

RESEARCH AND APPLICATION ON
ASPHALT RUBBER AND ASPHALT RUBBER MIXTURE

橡胶沥青及其混合料的研究与应用

黄卫东 李彦伟 杜群乐 王书斌 编著



人民交通出版社
China Communications Press

绿色交通发展丛书

橡胶沥青及其混合料的研究与应用

黄卫东 李彦伟 杜群乐 王书斌 编著



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书阐述了橡胶沥青的概况、国内外技术应用和现状、橡胶沥青混合料的配合比设计、橡胶沥青混合料的高温性能、疲劳性能,以及橡胶沥青混合料的设计施工方法。对橡胶沥青混合料的设计和施工具有借鉴意义。

本书可作为高等院校道路工程方向本科和研究生的参考用书,也可供工程设计、施工人员和科研人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

橡胶沥青及其混合料的研究与应用/黄卫东等编著.

—北京:人民交通出版社,2013. 10

(绿色交通发展丛书)

ISBN 978-7-114-10469-5

I. ①橡… II. ①黄… III. ①橡胶沥青—沥青路面—
研究 IV. ①U414②U416. 217

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 059769 号

绿色交通发展丛书

书 名: 橡胶沥青及其混合料的研究与应用

著 作 者: 黄卫东 李彦伟 杜群乐 王书斌

责任编辑: 李 喆

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京交通印务实业公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 23.5

字 数: 560 千

版 次: 2013 年 10 月 第 1 版

印 次: 2013 年 10 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-10469-5

定 价: 57.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

橡胶沥青起源于 20 世纪 50 年代的美国,它性能优异,生产过程中可将废旧胶粉变废为宝,能有效降低改性沥青成本,并已在实践中证明是可以有效防治我国沥青面层大量存在的反射裂缝等问题。截至目前,橡胶沥青已经在美国约 40 个州及近 30 个国家得到评价与应用。橡胶沥青引入中国,从某种程度上有效改善了路面抗疲劳性能、丰富了路面和混合料设计方法、降低了改性沥青成本、解决了部分废旧轮胎的黑色污染问题,积极响应了交通运输部“材料节约和循环利用专项行动”和“进一步加强交通行业节能减排工作的意见”等专项计划。

橡胶粉在沥青中的应用主要有三条不同的技术路线:湿法(Wet Process,即橡胶沥青)、干法(Dry Process)和 Terminal Blend 法(书中译为沥青库法或无搅拌湿法)。本书针对的对象主要为橡胶沥青,并且主要以美国亚利桑那州规范与思想为主。橡胶沥青最大的特点在于可以在很高的沥青用量下不出现高温析漏问题,而较高的沥青用量可以带来疲劳性能的显著提高,使橡胶沥青可以用于水泥路面加罩。目前国内橡胶沥青的种类很多,但大多数橡胶沥青与最初定义已经有较大不同,本书一方面希望向读者介绍橡胶沥青在美国,尤其在亚利桑那州、加利福尼亚州的使用经验与规范;另一方面通过介绍笔者近些年来的研究,使读者对橡胶沥青有更深入的理解,并探讨如何使其在中国得到更好的应用。

本书主要包括两大部分内容。第一部分是対美国亚利桑那州、加利福尼亚州为主的橡胶沥青技术进行介绍,这一部分大量参考了亚利桑那州、加利福尼亚州及国际橡胶沥青协会的很多研究报告与规范,读者在这部分里可以看到橡胶沥青的源头和开创的初衷。第二部分是我們针对橡胶沥青技术进行的一些补充性研究,橡胶沥青在美国是一个以工程经验为主的技术,实验室研究并不多,要在中国得到成功推广应用,必需根据中国的实际情况,进行各方面的研究。由于橡胶粉改性沥青的机理复杂,可用的技术方案多种多样,因此还有很多技术问题有待于实践的检验,书中的一些观点难免存在偏颇或错误,欢迎同行们批评指正。

本书的主体内容是同济大学与河北省公路管理部门在多个科研项目基础上形成的,书中所述成果由橡胶沥青研究应用的科研人员、工程技术人员和管理人员共同编写完成,主要参与人员有:黄卫东、李彦伟、杜群乐、王书斌、黄明、王庆凯、李本亮、王伟、高川、郑茂等,黄文元博士也提供了相当多的资料,在此表示感谢。

编 者

2013 年 9 月

目 录

术语	1
第一章 概述	5
第一节 橡胶沥青的起源	5
第二节 橡胶沥青的定义及胶粉分类	7
第三节 常见橡胶沥青生产工艺	8
第四节 橡胶沥青相关问题介绍	9
本章参考文献	12
第二章 美国各州橡胶沥青技术应用与研究现状综述	13
第一节 总体情况	13
第二节 材料选择与设计	16
第三节 橡胶沥青质量控制指标选择	24
第四节 结构设计	28
第五节 应用	30
第六节 性能	37
第七节 相关问题	42
第八节 废弃橡胶轮胎的其他应用	47
本章参考文献	49
第三章 亚利桑那州橡胶沥青规范体系及路面使用情况调查	53
第一节 亚利桑那州橡胶沥青技术要求与规范	54
第二节 刚性路面上的加铺层应用现状	67
第三节 柔性路面上的 AR-ACFC 罩面	74
第四节 柔性路面上的 AR-AC 罩面	76
第五节 亚利桑那州使用现状小结	84
本章参考文献	85
第四章 加利福尼亚州橡胶沥青设计和施工指南	87
第一节 橡胶沥青使用情况概述	87
第二节 橡胶沥青路面结构设计	88
第三节 橡胶沥青材料设计	92
第四节 橡胶沥青结合料和混合料的生产	98
第五节 热拌橡胶沥青混合料的施工要求	100
第六节 橡胶沥青碎石封层施工要求	104

