

文章编号:1007-9629(2024)03-0275-08

热拌沥青混合料拌和和易性的评价方法

董夫强^{1,*}, 祖元哲¹, 朱启洋², 柳 林², 王海军²

(1. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098;

2. 江苏交通控股有限公司 江苏现代路桥有限责任公司, 江苏 南京 210002)

摘要: 基于沥青混合料的材料组成及分布, 采用扫描电镜(SEM)测定热拌沥青混合料中集料表面裹附的沥青膜厚度, 并提出一种拌和和易性评价指标. 采用集料分布均匀性和压实度测试结果进一步验证和分析不同热拌沥青混合料拌和和易性的变化规律. 结果表明: 沥青种类、级配类型及拌和温度对热拌沥青混合料拌和和易性影响作用不同; 沥青膜在集料表面裹附得越均匀, 热拌沥青混合料的拌和和易性就越好, 集料分布的离散性越小, 热拌沥青混合料成型的压实度越大.

关键词: 道路工程; 热拌沥青混合料; 拌和和易性; 沥青膜厚度; 压实度

中图分类号: U414

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2024.03.012

Mixing Workability Evaluation Method of Hot Mix Asphalt Mixture

DONG Fuqiang^{1,*}, ZU Yuanzhe¹, ZHU Qiyang², LIU Lin², WANG Haijun²

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Jiangsu Xiandai Road & Bridge Co., Ltd., Jiangsu Communications Holding Co., Ltd., Nanjing 210002, China)

Abstract: Based on the material composition and distribution of asphalt mixtures, scanning electron microscopy (SEM) was used to determine the thickness of the asphalt film wrapped around the aggregate surface in hot mix asphalt mixtures, and to propose a mixing workability evaluation index. Then the changes of mixing workability in different hot mix asphalt mixtures were further verified and analyzed through the index of aggregate distribution and compaction. The results show that the type of asphalt, gradation type, and mixing temperature have different effects on the mixing workability of hot mix asphalt mixtures. The better the uniformity of asphalt film attachment to the aggregate surface, the better the mixing workability of hot mix asphalt mixtures, the less discrete the aggregate distribution, the greater the compaction of the hot mix asphalt mixtures molding.

Key words: road engineering; hot mix asphalt mixture; mixing workability; asphalt film thickness; compaction

热拌技术作为当前沥青混合料的主流生产方式, 其高能耗和高温拌和方式给可持续发展带来了严峻挑战^[1]. 为应对资源和环境危机, 研究人员一直在努力探索降低燃料资源过度消耗和减少温室气体排放的工程技术^[2-4].

沥青混合料的拌和和易性是表征拌和难易程度的一项关键指标, 本质上反映了材料的流动特性^[5]. 拌和和易性越好, 沥青混合料越易于压实和摊铺, 进而保证道路行驶的安全与舒适. Gudimettla 等^[6]和 Ali

等^[7]最早开发了和易性测试仪并采用拌和扭矩作为沥青混合料拌和和易性的评价指标, 扭矩值越小表明和易性越好. 侯曙光^[8]使用拌和扭矩的倒数作为和易性评价指标, 研究发现温拌技术可改善沥青混合料的拌和和易性. 延西利等^[9]通过测试拌和功率与建立流变模型评价了沥青混合料的拌和和易性, 研究发现沥青混合料的拌和流动集料种类、特性符合宾汉黏塑性模型. 研究已证实沥青种类、集料种类、级配类型、拌和速率及温度等均是影响沥青混合料拌

收稿日期: 2023-04-24; 修订日期: 2023-08-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52278451); 江苏现代路桥有限公司科技项目(2021JKY18)

第一作者(通讯作者): 董夫强(1985—), 男, 山东济宁人, 河海大学副教授, 硕士生导师, 博士. E-mail: dfq0107@126.com

和和易性的主要因素^[10-12].随着新技术和新材料的推广应用,主流和易性评价方法的适用性与精确性持续降低,需要提出一种新的和易性评价方法.

本文通过扫描电镜(SEM)测试了热拌沥青混合料(以下简称沥青混合料)中关键粒径集料表面的沥青膜厚度,并提出一种新的拌和和易性评价指标.采用该指标对不同沥青胶结料、级配类型及拌和温度下沥青混合料的拌和和易性进行对比分析,通过集料分布均匀性和压实度测试结果验证分析了沥青混合料拌和和易性对集料分布均匀性的影响.

1 试验材料

1.1 沥青

沥青选用南通通沙沥青科技有限公司提供的70#基质沥青和SBS改性沥青.依据文献[13]对以上2种沥青进行性能检测,其基本技术性能指标如表1所示.

