第 38 卷　第 5 期
2018 年 9 月

长安大学学报(自然科学版)
Journal of Chang'an University(Natural Science Edition)

Vol. 38　No. 5
Sept. 2018

文章编号:1671-8879(2018)05-0040-09

道路用涂料耐久性评价指标与方法

刘英杰[1,2],刘　闯[3]

(1. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064; 2. 神华神东煤炭集团有限责任公司,陕西 榆林 719315;
3. 海南省交通运输厅,海南 海口 570204)

摘　要:针对缺乏完备的路用涂层耐久性评价指标体系问题,全面调查和梳理了现有涂层标准及规范中对于耐久性相关评价要求。深入分析当前涂层耐久性评价中存在问题,选择环境和行车作为主要影响因素,明确单一指标组成及分类,通过不同单一因素的合理组合及匹配性分析,确定复合工况下的路用涂层耐久性综合评价指标;结合中国现有涂料性能的评价指标和方法,提出路用涂层材料单一及复合工况条件下的耐久性评价试验方法,并基于涂料的性能参数和试验结果确定路用涂层的耐久性评价指标限值及相应的评价使用范围;建立系统和完备的道路用涂层材料的耐久性评价指标体系和方法,并采用提出的耐久性评价指标对道路用涂层材料实际应用过程中的耐久性能进行全面评价和研究。结果表明:该路用涂层耐久性评价体系指标与路用涂层材料的实际应用环境具有良好的匹配性,可针对路用涂层在复杂应用环境中的耐久性进行室内模拟和全面评价,为路用涂层的耐久性评价提供了合理的试验方法;采用相关评价指标和方法获得的耐久性评价结果与实体工程应用效果基本一致,该耐久性评价指标及方法具有良好的理论基础,能够为现有路用涂层耐久性评价提供依据。

关键词:道路工程;路用涂层;耐久性;评价指标;评价方法

中图分类号:U414　　**文献标志码**:A

Durability evaluation indices and method of coating material for pavements

LIU Ying-jie[1,2], LIU Chuang[3]

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Shenhua Shendong Coal Group Co., Ltd., Yulin 719315, Shaanxi, China; 3. Department of Transport of Hainan Province, Haikou 570204, Hainan, China)

Abstract: Regarding the lack of a durability evaluation system for pavement coating, the evaluation indices and requirements of the current standards were comprehensively investigated and summarized. The problems of durability evaluations of coatings present in the current standards were analyzed. The environment and vehicle load were selected as the main influencing factors, which cleared the composition and classification of a single indicator. Through a reasonable combination and matching analysis of different single factors, a comprehensive evaluation index of the road coating durability under composite working conditions was determined. Combined with the evaluation indices and corresponding methods of the existing coating properties in China, durability evaluation test methods for road coating materials under

收稿日期:2018-03-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51808133)

作者简介:刘英杰(1985-),男,内蒙古通辽人,神华神东煤炭集团有限责任公司高级工程师,长安大学工学博士研究生,
E-mail:53931593@qq.com。

single and composite working conditions were proposed. Based on the performance parameters and test results of the coatings, the durability evaluation index-limits of the road coatings and the corresponding evaluation scope were determined. Finally, a method for the road coating materials and the complete durability evaluation index system and a method for the road coating materials were established. The durability evaluation indices proposed were used to comprehensively evaluate and study the durability of the road coating materials. The results show that the road coating durability evaluation index-system matches well with the practical application environment of the road coating material. An indoor simulation and a comprehensive evaluation of the durability of the road coatings in complex application environments provided reasonable test methods. The durability evaluation results obtained using relevant evaluation indicators and methods are basically consistent with the physical engineering application results, indicating that the durability evaluation indicators and methods can provide a scientific and objective basis for a durability evaluation of existing road coating applications. 8 tabs, 20 refs.

Key words: road engineering; coating material for pavement; durability; evaluation indices; evaluation method

0　引　言

路用涂层作为新型路面材料，主要包含降温涂层、净化尾气涂层、抗滑涂层及交通区域规划类彩色涂层等。国内外研究人员针对不同类型路用涂层展开了大量研究。李浩等采用光谱分析研究了不同类型的热熔型反光道路标线涂料配方成分及性能[1]。王朝辉等基于能量转换原理，研发了一系列路用降温涂层，并评价了其降温性能及路用性能[2]。李文珍等研制了不饱和聚酯降温涂料，并研究其在沥青路面的应用效果[3]；张广泰等将 TiO_2 应用到彩色防滑涂料路面中，研究其对汽车尾气的降解效果及路用性能[4]。郑木莲等配制了新型热反射降温涂层，研究其降温性能[5]。Cao 等研究了热反射涂料对沥青路面性能影响[6-7]。Zheng 等评价了热反射涂料的降温效果及其对抗滑性能的影响[8]。Jiang 等评价了热阻涂层对沥青路面抗车辙性能的作用效果[9]。Sha 等研究了热反射涂料对沥青路面表面的影响[10]。随着路用涂层相关研究的不断发展和完善，交通标线涂层、降温涂层及抗滑涂层等已逐步在高速公路、市政道路以及停车场、步行街等普及使用，并取得了良好的应用效果。然而，路面材料应用过程中会受到环境因素（高低温、降水等）及车辆荷载等综合作用，对路用涂层的耐久性提出了更高要求[11-12]。现有研究主要集中在抗滑、渗水等路用性能指标，缺乏针对耐久性的相关评价，导致现有路用涂层使用寿命较短，无法满足对于其耐久性能的需要，因此对路用涂层耐久性的合理评价尤为迫切。

