

沥青混合料拌和和易性评价方法研究综述

董夫强¹, 祖元哲¹, 于新^{1,2*}, 陈贝¹, 柳林³

(1. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114;

3. 江苏现代路桥有限责任公司, 江苏 南京 210049)

摘要: 为明确沥青混合料拌和和易性的评价方法及研究现状, 通过查阅国内外相关研究文献, 对比分析各种不同的沥青混合料和易性评价方法、指标及研究结论, 系统归纳了不同沥青混合料和易性评价方法的适用性及评价效果, 并对拌和和易性的主要影响因素作出对比分析及综合评述。结果表明: 沥青混合料拌和和易性的评价方法, 大多是通过量化拌和过程中的阻力或能量消耗来构建相应的指标定量评价和易性, 也有部分方法是通过压实体积指标或工作效能作为间接验证来评价和易性。混合料中材料组成及拌和条件直接影响沥青混合料的和易性, 若提升和易性, 不仅能够改善混合料的成型及压实性能, 还能显著提升路面工程质量。不断优化和提升沥青混合料和易性评价方法以及相应评价指标, 能够使混合料和易性得到更加精确合理的评价, 这不仅有助于促进路面工程新技术的推广应用, 还可以降低能量消耗、减少污染物与碳排放等。

关键词: 道路工程; 沥青混合料; 拌和和易性; 评价方法

中图分类号: U414

文献标志码: A

Review of Evaluation Methods for Mixing Workability of Asphalt Mixture

DONG Fuqiang¹, ZU Yuanzhe¹, YU Xin^{1,2*}, CHEN Bei¹, LIU Lin³

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. School of Traffic & Transportation

Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 3. Jiangsu Xiandai Road &

Bridge Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210049, China)

Abstract: To clarify the evaluation methods and research status of mixing workability of asphalt mixture, by consulting relevant research literature in China and abroad and analyzing different evaluation methods, indexes, and research findings of the workability of asphalt mixture, the applicability and evaluation effects of different workability evaluation methods were systematically summarized, and the comparative analysis and comprehensive review were made on the main influencing factors of the mixing workability. The results show that in most evaluation methods for the mixing workability of asphalt mixture, corresponding indexes are constructed to quantitatively evaluate the workability by quantifying the resistance or energy consumption in the mixing process. Besides, in some other evaluation methods, workability can be evaluated by taking the compaction volume index or work effectiveness as indirect verification. The material composition and mixing conditions in the mixture directly affect the workability of the asphalt mixture. In addition, the improved workability can not only improve the forming and compaction performance of the mixture but also enhance the quality of road engineering. The improvement and enhancement of the evaluation method for the workability of asphalt mixture and the corresponding evaluation indexes can evaluate the workability of asphalt mixture more accurately and reasonably, which can promote the application of new road engineering technology and reduce energy consumption, pollutants, and carbon emissions.

Keywords: road engineering; asphalt mixture; mixing workability; evaluation method

收稿日期: 2024-07-06(修改稿)

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

作者简介: 董夫强, 男, 博士, 副教授. E-mail: dfq0107@126.com

*通信作者: 于新, 男, 博士, 教授, 博士生导师. E-mail: yuxin2009@hhu.edu.cn

0 引言

进入 21 世纪后,中国的公路建设速度及规模大幅提升。沥青路面因具有强度高、安全稳定等优势,在高等级公路建设中占比达 90% 以上^[1]。沥青混合料是由不同粒径的矿石集料与沥青胶结料组成的典型黏弹性材料,因其具有良好的路用性能而被广泛应用于路面工程^[2]。和易性是用于表征沥青混合料拌和、摊铺和压实难易特性的一项关键指标,本质上反映的是材料的均匀分布特性^[3]。沥青混合料和易性越好,意味着在拌和与摊铺过程中的阻力越小,越容易成型,满足需求的路面结构,从而保证沥青路面行驶的舒适与安全性。因此,深入研究沥青混合料的和易性评价方法及指标具有重要意义。

合理评价沥青混合料的拌和和易性能够保证路面的施工质量,因此国内外学者一直在展开相关的理论及技术研究。最初有关沥青混合料和易性的研究多借鉴于水泥混凝土的拌和和易性概念,通过材料流动性测试包括坍落度仪法及威布尔夫等方法评价水泥混凝土的和易性^[4-6]。目前业内规范以沥青胶结料的黏度-温度曲线间接评价沥青混合料和易性,缺乏统一定量评价混合料和易性的标准^[7-9]。为表征不同沥青混合料的和易性变化规律,研究人员陆续研发出拌和和易性测试设备,并提出不同的评价方法及指标,主要分为两类:① 拌和过程中,采用扭矩、拌和能量、黏温流变曲线等来评价混合料和易性。② 在压实过程中,使用力学指标(剪应力、垂直应力等)、体积指标(压实度、空隙率等)间接评价和验证混合料的拌和和易性。这些方法的应用为定量评价拌和和易性作出了巨大贡献。大量的研究已证实沥青混合料拌和和易性的主要影响因素可归纳为胶结料的类型及含量、集料种类及级配类型、拌和温度和速率等。对于常规热拌沥青混合料而言,在相同拌和条件下,拌和温度越高,混合料和易性自然越好,但过分追求拌和温度的提高对能源消耗与环境保护是不可取的^[10-13]。随着改性技术与温拌技术的大规模应用,在较低拌和温度下混合料的和易性也能达到较好的标准,但仍需要在传统方法的基础上对拌和及压实温度的确定进行改进。因此,为准确评价不同沥青混合料的和易性,需要对和易性评价方法及指标进一步探索完善。

本文基于国内外沥青混合料和易性评价方法的相关研究成果,聚焦混合料和易性评价过程中存在的关键问题,对相关沥青混合料和易性的研究现状进行整理综述。同时,本文将不同沥青混合料和易性的评价方法及指标进行了详细的对比分析,并总结了影响混合料和易性的关键因素。旨在通过这些研究成果的介绍与应用,完善沥青混合料和易性评价方法,促进沥青混合料和易性的评价与应用研究的进展,从而保障沥青路面的施工质量,实现能源的有效利用。

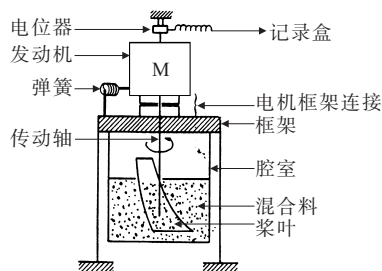
1 拌和和易性评价方法介绍

沥青混合料和易性本质上受材料均匀性影响,而保证材料均匀性的关键阶段是拌和过程^[14],因此将沥青混合料的拌和和易性测试作为分析和易性好坏及路用性能的关键。由于实验室条件下对摊铺与碾压的工程模拟研究相似性有限,且沥青混合料拌和过程中对和易性的研究较摊铺和碾压阶段更易开展,因此为贴切模拟工程实际,在实验室研究中主要使用混合料拌和设备 and 旋转压实设备测试和易性评价的关键指标,本部分将集中介绍目前沥青混合料和易性常用的评价方法。