1.2 集料及级配设计

集料选用江苏现代路桥有限责任公司提供的玄

表1 2种沥青的基本技术性能指标
Table 1 Basic technical specifications of two kinds of asphalts

Index	70# base asphalt	SBS modified asphalt	Test method
Penetration (25 °C)/(0.1 mm)	68.0	55.8	T 0604
Softening point/°C	47.8	62.9	T 0606
Ductility(5 °C)/cm	Brittle failure	35.55	T 0605
Viscosity/(Pa·s ⁻¹)	120 °C	0.992	T 0625
	135 °C	0.450	
	140 °C	0.376	
	160 °C	0.115	
	180 °C	0.082	

武岩骨料及石灰岩填料.2种集料的基本技术性能指标如表2所示.为研究不同级配类型下沥青混合料的拌和和易性,设计级配为AC-13和AC-20,沥青混合料的合成级配见表3.根据马歇尔试验法确定AC-13和AC-20沥青混合料的油石比(质量比)分别为4.8%和4.2%.

表2 2种集料的基本技术性能指标
Table 2 Basic technical specifications of two kinds of aggregates

Aggregate type	Performance specification	Test result	Specification requirement
Basalt	Apparent density/(g·cm ⁻³)	2.884	≥2.5
	Hygroscopic coefficient/%	0.72	≤3.0
	Flat and elongated particle/%	11.6	≤18
Limestone mineral powder	Apparent density/(g·cm ⁻³)	2.682	≥2.5
	Moisture content(by mass)/%	0.3	≤1.0
	Particle size distribution rate(≤0.075 mm)/%	83.6	75-100
	Hydrophilic coefficient	<0.58	<1
	Thermal resistance	No significant change in color	Actual measurement record
	Appearance	No aggregate caking	No aggregate caking

表3 沥青混合料的合成级配
Table 3 Synthesis gradations of asphalt mixtures

Gradation type	Passing ratio(by mass)/%										
	19 mm	16 mm	13.2 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm
AC-13	100.00	100.00	97.62	83.31	54.42	40.73	26.31	17.07	9.03	6.40	4.49
AC-20	100.00	99.79	73.50	63.09	34.99	18.04	15.61	12.87	10.86	6.60	4.74

2 试验方案

2.1 沥青膜厚度扫描测试

沥青膜厚度扫描测试步骤如下:(1)根据沥青混合料级配组成,在拌和结束后,针对级配类型AC-13和AC-20分别选取若干颗最大粒径(13.2 mm和19 mm)集料,利用环氧树脂将其浇注至沥青离析管内形成圆柱体,静置24 h,待其固化后取出;(2)利用

切割机将固化后的集料树脂混合体切割成为厚度为5 mm左右的薄片;(3)将包含集料-沥青-树脂的薄片放入喷金设备中进行喷金处理;(4)采用SEM扫描裹附于集料表面的沥青膜厚度.沥青膜厚度扫描测试流程示意图如图1所示.

为明确沥青混合料的拌和和易性与沥青膜分布的关联性,提出了沥青膜平均厚度(δ_{av} , μm)和沥青膜裹附均匀性(λ_{en} , μm^2)指标,计算表达式见

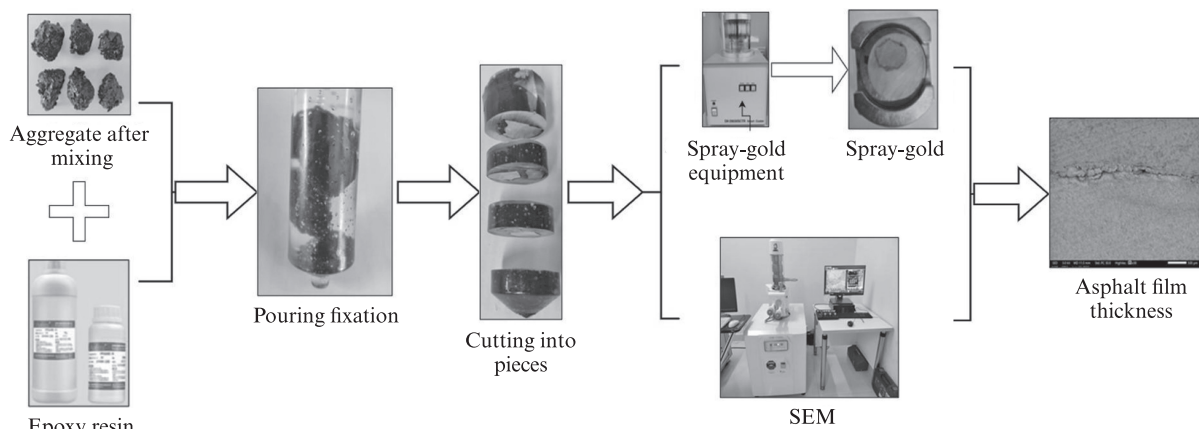


图1 沥青膜厚度扫描测试流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of scanning test process for asphalt film thickness

式(1)、(2).

$$\delta_{av} = \frac{\sum_{m=1}^n \delta_m}{n} \quad (1)$$

$$\lambda_{en} = \frac{\sum_{m=1}^n (\delta_m - \delta_{av})^2}{n} \quad (2)$$

式中: n 为所选取的最大粒径集料的个数,个; δ_m 为在集料表面不同位置 m 裹附的沥青膜厚度, μm .

