

# 半温拌泡沫沥青混合料水稳定性及压实特性研究

臧芝树<sup>1</sup>, 赵宾<sup>1</sup>, 申爱琴<sup>2</sup> 编译

(1.中国公路工程咨询集团有限公司,北京市 100097; 2.长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室)

**摘要:** 根据自主设计的试验环境,借助马歇尔试验和间接抗拉强度试验,以空隙率和间接抗拉强度比作为评价指标进行半温拌泡沫沥青混合料的压实特性及水稳定性研究,并对空隙率和间接抗拉强度的显著性进行统计分析,探讨混合料之间的相关程度。试验结果表明:费托合成蜡(FT)有助于改善沥青的发泡性能,显著提高膨胀率和半衰期;添加 2.5%FT 的半温拌泡沫沥青混合料,在降低施工温度 45℃条件下,可保证压实特性与水稳定性能与普通热拌 HMA 水平相当;水稳性能与空隙率呈良好的负相关,建立了二者之间的关系方程。

**关键词:** 半温拌; 泡沫沥青混合料; 水稳定性; 压实特性

半温拌泡沫沥青技术是在温拌沥青混合料基础上发展起来的一种拌和温度低于 100℃的施工技术,具有环保节能,降低沥青老化及显著延长施工季节等优点,由于该技术在降低施工温度达 40~60℃的基础上,仍能保持较为良好的路用性能,故成为道路工程前沿领域的关注热点。但较低的拌和温度使水分无法挥发,影响沥青与集料的裹覆能力,降低混合料的黏附能力,使水稳定性下降,因此如何保证半温拌沥青混合料的水稳定性是重中之重。

目前在水稳定性提高上,一般采取发泡技术或者添加由费托技术合成的蜡(简称费托蜡,FT wax)等措施,而掺加 FT 是在沥青发泡前,通过改善沥青的流变性质,从而达到促进沥青发泡性能的目的。Marek Iwan'ski 等进行了费托蜡改善沥青发泡性能的相关研究,得出 FT 的添加可以显著改善泡沫沥青的发泡性能;Silva HMRD 等发现费托蜡 FT 在拌和温度 100℃以下时增大沥青黏度,而高于 100℃即减小沥青黏度,可实现沥青混合料更低环境下的拌和施工。总之,国内外关于半温拌泡沫沥青技术的研究较少,因此十分有必要对该技术的水稳定性展开研究。

该文借助自主设计的试验环境,重点研究掺 FT 的半温拌泡沫沥青混合料的压实特性及水稳定性。同时利用统计分析,探究不同沥青混合料对评价指标的显著性程度,并建立压实特性与水稳定性之间的联系,为半温拌泡沫技术提供理论基础和实践经验。

## 1 原材料及试验方案

### 1.1 原材料

此次试验研究采用 50/70 号沥青,温拌剂选择费托蜡(FT wax),剂量是沥青质量的 2.5%,添加 FT 前后沥青的技术要求及检测结果见表 1,均满足规范要求。粗集料采用辉长岩,细集料及矿粉选用石灰岩,为制备表面磨耗层 AC-8 沥青混合料,各集料的配比为(4~8 mm):(2~5 mm):(0~2 mm):矿粉=40%:16%:37%:7%,级配曲线见图 1,沥青用量为 5.8%。

表 1 添加 FT 降黏剂前后沥青的技术要求及检测结果

试验项目	单位	50/70	2.5%FT+ 50/70	试验方法
25℃针入度	0.1 mm	65.9	44.3	EN1426
针入度指数		−0.6	1.4	EN12591
软化点	℃	50.4	63.3	EN1427
脆点	℃	−15.1	−12.8	EN12593
60℃	Pa·s	372.9	613.7	EN13302
黏度 90℃	Pa·s	14	16.9	EN13302
135℃	Pa·s	0.649	0.522	EN13302

