2021 年 第 21 卷 第 35 期
2021, 21(35): 14892-09
科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering
ISSN 1671—1815
CN 11—4688/T

引用格式:钱华信, 梁映平, 吴晓明, 等. 双组分道路交通标线研究进展[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(35): 14892-14900.
Qian Huaxin, Liang Yingping, Wu Xiaoming, et al. Research progress of two-component road marking[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(35): 14892-14900.

交通运输

双组分道路交通标线研究进展

钱华信[1], 梁映平[2], 吴晓明[1], 何 锐[2*]
(1. 陕西交通控股集团有限公司, 西安 710065; 2. 长安大学材料科学与工程学院, 西安 710064)

摘 要 为了有效提高双组分道路交通标线的路用性能,促进双组分道路交通标线的推广应用,通过梳理中国关于双组分道路交通标线路用性能的最新研究成果,分析了双组分道路交通标线材料体系及其固化原理,总结了道路标线耐久性的评价指标,并探讨了温度、雨水侵蚀、紫外辐射以及车辆磨耗等对其的耐久性的影响。同时,论述了面撒玻璃珠和发光材料对提升道路交通标线可视性的效果。结果表明,面撒密度范围 9% ~24% 的高折射率玻璃珠和添加发光粉 $SrAl_2O_4:Eu^{2+},Dy^{3+}$ 对道路标线可视性提升效果最佳。此外,阐述了组成设计优化、纳米材料(纳米 TiO_2、纳米填料和纳米黏土)等改善道路交通标线路用性能的方法,并在此基础上对未来的发展和研究方向进行了展望,以期推动双组分道路交通标线的发展。

关键词 双组分道路交通标线; 可视性; 发光材料; 耐久性; 研究进展
中图法分类号 U491.523; **文献标志码** A

Research Progress of Two-component Road Marking

QIAN Hua-xin[1], LIANG Ying-ping[2], WU Xiao-ming[1], HE Rui[2*]
(1. Shaanxi Transportation Holding Group Co,. Ltd, Xi'an 710065, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

[**Abstract**] In order to improve the road performance and promote the application of two-component road markings, the latest research findings of two-component road markings were summarized, and the material system and curing mechanism of two-component road markings were analyzed. In addition, the durability indexes of road marking were concluded. Then, the impact factors of durability, such as temperature, rain erosion, ultraviolet radiation and vehicle wear were discussed. Furthermore, the influence of glass beads and luminescent materials on the visibility of road markings were investigated. The results show that the visibility of road markings is the best under the high refractive index glass beads with spreading density of 9% ~24% and luminescent powder of $SrAl_2O_4:Eu^{2+},Dy^{3+}$. The design optimization methods and nano-materials (nano-TiO_2, nano-fillers and nano-clay) are elaborated to improve the road performance of markings. Finally, the research directions of road markings are prospected, by which the development of two-component road markings are expected to be promoted.

[**Keywords**] two-component road marking; visibility; luminescent materials; durability; research progress

作为视觉引导和交通诱导的交通基础设施,道路交通标线对于发挥道路功能、预防和减少交通事故的发生,有着十分重要的作用,极大地推动了交通运输业的发展。随着中国城乡公路尤其是高速公路网络的大规模建设,改善道路交通标线视认性对提高交通效率、保障行车安全具有关键性的作用。同时,随着节能减排、绿色环保的理念深入人心以及夜间、雨、雾等恶劣天气条件下行车需求增大,人们对道路交通标线提出了更加节能、环保及智能的要求[1-3]。开发新型道路交通标线材料,提高道路交通标线的视认性与耐久性,具有重要的社会、经济和生态意义。

现有的道路交通标线主要包括溶剂型、热熔型、双组分和水性涂料 4 种[4-7]。其中,最早使用的传统道路交通标线是溶剂型和热熔型标线[8]。但随着社会发展,对道路交通标线的要求日益增高,溶剂型道路交通标线有机物挥发量高,夜间反光效果不佳,耐久性差,且该类标线对环境污染严

收稿日期: 2021-04-01; **修订日期**: 2021-08-30
基金项目: 陕西省交通科技项目(19-21K, 20-22K);陕西省创新人才推进计划(2020KJXX-043)
第一作者: 钱华信(1980—),男,汉族,河北清河人,硕士研究生,高级工程师。研究方向:交通运输工程。E-mail:scgylyp@163.com。
* **通信作者**: 何 锐(1984—),男,汉族,湖北襄阳人,博士,教授。研究方向:道路材料与结构。E-mail:heruia@163.com。

重[9-11],不符合社会发展理念;热熔型道路交通标线则存在易开裂,高温易变色,施工时需加热等缺点,均对环境污染有害[12-13]。因此,环境友好、高抗裂及夜间反光性能优异的双组分道路交通标线由此诞生。双组分道路交通标线是由 A 组分(活性树脂和颜填料、助剂等组成)和 B 组分(固化剂)通过物理混合,由分子量低的单体聚合为网状分子结构的涂层[14],其与路面材料紧密结合,最后通过面撒玻璃微珠的反射形成夜间视认性,大幅提高行车安全。近年来双组分道路交通标线材料从单一的聚酯型树脂发展为环氧树脂再到现在的甲基丙烯酸甲酯(methyl methacrylate,MMA)和聚甲基丙烯酸甲酯(polymethyl methacrylate,PMMA)树脂,质量逐步提高。但是,交通运输的不断发展也对双组分标线的耐久性与可视性提出了更高的要求。

