

# 复合阻燃剂对 OGFC 沥青混合料路用性能的影响

Effect of Flame Retardant on Pavement Performance of OGFC Asphalt Mixture

王 铭

(陕西铁路工程职业技术学院, 陕西 渭南 714000)

**摘 要:** 通过极限氧指数评价 3 种复合阻燃剂改性沥青的阻燃性能, 借助室内车辙试验、低温弯曲试验、浸水马歇尔试验、劈裂疲劳试验研究了 3 种复合阻燃剂对 OGFC 沥青混合料路用性能及疲劳性能的影响, 结果表明: 复配阻燃体系阻燃效果明显优于单一无机系阻燃剂, 且 HL+APP 复配的无机膨胀型阻燃体系效果最佳; 在保证阻燃性能的同时, 3 种复配阻燃体系下混合料的路用耐久性能无负面影响, 高温性能、水稳定性和疲劳性能有一定提升, 低温性能稍有下降。

**关键词:** 阻燃剂; OGFC; 阻燃性能; 路用性能; 疲劳性能

**中图分类号:** U414 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 02-0027-04

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.02.006

WANG Ming

(Shaanxi Railway Institute, Weinan 714000, China)

**Abstract:** The flame retardancy of modified asphalt with three kinds of composite flame retardants was evaluated by limiting oxygen index test. The influence of three kinds of composite flame retardants on the road performance and fatigue performance of OGFC asphalt mixture was studied by means of indoor rutting test, low temperature bending test, and the inorganic intumescent flame retardant system composed of HL + app has the best effect. The high-temperature performance, water stability and fatigue performance of the three composite flame retardant systems were improved to some extent, and the low-temperature performance was slightly decreased.

**Keywords:** flame retardant; OGFC; flame retardant performance; road performance; fatigue performance

## 0 引言

OGFC 沥青混合料因其大量的连通空隙和良好的表面构造从而具有一定的排水、降噪和抗滑功能, 更加适用于隧道内的特殊环境<sup>[1]</sup>。长隧道内部密闭、阴暗、狭长, 且沥青路面具有燃烧特性, 发生火灾后救援工作难以展开。因此, 开发阻燃排水降噪多功能沥青路面至关重要<sup>[2]</sup>。Alice Bonati 等<sup>[3]</sup>研究了

复合阻燃剂改性沥青的阻燃效果, 并认为多种阻燃剂协同作用有利于阻燃效果的提升; 兰翔<sup>[4]</sup>研究了膨胀类和无机类阻燃剂复合改性沥青的阻燃效果, 提出相对于单系阻燃剂, 复配阻燃剂的阻燃效果提升明显, 且对沥青力学性能影响较小; 李立寒等<sup>[5]</sup>研究了不同阻燃剂的抑烟效果, 提出氢氧化镁和硼酸锌按比例掺配后对沥青改性抑烟效果较好; 朱凯<sup>[6]</sup>认为将氢氧化合物与纳米蒙脱土的复配阻燃剂, 可有效降低沥青燃烧速率, 改善阻燃效果; 贺海等<sup>[7]</sup>研究了新型无机阻燃剂的阻燃机理, 认为阻燃剂对 SBS 沥青的黏附性不会产生不利影响, 经济实用。

以上研究结果表明无论是单一阻燃剂还是复合阻

作者简介: 王铭 (1990—), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向: 智能建造工程及应用。

收稿日期: 2023-09-08

材料科学

燃体系对沥青路面的阻燃性能均有一定的增强效果，且无机系阻燃剂在阻燃体系中发挥主要作用，提高了发生火灾时的安全性，但不同复合阻燃体系对 OGFC 沥青混合料路用及耐久性能影响差异尚未研究。鉴于此，为确保阻燃剂的掺加对混合料路用性能无负面影响，以无机系阻燃剂氢氧化铝为基础，复配 3 种不同阻燃体系，研究其阻燃效果及对 OGFC 沥青混合料路用性能的影响，具有一定的工程实际意义。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

沥青采用 SBS 改性沥青，技术指标见表 1。粗集料为确山县产的石灰岩；细集料为石灰岩加工的机制砂；矿粉为石灰石磨制的矿粉；其技术指标均满足规范要求。

表 1 SBS 改性沥青技术指标 Table 1 Technical indicators of SBS modified asphalt

Table with 3 columns: 试验项目 (Test Item), 试验值 (Test Value), 技术指标 (Technical Indicator). Rows include 针入度, 软化点, 延度, 闪点, 相对密度, TFOF 质量损失, 残留物 针入度.

