

文章编号:1007-9629(2021)01-0153-08

自研环保无机硅胶温拌剂的综合性能鉴评

罗浩原^{1,2}, 邱延峻^{1,2}, 赵碧云³, 苏 婷^{1,2}, 郑鹏飞^{1,2}

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 道路工程四川省重点实验室, 四川 成都 610031;
3. 云南省生态环境科学研究院, 云南 昆明 650034)

摘要: 研发了一种应用于寒冷低温地区以无机硅胶作为主要成分的新型温拌剂 Siligate. 为探明该温拌剂对沥青性能的影响, 选用苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)改性沥青, 并引入中国应用较广的 2 种温拌剂 Sasobit 与 Evotherm M1 进行对比, 采用旋转平板黏度试验、双边缺口拉伸试验、低温临界开裂温度(T_{cr})计算、环境排放物定量测试, 对温拌剂的降黏、抗疲劳改性、抗低温开裂改性、减排效果展开分析. 结果表明: 6% 的 Siligate、3% 的 Sasobit 和 0.8% 的 Evotherm M1 具备相似的降温效果, 均降低拌和温度 13 °C, 降低压实温度 14 °C; 以上掺量作为对比基准, Siligate 可使沥青胶结料的低温临界开裂温度 T_{cr} 显著降低, 起到优化低温抗裂性能的作用, 这是传统温拌剂所不具备的; Siligate 还起到了改善沥青抗疲劳性能, 降低碳基化合物排放的效果.

关键词: 沥青胶结料; 温拌剂; 寒冷地区; 低温抗裂性; 节能减排; 疲劳性能

中图分类号: U414

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.01.021

Comprehensive Performance Evaluation of a Novel Self-developed Inorganic Silica Gel Warm-Mix Additive

LUO Haoyuan^{1,2}, QIU Yanjun^{1,2}, ZHAO Biyun³, SU Ting^{1,2}, ZHENG Pengfei^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Key Laboratory of Highway Engineering of Sichuan Province, Chengdu 610031, China;

3. Yunnan Research Academy of Eco-environmental Science, Kunming 650034, China)

Abstract: A novel warm-mix additive-Siligate with inorganic silica gel as the main ingredient was developed specifically for cold areas. In order to investigate the influence of this warm-mix additive on asphalts, styrene-butadiene-styrene triblock copolymer(SBS) modified asphalt was selected as the test asphalt. Two kinds of warm-mix additives that have been widely used in China, Sasobit and Evotherm M1, were used as the comparison. Rotational plate viscosity test, double edge notched tension test, calculation of critical cracking temperature at low temperature(T_{cr}), quantitative test of characteristic environmental emissions were respectively used to test the changes of construction temperature, fatigue resistance, low-temperature crack resistance and characteristic emissions during mix of SBS-modified asphalt. The results show that 6% Siligate, 3% Sasobit and 0.8% Evotherm M1 have similar effect in construction temperature decreasing, which can effectively reduce the mixing temperature of asphalt by 13 °C and the compaction temperature by 14 °C. Based on above dosage, Siligate can significantly reduce the critical cracking temperature at low temperature(T_{cr}) and optimize the low temperature performance of asphalt, which are not available in traditional products. In addition, Siligate can also improve the fatigue resistance of asphalt and significant-

收稿日期:2019-08-14; 修订日期:2019-09-29

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51778541),中央高校基本科研业务费专项资金(2682019ZT05)

第一作者:罗浩原(1994—),男,云南曲靖人,西南交通大学硕士生. E-mail:lhy19940517@vip.qq.com

通讯作者:邱延峻(1966—),男,浙江衢州人,西南交通大学教授,博士生导师,博士. E-mail:publicqiu@vip.163.com

ly reduce the emissions of carbon-based compounds.

Key words: asphalt binder; warm-mix additive; cold region; low-temperature crack resistance; energy conservation and emission reduction; fatigue performance

