

东南交通青年教师

科研论丛

沥青路面 厂拌热再生关键技术

马 涛 赵永利 黄晓明 ▶ 著

TRANSPORT

KEY TECHNOLOGY FOR
CENTRAL PLANT HOT RECYCLING
OF ASPHALT PAVEMENT

东 南 大 学 出 版 社

东南交通·青年教师·科研论丛

沥青路面厂拌热再生关键技术

马 涛 赵永利 黄晓明 著

东南大学出版社
· 南京 ·

内 容 简 介

本书重点针对沥青路面厂拌热再生技术展开探讨与优化分析。主要包括沥青(混合料)的性能老化机理与性能老化规律分析;老化沥青的性能恢复机理与手段,再生剂的应用、研制与评价;厂拌热再生沥青混合料材料组成设计的关键影响因素与关键技术方法;厂拌热再生施工工艺的核心影响因素与关键工序参数优化以及厂拌热再生技术的工程实践等。

本书可供从事道路工程的科研、设计、施工、养护与建设管理技术人员参考,亦适合高等院校、科研机构相关专业技术人员、教师、研究生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

沥青路面厂拌热再生关键技术/马涛,赵永利,黄晓明著.

—南京:东南大学出版社,2015.5

(东南交通青年教师科研论丛)

ISBN 978-7-5641-5444-8

I. ①沥… II. ①马…②赵…③黄… III. ①沥青路面—再生路面—研究 IV. ①U416.217

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 311703 号

沥青路面厂拌热再生关键技术

著 者 马 涛 赵永利 黄晓明

责任编辑 丁 丁

编辑邮箱 d. d. 00@163. com

出版发行 东南大学出版社

社 址 南京市四牌楼 2 号 邮编:210096

出 版 人 江建中

网 址 <http://www.seupress.com>

电子邮箱 press@seupress.com

经 销 全国各地新华书店

印 刷 扬中市印刷有限公司

版 次 2015 年 5 月第 1 版

印 次 2015 年 5 月第 1 次印刷

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 14.5

字 数 354 千

书 号 ISBN 978-7-5641-5444-8

定 价 58.00 元

本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话(传真):025-83791830

总 序

在东南大学交通学院的教师队伍中,40岁以下的青年教师约占40%。他们中的绝大多数拥有博士学位和海外留学经历,具有较强的创新能力和开拓精神,是承担学院教学和科研工作的主力军。

青年教师代表着学科的未来,他们的成长是保持学院可持续发展的关键。按照一般规律,人的最佳创造年龄是25岁至45岁,37岁为峰值年。青年教师正处于科研创新的黄金年龄,理应积极进取,以所学回馈社会。然而,青年人又处于事业的起步阶段,面临着工作和生活的双重压力。如何以实际行动关心青年教师的成长,让他们能够放下包袱全身心地投入到教学和科研工作中,这是值得高校管理者重视的问题。

近年来,我院陆续通过了一系列培养措施帮助加快青年人才成长。2013年成立了“东南大学交通学院青年教师发展委员会”,为青年教师搭建了专业发展、思想交流和科研合作的平台。从学院经费中拨专款设立了交通学院青年教师出版基金,以资助青年教师出版学术专著。《东南交通青年教师科研论丛》的出版正是我院人才培养措施的一个缩影。该丛书不仅凝结了我院青年教师在各自领域内的优秀成果,相信也记载着青年教师们的奋斗历程。

东南大学交通学院的发展一贯和青年教师的成长息息相关。回顾过去十五年,我院一直秉承“以学科建设为龙头,以教学科研为两翼,以队伍建设为主体”的发展思路,走出了一条“从无到有、从小到大、从弱到强”的创业之路,实现了教育部交通运输工程一级学科评估排名第一轮全国第五,第二轮全国第二,第三轮全国第一的“三级跳”。这一成绩的取得包含了几代交通人的不懈努力,更离不开青年教师的贡献。

我国社会经济的快速发展为青年人的进步提供了广阔的空间。一批又一批青年人才正在脱颖而出,成为推动社会进步的重要力量。世间万物有盛衰,人生安得常少年?希望本丛书的出版可以激励我院青年教师更乐观、自信、勤奋、执着地拼搏下去,搭上时代发展的快车,更好地实现人生的自我价值和社会价值。展望未来,随着大批优秀青年人才的不断涌现,东南大学交通学院的明天一定更加辉煌!



