

文章编号:1671-8879(2020)02-0001-09

ATH/MMT 阻燃剂对沥青混合料性能的影响

申爱琴¹, 苏宇轩¹, 杨小龙¹, 王 涵¹, 赵文丁²

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 吉林省交通规划设计院, 吉林 长春 130000)

摘 要:为降低公路隧道沥青路面存在的火灾隐患,提升公路隧道沥青路面阻燃性能,采用金属氢氧化铝(ATH)和蒙脱土(MMT)复掺制备 SBS 改性阻燃沥青混合料,通过氧指数试验、直接燃烧试验、车辙试验、低温弯曲试验、冻融劈裂试验等方法,分析 ATH/MMT 复掺阻燃剂对沥青混合料的阻燃抑烟性能和路用性能影响。研究结果表明:ATH/MMT 复掺阻燃剂可以将沥青材料的极限氧指数从 21.2% 提升至 25% 以上,使沥青材料燃烧级别达到难燃级别,基本可达到自熄材料的标准;掺加 ATH/MMT 复掺阻燃剂可以减少沥青混合料的燃烧持续时间,MMT 和 ATH 的掺量(质量分数,下同)分别为 3%、10% 的复掺阻燃剂,其混合料的燃烧时间可以缩短近 1 倍;能降低沥青混合料的燃烧质量损失率,保证燃烧后的马歇尔试件结构的完整,并可提升沥青混合料的燃烧残留马歇尔稳定度,使沥青混合料燃烧后仍具有较好的力学性能;同时还可降低沥青混合料燃烧过程中挥发性有机化合物(VOC)的挥发量和峰值浓度,加快 VOC 产物的扩散速度;ATH/MMT 阻燃剂可以显著改善沥青混合料的阻燃抑烟性能,且其可有效改善沥青混合料的高温稳定性和水稳定性,但是会在一定程度上降低混合料的低温抗裂性,虽仍能满足较高的路面性能要求,但其阻燃剂掺量不宜过大。

关键词:道路工程;复掺阻燃剂;试验研究;沥青混合料;金属氢氧化铝;蒙脱土

中图分类号:U414 **文献标志码:**A **DOI:**10.19721/j.cnki.1671-8879.2020.02.001

Influencing of compounding flame retardants with ATH/MMT on performance of asphalt mixture

SHEN Ai-qin¹, SU Yu-xuan¹, YANG Xiao-long¹, WANG Han¹, ZHAO Wen-ding²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Jilin Traffic Planning and Design Institute, Changchun 130000, Jilin, China)

Abstract: In order to solve the existing security issues of long tunnel's asphalt pavement currently, and improve the flame retardant performance of highway tunnel asphalt pavement, metal aluminum hydroxide(ATH) and montmorillonite(MMT) was chosen as compounding flame retardants and then SBS modified asphalt mixture were prepared. Rutting test, low temperature blinding, Marshall submerge experiment, freeze-thaw indirect tension test were used to analysis the impact of ATH/MMT mixed flame retardant on asphalt mixture's paving performance and flame retardant performance. The results show that ATH/MMT compounding flame retardant can improve the asphalt materials' limiting oxygen index(LOI) by 21.2% to above 25%, and can

收稿日期:2019-10-09

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2017JQ5085)

作者简介:申爱琴(1957-),女,陕西宝鸡人,教授,博士研究生导师,E-mail:saq6305@163.com。

increase asphalt material's flammability rating from flammable to flame retardant, and can reach the standard of self-extinguishing materials. ATH/MMT compounding flame retardant can reduce the burning duration of asphalt mixture. The burning duration can be reduce by nearly double, when the dosage of MMT and ATH is 3% and 10%, mass fraction, same below. ATH/MMT compounding flame retardant can also reduce the loss rate of combustion quality of asphalt mixture, and improve the burning residual Marshall stability of the asphalt mixture. It also can ensure that the burned Marshall test piece is basically complete in structure and has good mechanical properties. At the same time, ATH/MMT compounding flame retardant reduce the volatile organic compounds (VOC) volatilization during the burning process of asphalt mixture, reduce the peak concentration during VOC volatilization and accelerate the diffusion rate of VOC products. These all explain that ATH/MMT flame retardant can significantly improve the flame retardant and smoke suppression performance of asphalt mixture, and can improve asphalt mixture's high temperature stability and water stability, but reduce the low temperature crack resistance of the asphalt mixture to some extent. Although it can still meet high performance requirements, but the amount of flame retardant should not be too large. 8 tabs, 11 figs, 30 refs.

Key words: road engineering; hydroxide flame retardant; experiment study; asphalt mixture; ATH; MMT

0 引言

中国西北地区地形以山区为主,随着中西部建设的发展,隧道的建设数量和规模也持续加大。目前中国隧道路面多以水泥混凝土路面为主,存在行车舒适性差、接缝、排水不良等问题^[1]。而沥青路面具有行车舒适性好、抗滑降噪等显著优势,并可降低隧道内扬尘,因此,近年来越来越多的公路隧道路面采用了沥青路面的铺筑形式^[2]。但沥青是一种易燃材料,一旦隧道内发生火灾,会在短时间内释放大热量和烟气,从而对隧道内人员的逃离疏散造成困难,增大救援难度。因此,隧道沥青路面的阻燃防火工作一直是国内外学者们关注的重点^[3-7]。

