

长余辉材料的路面应用和研究进展

王凤民, 吕清华

(凌源市交通运输事务服务中心, 辽宁 凌源 122500)

摘要: 长余辉材料是一种无电源、非放射性、可循环蓄光发光的功能材料, 吸光 5 ~ 10 min 可在黑暗中持续发光 12 h 以上, 在绿色交通与道路安全领域的应用潜力显著。在相关研究的基础上, 回顾了长余辉材料的发展历史, 阐述了金属硫化物、铝酸盐和硅酸盐 3 种主要长余辉材料的发光特性与发光原理, 对比分析了涂料型、水泥基、树脂基、沥青类自发光路面的技术特点, 指出当前材料存在耐水性不足、发光衰减快、路面耐久性与成本控制的适配性差等问题。研究结果表明, 自发光路面可降低夜间事故率、减少照明能耗与光污染。最后从材料改性、路面结构优化、施工工艺标准化等方面进行展望, 为长余辉材料在道路工程中的推广应用提供参考。

关键词: 道路工程; 长余辉材料; 自发光路面; 发光机理; 路用性能; 绿色交通

中图分类号: U416

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)09-0162-04

Pavement Application and Research Progress of Long-Afterglow Material

WANG Fengmin, LYU Qinghua

(Lingyuan City Transportation Affairs Service Center, Lingyuan 122500, China)

Abstract: Long-afterglow material is a power-free, non-radioactive and recyclable light-storing and luminescent functional material, which can absorb light for 5~10 min and continuously emit light in the dark for more than 12 h, showing significant application potential in green transportation and road safety. Based on existing studies, the development history of long-afterglow materials is reviewed, the luminescence characteristics and principles of three main long afterglow materials, namely metal sulfides, aluminates and silicates, are expounded, and the technical characteristics of four coating-based, cement-based, resin-based and asphalt-based self-luminous pavements are compared and analyzed, which is pointed out that the current materials have problems such as insufficient water resistance, rapid luminescence attenuation, and poor compatibility between pavement durability and cost control. The research result shows that the self-luminous pavements can reduce night traffic accidents, lighting energy consumption and light pollution. Finally, the prospects are put forward from material modification, pavement structure optimization and construction standardization, which can provide references for the application and popularization of long-afterglow materials in road engineering.

Keywords: road engineering; long-afterglow materials; self-luminous pavement; luminescent mechanism; pavement performance; green transportation

0 引言

夜间行车安全是道路工作者关心的重点内容。在夜晚黑暗的环境中, 行车视线不良, 驾驶难度增大, 尤其是在一些急弯、陡坡处, 极易发生交通事故^[1]。据统计, 山区双车道公路夜间交通量只有白天的 1/4, 但道路夜间交通事故死亡率是白天的 1.5 倍, 整个山区道路夜间的事故死亡率是白天的 4 倍

以上, 夜间不仅交通事故发生率高, 事故的严重程度也更高^[2]。

究其原因, 一方面, 常规警示标志一般立于路侧, 不利于夜间驾驶观察, 且我国仍有很大一部分道路为无照明道路, 夜间行车主要依靠车灯照明, 照明区域有限, 道路两侧轮廓模糊, 驾驶员的视野既短又窄。驾驶员在夜间的生理状态差, 易疲劳, 对速度和距离的判断易出错, 易酿成事故。另一方面, 夜间车辆少、道路空旷, 易诱导驾驶员加速, 然而, 光线暗、视线短, 加上急弯、陡坡等危险路段亮化不足, 且车速快, 会导致驾驶员视力下降、判断时间缩短、制动距离延长、非安全区扩大, 遇到紧急情况时易措手不及, 从而引发事故^[3-4]。

收稿日期: 2026-04-08

作者简介: 王凤民(1972—), 男, 本科, 高级工程师, 从事道路与桥梁建设工作。

通信作者: 吕清华(1973—), 男, 本科, 高级工程师, 从事公路建设工作。电子信箱: 1804118823@qq.com

然而,若要为所有道路铺设照明设施,则成本过高、规模过大,后期维修任务重,且这些照明设施每日的能源消耗巨大,不符合当前所提倡的“绿色发展”和“绿色交通”理念。此外,已有的照明设施不仅能源消耗大,还会形成光污染。据统计,道路照明用电量约占全国照明用电总量的20%~30%,而道路照明的电能利用率不到65%,造成严重的能源消耗与浪费。与此同时,照明设施的大量铺设,还会破坏当地的生态环境。过高的照明亮度,会对周围生物的生活习性造成影响。为解决上述问题,研究人员将长余辉材料应用于道路领域,利用其自发光的特性,提高夜晚路面的可见度。本文梳理了长余辉材料的发展历程,总结了材料特性及发光原理,介绍了长余辉材料在路面工程领域的主要应用形式,并分析了现有研究的不足与未来发展趋势。

