

沥青路面再生利用 理论与实践

THEORY AND
PRACTICE
OF ASPHALT
PAVEMENT
RECYCLING

黄晓明 赵永利 著



科学出版社

沥青路面再生利用理论与实践

黄晓明 赵永利 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书内容包括沥青的老化机理分析,再生剂的开发与评价,热再生沥青混合料的设计与评价,冷再生沥青混合料的设计与评价,以及再生沥青路面的工程实践等。

本书可供从事道路工程及铁路、土建工程的科研、设计、施工(新建及养护)与建设管理技术人员参考,亦适合高等院校与科研机构的教师、学生、相关专业技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

沥青路面再生利用理论与实践/黄晓明,赵永利著. —北京:科学出版社, 2014.7

ISBN 978-7-03-041368-0

I. ①沥… II. ①黄… ②赵… III. ①沥青路面-再生路面-道路工程-研究 IV. ①U416.217

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 149583 号

责任编辑:陈岭啸 焦惠丛 顾晋飴/责任校对:赵桂芬
责任印制:肖 兴/封面设计:许 瑞

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 7 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014 年 7 月第一次印刷 印张:26 1/2 插页:2

字数:635 000

定价:99.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

随着沥青路面使用时间的增加,沥青路面将出现功能性病害和结构性病害。到 2013 年年底,我国公路总里程超过 430 万 km,高速公路也居世界第一位,超过 10 万 km,路面的科学养护与管理将是十分重要的内容。沥青路面旧料再生利用不仅能大大节约资源,同时能保护生态环境,符合交通可持续发展的基本国策。

沥青路面再生利用总体上可分为厂拌和就地热再生、厂拌和就地冷再生以及全厚式再生等五类。从再生后沥青混合料的基本性质来分析,全部或部分恢复其原有性能的可称为再生,没有恢复原有性能的只能称为再利用。因此,如何高效利用沥青路面养护维修过程中产生的旧料以及合理设计再生或再利用沥青混合料、合理设计再生利用的沥青混合料的层位、合理设计再生沥青路面结构是沥青路面再生利用过程中必须考虑的重要问题。

目前沥青路面的再生利用已成为我国公路建设和养护发展的重要方向,但对于再生技术的理解尚存在诸多争议。本书作者经过十多年的基础研究与积累,结合多年的工程应用实践,出版了《沥青路面再生利用理论与实践》一书,供相关技术人员参考。

全书分 12 章,第 1 章绪论、第 2 章基质沥青的老化机理、第 3 章 SBS 改性沥青的老化、第 4 章老化沥青改性再生剂的研发、第 5 章改性再生剂的性能评价、第 6 章再生沥青混合料的配合比设计、第 7 章 SMA 路面的就地热再生、第 8 章就地热再生工艺优化及适用性、第 9 章沥青混合料厂拌热再生的优化设计、第 10 章泡沫沥青冷再生混合料、第 11 章乳化沥青冷再生混合料、第 12 章冷再生加铺结构设计方法研究,在编写过程中参考了课题组多位博士及硕士的研究成果。

本书得到国家科学技术学术著作出版基金、交通运输行业高层次科技人才培养项目专著出版基金和江苏省优势学科建设经费的资助。

同时要感谢李海军博士、马涛博士、王真博士、薛颜卿博士、顾凡博士、张道义硕士、范庆国硕士、耿磊硕士、刘晓珊硕士等为本书所作的贡献。在本书编写中得到诸多研究人员和单位的大力支持和帮助,在此表示衷心感谢。