### 1.2 试验方案

为评价半温拌泡沫沥青混合料的压实特性及水敏

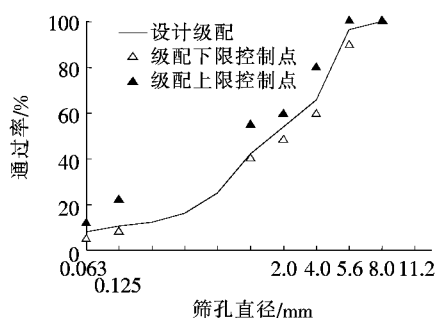
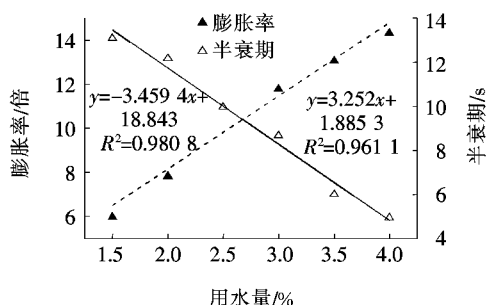


图 1 AC-8 沥青混合料级配设计曲线

感性能,首先进行不同类型试件的制备:在 140℃ 击实温度下成型热拌沥青混合料 HMA(简称 A 混合料),



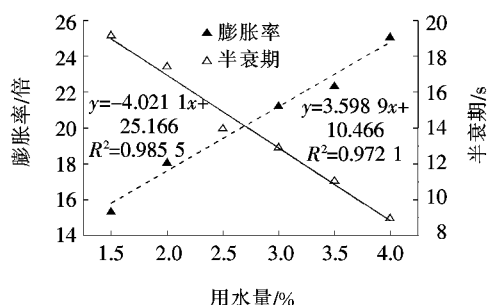
(a) 50/70 沥青

在 95℃ 击实温度下分别成型未添加 FT、添加 2.5% FT 的温拌泡沫沥青混合料 HFWMA(简称 B 混合料)、HFWMA(简称 C 混合料)。主要测试方法如下:

### (1) 沥青发泡性能

分别对 50/70 号及 2.5% FT+50/70 的沥青进行发泡试验,在 140℃ 试验温度下,发泡用水量采用 1.5%~4.0%,间隔 0.5%,以膨胀率和半衰期为评价指标,选取二者均较高时的发泡用水量作为最佳发泡用水量。

对添加 2.5% FT 前后的 50/70 号沥青进行发泡试验,其试验结果如图 2 所示。



(b) 2.5%FT+50/70 沥青

图 2 沥青发泡性能曲线

从图 2 可以看出:随着发泡用水量的增加,两种类型沥青的膨胀率呈线性增加,半衰期线性减小,拟合精度均达到 95%,其中,添加 FT 温拌剂后,相较于普通基质沥青而言,膨胀率和半衰期均有较大幅度的提高。以膨胀率和半衰期均较大为原则选择沥青的最佳发泡用水量,最终确定添加 2.5% FT 前后的沥青最佳发泡用水量分别为 2.5% 和 2.0%,膨胀率为 11 倍和 18 倍,半衰期为 10 s 和 18 s。

### (2) 压实特性

针对不同类型的混合料(A、B 和 C),采用马歇尔试验方法,改变不同的击实次数(双面击实 35 次、50 次和 75 次)分别成型 9 个马歇尔平行试件,测试对应试件的空隙率,以此研究温拌泡沫沥青混合料的压实特性。

### (3) 水敏感性能

采用间接抗拉强度试验,选用干、湿劈裂强度( $ITS_d$ 、 $ITS_w$ )及干湿劈裂强度比( $ITSR$ )作为评价指标,评价温拌泡沫沥青混合料的水敏感性能。考虑到当地严峻的降雨及水损害等特点,设计两种试验环境,如表 2 所示,分别测试  $ITS_d$ 、 $ITS_{w(A)}$ 、 $ITS_{w(B)}$ (单

位:kPa),最终可得到不同试验环境下温拌泡沫沥青混合料的干湿劈裂强度比—— $ITSR$ (单位:%)。

最后,借助单因素方差分析及 Duncan 多重比较检验,得到添加温拌剂 FT 前后影响空隙率  $V_m$ 、 $ITS_d$ 、 $ITS_{w(A)}$ 、 $ITS_{w(B)}$  及  $ITSR$  等指标的显著性程度,另外还得到了压实特性与水稳定性能的关系方程。

