消杂光漆来用。如帝国理工学院用在付里叶变换透镜边缘的消杂光黑漆是英国国际涂料有限公司 (International Paint Co. Ltd.) 生产的无光黑板漆。它是一种油基漆，由一个外观无光的炭黑形成坚固的耐蚀表面。再如，伊灵拜克光学公司 (Eling Beck Ltd.) 在红外瞄准镜上用的黑漆，是水溶性的乙烯乳液。这些消光涂料均以表面无光为其显著特征。美国马丁·马瑞特公司 (Martin Marietta) 研制的光学黑色涂层也广泛应用在一些光学仪器上<sup>[8]</sup>。

据1979年的报导<sup>[9]</sup>，美国标准局研究成功一种产生超黑表面的简单的化学浸没技术，超黑表面在大多数金属、塑料、陶瓷和玻璃上具有非常高的光吸收值。当在 350~2100 毫微米波长试验时，这种涂层技术产生的表面，平均吸收值超过99%，这种技术可用于平面板阳光捕集器以及许多光学仪器中。

照相镜头有杂光，则与成像无关的非成像光在画面内淡淡地扩散，当杂光大时，画面的暗部分照度上升，整个对比度下降，摄晴朗的景象也象蒙一层雾一样<sup>[4]</sup>。杂光对光学测试也同样造成不良的影响<sup>[5]</sup>。因为杂散光的存在，必然产生一个附加的光强度，不管对白光光学系统，还是对红外视系统都会产生暗背景，使背景衬度有所降低，也就使象的清晰度降低。对光电接受器件和电子线路的处理加杂了噪音，信噪比降低，致使输出显

日本佳能公司的根岸广和、松本和也两人从事透镜边缘消杂光黑漆的研究多年,从1968年开始申请专利<sup>[10][11][12][13]</sup>。他们有独到的见解,使之成为透镜边缘消杂光黑漆研究工作中的新的分支。

## 对透镜消杂光黑漆的基本要求

一、黑漆的折射率要大于光学玻璃的折射率<sup>[7][14]</sup>。

从几何光学角度看,经光学玻璃入射到黑漆的光,当光学玻璃的折射率大于黑漆的折射率,入射角超过临界角时,则产生全反射<sup>[15]</sup>。

如图2所示,当 $n_1 > n_2$ ,又 $\theta_1 > \theta_c$ ,则

$$\sin \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 \quad (1)$$

其中 $n_1$ 为光学玻璃的折射率, $n_2$ 为黑漆的折射率, $\theta_1$ 为入射角, $\theta_2$ 为折射角, $\theta_c$ 为临界角(即 $\theta_c$ 是满足式 $\sin \theta_c = \frac{n_1}{n_2}$ 的)。

但当 $n_2 > n_1$ 时,由(1)式得知

$$\sin \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 < \sin \theta_1 \quad (2)$$

所以每一个入射角 $\theta_1$ 都有一个实折射角 $\theta_2$ 与之呼应<sup>[16]</sup>,而不产生全反射。这就可以使折射在第二介质的光,被第二介质所吸收。

由此可知,使黑漆的折射率尽量大一些,是消除透镜边缘杂光的一个有效的途径,也是目前消杂光黑漆研制中普遍遵循的原则。

但黑色涂料的折射率并不是可以无限制地提高的。有人<sup>[13]</sup>经过实验认为,黑漆的折射率最大限度能达到 $nd = 1.62$ ,而光学玻璃的折射率有的高达1.8以上,在这种场合下,第一种消杂光原理是无效的。

那么,当黑漆的折射率低于光学玻璃的折射率时,如何才能消除光学玻璃和黑漆界面的内反射呢?根岸广和等人提出透镜消杂光黑漆还应具备如下两个条件。

二、黑漆的颗粒要非常小,要小于入射光波长的五分之一<sup>[10][11][13]</sup>。

从物理光学角度看,当 $n_1 > n_2$ ,入射角 $\theta_1$ 大于临界角 $\theta_c$ 时,光要以波长五分之一的深度渗透到第二介质后,再回到第一介质,进行全反射<sup>[13][14]</sup>,如图3所示。这种光叫“渗透光”或叫“受抑波”(“しみ出し光”,“Wave frustration”)。