目前,提高隧道沥青路面阻燃性能的常用方法是向沥青中添加各类阻燃剂,其中氢氧化镁(MTH)、氢氧化铝(ATH)等无机阻燃剂因其具有良好的阻燃抑烟性能、无毒无害、经济环保等优势,成为聚合物中最常用的阻燃剂^[8]。杨宇等针对掺加镁铝系阻燃剂的阻燃沥青混合料进行了研究,结果表明,掺加阻燃剂后沥青混合料的阻燃性能显著提升^[9]。何立平等研究表明,ATH阻燃剂可在一定程度上提升沥青混合料的高温性能,同时降低老化作用对沥青混合料的影响程度,但是会降低混合料的低温性能^[10]。此外,Juliette等的研究表明,ATH阻燃剂可将乙烯-醋酸乙烯酯(EVA)复合材料的阻燃性能提升20%左右^[11]。

近年来,研究人员开始采用纳米改性的方式来提高聚合物材料的阻燃性能,如采用纳米层状硅酸盐、纳米二氧化硅以及纳米碳纤维管^[6]等材料,而蒙脱土(MMT)作为目前最常用的纳米无机阻燃剂之一,成炭作用可以使其燃烧后在混合料表面形成致密的隔热层,阻绝火焰与氧气接触的同时减慢热量传导,从而有效地提升沥青混合料的阻燃性能^[12]。Abdel-Fattah等的研究表明,蒙脱土改性纳米涂层可有效提升复合材料的阻燃性能与力学性能,其阻燃性能可以提升至难燃材料级别,力学性能可以改善15%~20%^[13]。Oussama等发现在高温条件下纳米无机阻燃剂对沥青混凝土的耐久性能仍有良好提升效果^[14]。Hesami等的研究表明,掺纳米改性蒙脱土可对环氧复合材料的耐火性与耐热性起到很大程度的改善作用^[15]。孙思萌研究表明,纳米级MMT阻燃剂可以有效改善乳化沥青的抗老化性能,将乳化沥青的层间距提升270%,且在老化情况下MMT阻燃剂依旧可以显著提升乳化沥青的阻燃性能^[16]。Kausar等发现羟基改性蒙脱土可在很大程度上提升聚合物材料的阻燃性能与力学性能^[17]。

虽然无机阻燃剂具有良好的阻燃性能,但其掺量较高时制得的沥青胶浆黏稠性变大,影响沥青的流变性能,导致沥青路面路用性能的降低^[18]。为此,一般选用ATH阻燃剂与其他阻燃剂复掺以同时提升沥青材料的阻燃性能与力学性能,来保证路面的服务水平。在复合阻燃剂的研究方面,Zhang等研究了膨胀

石墨(EG)/ATH 改性涂料对聚合物防火隔热性能的改善效果,研究结果表明,EG/ATH 涂层可以为聚合物材料提供良好的隔热层,使其具有优异的阻燃性能,可以达到自熄材料的标准^[19]。程博等通过研究不同蒙脱土对 EVA(乙烯-乙酸乙烯)/ATH 改性聚合物阻燃性能和热行为的影响,指出 MMT/EVA/ATH 复合阻燃剂对聚合物材料热稳定性与力学性能的改善效果显著^[20]。丁庆军等用沸石粉与 ATH、MH 制备协同阻燃沥青的氧指数达到 29%以上,闪点达到 420 ℃,说明沸石粉/ATH 体系可以有效改善沥青材料的阻燃性能^[21]。梁永胜等研究表明,ATH 与 MMT 复合阻燃剂对沥青氧指数的提高效果显著大于单一阻燃剂,ATH 与 MMT 间表现出良好的协同阻燃效应^[22]。

综上所述,目前针对沥青混合料复掺阻燃剂的研究主要集中在阻燃剂材料性能方面,而关于掺阻燃剂沥青混凝土力学性能与服务水平的研究较少。为此,本文选用 ATH 与 MMT 阻燃剂复掺制备阻燃抑烟沥青混合料,通过试验研究分析不同阻燃剂掺量对沥青混合料性能的影响,着重考虑复掺阻燃剂对阻燃抑烟性能及沥青混合料路用性能的影响,验证基于 ATH/MMT 复掺阻燃抑烟沥青混合料在实际工程建设中的可行性,以解决公路隧道沥青路面的施工及服役期间安全问题。

1 原材料

1.1 沥青

沥青为陕西丰诚沥青有限公司生产的 70# A 级 SBS 改性沥青,测试依照《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)进行,其指标测试结果如表 1 所示。

表 1 SBS 改性沥青技术指标

项目	技术指标	规范要求
针入度(25 ℃,100 g,5 s)/(0.1 mm)	62	60~80
延度(5 ℃,5 cm·min ⁻¹)/cm	47	≥30
软化点(环球法)/℃	76.5	≥55.0
闪点/℃	362	≥230
弹性恢复(25 ℃)/%	93	≥65
密度(15 ℃)/(g·cm ⁻³)	1.024	

1.2 阻燃抑烟剂

选用中丰铝粉材料有限公司生产的 ATH,其粒径为 13 μm,MMT 为巩义市城区炜展耐材公司生产的纳米级阻燃改性蒙脱土。ATH 和 MMT 的

主要参数如表 2、表 3 所示。

表 2 金属氢氧化铝(ATH)技术性能

Tab. 2 Technical performance of aluminum hydroxide(ATH)						
物理指标	粒径/μm	比白度	pH 值	烧失量/%	附着水	纯度
	13	93	8.9	≤35	0.17%	≥98%
化学指标	SiO ₂ 含量/%		Fe ₂ O ₃ 含量/%		Na ₂ O 含量/%	
	≤0.02		≤0.02		≤0.2	

