

温拌阻燃沥青混合料优化设计与性能评价

杨锐¹,周启伟²,王磊³,袁明园²

1. 安徽交通职业技术学院土木工程系,安徽 合肥 230000;2. 招商局重庆交通科研设计院有限公司,重庆 400000;
3. 安徽交控道路养护有限公司,安徽 合肥 230000

摘要:为开发阻燃性能较好、适用于隧道路面的沥青混合料,基于正交试验设计,确定温拌剂、阻燃剂的最佳质量分数,设计温拌阻燃沥青混合料并进行路用性能评价;试验确定温拌阻燃沥青混合料最佳拌和温度与压实温度,并评价其路用性能、抗疲劳性能及阻燃性能。结果表明:温拌阻燃沥青混合料的最佳拌和温度为150℃,最佳压实温度为140℃;其水稳定性及抗疲劳性能均得到显著改善,高温、低温性能得到一定提高;从燃烧时间、质量损失水平及残留稳定度等参数分析表明,温拌阻燃沥青混合料可增加路面材料的阻燃性能,提高火灾事故后道路材料的基本路用性能,可为温拌阻燃沥青混合料在隧道工程中的应用提供参考。

关键词:道路工程;温拌阻燃沥青;路用性能;阻燃性能

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2024)01-0049-07

引用格式:杨锐,周启伟,王磊,等.温拌阻燃沥青混合料优化设计与性能评价[J].山东交通学院学报,2024,32(1):49-55.

YANG Rui, ZHOU Qiwei, WANG Lei, et al. Optimization design and performance evaluation of flame-retardant warm-mix asphalt mixture[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2024, 32(1): 49-55.

0 引言

目前大多数隧道均采用沥青路面,因隧道空间狭小,通风不佳,铺筑沥青混合料时有害气体难以散去,一旦出现火情,更易产生有毒气体和烟雾,对人员健康安全造成较大威胁^[1-4]。因此,需研发具有抑烟阻燃作用的隧道沥青路面材料。

20世纪90年代,研究人员发现温拌沥青可显著降低温室气体的排放^[5-6],已研发多种降低沥青拌和温度的添加剂及方法,并在欧洲大规模推广以温拌沥青混合料为主要铺筑材料的道路^[7]。Hou等^[8]、Alimohammadi等^[9]通过试验研究不同温拌剂质量分数下沥青混合料的性能,发现温拌剂与沥青的质量比为0.025%的沥青混合料的最低拌和温度可达129℃,最低碾压温度为110℃。Li等^[10]对比分析热拌沥青混合料和添加Sasobit温拌剂的温拌沥青混合料的废气排放水平及抗车辙能力,结果表明添加温拌剂后废气排放明显减少,拌和温度可降低25℃,抗车辙能力相差不大。牛茺昌等^[11]、申爱琴等^[12]测试7种掺加不同温拌剂和抑烟阻燃剂的苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(styrene butadiene styrene, SBS)改性沥青及辉绿岩集料的表面能,基于表面能理论计算分析沥青与集料匹配性指标,发现温拌剂与沥青的质量比为0.007%、抑烟阻燃剂与沥青的质量比为0.14的SBS改性沥青与集料间黏附性最佳,沥青混合料水稳定性最好。龙云霄等^[13]、乔建刚等^[14]通过表面改性制备新型复合阻燃剂BPN-Ti,基于氧指数、烟密度及低温延度试验确定阻燃剂的合理用量,并通过对比试验分析表面改性对改性沥青的阻燃性、抑烟

收稿日期:2022-12-10

基金项目:重庆市科学技术局技术创新与应用发展专项援藏项目(CSTB2022TIAD-GPX0006);安徽省高校自然科学基金研究项目(2022AH052459, 2023AH052969, 2023AH052972);全国交通运输职业教育教学指导委员会项目(LQZZW202213, LQZWH202310);安徽省职业与成人教育学会课题(AZCJ2023150)