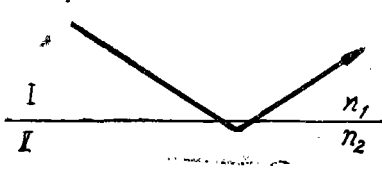


图3 全反射时的渗透光

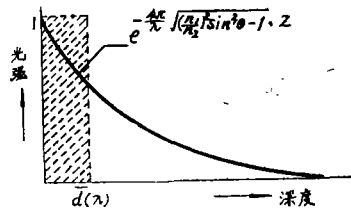


图4 全反射时渗透光强度和渗透深度的关系

这种渗透光的强度分布与渗透深度的关系可由图4表示。它是一个由式

$$e^{-\frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta - 1} \cdot Z}$$
表示的曲线。式中 $n_1$ 为第一介质（光学玻璃）的折射率， $n_2$ 为第二介质（黑漆）的折射率， $\theta$ 为光在玻璃和涂料界面上的入射角， $Z$ 为光由界面向涂料的渗透深度， $\lambda$ 为入射光波长。

由图4可知，强度分布曲线所围部分的面积等于长为1、短边为 $\bar{d}(\lambda)$ （与波长有关的平均渗透深度）的矩形（图中打斜线的部分）的面积，即

$$\int_0^{\infty} e^{-\frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta - 1} Z} \cdot dZ = 1 \cdot \bar{d}(\lambda) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{解得 } \bar{d}(\lambda) &= \frac{1}{\frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta - 1}} = \frac{1}{4\pi \sqrt{\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta - 1}} \cdot \lambda \\ &= K\lambda \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{其中 } K = \frac{1}{4\pi \sqrt{\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta - 1}} \quad (5)$$

它是与两种介质的折射率及入射角 $\theta$ 有关的量。

假若一个光学透镜其折射率为 $n_1 = 1.75 \sim 1.8$ ，涂在其边缘上的黑漆的折射率为 $n_2 = 1.50$ ，光的入射角 $\theta = 68^\circ$ ，并且在 $Z = 0$ （即在光学透镜和涂料的界面上）时的光强为1，那么，

$$\begin{aligned} Z = \frac{1}{10} \lambda \text{ 时} & \quad \text{光强为} 0.5; \\ Z = \frac{1}{5} \lambda \text{ 时} & \quad \text{光强为} 0.3; \\ Z = \frac{1}{2} \lambda \text{ 时} & \quad \text{光强为} 0.02. \end{aligned}$$

可见，在光学玻璃和黑漆的界面发生全反射时，光在第二介质（即在黑漆层）渗透 $\frac{1}{5}\lambda$ ，则入射光强度已衰减70%；而渗透的深度大于 $\frac{1}{5}\lambda$ （如在 $\frac{1}{2}\lambda$ 时），渗透光强度则更小，几乎全被吸收。因此，如果黑漆的颗粒小于 $\frac{1}{5}\lambda$ （在可见光范围使用的黑漆粒径应为0.08~0.16微米），就能把渗透光全部吸收，而不致使其重反射到第一介质。

图5表示了两种黑漆的全反射现象。由图5(A)可以看出，如果使用粒径小于 $\frac{1}{5}\lambda$ 的染料或颜料 $c$ ，并使这些微粒多分布于光学玻璃 $a$ 和黑漆 $b$ 的界面（或附近），那么，就有可能有效地吸收进入黑漆层内部的全部渗透光。然而，如图5(B)所示，在以炭黑为主要消光物质的黑漆中，因为炭黑是由很多颗粒凝聚在一起的，粒径较大，如图中的 $d$ ，不可能密集分布在光学