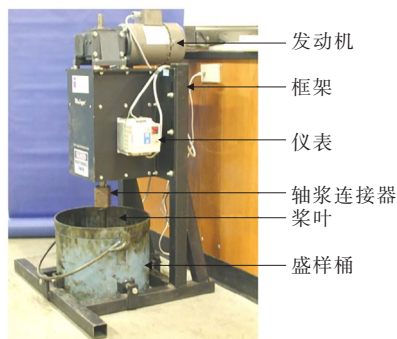
1.1 拌和扭矩

沥青混合料在拌和过程中搅拌桨对混合料有较大的剪切力,混合料将产生一个反向力矩,通过扭矩测试可测量并计算混合料的剪切应力,从而表征混合料拌和和易性的大小。国外对混合料和易性的相关研究起步较早,最早在 1978 年的 AAPT 上,Marvillet 等^[15]在报告中提出热拌沥青混合料和易性的概念,并描述了一种测试热拌沥青混合料和易性的设备原型。该设备主要结构组成包括由钢架固定的拌和容器、在容器上方的电动机及与其连接的搅拌桨、电动机上部钢架连接弹簧的电位器等。电动机带动搅拌桨以恒速拌和混合料,将沥青混合料的拌和阻力转化为电信号,再以扭矩值显示,扭矩值越大,代表和易性越差。在这项研究中,和易性指数被定义为拌和扭矩的倒数,研究结果显示热拌沥青混合料的和易性与胶结料黏度、集料含量与形貌直接相关。但由于使用电位器测试扭矩,致使扭矩值有较大的波动与误差。在此之后 NACT 的 Gudimettla 等^[16]与 Instrotek, Inc 公司协同开发了测试热拌沥青混合料

和易性的设备,通过测试混合料在定速拌和条件下的扭矩值评价和易性,不同的是该研究中对设备的拌和桨形状及剪切空间模型进行了对比分析,并改进了拌和速率与扭矩测量的功能。在使用5种类型的热拌沥青混合料验证设备的实际可行性后,试验结果表明:在进行相应误差处理后,使用扭矩评价和易性是可行的,拌和扭矩值越大,混合料和易性越差。两种沥青混合料和易性测试仪如图1所示。



(a) Marvillet



(b) Gudimettla

图1 和易性测试仪示意图

Figure 1 Workability meter

随着再生沥青混合料在国外的大规模推广与应用,针对其和易性的研究也逐渐展开。Tao等^[17]为研究不同温拌剂对100%掺量再生RAP沥青混合料和易性及力学性能的影响,使用伍斯特理工学院路面研究实验室制造的扭矩测试仪对混合料和易性进行评估。该装置由拌和桨、拌和桶及扭力扳手组成,使用扭力扳手代替电动机旋转拌和桨,在Gudimettla等^[16]的研究基础上,测试在不同拌和时间内超过3次的旋转扭矩值,并使用平均扭矩倒数的千倍值作为和易性评价指数;Mogawer等^[18]研究温拌剂掺量对再生沥青混合料和易性与耐久性的影响,使用麻省大学达特茅斯高速公路可持续发展研究中心开发沥青混合料和易性测试装置(AMD),记录再生沥青混合料的拌和扭矩。在该研究中,为了准确测试扭矩

值,使用固定扭矩测试传感器,与电位器或应变计相比,其可获得更为可靠的试验值,遗憾的是该设备尽管可以测试温度,但在拌和过程中,并未配备温度控制系统以确保保温效果;Bennert等^[19]使用沥青混合料和易性测试装置(AMD)对PG 76-22胶结料和不同类型及掺量的温拌剂的混合料在不同温度下进行扭矩测试,分析扭矩-温度模拟曲线发现,扭矩值的转折点在110.0~115.6℃时出现。研究中使用马歇尔压实及旋转压实试验对压实率进行测试,侧面验证和易性试验结果,发现随着Rediset和Sasobit温拌添加剂用量的增加,沥青混合料的和易性和压实性都有所提高,其中掺量2%的Rediset和0.6%的Evotherm 3G的沥青混合料和易性较好。Tao等^[17]和Bennert等^[19]使用的两种沥青混合料和易性测试仪如图2所示。

(a) Tao等^[17](b) Bennert等^[19]

图2 和易性测试仪示意图

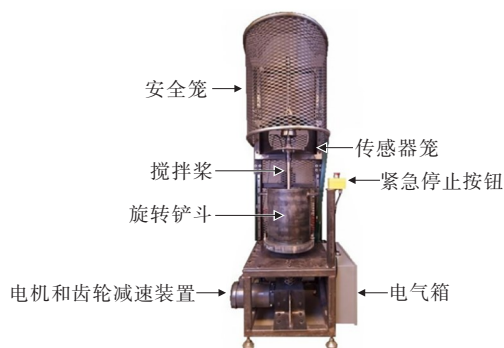
Figure 2 Workability meter

随着沥青混合料和易性研究的不断开展,为降低和易性测试值的误差,许多学者针对和易性测试仪及数据处理方法进行改进与完善。West等^[20]使用NCAT的和易性测试装置测试改性沥青混合料的拌和扭矩。为去除仪器噪声的影响,对原始扭矩进行滤波,并对滤波后的扭矩与温度进行最小二乘回归拟合。通过分析指定温度下的扭矩值,发现重复试验的扭矩值差异较明显,差异范围为10%~15%,这可能是相同样品在试验过程中加热程序的改变所导致。研究结果显示:对于使用不同黏结剂的沥青混合料,所测试的扭矩数据并不能明确分析出和易性与温度的关系。Khalil等^[21]开发了一种利用温度调节器和旋转扭矩传感器测试热拌沥青混合料和易性和拌和温度的装置,换能器可以与驱动台或笔记本系统连接,实现扭矩数字数据输出与显示。研究中,

设计了7种不同类型的混合料,并用3种不同结构类型的搅拌桨在5种转速下进行和易性测试,试验结果显示:三叶平交式拌和桨的拌和扭矩值最大,优选为和易性测试器配件,但和易性测试结果适用于研究中使用的AC-14沥青混合料,对其他类型混合料的适用性有待研究。Ali等^[22]利用阿克伦大学开发的和易性设备,研究热拌和温拌泡沫沥青混合料的和易性,该装置在之前研究者的基础上完善了诸多功能,包括安装了变速驱动器、扭矩及温度传感器、数据采集系统、安全笼及紧急停止系统等。研究中,将拌和温度由150℃下降至100℃的时间作为测试时长,并使用指数模型验证了温度对扭矩的影响。研究结果显示:泡沫温拌沥青混合料的和易性,明显优于热拌沥青混合料,但这两种沥青混合料的和易性均受胶结料类型、集料类型及最大公称粒径等因素的影响。其中,集料类型对温拌沥青混合料的作用效果不同于热拌沥青混合料。Khalil等^[21]和Ali等^[22]改进后的和易性测试仪如图3所示。



(a) Khalil等改进后的测试仪^[21]



(b) Ali等改进后的测试仪^[22]

