

文章编号:1672-9331(2020)02-0026-07

十溴二苯乙烷阻燃反应型常温沥青的研究

李九苏, 王 平, 王争愿, 娄梦雷, 方克俭, 石 扬

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 基于一种自研反应型常温阻燃沥青, 对十溴二苯乙烷(DBDPE)阻燃反应型常温沥青的阻燃效果和阻燃作用机理进行了研究。通过扫描电镜试验、红外光谱试验、热分析试验, 研究阻燃剂在反应型常温沥青中的分散状态、相容性和热失重行为, 并通过对比反应型常温沥青和反应型常温阻燃沥青的热解规律, 揭示阻燃机理。氧指数测试结果表明: 该反应型常温阻燃沥青氧指数可达 26%; 扫描电镜试验结果表明: 阻燃剂在常温沥青中具有良好的分散性; 红外光谱试验结果表明: 阻燃剂 DBDPE 与反应型常温沥青未发生化学反应, 属于物理混溶, 且两者之间具有良好的相容性; 热分析试验结果表明: DBDPE 以气相阻燃机理为主, 兼具凝聚相阻燃作用, DBDPE 使反应型常温阻燃沥青终止分解温度从 641.5 °C 提高到 800 °C 以上, 热流率峰值从 -22.7 mW/mg 降低到 -16.7 mW/mg。

关键词: 十溴二苯乙烷; 反应型常温阻燃沥青; 分散性; 相容性; 热解规律; 阻燃机理

中图分类号: U414

文献标识码: A

Research on reactive cold mixed flame retardant asphalt modified by decabromodiphenylethane

LI Jiu-su, WANG Ping, WANG Zheng-yuan,
LOU Meng-lei, FANG Ke-jian, SHI Yang

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of
Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Based on a self-developed reactive cold mixed flame retardant asphalt, the flame retardant effect and mechanism of decabromodiphenylethane(DBDPE) flame retardant reactive cold mixed asphalt were studied. Scanning electron microscope test, infrared spectrum test and thermal analysis test were used to study the dispersion state, compatibility and thermal weight loss behavior of the flame retardant in reactive cold mixed asphalt, and the flame retardant mechanism was revealed compared with the pyrolysis law of reactive cold mixed asphalt and reactive cold mixed flame retardant asphalt. The oxygen index test results show that the oxygen index parameter of the reactive cold mixed flame retardant asphalt can reach 26%. Scanning electron microscope test results show that the flame retardant has good dispensability in reactive cold mixed asphalt. Infrared spectrum test results

收稿日期: 2019-12-19

基金项目: 长沙市科技特派员项目(CSKJ2017)

通讯作者: 李九苏(1972—), 男, 湖南湘乡人, 长沙理工大学教授, 主要从事废渣资源利用、道路新材料及道路养护材料与技术方面的研究。E-mail: lijiusu@126.com

show that the flame retardant DBDPE does not chemically react with cold mixed asphalt, which is a physical blend with good compatibility between them. Thermal analysis test results show that DBDPE is mainly based on the gas-phase flame retardant mechanism, but also plays a solid-phase role. DBDPE increases the final decomposition temperature of reactive cold mixed flame retardant asphalt from 641.5 °C to more than 800 °C, and the peak value of heat flow rate is reduced from -22.7 mW/mg to -16.7 mW/mg.

Key words: DBDPE; reactive cold mixed flame retardant asphalt; dispensability; compatibility; pyrolysis law; flame retardant mechanism

我国交通运输业发展迅速,至 2018 年底,公路隧道已达 17 738 处,总里程超 1.7 万 km,我国已成为世界上隧道数量最多、情况最复杂、发展速度最快的国家。在 2004 年以前,隧道路面以水泥混凝土为主,但水泥混凝土路面存在抗滑性差、平整度舒适性较低、维修困难等问题。沥青混凝土路面能有效克服水泥混凝土路面的部分缺点,具有行车舒适、易于维修的优势。因而《公路隧道设计规范》(JTG D70-2004)提出各级公路隧道可采用水泥混凝土路面,有条件时也可采用沥青混合料上面层和水泥混凝土下面层组成的复合式路面。在最新的《公路隧道设计规范》(JTG 3370.1-2018)中修订为高速公路、一级公路宜采用沥青混合料上面层和水泥混凝土下面层组成的复合式路面,其它等级公路隧道可采用水泥混凝土路面或复合式路面。由此可见,沥青混合料已广泛应用于隧道路面铺装^[1-3]。隧道沥青路面所用沥青多为热拌阻燃沥青或温拌阻燃沥青。热拌阻燃沥青施工温度高,施工时产生大量的烟尘,不仅污染环境,且对施工人员健康造成巨大伤害^[4];温拌阻燃沥青在一定程度上降低了施工温度,污染程度有所下降,但仍没有从根本上解决问题^[5,6]。近年来,常温拌和沥青混合料材料技术不断兴起,有效解决了施工烟尘大、能耗高的问题,良好的铺装性能使常温沥青的研究成为热点^[7]。