鉴于此,通过梳理中外对双组分道路交通标线路用性能的最新研究成果,分析双组分道路交通标线材料体系及其固化原理,总结影响道路交通标线耐久性与可视性的评价指标及其主要影响因素。此外,论述提高双组分道路交通标线性能优化的主要途径,并在此基础上对未来的发展和研究方向进行展望,以期推动双组分道路交通标线的发展。

1　双组分道路交通标线体系概述

双组分道路交通标线泛指反应型路面标线,于 20 世纪 70 年代由欧美发达国家率先研发的一种应对全球越来越严重的交通和环保压力的新型道路交通标线。在北美和欧洲等地区,双组分道路交通标线因其优异的性能和环境友好的特点,发展迅速,总体市场占有率超 10%[4]。而在中国,于 20 世纪 70 年代开始研制道路交通标线,随着中国公路事业的不断建设,对道路交通标线的要求也日益变高,双组分道路交通标线因其优异的路用性能和对环境人体健康危害较低的特点,在中国用量逐渐增加,标线市场占比越来越大。

双组分道路交通标线技术要求如表 1 所示。该类型道路交通标线通过两组份聚合反应形成网状结构,在路面形成密实的整体,形成的新的网状结构中,不存在活性分子键,因此其附着力优于溶剂型和热熔型道路交通标线,而且低温不易开裂,高温不软化[15]。同时,双组分道路交通标线具有较高的耐磨性和耐候性,施工过程中受施工温度的影响较小,可以通过调节固化剂的量来控制实际凝结时间等施工特点。且具有不含溶剂,挥发物含量低,施工无需加热等特点,是环境友好型产品,因此受到广大用户的青睐,是中国未来主流道路交通标线

表 1　双组分道路交通标线技术要求[16]

Table 1　Technical requirements for two component road traffic marking[16]

项目	普通型	溶剂型	反光型
容器中状态	应无结块、结皮现象,易于搅匀		
密度/(g·cm^{-3})	1.5~2.0		
施工性能	按生产厂的要求,将 AB 组分按一定比例混合搅拌均匀后,喷涂、刮涂施工性能良好		
涂膜外观	涂膜固化后应无裂纹、斑点、气泡、裂纹脱落、粘结等现象,涂膜颜色与外观应与样板差别不大		
不沾胎干燥时间/min	≤35		
白色 黄色	漆膜的色品坐标和亮度因数应符合规范		
附着性(划圈法)	≤4 级(不含玻璃珠)	—	—
柔韧性/mm	5(不含玻璃珠)	—	—
玻璃含量/%	—	18~25	18~25

材料之一。

1.1　双组分道路交通标线分类

1.1.1　树脂类型

树脂是决定双组分道路交通标线质量好坏的关键,双组分道路交通标线的稳定性、施工性、快干性、经济性等都取决于树脂本身性能,所以树脂的类型直接影响标线的质量。双组分道路交通标线按照成膜树脂可分为聚氨酯型、聚脲型、环氧型、MMA 型和 PMMA 树脂型。

聚氨酯型双组分道路交通标线一般是由异氰酸酯预聚物(低分子氨基甲酸酯聚合物)和含羟基树脂两部分组成[17]。该类型标线漆膜厚度大,对基层材料要求不高,具有附着力强、耐磨性好及柔韧性好、耐高低温性能好、固体含量高等优点。为提高聚氨酯标线的性能,必须添加合适的催化剂,但催化剂与树脂中的官能团发生反应,产生的气体造成漆膜的机械性能降低[5]。

聚脲树脂是由异氰酸酯组分与胺基组分反应得到的高聚物[18],聚脲道路交通标线具有固化速度快、和基材附着力好以及耐久性能优异等优点。此外,该类型标线固体含量高,对环境友好,但施工技术较复杂,对施工人员要求较高[16-17]。

环氧树脂结构含—OH、—O—和—CH(O)CH—等官能团,其中,含有活性胺基团的固化剂与环氧树脂中的环氧基发生化学反应,交联固化形成连续、完整的高分子薄膜。因—CH(O)CH—是一种高活性基团,所以环氧树脂具有较强的黏附性,耐高温性及防腐蚀性也非常好[19],对玻璃珠的亲和力也很高,增长标线的使用寿命。但由于分子结构中苯环的存在,其抗紫外线能力较弱、耐候性差及易

粉化,且该类型双组分道路交通标线固化时间较慢,漆膜固化后容易变黄。

MMA 双组分道路交通标线的主成膜物为具有化学反应活性低分子量的丙烯酸酯低聚物和甲基丙烯酸酯低聚物[20],因分子结构中含有大量的极性基团,所以具有优良的化学稳定性和耐候性。在路面完成润湿渗透,极性基团可与路面基材部分基团发生化学交联聚合反应,与路面形成牢固的网状结构,所以该交通标线附着力优异,与路面粘结紧密,耐磨性和耐久性优异。

如今使用较为广泛的液态 PMMA 树脂,属于环保型树脂产品,其结构如图 1 所示。PMMA 分子链上有非极性甲基和极性羧甲基酯基团,使得分子间有一定空间位阻,同时有相互作用力[21],因此,其具有良好的化学稳定性和耐候性。PMMA 预聚体树脂,区别于完全反应后以固态形式存在的硬性PMMA树脂(有机玻璃),属于柔性 PMMA 树脂体系。MMA 单体经过预聚工艺制备成具备一定活性的液态树脂(即 PMMA 预聚体),采用过氧化物,常用过氧化苯甲酰(BPO)为引发剂,配合相应的促进剂,引发甲基丙烯酸甲酯进行自由基聚合,在聚合 30% ~50%时,采用阻聚封端技术强制终止反应,确保预聚物的活性。施工时加引发剂二次引发,使其完成全部反应,形成的路面标线就是 PMMA 型双组分道路交通标线。其固含量高达 98%,因此属于环境友的好产品,且抗裂性能、附着力、耐久性较热熔型和溶剂型优异,但该类标线耐水性及耐化学腐蚀性有限,存在成膜时间较久、固化不完全等缺点。

