

荧光屏加固黑印形成机理与抑制方法研究

李世龙 杨武丽 石峰 张晓辉 李阳

Formation mechanism and inhibition method of reinforcing black marks on phosphor screen

LI Shilong, YANG Wuli, SHI Feng, ZHANG Xiaohui, LI Yang

引用本文:

李世龙, 杨武丽, 石峰, 等. 荧光屏加固黑印形成机理与抑制方法研究[J]. 应用光学, 2026, 47(1): 66–72. DOI: 10.5768/JAO202647.0101008

LI Shilong, YANG Wuli, SHI Feng, et al. Formation mechanism and inhibition method of reinforcing black marks on phosphor screen[J]. Journal of Applied Optics, 2026, 47(1): 66–72. DOI: 10.5768/JAO202647.0101008

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202647.0101008>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

微光像增强器常用荧光粉性能研究

Research on properties of commonly-used phosphors for low-level-light image intensifiers

应用光学. 2022, 43(6): 1207–1216 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0604023>

微光像增强器纳秒级荧光屏余辉时间测试系统

Development of afterglow time test system for nanosecond fluorescent screen of low-level-light image intensifier

应用光学. 2022, 43(6): 1130–1137 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0604012>

微光像增强器光晕消失时间测试方法

Test method for halo disappearance time of low-level-light image intensifier

应用光学. 2024, 45(3): 652–658 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0304001>

像增强管激光封接过程中的气密性研究

Research on air tightness of image intensifier tube during laser sealing

应用光学. 2022, 43(6): 1202–1206 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0604022>

基于光晕的微通道板黑点检测方法

Halo-based black point detection method of microchannel plate

应用光学. 2022, 43(6): 1145–1152 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0604014>

浅析光纤倒像器固有误差对应用的影响

Influence of inherent error of fiber-optic image inverter on application

应用光学. 2022, 43(6): 1153–1157 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0604015>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2026) 01-0066-07

引用格式: 李世龙, 杨武丽, 石峰, 等. 荧光屏加固黑印形成机理与抑制方法研究 [J]. 应用光学, 2026, 47(1): 66-72.

LI Shilong, YANG Wuli, SHI Feng, et al. Formation mechanism and inhibition method of reinforcing black marks on phosphor screen[J]. Journal of Applied Optics, 2026, 47(1): 66-72.



在线阅读

荧光屏加固黑印形成机理与抑制方法研究

李世龙^{1,2}, 杨武丽^{1,2}, 石 峰^{1,2}, 张晓辉^{1,2}, 李 阳^{1,2}

(1. 微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065; 2. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘 要: 为解决微光像增强器荧光屏粉层加固过程中, 粉层面频繁出现黑印导致成品率低的问题, 探究了仪器的转速、时间、加固液浓度及温度对加固过程的影响。在加固过程中, 粉层面出现加固黑印的概率随着加固转速增大、加固时长延长、硅酸钾溶液浓度降低和荧光屏温度升高而减小。据此分析了微光像增强器荧光屏粉层的加固机理, 即加固过程主要是离心作用克服硅酸钾分子与水分子间氢键作用的过程, 水分子的蒸发作用是次要因素, 但在高温时也会成为主要因素之一。通过减弱氢键作用改进加固方式, 成品率得到显著提升, 验证了机理的合理性。

关键词: 微光像增强器; 荧光屏; 粉层加固; 硅酸钾溶液

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202647.0101008

Formation mechanism and inhibition method of reinforcing black marks on phosphor screen

LI Shilong^{1,2}, YANG Wuli^{1,2}, SHI Feng^{1,2}, ZHANG Xiaohui^{1,2}, LI Yang^{1,2}

(1. Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China; 2. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: In order to solve the problem that black marks appear in the powder layer on phosphor screen of low-light image intensifier during the process of reinforcing, the effects of rotation speed, time, concentration of potassium silicate solution, and temperature on the reinforcement process were explored. As the rotation speed increases, the time is appropriately prolonged, the concentration potassium silicate solution decreases and the temperature increases, the frequency of black marks on the powder layer reduces. Based on this, the reinforcement mechanism of powder layer on phosphor screen of low-light image intensifier is proposed, which is mainly the process of centrifugal action overcoming the hydrogen bond between potassium silicate and water molecules. Evaporation is a second factor, but can also be a major factor at high temperature. By weakening the hydrogen bond and improving the reinforcement approaches, the reinforcement yield is significantly improved, which verifies the rationality of the mechanism.