图3 改进后的和易性测试仪示意图

Figure 3 Improved workability meter

中国对沥青混合料和易性相关的研究起步较

迟,但仍取得了一系列研究成果。为确定拌和扭矩法在沥青混合料和易性研究中的适用范围,研究者对不同类型的混合料进行了和易性测试。侯曙光^[23]最早使用自行研发的和易性测试仪测试了热拌和温拌沥青混合料的拌和扭矩,并将拌和扭矩的倒数作为和易性评价指数,研究发现沥青混合料和易性受拌和转速、温度、混合料公称最大粒径及胶结料类型等因素的影响;汪海年等^[24]借助自行开发的沥青混合料和易性测试机测试不同沥青混合料的扭矩,使用拌和稳定后的单值扭矩作为和易性评价指标,发现不同拌和条件对和易性的影响效果不同,其中,主要影响和易性的因素为沥青胶结料特性、混合料温度及集料类型等;汪德才等^[25]为研究乳化沥青冷再生混合料和易性,使用扭力扳手多次测试的平均扭矩值作为和易性评价指标,通过反算水泥初凝时间和压实体积参数验证了扭矩指标的合理性。研究结果显示RAP掺量和拌和用水量对冷再生混合料和易性的影响显著,而乳化沥青特性的影响作用较小。其中,RAP掺量越多,混合料和易性越差,使用合适的用水量和粒径细的乳化沥青能有效改善混合料的和易性;郭平等^[26]为研究Sasobit温拌沥青混合料的和易性,使用可以调节转速的沥青混合料和易性测试仪采集拌和扭矩,在不同拌和温度和转速下测定温拌沥青混合料的和易性大小,研究发现在拌和频率为30 Hz时混合料的和易性最佳,且Sasobit温拌沥青混合料的和易性与热拌沥青混合料拌和温度降低30℃时的和易性相似;张志强等^[27]提出对于纤维高模量改性沥青混合料,由于掺入不同类型及含量的纤维,其和易性必然不同。通过和易性试验仪测试拌和扭矩,研究发现改变纤维的掺量及长度会影响其在混合料中加筋和分散结构,改变沥青的增黏作用等,从而使得混合料和易性发生变化;张琛等^[28]使用扭力扳手测试的扭矩值作为和易性指标,评价橡胶热再生沥青混合料和易性,主要针对不同拌和温度及级配条件的混合料和易性进行测试。研究发现随着拌和温度的升高,混合料和易性变好,当拌和温度相同时,AC-16级配类型的混合料和易性要差于AC-13级配;张庆等^[29]使用稀浆混合料拌和试验仪对改性乳化沥青混合料和易性进行测试,该拌和仪的工作原理也是通过采集扭矩反映乳化沥青破乳过程。但不同于常规沥青混合料,研究中使用扭矩达

到峰值时的拌和时间作为和易性评价指标,拌和时间越长说明混合料和易性越好。

沥青混合料的生产温度会改变沥青涂层的厚度,影响路面的压实程度和使用寿命,通过分析混合料和易性的变化规律,进而确定生产温度。张争奇等^[30]为研究改性沥青混合料的拌和及压实温度,在美国沥青混合料和易性试验仪的基础上开发和易性试验仪。研究中,采用定速拌和的方式,测定SBS改性沥青混合料在不同温度下的实时扭矩,并通过扭矩与温度的拟合曲线确定最佳拌和与压实温度;王春等^[10]为研究温拌沥青混合料的生产温度,使用混合料和易性测试仪确定拌和扭矩范围,研究结果显示所有温拌沥青混合料的和易性均好于热拌沥青混合料,通过扭矩-温度曲线回归分析,确定温拌沥青混合料的生产温度至少可降低16℃,说明扭矩-温度法确定的生产温度范围是合理的。扭矩-温度法的使用,进一步增强了对改性沥青混合料和易性的验证,同时为工程实际中快速确定施工温度提供了帮助^[31-33]。

压实性能是反映沥青混合料和易性的关键指标,拌和和易性的优劣对混合料后续压实性能的变化易产生影响,因此将拌和过程的和易性测试与压实性能测试进行关联分析是必要的。张翠红等^[34]使用和易性测试设备及旋转压实仪分别测定水泥乳化沥青混合料的拌和扭矩和压实性能,使用实时扭矩作为和易性的评价指标,研究发现不同初压次数对混合料摊铺和易性的影响效果具有差异性;张琛等^[35]、张强等^[36]研究发现对于低温地区橡胶沥青混合料和易性与压实特性而言,拌和温度、胶粉细度及掺量对橡胶沥青混合料和易性的影响作用不同,其中胶粉掺量对橡胶沥青混合料和易性与压实特性之间相关性的影响更显著,并且和易性越好的混合料其压实性能也越好。由拌和扭矩量化评价沥青混合料的和易性意义毋庸置疑,在整体的研究进程中,相较于初期研究中使用电位器或扭力扳手等方式采集扭矩,后续研究中使用扭矩测试仪可大幅度提升数据的精度及准确性。但在试验过程中由于拌和速率的波动以及扭矩测试仪的不同选择,造成测试结果仍存在一定的波动与离散,因此针对拌和扭矩法的使用及优化方法仍需进一步探索。

1.2 拌和能量

为积极响应国家绿色减排政策的号召,需要严格控制沥青混合料生产过程中的能量消耗。在相同的生产条件下,保证混合料和易性达到要求的同时应尽可能降低能源消耗。针对使用拌和扭矩法存在的不足之处,部分研究者从电量学角度出发,提出通过拌和电流进而表征拌和能量的消耗程度,评价混合料的和易性。刘黎萍等^[37]提出从室内试验中拌和桨做功与电路中电流成正比这一原理出发,提出使用测试电流值代替扭矩评价沥青混合料的和易性,但这一测试方法的前提是保持电压不变;于新等^[38]发明了一种基于拌和电流的和易性测试装置,通过与变速电动机串联的电流表测试电流值,检测不同拌和温度下基质沥青SUP13混合料和SBS改性沥青混合料的和易性,结果表明:无论是基质沥青或改性沥青,随着混合料温度升高,拌和电流值减小,和易性均得到改善。借助拌和电流评价沥青混合料和易性的思路较为新颖,在一定程度上避免了由于测试拌和扭矩的不稳定性造成的误差,但因为电路中的电流与外界输入电压相关,试验过程中几乎无法维持输入电压不变,因此使用单一电流值评价混合料的和易性显然不够科学合理。

沥青混合料和易性不仅与沥青黏结作用和骨料屈服作用相关,还受拌和速率的影响,在目前多采用定速拌和扭矩评价和易性的现状下,延西利等^[39]在现有拌和设备基础上,加装了拌和速率控制和电功率测试装置。通过变速拌和功率测试,对不同沥青混合料建立拌和功率-拌和速率图,并建立拌和流变模型,定量分析拌和和易性指数。通过在5个温度下对不同沥青种类、不同油石比和不同级配类型的沥青混合料进行变速拌和试验,绘制了相应拌和流变图,并将流变特性分别表示为式(1)~(3)。研究发现:沥青混合料的拌和流变特性服从线性黏塑性的宾汉流变模型,并在提出的两个拌和流动参数(拌和塑限 f 和拌和黏度 λ)的基础上,将和易性指数进行图式分析,如图4所示。最终定义和易性指数 I_e 为混合料拌和流动直线对拌和速率之面积 A ,见式(4)。研究结果表明:主要影响沥青混合料和易性的因素为拌和温度、沥青种类、沥青用量和级配类型,试验中拌和温度越低、沥青越黏稠、沥青用量越大、集料粒径越粗,沥青混合料越难以拌和,和易性就越差。

$$P(b, T) = F(b) + \lambda(b, T) \cdot V \quad (1)$$

$$P(\omega, T) = F(\omega) + \lambda(\omega, T) \cdot V \quad (2)$$

$$P(a, T) = F(a) + \lambda(T) \cdot V \quad (3)$$

式中: P 为拌和功率; V 为拌和速率; F 为直线截距; λ 为直线斜率; b 为沥青种类; ω 为沥青用量(油石比); a 为混合料的级配类型; T 为拌和温度。