## 2 结果及讨论

### 2.1 空隙率结果分析

改变击实次数,根据马歇尔试验方法制备试件,测试不同混合料的空隙率,试验结果如图 3、4 所示。

通过对图 3 中 3 种沥青混合料(A、B 和 C)的空隙率比较可以看出:3 种沥青混合料的空隙率均满足规范要求,在 2%~4% 范围内,其中混合料 B 的空隙率最大,而混合料 A 与 C 的空隙率相当,仅相差 0.2%。造成该现象的主要原因是,添加费托合成蜡 FT 之后,降低了沥青的黏度,增强了沥青与集料的裹覆能力,从而提高了混合料的压实度,使得在降低压实温度的同时空隙率并未大幅度提升。

表 2 水敏感性试验方案设计

测试指标/kPa	试验环境		试件个数
$ITS_d$	将试件置于平台上,室温( $20\pm5$ )℃下保存,测试干劈裂强度,记为 $ITS_d$		$3\times9$
$ITS_{w(A)}$	将试件放置于( $20\pm5$ )℃水中抽去空气真空饱水( $30\pm5$ ) min(真空度 94.3~94.9 kPa),然后恢复常压,放入水中放置( $30\pm5$ ) min;放入( $40\pm1$ )℃水中保温 68~72 h;取出试件放入装有( $10\pm1$ ) mL 水的塑料袋中,放入恒温( $-18\pm3$ )℃冰箱中,保持 16 h	A:取出塑料袋,放入( $60\pm1$ )℃水中保温 24 h,进行湿劈裂强度测试,记为 $ITS_{w(A)}$	$3\times9$
$ITS_{w(B)}$		B:取出塑料袋,放入( $25\pm1$ )℃水中保温 24 h,进行湿劈裂强度测试,记为 $ITS_{w(B)}$ 。	$3\times9$

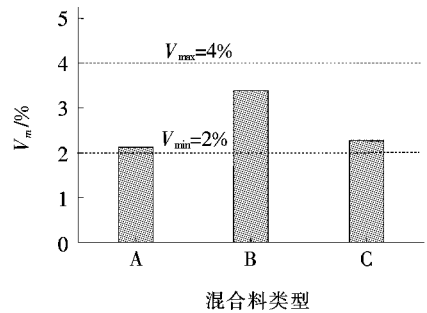


图 3 3 种沥青混合料的空隙率比较

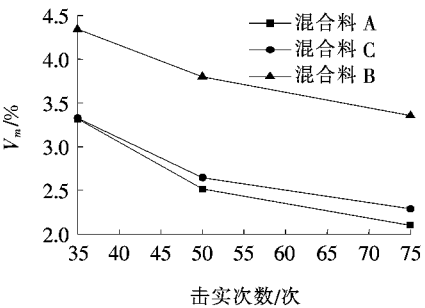


图 4 3 种混合料空隙率  $V_m$  随击实次数的变化

图 4 为半温拌泡沫沥青混合料空隙率  $V_m$  随击实次数的变化规律。由图 4 可知:① 随着击实次数的增加,空隙率呈下降趋势,当击实次数从 35 次增加到 50 次时,3 种混合料空隙率下降较快,一旦超过 50 次后,下降速度放缓,由此说明 HWMA 与 HMA 的压实特性相似,均是由击实次数增加从而提高混合料密实度所致;② 未添加温拌剂 FT 的混合料 B 在不同击实次数下的空隙率明显大于 A 和 C,且添加 FT 的 HWMA 与 HMA 空隙率大致相同。该现象表明:在未掺入温拌剂 FT 时,仅通过发泡技术实现半温拌目的效果不佳,一旦添加温拌剂 FT 后,可达到与 HMA 相似的压实特性。

对 A、B 和 C 这 3 组马歇尔试件(每组 9 个试件)的空隙率  $V_m$  进行统计分析,结果如表 3~5 所示。

表 3 为不同种类(每种 9 个平行试件)混合料空隙率  $V_m$  的描述性统计结果,3 种混合料的空隙率极差差异在 0.2%~0.3%波动,混合料 C 的方差和变异系数最大,表明空隙率差异明显。表 4、5 表明了 3 种混合