1 长余辉材料的特性及发光原理

长余辉材料是一种能够吸收并存储可见光或紫外光能量,在照射停止后,在常温下会缓慢以光形式释放能量的特殊光致发光材料。长余辉材料的产业化技术已相对成熟,应用场景广泛,覆盖建筑装饰、常规信息显示、公共安全指示等领域,近年来还进一步拓展至信息防伪、生物医学检测、光学成像等领域。目前研究重点主要集中在金属硫化物、铝酸盐和硅酸盐3种体系。

1.1 硫化物长余辉材料

硫化物长余辉材料是最早被系统研究的长余辉发光体系。这类金属硫化物或硫氧化物长余辉材料,在弱光下吸光快,发光颜色丰富,覆盖从蓝到红的光谱范围。但该类材料的化学性质不稳定,易老化,余辉时间短。尤其是经紫外线照射后,发光性质会衰变,稳定性也会下降,应用场景受限。此外,这类材料在生产过程会释放含硫气体,造成环境污染。同时,传统硫化物长余辉材料在路面应用中常需掺入镭等放射性元素,以提高发光亮度和余辉时间。因此,这类材料发展受到限制。

1.2 铝酸盐基长余辉材料

铝酸盐基长余辉材料主要以离子为激活剂,以碱土金属铝酸盐为基质,并加入稀土离子等作为辅助激活剂制成。该材料虽然化学稳定性好、余辉时间长,但发光颜色较为单调(光波波长集中于450~520 nm,主要是蓝色至绿色光),遇水易潮解,耐水性和耐酸碱性强,合成温度高,成本也较高,应用范

围受限。

1.3 硅酸盐基长余辉材料

硅酸盐基长余辉材料以相关物质为激活剂,发光颜色集中于绿色和蓝色,其基质包括焦硅酸盐、偏硅酸盐等多种类型。该材料具有良好的化学稳定性和热稳定性,且生产所需的高纯度二氧化硅原料容易得到,制备所需温度低,因此被认为是最有前途的长余辉材料。但是其发光性能和余辉特性不及铝酸盐体系。

1.4 发光原理

长余辉材料能够稳定、高效地发出各色光,且亮度高、耐候性好、无放射性,可反复使用,这些特性使其受到研究人员的广泛关注。本文选取电子陷阱模型,对长余辉材料的发光原理进行解析。

在受到外界光激发时,电子吸收光子的能量,从基态跳到第一电子激发态的第三振动激发态。在这个过程中,由于能量守恒,分子体系能量增加;在光子吸收完成后,分子处于不稳定状态,呈现放出能量回到基态的趋势。而放出能量的途径有多种。

3种主流长余辉材料在电子陷阱模型中的跃迁路径与陷阱能级存在明显区别。

硫化物:陷阱能级浅、密度低,电子激发后快速回落复合,余辉短、衰减快。

铝酸盐基:含稀土深能级陷阱,电子被缓慢释放,余辉长、亮度高,但发光颜色单调。

硅酸盐基:陷阱深度中等,稳定性好,但载流子容量偏低,余辉性能稍弱。

2 自发光路面类型

2.1 涂料型自发光路面

涂料型自发光路面是指将自发光涂料涂覆于路面标线或指示、警告及禁止等标志上,以提高路面或周围环境的夜间可视度,达到降低夜晚交通事故发生率的目的。自发光涂料由长余辉材料、涂料成膜物质、填料和助剂等按一定比例配制而成。起初,人们将硫化物长余辉材料作为涂料中的发光材料使用,但该类材料余辉时间短、发光不稳定、耐久性差,且掺杂的放射性元素还会对环境造成污染,因此被逐渐淘汰。而铝酸盐基长余辉材料和硅酸盐基长余辉材料具有激发条件简单(日光和灯光均可激发)、余辉时间长、稳定性高、无放射性污染和良好的耐久性等优点,具有很大的应用价值。

