

文章编号:1671-8879(2020)02-0047-09

DBDPE 复合阻燃剂对 SBS 沥青性能的影响

金 雷^{1,2}, 魏建国¹, 付其林¹, 张青江³

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410004; 2. 河南交通投资集团有限公司, 河南 郑州 450016;
3. 山西路桥集团长临高速公路有限公司, 山西 太原 030012)

摘 要:为了研究十溴二苯乙烷(DBDPE)复合阻燃剂对 SBS 改性沥青性能的影响,采用极限氧指数试验、烟密度试验、针入度试验、延度试验、软化点试验、动态剪切流变试验和弯曲梁流变试验等方法,分析不同阻燃剂掺量下 SBS 改性沥青阻燃抑烟性能、物理性能和流变性能。研究表明:DBDPE 复合阻燃剂对 SBS 改性沥青性能具有显著影响,其阻燃抑烟性能显著提高;随着 DBDPE 复合阻燃剂掺量的增大,SBS 改性阻燃沥青极限氧指数逐渐提高,其烟密度等级逐渐降低,当阻燃剂掺量(质量分数,下同)大于 8% 时,其极限氧指数大于 24% 且烟密度等级降幅较小,阻燃抑烟性能提升有限,SBS 改性阻燃沥青针入度和延度逐渐降低,软化点逐渐提高,当阻燃剂掺量小于 12% 时其延度大于 20 cm,当阻燃剂掺量大于 12% 时其软化点提高的幅度较小;DBDPE 复合阻燃沥青高温抗变形能力显著提高,随着阻燃剂掺量的增大,SBS 改性阻燃沥青抗车辙因子、蠕变恢复率逐渐增大,但当阻燃剂掺量大于 8% 时其提高的幅度较小;DBDPE 复合阻燃沥青低温抗裂性能逐渐降低,随着阻燃剂掺量的增大,SBS 改性阻燃沥青的低温蠕变劲度模量逐渐提高,低温蠕变速率逐渐降低,但当阻燃剂掺量大于 12% 时二者变幅较小。综合考虑 DBDPE 复合阻燃剂对 SBS 改性沥青阻燃性能、抑烟性能及高低温流变性能的影响可知,当其掺量为 8%~12% 时的技术性能较好。

关键词:道路工程;DBDPE 复合阻燃剂;阻燃沥青;流变性能;合理掺量

中图分类号:U414 **文献标志码:**A **DOI:**10.19721/j.cnki.1671-8879.2020.02.006

Effect of DBDPE composite flame retardant on the performance of SBS asphalt

JIN Lei^{1,2}, WEI Jian-guo¹, FU Qi-lin¹, ZHANG Qing-jiang³

(1. School of Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, Hunan, China; 2. Henan Transportation Investment Group Co., Ltd., Zhengzhou 450016, Henan, China;
3. Shanxi Luqiao Group Changlin Expressway Co., Ltd., Taiyuan 030012, Shanxi, China)

Abstract: To study the effect of DBDPE composite flame retardant on the performance of SBS modified asphalt, the flame retardant and smoke suppression properties, physical properties and rheological properties of SBS modified asphalt with different flame retardant content were analyzed, based on the limit oxygen index test, smoke density test, penetration test, ductility test, softening point test, dynamic shear rheology test and bending beam rheology test. The

收稿日期:2019-10-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51608057,51878077);湖南省自然科学基金项目(2015JJ3007)

作者简介:金 雷(1972-),男,河南光山人,高级工程师,工学博士研究生,E-mail:9162@sohu.com。

通讯作者:魏建国(1972-),男,河南信阳人,教授,博士研究生导师,E-mail:jianguowei9969@126.com。

results show that DBDPE composite flame retardant has a significant effect on the performance of SBS modified asphalt. DBDPE composite flame retardant significantly improves the flame retardant property. With the increase of the content of DBDPE composite flame retardant, limit oxygen index(LOI) of SBS modified flame retardant asphalt increases gradually, but its smoke density grade decreases gradually. When the content of flame retardant is more than 8%, LOI is more than 24%, the smoke density grade decreases less, and the improvement of the flame retardant and smoke suppression properties is limited. With the increase of the content of DBDPE composite flame retardant, the penetration and ductility of SBS modified flame retardant asphalt decrease, but the softening point increases gradually. When the content of flame retardant is less than 12%, the ductility is more than 20 cm, and when the content of flame retardant is more than 12%, the softening point increases less. The high temperature deformation resistance of DBDPE composite flame retardant asphalt is significantly improved. With the increase of the content of DBDPE composite flame retardant, the rutting factor and creep recovery rate of SBS modified flame retardant asphalt increase gradually. When the content of flame retardant is more than 8%, the rutting factor and creep recovery rate increase less. The low temperature crack resistance of DBDPE composite flame retardant asphalt gradually decreases. With the increase of the content of DBDPE composite flame retardant, the creep stiffness modulus of SBS modified flame retardant asphalt increases gradually, and the creep rate decreases gradually. When the content of flame retardant is more than 12%, the creep stiffness modulus and creep rate of it change little. Considering the effects of BDDPE composite flame retardant on the flame retardant performance, smoke suppression performance, high and low temperature rheological properties of SBS modified asphalt, it can be seen that the technical performance is better when the content of DBDPE composite flame retardant is 8% to 12%. 4 tabs, 18 figs, 27 refs.

