

沥青混合料平衡设计法研究综述

肖庆一, 张恒*, 孙立东, 范津, 苏刚

(河北工业大学 土木与交通学院, 天津市 300401)

摘要:为改善中国路面开裂的现状、平衡道路车辙与开裂之间的关系,找到更优的沥青混合料设计方法,对国外沥青混合料平衡设计法进行了梳理研究。概述了马歇尔法和 Superpave 设计法的不足以及平衡设计法的设计机理、起源与发展,明确三类平衡设计法的概念与内涵;总结平衡设计法混合料试验评价方法和应用实践现状,得出结论:马歇尔法应用较多、实践较成熟;用平衡设计法设计的沥青混合料性能更优,能更好地兼顾抗车辙与抗开裂性能、延长道路使用寿命,但现阶段的平衡设计法存在开裂试验中裂缝标准不一、试件老化标准缺乏、忽视质量控制/质量保证(QC/QA)等问题。未来可借助平衡设计法优化中国现行的沥青混合料设计方法,引入 QC/QA,制定相应的规范标准,解决车辙与开裂之间的矛盾,全面有效地提高中国路面的使用寿命。

关键词:平衡设计法;综述;沥青混合料;车辙;开裂;性能测试

随着中国公路运输业的蓬勃发展,公路建设开始向高质量转型。据交通运输部统计,2018年末中国公路总里程为484.65万km,比上年增加7.31万km,公路养护里程更是达到了475.78万km,占公路总里程的98.2%^[1]。公路建设虽不断进步,但车辙和裂缝仍是路面最主要的病害形式,极大地降低了行车舒适性、道路美观性和路面使用寿命^[2]。在此环境下,对新建沥青道路就提出了更高的性能要求,如何选用更优的配比、平衡车辙与开裂的关系,采用更合理可靠的沥青混合料配合比设计方法就显得尤为重要。

中国对于沥青混合料平衡设计法研究较少,该文主要对国外相关文献进行系统总结,综述沥青混合料平衡设计法的研究现状。首先阐述沥青混合料平衡设计法的起源与发展脉络;明确平衡设计法的概念和3种典型的平衡设计法,通过美国对平衡设计法的应用实践,详细总结平衡设计法常用的沥青混合料车辙和开裂性能试验方法及试验标准;最后基于对研究现状的梳理,归纳现阶段研究存在的不足以及对于后续平衡设计法的展望。

1 平衡设计法的起源与发展

1.1 平衡设计法的起源

目前现行的沥青混合料配合比设计方法主要有马

歇尔设计法、Superpave设计法、贝雷法以及GTM法。其中最常用的为马歇尔法和Superpave法。马歇尔设计法由美国密西西比州公路局的Bruce Marshall提出,是目前国内外应用最多、技术最成熟的设计方法,中国沥青混合料设计规范采用此设计方法,其优点是试验方法简单、经济,考虑到了高温流变特性^[3]。随着时间推移,美国许多州发现虽然马歇尔设计法相对来说抗裂性能表现良好,但无法较好地控制车辙^[4]。大量实践证明,室内马歇尔试验结果常出现密度和稳定度随沥青用量的增加没有明显峰值、空隙率偏小或过大、矿料间隙率偏低等情况,传统马歇尔设计法的整个指标体系与混合料的路用性能的关联性较差,对路面结构的各种破坏现象也不能起到有针对性的防治作用^[5]。

为了更好地延长路面寿命,美国公路战略研究计划(SHRP)开发了Superpave设计法,Superpave沥青混合料设计系统被赋予了3个水平,现阶段主要应用水平1方法,水平2与水平3因试验设备昂贵、设计过程复杂等原因未得到广泛实施^[6]。早期Superpave设计系统中,更注重提高道路的抗车辙性能,许多州的交通部门要求在中高等级路面沥青混合料设计时增加抗车辙测试。另外,根据Superpave设计法计算得到的路面低温高于现场路面实际气温,因此Superpave

收稿日期:2020-03-28

基金项目:天津市科技计划项目(编号:16ZXCXFSF00110)

