MPP/ZB/IPPP对SBS改性沥青混合料阻燃与抑烟性能的影响

樊 宇[1],徐安花[2],王元元[3]*,曹芯芯[4]

(1.青海省公路局,青海 西宁 810000;2.青海职业技术大学,青海 西宁 810000;3.湖北文理学院土木工程与建筑学院,湖北 襄阳 441053;4.北京工业大学,北京 100124)

摘 要:将三聚氰胺磷酸盐(MPP)、硼酸锌(ZB)和异丙基化磷酸三苯酯(IPPP)组成的三元复合阻燃剂(TAFR)与苯乙烯-丁二烯-苯乙烯三嵌段共聚物(SBS)改性沥青进行复配,制得TAFR改性沥青。研究TAFR对SBS改性沥青的阻燃性能、抑烟性能、热稳定性能、流变性能及其混合料路用性能的影响。结果表明:TAFR改性沥青表现出显著的协同阻燃效应,极限氧指数(LOI)达到26.8%,烟密度等级(SDR)降低37.2%,残炭率提升至22.8%,总热释放量降低57.8%。弯曲梁流变试验和路用性能试验验证了IPPP能够有效抑制固体粉体对低温性能的负面影响。TAFR改性沥青在-18 ℃下的蠕变劲度满足规范要求。TAFR改性沥青混合料的高温动稳定度达5 820次/mm,在-10 ℃下的低温破坏微应变为2 250×10^{-6}。TAFR改性沥青混合料燃烧10 min后的稳定度残留比高达82.5%,远优于SBS改性沥青混合料。研究结果为环保型高性能隧道阻燃沥青路面的设计提供参考。

关键词:SBS改性沥青;复合阻燃剂;热稳定性;马歇尔燃烧试验

中图分类号:TQ314.24 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-3360(2026)09-0055-06

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.09.011

Effect of MPP/ZB/IPPP on Flame Retardancy and Smoke Suppression Properties of SBS Modified Asphalt Mixtures

FAN Yu[1], XU Anhua[2], WANG Yuanyuan[3]*, CAO Xinxin[4]

(1. Qinghai Provincial Highway Bureau, Xining 810000, China; 2. Qinghai Vocational Technical University, Xining 810000, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang 441053, China; 4. Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: A ternary composite flame-retardant additive (TAFR), composed of melamine phosphate (MPP), zinc borate (ZB), and isopropylated triphenyl phosphate (IPPP), was compounded with styrene-butadiene-styrene triblock copolymer (SBS) modified asphalt to prepare TAFR modified asphalt. The effects of the TAFR on the flame retardancy, smoke suppression, thermal stability, rheological properties, and pavement performance of the SBS modified asphalt were investigated. The results showed that the TAFR modified asphalt exhibited a significant synergistic flame-retardant effect, with a limiting oxygen index (LOI) of 26.8%, a 37.2% reduction in smoke density rating (SDR), an increase in char residue to 22.8%, and a 57.8% reduction in total heat release (THR). The bending beam rheometer (BBR) test and pavement performance tests confirmed that IPPP effectively mitigated the negative impact of the solid fillers on the low-temperature performance. The creep stiffness of the TAFR modified asphalt at -18 ℃ met the specification requirements. The TAFR modified asphalt mixture exhibited a high-temperature dynamic stability of 5 820 cycles/mm and a low-temperature failure microstrain of 2 250×10^{-6} at -10 ℃. After 10 min of combustion, the stability retention ratio of the TAFR modified asphalt mixture was as high as 82.5%, significantly superior to that of the SBS modified asphalt mixture. These findings provide a reference for the design of environmentally friendly high-performance flame-retardant asphalt pavements for tunnels.

Keywords: SBS modified asphalt; Composite flame retardant; Thermal stability; Marshall combustion test

收稿日期Submitted date 2026-05-06;修回日期Revised date 2026-06-02;录用日期Accepted date 2026-07-10

基金项目:湖北省自然科学基金-杰出青年项目(2024AFA079)

*联系人,wyuanyuan0218@giset.cn

引用本文:樊宇,徐安花,王元元,等.MPP/ZB/IPPP对SBS改性沥青混合料阻燃与抑烟性能的影响[J].塑料科技,2026,54(9):55-60.

Citation:FAN Y, XU A H, WANG Y Y, et al. Effect of MPP/ZB/IPPP on flame retardancy and smoke suppression properties of SBS modified asphalt mixtures[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(9): 55-60.

