

文章编号:1000-582X(2013)03-053-06

# BFR-Ti 和 ZB 协同阻燃隧道路面沥青的阻燃性能及机理

陈辉强<sup>1</sup>, 唐伯明<sup>1</sup>, 郝培文<sup>2</sup>

(1. 重庆交通大学 土木建筑学院, 重庆 400074; 2. 长安大学 道路结构与材料交通部重点实验室, 西安 710064)

**摘要:**以钛酸酯改性沥青阻燃剂 BFR-Ti 和阻燃增效剂硼酸锌 ZB 为助剂, 以 SBS 改性沥青为母体制备隧道阻燃沥青, 通过氧指数法、烟密度法、锥形量热法和热重分析等方法系统研究了 BFR-Ti 与 ZB 协同阻燃 SBS 改性沥青的燃烧性能, 探讨了二者的协同阻燃机理。结果表明, 与 SBS 改性沥青/BFR-Ti 相比, SBS 改性沥青/BFR-Ti/ZB 体系的氧指数略有上升, 烟密度、热释放速率(HRR)、质量损失速率(MLR)以及有效燃烧热(EHC)等指标均明显下降, 实际成炭量增加; SBS 改性沥青/BFR-Ti 具有显著的吸热阻燃机理和凝聚相阻燃机理的特征, SBS 改性沥青/BFR-Ti/ZB 是以凝聚相阻燃机理为主, 兼具协效阻燃和吸热阻燃机理。

**关键词:**隧道; 阻燃改性; 沥青; 硼酸锌; 偶联剂; 协同作用; 阻燃机理

**中图分类号:**U416.216

**文献标志码:**A

## Study on flammability and flame-retardant mechanism of modified asphalt for tunnel pavement synergistically flame retarded by BFR-Ti and ZB

CHEN Huiqiang<sup>1</sup>, TANG Boming<sup>1</sup>, HAO Peiwen<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Key Laboratory of Road Structure and Material of Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** Tunnel fire resistant asphalt can be prepared by mixing SBS modified asphalt and BFR-Ti/ZB. The combustion performances of the SBS modified asphalt/BFR-Ti/ZB and the synergism mechanism of the BFR-Ti and ZB are studied systematically through different methods, such as oxygen index (LOI) method, density of smoke, cone calorimetry, thermogravimetric analysis, etc. The result indicates that compared with SBS modified asphalt/BFR-Ti, BFR-Ti/ZB has synergistic effect which can make smoke density, heat release rate(HRR), mass loss rate(MLR) and effective heat of combustion(EHC) of SBS modified asphalt/BFR-Ti/ZB systems significantly decrease while the oxygen index of the SBS modified asphalt/BFR-Ti/ZB and the practice carbon content increase. SBS modified asphalt/BFR-Ti system has significant endothermic-antiflaming mechanism and condensed phase flame-retardance character. SBS modified-asphalt / BFR-Ti/ZB is based on the condensed phase flame-retardance mechanism while with synergistic flame-retardance and endothermic-antiflaming mechanism.

**Key words:** tunnel; flame-retardant modified; asphalt; zinc borate; coupling agent; synergistic effect; flame-retardant mechanism

收稿日期:2012-10-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50978263)