目前研究较多的常温沥青可分为三类:乳化型常温沥青、溶剂型常温沥青和反应型常温沥青。前两类常温沥青普遍存在初始强度低、强度增长慢、温度敏感性大及存储稳定性差等问题^[8,9]。反应型常温沥青是利用反应型溶剂并结合其他沥青改性剂将基质沥青稀释液化研制而成。胡芄等^[10]以植物油多元醇、阻燃剂、稀释剂等作为反应溶

剂,复配一定量正戊烷、柴油等稀释剂,研制了一种复合溶剂反应型冷拌沥青混合料,该反应型常温沥青混合料能快速形成较高的早期强度,且具有良好的黏附性;李璐等^[11]将反应型树脂预聚体结合一定量稀释剂成功研制出一种高性能反应型常温沥青,结果表明该常温沥青储存稳定性表现良好,且初期强度与成型强度均远高于其他市面上用作冷补的常温沥青;盛兴跃等^[12]通过大量室内试验系统研究了自研的反应型聚氨酯常温沥青,结果表明其具有较好的黏聚性和抗水损害能力,同时高低温性能和耐疲劳性均有不错的表现。

十溴二苯乙烷(DBDPE)是一种新型溴系阻燃剂,具有阻燃效率高、热稳定性好、抗紫外性能佳等特点。目前 DBDPE 在塑料领域有比较广泛的应用,其制作的材料力学性能稳定,较其他溴系阻燃剂渗出性低,燃烧时不产生有毒气体,与无机类阻燃剂相比,DBDPE 与有机材料相容性好。因此 DBDPE 被誉为高效环保型溴系阻燃剂^[13,14]。近年来,DBDPE 用作沥青阻燃剂也取得了一定的成果。熊剑平等^[15,16]利用热重分析、煅烧分析及分解气体产物检验等方法对 DBDPE 阻燃机理进行了深入研究,结果表明 DBDPE 兼具凝聚相阻燃作用与气相阻燃作用,具有较好的阻燃抑烟效果。

将反应型常温沥青与有机阻燃剂十溴二苯乙烷结合,研制出一种反应型常温阻燃沥青。前期试验结果发现,其主要技术指标均符合规范要求(见表 1)。因此,本研究通过氧指数测试检验该反应型常温阻燃沥青的阻燃效果,同时为研究阻燃剂 DBDPE 与反应型常温沥青的阻燃作用机理,本研究通过扫描电镜试验、红外光谱试验、热分析试验对阻燃剂 DBDPE 在反应型常温沥青中的微观表征和阻燃机理进行了研究。

1 试验材料与方法

本研究在自研反应型常温沥青的基础上,以自研不饱和脂肪酸类物质作为稀释溶剂,结合其他改性剂将 70# 道路石油沥青液化制得液体沥青。选用的十溴二苯乙烷(DBDPE)阻燃剂由山东泰星新材料有限公司生产,含溴量 81%,平均粒径 $5.0\ \mu\text{m}$ 以下。由于颗粒过小容易发生团聚现象会给阻燃沥青的制备带来一定困难,因此在阻燃沥青制备过程中采用机械搅拌和人工搅拌相结合的方法进行充分拌和。采用水泥、偏高岭土、氢氧化钙等无机活性粉末作为固化剂。将固化剂加入到液体沥青中固化形成强度制备反应型常温沥青试样,然后将阻燃剂和固化剂先后加入到液体沥青中拌和均匀制得反应型常温阻燃沥青试样。通过大量前期试验确定阻燃剂 DBDPE 掺量为 15%。反应型常温阻燃沥青各项性能指标见表 1。