本文针对现有涂层耐久性评价中存在的问题，深入分析路用涂层应用过程中的环境、车辆等影响，确定路用涂层耐久性单一及复合影响工况，提出路用涂层耐久性评价指标及试验方法，确定耐久性指标限值和适用范围，建立完备的评价指标体系，并依托实体工程对路用涂层耐久性进行了全面评价。

1　现有规范与标准的耐久性指标

通过对《环氧树脂地面涂层材料》（JC/T 1015—2006）[13]，《彩色路面防滑涂料》（JT/T 712—2008）[14]，《路面标线涂料》（JT/T 280—2004）[15]，《公路用防腐蚀粉末涂料及涂层》（JT/T 600—2004）[16]等现有标准与规范分析，总结其主要耐久性指标如表 1 所示。

现有标准及规范分别从耐化学性、耐水性、耐磨性、耐低温性、耐变形性、耐冲击性等方面对涂层材料的耐久性做出了要求，其中，耐磨性和耐变形性属于定量评价指标，其他指标均属于定性指标。结合表 1 分析可知，现有规范及标准的耐久性指标主要存在以下问题：

（1）现有耐久性评价指标仅对涂层实际应用环境中某些单一影响因素进行限定。但在实际应用环境中，对于耐久性影响多为复合多因素的综合影响，现有规范及标准无法满足真实应用环境下耐久性评价要求。

（2）现有耐久性评价指标多数属于定性指标，定量指标较少。定性指标虽然能够对涂层的耐久性能做出评价，但由于评价方法受到主观影响较大，不同

表 1 现有规范及标准耐久性评价指标要求和适用性

Tab. 1 Indices requirements and applicability of durability evaluation of current standards

评价指标	指标属性	指标要求	适用性
耐化学性	定性指标	涂层无气泡、溶解、溶胀、软化、丧失黏结性等现象	车辆废油腐蚀、腐蚀性液体运输车辆泄露、酸雨等
耐水性	定性指标	涂膜完整,不起泡,不剥落,允许轻微变色	所在地区降水量较大,路面排水不畅
耐磨性	定量指标	≤40 mg	交通量较大,车辆制动次数多的弯道或下坡路段
耐低温性	定性指标	无裂纹出现	冬季气温低于 0 ℃,路面排水不畅
耐变形性	定量指标	≥90%	夏季高温地区,载重车辆较多
耐冲击性	定性指标	除冲击部位外,无明显裂痕、皱纹及涂层脱落现象	车祸较多的路段、有较多超载车辆通行

试验人员的评价结果往往存在差异,评价结果缺乏说服力。

(3)不同规范及标准的耐久性指标评价及方法存在较大差异,缺乏统一的试验方法(如试验试件制备方法、试验经历时间等),造成评价结果难以对比。

(4)现有规范及标准并未针对不同气候分区提出相应的耐久性控制指标,无法对特殊地区涂层耐久性评价。

(5)耐久性评价指标针对性不强,整体性较差,尚未形成系统、完备的评价指标体系。

2 路用涂层耐久性影响因素

2.1 自然影响因素

温度和水对耐久性具有重要影响[17-18]。针对高温指标、低温指标及降水量指标等提出气候分区,如表 2 所示[19-20]。

由表 2 可知,夏炎热区 7 月平均最高气温高于 30 ℃,针对路用涂层耐高温评价,应统一以夏炎热区最恶劣高温环境为主要依据,提出高温相关耐久性评价指标。

对于冬严寒区、冬寒区、冬冷区,温度均低于 −9 ℃,持续低温对路用涂层的耐低温性能产生极为不利影响,为保证其低温耐久性能,应统一以冬严寒区最恶劣低温环境为主要依据,提出低温相关耐久性评价指标。

表 2 高低温及雨量指标气候分区

Tab. 2 Climate division of high and low temperature and precipitation

指标分区	高温指标	低温指标	降水量
分区依据	30 年的 7 月平均最高气温	30 年的极端最低气温	30 年年降水量平均值
	大于 30 ℃,20 ℃～30 ℃,小于 20 ℃	小于−37 ℃,−21.5 ℃～−37 ℃,−9.0 ℃～−21.5 ℃,大于−9.0 ℃	大于 1 000,500～1 000,250～500,小于 250 mm
气候分区	夏炎热区、夏炎区、夏凉区	冬严寒区、冬寒区、冬冷区、冬温区	潮湿区、湿润区、半干区、干旱区

对于潮湿区、湿润区,降水量较大,容易造成路面积水现象,对路用涂层与路面之间的黏结性产生不利影响。应统一以潮湿区的最大降水量为依据,确定与降水相关耐久性评价指标。

2.2 道路车辆影响因素

车辆在道路上行驶时,车辆轴载作用、车轮滚动摩擦力与制动力、车辆废弃油料泄露等都会对路用涂层耐久性能产生不利影响。因此,本节深入分析不同道路行车影响因素特点,确定针对道路行车作用的耐久性影响因素,如表 3 所示。