经验证分析,最终采用 λ_{en} 作为沥青混合料的拌和和易性指标. λ_{en} 值越小,表明裹附于集料表面的沥青膜分布得越均匀,沥青混合料的拌和和易性就越好.

2.2 集料分布均匀性测试

集料分布均匀性测试简易流程如下:(1)将沥青混合料均分为上下4层分别取样;(2)将4份试样(1[#]~4[#])放入煅烧炉内煅烧,煅烧温度为540℃,煅烧时间为3.5 h左右,当集料表面沥青呈现灰白色时结束煅烧;(3)取出煅烧后的沥青混合料试样,使用标准筛对其筛分,称取不同孔径筛上的集料质量,同时计算煅烧前后沥青混合料的质量损失.

将燃烧筛分后不同粒径集料的质量与生产级配中集料的质量进行对比,提出了集料分布离散度(σ_{di} ,%)指标,计算表达式见式(3).

$$\sigma_{di} = \sum_{i=0.075}^{19} (P_i - p_i)^2 \quad (3)$$

式中: P_i 为煅烧后集料的筛孔通过率,%,其中 i 表示筛孔直径; p_i 为集料合成级配中的筛孔通过率,%.

针对1[#]~4[#]沥青混合料试样中的集料分布状态,提出了集料分布均匀性(λ_{di} ,%)指标,计算表达式见式(4).

$$\lambda_{di} = \frac{\sigma_{di,1} + \sigma_{di,2} + \sigma_{di,3} + \sigma_{di,4}}{4} \quad (4)$$

式中: $\sigma_{di,1}$ 、 $\sigma_{di,2}$ 、 $\sigma_{di,3}$ 和 $\sigma_{di,4}$ 分别表示1[#]~4[#]沥青混合料试样中的集料分布离散度.

本研究采用2种沥青种类(70[#]基质沥青和SBS改性沥青)、2种级配类型(AC-13和AC-20)及2种拌和温度(140、180℃)设计交叉试验.

3 结果与分析

3.1 不同沥青混合料拌和和易性分析及评价指标的建立

在沥青混合料拌和过程中,矿粉及较小的细集料与沥青相互交融形成沥青胶砂浆,其在搅拌力的作用下裹附于集料表面,因此试验所测试的沥青膜厚度实质上是沥青胶砂浆的厚度.沥青混合料中集料表面的SEM照片如图2所示.由图2可见,不同沥青混合料拌和后集料表面裹附的沥青膜厚度具有差异性,说明沥青种类、级配类型及拌和温度对沥青膜裹附均匀性的影响有所不同.

不同沥青混合料的 λ_{en} 值如图3所示.其中70[#]表示70[#]基质沥青,SBS表示SBS改性沥青.由图3可见:(1)当沥青种类和级配类型相同时,180℃拌和温度下沥青混合料的 λ_{en} 值明显小于140℃拌和温度下的 λ_{en} 值.这是由于拌和温度升高后,沥青砂浆的黏度降低且流动性变好,能够均匀地裹附在集料表面,同时减小了集料间的摩阻力,使得沥青混合料的拌和和易性变好^[14].(2)在拌和温度和级配类型相同时,SBS改性沥青的 λ_{en} 值大于70[#]基质沥青.这是由于相同拌和温度下SBS改性沥青的黏度大于70[#]基质沥青,在拌和过程中流动性较差,不易在集料表面均匀裹附,导致沥青混合料的拌和和易性变差^[15].(3)在沥青种类和拌和温度相同时,AC-20沥青混合料的 λ_{en} 值大于AC-13沥青混合料.这是由于在拌和过程中搅拌浆提供的拌和力不变时,AC-20沥青混合料中最大粒径(19 mm)集料的惯性大于AC-13沥青混合料中最大粒径