根据《国家公路网规划(2013年—2030年)》,从现在起到2030年,还有 2.6×10^4 km国家高速公路亟待修建,这部分高速公路多集中在中国的川西高原、青藏高原等“三区三州”地区,这些地区全年平均气温低、自然生态环境敏感,极大地限制了沥青公路的铺筑速度,而添加沥青温拌剂成为解决上述问题行之有效的办法。以刚竣工的雅康(雅安—康定)高速公路为例,该公路需要穿越的二郎山脉,全年有至少150 d的平均气温低于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,而其中的二郎山国家森林公园更是大熊猫的重要保护基地之一,对施工过程的环境影响要求极其严苛^[1]。因此,美德维实伟克公司生产的Evotherm M1表面活性型温拌剂被应用于该工程,该温拌剂能使沥青混合料的拌和温度降低 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,并能有效控制环境温度在 $0\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内的路面铺筑质量。但Evotherm M1在降低施工温度的同时会显著降低混合料的低温抗裂性能,与目标服役环境的要求不符^[2-3]。通过调研和测试可知,在现在中国应用较为广泛的温拌剂中,以Sasobit(南非产)、Licomont BS(德国产)和EC-120(中国产)为代表的有机降黏型温拌剂主要是利用其主要成分直链脂肪族碳氢化合物受热熔化起物理润滑作用,但这些蜡类似物的存在会显著降低沥青的低温韧性^[4-5];以WAM-Foam(英国产)和Asphalt min(德国产)为代表的发泡降黏型温拌剂主要是通过化学反应时释放结晶水引起沥青体积膨胀而达到化学降黏的效果,但发泡引入的空隙和水分会显著影响沥青的性能^[6-7];以Evotherm(美国)公司旗下DAT、M1、ET为代表的表面活性型温拌剂主要通过改变沥青质分子的表面张力起到化学润滑的作用,但这种分子间的作用力改变几乎是永久的,也会影响沥青的低温性能^[7-9]。现阶段几乎所有的商业温拌剂产品都会对沥青的低温性能造成裂化效果。

为了满足温拌剂在低温和环境敏感情况下的应用要求,本研究团队研发了1种以无机硅胶为主要成分的三组分新型温拌剂,利用旋转平板黏度测试方法(RPV)^[10]、基于温度应力的沥青低温临界开裂温度 T_{cr} 计算方法^[11]、双边缺口拉伸试验(DENT)^[12]和室内拌和过程中的环境气体排放检测^[13],对添加新型

温拌剂前后沥青的拌和温度与压实温度、低温性能、疲劳性能和7种特征环境排放物的排放变化进行了分析,以期为中国路面材料及其性能评价方法的完善提供参考。

1 原材料及试验方法

1.1 Siligate 温拌剂

Siligate温拌剂是本团队自主研发的以无机硅胶为主要基材的三组分复合配方温拌剂,外观为半透明流体。其降黏原理为硅胶小分子的物理润滑,密度约为 1.1 g/cm^3 ,建议掺量¹⁾为沥青质量的 $5\%\sim 7\%$,本研究使用掺量为 6% 。Siligate温拌剂可在沥青加热过程中(温度约为软化点以上 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$)直接添加,缓慢搅拌混合均匀,避免引入气泡。Siligate温拌剂利用了无机硅胶(组分A)敏感性弱、低温韧性好的优点对沥青进行改性,活化剂(组分B)来提高Siligate温拌沥青对于集料的黏附性,溶剂(组分C)来提高组分A和沥青的拌和性。Siligate温拌剂主要定位为1种可在降低施工温度的同时,优化沥青胶结料低温抗裂性能的新型环保温拌剂。

1.2 其他试验材料

本研究除了对自研Siligate温拌剂进行测试,还选用了2种在中国应用广泛的温拌剂产品Evotherm M1(简称M1)和Sasobit进行对照。M1温拌剂为表面活性型温拌剂,为暗黄色油状流体,具有刺激性氨味。其密度约为 0.96 g/cm^3 ,建议掺量为沥青质量的 $0.5\%\sim 1.0\%$ ^[3],本研究使用掺量为 0.8% 。Sasobit温拌剂为有机降黏型温拌剂,为白色颗粒状物质。其熔点 $115\text{ }^{\circ}\text{C}$,闪点 $286\text{ }^{\circ}\text{C}$,密度 0.90 g/cm^3 ,建议掺量为沥青质量的 $2\%\sim 5\%$ ^[4],本研究使用掺量为 3% 。

沥青采用茂名苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)改性沥青,分别加入 6% Siligate、 0.8% M1、 3% Sasobit来配置沥青胶结料,其主要技术指标如表1所示。

混合料采用SMA-13级配,设计级配如表2所示,油石比采用 5.8% ,集料采用玄武岩碎石,填料采用矿粉。

1)文中涉及的掺量、比值等除特别说明外均为质量分数或质量比。

表 1 沥青胶结料的主要技术指标
Table 1 Basic performance index of asphalt binders

Index	Asphalt binder				Requirement	Method
	SBS	SBS+6%Siligate	SBS+0.8%M1	SBS+3%Sasobit		
Penetration(25℃)/(0.1mm)	61	62	63	36	60-80	T0604
Softening point/℃	79	74	77	93	≥55	T0606
Ductility(5℃)/cm	33	31	35	17	≥20	T0605
Flash point/℃	321	329	321	340	≥230	T0611
Elastic recovery(25℃)/%	95	97	96	65	≥90	T0662
Performance grade(PG)/℃	82-22	82-22	82-22	94-16		AASHTO M320-05
PG at mid-temperature/℃	22	19	22	25		AASHTO M320-05

表 2 SMA-13 沥青混合料设计级配
Table 2 Gradation of SMA-13 asphalt mixture

Sieve size/mm	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
Passing ratio(by mass)/%	100.0	97.2	58.0	27.2	22.7	19.4	17.2	14.1	12.0	9.8