作 者

2014 年于南京

目 录

前言

第 1 章	绪论	1
1.1	沥青路面的再生利用	1
1.1.1	国外沥青路面再生技术的使用	1
1.1.2	国内沥青路面再生技术的使用	3
1.2	沥青路面再生利用研究现状	4
1.2.1	沥青材料老化性状及再生适用性评价	4
1.2.2	老化沥青的再生机理研究	6
1.2.3	再生沥青路面材料配比设计	14
1.2.4	沥青路面再生工艺特征及适用性	21
第 2 章	基质沥青的老化机理	24
2.1	沥青材料的结构组成	24
2.1.1	沥青的元素组成	24
2.1.2	沥青的化学组分	26
2.1.3	沥青的胶体结构	30
2.2	沥青老化的基本规律	32
2.2.1	热氧老化作用	32
2.2.2	紫外线老化作用	34
2.2.3	水侵蚀作用	36
2.3	沥青老化的深入分析	38
2.3.1	SHRP 方法评价沥青的老化性能	38
2.3.2	热分析方法评价沥青老化性状	41
2.3.3	旧沥青二次老化性状	45
2.4	沥青老化机理分析	46
2.4.1	沥青老化行为理论	46
2.4.2	沥青老化行为机理分析	49
2.5	老化沥青的再生机理分析	55
2.5.1	溶液相容性调衡	55
2.5.2	组分调合设计	56
第 3 章	SBS 改性沥青的老化	59
3.1	SBS 改性沥青的基本性能	59
3.1.1	高聚物材料的基本特征	59
3.1.2	SBS 改性剂	60

3.1.3	SBS 改性沥青的技术标准	60
3.2	SBS 改性沥青的老化特性	61
3.2.1	SBS 改性沥青宏观特性研究	62
3.2.2	SBS 改性剂老化的特性评价	64
3.3	SBS 改性沥青老化作用机理	76
3.3.1	SBS 改性沥青胶溶状态的荧光显微分析	76
3.3.2	SBS 改性沥青老化性能的试验分析	79
3.3.3	SBS 改性沥青老化影响因素分析	81
3.3.4	老化 SBS 改性沥青的测力延度评价	85
第 4 章	老化沥青改性再生剂的研发	94
4.1	再生剂研究概述	94
4.2	老化沥青性能的调合再生	97
4.2.1	材料复合理论	97
4.2.2	老化沥青的调合再生	98
4.3	普通再生剂成分及基本性能分析	100
4.3.1	再生剂的组成	100
4.3.2	再生剂的安全性	102
4.3.3	再生剂的黏度	103
4.3.4	再生剂的耐老化性能	103
4.4	普通再生剂对老化沥青的再生效果	104
4.4.1	再生沥青的温度敏感性	104
4.4.2	再生沥青的高温性能	108
4.4.3	再生沥青的低温流变性能	110
4.4.4	再生沥青的抗老化性能	112
4.5	改性再生剂的开发	113
4.5.1	改性再生剂开发的指导思想	113
4.5.2	改性再生剂的研发模式	113
4.5.3	材料选择原则	114
4.5.4	改性再生剂配制	115
第 5 章	改性再生剂的性能评价	125
5.1	再生剂性能评价方法	125
5.1.1	热再生剂基本质量要求	125
5.1.2	沥青再生试样的养护	126
5.1.3	延度试验温度的确定	127
5.1.4	再生剂扩散性能评价	127
5.1.5	再生沥青胶浆状态分析	133
5.2	改性再生剂对老化基质沥青的再生效果评价	137

5.2.1	常规技术指标分析	137
5.2.2	扩散能力分析	137
5.2.3	再生沥青的性能分析	138
5.2.4	再生混合料的性能分析	139
5.2.5	再生剂对旧改性沥青性能的再生效果评价	140
第 6 章	再生沥青混合料的配合比设计	149
6.1	回收旧沥青性状及其再生适用性	149
6.1.1	回收旧沥青性状特点	149
6.1.2	回收旧集料性状及其再生适用性	154
6.1.3	集料细化程度评价	161
6.2	老化沥青抽提回收方法的评价与改进	163
6.2.1	抽提回收沥青的试验方法	163
6.2.2	旧沥青回收的影响因素及其解决方案	166
6.3	再生沥青混合料的配合比设计	172
6.3.1	再生沥青混合料配合比设计的基本原则	172
6.3.2	热再生沥青混合料材料组成设计	178
6.4	基于混合料的性能恢复效果评价方法研究	187
6.4.1	老化沥青混合料的性能评价方法研究	187
6.4.2	SBS 改性沥青混合料老化程度评价	190
6.4.3	基于环形加载的再生效果评价	194
第 7 章	SMA 路面的就地热再生	200
7.1	SMA 混合料的特点	200
7.1.1	SMA 混合料的组成特点	200
7.1.2	SMA 混合料的性能特点	202
7.2	SMA 路面使用特性调查分析	204
7.2.1	SMA 路面典型病害调查	204
7.2.2	SMA 路面车辙病害调查	205
7.2.3	SMA 混合料性能试验分析	209
7.3	SMA 混合料的级配衰变规律研究	218
7.3.1	集料的破碎特征	218
7.3.2	集料的破碎级配	221
7.3.3	SMA 级配衰变特性分析	223
7.4	SMA 混合料骨架特性的恢复	227
7.4.1	集料骨架内摩阻力研究	227
7.4.2	集料骨架恢复	232
7.5	纤维性能老化与新纤维应用分析	234
7.5.1	纤维性能老化分析	234