第一作者简介:杨锐(1986—),女,河南漯河人,讲师,工学硕士,主要研究方向为道路工程,E-mail:695749271@qq.com。

性、存储稳定性及路用性能的影响。蒋玮等^[15]、王春等^[16]、何立平等^[17]、王朝辉等^[18]基于试验设计确定温拌剂和阻燃剂与沥青的合理质量比、拌和温度及剪切速率,采用红外热成像仪评价温拌阻燃沥青混合料的阻燃效果,并通过路用性能试验分析发现温拌阻燃沥青混合料的长期水稳定性和抗疲劳性能有所降低,高温稳定性和低温稳定性均有提升。现阶段针对温拌阻燃沥青混合料的研究主要集中在添加剂、单一成分与沥青的质量比及路用性能方面,针对2种添加剂的复配混合设计及沥青混合料耐久性等的研究较少。

本文基于正交试验设计,得到2种添加剂与沥青的复配最佳质量比,优化设计温拌阻燃沥青混合料级配,评价沥青混合料的路用性能、疲劳性能及阻燃性能,以期温拌阻燃混合料在隧道工程中的应用提供依据。

1 原材料性能

选择SBS改性沥青,基本性能测试结果如表1所示。粗集料、细集料物理力学性能指标如表2、3所示。石灰石磨细制成石灰岩矿粉,技术指标如表4所示。某A型阻燃沥青改性剂的性能指标如表5所示。HH-XII型温拌剂为棕绿色黏稠液体,主要成分为表面活性剂,密度为 $0.99\sim 1.01\text{ g/cm}^3$,pH值为 $8\sim 11$,基质沥青混合料、SBS改性沥青混合料的降温幅度分别为 $10\sim 30\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $20\sim 40\text{ }^\circ\text{C}$ 。

表1 SBS改性沥青基本性能测试结果

项目	25℃针入度/ (0.1 mm)	针入度 指数	软化 点/℃	5℃ 延度/cm	135℃运动 黏度/(Pa·s)	闪点/ ℃	溶解 度/%	25℃弹性 恢复/%	残留 延度/cm	质量 变化/%	25℃残留针 入度比/%
试验结果	71	0.51	87	37.3	2.46	264	99.3	82	26	0.350	67.5
技术要求 ^[19]	60~75	≥-0.40	≥75	≥35.0	2.00~3.00	≥230	≥99.0	≥80	≥25	±1.000	≥65.0

表2 粗集料物理力学性能指标

粒径/mm	集料压碎值/%	洛杉矶磨耗损失/%	表观相对密度	毛体积相对密度	吸水率/%	针片状颗粒的 质量分数/%
>9.5~13.2	16.5	14.6	2.814	2.849	0.41	4.51
>4.75~9.5		12.5	2.818	2.844	0.56	5.50
2.36~4.75		13.4	2.814	2.856	0.68	
技术要求 ^[19]	≤22.0	≤25.0	≥2.500		≤3.00	≤20.00

表3 细集料物理力学性能指标

项目	表观相对密度	毛体积相对密度	棱角性/s	亚甲基值/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
试验结果	2.845	35.9	0.75	1.2
技术要求 ^[19]	≥2.500		≤30.00	≤2.5

表4 石灰岩矿粉技术指标

项目	表观相对密度	亲水系数
试验结果	2.714	0.71
技术要求 ^[19]	≥2.500	≤1.00

表5 某A型阻燃沥青改性剂性能指标

项目	固含量/%	细度(0.315 mm筛余)/%	分解温度/℃	氧指数指标/%	烟密度等级	pH值
试验结果	96.5	8.6	285	33	67	5.9
技术要求 ^[19]	≥95.0	≤10.0	≥270	≥31	≤70	5.5~7.0

由表1~5可知本文试验所用原材料性能均满足文献[19]要求。

2 施工参数正交试验确定方法

基于相关正交试验设计,确定温拌剂、阻燃剂与沥青的合理质量比和温拌阻燃沥青混合料的最佳拌和温度,优化工艺参数。以温拌剂与沥青的质量比 A 、阻燃剂与沥青的质量比 B 与温拌阻燃沥青混合料的拌和温度 C 为影响因素,根据推荐最佳用量和工程经验,每个影响因素确定 3 个水平,正交分析各因素对沥青性能的影响。各正交试验影响因子和水平为: $A_1 \sim A_3$ 分别为 5%、6%、7%, $B_1 \sim B_3$ 分别为 7%、9%、11%, $C_1 \sim C_3$ 分别为 140、150、160 °C。选择 $L_9(3^4)$ 正交表进行试验和极差分析,结果如表 6、7 所示。