1.3 旋转平板黏度(RPV)测试

传统沥青施工温度估计方法一般采用布氏旋转黏度计对沥青的 135、165、175℃黏度进行测试并绘制黏温曲线,而后以黏温曲线上黏度范围 0.31~0.25 Pa·s 对应的温度范围为混合料的压实温度,以黏度范围 0.19~0.15 Pa·s 对应的温度范围为混合料的拌和温度.但是部分研究中指出,由于布氏旋转黏度测试过程中使用的剪切速率不可控,因此对温拌剂的降黏效果存在捕捉不明显、测试效率较低的问题^[14].基于以上问题,本研究团队提出了基于动态剪切流变仪的旋转平板黏度(RPV)测试方法来替代布氏旋转黏度测试作为沥青混合料施工温度确定的方法,该方法得益于动态剪切流变仪(DSR)可以在黏温曲线的扫描测试中主动控制加载所使用的应变和剪切速率,从而快速准确地计算出其施工温度范围.在之前研究中已经对该黏度测试及施工温度确定方法进行了完整的介绍^[10],在此不予赘述.

1.4 低温临界开裂温度 T_{cr} 计算

由于温拌剂具备拓展沥青路面可施工温度范围的功效,未来温拌剂的应用环境多为冬季低温地区,因此,温拌剂对沥青低温造成的影响显得尤为重要.现阶段中国规范多采用低温针入度、低温延度和当量脆点等指标来评价沥青的低温性能,但这些评价指标多具有经验性,与实际沥青混合料的低温路用性能关联度较小^[15].美国战略公路计划(SHRP)提出的低温 PG 分级,每 6℃才进行 1 次等级划分,其划分跨度太大.Qiu 等^[16]的研究也说明:采用 PG 分级对相似沥青,尤其是改性沥青的低温性能进行判

断时,其分辨精度很差.

本研究采用低温临界开裂温度 T_{cr} 作为评估温拌剂对沥青低温性能影响的指标^[17]. T_{cr} 依托弯曲梁流变测试(BBR)获得的劲度模量数据即可确定.Shenoy^[18]研究证明, T_{cr} 计算理论作为一种无强度试验理论,其计算结果与直接拉伸试验(DTT)结果具有良好的相关性. T_{cr} 越小,证明沥青可以在更低的环境温度中服役而不会由于自身低温应力而开裂,即低温抗裂性能越好. T_{cr} 涉及的试验过程十分简单,但是对于求解 T_{cr} 所需的温度应力计算过程比较复杂.在本团队之前的研究^[11]中,已经形成了一套完善的针对温拌沥青温度应力及 T_{cr} 的计算流程,在此就不予详细介绍了.

1.5 双边缺口拉伸试验(DENT)

同低温分级类似,PG 中温分级也是 SHRP 提出用于评价沥青中温疲劳性能的手段,但是其按照失效温度 3℃梯度进行定级,同样存在范围过大,定级笼统的问题,很难对相似沥青的疲劳性能做出更精细化的鉴别^[19].双边拉伸缺口试验(DENT)是由加拿大女皇大学引入,用于评价沥青胶结料中温疲劳性能的测试方法^[20],本研究团队在此基础上提出采用临界裂纹尖端位移(CTOD)作为沥青疲劳性能的评价指标,CTOD 值越大,说明沥青能承受的疲劳荷载越大,也就意味着该沥青的疲劳性能越好.DENT 方法依靠测力延度仪和自制的硅胶模具就可以实现对沥青胶结料疲劳性能的测试,且疲劳评价指标 CTOD 是建立在断裂功基础上计算得到的,不受试件尺寸的影响.与疲劳因子($G^* \cdot \sin \delta$)相比,CTOD 表征的沥青胶结料疲劳

性能与对应沥青混合料的疲劳性能测试(四点弯曲疲劳试验)的相关性更好,且对于相似沥青疲劳性能鉴别的精确度更高,对于 DENT 试验及 CTOD 值的计算方法也在本研究团队的前序研究^[12]中进行了详细的介绍。

1.6 室内拌和过程中的环境排放物检测

为了量化温拌剂的减排效果,本研究在相同的实验室拌和条件下(即室温 20℃、相对湿度 60%的情况下,采用 20 L 沥青自动拌和锅来拌和

10 kg 沥青混合料),收集拌和锅顶部唯一通风口处的气体用于气体成分的定量测试。对比了添加温拌剂前后沥青混合料拌和过程中 CO₂、CO、SO₂、NO_x、PM_{2.5}、PM₁₀、苯 a 芘(BaP)共计 7 种特征排放物^[21]的排放情况。配置混合料采用的级配和油石比见 1.2 节。试验中的变量仅为温拌剂种类及其对应的拌和与压实温度,其计算过程将在 2.1 节中进行介绍。7 种特征排放物的测定方法和参考标准见表 3。