2014年3月16日

前 言

近年来,我国仅干线公路大中修工程,每年产生沥青路面旧料就达 1.6 亿吨,然而,据统计,目前我国公路路面材料循环利用率不到 30%,远低于发达国家 90%以上利用率的水平。加快推进公路路面材料循环利用工作,对促进公路交通事业可持续发展、节约资源、降低排放及保护环境具有重要意义。

沥青路面厂拌热再生技术是将回收的沥青路面材料,运至沥青拌和厂(场、站),经破碎、筛分,以一定的比例与新集料、新沥青、再生剂(必要时)等拌制成热拌再生混合料,铺筑路面的技术。研究和实践表明,合理的材料组成设计与施工工艺能够使得厂拌热再生沥青混合料及其再生沥青路面具备与新拌沥青混合料和沥青路面相同的使用性能与使用寿命,具有显著的经济效益和社会环境效益。

厂拌热再生技术已经成为国内外沥青路面养护维修中重点推广应用的技术之一,但是厂拌热再生的一些关键技术与原理尚存在模糊之处,一定程度上限制了其实际工程使用效果。本书在课题组多年研究的基础上,围绕厂拌热再生技术的关键原理与技术方法展开阐述,供相关技术人员参考。

全书分 6 章,第 1 章绪论,第 2 章 SBS 改性沥青的老化,第 3 章老化沥青的性能恢复,第 4 章热再生沥青混合料组成设计关键技术,第 5 章厂拌热再生关键工艺技术,第 6 章工程实践。第 1 章由黄晓明编写,第 2、3、4、5 章由马涛编写,第 6 章由赵永利编写。在编写过程中吸收了课题组多位博士、硕士的研究成果,并借鉴了国内外的相关先进研究成果与经验。在此要感谢拾方治博士、李海军博士、王真博士、顾凡博士、薛彦卿博士、祝谭雍博士、洪锦祥博士、张道义硕士、范庆国硕士、胡林硕士、王均样硕士、符适硕士、李靖硕士、耿磊硕士、徐静硕士等为本书所作的贡献。在本书编写中还得到诸多研究人员和单位的大力支持和帮助,在此一并表示衷心感谢。

本书有幸出版,得到了江苏省优势学科建设资助,还要感谢东南大学交通学院青年教师发展委员会给予青年教师专著出版的支持与帮助。本书同时得到国家自然科学基金项目(51008075、50878054、51378006、51378123)和东南大学青年教师资助计划项目(2242015R30027)以及教育部霍英东基金项目(141076)的资助。

由于作者水平有限,书中缺点和错误在所难免,望请国内外同行专家、学者和读者不吝赐教,批评指正。

作 者

2014 年底于南京

目 录

1 绪论	1
1.1 沥青路面的再生利用	1
1.1.1 国外应用概况	1
1.1.2 国内应用概况	2
1.1.3 沥青路面厂拌热再生技术	4
1.2 厂拌热再生混合料配合比设计方法	5
1.2.1 再生混合料组成设计基本流程	6
1.2.2 马歇尔设计法	7
1.2.3 Superpave 设计法	9
1.3 厂拌热再生施工工艺与设备	11
1.3.1 旧沥青路面的回收处理	11
1.3.2 回收旧料的粉碎和堆放	12
1.3.3 再生混合料生产设备	14
1.4 厂拌热再生技术层次划分	18
2 SBS 改性沥青的老化	19
2.1 SBS 改性沥青的基本特性	19
2.1.1 高聚物材料的基本特征	19
2.1.2 SBS 改性机理	20
2.1.3 SBS 改性沥青的宏观特性	23
2.2 SBS 改性沥青的性能老化规律	25
2.2.1 SBS 改性沥青老化的关键影响因素	25
2.2.2 SBS 改性沥青性能老化规律	28
2.2.3 测力延度性能评价	31
2.3 SBS 改性剂的老化特性	36
2.3.1 SBS 改性剂热氧老化特性	36
2.3.2 改性剂在轻质油分中的老化特性	40

2.4	SBS 改性沥青的老化机理	45
2.4.1	SBS 改性沥青的微观结构分析	46
2.4.2	SBS 改性沥青的老化机理总结	53
2.5	SBS 改性沥青混合料的老化特征	57
2.5.1	老化 SBS 混合料的力学性能	58
2.5.2	老化 SBS 混合料的路用性能	59
2.5.3	SBS 混合料性能老化机理	60
3	老化沥青的性能恢复	61
3.1	沥青的流变性质	61
3.1.1	沥青的基本流变特性	61
3.1.2	沥青老化过程中的流变行为	63
3.2	老化沥青性能再生机理	64
3.2.1	胶体结构组分调和	65
3.2.2	溶液相容性调衡	68
3.2.3	流变特性调和	72
3.3	再生剂的应用	77
3.3.1	再生剂的基本特性	78
3.3.2	再生剂对老化沥青的性能恢复	84
3.3.3	再生剂的扩散作用特性	90
3.4	再生剂的研制	99
3.4.1	再生剂研制思路	99
3.4.2	改性再生剂配制	100
3.4.3	改性再生剂性能评价	108
4	热再生沥青混合料组成设计关键技术	114
4.1	再生混合料组成设计基本原则	114
4.2	回收旧料的关键性状分析	116
4.2.1	回收旧料的应用概况	116
4.2.2	旧料的沥青与级配评价	120
4.2.3	旧料掺配比率的选择	125
4.3	老化沥青(混合料)性能再生关键评价技术	126
4.3.1	老化沥青抽提回收方法分析	127
4.3.2	基于混合料性能恢复的再生评价方法	133
4.4	再生混合料最大理论密度确定方法	143

