

影响荧光粉静电涂敷质量诸因素

李集田 牛惠辉 侯庭辉

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 对U型节能灯采用静电涂敷荧光粉工艺, 影响涂层质量的各种因素进行分析, 其中包括高压选取, 玻管及荧光粉电阻率与加热温度的确定, 喷枪设计等, 最后给出涂层常见缺陷及克服方法。

1 引言

荧光粉静电涂敷工艺是在自制单工位实验涂敷机上完成的, 其工作原理和组成如图1所示。

空气压缩机输出压缩空气, 经过调节阀调节适当压力, 使流量计为50L/min的气流流量, 再经过油水分离并过滤, 得到干燥空气进入文丘里式供粉器, 把荧光粉吸入管道中, 并且混合成气-固二相粉流从喷枪中喷出, 工作时U型玻管开口向下夹在固定夹具上, 喷枪上下运动, 当喷枪上升到最顶端(放电针靠近玻管弯曲内壁)时, 电磁阀打开, 并有雾化粉流从喷枪喷出, 当喷枪退出玻管时, 关闭电磁阀, 停止喷粉, 这一同步运行控制过程是依靠装在同轴上的两个凸轮完成的, 涂敷前把喷枪和玻管分别与静电高压电源负、正端(地)相联, 当喷枪向上运动伸入玻管中时, 放电针与玻管就形成电晕放电, 从喷枪喷出的粉粒与空间负离子碰撞并吸附负离子而带负电荷, 在电场作用下飞向玻壳并为玻壳内壁吸附, 为使吸附的电荷迅速导走, 不妨碍后续粉粒的吸附, 要求玻管电阻率不能太大, 因此在喷涂时需对玻管进行加热, 为确保粉粒带电良好, 和不堵塞管道, 在供粉器上用电炉加热, 去掉水分, 并用搅拌器搅拌荧光粉以保证粉流连续供应。

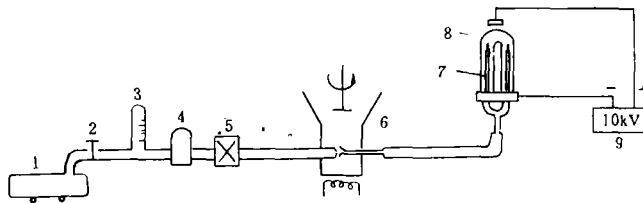


图1

1—空气压缩机; 2—调节阀; 3—流量计; 4—油水分离器; 5—电磁阀; 6—供粉器; 7—喷枪; 8—玻管; 9—高压电源

然而,要获得均匀、牢固涂层是各种工艺条件的综合结果,影响涂层质量的因素是多方面的,其中包括,静电高压确定,玻管加热温度,粉的加热温度,通气流量与速度以及喷枪结构设计等。

2 静电高压的选取

荧光粉静电涂敷机理是建立在放电针与玻管内壁之间产生电晕放电的基础上的,由非自持放电过渡到电晕放电的外加电压称作放电电压,其放电条件为^{[1][2]}

$$d = \frac{1}{a} \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (1)$$

$$a = A \cdot p \cdot e^{-\frac{BP}{E}} \quad (2)$$

式中 d 为极间距离; a 为电子碰撞电离系数; γ 为阴极过程电离系数,大气中 $\gamma=10^{-2}$;为气体压力(mmHg); A, B 为气体常数,对空气 $A=15/\text{cm} \cdot \text{mmHg}$, $B=365\text{V}/\text{cm} \cdot \text{mmHg}$; $E=V/d$ 平均电场强度,而我们这里由喷枪放电针与玻管组成的圆筒形放电系统。