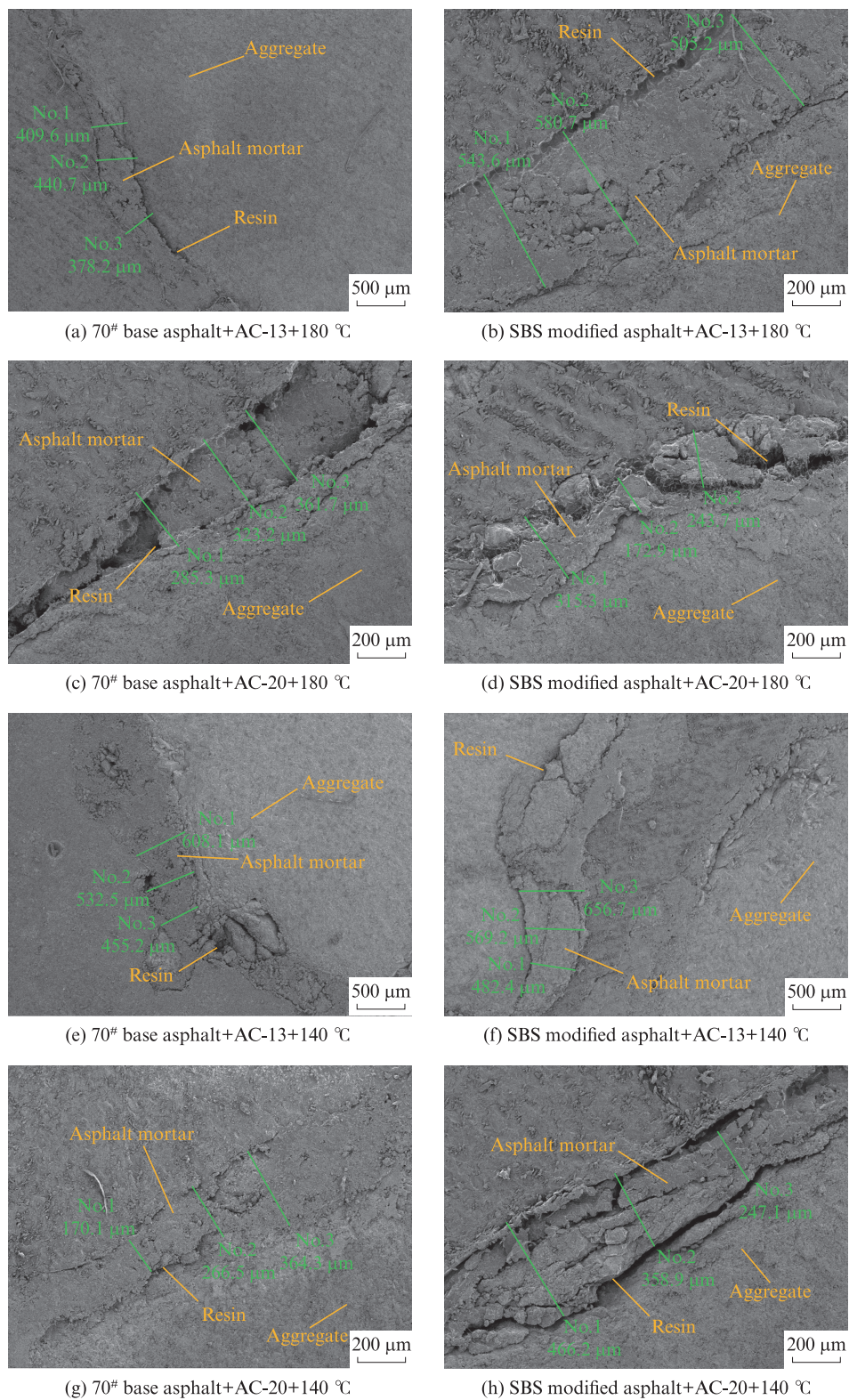


图2 沥青混合物中集料表面的SEM照片

Fig. 2 SEM images of aggregate surface of asphalt mixtures

(13.2 mm)集料,不同颗粒与搅拌桨及拌和锅之间不断碰撞,使集料表面裹附的沥青砂浆分布不均匀,导致沥青混合料的拌和和易性较差.图3还显示,3个因素对沥青混合料拌和和易性的影响程度由大到小依次为拌和温度、级配类型和沥青种类.

3.2 拌和和易性对集料分布均匀性的影响

集料分布离散度(σ_{di})计算结果如表4所示.由表4可见:(1)在沥青混合料级配类型相同时,只使用集料拌和的沥青混合料的 σ_{di} 值明显大于添加沥青的沥青混合料,这是由于沥青混合料在拌和过程中沥青