表 3 蒙脱土(MMT)技术性能

Tab. 3 Technical performance of montmorillonite (MMT)						
颜色	外观	密度/(g·cm ⁻³)	表观密度/(g·cm ⁻³)	平均晶片厚度/nm	含水量/%	粒径/nm
米白色	细粉体	1.8	<0.35	<25	<3	2.4

1.3 集料

集料采用玄武岩碎石,其最大粒径为 13.2 mm,依照《公路工程集料试验规范》(JTG E42—2005)测试集料的各项物理力学性能如表 4 所示。细集料采用机制砂,密度为 2.656 g/cm³,矿粉采用石灰岩矿粉,密度为 2.722 g/cm³。

表 4 沥青混合料集料技术性能

Tab. 4 Technical performances of asphalt mixture aggregate				
检测项目	要求值	不同粒径(mm)下各指标的实测值		
		(3,5]	(5,10]	(10,15]
表观相对密度/(g·cm ⁻³)	≥2.600	2.955	2.893	2.913
毛体 积 相 对 密 度/(g·cm ⁻³)		2.909	2.839	2.879
吸水率/%	≤2.00	0.54	0.66	0.40
针片状颗粒含量/%	粒径大于等于 9.5 mm	≤12.0		8.5
	粒径小于 9.5 mm	≤18.0	6.4	12.0
粗集料压碎值/%	≤26			21
坚固性/%	≤12.0	5.2	6.5	5.2
粗集料洛杉矶磨耗损失/%	≤28.0		26.0	20.5

依照《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)要求,本文选择常用的 AC-13 级配,如表 5 所示。

2 沥青混合料制备及试验方案

2.1 阻燃剂复配方案设计及沥青混合料制备

从已有的研究成果可知,当沥青混合料中 MMT 的掺量(质量分数,下同)达到 5%以上时,会降低混合料的水稳定性。ATH 的掺量大于 15%时,会影响混合料的施工和易性;而 ATH 掺量小于

3%，则无法起到明显的阻燃抑烟效果^[22-24]。因此，配制复合阻燃剂时，不仅要考虑到 ATH 与 MMT 的配伍性及其掺量，而且还要考虑到阻燃沥青混合料的施工性能以及经济性。综合考虑各方面因素，初步设计的复合阻燃剂掺配方案如表 6 所示。

通过对不同复配方案的沥青进行氧指数测试，结果如图 1 所示。根据《建筑材料及制品燃烧性能分级》(GB 8624—2012)中的评级指标，一般认为氧指数小于 22% 为易燃材料，氧指数在 (22%，27%) 属于可燃材料，氧指数大于 27% 是难燃材料。从图 1 可以看出，对照组沥青的氧指数为 21.2%，属于易燃物，但当参加 1% MMT+5% ATH 的复掺阻燃剂后，氧指数达到了 25.3%，增幅达 4.1%。而复掺阻燃剂掺量越大，其阻燃性能也逐渐升高，当掺量为 3% MMT+10% ATH 时，沥青氧指数为 29.3%，

达到了难燃材料级别，表明阻燃沥青已具备良好的阻燃性能。

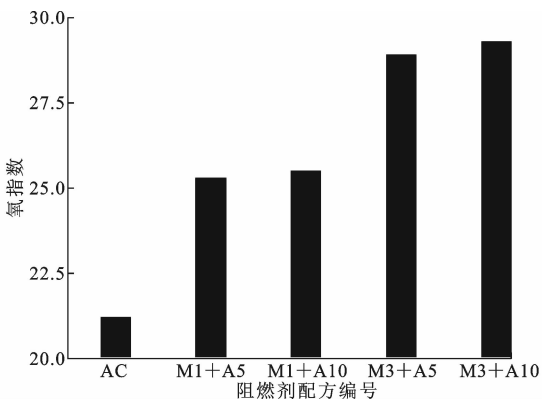


图 1 阻燃沥青氧指数结果分析

Fig. 1 Analysis of oxygen indexes results of flame retardant asphalt

表 5 AC-13 矿料级配

Tab. 5 Gradations of AC-13 asphalt mixture

筛孔尺寸/mm	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
上限/%	100	85	68	50	38	28	20	15	8
下限/%	90	68	38	24	15	10	7	5	4
AC-13 设计级配	95.3	77.6	51.4	38.9	24.5	18.0	9.3	7.0	5.5

表 6 沥青混合料复合阻燃剂掺配方案

Tab. 6 Flame retardant addition amounts in asphalt mixture

编号	MMT 掺量/%	ATH 掺量/%
AC	0	0
M1+A5	1	5
M1+A10	1	10
M3+A5	3	5
M3+A10	3	10

采用前述制订的阻燃剂掺配比，通过室内马歇尔试验，确定沥青混合料的马歇尔体积设计指标。试验中使用的阻燃剂以外掺法加入到沥青混合料中，用阻燃剂代替等质量矿粉，并提前将阻燃剂与矿粉搅拌均匀，以免发生阻燃剂拌和不均匀的现象。然后成型试验所用试件。