Key words: low-light-level image intensifier; phosphor screen; powder layer reinforcement; potassium silicate solution

引言

荧光屏是微光像增强器的重要组成部分^[1-3], 作为图像输出端, 它主要承担着把微通道板的倍增

电子信号转换为光信号, 并输出光信号以供观察和记录^[4-6]。已有的研究报道主要集中在发光亮度和粉层制备方面, 通过探究不同的荧光粉与工艺

收稿日期: 2025-01-06; 修回日期: 2025-05-11

基金项目: 政府型号研制项目 (2110WG006-1)

第一作者: 李世龙, E-mail: shilonglee@163.com

的匹配性,实现电光转化的最大化目标^[7-11]。因此在荧光屏的制作过程中,应保证荧光屏的粉层面没有影响最终观察效果的脏点及划痕等^[12],这就对荧光屏的制作工艺提出了较高的要求。目前常见的荧光屏是以荧光粉作为发光材料,借助黏合剂的作用,通过离心沉淀法、刷涂法、喷涂法等将荧光粉颗粒均匀涂覆在传像元基底上得到粉层^[13-14],再经过蘸取硅酸钾溶液对粉层进行加固后,涂覆有机膜,然后镀铝制得铝层,再经高温焙烧去除有机膜,最终形成铝封式荧光屏,它能在高速电子束的激发下发射出可见光^[15]。

在荧光屏研制过程中,荧光屏加固工序是一道关键工序。因为荧光粉颗粒与基底仅依靠烧结作用黏合在一起,牢固度非常差,粉层表面极易脱落,若不采取有效的加固措施,会影响荧光屏的可靠性和耐场强特性。加固过程中,一方面粉层自身牢固地黏连在一起,另一方面粉层与基底牢固地黏连在一起,防止后续工艺中粉层颗粒受到外力作用而与基底分离。对于高质量的荧光屏而言,则要求粉层加固后具有良好的牢固度,且不出影响视场均匀性的脏点及划痕。现用的加固方法是室温条件下蘸取硅酸钾溶液,在高速离心作用下使硅酸钾溶液均匀覆盖粉层表面。根据长期以来的加固工艺经验得出,增加硅酸钾溶液浓度可明显提升加固牢固度,但也会引起荧光屏显示缺陷增多。如果加固方法不当的话,会在边缘处极易形成部分区域发光失效,在电子轰击下该区域不发光,与周围发光区域形成鲜明对比,通常将这种显示缺陷称之为“黑印”。黑印的形成机理在于该处荧光粉失效,以广泛使用的硫化物荧光粉来说,水分子长时间驻留会与硫化物发生水解反应,造成结构崩塌,进而破坏发光材料的发光中心,无法实现在接收阴极射线激发后发光^[16],形成视场中的黑暗区域,简称为“黑印”,严重影响了荧光屏的制作成品率。因此,对加固机理进行研究,并根据机理改进加固方式十分必要。

针对上述问题,本文主要探究了加固转速、加固时间、硅酸钾溶液浓度及加固温度对加固结果的影响,分析了微光像增强器荧光屏粉层加固原理,并基于该原理对加固方式进行了改进,验证了机理的合理性,有效解决了荧光屏粉层加固过程中粉层面频繁出现黑印导致成品率及效率低的问题。

1 荧光屏粉层的制备及加固实验设计

1.1 材料及仪器

荧光屏制作及加固所需原材料主要包括封接合格的传像元基底、丙酮(分析纯)、自制有机胶液、荧光粉、高密度海绵、硅酸钾溶液(质量分数28%)、去离子水、乙醇(分析纯)等。