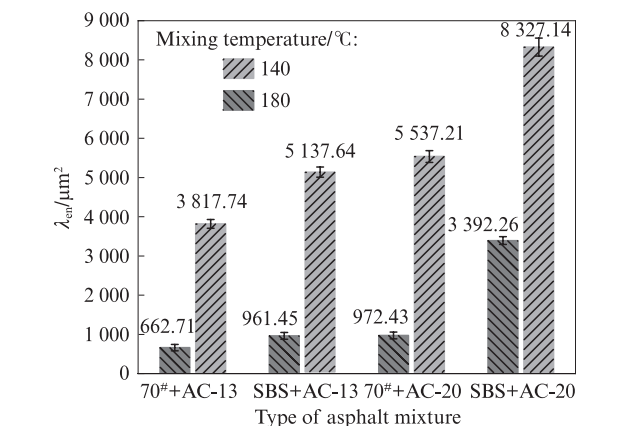


图3 不同沥青混合料的 λ_{en} 值

Fig. 3 λ_{en} values of different asphalt mixtures

的加入会减小因集料颗粒差异导致的分布离散度^[16].
(2)当拌和温度和级配类型相同时,SBS改性沥青的 σ_{di} 值普遍比70[#]基质沥青小,这是由于SBS改性沥青的黏度偏大,在拌和过程中高黏度的沥青更易使粗细集料与之粘结,降低了集料的分布离散性^[17].(3)当沥青种类和拌和温度相同时,AC-20沥青混合料的 σ_{di} 值大于AC-13沥青混合料,这可能是由于AC-20沥青混合料中粗集料的含量相对较高,较大的摩擦阻力导致集料分布离散度大.

集料分布均匀性(λ_{di})计算结果如图4所示.由图4可见:(1)只使用集料拌和时沥青混合料的 λ_{di}

值明显大于添加沥青的沥青混合料.这是由于未掺入沥青时混合料在拌和过程中会发生离析现象,细集料在搅拌桨机械力和自身重力作用下沿着粗集料的缝隙向拌和锅底部迁移,使得较多的粗集料留在拌和锅上方,因而集料分布均匀性较差^[18];而混合料中加入沥青后,由于沥青本身的高黏弹性不仅在混合料拌和过程中阻止了细集料向下迁移,也使得粗细集料与沥青相互粘结裹附,从而改善了集料的分布均匀性^[19].(2)当沥青种类和拌和温度相同时,AC-20沥青混合料的 λ_{di} 值明显大于AC-13沥青混合料,这是由于AC-20沥青混合料中粗集料含量较高,拌和过程中粗细集料不易均匀分布.(3)当拌和温度和级配类型相同时,SBS改性沥青混合料的 λ_{di} 值比70[#]基质沥青混合料的小,这是由于相同温度下SBS改性沥青的黏度比70[#]基质沥青大,在拌和过程中高黏度的SBS改性沥青对集料分布状态的影响胜于70[#]基质沥青,能够使不同粒径的粗细集料充分接触,从而提高了沥青混合料拌和均匀性^[20].(4)当沥青种类和级配类型相同时,拌和温度越高,沥青混合料的 λ_{di} 值越大,这是由于随着拌和温度的升高,沥青黏度逐渐减小,在沥青混合料拌和过程中阻滞粗细集料均匀分布的作用有所减弱.

表4 集料分布离散度计算结果					
Table 4 Calculation results of distribution difference of aggregates					
Mixing temperature/℃	Type of asphalt mixture	$\sigma_{di,1}/\%$	$\sigma_{di,2}/\%$	$\sigma_{di,3}/\%$	$\sigma_{di,4}/\%$
25	AC-13	2 958.13	1 130.41	726.86	3 048.52
	AC-20	8 214.31	1 374.51	1 382.11	6 972.74
140	70 [#] base asphalt + AC-13	490.23	114.24	58.31	1 074.23
	SBS modified asphalt + AC-13	260.34	154.22	51.75	747.12
	70 [#] base asphalt + AC-20	1 134.21	33.86	258.24	1 696.21
	SBS modified asphalt + AC-20	426.12	332.55	136.56	1641.23
180	70 [#] base asphalt + AC-13	323.21	114.52	160.11	401.81
	SBS modified asphalt + AC-13	146.12	109.43	57.22	217.99
	70 [#] base asphalt + AC-20	477.27	379.24	88.33	1 559.12
	SBS modified asphalt + AC-20	665.23	32.12	137.33	781.22

沥青膜裹附均匀性(λ_{en})与集料分布均匀性(λ_{di})的线性关联分析结果如图5所示.

由图5可见:(1)沥青混合料的 λ_{en} 与 λ_{di} 的线性相关系数 R^2 在AC-13和AC-20级配下分别为0.873 9和0.826 1,表明 λ_{en} 与 λ_{di} 呈密切关联性.(2)当级配类型相同时,沥青混合料的 λ_{di} 随着 λ_{en} 的增大而逐渐减小,这验证了沥青混合料的拌和和易性越差,拌和过程中集料分布的差异性越大的结论.(3)AC-13沥青混合料的 λ_{di} 与 λ_{en} 之间的关联性较AC-20沥青混合料更加密

切,说明沥青混合料中细集料的含量越多,拌和和易性对混合料中的集料分布影响越深.综上所述,沥青混合料的沥青膜裹附均匀性(λ_{en})指标与集料分布均匀性(λ_{di})指标具有较大的关联, λ_{en} 指标在一定程度上可预测沥青混合料中集料的分布均匀状况.

