

减反射膜对摄影镜头彩色还原特性的贡献

齐 钰

(中国科学院长春光学精密机械研究所)

提 要

本文从彩色摄影的需要出发,根据美国的ANSI彩色标准,讨论了摄影镜头的彩色还原问题。文中指出镜头玻璃的光谱吸收对其彩色平衡的影响,着重分析了减反射膜对改善镜头彩色还原性能的作用,计算了各类减反射膜的彩色贡献,给出了用于10倍变焦距彩色摄影镜头减反射膜系的设计思想、计算方法和结果。结果表明:合理地选择减反射膜系可使镜头的透过率和彩色还原特性同时获得改善。

一、引 言

成像质量和彩色还原特性是评价现代彩色摄影镜头综合性能的两个重要指标。减反射膜在这方面具有极为重要的作用。

现代摄影镜头已发展为多达几十片透镜的复杂光学系统。由于设计者对玻璃材料的选择通常以成像质量为目标,对玻璃本身的彩色平衡往往忽视,而将镜头最终的彩色还原寄托于涂镀减反射膜。由于对减反射膜彩色贡献缺乏足够的了解,不能合理地选用,其结果造成摄影镜头的“偏色”(一般是定焦距镜头“偏冷”,变焦距镜头“偏暖”),而无法用于彩色摄影。因此,解决镜头的彩色还原问题,已成为当前国产摄影镜头、尤其是变焦距镜头急待解决的重要课题。

有关摄影镜头的彩色还原问题已有文献发表,但对减反射膜的彩色贡献和匹配问题却涉及很少。本文着重分析了减反射膜对镜头彩色还原的贡献,给出计算公式,以及用于10倍变焦距摄影镜头减反射膜系的设计思想、计算方法和结果。

二、还原特性的总体考虑

摄影镜头的彩色还原特性应根据美国的彩色标准ANSI PH_{3.44}-1970推荐的彩色贡献(Color Contribution)值(简称为C. C. 值): $8(\pm\frac{1}{8})-0(+\frac{1}{8})-0(+\frac{2}{8})$ 为标准。C. C. 值的三个数字分别表示镜头光谱透过的蓝、绿、红三部分相对衰减程度。上标括号中的数字表示其允许偏差的上下限。数字8表明与镜头的“蓝路”透过率相对应有较大的衰减,这是由人的眼睛对彩色的感觉而引起的,照明体色温的物理特性以及感光软片对光谱感光敏感程度不一等综合效果的经验数字满足这个C. C. 值,自然彩色就可复现。

我们借助这个C. C. 值标准,将摄影镜头的彩色还原特性归结为镜头玻璃和玻璃上减反射膜引入的彩色贡献两个方面。这样,就能以玻璃本身的彩色贡献为依据,选择不同彩色

特性的减反射膜进行校正,将具有一定彩色还原特性镜头的光谱透过,用其镜头玻璃和涂镀减反射膜共同引入的彩色贡献 C. C. 值来表示,从而建立起镜头的光谱透过率和 C. C. 值的对应关系。

三、吸收谱对彩色还原的影响

镜头的彩色还原特性首先取决于镜头玻璃的选择性吸收光谱。计算结果表明,玻璃本身对蓝、紫光的吸收程度较明显地影响着镜头的 C. C. 值。对于新型的高倍率变焦距镜头,由于使用重火石玻璃和镧冕玻璃过多,使之对蓝紫光吸收过大,其透射截止波长移向长波且带黄色“着色”,导致镜头严重“偏暖”。为了便于分析,现将我单位设计的 I 型 10 倍变焦距镜头所用 16 块透镜的 10 种不同牌号玻璃测定光谱透过率(样品厚 5 mm),然后按透镜平均厚度计算出每个元件无反射的光谱透过率,最后得出镜头的总光谱透过率。其数据绘入图 1 曲线 a。再选用与上述国产玻璃具有相同折射率、色散和厚度的德国肖特(Schott)玻璃数据,计算出镜头的无反射光谱透过率,绘入图 1 曲线 b。