作者简介:肖庆一,男,博士,教授。E-mail:xiaoqingyi@hebut.edu.cn

*通信作者:张恒,男,硕士研究生。E-mail:zh970113@126.com

设计法中计算路面设计最低温度的公式是否准确还值得商榷,这也使得利用 Superpave 设计法设计的沥青混合料在低温性能方面存在缺陷^[7]。近 10 年中,美国大部分州的交通部门表示目前的沥青混合料设计方法不能保证混合料的性能,且路面车辙几乎被消除,开裂成为影响沥青路面寿命的主要因素^[8]。因此,大部分州根据 AASHTO Superpave 设计标准调整了沥青混合料设计要求,以求提高沥青混合料的耐久性,但 Superpave 设计方法的微调(降低设计空隙率、降低压实水平)无法从根本上解决路面耐久性下降(开裂)的问题,使得各州开始寻找更科学、可靠的新沥青混合料设计方法。

2006 年,Fujie Zhou 和 Scullion 等对路面车辙与开裂之间的性能平衡进行研究,首次提出了基于沥青混合料抗车辙和抗开裂能力来确定最佳沥青含量的平衡方法,这也是最早关于沥青混合料平衡设计法的研究^[9];随后,Scullion 和 Xiaodi Hu 等借助此方法进行了罩面层沥青混合料的配合比设计,并铺设试验路,在 2011 年将研究成果进行了实际运用^[10];2012 年,Walubita 和 Xiaodi Hu 等使用 ALF 加速加载系统,把使用 TxDOT 法与平衡设计法设计的沥青混合料进行了对比试验,试验证明采用平衡设计法设计的沥青混合料性能表现更佳^[11];同年,Fujie Zhou 等首次对 RAP 混合料采用了平衡设计,以此确定最佳沥青含量^[12];2013 年,路易斯安那州交通部门提议修改规范,对沥青混合料进行性能试验评估来补充体积设计标准,以此来平衡混合料的抗车辙和抗疲劳开裂性能,这也是最早规范性质的平衡设计法^[13]。在中国,冯新军等在 2011 年采用车辙试验和低温弯曲小梁试验对沥青混合料进行了抗开裂和抗车辙的平衡设计^[14]。

2015 年 9 月,美国联邦公路管理局(FHWA)成立了平衡配合比设计小组,设计开发平衡配合比设计方法及平衡混合料。2018 年 9 月底,美国国家公路合作研究计划(NCHRP)完成开发平衡配合比设计框架的项目,此举更是表明了平衡设计法的重要性^[15]。

1.2 平衡设计法概念与内涵

FHWA 将平衡设计法(Balanced Mix Design,简称 BMD)定义为“对在适当的条件下得到的试样进行性能测试,解决多种病害,并且考虑了交通、气候、混合料的老化和它在路面结构中的位置。”简而言之,BMD 包含两个或更多力学试验,如车辙试验和开裂试验,以评估混合料抵抗常见路面病害的表现。

目前有 3 种可应用的 BMD 方法:性能试验验证

体积设计、性能试验改进体积设计和性能设计。

(1) 性能试验验证体积设计(Volumetric Design with Performance Verification)。以 Superpave 水平 1 体积配合比设计法为基础再增加额外的性能试验。如果混合料不能通过性能试验,就要重复整个配合比设计过程。目前这种方法在伊利诺斯州、路易斯安那州、新泽西州、得克萨斯州和威斯康星州使用。性能试验验证体积设计一般流程如图 1 所示。

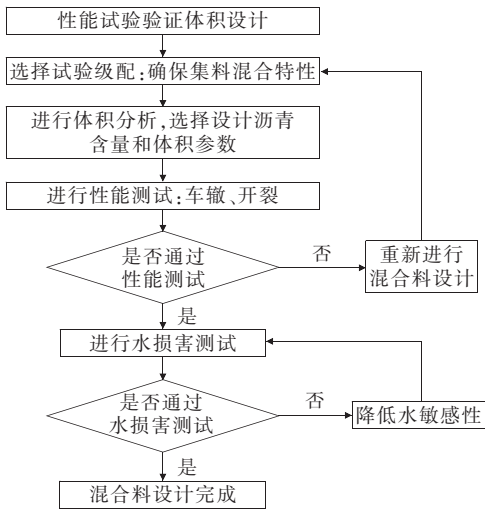


图 1 性能试验验证体积设计一般流程

(2) 性能试验改进体积设计(Performance-Modified Volumetric Design)。此方法也是从 Superpave 配合比设计方法开始,建立初始的集料级配和沥青含量,然后调整配合比以满足性能试验要求,最终设计可能不满足所有的 Superpave 标准。加利福尼亚州、俄克拉荷马州目前使用这种方法。性能试验改进体积设计一般流程如图 2 所示。