表 3 7 种废弃物及其检测方法
Table 3 Seven kinds of wastes and their detection methods

Waste	Detection method	Standard	Test equipment
CO	Non spectral infrared analysis	GB/T 18204.2—2014(3.1)	GXH-3011A CO infrared analyzer
CO ₂	Non spectral infrared analysis	GB/T 18204.2—2014(4.1)	GXH-3010E CO ₂ infrared analyzer
SO ₂	Spectrophotometric determination of para rosaniline hydrochloride by formaldehyde absorption	HJ 482—2009	7230G visible spectrophotometer
NO _x	N-(1-naphthyl) ethylene diamine dihydrochloride spectrophotometric method	HJ 479—2009	7230G visible spectrophotometer
PM ₁₀	Light scattering method	GB/T 18204.2—2014(5.2)	LD-5C(b) laser dust meter
PM _{2.5}	Light scattering method	GB/T 18204.2—2014(6)	LD-5C(b) laser dust meter
BaP	High performance liquid chromatography method	HJ 956—2018	High performance liquid chromatograph

测试项目中 CO、SO₂、NO_x、PM_{2.5}、PM₁₀ 是大气中主要的特征污染物,其中 CO₂ 是造成温室效应的重要原因;SO₂、NO_x 是酸雨的主要成因;PM_{2.5} 和 PM₁₀ 是雾霾的主要成分;BaP 是沥青烟的主要成分,为一级致癌物,严重威胁沥青混合料生产和路面施工从业人员的身体健康^[22]。

2 试验结果与分析

2.1 降温效果对比

通过 RPV 方法对 4 种沥青胶结料进行黏度测试,获得半对数坐标系中 10℃ 升温梯度下 4 种沥青胶结料的黏温曲线如图 1 所示。参照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》进行计算,其沥青的黏温曲线在半对数坐标系上可视为 1 条直线(即在半对数坐标系中符合 $y=A \cdot e^{Bx}$ 的拟合形式);利用 4 条黏温曲线计算得到的拌和温度、压实温度结果如表 4 所示,具体分析如下:

3 种温拌剂在选用掺量下均具有相似的降温效果,这是进行后续性能比较的基础。由于采用温拌剂的首要任务是降低沥青混合料的施工温度,因此,在对比不同温拌剂对沥青其他性能的影响程度时,先决条件是这几种温拌剂在其掺量下具有相似的降温效果。0.8% M1、3% Sasobit 和 6% Siligate 均可使沥青混合料拌和温度降低 13℃ 左右,压实温度降低

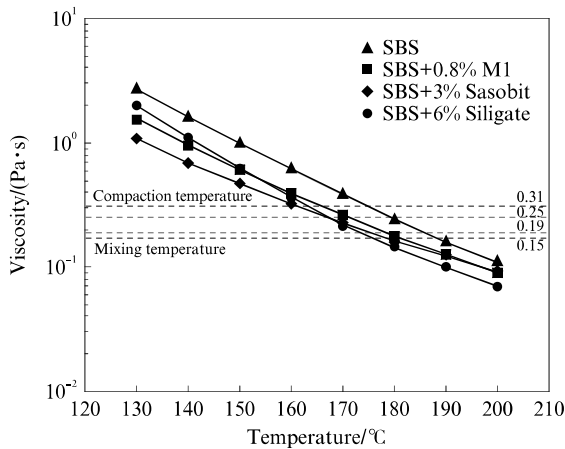


图 1 4 种沥青胶结料的黏温曲线
Fig. 1 Viscosity-temperature curves of four kinds of asphalt binders

14℃ 左右。因此,后续的性能测试均建立在此掺量上进行对比。

这里需要说明的是,由于 SBS 改性沥青本身是一种高黏沥青,相同掺量的温拌剂对其拌和与压实温度(统称“施工温度”)的降低效果会显著弱于普通基质沥青。例如:3% Sasobit 可以使 70# 基质沥青的施工温度下降 25℃ 左右^[23-24],而本文中对 SBS 改性沥青仅能降低 14℃。但是一味追求降低施工温度而不考虑温拌剂带来的性能影响,也是不符合应用

表 4 基于 RPV 方法的 4 种沥青胶结料黏温曲线测试结果
Table 4 Test results for four asphalt binders viscosity-temperature curves based on RPV

Asphalt binder	Fitting formula	R^2	Mixing temperature			Compaction temperature		
			Temperature range/℃	Median/℃	Temperature drop/℃	Temperature range/℃	Median/℃	Temperature drop/℃
SBS	$y=990.26e^{-0.046x}$	0.998	187-192	189		176-181	179	
SBS+0.8%M1	$y=886.99e^{-0.048x}$	0.996	174-180	177	12	163-169	166	13
SBS+3% Sasobit	$y=272.83e^{-0.041x}$	0.990	173-178	175	14	163-168	165	14
SBS+6% Siligate	$y=91.132e^{-0.035x}$	0.995	173-181	176	13	161-167	164	15

实际的.例如:若需使 SBS 改性沥青的拌和温度下降 25℃,则 Sasobit 的掺量将到达 9%,这将使沥青低温 PG 分级降低 2 级,完全改变了沥青胶结料的品质,也会严重超出工程成本,并不符合生产实际.因此,本文采用了上述 3 个掺量以求达到相似的降黏效果,作为其他性能对比的边界条件,又不至于采用过大的温拌剂掺量而导致沥青胶结料的性能受到严重影响,失去对比意义.