第七节 开工前会议	107
本章参考文献	108
第五章 橡胶沥青混合料配合比设计研究	112
第一节 橡胶沥青混合料配合比研究现状和研究意义	112
第二节 AR-AC-13 橡胶沥青混合料设计研究	121
第三节 SAC 级配橡胶沥青混合料设计研究	132
第四节 9.5mmRAC-G 级配橡胶沥青混合料设计研究	147
第五节 应用于应力吸收层的 AC-10 级配橡胶沥青混合料设计研究	152
第六节 矿粉对橡胶沥青混合料的性能影响情况	156
本章参考文献	159
第六章 橡胶沥青混合料高温性能研究	162
第一节 概述	162
第二节 橡胶沥青混合料高温性能的试验方法	164
第三节 沥青结合料的影响	174
第四节 集料的影响	184
第五节 其他因素的影响	189
本章参考文献	191
第七章 橡胶沥青混合料疲劳性能研究	207
第一节 概述	207
第二节 橡胶沥青指标与性能研究	208
第三节 橡胶沥青混合料疲劳性能试验方法的选择	217
第四节 橡胶沥青混合料疲劳性能分析	224
本章参考文献	242
第八章 橡胶沥青应力吸收层防治反射裂缝效果试验研究	244
第一节 概述	244
第二节 应力吸收层级配的选择	248
第三节 疲劳试验方法的选择和评价	255
第四节 橡胶沥青应力吸收层研究	265
第五节 橡胶沥青应力吸收层和常用混合料比较	284
本章参考文献	288
第九章 温拌橡胶沥青混合料技术研究	291
第一节 概述	291
第二节 混合料设计	291
第三节 AR-AC-13 型温拌橡胶沥青混合料试验路	293
第四节 环境影响评价	299
第五节 温拌橡胶沥青应力吸收层应用	303

本章参考文献	310
第十章 适用于我国的 AR-AC-13 设计与施工方法介绍	311
第一节 适用于我国的 AR-AC-13 施工指南	311
第二节 一个常规 AR-AC-13 试验路工程情况总结	321
第三节 一个基于既定油石比的 AR-AC-13 设计新法	325
第四节 一个 AR-AC-13 作应力吸收层尝试性的应用试验段工程情况总结	330
第五节 一个 AR-AC-16 橡胶沥青混合料的工程实际应用	334
第十一章 橡胶沥青 SAMI 施工操作规程	344
第一节 项目准备及协调工作	344
第二节 材料进销存管理和质量控制	346
第三节 质量保证体系(质检流程)	349
第四节 橡胶沥青生产	351
第五节 SAMI 施工	352
第六节 安全保证工作	355
附表 美国四个州橡胶沥青使用情况调查	357

术 语

为了描述橡胶改性沥青材料和产品,本书引入了多种术语,对于特定的术语,不同文献可能会提出各自的理解,为了保证阅读的一致性,使读者更加清晰地理解相关概念,避免造成混淆,在整本书前给出术语。

橡胶沥青:橡胶沥青是一种由沥青混合料、再生橡胶和某些添加剂组成的混合物,其中橡胶成分质量占总质量的至少 15%,橡胶颗粒在热沥青混合料中充分反应产生膨胀。

汽车轮胎:用于小汽车、小型载货汽车和轻型货车的外径小于 660mm 的轮胎。

橡胶粉改性剂(CRM):将废旧轮胎橡胶粉碎制成用于沥青路面材料中的改性剂的总称,由于工艺流程和设备的不同,有以下几种类型:

(1)回收橡胶粉改性剂:形状不规则,有巨大表面积的破碎橡胶颗粒,主要通过裂解磨碎机制造。

(2)富含天然橡胶的橡胶粉:按照加利福尼亚州交通运输部的要求,包含 40%~48%天然橡胶或异戊二烯,并包含至少 50%的橡胶烃。富含天然橡胶的橡胶粉来源包括一些类型的重型货车的废旧轮胎,但不局限于废旧轮胎。其他则来自于废旧的网球和橡胶垫。

抛光废弃物:高质量的废旧轮胎橡胶,是在准备翻新时轮胎实体处理过程中产生的副产品。胶末基本上不含金属和纤维。

胎面橡胶:废旧轮胎橡胶,主要由胎侧橡胶含量不足 5%的胎面橡胶组成。

胎面剥离:部分废旧轮胎橡胶,如果没有包含任何轮胎帘布的话,同样也是轮胎翻新处理中产生的副产品。

整体轮胎橡胶:废旧轮胎橡胶,包括胎面和胎侧,其比例接近各自在普通轮胎中的质量。

常温粉碎:废旧轮胎在不低于正常室温的条件下磨碎处理的方法。通常要求通过周围处理过程得到形状不规则、表面积比较大的细粒,用以促进和路面沥青的相互作用。

低温粉碎:利用液态氮冷冻废旧轮胎橡胶直至变脆,然后用锤磨机将冷冻的橡胶粉碎成具有表面积相对小的细粒的处理过程。这种方法可用于橡胶在环境温度下磨碎之前减小其颗粒尺寸。