表 1 反应型常温阻燃沥青主要技术指标

Table 1 Technical indicators of reactive cold mixed asphalt

性能指标	规范要求	测试结果
针入度(25 °C, 100 g, 5 s)/(0.1 mm)	30~80	55
软化点($T_{R\&B}$)/°C	≥ 60	72
延度(15 °C)/cm	—	49
闪点/°C	≥ 230	256
TFOT 后质量变化/%	—	0.6
黏韧性(25 °C)/(N·m)	≥ 5	12
韧性(25 °C)/(N·m)	≥ 2.5	7.8
布氏黏度(60 °C)/(Pa·s)	2~2.5	2.15
PG 等级	—	PG 70-22

采用 GS-YZ-A 型数字式氧指数测试仪对基质沥青、反应型常温沥青、反应型常温阻燃沥青氧指数进行测试。电镜扫描试验采用 EVO MA10 型扫描电镜通过放大 100~2 000 倍对阻燃沥青的微观形貌进行观测。红外光谱试验采用 Nicolet 380 傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)对反应型常温沥青加阻燃剂前后官能团的变化情况进行分析,以研究阻燃剂在反应型常温沥青中的存在状态,分析阻燃剂与反应型常温沥青之间的物理化学反应,为研究阻燃机理做准备。综合热重法和差示

扫描量热法分析反应型常温沥青和反应型常温阻燃沥青的热解规律,揭示阻燃机理。热分析仪采用德国耐驰公司 STA-449C 型综合热分析仪。它是一款先进的同步 TG-DSC 分析仪器(见图 1),通过 TG、DSC 等热分析技术的联用,可获取更多的热分析信息,同时多种分析技术集中在一个仪器上,方便使用,减少误差。试验条件为空气气氛,气氛流量为 20 mL/min,升温速率为 10 °C/min,温度范围为 30~800 °C。



图 1 热分析仪

Fig. 1 Thermal analyzer

2 试验结果分析

2.1 氧指数测试

极限氧指数法(简称氧指数法)是到目前为止使用最普遍的评价沥青阻燃效果的方法。该方法要求在规定的试验条件下,通入的氮氧混合气体能够刚好维持材料燃烧时氧气的浓度,以体积百分数表征。基质沥青、反应型常温沥青、反应型常温阻燃沥青氧指数测试结果见表 2。

表 2 基质沥青、反应型常温沥青及反应型常温阻燃沥青氧指数

Table 2 Oxygen index values of matrix asphalt, reactive cold mixed asphalt and reactive cold mixed flame retardant asphalt %

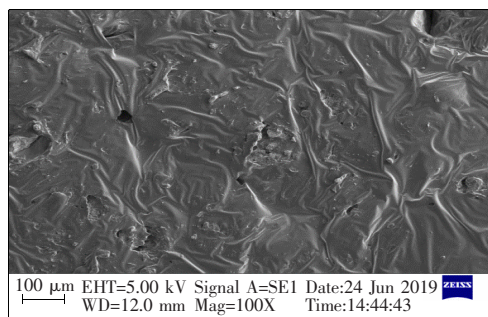
试样	氧指数
基质沥青	20.8
反应型常温沥青	23.0
反应型常温阻燃沥青	26.0

由表 2 测试结果可知,反应型常温沥青氧指数比基质沥青高了 2.2%,说明相比基质沥青反应型常温沥青具有一定的阻燃性能,其阻燃化改性

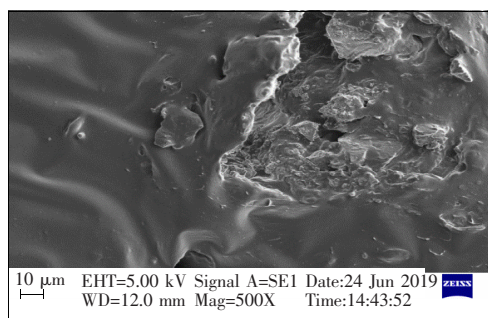
具有先天优势。另外,反应型常温阻燃沥青的氧指数达到了 26%,相比反应型常温沥青提高了 3%,阻燃性能提升明显。《道路用阻燃沥青混凝土》(GB/T 29051-2012)规范中要求阻燃沥青氧指数大于 23%。可见,该反应型常温阻燃沥青具有较好的阻燃性能。