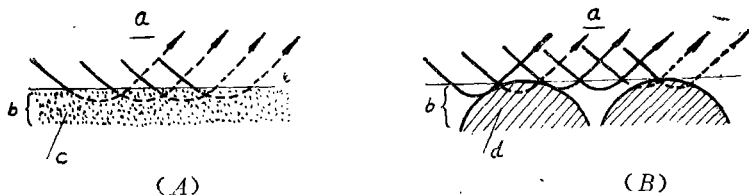


图5 两种全反射现象示意图

(A) 粒径小于 $\frac{1}{5}\lambda$ 的黑漆      (B) 以炭黑为主要消光物质的黑漆

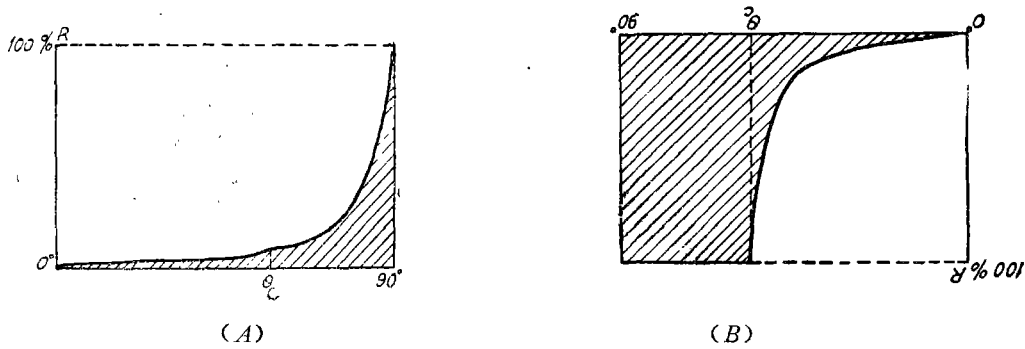


图 6 两种黑漆的入射角和反射率的关系

(A) 粒径小于  $\frac{1}{5}\lambda$  的黑漆 (B) 以炭黑为主要消光物质的黑漆

玻璃和涂料的界面 (或附近), 因而不能有效地吸收界面 (或附近) 存在的渗透光。图 6 表示这两种黑漆在不同入射角下的反射率。图中阴影部分的面积相当于实际的反射。图 6(A) 表明, 当黑漆的粒径小于  $\frac{1}{5}\lambda$  时, 尽管入射角大于临界角, 也不发生全反射, 或者说实际反射量是很小的。然而, 象图 6(B) 那样, 黑漆中消光物质粒径很大, 当入射角大于临界角时, 产生全反射。

很显然, 对以炭黑为主要消光颜料的黑漆, 应想办法完全打散凝聚的炭黑, 使其粒径小于  $\frac{1}{5}$  波长以下, 否则, 这种黑漆对折射率大的光学透镜是无效的。

### 三、黑漆对入射光短波部分的吸收应多于对长波部分的吸收<sup>[10][11][12]</sup>。

从式(4)  $\bar{d}(\lambda) = K\lambda$  中得知:  $\lambda$  越大,  $\bar{d}(\lambda)$  就越大, 即入射光中的长波部分在第二介质中渗透的平均深度大于短波部分在第二介质中渗透的平均深度。这说明, 入射光中的长波部分在第二介质中的强度衰减大于短波部分。如果所用黑漆对可见光各波段具有同样吸收系数, 就会得到如图 7 所示的结果, 即短波部分的光很少被黑漆所吸收而成为内反射光。

因此作为消除光学透镜边缘杂光的黑漆, 应该如图 8 (A), 把界面内反射光特性曲线平坦化, 为此应该如图 (B) 那样, 使其对入射光短波部分的吸收大于对长波部分的吸收。即黑漆组份中应含有能使长波光透过率大于短波光透过率的物质。

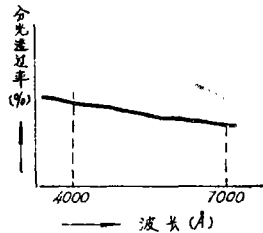
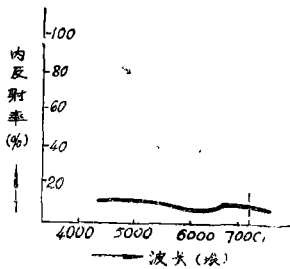
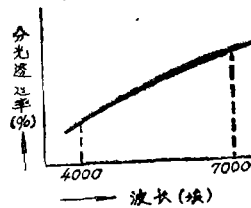