Key words: road engineering; DBDPE composite flame retardant; flame retardant asphalt; rheological property; reasonable content

0 引 言

中国隧道交通事故率逐年上升,隧道内一旦发生火灾,沥青路面燃烧散发出大量有毒气体与烟雾,在封闭的隧道内部难以扩散,加重了火灾的危险性,严重威胁着人们的生命和财产安全^[1-3]。因此,道路工作者对公路隧道沥青路面安全问题越来越重视,并对沥青路面阻燃技术进行了大量研究^[4-8]。学者对以十溴二苯醚(DBDPO)为代表的卤系阻燃剂进行了较多的研究。郭存进等发现,DBDPO与三氧化二锑(Sb_2O_3)具有协同阻燃作用,两者复配使用能够有效提高沥青的极限氧指数^[9]。Jang等研究表明,DBDPO/ Sb_2O_3 /硼酸锌(ZB)复配能够进一步提高沥青的阻燃效率。DBDPO卤系阻燃剂阻燃效率高,已在公路隧道沥青路面中广泛应用^[10-11]。徐婷等对DBDPO/ Sb_2O_3 /ZB体系研究发现,DBDPO会产生多溴苯位二噁英和多溴二苯呋喃等致癌物质,严重影响人类健康,

故其使用受到了限制^[12-13]。Hardy等研究发现,十溴二苯乙烷(DBDPE)对鱼、藻以及大型蚤等水生生物没有明显的毒性作用,这为环保型卤系阻燃剂DBDPE替代DBDPO应用提供了依据^[14-15]。Chen等将DBDPE/ Sb_2O_3 添加到聚丙烯(PP)中,通过热重-差热分析、极限氧指数和垂直燃烧测试发现,DBDPE/ Sb_2O_3 的存在使得PP具有更优的热稳定性及炭化残留物,从而显著提高其阻燃性能^[16-17]。李森等研究表明,DBDPE与 Sb_2O_3 对丁苯橡胶具有良好的阻燃效果^[18-19]。丛培良等发现,DBDPE/ Sb_2O_3 能够降低沥青燃烧时的热释放速率,提高阻燃基材的阻燃效率,其具有较好的阻燃性能^[20-21]。文献[22]中研究发现,DBDPE/ Sb_2O_3 阻燃剂中加入氢氧化铝(ATH),可以有效提高DBDPE/ Sb_2O_3 阻燃剂的抑烟性能,并开发了一种新型DBDPE/ Sb_2O_3 /ATH复配阻燃剂。廖克俭研究表明,阻燃剂加入到沥青中可显著改变沥青的技术性能^[23]。王朝辉等研究表明,含有ATH

的 2 种复合阻燃剂加入到沥青中,其沥青的高温稳定性均大幅提高^[24]。杨光等研究表明,ATH 加入到沥青中提高了沥青的感温性能^[25]。黄志义等研究表明,ATH 加入到沥青中严重降低了沥青的低温性能^[26-27]。

综上,环保型 DBDPE/Sb₂O₃ 阻燃性能得到了验证,而其对沥青性能的影响尚不明确;同时,掺入 ATH 虽进一步提升了其抑烟性能,但其也严重影响了沥青的低温性能。可见,含有 ATH 的 DBDPE 复合阻燃剂对沥青技术性能影响的研究不足。本文通过极限氧指数试验、烟密度试验、针入度试验、延度试验、软化点试验、动态剪切流变试验(DSR)和弯曲梁流变试验(BBR)等方法,分析 DBDPE 复合阻燃剂对 SBS 改性沥青阻燃抑烟性能、物理性能和流变性能的影响,确定其适用性与掺量,为其推广和应用提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 沥 青

试验用沥青为湖南思立特沥青有限公司产 SBS 改性沥青,依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)测定其主要技术指标,见表 1。

表 1 SBS 改性沥青的技术指标
Tab.1 Technical indexes of SBS asphalt

试验项目		技术标准	试验结果
软化点(R&B)/℃		≥60.0	74.1
延度(5 cm·min ⁻¹ ,5℃)/cm		≥20.0	35.5
针入度(25℃,100 g,5 s)/0.1 mm		40.0~60.0	53.0
运动黏度(135℃)/(Pa·s)		≤3.000	1.033
弹性恢复(25℃)/%		≥75.0	96.4
密度(15℃)/(g·cm ⁻³)			1.024
溶解度/%		≥99.0	99.9
薄膜烘箱老化法(5 h,163℃)	延度(5℃,5 cm·min ⁻¹)/cm	≥15.0	19.2
	质量损失/%	≤±1.000	-0.259

1.1.2 阻燃剂

本文所选用 DBDPE 复合阻燃剂分别由阻燃剂 DBDPE、Sb₂O₃ 和 ATH 复配组成,其主要物化性质分别见表 2~表 4。

表 2 DBDPE 物化性质指标
Tab.2 Physical property indicators of DBDPE

项目	溴含量/%	热失重/℃	熔点/℃	白度/%	平均粒径/μm
技术指标	82.3	312.5	350.2	92.2	4.65

表 3 Sb₂O₃ 物化性质指标
Tab.3 Physical property indicators of Sb₂O₃

项目	分子量/%	沸点/℃	熔点/℃	白度/%	平均粒径/μm
技术指标	291.5	1 425	656.0	96.3	0.64

表 4 ATH 物化性质指标
Tab.4 Physical property indicators of ATH

项目	分子量/%	热解温度/℃	密度/(g·cm ⁻³)	外观	平均粒径/μm
技术指标	78	≥200	2.42	白色粉末	125

1.2 试验方法

1.2.1 极限氧指数试验

将不同质量的阻燃剂依次掺加到 SBS 改性沥青中,分别制成不同掺量(0%、4%、6%、8%、10%、12%、14%、16%)的 DBDPE 复合阻燃沥青。以极限氧指数(LOI)评价阻燃沥青的阻燃性能;采用 JF-3 型氧指数测试仪,依据《中华人民共和国石油行业标准 沥青燃烧性能测定 氧指数法》(NB/SH/T 0815—2010),在气流量为 10 L/min 条件下,进行不同掺量下 DBDPE 复合阻燃沥青极限氧指数试验,见图 1。