表 3 道路车辆影响因素及作用结果

Tab. 3 Impact and effect results of vehicles

影响因素	车轮磨耗	车辆轴载	冲击力	化学腐蚀
影响方式	行驶中滚动摩擦、制动中滑动摩擦	竖向车辆轴载、行驶中动荷载	车辆碰撞中的坠落物车祸、车辆翻滚货物坠落	车辆油料泄露、化学物品泄露、冬季融雪剂、酸雨
作用结果	产生磨耗损失	产生永久性变形、裂缝	产生裂缝、局部碎裂、脱落	化学腐蚀破坏

2.3 基于道路实际使用环境的复合影响因素

在道路实际使用环境中,路用涂层耐久性不但受到温度、降水等自然因素的影响,还会受到车辆荷载、制动力、车轮磨耗等行车因素的影响。因此,有必要对实际道路应用时,其耐久性影响因素进行分析。首先,将环境及车辆作用选为主要因素,然后分别根据二者特点对相关单一因素(编号 Ai 及 Bj,i=1,2,3;j=1,2,3,4)进行分类,通过组内及组间的合理组合,确定所有复合影响因素类型,然后综合分析各组合因素的实际含义,与实际应用环境中各复合因素进行匹配分析,排除不合理复合因素后,最终确定基于应用环境的复合影响因素及对应工况。不同影响因素对应工况如表 4 所示。

表 4　复合耐久性影响因素及对应工况

Tab. 4　Complex influencing factors and conditions of durability

耐久性影响因素类型	单一影响因素		复合影响因素	
	环境影响工况	车辆影响工况	复合工况(组内组合)	复合工况(组间组合)
具体影响因素分类	A1 高温 A2 低温 A3 降水	B1 车轮磨耗 B2 车辆轴载 B3 冲击力 B4 化学腐蚀	A1A2 高低温交替 A1A2A3 冻融循环 B4B1 化学腐蚀下磨耗 B3B2 冲击力作用下行车荷载	A1B1 高温下磨耗 A1B2 高温下行车荷载 A1B4 高温下化学腐蚀 A2B2 低温下行车荷载 A2B3 低温下冲击力 A1A2A3B1 冻融循环下磨耗

注：A1A2 高低温交替包含在 A1A2A3 冻融循环内，故在复合耐久性指标和评价方法中不单独对耐温变指标进行列举。

2.4　路用涂层耐久性指标确定

依据上述分析，综合考虑路用涂层的实际应用环境，提出基于不同工况的路用涂层耐久性评价指标，如表 5 所示。

表 5　不同工况的耐久性评价指标

Tab. 5　Evaluation indices of durability based on different conditions

指标类型	指标	工况
单一耐久性评价指标	耐高温	高温
	耐低温	低温
	耐水性	水
	耐磨耗	车辆轮胎滚动摩擦、制动摩擦
	耐轮碾	车辆动荷载及轮胎碾压
	耐冲击	货车车载重物坠落、汽车碰撞坠物
	耐压	车辆竖向荷载
	耐腐蚀	车辆油料泄露、化学物品泄漏、酸雨、融雪剂等
复合耐久性评价指标	耐冻融循环	高温、低温、水
	化学腐蚀耐磨耗	路表化学污染物、车轮磨耗
	局部破坏下耐轮碾	货车车载重物坠落及汽车碰撞坠物、车辆动荷载及轮胎碾压
	高温耐磨耗	高温、车轮磨耗
	高温耐轮碾	高温、车辆动荷载及轮胎碾压
	高温耐变形	高温、车辆竖向荷载
	高温耐化学腐蚀	高温、路表化学污染物
	低温耐轮碾	低温、车辆动荷载及轮胎碾压
	低温耐冲击	低温、货车车载重物坠落及汽车碰撞坠物
	冻融循环耐磨耗	高温、低温、水、车轮磨耗

3　路用涂层耐久性试验方法及限值确定

3.1　路用涂层耐久性试验方法

3.1.1　单一工况的耐久性试验方法

单一工况的耐久性评价方法主要借鉴和改进现有标准和规范的相关方法，评价方法相对简单，如表 6 所示。

表 6　单一工况的耐久性评价方法

Tab. 6　Evaluation methods of durability based on single condition

评价指标	指标属性	参考标准及规范	评价依据
耐高温	定性	《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)	硬度变化率(高温保温后与保温前铅笔硬度比值)
	定量	《涂膜硬度铅笔测定法标准》(GB/T 6739—1996)	涂层表面是否发生粉化、起泡、开裂、剥落等现象
耐低温	定性	《建筑涂料涂层耐冻融循环性测定法》(JG/T 25—1999)	涂层表面是否发生粉化、起泡、开裂、剥落等现象
耐水性	定性	《漆膜耐水性测定法》(GB/T 1733—1993)	涂层表面是否存在气泡，皱皮，脱落，变色等现象
耐磨耗	定量	《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)	磨耗前后的质量损失率
耐冲击	定量	《测定有机涂层抗冲击强度的试验方法》(GME 60407)	抗冲击度(使用试验球数量与涂层厚度之比)
	定性		涂膜表面有无裂纹、剥落等现象
耐化学腐蚀	定性	《环氧树脂地面涂层材料》(JC/T 1015—2006)	浸泡化学腐蚀溶液后涂膜质量损失大于 10 mg
	定量		表面有无腐蚀毛面、剥落现象出现