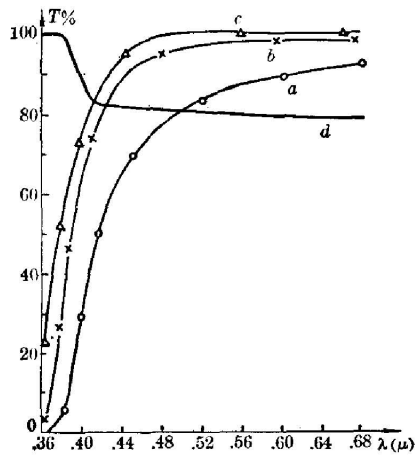


图 1 国产玻璃和肖特玻璃的 10 倍变焦距摄影镜头的无反射光谱透过率

Fig. 1 Non-reflecting spectral transmittance of 10× zoom photographic objective from glass made in our country and Schott glass

两种玻璃制成的镜头均是对蓝光衰减过大。肖特玻璃镜头透过率高,尤其短波更为显著,其 C. C. 值基本达到 ANSI 标准,“三色”值的蓝光部分为 C. C. 值允差范围的上限,使镜头略为发“暖”;而国产玻璃镜头透过率低,短波区尤为显著, C. C. 值大大超出允差范围,使镜头严重“偏暖”,甚至到了难以校正的程度。下面的计算结果将进一步说明这个问题。

两种玻璃制成的镜头均是对蓝光衰减过大。肖特玻璃镜头透过率高,尤其短波更为显著,其 C. C. 值基本达到 ANSI 标准,“三色”值的蓝光部分为 C. C. 值允差范围的上限,使镜头略为发“暖”;而国产玻璃镜头透过率低,短波区尤为显著, C. C. 值大大超出允差范围,使镜头严重“偏暖”,甚至到了难以校正的程度。下面的计算结果将进一步说明这个问题。

度。下面的计算结果将进一步说明这个问题。

四、减反膜对彩色失调的校正

众所周知,减反射膜具有对光谱选择性的减反射效果。这种光谱的选择性减反射使它对镜头具有一定的彩色校正作用。

不同类型减反射膜具有不同的彩色校正特性。单层减反射膜(如 MgF_2 膜)是光学元件通用的膜层。但由于 MgF_2 膜的减反射效果不高,且有明显的“着色”,在使用中若忽视了这种“着色”的匹配,势必造成镜头的严重彩色失调。近年来多层宽带减反射膜的发展,能够使透镜在不改变彩色特性的前提下提高整个可见区的光透过率,使光学系统获得较好的成像质量,这就为设计和制造优质的彩色摄影镜头提供了更为有利的条件。然而,这也曾给人们一个错觉,认为采用多层膜可以解决镜头的“偏色”问题,因而想用多层膜代替单层膜。应该指出,多层宽带减反射膜确实具有上述良好的光谱特性和彩色平衡,然而正因为如此,无法用来校正已造成彩色失调的摄影镜头的彩色还原。图 2 给出不同类型减反射膜的光谱特性

表 1 不同类型减反射膜的 C. C. 值对不同基片彩色平衡的校正

Table 1 C. C. value of anti-reflection coatings with different type and correction for color balance on different substrates

		基片 C.C. 值	纯膜 C.C. 值	基片+膜 C.C. 值		
				ZBaF ₁	ZF ₆	ZBaF ₁ +ZF ₆
基 片	ZBaF ₁	2.3—0.2—0				
	ZF ₆	8.0—0.4—0				
	ZBaF ₁ +ZF ₆	9.6—0.7—0				
单 层 膜			0—0.1—0.4	2.0—0—0.1	7.4—0—0	8.5—0—0
三 层 膜			0.1—0.1—0	2.4—0.3—0	8.0—0.3—0	9.6—0.6—0

计算曲线和 C. C. 值。

表 1 还给出计算各类减反射膜与不同基片匹配后的 C. C. 值变化情况。

表中单层膜为 MgF₂ 膜 ($\lambda_0 = 0.44\mu$)；双层 I 为 $\frac{\lambda}{2} - \frac{\lambda}{4}$ 膜系 ($\lambda_0 = 0.48\mu$)；双层膜 II 和 III 为任意厚度彩色校正膜；三层膜为 $\frac{\lambda}{4} - \frac{\lambda}{2} - \frac{\lambda}{4}$ 膜系 ($\lambda_0 = 0.46\mu$)。