图 1 DBDPE 复合阻燃沥青极限氧指数试验

Fig.1 LOI test of DBDPE composite flame retardant asphalt

1.2.2 烟密度试验

采用 JY-3 型烟密度仪,依据《建筑材料燃烧或分解的烟密度试验方法》(GB/T 8627—2007),进行不同掺量下 DBDPE 复合阻燃沥青的烟密度试验,见图 2,以烟密度等级(SDR)评价阻燃沥青的抑烟性能。

1.2.3 针入度、软化点和延度试验

依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011),进行不同掺量下 DBDPE 复合阻燃沥青的针入度、软化点和延度试验,以评价阻燃沥青的物理性能。



图2 DBDPE复合阻燃沥青烟密度等级试验

Fig.2 SDR test of DBDPE composite flame retardant asphalt

1.2.4 动态剪切流变和多重应力蠕变恢复试验

采用 DSR-4000 型动态剪切仪,以应变值 12% 和扫描频率 10 rad/s,在 52℃~82℃ 内进行不同掺量下 DBDPE 复合阻燃沥青动态剪切流变试验。采用 DSR-4000 型动态剪切仪,依据《使用动态剪切流变仪测定沥青黏合剂的多应力重复蠕变和恢复(MSCR)的标准试验方法》(ASTM D7405—2010),在 60℃ 温度下分别以 0.1、3.2 kPa 应力进行不同掺量下 DBDPE 复合阻燃沥青的蠕变恢复试验,见图 3。以车辙因子、蠕变恢复率和不可恢复蠕变柔量为指标,评价阻燃沥青的高温性能。



图3 DBDPE复合阻燃沥青动态剪切流变试验

Fig.3 DSR test of DBDPE composite flame retardant asphalt

1.2.5 弯曲梁流变试验

采用 TE-BBR 型弯曲梁流变仪,在试验温度-12℃ 的条件下,进行不同掺量下 DBDPE 复合阻燃沥青的弯曲梁流变试验,见图 4。以低温蠕变劲度模量及蠕变速率评价阻燃沥青的低温流变性能。

2 试验结果与分析

2.1 阻燃抑烟性能

不同阻燃剂掺量下 DBDPE 复合阻燃沥青的极



图4 DBDPE复合阻燃沥青弯曲梁流变试验

Fig.4 BBR test of DBDPE composite flame retardant asphalt

限氧指数和烟密度等级试验结果分别见图 5 和图 6。

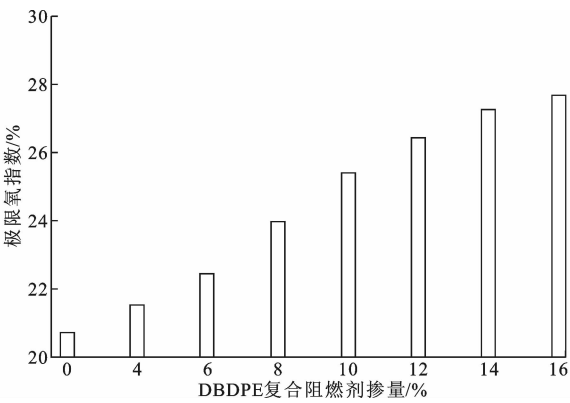


图5 不同 DBDPE 复合阻燃剂掺量下沥青极限氧指数

Fig.5 LOI of asphalt under different contents of DBDPE composite flame retardant

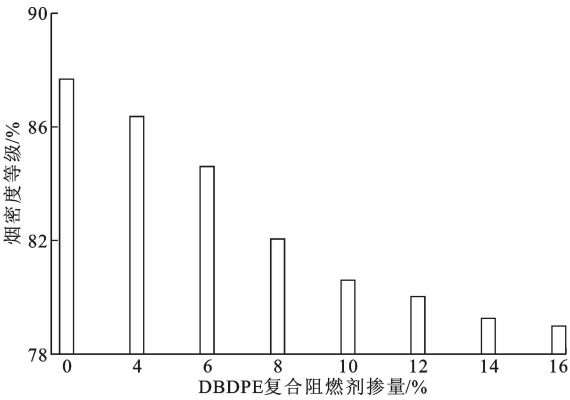


图6 不同 DBDPE 复合阻燃剂掺量下沥青烟密度等级

Fig.6 SDR of asphalt under different contents of DBDPE composite flame retardant

由图 5 可知:DBDPE 复合阻燃剂的加入显著提高了 SBS 改性沥青的极限氧指数,且随着掺量的增大,其极限氧指数逐渐提高;DBDPE 复合阻燃剂显著提高了 SBS 改性沥青的阻燃性能,且增大阻燃剂掺量可以显著提高其阻燃性能。这主要是因为,

DBDPE 复合阻燃剂的掺入使 SBS 改性沥青在燃烧阶段以气相阻燃的方式降低其燃烧性。根据材料判定为可燃物时临界极限氧指数为 24%。DBDPE 复合阻燃剂显著提高了 SBS 改性沥青的阻燃性能,且当阻燃剂掺量大于 8% 时 SBS 改性阻燃沥青的阻燃性能较好。

由图 6 可知:DBDPE 复合阻燃剂的加入显著降低了 SBS 改性沥青的烟密度等级,且随着掺量的增大其烟密度等级逐渐降低;当阻燃剂掺量大于 8% 时,阻燃沥青烟密度等级降幅较小。这说明,DBDPE 复合阻燃剂显著提高了 SBS 改性沥青的抑烟性能,增大阻燃剂掺量可以显著提高其抑烟性能,当阻燃剂掺量大于 8% 时 SBS 改性阻燃沥青的抑烟性能较好。