2.2 试验方法

2.2.1 沥青混合料阻燃性能测试

为了对比分析不同掺量阻燃沥青混合料的阻燃性能，本文采用在燃烧炉中直接燃烧的方法进行测试。并选择 JA-908 型便携式挥发性有机化合物 (VOC) 检测仪来检测沥青混合料燃烧时挥发产物的浓度。以沥青混合料的燃烧时间、燃烧时发烟量、燃烧前后的质量损失率、马歇尔稳定度的燃烧残留率分别作为沥青混合料阻燃性能的评价指标，从而综合评价阻燃剂的阻燃效果。具体试验方法为：分

别取不同掺量的阻燃剂加入沥青混合料，成型马歇尔试件，称重记为 m_1 ；将试件分批放入燃烧炉中，每个试件从表面浇入 30 mL 煤油作为助燃剂，试件表面放 3 cm 长棉条起引燃作用，点燃后记录燃烧发烟浓度和燃烧时间，燃烧结束并至试件冷却后，称重试件记为 m_2 ，即得出烧失比 $(1 - m_2 / m_1)$ 。试验过程如图 2、图 3 所示。



图 2 沥青混合料试件放置

Fig. 2 Test piece placement in asphalt mixture

2.2.2 路用性能试验

为研究 ATH/MMT 对沥青混合料路用性能的影响，依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG F40—2011)，采用车辙试验、低温弯曲、浸水马歇尔和冻融劈裂试验对阻燃沥青混合料的高低温



图 3 测试进行中
Fig. 3 Test progressing

性能以及水稳性能进行验证。

3 沥青混合料阻燃性能

采用直接燃烧法对不同阻燃沥青混合料的阻燃性能进行测试,分析不同阻燃剂配方对沥青马歇尔试件的燃烧持续时间、燃烧质量损失、燃烧残留马歇尔稳定度及烟气释放特性的影响。

3.1 燃烧时间

不同阻燃剂配方的沥青混合料燃烧持续时间如图 4 所示。

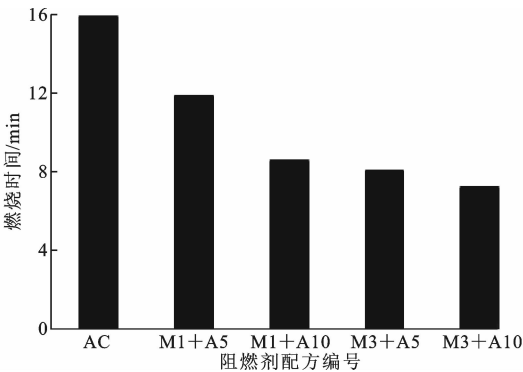


图 4 沥青混合料燃烧时间结果分析

Fig. 4 Analysis of combustion duration of asphalt mixture

由图 4 可知,普通热拌沥青混合料 AC 燃烧时间超过 15 min,而掺入 ATH/MMT 阻燃剂后,沥青混合料的燃烧时间都缩短了 3 min 以上。其中复掺阻燃剂的掺量越大,其燃烧持续时间越短。阻燃剂掺量为 1% MMT+5% ATH 的沥青混合料燃烧持续时间为 12 min,其他 3 组的燃烧持续时间都小于 10 min,复掺阻燃剂可有效抑制沥青混合料燃烧,即显著提升了沥青混合料的阻燃性能。

对燃烧前后马歇尔试件的质量变化进行分析,其结果如表 7 所示。

表 7 沥青混合料烧失比分析				
Tab. 7 Analysis of burn-loss ratios of asphalt mixture				
编号	燃烧前质量/g	燃烧后质量/g	燃烧损失质量/g	烧失比/%
AC	1 250. 4	1 110. 3	140. 1	11. 2
M1+A5	1 263. 6	1 170. 8	92. 8	7. 3
M1+A10	1 266. 6	1 195. 1	71. 5	5. 6
M3+A5	1 254. 7	1 208. 8	45. 9	3. 7
M3+A10	1 263. 2	1 225. 1	38. 1	3. 0

从表 7 可以得出,普通热拌沥青混合料烧失比为 11%左右,而掺加 ATH/MMT 复掺阻燃剂后,沥青混合料的烧失比降低至 7. 5%以下。随着 ATH/MMT 掺量的逐渐提升,阻燃沥青混合料烧失比也逐渐降低,当 MMT 掺量为 3%、ATH 掺量为 10%时,烧失比仅为 3. 0%,比普通的热拌沥青混合料燃烧质量损失率降低近 8%,说明复掺阻燃剂对沥青混合料的阻燃性能起到了良好的改善作用。

3.2 燃烧残留马歇尔稳定度

采用马歇尔试验方法对燃烧前后沥青混合料试件的残留稳定度进行测试,其结果如表 8 所示。

表 8 沥青混合料残留马歇尔稳定度分析			
Tab. 8 Marshal stabilities analysis of asphalt mixture			
编号	燃烧前马歇尔稳定度/kN	燃烧后马歇尔稳定度/kN	残留马歇尔稳定度/%
AC	11. 47	9. 78	85. 3
M1+A5	11. 82	10. 65	90. 1
M1+A10	12. 85	11. 98	93. 2
M3+A5	12. 47	11. 81	94. 7
M3+A10	13. 68	13. 30	97. 2