2.2 扫描电镜试验

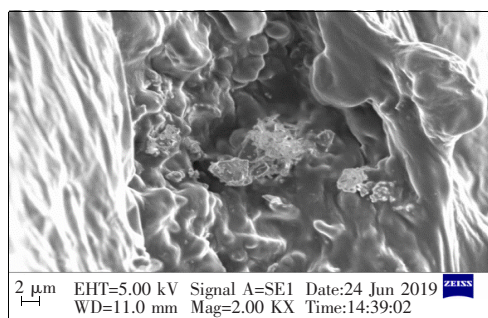
扫描电镜(SEM)是一种介于透射电镜与光学显微镜之间,对物质微观尺度进行观测的试验装置。它通过放大较大的倍数对试件表面及结构实现微观成像,广泛应用于物质表面形态的研究中^[17]。图 2 为反应型常温阻燃沥青表面扫描图。



(a) 放大 100 倍



(b) 放大 500 倍



(c) 放大 2 000 倍

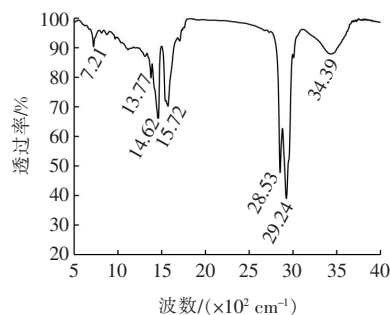
图 2 反应型常温阻燃沥青电镜扫描图

Fig. 2 SEM images of reactive cold mixed flame retardant asphalt

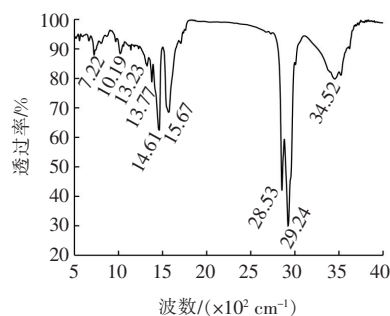
从图 2 可以看出,放大 100 倍后,反应型常温阻燃沥青表面出现褶皱,颗粒状物质较少,基本被沥青覆盖,说明该反应型常温阻燃沥青黏性较好,属于黏弹性体,具有自我修复能力;放大 500 倍后,可以观察到颗粒状和块状物,表面比较光滑,沥青裹附性好,颗粒物没有发生团聚现象;进一步放大至 2 000 倍,可以清楚地看到被沥青裹覆的细小颗粒,粒径均在 $5 \mu\text{m}$ 以下,推测为阻燃剂 DB-DPE,同时还有少量的絮状物,推测为固化反应的产物。

2.3 红外光谱试验

由于样品中的特征基团可以吸收不同波段的电磁辐射,并在光谱图的不同位置出现吸收峰,而相同基团的吸收峰位置相对固定。本研究通过红外光谱试验得到光谱图,并分析光谱图中吸收峰的形状、位置、数量及强度对样品进行定性分析^[18]。反应型常温沥青和反应型常温阻燃沥青红外光谱图见图 3。



(a) 反应型常温沥青



(b) 反应型常温阻燃沥青

图 3 红外光谱图

Fig. 3 Infrared spectrums

由图 3 可分析得到:

1) 反应型常温沥青存在 7 个明显的吸收峰, $3\,439 \text{ cm}^{-1}$ 处吸收峰波峰较宽,是由羟基 O-H 伸缩振动产生, $2\,924, 2\,853 \text{ cm}^{-1}$ 处吸收峰强度高且峰型尖锐,分别是由亚甲基- CH_2 -反对称伸缩

振动和对称伸缩振动产生, $1\,572\text{ cm}^{-1}$ 处吸收峰是由苯环骨架上 $\text{C}=\text{C}$ 伸缩振动产生, $1\,462\text{ cm}^{-1}$ 处吸收峰是由 $-\text{CH}_2-$ 弯曲振动和甲基 $-\text{CH}_3$ 上 $\text{C}-\text{H}$ 不对称弯曲振动叠加产生, $1\,377\text{ cm}^{-1}$ 处吸收峰峰形尖锐, 是由甲基 $-\text{CH}_3$ 上 $\text{C}-\text{H}$ 对称弯曲振动产生, 721 cm^{-1} 处吸收峰是由长链烷烃面内摇摆产生。

