

摘要

乳化沥青是一种性能优良的路面建筑材料，它具有施工快捷、工艺简单、节约资源和污染小等优点，因此它得到了越来越广泛的应用。

本文通过对沥青乳化机理的分析，在大量试验的基础上研究开发出了适用于冷拌沥青混合料的乳化沥青，并对所研究开发的乳化沥青及改性乳化沥青进行了质量检测，满足 BC-2 型阳离子乳化沥青的各项技术要求，可以作为冷拌沥青混合料的粘结料。

通过冷拌沥青混合料配合比试验的研究，提出了冷拌沥青混合料的配合比设计方法，首先用膜厚估算计算出冷拌沥青混合料初始乳液用量、然后用修正马歇尔试验对混合料的最佳乳液用量进行确定、最后用浸水马歇尔试验及飞散试验对最佳乳液用量进行了验证。

针对冷拌沥青混合料普遍存在的强度形成缓慢、早期强度偏低的特点，在冷拌沥青混合料中添加水泥，并通过马歇尔试验、浸水马歇尔试验、劈裂试验及冻融劈裂等性能试验评价分析了水泥剂量对冷拌沥青混合料性能的影响，并提出经济合理的技术方案。

最后，对冷拌沥青混合料的经济与社会效益进行了分析，结果表明冷拌沥青混合料对于偏远地区或远离热拌和厂的低等级道路来说是一种具有良好技术经济性的筑路材料，具有广阔的应用前景。

关键词：冷拌沥青混合料；慢裂乳化沥青；配合比设计；水泥；路用性能

Abstract

Asphalt emulsion is a kind of pavement material of good performance. It has the advantages of convenient construction, simple technics, saving resource and low pollution. So it is used widely in recent years.

In this paper, through the analysis of asphalt emulsification mechanism, a new kind of asphalt emulsion which is applicable for cold mix is made out after a great deal of experiments. The qualities of the asphalt emulsion and modified asphalt emulsion are checked, and they satisfy the requirements of BC-2 cationic asphalt emulsion and could be used in cold mix.

Through the research on cold mix, the mix design method is put forward .Firstly, the initial content of asphalt emulsion is determined by estimating the film thickness. Secondly, the optimum asphalt emulsion content is determined after modified Marshall Test. Finally, Waterlogged Marshall Test and Scattering Loss Test are used to validate the optimum asphalt emulsion content.

Aiming at the fact that cold mix forms strength slowly and its' earlier period strength is low, cement is added. After a great deal of experiments, it demonstrates the beneficial effects of adding cement to cold mix.

It also analyzes the economic and social results of the cold mix. And it is showed that cold mix is a good material to low class road which is far from the hot mix plant.

Key Words: cold mix; slow-setting asphalt emulsion; mix design; cement; pavement performance

东南大学学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得东南大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名： 李萍 日期： 2005.4.29

东南大学学位论文使用授权声明

东南大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆有权保留本人所送交学位论文的复印件和电子文档，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。除在保密期内的保密论文外，允许论文被查阅和借阅，可以公布（包括刊登）论文的全部或部分内容。论文的公布（包括刊登）授权东南大学研究生院办理。

研究生签名： 李萍 导师签名： 倪富健 日期：

第一章 绪论

1.1 问题的提出

近十年来,特别是“九五”以来,我国公路的主骨架已有相当部分实现了高速化,国道干线公路网也已基本实现二级以上公路相连通。随着干线公路网的逐步建设完善与保证畅通,三、四等级道路及农村公路的发展必将更加突出;其里程总量不足、技术等级普遍偏低、服务水平状况差等问题必然会影响干线公路的作用发挥,如何在已有建设的基础上进一步改善三、四等级道路及农村公路的技术服务状况、提高其通达深度、形成具有规模效益的路网,从而促进偏远地区经济发展、加快贫穷地区的开发、推动我国国民经济的更大发展,将是我们所面临的现实问题。

江苏的国、省干线公路经过多年大规模的建设,其发展水平已有了明显的质和量的提高。至“九五”期末,全省完成干线公路改造建设近 2000 公里;国道及三分之二的省道已达二级以上标准,基本保证了干线公路的畅通。而三、四等级道路及农村公路是干线公路的交通量主要来源和农村最重要的基础设施之一,长期以来,由于受资金困扰和人们认识上的偏差,其发展水平较低,表现为发展速度较慢、建设的标准较低、适应经济发展的能力差、抗灾害能力差、服务水平低及建设与养护管理基本处于无序状态,严重制约了社会经济发展和周边地区居民生活水平的提高。

三、四等级道路及农村公路的建设应本着就地取材,因地制宜、节约成本、施工简便的原则,目前建设中路面的主要选用形式为热拌沥青混合料及水泥混凝土路面,由于受地理位置及材料、资金等的限制,有时候这两种面层并不是很合适的方式,冷拌沥青混合料就是在这种情况下被人们用来作为低等级道路面层材料的。

冷拌沥青混合料的主要原材料之一就是乳化沥青,乳化沥青就是将沥青热融,经过机械的作用,以细小的微滴状态分散于含有乳化剂的水溶液之中,形成水包油状的沥青乳液。乳化沥青的发展始于 20 世纪初,最早被用于喷洒以减少灰尘,20 世纪 20 年代在道路建筑中普遍使用。起初乳化沥青的发展速度相对较慢,受制于可利用的乳化剂和人们对乳化沥青认识的缺乏。通过改进乳化设备和人们的不断实践,乳化沥青的型号和等级不断发展,现在的选择范围已经非常广泛。乳化沥青在其前 40 年的发展过程中,主要发展的是阴离子乳化沥青。这种乳液虽然具有节约能源、使用方便、乳化剂来源广且价格便宜等优点,但与矿料的粘附性不太好,特别是与酸性矿料的粘附性更不好。随着近代界面化学和胶体化学的发展,近 30 年来,阳离子乳化沥青发展很快,它克服了阴离子乳化沥青的缺点。

乳化沥青在我国的发展较晚。新中国建立之前只有个别市政部门使用了少量阴离子乳化沥青,解放后一直没有接触这项技术。自 20 世纪 80 年代初起,才对此课题进行立项科研,并于“七五”期间开始推广应用。近年来,乳化沥青的应用范围不断得到开拓发展,现在乳化沥青不仅用于低等级路面的铺筑和养护上,还逐步用于高等级公路的粘层油、透层油、封层及旧沥青路面材料的冷再生。随着乳化沥青在国内的广泛应用,人们也会越来越关注它的应用新领域。因此,开发慢裂乳化沥青及研究冷拌沥青混合料的应用技术显得尤为重要。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国外乳化沥青的发展及应用情况

在乳化沥青发展的几十年里,乳化剂是影响乳化沥青发展的关键因素之一。1905年,第一个沥青乳化剂产品问世,1906~1914年乳化沥青在筑路中崭露头角。1922年英国化学家 Mac.Kay 申请了第一个阴离子沥青乳化剂专利,1951年法国研制成阳离子乳化剂,成为乳化沥青发展史上一个重要的里程碑。六十年代后,阴离子乳化沥青使用量减少,阳离子乳化沥青的使用量直线上升,近几十年来,又出现了性能卓越的复合型乳化剂,这些都促进了乳化沥青的发展。

欧洲在乳化沥青的发展中占有重要的地位,尤其是法国,其应用量占了欧洲总用量的50%左右,大多数的次干道路的维修养护和改造使用了乳化沥青。美国是世界上乳化沥青使用量最多的国家,其用量占世界的40%以上。表1.1是2001年世界一些国家乳化沥青使用量的一些情况。

表 1.1 2001 年世界一些国家乳化沥青应用情况

国家	产量(吨)	沥青用于乳化沥青生产(%)
澳大利亚	101,000	33.67
加拿大	350,000	12.61
法国	1,040,000	33.44
日本	274,000	5.75
墨西哥	580,000	48.33
西班牙	320,000	20.00
美国	2,000,000	6.54
中国	300,000	—

此外,随着乳化沥青的不断发展,乳化沥青的应用领域越来越宽广。起初,乳化沥青被用于喷洒以减少灰尘,1925年乳化沥青施工发展为石屑封层,至今这一应用在欧洲占有一定比例。20世纪40年代稀浆封层开始被使用,它不仅能够延长道路寿命同时也非常经济有效,随着改性沥青的发展与使用,聚合物被添加到乳化沥青中制作成聚合物改性乳化沥青,60年代末70年代初,德国首先使用微表处技术,其突出的特点可以填补较大深度的车辙同时又不破坏昂贵的标线。随着稀浆封层、微表处及冷再生的应用,乳化沥青的需求量也越来越多。此外,能源的维护和环境污染这两个因素加速了乳化沥青在实际中的应用。

乳化沥青在道路工程中成功地应用让道路界看到了它突出的社会效益与经济效益,他们在发展现有应用技术时又不断地开拓它的应用新领域。

欧美在乳化沥青上已取得了许多成果,并取得了多项专利,发展的方向有以下几种:

1、可以控制破乳时间的乳化沥青,它始于1970年,至今已有5000万 m^2 以上的工程实例。调整破乳速度的方法一般为制造厂家的专利,最常用的方法是在喷洒乳液的时候同时喷洒破乳剂,这是最简便的方法。破乳时间可以调节在20~30分钟至数小时。在对表面进行处治时可以用时很短,并能在雨中或霜中对道路进行养护,因而大大延长路面表面处治的施工季节。

2、掺聚合物的乳化沥青。聚合物改性乳化沥青是在乳化沥青中掺加聚合物改性剂从而达到改善沥青性能的目的。80年代初开始工业化生产,其优点主要体现在:

- 提高高温稳定性
- 提高低温抗缩裂能力

- 延长路面寿命
- 提高粘附强度
- 提高内聚力
- 提高抗剥落能力
- 提高早期强度
- 改善拌和性能

3、精制乳化沥青。在制造乳液时，高的界面张力是制备细微粒乳液的最大障碍。如在酸性状态时往沥青中加入低分子胺将形成稳定的咪唑型的界面活性剂，由于这种界面活性剂的存在，使沥青与酸性溶液的界面张力显著下降。当 pH 值接近 2 时，界面张力几乎是零；这样处理的沥青制造的乳化沥青时形成的微小颗粒，也就是说一般乳化沥青微粒直径的中间值为 3~5 微米，而精制乳化沥青的中间值为 1~2 微米，微粒粒径和单一的粒径将有助于乳化沥青的贮存稳定性和骨料的粘附性，并由于骨料上沥青膜很薄而节省沥青用量。

4、高浓度乳化沥青。在道路上使用的乳化沥青最初是沥青含量 50% 的阴离子乳化沥青，渐渐制作出 55%、60% 的乳化沥青，而阳离子乳化沥青可制成 65% 甚至 69% 的沥青含量。法国已有沥青含量浓度为 72%、80% 的乳液，是属于水包油型的阳离子乳化沥青。

随着乳化沥青的发展，国外很多国家都在开拓乳化沥青的应用新领域——冷拌沥青混合料。冷拌沥青混合料主要用于低等级道路的结构层，可以用作基层也可以用作面层，在用作面层时往往在其上加一层稀浆封层或雾封层，国外也有不加封层的例子。在法国，已有较多街道、乡村道路采用冷拌沥青混合料，且使用效果得到了好评。但是由于冷拌沥青混合料的强度形成过程与热拌沥青混合料明显不同，起初摊铺和碾压的冷拌沥青混合料，需要经过比热沥青成型过程长得多的时间才能达到一定强度要求，所以各国都没有形成一种完整的设计体系及施工质量控制标准。