2.2 物理性能

不同阻燃剂掺量下 DBDPE 复合阻燃沥青的针入度、延度和软化点试验结果分别见图 7~图 9。

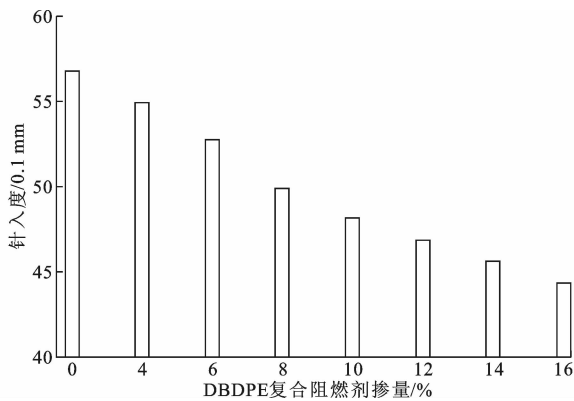


图 7 不同 DBDPE 复合阻燃剂掺量下沥青针入度
Fig. 7 Penetration of asphalt under different contents of DBDPE composite flame retardant

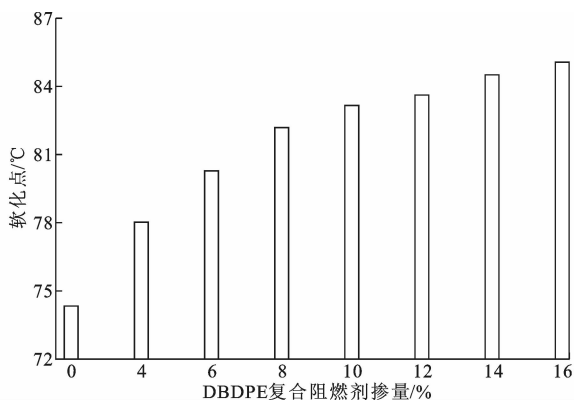


图 8 不同 DBDPE 复合阻燃剂掺量下沥青软化点
Fig. 8 Softening point of asphalt under different contents of DBDPE composite flame retardant

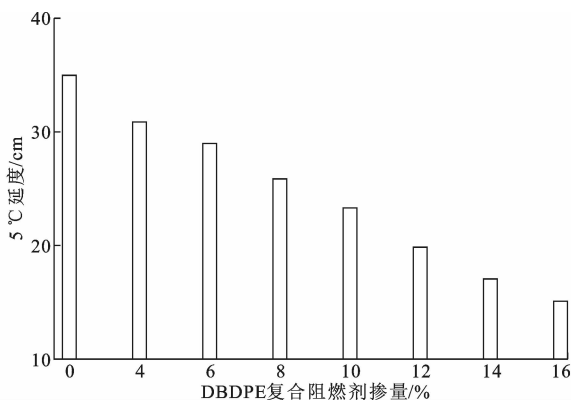


图 9 不同 DBDPE 复合阻燃剂掺量下沥青延度
Fig. 9 Ductility of asphalt under different contents of DBDPE composite flame retardant

低了 SBS 改性沥青的针入度,且随着掺量的增大其针入度逐渐降低。这说明,DBDPE 复合阻燃剂提高了 SBS 改性沥青的高温性能,且随着阻燃剂掺量的增大,其高温性能逐渐提高。

由图 8 可知:DBDPE 复合阻燃剂的加入显著提高了 SBS 改性沥青的软化点,且随着掺量的增大其软化点逐渐提高。当阻燃剂掺量从 4% 增大到 8% 时,软化点提高的幅度较大;而当阻燃剂掺量从 8% 增大到 16% 时,软化点提高的幅度较小。这说明 DBDPE 复合阻燃剂显著提高了 SBS 改性沥青的高温性能,且阻燃剂掺量大于 8% 时其高温性能较好。

由图 9 可知:DBDPE 复合阻燃剂的加入显著降低了 SBS 改性沥青的延度,且随其掺量的增大其延度逐渐降低。当阻燃剂掺量从 4% 增大到 12% 时,延度大于 20 cm,可满足技术要求;而当阻燃剂掺量从 12% 增大到 16% 时,延度小于 20 cm,不满足技术要求。这说明,DBDPE 复合阻燃剂显著降低了 SBS 改性沥青的低温性能,且当阻燃剂掺量小于 12% 时其低温性能较好。

2.3 高温流变性能

2.3.1 动态剪切流变试验

不同阻燃剂掺量下 DBDPE 复合阻燃沥青的抗车辙因子 $G^*/\sin(\delta)$ 试验结果见图 10。

由图 10 可知:

(1)随着温度的增加,各掺量下 DBDPE 复合阻燃剂对应的抗车辙因子均逐减下降, $\lg(G^*/\sin(\delta))$ 值随温度增加基本呈线性变化。依据 AASHTO M320-10 规定,沥青抗车辙因子不小于 1.0 kPa, $\lg(G^*/\sin(\delta))$ 为 0 时即满足规定要求;随着阻燃剂掺量 w 的增加,满足相关技术标准的试验温度逐渐提高。这说明,DBDPE 复合阻燃剂的加入显著提

