

高性能像增强器荧光屏粉层设计

李世龙^{1,2}, 石峰^{1,2}, 张太民^{1,2}, 刘照路^{1,2}, 袁渊^{1,2}, 刘晓健^{1,2}, 聂晶^{1,2}, 张晓辉^{1,2}, 李丹^{1,2}

- (1. 微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065;
2. 北方夜视科技集团股份有限公司, 云南 昆明 650223)

摘要: 高性能荧光屏能够有效提升微光像增强器性能, 而荧光屏的性能主要取决于粉层的特性。粉层本质上是由荧光粉堆积而成, 因此基于堆积理论关于粉层的研究将有助于指导荧光屏的制备工艺, 使之得到高质量粉层, 进而提升荧光屏的性能。基于经典粉末堆积理论, 结合实际制作工艺过程, 以特定型号的荧光粉为例, 通过理论分析得出该型号荧光粉最佳粉层厚度及相关制备工艺参数。该方法可以在首先保证粉层最佳厚度的基础上, 尽可能地使粉层致密度达到最优, 从而得到一个更为优化的粉层结构, 使荧光屏的性能更佳。

关键词: 荧光屏; 粉层; 致密度; 厚度

中图分类号: O471 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.S220002

Powder layer design of high performance image intensifier phosphor screen

Li Shilong^{1,2}, Shi Feng^{1,2}, Zhang Taimin^{1,2}, Liu Zhaolu^{1,2}, Yuan Yuan^{1,2}, Liu Xiaojian^{1,2}, Nie Jing^{1,2}, Zhang Xiaohui^{1,2}, Li Dan^{1,2}

- (1. Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China;
2. North Night-Vision Science & Technology Group Corp. Ltd., Kunming 650223, China)

Abstract: The high performance phosphor screen can effectively enhance the performance of low light level image intensifiers. The performance of phosphor screen mainly depends on the nature of the powder layer. The powder layer is essentially formed by the accumulation of phosphor grains, and therefore the related character research of the powder layer based on powder stacking theory is helpful to guide the actual production process to obtain higher quality powder layer, thereby enhancing the performance of the screen. Therefore, a theoretical analysis of the powder layer density based on the classic powder stacking theory was made, and combined with the actual production, some further related studies for the best powder layer thickness were obtained, taking a certain type of phosphor for example. The result shows that the powder layer first should be possible to achieve the optimum thickness, and then make the density to the maximum, so can obtain the better powder layer, hence, the performance of phosphor screen will get better.

Key words: phosphor screen; powder layer; compact density; thickness

收稿日期: 2016-08-05; 修订日期: 2016-09-03

作者简介: 李世龙(1985-), 男, 硕士, 主要从事无机非金属材料及石墨烯材料方面的研究。Email: shilonglee@163.com

0 引言

荧光屏被广泛应用于电真空光电探测器中,承担着电光转换的重要作用,特别在像增强器中,作为主体构成部件之一,其主要作用是将电学图像转换为光学图像^[1]。

荧光屏作为微光像增强器的输出端,其性能参数直接影响到整管性能指标,而荧光屏的性能主要取决于粉层的性质。荧光屏的粉层实质上是由荧光粉颗粒堆积而成,因此运用粉末颗粒堆积理论对粉层相关性质进行研究,将有助于指导实际生产工艺获得质量更高的粉层,进而提升荧光屏的性能参数。除荧光粉的本身性质外,粉层的致密度和厚度是影响粉层表面平整度、牢固度、荧光屏发光效率和分辨率等性能参数的主要因素。因此,文中引用经典堆积理论对粉层致密度进行了理论分析,并结合实际生产所使用的 P20 荧光粉对粉层厚度进行了相关研究。

1 粉层致密度模型

由于粉层是由荧光粉颗粒堆积而成,粉层的致密度越高也就意味着颗粒堆积密度越大,而如何获得最大堆积密度一直以来是粉末冶金中主要研究问题。因此,引用粉末冶金研究中常用的经典堆积理论来分析粉层致密度。