4.4.1	规范方法概述	143
4.4.2	不同方法的适用性分析	146
4.4.3	试件真空法	150
5	厂拌热再生关键工艺技术	154
5.1	再生工艺的核心影响因素	154
5.2	旧料对再生工艺的影响与处治措施	157
5.2.1	旧料的变异性影响因素	158
5.2.2	旧料的清洁性与含水率	161
5.2.3	旧料的处治与测试	167
5.3	厂拌热再生旧料加热效果分析	171
5.3.1	旧料残留颗粒团分析	171
5.3.2	旧料合理加热温度分析	176
5.3.3	厂拌热再生加热工艺参数分析	185
5.3.4	加热工艺对旧料添加比例的影响	194
5.4	厂拌热再生拌和关键工艺工序	196
5.4.1	拌和顺序与拌和时间	196
5.4.2	再生混合料短期储存工序	198
6	工程实践	200
6.1	厂拌热再生设备升级改造	200
6.1.1	厂拌热再生设备的基本要求	200
6.1.2	厂拌热再生设备改造实例	200
6.2	厂拌热再生沥青混合料配合比设计	203
6.2.1	原材料测试与级配设计	203
6.2.2	马歇尔配比设计	207
6.2.3	再生混合料性能检验	209
6.3	厂拌热再生的施工控制	212
6.3.1	再生混合料施工前准备	212
6.3.2	厂拌热再生沥青混合料的生产	213
6.3.3	运输与摊铺碾压	216
	参考文献	219

1 绪 论

沥青路面在使用一定时间后,其整体性能将不能满足路用要求,但作为路用材料仍有很高的利用价值。通过路面再生,可以使其重新满足路用性能要求,既可以节省大量材料资源和资金,也可避免环境污染,实现循环经济发展模式和可持续发展。

1.1 沥青路面的再生利用

根据我国《公路沥青路面再生技术规范》(JTG F41—2008)的定义^[1],沥青路面再生是指,采用专用机械设备对旧沥青路面或者回收沥青路面材料(RAP)进行处理,并参加一定比例的新集料、新沥青、再生剂(必要时)等形成路面结构层的技术。按照再生混合料拌制和施工温度的不同,沥青路面再生可分为热再生和冷再生;按照施工场合和工艺的不同,沥青路面再生可以分为厂拌再生和就地再生。

1.1.1 国外应用概况

欧美以及日本等发达国家很早就开始发展沥青路面再生利用技术,如今已经形成了比较规范化的再生利用技术体系^[2-13]。

相关资料和研究显示美国是最早进行沥青路面再生利用也是目前再生技术发展较为成熟的国家之一。早在 1915 年美国就有了关于旧沥青再利用的记录,美国人 Warren Brothers 在工厂内,通过对旧沥青层块进行加热,首次实现了重新利用,并“取得了较好使用效果以及节省了可观的费用”,但该项技术当时并未真正引起重视。

1956 年以后,随着美国州际公路网络的初步形成以及原油价格的上涨,再生技术逐渐被重视起来;1973 年石油危机造成全球油价上涨,恰逢美国国内高速公路出现大面积病害,铣刨重修的代价倍增,美国联邦公路局开始大力资助再生技术的研究工作,包括交通运输研究委员会及材料与实验协会在内的各种组织协会均大力推动该项研究工作的进展与交流,仅 1974 年,美国就对约 5 000 吨回收旧料进行了再生利用。

1981 年美国 40 个州共使用了 350 万吨再生沥青混合料,同年出版了《路面废料再生指南》及《沥青路面热拌再生技术手册》,1983 年又出版了《沥青路面冷拌再生技术手册》,到 1985 年,美国使用了近 2 亿吨再生沥青混合料。

90 年代以后,美国旧沥青混凝土的再生利用率达到 90%以上,再生混合料用量占全部路用沥青混合料的近 50%。美国联邦公路局(FHWA)1998 年公布的资料表明,所有 50 个州的政府公路局几乎都将沥青路面旧料作为骨料及黏结料的代替材料,用以生产与传统沥青混凝土品质相同的热拌再生沥青混凝土,其中旧料的添加量随各州政府规范而异,一般在

10%~50%，但主要集中在20%~30%。

2001年美国沥青再生协会出版了《美国沥青再生指南》，从工程评价、方案比选到材料设计、施工与质量评定都进行了较为全面的阐述，标志着美国的再生技术研究已经达到了稳步应用的地步，目前美国沥青路面废弃材料的重复利用率稳定在80%以上。

前苏联早在1966年就出版了《沥青混凝土废料再生利用技术的建议》，并于1979年出版了《旧沥青混凝土再生混合料技术准则》，提出了各种条件下适用的再生利用的方法，但当时规定再生沥青混合料只可用于高级路面的基层和低级路面的面层。1984年又出版了《再生路用沥青混凝土》，详细阐述了路拌再生和厂拌再生方法。近年来，俄罗斯沥青路面再生利用技术发展较快，并在生产中广为应用，仅圣彼得堡市因推广沥青路面再生技术每年就可节约沥青达1400吨之多。