荧光屏胶层及粉层制作在荧光屏刷涂屏系统内完成;荧光屏去胶层在德国 Thermo Scientific WU6100 高温除膜设备内完成;荧光屏粉层加固在国产 KW-4A 匀胶机上完成。荧光屏粉层均匀性由德国徕卡 M165C 体视显微镜观测;荧光屏粉层微观形貌由德国徕卡金相显微镜观测;荧光屏粉层厚度由德国 Bruker DektakXT 台阶仪测定;荧光屏黑印的观测通过荧光屏动态参数测试系统实现,该系统为自主研发设备,工作原理为将待测荧光屏置于高真空腔室上方,腔室下方安置有灯丝发射热电子,在电场作用下发射的热电子轰击荧光屏使之发光,在腔室的玻璃窗口处搭建显微镜放大视场,观测视场中是否存在黑印。

1.2 荧光屏粉层制备

为保证实验结果的准确性,本次荧光屏粉层制备工艺统一采用稳定性较好的刷涂法。封接合格的荧光屏经丙酮清洗后,涂覆一层有机胶层,筛选胶层面无瑕疵的荧光屏,将荧光粉均匀涂洒,随后,在荧光屏转动过程中,用高密度海绵沿荧光屏径向来回轻刷至颗粒均匀涂覆在胶层上。将粉层表面无损伤、凸起点、通孔的荧光屏放置在高温除膜设备中除去胶层后,用于后续的加固实验。

1.3 加固实验设计

通过控制变量法分别探究参与加固过程的几项重要因素,即匀胶机的转速、时间、加固液浓度及加固温度。

1) 固定加固时间、硅酸钾溶液浓度及加固温度,将 100 只荧光屏在加固转速分别为 6 000 r/min、7 000 r/min、8 000 r/min、9 000 r/min 及 9 900 r/min 时进行加固,统计黑印出现的频率,探究加固转速的影响。

2) 其次,固定加固转速、硅酸钾溶液浓度及加固温度,设定加固时间分别为 7 s、9 s、11 s、13 s、15 s、17 s、20 s,分别统计 100 只荧光屏在不同加固时间下的加固结果,探究加固时间的影响。

3) 接着,固定加固转速、加固时间及加固温度,统计 100 只荧光屏在硅酸钾溶液质量分数分别为 0.10%、0.15%、0.17%、0.20%、0.22%、0.25% 及 0.30%

时,黑印出现的频率,探究加固液浓度的影响。

4)最后,保持加固转速、加固时间、硅酸钾溶液浓度条件一致,设定加固温度分别为 20℃、35℃、50℃ 及 65℃,分别统计了 100 只荧光屏的加固结果,探究了加固温度的影响。

2 结果与讨论

2.1 荧光屏粉层微观形貌分析

原子金相显微镜下,荧光粉颗粒排列紧密,粉层无通孔,表面无显著凸起点,粉层平整度及均匀性良好。台阶仪所测荧光屏中间及边缘处的厚度均为 2.6 μm 左右,厚度均一性良好,避免了因粉层边缘厚、中间薄导致的加固液无法在离心作用下扩散出荧光屏,结果如图 1 所示。