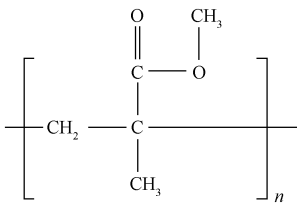

图 1 PMMA 的结构[21]

Fig. 1 Structure of PMMA[21]

1.1.2 功能分类

双组分道路交通标线按功能分为刮涂型、喷涂型和结构型。清楚了解不同功能的双组分道路交通标线,可以提高双组分标线的使用效率,提高行车安全。

喷涂型双组分道路交通标线采用专门的高压无气喷涂设备,施工时将 A、B 组分放在不同的涂料釜中,在喷枪出按一定比例相互混合,于路面上反应固化形成标线。该类标线涂料不含内混玻璃珠,具有初始逆反射值较高、重涂性能好、附着力较好等优点。此外,该类道路交通标线涂层较薄(0.6 ~0.8 mm),日后养护无需清除旧线,施工效率相对刮涂型较高,适用于边缘线。

刮涂型双组分道路交通标线用专用的双组分刮涂机即可施工。施工时,将 A、B 两种组分的涂料流入到涂斗,搅拌均匀后刮涂到路面反应形成双组分刮涂型标线。该类标线适用性更广泛,具有附着力强、耐磨性佳、施工方便等优点。该类标线厚度为 1.2 ~1.5 mm,和喷涂型标线相比,该类标线含内混玻璃珠,内混玻璃珠的存在使该类标线有效寿命大于喷涂型,即面撒玻璃珠磨损后,内混玻璃珠继续发挥反光效果,仍具有良好的反光效果。

不同于喷涂型或刮涂型标线拥有光滑平整的连续性平面,结构型双组分道路交通标线由不规则圆点或者无规则烂泥装,有助于提高现有标线的防滑值,且具有雨夜反光和振动作用,车轮碾压时发生振动和声音,提示驾驶人员,适用于车道分界线,斑马线,显示道路轮廓,提高驾乘人员对道路轮廓认同感的。此外,该结构有利于路面积水的排放,使标线不被雨水覆盖。该类标线还具有附着力强,耐磨性能好,抗裂性强等优点。

1.2 双组分道路交通标线固化机理

丙烯酸树脂类双组分道路交通标线固化原理是树脂在固化剂的作用下,通过与促进剂上的活性官能团反应,进行交联固化,形成网状结构的高分子量聚合物的涂层,高分子聚合物改善了其光泽、硬度、耐磨性及耐热性等。反应前单个组分的分子量较小,所以标线涂料在发生聚合化学反应前具有很好的渗透性,当两个组分在标线凝结过程中发生的聚合化学反应,使标线能与地面牢固结合[3]。如图 2所示,未添加固化剂前,丙烯酸树脂呈无规则链状结构,在固化剂的加速作用下,形成稳定的网状结构。

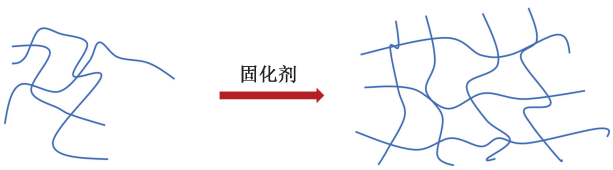

图 2 丙烯酸类双组分道路交通标线固化

Fig. 2 Curing of acrylic two component road traffic marking

2 耐久性评价分析

在风吹、日晒、雨淋等自然环境的侵蚀以及车辆的冲击、摩擦作用下,道路交通标线不断被磨损,严重影响其使用效果。因此,研究道路交通标线耐久性影响因素,并科学评判其耐久性,可以更好地

提高道路交通标线耐久性,延长其服役寿命,具有安全价值和经济价值。

2.1　耐久性评价指标

通过梳理《路面标线涂料》(JT/T 280—2004)[16]、《路面防滑涂料》(JTT 712—2008)[22]等现有规范及标准,双组分道路交通标线耐久性指标可总结如表2所示。现有标准和规范分别从耐碱性、耐水性、耐磨性、耐侯性、热稳定性、耐冲击性、冻融稳定性等方面对双组分道路交通标线的耐久性做出了要求。其中,耐磨性属于定量指标,其他均属于定性指标。

表2　双组分道路交通标线耐久性技术要求[16, 22]

Table 2　Technical requirements for durability of two component road traffic markings[16, 22]

评价指标	指标要求
耐水性	在水中浸泡24 h应无异常现象
耐碱性	在氢氧化钙饱和溶液中浸泡24 h应无异常现象
耐磨性	≤40 mg(JM-100橡胶砂轮)
耐候性	经人工加速耐候性试验后试板涂层不允许产生龟裂、剥落;允许轻微粉化和变色,但色品坐标更符合规范,亮度因数变化范围应不大于原样板亮度因数的20%
耐冲击性	除冲击部位外,无明显裂痕、皱纹及脱落
热稳定性	60 ℃下恒温3 h后取出冷却至25 ℃,黏度无变化
冻融稳定性	在-5 ℃条件下放置18 h后,立即置于(23±2) ℃条件下6 h为一周期,连续3周期后无分层、无结块、施工性能良好