原联邦德国在1978年沥青路面旧料回收利用率就已接近100%，于1981年编制了《热拌再生沥青混凝土施工规范》，并率先将再生沥青混合料应用于高速公路的路面维护。在法国和芬兰，几乎所有的城镇都组织进行旧路面材料的收集和储存工作，再生沥青混合料也主要用于低等级公路的面层和基层，逐渐发展到应用于重交通道路路面。2002年欧洲沥青路面协会(EAPA)通过互联网宣布，其成员国的旧沥青路面材料100%通过再生进行重复利用。

由于日本能源相对匮乏，所以政府很重视沥青路面再生技术的研究与应用，还根据使用旧沥青材料数量的多少，给予施工企业资金补助。日本从1976年就开始对旧沥青路面材料进行再生利用，1984年日本道路协会出版了《路面旧料再生利用技术指南》，并就有关厂拌再生技术编制了手册，1993年，全日本旧沥青路面材料的再生利用率为78%，2000年再生利用率已达到90%。全日本近两千台沥青混合料拌和设备中，一半以上可以生产再生沥青混合料；2002年，日本再生的热拌沥青混合料达4167万吨，占路面沥青混合料应用量的55%。

纵观发达国家沥青路面再生技术的发展可以看出，这些国家的再生技术发展起步较早，非常注重再生沥青混合料技术实用性的研究，因此在再生沥青混合料的评价与设计以及相应的施工工艺及配套机械的研发等方面均取得了巨大的成就，经过数十年的不断完善，已经达到了规范化和标准化的成熟程度，不仅形成了多种再生技术，同时可以根据自身的实际条件和路面性能需要合理选择适用的再生技术。

1.1.2 国内应用概况

我国沥青路面再生利用技术的发展可以大致分为五个阶段：50~70年代的探索阶段，80年代的发展与停滞阶段，90年代的再次探索阶段，21世纪以来的大规模发展阶段以及“十二五”规划中的大力推广阶段^[15-22]。

20世纪50~70年代，我国曾在轻交通道路、人行道或道路的垫层中不同程度上利用过旧沥青材料。70年代初期，山西、湖北、河南等省份曾将回收利用的废旧渣油沥青路面材料用作道路养护维修时的基层材料，湖南省公路部门将乳化沥青加入旧渣油表处面层材料，并分别用拌和法和层铺法修筑了试验路，证明了旧路材料再生利用的技术可行性和经济可行性。但当时我国的道路发展还比较落后，甚至还没有真正意义上的高速公路，因此也谈不上真正意义上的沥青混合料再生技术利用。

进入 80 年代,随着经济的迅速发展,交通量及重型车辆的迅猛增长,又限于公路建设投资的有限,沥青路面再生技术开始提上公路维修养护的工作日程。1982 年,交通运输部设立沥青渣油路面再生利用课题,对沥青路面的再生机理、再生设计与工艺等进行研究。通过理论研究,对沥青的化学热力学和流变学性能,老化过程中的流变行为变化规律以及沥青再生本质有了深刻的认识,并在此基础上初步提出了沥青混合料的再生设计方法。山西省及湖北省均结合各自省内的沥青路面维修工程,修筑了 80 多公里的试验段。1983 年建设部下达的“废旧沥青混合料再生利用”项目研究中,把旧渣油路面加入适当的轻油使之软化,采用适当改装的普通设备进行混合料的拌和,并在苏州、武汉、天津、南京四个城市铺筑了三万多平方米的试验路。尽管试验路初步效果观测表明再生路面完全可以达到不低于常规热拌沥青路面的性能,但由于生产工艺不成熟,生产设备缺乏,实用性的再生技术不够完善,因此造成再生沥青混合料生产质量无法保证,沥青路面再生利用投资大、收益慢,因此并没有形成实质意义上比较成熟的再生沥青混合料技术,甚至许多地方将已改装建成的再生设备相继拆除。80 年代后期开始,我国进入了大规模的公路建设期,路面再生技术研究和应用基本处于停滞状态。

90 年代中后期,随着早期修建的沥青路面进入大规模改建及修复阶段,沥青路面再生技术再次得到关注与探索。1992 年同济大学在槐阜路采用阳离子乳化沥青进行冷法再生沥青路面试验,1996 年湖南省在低等级公路改造中使用废机油为再生剂进行了沥青路面再生利用的应用研究,1997 年江苏省淮阴市用乳化沥青冷拌再生旧料后铺筑了路面。尽管都只是小规模尝试性研究与应用,但是为我国沥青路面再生技术的大规模开发应用研究起到了良好的推动作用。