粒化:生成统一的立方体外观,切割得到的表面积橡胶粉颗粒。

粉碎:在粒化和常温粉碎之前将废旧轮胎粉碎为面积小于 0.023m^2 的碎片的过程。

裂解磨碎机:通过旋转波纹钢鼓将废旧轮胎粉碎成粒径 $4.25\sim 4.75\mu\text{m}$ 细粒的常温粉碎设备。

粉碎机:切碎废旧轮胎橡胶的设备。通过严格容限的回转钢盘切割橡胶,使其变成粒径 $2\sim 9.5\text{mm}$ 的立方体颗粒。

微型磨碎机:进一步将橡胶粉细粒磨细,使其粒径达到 $4.25\mu\text{m}$ 以下。

密级配集料:指级配连续的集料混合物,通常与普通沥青或改性沥青一同用于制备热拌沥青混合料。

PCCP:波特兰水泥混凝土路面。

AC:一种指沥青混凝土,另一种指美国沥青黏度分级牌号。具体可根据文意理解。

RUMAC:干法橡胶粉改性沥青混凝土。

PlusRide:专有的干法废胶粉改性方法,但效果不甚良好,目前已经被普通方法取代。

DGAC:美国加利福尼亚州设计的密级配沥青混合料单面的简称。

RAC-G:美国加利福尼亚州设计的间断级配热拌橡胶沥青混合料。

SAMI-R:采用橡胶处理的应力吸收夹层。

SAMI-F:采用纤维处理的应力吸收夹层。

PCI:美国 AASHTO 路面设计方法中的路面情况参数。

PMS:路面管理系统。

脱硫橡胶:在磨细改变再生原料的理化性能后,经过高温、高压或加入软化剂处理的橡胶。

稀释剂:一种轻质石油制品(通常是煤油或者具有溶解性质的相似制品)。在结合料喷洒到面层表面用于破损密封之前,添加到橡胶沥青结合料中。

干法:与沥青结合料拌和之前,将干燥橡胶粉改性剂与集料混合的方法。在铺面混合料中橡胶粉改性剂作为一种橡胶集料。这个方法仅用于热拌沥青混合料的制备。

填充油:用于促进沥青结合料和橡胶粉改性剂反应的芳烃油。

磨损层:为延长路面寿命而摊铺在路面表面的稀乳化沥青,可用于预防碎石封层中的碎石脱落或沥青混合料的松散。

间断级配:集料非连续级配,通常缺失或缺乏一或两个细粒组,可提高沥青混合料中粗集料之间的嵌锁作用。这种级配类型多用于制备间断级配橡胶沥青混合料。

轻质集料:密实度很低的多孔集料,如人造膨胀页岩。它用于在碎石封层中降低风化破坏。

开级配:排水性好,主要由两种或三种基本不含细集料、0.075mm 筛分通过率为 0~4% 的集料组成的级配类型。开级配用于热拌过程中,为较薄的面层或磨损层提供良好的摩擦特性,可迅速排除表面水、减少路面滑胎和溅水。

反应:描述高温条件下沥青结合料和橡胶粉改性剂拌和时相互作用的常用术语。这个反应被更适当地定义为多聚物膨胀。它不是化学反应,而是沥青结合料中的橡胶粉吸收芳烃油和轻质组分(易挥发或不稳定的小分子)的物理反应,以及橡胶生产过程中加入的一些相似的油分加入到了沥青结合料中。

再生轮胎橡胶:通过处理用过的小汽车、载货汽车或公共汽车轮胎过程中获得的橡胶。加利福尼亚州运输部对废旧轮胎橡胶提出化学要求是为了排除不合适的轮胎来源,如实心轮胎、铲车轮胎、飞机轮胎和掘土机轮胎以及其他不能为橡胶沥青反应提供合适原料的非汽车轮胎。非轮胎橡胶源可能仅用于提供高天然橡胶,补充再生橡胶轮胎。

橡胶处理的沥青:用橡胶粉改性剂改性的沥青结合料。

橡胶处理的沥青混合料(RAC):将具有一定级配的集料与橡胶沥青或橡胶处理的沥青结合料混合而获得的材料,用于热拌混合料的生产。它可以是密级配、间断级配或者开级配。

应力吸收层(SAM):一种碎石封层。热橡胶沥青结合料喷洒在现有路面后立即摊铺一层单一粒径的封层集料,然后碾压使其嵌入沥青层。应力吸收层的厚度通常为 9~12mm,取决于封层集料的粒径。应力吸收层是一种表面处治,主要用于恢复路面表面的抗滑性,密封裂缝并形成一层隔水层,降低表面水对路面结构的侵蚀。应力吸收层用于路面保养、维护和局部维修。橡胶沥青应力吸收层减少了下层开裂的沥青路面和刚性路面产生的反射裂缝,并能有利于保持待修复或重建路面的路用性能。

橡胶沥青应力吸收夹层(SAMI-R):橡胶沥青应力吸收夹层是一种橡胶沥青应力吸收层,其上摊铺沥青混合料或者橡胶沥青混合料。橡胶沥青应力吸收夹层延缓裂缝在新面层中的延伸(反射裂缝)。