徐建晖等^[5]采用透明反应型高分子材料、相容

剂及助剂,与长余辉材料复配后,制成路面自发光涂料,并测试其发光性能。结果表明,该涂料在实际应用中的发光时长约为6 h,可很好地应用于城市慢行道及景观道路中。董元帅等^[6]开展了类似研究,结果表明,长余辉材料的颜色和粒径,对自发光涂料的性能具有重要影响,并提出道路专用发光标线涂料的最佳配伍掺量。Zhao等^[7]对表面改性的稀土铝酸盐自发光涂料的亮度影响因素进行探究,结果表明,无水乙醇可以改善发光粉的耐水性,纳米氧化铝可以提高涂料的强度和硬度。此外,还有学者对自发光涂料在隧道内的应用进行研究。例如,冯守中等^[8]制备了2种自发光涂料,并评价其在公路隧道辅助照明中的作用效果。当前,自发光涂料作为一种高效、节能的“绿色”材料,被广泛应用于多个领域。但已有的自发光涂料仍存在耐久性差、发光颜色单调等问题。国内外学者对长余辉材料进行“有机—无机”杂化的化学改性研究也仍处于探索阶段。随着国家绿色环保政策的推行,相应的发光涂料也由溶剂型向水溶性的环境友好型方向发展,由双组分向单组分方向发展。因此,提高长余辉材料的发光强度,延长其余辉时间,开发环境友好、发光颜色多样的自发光涂料,仍是今后业界主要的研究方向。

2.2 水泥基自发光路面

水泥基自发光路面是一种以长余辉材料 and 水泥为设计原料,具有安全、美观、节能特性的新型功能路面。研究人员将长余辉材料与传统建筑材料水泥相结合,开发出水泥基自发光混合料,并对其制备过程、性能特点和应用形式进行初步研究,主要包括水泥基自发光复合材料和水泥基自发光混凝土。

水泥基自发光复合材料是由长余辉材料、反光粉、细砂及水泥等材料按一定比例配制而成,它具有白天储存光能、夜晚发光的特点。何倍等^[9]在水泥基材料中掺入长余辉材料和反光粉,制备成水泥基自发光复合材料,并对其力学性能、发光性能及发光机理进行评价。结果表明,掺入长余辉材料和适量的反光粉,不仅可以提高水泥基自发光复合材料的亮度,延长其余辉时间,还能与水泥的水化产物发生反应,提高水泥基自发光复合材料的力学强度。Gao等^[10]也开展了这方面的研究,并得出如下结论:长余辉材料的最佳掺量为25%;反光粉对水泥基材料的强度有负面影响,其掺量应控制在10%以内。此外,他们制备的超疏水发光水泥路面材料,具有良好的稳定性和自清洁性能。

水泥基自发光路面不仅满足路用材料的力学性能要求,还具有夜晚发光的功能,在夜晚可以起到指示交通、美化道路的作用。但目前学界对水泥自发光路面的研究还处于起步阶段,仍有许多尚未解决的问题,例如,长余辉材料在水泥胶浆中易发生水解,水泥的发光、透光性差,强度和耐久性低,表面的防污清洁等,这些问题还有待进一步研究解决。

2.3 树脂基自发光路面

树脂基自发光路面是指采用以有机树脂为胶结料,掺入长余辉材料和一定级配的骨料等制成的混合料铺筑的路面。树脂基自发光路面一般采用颜色较浅、具有良好透光性的树脂,有利于长余辉材料的光激发和发射。同时,树脂的黏结性好、强度高,具有良好的防腐性和耐久性,在完整裹覆长余辉材料的情况下,能够显著改善长余辉材料的耐水性。目前路面工程领域应用较为广泛的树脂包括环氧树脂、聚氨酯树脂、醇酸树脂等。

李地红等^[11]基于CYD-128环氧树脂,结合碎石和长余辉材料等,制备树脂基自发光透水混凝土,并研究了其力学强度、透水性能及发光时长的变化。研究发现,混凝土强度受到树脂掺量的影响显著,计算得出具有较高力学强度和透水系数的树脂掺量、纤维层数及骨料粒径,同时其余辉时长可达6 h。许静贤等^[12]以雨花石为骨料,基于聚氨酯树脂制备了自发光透水混凝土,在提升混凝土美观程度和发光效果的情况下,未影响其透水效果。

虽然树脂基自发光混凝土展现出优良的综合性能,但其相关研究尚处于起步阶段,大多仍以室内试验为主,未进行大规模推广应用。一方面是因为树脂和长余辉材料价格昂贵,铺筑成本较高;另一方面是因为这类材料生产还未形成体系,相关规范标准和施工工艺尚未完善,因此限制了树脂基自发光路面的推广。

2.4 沥青类自发光路面

沥青是典型的路面铺筑材料,其颜色为黑色或黑褐色,吸光性强,透光性差。长余辉材料若被沥青包裹,会极大地阻碍其对光的吸收和释放,其发光效果难以体现。因此,人们一般以树脂或陶瓷为基质,加入长余辉材料,制成夜光碎石,通过替换部分集料或调整长余辉材料的嵌入方式,制备得到沥青类自发光路面^[13]。张阳等^[14]采用最大粒径为5 mm的发光碎石等量替换细集料,保持原级配曲线基本不变,制备自发光沥青混合料。结果表明,当细集料发光