$$I_{\omega} = \frac{100}{A(F, \lambda, V)} \quad (4)$$

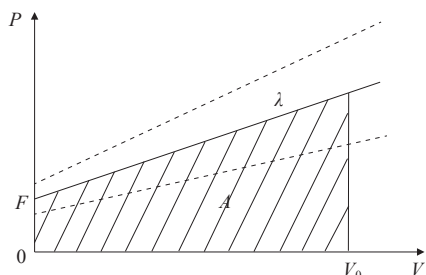


图4 和易性指数图

Figure 4 Workability index

颜建春等^[40]为研究配合比设计参数对沥青混合料拌和和易性的影响,采用三相电检测系统对拌和功率进行采集。当拌和速度相同时,拌和功率越大,混合料和易性越差。同时发现可以通过最佳沥青用量和关键筛孔通过率改善沥青混合料的和易性;刘聂扬子等^[41]使用拌和功率确定改性沥青混合料的拌和温度,但由于混合料非均匀性和拌和仪器的影响,拌和功率有较大波动,需要重复性研究以提高试验结果的准确性。相较于拌和扭矩法的应用,通过拌和电流或功率定量表征沥青混合料的和易性,在一定程度上减小了测试误差及仪器本身的影响,但由于电流或功率的测试对测试条件较为严苛,较易受到外界环境的影响且测试仪器相对昂贵,因此,虽难于大规模推广应用,但仍为沥青混合料和易性的测试与评价提供了合理可行的思路。

1.3 材料黏度

为弱化外部条件的影响,部分学者通过研究沥青混合料拌和过程的材料黏度或沥青集料间的力学作用进而分析和易性的变化。胶浆形态与混合料形态的变化是沥青混合料和易性与基本性能变化的基础。Hesami等^[42]为研究拌和顺序对沥青混合料和易性的影响,使用序贯拌和方法(先将骨料与沥青拌和,再依次加入填料与细骨料,最终拌和)与传统方

法进行对比。研究中基于沥青薄膜理论涂层厚度,使用摩擦系数对两种拌和顺序的混合料和易性进行量化分析,见式(5)。

$$\mu = \frac{\eta \cdot V \cdot A}{h \cdot N} \quad (5)$$

式中: μ 为摩擦系数; η 为液体黏度; V 为相对速度; A 为接触面积; h 为集料表面之间的距离; N 为接触点上的横向荷载。

使用序贯拌和方法制备的沥青混合料,沥青会率先裹附骨料形成沥青膜,填料在拌和时会立即黏附沥青上,这一现象被称作内聚拌和,如图5所示。研究结果表明:当两种拌和方法的拌和速率与接触面积相同时,使用序贯拌和方式的混合料摩擦系数更小,相较于传统沥青混合料拌和方法更易拌和,和易性更好。使用X射线扫描的3D图像结果也表明序贯拌和法制备的沥青混合料中材料空隙分布均匀,意味着混合料更易压实。

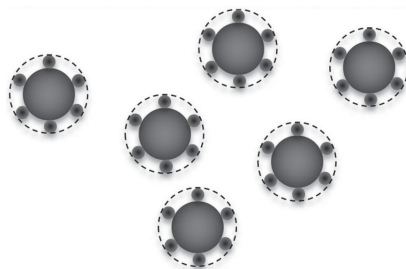


图5 填料颗粒黏结在沥青裹附的骨料颗粒

Figure 5 Filler particles bonded to asphalt-coated aggregate particles

不同的填料会使沥青混合料和易性产生差异,这是由于沥青胶浆的黏度是决定和易性的重要因素。Mongkol等^[43]为研究甘蔗渣与椰子泥炭作为填料对混合料和易性的影响,将不同浓度填料下胶浆的旋转黏度作为评价混合料和易性的关键指标,研究发现低浓度填料下的沥青胶浆具有牛顿力学行为,填料体积含量为20%时椰泥和甘蔗渣填料的沥青胶浆黏度与含石灰石填料的沥青胶浆黏度相似,高于含花岗岩填料的沥青胶浆黏度;王笑凤等^[44]为研究橡胶粉纤维沥青混合料的施工和易性,综合分析混合料离析度、拌和均匀性以及压实特性的关系,提出和易性控制函数综合评价和易性,见式(6)。

$$W = f(s, u, c) \quad (6)$$

式中: W 为施工和易性; s 为混合料离析度; u 为混合

料拌和均匀性; c 为混合料压实特性。

各组分材料的分布均匀性越好,混合料的宏观强度越好,同时和易性也将得到保证。乳化沥青混合料因其具有环境污染小和良好的和易性等优点,而作为一种新型材料被寄予厚望。但由于材料组成的特殊性,针对和易性的评价不同于普通沥青混合料;王海林等^[45]使用无侧限抗压强度试验综合评价乳化沥青混合料的和易性,将初始无侧限抗压强度值作为和易性评价指标;牛维宏等^[46]通过破乳时间和贯入力测试评价水泥乳化沥青混合料和易性。研究发现水泥掺量的增加使得混合料破乳时间缩短,增大集料间黏结力,导致混合料和易性变差,而油石比与掺水量的增加可以使破乳时间延长并减小集料间的黏结碰撞,改善混合料的和易性。

1.4 压实指标

沥青混合料的拌和和易性越好,混合料中材料的分布更均匀^[47]。在使用较少压实功的条件下便能达到需求压实度,压实后的混合料更加密实进而保证工程质量。通过混合料压实成型的关键指标可以有效反映压实的难易程度、材料的含量以及黏结力等重要参数,对控制拌和工艺、提升路面质量具有重要意义。Roozbahany等^[47]设计了压实流动试验装置,以模拟压实初期材料的流动。通过液压试验机对方形模具内的混合料施加垂直荷载,记录压实荷载及混合料流动隆起位移。研究结果表明:混合料级配类型及黏结剂含量对早期压实和易性的影响较大,CFT(Car Tracking Test)可以作为调整沥青混合料特性(如级配或黏结剂含量)的一种方法;杨跃焕等^[48]通过旋转剪切试验机测定混合料压实成型的多项指标,提出使用达到8%空隙率的旋转压实次数作为和易性评价的关键指标,达到目标空隙率的旋转压实次数越少,表明混合料的和易性越好。研究结果显示温拌沥青混合料和易性要优于热拌沥青混合料;张琛等^[28]为分析压实特性与和易性的关联,通过SGC试验结果分析压实特性评价指标 k_1 ,计算过程如式(7)。

$$k_1 = \frac{G_2 - G_1}{\ln N_{des} - \ln N_{ini}} \quad (7)$$

式中: k_1 为压实特性评价指标; G_1 、 G_2 分别为初始压实次数和设计压实次数下的压实度; N_{des} 为设计压实次数; N_{ini} 为初始压实次数。

k_1 表示混合料的可压实速率,数值越大说明沥青混合料压实和易性越好。

何亮等^[49]研究提出通过旋转压实试验研究不同温拌剂对橡胶沥青混合料和易性的影响,通过旋转压实体积参数(空隙率、矿料间隙率和沥青饱和度等)和成型试件图像的分析,研究结果显示不同温拌剂对橡胶沥青混合料的和易性均有所改善,不仅在一定程度上降低了施工温度,更重要的是明显改善了橡胶沥青在低温条件下的裹覆性;师航祺^[50]基于剪切压实仪对沥青混合料压实成型周期中空隙率及剪应力进行测试,在不同的指标组合分析后提出用剪应力变化率首次大于1%以上温度对应的剪应力平均值作为和易性评价指标。也有部分研究者通过空隙率、交通密实指数等分析温拌沥青混合料和易性及压实特性的变化规律^[51-53],通过对压实指标进行分析,研究人员总结出拌和和易性与压实性能的关系,但由于整体测试过程的延滞,评价混合料拌和和易性的稳定性仍需进一步探索。