沥青路面凭借表面平整、噪声低、养护简便等优势，广泛应用于隧道路面建设[1-3]。然而，沥青作为碳氢化合物，极易燃烧[4]，隧道内部呈半封闭管状结构，一旦发生火灾，火势极易迅速蔓延[5]。在高温及泄漏油污条件下，沥青热解不仅会造成路面结构不可逆的热损伤，还会释放大量富含多环芳烃(PAHs)、挥发性有机物(VOCs)及细微颗粒物(PM)的剧毒浓烟[6-8]。这类浓烟会显著降低隧道可见度，阻碍人员疏散与火灾救援，影响生态环境和人体健康[9]。因此，引入阻燃剂来提高沥青路面的阻燃与抑烟性能十分必要[5,10-11]。工程中常用的阻燃材料多为无机类(如氢氧化铝、氢氧化镁)以及卤系或磷氮系阻燃剂[12-15]。其中，三聚氰胺磷酸盐(MPP)因燃烧时优异的成炭性能和安全环保性能而备受关注[16]；硼酸锌(ZB)常作为协效组分，在高温下生成玻璃态覆盖层以促进基体成炭。MPP与ZB复配可在气相与凝聚相中发挥显著的协同效应，有效提高材料极限氧指数(LOI)，降低烟密度等级(SDR)及热释放速率(HRR)[17-18]。然而，传统固体粉末类阻燃剂，特别是无机无卤类，与沥青大分子链的相容性较差，粉体掺量高，极易在沥青中发生团聚并引发微观应力集中。尤其是在低温环境下，沥青蠕变速率显著降低，混合料低温抗裂性与耐疲劳性能迅速劣化[19-20]。为解决固相阻燃体系带来的脆化的问题，研究人员在阻燃网络中引入兼具阻燃和改性调控功能的液态介质。添加适量的液态含磷阻燃剂异丙基化磷酸三苯酯(IPPP)，可以在沥青大分子和无机颗粒之间形成显著的界面润滑效应与物理增塑作用，有效改善阻燃沥青的低温变形能力[14,21-27]。

为解决阻燃沥青难以兼顾阻燃性能与低温性能的难题，本研究自制MPP/ZB/IPPP复合阻燃剂(TAFR)，用于复合阻燃改性沥青，研究改性沥青的阻燃性能与抑烟性能，旨在为设计环保安全型隧道阻燃沥青路面提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

苯乙烯-丁二烯-苯乙烯三嵌段共聚物(SBS)改性沥青，质量分数99%，东莞市君信塑胶有限公司；粗细集料(玄武岩、石灰岩加工后的石屑和石灰岩矿粉)，质量分数95%，龙泽净水材料有限公司；MPP，15541-60-3，上海莱森诺化学有限公司；ZB，ZB2335，山东优索化工科技有限公司；IPPP，378-54-6，南通大遥化学品有限公司；汽油，质量分数92%，中石化加油站。

1.2 仪器与设备

真空干燥箱，DZF-6050，上海精宏实验设备有限公司；恒温鼓风烘箱，DHG-9140A，上海精宏实验设备有限公司；高速剪切乳化机，FM300，上海弗鲁克科技发展有限公司；马弗炉，SX2-4-10，上海贵尔机械设备有限公司；全自动沥青混合料车辙试验机，HYCZ-5，河北中仪伟创试验仪器有限公司；全自动氧指数测定仪，HC-2，北京鑫生卓锐科技有限公司；烟密度测试仪，KS-8627B，上海今森检测设备有限公司；锥形量热仪，VOUCH6810，苏州阳屹沃尔奇检测技术有限公司；同步热分析仪(TG-DSC)，Mettler TGA/DSC3+，瑞士Mettler Toledo公司；弯曲梁流变仪，TE-BBR，美国CANNON仪器公司；车辙试验机，SYD-0719E，上海昌吉地质仪器有限公司。