从表 8 可以看出:ATH/MMT 复掺阻燃剂能提升沥青混合料的马歇尔稳定度,而且随着阻燃剂掺量的不断提升,沥青混合料的马歇尔稳定度逐渐增大;当掺量达到 3% MMT+10% ATH 时,阻燃沥青混合料马歇尔稳定度达到 13. 68 kN,比普通热拌沥青混合料提升近 20%。阻燃沥青混合料的燃烧后马歇尔稳定度也表现出相似的规律,即阻燃沥青混合料的燃烧后稳定度都显著高于普通热拌沥青混合料。

普通热拌沥青混合料燃烧残留马歇尔稳定度为 85. 3%,而阻燃沥青混合料则均在 90%以上;随着 ATH/MMT 复掺阻燃剂掺量的增加,沥青混合料的残留马歇尔稳定度也逐渐增加,3% MMT+10% ATH 的阻燃沥青混合料残留马歇尔稳定度达到 97. 2%,表明此掺量下的阻燃沥青混合料基本达到自熄材料的标准。

图 5 为普通热拌沥青混合料和阻燃沥青混合料试样燃烧后的外观对比。

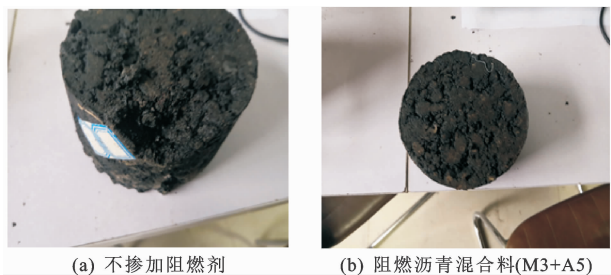


图 5 不参加阻燃剂沥青混合料和阻燃沥青混合料燃烧后的外观比较

Fig. 5 Comparisons of appearance of asphalt mixture after combustion with or without flame retardant

由图 5 可以看出,普通热拌沥青混合料燃烧后边角出现了明显破损,而阻燃沥青混合料试件表面较为完整,说明阻燃沥青混合料具有良好的阻燃性能。

3.3 VOC 释放特性

不同阻燃沥青混合料燃烧过程中 VOC 释放特性如图 6 所示。

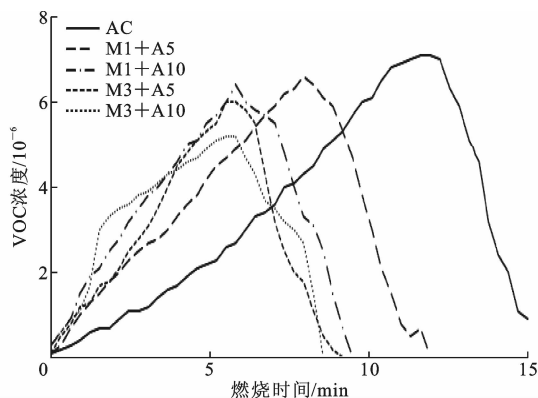


图 6 沥青混合料燃烧挥发 VOC 浓度

Fig. 6 Asphalt mixture burning VOC volatile concentration

由图 6 可知:所有沥青混合料的 VOC 释放的变化规律一致;随着燃烧的进行,VOC 的释放量呈先增大后减小的趋势,其中普通热拌沥青混合料 AC 的 VOC 释放量最大、持续时间最长,并于燃烧进行至约 12 min 时达到峰值,其 VOC 浓度大于 7×10^{-6} 。当沥青混合料中加入复掺阻燃剂后,其 VOC 释放量明显降低,其中掺加 3% MMT+10% ATH 复掺阻燃剂的沥青混合料,其 VOC 浓度峰值仅为 5.3×10^{-6} ,较普通沥青混合料降低了 25%,复掺阻燃剂可显著改善沥青混合料的抑烟性能。

4 路用性能

4.1 高温性能

采用车辙试验对阻燃沥青混合料的高温稳定性进行测试,不同阻燃沥青混合料的动稳定度试验结果如图 7 所示。

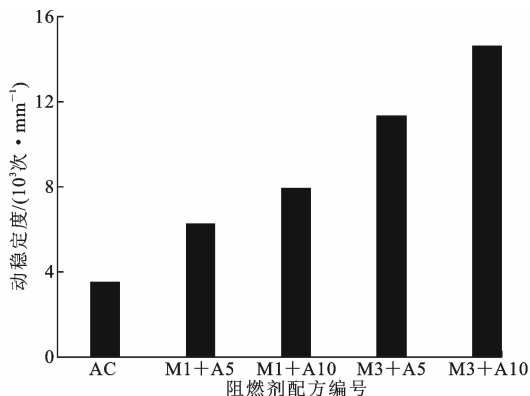


图 7 动稳定度

Fig. 7 Dynamic stabilities

由图 7 可知:随着复掺阻燃剂掺量的增加,沥青混合料的高温稳定性逐渐增强;普通沥青混合料动稳定度为 3 538 次/mm,掺加复掺阻燃剂后,沥青混合料的动稳定度均超过了 6 000 次/mm,表明复掺阻燃剂可以显著增强沥青混合料的高温性能。究其原因:一方面,MMT 可以增大沥青的黏稠度,阻碍 SBS 高分子链和沥青分子间的相对运动,从而提高沥青混合料的高温稳定性;另一方面,ATH 与 MMT 本身粒度较细、比表面积大,在高温情况下可以提高沥青黏度,从而改善了沥青混合料的高温稳定性^[25-27]。