1.2.2 国内乳化沥青的发展及应用情况

我国乳化沥青的发展进程也经历了与国外类似的进程。在新中国建立前只有个别的市政工程部门使用了少量的阴离子乳化沥青，解放后一直没有接触这项技术，直至 70 年代末，由交通部组织成立了“阳离子乳化沥青及其路用性能研究”课题协作组，才对这项技术攻关。经过“阳离子乳化沥青及其路用性能研究”课题协作组的努力，使得乳化沥青在“七五”期间在全国范围推广应用。课题协作组逐项解决了阳离子乳化沥青的各项有关技术，其中包括阳离子型沥青乳化剂的研制和生产、乳化工艺与乳液配方、乳化机械的研制与乳化车间的设置、阳离子沥青乳液的检验标准和试验方法；乳化沥青混凝土配合比设计及试验方法、阳离子乳化沥青筑路及养护施工技术等关键性技术问题。

在该课题完成时，全国 14 个省市铺筑了贯入式、黑色碎石、乳化沥青混凝土、表面处治等各种结构形式的路面并用于旧沥青路面材料冷再生、防尘处理。这些应用都取得了完全的成功，并显示出了很好的社会效益和经济效益。

目前我国的乳化沥青生产基地已经遍布全国各地，已拥有乳化沥青车间 200 多座，其生产技术水平也在不断提高，乳化沥青的生产从开口自流凭经验控制油水比例，逐步发展成密封加压由流量计控制油水比例，进而达到计算机自动控制油水比例和油水温度。乳化沥青的生产质量提高，产量增加，满足了公路工程 and 养护工程的需要。

此外，乳化剂的品种也在不断地增加，目前已有 20 多个厂家生产不同类型的乳化剂，但是国产沥青乳化剂也存在很多问题，例如品种少，产品质量不稳定等问题。还有一个问题就是对乳化沥青的认识上存在误差和不正确，乳化沥青不是热沥青的替代品，它们有各自的优点。我国许多基层单

位只用一种乳化剂，生产一种型号的乳化沥青应用于粘层油、透层油、封层等多种路面形式。因此，研究各种性能的乳化剂及其相应的使用技术是全面提高乳化沥青及混合料技术水平的重要因素。

今后我国乳化沥青的发展之一就是开拓它的应用新领域——冷拌沥青混合料。虽然我国的干线公路网已基本实现二级以上相通，但是三、四等级及农村公路的发展相对滞后，由于受地理、环境、材料的影响，在远离热拌和厂的地方，冷拌沥青混合料相对于热拌混合料来说是个更为经济的选择。它在我国的西部地区，偏远地区及农村有广阔的应用前景。因此开展冷拌沥青混合料设计与施工的研究是十分必要的。

1.3 本文研究的主要内容

本文研究的主要内容如下：

(1) 由于目前国内冷拌沥青混合料的研究还处于初始阶段，市场上适用于冷拌沥青混合料的乳化沥青几乎没有，因此研究开发适用于冷拌沥青混合料的慢裂乳化沥青是本课题的重点；

(2) 借鉴国外先进经验，结合我国的实际情况及试验设备进行冷拌沥青混合料室内试验研究，采用不同的方法进行冷拌沥青混合料配合比设计，确定最佳施工配合比，分析不同设计方法的合理性；

(3) 冷拌沥青混合料性能试验研究及水泥对冷拌沥青混合料性能的影响；

(4) 冷拌沥青混合料社会效益综合评价。

第二章 乳化剂及乳化沥青的形成机理

2.1 乳化沥青

2.1.1 乳化沥青简介

乳化沥青是胶体乳液，所谓胶体就是一种或几种物质均匀地分散于另一种物质之中，被分散的物质称为分散相，另一种分散物质称为分散介质。乳化是将两种难以互溶的液体（例如油与水），将一种液体均匀、稳定地分散于另一种溶液之中，成为乳状液。乳化沥青就是将沥青热融、经过机械的作用，以细小的微滴状态分散于含有乳化剂的水溶液之中，形成水包油状的乳液。

随着表面化学、胶体化学、物理化学等学科的发展，乳化理论日趋成熟，乳化剂的品种越来越丰富，这些都促进了乳化沥青的发展，现在不仅用于低等级路面的铺筑和养护上，还逐步用于高等级公路的粘层油、透层油、封层及旧沥青路面材料的冷再生。随着乳化沥青在国内的广泛应用，人们也会越来越关注它的应用新领域。

2.1.2 乳化沥青的分类

根据不同的分类方法可对乳化沥青加以分类：

- 1、根据沥青微粒所带电荷的不同，乳化沥青可以分为阳离子乳化沥青、阴离子乳化沥青和非离子乳化沥青；
- 2、根据是否掺加改性剂可分为普通乳化沥青和改性乳化沥青；
- 3、根据乳化沥青的分解破乳速度可以分为快、中、慢裂型；
- 4、根据施工用途可分为喷洒型乳化沥青和拌和型乳化沥青。

2.1.3 乳化沥青的发展历史

乳化沥青的发展始于 20 世纪初，最早被用于喷洒以减少灰尘，20 世纪 20 年代在道路建筑中普遍使用。起初乳化沥青的发展速度相对较慢，受制于可利用的乳化剂和人们对乳化沥青认识的缺乏。通过改进乳化设备和人们的不断实践，乳化沥青的型号和等级不断发展，现在的选择范围已经非常广泛。

商品化的乳化沥青问世已有 70 多年的历史。在其前 40 年的发展过程中，主要发展的是阴离子乳化沥青。这种乳液虽然具有节约能源、使用方便、乳化剂来源广且价格便宜等优点，但与矿料的粘附性不太好，特别是与酸性矿料的粘附性更不好。这是由于其沥青微粒表面带有阴离子电荷，而在水膜的情况下，湿润骨料表面也普遍带有阴离子电荷，同性相斥的原因使得沥青微粒不能尽快地粘附到骨料表面上。若要使沥青微粒裹附到骨料表面，必须等乳液中的水分蒸发掉。

阴离子乳液与骨料的裹附只是单纯的粘附，因此粘结力较低。遇上阴雨或低湿天气，乳液中的水分蒸发缓慢，沥青裹附骨料的时间延长，影响路面的早期成型，延迟开放交通的时间。另外，阴离子乳化剂对石蜡基与混合基较多的沥青难以乳化。因此，阴离子乳化沥青具有难以克服的缺点并逐渐为阳离子乳化沥青所代替。

随着近代界面化学和胶体化学的发展，近 30 年来，阳离子乳化沥青发展很快。阳离子乳化沥青

微粒带有阳离子电荷，与湿润骨料接触时，由于异性相吸的原理，可以很快吸附在矿料的表面，因此即使在阴湿或低温天气（5℃以上），仍可照常施工。由于阳离子乳液可以增强与骨料表面的粘附力，提高路面的早期强度，因而可以尽早通车。大量的实践证明，阳离子乳化沥青既发挥了阴离子乳化沥青的优点，同时又弥补了阴离子乳化沥青的缺点，这就使得乳化沥青的发展进入了一个崭新的阶段。下文中所提到的乳化沥青如不做特别说明均指阳离子乳化沥青。

乳化沥青在我国的发展较晚。新中国建立之前只有个别市政部门使用了少量阴离子乳化沥青，解放后一直没有接触这项技术。自20世纪80年代初起，才对此课题进行立项科研，并于“七五”期间开始推广应用。近年来，乳化沥青的应用范围不断得到开拓发展。

2.1.4 乳化沥青的特点及社会效益

现在乳化沥青筑路技术已被越来越多的施工人员所掌握，乳化沥青的应用量越来越大，应用范围越来越广。实践证明，用乳化沥青筑路有以下特点：

1、提高道路质量

热沥青的可操作温度为130℃~180℃，用作粘层时，由于原路面为常温，热沥青喷洒上去之后会迅速凝固，导致喷洒不均匀。而用作贯入路面时，用热沥青的贯入深度有限，而用乳化沥青则可以贯入到底，并使集料的大部分表面附着沥青，因此路面质量会大大提高。总之，乳化沥青常温下的可流动性、水溶性等将对路面带来质量的提高。

2、扩大沥青使用范围

随着乳化沥青技术的不断发展，已经有许多热沥青不能做到的用乳化沥青却能够实现。如采用雾封层（Fog Seal）可以处理轻微老化龟裂路面，使表面沥青再生，封闭路面雨水，延长路面寿命，又如土壤稳定（Soil Stability），用乳化沥青与土壤拌和均匀，可使土基达到一定的强度要求。而近十年来的稀浆封层技术更是一种经济有效的养护方式。

3、节约能源

采用热沥青修路时一般需要消耗大量能源为沥青材料和矿料加热，且在施工过程中为了保持沥青应有的温度，常常对沥青进行重复加热，既浪费燃料又容易引起沥青的老化。而采用乳化沥青施工时完全采用冷拌作业，只需在沥青乳化时加一次热，且加热温度仅有120℃~140℃，尽管在制备乳化沥青时还需要消耗其它一些能量，但是据统计来看，用乳化沥青筑、养路比用热沥青节约50%以上的热能。

4、节省材料

乳化沥青与矿料表面具有良好的工作度和粘附性，可以在矿料表面形成均匀的沥青膜，容易准确控制沥青用量保证矿料之间有足够的结构沥青，使混合料中的自由沥青降低到适宜的程度，因而提高了路面的稳定性、防水性和耐磨性。据统计，用乳化沥青筑、养路一般可以节省沥青10%~20%，另外，由于阳离子乳化沥青与酸性和碱性石料都有良好的粘附效果，扩大了矿料的来源，便于就地取材，减少材料的运输量，降低工程造价。

5、延长施工季节

阴雨与低温季节是热沥青施工的不利季节，也是沥青路面发生病害较多的季节。特别是在我国多雨的南方，常在阴雨季节沥青路面状况急速下降，出现了病害无法用热沥青及时修补，在行车作用下，更使得病害恶化致使运输效率降低，油耗与轮胎磨损增加，交通事故增多。而采用乳化沥青筑、养路，可以少受阴湿和低温的影响，及时修补路面病害，从而改善路况，提高好路率和运输效率。因此延长施工季节的重要意义在于加速公路建设，及时养护路面，制止病害的加剧与扩大。

6、减少环境污染，改善施工条件

乳化沥青的生产过程都是在密封状态中进行的，沥青的加热温度也较低，因此污染程度也较轻；而乳化沥青在施工时采用冷拌作业，避免了因灼热沥青引起的烧伤、烫伤，也避免了摊铺时沥青蒸汽的熏烤，所以采用乳化沥青施工可以改善不利的施工条件，降低工人的劳动强度。以上特点充分说明，乳化沥青是一种节约、安全、环保、有效且通用的道路材料系统，这一点已经得到了世界各国道路工作者的认可。

2.2 乳化剂

2.2.1 乳化剂的特点

沥青乳化剂分子结构可形象地描绘极性头加非极性尾，即由亲水的极性基和亲油的非极性基所组成，形成一头明显亲水，另一头明显疏水的不对称两亲结构（图 2-1）。沥青乳化剂的非极性基一般是碳氢疏水基团，极性基为离子型或非离子型亲水基团。在油水溶液中加入乳化剂后，乳化剂的两个基团产生定向排列，将油水两个界面连接起来，从而防止它们之间的相互排斥的作用，搅拌分散后，沥青可以以微粒形式稳定地分散于水中（图 2-2）。