1.3 样品制备

1.3.1 改性沥青的制备

结合文献[28]经验，复合阻燃剂总掺量固定为沥青基体质量的12%，设定阻燃剂MPP、ZB与IPPP的质量比为3∶1∶1[28]。将SBS改性沥青置于135 ℃的烘箱中，加热至流动态，保持温度在160~165 ℃之间。制备MPP与ZB纯粉体(MZ-CFR)改性沥青时，将MPP和ZB粉末置于真空干燥箱中，在80 ℃下恒温烘干12 h。将干燥后的MPP与ZB粉末(质量比为3∶1)在1 000 r/min低剪切速率下缓慢加入预热的SBS改性沥青。制备TAFR改性沥青时，将干燥后的MPP与ZB粉末按质量比为3∶1分批次缓慢加入预热的SBS改性沥青(避免粉末在液面结块团聚)，同时滴加液态IPPP。加料完毕后，将转速提升至3 000 r/min，持续高剪切25~45 min。剪切结束后，将试样置于160 ℃的恒温烘箱中，静置排气30~40 min，直至表面不再有气泡溢出，得到MZ-CFR和TAFR改性沥青。

1.3.2 改性沥青混合料的制备

SBS改性沥青混合料：将预热后的粗细集料在185 ℃下干拌90 s，加入预热的SBS改性沥青，搅拌90 s，以充分裹覆。在175~185 ℃条件下，加入矿粉拌和90 s，制得均匀的沥青混合料。将混合料装入预热模具，在160~170 ℃下规范插捣，双面各击实75次，待试件冷却后脱模，得到SBS改性沥青混合料，即马歇尔试件。

TAFR和MZ-CFR改性沥青混合料：制备方法同上，区别是在加入预热的SBS改性沥青的同时分别加入8% TAFR和8% MZ-CFR复配阻燃剂。

1.4 性能测试与表征

阻燃性能测试：采用全自动氧指数测定仪与烟密度测试仪分别测试样品的LOI和SDR。

锥形量热分析：采用锥形量热仪对SBS与TAFR改性沥青的动态热释放行为进行对比。试件尺寸为100 mm×100 mm×3 mm，外加热辐射通量设定为50 kW/m^2。

TG-DSC分析：在空气氛围、气体流量为50 mL/min下进行测试，采用同步热分析仪探究材料的受热降解与失重规律，测试温度为25~800 ℃，升温速率为20 ℃/min。

低温抗裂测试：采用弯曲梁流变仪进行测试，将小梁试件置于恒温液体浴中，测试温度分别为-12、-18、-24 ℃，施加荷载为980 mN，持续时间60 s。模拟汽油泄漏的马歇尔燃烧与马弗炉试验测定混合料的燃烧质量损失及残留稳定度，其中喷洒50 mL 92#汽油，将燃烧后的试件置于600 ℃马弗炉中灼烧30 min，模拟火灾高温环境。

路用性能测试：采用车辙试验机和低温小梁弯曲试验

装置分别对试件进行路用性能测试，以验证其高低温路用性能，小梁尺寸为250 mm×30 mm×35 mm，在-10 ℃和60 ℃恒温条件下保持4 h以上。每种试件进行3次平行测试。

2 结果与讨论

2.1 SBS与TAFR改性沥青的阻燃性能分析

图1为SBS与TAFR改性沥青的LOI与SDR。从图1可以看出，未加阻燃剂SBS改性沥青的LOI仅为18.6%，极易燃；SDR高达78.5，燃烧时剧烈产烟。掺入8% TAFR复合阻燃剂后，沥青的LOI提高至26.8%，达到难燃材料标准；SDR显著降低至49.3，降幅达37.2%。其原因在于液态IPPP在受热时易挥发并释放含磷自由基(如PO·)，这些自由基能在气相中有效捕获维持燃烧链式反应所需的活性自由基(如H·和·OH)。固态MPP与ZB在凝聚相中受热分解生成无机物与含磷酸性物质，这些物质可以催化沥青大分子交联脱水，形成致密的无机-有机复合炭层。该炭层能够阻断氧气与热量的传递，有效吸附并截留未完全燃烧的含碳微粒，从而提升沥青的阻燃与抑烟性能。

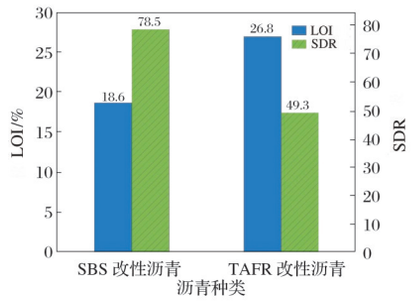


图1 SBS与TAFR改性沥青的LOI与SDR

Fig.1 LOI and SDR of SBS and TAFR modified asphalt

2.2 SBS与TAFR改性沥青的TG分析

图2为阻燃剂单体的TG和DTG曲线。从图2可以看出，MPP具有良好的热稳定性，主要质量损失区间在300~650 ℃，在800 ℃时残炭率为24.2%。ZB在270~450 ℃之间脱水吸热，在800 ℃时残炭率高达85.6%，为构筑坚固无机炭层提供骨架。液态IPPP则在200~450 ℃间迅速挥发分解，基本无残炭，气相阻燃特征明显。