注：耐高温评价方法中，将保温温度由 50 ℃±2 ℃调整为 60 ℃±2 ℃(更接近夏季道路的最高温度)，将保温时间由 3 h 提高为 12 h(最不利条件)；耐低温评价方法中，将保温时间由 3 h 提高为 12 h(最不利条件)。

3.1.2　复合工况的耐久性试验方法

(1)耐冻融性能

耐冻融性能评价方法主要参照《建筑涂料涂层耐冻融循环性能测定法》(JG/T 25—1999)，同时结合沥青路面应用环境特性对其进行合理调整，将涂层应用载体替换为沥青混合料车辙板进行耐冻融性

能试验评价。耐冻融性能定性评价依据:沥青混凝土试件表面涂层是否发生粉化、起泡、开裂、剥落等现象。

(2)化学腐蚀耐磨耗

车辆内部油料或酸、碱等化学品运输过程中泄露、酸雨等导致路用涂层产生腐蚀破坏,增大其表面构造深度,而在其与车辆轮胎接触时摩擦力相应增大,也加快了路用涂层的磨耗损失。因此,依据《乳化沥青稀浆封层混合料的湿轮磨耗试验》(T 0752—1993)及《环氧树脂地面涂层材料》(JC/T 1015—2006),提出了化学腐蚀耐磨耗性能评价方法,对化学腐蚀条件下路用涂层抵御车轮磨耗的能力进行评价。

评价试验步骤:①在油毛毡原片上制备圆形沥青混合料封层试件,并将试件放入 60 ℃烘箱中保温 16 h;②将试件取出冷却 2 h 后称重 m_a,在其表面涂刷定量路用涂层,并放于通风处干燥 24 h,再次称量试件质量 m_b;③将制备好的试件分别放入不同类型的腐蚀液体(质量分数为 15% NaOH 溶液,10% HCl 溶液或 120# 溶剂汽油)中浸泡 48 h;④将浸泡过的试件在 60 ℃烘箱中烘干后,称量其质量 m_c,并将该试件放置在湿轮磨耗仪的转台上进行磨耗试验,在 300 r/min 磨耗后,将试件取出放于60 ℃烘箱中烘干至恒重,并记录该质量 m_d。

定性评价依据:试件表面涂层是否出现严重磨耗或磨穿状况。

定量评价依据:磨耗质量损失率 W_1 计算式为

$$W_1=(m_c-m_d)/(m_b-m_a)\times 100 \tag{1}$$

(3)局部破坏下耐轮碾

当因冲击力引起路用涂层表面局部破坏时,其承受车辆的重载竖向压力时会出现应力不均,造成路用涂层沿裂缝或孔洞位置产生贯通性裂缝或局部碎裂。因此,采用冲击力及轴载因素模拟路用涂层的行车环境,提出局部破坏条件下耐压性能评价方法,评价局部冲击破坏条件下路用涂层抵御车辆轴载的能力。

评价试验步骤:①成型标准车辙板试件,在其表面均匀涂刷定量路用涂层,并放置于通风处干燥 24 h;②在试验平台表面均匀铺筑 2 cm 厚细沙,保持细沙平面水平,将试件放置于细沙上,采用 500 g 钢球在 2 m 位置处分别自由落体冲击试件的四角及中心位置,使冲击位置出现冲击损坏;③将受到冲击损坏的试件置于车辙轮碾仪中,以标准轴载碾压 1 h 后,取出试件观察表面涂层破坏状况。

定性评价依据:表面涂层是否出现贯通性裂缝、局部网状碎裂、剥落或脱落现象。

(4)高温耐磨耗

持续高温条件下,路用涂层可能会发生软化,在车轮的滚动或滑动摩擦作用下,可能会造成路用涂层的严重磨耗。采用高温因素、车轮磨耗因素模拟路用涂层的磨耗使用环境,提出高温耐磨耗评价方法,对路用涂层的在高温条件下抵抗车轮长期磨耗的能力进行评价。

评价试验步骤:①依据化学腐蚀耐磨耗评价中的试件制备方法制备试件,然后将试件放置于 60 ℃恒温烘箱中保温 6 h;②称量保温后试件的质量 M_a,然后放置于湿轮磨耗仪上进行磨耗试验,经过 300 r/min 标准磨耗后,取下试件称取其质量 M_b。

定性评价依据:试件表面涂层是否出现严重磨耗或磨穿状况。

定量评价依据:磨耗质量损失率 W_2 计算式为

$$W_2=(M_a-M_b)/M_a\times 100 \tag{2}$$

(5)高温耐轮碾

在夏季高温条件下,路用涂层质地变软,车辆动荷载作用会使路用涂层产生车辙等永久变形破坏。采用高温因素、车轮碾压等因素模拟路用涂层的使用环境,提出高温耐轮碾评价方法。