结合笔者制作不同种类及型号的荧光屏所积累的经验与理论分析得出:荧光粉颗粒堆积受诸多因素影响,其中主要因素包括:粉末粒度分布、粉末颗粒形状、粉末颗粒表面化学特性、颗粒之间的摩擦力以及颗粒的团聚。在这些因素中,粉末粒度是影响最大且人为可操作性最强的,所以在此仅考虑粒度与粉层致密度的关系。

根据经典堆积理论将荧光粉粒度分布分为连续和不连续两种情况。采用 Furnas、Westman 和 Hugill 为代表的研究人员相同的思路^[2-3],认为荧光屏粉层这个颗粒堆积系统中,荧光粉颗粒都是具有不同大小的球状且粒度是不连续分布的。在堆积过程中,当小颗粒恰好填入大颗粒所形成的空隙时便形成最密堆积。例如,有 3 种尺寸大小的颗粒,中颗粒应恰好填入粗颗粒的空隙,细颗粒填入中、粗颗粒的空隙,

这样就会达到一个最密堆积状态。把这样的一个思想推广到多种尺寸颗粒的情况下,根据 Furnas 的推导,荧光粉粒度不连续分布的情况下,粉层达到最密堆积应满足以下的 Furnas 方程:

$$\frac{\text{CPFT}}{100} = \frac{R^{\lg D} - R^{\lg D_s}}{R^{\lg D_L} - R^{\lg D_s}} \quad (1)$$

式中:CPFT 表示小于某一尺寸的累计百分数; D 表示与 CPFT 相对应的颗粒尺寸; R 为通过相邻两筛孔的颗粒量之比; D_s 为最小颗粒尺寸; D_L 为最大颗粒尺寸。

可以看出,假设荧光粉粒度是不连续分布,根据以上的堆积理论,粉层达到最紧密堆积状态下,粉粒类似于晶体的空间点阵排列,而在实际的荧光屏粉层制作过程中,荧光粉始终处于动态的混合作用之下,这种理想状态是不可能保持的^[4]。由混合机理可知,荧光粉粉层制作完成后,实际上粉层中的粉粒处于无序的不规则排列状态。因此,这种将荧光粉粒度看作不连续尺寸颗粒,依据堆积理论得出的最紧密堆积状态与荧光屏粉层的实际情况并不完全相符合。

依据 Andreasen 提出的连续颗粒尺寸的分布与堆积理论^[5],将荧光粉看作颗粒的尺寸是一种连续分布的情况,那么,粉层中荧光粉的堆积形式就是相同的一种统计类似情况。这样荧光粉的粒度分布就满足如下方程:

$$\frac{\text{CPFT}}{100} = \left(\frac{D}{D_L} \right)^n \quad (2)$$

在该理论下,即便在荧光屏粉层体系中不断加入越来越大的粉粒,由于大粉粒的体积总是细小粉粒总量的恒定分数,这显然在荧光屏粉层制作中是不可能实现的。

在实际的荧光屏粉层结构中,粉粒的大小总是有限的,而且根据应用要求通常会将荧光粉粒度限定在某一个区间范围内。因此,要将该理论用来分析荧光屏粉层结构,必须对方程(2)进行合理的修正。

依据荧光屏粉层构成特点,粉粒堆积体系中必定存在最小粒径粉粒,这一值与荧光粉的制备技术相关。所以,在此引用 Dinger 和 Funk 对 Andreasen 方程进行了修正^[6],在荧光粉粉粒分布中设定最小粉粒粒径,那么,粉层构成中的粉粒分布就满足如下所示

的 Dinger-funk 方程:

$$\frac{CPFT}{100} = \frac{D^n - D_s^n}{D_L^n - D_s^n} \quad (3)$$

如果假定粉层堆积中的最小粒径趋于无限小的话, Dinger-funk 分布与 Andreasen 分布实质上是一样的。虽然看起来只是增加了最小粉粒粒径——这一项限定条件, 在此修正下, 运用经典的颗粒尺寸分布和堆积理论就可以进行荧光屏粉层实现最紧密堆积设计, 实现粉层致密度的最大化, 进而满足对荧光屏粉层高分辨力、高耐场强的要求。