电场分布极不均匀,取平均场强 E ,计算等效间 \bar{d} 代入(1)式,在未放电之前。对圆筒形放电系统电场分布为:

$$E = \frac{U}{\ln R_2/R_1 \cdot \gamma} \quad (3)$$

式中 U 为极间电压; R_1, R_2 分别为放电针半径和玻管内径,且 $R_1=0.05\text{cm}$, $R_2=0.5\text{cm}$,其平均场强,等效极间距离为:

$$\bar{E} = \frac{1}{2} \frac{U}{\ln R_2/R_1} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} = \frac{U}{\bar{d}}$$

$$\bar{d} = 2 \ln(R_2 \cdot R_1) \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} = 0.21(\text{cm})$$

代入(1)、(2)式,放电电压

$$U = \frac{B \cdot p \cdot d}{\ln \frac{A \cdot p \cdot d}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}} \approx 11(\text{kV})$$

这是放电电压的理论值,为静电高压电源设计提供理论依据。由文献^[3]计算得知。粉粒带电最大值为

$$q_{\max} = 4\pi\epsilon_0 a^2 \cdot E_d \quad (4)$$

$$E_d = \frac{U}{\ln R_2/R_1} + \frac{\rho d}{2\epsilon_0} \quad (5)$$

说明极间电压 U 越高,带电量越大,因而附着力越强;但当带电量过大时,由于同种电荷的相斥作用,对涂层的牢固度增加不大;此外,当电压过高时,将电晕放电过渡到火花放电,对涂层有破坏作用。在紧凑型 U 型灯的条件下,经反复实验表明选取静电高压为 10kV 为宜。

3 粉粒电阻率与加热温度

粉粒带电过程,是在放电针和玻管带电空间,粉粒与负离子碰撞,并吸附负离子实现的,如果把每个粉粒小球等效为电容 C 、电阻 R 串联电路,那么,就要求粉粒从带电到玻管的运行期间内能保持电荷与积累电荷;当粉粒被玻管吸附后,又能迅速放掉电荷以防阻止后续粉粒的吸附,粉粒在放电空间飞行速度^[4]

$$v = \frac{qE}{6\pi\eta a} \quad (6)$$

式中 η 为空气粘度系数,对标准大气压下 $\eta=9.8 \times 1.81 \times 10^{-6}(\text{Pa} \cdot \text{s})$; a 为粉粒小球半径取 $a=5\mu\text{m}$; q 为带电电荷,由(4)式确定,代入(6)式:

$$v = \frac{2}{3} \cdot \frac{\epsilon_0 E^2 a}{\eta} \quad (7)$$

E 为平均电场强度,当 $U=10^4$ 伏时, $\bar{E}=4 \times 10^6 \text{V/m}$, $\epsilon_0=8.85 \times 10^{-12}(\text{C/V} \cdot \text{m})$ 代入(7)式。最后,计算 $U=2.6\text{m/s}$,粉粒在带电空间渡越时 $t=(R_2-R_1)/v=0.17 \times 10^{-3}\text{s}$ 。即要求由 R 、 C 等效电路组成的粉粒,能在 0.17×10^{-3} 秒时间内不会把电荷放掉,由 RC 电路放电方程:

$$Q(t) = Q_0 \cdot e^{-t/RC} \quad (8)$$

因此,要求 $R \cdot C \geq t$, 其中

$$C \approx \epsilon \cdot \epsilon_r \pi a$$

$$R \approx \rho \cdot \frac{2}{\pi a}$$

$$R \cdot C \approx 2\rho\epsilon \cdot \epsilon_r \geq t$$

于是

$$\rho \geq \frac{t}{2\epsilon_0 \cdot \epsilon_r}$$

当取 $\epsilon_r=2$ 时:

$$\rho \geq \frac{17 \times 10^{-5}}{4 \times 8.85 \times 10^{-12}} \approx 5 \times 10^6 (\Omega \cdot \text{m})$$

实际测量表明,当荧光粉加热到 100°C 时,电阻率为 $2.2 \times 10^7 (\Omega \cdot \text{m})$ 。这与理论分析一致;实验表明,粉粒电阻率在上述值时,吸附性良好;相反,如果荧光粉不进行加热,由于吸水性导致电阻率下降,吸附性很差,得不到良好涂层。