评价试验步骤:①采用水泥板(刚性板)作为路用涂层载体,测试水泥板厚度 H_0,然后将路用涂层均匀涂刷于水泥板表面,放置在通风处干燥 24 h;②完全干燥后,将试件置于保温箱中 60 ℃下保温 6 h,并测量试件厚度 H_1;③在 60 ℃下,以标准轴载分别对试件 2 个平行位置进行 1 h 碾压,观察路用涂层表面状况,并测量碾压位置厚度 H_2。

定性评价依据:碾压完成后检查涂层表面是否出现裂缝、局部脱落等病害。

定量评价依据:耐轮碾系数 H 计算式为

$$H=(H_2-H_0)/(H_1-H_0)\times 100 \tag{3}$$

(6)高温耐变形

参照《路面标线涂料》(JT/T 280—2004),采用高温因素、车辆静荷载因素模拟路用涂层在夏季的使用环境,提出高温耐变形评价方法,对路用涂层在高温下抵抗车辆长期碾压变形的能力进行评价。

评价试验步骤:①在规定的边长为 20 mm 立方体制样器的模腔内涂刷隔离剂(甘油、凡士林等),然后将制备好的路用涂层灌注于制样器内,并冷却至室温;②用加热的刮刀削掉端头表面突出部分,然后将试块取出,用 100 号砂纸将各面磨平;放置 24 h

后，用游标卡尺测量试件试验位置竖向高度 h_1，精确至 0.1 mm；③将试块在 60 ℃的恒温箱内保温5 h 后，在试块上放置 2 000±20 g 的配重，1 h 后取出试件，用游标卡尺测定试块的竖向高度 h_2。

定量评价依据：耐变形系数 N 计算式为

$$N=h_2/h_1\times100 \tag{4}$$

(7)高温耐化学腐蚀

采用高温及化学腐蚀条件模拟夏季高温环境中路面化学污染物的腐蚀作用，提出高温耐腐蚀评价方法，评价高温环境下路用涂层抵御路面化学污染物腐蚀作用的耐久性。

评价试验步骤：①在长、宽、高分别为 10、5、1 cm的模具内涂一层薄隔离剂（甘油、凡士林等），然后将制备好的涂层均匀灌注于模具内部，干燥 24 h后取出试件，并用流动水去除试件表面隔离剂，然后在30 ℃恒温箱内烘干至恒重，并称取其质量 m_1；②将试件取出后浸没于装有腐蚀液的烧杯中，并将烧杯防置于 60 ℃恒温箱内保温 6 h，保温期间每隔半小时检查腐蚀液减少量，并用 60 ℃蒸馏水补充至烧杯起始刻度；③保温结束后取出试件，采用流动水冲洗干净后，在 30 ℃恒温箱内烘干至恒重，并称取其质量 m_2。

定性评价依据：观察试件表面是否出现变色、褶皱、老化等现象。

定量评价依据：质量损失 M 计算式为

$$M=m_1-m_2 \tag{5}$$

(8)低温耐轮碾

低温条件下，路用涂层容易变脆，在车辆动荷载作用下易产生应力集中而出现裂缝、碎裂等病害。采用低温及标准轴载碾压模拟冬季行车荷载作用环境，提出低温耐轮碾评价方法。

评价试验步骤：①在预制的车辙板试件表面均匀涂刷定量路用涂层，并放置在通风处干燥 24 h；②完全干燥后，将试件置于保温箱中－20 ℃±2 ℃下保温 6 h 后，以标准轴载分别对试件进行 1 h 碾压，观察路用涂层表面状况。

定性评价依据：低温碾压后涂层表面是否出现裂缝、脱落及碎裂现象。

(9)低温耐冲击

冬季低温条件下，路用涂层脆性增大，在瞬间荷载作用下容易使路用涂层表面产生应力破坏，如碎裂、剥落等。采用低温因素、瞬时荷载等因素模拟路用涂层的低温使用环境，提出低温耐冲击评价方法，并对路用涂层在低温下抵抗瞬间荷载作用的能力进行评价。

评价试验步骤：①将制备好的路用涂层试件置于冰箱中，在－20 ℃±2 ℃下保温 6 h；②将 500 g 钢球在位于路用涂层上方 1.5 m 位置处自由下落，分别在四角及中心位置等 5 个不同位置进行抗冲击性试验，试验完成后对路用涂层表面状况进行评价。

定性评价依据：观测撞击部位是否出现碎裂和脱落现象，撞击部位之间是否出现贯穿性裂缝。

(10)冻融循环耐磨耗

采用冻融因素和车轮磨耗因素模拟路用涂层的冻融循环下的行车使用环境，提出冻融耐磨耗评价方法。

评价试验步骤：①参考高温耐磨耗试验试件制备过程，制备圆形试件，按照耐冻融循环的试验条件进行 5 个循环，然后将试件放置于 30 ℃恒温箱中烘干至恒重，并称量质量 M_1；②将试件取出后置于湿轮磨耗仪上进行磨耗试验，磨耗完成后再次将试件放置于 30 ℃恒温箱中烘干至恒重，并称量质量 M_2。