Siligate 和传统 M1 与 Sasobit 温拌剂的黏温曲线特征存在显著区别.由图 1 可知,传统温拌剂 M1 与 Sasobit 大幅降低了 130~150℃范围内的沥青黏度,但在温度升高后(>150℃),降黏效果变弱.与传统 2 种温拌剂不同,在温度较低时(130~150℃),Siligate 温拌剂并没有表现出优秀的降黏效果,而随着温度升高(>150℃),降黏效果越发显著.原因主要为: Sasobit 温拌剂的熔点约为 120~140℃,其通过自身熔化起到润滑作用,因此,降黏效果显著的温度区间在其熔点附近^[25];而 M1 温拌剂的本质为季铵盐表面活性剂,其发挥降黏效果的机理是其中含有的酰胺键在 130℃附近电离出季铵盐阳离子,起降低沥青质分子表面能的作用^[26],因此二者在 120~140℃下的降黏效果显著.

2.2 低温临界开裂温度对比

参照 1.4 节中低温应力与低温临界开裂温度的计算方法,对 4 种沥青进行分析,假定温度应力计算的起始温度为 10℃,终止温度为-40℃,降温速率为 2℃/h,计算得到沥青胶结料低温应力 σ 的变化曲线和低温临界开裂温度 T_{cr} ,见图 2 和表 5.进一步地,采用 p 值检验法对原始 SBS 改性沥青和各个温拌 SBS 改性沥青低温应力的差异性进行了检验.若 p 值小于 0.05,则可认为该温拌剂对沥青在低温连续降温环境中的应力积累总量造成了显著的影响.同时,也采用 p 值检验法对温拌剂添加前后 T_{cr} 的差异性进行了检验,若 p 值小于 0.05,则可以认为该温拌剂对沥青的 T_{cr} 造成了显著的影响. p 值变化曲线见图 2.

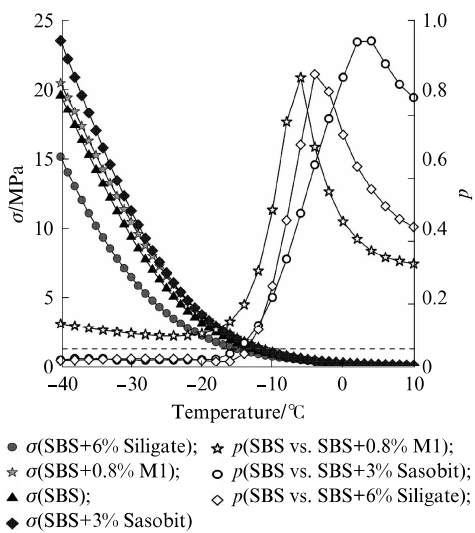


图 2 沥青胶结料的低温应力 σ 及其 p 值的变化曲线
Fig. 2 Variation curves low temperature stress and p -value of asphalt binders

表 5 沥青胶结料的低温临界开裂温度
Table 5 Low temperature critical cracking temperature of asphalt binders

Asphalt binder	PG	$T_{cr}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{cr}/^{\circ}\text{C}$	p
SBS	82-22	-21.79		
SBS+0.8%M1	82-22	-21.50	0.29	0.250 000
SBS+3% Sasobit	94-16	-19.56	2.23	0.000 023
SBS+6% Siligate	82-22	-23.89	-2.10	0.000 180

通过 T_{cr} 可以对沥青胶结料的低温抗裂性能作出明确划分,即 $\text{SBS}+6\% \text{ Siligate} > \text{SBS} > \text{SBS}+0.8\% \text{ M1} > \text{SBS}+3\% \text{ Sasobit}$.图 2 的低温应力曲线显示,当温度还未降至-10℃以下时,各个沥青内部的应力积累缓慢且总量不大,SBS 改性沥青与任意温拌沥青间低温应力的 p 值也均大于 0.05,可认为在统计上没有差异.当温度降至-10℃以下时,温拌剂对沥青胶结料低温应力积累总量的影响逐渐显现,其中只有 $\text{SBS}+6\% \text{ Siligate}$ 的低温应力曲线的位置是低于原始 SBS 改性沥青的,说明新型温拌剂对沥青胶结料在连续降温过程中低温应力积累总量起到了松弛效果,从而降低了沥青胶结料的 T_{cr} ,

起到了优化了沥青低温抗裂性能的作用,这是其余 2 种温拌剂所不具备的性能特点,也是 Siligate 适用于低温环境的关键. 与 Siligate 相反,Sasobit 则显著增加了 SBS 改性沥青在连续降温过程中的低温应力积累总量,劣化了沥青的低温抗裂性能. 温拌剂 M1 则在整个温度变化范围内对于 SBS 改性沥青的低温应力都不存在统计意义上的影响($p>0.05$),表明该温拌剂对沥青的低温抗裂性能影响不大.