应力吸收夹层(SAMI):最初指橡胶沥青应力吸收夹层。但是,应力吸收夹层现在还包括橡胶沥青碎石封层(SMAI-R)、土工织物(SAMI-F)或无胶结细集料。

湿法:将沥青和沥青路面材料混合之前,将橡胶粉改性剂和沥青混合料混合的方法。

沥青库混合法:湿法的一种。橡胶粉改性剂在炼油厂或沥青库与热沥青混合料混合,然后运到沥青混合料拌和站或施工现场使用。

湿法高黏度沥青:与沥青库法相对,是湿法的另一种方式,即现场加工的橡胶沥青,胶粉含量高达 18%以上,狭义上称这种湿法高黏度沥青为橡胶沥青。

载货汽车轮胎:用于商用载货汽车和公共汽车的轮胎,外径在 660~1 520mm。

黏度:流体或半流体阻滞流动(剪力)的性质。像橡胶沥青一样的高度黏稠液体具有高黏度。黏度作为衡量橡胶沥青结合料生产以及在橡胶沥青混合料中使用的现场质量控制指标。

硫化橡胶:经过化学、热或高压处理的天然橡胶或人造橡胶。其强度、稳定性、耐久性有所提高。轮胎橡胶是经过硫化的。

常温粉碎橡胶:废橡胶轮胎在室温下或高于室温的环境下进行粉碎处理后,生产的橡胶粉。

ARCO-ARM-R-SHIELD(亚利桑那精炼法):1975 年形成的橡胶沥青混合法。混合料含有约 20%的橡胶(其中含 40%的脱硫橡胶和 60%的硫化废橡胶)和 80%的 4 000/8 000 沥青橡胶(含 2%~4%的 Witco 填充油)。橡胶颗粒的级配是:16 号筛通过率为 98%,100 号筛通过率为 8%。

橡胶沥青:废轮胎橡胶(通常是通过 16~25 号筛的废胶粉)和沥青结合料的混合物,用作各种路面施工的结合料。橡胶沥青通常含有占混合料总质量 18%~22%的废轮胎橡胶粉。混合料在高温下按配方混合,以促进两组分的物理和化学结合。多种石油馏分和填充油加入混合料中以降低黏度,提高可喷洒性和施工和易性。

橡胶沥青混合料:将橡胶沥青(结合料)与密级配集料热拌产生的混合料。

热拌橡胶沥青混合料:将橡胶沥青(结合料)与密级配、间断级配或开级配集料热拌产生的混合料。

橡胶沥青磨耗层:将橡胶沥青(结合料)与开级配集料热拌产生的混合料。

废抛光料:从处理用于胎面翻新轮胎过程中得到的副产品,是高质量的废轮胎橡胶粉。

犄角封层:铺筑橡胶沥青碎石封层后封浆,使路面非常平坦。

粉碎机:将废轮胎橡胶通过带波纹的钢鼓撕裂,把橡胶变成颗粒状[一般为 4.75mm~

425 μm (4~40 号筛)]。

废胶粉改性剂:通常指减小尺寸并被用作沥青铺面材料改性剂的废轮胎橡胶。

低温粉碎橡胶:先冷冻废轮胎橡胶,然后粉碎至磨细前要求的颗粒尺寸。

脱硫橡胶:橡胶粉碎后经过加温、加压或者参加软化剂处理,改变回收橡胶的性质。

稀释剂:轻质石油产品(典型的如煤油),在橡胶沥青喷洒之前加入其中。

填充油:用于促进结合料和废胶粉改性剂反应的芳烃油。

磨耗层:将乳化沥青喷在新建道路表面,用来防止碎石封层中碎石脱落或热拌沥青混合料松散。

粒化废胶粉改性剂:形状不规则的立方体,废胶粉颗粒表面积较小,通常由制粒机制成。

制粒机:用于粉碎废轮胎橡胶的设备,用间距很近的旋转钢盘组切割橡胶,使橡胶颗粒减小到 2.0~9.5mm。

磨细废胶粉改性剂:形状不规则、表面积较大的粉碎废橡胶颗粒,通常由粉碎机制成。

精细研磨:进一步研磨细废胶粉使其粒径小于 425 μm (40 号筛)。

PlusRide:一种橡胶改性沥青混合料专利品,1960 年在瑞典发明,并以 PlusRide 为名在美国申请了专利,以 Rubit 为名在瑞士申请了专利。该产品用粗橡胶颗粒(粒径为 0.6~6mm)作为橡胶填充集料,一般占混合料质量的 3%。橡胶直接添加到间断级配集料中,以使集料和橡胶形成密级配。

回收轮胎橡胶:通过处理旧汽车、载货汽车或公共汽车轮胎得到的橡胶(注意:禁止用实心轮胎、叉车轮胎、飞行器轮胎、挖掘机轮胎、其他非机动车轮胎、非轮胎橡胶)。

橡胶集料:用干法添加到热拌沥青混合料中的废胶粉改性剂,保持了橡胶的物理形状和硬度。

橡胶改性沥青混合料:使用橡胶改性沥青的密级配热拌沥青混合料。

橡胶化沥青:与湿法含义相同或含有废胶粉改性剂的改性沥青结合料。

SAM:一种表面处治,应力吸收膜的缩写。SAM 主要用于减轻已开裂沥青或刚性路面的反射裂缝。橡胶沥青混合料喷洒到现有路面上,再立即撒布一层粒径单一的集料,再进行碾压,将集料嵌入沥青层。层厚通常在 9~12mm。在南加利福尼亚州,称之为橡胶沥青集料膜(ARAM)。

SAMI:应力吸收膜夹层的缩写。该夹层可以是橡胶沥青碎石封层、织物、无胶结细集料或开级配沥青层。SAMI 是用在沥青罩面层(混合料中可能含有橡胶)下的 SAM,主要用于抵抗拉压应力造成的反射裂缝,延缓反射裂缝透过新的罩面层。