3.3 拌和和易性对沥青混合料压实度的影响

不同沥青混合料的压实度(k)如图6所示.由图6可见:当沥青种类及级配类型相同时,拌和温度越高,沥青混合料的 k 值越大,这是由于在高温拌和时,

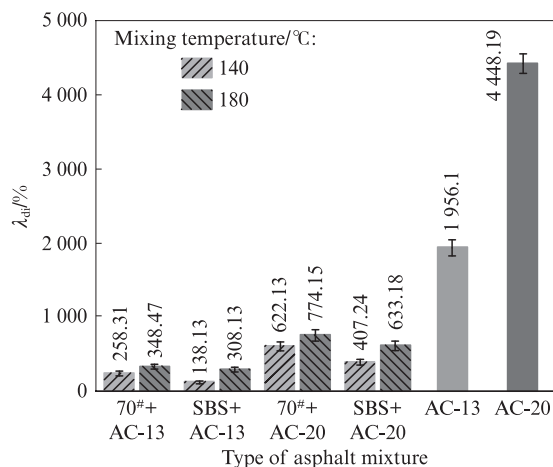


图4 集料分布均匀性计算结果

Fig. 4 Calculation results of distribution uniformity of aggregates

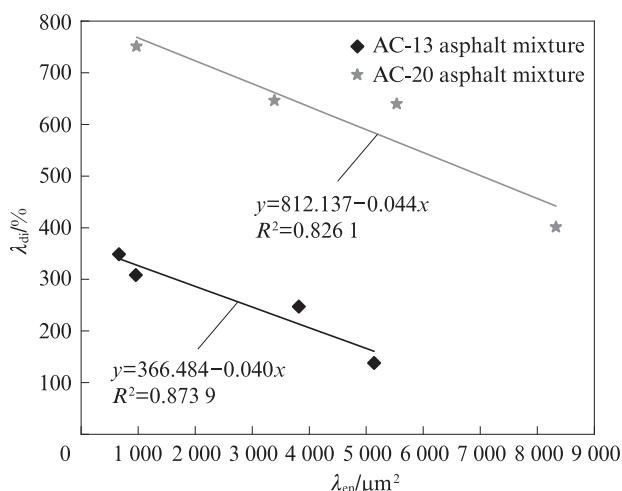
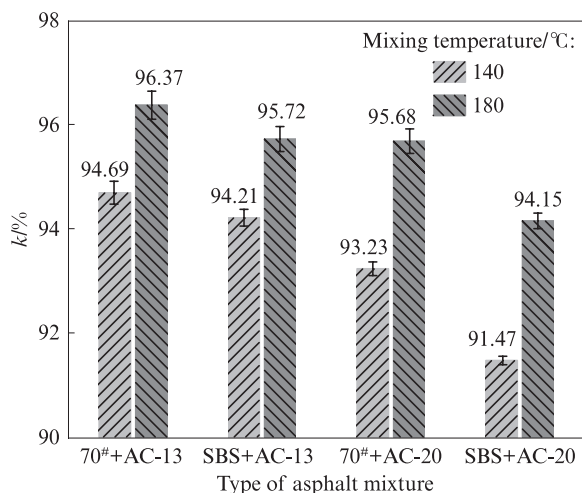
图5 λ_{en} 与 λ_{di} 的线性关联分析Fig. 5 Linear correlation analysis of λ_{en} and λ_{di} 

图6 不同沥青混合料的压实度

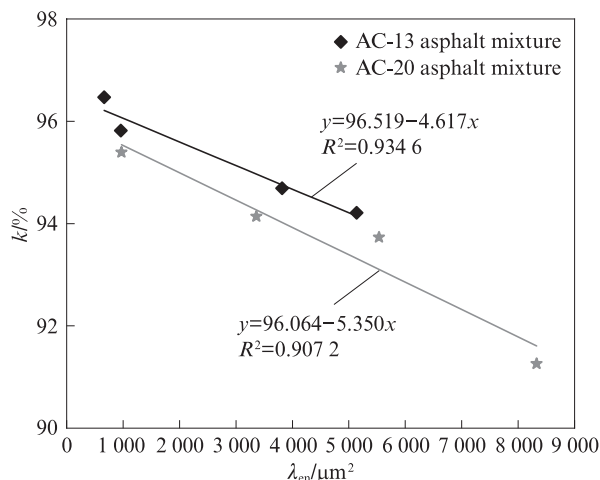
Fig. 6 Compaction of different asphalt mixtures

沥青混合料中的沥青与粗细集料更易均匀拌和,材料的分布均匀性较好,拌和后的沥青混合料容易压

实成形^[21]。(2)当沥青种类和拌和温度相同时,AC-13沥青混合料的 k 值大于AC-20沥青混合料,这是由于AC-13沥青混合料中集料的整体粒径偏小,沥青混合料在得到充分拌和的同时集料分布更加均匀,从而使得沥青混合料的压实度变好。(3)当级配类型和拌和温度相同时,70#基质沥青混合料的 k 值大于SBS改性沥青混合料,这主要由于在相同条件下SBS改性沥青的黏度大于70#基质沥青,导致沥青与集料较难均匀分布,致使沥青混合料成型后的 k 值较小。