表 3 不同类型混合料空隙率  $V_m$  的描述统计量

混合料类型	最小值/%	最大值/%	均值/%	个数	标准差/%	方差	变异系数/%	标准误差/%
A	1.90	2.40	2.111	9	0.153 66	0.024	7.278 59	0.051 22
B	3.10	3.70	3.378	9	0.238 63	0.057	7.064 71	0.079 54
C	2.00	2.70	2.289	9	0.257 12	0.066	11.233 43	0.085 71

表 4 不同类型混合料空隙率  $V_m$  单因素方差分析

变异来源	平方和 SS	自由度 $df$	均方差 MS	F 值	P 值(<0.05)
组间	8.465 2	2	4.232 6	86.578 37	0.000 000
组内	1.173 3	24	0.048 888		
总变异	9.638 5	26			

表 5 不同类型混合料空隙率  $V_m$  的 Duncan 多重比较检验结果

混合料 类型	P 值		
	A(M=2.111%)	B(M=3.378%)	C(M=2.289%)
A		0.000 065 *	0.101 150
B	0.000 065 *		0.000 152 *
C	0.101 150	0.000 152 *	

注:① \* 为在水平  $\alpha=0.05$  条件下,两种类型混合料之间有显著性差异;② M 为空隙率  $V_m$  均值。

料之间存在显著性差异,但混合料 A 和 C 之间的 P 值  $0.101\ 15>$  显著性水平  $\alpha=0.05$  下其他任两种混合

料之间的 P 值(即表 5 中带“\*”号数据),由此说明,HWMA+2.5%FT 与普通 HMA 的空隙率之间不存在差异,即添加 2.5%FT 的半温拌泡沫沥青混合料在降低 45℃施工温度下,能达到与普通热拌沥青混合料同样的压实特性。

2.2 ITS 结果分析

在显著降低拌和温度的同时,极易导致半温拌泡沫沥青混合料压实度降低,影响其水稳定性能,因此采用间接抗拉强度试验评价半温拌泡沫沥青混合料的水敏感性能,并对不同类型混合料间接抗拉强度进行统计分析,结果见表 6、图 5。

表 6 不同类型混合料间接抗拉强度——ITS 描述统计量

指标	混合料 类型	均值/ kPa	个数	标准差/ kPa	方差	变异系 数/%	均值标准 误差/kPa	最小值/ kPa	最大值/ kPa
$ITS_d$	A	1 052.350	9	75.577 64	5 711.979	7.181 797	25.192 55	945.76	1 169.11
	B	844.704	9	73.022 60	5 332.299	8.644 756	24.340 87	759.20	970.80
	C	1 144.847	9	33.264 79	1 106.546	2.905 610	11.088 26	1 094.88	1 187.01
$ITS_{w(A)}$	A	1 024.011	9	51.271 74	2 628.791	5.006 952	17.090 58	928.80	1 107.90
	B	727.622	9	48.981 50	2 399.187	6.731 723	16.327 17	663.30	827.90
	C	1 069.511	9	36.079 65	1 301.741	3.373 472	12.026 55	1 013.70	1 111.10
$ITS_{w(B)}$	A	1 118.734	9	38.655 93	1 494.281	3.455 328	12.885 31	1 055.20	1 179.49
	B	774.057	9	20.280 12	411.283	2.657 998	6.760 04	736.10	801.22
	C	1 161.823	9	30.881 22	953.649 9	2.619 977	10.293 74	1 114.50	1 198.10