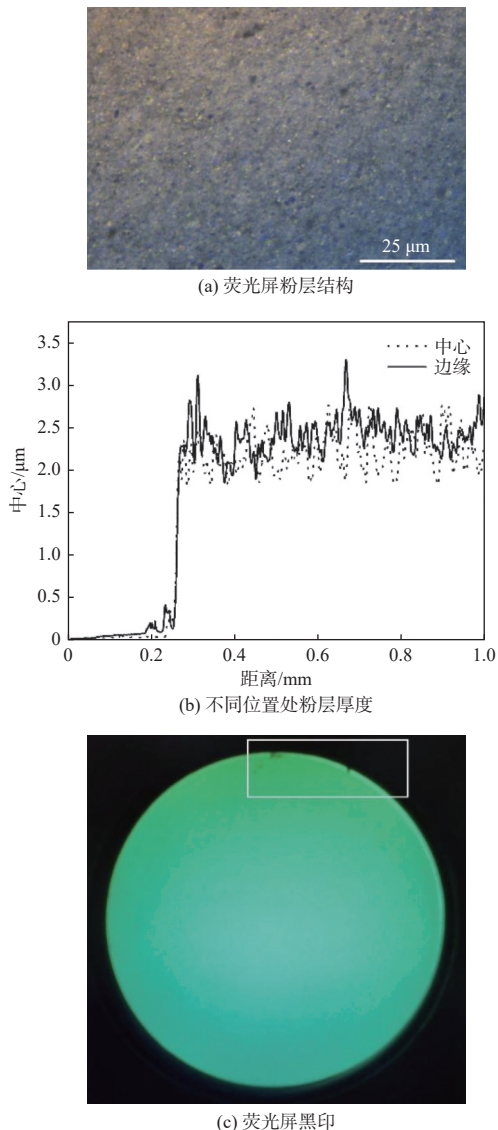


图 1 荧光屏粉层与黑印

Fig. 1 Powder layer and balck marks of phosphor screen

2.2 加固转速、加固时间与黑印出现频率统计结果分析

匀胶机在加固过程中,承担着将硅酸钾溶液通过高速离心作用快速覆盖粉层,其转速与时间是重要参数,因此,首先探究了加固转速及时间对黑印出现频率的影响。保持加固时间 15 s,硅酸钾溶液质量分数 0.20%,加固温度 20℃ 不变,通过调整加固转速,分析了加固转速与黑印出现频率的统计结果,如图 2(a)所示。转速为 6 000 r/min 时,加固结束后荧光屏边缘处均出现黑印,随着加固转速逐渐提升至 9 900 r/min,黑印出现频率降低,位置更靠外。保持硅酸钾溶液质量分数和加固温度不变,固定加固转速为 9 900 r/min,通过调整加固时间,分析了加固时间对黑印出现频率的影响。加固时间 ≤ 9 s,由于时间过短,大量硅酸钾溶液无法在离心作用下扩散出荧光屏,匀胶机旋转停止后,溶液仍留在粉层面,水分子通过缓慢蒸发作用离开,因此均留下不规则黑印。延长加固时间,多余的硅酸钾溶液能够通过离心作用扩散出荧光屏,黑印出现频率下降,随着时间进一步延长,黑

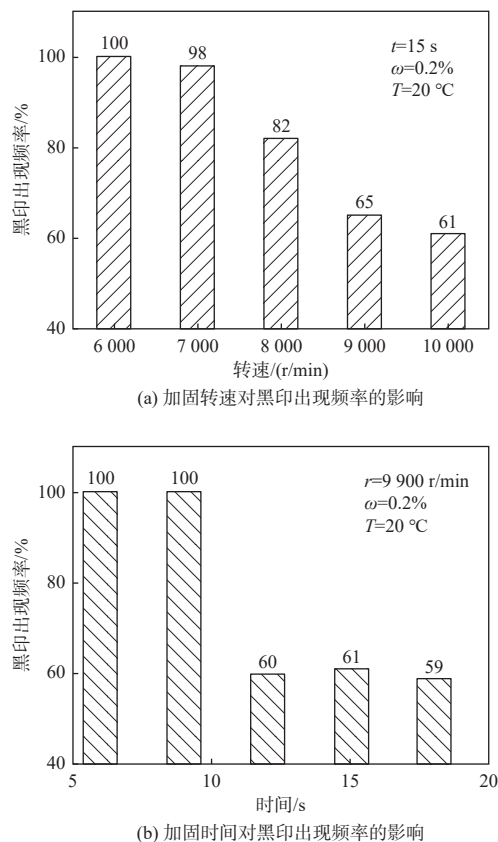


图 2 加固转速、时间对黑印出现频率的影响

Fig. 2 Effect of reinforcement rotation speed, time on frequency of black marks

印出现频率不再受加固时间影响, 如图 2(b) 所示。因此, 转速越高, 黑印出现频率越小, 位置相对靠近荧光屏边缘处。加固时间存在临界值, 低于此值, 硅酸钾溶液主要通过缓慢蒸发作用而非离心作用离开荧光屏, 易产生不规则黑印。高于此值, 黑印出现的频率显著降低, 且几乎不再受加固时间的影响。