4.2 低温性能分析

图 8、图 9 分别为沥青混合料的弯拉强度及最大弯拉应变测试结果。

由图 8、图 9 可知:加入 ATH/MMT 复配阻燃剂后,沥青混合料低温抗裂性略有降低,但均满足规范要求 ($> 2\,800 \times 10^{-6}$);当 MMT 掺量为 1%、ATH 掺量为 5% 时,沥青混合料抗弯拉强度与最大弯拉应变均比普通沥青混合料降低约 2%;当 MMT 掺量为 1%,ATH 掺量上升到 10% 时,其最大弯拉应变为 $3\,839 \times 10^{-6}$,降低了近 10%;当 3% MMT+10% ATH 掺量时,其最大弯拉应变仍达到 $3\,609 \times 10^{-6}$ 。这主要是因为 MMT 与 SBS 高分子、沥青分子间的桥接作用阻碍了沥青及 SBS 分子的自由运动,降低了沥青的延展性,使得沥青混合料的最大弯拉应变和极限抗弯拉强度均有所降低^[28-29]。

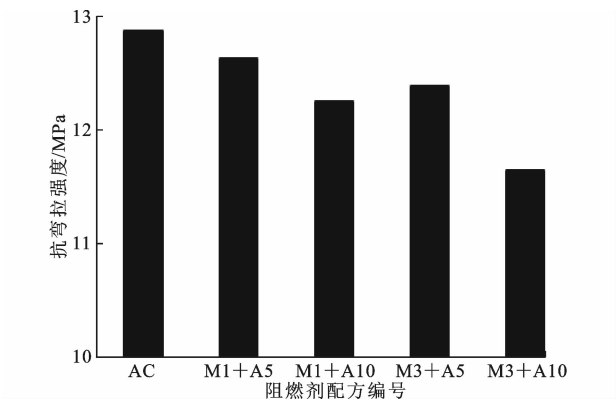


图 8 抗弯拉强度
Fig. 8 Bending-tension strengths

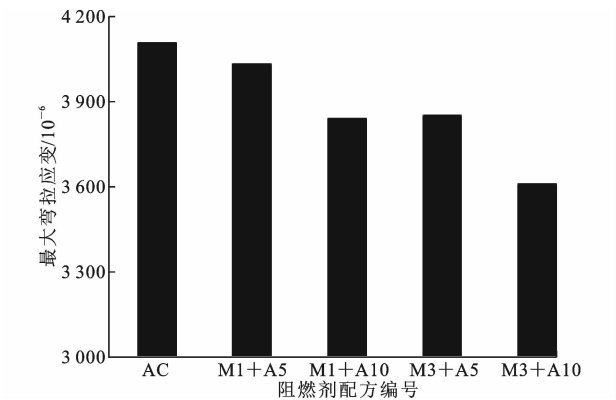


图 9 最大弯拉应变
Fig. 9 Maximum circumferential strains

4.3 水稳定性分析

基于浸水马歇尔试验和冻融循环试验来评价阻燃沥青混合料的水稳定性,结果图 10、图 11 所示。

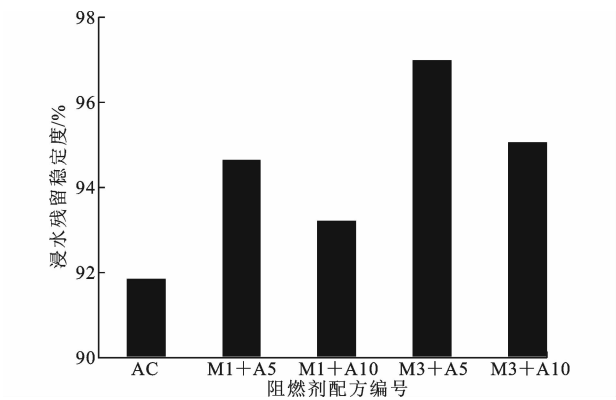


图 10 浸水马歇尔试验结果
Fig. 10 Results of immersion Marshall test

由图 10、图 11 可以看出:掺加复掺阻燃剂可以提升沥青混合料的水稳定性;当 MMT 掺量为 1%、ATH 掺量为 5%时,浸水残留稳定度和冻融劈裂残留稳定度分别提升了2.5%和2.4%;当 MMT 掺量为 3%、ATH 掺量为 5%时,浸水残留稳定度为

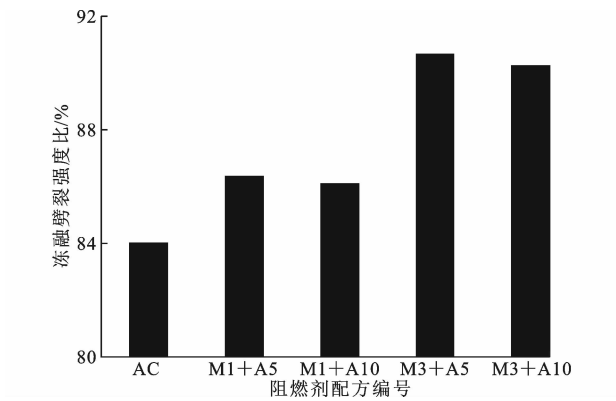


图 11 冻融劈裂试验
Fig. 11 Test results of freeze-thaw splitting

97%,冻融劈裂强度比为 90.7%,分别比普通热拌沥青混合料提高了 5.1%、6.7%;当 MMT 掺量为 3%时,ATH 掺量的增加会降低混合料的水稳定性,这是因为 ATH 的掺入降低了沥青膜的厚度^[17]。而 MMT 的掺加则对沥青混合料水稳定性具有一定的改善作用,其主要原因是 MMT 的掺入增大了改性沥青的黏度,且 MMT 本身对集料有一定的改善作用,可以提高集料的粗糙程度,从而提高沥青的吸附能力,改善沥青混合料的水稳定性^[30]。所以,ATH/MMT 复掺阻燃剂的掺加使得马歇尔试件更加密实,提升了沥青混合料的水稳定性。

