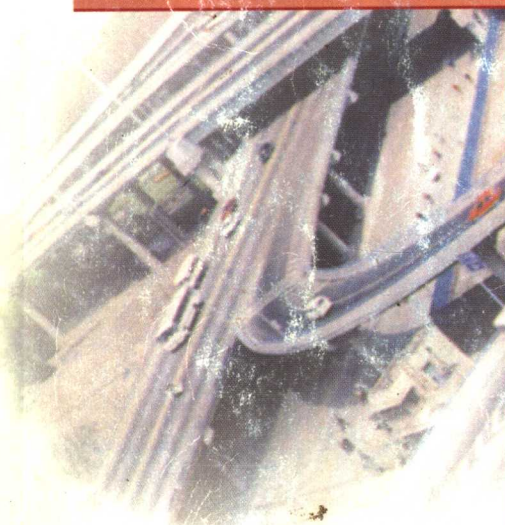


高等学校道路与铁道工程学科教材(同济大学推荐)

沥青混合料 设计原理与方法

LIQINGHUNHELIAO SHEJIJYUANLI YUFANGFA

吕伟民
编著



同济大学出版社

沥青混合料设计原理与方法

吕伟民 编著

同济大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

沥青混合料设计原理与方法/吕伟民编著. —上海:
同济大学出版社, 2001. 1
ISBN 7-5608-2226-6

I. 沥… II. 吕… III. 沥青混合料-设计 IV. U414.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 76271 号

沥青混合料设计原理与方法

作者 吕伟民

责任编辑 林武军 责任校对 徐春莲 装帧设计 李志云

出版 同济大学出版社
发行

(上海四平路 1239 号 邮编 200092 电话 021-65985622)

经销 全国各地新华书店

印刷 常熟市印刷八厂印刷

开本 787mm×1092mm 1/16

印张 22.25

字数 569600

版次 2001 年 1 月第 1 版 2001 年 1 月第 1 次印刷

书号 ISBN 7-5608-2226-6/U·28

定价 31.00 元

本书若有印装质量问题, 请向本社发行部调换

序 言

沥青路面具有行车平稳、舒适、噪声低、养护方便、易于回收再生利用等优点,在国内外公路和城市道路中,沥青路面作为高级路面的主要结构类型而广为应用。随着道路交通事业的发展,一方面对沥青路面的路用性能提出了更高的要求;另一方面,随着科学技术的不断进步,近年又出现了许多新型沥青路面结构和材料。道路工程师不仅需要了解沥青路面材料的基本特性、掌握适于不同用途的沥青混合料设计原理和方法,而且还要具备研究和开发新型沥青路面材料的知识和能力。

本书第一篇和第二篇主要论述道路石油沥青的基本路用性能,包括沥青的粘滞性、感温性、粘附性、耐久性,以及与温度、与荷载作用时间有关的粘流性质等;在此基础上进一步讨论沥青混合料的类型、组成结构、高温稳定性、低温抗裂性、耐疲劳性、耐久性以及影响车辆行驶质量的混合料表面特性。在上述各章中都详细阐明了影响沥青混合料路用特性的因素及其评价方法。所有这些就构成了沥青混合料设计的基本原理和方法。

本书还简要介绍了美国 SHRP 的研究成果,使我们对沥青路面材料新的研究动向和发展趋势有所了解。

研究沥青和沥青混合料的特性,目的不仅在于掌握这些基本知识,以便为沥青路面设计、养护、管理提供合理的方法和对策,而且还在于掌握各种沥青混合料的设计方法,以满足公路、城市道路、机场道面以及广场铺面建设的需要。为此,本书在第三篇除介绍常用的热拌热铺沥青混合料配合比设计方法之外,还介绍了各种沥青混合料的设计方法,其中,大多数内容包含了笔者的研究成果,对工程技术人员能有所帮助。