表 6 正交试验结果

方案	A	B	C/°C	软化点/°C	针入度/(0.1 mm)	5 °C 延度/cm	氧指数/%
1	0.05	0.07	140	82.5	53.1	36.9	21.2
2	0.05	0.09	150	84.6	51.6	35.8	23.4
3	0.05	0.11	160	85.3	50.4	34.4	26.9
4	0.06	0.07	150	84.4	49.5	34.5	23.1
5	0.06	0.09	160	85.3	47.4	33.6	23.8
6	0.06	0.11	140	87.1	44.5	31.0	26.7
7	0.07	0.07	160	86.1	46.7	33.1	23.1
8	0.07	0.09	140	87.3	45.9	32.3	24.2
9	0.07	0.11	150	87.9	43.5	30.8	25.5

表 7 极差分析结果

影响因素	软化点		针入度		5 °C 延度		氧指数	
	极差	最优水平	极差	最优水平	极差	最优水平	极差	最优水平
A	0.72	A_2	4.68	A_2	3.98	A_2	0.75	A_2
B	1.63	B_3	2.89	B_3	2.16	B_3	2.89	B_3
C	0.35	C_1	1.35	C_1	0.28	C_1	0.35	C_1
排序	$B、A、C$		$A、B、C$		$A、B、C$		$B、A、C$	

由表 6、7 可知:针入度、5 °C 延度和氧指数随温拌剂质量分数的增大而减小,软化点随温拌剂质量分数的增大而增大,说明温拌剂掺量过高对沥青性能不利。沥青的 5 °C 延度和针入度随阻燃剂的质量分数的增大而降低,软化点和氧指数则相反;温拌剂的质量分数对针入度、5 °C 延度的影响较大,阻燃剂的质量分数对软化点、氧指数的影响较大,拌和温度对各指标影响较小;方案 6 的沥青性能最佳,确定温拌剂、阻燃剂与沥青的最优质量比分别为 0.06、0.11,拌和温度为 140 °C。

3 温拌阻燃沥青混合料配合比及施工温度

3.1 配合比设计

选择 AC-13 级配沥青混合料,确定规范要求的级配范围,筛分粗、细集料并设计级配,通过试算,确定粒径分别为 $>9.5 \sim 13.2$ 、 $>4.75 \sim 9.5$ 、 $>2.36 \sim 4.75$ 、 $0 \sim 2.36$ mm 的矿料与矿粉的质量比为 35 : 15 : 18 : 27 : 5,合成级配曲线如图 1 所示。

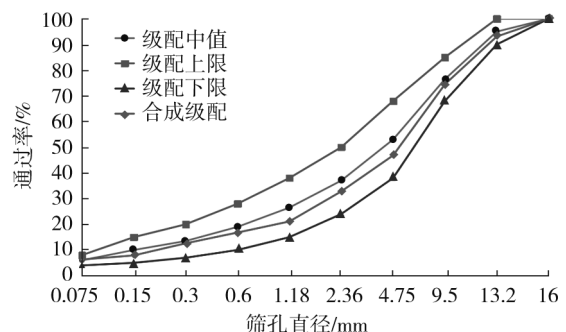


图 1 矿料的级配曲线

选择 SBS 改性沥青,温拌剂及阻燃剂与沥青的质量比分别为 0.06、0.11,根据规范要求制备试样,进行室内马歇尔试验,试验结果如表 8 所示。

表 8 SBS 改性沥青混合料马歇尔试验结果

油石比/%	毛体积相对密度	稳定度/kN	空隙率/%	流值/mm	矿料间隙率/%	沥青饱和度/%
3.5	2.358	8.75	6.85	2.53	14.25	57.65
4.0	2.372	8.95	6.90	2.62	14.53	63.12
4.5	2.401	9.05	6.88	2.63	14.67	70.89
5.0	2.395	8.86	5.68	2.48	15.15	73.89
5.5	2.391	8.79	5.35	2.43	15.49	75.32