作者简介:陈辉强(1974-),男,重庆交通大学副研究员,博士后,主要从事路面结构与材料的研究,(E-mail) chqlxj@126.com。

为了提高公路隧道沥青铺装运营的安全性,减少隧道交通事故的损失,保障人民生命财产的安全,环保、高效的抑烟型阻燃沥青是当今长大公路隧道铺装的首选<sup>[1-4]</sup>。然而,单一的阻燃剂很难满足上述要求,结合高分子阻燃的最新技术与成果,复合型的协同阻燃方式乃是实现这一目的最有效的途径<sup>[5-6]</sup>。尽管国内关于沥青阻燃的研究较多,但对于沥青的协同阻燃与阻燃机理的研究鲜有报道。经偶联剂表面改性的沥青阻燃剂尽管解决了其与沥青相容性差的问题<sup>[7-10]</sup>,但对阻燃效果的贡献并不明显。作为一种高分子材料的阻燃剂、抑烟剂和阻燃增效剂,硼酸锌(ZB)的应用十分广泛<sup>[11-14]</sup>。笔者将采用经钛酸酯偶联剂表面改性的沥青阻燃剂(BFR-Ti)与硼酸锌按一定比例混合,形成复合阻燃体系,通过对比分析 SBS 改性沥青、SBS 改性沥青/BFR-Ti 及 SBS 改性沥青/BFR-Ti/ZB 3 种体系的燃烧性能和热失重行为,研究硼酸锌(ZB)与 BFR-Ti 在阻燃沥青中的协同阻燃作用,进而探明其阻燃机理。

## 1 沥青阻燃性能测试

沥青的阻燃性能采用极限氧指数 LOI 与烟密度即比光密度  $D_s$  来表征。极限氧指数 LOI 试验按 GB/T 2406—1993 标准执行,采用常州市第一纺织设备有限公司生产的 YG-813 型氧指数试验仪进行测定;烟密度试验按 GB 8627—1999 标准执行,采用南京艾赛特科技发展有限公司生产的烟密度箱试验仪进行测定。SBS 改性沥青、SBS 改性沥青/BFR-Ti(质量比 100:9,下同)及 SBS 改性沥青/BFR-Ti/ZB(质量比 100:7:2,下同)极限氧指数与烟密度测试结果分别见表 1 和图 1。

表 1 SBS 改性沥青和阻燃沥青的极限氧指数 %

试样编号	1	2	3	4	5	平均值
SBS 改性沥青	18.2	18.7	19.3	18.4	18.6	18.6
BFR-Ti 阻燃沥青	26.6	27.8	27.5	27.2	27.0	27.2
BFR-Ti/ZB 阻燃沥青	28.8	28.3	28.7	29.1	28.4	28.7

SBS 改性沥青有着较低的氧指数和较高的烟密度,表明它容易被点燃且很快释放出大量的烟雾;SBS 改性沥青/BFR-Ti 与 SBS 改性沥青/BFR-Ti/ZB 的氧指数明显升高,烟密度明显降低,表明 BFR-Ti 与 ZB 具有良好的阻燃效果;ZB 的加入使阻燃沥青的氧指数略有升高,且明显降低了烟密度,表明 ZB 对于抑制沥青的点燃来说作用并不突出,但可明显降低隧道火灾事故中的烟雾浓度,证明了 BFR-Ti 与 ZB 在沥青燃烧过程中存在着协同阻燃作用,这对于隧道

火灾事故的逃生和救援具有重大的实际工程意义。

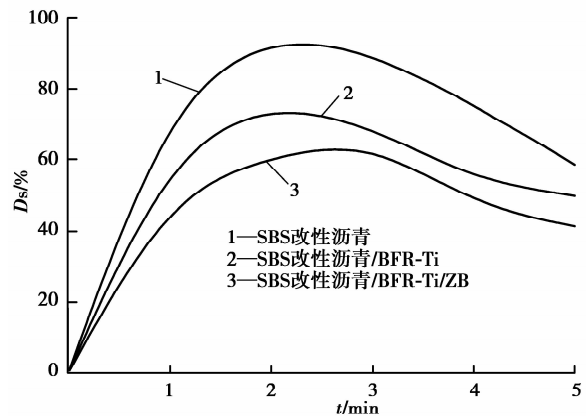


图 1 SBS 改性沥青和阻燃沥青烟密度曲线图

## 2 阻燃机理分析

### 2.1 BFR-Ti 和 ZB 协同阻燃 SBS 改性沥青的热失重行为

SBS 改性沥青、SBS 改性沥青/BFR-Ti 及 SBS 改性沥青/BFR-Ti/ZB 热分析数据采用美国 Perkin-Elmer 公司生产的 Perkin-Elmer Q50 热重分析仪进行测定,试验结果的 TGA 曲线和 DTG 曲线分别见图 2 和图 3,其相应数据见表 2。