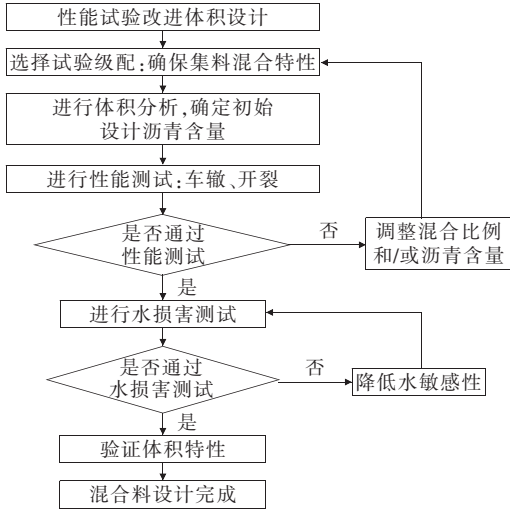


图 2 性能试验改进体积设计一般流程

(3) 性能设计(Performance Design):这种方法跳过了 Superpave 体积设计,直接使用性能试验来评估包含不同的集料级配和沥青含量的混合料。此方法可以为沥青结合料和集料的性能设定最低要求,传统的体积标准可作为非强制性参考标准,但不能为设计标准。此方法还未被实践采用。性能设计一般流程如图 3 所示。

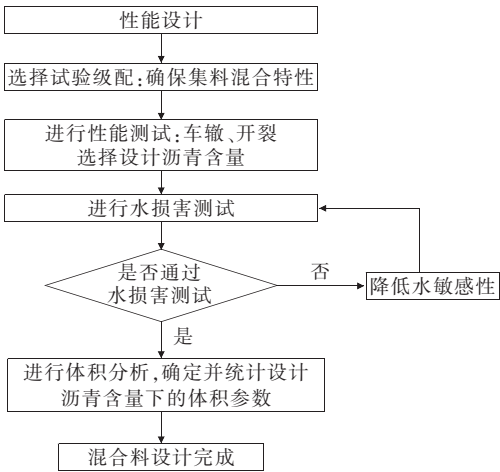


图 3 性能设计一般流程

沥青混合料平衡设计法就是要在车辙、开裂之间找到平衡点,沥青用量设计是关键,沥青用量过多,容易产生车辙,而过少则容易开裂、剥落等。平衡即以刚满足车辙标准的沥青含量为最大值;以刚满足开裂标准的沥青含量为最小值,介于最大与最小值之间的沥青含量值即代表了两者的平衡。而此平衡就需要性能试验来进行验证。

2 平衡设计法下的混合料性能评估

路面要想达到设计寿命时长,就要在交通荷载和自然环境条件共同作用下保持抗车辙和抗裂能力的平衡。沥青混合料平衡设计法是在 Superpave 系统下开发的,在 Superpave 系统中,集料和沥青黏结剂的配比主要取决于经验集料的质量特性和混合料的体积特性,如空隙率、VMA 和 VFA。随着 RAP 和 RAS 的掺入,骨料比重测定不准确性增加,温拌沥青添加剂、聚合物、再生剂和纤维的效果在目前的体积混合设计方法中也无法评估。因此,需要将性能测试作为混合料平衡设计程序的一部分,并且在选择采用何种性能试验评估时要依据多因素,以此确保路面有更好的抗车辙和抗裂性能^[16]。

2.1 车辙预估

沥青混合料的永久变形对沥青路面寿命影响较大,近几年车辙已得到有效的控制,但仍要在平衡设计法程序中进行车辙试验,对沥青混合料车辙性能进行预估。总结目前美国各州沥青混合料平衡设计法中的车辙试验方法,得到表 1;表 2 为美国 NCHRP 推荐的 FN 和 SST 试验性能标准,因试验机构和混合料各不相同,APA 和 HWTT 试验性能标准因各州而异。