2.3 加固液浓度与黑印出现频率统计结果分析

除仪器参数影响外, 加固液浓度往往决定着粉层牢固度的好坏及加固成品率, 因此, 对加固液浓度大小与黑印出现频率结果进行了统计分析。统计结果表明, 硅酸钾溶液浓度越低, 加固一遍成品率越高, 结果如图 3 所示。硅酸钾溶液质量分数为 0.10% 时, 黑印出现频率仅 2%, 质量分数 $\geq 0.25\%$ 时, 黑印出现频率高达 90% 及以上。然而, 当硅酸钾溶液质量分数 $\leq 0.15\%$ 时, 加固 2~3 遍才能够满足牢固度的要求, 耗费时间与人力, 质量分数 $\geq 0.25\%$ 时, 即使牢固度良好, 也因黑印出现频率过高而降低加固效率。而质量分数介于 0.17%~0.22% 的硅酸钾溶液, 既能满足加固一遍牢固度符合要求, 又有望通过改善加固方式降低黑印出现频率, 是较为合适的加固液浓度范围, 在此范围内, 黑印出现频率随硅酸钾溶液质量分数的增加而上升。

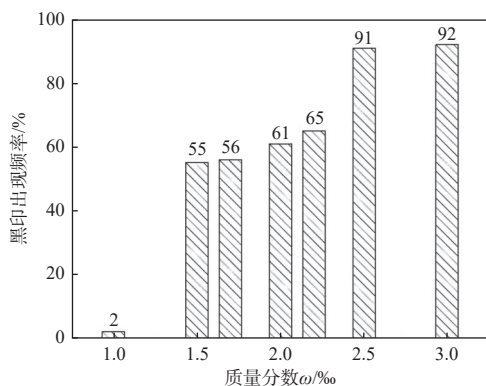


图 3 加固液浓度对黑印出现频率的影响

Fig. 3 Effect of reinforcement liquid concentration on frequency of black marks

2.4 加固温度与黑印出现频率统计结果分析

外界环境的改变也会对加固结果产生一定影响, 而外界环境最易产生变化的是温度, 因此, 进一步探究了加固温度与黑印出现频率间的关系。图 4 展示了不同浓度下温度对黑印出现频率的影响。硅酸钾溶液质量分数为 0.10% 时, 黑印出现频

率低, 受温度影响较小。随着质量分数的增加, 黑印出现频率对温度变化敏感。温度由 20℃ 上升至 50℃, 黑印出现的频率均显著降低。温度升高至 65℃, 黑印出现频率再次增加。这是由于温度过高, 荧光屏上的硅酸钾溶液蒸发速率过快, 局部蒸发速度快于旋涂扩散速度, 硅酸钾溶液未完全浸透整个粉层面, 水分子就已通过热蒸发作用离开屏面, 进而产生不规则的黑印。

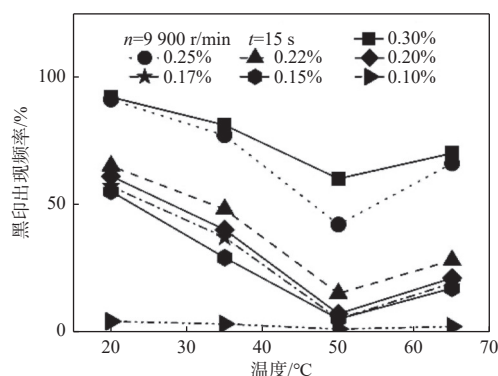


图 4 加固温度对黑印出现频率的影响

Fig. 4 Effect of reinforcement temperature on frequency of black marks

加固过程中, 加固所需时间也随温度的变化而改变。50℃ 时, 加固液从中心扩散至边缘仅需 3 s~5 s, 35℃ 时, 加固液完全离开粉层面需 9 s~11 s, 而 20℃ 时, 加固液完全甩干则需 12 s~15 s。除了成品率和加固时间, 黑印出现的位置及宽度也在随温度变化, 如图 5 所示。50℃ 加固, 黑印主要出现在粉层的最边缘处, 印迹较细, 颜色最深; 35℃ 加固, 黑印出现位置相对靠里, 印迹宽度略微增加, 颜色变淡; 20℃ 加固, 黑印出现位置进一步靠近中心, 并呈现由深到浅的散射状。因此, 一定范围内, 荧光屏温度越高, 黑印出现频率越低, 位置越靠近荧光屏边缘处, 加固所需时间越短。

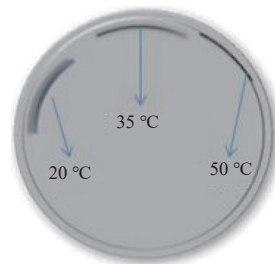


图 5 不同温度下黑印在荧光屏粉层上的主要出现位置

Fig. 5 Main position where black marks appear on powder layer of phosphor screen at different temperature