粉碎:将废轮胎处理到 0.15m² 的碎块或更小碎块的过程。

三层体系(TLS):亚利桑那州开发的构造,用于恢复严重破裂、翘曲或有问题的波特兰水泥路面的通行能力。该方法同样适用于沥青路面。三层体系通常采用两层薄(12.5~19mm)的普通开级配磨耗层,中间夹一层低模量的 SAMI(大约 9mm 厚),底部的开级配磨耗层直接置于现有路面上,部分起到了调平层的作用。

胎面胶:主要由胎壁胶约少于 5%的胎面胶组成。

货车轮胎:用于商用载货汽车和公共汽车上的外径大于 660mm 而小于 1520mm 的轮胎。

全轮胎橡胶:包括普通轮胎中的胎面胶和胎壁胶,两者各自的质量大约成比例。

第一章 概 述

内容提要:本章主要介绍橡胶沥青的起源、定义和相关分类,并简单介绍橡胶沥青使用的相关问题。

第一节 橡胶沥青的起源

随着世界经济的稳步发展,汽车工业欣欣向荣。汽车增长带来的副作用就是废弃轮胎的大量堆积。现在,许多国家废旧橡胶轮胎的闲置已经造成巨大的环境污染和资源浪费。据统计,目前全世界每年产生 15 亿条报废轮胎。2002 年,我国的废旧轮胎已达到 0.8 亿条,2010 年达到 2 亿条。废旧轮胎属于工业有害固体废弃物,它是恶化自然环境、破坏植被生长、影响人类健康、危及生态环境的有害垃圾之一,所以废旧轮胎被称为“黑色污染”。轮胎橡胶本身具有不降解、不分裂的化学特性,因而不能作常规的填埋处理;如果燃烧,会产生大量的一氧化碳等有害气体,带来严重的二次污染;大量的废旧轮胎垃圾堆积不仅占用土地资源,而且容易发生火灾、滋生蚊虫等。因此,解决日益突出的废旧轮胎污染问题,已经引起了世界各国的高度重视。把废旧轮胎作为资源回收利用,开发新的应用领域势在必行。

将废旧轮胎磨细成橡胶粉应用于道路工程建设已得到广泛关注,因为沥青和胶粉通常在高温下反应,必要时添加芳烃油(填充油),这成为大量处理废旧轮胎的有效途径之一。由于橡胶和沥青同属于高分子有机材料,具备一定程度的天然亲和性,所以橡胶改性沥青是一个很好的发展方向。现在由于技术水平的提高,常温下超精细橡胶粉的加工已经实现了工业化。如果能通过系统的研究全面论证橡胶粉改性沥青及其混合料的路用性能,解决橡胶粉加入沥青混合料的工程技术问题,将产生环境保护、废物利用和延长道路使用寿命的多赢效果,形成巨大的社会效益和经济效益。

相比以 SBS 为代表的高聚物改性沥青混合料和以 SMA 混合料为代表的纤维质材料稳定混合料,橡胶沥青混合料有相近的效果,且成本低廉,生产每吨橡胶沥青可比 SBS 改性沥青节约 800~1 000 元。同时,橡胶粉中含有的外加剂对混合料黏结性能的改善也有潜在的好处。

橡胶沥青起源于美国,20 世纪 60 年代初美国就有机构将橡胶沥青用于沥青混合料。这种方法由 Charles H. McDonald 在 20 世纪 60 年代中期首先使用,他和 Atlos 橡胶公司、亚利桑那州运输部、撒哈拉石油和沥青公司共同开展的试验工作,形成了一套商用沥青系统。

路用橡胶沥青材料如接缝填料、补丁和薄膜的发展始于 20 世纪 30 年代。在 20 世纪 50

年代,美国公路局的刘易斯和威尔伯恩实施了一个大型试验室研究项目,评估各种橡胶对石油沥青性能的影响。

他们用了 14 种橡胶粉末和 3 种沥青,包括“一种轻质、低硫、低沥青质的加利福尼亚州沥青”。研究成果和公路局的雷克斯与帕克合作进行的“橡胶沥青路面材料的试验研究”成果在 1954 年 10 月美国出版的《公路》上一同发表。

1960 年 3 月,沥青研究所在芝加哥举办了第一届橡胶沥青研讨会,有 5 篇论文和相关讨论。

1975 年,加利福尼亚州运输部开始在试验室进行针对橡胶沥青封层的试验,小型试验段摊铺在 03-Yol-84-PM 16+ 和 03-Sac-99-PM 20+,取得了普遍理想的试验效果。1978 年,加利福尼亚州第一条干法橡胶改性沥青混合料路面在迈耶福莱 SR50 公路上建成。

20 世纪 70 年代中期,亚利桑那州炼油厂(ARCO)也开发了一套橡胶沥青系统,这些早期的系统便是现在使用的产品的基础。

20 世纪 70 年代中期到 80 年代早期,亚利桑那州运输部组织了全面的研究工作,以加深对橡胶沥青的基本认识。通过研究发现,引起橡胶沥青混合料性质变化的因素有:橡胶类型、橡胶粒度、橡胶含量、沥青类型、沥青质含量、填充油的类型和浓度、反应时间和温度。这些变量对于橡胶沥青性质的影响在 Epps(1994 年)文献中有更详细的讨论。

1980 年,加利福尼亚州第一条橡胶化沥青混合料公路(采用早期湿法生产,将橡胶沥青与密级配集料拌和)在斯托贝城(SR 50)和汤尼萨米(I-80)建成。

1983 年建设的瑞文多城项目(02-Las-395)显著改变了加利福尼亚州运输部对橡胶沥青的用法。

1987 年,薄橡胶沥青混合料路面出现,其比更厚的普通密级配沥青混合料性能明显要好。

1992 年 3 月,加利福尼亚州运输部在这些研究和工程的基础上发表了《橡胶沥青热拌间断级配混合料(ARHM-GG)设计指南》。

1992 年,橡胶沥青应用的联邦法案开始生效,联邦公路局设立一些课题以帮助各州公路部门实施这项法案,包括:

第一阶段研究:由佛罗里达大学牵头,总结现阶段经验,确定第二阶段的研究需求。

第二阶段研究:由俄勒冈大学牵头,开发混合料厚度设计指南、施工和现场质量控制指南,确定含有废胶粉改性剂的混合料的长期性能,评价含有废胶粉改性剂的混合料的可再生性能。

美国西部研究院也进行了相关研究,包括橡胶沥青结合料的基本评价以及沥青组成、反应时间和温度的影响评价。

美国国家联合公路研究计划(HCHRP)综合项目(Epps, 1994 年)通过工程实践总结了各种废胶粉改性剂的应用方法。

在上述研究结束之前,应用橡胶沥青的法令取消,橡胶沥青专利期满。这样,就有一些新的橡胶沥青生产者参与进来,尤其是在亚利桑那州和加利福尼亚州参与者更多。

1995 年,加利福尼亚州就有 100 多个橡胶沥青工程竣工,加利福尼亚州已经建成了超过 400 条橡胶沥青项目,包括橡胶沥青碎石封层项目。但是出现了一些问题,包括一些早期破坏的案例。加利福尼亚州运输部的工程师们对项目中橡胶沥青的性能进行了回顾,挑选了本州

城乡项目和 41 个亚利桑那州运输部(ADOT)项目。

2001 年,加利福尼亚州运输部修建 210 多个橡胶沥青工程。各市县也继续使用性能普遍良好的橡胶沥青进行热拌和表面处治。

加利福尼亚州运输部在 20 世纪 70 年代开始评价橡胶沥青的喷洒应用,80 年代评价了其在热拌混合料中的应用。这些早期的研究工作发展成为现在的橡胶沥青混合料的厚度设计指南,与普通混合料相比厚度减薄比例为 2:1(Van Kirk,1992 年,1997 年)。这一时期亚利桑那州、得克萨斯州等其他公路部门继续使用橡胶沥青喷洒和热拌混合料。

加利福尼亚州早期应用的橡胶沥青效果良好,20 世纪 90 年代进行了推广应用。因此,这一时期内建设了很多橡胶沥青项目,其中有些出现了早期损坏,部分原因是使用地点不当、施工不当或者是橡胶沥青不合规范(Van Kirk, Hildebrand,1995 年)。橡胶沥青项目中出现的早期损害促使加利福尼亚州运输部开始研究有关的性能规范(PRS)来减少损坏(Reese,1994 年,1995 年),同时也促使其与产业界合作,开发出更好的配方规范以降低施工问题的影响。

我国幅员辽阔,气候和自然环境十分复杂,加上近年来超载运输现象十分严重,这对公路路面,特别是沥青面层提出了更高的技术要求。在大规模的高速公路建设中,许多刚建成通车的道路出现了早期损坏问题,其主要形式包括半刚性基层沥青路面出现反射裂缝、沥青面层水稳定性损坏(松散、坑槽等)以及高温稳定性病害(车辙)。这些损坏不仅造成了巨大的经济损失,严重影响了路面的使用寿命和服务质量,并且影响到交通行业的社会形象和可持续发展。由于交通量猛增,在全国各地普遍出现超载现象,加之近年来气候有变暖趋势,对路面材料、尤其是直接承受荷载的沥青混凝土面层材料提出了更高的要求。近年建成通车的高等级公路上出现了较大面积的路面早期损坏,其中高温稳定性和水稳定性类病害占多数,提高沥青混合料的高温和水稳定性能,是当前路面材料研究的重点。

第二节 橡胶沥青的定义及胶粉分类

对于橡胶沥青,ASTM 还有更明确的定义(ASTM2001 年标准年鉴 4.03 卷 ASTM D8,“公路和铺面材料标准术语”),橡胶沥青是“沥青、回收轮胎橡胶和某些添加剂混合而成的胶结料,橡胶成分最少占到总量的 15%,并且与热沥青充分反应,橡胶颗粒产生溶胀”。ASTM 将橡胶沥青(AR)定义为一种至少含有 15%再生轮胎橡胶的材料。加利福尼亚州依据自己的规范,要求含有占结合料总质量 20%±2%的废橡胶改性剂(包括 75%的废橡胶改性剂和 25%的高天然橡胶含量胶粉)。同时,对橡胶颗粒类型、粒径及生产方法也有规定。

按照 ASTM D5603 标准,胶粉可以分 6 类:全轮胎胶粉(Whole Tire Rubber),有客车或货车整条轮胎制成的胶粉;胎面胶粉(Tread or Peer Rubber),只有客车或货车轮胎胎面制成的胶粉;胎面、胎侧磨屑(Buffering Rubber),轮胎再生时抛光工序产生的碎屑;全胎磨屑胶粉(Whole Tire Buffering),当轮胎再生时抛光工艺涉及胎面、胎肩和胎侧时的碎屑;非路用轮胎胶粉(Off Road Tire Rubber),包括大型设备轮胎、农用机械轮胎、工程机械轮胎、叉车轮胎等;非轮胎胶粉(None-tire Rubber)。上述分类主要考虑的是废胶粉工业生产的手段和轮胎的来源部位,这些因素都会影响橡胶沥青的性能。对于路用轮胎胶粉的分类,我国工程界还没有明确的标准,这方面还有很多研究工作可做。