2) 反应型常温阻燃沥青存在 9 个明显的吸收峰, 其中 7 处吸收峰与反应型常温沥青相对应, 产生原因也相同。不同的是反应型常温阻燃沥青 $2\,924, 2\,853\text{ cm}^{-1}$ 处吸收峰透过率降低、波峰强度增大, 说明亚甲基 $-\text{CH}_2-$ 含量增加, 推测认为十溴二苯乙烷结构中的亚甲基导致 $2\,924, 2\,853\text{ cm}^{-1}$ 处波峰增强。反应型常温阻燃沥青中 $1\,323, 1\,019\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰, 峰形尖锐程度较低, 均是由十溴二苯乙烷上的苯环骨架振动产生。

综合以上分析可知, 阻燃剂 DBDPE 加入到反应型常温沥青中, 除了 DBDPE 自身官能团的掺入, 没有新的官能团产生, 说明 DBDPE 与反应型常温沥青没有发生化学反应, 属于物理混溶, 相容性良好。

2.4 热分析试验

材料在空气气氛中的热失重试验和实际火灾现场较为相似, 相关性也较高, 有助于分析材料的阻燃性能。图 4 为空气气氛下反应型常温沥青和反应型常温阻燃沥青 TG-DSC 试验结果对比图。

由图 4 分析可知:

1) 图 4(a) 中, $268.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 前反应型常温沥青和反应型常温阻燃沥青的失重线基本重叠, 失重量均低于 3% , 沥青开始分解, 阻燃剂尚未分解; $268.5\sim 456.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 反应型常温阻燃沥青的失重量始终大于反应型常温沥青; $456.0\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$, 反应型常温阻燃沥青的失重量始终小于反应型常温沥青; $641.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后, 反应型常温沥青失重量趋于稳定(重量变化小于 1%), 反应型常温阻燃沥青至 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 失重量仍在继续下降; 反应型常温阻燃沥青 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 残炭量大于 16% , 比反应型常温沥青大。由此, 可以推测阻燃剂前期没有阻碍沥青的分解, 相反自身也在分解并导致反应型常温阻燃沥青的失重量大于反应型常温沥青, 而后期阻燃剂的分解产物发挥了抑制沥青分解的作用。

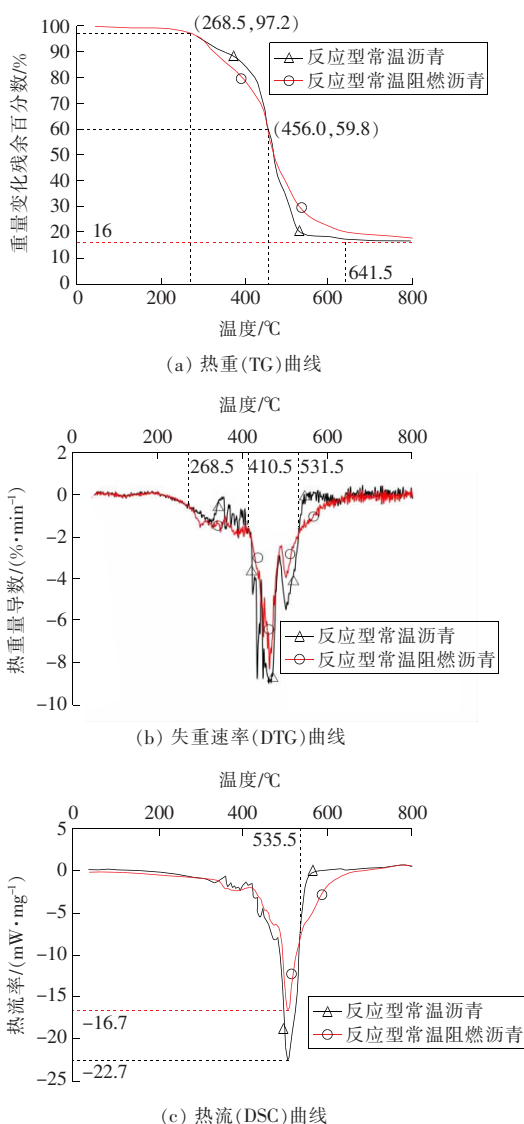


图 4 反应型常温沥青和反应型常温阻燃沥青热分析试验结果

Fig. 4 Thermal analysis test results of reactive cold mixed asphalt and reactive cold mixed flame retardant asphalt