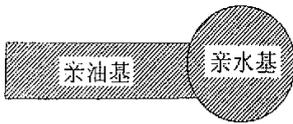


图 2-1 乳化剂分子模型图

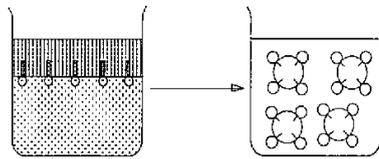


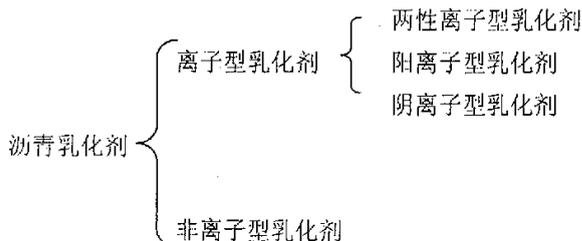
图 2-2 乳化剂乳化作用示意图

2.2.2 乳化剂的分类

亲水亲油沥青乳化剂的分类方法很多，但总体来说亲水基对沥青乳化剂的影响较大，所以按离子的类型和亲水基的种类分类较为常见^[1]。

1、按离子的类型分类

按离子的类型分类是指沥青乳化剂在溶液中能电离生成离子或离子胶束的称为离子型乳化剂，凡不能电离生成离子或离子胶束的称为非离子型乳化剂。可以区分为：



2、按亲水基的种类分类

在离子型分类的基础上再分别按亲水基种类分类。

阴离子型乳化剂可以分为：

- (1) R-COONa 羧酸盐
- (2) ROSO₃Na 硫酸酯盐
- (3) RSO₃Na 磺酸盐

(4) ROPO_3Na 磷酸酯

阳离子型乳化剂可以分为:

(1) $\text{R-NH}_2\text{HCl}$ 伯胺盐



(2) $\text{R-NHCH}_2\text{HCl}$ 仲胺盐



(3) $\text{R-N(CH}_2\text{)HCl}$ 叔胺盐



(4) $[\text{R-N}(\text{CH}_3)_3]^+\text{Cl}^-$



按离子类型分类的优点在于各种类型的乳化剂都随离子的类型不同而具有不同的特点,因而可由类型确定其合适的用途。在目前道路工程的应用中,普遍使用阳离子乳化沥青,因为阳离子沥青的微粒上带有正电荷,与湿润集料表面普遍带有的负电荷异性相吸,使得沥青较快的粘附到集料表面,正因为阳离子乳化沥青筑路具有诸多的路用优点,所以在公路建设和养护中,阳离子乳化沥青使用较为广泛。

2.2.3 亲水亲油平衡值 (HLB 值)

乳化剂分子的结构都含有亲水基团和亲油基团,不同的乳化剂的分子中的亲水基团与亲油基团的数量与强度均不同,各种表面活性剂的亲水亲油性质可以用 HLB (Hydrophile Lyophile Balance) 值^[21]来表示。HLB 值较低时,表示分子的亲油性强,反之,则亲水性强。HLB 值在 1~40 范围内变动,HLB 值小于 10 的乳化剂亲油,大于 10 的则亲水。前者可制成油包水状乳液,后者制备水包油状乳液。

目前关于 HLB 值的计算方法有很多。Davies 于 1957 年提出将 HLB 值作为结构因子的总和处理,即按表面活性剂的基团对 HLB 值的贡献来处理,称之为 HLB 基团数。只要了解分子的化学结构,就可以按以下公式计算出 HLB 值:

$$HLB = 7 + \sum(\text{亲水基团数}) - \sum(\text{亲油基团数})$$

HLB 值的大小与其水溶性有关,其关系见表 2.1:

表 2.1 HLB 值与水溶性关系

HLB 值	表面活性剂的水溶性
1~4	在水中基本不能分散
3~6	在水中分散不完全
6~8	加以搅拌即能分散
8~10	分散液稳定
10~13	具有透明感的分散
>13	透明溶液

根据上述表中表面活性剂的水溶性的情况,反过来定性的推断表面活性剂的 HLB 值。此外,也可根据 HLB 的范围,将表面活性剂按其工作用途大致分为见表 2.2 所示:

表 2.2 表面活性剂的 HLB 值和功用

HLB 值	工业中的用途
3~6	乳化剂 (油包水状)
7~9	湿润剂
8~18	乳化剂 (水包油状)
13~15	洗涤剂
15~18	增溶剂

上表的划分比较粗略,用于沥青乳化的表面活性剂一般叫沥青乳化剂,其 HLB 值在 8~18 之间。HLB 值是选择沥青乳化剂的一个重要参数,但是 HLB 值适合的表面活性剂不一定是最佳的乳化剂,还要考虑乳化力、乳化成本及乳化后乳液的各种性能能否满足要求等。

2.3 乳化沥青形成机理

沥青在水中,经机械作用后可以分散为微粒,静置一会,则与水分层而聚结浮于水面。但是,沥青在有“乳化剂—稳定剂”的水中,经机械作用分散为微粒后,又能形成稳定的分散系——乳化沥青。按对现代乳化沥青形成机理的研究解释如下:

2.3.1 降低表面张力的作用

一般将液体与气体两相界面之间的张力称为表面张力,将液体与液体、液体与固体之间的张力统称为界面张力,表 2.3 列出了几种液体的表面张力。

表 2.3 几种液体的表面张力

编号	液体名称	与液体表面接触的气体	测定的温度(°C)	表面张力(N/m)
1	水银	空气	20	0.475
2	水	空气	20	0.073
3	水	空气	25	0.072
4	乙醇	空气	0	0.024
5	乙醇	空气	20	0.022
6	沥青	空气	>100	0.024
7	苯	空气	20	0.029
8	橄榄油	空气	18	0.033

从上表可以看出,水银的表面张力最大,其次是水的表面张力,苯与沥青(>100°C)等表面张力较小。

根据 Antonoff 提出的规则,表明界面张力与两种单纯液体表面张力的关系如下:

$$\gamma_i = \gamma_1 - \gamma_2$$

式中: γ_i ——两界面张力;

γ_1 ——甲种纯液体的表面张力;

γ_2 ——乙种纯液体的表面张力。

对于乳化沥青来说,如不采取其他措施而直接将沥青分散到水中则要克服巨大的界面张力,即要施加很大的能量,且沥青分散成很小的颗粒时,其比表面积增加很大,这样就使得产生的乳化沥青体系具有很高的能量状态,所产生的乳液也不会稳定,因此在生产乳化沥青时降低水的表面张力

是必需的^[3]。乳化剂就具有这个功能。增加乳化剂可以极大地降低水与沥青的界面张力，可以降低乳液的能量状态，增加乳液的稳定性。

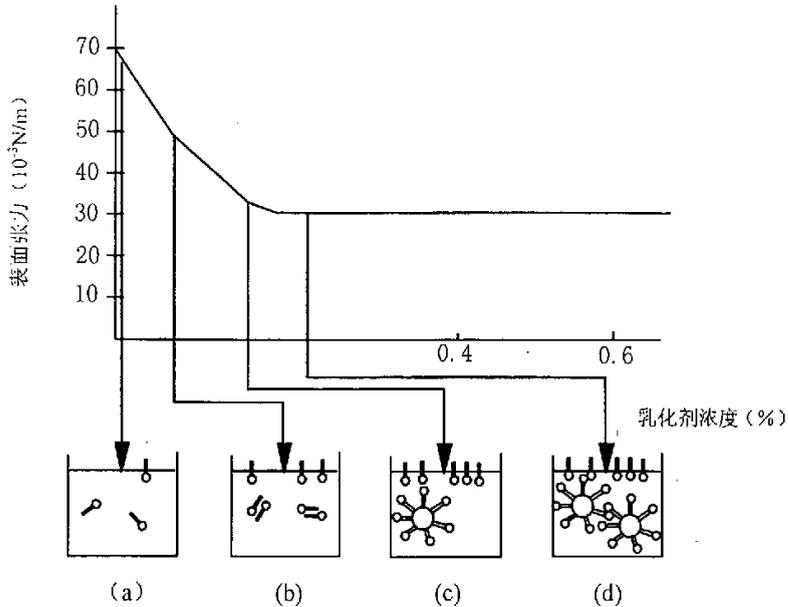


图 2-3 (a) 乳化剂用量很低；(b) 乳化剂用量低；
(c) CMC 临界胶束离子状态；(d) 比 CMC 浓度大

为了了解乳化剂的作用，可在水溶液中不断增加乳化剂的同时，测定水溶液的表面张力，从图 2-3 的上部曲线看出，随着乳化剂浓度的增加，其表面张力急剧下降，而后即保持不变。(a) 是水溶液中乳化剂用量很少的情况下，其表面张力接近于纯水的表面张力 (0.072N/m)。这是由于乳化剂用量少，空气与水的界面上还没有聚集很多乳化剂，空气与水几乎是直接接触，水的表面张力就没有明显下降；(b) 增加乳化剂用量时，水溶液的表面张力急剧下降，这是因为乳化剂会很快聚集到水面上，使空气和水的接触面减少，从而使水溶液的表面张力按比例急剧下降，与此同时，水中的乳化剂分子也聚集在一起，将亲油基靠在一起，开始形成胶束；(c) 表示乳化剂用量再增加，水溶液表面聚集足够的乳化剂，并密集地分散在液面上，形成单分子膜，使空气与水溶液完全处于隔绝状态。如再增加乳化剂，则水溶液中的乳化剂分子就各自以几十、几百的聚集在一起，排列成为亲油基向里、亲水基向外的胶束，形成胶束的临界浓度 (CMC)；(d) 表示水溶液中乳化剂含量大于临界胶束浓度，此时，再增加乳化剂用量，胶束也会随之增加，但水溶液表面已形成单分子膜，乳化剂的分子定向排列于空气与水溶液之间，不可能再降低表面张力。

对于乳化剂的用量来说，CMC 不是应用乳化剂的最佳值，而只能做一个参考，实际用量一般要远远大于 CMC 值。

2.3.2 界面膜的稳定作用

在沥青—水的分散体系中，乳化剂吸附在沥青微滴的表面，定向排列而形成界面膜（如图 2-4）。此界面膜不仅可降低沥青与水的界面张力，而且对沥青微滴起着机械的保护作用，使沥青微滴在互相碰撞时不致产生聚结。

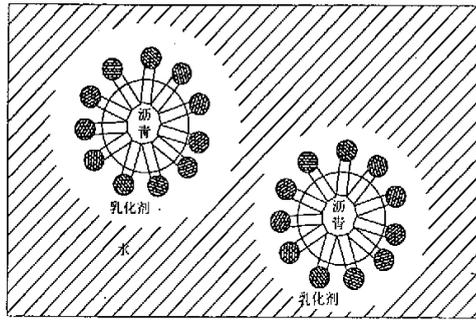


图 2-4 乳化剂在沥青微滴表面形成的界面膜

界面膜的强度和紧密度，取决于乳化剂的性能和用量。乳化剂用量适宜时，界面膜即由密排的定向分子所组成。膜的强度较大，沥青微滴聚结需要克服较大的阻力，故能形成稳定的沥青乳液。最佳乳化效果的乳化剂用量，与乳化剂对沥青的吸附作用有关。

2.3.3 界面电荷的稳定作用

通常稳定的沥青乳液中沥青微滴都带有电荷，这电荷主要来源于电离、吸附和沥青微滴与水之间的摩擦。电离与吸附带电是同时发生的，例如阳离子乳化剂吸附于沥青微滴表面时，伸入水中的极性基团电离而使沥青微滴带正电荷。

沥青-水界面上电荷层结构，一般是扩散双电层分布（如图 2-5 所示）。双电层由两部分组成，第一部分为单分子层，基本固定在界面上，这层电荷与沥青微滴的电荷相反，这一层称为吸附层；第二部分由吸附层向外，电荷向水介质中扩散，此层称为扩散层。由于每一沥青微滴界面都带相同电荷，并有扩散双电层的作用，故水-沥青体系成为稳定体系。