2.2　耐久性影响因素分析

影响道路交通标线耐久性的因素可以分为自然因素和道路车辆因素[23],自然因素包括温度、降水、紫外线辐射。温度和水汽使标线产生气体膨胀应力和热胀冷缩应力。雨水渗入标线内部,与标线和基层产生物理化学作用,降低标线的附着力和抗冲击强度,同时雨水侵蚀标线,灰尘易在被侵蚀的标线表明吸附,降低标线可视性。颜料吸收太阳辐射中的紫外光,发生化学反应或光氧反应,造成道路交通标线强度减小,容易起皱,空鼓和被磨损。道路车辆因素包括车轮荷载、车轮磨耗等。耐磨性较差的道路交通标线,经过车轮冲击和车轮磨耗,标线易掉色和脱落,严重影响道路交通标线可视性。

而现有的规范与标准,只对单一因素作用下道路交通标线耐久性进行评价,不符合实际服役环境。因此,综合考虑道路交通标线的实际应用环境,提出多因素(车辆荷载、雨水侵蚀和紫外辐射等)作用下道路交通标线耐久性评价能够实现标线服役性能的科学评判。

3　双组分道路交通标线可视性分析

道路交通标线具有反光特性,以确保夜间具有可视性。有研究表明,夜间交通事故死亡率占所有交通事故死亡率的一半,所以,研究道路交通标线可视性的影响因素以及提升其可视性,对于夜间行车安全有着至关重要的作用。

3.1　可视性提升分析

面撒玻璃珠是增加道路交通标线可视性的常见方法。玻璃珠反光原理如图3所示[12],射入玻璃珠内的光线在其内折射,将光线反射到光源方向,玻璃珠的这种反射称为光的回归反射。汽车前照灯照射路面时,由于该光线回归反射到司机眼睛而提高了路面标线的视认性。随着技术的进步,发光涂料、LED标线、凸起型标线等均可提高道路交通标线夜间可视性,中外学者对此做了大量研究。

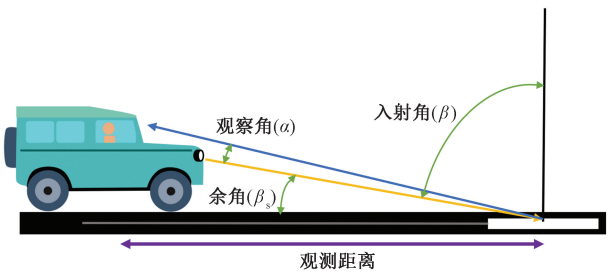

图3　玻璃珠反光原理[24]

Fig. 3　Reflection principle of glass beads[24]

玻璃珠是影响道路交通标线可视性主要影响因素,玻璃珠的折射率、级配和成圆率对道路交通标线可视性影响的研究较多。David等[25]研究了道路交通标线结构、玻璃珠折射率与其反光效率之间的关系,以及雨水以及潮湿状对道路交通标线的可视性的影响。研究结果表明,玻璃珠的折射率越高,形成的有效逆反射越好,在雨天和潮湿条件下的性能更高。与非结构化标记系统相比,具有结构化光学系统的路面标记系统在更大距离上表现出更高的整体反光效率,即结构型标线具有更好的反光效果。Zhang等[26]利用计算机辅助成像技术研究了玻璃珠的密度对道路交通标线逆反射的影响,结果表明,较高的玻璃珠密度导致较高的标线回复反射率。此外,当玻璃珠密度值相同时,白色边缘标线的逆反射值明显高于黄色中心标记。他们建议的玻璃珠密度范围为9%~24%,玻璃珠密度低于9%时,无法提供标准要求的逆反射值,而密度大于24%时,道路交通标线成本增加,且逆反射值无显著提高。Adam等[27]研究玻璃珠折射率(折射率为1.5和1.9)和几何形状对路面标线的反射率的

影响,结果表明,对于 1.5 和 1.9 折射率玻璃珠而言,反射率均随观察角和入射角的增加而降低,与 1.5 折射率的玻璃珠相比,1.9 折射率玻璃珠的反射率平均高出 171%,另外,还发现相比粒径的增加,折射率的增加对反射率的影响更大。

除面撒玻璃珠提高道路交通标线的可视性外,还可以添加发光材料、提高钛白粉含量等方法提升其可视性。Jason 等[28-29]研究了持续时间较长的稀土掺杂的铝酸锶($SrAl_2O_4:Eu^{2+},Dy^{3+}$)代替玻璃珠作用,该项技术显示了标线整夜可见的潜力。此外,介绍了荧光材料、磷光材料以及 LED 灯等改善标线可视性的方法。并比较了不同涂料类型在缓解水解方面的有效性,研究结果表明:羧酸官能团对磷光涂料体系是有益的,具有羧酸盐官能团的涂料的性能优于大多数涂料,并且建议未来荧光涂料使用树脂为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)树脂。吴谨[30]针对反光交通标线雨夜反光不足的问题,优选荧光材料、胶结材料等制备了长久发光交通标线涂料,并研究了荧光粉不同掺量对胶结材料的性能、辉度值的影响,结果表明,掺量超过 30% 时,辉度值几乎没有变化;固化时间随着荧光粉掺量的增大而略微缩短,抗拉强度和断裂伸长率都成减小的趋势,因此推荐掺量为 30%。同时,利用 UC-win/Road 软件对不同标线设计方案进行仿真模拟,仿真结果表明,直线段标线宽度为 50% 的方案即可达到良好的诱导效果;曲线段标线施划在外侧且间距为 9 m 时效果最佳。马静洁等[31]从涂料材质与玻璃珠两方面综合分析了标线可视性影响因素。研究结果表明,含有钛白粉的涂料,反射率则高于普通涂料,白度数值越高,反射率就越高,且在一定程度上,反射率提高能增强标线夜间可视性的效果;玻璃珠内的杂质气泡不合适的折射率、形状不规则、透明度低的玻璃珠都会降低标线的反光性能。Babić 等[32]研究了白天和夜间道路交通标线可视性之间的相关性,利用静态测量,通过相关分析确定,白天能见度与夜间能见度的关系强度相对较弱,并将逆反射亮度系数和白天可视性比值作为系数,开发了一种能通过夜间逆反射亮度系数换算白天可视性的模型。