由图 2 可见，不同中心波长的单层减反射膜具有明显不同的彩色校正作用，三层减反射膜的校正作用虽然也是随中心波长不同而异，但其差别不是很大（指可见区而言，以下皆同）。

由图 2 和表 1 的数据可见，单层和双层膜比三层膜有较大的彩色校正作用，三层膜和基片匹配后的 C. C. 值基本同于基片的 C. C. 值，不改变基片的彩色特性。

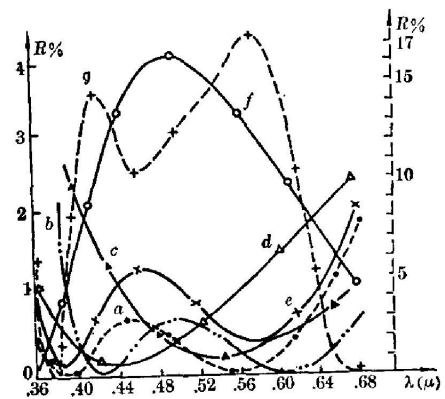


图 2 计算不同类型减反射膜的光谱特性和 C. C. 值

Fig. 2 Calculated curve of spectral characteristic and C. C. value in anti-reflection coatings with different type

五、彩色贡献的计算方法

根据 Hardy 和 Wurzburg 提出的彩色复现条件和所得出的彩色摄影光谱响应曲线，最后导出摄影镜头光谱透过的“有效光密度”： $D_{\text{eff}} = -\lg T_{\text{eff}}$ 。

$$\text{式中 } T_{\text{eff}} = \frac{\int \tau(\lambda) \cdot P(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda}{\int P(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda} = \frac{\int \tau(\lambda) \cdot W(\lambda) d\lambda}{\int W(\lambda) d\lambda} = \frac{\sum \tau(\lambda) \cdot W(\lambda)}{\sum W(\lambda)}$$

T_{eff} ——镜头的有效光谱透过率；

$\tau(\lambda)$ ——镜头无反射时轴上的光谱透过率；

$P(\lambda)$ ——摄影照明光源的光谱能量分布；

$S(\lambda)$ ——标准感光片的光谱灵敏度；

$W(\lambda) = P(\lambda) \cdot S(\lambda)$, 称为光谱权函数。

因此, 当选定照明光源和摄影软片之后, 具有不同光谱透过率的摄影镜头就产生不同的彩色还原特性, 我们可以根据镜头透过率计算出其 C. C. 值。

表 2 列出 ZBaF₁ 玻璃 C. C. 值计算的实例。表中透过率 $\tau(\lambda)$ 为 ZBaF₁ 玻璃已考虑其厚度吸收的无反射光谱透过, $W_b(\lambda)$ 、 $W_g(\lambda)$ 和 $W_r(\lambda)$ 为光谱权函数的蓝、绿和红三“路”的特定数值。计算中对光谱权函数作归一化处理, 即使 $\sum_i W_{bi}(\lambda) = \sum_i W_{gi}(\lambda) = \sum_i W_{ri}(\lambda) = 100$; 最后一项 C. C. 值标准化时是用其三个数字中最小的一个去减各个数。

表 2 ZBaF₁ 玻璃本身 C. C. 值的计算

Table 2 Calculation of C.C. Value of ZBaF₁ glass in itself

波长(μ)	$\tau(\lambda)$	W_b	$\tau(\lambda) \times W_b \times 100$	W_g	$\tau(\lambda) \times W_g \times 100$	W_r	$\tau(\lambda) \times W_r \times 100$	
0.36	0.650	4	260					
0.38	0.854	10	853					
0.40	0.934	18	1681					
0.42	0.970	20	1940					
0.44	0.975	20	1950					
0.46	0.980	16	1568	3	294			
0.48	0.984	9	886	5	492			
0.50	0.986	3	296	9	887			
0.52	0.989			16	1582			
0.54	0.991			23	2279	1	99	
0.56	0.993			26	2582	3	298	
0.58	0.993			15	1490	6	596	
0.60	0.995			3	299	10	995	
0.62	0.995					19	1891	
0.64	0.996					30	2988	
0.66	0.996					28	2789	
0.68	0.996					3	299	
$\text{sum} = \left[\sum_i \tau_i \cdot W_j \right] \times 100$			9434		9905		9955	
$\text{dsum} = \frac{\text{sum}}{10000}$			0.9434		0.9905		0.9955	
$\text{lsum} = [-\lg(\text{dsum})] \times 100$			2.53		0.42		0.20	
标准化 C. C. 值			2.33-0.22-0					