除上文提到的评价方法外,也有部分研究者为了减小试验外部因素的影响,通过建立材料模型、使用仿真模拟等手段对沥青混合料的实际拌和过程进行分析研究,但由于在不同沥青混合料中适用性相对较差及方法应用较难等问题,仍需要深入的研究与优化。沥青混合料拌和和易性的主要评价方法如表1所示。

1.5 评价方法对比

(1) 拌和扭矩和拌和能量等方法(表1)本质上是为了量化拌和过程中的阻力,分别由直接表征受力的扭矩及拌和输出能量进行评价混合料的拌和和易性,因而它们之间存在相似之处:① 目的是测试拌和的难易程度以评价和易性的大小;② 在拌和过程中多采用定速拌和的方式,以提高记录数据的精度;③ 由于和易性测试装置的特殊性,能够适用于不同类型的沥青混合料。

拌和扭矩法反映了沥青混合料在拌和过程中的阻力大小,是目前实验室内评价沥青混合料拌和和易性最为接近实际使用条件的方法之一。相比于其他方法,由于该方法具有测试方法简易、数据直观性好以及工程应用前景好等优点,因此笔者认为在未来拌和扭矩法仍将对混合料和易性的主要评价方法,而对于拌和扭矩法的深入优化与应用,将更多集

表 1 国内外沥青混合料拌和和易性的主要评价方法

Table 1 Main evaluation methods for mixing workability of asphalt mixture in China and abroad

序号	研究人员	评价方法	主要研究内容	备注
1	Marvillet 等 ^[15] 、Gudimettla 等 ^[16]	拌和单值扭矩	热拌沥青混合料	拌和扭矩法:测试简易、指标直观等;但扭矩值有波动性,需多次重复验证等
2	Tao 等 ^[17] 、Mogawer 等 ^[18]	拌和平均扭矩	再生沥青混合料	
3	Bennert 等 ^[19] 、Ali 等 ^[22]	拌和全过程扭矩	温拌沥青混合料	
4	West 等 ^[20] 、Khalil 等 ^[21]	拌和单值扭矩	改性沥青混合料	
5	侯曙光 ^[23] 、汪海年等 ^[24] 、郭平等 ^[26] 、王春 ^[10] 、张琛等 ^[35] 、张翠红等 ^[34]	拌和单值扭矩	热拌及温拌沥青混合料等	
6	刘黎萍等 ^[37] 、于新等 ^[38]	拌和电流	热拌沥青混合料	拌和能量法:数据精确性高、指标离散性小;但测试仪器较精密,对外界测试条件要求高等
7	延西利等 ^[39] 、颜建春等 ^[40] 、刘聂场子等 ^[41]	拌和功率	热拌沥青混合料	
8	Hesami 等 ^[42]	拌和摩擦力	热拌沥青混合料	材料黏度法:受外界测试条件影响较小;但材料的性能对测试结果产生较大的影响
9	Mongkol 等 ^[43]	胶浆的黏度	热拌沥青混合料	
10	王海林等 ^[45] 、牛维宏等 ^[46]	无侧限抗压强度、破乳时间等	乳化沥青混合料	
11	杨跃焕等 ^[48] 、何亮等 ^[49]	压实次数、压实做工、压实孔隙率等指标	热拌及温拌沥青混合料	压实指标:可直接验证和易性的好坏,但较难全面表征和易性的变化规律

中在扭矩数据采集后的误差处理方法及评价指标归纳分析等,这将是未来对混合料和易性评价研究的重要方向。拌和功率法的优势在于可直接测试沥青混合料在拌和过程中所需的能量,相比于拌和扭矩法其采集数据的稳定性更好,但由于测试仪器较昂贵且精密,短期内较难在室内研究及工程实践中大规模推广应用。无论是扭矩法,还是能量法,测试仪器均需要一定的养护维修成本,并且在许多研究中发现试验条件(例如温度和转速)对测试结果的影响较大,在一定程度上限制了研究范围;其次,这些方法更适用于常规沥青混合料,而对于一些特殊沥青混合料的适用性有待研究;此外,通常由于缺少标准的流程及规范,试验人员的具体操作对数据结果有一定影响。因此,在使用这些方法时,研究人员经常对采集数据进行分析处理,进而提出合理的指标,评价不同沥青混合料的拌和和易性。

(2) 由混合料黏度与压实指标评价沥青混合料的和易性,本质上由混合料中沥青与集料的力学作用与材料组成出发,反映该混合料的流变性质和密实程度,它们的共同点包括:① 黏度和压实指标都能够反映沥青混合料的流变特性;② 反映了沥青混合料中空隙结构的状态。较高的黏度或更大的压实度通常意

味着混合料中空隙较少,从而可能表明混合料拌和成型后结构更致密,强度更高,但同时可能会导致混合料的抗裂性更差;③ 黏度和压实指标都受到温度和拌和条件等因素的影响,因此需要在相同的条件下进行比较才能得到有效的评价结果。因此,笔者认为,单独由黏温曲线或混合料黏度及压实指标等均较难充分表征混合料和易性的好坏,常常需要与其他参数(如弹性模量、抗剪强度等)综合考虑,才能全面评价沥青混合料的和易性。在本节的最后,根据各文献的研究结果及工程应用实际情况,选择数据精确性、数据可靠性、数据可复现性及工程应用前景因素等确定打分权重,最终评分结果仅代表笔者本人对该方法的推荐性以及未来研究的潜力,各种方法的综合评分标准及细则、最终评分结果见表 2、3。

表 2 推荐评分标准及细则

Table 2 Recommended scoring criteria and rules

评分细则	评分权重	评分标准		
		一般	较好	优秀
数据精确性	25	10	15	25
数据可靠性	20	10	15	20
数据波动性	20	10	15	20
数据可重复性	15	5	10	15
工程应用性	20	10	15	20

表 3 评价方法对比

Table 3 Comparison of evaluation methods

评价方法	评价指标	适用范围	推荐综合评分(100分制)
拌和扭矩法	拌和稳定后单点扭矩	各种类型的沥青混合料均适用	65(15、15、10、10、15)
	拌和稳定扭矩的倒数		70(15、15、15、10、15)
	多个扭矩的平均值		75(15、20、15、10、15)
拌和能量法	拌和稳定电流	主要适用于普通未改性的热拌沥青混合料	65(15、15、15、10、10)
	拌和全过程的功率		75(15、20、15、10、15)
材料黏度法	沥青或沥青胶砂浆的黏度		60(15、15、10、10、10)
	沥青黏温曲线的斜率		60(10、15、10、10、15)
	沥青胶结料的动态剪切模量		65(15、15、10、10、15)
压实指标法	达到目标空隙率的旋转压实次数		70(15、15、15、10、15)
	可压实速率	各种类型的沥青混合料均适用	65(15、10、10、15、15)
	剪应力平均值		70(15、20、10、10、15)
	空隙率		65(15、15、10、10、15)

2 拌和和易性主要影响因素

在施工温度范围内,沥青混合料具有黏塑性,而随着荷载作用次数和时间的增多,混合料更趋近于塑性体^[54]。沥青混合料的黏性在其变形流动过程中起主要作用,温度升高黏性逐渐增强,弹性逐渐失