2.3 疲劳性能对比

4 种沥青胶结料的 CTOD 值测试结果如图 3 所示. CTOD 越大,证明沥青胶结料的疲劳性能越好. 因此,沥青胶结料的疲劳性能排序为 $SBS+6\%Siligate>SBS+0.8\%M1>SBS>SBS+3\%Sasobit$;显然,温拌剂 M1 和 Siligate 都具备能够优化沥青疲劳性能的能力,相较原始沥青,这二者的 CTOD 值分别提升了约 35%和 60%,自研的 Siligate 温拌剂表现更为出色. 而 $SBS+3\%Sasobit$ 的 CTOD 值是唯一小于原始 SBS 改性沥青的(CTOD 值下降了 60%),证明其劣化了原始沥青的疲劳性能,在这一点上,由 CTOD 得出的结论同 PG 中温分级一致. 但是,在 PG 中温分级的判断下, $SBS+0.8\%M1$ 和 SBS 也是同一疲劳性能分级,CTOD 给出的结果则证明添加温拌剂 M1 后,SBS 改性沥青的疲劳性能有所提高. 这是由于 PG 中温分级笼统的划分机制,

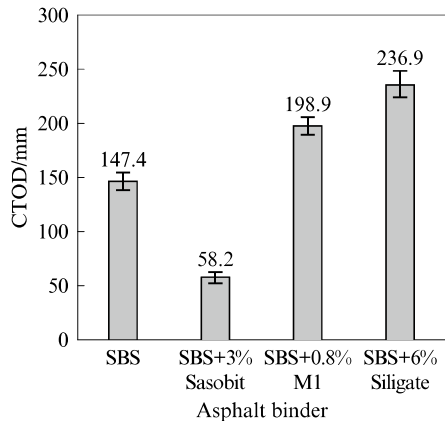


图 3 4 种沥青胶结料的 CTOD 值
Fig. 3 CTOD values of 4 kinds of asphalt binders

对于相似沥青疲劳性能的鉴别精度有限造成的.

2.4 环境排放物对比

4 种沥青混合料在拌和过程中产生的 7 种特征环境排放物的定量检测结果如表 6 所示. 显然,无论添加哪一种温拌剂都可以降低沥青混合料的拌和温度,而拌和温度的下降则进一步导致排放物的产生放缓. 值得注意的是,添加 3 种温拌剂后, CO_2 、 CO 、 SO_2 、 NO_x 和 BaP 的排放量下降比较明显,但 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的排放量几乎没有变化,这主要是由于这 2 种物质主要是拌和过程中扬起的细小粉尘颗粒,而与拌和温度的高低没有关联.

表 6 7 种废弃物排放量的变化关系
Table 6 Change relation of 7 kinds of emission materials

Emission	Emission concentration				Changes in the concentration of emissions/%			
	Unit	SBS	SBS+0.8%M1	SBS+3%Sasobit	SBS+6%Siligat	SBS+0.8%M1	SBS+3%Sasobit	SBS+6%Siligate
CO	$mg \cdot m^{-3}$	94.000	23.500	28.900	16.300	75.000	69.200	82.600
CO ₂	%	0.094	0.059	0.057	0.041	37.200	39.400	56.400
SO ₂	$mg \cdot m^{-3}$	21.200	6.100	5.600	10.900	71.200	73.500	48.500
NO _x	$mg \cdot m^{-3}$	0.093	0.059	0.024	0.028	36.600	74.100	69.900
PM _{2.5}	$\mu g \cdot m^{-3}$	1.045	1.011	1.007	1.012	3.250	3.640	3.160
PM ₁₀	$\mu g \cdot m^{-3}$	1.012	1.101	0.999	1.013	-8.790	1.280	-0.001
BaP	$\mu g \cdot m^{-3}$	1.410	0.470	0.410	0.280	66.700	70.900	80.100

由于 Siligate 不是碳基化合物,因此,其在 CO_2 、 CO 和 BaP 的减排方面表现最佳,可以有效降低 CO_2 排放量 50%以上,降低 CO 排放量 82%,降低 BaP 排放量 80%,但是对于 SO_2 的降低程度则不如其他 2 种温拌剂. 而温拌剂 M1 的主要成分是季铵盐表面活性剂,其中富有较多 NH_4^+ ,容易在高温下转化为氮氧化合物^[26],因此该温拌剂在 NO_x 减排上的效果略弱. 值得强调的是,对于一级致癌物质 BaP,虽然在添加温拌剂后,其排放量已经得到显著控制,但是仍然超出致癌浓度($12.7\text{ ng}/\text{m}^3$)多倍^[22]. 而通过排放物测

试监测数据显示,不添加温拌剂的 SBS 改性沥青混合料在制备时,BaP 排放量超出允许值 111 倍;对于 BaP 减排效果最好的 Siligate 温拌剂,其 BaP 排放量仍然超出允许值 23 倍.