由图 7 可知:DBDPE 复合阻燃剂的加入显著降

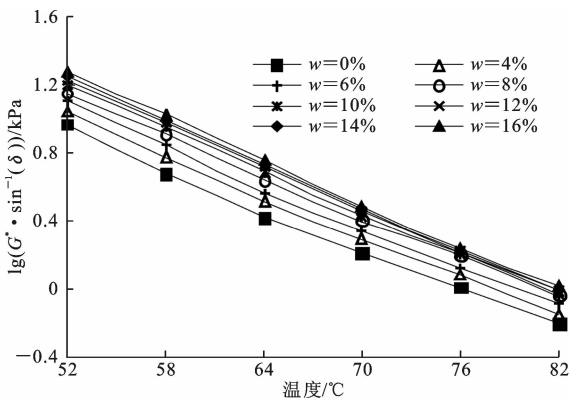


图 10 不同 DBDPE 复合阻燃剂掺量下沥青抗车辙因子
Fig. 10 Rut factor of asphalt under different contents of DBDPE composite flame retardant

高了 SBS 改性沥青抗高温变形能力。

(2)当试验温度相同时,随着 DBDPE 复合阻燃剂掺量的增大,SBS 改性阻燃沥青抗车辙因子逐渐增大。当阻燃剂掺量从 4%增大到 8%时,抗车辙因子提高的幅度较大;而当阻燃剂掺量从 8%增大到 16%时提高的幅度较小。这说明,随着 DBDPE 复合阻燃剂掺量的增大,SBS 改性阻燃沥青的抗高温变形能力逐渐提高,且掺量大于 8%后,其抗高温变形能力提高较为明显。

2.3.2 多重应力蠕变恢复试验

基于动态流变剪切仪进行多重应力蠕变恢复试验,将试样在 0.1 kPa 应力水平下加载 1 s 后卸载 9 s,该过程循环加载 10 次;接着在 3.2 kPa 应力水平下循环加载 10 次,该过程间歇,采集全过程应变随时间及应力变化的数据。0.1、3.2 kPa 应力水平下 SBS 改性沥青与不同掺量下的阻燃沥青在第 1 个循环周期蠕变恢复曲线如图 11 和图 12 所示。

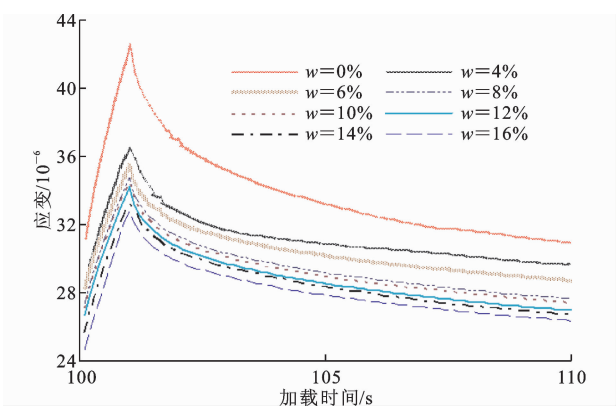


图 11 不同 DBDPE 复合阻燃剂掺量下阻燃
沥青蠕变恢复曲线(0.1 kPa)

Fig. 11 Creep recovery curves of asphalt under different contents of DBDPE composite flame retardant (0.1 kPa)

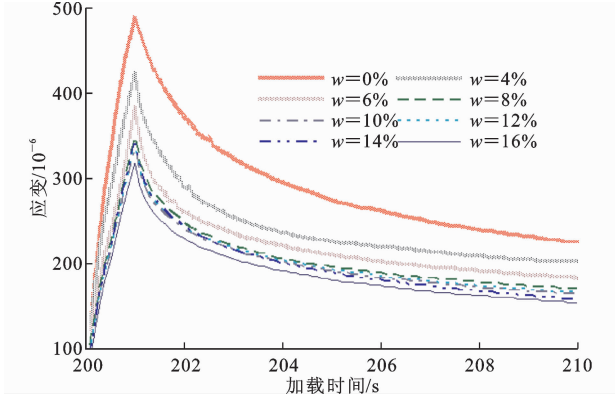


图 12 不同 DBDPE 复合阻燃剂掺量下阻燃
沥青蠕变恢复曲线(3.2 kPa)

Fig. 12 Creep recovery curves of asphalt under different contents of DBDPE composite flame retardant (3.2 kPa)

由图 11、图 12 可知,DBDPE 复合阻燃剂掺加到 SBS 改性沥青中后,对应阻燃沥青蠕变恢复曲线明显降低,加入阻燃剂可提升 SBS 改性沥青中的弹性成分,降低沥青中的黏性比例,从而提高阻燃沥青抗永久变形能力。在相同应力水平条件下,随着 DBDPE 复合阻燃剂掺量的增加,蠕变加载恢复曲线均逐渐降低。当阻燃剂掺量大于 8%时,阻燃沥青蠕变恢复应变减小趋势最为明显,可有效提高阻燃沥青的抵抗外力变形的能力,这可能是由于掺量的增加,使得阻燃沥青结构更加稳定,从而降低了其高温流动性。

以每个试验周期内的蠕变恢复率 R 及不可恢复蠕变柔量 J_{nr} 表征阻燃沥青的高温变形能力,将 0.1、3.2 kPa 应力水平下,沥青材料蠕变恢复率平均值分别记为 $R_{0.1}$ 与 $R_{3.2}$,10 个蠕变恢复循环周期内沥青材料的不可恢复蠕变柔量平均值记为 $J_{nr0.1}$ 与 $J_{nr3.2}$ 。0.1、3.2 kPa 应力水平下,不同阻燃剂掺量的 DBDPE 复合阻燃沥青的蠕变恢复率 $R_{0.1}$ 与 $R_{3.2}$,不可恢复蠕变柔量值 $J_{nr0.1}$ 与 $J_{nr3.2}$ 试验结果分别见图 13~图 16。

由图 13 和图 14 可知:

(1)DBDPE 复合阻燃剂的加入显著提高了 SBS 改性沥青的蠕变恢复率,随着其掺量的增大,0.1、3.2 kPa 应力水平下的蠕变恢复率均逐渐增大,当掺量大于 8%后其提高的幅度较小。这说明,DBDPE 复合阻燃剂掺量的增大有效提高了沥青抗高温变形能力,且阻燃剂掺量大于 8%时其抗高温变形能力较好。

(2)相同阻燃剂掺量 DBDPE 复合阻燃沥青在 3.2 kPa 应力水平下的蠕变恢复率均显著小于 0.1

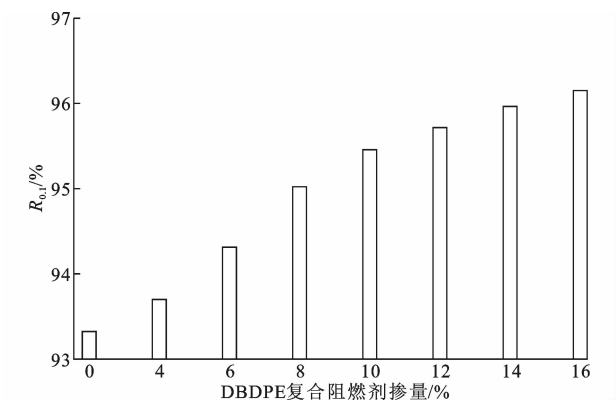


图 13 不同 DBDPE 复合阻燃剂掺量下沥青 $R_{0.1}$

Fig. 13 $R_{0.1}$ of asphalt under different contents of DBDPE composite flame retardant

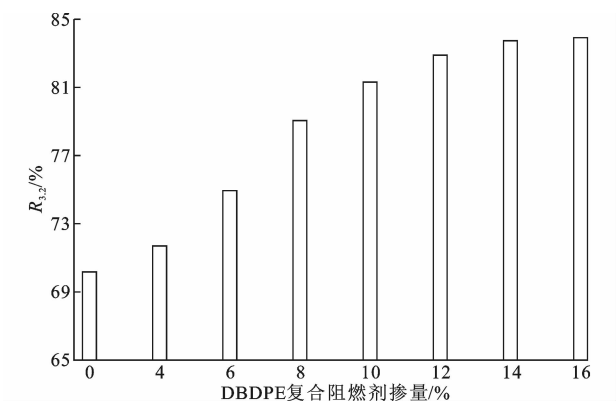


图 14 不同 DBDPE 复合阻燃剂掺量下沥青 $R_{3.2}$

Fig. 14 $R_{3.2}$ of asphalt under different contents of DBDPE composite flame retardant

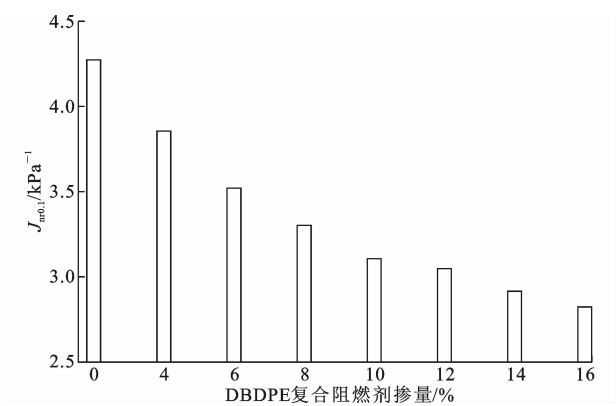


图 15 不同 DBDPE 复合阻燃剂掺量下沥青 $J_{nr0.1}$

Fig. 15 $J_{nr0.1}$ of asphalt under different contents of DBDPE composite flame retardant

kPa,说明,应力水平越高其越容易产生不可恢复变形。

由图 15 和图 16 可知:

(1)DBDPE 复合阻燃剂的加入显著降低了 SBS 改性沥青的不可恢复蠕变柔量,且随着掺量的增大,

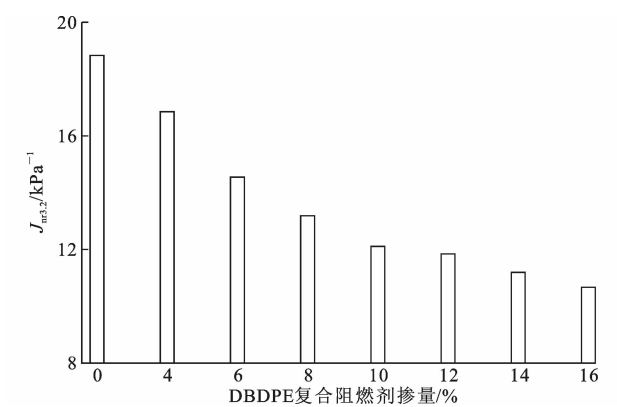


图 16 不同 DBDPE 复合阻燃剂掺量下沥青 $J_{nr3.2}$

Fig. 16 $J_{nr3.2}$ of asphalt under different contents of DBDPE composite flame retardant

0.1、3.2 kPa 应力水平下的不可恢复蠕变柔量均逐渐降低,当掺量大于 8%时,其降幅较小。这主要是因为,在相同试验温度条件下,阻燃剂充当沥青填料在一定程度上吸收了过多的自由沥青,从而增加了阻燃沥青的弹性成分比例。DBDPE 复合阻燃剂掺量的增大有效提高了沥青的抗高温变形能力,且阻燃剂掺量大于 8%时其效果较好。

(2)相同阻燃剂掺量 DBDPE 复合阻燃沥青,在 3.2 kPa 应力水平下的不可恢复蠕变柔量均显著大于 0.1 kPa 时,低应力水平下其抗高温变形能力更好。