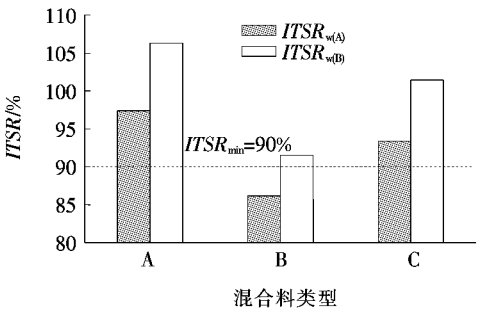


图 5 AC—8 沥青混合料干湿劈裂强度比  $ITSR$

由表 6 干、湿劈裂强度描述性统计分析可知:① 3 种类型混合料的干劈裂强度  $ITS_d$  变化范围为 750~1 200 kPa,湿环境 A 下的劈裂强度  $ITS_{w(A)}$  变化范围为 650~1 150 kPa,湿环境 B 下的劈裂强度  $ITS_{w(B)}$  变化范围为 700~1 200 kPa,整体变异性不大,均小于 10%;②  $ITS_d$ 、 $ITS_{w(A)}$ 、 $ITS_{w(B)}$  等指标从大到小依次为:C、A 和 B,其中添加 FT 的 HFWMA 相关劈裂强度指标值最高,未添加温拌剂 FT 的 HFWMA 各劈裂

强度值最低,表明温拌剂 FT 在提高劈裂强度上有显著作用。

由图 5 可知:除了混合料 B 的  $ITS_{w(A)}$  (86%) 小于 90% 以外,其他混合料均满足规范对于水稳定性的要求,其中,对于 3 种混合料而言,经过湿环境 B 的  $ITS_{w(B)}>ITS_{w(A)}$ ,高 10% 左右,主要是环境 B 的温差 78℃(−18℃→60℃)较大,相比于环境 A 更恶劣,从而使得水稳定性能下降。

判别混合料之间的显著性结果见表 7、8。

由表 7、8 可知:不同混合料类型对劈裂强度指标  $ITS_d$ 、 $ITS_{w(A)}$  和  $ITS_{w(B)}$  均存在显著性影响(P 值<0.05),但表 8 中混合料类型关于  $ITS_{w(B)}$  指标的影响中,混合料 A 和 C 的 P 值(0.679 052)>显著性水平  $\alpha=0.5$  下任意两种混合料之间的 P 值(即表 8 中带“\*”号数据),表明添加 2.5%FT 的 HFWMA 在降低压实温度 45℃下,湿环境 B 下的劈裂强度与普通热拌 HMA 无差异,即可达到普通热拌混合料的水平,主

表 7 不同类型混合料各种间接抗拉强度  $ITS$  单因素方差分析

指标	组间平方和 SS	组间自由度 $df$	组内平方和 SS	组内自由度 $df$	组间均方差 MS	组内均方差 MS	F 值	P 值
$ITS_d$	425 276.4	2	97 206.6	24	212 638.2	4 050.275	52.499 7	0.000 000
$ITS_{w(A)}$	620 413.9	2	50 637.8	24	310 207.0	2 109.906	147.024 0	0.000 000
$ITS_{w(B)}$	401 327.3	2	59 372.8	24	200 663.7	2 473.865	81.113 4	0.000 000

表 8 不同类型混合料各种间接抗拉强度  $ITS$  Duncan 多重比较检验结果

混合料类型	$ITS_d$ 指标时的 P 值			$ITS_{w(A)}$ 指标时的 P 值			$ITS_{w(B)}$ 指标时的 P 值		
	A(M=1 052.4)	B(M=844.7)	C(M=1 144.8)	A(M=1 024.0)	B(M=727.6)	C(M=1 069.5)	A(M=1 118.7)	B(M=865.2)	C(M=1 128.6)
A		0.000 153*	0.005 254*		0.000 152*	0.046 427*		0.000 152*	0.679 052
B	0.000 153*		0.000 065*	0.000 152*		0.000 065*	0.000 152*		0.000 065*
C	0.005 254*	0.000 065*		0.046 427*	0.000 065*		0.679 052	0.000 065*	

注: \* 为在水平  $\alpha=0.05$  条件下,两种类型混合料之间有显著性差异;M 为  $ITS$  均值。

要是因为 FT 的使用在提高沥青发泡性能的基础上,降低了沥青针入度,提高了软化点,使混合料的黏聚力及抗永久变形能力增强所致。

3 水稳定性能与压实特性相关性分析

通过上述对半温拌泡沫沥青混合料的压实特性及水稳定性能研究后发现,添加 2.5% FT 的 HFWMA 压实特性及水稳定性能可达到普通热拌混合料的水平,均满足规范要求。另外,压实度不足,空隙率偏大,会导致水稳定性能降低,提高压实特性,一定程度上可改善混合料的水敏感性能,因此,十分有必要探求半温拌泡沫沥青混合料水稳定性与压实特性二者之间的关系。针对 3 种混合料 A、B 和 C,双面击实 35 次制备马歇尔试件,测试相应的空隙率及干湿劈裂强度 [ $ITS_d$ 、 $ITS_{w(A)}$  和  $ITS_{w(B)}$ ],进行线性拟合,并得到对应的回归方程,具体结果如图 6~8 所示。