3 结论

(1)本研究介绍了一种以无机硅胶为主要成分的三组分新型沥青温拌剂 Siligate,定位于低温寒冷地区的道路铺筑. 研究发现 6%的 Siligate 温拌剂,0.8%的 Evotherm M1 温拌剂和 3%的 Sasobit 温

拌剂对选用的 SBS 改性沥青具有相似的降温效果,可以使沥青混合料的拌和温度降低 13 ℃ 左右,压实温度降低 14 ℃ 左右。

(2) Siligate 温拌剂可以使 SBS 改性沥青的低温应力积累总量和低温临界开裂温度 T_{cr} 显著降低,起到优化沥青低温抗裂性能的作用,这是同类产品所不具备的;对比产品中, Sasobit 会显著劣化沥青的低温抗裂性能,而 Evotherm M1 对该性能无明显的改变。

(3) 添加 Siligate 温拌剂后, SBS 改性沥青的在常温下抗疲劳断裂的能力也有所提升; Siligate 温拌剂还能显著降低拌和过程中碳基化合物的排放。相较于热拌沥青, Siligate 温拌剂可使 CO_2 排放量降低 50% 以上, CO 排放量降低 82%, BaP 排放量降低 80%, 在 3 种温拌剂中表现最佳。

(4) Siligate 温拌剂可以优化沥青胶结料低温抗裂性, 常温抗疲劳性能, 减少废弃物排放量, 尤其适用于冬季低温和环境敏感的高原、高海拔地区的路面温拌铺筑工程。

参考文献:

- [1] 张堂仁, 陈彬. 川藏高速泸康段复杂地形地质条件山区高速公路总体设计[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018, 14(3): 28-32.
ZHANG Tangren, CHEN Bin. Overall design of expressway in mountainous area with complex topography and geological conditions in Lukang section of Sichuan-Tibet expressway[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development(Applied Technology Edition), 2018, 14(3): 28-32. (in Chinese)
- [2] 袁飞云, 徐加秋, 阳恩慧. 温拌剂种类及掺量对沥青性能的影响研究[J]. 中外公路, 2018, 38(5): 173-177.
YUAN Feiyun, XU Jiaqiu, YANG Enhui. Study on the effect of warm mixing agent type and dosage on asphalt performance[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2018, 38(5): 173-177. (in Chinese)
- [3] 张镇, 刘黎萍, 汤文. Evotherm 温拌沥青混合料性能研究[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(4): 438-441.
ZHANG Zhen, LIU Liping, TANG Wen. Research on performance of evotherm warm-mix asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(4): 438-441. (in Chinese)
- [4] 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.
WANG Dawei, LUO Genchuan, DENG Xiangming, et al. 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. (in Chinese)
- [5] 王朝辉, 陈姣, 侯明业. 道路常用温拌改性剂现状与路用性能评价[J]. 材料导报, 2016, 30(7): 102-108, 137.
WANG Chaohui, CHEN Jiao, HOU Mingye. Status and performance evaluation of common warm mix modifier in road[J]. Materials Review, 2016, 30(7): 102-108, 137. (in Chinese)
- [6] KHERADMAND B, MUNIANDY R, LAW T H, et al. An overview of the emerging warm mix asphalt technology[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2014, 15(1): 79-94.
- [7] YU H Y, LENG Z, XIAO F P, et al. Rheological and chemical characteristics of rubberized binders with non-foaming warm mix additives[J]. Construction and Building Materials, 2016, 111: 671-678.
- [8] GUO N S, YOU Z P, ZHAO Y H, et al. Laboratory performance of warm mix asphalt containing recycled asphalt mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2014, 64: 141-149.
- [9] 郭乃胜, 尤占平, 赵颖华, 等. 考虑再生剂作用的温拌再生沥青混合料路用性能[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(4): 674-681.
GUO Naisheng, YOU Zhanping, ZHAO Yinghua, et al. Performance of warm mix asphalt with recycled asphalt mixtures considering the effect of rejuvenating agent[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(4): 674-681. (in Chinese)
- [10] 罗浩原, 欧阳铨霏, 徐加秋, 等. 一种 SBS 改性沥青黏度测试新方法——旋转平板黏度法[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(3): 724-732.
LUO Haoyuan, OUYANG Chengfei, XU Jiaqiu, et al. A new method to measure viscosity of SBS-modified asphalt—Rotational plate viscosity test[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(3): 724-732. (in Chinese)
- [11] 徐加秋, 阳恩慧, 罗浩原, 等. 基于温度应力计算的温拌沥青低温力学性能研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(1): 70-76.
XU Jiaqiu, YANG Enhui, LUO Haoyuan, et al. Mechanical properties of warm mix asphalt at low temperature based on thermal stress calculations[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1): 70-76. (in Chinese)
- [12] 罗浩原, 欧阳铨霏, 冷慧康, 等. 基于临界裂纹尖端位移的沥青抗疲劳性能评价[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(4): 969-977.
LUO Haoyuan, OUYANG Chengfei, LENG Huikang, et al. Fatigue performance evaluation of asphalt binder based on crack tip opening displacement[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(4): 969-977. (in Chinese)
- [13] 李君强, 王立志, 徐强. 温拌沥青混合料施工质量与减排效果测试分析[J]. 山东建筑大学学报, 2014, 29(3): 246-249.
LI Junqiang, WANG Lizhi, XU Qiang. Analysis of construction quality and emission reduction of warm mix asphalt[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2014, 29(3): 246-249. (in Chinese)
- [14] 张争奇, 李宁利, 陈华鑫. 改性沥青混合料拌和与压实温度确定方法[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(2): 36-40.
ZHANG Zhengqi, LI Ningli, CHEN Huaxin. Determining method of mixing and compaction temperatures for modified asphalt mixture[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(2): 36-40. (in Chinese)