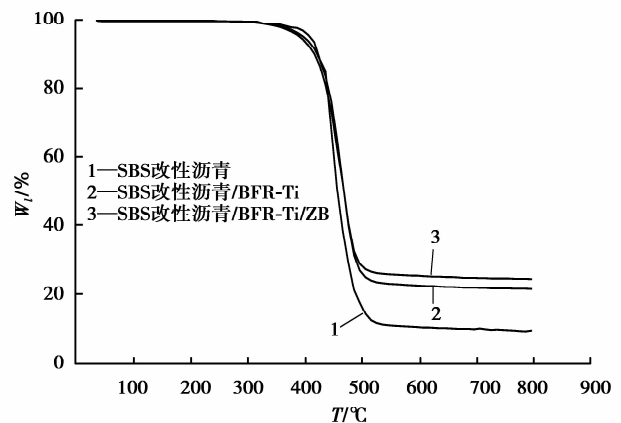


图 2 SBS 改性沥青和阻燃沥青的 TGA 曲线

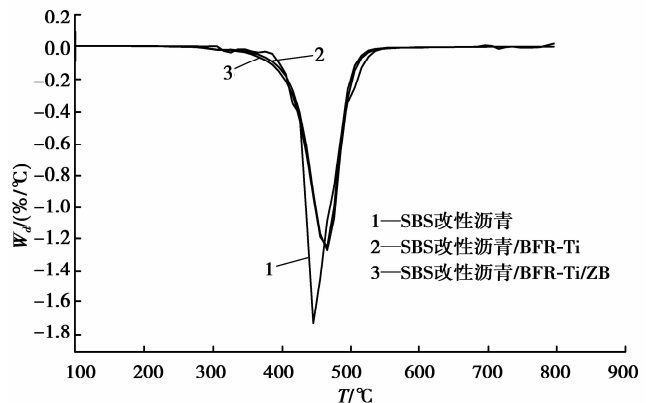


图 3 SBS 改性沥青和阻燃沥青的 DTG 曲线

表2 SBS改性沥青和阻燃沥青的热分析数据

样品类别	$T_{\text{onset}}$ /°C	$T_p$ /°C	$T_f$ /°C	各种分解温度下的残留物/%			
				450 °C	550 °C	650 °C	750 °C
SBS改性沥青	405.5	445.6	545.6	50.89	10.91	10.06	9.54
SBS改性沥青/BFR-Ti	395.9	465.1	565.6	70.55	22.99	22.11	21.68
SBS改性沥青/BFR-Ti/ZB	386.8	465.3	565.6	67.70	25.75	24.97	24.54

注: $T_{\text{onset}}$ 为分解率5%时的温度; $T_p$ 为DTG曲线中的峰温; $T_f$ 为分解完毕的温度。

图2、图3和表2的试验结果表明,SBS改性沥青的起始分解温度 $T_{\text{onset}}$ 为405.5 °C,最高分解温度 $T_p$ 为445.6 °C,而SBS改性沥青/BFR-Ti以及SBS改性沥青/BFR-Ti/ZB的起始分解温度 $T_{\text{onset}}$ 分别为395.9 °C和386.8 °C,最高分解温度 $T_p$ 均为465.5 °C左右。与SBS改性沥青相比,SBS改性沥青/BFR-Ti以及SBS改性沥青/BFR-Ti/ZB最高分解温度 $T_p$ 都有显著提高,但起始分解温度 $T_{\text{onset}}$ 变化不大;说明沥青阻燃剂BFR-Ti和硼酸锌ZB的加入明显增强了阻燃沥青的高温热稳性;分析比较450 °C以后的残炭量可以看出,SBS改性沥青的成炭量仅为10.91%,而SBS改性沥青/BFR-Ti的成炭量为21.68%,SBS改性沥青/BFR-Ti/ZB的成炭量则高达24.54%,SBS改性沥青/BFR-Ti以及SBS改性沥青/BFR-Ti/ZB在各个温度下的残炭量均明显高于SBS改性沥青,说明SBS改性沥青在燃烧过程中几乎没有成炭作用;而添加BFR-Ti与ZB之后的阻燃沥青,其最终残留物均在20%以上,表明BFR-Ti与ZB促进了沥青在热分解过程中的成炭,并最终使成炭量提高了10.0%以上。Van Krevelen理论认为,无卤阻燃聚合物的阻燃性能与体系的成炭量有着较好的线性关系。其原因是所形成的炭层覆盖在沥青表面起到隔热隔氧的作用,从而保护阻燃沥青基体,使其不再分解。试验结果表明了BFR-Ti有利于阻燃沥青燃烧过程中的成炭,BFR-Ti和ZB协同阻燃更增强了成炭进程。