进入 21 世纪,随着我国高等级沥青路面维修养护量的不断增加,沥青路面再生技术才真正意义上引起了国内的广泛重视与研究,开始进入深入化、系统化的研究和推广应用阶段。2000 年,沈大高速公路营口段开展了旧沥青路面材料再生试验研究。2001 年,北京市采用沥青混合料再生技术铺筑了第一条环保沥青路,并于 2002 年推出《北京市路面沥青混凝土旧料再生利用管理办法》。2002 年同济大学和东南大学承担的国家高技术研究发展计划(863 计划)课题中首次将“再生沥青混合料技术”研究纳入高水平研究课题,对再生沥青混合料性能及再生配合比设计方法进行了深入系统的研究。2003 年,广佛高速公路路面大修中,引进美国 ASTEC 公司双滚筒沥青再生拌和设备进行了沥青路面的再生利用,沥青下面层设计采用了旧料掺量为 20% 的再生沥青混合料。同年 6 月至 8 月,上海浦东路桥建设公司利用就地热再生技术对沪宁高速公路上海段的沥青路面上面层进行了再生修复。经过不断的探索研究与应用证明了沥青路面再生利用技术在我国的可操作性与必要性。2005 年以后沥青路面再生利用技术在我国得到了大规模的推广性研究与应用。江苏、广东、河北、河南、山东等省份均引进了先进的再生设备,并已投入到实体工程应用中,取得了良好的实际应用效果,得到了较为广泛的认可。与此同时,国内的很多高校及科研机构均针对沥青路面再生技术开展了深入研究,并初步取得了许多颇富成效的科研成果。交通运输部于 2008 年 4 月颁布的《公路沥青路面再生技术规范》不仅是我国近年来沥青路面再生技术发展的一个总结,更标志着我国沥青路面再生技术在近年来飞速发展和取得丰硕研究成果的基础上进入了跨越式发展的新时期,有了更加明确的发展目标与方向。

2012 年交通运输部下发了《交通运输部关于加快推进公路路面材料循环利用工作的指

导意见》(简称《意见》),明确指出:公路路面材料循环利用是潜力巨大、效果突出的建设养护环保技术之一。据测算,我国仅干线公路大中修工程,每年产生沥青路面旧料就达 1.6 亿吨,水泥路面旧料达 3 000 万吨。然而,据统计,目前我国公路路面材料循环利用率不到 30%,远低于发达国家 90%以上利用率的水平。加快推进公路路面材料循环利用工作,对促进公路交通事业可持续发展,节约资源,降低排放及保护环境具有重要意义。《意见》中明确提出了发展目标:到“十二五”末,全国基本实现公路路面旧料“零废弃”,路面旧料回收率(含回收和就地利用)达到 95%以上,循环利用率(含回收后再利用和就地利用)达到 50%以上,其中东、中、西部分别达到 60%以上、50%以上、40%以上。到 2020 年,全国公路路面旧料循环利用率达到 90%以上。其中:高速公路到“十二五”末,路面旧料回收率达到 100%,循环利用率达到 90%以上,其中东、中、西部分别达到 95%以上、90%以上、85%以上,到 2020 年,路面旧料循环利用率达到 95%以上;普通干线公路到“十二五”末,路面旧料回收率达到 95%,循环利用率达到 70%以上,其中东、中、西部分别达到 80%以上、70%以上、60%以上,到 2020 年,路面旧料循环利用率达到 85%以上;农村公路“十二五”期间,要积极开展路面旧料的回收与循环利用,到 2020 年,基本实现路面旧料的回收与循环利用。与此同时,交通运输部也已经开始着手进行《公路沥青路面再生技术规范》的新一轮修订工作。

总体而言,与国外发达国家相比,我国无论是再生利用方式、再生材料设计与路用性能还是实用施工技术及设备的研究依然还处于未成熟阶段,还缺乏系统的理论指导和实用的核心技术。但是经过近十年的发展,我国沥青路面再生技术已经取得了长足的进步,在实体工程中得到了良好的推广应用,积累了丰富的工程经验,而我国当前的沥青路面使用现状以及国家发展政策与模式均为沥青路面再生技术的继续深入研究和推广应用提供了前所未有的良好平台与支撑。

1.1.3 沥青路面厂拌热再生技术

国际经合组织曾经对 14 个国家的路面材料再生利用情况进行了调查,并发表了《道路工程再生利用战略》白皮书,从调查结果来看,被调查国家的旧沥青路面材料再生利用率为 75%~100%,再生材料主要用于路面面层结构,少量用作回填材料和其他用途。相对来讲,厂拌热再生技术的应用最为普遍,几乎所有被调查国家都将厂拌热再生技术作为首选技术使用。总体而言,无论是国内还是国外,沥青路面厂拌热再生技术发展相对较早也较成熟,是目前为止应用最为普遍的沥青路面再生利用技术。

按照我国《公路沥青路面再生技术规范》(JTJG F41—2008)的定义,厂拌热再生(Central Plant Hot Recycling)是将回收沥青路面(Reclaimed Asphalt Pavement, RAP)材料运至沥青拌合厂(场、站),经破碎、筛分,以一定的比例与新集料、新沥青、再生剂(必要时)等拌制成热拌再生混合料铺筑路面的技术。尽管厂拌热再生技术中使用了回收旧料,但是其材料组成、设计方法以及施工工艺与普通热拌沥青混合料没有本质的差异,因此其性能要求也与普通热拌沥青混合料相同,其应用场合以及铺筑也和普通沥青路面一样,分别按下面层、中面层、上面层(磨耗层)的不同技术要求进行。

相关研究表明,厂拌热再生方法处理的沥青路面旧料的掺配比例可达到 50%~60%,并且通过适当设计,生产的再生沥青混合料完全可以达到高等级公路沥青路面技术标准的要求。1997 年澳大利亚就在其《沥青混凝土路面再生指南》中指出,即使是含有 60%再生料