碎石替换率小于 10% 时,混合料高温稳定性、水稳定性、抗滑性能等路用指标仍满足规范要求,且发光时长可达 12 h。此外,在热拌沥青混合料摊铺后,将发光碎石撒布在其表面并一同碾压成型,使发光碎石嵌入沥青路面,也是一种实现沥青路面自发光的途径,但该方法存在发光碎石易破碎、脱落等缺点。也有研究认为,在多孔沥青混合料中灌入自发光涂料,不仅可以实现沥青路面自发光,还能够提高沥青路面的强度,提升其防水性和耐久性。

为直观地对比不同自发光路面的应用特性,本文总结了 4 种类型路面的成本、耐久性、发光效果及适用场景,结果如表 1 所示。

表 1 4 种自发光路面性能对比

路面类型	成本	耐久性	发光效果	适用场景
涂料型	低	一般	较好	标线、隧道、慢行步道、景观路
水泥基	中低	较好	中等	广场、步道、轻型交通路面
树脂基	高	优良	优	景观路、透水路面、高端园区路
沥青类	中	良好	良好	机动车道、隧道、山区危险路段

3 结 语

长余辉材料作为环保节能材料,已广泛用于建筑装饰、消防应急等领域,在道路领域,仅涂料型自发光路面应用较广,其余类型尚处于研究阶段。随着研究的深入,以及“绿色交通”“智能道路”理念的推行,长余辉材料在路面领域的应用前景广阔。

(1)长余辉材料种类多、性能差异大,存在稳定性低、耐水性差等问题,尚无适配复杂道路环境的产品,且现有材料前期余辉衰减快,后期亮度小,易被自然光线遮盖。因此,还需进一步研究如何使长余辉材料保持持续高亮度、延缓余辉衰减,并开发适配道路复杂工况的专用材料。

(2)涂料型自发光路面施工简便、成本经济,但存在溶剂污染、耐久性差等问题,未来可开发环保涂料,提升涂料性能,并丰富发光颜色。

(3)长余辉材料与水泥结合可降低成本,但面临

材料易水解等问题,需进一步研究解决方案。

(4)树脂基自发光路面前景好,但成本高,树脂老化后性能下降,需研究降本方案,并提升其抗老化性能。

(5)沥青与长余辉材料结合的意义重大。沥青的透光性差,会影响发光效果,虽然通过嵌入发光碎石等方法可改善发光效果,但其施工标准化、表面磨损等问题仍需深入研究。

参考文献:

[1] 魏建国,赵炜华,熊保林.不同因素对驾驶人夜间视认距离影响[J].中国安全科学学报,2013,23(12):21-27.

[2] 乔建刚,陈春燕,吴琼.基于驾驶行为的夜间山区作业路段安全距离分析[J].科学技术与工程,2018,18(26):226-231.

[3] 国威,潘晓东,邓其,等.驾驶员隧道段夜间行车动视点特征模糊聚类评价[J].公路工程,2013,38(6):97-101.

[4] 宋杰,张杰,杜戈.驾驶员夜间行车视觉增强新技术[J].公路,2013(3):140-144.

[5] 徐建晖,陈诚,万宏,等.长余辉路面自发光涂料研究及应用[J].公路交通技术,2017,33(6):14-16;26.

[6] 董元帅,侯芸,薛忠军.基于道路安全的蓄能发光材料配伍性研究[J].公路,2020,65(5):272-280.

[7] Zhao S, Wei W, Wu Q, et al. Study on the influence factors of the luminous intensity of the long afterglow luminous paints[C]// Proceedings of the International Symposium on Materials Application and Engineering (SMAE), Chiang Mai, Thailand, 2016.

[8] 冯守中,高巍.公路隧道新型蓄能发光材料的制备方法 & 性能试验研究[J].现代隧道技术,2020,57(4):215-218.

[9] 何倍,高英力,冷政,等.光致发光水泥基复合材料的强度与光学特性研究[J].功能材料,2019,50(7):7126-7133;7138.

[10] Gao Y L, He B, Xiao M Q, et al. Study on properties and mechanisms of luminescent cement-based pavement materials with superhydrophobic function[J]. Construction and Building Materials, 2018, 165(20): 548-559.

[11] 李地红,代函函,高群,等.发光树脂透水混凝土的制备及性能研究[J].热固性树脂,2019,34(6):36-40.

[12] 许静贤,姜雪亮,张倩.发光聚合物透水混凝土的制备及性能研究[J].混凝土与水泥制品,2017(8):28-30.

[13] 詹成根,郝增恒,张华.沥青混凝土路面明色化铺装研究现状及应用前景[J].公路,2013(10):197-199.

[14] 张阳,梁倩倩.储能缓释型自发光沥青混合料的制备及路用性能研究[J].交通世界,2020(29):25-28.