2 最佳粉层厚度实验研究

以目前所使用的 P20 荧光粉进行实验研究分析, 在图 1(a)中给出该种荧光粉的粒径分布情况, 从图中可以看出粉末颗粒的尺度主要分布在 2~5 μm。粉层发光效率、粉层厚度和荧光粉粉粒粒度大小之间密切相关, 图 1(b)给出了发光效率最高时的粒度与粉层厚度的关系。

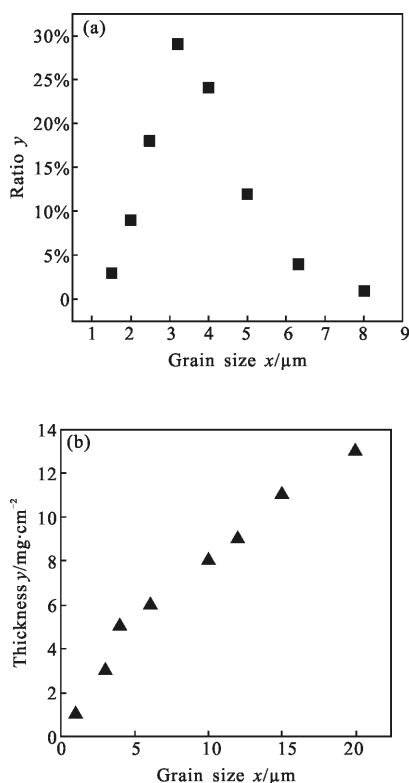


图 1 粒度分布及不同粒度对应的最佳粉层厚度的关系

Fig.1 Relationship between particle size distribution and optimum thickness of the powder layer vs grain size

实验所使用的该型号荧光粉粒度分布如表 1 所示。

表 1 实验型号荧光粉粒度分布

Tab.1 A certain type of phosphor particle size distribution

Size /μm	1.5	2	2.5	3.2	4	5	6.3	8
Ratio	3%	9%	18%	29%	24%	12%	4%	1%

实验所使用的该型号荧光粉不同粒度对应的最佳粉层厚度如表 2 所示, 其中最佳厚度对应粉层发光效率最大时对应厚度。

表 2 荧光粉粒度分布与最佳粉层厚度关系

Tab.2 Relationship between particle size distribution and optimal thickness

Size /μm	1	3	4	6	10	12	15	20
Thickness /mg·cm⁻²	1	3	5	6	8	9	11	13

结合 P20 荧光粉粒度分布的实际情况, 将表 2 中粒度为 1、3、4、6 μm 的情况进行了线性拟合, 得到了如图 2 所示的图像。

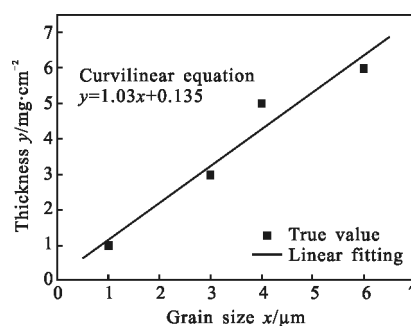


图 2 厚度与粒度的拟合结果

Fig.2 Fitting results of thickness and size

从图 2 中可以得到在 1~6 μm 范围内, 粉层的最佳厚度和粒度满足方程:

$$y=1.03x+0.135 \quad (4)$$

那么将表 1 中的粒度情况代入方程(4)中, 就可以得到对应的粉层最佳厚度, 如表 3 所示。

表 3 实际使用荧光粉粒度分布与最佳粉层厚度关系

Tab.3 Relation of particle sizes distribution and optimum thickness in actual application

Size / μm	1.5	2	2.5	3.2	4	5	6.3	8
Thickness / $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$	1.68	2.20	2.71	3.43	5.0	5.29	6.32	8.38

P20 粉的最佳厚度与不同尺度的粒度百分比含量具有密切关系,在此,将不同尺度粉末颗粒的百分含量作为其对最佳厚度的影响因子系数,将不同粒度分布下所对应的最佳厚度相加,就可以得到以不同颗粒尺度不同比例粉末颗粒混合的粉层最佳厚度。