参考最佳油石比确定步骤,计算得到沥青与矿料的最佳质量比为 0.046 8。综合考虑各项指标试验结果,结合工程实践经验,确定最佳油石比为 4.6%。

3.2 拌和与压实温度

空隙率反映路面的压实效果,空隙率过大将导致路面二次压实形成车辙,水更易进入路面造成水损坏。温度对温拌阻燃沥青混合料的影响较大,需确定压实温度和温拌阻燃沥青混合料空隙率的相关关系,以此得到温拌阻燃沥青混合料最佳拌和温度和最佳压实温度。设置压实温度分别为 120、130、140、150、160 °C (每组混合料的拌和温度均比压实温度高 10 °C),掺加温拌剂和阻燃剂后分别拌和温拌阻燃沥青混合料,制备试件并测试空隙率,结果如图 2 所示。

由图 2 可知:温拌阻燃沥青混合料的空隙率随压实温度升高而减小;160 °C 压实普通热拌沥青混合料时,空隙率为 4.0%;拟合公式中,138 °C 下压实温拌阻燃沥青混合料时,空隙率为 4.0%,比普通热拌沥青混合料的压实温度低 22 °C。分析图 2 中空隙率与压实温度的关系,最佳压实温度为 140 °C,最佳拌和温度为 150 °C。

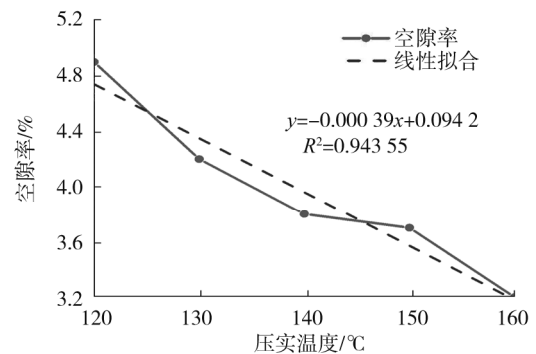


图 2 不同压实温度下的空隙率变化曲线

4 温拌阻燃沥青混合料性能试验及分析

4.1 试验设计

测试沥青混合料的路用性能时,按文献[20]中 T 0703 的要求成型马歇尔试件和车辙板试件,按 T 0719 方法测试高温稳定性,按文献[20]中 T 0715D 的方法测试低温稳定性,按文献[20]T 0709 和 T 0729 方法测试水稳定性,按文献[20]T 0739 的方法评价疲劳性能,采用应变控制方法,选用应变分别为 2×10^{-4} 、 4×10^{-4} 、 6×10^{-4} 。

燃烧试件,模拟车辆漏油或其他原因引发的道路火灾事故,评价沥青混合料的阻燃性能。试件在汽油中浸泡 10 s,点燃后测定燃烧时间,燃烧后把试件放在通风的地方,5 h 后测定试件的质量损失,测试车辙板的动稳定性。马歇尔试件的残留稳定度

$$M_{s0} = M_{s1} / M_s \times 100\%$$

式中: M_{s1} 为马歇尔试件燃烧后的稳定度, M_s 为马歇尔试件燃烧前的稳定度。

车辙板试件的残留稳定度

$$M_{sD} = M_{sD1} / M_{sD0} \times 100\%$$

式中: M_{sD1} 为车辙板燃烧后的动稳定度, M_{sD0} 为车辙板燃烧前的动稳定度。

4.2 路用性能试验结果

对各组试件进行车辙试验,温拌阻燃沥青混合料3组平行试件的动态稳定度分别为4 426、4 382、4 315次/mm,热拌SBS改性沥青混合料3组平行试件的动态稳定度分别为4 487、4 395、4 345次/mm。温拌阻燃沥青混合料的动态稳定度与热拌SBS改性沥青混合料之差小于1%,说明在沥青混合料中加入2种添加剂不会明显降低混合料的高温稳定性,2种添加剂对沥青混合料的高温性能影响较小。