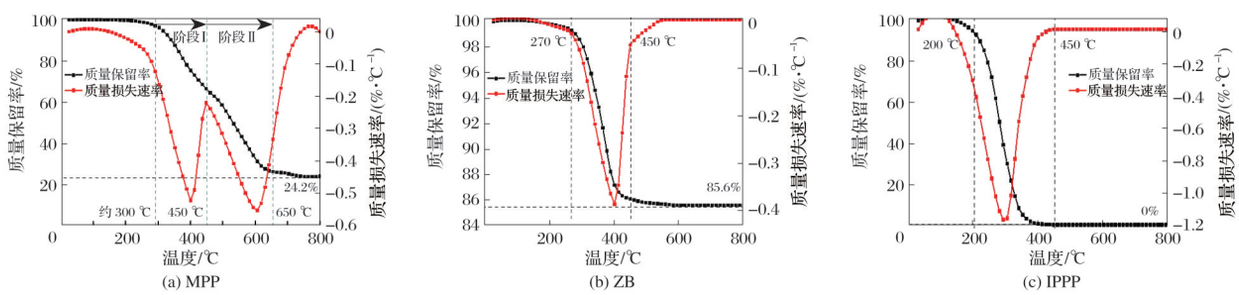


图2 阻燃剂单体的TG和DTG曲线

Fig.2 TG and DTG curves of flame retardant monomer

图3为SBS与TAFR改性沥青的TG和DTG曲线。图4为SBS与TAFR改性沥青的DSC曲线。

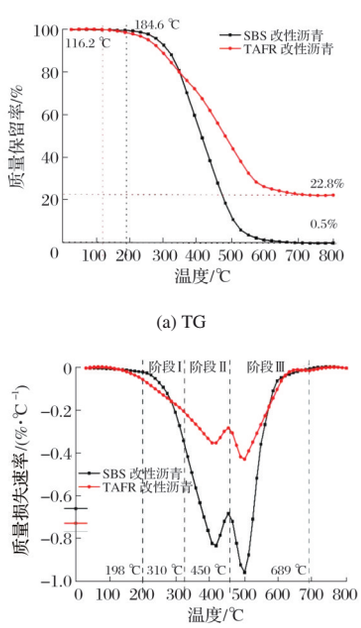


图3 SBS与TAFR改性沥青的TG和DTG曲线

Fig.3 TG and DTG curves of SBS and TAFR modified asphalt

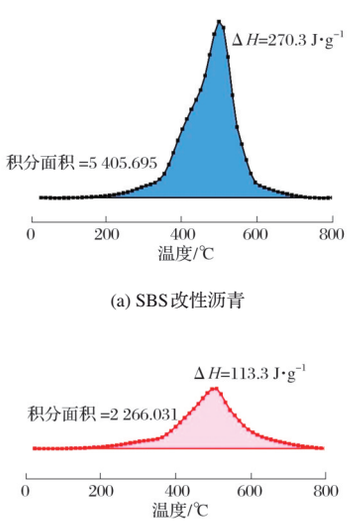


图4 SBS与TAFR改性沥青的DSC曲线

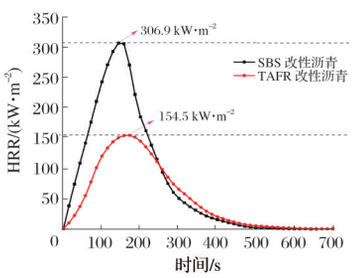
Fig.4 DSC curves of SBS and TAFR modified asphalt

从图3和图4可以看出，SBS改性沥青在600 ℃时基本完全分解，残炭率仅为0.5%，其燃烧全过程焓变(Δ*H*)为270.3 J/g。添加TAFR后，TAFR改性沥青中的含磷、氮组分在较低温区即催化沥青大分子交联脱水，初始失重温度