7.5.2	新纤维的应用分析	237
第 8 章	就地热再生工艺优化及适用性	240
8.1	就地热再生的工艺组成	240
8.1.1	就地热再生的工序	240
8.1.2	就地热再生的分类	243
8.2	就地热再生关键工艺特征研究	245
8.2.1	加热效果分析	245
8.2.2	再生机组运行速度分析	246
8.2.3	就地热再生加热过程对沥青的再老化分析	249
8.2.4	SMA 混合料的分散均匀性分析	251
8.3	就地热再生加热工艺优化研究	255
8.3.1	加热温度场数值分析建模	255
8.3.2	加热工艺对就地热再生温度场的影响	259
8.3.3	改进加热工艺的现场验证	269
8.3.4	现场热再生成型工艺条件分析	271
8.4	现场热再生对 SMA 路面车辙维修适用性分析	281
8.4.1	中面层经车辆荷载作用后抗车辙性能的变化	281
8.4.2	现场热再生对中面层的再压实作用	284
8.4.3	层间接触状态对 SMA 路面车辙发展规律的影响分析	285
第 9 章	沥青混合料厂拌热再生的优化设计	291
9.1	厂拌热再生工艺条件对再生混合料性能的影响	291
9.1.1	厂拌热再生沥青混合料生产工艺	291
9.1.2	厂拌热再生工艺参数对再生混合料性能的影响	294
9.2	旧料性能对厂拌热再生工艺的影响	299
9.2.1	含水率对 RAP 掺量的影响	299
9.2.2	旧料加热温度的确定	300
9.2.3	旧料加热温度对再生混合料的性能影响	307
9.2.4	厂拌热再生工艺合理拌和顺序研究	308
9.3	再生沥青路面的施工控制	309
9.3.1	再生混合料施工前准备	309
9.3.2	厂拌热再生沥青混合料的拌和	309
9.3.3	厂拌热再生沥青混合料运输	311
9.3.4	厂拌热再生沥青混合料摊铺碾压	312
第 10 章	泡沫沥青冷再生混合料	313
10.1	泡沫沥青发泡原理及评价指标	313
10.1.1	泡沫沥青的发泡原理	313
10.1.2	沥青发泡评价指标	314

10.2	泡沫沥青混合料设计及试验方法	314
10.2.1	确定沥青最佳发泡条件	314
10.2.2	混合料级配	315
10.2.3	最佳含水量	316
10.2.4	最佳沥青含量	316
10.2.5	最佳水泥用量	317
10.3	泡沫沥青冷再生混合料配合比设计	318
10.3.1	沥青性能试验及沥青发泡特性试验	318
10.3.2	确定混合料级配	319
10.3.3	确定最佳含水量	322
10.3.4	确定最佳沥青含量	323
10.3.5	确定最佳水泥用量	325
10.3.6	试验结果分析	327
10.4	泡沫沥青混合料强度特性	328
10.4.1	泡沫沥青混合料组成及作用	328
10.4.2	强度形成过程及强度特性	329
10.4.3	强度的影响因素	333
第 11 章	乳化沥青冷再生混合料	342
11.1	旧料残余强度研究	342
11.2	冷再生混合料的配合比设计	345
11.2.1	乳化沥青冷再生混合料的配合比设计	345
11.2.2	用水量对冷再生混合料性能的影响	347
11.2.3	乳化沥青种类和用量对冷再生混合料性能的影响	349
11.2.4	水泥用量对冷再生混合料性能的影响	354
11.2.5	击实次数对冷再生混合料性能的影响	356
11.2.6	养生条件对冷再生混合料性能的影响	358
11.3	乳化沥青冷再生混合料的性能研究	361
11.3.1	乳化沥青冷再生混合料的空隙率	361
11.3.2	乳化沥青冷再生混合料的水稳定性	362
11.3.3	乳化沥青冷再生混合料的高温稳定性	363
11.3.4	乳化沥青冷再生混合料的静态模量	363
11.3.5	乳化沥青冷再生混合料的动态模量	364
11.3.6	乳化沥青冷再生混合料的抗疲劳性能	372
第 12 章	冷再生加铺结构设计方法研究	378
12.1	国内外冷再生结构设计方法对比分析	378
12.1.1	国外冷再生结构设计方法简介	378
12.1.2	我国设计方法	382