分别对2种沥青混合料进行低温弯曲试验和水稳定性性能试验,结果如表9、10所示。

表9 2种沥青混合料低温弯曲试验结果

材料类型	抗弯拉强度/MPa	弯拉应变/ 10^{-3}	弯曲劲度模量/MPa
SBS改性沥青混合料	14.81	2.698	5 489
温拌阻燃沥青混合料	15.16	2.589	5 855

表10 2种沥青混合料的水稳定性性能试验结果

材料类型	30 min 稳定度/kN	48 h 稳定度/kN	残留稳定度/%	未冻融劈裂强度/MPa	冻融劈裂强度/MPa	劈裂强度比/%
SBS改性沥青混合料	13.51	12.58	93.1	1.59	1.38	86.8
温拌阻燃沥青混合料	14.34	13.75	95.9	1.75	1.55	88.6

注:劈裂强度比为冻融劈裂强度与未冻融劈裂强度之比。

由表9可知:加入2种添加剂对沥青混合料的低温性能无显著影响,低温弯拉应变小幅减小,抗弯拉强度小幅增大,弯曲劲度模量波动幅度较小。说明加入2种添加剂可在一定程度上改善沥青混合料的低温性能。

由表10可知:加入2种添加剂在一定程度上改善了温拌阻燃沥青混合料的水稳定性性能。相比于SBS改性沥青混合料,温拌阻燃沥青混合料的30 min、48 h稳定度指标均得到改善,残留稳定度提高3%。温拌阻燃沥青混合料的未冻融、冻融劈裂强度均高于SBS改性沥青混合料,前者的冻融劈裂强度比远超过规范要求(80%),比后者提高约2%。加入2种添加剂可提高沥青混合料的水稳定性,有利于温拌阻燃沥青混合料的抗水损坏性能。

4.3 疲劳性能

热拌SBS改性沥青混合料和温拌阻燃沥青混合料的疲劳性能试验结果如图3所示。

由图3可知:2种沥青混合料的疲劳寿命随应变的增大均缩短。同种应变下,热拌SBS改性沥青混合料的疲劳寿命更高,低应变水平下差距更明显,应变为 2×10^{-4} 水平下,温拌阻燃沥青混合料的疲劳寿命比热拌SBS改性沥青混合料高约2倍,说明加入温拌剂、阻燃剂可显著改善沥青混合料的疲劳耐久性能。

4.4 阻燃性能

分别对2种马歇尔试件和车辙板试件进行燃烧试验,测定燃烧时间,结果如图4所示。分别分析2种车辙和马歇尔试件燃烧试验后的质量损失,结果如图5所示。

由图4可知:温拌阻燃沥青混合料试件的燃烧时间明显缩短,仅有部分试件的燃烧用时比热拌SBS沥青混合料试件长。原因是部分试件浸润汽油时,因表面结构的特点吸附较多汽油,燃烧时间变长。马歇尔试件的燃烧用时约为20~40 s,明显低于热拌沥青混合料;温拌阻燃沥青混合料制备的车辙板试件的燃烧用时比热拌SBS改性沥青混合料试件缩短约60 s,说明前者的阻燃效果较好。试件的主要燃烧物质

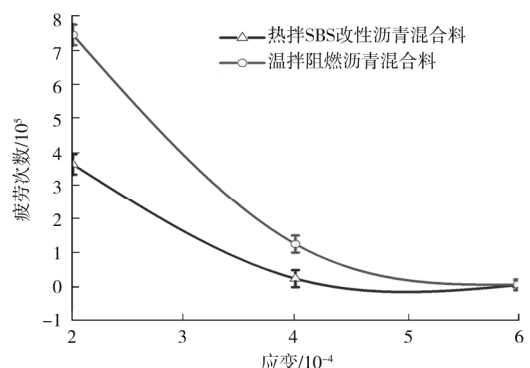


图3 疲劳试验结果

为汽油,阻燃剂混合在沥青内部,未暴露时不会影响燃烧时间。车辙板试件的体积比普通马歇尔试件大,附着更多汽油,燃烧时间明显延长。沥青成为燃烧主体时,阻燃剂释放,减缓、削弱了沥青燃烧过程。