图 7 普通黑漆在各种波长下的分光透过率



(A)



(B)

图 8 黑漆所应具备的内反射率曲线(A)和分光透过率曲线(B)

## 透镜消杂光黑漆的配方设计

在配制消杂光黑漆时,首先应该考虑涂料的以下四个组份:1.主要成膜物质用什么?是油脂,还是树脂?是松香,还是沥青?2.次要成膜物质是什么?需要哪些添加物?3.用哪些颜料或染料?4.这些都确定之后,再确定用哪些溶剂。选用这些组份的主要依据就是上述的折射率或颗粒大小以及对入射光短波部分的吸收性能等。除此而外,还要考虑使黑漆具备如下的性能<sup>[6][7]</sup>:涂料对光学玻璃毛面的浸润性要好,因而具有对玻璃的良好附着力;涂料的流平性要好,应能形成薄而均匀的消杂光涂层,易涂,快干;干后的涂层不能溶解于酒精、乙醚,因为这种溶剂常用来擦拭光学透镜。

下面仅就透镜消杂光黑漆配方设计中的某些问题作一粗略的归纳。

1.成膜物质在涂料中是载色体(Vehicle),它能把颜料或染料均匀分散;它又是粘结剂,能把涂料粘附于被涂物质上。作为光学透镜的消杂光黑漆的成膜物质,除具备上述特点之外,还应具备较高的折射率和吸光能力。国内有些单位<sup>[6][7]</sup>采用氯乙烯—醋酸乙烯共聚物,此种共聚物形成的薄膜有无光的特性<sup>[18]</sup>,但这种二元共聚物在光滑表面上的自干附着力很差<sup>[19]</sup>。用氯乙烯—醋酸乙烯—顺丁烯二酸酐三元共聚物则能大大改善附着力,因聚合链旁含有反应基的乙烯基,并由于分子量小,易溶于混合溶剂中,可以取得比较低粘度的稳定溶液<sup>[20]</sup>。

根岸广和等人认为:为减少透镜的内反射率,把沥青物质作为载色体之一来使用,是非常有效的<sup>[10][11][13]</sup>。因为沥青物质不仅起着载色体的作用,还可以作为粒径小于 $\frac{1}{5}\lambda$ 的吸收体存在于涂料之中,所以能够显示透明载色体所达不到的高吸收能力,同时光照射引起的退色现象也很少。因此用这种载色体制配的黑漆是非常理想的透镜消杂光黑漆。

根岸广和等人也提出了如使用松香等溶于有机溶剂的其他载色体配方例,以及使用聚乙烯醇、阿拉伯树胶等水溶性载色体的配方例,但是前者要配用油性染料或颜料,后者要配用水溶性染料或颜料,以达到使这些染料或颜料分散成 $\frac{1}{5}\lambda$ 的微粒之目的。

2.在光学透镜的消杂光黑漆中所用的颜料,主要是作为消光物质来用,国内一般用炭黑。消光涂料所用炭黑应该有颗粒细、黑度好、分散性好、流动性高等特点,但这些条件中有些是矛盾的。如颗粒越细,黑度越好,但吸油量变小,分散度不好。这是由于表面能的作用,使细粒之间产生吸引力,把颗粒聚集成较大的块。在涂料的配制过程中炭黑颗粒之间的吸引力很强而未能分散开,则有较大的颗粒在膜中露出<sup>[21]</sup>。但是臭氧处理的炭黑,其分散度有明显的改善。少量的铜盐和芳香胺也能促进炭黑在树脂中的分散作用。

根岸广和等人指出了以炭黑作为主要消光物质的黑漆的弊病,同时提出了配合沥青载色体使用油性染料方案,认为以黑色染料代替炭黑作消光物质,有利于黑漆颗粒分散成 $\frac{1}{5}\lambda$ <sup>[13]</sup>。