从图 6~8 可以看出:空隙率与间接抗拉强度之间存在着负相关关系,空隙率变大时,干湿间接抗拉强度  $ITS$  均呈现降低趋势,使得水稳定性能不足,造成该现象的主要原因是空隙率较大时压实度不足,导致水分进入试件内部,在冻融循环和荷载的双重作用下,加速沥青从集料表面剥落,造成水稳定性能下降,反之亦然。最后通过线性回归,得到了水稳定性能与压实特性空隙率之间的关系方程,从拟合效果来看, $R^2$  达到

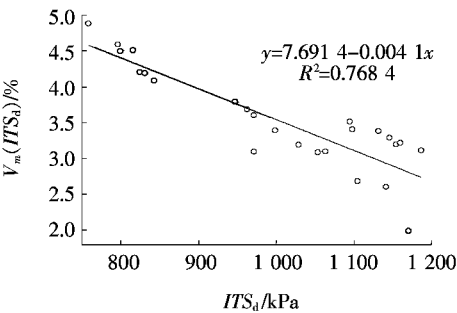


图 6 AC-8 混合料空隙率  $V_m$ — $ITS_d$  关系

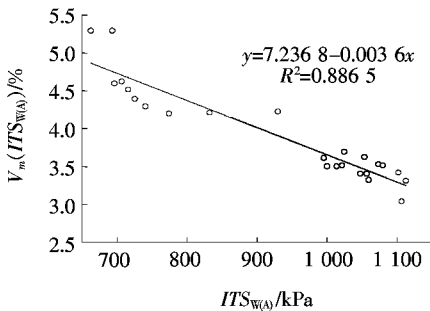


图 7 AC-8 混合料空隙率  $V_m$ — $ITS_{w(A)}$  关系

0.7 以上,两者具有良好的线性关系,可为半温拌泡沫沥青混合料的水稳定性能研究提供一定的理论基础。

4 结论

(1) 添加费托合成蜡 FT,可改变沥青的流变性质,如针入度降低,软化点提高,使得沥青混合料的抗

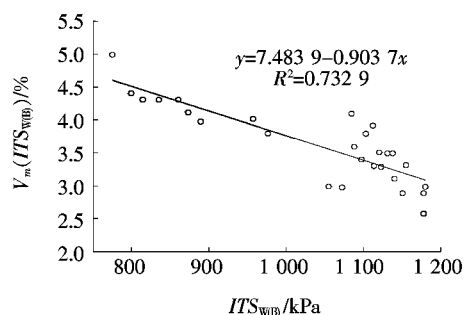


图 8 AC-8 混合料空隙率  $V_m$ — $ITS_{w(B)}$  关系

永久变形能力增强;改善泡沫沥青的发泡性能,使得膨胀率和半衰期显著提高。

(2) 对于未使用温拌剂的混合料而言,半温拌泡沫沥青混合料通过添加一定量的 FT 在一定程度上可改善其压实特性及水稳定性能,主要原因就是 FT 的使用降低了沥青的黏度和提高了发泡性能,从而改善了工作和易性,使得空隙率下降,压实度得到显著提升。

(3) 在降低施工温度 45℃ 的条件下,仅通过发泡技术实现半温拌水平效果不佳,可通过添加 2.5% FT 使半温拌泡沫沥青混合料的压实特性及水稳定性能等达到普通热拌 HMA 的要求。

(4) 建立了半温拌泡沫沥青混合料水稳定性能与压实特性空隙率之间的关系方程,两者具有良好的线性关系。

#### 参考文献:

- [1] Chomicz—Kowalska A, Gardziejczyk W, Iwański M M. Moisture Resistance and Compactibility of Asphalt Concrete Produced in Half—Warm Mix Asphalt Technology

with Foamed Bitumen[J]. Construction & Building Materials, 2016, 126:108—118.