综上,提高道路交通标线的可视性可通过控制面撒玻璃珠质量(成圆率、折射率、嵌入度、级配)和添加发光材料(荧光、磷光)以及安装 LED 标线灯等方法。发光涂料主要用磷光材料和荧光材料分散在涂料中,是一项有前途的新技术,虽然发光材料显示出使标线整夜可见的潜力,但发光涂料存在不稳定容易水解的问题。因此,造成添加磷光体标线稳定性差,如何降低磷光材料水解以及延长发光道路交通标线寿命是下一阶段亟待解决的问题。

3.2 可视性评价指标分析

道路交通标线可视性是反光型道路交通标线的重要指标,而逆反射亮度系数反是标线可视性的重要评价指标,因此需要保证标线拥有较高的逆反射亮度系数。中外都对道路交通标线的逆反射亮度系数做出要求,表 3 ~ 表 5 分别是美国、印度以及中国对标线逆反射亮度系数的规范要求[33-35]。相比较可知,国外对逆反射亮度系数要求更高,印度设计时速不同时,对逆反射亮度系数要求也不同,更符合实际需求;美国对标线逆反射亮度系数的有效期更长。中国在未来也需对逆反射亮度系数做出更详细的规定,例如,针对不同道路不同时速,设计不同逆反射亮度系数要求,同时对逆反射亮度系数的有效期进一步延长。

表 3 美国部分地区对逆反射亮度系数要求[33]

Table 3 Requirements for brightness coefficient of retroreflection in some parts of the United States[33]

地区	标线颜色	最小逆反射亮度系数/(mcd·m⁻²·lx⁻¹)			
		初始	6 个月	2 年	保质期(4 年)
阿拉斯加州	白色	200	150	40	
	黄色				
爱达荷州	白色	250	150	150	
	黄色	175	125	125	
密苏里州	白色	450			200
	黄色	300			150

表 4 印度对逆反射系数亮度要求[34]

Table 4 Requirements for brightness coefficient of retroreflection in India[34]

等级	设计时速/(km·h⁻¹)	逆反射亮度系数/(mcd·m⁻²·lx⁻¹)	
		7 d	两年后
1	<65	200	80
2	65 ~ 100	250	120
3	>100	350	150

表 5 中国对逆反射亮度系数要求[35]

Table 5 Requirements for brightness coefficient of retroreflection in China[35]

等级	逆反射亮度系数/(mcd·m⁻²·lx⁻¹)			
	初始		开放交通两年内阶段标线	
	白	黄	白	黄
1	150	100	80	50
2	250	125	100	60
3	350	150	120	70
4	450	175	140	80

4　双组分道路交通标线性能优化

双组分交通道路标线性能优化可由组成设计优化和材料改性两方面进行。组成设计优化即通过优化标线涂料配方和优选原材料达到性能优化的目的;材料改性则是通过对原材料改性,例如对填料、颜料进行纳米处理和对内混玻璃珠用偶联剂处理等方式,利用新技术对原材料改性的方法,优化交通道路标线的性能。

4.1　组成设计优化

优良的双组分道路交通标线配方是保证标线质量的基础,合适的配方,才能制备出高质量的道路交通标线。优化配方可以有效提高双组分道路交通标线的质量,中外学者研究优化标线组分做了部分研究,并取得了一定成果。

文献[36-38]将混合设计(mixture design)的新方法用于设计和优化道路交通标线配方,该方法能研究多个变量之间的交互作用,用最少数量的实验可以同时在几个级别上估计不同的响应,且混合实验设计考察的自变量因素较多,得出的结论与实际情况更加相符。研究结果表明,与商业溶剂型涂料相比,新配制的涂料具有优异的路用性能。Hadizadeh 等[39]后利用相同方法优化了 MMA 双组道路分标线,选取树脂、填料、颜料、增塑剂作为变量,以抗污性和抗滑性作为评价指标,结果表明,用该方法优化后最佳配方制备的双组分道路交通标线,具有优异的抗滑性和耐污性。此外,还研究了固化剂(BPO)含量对 MMA 道路交通标线的固化影响,结果显示固化剂在 2% 的含量时,固化效果最佳。刘俊权[40]为了解决标线与水泥路面使用效果的问题,优化了双组分环氧树脂道路交通标线,一方面通过选择良好的溶剂保证涂料的黏度以及施工后溶剂的快速挥发性和快干性;另一方面选择合适的固化剂以及适量的增白剂和紫外线吸收剂,保证标线的快速固化,并具有良好的耐紫外光照射性和优异的保色性能。最终结果表明,优化后环氧树脂型双组分道路交通标线在水泥路面上附着效果良好,且其他性能均满足设计要求。