## 2.2 BFR-Ti和ZB协同阻燃对SBS改性沥青的锥形量热分析

利用英国Fire Testing Technolo公司生产的锥形量热仪(FTT Standard Cone Calorimeter),分别测试了SBS改性沥青、SBS改性沥青/BFR-Ti及SBS改性沥青/BFR-Ti/ZB 3种体系的热释放速率(HRR)、有效燃烧热(EHC)以及质量损失速率(MLR),试验按照ISO 5660标准,在50 kW/m<sup>2</sup>辐照功率下对样品进行试验<sup>[15-16]</sup>,并分别讨论了BFR-Ti和ZB协同阻燃对SBS改性沥青的HRR、EHC

及MLR的影响。

### 2.2.1 BFR-Ti和ZB协同阻燃对SBS改性沥青热释放速率(HRR)的影响

SBS改性沥青、SBS改性沥青/BFR-Ti及SBS改性沥青/BFR-Ti/ZB的HRR变化曲线见图4。

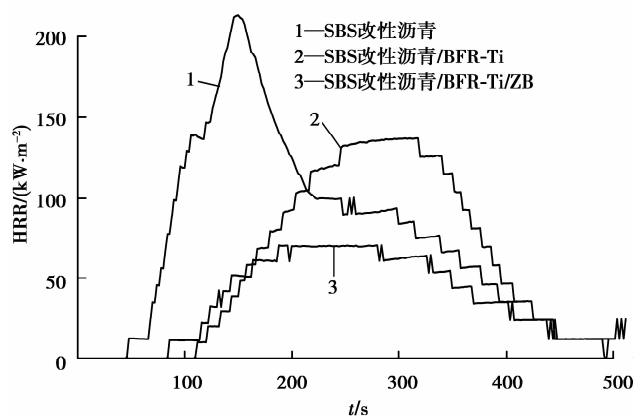


图4 SBS改性沥青和阻燃沥青的热释放速率曲线图

从点燃时间看,几种体系的点燃时间存在较大差别:SBS改性沥青能够比较快地被点燃,其次是SBS改性沥青/BFR-Ti/ZB,SBS改性沥青/BFR-Ti的点燃时间最长,但几种阻燃体系的点燃时间差别并不大。从峰型看,SBS改性沥青的HRR值增加迅速且峰形尖锐,点燃之后迅速达到最大值213.68 kW/m<sup>2</sup>。然而,在SBS改性沥青基体中添加BFR-Ti及ZB之后,其热释放速率曲线发生了明显的改变,不仅HRR峰值呈现大幅降低,而且体系的燃烧时间明显延长;另外,SBS改性沥青/BFR-Ti及SBS改性沥青/BFR-Ti/ZB的HRR图呈现低而宽的阶梯状峰形特征,表明燃烧比较缓和,BFR-Ti与ZB对SBS改性沥青有着良好的阻燃作用。

再比较SBS改性沥青/BFR-Ti及SBS改性沥青/BFR-Ti/ZB的HRR曲线图,SBS改性沥青/BFR-Ti/ZB的热释放速率HRR明显低于SBS改性沥青/BFR-Ti,表明硼酸锌ZB对于SBS改性沥青/BFR-Ti有着良好的协同阻燃作用。