效,温度降低则相反。在长期对沥青混合料的材料组成及施工研究中,沥青混合料和易性的主要影响因素如表 4 所示。内因为沥青混合料自身的材料组成,主要包括沥青性能及用量、集料性质、级配类型等。外因为影响混合料和易性测试的外部条件,主要包括拌和温度、拌和速度、和易性测试仪类型等。

表 4 沥青混合料拌和和易性的主要影响因素

Table 4 Main influencing factors of mixing workability of asphalt mixture

分类	主要影响因素	性能及条件等	和易性变化趋势
内因	沥青	黏度	随着沥青黏度的增大,混合料和易性逐渐变差
		流变性能	随着沥青黏性的增大,或弹性变小,混合料和易性变差
		油石比	当沥青用量由小于最佳沥青用量逐渐增多时,混合料和易性先变好再变差
	沥青胶浆	黏度	胶浆黏度越大,和易性越差
		流变性能	胶浆黏性越大,和易性越差
	集料	球形度	集料几何形貌越接近球形,和易性越好
		棱角性	集料棱角性越好,和易性越差
		表面纹理	集料表观越粗糙,和易性越差
外因	混合料的级配组成	最大公称粒径	最大公称粒径越大,单纯粗集料或细集料的含量越多,和易性越差
	拌和条件	拌和温度	拌和温度越低,混合料和易性越差
		拌和速率	拌和速率越快,和易性越差
	和易性测试装置	扭矩传感器	精度及测试范围越好,测试和易性结果越好
		扭力扳手	测试速度越趋近于匀速,测试和易性结果越好
		功率采集仪	精度及测试环境越好,测试和易性结果越好
		电流传感器	精度及测试环境越好,测试和易性结果越好

作为沥青混合料黏性成分的主要组成,沥青基本性能对混合料和易性的影响十分显著。由于油源、施工等生产步骤的不同,每种沥青的基本性能差

异较大。在长期的研究中发现沥青的黏度及用量对混合料的和易性起重要作用,并且其特殊的温度敏感性与混合料的路用性能有密切关系^[55]。沥青混合

料拌和和易性主要受沥青与集料之间的黏结裹附作用及集料颗粒之间的嵌挤摩擦作用影响。已有的研究表明使用较高黏度沥青制备的混合料,拌和与压实过程中材料流动更困难,和易性越差^[37]。沥青黏性作用发挥越多,混合料在拌和过程中的阻滞作用就越大,因此和易性变差。当沥青用量在最佳油石比下,混合料的和易性最好,而沥青用量过多或过少都会对混合料和易性产生衰减作用。过量沥青的加入,不仅增加了沥青砂浆胶结料的比例,使其与集料的黏结力增强,同时沥青自身黏结性也在逐渐发挥,还使混合料的拌和及压实难度增大,最终表现为和易性变差。而当沥青用量较小时,沥青不能充分发挥润滑作用与骨料及填料黏结,混合料的和易性也会变差^[38]。

集料在混合料骨架组成及性能发挥中起关键作用。汪海年等^[24]研究显示在沥青混合料中使用形貌圆润的集料时其和易性相对较好,而使用棱角复杂的集料时混合料和易性相对较差。此外集料颗粒整体越接近球形,表面纹理越光滑,其在拌和过程中的相互摩擦作用更小,混合料就越容易拌和,沥青也可以更好地与集料相裹附。集料的最大公称粒径越大,颗粒间的咬合嵌挤摩擦力相对越强,会给拌和与压实流动造成更大阻力,使和易性降低。粗级配的沥青混合料和易性要好于细级配沥青混合料,不过这种差距在温度升高后会逐渐缩减^[56]。沥青混合料级配设计中大小集料尺径要均匀合理,若缺乏中间粒径,混合料易分层离析,细集料含量少,沥青不易均匀地裹附在粗集料表面,细集料太多,拌和阻力变大,影响混合料的和易性^[20]。

试验温度在沥青混合料和易性的影响外因中最为突出。这是由于在其他条件相同时,拌和和压实温度的变化,改变沥青及混合料的黏度,使得拌和及压实的和易性产生差异^[57]。对于热拌沥青混合料而言,在拌和温度升高的过程中,混合料的拌和黏度是由快变慢的降低,和易性也是先快后慢的增长。对于温拌沥青混合料而言,在较低的试验温度下,混合料的和易性也可达到与热拌沥青混合料相似的和易性^[28]。无论是改性还是非改性沥青,盲目地升高拌和与压实温度并不能提升混合料的和易性,只有在合适的试验温度范围下,沥青与集料才能充分实现黏结裹附,混合料和易性才最好。

对于沥青混合料拌和和易性而言,拌和速度也会改变其大小。通过不同拌和速率对混合料进行和易性测试,发现随着拌和速率的增大,和易性的变化趋势由好变差。这是由于在较小拌和速度下,需要克服内在塑性极限及阻力,和易性相对较差,当拌和速率较高时,将产生较大的切应力,并引起沥青分子的拉伸、剪切和摩擦力的变化,从而影响了沥青混合料的流变性能,导致混合料的和易性变差^[36]。此外,随着拌和速率的增加,沥青混合料中的空气含量也会逐渐上升,进一步加剧了混合料的不均匀性,从而影响了混合料的和易性。拌和设备及压实设备的类型对混合料和易性的测试结果也会产生不同的影响,其中合适的混合料和易性测试仪对和易性的评价效果有很大的优化^[58]。由于仪器精度及选择的不同,无论是简易的扭力扳手、扭矩传感器,还是电量变送器,在测试的过程中数据的记录及传输均会有不同程度的波动,这对和易性的测试结果也会产生不同影响,就当前研究现状而言,针对和易性测试仪的功能仍需进一步改进。

3 结 论

(1) 沥青混合料拌和和易性的直接评价方法多基于量化拌和阻力或拌和能量消耗,间接评价方法多通过材料黏度或混合料体积指标验证评价混合料的和易性,已有的评价方法及指标的适用性与准确性会受到外部测试条件及主观测试方法的限制,需合理选择。

(2) 沥青混合料拌和和易性的主要影响因素可分为:内部因素,如沥青黏度及用量、沥青胶浆、集料表观形貌及级配组成等,内部因素主要通过改变沥青的黏度、沥青与集料黏结裹附作用或集料颗粒间摩擦力等直接影响混合料的拌和和易性;外部因素,如拌和速度、拌和温度及拌和时间等,主要是由于拌和外部条件的改变影响沥青的黏度或材料分布均匀性间接影响拌和和易性。

(3) 目前拌和扭矩法仍是沥青混合料和易性评价方法中研究应用次数最多、测试设备易安装、数据易采集的主流方法,但因其数据采集中易受仪器整体刚度及试验操作顺序的影响,结果仍存在一定波动。未来的研究方向应尽量在拌和扭矩法的基础上,对扭矩数据进行多种波动及误差处理,并提出相

应的评价指标全面分析沥青混合料的拌和和易性,以满足道路建设对沥青混合料质量和安全性、环保性的高要求。

参考文献:

References:

- [1] 《中国公路学报》编辑部.中国路面工程学术研究综述·2020[J].中国公路学报,2020,33(10):1-66.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's pavement engineering research·2020[J].China Journal of Highway and Transport, 2020,33(10):1-66.
- [2] 张肖宁,尹应梅,邹桂莲.不同空隙率沥青混合料的粘弹性性能[J].中国公路学报,2010,23(4):1-7.
ZHANG Xiaoning, YIN Yingmei, ZOU Guilian. Viscoelastic performance of asphalt mixture with different void contents[J].China Journal of Highway and Transport, 2010,23(4):1-7.
- [3] 唐炯,刘建超,谢淑琴.沥青混合料工作性路用性能的探索[J].铁道建筑,2007,47(9):92-93.
TANG Xian, LIU Jianchao, XIE Shuqin. Exploration on workability of asphalt mixtures for road use[J]. Railway Engineering, 2007,47(9):92-93.
- [4] 董满生,余志平,鹿婧,等.考虑温度效应的沥青混合料粘弹性力学模型[J].固体力学学报,2014,35(增刊1):165-172.
DONG Mansheng, YU Zhiping, LU Jing, et al. Viscoelastic constitutive model of asphalt mixtures considering temperature effect[J].Chinese Journal of Solid Mechanics, 2014,35(sup 1):165-172.
- [5] 权磊,田波,何哲,等.低坍落度路面混凝土工作性评价指标研究[J].公路交通科技,2020,37(5):11-19.
QUAN Lei, TIAN Bo, HE Zhe, et al. Study on evaluation indicators for workability of low-slump pavement concrete [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020,37(5):11-19.
- [6] 胡师杰,权磊,凌海宇,等.液化剂对混凝土工作性能影响的试验研究[J].混凝土,2018(9):100-102.
HU Shijie, QUAN Lei, LING Haiyu, et al. Research on the influence of the concrete working performance with the liquifier[J].Concrete, 2018(9):100-102.
- [7] 李淑萍,李亚飞,陈景,等.胶粉与RET复合SBS改性沥青老化前后流变特性及其混合料性能研究[J].公路工程, 2017,42(3):112-120,158.
- [8] SHARMA A, RANSINCHUNG G D, KUMAR P, et al. Design mixture of RAP-HMA pavements:A review[J].IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021,1075(1):012025.
- [9] SHENOY A. Determination of the temperature for mixing aggregates with polymer-modified asphalts[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2001,2(1): 33-47.
- [10] 王春,郝培文.改性沥青混合料拌和压实温度确定方法[J].公路,2020,65(8):32-36.
WANG Chun, HAO Peiwen. Determination of the mixing and compaction temperature of modified-asphalt mixture [J]. Highway, 2020,65(8):32-36.
- [11] 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 Edition), 2019,39(3):1-9.
- [12] 黄波,李超源,郝治,等.集料密度差异及成型温度对沥青混合料配合比的影响研究[J].中外公路,2022,42(3):180-185.
HUANG Bo, LI Chaoyuan, HAO Zhi, et al. Study on influence of aggregate density difference and compaction temperature on mixing proportions of asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022,42(3):180-185.
- [13] 刘福明,吴迪,何庆德,等.纤维稳定剂对排水沥青混合料抗水温循环损伤能力的影响[J].中外公路,2023,43(1): 194-198.
LIU Fuming, WU Di, HE Qingde, et al. Study on effect of fiber stabilizers on water temperature cycle damage resistance of drainage asphalt mixtures[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023,43(1):194-198.
- [14] 郭乃胜,尤占平,谭忆秋,等.考虑均匀性的沥青混合料最佳沥青用量确定方法[J].交通运输工程学报,2017,17(1): 1-10.
GUO Naisheng, YOU Zhanping, TAN Yiqiu, et al. Determination method of optimum asphalt content in asphalt mixture under considering homogeneity[J].Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017,17(1): 1-10.

- [15] MARVILLET J, BOUGAULT P. Workability of bituminous mixes: Development of a workability meter[J]. Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), 1979, 48: 91-110.
- [16] GUDIMETTLA J M, COOLEY L A Jr, BROWN E R. Workability of hot-mix asphalt[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2004, 1891(1): 229-237.
- [17] TAO M J, MALLICK R B. Effects of warm-mix asphalt additives on workability and mechanical properties of reclaimed asphalt pavement material[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2009, 2126(1): 151-160.
- [18] MOGAWER W S, AUSTERMAN A J, KLUTTZ R, et al. High-performance thin-lift overlays with high reclaimed asphalt pavement content and warm-mix asphalt technology[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2012, 2293(1): 18-28.
- [19] BENNERT T, REINKE G, MOGAWER W, et al. Assessment of workability and compactability of warm-mix asphalt[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2010, 2180(1): 36-47.
- [20] WEST R, WATSON D E, TURNER P, et al. Mixing and compaction temperatures of asphalt binders in hot-mix asphalt[J]. NCHRP Report, 2010, 648(1): 2-148.
- [21] KHALIL S M, ARSHAD A K, RAHMAN M Y A. The development of workability measurement for asphalt mixture using transducer by torque[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2012, 5: 203-208.
- [22] ALI A, ABBAS A, NAZZAL M, et al. Workability evaluation of foamed warm-mix asphalt[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26(6): 04014011.
- [23] 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 University of Technology (Natural Science Edition), 2011, 33(5): 36-39.
- [24] 汪海年, 郝培文. 热拌沥青混合料的工作性测试新方法[J]. 中外公路, 2006, 26(2): 194-196.
- WANG Hainian, HAO Peiwen. A new method for workability test of hot mix asphalt mixtures[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2006, 26(2): 194-196.
- [25] 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.
- [26] 郭平, 段凌云. Sasobit 温拌沥青混合料和易性研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2012, 43(1): 119-123.
- GUO Ping, DUAN Lingyun. Research on the workability of sasobit warm mix asphalt[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2012, 43(1): 119-123.
- [27] 张志强, 陈冬, 段鑫明, 等. 基于柔韧性改善的纤维高模量沥青混合料技术研究[J]. 森林工程, 2022, 38(3): 153-162.
- ZHANG Zhiqiang, CHEN Dong, DUAN Xinming, et al. Technique research on performance of high modulus asphalt mixture with fiber based on flexibility[J]. Forest Engineering, 2022, 38(3): 153-162.
- [28] 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 Edition), 2016, 46(1): 202-208.
- [29] 张庆, 侯德华, 刘廷国. 水固化型聚合物改性乳化沥青混合料性能研究[J]. 材料导报, 2020, 34(增刊2): 1612-1617.
- ZHANG Qing, HOU Dehua, LIU Tingguo. Study on mechanical properties of water-curable polymer modified emulsified asphalt mixture[J]. Materials Reports, 2020, 34(sup 2): 1612-1617.
- [30] 张争奇, 吴瑞环, 季社鹏. 改性沥青混合料拌和及压实温度的确定方法[J]. 公路交通科技, 2013, 30(8): 6-11.
- ZHANG Zhengqi, WU Ruihuan, JI Shepeng. An approach to determine mixing and compaction temperatures for modified asphalt mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(8): 6-11.
- [31] 甘新立, 郑南翔, 侯月琴, 等. 再生 SBS 改性沥青混合料的施工温度确定[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(5): 808-812.
- GAN Xinli, ZHENG Nanxiang, HOU Yueqin, et al. Determination of construction temperature of recycled SBS modified asphalt mixture[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(5): 808-812.
- [32] 李宁利, 李铁虎, 陈华鑫, 等. 改性沥青混合料拌和与压实温度确定方法综述[J]. 材料导报, 2007, 21(8): 92-95.