综上所述，沥青乳液之所以能形成高稳定的分散体系，主要是由于乳化剂降低了体系的界面能、界面膜的形成和界面电荷的作用。

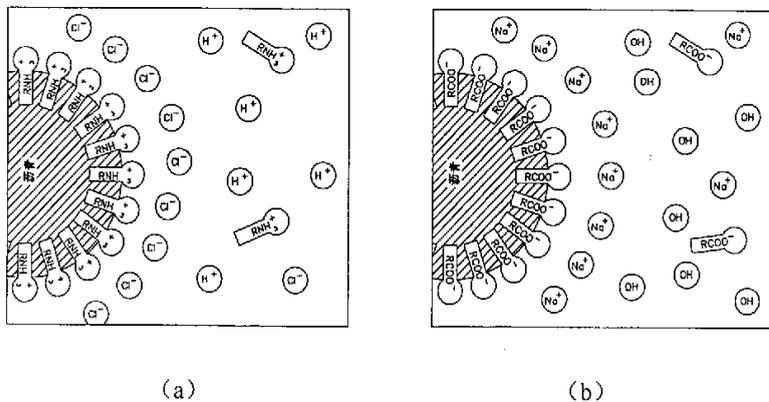


图 2-5 沥青乳液中沥青-水界面上电荷层

(a) 阳离子沥青乳液；(b) 阴离子沥青乳液

2.4 乳化沥青的组成和制备

2.4.1 乳化沥青的配合组成

乳化沥青由以下三种主要物质组成：沥青、水和乳化剂。

1、组成材料选择

(1) 沥青

沥青是乳化沥青的主要原料，也是用于筑路的最终粘结料。生产乳化沥青所用的沥青除了满足最终应用的要求外，还必须满足乳化要求。石油沥青是大分子的饱和烃、芳香烃、胶质、沥青质等组成的复杂混合物，其化学组成、沥青的胶体结构类型随原油和加工工艺的不同而有很大差别，因此乳化的难易程度也不同。所以对于沥青进行必要的选择是制备乳化沥青的前提。

随着交通量的不断增长，改性沥青用于乳化的需求也随之出现。由于改性沥青的粘度大幅度增大，且改性剂大部分是高分子聚合物，其可乳化性非常局限，因此在选择改性沥青和改性剂时应当充分试验。

(2) 水

水只是沥青分散的介质，并不是沥青乳液的重要成分。但是水的硬度及离子特性对乳化沥青生产有较大的影响，有有利的一面，也有不利的一面。镁离子和钙离子的存在对生产阳离子乳化沥青来说是有利的。因此有时为制备稳定的乳液会加入 CaCl_2 作为稳定剂。生产阴离子乳液时，镁、钙离子的存在又成为不利的因素。这是因为阴离子乳化剂大都是以可溶性的钠或钾盐的形式存在，当有大量的镁和钙离子存在时会形成不溶于水的物质从而影响乳化效力，甚至导致乳化失败。碳酸离子、碳酸氢离子的存在对于形成稳定的阳离子乳液是不利的，因为它们常与乳化剂中的水溶性胺基酸盐进行反应，生成不溶性盐。但对于阴离子乳液，碳酸离子和碳酸氢离子具有缓冲作用，是有利的。此外，水中存在粒状物质时，一般带负电物质居多，由于对阳离子乳化剂的吸附，所以对阳离子乳液的生产是不利的。因此根据乳化沥青的离子类型，选择符合水质要求的水源会对沥青的乳化起到很好的作用。

(3) 乳化剂

乳化剂在乳化沥青中所占比例较小，但其对乳化沥青的生产、贮存及施工均有较大的影响，所以根据生产乳液的用途、乳化效果来精心挑选乳化剂是非常重要的。

(4) 添加剂

使用添加剂是调制稳定乳化沥青的一种常用方法。有时添加剂的存在是必不可少的，添加剂的加入也是降低乳化沥青成本的好方法。对于胺型阳离子乳化剂，由于不能直接溶解于水，需要用盐酸调到 $\text{pH} \leq 2$ 或用醋酸调节到 $\text{pH} \leq 4$ 方能使用。如果用酸过量，则乳化性或贮存稳定性不好，必须注意。对于季铵盐阳离子乳化剂，添加 CaCl_2 则可以降低乳化剂的用量。另外高分子聚乙烯醇、甲基纤维素等物质可以增加水的粘度，从而有利于沥青乳液的稳定，也是常用的添加剂。

2、配合组成确定

在设计配合组成之前，需知道乳化沥青各个组分的用量范围，其用量范围应根据对乳化沥青的性能要求通过试验来确定，不同的原材料其用量也不相同。沥青的用量范围一般在 30%~70% 之间；乳化剂的用量取决于临界胶束浓度，通常在 0.3%~5% 之间；水的用量在 30%~70% 之间；对于辅助材料来讲，不同品种的乳化剂，其用量和选择各不相同。例如，阴离子乳化沥青选择碱性调节剂，阳离子乳化沥青需酸性调节剂。

2.4.2 乳化沥青的制备

(1) 乳化温度的确定

生产乳化沥青要求将沥青加热到流动性很好的状态，温度一般在 $110^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ 之间，沥青标号高时温度较低，标号低时温度较高。由于乳化混合时沥青放热，使乳化剂水溶液沸腾发泡，造成乳化不良。为防止这种现象的发生，沥青和水溶液的温度应当严格控制。对于低标号的沥青，由于加热到流动状态的所需的温度较高，所以乳化时水的温度可以适当放低，以保证不发生沸腾现象。

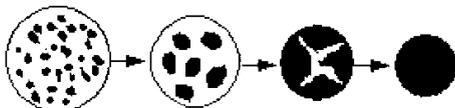
(2) 制造乳化沥青的设备

目前使用机械分散法制造乳化沥青的设备类型很多，归纳起来主要有下列三大类：即胶体磨、高速搅拌机和齿轮泵型乳化机。这三种乳化机所制得的乳液比较起来，用胶体磨所得乳液质量较高，而高速搅拌机仅能得到分散性不太高的乳液，齿轮泵型乳化机如经改进亦能得到符合要求的沥青乳液。

2.5 乳化沥青的破乳

在路面施工时，乳化沥青与集料接触后，乳化沥青为发挥其粘结的功能，沥青微滴从水相中分离出来，乳液中分散的沥青微粒相聚结，在骨料或路面上形成连续的结合料的覆盖膜。根据路面结构及施工方式的不同，一般在层铺贯入式路面中，需要喷洒后的乳液尽快分解破乳，即为快裂型沥青乳液；在拌和级配混合料的拌和式路面时，为便于乳液的拌和与摊铺，需要乳液有慢速的分解破乳，即为慢裂型沥青乳液。

沥青乳液的分解与破乳是指沥青乳液的性质发生变化，沥青从乳液中的水相分离，将许多微小沥青颗粒相互聚结，成为连续整体薄膜。这种分解破乳主要是乳液与其材料接触后，由于离子电荷的吸附和水分的蒸发产生分解破乳，其发展过程一般如图 2-6。



乳液类型	水包油型→浓缩→水分蒸发→分解完了
颜色	褐色→逐渐呈黑褐色→无光泽黑褐色变黑色→黑色
粘附性	无→无→稍有粘性→有充分粘接力
破乳所需时间	较短时间内产生薄膜→需要较长时间

图 2-6 沥青乳液的分解破乳过程

首先从沥青乳液的颜色、粘附性及稠度等方面发生变化，按这几点的变化进行鉴别，待乳液分解破乳完成后，乳液中的沥青又恢复到乳化前的性能。这种乳液的分解破乳所需要的时间，即为沥青乳液的分解破乳速度。影响乳液破乳速度的因素主要有：

1、阳离子沥青乳液的分解破乳，主要靠乳液中沥青微粒所带电荷与骨料表面所带电荷，即离子电荷吸附作用。目前我国筑路所用骨料多为碳酸盐或硅酸盐，在潮湿状态下，骨料表面多带有负电荷，所以阳离子沥青乳液很快与骨料表面相结合。还由于阳离子沥青乳化剂具有高振动性能，与骨料表面有自然的吸引力，它可以穿过骨料表面的水膜，与骨料紧密结合。根据范德华吸引力，沥青与集料之间有较强的结合力，即使是沥青与骨料表面电荷都是正电荷，两者之间仍有吸引力。

阳离子乳化沥青与碱性集料能牢固的结合，其原因为阳离子乳液有一定的游离酸，PH 值小，游离酸与碱性集料起作用，生成氯化钙和带负电荷的碳酸离子，恰好它与裹在沥青外围的阳离子中和，所以沥青微粒能与骨料表面紧密相连，形成牢固的沥青膜，同时将乳液中的水分很快的分离出来。

2、骨料的孔隙度、粗糙度与干湿度等因素直接影响吸收乳液中的水分，因而影响乳液的破乳速度。例如施工中所用的骨料多为孔质表面粗糙或疏松的骨料时，乳液中的水分很快就被这种骨料所吸收，破坏乳液的平衡，加快乳液的破乳速度。如果所用骨料表面致密光滑，吸水性很小时，即将减缓乳液的破乳速度。还有，骨料本身的含水量，也影响乳液的破乳速度。如果骨料与乳液接触前为干燥、湿润和饱和的不同状态时，则与乳液接触后，将根据含水量的不同而产生不同的分解破乳速度，干燥的骨料将加快破乳速度，湿润与饱和的骨料将减缓其分解破乳速度。

3、施工时的气候条件是影响破乳速度的重要因素，如气温、湿度、风速等因素都将影响乳液的破乳速度。气温高、湿度小、风速大将加速破乳，反之则减缓破乳速度。

4、机械的冲击及压力作用（比如压路机和行车的作用）也会加快乳液的破乳速度。

5、骨料颗粒级配与矿物成分的不同，也将影响破乳速度。骨料颗粒越细其比表面积越大，乳液的破乳速度加快，与此相反，则减缓破乳速度。矿物成分不同，也影响着乳液的破乳速度，所选用的骨料容易与阳离子乳液起化学反应，就加速了破乳。

6、乳化剂的化学结构对破乳速度的影响。乳化剂本身可分为快、中、慢裂型。快裂乳化剂一般都是单头的，而慢裂、慢裂快凝型乳化剂一般都是多头的。从下图可以看出，单头乳化剂在沥青微粒表面排列紧密，使得微粒带有很强的正电荷，同时由于该类乳化剂在水中的溶解度很小，使得水相中游离的乳化剂分子很少，因此当与石料接触时，会迅速与石料结合。而多头乳化剂分子在油水界面吸附不是十分紧密，使得沥青微粒的表面电荷不是太强，再加上这类乳化剂一般在水中都有很好的溶剂性，使得水相中游离的乳化剂分子较多，当与石料接触时，游离的乳化剂分子首先吸附到石料表面，降低了石料的负电荷强度，从而延缓了乳化沥青的破乳速度。此外，同种乳化剂用量不同也影响破乳速度。乳化剂用量大，减缓破乳速度，乳化剂用量少则加快破乳。

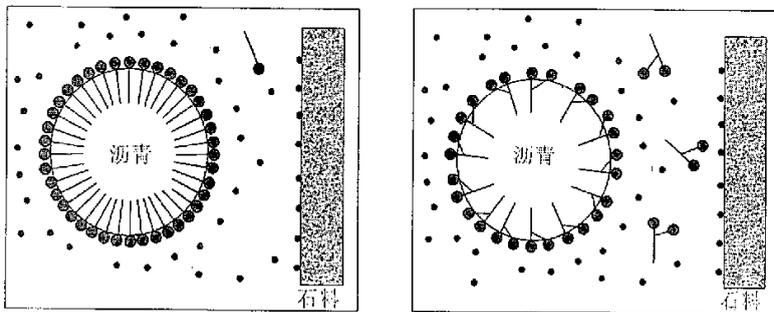


图 2-7 单头与多头乳化剂结构和石料作用示意图

2.6 乳化沥青技术指标及要求

目前各国乳化沥青检验标准与分类方法是不同的，但检验的内容与实质是非常相似的。我国经过“六五”及“七五”期间的研究和推广应用，乳化沥青的应用已相当普及，为此有关部门制订了乳化沥青的技术要求和相应的试验方法。这些试验方法都是根据多年来乳化沥青课题研究的成果，参照国外的标准试验方法，主要是美国试验和材料协会 ASTM D244 标准及日本乳化沥青协会、日本道路协会的试验方法，并结合我国这几年的使用实践而制订的。乳化沥青根据不同的用途有不同