定性评价依据：涂层表面有无腐蚀毛面、剥落现象出现，是否出现严重磨耗或磨穿状况。

定量评价依据：磨耗质量损失率 W_3 计算式为

$$W_3=(M_1-M_2)/M_2\times100$$

3.2　路用涂层耐久性指标限值及适用范围

在路用涂层耐久性评价指标及评价方法的基础上，结合相关试验经验，提出相应路用涂层耐久性评价指标限值及适用范围，见表 7。

3.3　路用涂层耐久性评价体系应用

依托某高速公路养护项目，采用常用路用涂层材料对养护工程内 500 m 路段进行铺筑，并在现场进行取样，对试样进行耐久性测试。由于涂层铺筑地区属夏炎热地区，且重载车辆较多，故耐久性试验主要针对高温及重载工况的耐久性指标进行评价，并开展长期监测，验证本文耐久性评价结果准确性，具体试验结果如表 8 所示。

由表 8 可知，试验段采用的路用涂层各项耐久性指标均能满足该指标体系的相关要求，在使用 1 年后对试验段现场观测发现，路用涂层表面状况良好，无明显破坏，这表明该耐久性评价体系各项指标限值能够满足道路应用要求，可为路用涂层的道路耐久性评价提供可靠依据。

4　结　语

(1)现有涂层规范及标准中的耐久性评价指标多属于定性指标，定量指标较少，缺乏统一的评价

表 7 路用涂层耐久性评价指标限值及适用范围

Tab. 7 Limited value and applicability of evaluation indices of pavement coating

评价指标		指标属性	指标限值	适用范围
单一工况耐久性评价指标	耐高温评价指标	定性、定量	涂层表面不发生粉化、起泡、开裂、剥落等现象,即为合格,硬度变化率<10%	夏炎热区、夏炎区等(≥30 ℃)或太阳辐射量较大地区
	耐低温评价指标	定性	涂层表面不发生粉化、起泡、开裂、剥落等现象,即为合格	冬严寒区、冬寒区、冬冷区(≤0 ℃)等冬季温度较低地区
	耐水性评价指标	定性	测试板上路用涂层表面无气泡,不皱皮,不脱落,无变色,即为合格	潮湿区、湿润区等降水量较大地区
	耐磨耗评价指标	定量	磨耗质量损失率≤0.2%	交通量繁重的道路,需制动减速的弯道及下坡路段
	耐冲击评价指标	定性	涂膜无裂纹、无剥落,即为合格。	砂石采集场、煤矿等场站道路及货车通量大的道路,车祸多发路段
	耐化学腐蚀评价指标	定性、定量	表面完好,无腐蚀毛面出现,无剥落,质量损失≤10 mg	车流量较大的道路或重交通道路,化工厂、石油单位等附近道路及运输道路
复合工况耐久性评价指标	耐冻融性能指标	定性	表面完好,无裂缝、剥落等现象出现	春季、冬季昼夜温差较大,降水量较大地区的道路(夜间低于零度,日间大于零度)
	化学腐蚀耐磨耗评价指标	定性、定量	涂层表面有无腐蚀毛面、剥落现象出现,是否出现严重磨耗或磨穿状况,磨耗质量损失率≤0.3%	车流量较大的道路或重交通道路,化工厂、石油单位等附近道路及运输道路,易出现油料、化学品泄漏地区的交通量繁重道路,需制动减速的弯道及下坡路段
	局部破坏下耐轮碾评价指标	定性	表面涂层是否出现贯通性裂缝、局部网状碎裂、剥落或脱落现象。	货车通量大且重载交通量大的道路
	高温耐磨耗评价指标	定量	磨耗质量损失率≤0.2%	夏炎热区、夏炎区(≥30℃)或太阳辐射量较大地区的车流量较大的道路或重交通道路
	高温耐轮碾评价指标	定量	耐轮碾系数>95%	夏炎热区、夏炎区(≥30 ℃)或太阳辐射量较大地区的车流量较大的道路或重交通道路
	高温耐变形评价指标	定量	耐变形系数≥90%	夏炎热区、夏炎区(≥30 ℃)或太阳辐射量较大地区的车流量较大的道路或重交通道路
	高温耐化学腐蚀评价指标	定性、定量	表面是否出现变色、褶皱、老化等现象,质量损失<10 mg	夏炎热区、夏炎区(≥30℃)或太阳辐射量较大地区的化工厂、石油单位等附近道路及运输道路,易出现油料、化学品泄漏地区的交通量繁重道路
	低温耐轮碾评价指标	定性	低温碾压后涂层表面是否出现裂缝、脱落及碎裂现象	冬严寒区、冬寒区、冬冷区(≤0℃)等冬季温度较低地区的车流量较大的道路或重交通道路
	低温耐冲击评价指标	定性	观测撞击部位是否出现碎裂和脱落现象,撞击部位之间位置是否出现贯穿性裂缝。	车流量较大的道路或重交通道路,砂石采集场、煤矿等生产地附近道路及运输道路
	冻融耐磨耗评价指标	定量	≤0.2 g	春季昼夜温差较大(夜间低于零度,日间大于零度)地区的车流量较大的道路或重交通道路