2.4 低温流变性能

不同阻燃剂掺量下 DBDPE 复合阻燃沥青的低温蠕变劲度模量 S 和蠕变速率 m 试验结果见图 17 和图 18。

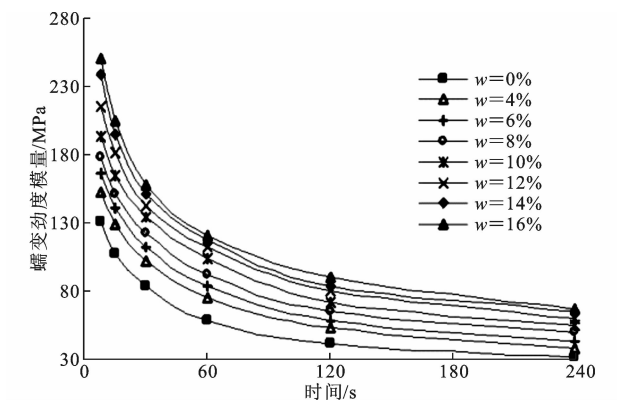


图 17 不同 DBDPE 复合阻燃剂掺量下沥青蠕变劲度模量

Fig. 17 S of asphalt under different contents of DBDPE composite flame retardant

由图 17 可知:DBDPE 复合阻燃剂的加入显著提高了 SBS 改性沥青的低温蠕变劲度模量,且随着掺量的增大其低温蠕变劲度模量逐渐提高;当

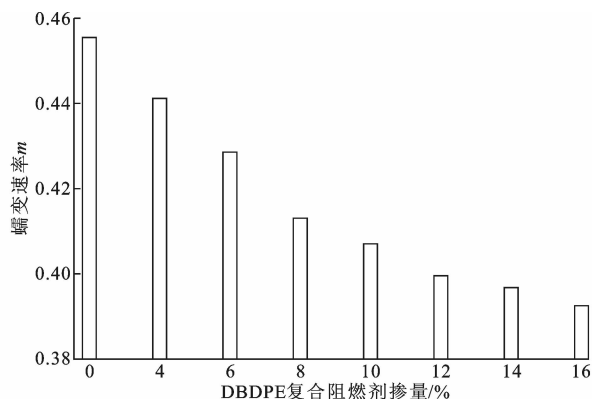


图 18 不同 DBDPE 复合阻燃剂掺量下沥青蠕变速率

Fig. 18 m of asphalt under different contents of DBDPE composite flame retardant

阻燃剂掺量大于 12% 时,蠕变劲度模量及其增幅均较小。这主要是因为,阻燃剂的加入吸收了过多的自由沥青,增加了沥青的塑性成分,降低了其柔韧性和变形能力,表现为抗低温开裂能力下降,且随着掺量的增加其抗低温开裂能力逐渐下降。

由图 18 可知:DBDPE 复合阻燃剂的加入显著降低了 SBS 改性沥青的低温蠕变速率,且随其掺量的增大逐渐减小;当阻燃剂掺量大于 12% 时,SBS 改性阻燃沥青低温蠕变速率较小且降幅也较小。DBDPE 复合阻燃剂掺量的增大显著降低了 SBS 改性沥青的抗低温开裂能力,随着阻燃剂掺量的增大,其抗低温开裂能力逐渐下降,当阻燃剂掺量小于 12% 时其抗低温开裂能力较好。

3 结 语

(1)自主研发的 DBDPE 复合阻燃剂显著提高了 SBS 改性沥青的极限氧指数,降低了烟密度等级,具有良好的阻燃抑烟性能。

(2)DBDPE 复合阻燃剂对 SBS 改性沥青的物理性能和流变性能影响显著,提高了 SBS 改性沥青的高温性能和抗高温变形能力,但降低了其低温性能和抗低温开裂能力。

(3)DBDPE 复合阻燃剂掺量对 SBS 改性沥青技术性能影响显著,且随着其掺量的增大,阻燃抑烟性能和抗高温变形能力逐渐提高,抗低温开裂能力逐渐降低;阻燃剂掺量为 8%~12% 时阻燃沥青的技术性能较好。

(4)本文研究仅以湖南思立特沥青有限公司产 SBS 改性沥青为基础,后续需开展不同种类沥青研究,以使本文结论更具有普遍性。

参考文献:

References:

- [1] 辛 炜. 氢氧化铝/矿物纤维复合阻燃沥青的制备及热重行为研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(6): 1972-1976.
XIN Wei. Study on preparation and thermal behavior of aluminum hydroxide/mineral fiber composite flame retard asphalt[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(6): 1972-1976.
- [2] 任 梵, 张晓娇, 孙海斌, 等. 国内外路用阻燃沥青的研究现状与展望[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2012, 32(6): 1-10.
REN Fan, ZHANG Xiao-jiao, SUN Hai-bin, et al. Research status and development trend of flame-retardant asphalt at home and abroad [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(6): 1-10.
- [3] 赵江平, 王 倩, 王亚超. 硅灰改性膨胀型阻燃剂的阻燃机理[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(8): 2588-2592, 2600.
ZHAO Jiang-ping, WANG Qian, WANG Ya-chao. Flame retardant mechanism of intumescent flame retardant modified with silica fume[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(8): 2588-2592, 2600.
- [4] 许 贺, 王 利, 孙佳惠, 等. 环保型溴-锑阻燃体系在聚苯乙烯中的应用[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(12): 39-42.
XU He, WANG Li, SUN Jia-hui, et al. Application of environmental bromine-antimony flame retardant system in polystyrene[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(12): 39-42.
- [5] 王彦民, 王娅丽. 溴代阻燃剂 TBBPA 最新研究进展[J]. 环境工程, 2016, 34(4): 1-5, 11.
WANG Yan-min, WANG Ya-li. Research progress on tetrabromobisphenol A (TBBPA) [J]. Environmental Engineering, 2016, 34(4): 1-5, 11.
- [6] 盛燕萍, 乔云雁, 薛 哲, 等. 阻燃剂表面改性对阻燃沥青性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(3): 961-966.
SHENG Yan-ping, QIAO Yun-yan, XUE Zhe, et al. Influence of surface modification of flame retardant on performance of flame retardant asphalt[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(3): 961-966.
- [7] 毛郑州, 吴彦城, 汪朝阳. 聚合物本质阻燃改性研究新进展[J]. 化工新型材料, 2018, 46(11): 37-40.
MAO Zheng-zhou, WU Yan-cheng, WANG Zhao-yang. Research progress in inherent flame retardance