的沥青路面经过合理的设计与施工,其使用寿命也可以达到与传统沥青路面相同的水平,甚至有较优的抗车辙性能。美国在 20 世纪 80 年代中后期至今发表的系列研究报告表明,经过正确设计和施工的再生沥青路面,无论是路用性能还是使用寿命,与全新料沥青路面都没有明显的区别。日本道路协会对热拌再生沥青混合料应用于条件苛刻的重交通道路路面的调查结果表明,只要对热拌再生沥青混合料进行恰当的质量控制管理,铺装后的性能与全新料路面基本没有区别。

由于回收旧料性能的复杂性以及受施工工艺水平的限制,当前的再生工程实践中,旧料的普遍掺量多集中于 20%~30%。但是相关研究也证实^[23],如果能够精确地控制材料组成以及施工工艺条件,旧料的掺量完全可以进一步提高。美国加利福尼亚州曾经在厂拌热再生中,应用微波技术和高速热气流传热再生新技术,使得旧料的掺参加达到了 90%~100%。将旧沥青路面经过破碎、筛分、预热并去除水分,送入微波炉加热,使 RAP 温度达到 149℃时,旧沥青结合料既不会燃烧也不会焦化,同时可减少对环境的污染。然后,加入再生剂使旧沥青恢复到原来状态。在拌合机内将再生剂、RAP 重新拌和得到在化学和物理性质上与新沥青混合料接近的热拌沥青混合料。这种热拌沥青混合料与新的沥青热拌混合料相比,质量相近,但费用却只有新混合料的 2/3。

相比于基质沥青,改性沥青在某些方面的路用性能,如高温抗车辙性能、低温抗裂性能、抗水损性能及综合路用性能方面有良好的改善,因此具有更广泛的适用性,从而在世界范围内得到了良好的推广应用。以美国为例,目前绝大多数州都规定在高速公路沥青路面修建中必须使用改性沥青。我国现在新修的沥青路面尤其是等级较高的沥青路面多倾向于使用改性沥青。以江苏省为例,近年来修建的沥青路面基本上都在上、中面层使用了改性沥青,有的甚至在上、中、下面层均使用了改性沥青。由于改性沥青的大规模使用相对较晚,因此其再生利用近年来才受到广泛的关注。之前的沥青路面热再生利用技术及其研究成果大多针对基质沥青,因此,必须从机理、再生技术方法以及施工工艺上有所创新与改进,才能够真正有效地实现改性沥青混合料的热再生利用。

总体而言,在众多再生方法中,厂拌热再生方法是一种颇具竞争力的修复措施,在利用旧沥青路面材料时,该方法不仅能够减缓、消除路面病害,还能够增强路面的承载能力。但是在厂拌热再生方法中,因为使用了回收旧料以及再生剂等,应针对再生沥青混合料拟用层面进行专门的材料性能配比设计,以及相应的拌制及摊铺工艺设计,需要专门的热再生混合生产设备。由于旧料性能的复杂性,厂拌热再生技术中依然存在很多需要研究和改进的地方,尤其是提高旧料掺量的再生沥青混合料技术还需要进一步的深入探索研究。

1.2 厂拌热再生混合料配合比设计方法

我国的《公路沥青路面再生技术规范》(JTG F41—2008)依据国外的设计方法结合我国的工程经验对厂拌热再生的沥青混合料配合比设计给出了相应的规定,在此不再多加描述,在后续章节中将会针对我国的厂拌热再生混合料材料组成设计方法及其关键技术优化做详细分析。本小节仅对国外的热再生沥青混合料配合比设计基本步骤做相关的介绍。

1.2.1 再生混合料组成设计基本流程

由于再生沥青混合料材料组成的复杂性以及各国原有的沥青混合料设计方法与工程经验各有不同,因此各个国家的热再生沥青混合料设计方法也不尽相同。综合现有的各种设计方法,再生沥青混合料设计的基本环节与流程如图 1.1 所示。热再生沥青混合料的材料组成设计除包括了普通混合料配合比设计中需要解决的新料原材料评价、级配设计、最佳油石比确定等外,还需要解决旧料的性能评价、旧料掺配比例的确定、再生剂的类型与用量确定等内容。