1.2 级配

试验采用 OGFC 沥青混合料，级配见表 2。

表 2 OGFC 沥青混合料级配 Table 2 OGFC asphalt mix grading /%

Table with 2 rows and 10 columns representing sieve sizes (16mm to 0.075mm) and their corresponding percentages (100 to 3).

1.3 试验方法

1.3.1 阻燃沥青制备方法

试验选用 4 种类型阻燃剂的代表产品，基于其不同阻燃机理复配多元阻燃体系，分别为氢氧化铝 (HL)、氢氧化镁 (ATH)、硅藻土 (SH) 和聚磷酸铵 (APP)。以 10% 沥青含量的无机系阻燃剂氢氧化铝为基础 [7]，将其他阻燃剂分别以 5%、10%、15%、20% 的比例掺入 SBS 改性沥青中。为使阻燃剂充分均匀地分布于沥青中，采用沥青高速剪切机对其搅拌剪切后并充分溶胀，随后放入 180 °C 烘箱中发育 30 min，确保阻燃剂改性沥青的效果。将发育完成的改性沥青浇筑于干燥洁净的玻璃表面，冷却至室温

后裁剪成尺寸为长 100 mm、宽 5.5 ± 0.5 mm 沥青试条。

1.3.2 试验方法

(1) 阻燃性能 现行规范一般采用极限氧指数法测试沥青的阻燃效果。氧指数 (LOI) 是指沥青试条在氧气、氮气组合容器中点燃后持续保持稳定的火焰形燃烧时氧气的最低体积分数。通常规定 LOI 大于 25% 时，材料的阻燃性能较好，在燃烧状态下可自行熄灭。不同阻燃剂和不同掺量下分别制备试条，平行试验 15 组。根据氧指数测试仪测试结果评价每组试条的氧指数和阻燃性。

(2) 路用性能 研究 OGFC 沥青混合料的路用性能包括温度稳定性和水稳定性，借助车辙试验、小梁弯曲试验和浸水马歇尔试验研究阻燃剂对 OGFC 沥青混合料高低温性能和水稳定性的影响，试验方法与步骤参考 JTG E20—2011 《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》。

(3) 疲劳性能 采用劈裂疲劳试验研究混合料的疲劳性能，借助 MTS 万能试验机进行疲劳试验，为了接近车辆行驶荷载作用，试验以应力控制模式并采用半正矢正弦波形的荷载进行加载，频率采用 10 Hz，温度为 15 °C，计算不同类型混合料在应力水平 0.45 时的疲劳寿命 [8]。试验时试件受力状态如图 1 所示。

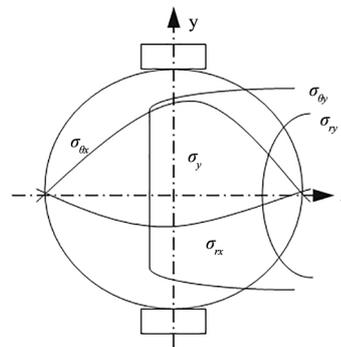


图 1 试件受力状态 Fig. 1 Stress state of the specimen

2 试验结果及分析

2.1 阻燃剂对燃烧性能的影响

研究不同类型复合阻燃体系对沥青燃烧性能的影响，检测其极限氧指数结果如图 2 所示。

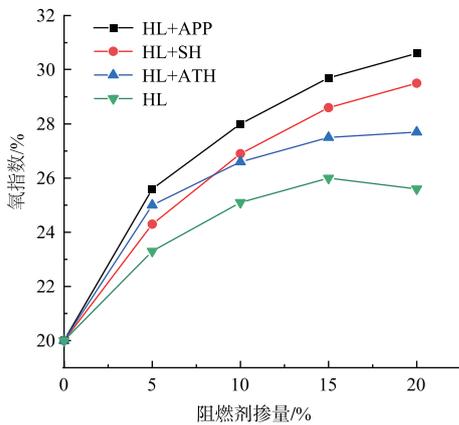


图2 不同阻燃剂掺量下改性沥青的极限氧指数  
Fig. 2 Limiting oxygen index of modified asphalt with different content of flame retardants

不同类型阻燃改性沥青极限氧指数随阻燃剂掺量的增加逐渐增大,说明阻燃剂的加入可有效提高沥青的阻燃效果,且在一定范围内,随着阻燃剂掺量的提高阻燃效果显著提升。掺入阻燃剂前期氧指数增长较快,随着阻燃剂掺量增加,极限氧化数增加幅度逐渐降低。阻燃的过程中,阻燃剂也具有一定的抑烟效果,试验中发现各阻燃沥青相对于普通SBS改性沥青发烟量明显较少。