表 1 常见的沥青混合料车辙性能试验方法

试验方法	试验标准	性能评价指标
APA 车辙试验	AASHTO T340	车辙深度 RD
流值试验(FN)	AASHTO TP79—15	流值次数 FN
汉堡车辙试验(HWTT)	AASHTO T324	车辙深度 RD
Superpave 剪切试验(SST)	AASHTO T320—07	永久剪切应变 PSS

表 2 FN 和 SST 试验性能标准

交通等级 ESALs/ (10 ⁶ 次)	FN 试验标准		SST 试验标准
	HMA 最小 平均流值数 FN/mm	WMA 最小 平均流值数 FN/mm	最大永久剪切 应变 PSS/%
3~10	50	30	3.4
10~30	190	105	2.1
≥30	740	415	0.8

路易斯安那州采用汉堡车辙仪(HWTT)评估混合料抗车辙性能,11 种混合料采用 BMD 第一类方法进行设计,40 种混合料采用常规混合料体积设计法,试验结果对比得出,采用平衡设计法设计的混合料车辙性能与体积设计法相似或有所提升,且都满足规范要求^[17];加利福尼亚州采用 SST 和 HWTT 共同验证的方式,并在试验前对试件进行短期老化;采用 HWTT 的还有明尼苏达州、伊利诺伊州、得克萨斯州、威斯康星州、爱荷华州、新墨西哥州、犹他州,采用 APA 的为弗尼吉亚州、新泽西州、乔治亚州、俄亥俄州及南达科他州^[15]。

2.2 开裂预估

开裂成为近几年路面结构最主要的破坏形式。Superpave 的体积设计无法从根本上解决路面开裂的问题,这也正是平衡设计法要解决的核心问题。表 3 为平衡设计法中常见的沥青混合料开裂性能试验评价方法。

表 3 常见的沥青混合料开裂性能试验方法

破坏类型	试验方法	试验标准	性能评价指标	试验变异性
温度应力 开裂	圆盘形试件偏心拉伸试验(DCT)	ASTM D7313	断裂能	小, $C_v=10\%\sim15\%$
	间接拉伸蠕变柔量和强度试验(IDT Creep & Strength Test)	AASHTO T322	蠕变柔量和拉伸强度	小, $C_v<11\%$
	低温半圆弯拉试验(SCB at Low Temperature)	AASHTO TP105	断裂能	中等, $C_v\approx20\%$
	约束试件温度应力试验(TSRST)	AASHTO TP10	断裂温度/断裂能	小, $C_v\approx10\%$
	圆盘形试件偏心拉伸试验(DCT)	ASTM D7313	断裂能	小, $C_v=10\%\sim15\%$
反射开裂	得州拉伸抗裂试验(Texas OT)	TxDOT Tex-248-F/ NJDOT B-10	荷载循环次数/ 断裂参数	相当高, $C_v=30\%\sim50\%$
	伊利诺伊州柔性指数试验(I-FIT)	AASHTO TP124	柔性指数	小, $C_v\approx10\%$
	常温半圆弯拉试验(SCB at Intermediate Temperature)	AASHTO TP124/ ASTM D8044	断裂延度	中等, $C_v\approx20\%$
	直接拉伸疲劳试验(S-VECD)	AASHTO TP107	疲劳方程/破坏参数	通常较小,但需进一步验证
自下而上的疲劳 开裂	梁弯曲疲劳试验(BBF)	AASHTO T321/ ASTM D7460	循环次数/ 疲劳方程	非常高, $C_v\approx50\%$
	间接拉伸断裂能试验(IDT Fracture Energy Test)	TxDOT Tex-226-F	断裂能	小, $C_v<11\%$
	伊利诺伊州柔性指数试验(I-FIT)	AASHTO TP124	柔性指数	小, $C_v\approx10\%$
	常温半圆弯拉试验(SCB at Intermediate Temperature)	ASTM D8044	断裂延度	中等, $C_v\approx20\%$
	得州拉伸抗裂试验(Texas OT)	TxDOT Tex-248-F	荷载循环次 数/断裂参数	相当高, $C_v=30\%\sim50\%$
自上而下的疲劳 开裂	直接拉伸试验(DT)	Texas A&M University	循环次数	通常较小,但需进一步验证
	间接拉伸能量速率试验(IDT Energy Ratio Test)	University of Florida	能量速率	可能较小,与 AASHTO T322 相似
	伊利诺伊州柔性指数试验(I-FIT)	AASHTO TP124	柔性指数	小, $C_v\approx10\%$