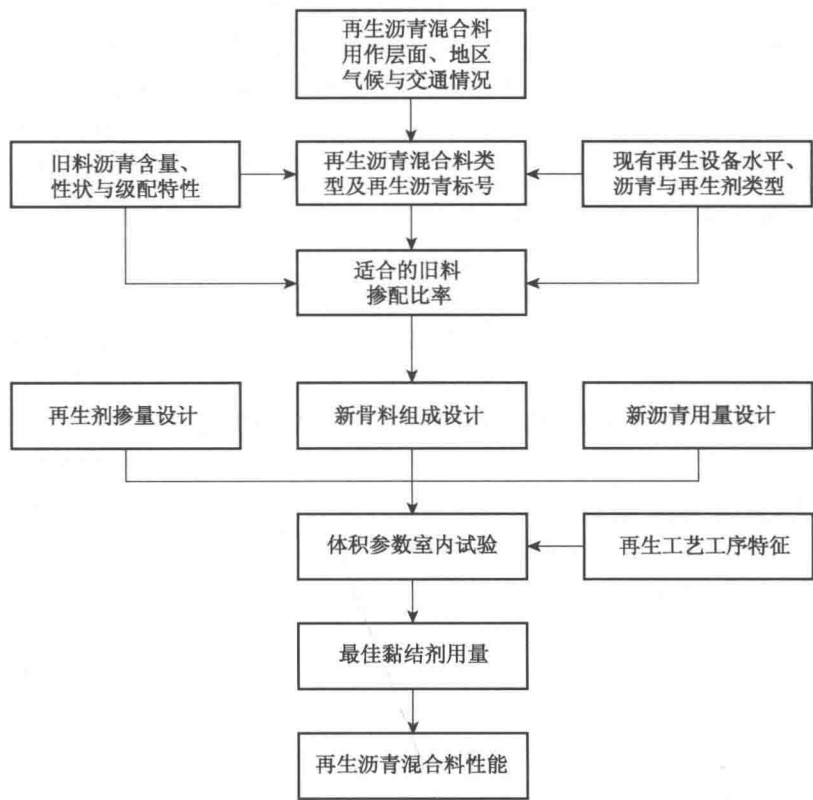


图 1.1 再生沥青混合料设计基本环节与流程图

总体而言,热再生沥青混合料材料设计包括两个基本步骤:材料测试和混合料的配合比设计。材料测试的目的是确定组成材料的各项指标,从而优化材料组成以达到混合料设计的要求。混合料的配合比设计是通过测试混合料试件的各种性能来确定最佳级配组成与油石比。因此,热再生沥青混合料设计应包含以下基本步骤:

- (1) 获取有代表性的旧路面回收材料样品。
- (2) 进行室内试验分析:①测试回收料的性质,确定回收料的组成;②确定旧料用量以及添加的新集料的用量;③确定新沥青、再生剂的种类及其用量。
- (3) 通过性能试验确定满足设计指标的最佳混合料组成。

1.2.2 马歇尔设计法

结合相关研究^[24, 25],首先对传统的马歇尔设计方法做简要介绍。图 1.2 是传统的马歇尔设计法设计热再生混合料的步骤。

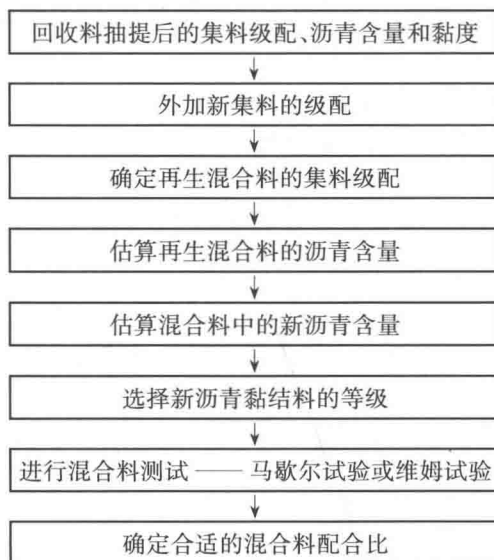


图 1.2 再生混合料设计流程图

1) 回收料中的外加集料比例 r

根据旧路面中的集料和新集料的级配,可以计算出符合再生级配的外加集料比例,从而可以计算出新加入集料占再生混合料总集料的重量百分比 r 。

2) 再生混合料目标沥青含量

再生混合料目标沥青含量的确定方法比较复杂。对于热再生沥青混合料,最实际可行的方法就是假定回收料添加并不影响沥青含量的确定。也就是说,根据新、旧集料的级配所得到的混合料级配就可以确定目标沥青含量,而且回收料添加量对这个结果没有影响。因此,实验室可以将相同新集料级配所确定的沥青用量作为再生混合料的目标沥青含量。

如果以前并没有对同类新集料和相同级配的混合料进行过测试,那么再生混合料的目标沥青含量可以根据美国沥青协会维姆混合料设计法确定,或者以下面的公式估算:

$$P = 0.035a + 0.045b + Kc + F \quad (1-1)$$

式中: P ——再生混合料的目标沥青含量估算值,以占沥青混合料重量百分数表示;

a ——以整数表示,2.36 mm 筛以上的集料百分数;

b ——2.36 mm 筛和 0.075 mm 筛之间的集料百分数,以整数表示;

c ——0.075 mm 筛以下的集料百分数;

K ——集料系数,根据 c 值变化而变化, $c=11\sim15$ 时,取 0.15; $c=6\sim10$ 时,取 0.18;
 $c=0\sim5$ 时,取 0.20;

F ——系数,根据集料的比重和表观特性,取 0~2.0。如果没有参考值,可以取 0.7。

根据以上的目标沥青含量估算值为基准,增加或减少 0.5%、1.0% 的沥青用量,分别进行检测就可以确定最佳的沥青含量。例如,经过计算得到估算值为 5.2%,则可以对 5.0%、±0.5%、±1.0% 等五个沥青用量等级测试,得到最佳的再生混合料沥青含量 P_b 。