根岸广和等人还提出了以黑色染料、沉淀色料为基础,大量加进可以增强可见光长波部分透过率的黄色染料、沉淀色料,另外作为补色剂(防止出现中间色)加橙红色染料的配方例<sup>[10][11][12]</sup>。以这种手段,即使黑漆颗粒小于入射光波长的 $\frac{1}{5}$ 的大小分散,也使黑漆对入射光中短波部分的吸收好于长波部分,以使内反射充分黑色化。

3.在考虑好用哪些组份的基础上,进一步考虑选取怎样一个配比,这也是配方设计的重要一环。

选择最佳配比的主要依据首先应该是光学透镜的消杂光对黑漆提出的要求。主要的原则

是：①在以炭黑为主要消光物质的黑漆配方中，要增加炭黑的含量。因为只有颜料的体积浓度(PVC)大于临界颜料体积浓度(CPVC)，所配黑漆才显无光特性<sup>[21]</sup>。②增加粒径小于 $\frac{1}{5}\lambda$ 的光吸收物质在玻璃界面上的浓度，为此，染料在黑漆中的体积浓度也要大一些。

除此而外，考虑配比还要依据于涂料的研磨对涂料的粘度所提出的要求。因为球磨对透视镜消杂光黑漆的性能有很重要的意义，只有充分的研磨，才能使漆料的各组份有效地分散。球磨除了有球的密度与大小、装球量、球磨速度等因素外，还有对黑漆粘度的要求。计算球磨漆浆最佳粘度的经验式<sup>[21]</sup>是：

$$KU = D^{0.75}(93 + 11\Delta p) \quad (6)$$

其中 $KU$ 为克瑞伯(*Kreb*)粘度单位， $D$ 为球直径， $\Delta p$ 为球与漆浆密度之差。

确定黑漆配比应该经过反复实验，加以优选。有人<sup>[22]</sup>建议在涂料研究中应用统计分析方法，在已知的几种物料量区间内，找出特定性能的最佳配比，设计实验方案。

### 参 考 文 献

- [1] S.Martin, Opt. Acta, 1972, 19, No. 6, 99.
- [2] 仁藤忠芳; 光学技術コンタクト, 1972, 10, No. 4, 17.
- [3] 竜岡静夫; 応用物理, 1966, 35, No. 9, 649.
- [4] 竜岡静夫; 光学技術コンタクト, 1971, 9, No. 12, 17.
- [5] 祝德順; 电影光学, 1979, No. 1, 59.
- [6] 甘肃光学仪器厂、甘肃油漆厂涂料工业研究所; 涂料工业, 1972, No. 1, 11.
- [7] 杨用家; 光学技术1980, No. 4, 31.
- [8] Martin Marietta, Pro. Soci. Photo—Opt. Instrum. Eng., 1977, 107, 168.
- [9] National Bureau of Standards, Opt. Spectra, 1979, Aug., 26.
- [10] Canon Camera Co. Ltd., Fr. 1, 538, 317, 1968, Sep
- [11] Hirokazu Negishi, Kazuga Matsumoto, Brit. 1, 173, 303, 1969, Dec.
- [12] 根岸広和, 松本和也; 特許公報昭47—32418, 1972.
- [13] 根岸広和, 松本和也; 特許公報昭47—32419, 1972.
- [14] 刘瑞祥; 光学机械, 1977, No. 5, 11.
- [15] 辻内順平; “光学概論” I 朝倉書店, 1979.
- [16] M. 玻恩, E. 沃耳夫; “光学原理” (上册) 科学出版社, 1978.
- [17] 松用 正; 塗装技術, 1979, 18, No. 4, 54.
- [18] Pfiffne Robert; US 3, 542, 630 1971.
- [19] 原燃料化学工业部涂料技术训练班; “涂料工艺” 第四册, 北京化学工业出版社, 1976.
- [20] G. Barnett, Paint technol. 1971, 35, No. 4 ii—iv.
- [21] 原燃料化学工业部涂料技术训练班; “涂料工艺” 第三册, 北京化学工业出版社, 1976.
- [22] 沈锦周; 涂料工业1979, No. 3, 6.