同样, 测得透镜镀膜后的无反射光谱透过率后, 按表 2 程序计算出其 C. C. 值。

经数值计算表明, 镜片、减反射膜和镜片镀膜后的 C. C. 值有如下关系:

$$\text{单镜片: } C.C._{\text{镀膜后}} \cong C.C._{\text{玻璃}} + C.C._{\text{膜}} \quad (1)$$

$$\text{多镜片系统(镜头): } C.C._{\text{镜头镀膜后}} \cong C.C._{\text{玻璃总体}} + C.C._{\text{膜系总体}} \quad (2)$$

式中 $C.C._{\text{玻璃总体}}$ ——按 $\prod_{i=1}^j (T_{i, \text{玻}})$ 计算的透过率计算求得, $C.C._{\text{膜系总体}}$ ——按 $\prod_{i=1}^j (T_{i, \text{膜}})$ 计算的透过率计算求得。

如果要求镜片涂镀减反射膜后获得理想的彩色还原, 即 $C.C. = C.C._{\text{标准}} = 8-0-0$, 那么减反射膜的彩色贡献应为 $C.C._{\text{膜}} = C.C._{\text{标准}} - C.C._{\text{玻璃}}$ (3)

根据公式(3)给出的 $C.C.$ 值选择减反射膜, 即为完善的彩色校正膜, 可实现对玻璃的彩色还原。

六、计算实例

用于 10 倍变焦距彩色摄影镜头减反射膜系的设计思想和计算结果

1. 设计思想

图 1 中曲线 c 为与标准 $C.C.$ 值(8-0.4-0)对应的光谱透过率。比较曲线 a 、 b 、 c 可见, 造成彩色平衡失调的主要原因是 10 倍变焦距镜头的蓝光吸收过大, 其中国产玻璃的镜头尤为严重。因此必须设法提高蓝光透过率; 另一方面作为实际使用的需要, 还必须考虑到整个镜头光路长, 透镜数量多, 光在界面的损失较大, 因此需要尽量提高镜头在整个可见光谱区的透过率, 以提高成像质量。所以, 减反射膜系的选择原则应是采用适当的单、双层膜进行彩色校正, 并在保证彩色还原的前提下尽量施加多层减反射膜。

2. 设计方法

用于镜头减反射膜的设计方法有两个:

(1) 根据摄影镜头的无反射光谱透过率, 计算所需要减反射膜系总的彩色贡献 $C.C.$ 值, 再用膜系自动设计程序设计一个满足镜头彩色还原, 各界面以涂镀单层或多层减反射膜为主, 另有一个界面涂镀适宜的彩色校正膜(如非规整双层膜^[9]或多层膜)的膜系。

这种方法的关键在于使用自动设计程序设计出具有给定要求的彩色校正膜。如图 1 曲线 b 所示的肖特玻璃镜头, 可施加一个类似曲线 d 光谱透过的膜层进行校正。

(2) 在不用膜系自动设计程序的情况下, 可采用试探计算法, 根据镜头总的无反射光谱透过率, 选择适当减反射膜系同镜头各相应界面匹配, 用电子计算机计算出总的光谱透过率及其 $C.C.$ 值, 然后与标准 $C.C.$ 值相比较, 如果不满足要求, 可再相应地修改某一个或几个界面的减反射膜, 然后进行计算, 再比较, 直至符合彩色还原标准为止。

这种方法虽然繁琐一些, 但比较直观, 又不需自动设计程序, 因此有一定的灵活性。

3. 计算结果

基于上述算法并结合施加校正膜进行减反射膜系的设计。设计中根据镜头所用的 10 种玻璃, 选择四类减反射膜和两种彩色校正膜共十几个不同中心波长的膜系进行匹配计算。为了比较说明, 同样对肖特玻璃镜头也进行相应计算。其计算结果列入表 3, 光谱曲线绘于图 3。