限于作者水平,书中错误和不当之处在所难免,恳请读者指正。

吕伟民

2000年12月于同济园

目 录

第一篇 沥青材料

第一章 概论	(3)
第一节 沥青材料的分类	(3)
第二节 沥青的组成和结构	(7)
第三节 道路石油沥青的物理性质	(12)
第四节 道路沥青的技术指标与技术要求	(15)
第二章 道路石油沥青的路用性质	(24)
第一节 沥青的粘滞性	(24)
第二节 沥青的感温性	(28)
第三节 沥青的粘附性	(33)
第四节 沥青的耐久性	(37)
第五节 沥青质量九面图	(44)
第三章 沥青材料的流变性质	(47)
第一节 材料的流变性质	(47)
第二节 沥青流变性质的主要影响因素	(50)
第三节 沥青粘流指标之间的关系	(51)
第四节 沥青的劲度模量	(55)
第五节 沥青劲度模量的现代测试方法	(60)
第六节 基本流变模型及其本构方程	(65)
第四章 沥青材料性能的改善	(69)
第一节 聚合物材料的种类	(69)
第二节 改性沥青的制备	(72)
第三节 改性沥青的性能	(75)
第四节 改性沥青的技术标准	(79)
第五节 改性沥青在道路工程中的应用	(84)

第二篇 沥青混合料

第五章 沥青混合料的组成结构	(89)
第一节 沥青混合料的类型	(89)
第二节 沥青混合料的集料级配与组成结构	(91)

第三节	沥青混合料的强度理论	(94)
第四节	沥青混合料的技术要求	(97)
第六章	沥青混合料的劲度特性	(99)
第一节	沥青混合料的变形特性	(99)
第二节	沥青混合料劲度模量的影响因素	(100)
第三节	沥青混合料劲度模量的确定方法	(103)
第四节	时温换算法则	(111)
第七章	沥青混合料的高温稳定性	(114)
第一节	概述	(114)
第二节	沥青混合料高温稳定性的影响因素	(114)
第三节	沥青混合料高温稳定性的评价	(116)
第四节	高温稳定性指标的相关关系	(126)
第五节	沥青混合料高温稳定性技术标准	(129)
第八章	沥青混合料的低温抗裂性	(133)
第一节	概述	(133)
第二节	沥青混合料低温断裂的影响因素	(134)
第三节	沥青混合料的收缩特性	(138)
第四节	沥青混合料低温缩裂性能的评价与防治	(140)
第五节	反复温度应力的疲劳开裂	(149)
第九章	沥青混合料的疲劳特性	(151)
第一节	路面的应力状态与疲劳模式	(151)
第二节	沥青混合料疲劳寿命的影响因素	(153)
第三节	疲劳试验的方法	(157)
第四节	沥青混合料的疲劳规律	(161)
第五节	沥青混合料疲劳寿命的预估	(165)
第十章	沥青混合料的耐久性	(171)
第一节	沥青混合料生产过程中的老化	(171)
第二节	沥青路面在使用过程中的老化	(173)
第三节	沥青混合料耐久性的评价方法	(174)
第四节	沥青混合料耐久性的改善	(179)
第十一章	沥青混合料的表面特性	(181)
第一节	表面宏观构造与抗滑性能的关系	(181)
第二节	表面宏观构造与路面噪声的关系	(186)
第三节	表面宏观构造与反光特性的关系	(194)

第三篇 沥青混合料组成设计

第十二章	概 述	(199)
第一节	沥青混合料组成设计的内容	(199)

