

研究论文

# 染料云的形态结构表征—染料的 径向分布与投影密度分布\*

夏培杰\*\* 赵文芳 史瑶

(中国科学院感光化学研究所, 北京 100101)

## 摘 要

彩色影像的最小像元—染料云的形态结构的表征有两种方法: | 种是染料云的染料浓度的径向分布, 另| 种是染料云的投影密度分布. 前者| 般是从染料云形成过程的模拟计算得到; 后者是从微密度计对染料云的扫描测得. 本文提出了将染料的径向分布转换成相对投影密度的| 种近似计算方法, 从而使两种形式的表征方法相互联系起来, 这为进| 步优化染料云形态的研究打下基础.

**关键词** 染料云形态, 影像结构, 染料云

在现代卤化银彩色照相体系中, 染料云是构成彩色影像的最小基元, 它的形态结构将对彩色影像质量产生重要影响<sup>[1]</sup>, 因而受到照相科学家的密切关注. 影响形成的染料云的形态结构的因素很多, 包括涂层中的银含量, 卤化银的颗粒大小和形态, 卤化银颗粒在显影时的还原速率, 彩色显影剂氧化产物(QDI)在明胶层内的扩散速率, 卤化银颗粒周围的成色剂生成染料的偶合速率以及 QDI 的脱氨和磺化速率等. 如果体系中采用的是以油珠形式的分散性成色剂, 则形成染料云的形态结构还必然与成色剂油珠大小, 油珠内成色剂的浓度和 QDI 在油珠界面与成色剂发生界面偶合反应的比速率常数等因素有关. 由此可见, 染料云的形成是一个十分复杂的物理化学过程. 目前对染料云形态结构的表征有两种方法: 一种是染料的径向分布表示法, 这种方法主要采用于描述染料云形成过程的研究中, 如染料云形成的数学模型的设计<sup>[2,3]</sup>; 另一种是染料云的投影密度分布表示法, 这种方法比较直观, 常被采用于实验测量研究染料云形态时, 由测微密度计作定向扫描获得<sup>[4]</sup>. 然而, 这两种方法如能相互转换或单向转换, 则意义更大, 因为这样人们即可

1997 年 6 月 29 日收到来稿.

\* 国家自然科学基金委资助项目(批准号: 29473139)

\*\* 通讯联系人

从染料云形成过程出发来预测实验结果;也可从实验结果来推测染料云形成的过程.为此目的,本文实现了将染料的径向分布转换成投影密度分布的方法.

## 1 染料的径向分布转换成相对投影密度分布的原理和方法

### 1.1 染料云的形成过程与染料的分布

涂层中的卤化银颗粒,曝光后进行彩色显影时,在卤化银还原成银的同时其颗粒表面生成显影剂的氧化产物(QDI),此QDI会不断地向周围作近似于球形对称的扩散(即径向扩散).当QDI在扩散途中遇上成色剂油珠时,则会与油珠内的成色剂发生界面偶合反应并生成染料.这种在显影的银颗粒周围所形成的大量的离散的含染料的油珠构成了染料影像的基元,被称之为染料云或染料球.在文献[3]中我们曾采用数模模拟了染料云的形成动力学过程,并可获得染料云中染料浓度的径向分布.典型的染料浓度的径向分布如图1中的曲线所示,其横坐标是以颗粒中心为球心的染料云的相对半径(用半径 $r$ 除以颗粒半径 $a$ 来表示),纵坐标是油珠内的染料浓度.虽然从这些分布曲线可以推测出染料云的结构特点,但是不够直观也不能直接与实验所得的微密度计的结果进行比较,为此需设法将其转变成相对的投影密度分布.

### 1.2 染料云的相对投影密度分布

图2是染料云半球的剖面示意图.半球中心的空心位置是卤化银颗粒经显影和漂白后形成的空泡(vacuole),空泡的半径近似等于卤化银的颗粒半径 $a$ .染料云内部的明胶介质中的油珠分布如图2中左半球所示,可认为是随机均匀分布的,油珠内的染料浓度如图1所示是随染料云的半径 $R$ 而变化的.

染料云的投影密度是指当一条很细的光束透过染料云时由于光衰减所产生的光密度.在描绘染料云的轮廓或投影密度的分布时,通常是沿着染料云的直径方向进行扫描或按一定的间距进行测量.假设染料云是球对称的,所以一般在进行投影密度计算时只计算从球心到染料云的边缘的光密度即可.为了将染料的径向分布转换成染料云的投影密度分布,对体系作以下的简化和假设:

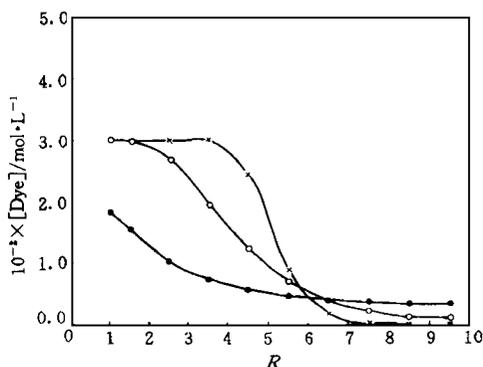


图1 几种典型染料云的染料浓度的径向分布曲线  
Typical radial distributions of [dye] in dye clouds

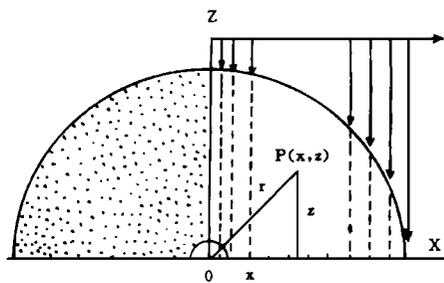


图2 从染料浓度的径向分布转换成投影密度分布的示意图  
Schematic for transformation of a radial distribution into a projected density distribution

1) 假设将染料云的球心设定在空间直角坐标的原点处, 中间空泡的半径为  $a$ , 染料云外边界处的半径为  $b$ .

2) 设定入射光束是从与  $X-Y$  平面垂直的  $Z$  轴方向射入, 光束的移动轨迹为从原点开始沿  $X$  轴作等间距步进, 步长  $\Delta X = a$ , 直至染料云的边界  $b$ . 故测量点(节点)的  $(x, y)$  坐标定在  $x_0 = 0, x_1 = a, x_2 = x_1 + a, \dots, x_n = x_{n-1} + a = b$  以及所有点的  $y = 0$ . 为了突出中心空泡对投影密度的影响, 在  $x_0$  与  $x_1$  的中点上再增加一个节点  $x_{01} = a/2$ .

3) 假定朗伯-比耳定律仍然有效<sup>[5]</sup>, 即入射光的光密度与光所透过距离上单位截面的染料量成正比.

对于本文所讨论的体系而言, 所生成的染料集中在分散性油珠内, 可以采用离散化的数值积分方法近似地求得光密度与油珠内的染料浓度和光束透过的长度的关系. 首先, 可把光束在染料云内的透过长度(图2内虚线所示)分割成等距离  $n$  段, 每段长为  $\Delta z$ , 计算时取  $\Delta z = a/2$ . 当长度为  $\Delta z$ , 光束的投影面积为  $\Delta S$  时的体积内的染料量可近似地用下式表示:

$$\Delta M(x, z_i) = n_d \cdot C(x, z_i) \cdot V_d \cdot \Delta z \cdot \Delta S \quad (1)$$

这里,  $n_d$  为单位体积内的油珠数;  $V_d$  为油珠的平均体积;  $C(x, z_i)$  是染料在油珠内的浓度, 它与所在的坐标位置有关; 下标  $i$  为透过光束段的序号, 坐标  $z_i$  是代表第  $i$  段的两端点间中点坐标, 所以  $c(x, z_i)$  是每一个分割段两端点处油珠内染料浓度的平均值, 即:

$$C(x, z_i) = [c(x, z_i - \frac{\Delta z}{2}) + c(x, z_i + \frac{\Delta z}{2})] / 2$$

在指定的光束入射位置  $x$  处, 光束透过染料云的长度  $l(x)$  内的总染料量为:

$$M(x) = \sum_i \Delta M(x, z_i) = n_d \cdot V_d \cdot \Delta S \cdot \Delta z \sum_{i=1}^n c(x, z_i) \quad (2)$$

按照朗伯-比耳定律, 光密度正比于单位投影面积中的染料量, 因此式(2)可写成:

$$D(x) \propto \frac{M(x)}{\Delta S} = n_d \cdot V_d \cdot \Delta z \sum_{i=1}^n c(x, z_i)$$

或

$$D(x) = K \cdot n_d \cdot V_d \cdot \Delta z \sum_{i=1}^n c(x, z_i) \quad (3)$$

这里  $K$  为比例因子, 与染料的摩尔吸收有关, 对于相同的染料而言,  $K$  可作为一个常数. 由以上导出的式(3)是表示在染料云某一位置上的投影密度与油珠内染料浓度的关系式, 其中  $n_d$  和  $V_d$  可从实验或计算得到. 在实际运算时, 我们常取节点坐标  $z'_i$  来代替中点坐标  $z_i$ , 此时式(3)可改写成:

$$D(x) = K \cdot n_d \cdot V_d \cdot \Delta z \left[ \frac{C(x, z'_1)}{2} + \frac{C(x, z'_{n+1})}{2} + \sum_{i=2}^n c(x, z'_i) \right] \quad (3')$$

式(3)和(3')的差别仅在于数值计算时  $z$  坐标的取值点不同, 后者是目前常用的梯形法求函数积分的数值算法. 无论是式(3)中的  $C(x, z_i)$  与式(3')中的  $C(x, z'_i)$  都可用三次自

然样条函数内插的方法<sup>[6]</sup>来求得, 只要将图 2 所示的直角坐标 $(x, z_i)$ 坐标转换相应的球坐标 $r_i$ , 随后采用三次自然样条函数插值法<sup>[6]</sup>从径向分布求得的 $c(r_i)$ 代入式(3)或(3')计算出 $D(x)$ . 此后, 改变 $x$ 值, 即移动一个新测量点, 重复上述计算过程, 直至超越染料云的边界, 这样即可将染料浓度的径向分布转换成染料云的相对投影密度分布.