抗裂性能测试种类多样,最常用的是 SCB 和 OT 试验,因采用试验不同,执行标准也不同,下文具体给出美国各州平衡设计法中采用不同组合的性能试验方法及性能标准。

3 平衡设计法的实施现状综述

3.1 性能试验验证体积设计法

此方法为平衡设计法的第一类方法,以 Superpave 水平 1 为基础,也是目前使用最广泛、最简捷的平衡设计法。有研究表明:性能试验验证体积设计法可同时满足车辙、开裂和体积标准^[18]。路易斯安那州采用此类平衡设计方法,并在 2013 年对本州规范进行

了修改,规范中室内试验包括 HWTT 和 SCB,分别用于评价车辙和常温下开裂;沥青混合料结果显示:按 BMD 规范生产的混合料抗车辙性能有所提升,50%以上的混合料也均已满足抗裂标准,规范的修改对混合料的抗车辙或抗疲劳开裂无不利影响^[17]。为了解决大量使用 RAP 和 RAS 带来的问题,伊利诺伊州交通部在 2016 年开始对第一类 BMD 方法实施研究,采用 HWTT 进行车辙评估,I-FIT 对开裂进行评估,并要求最终的混合料要满足 Superpave 体积标准^[19]。得克萨斯州也采用第一类 BMD 方法,从 Superpave 体积设计开始,估算最佳沥青含量,使用 HWTT 来评估混合料的抗车辙和抗水损害性能,并使用 OT 来评估抗反射裂缝和自上而下疲劳裂缝的能力,最后在满足

HWTT 和 OT 要求的沥青含量范围选择最佳沥青含量^[20]。威斯康星州交通部要求采用 DCT 试验评估混合料的低温开裂性能,SCB 试验评估混合料的疲劳开裂性能,车辙采用汉堡车辙仪进行评估。

从 2006 年开始,新泽西州交通基础设施逐渐恶化,交通条件逐步恶劣,其交通部于 2011 年开始为“特殊沥青混合料(高 RAP)”实施基于性能的沥青混合料设计系统,此设计系统与第一类 BMD 方法如出一辙,即采用 APA 测定热拌沥青混合料的车辙敏感性,用 OT 试验测定混合料现场抗裂性能,并有意在后续的平衡设计系统中引入沥青混合料质量控制过程^[21]。明尼苏达州交通部利用 4 种沥青含量不同的混合料,通过第一类 BMD 程序和性能试验测试沥青含量对抗裂性和抗车辙性的影响,并选用 HWTT 用于车辙评估,DCT 用于开裂评估,混合料间接拉伸开裂测试(Indirect Tension Asphalt Cracking Test, IDEAL-CT)用于混合料质量控制和质量保证(QC/QA),试验结果表明:采用 BMD 程序设计沥青含量更能准确地

平衡车辙和开裂之间的关系^[22]。到 2013 年,弗尼吉亚州交通部已允许使用 RAP 含量高达 45%的沥青混合料为高 RAP 混合料选择更高规格的 BMD 设计方法,且准备在 BMD 设计过程中引进 QC/QA^[23];通过对沥青混合料样品进行 Cantabro 磨耗试验、APA 试验、I-FIT 试验、IDEAL-CT 试验的结果比较,弗尼吉亚州交通部在 BMD 程序中选用 APA 测定热拌沥青混合料的车辙敏感性、Cantabro 进行混合料的耐久性测试和 IDEAL-CT 测试混合料开裂性能^[24]。中国,2011 年冯新军等利用 60℃车辙试验和-10℃弯曲小梁试验进行了基于抗车辙和抗开裂的沥青混合料平衡设计法的研究,此方法与第一类平衡设计法类似,试验结果表明:平衡设计法比马歇尔设计法能更好地平衡沥青混合料高温稳定性和低温抗裂性之间的矛盾,但试验过程中并没有引入混合料质量控制和质量保证过程。美国各州平衡设计法采取的性能试验及标准见表 4。