第二节	现行沥青混合料设计方法	(201)
第三节	SHRP 沥青混合料设计方法	(202)
第十三章	热拌沥青混合料组成设计	(211)
第一节	材料	(211)
第二节	集料级配	(217)
第三节	确定沥青用量	(219)
第四节	配合比调整	(222)
第五节	沥青混合料性能检验	(223)
第六节	生产配合比设计	(224)
第十四章	SMA 混合料配合比设计	(226)
第一节	概述	(226)
第二节	材料	(228)
第三节	玛蹄脂的组成与技术要求	(238)
第四节	SMA 混合料级配	(241)
第五节	SMA 混合料的技术指标与要求	(247)
第六节	SMA 混合料设计示例	(254)
第十五章	开级配抗滑磨耗层混合料设计	(260)
第一节	概述	(260)
第二节	材料	(262)
第三节	集料级配	(267)
第四节	结合料用量的确定	(270)
第十六章	机场沥青道面混合料设计	(277)
第一节	机场道面的工作特点	(277)
第二节	材料	(278)
第三节	混合料配合比设计	(282)
第十七章	乳化沥青冷铺混合料设计	(289)
第一节	乳化沥青的制备	(290)
第二节	乳化沥青混合料配合比设计	(296)
第十八章	浇注式沥青混合料配合比设计	(299)
第一节	浇注式沥青混合料的特性及其应用	(299)
第二节	材料组成及其技术要求	(300)
第十九章	再生沥青混合料配合比设计	(306)
第一节	概述	(306)
第二节	沥青再生的机理与方法	(307)
第三节	再生剂的作用及其技术标准	(308)
第四节	旧料与新料配合比例的确定	(312)
第五节	再生剂与新沥青用量的计算	(313)
第六节	再生混合料集料的配合	(315)
第七节	再生混合料沥青用量的确定	(316)

第二十章 彩色沥青混合料设计	(319)
第一节 彩色铺面的用途.....	(319)
第二节 胶结料的配制.....	(320)
第三节 彩色混合料的材料组成.....	(322)
第四节 彩色混合料配合比.....	(323)
第二十一章 高强沥青混凝土配合设计	(325)
第一节 概述.....	(325)
第二节 环氧沥青混凝土配制的原理.....	(327)
第三节 环氧树脂与沥青的相容性.....	(328)
第四节 固化剂的性质与选择.....	(330)
第五节 环氧沥青混凝土的配制.....	(332)
第二十二章 储存式冷铺沥青混合料设计	(335)
第一节 概述.....	(335)
第二节 结合料的性能与技术要求.....	(336)
第三节 混合料配合设计与技术指标.....	(338)
第二十三章 沥青稀浆封层混合料设计	(342)
第一节 稀浆封层的结构类型.....	(342)
第二节 沥青稀浆混合料配合比设计.....	(344)
参考文献	(347)

第一篇 沥青材料

第一章 概 论

第一节 沥青材料的分类

沥青材料的品种很多,按照沥青材料的来源、加工方法、用途、形态等可分为许多种类。

一、按沥青的来源分类

1. 石油沥青

地壳中的原油,经开采加工所得的沥青为石油沥青。这是沥青材料的主要来源,应用最为广泛。

地壳中的石油在各种因素作用下,其轻质油分蒸发,经浓缩、氧化作用形成天然的沥青,称为“天然沥青”(nature asphalt)。人们熟知的“湖沥青”(lake asphalt)就是天然沥青。其中,产地在中美洲的委内瑞拉北海岸附近的特立尼达岛上的特立尼达湖沥青就是著名的天然沥青,它是 1595 年由沃尔特·雷利发现的。我国新疆克拉玛依也有天然沥青。

存在于岩石缝隙的天然沥青,称为岩沥青(rock asphalt)。岩沥青中含有许多砂和岩石,经过水熬制,可以得到纯净的沥青。

2. 焦油沥青

煤、木材、页岩等有机物质经炭化作用或在真空中分馏得到的粘性液体,称为焦油沥青。由煤加工所得的焦油称为煤焦油。由木材蒸馏而得到的焦油,称为木焦油,松节油就是典型的木焦油。页岩经过蒸馏得到的焦油,称为页岩沥青。

二、按石油加工的方法分类

石油有不同的炼制方法。由于加工工艺的不同所得的石油沥青的性质也不尽相同。现代加工沥青的方法主要有以下几种:

1. 蒸馏沥青

直接蒸馏原油,将不同沸点的馏分取出后,在常压塔底获得的残渣为直馏沥青。蒸馏法制取石油沥青是最简单、最经济的方法。原油脱水后加热至 360℃,进入常压塔,在塔内分馏出汽油、柴油和重柴油。塔底常压渣油再进一步加热至 390℃,进入减压蒸馏塔,此塔保持一定的真空度,分馏出减压馏分,塔底所存的减压渣油往往可以获得合格的道路沥青。直馏沥青生产过程如图 1-1 所示。