不同复配阻燃剂的阻燃效果也不尽相同,但均优于单掺HL时的阻燃效果。HL与APP复配的无机膨胀型阻燃剂阻燃效果最佳,阻燃原理是在特定温度下发生化学反应生成炭、水等化学物质,炭的化学性质稳定,可以抑制燃烧,并且减少可燃物质;生成的水可以吸热变成水蒸气,降低材料表面温度,同时水蒸气可以与可燃气体混合,以稀释可燃气体的浓度,起到阻燃作用。HL与ATH复配无机系阻燃剂改性阻燃沥青在高温下发生吸热反应,并在反应发生时释放大量水,从而达到脱水吸热阻燃效果,同时由于两者分解温度差的存在,拓宽了温度阻燃区间,使得阻燃效果优于单掺HL。而SH内存在大量细观微孔,拥有非常强的吸附性,因此沥青燃烧时释放烟雾会被硅藻土吸附,这样,向大气中所释放烟雾就明显减少,以此实现抑烟的目标,但其复配阻燃效果相对较差。

## 2.2 阻燃剂对OGFC混合料路用性能的影响

由于阻燃剂掺量相对较大,为了避免阻燃剂的掺加对沥青混合料的体积参数产生影响,同时又考

虑到阻燃剂在细度、可填充性以及黏附性等方面与矿粉作用类似,因此将复配阻燃剂按沥青25%的质量比例等量替代矿粉制作沥青混合料。为使阻燃剂能够更加均匀分布在沥青混合料中,先将无机阻燃剂与矿粉拌和均匀,其余步骤参考普通沥青混合料的制备方法。

### 2.2.1 高温稳定性

研究不同复配阻燃剂对沥青混合料高温稳定性的影响,掺加不同阻燃剂OGFC沥青混合料的动稳定度(DS)见表3。3种复配阻燃剂的掺加,混合料动稳定度均有小幅度的增大。其中HL+ATH无机系阻燃剂和HL+SH多孔阻燃剂的可提高6%以上,而HL+APP无机膨胀系阻燃剂对混合料动稳定度影响较小。3种复配阻燃剂均能改善沥青混合料高温稳定性,且掺加碱性阻燃剂的混合料高温性能更好。这是因为HL、ATH和SH均呈现碱性,且ATH碱性较强,增大了沥青软化点,高温软化阈值提高,同时增强沥青与集料界面黏结力,因此OGFC沥青混合料高温稳定性不受影响甚至略有增强。

表3 不同阻燃剂类型混合料的动稳定度

Table 3 Dynamic stability of mixtures of different types of flame retardants

测试指标	无阻燃剂	HL+ATH	HL+SH	HL+APP
DS (次/mm)	4867	5213	5021	5176
比率	1.00	1.07	1.06	1.03

### 2.2.2 低温稳定性

研究不同复配阻燃剂对沥青混合料低温抗裂性的影响,掺加不同阻燃剂的OGFC沥青混合料的抗弯拉强度和最大弯曲应变见表4。3种复配阻燃剂的掺加会对OGFC沥青混合料低温弯曲性能产生一定影响,相比于无阻燃剂对照组,掺复配阻燃剂沥青混合料低温弯曲应变和弯拉强度均略微降低,3种复配阻燃剂掺加会使OGFC沥青混合料低温弯曲应变分别降低2.9%、0.7%、4.9%,弯拉强度降低不明显。这表明阻燃剂在一定程度上会降低沥青混合料低温抗裂性能。主要原因在于阻燃剂加入使得沥青延度降低,当温度下降时,沥青延展性和韧性大幅下降,更易发生脆性破坏,从而导致沥青混合料低温性能降低。但3种阻燃剂的掺加,OGFC混合料低温性能下降并不明显,说明普通阻燃材料应用到低温气候区混合料中是合理可行的。在实际应用中可结合纤维使用,既能保证混合料阻燃性能,也可以减缓低

材料科学

温抗裂性下降。

表 4 不同阻燃剂类型混合料的低温性能  
Table 4 Low temperature performance of mixtures with different types of flame retardants

测试指标	无阻燃剂	HL+ATH	HL+SH	HL+APP
弯拉强度/MPa	9.2	9.0	9.4	8.9
弯曲应变	3 078	2 988	3 055	2 927