5 结 语

(1)ATH/MMT 复掺阻燃剂可以显著提升沥青材料的极限氧指数,使沥青材料的阻燃等级从易燃级提升至难燃级,掺加复掺阻燃剂的沥青具有良好的阻燃能力。

(2)ATH/MMT 复掺阻燃剂可以减少沥青混合料的燃烧时间,降低燃烧质量损失率,提升燃烧后的残留动稳定度。说明复掺阻燃剂可以在很大程度上改善沥青混合料的阻燃性能。

(3)ATH/MMT 阻燃剂可以降低沥青混合料燃烧过程中的 VOC 峰值浓度以及 VOC 挥发量。说明掺 ATH/MMT 的阻燃沥青混合料具有良好的抑烟性能。

(4)ATH/MMT 复掺阻燃剂对沥青混合料的路用性能有很大的改善。复掺阻燃剂可显著提升沥青混合料的高温稳定性,同时可以有效改善沥青混合料的水稳定性。复掺阻燃剂后沥青混合料的最大弯拉应变和极限抗拉强度略有降低。

(5)本文仅讨论了 ATH 与 MMT 两种阻燃剂复掺对沥青路面的改善效果,下一步将研究更多种

阻燃剂以及其协同阻燃作用。

参考文献:

References:

- [1] 关甫洋. 隧道沥青路面混合料阻燃降粘技术研究[D]. 西安:长安大学, 2015.
GUAN Fu-yang. Study of asphalt flame retardant and decreasing viscosity for asphalt pavement mixture in tunnel[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [2] 王 嵩. 公路隧道沥青路面燃烧机制及影响因素的研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2016.
WANG Song. The research on the combustive mechanisms of asphalt pavement in tunnels and factors affect them[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.
- [3] HU S M, WANG C H, DU Q, et al. Research on aging properties of tourmaline modified asphalt[J]. Advanced Materials Research, 2012 (535): 1715-1718.
- [4] 贺 海, 王朝辉, 刘志胜, 等. 新型无机阻燃改性沥青的制备与路用性能研究[J]. 公路交通科技, 2014, 31(7): 45-52.
HE Hai, WANG Zhao-hui, LIU Zhi-sheng, et al. Study on preparation road performance of new inorganic fire-retardant modified asphalt[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(7): 45-52.
- [5] 黄志义, 吴 珂. 长大隧道沥青混凝土路面的防火安全性能[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2007, 41(8): 1427-1428.
HUANG Zhi-yi, WU Ke. Fire safety of long tunnel asphalt concrete pavement[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2007, 41(8): 1427-1428.
- [6] MASHINO H. State of the road tunnel safety technology in Japan[J]. Tunnelling and underground space technology, 2002, 17(2): 145-152.
- [7] 张 锐, 黄晓明. 新型无卤阻燃沥青的开发与性能测试[J]. 公路交通科技, 2007, 24(11): 40-44.
ZHANG Rui, HUANG Xiao-ming. Development and performance test of fire resistant asphalt without halogen[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(11): 40-44.
- [8] 武 斌. 复合氢氧化物沥青阻燃体系及其路用性能研究[D]. 杭州:浙江大学, 2015.
WU Bin. Research on composite hydroxide asphalt flame-retardant system and pavement performance[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [9] 杨 宇, 王洪国, 廖克俭, 等. 铝镁系阻燃剂对沥青的影响及其阻燃机理研究[J]. 应用化工, 2016, 45(4): 691-695.
YANG Yu, WANG Hong-guo, LIAO Ke-jian, et al. Study on the influence of Al and Mg system flame retardant on asphalt and its flame retardant mechanism[J]. Applied Chemical Industry, 2016, 45(4): 691-695.
- [10] 何立平, 申爱琴, 梁军林, 等. 阻燃沥青及沥青混合料的阻燃性能及路用性能[J]. 公路交通科技, 2013, 30(12): 15-22.
HE Li-ping, SHEN Ai-qin, LIANG Jun-lin, et al. Flame retardant and pavement performance of flame retardant asphalt and asphalt mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(12): 15-22.
- [11] JULIETTE C, AHMEDOU S, JEAN-FRANCOIS L, et al. Thermo-oxidative degradation of crosslinked EVA/EPDM copolymers: Impact of aluminium trihydrate (ATH) filler incorporation[J]. Polymer Degradation and Stability, 2018(4): 130-144.
- [12] 张鸿凯. 蒙脱土层间化合物在聚合物中的阻燃作用研究[D]. 镇江:江苏大学, 2017.
ZHANG Hong Kai. Influence of montmorillonite interlayer compounds on flame retardancy in polymer[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017.
- [13] ABDEL-FATTAH M, ASHRAF M E L, SAEED B M, et al. Studying the effect of organ-modified nano clay loading on the thermal stability, flame retardant, anti-corrosive and mechanical properties of polyurethane nanocomposite for surface coating[J]. Progress in Organic Coatings, 2015(89): 212-219.
- [14] OUSSAMA E, ELHEM G, MONGI B, et al. Influence of flame retardant addition on the durability of epoxy based polymer concrete after exposition to elevated temperature[J]. Construction and Building Materials, 2018, 192: 233-239.
- [15] HESAMI M, BAGHERI R, MASOOMI M. Combination effects of carbon nanotubes, MMT and phosphorus flame retardant on fire and thermal resistance of fiber-reinforced epoxy composites[J]. Iranian Polymer Journal, 2014, 23(6): 469-476.
- [16] 孙思萌. 纳米蒙脱土改性乳化沥青的制备及性能研究[D]. 北京:北京化工大学, 2015.
SUN Si-meng. Preparation and properties of nanometer montmorillonite modified asphalt emulsion[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2015.
- [17] KAUSAR A, ZULFIQAR S, AHMAD Z, et al. Studies on novel thermally stable segmented polyure-