12.1.3 国内外设计方法的优缺点	383
12.2 冷再生沥青路面结构设计	385
12.2.1 总体原则	385
12.2.2 冷再生材料抗拉强度结构系数	386
12.2.3 冷再生材料轴载换算公式	393
12.2.4 旧路面结构残余承载力	396
12.2.5 结构设计流程	398
12.3 冷再生加铺结构设计实例	400
12.3.1 交通量计算	400
12.3.2 路面结构组合设计	401
12.3.3 结构参数确定	402
12.3.4 结合组合验算	403
12.4 乳化沥青冷再生试验路的铺筑与检测	405
12.4.1 旧路状况调查	405
12.4.2 试验路施工	406
12.4.3 试验路检测	407
参考文献	409
图版	

第1章 绪 论

1.1 沥青路面的再生利用

根据中华人民共和国交通运输部规范《公路沥青路面再生技术规范》(JTG F41—2008)的定义,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(reclaimed asphalt pavement, RAP)进行处理,并掺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。

可以看出,沥青路面再生是一个非常广义的概念,为进一步明确不同工艺所产生的效果,本书将其具体分为再生和再利用,其定义如下。

再生:以旧料为主要原材料(或之一),按照原有材料性能或接近原有材料性能的要求,对其进行加工和使用的过程。

再利用:以旧料为主要原材料(或之一),按照不同于原有材料性能的要求,对其进行加工和使用的过程。

从上述定义可以看出,沥青路面厂拌热再生技术和就地热再生技术,属于对旧路面和旧料的再生,而沥青路面的冷再生技术则属于再利用,其两者的主要区别在于新制备混合料性能上的差异。在《公路沥青路面再生技术规范》(JTG F41—2008)中,厂拌热再生和就地热再生混合料的性能要求与新拌沥青混合料一致,而对厂拌冷再生和就地冷再生混合料的性能要求则侧重于劈裂强度,明显不同于热拌沥青混合料,更接近于对基层材料性能的要求。

区分再生与再利用,可以更明确对再生后混合料的性能要求。但并不是说再生技术就高于再利用技术,不同的技术和不同性能的再生混合料有不同的工程适用场合。无论是从技术角度还是从环保角度,只要能实现旧料的循环利用,都具有巨大的价值。本书重点以沥青路面的再生技术为主要论述对象。

1.1.1 国外沥青路面再生技术的使用

对沥青路面有文字记载的再生利用,可追溯到美国人 Warren Brothers 在 1915 年进行的探索,其在工厂内,通过对旧沥青层块进行加热,首次实现了重新利用,并取得了较好的使用效果并且节省了可观的费用,但该项技术并未真正引起重视。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,沥青路面的养护与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,使得人们对沥青路面再生技术逐渐重视起来。1974 年,美国对约 5000t 回收旧料进行了再生利用;1981 年,美国 40 个州共