沥青膜裹附均匀性(λ_{en})与沥青混合料压实度(k)的线性关联分析结果如图7所示。

由图7可见:沥青混合料的 λ_{en} 与 k 的线性相关系数 R^2 在AC-13和AC-20级配下分别为0.934 6和0.907 2,说明二者呈密切关联性;随着 λ_{en} 值的增大,沥青膜裹附均匀性降低,沥青混合料的拌和和易性变差, k 值也不断减小。这是由于沥青混合料的 λ_{en} 值越大,意味着沥青混合料越难拌和且拌和过程中材料不易均匀分布,从而导致沥青混合料的 k 值较小。综上所述,本研究提出的沥青混合料的拌和和易性指标(λ_{en})可以反映沥青混合料的压实度(k),通过沥青混合料压实度来验证其拌和和易性是适用和有效的。

图7 λ_{en} 与 k 的线性关联分析Fig. 7 Linear correlation analysis of λ_{en} and k

4 结论

(1)沥青膜裹附均匀性(λ_{en})指标可定量评价热拌沥青混合料的拌和和易性。 λ_{en} 值越大,表明沥青膜裹附分布越不均匀,沥青混合料的拌和和易性就越差。

(2)沥青种类、级配类型和拌和温度对热拌沥青混合料拌和和易性的影响程度不同,影响程度由大到小依次为拌和温度、级配类型和沥青种类。在拌和

温度较高、混合料最大公称粒径较小及沥青胶结料黏度较低时,热拌沥青混合料的拌和和易性较好;反之则较差。

(3)热拌沥青混合料的拌和和易性越好,其压实度就越大。集料分布均匀性及压实度试验结果验证了本文提出的拌和和易性指标的合理性与准确性。在后续研究和工程实践中可进一步验证该指标在其他种类沥青混合料中的可行性。

参考文献:

- [1] 彭波,邓海龙,曹世江,等.热拌沥青混合料碳排放量化与评价体系[J].长安大学学报(自然科学版),2019,39(3):1-9.
PENG Bo, DENG Hailong, CAO Shijiang, et al. Carbon emission quantification and evaluation system of hot mix asphalt mixture[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science), 2019, 39(3):1-9. (in Chinese)
- [2] 王海成,金娇,刘帅,等.环境友好型绿色道路研究进展与展望[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(7):2137-2169.
WANG Haicheng, JIN Jiao, LIU Shuai, et al. Research progress and prospect of environment-friendly green road[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(7):2137-2169. (in Chinese)
- [3] 王诗雨,董夫强,于新,等.相容剂组成对SBS改性沥青抗老化性能的影响[J].建筑材料学报,2023,26(9):996-1002.
WANG Shiyu, DONG Fuqiang, YU Xin, et al. Influence of compatibilizer composition on anti-aging properties of SBS modified asphalt [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(9): 996-1002. (in Chinese)
- [4] KIM M, PHALTANE P, MOHAMMAD L, et al. Temperature segregation and its impact on the quality and performance of asphalt pavements [J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2018, 12(4):536-547.
- [5] HESAMI E, JELAGIN D, KRINGOS N, et al. An empirical framework for determining asphalt mastic viscosity as a function of mineral filler concentration [J]. Construction and Building Materials, 2012, 35:23-29.
- [6] GUDIMETTLA J M, COOLEY L A, BROWN E R. Workability of hot mix asphalt [J]. Transportation Research Record, 2004, 1891(1):229-237.
- [7] ALI A, ABBAS A, NAZZAL M, et al. Workability evaluation of foamed warm-mix asphalt [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 26(6):04014011.
- [8] 侯曙光.热拌与温拌沥青混合料和易性试验[J].南京工业大学学报(自然科学版),2011,33(5):36-39.
HOU Shuguang. Workability experiment of hot asphalt mixture and warm asphalt mixture [J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science), 2011, 33(5):36-39. (in Chinese)
- [9] 延西利,景宏君,游庆龙,等.沥青混合料的拌和流动特性及和易性指标[J].土木工程学报,2019,52(10):120-128.
YAN Xili, JING Hongjun, YOU Qinglong, et al. Mixing flow characteristic and workability index of asphalt mixtures [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(10):120-128. (in Chinese)
- [10] HANZ A J, BAHIA H U. Asphalt binder contribution to mixture workability and application of asphalt lubricity test to estimate compactability temperatures for warm-mix asphalt [J]. Transportation Research Record, 2013, 2371(1):87-95.
- [11] 杨跃焕,姚雄,宋圣霞,等.沥青混合料的工作和易性实验研究[J].材料导报,2013,27(增刊1):309-313.
YANG Yuehuan, YAO Xiong, SONG Shengxia, et al. Experimental investigation of workability for asphalt mixtures [J]. Materials Reports, 2013, 27(Suppl 1):309-313. (in Chinese)
- [12] 付军,熊定邦,李忠杰,等.沥青混合料界面区微米划痕试验与参数分析[J].建筑材料学报,2023,26(1):78-84.
FU Jun, XIONG Dingbang, LI Zhongjie, et al. Micro-scratch test and parameter analysis of asphalt mixture interfacial transition zone [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(1):78-84. (in Chinese)
- [13] 中华人民共和国交通部.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.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering: JTG E20—2011 [S]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese)
- [14] 纪小平,许辉,侯月琴,等.温拌再生沥青混合料的压实特性研究[J].建筑材料学报,2014,17(2):349-354.
JI Xiaoping, XU Hui, HOU Yueqin, et al. Study on compaction characteristics of warm mixed reclaimed mixture [J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(2):349-354. (in Chinese)
- [15] 李昂.不同性质沥青混合料的变速拌和和易性指标研究[D].西安:长安大学,2017.
LI Ang. Experiment at different mixing velocities and workability experiment at different mixing velocities and workability [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017. (in Chinese)
- [16] 刘聂扬子,刘洪海,荣鑫,等.确定改性沥青混合料拌和温度的功率法[J].华中科技大学学报(自然科学版),2021,49(7):44-48.
LIU Nieyangzi, LIU Honghai, RONG Xin, et al. Stirring power method to determine mixing temperature of modified asphalt mixture [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science), 2021, 49(7):44-48. (in Chinese)
- [17] 徐浩,张文武,何兆益,等.沥青老化及再生对自愈性能的影响[J].建筑材料学报,2022,25(10):1070-1076.
XU Hao, ZHANG Wenwu, HE Zhaoyi, et al. Influence of asphalt aging and regeneration on self-healing performance [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(10):1070-1076. (in Chinese)
- [18] 汪德才,郝培文,刘娜,等.乳化沥青冷再生混合料和易性指标及影响因素[J].北京工业大学学报,2016,42(6):919-925.
WANG Decai, HAO Peiwen, LIU Na, et al. Workability indicator for emulsified asphalt recycled mixture and influence factors [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(6):919-925. (in Chinese)
- [19] 任敏达,冯汉卿,丛林,等.沥青混合料饱水过程的强度演化规律及机理分析[J].建筑材料学报,2022,25(5):537-544.