从表 3 和图 3 计算结果不难看出, 摄影镜头通过减反射膜和校正膜进行彩色校正后, 可以明显改善镜头的彩色还原特性。施加多层减反射膜有助于镜头的总透过率的提高, 如方

表 3 国产玻璃和肖特玻璃两种镜头施加不同减反射膜系的光谱透过率计算值及其 C. C. 值

Table 3 Calculated value of spectral transmittance characteristics and C. C. value for two kinds of glass, one is made in our country and another being Schott type with different plans of anti-reflection coatings

	减反射膜方案	减反射膜系结构特点	平均透过率 (0.44~0.64 μ)	C. C. 值
国产玻璃镜头	1	双层 II, 其余为不同 λ_0 单层膜	47%	11.3—0—0.8
	2	双层 II+7 个多层, 其余单层膜	53%	12.6—0—0.7
	3	双层 II+7 个多层, 其余单层膜	58%	18.0—0—1.2
肖特玻璃镜头	4	双层 II, 其余为不同 λ_0 单层膜	67%	11.8—0—1.1
	5	双层 II+5 个多层, 其余单层膜	71%	9.95—0—0.7
	6	双层 I, II, 6 个多层, 其余单层膜	73%	10.2—0—0.3
	7	双层 III, 其余多层膜	76%	9.94—0.24—0

案 6 所示, 透过率可达 73% 左右; 通过“近理想”彩色校正膜还可以进一步提高镜头透过率, 如方案 7 所示, 可达 76% 左右。然而对于国产玻璃的镜头, 由于对短波吸收过大而难以实现较理想的校正。

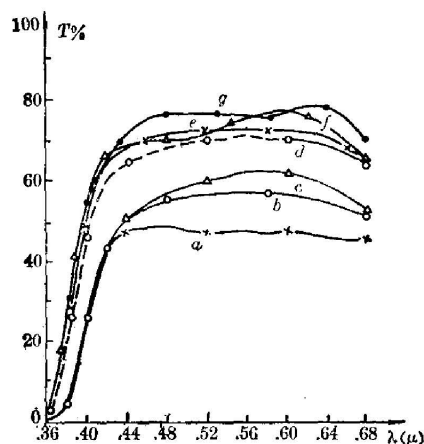


图 3 国产玻璃和肖特玻璃镜头采用不同方案减反射膜系后的计算光谱透过率及其彩色还原

Fig. 3 Calculated spectral transmittance and color contribution of photographic objective from glass made in our country and Schott glass with different plans

应当指出, 计算中由于未用自动设计程序设计出理想校正减反射膜系(包括校正膜), 而是采用试探法逐步逼近求得, 因此表 3 和图 3 数据尚不是最佳计算结果。

表 4 给出设计的一组肖特玻璃镜头按方案 5 减反射膜系计算的彩色贡献。

表中 $C. C._{玻璃}$ 、 $C. C._{膜}$ 和 $C. C._{镜头}$ 皆由总透过率计算所得。若按公式(2), 则 $C. C._{镜头} = C. C._{玻璃} + C. C._{膜} = 10.11 - 0 - 0.65$ 。可见两者很接近, 足见近似公式(2)的适用性。

七、初步结论

变焦距摄影镜头的彩色还原是个综合性问题, 必须首先从光学设计引起重视, 并在玻璃

表 4 肖特玻璃的 10 倍变焦距镜头采用方案 5 减反射膜系计算的彩色还原
Table 4 Color reducing of anti-reflection coatings of 10× zoom photographic objective from Schott glass with plan 5