### 2.2.2 BFR-Ti 和 ZB 协同阻燃对 SBS 改性沥青有效燃烧热(EHC)的影响

有效燃烧热 EHC 表示燃烧过程中高分子材料受热分解所形成的挥发物中可燃烧成分燃烧释放的热量。EHC 值越大,表明挥发物越多燃烧也越完全;反之,挥发物越少燃烧也越不完全。SBS 改性沥青、SBS 改性沥青/BFR-Ti 及 SBS 改性沥青/BFR-Ti/ZB 3 种体系的 EHC 对时间的关系曲线见图 5。

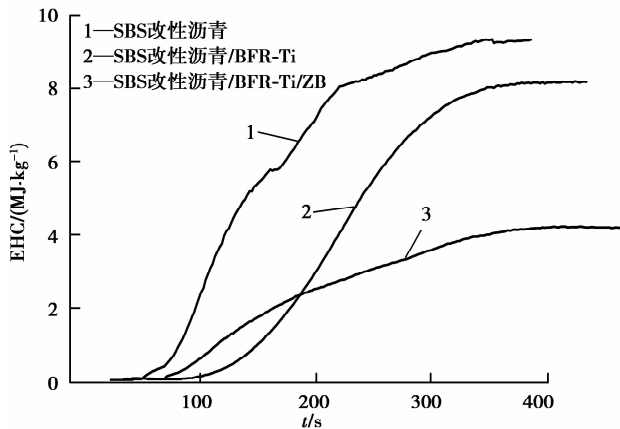


图 5 SBS 改性沥青和阻燃沥青的有效燃烧热 EHC 曲线图

可以看出,SBS 改性沥青的 EHC 峰值明显高于 SBS 改性沥青/BFR-Ti 及 SBS 改性沥青/BFR-Ti/ZB 体系,相对于 SBS 改性沥青/BFR-Ti,SBS 改性沥青/BFR-Ti/ZB 的 EHC 峰值进一步明显下降,表明 BFR-Ti 与 ZB 有效抑制了沥青燃烧过程中挥发物的溢出及其充分燃烧,降低了 EHC 值;在燃烧初期,SBS 改性沥青/BFR-Ti/ZB 的 EHC 值略高于 SBS 改性沥青/BFR-Ti,但中期和后期的 EHC 值明显降低,且 SBS 改性沥青/BFR-Ti/ZB 的 EHC 曲线,随时间的上升趋势最为缓和,具有最小的 EHC 峰值(5.20 kJ/g)。表明硼酸锌 ZB 的加入,减少了阻燃沥青挥发物的溢出量,使挥发物燃烧不够充分,ZB 与 BFR-Ti 产生了协同作用,这种协同作用主要发生在燃烧中后期,并引起了体系阻燃机理的改变,它使体系由气相阻燃机理向凝聚相阻燃机理转变。

为了便于比较,将图 4 和图 5 中 3 种体系的相关数据(如点燃时间、最大热释放速率和残留物质量等)列于表 3。

从表 3 可以看出,SBS 改性沥青/BFR-Ti 的 PHRR 值为 136.87 kW/m<sup>2</sup>,明显低于 SBS 改性沥青,而 SBS 改性沥青/BFR-Ti/ZB 的 PHRR 值仅为 70.29 kW/m<sup>2</sup>,表明硼酸锌对 BFR-Ti 沥青阻燃有着较好的协同增效作用;相对于 SBS 改性沥青,两

种阻燃沥青的点燃时间  $T_{ig}$  和达到 PHRR 值所需时间  $t_p$  均明显延长,一方面表明阻燃沥青不易被点燃,它们需要一定的点燃时间聚集热量才能点燃,另一方面也说明同样达到 PHRR 值的时间阻燃沥青较 SBS 改性沥青有所延长,降低了隧道火灾的危险性。