2) 图 4(b) 中, $268.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 前反应型常温沥青和反应型常温阻燃沥青热失重速率曲线基本重合, 阻燃剂尚未分解; $268.5\sim 410.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 反应型常温阻燃沥青失重速率基本大于反应型常温沥青, 沥青和阻燃剂均在分解; $410.5\sim 531.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 反应型常温沥青和反应型常温阻燃沥青均出现了明显的热解峰, 且前者的热解峰“包裹着”后者的热解峰, 前者的失重速率大于后者, 阻燃剂分解产物起到了抑制沥青继续分解的作用; $531.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之后, 反应型常温沥青失重速率迅速下降, 分解基本完成, 反应型常温阻燃沥青随着阻燃剂分解产物阻燃作用的失

效而继续分解。

3) 图 4(c)中,反应型常温阻燃沥青的热流率峰值为 -16.7 mW/mg ,远小于反应型常温沥青的热流率峰值 -22.7 mW/mg (负号表示放热)。535.5 $^{\circ}\text{C}$ 之前,反应型常温阻燃沥青热流率总体小于反应型常温沥青,后者的热流率曲线峰“包裹”着前者的热流率曲线峰,且后者的放热量大于前者,说明阻燃剂抑制了沥青的分解反应,有效降低了沥青的反应热。

综合以上分析可知,反应型常温阻燃沥青先于反应型常温沥青分解,DBDPE在一定范围内加速了沥青的分解,表现为268.5~410.5 $^{\circ}\text{C}$ 反应型常温阻燃沥青失重量和失重速率均大于反应型常温沥青,这是因为DBDPE分解产生的溴化氢(HBr)消耗了反应型常温沥青热解产生的自由基。对比图4(c)DSC曲线可知,低于535.5 $^{\circ}\text{C}$ 时反应型常温阻燃沥青的放热量小于反应型常温沥青,这是由于DBDPE分解产生了致密的硬质薄膜,延缓了沥青的分解过程。但主要原因还是DBDPE在沥青分解时就开始产生HBr,并捕捉沥青热解反应生成的自由基,从而延缓或终止燃烧反应。同时释放出不易燃、密度大的HBr气体,覆盖在沥青表面,隔绝其表面的可燃气,从而抑制沥青燃烧,起到阻燃作用。

3 结论

1) 反应型常温阻燃沥青的氧指数达到了26%,DBDPE的掺入大大提升了反应型常温沥青的阻燃性能。

2) DBDPE在反应型常温沥青中具有良好的分散性,被反应型常温沥青完全包裹的颗粒,基本粒径均在5 μm 以下,没有颗粒外露及团聚现象。

3) 反应型常温阻燃沥青中,DBDPE与反应型常温沥青未发生化学反应,属于物理混溶,相容性良好。出现在1323,1019 cm^{-1} 处的吸收峰,是由DBDPE上的苯环骨架振动产生,没有产生新的官能团。

4) 反应型常温阻燃沥青的阻燃机理为气相阻燃兼凝聚相阻燃,DBDPE分解产物HBr能够捕

捉沥青热解反应生成的自由基,从而延缓反应型常温沥青分解。反应型常温阻燃沥青终止分解温度相比反应型常温沥青,从641.5 $^{\circ}\text{C}$ 提高至800 $^{\circ}\text{C}$ 以上。反应型常温阻燃沥青分解过程中会产生致密的硬质薄膜,覆盖在沥青表面抑制常温沥青的分解,有效降低了反应热。同时反应型常温阻燃沥青热流率峰值相比反应型常温沥青,从 -22.7 mW/mg 降至 -16.7 mW/mg 。