透镜序号	玻璃牌号	折 射 率	镀膜面数	选匹减反射膜	减反射膜的 C. C. 值
1	ZF ₆	1.76	双	单 层	0—0.7—1.56
2	ZK ₉	1.62	双	单 层	0.25—0—0.32
3	K ₂	1.50	双	非均匀多层	0—0.06—0.03
4	LaK ₃	1.74	双	单 层	0.48—0—0.52
5	QK ₁	1.47	单	三 层	0—0—0.15
6	ZF ₇	1.81	单	单 层	0.54—0—0.64
7	ZK ₉	1.62	双	单 层	0.25—0—0.32
8	ZBaF ₄	1.62	单	三 层	0.11—0—0.3
9	LaK ₃	1.74	双	单 层	0—0.89—1.79
10	LaK ₃	1.74	单	单 层	0—0.44—0.9
11	ZF ₃	1.72	双	单 层	0—0.85—1.65
12	LaK ₃	1.74	双	单 层	0—0.89—1.79
13	BaK ₇	1.56	双	非均匀多层	0.36—0.4—0
14	ZF ₇	1.81	单	双 层 II	1.32—3.07—0
15	K ₂	1.50	单	非均匀多层	0—0.03—0.02

C. C._{玻璃} = 12.0—0.4—0, C. C._膜 = 0—1.49—2.54 校正后 C. C._{镜头} = 9.95—0—0.7

材料选择和减反射膜的匹配方面同时着手解决。

(1) 变焦距摄影镜头的减反射膜一般不能按通常的以增加光透过为目的的思想方法考虑,还必须着眼于彩色还原标准,合理地选择减反射膜系进行匹配,而且应采用单层、双层、多层减反射膜同彩色校正膜相结合的方法,使镜头的彩色还原和光谱透过率同时获得提高。

(2) 减反射膜具有彩色校正作用,其中单层和双层具有明显的选择性光谱透过,可用来改善摄影镜头的彩色失调;多层宽带减反射膜具有平坦型的光谱透过,彩色贡献较小,但可以提高可见光谱区的透过,有利于镜头成像质量;而大幅度的彩色校正应由适宜的彩色校正膜实现。

(3) 单镜片和多镜片系统的彩色贡献可按近似公式(1)和(2)考虑和计算。对于多镜片光学系统,其减反射膜系总的彩色贡献不能按诸界面减反射膜的 C. C. 值相加,应由诸膜系相乘的总透过率计算求得。由表 4 的实例可知,如果减反射膜总的彩色贡献按诸膜的 C. C. 值相加,有 $C. C._{\text{膜}} = \sum_i C. C._{i} = 0—4.12—6.68$, 可见同表中计算的 $C. C._{\text{膜}} = 0—1.49—2.54$ 相差甚大。同理,对诸玻璃(镜头)总的彩色贡献也必须这样处理。

(4) 使用目前国产玻璃制作的 10 倍变焦距镜头,应尽量少用重火石玻璃和镧冕玻璃

(如 ZF_7 和 LaK_8 等), 同时还必须对所用玻璃的短波透过率进行筛选, 否则难以靠减反射膜和校正膜实现较为理想的彩色还原。除非象表 3 中的方案 1, 对其透过率有较大的损失。

根据上述原则, 我们设计了国产玻璃的 II 型 10 倍变焦距镜头, 透镜由原来 16 片减到 14 片, 少用 ZF_6 和 LaK_3 玻璃各一块, 同时对材料做了筛选, 结果使镜头的无反射透过率和彩色还原均有所提高。施加减反射膜后的计算平均透过率达 65%, $C. C. = 10.6-0-0.6$ 。

参 考 文 献

- [1] A. E. Murray; *J. O. S. A.*, 1956, **46**, No. 10 (Oct), 790.
[2] J. A. Dobrowolski; *Appl. Opt.*, 1979, **18**, No. 12 (6 Jun), 1897.

The contribution of anti-reflective film to the colour restoration characteristics of photographic lenses

Qi Yu

(*Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica*)

(Received 24 August 1981)

Abstract

According to the American colour standard ANSI, the colour restoration of photographic lenses is discussed in this paper.

The effect of light absorption of lens glasses on the colour balance is pointed out and the function of anti-reflection coating to the improvement of colour restoration characteristics of lenses is analysed in detail. The colour contribution of various kinds of anti-reflection coating is calculated also. The design, calculation and results of anti-reflection coatings for a $10\times$ zoom lens have been given. The result shows that if the anti-reflection coatings is chosen reasonably, the transmittance and colour restoration characteristics of lenses both can be improved greatly.