的技术要求, 表 2.4 为有关部门制订的乳化沥青技术要求^[4]。

表 2.4 道路用乳化沥青技术要求

项 目 \ 种 类		PC-1	PC-2	PC-3	BC-1	BC-2	BC-3
		PA-1	PA-2	PA-3	BA-1	BA-2	BA-3
筛上剩余量 不大于 (%)		0.3					
电 荷		阳离子带正电 (+)、阴离子带负电 (-)					
破乳速度试验		快裂	慢裂	快裂	中或慢裂		慢裂
粘度	沥青标准粘度计 C _{25,3} (S)	12~45	8~20		12~100		40~100
	恩格拉度 E ₂₅	3~15	1~6		3~40		15~40
蒸发残留物含量 不小于 (%)		60	50		55		60
蒸 发 残 留 物 性 质	针入度 (100g, 25°C, 5S) (0.1 mm)	80~200	80~300	60~160	60~200	60~300	80~200
	残留延度比 (25°C) 不小于 (%)	80					
	溶解度 (三氯乙烯) 不小于 (%)	97.5					
贮存稳 定性	5d 不大于 (%)	5					
	1d 不大于 (%)	1					
与矿料的粘附性, 裹覆面积不小于		2/3					
粗粒式集料拌和试验		—			均匀	—	
细粒式集料拌和试验		—				均匀	
水泥拌和试验, 1.18 mm 筛上剩余量 不大于 (%)		—				5	
低温贮存稳定度 (-5°C)		无粗颗粒或结块					
用 途		表面处 治及贯 入式洒 布用	透层油 用	粘层油 用	拌制粗 粒式沥 青混合 料	拌制中 粒式及 细粒式 沥青混 合料	拌制砂 粒式沥 青混合 料及稀 浆封层

随着我国乳化沥青技术的发展, 2003 年交通部《道路用乳化石油沥青技术要求修订》项目对乳化沥青技术要求进行了研究, 并提出了修订建议。其中对技术指标与要求值做了如下一些修改^[5]:

1、粘度指标与要求值

我国的乳化沥青技术要求并列使用了标准粘度 C_{25,3} 和恩格拉粘度 E₂₅。据有关人员试验验证了恩格拉粘度和标准粘度之间存在着固定的换算关系。因此, 单纯从技术角度看, 采用哪一种粘度并没有本质上的不同。在我国沥青标准粘度计已经得到普遍采用, 同时考虑与国际标准的接轨, 将标准粘度和恩格拉粘度并列使用是科学的。

对于粘度指标的要求值, 由乳状液的组成可知, 外相粘度对乳状液的粘度起主导作用, 对于乳化沥青, 外相粘度相差不大, 蒸发残留物含量便成为影响乳化沥青粘度的主要因素, 蒸发残留物越

高, 乳化沥青的粘度就越高。

在美、法等国家, 成品乳化沥青的蒸发残留物含量都很高(一般在 60%以上), 高固含量的乳化沥青运至现场可根据需要掺水使用。这样既节省运输成本, 又可以保证有较好的储存稳定性。因此美、法等国乳化沥青的粘度要求值相对比较高。

我国生产使用的乳化沥青, 蒸发残留物含量一般都较低, 用于透层油、粘层油的乳化沥青的蒸发残留物含量可低至 30%, 用于稀浆封层的乳化沥青的蒸发残留物含量一般在 55%左右, 明显低于美、法等国, 再加上我国乳化沥青生产设备相对落后, 乳化沥青颗粒粒径粗而不均匀, 粘度一般较低。我国现行的乳化沥青技术要求中的粘度指标的要求值有些偏高, 2003 年交通部《道路用乳化石油沥青技术要求修订》项目已经建议对此指标进行调整。

2、蒸发残留物性质指标与要求

乳化沥青使用到路面上, 最终留在路面上的还是沥青。因此各国的乳化沥青技术要求中一般都有蒸发残留物性质的要求, 但蒸发残留物的获取方法和指标各不相同。

美国的 ASTM 标准中要求采用蒸馏法, 并对蒸馏法获取的残留物提出了针入度、25℃延度和溶解度的要求; 法国标准中没有蒸发残留物性质的要求; 日本的 JIS 和 JEAAS 标准采用电炉加热蒸发的方法, 并对蒸发残留物提出了针入度, 25℃残留延度比和溶解度的要求。

由于乳化沥青是常温条件下施工的, 无论采用何种方法获取残留物, 都难以真正模拟乳化沥青的实际成型过程。而电炉加热法操作比较简单, 但试验结果受主观性影响较大, 重现性较差, 但仍然不失为一种适合我国国情的办法。

对于乳化沥青蒸发残留物的性质指标, 我国提出了针入度、溶解度、及残留物与基质沥青 25℃延度的比值。随着乳化沥青原材料质量的提高, 特别是成品乳化沥青的不断增加, 测定基质沥青延度变得既没有可能也没有必要了。2003 年交通部《道路用乳化石油沥青技术要求修订》项目已经建议对此指标进行调整。此外, 在建议稿中适当提高了喷洒用乳化沥青针入度的上限, 即引导使用高标号沥青进行乳化, 以提高透层油、粘层油的使用性能, 而对于拌和用的乳化沥青, 适当降低针入度指标上限, 以适应重载、大交通量的需要。

3、筛上剩余量指标与要求值

乳化沥青筛上剩余量指标反映的是沥青乳化质量的好坏。但是值得注意的是筛上剩余量只是反映乳化沥青乳化完全, 而不是反映乳化沥青的细度。

我国的乳化沥青筛上剩余量指标标准是借鉴日本标准采用 1.18mm 筛孔, 要求小于 0.3%, 比美国标准低。目前, 对于国内的乳化沥青成品来说, 基本上都能满足这个指标。所以, 有关科研人员已提出适当提高此指标要求。

4、储存稳定性指标

储存稳定性指标反映的是乳化沥青在静置情况下的沉降情况。美国 ASTM 标准, 日本的 JIS 以及 JEAAS 标准都是采用稳定管试验, 要求各型号的阳离子乳化沥青的 24h 储存稳定性不大于 1%, 美国 ASTM 标准在注中还说明如果乳化沥青得到了成功的应用, 24h 的稳定性可不作要求; 法国标准采用一种通直流电的金属烧杯进行储存稳定性检测, 要求 24h 的稳定性不大于 5%。我国的技术要求采用稳定管试验, 要求 24h 储存稳定性不超过 1%, 要求 5d 储存稳定性不超过 5%。

5、矿料粘附性指标

从国外的技术要求来看, 粘附性指标只是针对快裂、中裂或者喷洒用的乳化沥青, 而对于慢裂或拌和用的乳化沥青, 并没有粘附性指标要求。实际上, 粘附性反映的是乳化沥青与粗骨料的裹附能力。对于拌和用乳化沥青, 其与集料裹附的好坏关键取决于细集料、矿粉、外加剂以及混合料系统的相容性。因此没有必要对拌和用的乳化沥青提出粘附性要求。

第三章 冷拌沥青混合料的乳化沥青及改性乳化沥青的研究开发

3.1 普通乳化沥青的研究开发

3.1.1 阳离子乳化剂的选择

乳化剂在乳化沥青中所占的比例很小，一般在 0.3%~5% 之间，但乳化剂对乳化沥青的生产、储存以及对混合料的施工性能都有很大的影响，此外，乳化剂的加入在一定程度上改变沥青性质。所以必须根据乳化沥青的用途精心挑选乳化剂。例如用于表处乳化沥青的乳化剂，要求破乳快，强度形成早；而用于透层乳化沥青的乳化剂则要求破乳慢，具有一定的渗透能力；用于冷拌沥青混合料乳化沥青的乳化剂要求破乳可调性强，与石料的裹覆能力强。除了考虑用途之外，乳化剂的选择还应考虑如下几点：

- 1、沥青的类型、型号及产地；
- 2、冷拌沥青混合料的施工机械型号、施工气温的变化、可能出现的不利因素；
- 3、骨料类型及级配的变化；
- 4、外地使用成功的乳化剂，不可以照搬套用，一定要结合当地的实际情况（沥青品种、骨料级配、气候变化等因素）进行室内试验、取得理想结果方可进行现场试铺；
- 5、掌握乳化剂的有效物含量与实物价格。有的乳化剂价格高、含量高、但用量少，计算乳化剂费用不高，而有的乳化剂价格低，但含量低、用量大，计算乳化剂成本反而高，选择乳化剂要注意这些因素；
- 6、对于改性乳化沥青来说，改性剂的品种直接影响乳化剂品种的选择。

总而言之，在进行乳化剂选择时，首先要明确生产乳化沥青的用途，再综合考虑上述几种因素，选择合适的乳化剂进行乳化沥青试生产。

目前，国内乳化剂的生产现状是中裂乳化剂品种和数量较多，慢裂、快裂乳化剂及慢裂快凝型乳化剂的生产和应用较少。相比较而言，在国外，由于乳化沥青用量很大，应用面很广，因此其乳化剂的品种也多种多样。如 MeadWestvaco 公司、Akzo Nobel 公司等都有适用于各种用途的乳化剂供用户挑选。但是总的来说，适用于冷拌沥青混合料可用的乳化剂品种较少。本课题选择了 3 种进口的慢裂阳离子乳化剂进行试验，以下简称 1#、2#、3# 乳化剂，其物理性质见下表：

表 3.1 乳化剂的物理特性

乳化剂编号	1#	2#	3#
乳化沥青类型	慢凝	慢裂	慢凝
物理形态	黑色液体	棕色液体	棕色液体
比重, 25℃	1.09	1.085	1.09
粘度, cps, 25℃	-	1000	800
固含量, %	-	60	40
pH, 15%(w/v) 溶液, 25℃	-	10.5	11.9

3.1.1.1 乳化剂对蒸发残留物性质的影响

乳化沥青只是使用过程中的一种暂存形式，其最终表现的性能还是沥青的基本性能。由于在乳

化沥青的生产过程中添加的乳化剂仍存留在沥青材料中，所以应该考虑乳化剂对基质沥青性质的影响为工程所接受。

国外有人从沥青材料延度和乳化沥青蒸发残留物试验结果对比分析入手，研究了乳化剂对沥青材料性能的影响，表 3.2 就是某文献^[1]提供的不同乳化剂对乳化沥青蒸发残留物延度的影响。

表 3.2 不同乳化剂对蒸发残留物延度的影响

乳化剂编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
基质沥青延度 (cm)	92	60	80	>100	>100	>100	>100	>100	98
蒸发残留物延度 (cm)	30	25	38	51	55	69	96	>100	>100
延度降低率 (%)	67.4	58.3	52.5	>49	>45	>31	>4	0	< -2

由上表可以看出，不同的乳化剂品种对沥青材料的性能影响不同，乳化剂对沥青材料性能的可以起到改善作用，可能起到降低作用，也可能基本不产生影响。

笔者采用上述 3 种乳化剂（分别用 1#、2#、3# 表示）用完全相同的乳化工艺乳化 AH-70 沥青，得到的乳化沥青蒸发残留物性质的指标如下表所示：

表 3.3 不同乳化剂对蒸发残留物性质的影响

编 号	基质沥青	1#	2#	3#
软化点 (°C)	48.9	50.4	48.9	49.1
针入度(0.1mm)	61	63	65	66
延度(15°C), cm	>150	>150	>150	>150

从上表可以看出，尽管基质沥青相同，但蒸发残留物性质不同，软化点从低到高的顺序为：2# < 3# < 1#，即相同的沥青用不同的乳化剂进行乳化，1# 乳化剂使得沥青变得最硬，3# 次之，2# 再次之，针入度从高到低排序为 3# > 2# > 1#，但这种变化均为工程所接受，三种乳化剂都可以选用。