使用了 350 万 t 再生沥青混合料；到 1985 年，美国使用了近 2 亿 t 再生沥青混合料，占全部路用沥青混凝土的 1/2。

20 世纪 90 年代，美、德等国旧沥青混凝土的再生利用率都在 90% 以上，1994 年美国各州因使用回收旧沥青而节约的费用达 3 亿美元。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的规范而异，一般在 10%~50%。近年来，加利福尼亚州在厂拌热再生中，应用了微波技术和高速热气流传热再生新技术，旧料的掺加率达到了 90%~100%。

日本从 1976 年开始对旧沥青路面材料进行再生利用，由于日本能源相对匮乏，政府很重视这项技术的研究与应用，还根据使用旧沥青材料数量的多少，给施工企业予以资金补助。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 2000 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 t，占路面沥青混合料应用量的 55%。

西欧国家也十分重视沥青路面再生利用这项技术。联邦德国在 1978 年，沥青路面旧料回收利用率已接近 100%，并率先将再生沥青混合料应用于高速公路的路面维护。在芬兰，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，再生沥青混合料也由以前的主要用于低等级公路的面层和基层，发展到应用于重交通道路路面。法国也已开始在高速公路和一些重交通道路的路面修复工程中推广应用再生技术。2002 年欧洲沥青路面协会（EAPA）已通过互联网宣布，其成员国的旧沥青路面材料 100% 通过再生进行重复利用。

苏联很早就对沥青路面再生技术进行了研究，但实际应用相对较少。1979 年，苏联出版了《旧沥青混凝土再生混合料技术准则》，提出了适于各种条件下再生利用的方法，其中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。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 1400t 之多。

在节省费用方面，比利时的统计表明，再生沥青混合料比普通沥青混合料节省直接费用在 12% 左右；日本的统计资料显示是 5%~10%。在服务寿命方面，美国认为，就地热再生路面为 4~8 年，厂拌热再生路面为 10~20 年，就地冷再生路面为 10~15 年。

1997 年国际经济合作与发展组织对 14 个国家的路面材料再生利用情况进行了调查，发表了《道路工程再生利用战略》白皮书，其中沥青路面再生利用的基本情况为：

（1）旧沥青路面材料的再生利用率为 75%~100%；

（2）热再生技术应用最为普遍，再生材料主要用于路面面层结构，极少用作回填材料和其他用途；

（3）不论是集中厂拌还是就地方法，冷再生技术推广程度较低；

（4）就地热再生技术得到较多国家采用，但只有少数国家推广程度较高。

由此可见，欧美发达国家十分重视旧沥青路面的再生应用，基本形成了一套成熟的比较完整的沥青路面再生应用技术，并且制定了相应的技术规范，即对再生沥青及再生沥青混合料的性能进行了规范，极大促进了再生技术的推广应用。表 1.1 列出了国内外

沥青再生方面的研究技术资料。

表 1.1 国内外沥青再生技术的相关规范

出版物	国家及地区	年份
《沥青混凝土废料再生利用技术的建议》	苏联	1966
《旧沥青混凝土再生混合料技术标准》	苏联	1979
《路面废料再生指南》	美国	1981
《沥青路面热拌再生技术手册》	美国	1981
《热拌再生沥青混凝土施工规范》	联邦德国	1981
《沥青路面冷拌再生技术手册》	美国	1983
《热拌沥青混凝土基本规范》	英国	1983
《再生路用沥青混凝土》	苏联	1984
《路面废料再生利用技术指南》	日本	1984
《再生沥青混凝土施工指南》	德国	1994
《再生沥青混凝土施工规范》	中国台湾	1997

1.1.2 国内沥青路面再生技术的使用

20 世纪 50~70 年代，我国曾在不同程度上利用过旧沥青材料，但一般只用于轻交通道路、人行道或道路的垫层。70 年代初期，山西、湖北等省的公路养护部门，将开挖的旧沥青面层用于维修改造时的基层。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。1982 年，交通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、再生设计方法与工艺等进行了研究。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。但是，由于当时的生产工艺很不成熟，没有合适的再生机械，更没有足够的资金支持，造成沥青路面再生利用投资大、收益慢，而且再生沥青混合料的质量得不到保证，因此该项技术没有推广起来，甚至许多地方将已改装建成的再生设备相继拆除。