由于直馏沥青中含有许多不稳定的烃,其温度稳定性和耐候性差。但如果所用的原油合适(为环烷基或中间基原油),则往往延伸性好。

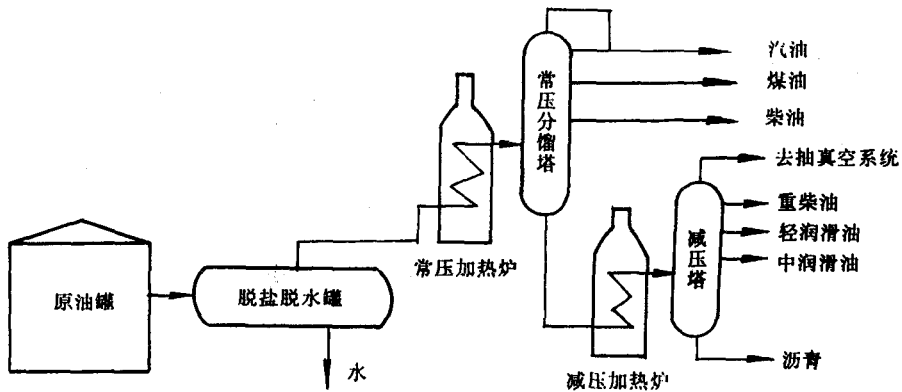


图 1-1 直馏沥青生产过程

2. 氧化沥青

将低标号的沥青或渣油在 240 ~ 290℃ 的高温下吹入空气,使其软化点提高、针入度降低,提高沥青的稠度,这种方法所得的沥青为氧化沥青,也称为吹制沥青 (blown asphalt)。氧化沥青生产过程如图 1-2 所示。

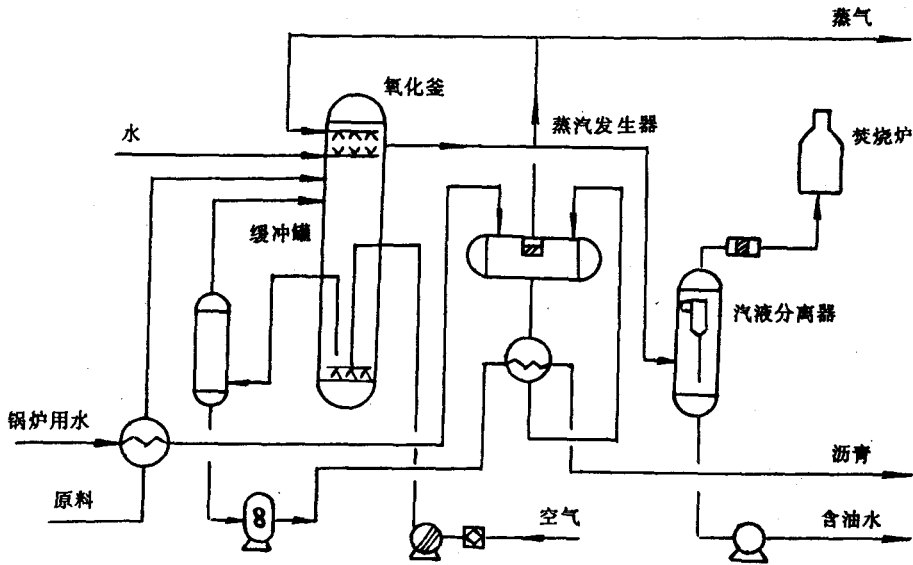


图 1-2 氧化沥青生产工艺流程

低标号沥青或渣油连续按一定的流速通入氧化塔。氧化塔系中空圆筒,里面装有栅板,以减少返混。空气由底部分批通入,在一定温度下渣油中的芳烃、胶质和沥青质与空气中的氧发生氧化反应,组成发生变化,其转化过程为:

芳烃 → 胶质 → 沥青质 → 碳青质 → 焦炭

氧化反应的结果使沥青稠化,温度敏感性降低,针入度指数增大。氧化法主要用来生产

高软化点的建筑沥青,当直馏法不能直接生产道路沥青时,有时就采用浅度氧化的方法,在比较低的温度下氧化较短的时间,所得沥青为半氧化沥青。

3. 溶剂沥青

石蜡基原油的残渣富含高沸点石蜡烃,蒸馏法很难将它完全蒸出。这些组分留在沥青中使沥青的稠度达不到要求,且软化点和延度都低。由于这种沥青中的饱和烃几乎不能被氧化,而芳烃和胶质则大量被氧化成沥青质和炭青质,这样得到的沥青不但脆,而且也没有弹性。采用溶剂法处理石蜡基原油则能得到质量优良的沥青。

溶剂法是利用溶剂对各组分有不同的溶解能力、能选择性地溶解其中一个或几个组分,这样,就能实现组分的分离。这种方法与蒸馏法相比,所得产品在组成和性能上有明显差异。根据渣油中组分不同的溶解能力,从渣油中分离出富含饱和烃和芳香烃的脱沥青油,即催化、裂化或加氢裂化的原料油,同时得到含胶质、沥青质高的浓缩物,即沥青。所得沥青加以调和、氧化,可生产出各种规格的沥青。丙烷脱沥青生产过程如图 1-3 所示。

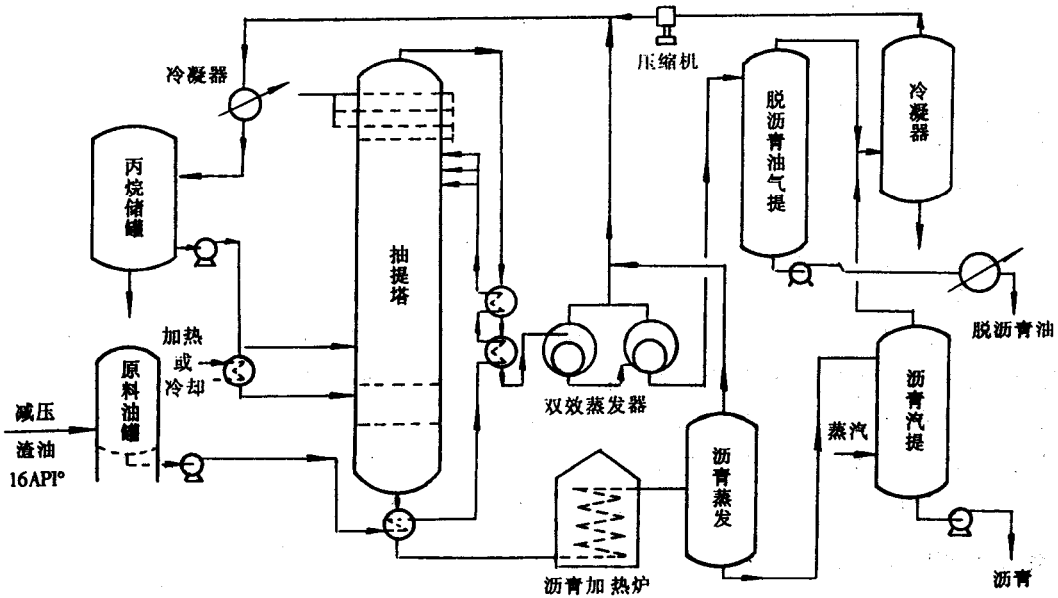


图 1-3 丙烷脱沥青生产流程示意图

4. 调和沥青

用调和法生产沥青是按照沥青质量要求,将几种沥青调和,调整沥青组分之间的比例以获得所要求的产品。

优质沥青的组分大致比例为:饱和分 13% ~ 31%,芳香分 32% ~ 60%,胶质 19% ~ 39%,沥青质 6% ~ 15%,蜡含量小于 3%。然而,调和沥青的性质与各组分的比例不是简单的加合,而是和形成的胶体结构类型有关。调和法生产沥青通常先生产出软、硬两种沥青组分,然后根据需要调和出符合要求的沥青。调和的关键在于配合比正确并混合均匀。