表 4 各州平衡设计法采取的性能试验及标准

州名	分类类型	性能试验及标准	
	交通量水平	(HWTT,50℃,20 000 次 碾压时)RD/mm	(SCB,25℃)Jc/ (kJ·m ⁻²)
路易斯 安那州	水平 1 高交通量	≤10.0	≥0.5
	水平 2 中/低交通量	≤6.0	≥0.6
	沥青 PG 等级	(HWTT,RD=12.5 mm 时)碾压次数/次	I-FIT,柔性指数 FI
伊利诺 伊州	PG 58-xx 或更低	>5 000	
	PG 64-xx	>7 500	>8.0
	PG 70-xx	>15 000	
	PG 76-xx 或更高	>20 000	
	混合料类型	(HWTT,RD=12.5 mm 时) 碾压次数/次	OT 荷载循环 次数/次
得克萨 斯州	PFC	>10 000	>200
	SMA	>20 000	>200
	TOM (PG 70-xx)	>15 000	>300
	TOM (PG 76-xx)	>20 000	>300
	HIR	>10 000	>150
	沥青 PG 等级	(HWTT,RD=12.5 mm 时) 碾压次数/次	(SCB) DCT 断裂能/ (kJ·m ⁻²)
威斯康 星州	PG 58-xx	>5 000	
	PG 64-xx	>10 000	>0.4

续表 4

州名	分类类型	性能试验及标准	
	混合料类型	(APA,8 000 次碾压时)车辙深度/mm	OT 荷载循环次数/次
新泽西州	HPTO	<4(设计)	>600
		<5(生产)	
	BRIC	<6(设计)	>700(设计)
		<7(生产)	>650(生产)
	BDWSC	<3	—
	BRBC	<5	—
	HRAP(表面层,PG 64—22)	<7	>150
	HRAP(表面层,PG 76—22)	<4	>175
	HRAP(中层或基层,PG 64—22)	<7	>100
	HRAP(中层或基层,PG 76—22)	<4	>125
交通等级/(100 万次)		DCT 断裂能/(kJ·m ⁻²)	
明尼	(高)>30	>0.69	
苏达州	(中)10~30	>0.46	
	(低)<10	>0.40	
加利福尼亚州	沥青 PG 等级	交通等级(ESALs)/(100 万次)	(HWTT,RD=12.5 mm)碾压次数/次
	PG 58—xx		(SST 试验) PSS/%
	PG 64—xx		
	PG 70—xx		
	PG 76—xx		
		3~10	<3.4
		10~30	<2.1
		≥30	<0.8
	沥青 PG 等级	(HWTT,RD=12.5 mm)碾压次数/次	TSR/%
俄克拉	PG 64—xx	>10 000	
荷马州	PG 70—xx	>15 000	>80
	PG 76—xx	>20 000	

3.2 性能试验改进体积设计法

此方法由 Superpave 体积设计开始,但最终的测试结果不一定都满足 Superpave 体积标准,且采用较少。加利福尼亚州交通部采用了第二类 BMD 方法,车辙评估采用 SST 和 HWTT 双重试验,试验前对试件进行短期老化,利用 Superpave 剪切测试仪确定试件的永久剪切应变和混合料的刚度;开裂性能测试采用 BBF 试验,试验前对试件进行长期老化,确定压实沥青混合料的疲劳寿命,加州目前正采用第二类 BMD 方法建造各类州际公路项目^[25]。俄克拉荷马州交通部在 2018 年对第二类 BMD 方法进行研究,混合料需进行 HWTT、I—FIT、Cantabro 和 TSR 测试,以确保

混合料路用性能达标;用于 HWTT 和 TSR 的样品需老化 2 h,I—FIT 和 Cantabro 测试样品需进行长期老化,但缺乏老化混合料的试验室标准,无法保证混合料老化程度的统一性;其州交通部正对该混合料进行长期性能监测,以此来优化第二类平衡设计法。

4 结论

- (1) 裂缝、车辙是沥青路面最主要的病害。沥青混合料平衡设计法能够在车辙与开裂之间很好地找到平衡点,让路面兼顾抗车辙与抗裂性能。
- (2) 平衡设计法采用的性能试验广泛,不同的性

能测试方法执行的标准不一,且目前也缺乏老化沥青混合料的试验室标准,为控制沥青混合料的质量,应在BMD程序中引入沥青混合料QC/QA过程。

(3) 3类BMD方法都能够有效地提高沥青混合料的性能,目前第一类BMD方法使用最为简捷、广泛。多种性能试验评价方法的联合使用能够使沥青混合料的性能更加可靠,对比中国现行的马歇尔设计方法,BMD法有着更大的优势,是未来中国混合料设计研究重点关注的方法与方向。