3.1.1.2 乳化剂用量对乳化沥青性能的影响

1、对乳化沥青胶粒表面吸附量的影响

乳化剂在沥青表面吸附时，如果乳化剂的浓度较低，由于分子间电荷排斥作用，使形成的吸附层比较疏松，当乳化剂浓度增大时，一方面由于疏水基的疏水效应，使乳化剂分子趋于聚集；另一方面由于离子间的特性吸附，使没有形成乳化剂胶团或者形成胶团又分解的乳化剂分子吸附于沥青表面，使沥青表面的阳离子乳化剂吸附量增加，从而使所带的电荷量增加。

2、对乳化沥青稳定性的影响

本试验以 1#、2#、3# 乳化剂为例制备不同乳化剂用量的乳化沥青。

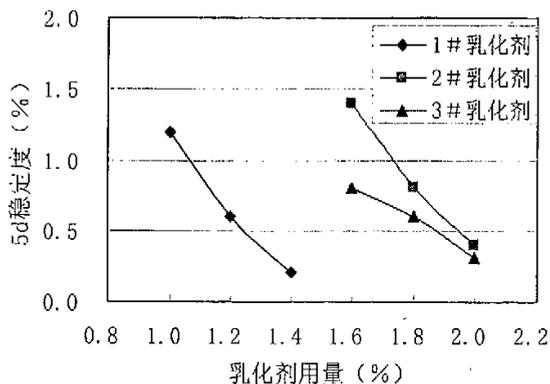


图 3-1 乳化剂用量对稳定性的影响

由上图可知,随着乳化剂用量的增加稳定度值逐渐减小,这是因为当乳化剂用量增加时,沥青微粒表面的乳化剂吸附量也会随之增加,使得界面张力降低、乳化沥青胶粒表面电荷增加,使得稳定度值减小,稳定性增加。

3、对破乳速度的影响

影响乳化沥青与石料接触的破乳速度的因素有很多:①乳化剂的用量;②稳定剂的加入;③施工时集料的级配;④用水量的大小;⑤环境的温度和湿度。笔者用3种乳化剂分别制备不同乳化剂用量的乳化沥青研究其对破乳速度的影响。试验温度为25℃,相对湿度为26%,试验采用同一级配的骨料,混合料的配合比均相同,试验结果如表3.4所示:

表 3.4 不同乳化剂用量的乳化沥青混合料的破乳时间

乳化剂用量 (%)		可拌和时间 (min)	初凝时间 (min)
1# 乳化剂	1.0	15	120
	1.2	16	180
	1.4	20	210
2# 乳化剂	1.6	12	105
	1.8	13	135
	2.0	16	180
3# 乳化剂	1.6	16	135
	1.8	18	180
	2.0	21	240

由上表可知,当乳化剂用量增加时,可拌和时间延长。由于所用乳化剂类型为慢裂慢凝型,一般可拌和时间较长,但是过多的拌和容易造成本来裹覆的沥青在机械力的作用下脱落,所以一般认为机械拌和在30秒左右、手工拌和在1分钟左右为宜。笔者查阅了大量冷拌沥青混合料的资料,发现可拌和时间试验对于冷拌沥青混合料来说意义不大,但对于初凝时间来说,当乳化剂用量增加时,由于乳化沥青胶粒表面电荷的增加,破乳速度减慢,混合料的初凝时间延长。

根据上述各项试验结果初步确定1#乳化剂用量为1.2%、2#乳化剂用量为2.0%、3#乳化剂用量为1.8%。

3.1.2 pH 值的选择

乳化剂水溶液的 pH 值一般要用 HCL 或 NaOH 溶液来调节,使其处于合理的数值范围内。阳离子乳化剂水溶液大多数用 HCL 调节 pH 值至 2~7。

3.1.2.1 pH 值对冷拌沥青混合料可拌和时间的的影响

图 3-2 为 3 种乳化剂以初步确定的用量配制成乳化剂水溶液用 HCL 调节不同 pH 值后制备的乳化沥青与一定级配的矿料配合成冷拌沥青混合料的可拌和时间的变化情况。从图中可以看出随着 pH 值的减小,混合料的可拌和 time 也在缩短,破乳速度加快。这主要是因为随着 pH 值的降低,乳化沥青胶粒表面电荷增加,从而使拌和时的电荷吸附作用增强。

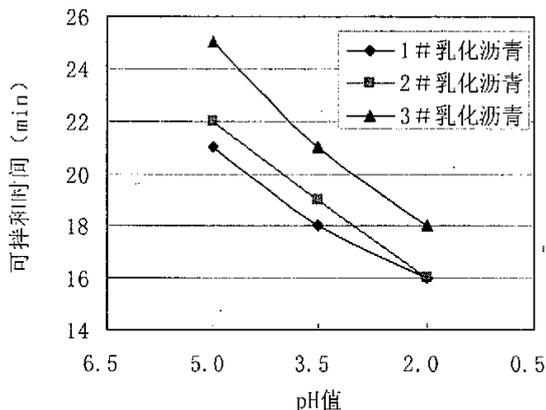


图 3-2 pH 值不同对冷拌沥青混合料可拌和时间的的影响

3.1.2.2 pH 值对乳化沥青的粘度影响

图 3-3 是不同的 pH 值所对应的乳化沥青的标准粘度,可以看出,随着 pH 值的减小,乳化沥青的标准粘度降低。

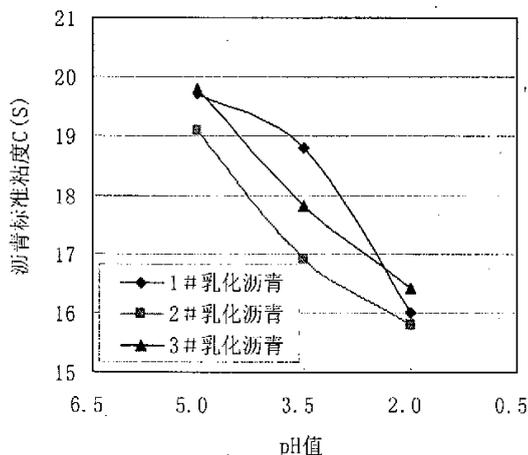


图 3-3 乳化剂水溶液 pH 值对沥青标准粘度的影响

3.1.2.3 pH 值对乳化效果的影响

试验发现乳化剂水溶液 pH 值对乳化效果影响较大,当 pH 值不合适时,无论乳化剂用量及乳化

温度如何调整, 乳化剂都不能将沥青很好地分散。笔者以 1# 乳化剂为例, 乳化剂用量相同均为 1.2%, 油水比 60:40, pH 值分别调节为 2.0、3.5、5.0。AH-70 沥青加热至 130℃, 乳化剂水溶液温度为 53℃, 不同的 pH 值得到不同的乳化效果, 见表 3.5:

表 3.5 不同 pH 值对乳化效果的影响

pH 值	乳化效果
2.0	乳化呈褐色、乳化完全
3.5	乳化呈褐色、乳化完全、泡沫较多
5.0	乳化呈黑褐色, 泡沫多, 乳化不完全

3.1.2.4 pH 值的确定

通过上述试验可以得出阳离子乳化剂制备乳化沥青时的 pH 值应该有个合理的范围, 在本次试验研究中最终确定 1# 乳化剂水溶液的 pH 值为 2.5、2# 乳化剂水溶液的 pH 值为 2.0、3# 乳化剂水溶液的 pH 值为 2.0。

3.1.3 乳化温度的确定

生产乳化沥青要求将沥青加热到流动性很好的状态, 温度一般在 110℃~150℃之间, 沥青标号高时温度较低, 标号低时温度较高。由于乳化混合时沥青放热, 使乳化剂水溶液沸腾发泡, 造成乳化不良。为防止这种现象的发生, 沥青和水溶液的温度应当严格控制。对于 AH-70 号沥青, 普遍认为沥青加热到 130℃~140℃、胶体磨流出的乳液温度在 85℃左右可以获得较好的效果, 相对应的乳化剂水溶液温度通过下式确定:

$$T_w = T_c + (T_c - T_a) \times \frac{C_a \times A}{C_w \times W}$$

式中: A——沥青用量, %;

W——乳化剂水溶液的用量, %;

C_a ——沥青的比热;

C_w ——水的比热;

T_c ——乳液温度, 一般取 85℃;

T_a ——沥青的温度;

T_w ——乳化剂水溶液温度。

所以

$$T_w = 85 + (85 - 130) \times \frac{1.98 \times 60\%}{4.18 \times 40\%} = 53 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

通过乳化试验可知, 当乳化剂水溶液加热到 53℃, AH-70 沥青加热到 130℃左右时, 可以获得质量良好的乳液。

3.1.4 乳化沥青配方确定

通过上述一系列试验, 确定如下三种配方的乳化沥青, 具体见表 3.6。

表 3.6 乳化沥青配方组成表

乳化沥青种类	配 方 组 成		备注：沥青温度加热至 130℃，乳化剂水溶液加热至 53℃。
1# 乳化沥青	AH-70 号沥青	60%	
	1# 乳化剂	1.2%	
	可饮用淡水	38.8%	
	乳化剂水溶 pH 值	2.5	
2# 乳化沥青	AH-70 号沥青	60%	
	2# 乳化剂	2.0%	
	可饮用淡水	38.0%	
	乳化剂水溶 pH 值	2.0	
3# 乳化沥青	AH-70 号沥青	60%	
	3# 乳化剂	1.8%	
	可饮用淡水	38.2%	
	乳化剂水溶 pH 值	2.0	

3.1.5 沥青乳化试验

沥青乳化试验采用进口的胶体磨（如图 3-4）。它的工作原理是通过定子、转子之间由于高速运转所产生的剪切力而起到研磨、分散沥青的作用。在制备乳化沥青时先将乳化剂水溶液加热到 53℃ 左右，沥青加热到 130℃，乳化剂水溶液配制两份，一份用于预热胶体磨，在胶体磨中循环 30 秒后即可放出用烧杯接住留待洗胶体磨用。然后将计算好的乳化剂溶液加入胶体磨，在胶体磨高速运转的过程中均匀地加入沥青，沥青在 30 秒内加完，然后再循环 30 秒后，在胶体磨运转的情况下在下口放出沥青接入广口瓶中，快要放完时关闭胶体磨。在制备乳液过程中，应注意上循环管流出的乳液是否顺畅，如发现流出不顺畅，则应减缓加入沥青速度，并用玻璃棒搅拌加入漏斗中的沥青。如果不能流出，说明乳化失败，应停止加入沥青，及时清洗胶体磨。

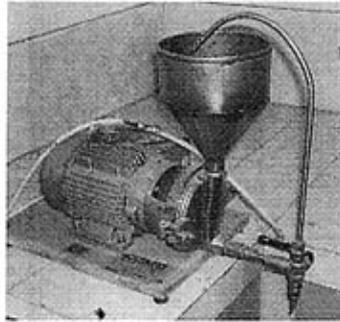


图 3-4 试验室制备乳化沥青用小胶体磨

3.1.6 乳化沥青的质量检测

所研究开发的乳化沥青必须经过质量检测满足相应的检验标准后方可投入生产使用。用作面层冷拌沥青混合料（细粒式型）的乳化沥青，应符合 BC-2 型规定的拌和用类型乳液技术指标。对所研

究开发的乳化沥青进行质量检验, 1#、2#、3#乳化沥青的技术指标分别见表 3.7~表 3.9:

表 3.7 1#乳化沥青主要技术指标

检测项目	结果	技术规格	技术规范 ^[6]
筛上剩余量(1.18mm), %	<0.1	<0.3	T 0652
蒸发残留物含量, %	59.8	≥55	T 0651
破乳速率	慢	慢	T 0658
电荷	阳离子	阳离子	T 0653
针入度(25℃), 1/10mm	63	60~300	T 0604
软化点, °C	50.4	—	T 0606
延度(15℃), cm	>150	—	T 0605
贮存稳定度 5d, %	0.6	<5	T 0655
溶解度(三氯乙烯), %	99.0	>97.5	T 0607