第三节 常见橡胶沥青生产工艺

废橡胶粉应用于沥青路面的技术主要分为湿法(Wet Process)和干法(Dry Process)两大类。根据美国加利福尼亚州运输部橡胶沥青使用指南的定义,湿法是指废旧胶粉(Crumb Rubber Modifier,简称 CRM)先与沥青拌和,制成一种称为橡胶沥青(Asphalt Rubber)的改性沥青胶结料,然后再与集料拌和。干法是指将 CRM 作为一部分细集料先与石料干拌,然后喷入沥青拌制成废橡胶粉(或颗粒)改性沥青混合料(Rubber Modified Asphalt Concrete,简称 RUMAC)。具体解释如下。

无搅拌湿法:无搅拌湿法沥青是用来描述不需要持续搅拌就能使橡胶颗粒均匀分布于高温沥青中的橡胶改性沥青。然而,这种沥青也可以在现场或拌和厂生产,称其为沥青库拌和物容易产生歧义,有失严密。更好的描述是称其为无搅拌湿法工艺。该工艺生产的沥青主要由可通过 $300\mu\text{m}$ 筛孔的 CRM 颗粒改性,因为这些颗粒可以较快地分解、溶合,正常环境下在储油罐中无需专门搅拌即可保持均匀分散,同时也可以加入聚合物或其他添加剂。过去,橡胶含量在质量上不大于沥青或总沥青质量的 10%,但是加利福尼亚州有的产品这一比例达到 15% 或更高。尽管这些沥青的橡胶改性效果明显,但 177°C 或 190°C 旋转黏度很少达到最小值 $1.5\text{Pa}\cdot\text{s}$,因此应该在不发生过分析漏的情况下大幅提高沥青含量,使其高于普通沥青混合料。这种产品现已在亚利桑那州、得克萨斯州和佛罗里达州推广应用。

高黏度湿法:反应过程中 177°C 或 190°C 旋转黏度值保持或高于最小值 $1.5\text{Pa}\cdot\text{s}$ 的 CRM 改性沥青称作湿法高黏度沥青。其在物理性质方面区别湿法无搅拌材料。这些材料需要搅拌才能维持 CRM 颗粒的均匀分布,可以在固定的大型容器中或移动的混合仓中制造。湿法高黏度沥青所需的沥青必须达到 ASTM D6114 的标准,通常至少需要 15% 的废胶粉才能达到所需的黏度。加利福尼亚州运输部的规范规定了 CRM 的最低含量、废旧轮胎的相对比例,富含天然橡胶的 CRM 中废橡胶不高于 15%。符合加利福尼亚州规范的 CRM 改性沥青通常具有足够的黏度,属于湿法高黏度沥青,应当进行搅拌。这种方法改性的沥青即橡胶沥青(Asphalt Rubber)。

干法:此法是用 CRM 替代了沥青混合料集料的 1%~3%,而不是作为沥青的改性剂。在混合料的设计过程中,由于 CRM 相对于集料的密度较低,必须做出适当的调整以满足空隙率的要求。目前已经确定了几种将 CRM 输入拌和站的方法,采用螺旋加料器、片式给料机和鼓风加料。采用了多种级配的 CRM,有粗粒橡胶($2.36\sim 6\text{mm}$),也有细粒橡胶(通过 $39\mu\text{m}$ 筛孔)。加利福尼亚州运输部还对 RUMAC 做出了专门的补充,包括一个 CRM 的中间级配规范。在沥青混合料拌和站里的混合、筒仓储存、运输、摊铺和压实过程中 CRM 与沥青的相互作用有限,干法中的沥青没有改性。

湿法的效果普遍优于干法,使用较为广泛。湿法工艺有以下要求:必须将 CRM 在高温沥青中拌和均匀($176\sim 226^{\circ}\text{C}$),将拌好的混合物在高温($150\sim 218^{\circ}\text{C}$)下放置规定的时间(通常是 $45\sim 60\text{min}$),这样可以使橡胶粉和沥青充分混合。根据所依照的规范,可能还有其他工序。相互作用(也称作反应)包括橡胶颗粒的膨胀和沥青与 CRM 混合物特定的物理性质的改变(达到一定的指标)。这些规范指标包括一定范围内的旋转黏度、软化点最小值、弹性恢复以及

针入度(在低温或室温下的针或锥)。各种指标,如组成比例、CRM 加入沥青和其混合物反应的最低温度、反应时间以及最终混合后的物理性质等,在采用此流程的各个代理机构之间有所差别(如亚利桑那州、加利福尼亚州及得克萨斯州的运输部),这些差别都在报告中被提了出来。

一些机构,如加利福尼亚州运输部,要求使用填充油(Extender Oils)。对于添加的 CRM,则要求其具有较高天然橡胶含量,而不是来自汽车轮胎的普通 CRM。符合此要求的 CRM 可以用废弃的网球、橡胶类坐垫或重型货车轮胎(参见加利福尼亚州标准规范,1999 年)。其他代理机构,如得克萨斯州运输部没有上述要求,允许使用多种改性剂(填充油用于沥青混合料,喷洒混合料采用稀释剂)。对于喷洒混合料,佛罗里达州允许但是不规定使用填充油和稀释剂,但均不得用于 AC 混合料。亚利桑那州运输部则不允许向橡胶沥青中加入填充油或稀释剂(参见《MACTEC 材料调查问卷》,2004 年)。