结合表 1 和表 3 的数据,可以得到 P20 粉的最佳厚度为:

$$H=0.03\times 1.68+0.09\times 2.195+0.18\times 2.71+0.29\times 3.431+0.24\times 5+0.12\times 5.285+0.04\times 6.315+0.01\times 8.375=3.90129\text{ mg/cm}^2$$

那么,对于目前所使用的 P20 荧光粉,笔者根据实验所测得的不同粒度的百分比分布情况进行数据拟合得到如图 3 结果。

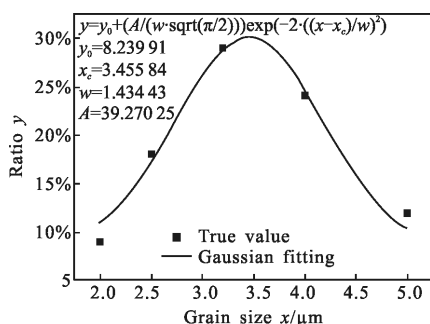


图 3 P20 不同粒度分布百分比

Fig.3 Percentage of different particle size distributions of P20

由上图可知,拟合得到不同粒度的百分比含量与粒度大小的关系满足方程:

$$y=8.24+21.86\times\exp(4.84-1.4x) \quad (5)$$

因此,对于不同批次的 P20 荧光粉,首先抽样检测其主体部分的粒度大小,对于符合方程所示的情形,直接参考方程(5)就可以确定不同粒度的分布百分比,再根据方程(4)就能求解出粉层最佳厚度。如果主体部分粒度大小与方程(5)不符,就需要对其进行修正,具体就是沿 x 轴进行合理平移,然后根据方程(4)就可以计算得到最佳厚度。

3 总结

通过对荧光粉粒度与粉层致密度和厚度的理论

研究,结合在荧光屏制作过程中所使用的荧光粉颗粒情况和对荧光屏性能参数要求,提出了一种提升荧光屏粉层性能的方法。

首先根据 Dinger-funk 方程计算得到最紧堆积情形所对应的颗粒尺度分布,再根据计算结果对荧光粉颗粒进行再加工和混合配料,最后使用具有合理配比的荧光粉混料进行刷粉,得到的粉层堆积密度就更大一些,这样一来,粉层的致密度就会更好。

再者,结合目前所大量使用的 P20 荧光粉实验测试参数,拟合得到了粉层最佳厚度与粒度的关系(方程(4))和 P20 荧光粉粒度与百分比含量关系(方程(5))。那么在刷粉过程中,根据荧光粉粒度情况计算得到的最佳厚度,进而可以推算出每一个屏的载粉量,通过改变刷粉工艺以达到粉层最佳厚度的结果。

此外,对于设定了荧光屏粉层厚度的情形,可以反推算出相应的最佳厚度,再通过方程(4)和(5)可以得到需要的粒度分布情况,继而根据粒度分布进行配料,使用这样的混料进行刷粉不仅可以满足粉层厚度的要求,而且可以使粉层达到最佳厚度。

不过粉层的致密度和最佳厚度并不是统一的,所以在实际刷粉过程中,应该从发光效率达到最高的目标出发,综合考虑荧光粉粒度与致密度及最佳厚度的关系,首先尽量做到粉层达到最佳厚度,在此条件下,使粉层致密度提高到最大,这样所得到的粉层性能就越好,进而达到荧光屏性能的最优化。

参考文献:

- [1] Xiang Shiming, Ni Guoqiang. The Principle of Photoelectronic Imaging Devices[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999: 77-85. (in Chinese)
- [2] Dinger D R, Funk J K. Particle size analysis routines [J]. *American Ceramic Society Bulletin*, 1989, 68(8): 1406-1408.
- [3] Westman A E R, Huggill H R. The packing of particles [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1930, 13: 767-779.
- [4] Andreasen A H M, Zur Kenntnis des Mahlgutes [J]. *Kolloidchemische Beihefte*, 1928, 27: 6-12.
- [5] Andreasen A H M. Uber die Gultigkeit des stokes schen gesetzes fur nicht kugelformige teilhen [J]. *Kolloid Z*, 1929, 49(2): 175-179.
- [6] Funk J E, Dinger D R. Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 1998, 13(5): 890-895.