注:高温耐轮碾评价指标及高温耐变形评价指标是通过对市面上不同种类路用涂层(降温涂层、净化尾气涂层、道路标线涂层等)抽样试验后得到的相应评价限值。

表 8 试验段路用涂层耐久性评价结果

Tab. 8 Evaluation results of experimental pavement of coating

测试项目	高温耐磨耗性	高温耐轮碾性	高温耐变形性	高温耐化学腐蚀性
测试结果	0.08%	97%	96%	表面状况良好,未出现明显破坏,质量损失为 2.1 mg
指标要求	≤0.2%	>95%	>90%	表面是否出现变色、褶皱、老化等现象,质量损失<10 mg
试验段实际观测结果(1 年)	涂层表面整体状况良好,无明显磨耗裸露处	涂层表面平整度良好,无明显车辙印痕存在	涂层表面平整度良好,无明显压痕出现	对油污等污染进行清洗后,涂层未出现剥落、变色等病害

条件及方法，无法形成对特殊地区涂层耐久性针对性控制，且尚未形成系统、完备的评价指标体系。

(2)将环境及车辆等单一影响因素进行分类，通过组内和组间的随机组合确定所有复合影响因素类型，并对其实际意义进行确定，排除不合理影响因素，确定了 9 个单一影响因素及 10 个复合影响因素及其对应的工况，并提出了相应的评价指标。

(3)针对耐久性单一及复合评价指标的特点，参考现有涂层规范及《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)，提出了相应的路用涂层耐久性评价方法及依据。

(4)分析现有规范中耐久性评价指标要求，结合路用涂层室内试验，提出了路用涂层耐久性评价指标限值及适用范围。

(5)试验段采用的路用涂层各项耐久性指标均能满足该指标体系的要求，在使用 1 年后对试验段现场观测发现，路用涂层表面状况良好，无明显破坏，该耐久性评价体系各项指标限值均能够满足道路应用的要求。

(6)本文主要集中于道路用涂层材料的耐久性能指标体系的建立，缺乏对实体工程的涂料耐久性的长期监测。下一步，将针对于路用涂料在实际工程应用中的耐久性评价展开全面研究。

参考文献：

References：

[1] 李　浩，马　芳，孙素琴. 热熔型反光道路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 Su-qin. Tri-level infrared spectroscopic identification of hot melting reflective road marking paint[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(12): 3339-3343.

[2] 王朝辉，王玉飞，孙晓龙，等. 基于能量转换的路用降温涂层材料制备与性能[J]. 中国公路学报，2015，28(8)：14-21.
WANG Chao-hui, WANG Yu-fei, SUN Xiao-long, et al. Preparation and properties of road cooling coatings based on energy conversion[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(8): 14-21.

[3] 李文珍，李　亮，石　飞，等. 沥青路面不饱和聚酯降温涂料的研制[J]. 重庆交通大学学报：自然科学版，2010，29(6)：916-918，954.
LI Wen-zhen, LI Liang, SHI Fei, et al. Research and development of unsaturated polyester temperature decreasing coatings of asphalt pavement[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2010, 29(6): 916-918, 954.

[4] 张广泰，邓洋洋，叶　奋. 纳米 TiO_2 彩色防滑路面的尾气降解效率及路用性能研究[J]. 中外公路，2016，36(2)：226-229.
ZHANG Guang-tai, DENG Yang-yang, YE Fen. Performance and exhaust degradation efficiency of color non-slip pavement with nano-TiO_2 [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2016, 36(2): 226-229.

[5] 郑木莲，何利涛，高　璇，等. 基于降温功能的沥青路面热反射涂层性能分析[J]. 交通运输工程学报，2013，13(5)：10-16.
ZHENG Mu-lian, HE Li-tao, GAO Xuan, et al. Analysis of heat-reflective coating property for asphalt pavement based on cooling function[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(5): 10-16.

[6] CAO Xue-juan, TANG Bo-ming, ZHU Hong-zhou, et al. Cooling principle analyses and performance evaluation of heat-reflective coating for asphalt pavement[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 23(7): 1067-1075.

[7] CAO Xue-juan, TANG Bo-ming, ZOU Xiao-ling, et al. Analysis on the cooling effect of a heat-reflective coating for asphalt pavement[J]. Road Materials and Pavement Design, 2015, 16(3): 716-726.

[8] ZHENG Mu-lian, Han Li-li, WANG Fei, et al. Comparison and analysis on heat reflective coating for asphalt pavement based on cooling effect and anti-skid performance[J]. Construction and Building Materials, 2015, 93: 1197-1205.

[9] JIANG Yang-jun, DENG Chang-qing, CHEN Zhe-jiang, et al. Evaluation of the cooling effect and anti-rutting performance of thermally resistant and heat-reflective pavement[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2018, 19: 1-10.

[10] SHA Ai-min, LIU Zhuang-zhuang, TANG Kun, et al. Solar heating reflective coating layer (SHRCL) to cool the asphalt pavement surface[J]. Construction and Building Materials, 2017, 139: 355-364.

[11] 黄晓明，范要武，赵永利，等. 高速公路沥青路面高温车辙的调查与试验分析[J]. 公路交通科技，2007，24(5)：16-20.
HUANG Xiao-ming, FAN Yao-wu, ZHAO Yong-li, et al. Investigation and test of expressway asphalt pavement high temperature performance[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(5): 16-20.