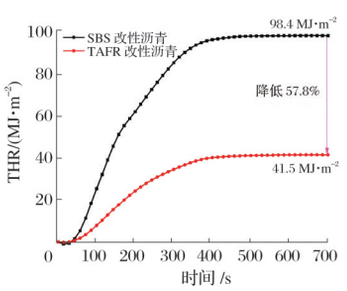
略提前。随着温度升高，最大热失重速率峰值显著下降，残炭率提升至22.8%。同时，其ΔH显著降至113.3 J/g，降低58.1%。这表明TAFR复合阻燃剂能促进沥青表面生成具有优异隔热阻氧功能的高质量炭化层，降低可燃气体的释放速率及体系总热释放量(THR)，从而有效抑制可燃气体逸出及热量向内传递。

2.3 SBS与TAFR改性沥青的动态热释放与烟释放分析

图5为SBS与TAFR改性沥青的HRR和THR曲线。从图5可以看出，SBS改性沥青点燃后火势迅速蔓延，热释放速率峰值(PHRR)呈尖锐状。而加入TAFR复合阻燃剂后，PHRR显著降低，达到峰值的时间明显延后。TAFR改性沥青的THR降低约57.8%，进一步验证了DSC测试中燃烧全过程总放热量的显著降低。其原因在于TAFR在燃烧初期催化生成多孔致密炭层，该炭层能够抑制热量交换及可燃气体释放。



(a) HRR



(b) THR

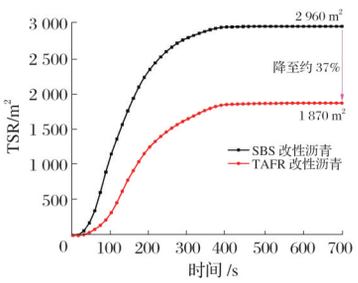
图5 SBS与TAFR改性沥青的HRR和THR曲线

Fig.5 HRR and THR curves of SBS and TAFR modified asphalt

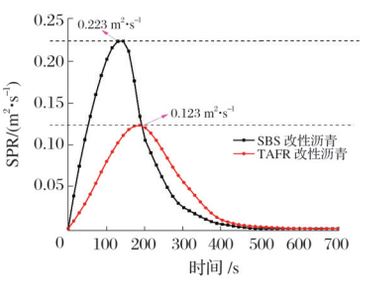
图6为SBS与TAFR改性沥青的总烟释放量(TSR)和动态烟气生成速率(SPR)。从图6可以看出，TAFR改性沥青的SPR峰值与TSR最终稳态值均较SBS改性沥青显著降低，这种动态发烟规律印证了SDR的宏观测试结果，进一步证实了TAFR复合阻燃剂具有显著的协同抑烟效应。这表明MPP、ZB与IPPP复配不仅在热力学上延缓燃烧进程，同时在燃烧过程中形成的炭层对热解产生的烟气颗粒形成物理阻隔和包裹，从而实现高效的协同抑烟效果。

2.4 SBS与TAFR改性沥青的低温流变性能分析

本研究在探讨阻燃性能、热稳定性、动态热释放及马歇尔燃烧试验时，主要系统对比SBS改性沥青与TAFR改性沥青的性能差异。实验中制备的MZ-CFR改性沥青主要作为流变与路用性能测试的对照组引入，用于评估固态粉体阻燃剂对沥青低温抗裂性能的负面影响。借此验证液态IPPP的物理增塑与界面改善效果，因此未在阻燃与热分析等其他测试环节中对MZ-CFR改性沥青进行重复比对。