表 3 SBS 改性沥青和阻燃沥青的燃烧参数

热指标	PHRR/ (kW·m <sup>-2</sup> )	$t_p$ /s	AvEHC/ (kJ·g <sup>-1</sup> )	$t_{ig}$ /s	THC/ (MJ·m <sup>-2</sup> )
SBS 改性沥青	213.68	164	9.34	48	38.8
SBS 改性沥青/ BFR-Ti	136.87	426	7.01	113	29.0
SBS 改性沥青/ BFR-Ti/ZB	70.29	280.0	5.20	84	25.02

注:①PHRR 为最大热释放速率;② $t_p$  为达到 PHRR 值所需时间;③AvEHC 为有效燃烧热峰值;④THC 为总热释放量;⑤ $t_{ig}$  为点燃时间。

再分析每一种试样单位面积燃烧过程中总释放热量 THC,在图 4 中体现为每一条曲线与横轴围成的面积,计算结果见表 3。显然,SBS 改性沥青的 THC 值最大,其次是 SBS 改性沥青/BFR-Ti,SBS 改性沥青/BFR-Ti/ZB 最小。SBS 改性沥青的 THC 值也明显高于两种阻燃沥青,并且它的热释放过程短,HRR 和 PHRR 都很高,因此危险程度高;而阻燃沥青燃烧时间长,达到 PHRR 值的时间也长,热释放主要集中在燃烧的中后期,因此 HRR 和 PHRR 较低,危险程度较小。

### 2.2.3 阻燃沥青燃烧过程中的质量损失速率 (MLR)

聚合物材料燃烧时的质量损失速率,简称为 MLR(mass loss rate)。一般地,如果 MLR 越大,则材料燃烧火焰发展蔓延性就越高,火势也就越迅猛。MLR 与 HRR 密切相关,HRR 的本质就是 MLR,因此 MLR 也是反映有机高分子材料燃烧阻燃性能的另一参数。

SBS 改性沥青、SBS 改性沥青/BFR-Ti 及 SBS 改性沥青/BFR-Ti/ZB 3 种体系的试样燃烧质量损失速率 MLR 对燃烧时间关系曲线见图 6。

由图 6 可知,SBS 改性沥青最先被点燃,且 MLR 迅速增大到较大的峰值(0.20 g/(s·m<sup>2</sup>)左右),而 SBS 改性沥青/BFR-Ti 及 SBS 改性沥青/BFR-Ti/ZB 体系随后被依次点燃,其 MLR 也较迅速增大到峰值(0.14 g/(s·m<sup>2</sup>)左右)。比较这 3 条

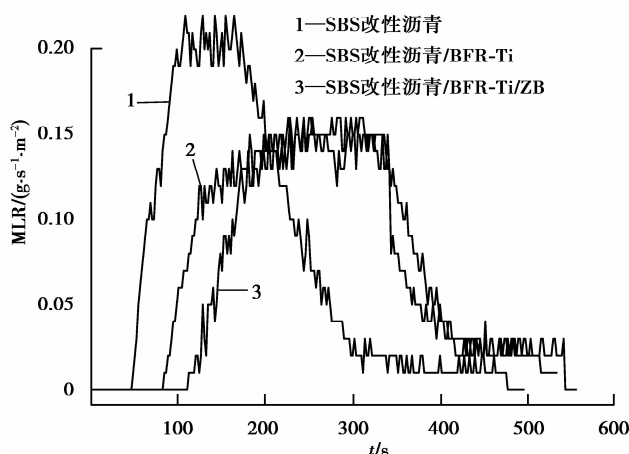


图6 SBS改性沥青和阻燃沥青的质量损失曲线图

曲线发现,在燃烧初期,SBS改性沥青一旦被点燃,其质量损失速率MLR上升很快,进入燃烧中期,该燃烧过程的MLR一直维持在一个很高的值,但时间较短,很快就燃烧完毕(MLR=0);而SBS改性沥青/BFR-Ti及SBS改性沥青/BFR-Ti/ZB体系点燃之后尽管其MLR也上升较快,但峰值较低,燃烧时间较长。显然,较低的MLR与较长的燃烧时间有利于隧道火灾事故中人们的逃生和救援工作,增强了隧道运营的安全性。