- modification of polymer[J]. New Chemical Materials, 2018,46(11):37-40.
- [8] QIU J, YANG T, WANG X, et al. Review of the flame retardancy on highway tunnel asphalt pavement [J]. Construction & Building Materials, 2019, 195: 468-482.
- [9] 郭进存, 廖克俭, 戴跃玲, 等. 阻燃沥青的研制[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2005, 25(2): 5-8.
- GUO Jin-cun, LIAO Ke-jian, DAI Yue-ling, et al. Development of asphalt for flame retardancy[J]. Journal of Liaoning University of Petroleum & Chemical Technology, 2005, 25(2): 5-8.
- [10] JANG J, CHUNG H, KIM M, et al. The effect of flame retardants on the flammability and mechanical properties of paper-sludge/phenolic composite [J]. Polymer Testing, 2000, 19(3): 269-279.
- [11] 谭忆秋, 蓝碧武, 纪伦, 等. 隧道路面沥青常用阻燃剂改性技术研究方法[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2009, 28(4): 711-714, 719.
- TAN Yi-qiu, LAN Bi-wu, JI Lun, et al. Modified techniques of commonly-used flame-retardant asphalt in asphalt pavement tunnel [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2009, 28(4): 711-714, 719.
- [12] 徐婷. 隧道阻燃抑烟沥青及其混合料技术性能与机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- XU Ting. Study on the performance and mechanism of the flame retardant asphalt and asphalt mixture[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [13] 施晓婷, 陈丽梅, 汪思佳, 等. 多溴联苯醚的人群暴露及甲状腺毒性研究进展[J]. 中华预防医学杂志, 2017, 51(2): 188-192.
- SHI Xiao-ting, CHEN Li-mei, WANG Si-jia, et al. Human exposure and thyroid toxicity of polybrominated diphenyl ether[J]. Chinese Journal of Preventive Medicine, 2017, 51(2): 188-192.
- [14] HARDY M L, AUFDERHEIDE J, KRUEGER H O, et al. Terrestrial toxicity evaluation of decabromodiphenyl ethane on organisms from three trophic levels [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2011, 74(4): 703-710.
- [15] HARDY M L, KRUEGER H O, BLANKINSHIP A S, et al. Studies and evaluation of the potential toxicity of decabromodiphenyl ethane to five aquatic and sediment organisms[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2012, 75: 73-79.
- [16] CHEN X S, YU Z Z, LIU W, et al. Synergistic effect of decabromodiphenyl ethane and montmorillonite on flame retardancy of polypropylene[J]. Polymer Degradation & Stability, 2009, 94(9): 1520-1525.
- [17] 徐建林, 周生刚, 牛磊, 等. Sb_2O_3 /聚氯乙烯复合材料的制备及阻燃性能[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(11): 1-6.
- XU Jian-lin, ZHOU Sheng-gang, NIU Lei, et al. Preparation and flame retardancy of Sb_2O_3 /polyvinyl chloride composites [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(11): 1-6.
- [18] 李森, 李荣勋. 十溴二苯乙烷阻燃SBR的阻燃性能及热失重行为[J]. 特种橡胶制品, 2013, 34(3): 22-26.
- LI Sen, LI Rong-xun. Flame retardancy and thermal weight loss behavior of decabromodiphenylethane flame retardant SBR [J]. Special Purpose Rubber Products, 2013, 34(3): 22-26.
- [19] 赵华, 廖克俭, 李会鹏, 等. 阻燃型苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物改性沥青的老化动力学[J]. 合成橡胶工业, 2011, 34(3): 223-226.
- ZHAO Hua, LIAO Ke-jian, LI Hui-peng, et al. Aging kinetics of flame retardant styrene-butadiene-styrene block copolymer modified asphalt[J]. China Synthetic Rubber Industry, 2011, 34(3): 223-226.
- [20] 丛培良. 阻燃沥青混凝土制备与路用性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
- CONG Pei-liang. Study on the preparation and pavement performance of flame retardant asphalt concrete [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006.
- [21] 蒋玮, 沙爱民, 赵辉, 等. 温拌阻燃沥青混合料设计与性能评价[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2018, 41(5): 671-676.
- JIANG Wei, SHA Ai-min, ZHAO Hui, et al. Structural expressions and retarding mechanism of inorganic modified fire-retardant asphalt[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2018, 41(5): 671-676.
- [22] 魏建国, 李平, 付其林, 等. 一种基于十溴二苯乙烷的沥青混合料用阻燃剂: 中国, CN104058625A[P]. 2014-09-24.
- WEI Jian-guo, LI Ping, FU Qi-lin, et al. One flame retardant for asphalt mixture based on DBDPE: China, CN104058625A[P]. 2014-09-24.
- [23] 廖克俭. SBS改性阻燃沥青的感温性能研究[J]. 石油化工高等学校学报, 2010, 23(3): 52-54.
- LIAO Ke-jian. Temperature serviceability of SBS modified flame-retardant asphalt[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2010, 23(3): 52-54.