三、按原油的性质分类

石油按其含蜡量的多少可分为石蜡基、中间基和环烷基原油,不同性质的原油所炼制的沥青性质有很大的差别。

1. 石蜡基沥青

石蜡基沥青其蜡的含量一般都大于5%,大庆原油所炼制的沥青是典型的石蜡基沥青,其含蜡量甚至达20%左右。

由于在常温下蜡常常以结晶析出存在于沥青的表面,使沥青失去黑色光泽。石蜡基沥青粘结性差,软化点虽高,但热稳性极差,温度稍高粘度就会很快降低。

2. 环烷基沥青

由环烷基石油加工所炼制的沥青为环烷基沥青。这种沥青含有较多的脂烷烃,蜡含量少(一般低于3%),这种沥青粘性好,优质的重交通道路沥青大多是环烷基沥青。

3. 中间基沥青

采用中间基原油炼制的沥青,其蜡的含量约为3%~5%,普通道路沥青大多属于这种沥青。

四、按沥青的形态分类

1. 粘稠沥青

在常温下沥青呈膏体状或固体状,故称之为膏体沥青,这是粘滞度比较高的沥青,所以,一般称为粘稠沥青。这种沥青的标号通常用针入度表示,故有时又称针入度级沥青。

2. 液体沥青

这种沥青在常温下是液体或半流动状态的沥青。用溶剂将粘稠沥青加以稀释所得到的液体沥青,称为稀释沥青,也称为回配沥青(cut back)。根据沥青凝固的速度,液体沥青又分为快凝、中凝和慢凝三种。将沥青材料加以乳化成为乳化沥青,乳化沥青是另一种形式的液体沥青。按照乳化沥青破乳速度的快慢又分为快裂、中裂和慢裂三种。乳化沥青按其所用乳化剂的种类可分为阳离子乳化沥青、阴离子乳化沥青和非离子乳化沥青。

五、按沥青的用途分类

1. 道路沥青

用于铺筑道路路面的沥青为道路沥青。适用于在重交通道路的沥青为重交通道路沥青(heavy duty asphalt),只适用于一般中、轻交通的道路上使用的沥青为中、轻交通道路沥青,即普通道路沥青。沥青的主要用途是用于修路,所以,道路沥青几乎要占整个沥青产量的50%。

2. 建筑沥青

建筑业用的石油沥青主要用于防水、防潮,也用于制造防水材料,如油毛毡、沥青油膏等。一般要求沥青具有良好的粘结性和防水性,在高温下不流淌,低温下不脆裂,并要求有良好的耐久性。建筑沥青标号较高,针入度在5~40(0.1mm)范围内。

3. 机场沥青

适用于铺筑机场跑道道面的沥青材料称为机场沥青。由于机场道面承受飞机荷载,要

求沥青有良好的粘结性和耐久性。机场道面沥青的名称已经在我国《民用机场沥青混凝土道面设计规范》中提出。

4. 其他沥青

沥青在许多领域有着广泛的应用。根据用途的不同,沥青又有很多种类。例如,在水利工程中应用的沥青,称之为水工沥青。根据有关方面的统计,全世界有 200 多个大型水工结构物应用沥青。英国的邓岗内尔水坝、库利福水坝,以及我国浙江安吉县天荒坪水库等都采用沥青混凝土做面板防渗。沥青还用于动力电缆和通讯电缆的防潮和防腐,这种沥青称之为电缆沥青。用于输油、输气、供水等金属管线以防止锈蚀的沥青,称为防腐沥青。用于加工油漆和烘漆的称为油漆沥青等等。