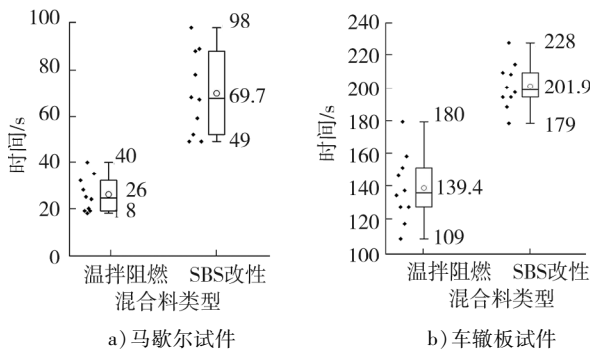


图4 燃烧试验测试结果

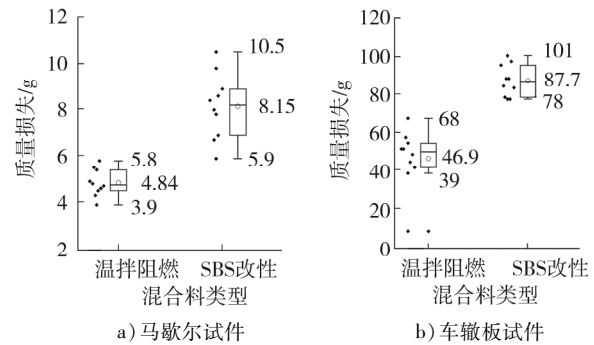


图5 质量损失试验结果

由图5可知:相比普通热拌SBS改性沥青试件,温拌阻燃沥青混合料制备的马歇尔、车辙板试件质量损失分别减少40.6%、46.6%。根据氧化分解反应机理,外侧沥青燃烧分解后,附着在沥青内部的阻燃剂释放,发挥阻燃作用,沥青材料本身的燃烧时间减少,试件的质量损失减小。实际隧道路面发生火灾时,沥青燃烧会产生大量的致癌气体,采用温拌阻燃沥青混合料可大大减少致癌气体的排放量,减轻隧道内路面发生火灾造成的生态危害。

分别计算车辙板试件和马歇尔试件燃烧试验后的稳定度变化,结果如表11所示。

表11 2种试件燃烧后稳定度变化结果

材料类型	马歇尔稳定度/kN		马歇尔试件 残留稳定度/ %	车辙板动稳定度/(次·mm ⁻¹)		车辙板试件 残留稳定度/ %
	未燃烧	燃烧后		未燃烧	燃烧后	
温拌阻燃沥青混合料	17.32	15.99	92.3	4 987	4 648	93.2
SBS改性沥青混合料	16.65	14.50	87.1	5 124	4 443	86.7

由表11可知:温拌阻燃沥青混合料制备的马歇尔试件、车辙板试件燃烧后残留稳定度比SBS改性沥青混合料分别提高5.2%、6.5%。说明加入2种添加剂未改变沥青混合料的高温性能,显著改善温拌阻燃沥青混合料的阻燃效果。

集料间相互接触形成的嵌挤结构决定材料的高温性能,燃烧过程不会对嵌挤作用产生影响,因此温拌阻燃沥青混合料的高温性能未受影响。但燃烧过程中沥青分解,黏结作用降低,试件的稳定度减小。加入温拌剂和阻燃剂可减缓沥青质量损失,汽油燃烧完全后,试件仍具有较高的残留稳定度,说明加入2种添加剂可显著改善温拌阻燃沥青混合料的阻燃性能。

5 结论

1) 基于正交设计,分析温拌剂、阻燃剂2种添加剂与沥青的质量比及拌和温度对沥青性能的影响,确定2种添加剂的最优质量比分别为0.06、0.11。

2) 通过配合比设计综合确定最佳油石比为4.6%,基于温度与沥青混合料空隙率的相关关系,确定最佳拌和温度为150℃,最佳压实温度为140℃。

3) 设计试验评价温拌阻燃沥青混合料的路用性能、耐久性能及阻燃性能,加入2种添加剂可显著提高温拌阻燃沥青混合料的水稳定性,高温及低温性能得到一定提升;各种加载条件下试件的疲劳寿命均远超过普通AC-13沥青混合料;通过多个指标参数分析沥青混合料的阻燃能力,表明加入添加剂可显著