湿法可以生产多种 CRM 改性沥青,扩大具备其物理性质的范围。不同混合物之间最重要的区别看起来与高温条件下 CRM 沥青的旋转黏度有关(极限为 $1.5\text{Pa}\cdot\text{s}$; 试验温度因不同规范而异:ASTM 美国材料试验协会、ADOT 亚利桑那州运输部、TXDOT 得克萨斯州运输部规定为 177°C ,加利福尼亚州运输部规定为 190°C)。同时,还与混合物是否需要连续搅拌(其目的是为了使橡胶粉的分布相对均匀)有关。黏度与两个因素密切相关:一是废旧轮胎橡胶粉颗粒的大小,二是 CRM 改性混合料中轮胎橡胶的相对含量。如果 CRM 改性沥青在 177°C 或 190°C 时的黏度高于 $1.5\text{Pa}\cdot\text{s}$,则需搅拌。

第四节 橡胶沥青相关问题介绍

一、橡胶沥青如何使用

橡胶沥青既可用于热拌混合料,也可喷洒使用(如碎石封层、SAM、SAMIs),尤其适用于为控制级配和改变现有平均层厚而减小层厚的情况。橡胶沥青已经用于密级配、间断级配和开级配混合料。目前,在加利福尼亚州用于间断级配和开级配混合料最为普遍,有时也喷洒使用。最常见的喷洒使用是碎石封层,喷洒大量橡胶沥青后在其上铺撒碎石。

1. 热拌混合料

热拌橡胶沥青混合料可摊铺于现有路面上,以减少因天气、行车和氧化而造成的路面性能退化,也可提供具有良好表面抗滑性能和路用性能的磨耗层。热拌橡胶沥青混合料也能用于波特兰水泥混凝土路面或桥面铺装。这些情况下,该混合料用于减少反射裂缝、提高路面抗滑性能及降噪。与其他混合料一样,热拌橡胶沥青混合料并不能解决所有的路面问题。如果摊铺时温度过低,则不能充分压实,可能出现早期松散。由于改善了抗裂性能,与普通沥青混合料相比,热拌橡胶沥青混合料层可以减薄厚度。当考虑全部设计因素时,橡胶沥青的成本效益更高。橡胶沥青混合料用于如交叉口等停车区时易产生泛油。环境(或路面)温度低于 13°C 或雨天时,不宜摊铺橡胶沥青热拌混合料。重要的是,低温天气到来之前橡胶沥青的施工就应完成。橡胶沥青混合料必须在温度较高时压实以获得良好的性能,同时由于摊铺后路面的黏着性,开放交通前其上应铺砂。

2. 碎石封层

橡胶沥青碎石封层可用作现有路面的表面封层,或作为夹层铺筑于薄橡胶沥青混合料调平层之上。橡胶沥青碎石封层具有良好的抗滑性能,并能提高路面耐久性。碎石封层不能增加结构强度,也不能解决纵向粗糙问题,但在防止反射裂缝方面与 50mm 的 HMA 作用相当。环境(或路面)温度低于 13℃或雨天时,不应摊铺橡胶沥青碎石封层。橡胶沥青混合料应摊铺在干净的干燥表面上。施工时的环境温度不应超过 40℃。

3. 夹层

橡胶沥青碎石封层也用两层或三层结构的夹层作为应力吸收层,以减缓反射裂缝的发展。

二、橡胶沥青用在何处

热拌橡胶沥青可以用于任何使用普通混合料的地方。橡胶沥青碎石封层能用于任何使用普通碎石封层的地方,它具有更好的抗碎石剥落、抗反射裂缝性能和更长的路面寿命。同时,橡胶沥青碎石封层可以与橡胶沥青罩面结合构成应力吸收膜夹层(SAMI),用于新建路面中。

三、橡胶沥青及其路面的优点

沥青含量更高,改善了路面的初始抗裂性能,延长了路面寿命,并提高了抗氧化性能,改善了抗疲劳和抗反射裂缝性能;黏度和软化点更高,提高了抗车辙性能;路面和标线的对比,增加了夜间的可视性;加厚的沥青膜和开放式纹理结构,减小了轮胎噪声;开放式纹理结构,减少了雨雪天气下喷溅的发生;更少的摊铺材料,缩短了施工时间;改善了路面性能,降低了养护成本;厚的沥青膜能更好地黏结碎石;提高了性能,降低了使用周期内的成本;废物再利用,节省能源和自然资源。

橡胶沥青路面有以下优点:

耐久性:橡胶沥青路面在抗裂缝和抗老化方面有优异的性能。

可施工性:橡胶沥青路面有机械摊铺,并可立即开放交通,不需等待路面固化。

经济性:橡胶沥青路面具有很高的成本效益。它的建设成本,以及长使用寿命(当合理设计和建造时)是重要的特性。另外,与其他路面材料相比,养护和改建时间短,可减少使用者的延误。

可循环性:橡胶沥青路面的一个主要特性就是可以完全再利用。不仅集料可再利用,橡胶结合料也保持了较强的胶结性能,可以重新用于混合料中。但是,仍然要考虑空气质量是否达标。

多功能性:橡胶沥青的多功能性在加利福尼亚州和美国的其他地方都是显而易见的。加利福尼亚州的许多道路采用了橡胶沥青路面,反映了其良好的成本效益、可施工性和养护的简易性。

安全性:橡胶沥青路面具有良好的抗滑性能,路面安全性高。开级配(或间断级配)混合料还有其他优点,如它能减少雨天时的喷溅。

养护量少:当合理设计和施工时,橡胶沥青路面的养护工作量减少。

降噪:使用橡胶沥青路面时,轮胎噪声减小(如 3~5dB)。