(a) TSR



(b) SPR

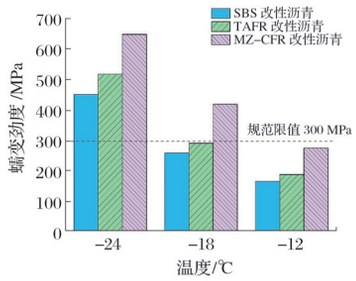
图6 SBS与TAFR改性沥青的TSR和SPR

Fig.6 TSR and SPR of SBS and TAFR modified asphalt

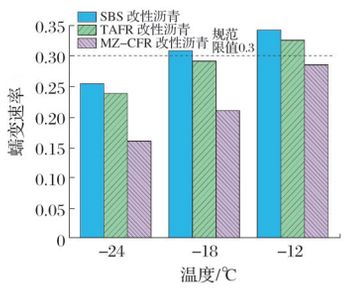
采用弯曲梁流变试验(BBR)评估固态粉体对沥青低温性能的负面影响及IPPP的改善效果，引入同等质量比MZ-CFR改性沥青作为对照。图7为不同温度下改性沥青的蠕变劲度及蠕变速率。从图7可以看出，随着温度的升高，SBS、MZ-CFR和TAFR改性沥青的蠕变劲度逐渐减小，而蠕变速率却逐渐增大。在各温度梯度下MZ-CFR改性沥青的蠕变劲度最高，蠕变速率最低。在-18 ℃时其蠕变速率远低于0.3的规范要求，这说明刚性无机颗粒的团聚会产生应力集中现象，显著加剧沥青的低温脆硬程度。而含液态IPPP的TAFR改性沥青低温流变性能得到显著改善。-18 ℃时其蠕变劲度为291 MPa (符合<300 MPa)，蠕变速率较MZ-CFR改性沥青显著升高。这表明IPPP作为增塑剂，其小分子能够插入沥青高分子链段间，增加沥青的自由体积，削弱分子链间的作用力。这种增塑效应有效缓解固态粉体引起的界面摩擦与基体硬化，使阻燃沥青具备优异阻燃性，维持材料的低温抗裂柔韧性。

2.5 不同改性沥青混合料的马歇尔试验分析

为检验混合料层面的阻燃性能，试验采用模拟汽油泄漏的马歇尔试件燃烧测试。表1为马歇尔燃烧试验分析结果。对比SBS改性沥青混合料，TAFR改性沥青混合料的点燃时间从18 s延长至42 s；持续燃烧时间从195 s缩短至68 s；质量损失率由9.85%锐减至2.14%，具有较好的自熄特性。图8为马歇尔燃烧试验照片。从图8可以看出，在添加汽油点火后，TAFR改性沥青混合料对火灾蔓延的抑制效果突出。



(a) 蠕变劲度



(b) 蠕变速率

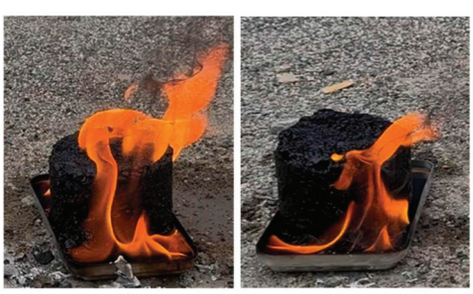
图 7 不同温度下改性沥青的蠕变劲度及蠕变速率

Fig.7 Creep stiffness and creep rate of modified asphalt at different temperatures

表 1 马歇尔燃烧试验分析结果

Tab.1 Analysis results of Marshall combustion test

试样	点燃时间/s	持续燃烧时间/s	质量损失率/%
SBS改性沥青混合料	18	195	9.85
TAFR改性沥青混合料	42	68	2.14

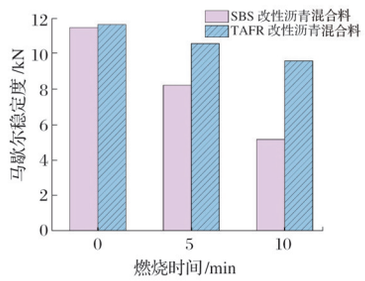


(a) SBS 改性沥青混合料 (b) TAFR 沥青混合料

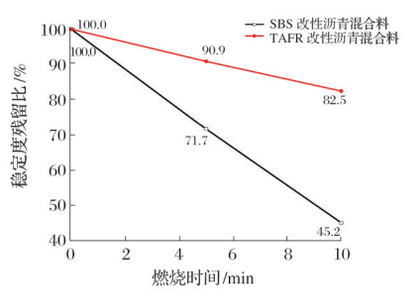
图 8 马歇尔燃烧试验照片

Fig.8 Images of Marshall combustion test

图 9 为改性沥青混合料的马歇尔稳定度及稳定度残留比。从图 9 可以看出，混合料未燃烧时(0 min)，TAFR 改性沥青混合料稳定度略高于 SBS 改性沥青混合料；经 10 min 剧烈燃烧后，SBS 改性沥青混合料发生热破坏，此时稳定度残留比仅为 45.2%；而 TAFR 改性沥青混合料仍保持 9.6 kN 的较高马歇尔稳定度，稳定度残留比高达 82.5%。其原因在于 TAFR 复合阻燃剂能够在火灾发生初期快速形成炭化层，有效抑制热量向试件内部的传递，保护内部沥青胶结料免受深度热降解，从而维持集料间的黏结力与混合料的整体承载骨架。这表明 TAFR 复合阻燃剂能有效延缓火灾条件下沥青路面力学性能劣化。