表 3.8 2#乳化沥青主要技术指标

检测项目	结果	技术规格	技术规范 ^[6]
筛上剩余量(1.18mm), %	<0.1	<0.3	T 0652
蒸发残留物含量, %	59.9	≥55	T 0651
破乳速率	慢	慢	T 0658
电荷	阳离子	阳离子	T 0653
针入度(25℃), 1/10mm	65	60~300	T 0604
软化点, °C	48.9	—	T 0606
延度(15℃), cm	>150	—	T 0605
贮存稳定度 5d, %	0.8	<5	T 0655
溶解度(三氯乙烯), %	98	>97.5	T 0607

表 3.9 3#乳化沥青主要技术指标

检测项目	结果	技术规格	技术规范 ^[6]
筛上剩余量(1.18mm), %	<0.1	<0.3	T 0652
蒸发残留物含量, %	59.7	≥55	T 0651
破乳速率	慢	慢	T 0658
电荷	阳离子	阳离子	T 0653
针入度(25℃), 1/10mm	66	60~300	T 0604
软化点, °C	49.1	—	T 0606

延度 (15℃), cm	>150	—	T 0605
贮存稳定度 5d, %	1.0	<5	T 0655
溶解度 (三氯乙烯), %	98	>97.5	T 0607

随着乳化沥青原材料质量的提高,特别是成品乳化沥青的不断增长,测定基质沥青延度变得既没有可能也没有必要了,2003年交通部《道路用乳化石油沥青技术要求修订》项目已经建议对此指标进行调整,由于目前还没有新的规范出来,所以在此文只给出这三种乳化沥青 15℃的延度值。

由上表结果可知,所研究开发的乳化沥青各项指标均能满足道路用乳化沥青技术要求。具体选用何种乳化沥青进行冷拌沥青混合料试验研究从乳化剂价格、来源等因素综合考虑,本文后述的试验研究采用 3# 乳化沥青。

3.2 改性乳化沥青的研究开发

本次研究开发的改性乳化沥青是在上述 3# 普通乳化沥青研究开发基础上进行的。

3.2.1 改性材料

选用聚合物做改性乳化沥青的改性材料有很多种,但以下三种类型中的聚合物品种被一致认为是有有效的:

1、热塑性弹性体类

苯乙烯-丁二烯嵌段共聚物(SBS 胶乳)作为改性材料的聚合物,以 SBS 的效果为最好,它可以显示出多种的改性效果。

对于选择 SBS 的品种时,应注意下列指标:

- a、首先判断是属于星型还是线型,一般星型 SBS 改性效果明显优于线型的。
- b、检查嵌段比 S/B,它是塑性段与橡胶段的比例。
- c、SBS 自身的拉伸性能对 SBS 改性提高抗裂性能的效果影响较大,可以从 300%定伸应力、拉伸强度、扯断伸长率等指标来判断 SBS 的拉伸性能。

d、熔体流动速率是决定加工难易程度的主要指标,它与分子量有关。流动速率越小,加工越容易,但性能往往差一点。

2、合成橡胶类

早期曾用橡胶树产生的天然橡胶做改性材料,后来用合成橡胶的胶乳代替,其中以丁苯胶乳(SBR)和氯丁胶乳(CR)用的多。SBR 是乳液改性中的一种主要材料,它可以明显提高粘附性、抗开裂性及低温延度,但高温稳定性提高不明显。CR 的性能与 SBR 相近,但比 SBR 稍有点热塑性,稳定性较差。

3、热塑性树脂类

乙烯醋酸乙烯酯(EVA 胶乳)是一种树脂类改性剂,可提高软化点及抗流动性,但对低温性能改善不明显。根据其中乙烯含量的不同,其胶乳的粘度与分子量是不同的,物性差异很大。一般随着 EVA 的掺量的增加,沥青的针入度降低,软化点在增加。

本试验研究所用的改性材料为国外某公司生产的 SBR 胶乳。该改性材料的物理性质如下表 3.10 所示:

表 3.10 SBR 胶乳改性材料的物理特性

品 名	SBR 胶乳
类 型	阳离子丁苯合成胶乳
物理形态	乳白色液体
比 重, 25℃	0.94
闪 点, °C	149
固含量, %	65~67
pH, 15%(w/v)溶液, 25℃	4.3

3.2.2 改性乳化沥青配方设计

表 3.11 改性乳化沥青配方设计表

材料项目	型号	用量与方法
沥 青	AH-70 号沥青	60%
乳化剂	3# 乳化剂	1.8%
改性剂	SBR 胶乳	1%、3%、5%
水	可饮用淡水	加至 100%
乳化剂水溶液 pH 值	2.0	用盐酸调节
备注：沥青温度加热至 130℃，乳化剂水溶液加热至 53℃。		

3.2.3 改性乳化沥青的生产过程

选择好改性剂材料后，还不能保证生产出合适的聚合物乳液。首先应注意聚合物的离子特性，如果胶乳呈现阴离子特性，而乳化剂采用阳离子表面活性剂，则在乳化过程中存在着阴阳离子复配问题。大量的试验表明：任何比例的两性复配体系均形成非理想混合胶团，但两体系在形成胶团能力方面均出现增效作用。实际乳化生产时，若不注意添加方式和顺序，将会出现改性乳液破乳现象。目前，大家一致认为内掺法较好的改性乳化沥青生产工艺法。

本次试验研究所生产的改性乳化沥青采用内掺法，即将改性剂掺入乳化剂水溶液中，而后与沥青进入胶体磨进行乳化的方法。生产过程如图 3-5 所示：

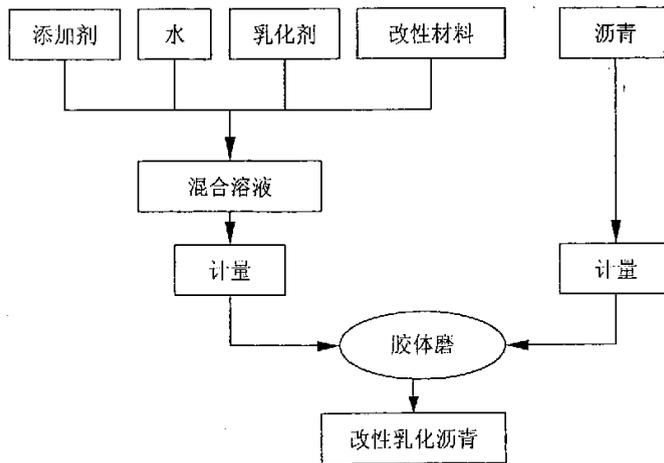


图 3-5 改性乳化沥青生产工艺图

此工艺只需要一个工序即可完成，具有生产效率高、生产易控制、操作方便的优点，而且还具有粘度大、固含量高（干胶占沥青 2.5%~10%）、贮存稳定性好的特点。

3.2.4 改性乳化沥青的质量检测

对以上三种改性乳化沥青进行质量检测，并与普通乳化沥青进行对比：

表 3.12 改性乳化沥青的主要技术指标

检测项目 \ 乳液种类	普通	1%改性	3%改性	5%改性
筛上剩余量(1.18mm), %	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
蒸发残留物含量, %	59.7	59.8	59.8	59.7
破乳速率	慢	慢	慢	慢
电荷	阳离子	阳离子	阳离子	阳离子
针入度(25℃), 1/10mm	66	63	61	59
软化点, °C	49.1	49.8	53.8	56.9
延度(15℃), cm	>150	>150	>150	>150
贮存稳定度 5d, %	1.0	1.1	0.9	1.2
溶解度(三氯乙烯), %	98	97.8	97.6	98

从上表可以得知，加入 SBR 胶乳可以提高沥青的软化点，且随 SBR 的量增加而提高，但同时降低了沥青的针入度。由此可知随着 SBR 胶乳使得沥青硬度增加，通过不同 SBR 胶乳含量的乳化沥青实测结果看，3%胶乳改性乳化沥青从性能上分析是可行的，对于应用于低等级道路的冷拌沥青混合料来说，如果普通乳化沥青的冷拌沥青混合料路用性能较差可以考虑采用胶乳的改性乳化沥青，但在确定是否使用改性乳化沥青之前，应进行冷拌沥青混合料的性能试验和经济分析。

3.3 本章小结

本章选用三种乳化剂制备不同乳化剂用量、不同乳化剂水溶液的 pH 值的乳化沥青，并通过贮存稳定度试验、破乳试验、蒸发残留物性质试验、乳化沥青标准粘度等一系列试验基础上研究开发出三种乳化沥青，并且在 3# 普通乳化沥青基础上进行了改性乳化沥青的研究开发，得出了如下结论：

(1) 三种乳化沥青均能满足 BC-2 型规定的拌和用类型乳液技术指标，在具体选用何种乳化沥青应用到冷拌沥青混合料之中，应根据乳化剂来源、价格等因素综合考虑选用乳化沥青种类；

(2) 通过掺加改性剂，乳化沥青的性能指标明显改善。实际应用时，在普通冷拌沥青混合料不能满足路用性能时，可采用改性乳化沥青，但应进行必要的技术经济分析，以便确定适宜的改性剂和掺加量；

(3) 在 3# 普通乳化沥青基础上研究开发的 SBR 改性乳化沥青中，掺加 3% 胶乳的改性乳化沥青具有较好的性能指标。

第四章 冷拌沥青混合料的配合比设计

4.1 冷拌沥青混合料简介

冷拌沥青混合料是相对于传统的热拌沥青混合料而言的,它分为开级配型和密级配型。用于冷拌沥青混合料的沥青种类有乳化沥青、液体沥青等,有时对使用乳化沥青的冷拌沥青混合料也称为乳化沥青混合料。乳化沥青混合料是指把适量的乳化沥青与一定规格级配的骨料,采用常温拌和工艺设备的混合材料,经过压实、养生后的材料统称为乳化沥青混合料,它可以用于基层,也可用于面层,本文主要研究用于低等级道路及农村公路面层的冷拌沥青混合料。

由于乳化沥青是一种环保型材料,所以一直深受国外的青睐,除了在高速公路预防性养护中大量使用外,也有很多国家用来尝试在低交通量的道路中铺筑冷拌沥青混合料作面层使用,到目前为止法国、美国及瑞典等国家都有用冷拌沥青混合料来铺筑街道及乡村道路的实例,且使用效果得到了好评。但是各国都没有形成一种完整的设计体系及施工质量控制标准。冷拌沥青混合料作为低等级道路及农村公路面层的可选材料,有如下几个优点:

1、节约能源。采用热沥青修路时,一般都要为沥青和矿料加热,消耗大量的燃料,且在施工中为了时刻保持沥青应有的高温,常常对沥青进行重复加热与持续加热。而冷拌沥青混合料只需在沥青乳化一次加热,且用于冷拌沥青混合料的矿料不需烘干和加热,这就大大降低了能源消耗。

2、节省资源。冷拌沥青混合料的乳液与骨料表面具有良好的工作度与粘附性,可以在骨料表面形成均匀的沥青膜,容易准确的控制沥青用量,据有关资料显示,一般可以节省沥青用量为10%—20%。众所周知,沥青是种宝贵的资源,所以节约沥青就是节省资源。

3、延长施工季节。采用冷拌沥青混合料作面层可以在5℃以上的环境下施工,而且阴雨过后,不需等待骨料与路面晒干就可以开工,减少停机台班费。

4、改善施工条件,减少环境污染。乳化沥青可在常温条件下使用,不需要燃料加热,减少了环境污染,且在高温季节时工人不再受高温的沥青烧烤及呛人的烟味,改善了工人的施工条件。