20 世纪 80 年代后期，我国开始进行大规模的新修公路建设，沥青路面再生利用技术研究的深化与延伸也一直处于停滞状态。直到 90 年代中后期，早期建成的大量高等级沥青路面陆续进入大修或改建阶段，沥青路面再生利用技术才重新引起广泛重视。例如，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，湖南省公路部门在低等级旧路改造中使用废机油作为再生剂进行了沥青路面再生利用的应用研究；1997 年，江苏淮阴市公路处用乳化沥青冷法再生旧料后铺筑路面等。随着我国高等级沥青路面维修养护量的不断增加，对沥青路面旧料的再生技术研究正逐步深入化、系统化。例如，2000 年沈大高速公路营口段沥青路面再生试验，黄晓明等针对克拉玛依

AH-70 沥青研制出 A、B 型再生剂。2003 年,广佛高速公路路面大修中,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。

2000 年后,我国对沥青路面再生技术的重视程度明显增加,在《“十二五”公路养护管理发展纲要》中将沥青路面的再生利用列为公路养护与管理工作的基本原则。2012 年交通运输部又下发了《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达 1.6 亿 t,水泥路面旧料达 3000 万 t。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。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,高速公路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,普通干线公路路面旧料循环利用率达到 85% 以上;农村公路在“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。同时,交通运输部还专门安排了交通运输节能减排专项资金。

我国政府相关部门对沥青路面的再生利用也相当重视,原国家经贸委办公厅转发的财政部、国家税务总局联合发布的文件中明确规定,自 2001 年 1 月 1 日起,掺加不少于 30% 的旧沥青路面材料而生产的再生混合料,可以享受增值税即征即退的优惠政策。2012 年江苏省公路局下发了《江苏省普通国省道沥青路面再生技术推广实施意见》,其中明确提出:为了鼓励使用沥青路面再生技术,省局在部门预算中安排一定资金,用于奖励应用再生技术的工程项目。综合考虑再生方式、再生水平、回收旧料使用数量、使用途径等因素,各类再生技术应用奖励标准为:每使用 1t 旧混合料,厂拌热再生、现场热再生、厂拌冷再生、现场冷再生和全深再生分别奖励 48 元、24 元、7 元、7 元和 3 元。

1.2 沥青路面再生利用研究现状

1.2.1 沥青材料老化性状及再生适用性评价

北京市对不同年代修建的城市道路旧料进行沥青抽提检测表明,运营 10~15 年旧路的沥青针入度一般在 30~40 (0.1mm),软化点一般在 50~60℃,25℃ 延度离散较大,一般在 10~50cm。1992 年通车的江苏宁连公路马武段,原始沥青为克拉玛依 AH-70,

1999 年回收沥青的 25℃针入度为 35~42 (0.1mm)，15℃延度为 20~40cm。单纯从性能指标来看，无论是公路，还是城市道路，旧料中旧沥青的可利用价值都比较高。

郭忠印等研究分析认为，由于沥青路面结构一般分为上面层、中面层和下面层，各层的厚度和材料组成都可能不一样，所用的集料品种也不相同，在进行旧料再生利用时，没有可能也没有必要将各层分开使用。由此，对旧料进行评价时，应是对整个旧沥青面层混合料进行取样评价。在具体评价指标上，对于旧沥青包括软化点、针入度和 60℃黏度等，对于旧集料包括级配组成、颗粒形状、压碎值和毛体积密度等。

同济大学吕伟民等的研究测试表明，回收的旧集料中，矿质颗粒都明显地发生破碎，粉料增多。但是，矿质颗粒的细化并不随路面使用年限的增加而加剧，而是随着时间的延长而减缓。集料的细化在路面使用的前期就已经完成，其随时间细化的程度逐渐减缓，原因是集料一旦破碎，就使颗粒之间的接触点增加，接触应力减小。另外，不同的铣刨回收方式也会对集料的细化产生一定的影响。