综上而言,通过优选原材料和优化配方两种方式对双组分道路交通标线优化均可有效提高道路交通标线的质量,且这两种方式较为简单,成本投入较低。此外,原材料质量也是影响道路交通标线质量的关键因素,控制原材料质量可保证道路交通标线质量,但还没有规范和标准对道路交通标线原材料提出要求,未来应对标线原材料的技术指标统一规范,保证道路交通标线质量。

4.2　原材料改性

原材料性能与双组分道路交通标线的性能密切相关,对原材料改性可以提高道路交通标线的性能,目前,中外对双组分标线原材料改性方面的研究较为丰富,且取得一定的成果。

纳米材料的应用可以有效改善道路交通标线的性能。Maryam 等[41]利用纳米黏土将丙烯酸树脂改性,合成纳米复合丙烯酸树脂,并利用自制纳米复合丙烯酸树脂制备出纳米黏土丙烯酸标线。研究结果表明,黏土板发生了剥离和插层,对丙烯酸树脂的聚合和行为有明显的影响,黏土夹层的形态显著提高道路交通标线的耐磨性和耐划性,增加标线的使用寿命。同时,他们还使用光催化效果的纳米 TiO_2 将丙烯酸聚合物改性,将纳米结构和/或纳米尺寸的 TiO_2 均匀分散在涂料,通过透射电子显微镜(transmission electron microscope,TEM)和光学能量带表征纳米 TiO_2 在涂料中分布,研究结果表明:含有 TiO_2 纳米颗粒如果均匀分散在标线涂料中,利用 TiO_2 的光分解效果使标线具有自清洁能力,增长标线的有效寿命。

此外,添加矿物质填料也可以作为提升道路交通标线的有效方法。Hadizadeh 等[39]利用粒径不同的 40 μm 和 0.4 ~ 0.8 mm 的 SiO_2 作为涂料的填料,以 1∶3和 1∶1的比例制备丙烯酸涂料,研究不同级配的填料对道路交通标线性能的影响,研究结果表明,一定级配下的填料可以有效提高道路交通标线的抗滑性。Siyahi 等[42]利用矿物质提高双组分道路交通标线的防滑性,他们采用废玻璃粉、二氧化硅颗粒和膨胀黏土等矿物质材料作为防滑骨料制备双组分道路交通标线,利用摆锤试验测试防滑值,结果表明,二氧化硅和膨胀黏土的添加影响标线的耐磨性,而含有 10% 废玻璃粉的标线,抗滑性和反射率均明显提高,且不会影响其他性能。窦小燕等[43]采用活性丙烯酸树脂与丙烯酸单体为基体,用引发剂为交联固化,制备出具有黏度低、固体含量高、固化时间适宜、低污染、与玻璃珠粘结牢固、耐候性好等特点的双组分道路交通标线。并着重讨论了涂料配方中的树脂、活性单体、钛白粉的用量及填料粒径的合理级配。制备的涂料不仅保证路面排水并具有一定的防滑功能。

内混玻璃珠也可改善道路交通标线的路用性能,尤其是对其防滑性能有显著的影响。Richards[44]评估了预混合玻璃微珠对道路交通标线抗滑性的影响,研究结果表明,预混玻璃珠能显著提高道路交通标线的抗滑性。另外,Eigenmann[45]研究了玻璃微珠对道路交通标线漆防滑性的影响。研

究结果表明,硅烷偶联剂处理过玻璃珠不仅提高道路交通标线漆的防滑性,而且提高了它的反射率。

总体而言,双组分道路交通标线改性主要通过利用纳米颗粒、添加矿物质颗粒以及利用偶联剂等手段对原材料改性,提高原材料的性能从而提高双组分道路交通标线的路用性能。相较而言,纳米技术的应用更受青睐,拥有广阔前景,纳米颗粒均匀分散在道路交通标线中,能显著提高双组分道路交通标线的各项性能。

5 结论及展望

通过梳理中外对双组分道路标线路用性能的最新研究成果可知,纳米级的 TiO_2 和矿物质填料的应用,能显著提高双组分道路交通标线的耐污性和抗滑性;添加发光材料可提高双组分道路交通标线可视性,但发光材料存在不稳定等缺点,需深度对此研究。另外,目前双组分道路交通标线研究多集中于提高双组分道路交通标线的路用性能和可视性,而双组分道路交通标线耐久性评价较单一,缺乏与实际服役环境结合程度较低。鉴于此,建议以后针对以下几方面展开研究。

(1)结合实际环境,采用室内模拟试验,研究多种环境因素(车辆荷载、温度、雨水侵蚀和紫外辐射等)交互作用对道路标线耐久性的影响,重点研究其可视性的衰变规律,并探索其性能衰变机理,建立可视性衰变预估模型,预测交通标线未来的性能衰退状态,并提出多因素耦合作用下双组分道路交通标线耐久性评价指标,为建立完整道路交通标线性能评价体系提供支撑。

(2)双组分道路交通标线性能提高和原材料性能和质量密切相关,目前研究多集中于单组分对标线性能影响研究,后续研究应考虑各组分相互影响以及相互作用下对道路交通标线性能改善影响,建立材料组成、结构、理化性质和标线服役性能之间的关系,并根据气候环境和交通等级推荐出其质量控制指标,以期推动双组分道路交通标线的应用。