综合以上对HRR、EHC、MLR以及热失重行为的分析可以看出,SBS改性沥青/BFR-Ti的HRR与EHC有所降低,残炭量也有所增加,具有明显凝聚相阻燃的特征,但吸热阻燃仍占有较大比例,因此SBS改性沥青/BFR-Ti的阻燃作用是吸热阻燃和凝聚相阻燃共同作用的结果;而硼酸锌ZB与BFR-Ti协同作用,SBS改性沥青/BFR-Ti/ZB体系的残炭量很高,HRR与EHC值显著下降,表明协同阻燃使BFR-Ti-ZB阻燃体系的阻燃机理主要以凝聚相阻燃机理为主,取得了更好的阻燃效果。

### 3 结论

1)与SBS改性沥青相比,SBS改性沥青/BFR-Ti有着较高氧指数和较低的烟密度,ZB的加入明显降低了体系的烟密度,氧指数也略有上升,表明BFR-Ti与ZB存在显著的协同阻燃作用。

2)TGA测试结果表明,BFR-Ti和ZB具有协同作用,这种协同作用提高了阻燃沥青的热稳定性和阻燃性,增加了实际成炭量;在500~600℃,TGA和CONE的成炭量具有良好的相关性。

3)与SBS改性沥青相比,SBS改性沥青/BFR-Ti和SBS改性沥青/BFR-Ti/ZB的热释放速率

(HRR)、质量损失速率(MLR)以及有效燃烧热(EHC)等指标均明显下降,而点燃时间明显延长,燃烧残留物质量明显增加,表明BFR-Ti与ZB的加入,明显提高了沥青的阻燃性能。

4)硼酸锌ZB与BFR-Ti在阻燃沥青的燃烧过程中起到了明显的协同作用,这主要体现在沥青燃烧过程中HRR值和EHC值等燃烧参数得到了明显的减小,因此从阻燃效果上看,SBS改性沥青/BFR-Ti/ZB体系比SBS改性沥青/BFR-Ti体系更佳,这有利于隧道特别是长大隧道火灾事故中人们的逃生和救援工作,具有重要的工程实际意义。

5)SBS改性沥青/BFR-Ti/ZB、SBS改性沥青/BFR-Ti在燃烧过程中,均有BFR-Ti分解吸热、成炭等现象,表明其阻燃机理并不单一。SBS改性沥青/BFR-Ti/ZB是以凝聚相阻燃机理为主,兼具协效阻燃和吸热阻燃机理;SBS改性沥青/BFR-Ti则是吸热阻燃机理和凝聚相阻燃机理共同作用的结果。

### 参考文献:

- [1] 陈辉强,郝培文.公路隧道沥青阻燃技术研究现状及应用前景[J].公路交通技术,2009(4):115-119,128.  
CHEN Huiqiang, HAO Peiwen. Status of research and prospect of application of asphalt flame retardant technique in highway tunnel [J]. Technology of Highway and Transport, 2009(4):115-119,128.
- [2] Lu S Y, Hamerton I. Recent developments in the chemistry of halogen-free flame retardant polymers[J]. Progress in Polymer Science, 2002, 27: 1661-1712.
- [3] 杨群,郭忠印,蔺习雄.隧道路面阻燃多孔沥青混凝土性能研究[J].同济大学学报:自然科学版,2005,33(3):316-320.  
YANG Qun, GUO Zhongyin, LIN Xixiong. Research on fire-retarded open-graded friction course used in road tunnel[J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2005, 33(3): 316-320.
- [4] 陈辉强,陈仕周.沥青阻燃改性技术研究[J].公路交通技术,2003(2):19-20,39.  
CHEN Huiqiang, CHEN Shizhou. Study on technology to improve flame resistant modified bitumen [J]. Technology of Highway and Transport, 2003(2): 19-20,39.
- [5] Levchik G F, Levchik S V, Lesnikovich A I. Mechanisms of action in flame retardant reinforced nylon 6[J]. Polymer Degradation and Stability, 1996, 54(2/3):361-363.
- [6] Gilman J W, Lomakin S, Kashiwagi T, et al.