- [15] 詹小丽,张肖宁,谭忆秋,等.改性沥青低温性能评价指标研究[J].公路交通科技,2007,24(9):42-45.
ZHAN Xiaoli, ZHANG Xiaoning, TAN Yiqiu, et al. Study on evaluation index of low temperature performance of modified asphalt[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(9): 42-45. (in Chinese)
- [16] QIU Y J, DING H B, RAHMAN A, et al. Application of dispersant to slow down physical hardening process in asphalt binder[J]. Materials and Structures, 2019, 52(1): 9.
- [17] 陈兴伟.力学-经验路面设计指南(MEPDG)简介[J].上海公路,2011(3):1-7,12.
CHEN Xingwei. Introduction to mechanistic-empirical pavement design guide[J]. Shanghai Highways, 2011(3): 1-7, 12. (in Chinese)
- [18] SHENOY A. Single-event cracking temperature of asphalt pavements directly from bending beam rheometer data[J]. Journal of Transportation Engineering, 2002, 128(5): 465-471.
- [19] 丁海波,邱延峻,王文奇,等.废机油底渣对沥青的不利影响及机理初探[J].建筑材料学报,2017,20(4):646-650.
DING Haibo, QIU Yanjun, WANG Wenqi, et al. Adverse effect of waste engine oil bottom on asphalt performance and its mechanism[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(4): 646-650. (in Chinese)
- [20] ANDRIESCUA, HESP S A M, YOUTCHEFF J S. Essential and plastic works of ductile fracture in asphalt binders[J]. Transportation Research Record, 2004(1875): 1-8.
- [21] 邱延峻,罗浩原,张家康,等.热拌与温拌沥青路面生产施工排放物对比[J].长安大学学报(自然科学版),2020,40(1): 30-39.
QIU Yanjun, LUO Haoyuan, ZHANG Jiakang, et al. Comparative of emissions from production and construction of hot mix and warm mix asphalt pavement[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2020, 40(1): 30-39. (in Chinese)
- [22] 袁飞云,徐加秋,阳恩慧.温拌剂种类及掺量对沥青性能的影响研究[J].中外公路,2018,38(5):173-177.
YUAN Feiyun, XU Jiaqiu, YANG Enhui. Influence study of variety and amount of warm-mixed agent on asphalt performance[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(5): 173-177. (in Chinese)
- [23] 邱延峻,罗浩原,欧阳铨霏,等.不同温拌剂对于沥青性能改性效果的流变分析[J].中外公路,2020,40(2):233-238.
QIU Yanjun, LUO Haoyuan, OUYANG Chengfei, et al. Analysis on rheology effect of asphalt performance modified by different warm agent[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(2): 233-238. (in Chinese)
- [24] 王伟.鞍山市大气中多环芳烃健康影响评价[J].环境科学与管理,2013,38(6):192-194.
WANG Wei. Health impact assessment of PAHs on atmosphere of Anshan[J]. Environmental Science and Management, 2013, 38(6): 192-194. (in Chinese)
- [25] 吴才轩.基于化学组成对掺加 Sasobit 温拌橡胶沥青降粘机理的研究[J].公路工程,2015,40(2):70-73,79.
WU Caixuan. Study on viscosity reduction mechanism of crumb rubber asphalt with sasobit based on chemical composition[J]. Highway Engineering, 2015, 40(2): 70-73, 79. (in Chinese)
- [26] MIAO Z C, WANG F, DENG D, et al. Preparation of novel gemini quaternary ammonium salt cationic surfactant[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 174-177: 1433-1436.