2.2.3 水稳定性

研究不同复配阻燃剂对沥青混合料水稳定性影响, 掺加不同阻燃剂 OGFC 沥青混合料马歇尔残留稳定度见表 5。3 种阻燃体系下 OGFC 沥青混合料残留稳定度与无阻燃剂的对照组相比无明显差异, 说明复合阻燃剂掺加不会影响到 OGFC 沥青混合料水稳定性, 在一定程度上甚至会改善沥青混合料水稳定性性能。

表 5 不同阻燃剂类型混合料的残留稳定度  
Table 5 Residual stability of mixtures of different flame retardant types /%

无阻燃剂	HL+ATH	HL+SH	HL+APP
85.65	86.77	87.21	88.54

2.2.4 疲劳性能

研究不同复配阻燃剂对沥青混合料疲劳性能影响, 掺加不同阻燃剂 OGFC 沥青混合料的疲劳寿命(次)见表 6。

表 6 沥青混合料的疲劳寿命  
Table 6 Fatigue life of asphalt mixtures

疲劳寿命	无阻燃剂	HL+ATH	HL+SH	HL+APP
疲劳寿命/次	4 367	4 665	4 580	4 392
比率	1.00	1.07	1.05	1.01

掺加 3 种阻燃体系 OGFC 沥青混合料疲劳寿命略有提高, HL、ATH 和 SH 均呈现碱性, 且 ATH 碱性较强, 提升沥青胶浆相容性, 能够增强沥青与集料黏附性, 改善沥青集料界面受力情况, 在荷载反复作用下减少细观裂缝产生, 从而有效阻止疲劳破坏,

延长混合料疲劳寿命。

3 结论

综合 3 种复配阻燃体系对沥青阻燃性能和 OGFC 沥青混合料路用性能的影响, 结论如下:

(1) 相对于单掺 HL 相比, 3 种类型复配阻燃剂掺加使沥青和混合料阻燃性能均有较大提升, 其中 HL+APP 无机膨胀型复配阻燃剂阻燃性能最佳。

(2) 3 种复配阻燃体系在保证良好阻燃性能的同时, 对混合料高温性能、水稳定性和疲劳性能均略有改善, 但低温性能稍有下降, 在低温地区使用阻燃体系时可结合纤维使用, 既能保证混合料阻燃性能, 也可以中和低温抗裂性下降。

参 考 文 献

[1] 徐斌. 排水性沥青路面理论与实践 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.

[2] 魏建国, 谢成, 付其林. 阻燃剂对沥青与沥青混合料性能的影响 [J]. 中国公路学报, 2013, 26 (6): 30-36.

[3] ALICE B, FILIPPO M, GIOVANNA B, et al. Effect of nanoclay and conventional flame retardants on asphalt mixtures fire reaction. 2013, 47: 990-1000.

[4] 兰翔. 隧道温拌阻燃抑烟排水沥青路面材料与性能研究 [D]. 西安: 长安大学, 2013.

[5] 李立寒, 邹小龙, 陈春羽, 等. 复配阻燃沥青氧指数和路用性能研究. [J] 建筑材料学报. 2013, 16 (1): 76-80.

[6] 朱凯. 基于沥青多组分燃烧特性的钙基纳米复合阻燃体系研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.

[7] 贺海, 王朝辉, 刘志胜, 等. 新型无机阻燃沥青制备与路用性能研究 [J]. 公路交通科技, 2014, 31 (7): 45-52.

[8] 孙杰. 基于应力控制模式下的沥青混合料疲劳开裂预估模型的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010.

(上接第 21 页)

价格理论与实践, 2021(4): 4-11, 53.

[11] 胡延燕, 何廷树. 石英粉、矿粉对 PHC 管桩混凝土力学性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(11): 3517-3521, 3528.

[12] SURENDER S, RANSINCHUNG GD, PRAVEEN K. Effect of mineral admixtures on fresh, mechanical and durability properties of RAP inclusive concrete [J]. Construction and Building Materials, 2017, 156: 19-27.

[13] 张艺清, 董芸. 粉煤灰和硅粉对水下自密实混凝土性能的影响 [J]. 混凝土, 2021(10): 133-137.

[14] 李波, 周海龙, 吕振国, 等. 高强机制砂混凝土工作性及力学性能的试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2020, 39 (6): 1765-1771, 1797.

[15] 李福海, 高浩, 唐慧琪, 等. 短切玄武岩纤维混凝土基本性能试验研究. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(2): 419-427.

[16] 王萧萧, 刘畅, 张菊, 等. 常年冻土区混凝土孔隙结冰规律对抗压强度的影响 [J]. 工业建筑, 2021, 51(9): 197-201.