Colbett 等对使用 18 年沥青路面不同深度部分的旧沥青性质进行了测试，表 1.2 为回收沥青的性质。

表 1.2 使用 18 年后不同深度路面沥青的性质

路段	测试指标	单位	基质沥青	回收沥青	
				表面部分 (1/8in)	路面下部 (1/4in)
I	25℃针入度	0.1mm	46	26	37
	15℃延度	cm	150	5	8
	60℃黏度	Pa · s	388	1832	732
II	25℃针入度	0.1mm	52	19	34
	15℃延度	cm	150	0.5	8.5
	60℃黏度	Pa · s	531	7737	1704
III	25℃针入度	0.1mm	49	19	32
	15℃延度	cm	27	2.5	4.5
	60℃黏度	Pa · s	774	13 344	3441

注：1in=2.54cm。

由表 1.2 可以看出，经过老化后，沥青路面的上部与下部的沥青黏度有 2~4 倍的差异，这些差异不经处理将会影响沥青的再生方式，也将影响沥青再生后的性能。

美国 SUPERPAVE 相关路面再生利用的设计方法中，与旧料评价相关最大的是旧沥青黏结剂高、中、低控制温度的测试。式 (1.1) 所示为旧沥青高温控制温度的计算式。

$$T(\text{High}) = \frac{\lg 1.00 - \lg G_1}{a} + T_1 \tag{1.1}$$

式中， G_1 为 $G^* / \sin \delta$ 在温度为 T_1 时对应的数值，单位为 kPa； T_1 为 $G^* / \sin \delta$ 值最接近

1.00kPa 时的测试温度; a 为 $G^* / \sin \delta$ 曲线在温度为 T_i 点的斜率。

利用旧沥青的高、中、低控制温度指标值, 可进行新沥青等级或旧料掺配比例的计算。

Pedro 研究认为, 回收旧料颗粒的最大粒径应受到一定限制, 并满足混合料相关规范。同时, 监控料场旧料的含水量和离析情况, 以及旧沥青黏度情况非常重要。另外, 旧路芯样状况及其毛体积密度的测试也会对评价旧料有一定的帮助。

国外多数国家认为对新集料级配的要求同样适于旧回收集料。荷兰等国家规定用于再生的旧沥青集料中的水泥块、基层材料、砖块等杂物含量小于 5%, 塑料、木块等致污物含量小于 0.1% (体积比)。欧洲一些国家对旧沥青集料的均匀性作目测检查, 通过均匀性检查后, 再进行旧沥青含量、旧集料级配、旧沥青针入度和针入度指数的测试。德国甚至认为, 旧料均匀性决定着其掺配率的大小。

综合来看, 国内外对旧沥青混合料性状的测试较多, 但研究主要侧重于旧料性能对路面使用的影响, 如旧沥青针入度衰减程度与路面抗裂特性等, 针对再生利用方面的指标评价体系很不完善。从材料组成方面讲, 再生沥青混合料与普通沥青混合料的区别主要表现在两方面: 一是其黏结剂中相当一部分是老化沥青, 二是由于养护、铣刨、料源的变异, 其组成组分有较大的变异和不可控性。由此, 根据回收旧料特性, 从再生利用角度分析其再生适用性, 并针对再生应用特点和要求, 从集料和沥青黏结剂等方面分析和建立旧料性状指标评价体系非常重要, 这也是本书该部分研究的目的所在。

1.2.2 老化沥青的再生机理研究

1. 道路沥青老化的化学研究

1956 年 van Oort 等研究道路沥青与氧气反应时认为, 沥青的氧化过程很大程度依赖于反应温度, 当温度高于 100°C 时产生明显的脱氢反应, 生成 H_2O 和 CO_2 , 在 100°C 以下氧化主要生成含氧化物。1962 年 Wright 等提出利用 IR 光谱确定沥青的氧化速度。1973 年 Schmidt 等提出沥青旋转薄膜烘箱试验方法 (rolling thin film oven test, RTFOT), 沥青的薄膜厚度为 $20\mu\text{m}$, 以观察老化后沥青中含氧极性官能团的变化。1974 年 Barbour 和 Petersen 建立了利用 IR 光谱定量分析沥青中含氧官能团 (羰基、酮基、酸酐与亚砷等官能团) 的方法。20 世纪 60 年代, Emerson 等测定了亚砷官能团的热解半衰期。1982 年 Rulz 等, 1990 年 Kelemen 等利用选择氧化与电子能谱 (XPS) 确定了沥青中有机硫化物的存在, 并提出只有沥青中脂肪族硫化物被氧化成亚砷官能团。1995 年, Herrington 等研究了沥青中的亚砷官能团的热分解, 认为分子中至少含有一个 β 氢的亚砷官能团热解动力学符合一级反应规律。经过几十年的发展, 人们对道路沥青的老化现象与机理的认识逐渐深入, 为进一步改善道路沥青的质量提供了科学依据。有关道路沥青的研究至今仍然是热点问题之一。