- thanes based on thiourea-derivative diols[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2010, 95(12): 2281-2288.
- [18] 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. Materials design and properties evaluation for flame-retardant warm-mix asphalt[J]. *Journal of Hefei University of Technology: Natural Science*, 2018, 41 (5): 671-676.
- [19] ZHANG Yue-hong, LUAN Wei-ling, JIANG Tao. Fire-proofing and heat insulating performance improvement of EG/ATH modified intumescent flame retardant coating treated under Co-60 radiation[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017(100): 012039.
- [20] 程 博,李定华,吴 凡,等. 不同蒙脱土对 Al(OH)₃/乙烯-醋酸乙烯酯复合材料力学性能和阻燃性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2017, 34(12): 2715-2721.
- CHENG Bo, LI Ding-hua, WU Fan, et al. Effect of montmorillonite type on mechanical and flame retarded properties of Al(OH)₃/ethylene vinyl acetate copolymer composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, 34(12): 2715-2721.
- [21] 丁庆军,刘新权,沈 凡. ATH 沥青阻燃体系试验及机理分析[J]. *中国公路学报*, 2008, 21(5): 10-14.
- DING Qing-jun, LIU Xin-quan, SHEN Fan. Test and mechanism analysis of ATH asphalt flame-retarding system[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2008, 21(5): 10-14.
- [22] 梁永胜,余剑英,李汶卒,等. 氢氧化铝/蒙脱土复合阻燃沥青的制备与性能研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2013, 35(10): 38-42.
- LIANG Yong-sheng, YU Jian-ying, LI Wen-zu, et al. Preparation and properties of flame-retardant bitumen with aluminium trihydrate /montmorillonite[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2010, 35(10): 38-42.
- [23] 杨 光,余剑英,李玉环,等. 阻燃 SBS 改性沥青的制备与性能研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2016, 38(5): 8-12.
- YANG Guang, YU Jian-ying, LI Yu-huan, et al. Preparation and Properties of flame-retardant SBS modified bitumen[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2016, 38(5): 8-12.
- [24] 温 永. 有机蒙脱土-氢氧化物改性沥青的制备及其阻燃性能研究[D]. 西安:长安大学, 2012.
- WEN Yong. The preparation and flame retardancy of organe-montmorillonte/hydroxid modified asphalt [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [25] 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. Flame-retardant mechanism of flame-retardant asphalt based on thermal analysis [J]. *Journal of Chang'an University: Natural Science Edition*, 2019, 39(2): 47-56.
- [26] 黄志义,武 斌,康 诚,等. 复合氢氧化物改性沥青阻燃和路用性能[J]. *浙江大学学报:工学版*, 2016, 50(1): 27-32.
- HUANG Zhi-yi, WU Bin, KANG Cheng, et al. Flame retardant and pavement performance of composite hydroxide modified asphalt[J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2016, 50(1): 27-32.
- [27] 王朝辉,董 彪,高志伟,等. 无机阻燃改性沥青结构表征及阻燃机理研究[J]. *功能材料*, 2014, 13(1): 13045-13049, 13055.
- WANG Zhao-hui, DONG Biao, GAO Zhi-wei, et al. Structural expressions and retarding mechanism of inorganic modified fire-retardant asphalt[J]. *Journal of Functional Materials*, 2014, 13(1): 13045-13049, 13055.
- [28] 王大伟,邓祥明. 温拌阻燃沥青与沥青混合料应用性能研究[J]. *中国公路学报*, 2017, 30(5): 59-66.
- WANG Da-wei, DENG Xiang-ming. Research on application performance of warm-mixed flame retardant asphalt and asphalt mixture [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(5): 59-66.
- [29] XU T, HUANG X, ZHA Y. Investigation into the properties of asphalt mixtures containing magnesium hydroxide flame retardant[J]. *Fire Safety Journal*, 2011, 46: 330-344.
- [30] 李圣杰. 蒙脱土丁苯橡胶复合改性乳化沥青的制备及性能研究[D]. 北京:北京化工大学, 2015.
- LI Sheng-jie. Preparation and properties of montmorillonite and styrene butadiene rubber composites modified asphalt emulsion[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2016.