(3)进一步加强发光材料(荧光材料、磷光材料)在双组分道路交通标线中应用研究,在保证发光材料稳定、不水解的基础上,满足双组分道路交通标线的性能要求,实现双组分道路交通标线整间可视性,提高双组分道路交通标线的使用效率。

(4)国内外对于玻璃珠的研究较为广泛,但缺乏玻璃珠关键因素嵌入度对标线逆反射亮度系数的详细影响规律的研究,且对于嵌入度控制和检测极为不便,因此亟需对嵌入度展开深层次研究,利用图像处理等技术,建立快速检测嵌入度的方法,研究玻璃珠嵌入度与标线逆反射系数之间的影响规律,并提出玻璃珠嵌入度控制方法。

参 考 文 献

[1] 孔佩佩. 道路交通标线涂料的研究进展[J]. 涂层与防护, 2019, 40(1): 48-52.
Kong Peipei. Research progress of road traffic marking coatings [J]. Coating and Protection, 2019, 40(1): 48-52.

[2] 尚 婷, 张 勃, 白婧荣. 基于驾驶员视觉特性的道路视错觉控速标线关键参数[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(18): 300-307.
Shang Ting, Zhang Bo, Bai Jingrong. Key technology of the visual illusion speed control marking based on driver's visual characteristics[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(18): 300-307.

[3] 白婧荣, 唐伯明, 赵子玉, 等. 山区城市道路交叉口纵向减速标线影响分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(17): 7040-7045.
Bai Jingrong, Tang Boming, Zhao Ziyu, et al. The effect analysis of longitudinal deceleration lin on urban road intersections in mountainous areas[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(17): 7040-7045.

[4] 杜玲玲. 我国道路交通标线涂料在改革开放中奋起[J]. 中国涂料, 2019, 34(2): 26-29.
Du lingling. The rise of chinese road marking coatings in reform and opening up[J]. Chinese Coatings, 2019, 34(2): 26-29.

[5] Pratico F G, Vaiana R, Noto S. Photoluminescent road coatings for open-graded and dense-graded asphalts: theoretical and experimental investigation[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(8): 04018173.

[6] Fujishima A, Honda K. Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode[J]. Nature, 1972, 238(5358): 37-38.

[7] Vyankatesh N, Naidu V, Bhaiswar V. Review on road marking paint machine and material[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 954(1): 012016.

[8] 杜玲玲, 李兴仁. 国外道路交通标线材料的发展趋势[J]. 公路交通科技, 2000(6): 64-66.
Du lingling. Development of road materials in forrign countries[J]. Highway Transportation Technology, 2000(6): 64-66.

[9] 李 浩, 马 芳, 孙素琴. 热熔型反光道路交通标线涂料的红外光谱三级鉴定[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(12): 3339-3343.
Li Hao, Ma Fang, Sun Suqin. Tri-level infrared spectroscopic identification of hot melting reflective road marking paint[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(12): 3339-3343.

[10] 郭 旭. 耐久型热熔道路交通标线涂料技术性能研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2019.
Guo Xu. Study on technical performance of durable hot melt road traffic marking coatings[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2019.

[11] Taheri M, Jahanfar M, Ogino K. Synthesis of acrylic resins for high-solids traffic marking paint by solution polymerization[J]. Designed Monomers and Polymers, 2019, 22(1): 213-225.

[12] 杨 波, 邓 华. 基于驾驶员眼动特征的蓄能荧光标线诱导特性及设置方法[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(35): 14694-14700.

Yang Bo, Deng Hua. Inducing characteristics and setting method of energy storage fluorescent marking based on driver's eye movement characteristics[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(35): 14694-14700.

[13] Guo D H. Research on application of waterborne marking paint with material properties[J]. Advanced Materials Research, 2013, 700: 45-49.

[14] 顾东海. 探析双组分道路交通标线涂料的应用及其特点[J]. 建材与装饰, 2017(19): 268-269.
Gu Donghai. Application andcharacteristics of two component road traffic marking coatings[J]. Building Materials and Decoration, 2017(19): 268-269.

[15] Naidoo S, Steyn W J, Vd M, et al. Performance of thermoplastic road-marking material[J]. Journal of the South African Institution of Civil Engineering, 2018, 60(2): 9-22.

[16] 全国交通工程设施(公路)标准化技术委员会. 路面标线涂料: JT/T 280—2004[S]. 北京: 中华人民共和国交通部, 2004.
National Technical Committee for Standardization of Traffic Engineering Facilities (Highways). Pavement marking paint: JT/T 280—2004[S]. Beijing: Ministry of communications of the People's Republic of China, 2004.

[17] 张文才, 杨 勇, 乔忠浩. 双组分涂料及其在道路交通标线中的应用[J]. 中国涂料, 2014, 29(9): 40-43.
Zhang Wencai. Two-componentcoatings and its applications in road marking[J]. Chinese Coatings, 2014, 29(9): 40-43.

[18] 张文毓. 聚脲涂料的研究与应用[J]. 上海涂料, 2020, 58(1): 34-39.
Zhang Wenming. Research and application ofpolyurea coatings [J]. Shanghai Coatings, 2020, 58(1): 34-39.

[19] 李 晋. 水性环氧树脂体系的制备与研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2014.
Li Jin. Study and preparation of water-borne epoxy resin system [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2014.

[20] 关腊生. MMA 双组分道路交通标线涂料与热熔标线涂料对比[J]. 黑龙江交通科技, 2013, 36(10): 155-157.
Guan Lashing. Comparison of MMA two component road traffic marking coating and hot melt marking coating[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2013, 36(10): 155-157.