4 玻管电阻率与加热温度

对玻管电阻率的要求基于下述理论,当带电粉粒被玻管内壁吸附以后,应迅速把电荷导走(通过接地电极),不得有电荷堆积,防止对后续到达的带电粉粒排斥作用,其放电时间是这样考虑的:对 $3-10\mu\text{m}$ 粉颗粒而言,荧光粉涂层厚度为 $3-4$ 颗粒,以确保足够的发光效率。如认为粉粒是均匀达到管壁而吸附的,则间隔时间为: $t' = 0.17 \times 10^{-3} / 4\text{s}$ 。于是根据放电方程:

$$Q(t) = Q_0 \cdot e^{t/R.C}$$

则有

$$RC \geq t'$$

$$RC = p \frac{l}{s} \epsilon_0 \epsilon_r \frac{s}{d}$$

$$= p \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\pi ol}{d} \frac{d}{\pi ol}$$

$$= p \epsilon_0 \epsilon_r$$

所以

$$p \leq \frac{t'}{\epsilon_0 \epsilon_r}$$

取 $\epsilon_r = 8$ 时:

$$p \leq \frac{0.17 \times 10^{-3}}{4 \times 8 \times 8.85 \times 10^{-12}} = 6 \times 10^5 (\Omega \cdot \text{m})$$

经过实测当玻管加热到 200°C 时,玻管电阻率为 $1.1 \times 10^5 (\Omega \cdot \text{m})$,实验表明在该电阻率下,可得到均匀牢固涂层。涂敷以后,应使玻管放在室温下迅速冷却,这时电阻率上升至 $2 \times 10^8 (\Omega \cdot \text{m})$,使带电涂层在 10 小时以内不会掉粉。

5 输送管道气流速度

喷枪工作时垂直插入 U 型管内,且上下运动,气流从喷嘴喷出时把粉带出形成固—气二相粉流,以实现荧光粉的雾化,粉粒同时受到重力和阻力作用,达到平衡时^{[5][6]}式中

$$F = F_0$$

$$F = mg = \rho_1 4/3\pi a^3 \cdot g$$

$$F_0 = C_0 1/2\rho_2 v^2 \cdot S$$

则有

$$v = k \sqrt{\frac{8\rho_1 g a}{3C_0 \rho_2}} \quad (11)$$

(11)式中 ρ_1, ρ_2 分别为荧光粉和空气密度 ($\rho_1 = 5 \times 10^3 \text{kg/m}^3, \rho_2 = 1.2 \text{kg/m}^3$); C_0 为阻力系数, 近似取平板面积 $S = \pi a^2$ 的阻力系数为 0.88; K 为管道放置条件系数取 $K = 7$, 代入(11)

$$v = 7.7 \text{m/s}$$

实验结果表明, $v = 8.8 \text{m/s}$ 。当速度小时, 不足以把粉带出, 当过大时, 破坏涂层, 使涂层掉粉。

6 喷 枪

荧光粉是通过插入玻管内喷枪喷出的, 因此, 喷枪既是放电系统的组成部分(放电针加负高压), 也是使荧光粉雾化, 输粉部件, 其结构如图 2 所示, 喷枪由枪体, 喷嘴, 放电针和导流子组成, 枪体由一根长 200mm, 外径 5mm, 内径 4mm 的紫铜管制作, 在一端开出張角为 90 度、张口为 6mm 的喷嘴, 在喷嘴中心轴线上安装一根放电针, 它是用钨丝($\Phi 1$), 弯成直角与枪体焊在一体的, 在放电针顶端磨成尖端以利于放电; 在放电针上套一导流子, 导流子与放电针通过螺纹联接, 调节导流子高度可以改变喷出粉流形状, 直接影响涂层均匀性。