3 加固机理分析及验证

3.1 加固机理分析

加固受转速、时间、浓度及温度的影响十分显著。加固过程中,硅酸钾溶液主要受高速旋转时的向外离心作用,溶液所含水分子与硅酸钾分子的氢键相互作用,以及水分子蒸发作用的影响。加固转速、时间决定着离心作用的大小及时间,浓度及温度决定着分子间相互作用的大小,同时,蒸发速率也会受温度影响。因此,加固过程主要是离心作用克服分子间氢键作用的过程,蒸发作用是次要因素,但在高温下也会成为主要影响因素之一。

加固的转速较低、时间较短时,硅酸钾溶液受到的离心作用弱、时间短,溶液无法完全覆盖粉层表面,水分子主要通过缓慢蒸发离开荧光屏,由于蒸发速率有所差异,易在粉层面上留下不规则水印,水分子完全蒸发后,与周围粉层状态发生变化,视觉上便产生“黑色印迹”。

加固转速较高、时间合理、温度较低的情况下,水分子和硅酸钾分子同时受到高速离心作用向外扩散,此时缓慢蒸发速度可以忽略不计,由于硅酸钾分子大于水分子,所以在离心作用下硅酸钾分子的扩散速度快,因而易在荧光屏边缘聚集,导致边缘浓度和黏度同时增大。如图 6 所示,低浓度时,即使边缘处硅酸钾分子浓度增加,水分子扩散到该处时,离心作用仍大于硅酸钾分子和水分子间的氢键作用力,因此水分子能在离心作用下扩散出荧光屏而不易产生黑印。浓度较高时,溶液黏度本身较大,扩散较慢,加上离心作用使荧光屏边缘聚集了更多的硅酸钾分子,水分子经过时,与硅酸钾分子间作用力显著增加,硅酸钾分子和水分子间氢键作用力大于离心作用,同时受黏度较大影响,水分子无法及时完全扩散出荧光屏,产生黑印。

离心作用>氢键作用 氢键作用>离心作用 蒸发作用≈离心作用≈氢键

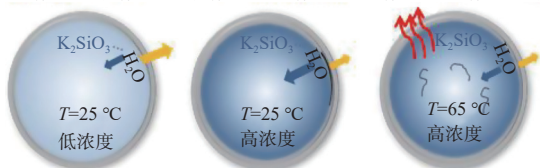


图 6 离心作用克服氢键及蒸发作用示意图

Fig. 6 Schematic diagram of centrifugation overcoming hydrogen bonds and evaporation

温度较高时分子运动剧烈,因此高浓度下,多余的硅酸钾分子能够快速扩散出屏面而非在边缘

处堆积,分布均匀性增加,加之高温使氢键作用减弱,因此,水分子经过边缘的速度较快,而能在离心作用下扩散出荧光屏,使黑印出现频率降低。随着温度进一步升高,水分子蒸发速度过快,因此加固过程中,部分通过离心作用扩散出荧光屏,部分通过蒸发作用离开荧光屏,而产生不规则的黑印。

3.2 加固机理验证

加固主要是利用离心作用克服水分子与硅酸钾分子间氢键作用的过程,便可以通过减弱水分子与硅酸钾分子间氢键作用而使水分子及时扩散出荧光屏。因此,以质量分数为 0.20% 的硅酸钾溶液为例,提出了新的加固方法以验证机理的合理性。包括在边缘处稀释硅酸钾的浓度或通过加入能与硅酸钾产生范德华力的其他分子减弱其与水分子间的作用。

1) 滴加乙醇稀释溶液浓度、破坏氢键

硅酸钾溶液扩散至边缘处时,黏度增加,扩散速度减慢,此时若能降低边缘处黏度,破坏氢键作用,水分子就能及时扩散出荧光屏。乙醇与水互溶,能与水分子形成氢键,是硅酸钾分子的不良溶剂,因此,乙醇分子与硅酸钾分子间能够产生竞争关系,从而起到稀释硅酸钾溶液浓度,降低黏度的同时,减弱硅酸钾与水分子间的作用力。如图 7 所示,加固过程中,硅酸钾溶液扩散至边缘处时,通过向屏面滴加乙醇使水分子及时扩散出荧光屏,能够显著提升成品率,缩短加固所需时间。