- LI Ningli, LI Tielu, CHEN Huaxin, et al. Summarization on methods in defining mixing and compaction temperatures for modified asphalt mixture[J]. Materials Review, 2007, 21(8): 92-95.
- [33] 张宜洛, 郭科, 赵少宗, 等. 改性沥青混合料施工温度的确定[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2016, 37(6): 740-744.
- ZHANG Yiluo, GUO Ke, ZHAO Shaozong, et al. Determination of construction temperature for modified asphalt mixture[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2016, 37(6): 740-744.
- [34] 张翠红, 焦生杰, 曹学鹏, 等. 水泥乳化沥青混合料施工和易性评价方法及影响因素[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2018, 38(1): 41-48.
- ZHANG Cuihong, JIAO Shengjie, CAO Xuepeng, et al. Evaluation method and influencing factors for construction workability of cement-emulsified asphalt mixture[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2018, 38(1): 41-48.
- [35] 张琛, 汪海年, 王宠惠. 多年冻土区温拌橡胶沥青混合料的性能及适用性[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2017, 40(9): 1254-1259.
- ZHANG Chen, WANG Hainian, WANG Chonghui. Performance and applicability of rubberized warm asphalt mixture in permafrost regions[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2017, 40(9): 1254-1259.
- [36] 张强, 高学凯, 梁春雨. 热再生沥青混合料低温蠕变行为及黏弹性分析[J]. 中外公路, 2022, 42(2): 218-222.
- ZHANG Qiang, GAO Xuekai, LIANG Chunyu. Creep behavior and viscoelastic analysis of hot recycled asphalt mixture at low temperature[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(2): 218-222.
- [37] 刘黎萍, 刘宁, 孙立军. 沥青混合料的和易性测试装置及和易性评价方法: 中国, CN111060680B[P]. 2022-01-25.
- LIU Liping, LIU Ning, SUN Lijun. Workability testing device and workability evaluation method for asphalt mixture: China, CN111060680B[P]. 2022-01-25.
- [38] 于新, 徐波, 邓德毅, 等. 一种基于搅拌电流值的沥青混合料和易性检测装置及检测方法: 中国, CN104297294A[P]. 2015-01-21.
- YU Xin, XU Bo, DENG Deyi, et al. Asphalt mixture workability detection device and detection method based on stirring current value: China, CN104297294A[P]. 2015-01-21.
- [39] 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数[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.
- [40] 颜建春, 邹前, 王晓磊, 等. 配合比设计参数对沥青混合料拌和和易性的影响研究[J]. 西部交通科技, 2022(5): 92-95.
- YAN Jianchun, ZOU Qian, WANG Xiaolei, et al. Study on the influence of mix design parameters on the mixing workability of asphalt mixture[J]. Western China Communications Science & Technology, 2022(5): 92-95.
- [41] 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 Edition), 2021, 49(7): 44-48.
- [42] HESAMI E, BIRGISSON B, KRINGOS N. Effect of mixing sequence on the workability and performance of asphalt mixtures[J]. Road Materials and Pavement Design, 2015, 16(sup 2): 197-213.
- [43] MONGKOL K, CHATURABONG P, SUWANNAPLAI A. Effect of bagasse and coconut peat fillers on asphalt mixture workability[J]. Coatings, 2020, 10(12): 1262.
- [44] 王笑风, 苏青山, 王振军. 橡胶粉纤维沥青混合料高温性能及施工和易性[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2006, 30(5): 846-849.
- WANG Xiaofeng, SU Qingshan, WANG Zhenjun. High temperature stability and workability of crumb rubber-modified and fibers-reinforced asphalt mixture[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2006, 30(5): 846-849.
- [45] 王海林, 李江, 陈忠达, 等. 乳化沥青混合料技术性能评价方法研究[J]. 公路交通科技, 2004, 21(6): 44-46.
- WANG Hailin, LI Jiang, CHEN Zhongda, et al. Study on performance evaluation method for emulsified asphalt mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(6): 44-46.
- [46] 牛维宏, 徐清, 陈治君, 等. 硫铝酸盐水泥-乳化沥青混合料性能影响因素研究[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(3): 156-160.
- NIU Weihong, XU Qing, CHEN Zhijun, et al. Research on influencing factors of R-SAC-emulsified asphalt mixture performance[J]. New Building Materials, 2021, 48(3):

- 156-160.
- [47] ROOZBAHANY E G, PARTL M N. A new test to study the flow of mixtures at early stages of compaction[J]. *Materials and Structures*, 2016, 49(9):3547-3558.
- [48] 杨跃焕, 姚雄, 宋圣霞, 等. 沥青混合料的工作和易性试验研究[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(sup 1):309-313.
- [49] 何亮, 何兆益, 凌天清, 等. 温拌橡胶沥青混合料施工和易性研究[J]. *功能材料*, 2015, 46(20):20102-20107.
- HE Liang, HE Zhaoyi, LING Tianqing, et al. Research on construction workability of asphalt-rubber mixture with warm mix additives[J]. *Journal of Functional Materials*, 2015, 46(20):20102-20107.
- [50] 师航祺. 基于剪切压实仪的沥青混合料压实和易性研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2017.
- SHI Hangqi. Evaluation of asphalt mixture compaction workability based on shear compactor[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2017.
- [51] 南秋彩. 温拌沥青混合料压实特性影响因素研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2019, 38(12):63-68.
- NAN Qiucui. Influencing factors of compaction characteristics of warm mix asphalt mixture[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2019, 38(12):63-68.
- [52] 袁剑波, 殷婵, 冯新军, 等. 多聚磷酸/脱硫胶粉复合改性沥青的制备及性能研究[J/OL]. *中外公路*, 1-10[2024-06-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20240614.1606.003.html>.
- YUAN Jianbo, YIN Chan, FENG Xinjun, et al. Preparation and performance study of polyphosphoric Acid/Desulfurized crumb rubber composite modified asphalt[J/OL]. *Journal of China & Foreign Highway*, 1-10[2024-06-15].
- <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20240614.1606.003.html>.
- [53] 杨彦海, 刘梦晴, 孙贯益. 温拌沥青混合料可压实性与路用性能分析[J]. *公路*, 2016, 61(1):32-35.
- YANG Yanhai, LIU Mengqing, SUN Guanyi. Analysis of the compatibility and road performance of warm mix asphalt[J]. *Highway*, 2016, 61(1):32-35.
- [54] 唐娴, 刘建超, 谢淑琴. 沥青混合料工作性路用性能的探索[J]. *铁道建筑*, 2007, 47(9):92-93.
- TANG Xian, LIU Jianchao, XIE Shuqin. Exploration on workability of asphalt mixture for road use[J]. *Railway Engineering*, 2007, 47(9):92-93.
- [55] 刘文强, 熊竹. 沥青混合料工作性及其影响因素试验研究[J]. *公路工程*, 2014, 39(1):256-262.
- LIU Wenqiang, XIONG Zhu. Experimental study on asphalt mixture workability and its impact factors[J]. *Highway Engineering*, 2014, 39(1):256-262.
- [56] 季社鹏. 沥青混合料工作性及施工质量控制研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- JI Shepeng. Study on asphalt mixture workability and construction quality control[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [57] 李昂. 不同性质沥青混合料的变速拌和及和易性指数研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- LI Ang. Experiment at different mixing velocities and workability index of asphalt mixture with different bitumen[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [58] 延西利, 田辉黎, 延喜乐, 等. 沥青混合料的变速拌和功率测试与拌和流变模型[J]. *交通运输工程学报*, 2016, 16(3):1-7.
- YAN Xili, TIAN Huili, YAN Xile, et al. Mixing power measurement at different mixing velocities and mixing rheological model of bituminous mixture[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2016, 16(3):1-7.