- Characterization of flame-retarded polymer combustion chars by solid-state  $^{13}\text{C}$  and  $^{29}\text{Si}$  NMR and EPR[J]. *Fire and Material*, 1998, 22(2):61-67.
- [7] 陈辉强,郝培文. 硅烷偶联剂表面改性沥青阻燃剂[J]. *土木建筑与环境工程*, 2009, 31(3):136-141.  
CHEN Huiqiang, HAO Peiwen. Surface modification of fire-retardant asphalt with silane coupling agent[J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2009, 31(3):136-141.
- [8] Liao S K, Jang S C, Lin M F. Phase behavior and mechanical properties of siloxane-urethane copolymer[J]. *Journal of Polymer Research*, 2005, 12(2):103-112.
- [9] Nguyen F N, Berg J C. Adhesion promotion of poly (phenylene sulfide) to aluminum treated with silane coupling agents[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2006, 20(2/3):197-208.
- [10] Vadala M L, Rutnakornpituk M, Zalich M A, et al. Block copolysiloxanes and their complexation with cobalt nanoparticles [J]. *Polymer*, 2004, 45 (22) : 7449-7461.
- [11] Levchik S V, Camino G, Costa L, et al. Mechanism of action of phosphorus-based flame retardants in nylon 6. I. ammonium polyphosphate[J]. *Fire and Materials*, 1995, 19(1):1-10.
- [12] 林晓丹,贾德民,陈广强,等. 硼酸锌在膨胀型阻燃聚丙烯中的协同阻燃机理研究[J]. *塑料工业*, 2002, 30(2):41-42.  
LIN Xiaodan, JIA Demin, CHEN Guangqiang, et al. Studies of mechanism of synergistic effect of zinc borate in intumescent flame retarded polypropylene[J]. *China Plastics Industry*, 2002, 30(2):41-42.
- [13] 赵伟,王丽. 硼酸锌在 LDPE 阻燃中的协效作用[J]. *塑料科技*, 2006, 34(1): 40-43.  
ZHAO Wei, WANG Li. The synergism effect of the zinc borate on fire retardancy of low density polyethylene [J]. *Plastics Science and Technology*, 2006, 34(1): 40-43.
- [14] Hietaniemi J, Kallonen R, Mikkola E. Burning characteristics of selected substance: production of heat, smoke and chemicals species [J]. *Fire and Material*, 1999, 23(4):171-185.
- [15] 舒中俊,徐晓楠,杨守生,等. 基于锥形量热仪试验的聚合物材料火灾危险评价研究[J]. *高分子通报*, 2006, 19(5): 37-44, 78.  
SHU ZhongJun, XU Xiaonan, YANG Shousheng, et al. Integrated assessing fire hazard of polymer based on data of cone calorimeter[J]. *Polymer Bulletin*, 2006, 19(5): 37-44, 78.
- [16] 李斌,王建祺. 聚合物材料燃烧性和阻燃性的评价:锥形量热仪 (CONE) 法[J]. *高分子材料科学与工程*, 1998(5):15-19.  
LI Bin, WANG Jianqi. Utilization of cone calorimeter for the appraisal of the flammability and flame retardancy of polymeric materials [J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 1998(5):15-19.

(编辑 王维朗)

(上接第 52 页)

- [14] Bernal S A, Ruby M D G, Pedraza A L, et al. Effect of binder content on the performance of alkali-activated slag concretes [J]. *Cement and Concrete Research*, 2011, 41(1): 1-8.
- [15] Martinez-Aguilar O A, Castro-Borges P, Escalante-García J I. Hydraulic binders of fluorgypsum-portland cement and blastfurnace slag stability and mechanical properties [J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(5): 631-639.
- [16] Taylor H F W. *Cement chemistry* [M]. London: Academic Press, 1990.
- [17] Sakulich A R. *Characterization of environmentally-friendly alkali activated slag cements and ancient building materials*[D]. Philadelphia: Drexel University, 2009.

(编辑 王维朗)