[12] 姜旺恒,张肖宁,李 智.基于动水压力模拟试验的沥青混合料水损坏力学机理[J].中国公路学报,2011,24(4):21-25.
JIANG Wang-heng,ZHANG Xiao-ning,LI Zhi. Mechanical mechanism of moisture-induced damage of asphalt mixture based on simulation test of dynamic water pressure[J]. China Journal of Highway and Transport,2011,24(4):21-25.

[13] JC/T 1015—2006,环氧树脂地面涂层材料[S].
JC/T 1015—2006,Epoxy resin flooring coating[S].

[14] JT/T 712—2008,路面防滑涂料[S].
JT/T 712—2008,Pavement anti-skid paint[S].

[15] JT/T280—2004,路面标线涂料[S].
JT/T280—2004,Pavement marking paint[S].

[16] JT/T 600—2004,公路用防腐蚀粉末涂料及涂层[S].
JT/T 600—2004,The corrosion resistant powder and coating for highway[S].

[17] 黄立葵,贾 璐,万剑平,等.沥青路面高温温度场数值分析与试验验证[J].岩土力学,2006,27(1):40-45.
HUANG Li-kui,JIA Lu,WAN Jian-ping,et al. Numerical analysis and experimental validation of high temperature fields in asphalt pavements[J]. Rock and Soil Mechanics,2006,27(1):40-45.

[18] 苗英豪,王秉纲,李 超,等.中国公路沥青路面水损害气候影响分区方案[J].长安大学学报:自然科学版,2008,28(1):26-31.
MIAO Ying-hao,WANG Bing-gang,LI Chao,et al. Climate zoning for moisture damage of asphalt pavements in China[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2008,28(1):26-31.

[19] 苗英豪,王秉纲.中国沥青路面气候影响分区方案[J].交通运输工程学报,2007,7(6):64-69.
MIAO Ying-hao,WANG Bing-gang. Zoning scheme of climatic influence for asphalt pavement in China[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2007,7(6):64-69.

[20] 沈金安.道路沥青及沥青混合料的气候分区及关键性技术指标[J].中国公路学报,1997,10(1):1-9.
SHEN Jin-an. Climate zoning for road asphalt and asphalt mixture and the key technical index[J]. China Journal of Highway and Transport,1997,10(1):1-9.

(上接第 31 页)

[16] 郭乃胜,尤占平,赵颖华,等.温拌再生沥青混合料耐久性能[J].中国公路学报,2014,27(8):17-22.
GUO Nai-sheng,YOU Zhan-ping,ZHAO Ying-hua,et al. Durability of warm mix asphalt containing recycled asphalt mixtures[J]. China Journal of Highway and Transport,2014,27(8):17-22.

[17] 李祖仲,陈拴发,廖卫东,等.改性沥青应力吸收层混合料低温抗裂性能评价[J].中国公路学报,2012,25(4):29-35.
LI Zu-zhong,CHEN Shuan-fa,LIAO Wei-dong,et al. Evaluation of anti-cracking performance of modified HMA in stress absorbing layers under low temperature[J]. China Journal of Highway and Transport,2012,25(4):29-35.

[18] 季 节,索 智,许 鹰,等.SMA 温拌再生沥青混合料性能试验[J].中国公路学报,2013,26(5):28-33.
JI Jie,SUO Zhi,XU Ying,et al. Experimental research on performance of warm-recycled mixture asphalt with SMA[J]. China Journal of Highway and Transport,2013,26(5):28-33.

[19] 刘唐志,朱洪洲,李佳坤,等.温拌再生沥青混合料水稳定性研究[J].武汉理工大学学报,2013,35(3):54-58.
LIU Tang-zhi,ZHU Hong-zhou,LI Jia-kun,et al. Research on water stability of warm-recycled asphalt mixture[J]. Journal of Wuhan University of Technology,2013,35(3):54-58.

[20] 徐鸥明,韩 森,高世君.沥青混合料疲劳耐久极限研究[J].武汉理工大学学报,2010,32(8):45-48.
XU Ou-ming,HAN Sen,GAO Shi-jun. Research on the fatigue endurance limit of hot-mix asphalt concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology,2010,32(8):45-48.

[21] 汤 文,盛晓军,谢旭飞,等.回收料掺量对温拌再生沥青混合料性能的影响[J].建筑材料学报,2016,19(1):204-208.
TANG Wen,SHEN Xiao-jun,XIE Xu-fei,et al. Performance of warm mix asphalt mixture containing different RAP contents[J]. Journal of Building Materials,2016,19(1):204-208.

[22] 陈静云,马 强.温拌-再生改性沥青 SMA 混合料性能研究[J].沈阳建筑大学学报:自然科学版,2012,28(2):286-291.
CHEN Jing-yun,MA Qiang. Properties of warm mix-recycled modified asphalt SMA mixture[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science,2012,28(2):286-291.

[23] 付 欣,刘 秋,陈拴发.基于 ANSYS 的带切口半圆弯曲试验参数分析[J].公路交通科技,2012,29(2):13-17.
FU Xin,LIU Qiu,CHEN Shuan-fa. Parameter analysis of semi-circular bending test on notched specimen based on ANSYS[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2012,29(2):13-17.