[21] 张子健. PMMA 树脂的力学性能及热稳定性研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2012.
Zhang Zijian. Study on mechanical properties and thermal stability of PMMA[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2012.

[22] 全国交通工程设施(公路)标准化技术委员会. 路面防滑涂料: JT/T 712—2008[S]. 北京: 中华人民共和国交通部, 2008.
National Technical Committee for Standardization of Traffic Engineering Facilities (Highways). Pavement anti-skid paint: JT/T 712—2008[S]. Beijing: Ministry of Communications of the people's Republic of China, 2008.

[23] 刘英杰, 刘 闯. 道路用涂料耐久性评价指标与方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2018, 38(5): 40-48.
Liu Yingjie, Liu Chuang. Durability evaluation indices and methods of coatings material for pavenents[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2018, 38(5): 40-48.

[24] Maryam T, Mehdi J, Kenji O, et al. Wear properties of nanocomposite traffic marking paint[J]. Journal of Nanomaterials, 2018, 2018, 89: 1-13.

[25] David M B, Thomas P H, Terry W M. Modern pavement marking systems: relationship between optics and nighttime visibility[J]. Transportation Research Record, 2008, 2056(1): 43-51.

[26] Zhang G H, Joseph E H, William R. Impact of bead density on paint pavement marking retroreflectivity[J]. Journal of Transportation Engineering, 2010, 136(8): 773-781.

[27] Adam M P, Songjukta D. Effect of glass bead refractive index on pavement marking retroreflectivity considering passenger vehicle and airplane geometries[J]. Transportation Research Record, 2020, 2674(10): 438-447. .

[28] Jason N, Taylor D S. Comparison of coatings for $SrAl_2O_4$: Eu^{2+}, Dy^{3+} powder in waterborne road striping paint under wet conditions[J]. Progress in Organic Coatings, 2020, 144: 1 05637.

[29] Jason N, Taylor D S. From streetlights to phosphors: a review on the visibility of roadway markings[J]. Progress in Organic Coatings, 2020, 148: 105749.

[30] 吴 谨. 基于视觉特性的荧光标线涂料研发及模拟分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
Wu Jin. Development andsimulation analysis of fluorescent marking coatings based on visual characteristics[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.

[31] 马静洁, 黄 磊. 道路交通标线可视性研究[J]. 中国标准化, 2018(20): 169-173.
Ma Jingjie, Huang Lei. Research onvisibility of road traffic marking[J]. Standardization in China, 2018(20): 169-173.

[32] Babić D, Šćukanec A, Babić D. Determining the correlation between daytime and night-time road markings visibility[J]. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 2016, 11(4): 283-290.

[33] American Associationof State Highway and Transportation Officials. Standard method of test for producing draw down panels and measuring the coefficient of retroreflected luminance (RL) of pavement markings in a laboratory panel: AASHTO TP 130-2018 [S]. Washington: American Associationof State Highway and Transportation Officials, 2018.

[34] Ministry of Road Transport and Highways. Code of practice for road markings: IRC 35—2015[S]. New Delhi: Indian Road Congress, 2015.

[35] 交通运输部公路科学研究院. 公路工程质量检验评定标准: 第一册 土建工程: JTG F80/1—2017[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Quality inspection and evaluation standards for highway engineering section 1 civil engineering: JTG F80/1—2017[S]. Beijin: People's Communications Press, 2017

[36] Shohreh F, Maryam K V, Zahra R, et al. Optimization of the water-based road-marking paint by experimental design, mixture method[J]. Progress in Organic Coatings, 2006, 55(4): 337-344.

[37] Mirabedini S M, Jamali S S, Haghayegh M, et al. Application of mixture experimental design to optimize formulation and performance of thermoplastic road markings[J]. Progress in Organic Coat-

ings, 2012, 75(4): 549-559.

[38] Kardar P, Ebrahimi M, Bastani S, et al. Using mixture experimental design to study the effect of multifunctional acrylate monomers on UV cured epoxy acrylate resins[J]. Progress in Organic Coatings, 2008, 64(1): 74-80.

[39] Hadizadeh E, Pazokifard S, Mirabedini S M, et al. Optimizing practical properties of MMA-based cold plastic road marking paints using mixture experimental design[J]. Progress in Organic Coatings, 2020, 147: 105784.

[40] 刘俊权. 双组分环氧道路交通标线涂料[D]. 太原: 太原理工大学, 2007.
Liu Junquan. Thedouble-component epoxy resin road marking coating[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2007.

[41] Maryam T, Mehdi J, Kenji O. Self-cleaning traffic marking paint [J]. Surfaces and Interfaces, 2017, 9: 13-20.

[42] Siyahi A, Kavussi A, Mirza B A. Enhancing skid resistance of two-component road marking paint using mineral and recycled materials[J]. International Journal of Transportation Engineering, 2016, 3(3): 195-206.

[43] 窦小燕, 潘 峰. 双组分道路交通标线涂料的制备与应用[J]. 中国涂料, 2009, 24(2): 40-43.
Dou Xiaoyan, Pan Feng. Preparation and application of two-component road traffic marking coatings[J]. Chinese Coatings, 2009, 24(2): 40-43.

[44] Richards D. Improving the skid resistance of pavement markings [C]//NZRF/RIAA Conference. New Zealand: Waka Kotahi NZ Transport Agency, 1997: 195-205.

[45] Eigenmann L. Aggregate elements for improving anti-skid and visibility properties of traffic regulating markings on roadway pavements: 3958891[P]. 1976-5-25.