根据外加集料的比例 r 、回收料沥青含量 P_{sb} 和再生混合料目标沥青含量 P_b ,就可以分别得到混合料其他成分的计算值。为了便于查找和参考,这里列出公式中各个符号的代表意义:

P_{sm} ——回收旧料占再生混合料总重的百分比,%;

P_{sb} ——回收旧料中沥青占旧料的百分比,%;

P_{nb} ——外加沥青占再生混合料重量的百分比,%;

P_{ns} ——外加新集料占再生混合料重量的百分比,%;

R ——外加沥青(包括再生剂)占总沥青的百分比,%。

3) 外加沥青含量

外加沥青含量 P_{nb} 是指外加沥青占再生混合料重量的百分比,按照下式计算:

$$P_{nb} = \frac{(100^2 - rP_{sb})P_b}{[100(100 - P_{sb})]} - \frac{(100 - r)P_{sb}}{(100 - P_{sb})} \quad (1-2)$$

例如,在实际工程中, $P_{sb}=4.5$, $r=75$,那么有

$$P_{nb} = \frac{(100^2 - 75 \times 4.5)P_b}{[100(100 - 4.5)]} - \frac{(100 - 75) \times 4.5}{(100 - 4.5)} = 1.012 P_b - 1.178$$

这样,就可以根据不同的再生混合料沥青含量确定不同的外加沥青用量。

4) 外加沥青的标号选择

设计中,首先要确定混合料的沥青设计黏度,即目标黏度。一般,设计黏度值与施工方法、气候条件和交通条件有关,应取当地同等条件道路沥青标号黏度范围的中值。然后再计算外加沥青(包括再生剂)占总沥青的百分比 R ,其计算公式为:

$$R = 100 P_{nb} / P_b \quad (1-3)$$

图 1.3 为沥青黏度-外加沥青比例图,已知回收料的老化沥青黏度为左侧纵坐标,根据外加沥青百分比 R 和目标黏度可以在图 1.3 中确定一个坐标点,而外加沥青的黏度显示在右侧纵坐标上。例如,工程目标黏度为 2 000 泊,外加沥青的百分比 R 为 81%,回收料沥青黏度为 60 000 泊,那么就很容易确定坐标点 A 和 B ,将 A 和 B 连成直线,并延长至右侧纵坐标得到坐标点 C ,这样就确定了外加沥青的黏度应为 900 泊,从而,也就确定了外加沥青的标号。

在外加沥青标号选择时,建议遵循以下经验原则:

(1) 当回收料比例低于 15% 时,采用当地通用的沥青标号,不必进行调整;

(2) 当回收料比例超过 15% 时,标号提高一个等级就可以了。除非经过车辙试验的检验,一般不要将标号提高超过一个等级。

5) 回收料含量和新集料含量

回收料含量是指回收料占再生混合料总重的百分比,以整数表示。下面给出回收料含量计算公式:

$$P_{sm} = \frac{100(100-r)}{(100-P_{sb})} - \frac{(100-r)P_b}{(100-P_{sb})} \quad (1-4)$$

外加新集料占再生混合料重量的百分比 P_{ns} 的计算公式为:

$$P_{ns} = r - \frac{rP_b}{100} \quad (1-5)$$

6) 混合料设计

应用前面的计算公式,就可以得到控制施工的主要技术参数。然后,应用马歇尔(Marshall)设计法进行混合料设计。

7) 确定最佳混合料配合比

根据混合料测试的结果,确定最佳混合料配合比。如果混合料设计采用马歇尔(Marshall)设计法,建议选取 4.0% 空隙率对应的沥青含量作为最佳沥青含量。

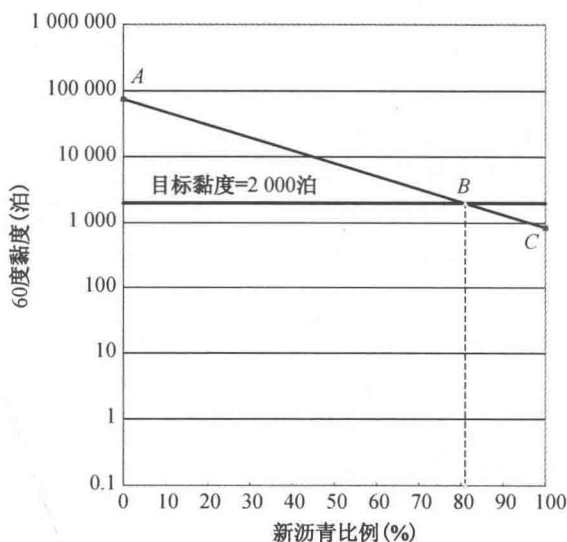


图 1.3 沥青黏度-外加沥青比例计算图

1.2.3 Superpave 设计法

由于热拌沥青混合料方法设计体系的不同,基于 Superpave 的热再生沥青混合料设计法在我国应用相对较少,在国外应用比较普遍^[26, 27]。热再生沥青混合料 Superpave 设计方法可以按照图 1.4 的步骤进行。



图 1.4 再生混合料设计流程图——Superpave 方法