〔参考文献〕

- [1] JTG D70-2004,公路隧道设计规范[S].北京:人民交通出版社,2004.
JTG D70-2004,Code for design of road tunnels[S]. Beijing:China Communications Press,2004.
- [2] JTG 3370.1-2018,公路隧道设计规范[S].北京:人民交通出版社,2018.
JTG 3370.1-2018,Code for design of road tunnels[S]. Beijing:China Communications Press,2018.
- [3] Qiu J L, Yang T, Wang X L, et al. Review of the flame retardancy on highway tunnel asphalt pavement[J]. Construction and Building Materials, 2019, 195:468-482.
- [4] Xiao F P, Guo R, Wang J G. Flame retardant and its influence on the performance of asphalt-a review[J]. Construction and Building Materials, 2019, 212: 841-861.
- [5] Tang N, Deng Z X, Dai J G, et al. Geopolymer as an additive of warm mix asphalt: preparation and properties[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 192: 906-915.
- [6] Li Y Y, Liu S T, Xue Z C, et al. Experimental research on combined effects of flame retardant and warm mixture asphalt additive on asphalt binders and bituminous mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2014, 54:533-540.
- [7] Li J S, Yang F, Dai L C, et al. Fundamental performance investigation on reactive liquid asphalt[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 225:315-323.
- [8] Xiao J J, Jiang W, Ye W L, et al. Effect of cement and emulsified asphalt contents on the performance of cement-emulsified asphalt mixture [J]. Construction and Building Materials, 2019, 220:577-586.
- [9] Nader Nciri, Namho Kim, Namjun Cho. New insights

- into the effects of styrene-butadiene-styrene polymer modifier on the structure, properties and performance of asphalt binder; the case of AP-5 asphalt and solvent deasphalting pitch[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2017, 193: 477-495.
- [10] 胡芑,阮玉非,张伟,等. 反应型冷拌沥青混合料的制备与强度性能研究[J]. *施工技术*, 2016, 45(S): 373-375.
- HU Yan, RUAN Yu-fei, ZHANG Wei, et al. Study on the preparation and strength performance of reactive cold mix asphalt mixtures[J]. *Construction Technology*, 2016, 45(S): 373-375.
- [11] 李璐,李睿,盛兴跃,等. 高性能反应型沥青冷补液研究[J]. *公路工程*, 2015(2): 83-86.
- LI Lu, LI Rui, SHENG Xing-yue, et al. Research on cold rehydration of high performance reactive asphalt[J]. *Highway Engineering*, 2015(2): 83-86.
- [12] 盛兴跃,李睿,李璐,等. 反应型沥青冷补料制备与性能研究[J]. *公路交通技术*, 2016(1): 48-52.
- SHENG Xing-yue, LI Rui, LI Lu, et al. Preparation and performance of reactive asphalt cold feed[J]. *Technology of Highway and Transport*, 2016(1): 48-52.
- [13] 张胜,谷晓昱. 阻燃剂十溴二苯乙烷的市场现状分析及展望[J]. *塑料助剂*, 2013(6): 12-15.
- ZHANG Sheng, GU Xiao-yu. Analysis and prospect of the market status of flame retardant DBDPE[J]. *Plastic Auxiliaries*, 2013(6): 12-15.
- [14] 李森,王雪,李洪成,等. 十溴二苯乙烷阻燃 SBR 热失重行为研究[J]. *世界橡胶工业*, 2014, 41(3): 24-28.
- LI Sen, WANG Xue, LI Hong-cheng, et al. Study on thermal weight loss behavior of decabromodiphenylethane flame retardant SBR[J]. *World Rubber Industry*, 2014, 41(3): 24-28.
- [15] 熊剑平,彭文举. 阻燃沥青用十溴二苯乙烷阻燃机理研究[J]. *交通世界*, 2016(S2): 182-183, 191.
- XIONG Jian-ping, PENG Wen-ju. Research on the flame retardant mechanism of decabromodiphenylethane for flame retardant asphalt[J]. *World of Communications*, 2016(S2): 182-183, 191.
- [16] 熊剑平,彭文举,陈宇,等. 基于热分析的阻燃沥青阻燃机理[J]. *长安大学学报:自然科学版*, 2019, 39(2): 47-56.
- XIONG Jian-ping, PENG Wen-ju, CHEN Yu, et al. The flame retardant mechanism of flame retardant asphalt based on thermal analysis[J]. *Journal of Changan University: Natural Science Edition*, 2019, 39(2): 47-56.
- [17] Wang X, Chen Q H, Zheng Y Q, et al. Study on novel flame retarded LDH-TDI-HEA-VTES-acrylate composites and their flame retardant mechanism[J]. *Reactive and Functional Polymers*, 2020, 147: 104371.
- [18] Hou X D, Lv S T, Chen Z, et al. Applications of Fourier transform infrared spectroscopy technologies on asphalt materials[J]. *Measurement*, 2018, 121: 304-316.