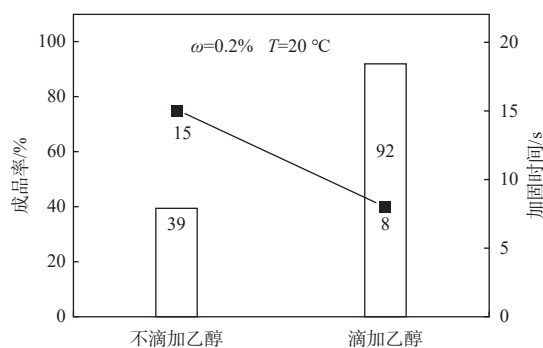


图 7 滴加乙醇对加固成品率的影响

Fig. 7 Effect of adding acetone on reinforcement yield

2) 改变组分配比调控分子间作用力

通过向硅酸钾溶液中加入一定量的乙醇,改变水与乙醇的组分配比以调控离心作用和分子间氢键作用的配比。保持硅酸钾溶液质量分数 0.20% 不变,调整水与乙醇溶剂的体积比。当水与乙醇溶剂体积比 $\leq 2:1$ 时,由于不良溶剂加入过多,硅酸钾分

析出, 不满足加固液的要求。当水与乙醇溶剂体积比 $>3:1$ 时, 对应的成品率如图8所示, 随着良溶剂水与不良溶剂乙醇组分比减小, 成品率逐渐提升。

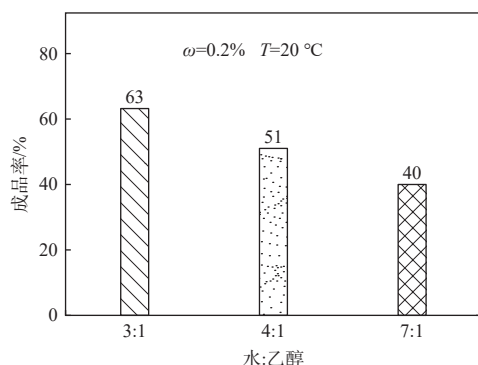


图8 水与乙醇组分比对加固成品率的影响

Fig. 8 Effect of component ratio of water to acetone solvent on reinforcement yield

4 结论

本文研究了加固转速、加固时间、加固液浓度及加固温度对加固过程的影响。转速越高, 粉层面黑印出现频率越小, 位置越靠近边缘。而加固时间存在临界值, 低于此值, 加固后屏面均出现黑印, 高于此值, 黑印出现频率降低, 且不再受加固时间的影响。除此之外, 黑印出现频率及其对温度的敏感性随硅酸钾溶液质量分数的减小而降低, 在一定范围内, 荧光屏温度越高, 黑印出现频率越低, 出现位置更接近边缘, 加固所需时间越短。因此, 加固过程主要是离心作用克服分子间氢键作用的过程, 而蒸发作用在温度较高时也会成为主要影响因素之一。通过在加固过程中滴加乙醇或改变溶剂中水与乙醇的组分比等方式减弱分子间氢键作用, 使水分子及多余的硅酸钾分子及时扩散出荧光屏, 可显著降低黑印出现频率, 实现加固成品率及效率的提升, 同时也印证了加固机理分析的合理性。

参考文献:

- [1] 向世明, 倪国强. 光电子成像器件原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 77-85.
XIANG Shiming, NI Guoqiang. The principle of photo-electronic imaging devices[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999: 77-85.
- [2] 孙默涵, 钱云生, 任莹楠, 等. 基于自动亮度控制模型的

门控型微光像增强器荧光屏亮度研究[J]. 光子学报, 2022, 51(3): 2304004.

SUN Mohan, QIAN Yunsheng, REN Yingnan, et al. Brightness of the screen of gated low light level image intensifier based on automatic brightness control model[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(3): 0304004.

- [3] 杨晔, 倪小兵, 延波, 等. 像增强器阴极脉冲与屏极亮度稳定性关系研究[J]. 红外技术, 2018, 40(7): 691-694.