## 2 结果与讨论

以上所述的转换算法通过用 FORTRAN77 算法语言编制成一个例行子程序, 使用时与模拟染料云形成过程的主程序相联. 该子程序的主要输入参数是油珠内染料浓度的径向分布数据, 输出即为相对投影密度随扫描方向( $X$ 轴)变化的分布数据, 此数据可以直接通过 Rolard DXY 绘图仪作图输出.

图 3 是由染料云形成的动力学模型<sup>[5]</sup>计算得到的不同时间的染料浓度的径向分布曲线. 经过上述的转换算法得到的相应的相对投影密度分布曲线见图 4. 所谓相对投影密度是指表达式(3)或(3')中的比例因子 $K$ 是未知时的情况, 对于同种染料而言,  $K$ 值为常数.  $K$ 是与染料摩尔吸收有关的因子, 它可通过实验测量获得. 图 4 中曲线峰值左边光密度下降现象是由于卤化银颗粒所处的位置造成的, 即所谓染料云的空泡所致. 从图 4 中染料云的投影密度分布曲线可以看到, 彩色影像的像元—染料云尺寸虽然要比黑白影像的像元—银的尺寸大数倍以上, 但由于其投影密度形态不像银那样致密, 因此一般来说彩色染料影像的颗粒度较黑白影像好, 但在卤化银颗粒尺寸相同的条件下, 其分辨率较差.

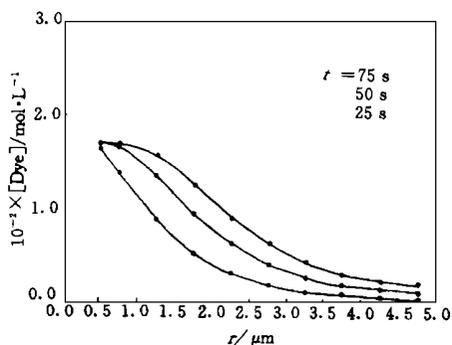


图 3 不同显影时间形成的染料浓度沿染料云的径向分布  
Radial distributions of [dye] formed at different  
developing time

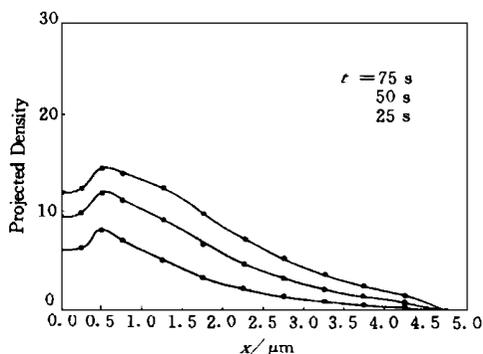


图 4 由图 3 的染料径向分布转换得到的相应的投影密度分布  
Corresponding projected density distributions obtained from  
transformation of the radial distribution of [dye] in Fig. 3

染料云的投影密度分布在彩色影像结构的分析上是很重要的, 此表征方法较直观, 因此数学模拟彩色影像形成过程所得到的染料浓度的径向分布转换成染料云的投影密度分布就很必要, 这为进一步研究染料云形态的优化打下了基础.

## 参 考 文 献

- 1 Kriss M A. Image structure. In: James T H, ed. *The Theory of the Photographic Process*. New York: Macmillan, 1977. 592
- 2 Spencer A P. Modeling film dye yield with a Series of single grain reaction- diffusion calculation. In: *The International East-West Symposium ( II ) Factor Influencing the Efficiency of Photographic Imaging*. Hawaii: SPST& SPSTJ, 1988. D-40
- 3 夏培杰, 赵文芳, 史瑶. 彩色卤化银体系中染料云形成的动力学模型. 感光科学与光化学, 1998, 16(1): 22~ 31
- 4 Van Veelen G F. The morphology of color images formed by color development with substantive couplers. *Photogr. Sci. Engng.*, 1971, 15(3): 242~ 250
- 5 Kowaliski P. In: James T H, ed. Sensitometry of color films and papers. *The Theory of the Photographic Process*. New York: Macmillan, 1977. 525
- 6 上海机械学院和安徽省计算中心. FORTRAN 应用程序库. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1994. 8

## CHARACTERIZATION OF DYE CLOUD MORPHOLOGY DYE RADIAL DISTRIBUTION AND PROJECTED DENSITY DISTRIBUTION

XIA Peijie\*    ZHAO Wenfang    SHI Yao

( Institute of Photographic Chemistry, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, P. R. China)

### ABSTRACT

There are two ways to characterize the morphology of dye cloud: one is the radial distribution of dye around a silver halide grain, which could be generally obtained from a numerical simulation or calculation for dye cloud formation; another is the distribution of projected densities of a dye cloud, which could be experimentally obtained from measurements via scanning of a microdensitometer. An approximate mathematic transformation, suitable for silver halide color imaging system with dispersion couplers, from the radial distribution of dye into the distribution of the relative projected densities has been proposed and derived.

**Key words** morphology of dye cloud, image structure, dye cloud

---

\* To whom correspondence should be addressed.