沥青老化时组分的变化。沥青主要是由碳氢化合物构成的高分子化合物的混合物, 分子中含有硫、氮与氧等杂原子官能团。道路沥青的元素组成为: C (82%~88%), H

(8%~11%), S (0~6%), O (0~1.5%), N (0~1%)。为考察沥青老化过程中组分的变化,将其组成为两大类,即沥青质与软沥青质。后者又进一步分成饱和分、芳香分、胶质。比较典型的组成分析方法有:O'Donnell 法、Chelton-Traxler 法与 Corbett 法。我国交通运输部制定的行业标准(JTJ 052—93)也是采用 Corbett 法。

沥青质属不溶于正庚烷的黑色无定型固体,分子中除有碳氢外,还含有氮、硫、氧。VPO 测试的平均相对分子质量为 1000~100 000,显微镜测试的颗粒直径为 5~30nm。沥青质含量的多少对道路沥青的流变特性有很大的影响。增加沥青质含量,会提高沥青的软化点,降低针入度,增大黏度等。

胶质溶于正庚烷,是由层析色谱柱洗脱分离出的组分,它是深棕色固体或半固体,极性很强。该特性使得胶质具有很好的黏附性。它是沥青质的扩散剂或胶溶剂,胶质与沥青质的比例基本上决定了沥青的胶体结构类型。相对分子质量为 500~50 000,颗粒直径为 1~5nm。

芳香分由沥青中相对分子质量低的环烷芳烃类化合物组成,是沥青的分散介质,深棕色黏稠液体,非极性,与沥青中胶质和沥青质具有较好的融合能力,相对分子质量为 300~2000。

饱和分由直链与支链脂肪烃、环烷烃以及低分子芳烃组成,非极性,分散介质。

1989 年,陈惠敏和郑毓权研究了沥青组成对其黏度、黏温关系以及延展性的影响,并测试了沥青性质与化学组成的关系。1965 年, Rostler 提出依据沥青组成预测其性质的方法。1970 年, Vallerga 等建立了沥青的组成、化学性质和物理性质与道路沥青性质之间的定量的关系。1985 年, Goodrich 利用改进的组成分析方法研究了沥青组成与筑路后沥青组成的关系。

综合研究认为,沥青具有胶体结构的特征,胶质与沥青质的含量相对比例决定了沥青胶体的结构类型,即溶胶型和凝胶型。通过道路沥青老化模拟与自然老化可发现,沥青老化之后饱和分、芳香分以及胶质减少,沥青质增加,最终使沥青的胶体类型发生转变,即由溶胶型向凝胶型转变,黏度增大。

沥青老化时的物理性质的变化。道路沥青常用软化点、针入度与黏度等指标来评价沥青老化过程中的性质变化。沥青针入度与测试温度的关系如下列公式

$$\lg P = A \times T + K \quad (1.2)$$

$$PI = \frac{20(1-25A)}{(1+50A)} \quad (1.3)$$

式中, P 为针入度,单位为 0.1mm; A 为温度敏感参数, 0.015~0.06; T 为测试温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$; K 为常数, PI 为针入度指数。

Vallerga 和 Finn 等对沥青老化进行了长期的研究,认为沥青在拌和、铺筑、使用过程中,其老化作用是由下列六种因素作用的。

(1) 氧化作用,即氧气与沥青发生化学反应的过程,反应速率取决环境温度和太阳光的辐射情况;

(2) 挥发作用,即轻质油分从沥青组分中逐渐溢出,它 also 与环境温度有关,一般发生过程很慢,是一个长时间的过程;