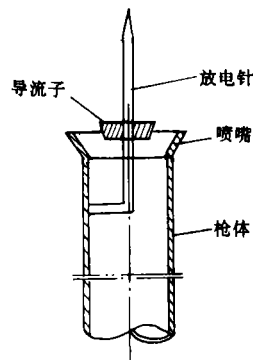


图 2

放电针露出喷嘴平面 6—8mm,当短于 6mm 时,影响放电,使粉粒带电不足,固而下管不上粉或涂层不牢,当长于 8mm 时,限制枪体插入玻管的高度,使弯管处上粉不足。

导流子外形以倒三角形为宜,其外径为 2.5mm;当外径大于 3mm 时,影响粉流喷出,使玻管弯曲部分上粉不足;当外径小于 2mm 时,导流子失去调节粉流作用;

导流子放电针上的位置直接影响涂敷均匀性,当导流子上表面高于喷嘴平面时涂层产生鱼鳞状缺陷,因此最好导流子平面低于喷嘴平面;当导流子外径为 2mm 时,可把导流子提高离喷嘴以 3mm 以上,也可获得均匀涂层;

此外,在喷枪制作中,要对枪体进行校直,表面磨光,放电针导流体装正,使导流体与枪体在同一轴线上,以形成均匀的圆对称间隙,这是获得整个灯管均匀涂层的前提。

7 涂层缺陷、产生原因及克服方法

(1)整管不上粉:未通气或管道堵塞;未加高压或加热温度太低;未加玻管电极等(这时往往伴随有大量粉溢出现象);采取相应措施即可克服;

(2)整管上粉不牢:高压太低,温度偏低或外电极太远;

(3)整管涂层太薄:通气量太小或管道堵塞;导流子与喷嘴间隙太小,应上调导流子;

(4)整管涂层太厚:通气量过大;导流子与喷嘴间隙过大,应下调导流子;

(5)两管涂层厚薄不一样:主要是两枪不对称所致,如两枪的导流子与喷嘴的间隙不一样,应适当调节导流子高度;两枪放电针长短不一,应调节喷枪高度;此外当一支喷枪放电针处有堆积粉时也会造成两管厚度不一致;

(6)单管涂层不均匀:

A. 鱼鳞状缺陷:导流子位置偏高,应下调即可消除;

B. 竖直线纹:喷嘴不圆或有边缘毛刺,枪体外表面不光滑,电场不是圆对称所致;

C. 竖直阴阳脸(周向不均匀):枪的位置不正(不在玻管中心线上),导流子与喷嘴间隙周向不均;

D. 局部花纹:是局部放电所致,通常是由于夹具绝缘不良,引起放电所致;

E. 单管下部涂层不均或偏薄:是因为下部温度太低造成,通常这一缺陷发生在初始涂敷的几支灯管,过一段时间,随温度上升而自行消失。

(7)玻管弯曲部分不上粉:是因导流体外径过大或其位置太低,应适当调节位置可以消除;

(8)玻管弯曲部分涂层太薄:枪的位置太低,或喷涂时间起动太晚,可通过提高喷枪位置和改变凸轮角度控制喷涂时间得以调整。

参 考 文 献

[1]成都电讯工程学院,《气体放电及离子管》,人民教育出版社,1961

[2]杨津基,《气体放电》,科学出版社,1983

[3]李集田等,静电涂敷荧光粉带电机理,光学机械,1992,6

[4][日]菅义夫,《静电手册》,科学出版社,1981,482

[5][英]L. M. 米尔恩—汤姆森,《理论流体动力学》,机械工业出版社,1984

[6]王鹏等,影响玻壳静电涂敷质量的因素,电光源,1989,5,21

Some Factors to Effect on Layer Quality for Electrostatically Coating Phosphors

Li Jitian, Niu Huihui and Hou Tinghui

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

In this paper some factors to effect on phosphor layer quality using electrostatic deposition techniques for U—shape fluorescent lamps are analysed, including high voltage power, resistivity of the glass tubes and phosphor particles, and their heated temperatures during coated phosphors, design of the sprayers etc. Finally this paper represents the defects often occurred and the way to overcome them.