YANG Ye, NI Xiaobing, YAN Bo, et al. Study on the relationship between image intensifier cathode pulse and plate brightness stability[J]. Infrared Technology, 2018, 40(7): 691-694.

- [4] 李世龙, 石峰, 张太民, 等. 高性能像增强器荧光屏粉层设计[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(增刊 2): S2200021-4.

LI Shilong, SHI Feng, ZHANG Taimin, et al. Powder layer design of high performance image intensifier phosphor screen[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(S2): S2200021-4.

- [5] 王晓霞, 曾光宇, 井娥林. 医学成像中基于像增强器感光屏的工作机理研究[J]. 科技信息, 2006(7): 23-24.

WANG Xiaoxia, ZENG Guangyu, JING elin. Research on working mechanism of photosensitive screen based on image intensifier in medical imaging[J]. Science and Techonolgy Information, 2006(7): 23-24.

- [6] ZHANG T M, SHI F, LIU Z L, et al. Phosphor screen's FM for LLL image intensifer[J]. Optik, 2015, 126(2): 208-212.

- [7] 卢杰, 常乐, 陈益新, 等. 微光像增强器纳秒级荧光屏余辉时间测试系统[J]. 应用光学, 2022, 43(6): 1130-1137.

LU Jie, CHANG Le, CHEN Yixin, et al. Development of afterglow time test system for nanosecond fluorescent screen of low-level-light image intensifier[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(6): 1130-1137.

- [8] 杨武丽, 来悦颖, 张晓辉, 等. 微光像增强器常用荧光粉性能研究[J]. 应用光学, 2022, 43(6): 1207-1216.

YANG Wuli, LAI Yueying, ZHANG Xiaohui, et al. Research on properties of commonly-used phosphors for low-level-light image intensifiers[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(6): 1207-1216.

- [9] 程宏昌, 石峰, 李周奎, 等. 微光夜视器件划代方法初探[J]. 应用光学, 2021, 42(6): 1092-1101.

CHENG Hongchang, SHI Feng, LI Zhoukui, et al. Preliminary study on distinguishment method of low-level-light night vision devices[J]. Journal of Applied Optics, 2021,

- 42(6): 1092-1101.
- [10] YANG S H, LU C Y, CHANG S J. Luminescence enhancement mechanism of ZnGa_2O_4 phosphor screen with an In_2O_3 buffer layer[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2007, 154(8): J229-J233.
- [11] PENG X K, XU H B. Monte Carlo study on point spread function of a granular phosphor screen[J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2010, 27(6): 816-822.
- [12] 邱亚峰, 常本康, 孙恋军, 等. 像增强器的荧光屏亮度均匀性测试的矫正法研究[J]. *光学技术*, 2008, 34(6): 911-913.
- Qiu Yafeng, CHANG Benkang, SUN Lianjun, et al. Research on correction method of the testing of the uniformity of image intensifier fluorescence screen brightness[J]. *Optical Technique*, 2008, 34(6): 911-913.
- [13] 刘杰, 刘键, 冷兴龙, 等. 全自动荧光粉涂覆工艺研究[J]. *半导体技术*, 2013, 38(4): 288-291.
- LIU Jie, LIU Jian, LENG Xinglong, et al. Research on automatic phosphor coating process[J]. *Semiconductor Manufacturing Technologies*, 2013, 38(4): 288-291.
- [14] 张利杰, 孙彦民, 李贺, 等. 催化剂涂覆工艺研究进展[J]. *无机盐工业*, 2023, 55(2): 19-25.
- ZHANG Lijie, SUN Yanmin, LI He, et al. Research progress of catalyst coating process[J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2023, 55(2): 19-25.
- [15] 李晓峰, 杜木林, 徐传平, 等. 影响超二代像增强器最高增益的因数分析[J]. *光子学报*, 2022, 51(3): 0304001.
- LI Xiaofeng, DU Mulin, XU Chuanping, et al. Analysis on factors affecting the maximum gain of super second generation image intensifier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(3): 0304001.
- [16] 徐叙瑒, 苏勉曾. 发光学与发光材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 95-98.
- XU Xurong, SU Mianzeng. *Optical and luminous materials* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 95-98.