(a) 马歇尔稳定度



(b) 稳定度残留比

图 9 改性沥青混合料的马歇尔稳定度及稳定度残留比

Fig.9 Marshall stability and stability residual ratio of modified asphalt mixtures

2.6 改性沥青混合料的路用性能分析

图 10 为改性沥青混合料的动稳定度与破坏微应变。在高温条件下，MZ-CFR 改性沥青混合料因无机粉体的微填料硬化效应，动稳定度高达 7 850 次/mm；TAFR 沥青混合料受 IPPP 增塑软化影响，动稳定度降至 5 820 次/mm，但仍远超 3 000 次/mm 的规范要求，具备优异的高温稳定性。低温弯拉应变结果与 BBR 试验结果一致。MZ-CFR 改性沥青混合料的破坏微应变显著降至 $1\,650\times10^{-6}$，低于一般工程要求。这表明纯粉体严重破坏了混合料的低温延展性。而 TAFR 改性沥青混合料在 IPPP 自由体积补偿与增塑作用下，破坏微应变显著回升至 $2\,250\times10^{-6}$。结果表明：TAFR 复合阻燃剂能够发挥固态骨架增强-液态增塑润滑的协同作用，在保持阻燃抑烟效果的同时，有效解决传统无机阻燃剂易引起混合料低温脆裂的问题，实现阻燃抑烟性能与高低温路用性能的良好平衡。

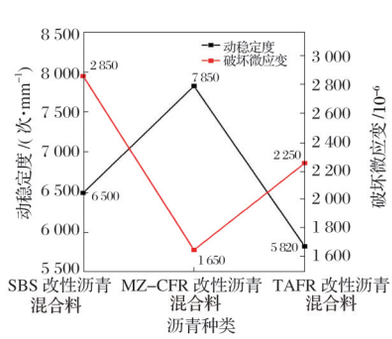


图 10 改性沥青混合料的动稳定度与破坏微应变

Fig.10 Dynamic stability and failure microstrain of modified asphalt mixtures

3 结论

文章研究了TAFR改性沥青及其混合料的阻燃抑烟、流变及路用性能。结果表明：TAFR复合阻燃剂能够提升基体的阻燃抑烟与动态控火能力，掺入8% TAFR复合阻燃剂后，TAFR改性沥青的LOI升至26.8%，SDR降至49.3。热分析与锥形量热证实了气固协同效应能够使沥青提前形成强韧连续的炭骨架，物理阻断热氧交换，残炭率提高至22.8%，ΔH降低58.1%，PHRR与THR均显著降低。针对无机粉体易导致基质沥青低温硬化与脆裂的缺陷，液态IPPP的增塑作用显著改善了低温蠕变速率，TAFR改性沥青混合料的低温破坏微应变回升至2 250×10^{-6}，TAFR改性沥青实现了高阻燃与路用性能的有效平衡。TAFR改性沥青混合料高温动稳定度高达5 820次/mm，能够有效保障严寒与重载交替环境下的结构稳定性。在极端汽油引燃工况下，TAFR表现出优异的抗热损毁能力。燃烧10 min后，TAFR改性沥青混合料的马歇尔稳定度残留比达82.5%，而SBS改性沥青混合料仅为45.2%。研究结果为高性能隧道安全铺装的设计与灾后逃生救援提供参考。

参考文献

[1] 许涛, 黄晓明, 赵永利. 隧道路面类型选择及调查研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2011, 35(1): 181-185..

[2] XIE X G, ZHANG W H, HAN W Q, et al. Surface functional properties of basalt fibers-modified asphalt mixtures for tunnel pavement[J]. Construction and Building Materials, 2025, 464: 140184.

[3] 赵毅, 田于锋, 郝增恒, 等. 隧道沥青路面阻燃抑烟技术及机理研究进展[J]. 应用化工, 2021, 50(5): 1430-1438.

[4] HE L, CAO Y, QU H M, et al. Advances in flame retardancy of asphalt pavement: A review[J]. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 2024, 7(3): 273-294.

[5] SHENG Y P, WU Y C, YAN Y, et al. Development of environmentally friendly flame retardant to achieve low flammability for asphalt binder used in tunnel pavements[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 257: 120487.

[6] 鲜江林, 李雁翔, 杨青阳. 长大隧道沥青路面铺装中温拌阻燃技术对施工环境的影响[J]. 中外公路, 2024, 44(2): 68-74.