改善温拌阻燃沥青混合料的阻燃性能。

参考文献:

- [1] 王大伟,罗根传,邓祥明,等. 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.
- [2] 刘岩,张富有. 浅谈高速公路隧道阻燃剂在沥青路面施工中的应用[J]. 公路,2020,65(12):199-200.
- [3] 冯伟伦. 温拌阻燃沥青混合料在隧道路面中的应用研究[D]. 西安:长安大学,2021.
- [4] 周志刚,周建雄,罗根传,等. 温拌阻燃沥青混凝土路面性能加速加载试验模拟分析[J]. 公路交通科技,2019,36(7):1-9.
- [5] CHEN R, ZHAO R K, LIU Y, et al. Development of eco-friendly fire-retarded warm-mix epoxy asphalt binders using reactive polymeric flame retardants for road tunnel pavements [J]. Construction and Building Materials, 2021, 284(2):122752.
- [6] 丁佳琪,薛永兵,刘振民,等. 环保型沥青研究进展[J]. 化工进展,2021,40(增刊2):226-231.
- [7] LI R X, ZHANG K W, WU J H, et al. Performance of warm-mixed flame retardant modified asphalt binder[J]. Applied Sciences,2019,9(7):1491. DOI:10.3390/app9071491.
- [8] HOU X, HETTIARACHCHI C, XIAO F, et al. Blending efficiency improvement and energy investigation of recycled asphalt mixture involved warm mix technology[J]. Journal of Cleaner Production, 2020:123732.
- [9] ALIMOHAMMADIH A. Field and simulated rutting behavior of hot mix and warm mix asphalt overlays[J]. Construction and Building Materials, 2020,265:120366.
- [10] LI X, ZHOU Z, DENG X, et al. Flame resistance of asphalt mixtures with flame retardants through a comprehensive testing program[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(4):04016266. 1-04016266. 9.
- [11] 牛茺昌,刘安刚,刘青海,等. 基于表面能理论的温拌抑烟阻燃改性沥青混合料水稳定性研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2022,46(4):729-733.
- [12] 申爱琴,苏宇轩,杨小龙,等. ATH/MMT 阻燃剂对沥青混合料性能的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版),2020,40(2):1-9.
- [13] 龙云霄,陈辉强,文中秋,等. 基于表面改性的温拌阻燃沥青的制备及性能研究[J]. 公路,2021,66(10):296-301.
- [14] 乔建刚,李维东,郭蕊,等. 温拌阻燃沥青混合料阻燃效果评价[J]. 安全与环境学报,2021,21(1):139-146.
- [15] 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.
- [16] 王春,郝培文,徐婷,等. Sasobit 对沥青混合料阻燃性能的影响[J]. 武汉理工大学学报,2012,34(8):55-60.
- [17] 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.
- [18] 王朝辉,蒋婷婷,贺海,等. 温拌阻燃 OGFC 沥青混合料功能研究[J]. 材料导报,2015,29(4):122-128.
- [19] 中华人民共和国交通运输部,交通部公路科学研究所. 公路沥青路面施工技术规范:JTG F40—2004[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [20] 中华人民共和国交通运输部,交通运输部公路科学研究院. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTG E20—2011[S]. 北京:人民交通出版社,2011.

Optimization design and performance evaluation of flame-retardant warm-mix asphalt mixture

YANG Rui¹, ZHOU Qiwei², WANG Lei³, YUAN Mingyuan²

1. Department of Civil Engineering, Anhui Communications Vocational and Technical College, Hefei 230000, China;

2. China Merchants Chongqing Communications Technology Research and Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400000, China;

3. Anhui Traffic Control Road Maintenance Co., Ltd., Hefei 230000, China

Abstract: To develop asphalt mixtures with good flame-retardant performance for tunnel pavement, an orthogonal

(下转第123页)