参考文献:

- [1] 交通运输部. 2018年交通运输行业发展统计公报[N]. 中国交通报, 2019-04-12.
- [2] 薛爱新, 王洁光, 王海军, 等. 高速公路沥青路面裂缝发展对路面结构性能的影响研究[J]. 中外公路, 2019, 39(3): 47-53.
- [3] 郝培文. 沥青与沥青混合料[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [4] Musselman James, Choubane Bouzid, Page Gale, et al. Superpave Field Implementation: Florida's Early Experience[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1998, 1 609(1): 51-60.
- [5] 陈华鑫, 江星. 沥青混合料马歇尔设计异常现象分析[J]. 中外公路, 2006, 26(4): 195-197.
- [6] NCHRP. The Superpave Mix Design System: Anatomy of a Research Program[R], 2012.
- [7] 陈骁, 朱春阳. 不同沥青混合料设计方法对比评价分析[J]. 中外公路, 2007, 27(4): 267-271.
- [8] McCarthy Leslie Myers, Callans Jonathan, Quigely Robert. Performance Specifications for Asphalt Mixtures[R], 2016.
- [9] Fujie Zhou, Sheng Hu, Tom Scullion. Integrated Asphalt (Overlay) Mixture Design, Balance Rutting and Cracking Requirement[R]. Technical Report FHWA/TX-06/0-5123-1, TTI, TX, US, 2016.
- [10] Tom Scullion, Xiaodi Hu, Stephen Sebesta. Design, Construction and Performance Monitoring of the very Thin Overlay Placed on BUS 59 in the Lufkin District[R]. Technical Report FHWA/TX-10/5-5598-01-2, TTI, TX, US, 2010.
- [11] Lubinda Walubita, Xiaodi Hu, Tom Scullion. Laboratory Evaluation of Two Different HMA Mix-Design Methods and Test Procedures[J]. Asfaltosy Pavimentos, 2012, 13(24): 4-16.
- [12] Fujie Zhou, Sheng Hu, Gautam Das, et al. Successful High RAP Mixes Designed with Balanced Rutting and Cracking Requirements[J]. Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions, 2012, 81(1): 477-505.
- [13] Standard Specifications for Roads and Bridges[S]. Louisiana Department of Transportation and Development, 2016.
- [14] 冯新军, 查旭东, 汪文渊, 等. 基于抗车辙和抗开裂的沥青混合料平衡设计[J]. 武汉理工大学学报, 2011(5): 86-89, 112.
- [15] NCHRP. Auburn, AL: National Center for Asphalt Technology at Auburn University. Development of a Framework for Balanced Mix Design[R], 2018.
- [16] Fujie Zhou, David Newcomb, Charles Gurganus, et al. Experimental Design for Field Validation of Laboratory Tests to Assess Cracking Resistance of Asphalt Mixtures[R], 2015.
- [17] Samuel Cooper, Louay Mohammad, Sharear Kabir, et al. Balanced Asphalt Mixture Design through Specification Modification: Louisiana's Experience[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2014, 2 447: 92-100.
- [18] Fujie Zhou, Sheng Hu, Tom Scullion, et al. A Balanced HMA Mix Design Procedure for Overlays (with Discussion)[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2007, 76: 823-850.
- [19] Pfeifer, B. A.. Illinois DOT Practices for Balanced Mix Design[M]. Presented at 97th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D. C., 2018.
- [20] Test Procedure for Design of Bituminous Mixtures[S]. Tex-204-F. Texas Department of Transportation, 2016.
- [21] Standard Specifications for Road and Bridge Construction[S]. New Jersey Department of Transportation, 2007.
- [22] Fujie Zhou, David Newcomb, Texas A&M Transportation Institute. Balanced Design of Asphalt Mixtures[R], 2018.
- [23] Stacey D. Diefenderfer, Benjamin F. Bowers. Initial Approach to Performance (Balanced) Mix Design: The Virginia Experience[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2019, 2 673: 335-345.
- [24] USA. Department of Hingways. Road and Bridge Specifications[Z], 2016.
- [25] Aschenbrener, T.. Case Histories of Setting the Job Mix Formula with a Balanced Mix Design Compared to a Volumetric Mix Design[R], 2016.