[7] 刘卫东, 刘圣洁, 王海名, 等. 温拌阻燃沥青阻燃机理的红外和热重差热分析[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2024, 45(2): 242-248.

[8] 王盟, 李萍, 念腾飞, 等. 沥青烟中16种PAHs组成及毒性当量变化规律研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(1): 296-303.

[9] SONG Y X, LIU P R, HUANG J L, et al. Research on flame retardant and smoke suppression technology of asphalt and its mechanism[J]. Frontiers in Built Environment, 2026, 11: 1700128.

[10] 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.

[11] XU T, WANG H C, HUANG X M, et al. Inhibitory action of flame retardant on the dynamic evolution of asphalt pyrolysis volatiles[J]. Fuel, 2013, 105: 757-763.

[12] JOKIC M, ZHANG J M, KABIR I I. Polymer-based flame-retardant asphalt: A comprehensive review of materials, performance, and evaluation methods[J]. Polymers, 2025, 17(24): 3272.

[13] 胡桂林, 赵泽永, 颜渊巍, 等. 不同阻燃剂对天然橡胶胶料阻燃性能和物理性能的影响[J]. 橡胶工业, 2025, 72(12): 923-927.

[14] ZHAO Y, WU X Q, WANG M Y, et al. Effect of composite flame retardants on combustion behavior and pavement performance of tunnel SBS asphalt[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2026, 38(3): 04025613.

[15] 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.

[16] 唐启恒, 郭文静. 三聚氰胺聚磷酸盐/次磷酸铝对高密度纤维板阻燃和力学性能的影响[J]. 材料导报, 2021, 35(16): 16166-16171.

[17] MAPOSSA A B, DOS ANJOS E G R, SUNDARARAJ U. Evaluation of zinc borate and melamine polyphosphate synergy on the rheological, thermal, mechanical, dimensional, and flame retardant performance of rLLDPE/$CaCO_3$ composites for pipes applications[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2026, 143(8): e70082.

[18] ZHANG S Q, ZHAO J P, YANG Y, et al. Suppression effect and mechanism of melamine polyphosphate/zinc borate composite suppressant on aluminum dust explosion[J]. Powder Technology, 2025, 456: 120777.

[19] 林钰, 刘圣洁, 黄慧, 等. 基于流变特性的温拌阻燃沥青的高、低温性能[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2023, 44(4): 483-489.

[20] 张争奇, 郑文章, 桂增俭, 等. 高聚物复合改性高模量沥青的流变性能与改性机理[J]. 材料科学与工程学报, 2023, 41(1): 51-57.

[21] XING C W, XIONG Z H, LU T, et al. Performance of asphalt materials based on molecular dynamics simulation: A review[J]. Polymers, 2025, 17(15): 2051.

[22] LIU Y B, LIU Q, ZHAO H, et al. A low smoke and high strength polycarbonate (bisphenol A)/acrylonitrile-butadiene-styrene with ternary flame-retardant system[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2025, 87: 345-356.

[23] XU L J, ZHANG X, BIAN Y L, et al. Preparation and properties of low-hardness, high-abrasion-resistance, and flame-retardancy NR/BR composites with triisopropyl phenyl phosphate[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2025, 98(3): 496-512.

[24] ZENG X B, LI S N, XING J F, et al. Synergistic effects of resorcinol bis (diphenyl phosphate) (RDP) on the flame retardancy, foaming behavior, and thermal stability of poly (2, 6-dimethyl-1, 4-phenylene oxide)/polyamide (PPO/PA) composites[J]. Polymer Testing, 2026, 156: 109129.

[25] 瞿发海, 张振环, 查坐统, 等. 磷系阻燃剂阻燃机制及高分子材料阻燃技术研究进展[J]. 生态产业科学与磷氟工程, 2025, 40(5): 71-79.

[26] BI Q Q, LI Y M, HE L, et al. Fabrication of fire-retarded epoxy asphalt composites with compatibilization and toughening for road tunnel pavements[J]. Polymer Degradation and Stability, 2024, 229: 110968.

[27] XU Y, ZHANG W J, YIN R, et al. Novel aryl phosphate for improving fire safety and mechanical properties of epoxy resins[J]. Polymers, 2024, 16(21): 3049.

[28] 朱志成, 王洪国, 廖克俭, 等. 膨胀型阻燃体系在沥青中协同阻燃作用的研究[J]. 石油化工高等学校学报, 2015, 28(3): 37-40.