- REN Minda, FENG Hanqin, CONG lin, et al. Strength evolution law and mechanism analysis of asphalt mixtures during water saturation[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(5): 537-544. (in Chinese)
- [20] 崔亚楠, 张强, 张翔. 沥青混合料复合小梁宏观与微观疲劳特性分析[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(1):85-90.
- CUI Yanan, ZHANG Qiang, ZHANG Xiang. Analysis of macroscopic and mesoscopic fatigue characteristics of asphalt mixture composite small beam[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(1):85-90. (in Chinese)
- [21] 张琛, 汪海年, 尤占平, 等. 橡胶沥青混合料和易性与压实特性的相关性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(1):202-208.
- ZHANG Chen, WANG Hainian, YOU Zhanping, et al. Correlation between workability and compaction property of rubber asphalt mixture [J]. Journal of Southeast University (Natural Science), 2016, 46(1):202-208. (in Chinese)

(上接第252页)

- [16] 刘凯, 王芳, 王选仓. 水泥混凝土导热性能影响因素及预估模型研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(6):771-777.
- LIU Kai, WANG Fang, WANG Xuancang. Influence factor of thermal conductivity of cement concrete and its prediction model [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15 (6): 771-777. (in Chinese)
- [17] 王卫仑, 刘鹏, 邢锋. 自然环境湿度变化与混凝土内湿度响应[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(12):5109-5116.
- WANG Weilun, LIU Peng, XING Feng. Change of natural environment humidity and response of humidity in concrete[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2013, 44 (12):5109-5116. (in Chinese)
- [18] 徐宁, 黄庆华, 张伟平, 等. 混凝土结构空间多尺度相对湿度值[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(1):35-41.
- XU Ning, HUANG Qinghua, ZHANG Weiping, et al. Spatial multi-scale relative humidity values for concrete structures[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2012, 34(1): 35-41. (in Chinese)
- [19] 梅明荣, 杨勇, 王山山, 等. 钢纤维混凝土热性能及其防裂作用的研究[J]. 水利学报, 2007, 38(增刊1):111-117.
- MEI Mingrong, YANG Yong, WANG Shanshan, et al. Study of thermal property of steel-fiber concrete and its crack-resistance capacity [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38 (Suppl 1): 111-117. (in Chinese)