- [2] 刘祥,李波,李艳博,等.基于发泡技术的半温拌再生沥青混合料性能研究[J].中外公路,2015(3).
- [3] 李全.温拌与半温拌沥青混合料技术研究进展[J].城乡建设,2012(13).
- [4] 徐世法,颜彬,季节,等.高节能低排放型温拌沥青混合料的技术现状与应用前景[J].公路,2005(7).
- [5] 马永锋,郝培文.温拌(半温拌)泡沫沥青混合料发展现状[J].中外公路,2012(3).
- [6] Bhusal S. A Laboratory Study of Warm Mix Asphalt for Moisture Damage Potential and Performances Issues[J]. Dissertations & Theses — Gradworks, 2008.
- [7] 郭平.Sasobit 温拌沥青混合料水稳定性能研究[J].郑州大学学报:工学版,2010(5).
- [8] 叶奋,王宝松,贾晓阳,等.成型温度对温拌沥青混合料水稳定性的影响[J].建筑材料学报,2009(3).
- [9] Jenkins K J. Mix Design Considerations for Cold and Half—Warm Bituminous Mixes with Emphasis of Foamed Bitumen[J]. Stellenbosch Stellenbosch University, 2000.
- [10] Iwański M, Chomicz—Kowalska A, Maciejewski K. Application of Synthetic Wax for Improvement of Foamed Bitumen Parameters[J]. Construction & Building Materials, 2015, 83(8):62—69.
- [11] Silva H M R D, Oliveira J R M, Peralta J, et al. Optimization of Warm Mix Asphalts Using Different Blends of Binders and Synthetic Paraffin Wax Contents[J]. Construction & Building Materials, 2010, 24(9):1 621—1 631.
- [12] 易守春,高彦芝,胡小圆.温拌和半温拌沥青混合料的能耗计算和环境评价[J].石油沥青,2009(5).
- [13] 罗有权.发泡温度对泡沫温拌橡胶沥青高温性能的影响[J].中外公路,2017(3).

## 投稿须知

1. 征稿范围:国内外公路概况;国外公路考察见闻;公路路线设计;路基路面工程;桥梁与隧道工程;材料试验与应用;交通工程与管理;公路景观与环保等。

2. 稿件要求:① 请提供 word 文档。文稿以 6 000 字左右为佳;② 投寄本刊的稿件,直接发至 E-mail:zhong-waigonglu@vip.163.com(本刊唯一投稿邮箱),本刊审稿周期 1~2 个月。若被采用,本刊将 E-mail 通知作者。3 个月未收到通知,作者可另行处理。请勿一稿多投,否则后果自负;③ 题目应简洁明晰,字数不能多于 20 个中文字;④ 作者单位必须注明邮政编码。第一作者须注明出生年、性别、学历、职称、研究方向、电子信箱和联系电话;⑤ 摘要、关键词。摘要请务必按“研究目的、方法、结果、结论”四要素写。关键词:3~8 个;⑥ 基金项目必须写明基金项目名称和编号;⑦ 图表。图表要与文中相对应,(示例:\*\*\* 如表 1 所示)。图表要有图名和表名。除照片外,其余图均需提供 excel 或 origin 或 cad 源文件。表格采用三线表。所有图、表中的字体为小 5 号或 6 号;⑧ 文后必须要有参考文献。参考文献参考格式如下:[1] 期刊:作者姓名(列三位,等(姓在前,名在后)).文章题目[J].刊名,出版年份(期);[2] 专著:作者姓名(列三位,等).专著名称[M].版本(第一版不标注).出版地:出版单位,出版年;[3] 论文集:作者姓名(列三位,等).题名[C].论文集名,出版年;[4] 学位论文:作者姓名.题名[D].单位[硕士(博士)学位论文],年份;[5] 专利:专利申请者姓名(列三位,等).题名:国别,专利号[P].公告日期或公开日期[引用日期];[6] 技术标准:标准代号 标准名称[S].

《中外公路》杂志社