第二节 沥青的组成和结构

一、沥青的元素组成

沥青不是单一的物质,而是由多种化合物组成的混合物,成分极其复杂。但从化学元素分析,其主要由碳(C)、氢(H)两种化学元素所组成,故又称为碳氢化合物。此外,沥青中还含有少量的硫(S)、氮(N)、氧(O)以及一些金属元素,如钠、镍、铁、镁和钙等,它们以无机盐或氧化物的形式存在,约占 5%。几种沥青的元素组成如表 1-1。

表 1-1 沥青的元素组成

沥青名称	C%	H%	C/H(原子比)	平均分子式
阿拉伯轻质原油沥青	84.0	10.3	0.68	$C_{68.5}H_{104.2}O_{1.1}S_{0.1}$
伊朗重质原油沥青	83.6	10.2	0.68	$C_{71.8}H_{105}S_{1.8}$
科威特沥青	83.9	10.3	0.68	$C_{69.9}H_{103}S_{1.8}$
大庆丙脱沥青	86.1	11.0	0.66	$C_{68.5}H_{104.2}O_{1.1}S_{0.1}$
胜利氧化沥青	84.5	10.6	0.67	$C_{71.8}H_{107.3}O_{1.1}S_{0.8}$

由表 1-1 可见,沥青的成分随原油的来源不同而不同,同时,沥青在炼制过程中组分也会发生变化。C/H 的比例可以在很大程度上反映沥青的化学成分,C/H 愈大,表明沥青的环状结构,尤其是芳香环结构愈多。在沥青中,碳和氢的含量占 98% ~ 99%,其中,碳的含量为 83% ~ 87%,氢为 11% ~ 14%。

二、沥青的组分

由于沥青的组成极其复杂和有机化合物的同分异构现象,许多沥青的化学元素组成虽然十分相似,但是它们的性质却往往有很大区别,沥青化学元素的含量与沥青性能之间尚不能建立起直接的相关关系。

人们在研究沥青化学组成的同时,利用沥青对不同溶剂的溶性,将沥青分离成几个化学成分和物理性质相似的部分,这些部分称为沥青的组分。沥青中各组分的含量和性质对沥青的粘滞性、感温性、粘附性等化学性质有直接的联系。

根据试验方法的不同,沥青可以分离成以下几种组分:

(1) 二组分

沥青分为沥青质和可溶质(软沥青质)两种组分。

(2) 三组分

沥青分为沥青质、油分和树脂三种组分。

(3) 四组分

沥青分为沥青质、饱和分、芳香分和胶质四种组分。

(5) 五组分

按罗斯特勒提出的分离法,沥青可分为沥青质、氨基、第一酸性分、第二酸性分和链烷分五种组分。

我国目前广泛采用四组分分析方法,该法已于 1978 年列入美国材料试验协会 (ASTM) 推荐方法。四组分试验流程如图 1-4 所示:

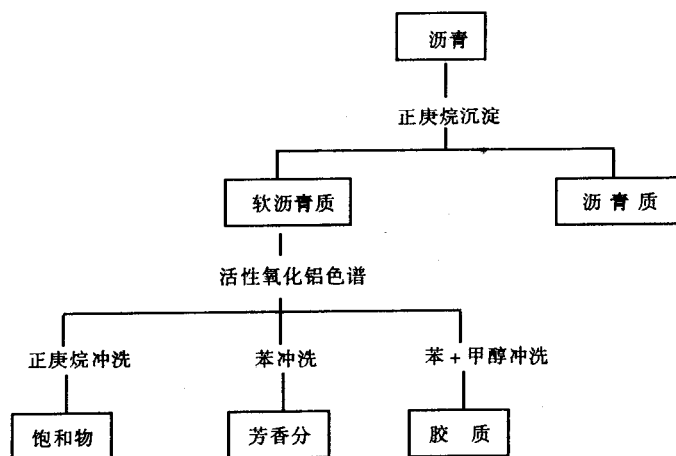


图 1-4 四组分试验流程

沥青的四种组分有以下所述的不同的特征:

1. 沥青质

沥青质是深褐色至黑色的无定形物质,有的文献中又称之为沥青烯。沥青质比重大于 1,不溶于乙醇、石油醚,易溶于苯、氯仿、四氯化碳等溶剂。这是复杂的芳香分物质,有很强的极性,分子量在 1000 ~ 10000 范围内,颗粒的粒径为 5 ~ 30nm, H/C 原子比例约为 1.16 ~ 1.28。

沥青质在沥青中的含量一般为 5% ~ 25%,其含量的多少对沥青的流变特性有很大的影响。我国有些沥青如大庆沥青、任丘沥青中的沥青质含量很低,几乎都在 1% 以下,这是

国产沥青的重要特征。

沥青质对沥青中的油分虽有憎液性,而对胶质呈亲液性。因此,沥青是胶质包裹沥青质而成胶团悬浮在油分之中,形成胶体溶液。这样,沥青质含量多少对胶体体系的性质有很大的影响。

当沥青中的沥青质含量增加时,沥青稠度提高、软化点上升。日本饭岛博通过对 20 多种沥青的研究,发现沥青的软化点 $T_{R\&B}$ 与各组分含量之间成如下关系:

$$T_{R\&B} = 1.19X - 0.671Y - 0.682Z - 0.00838W + 83.6 \quad (1-1)$$

式中, X, Y, Z, W 分别为沥青质、胶质、芳香分和饱和分的含量。该式与实测误差不超过 3°C 。

沥青质的存在,对沥青的粘度、粘结力、温度稳定性都有很大的影响。所以,优质沥青必须含有一定数量的沥青质。

2. 胶质

胶质也称为树脂或极性芳烃,是半固体或液体状的黄色至褐色的粘稠状物质,有很强的极性。这一突出的特性使胶质有很好的粘结力。胶质比重为 $1.0 \sim 1.08$,分子量在 $600 \sim 1000$ 范围内,其在沥青中含量为 $15\% \sim 30\%$ 。胶质溶于石油醚、汽油、苯等有机溶剂。

胶质是沥青的扩散剂或胶溶剂,胶质与沥青质的比例在一定程度上决定沥青是溶胶或是凝胶的特性,胶质的 H/C 原子比为 $1.30 \sim 1.47$ 。

胶质赋予沥青以可塑性、流动性和粘结性,对沥青的延性、粘结力有很大的影响。

3. 芳香分

芳香分是由沥青中最低分子量的环烷芳香化合物组成的,它是胶溶沥青质的分散介质。芳香分在沥青中占 $40\% \sim 65\%$,是深棕色的粘稠液体, H/C 原子比为 $1.56 \sim 1.67$,平均分子量在 $300 \sim 600$ 范围内。

4. 饱和分

饱和分是由直链烃和支链烃所组成的,是一种非极性稠状油类, H/C 原子比在 2 左右,平均分子量为 $300 \sim 600$,饱和分在沥青中占 $5\% \sim 20\%$,饱和分对温度较为敏感。

芳香分和饱和分都作为油分,在沥青中起着润滑和柔软作用。油分含量愈多,沥青的软化点愈低,针入度愈大,稠度降低。

油分经丁酮-苯脱蜡,在 -20°C 冷冻,会分离出固态的烷烃,即为蜡。

5. 蜡分

蜡的化学组成以纯正构烷烃或其熔点接近纯正构烷烃的其他烃类为主。

蜡有石蜡和地蜡之分,地蜡是微晶蜡,沥青中的蜡主要是地蜡。在常温下,蜡都以固体形式存在,蜡对沥青的性能有较大的影响。

(1) 对沥青流变性的影响

在沥青中,蜡主要溶解在油分中,当它以溶解状态存在时,则会降低分散相的粘度,这是蜡在液体状态时粘度降低,仅 $10 \sim 30$ 厘泊;当蜡以结晶状态存在时,则会使沥青具有屈服应力的结构;如果以松散粒子存在,就类似于沥青中加入矿粉而使沥青的粘度增加。沥青中蜡含量增加,会使沥青在常温下的粘度增大;而当接近石蜡融化温度(50°C)时,蜡含量增加,反而使沥青的粘度降低。因此,蜡含量高的沥青温度敏感性强。