5、冷拌沥青混合料由于冰冻及路基软弱等引起的路面破坏要少于刚性路面。

6、冷拌沥青混合料施工灵活性大。冷拌沥青混合料可以采取拌和厂集中拌和,也可以就地拌和,方式灵活多样,就地拌和的话可以减少运输用的车辆,节约劳动力和施工成本。

7、冷拌沥青混合料在太阳的照射和汽车的轮碾作用下有“裂缝自动闭合”的趋势。

4.2 冷拌沥青混合料的强度形成及性能的影响因素

4.2.1 冷拌沥青混合料强度形成过程

1、热拌沥青混合料的强度形成过程

人们已经熟悉热沥青混合料的强度形成过程,它是由矿质集料和沥青胶结料所构成的多级空间网络结构的分散体系。热拌沥青混合料强度和稳定性的构成因素是材料的内聚力和内摩阻力。其中,内聚力主要是由沥青的粘聚力及沥青与矿料的粘附力所组成。就热拌沥青混合料而言,在热拌热铺施工条件下,是将热融状态的沥青与烘干加热的集料相拌和,并在沥青尚有一定粘度的情况下压实

成型。由于沥青的品种规格不同，拌和时对沥青温度要求不尽一致。经过适宜温度下拌和压实成型的热沥青混合料可在较短的时间内冷却。此时混合料中的沥青迅速由粘稠态转入近乎玻璃状态，分散体系也由具有较大空隙的散堆状态变为密实整体形状，并产生较大的强度。

2、冷拌沥青混合料的强度形成过程

冷拌沥青混合料成型过程与热拌沥青混合料明显不同，由于乳液是沥青与水的混合物，其中的沥青必须经过乳液与集料的粘附与分解破乳、排水、蒸干等过程后才能完全恢复原有的粘结性能。起初摊铺和碾压的乳化沥青混合料，需要经过比热沥青成型过程长得多的时间才能达到一定强度要求。这是因为乳液分散在集料的混合物中水分不能立即排净，这些水分大部分呈游离状态占据着混合料分散体系空隙，由于水的粘度低于沥青，因此，这些水分在混合料中甚至起着“润滑剂”的作用，降低集料间内摩阻力，降低混合料的强度和稳定性。当这种混合料受到捣实与养生，即相当己铺路面受到行车的压实，其中水分逐渐蒸干，混合料的残留沥青在骨料表面的分布状态也会得到进一步调整。于是，冷拌沥青混合料的密实度逐步增加，抵抗荷载的能力也随时间而增强。图 4-1 为国内在不同龄期测得的阳离子乳化沥青混凝土路面密实度的变化情况，图中曲线表明，这种路面的压实成型过程较长。刚铺筑压实的路面，只使混合料达到初步稳定的程度，随着行车的碾压，混合料水分继续分离蒸发，密实度不断增加，尤其在行车的不断作用下，混合料中粗、细集料的位置仍会进一步调整，使路面的密实度不断提高。

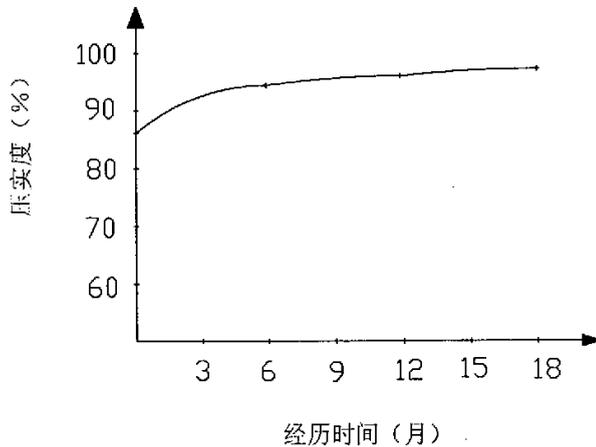


图 4-1 试验路面密实度随时间的变化

由此看出，乳化沥青中的沥青与普通沥青实质上是同一种材料，最终在路面上可以取得同样的作用效果，但由于冷拌沥青混合料需要一个粘附脱水与蒸干过程，所以要经过较长的时间才能达到一定的强度要求。

4.2.2 影响冷拌沥青混合料性能的因素

有关冷拌沥青混合料的性能，从大的范围来说，可以归纳为施工性能和使用性能两个方面。其中施工性能可综合性地用和易性表示，它反映冷拌沥青混合料在拌和、摊铺、碾压等施工过程中是否有脱附、离析、结硬等现象。使用性能主要表现在经摊铺碾压后路面的密实性、强度和变形性能。

影响冷拌沥青混合料的因素有很多，归纳为如下表 4.1 所示：

表 4.1 影响冷拌沥青混合料性能的主要因素

因素 性能	乳化剂 品种及 用量	乳液的 浓度及 用量	矿料的 品种及 规格	混合料 的总用 水量	拌和施 工温度	残留沥 青的性 质	压实效 果	初养措 施及气 候
和易性	√	√	√	√	√			
强度	√		√			√	√	√
变形性	√		√			√	√	
密实度	√		√	√		√	√	√

了解了上述因素可以帮助我们正确选择冷拌沥青混合料的组成材料，并可根据施工环境条件采用合适的施工工艺来保证冷拌沥青混合料的路面施工质量。

4.3 国内外配合比设计方法研究概况

4.3.1 国外概况

国外绝大多数的配合比设计方法是在很早以前就提出来的，目前各国设计方法不一，标准也不统一，其主要不同在于试件的成型方法和试件的养生时间两个方面。

关于试件的成型方法方面，以前的方法多数是利用“维姆”和“马歇尔”等仪器装置来制作和检验混合料试件，这些方法本身既有优点又有很多不足之处。马歇尔方法的优点是它注意到沥青混合料的密实度和空隙率特性，另一特点是所需设备价格适中且便于携带，但是，许多工程师认为马歇尔的冲击压实没有模拟实际路面压密的情况，而且马歇尔稳定度不足以评估混合料的抗剪强度。维姆法具有两个主要优点：首先，室内压实的搓揉法被认为较好地模拟了实际路面的压实特性。其次，维姆稳定度是对抗剪强度中的内摩阻成分的直接量度，它测试在垂直荷载作用下试件抵抗侧向位移的能力，其缺点在于试验设备较为昂贵且不便携带，而且与混合料耐久性相关的重要的混合料体积特性并未作为维姆法的一部分加以常规确定，某些工程师认为维姆法中选择沥青用量过于主观。鉴于上述情况，美国于 1994 年开始实施 Superpave 计划从而揭开了沥青混合料设计体系变革的序幕。其中一点就是对成型方法的改进，选择旋转压实仪（SGC），虽然旋转压实仪是针对热沥青混合料提出的，但是在国外研究表明^[7]旋转压实仪同样适用于冷拌沥青混合料，只是需对模子进行专门的改进以便于混合料中水的排出，目前虽然各国都没有统一标准，但是美国、瑞典等国家倾向于使用旋转压实仪来成型试件。

关于养生时间方面，由于冷拌沥青混合料成型过程与热拌沥青混合料明显不同，乳液是沥青与水的混合物，其中的沥青必须经过乳液与集料的粘附与分解破乳、排水、蒸干等过程后才能完全恢复原有的粘结性能。它需要经过一段比热沥青成型过程长得多的时间才能达到一定强度的要求，因此养生的条件也是各国争议的地方，就养生温度而言，目前国外普遍采用两种温度 40℃ 和 60℃，但是养生时间各不相同，例如瑞典在对冷拌沥青混合料进行结构性测试时所采用的试件是在 60℃ 条件下养生 3 天，而美国的一些机构在做马歇尔稳定度试验时采用不同的养生时间来模拟不同时期路面的强度情况。它主要分为三种养生情况：一种是 25℃ 下养生 4h 模拟现场施工一天后的情况；25℃ 下养生 24h，模拟现场施工 4~7 天后的强度情况；60℃ 下 48h，模拟现场施工数月后的强度，即

接近于最终强度。

总之各国对于冷拌沥青混合料的设计方法不一，目前冷拌沥青混合料设计方法向简单化和标准化趋势发展，各国正在努力使得设计方法统一。

4.3.2 我国概况

我国近几年来，在河南、黑龙江、河北、湖南、大连等省市，在一些交通量较大的主干线上铺装的不同类型阳离子乳化沥青混凝土路面。经过多年的行车与气候考验，路面状况完好，上述这些地区对于混合料的配合比设计大致采用了两种方法：一类是以无侧限抗压强度为依据的；另一类是采用修正的马歇尔稳定度试验法为依据的。无侧限抗压强度方法是采用直径为 20cm，高为 20cm 的圆柱形试件，这种方法的特点是操作简便，但由于乳化沥青混合料的强度随试件的养生龄期的变化较大，因此所得抗压强度结果很难与乳化沥青混合料路面的实际受力状态相一致。修正马歇尔稳定度试验方法，对混合料试件按不同养生条件进行试验，能使乳化沥青路面在初期与后期的强度都能得到反映，而且还可以与现行热沥青混合料的马歇尔稳定度试验结果对比。然而对于冷拌沥青混合料而言，无论采用哪一种试验方法，都应得出以下几项参数指标：

- (1) 为保证乳液能与骨料充分裹覆及混合料和易性所要求的拌和用水量；
- (2) 选择适用的乳化沥青品种；
- (3) 最适宜的乳化沥青的用量；
- (4) 室内混合料试件的具体养生条件；
- (5) 混合料的强度和承载能力；
- (6) 既能保证乳液充分裹覆于集料，又不出现乳液从集料表面剥离所要求的拌和时间；
- (7) 室内试验对于试件的压实效果（与现场路面所获得的压实效果应相接近）。

目前，对于冷拌沥青混合料配合比的设计试验方法，国内外都在研究探讨中，但国内普遍倾向于采用修正马歇尔稳定度试验方法^[8]。

4.4 材料的选择

用乳化沥青拌制的冷拌沥青混合料由粗粒料、细粒料、填充料和沥青乳液四种材料组成。由于乳化沥青混合料必须使其中的水分蒸发干，沥青已基本恢复原有的粘结性能之后，才能表现出较高的力学强度和稳定性。因此乳化沥青混合料最终的性质即相当于普通的热拌沥青混合料。它的材料组成及技术要求也与热拌沥青混合料基本相同^[9]。

4.4.1 集料

1、矿料类型

(1) 粗集料

冷拌沥青混合料中所选用的粗集料是指粒径大于 2.36mm，小于 26.5mm 的碎石。粗集料要求是三级以上集料轧制而成，应具有足够的强度和耐磨性，其细长扁平颗粒含量小于 15%。

(2) 细集料

细集料是指粒径小于 2.36mm，大于 0.074mm 的砂和石屑，这种材料要求质地坚硬、清洁、无杂质、并具有适当的级配。细集料需要做砂当量试验以检验其含杂质的情况，因为集料泥含量过高时，会使得纯沥青需要量增加，却不产生任何好处，所以集料中的泥含量不能过高，国外某文献^[10]

建议用于密级配冷拌沥青混合料的细集料砂当量要求 $\geq 45\%$ ，而我国在公路沥青路面施工技术规范中对于其他等级公路细集料砂当量要求 $\geq 50\%$ ，用于高等级公路预防性养护的微表处沥青混合料的细集料砂当量要求 $\geq 60\%$ 。

(3) 矿粉

为了提高冷拌沥青混合料的路面稳定度，混合料要加入一定数量的矿粉。矿粉要求为基性岩石磨制而成，亲水系数小于 1.0。

为保证冷拌沥青混合料的强度，减少剥落，在选择石料时应当优先考虑碱性石料。碱性石料主要有石灰岩和玄武岩两种。本试验研究采用界阜蚌的石灰岩，并测得其主要技术指标如表 4.2~4.3 所示：

表 4.2 石灰岩粗集料的试验指标与技术要求

试验项目	试验指标	技术要求 ^[1]	试验方法 ^[11]
压碎值(%)	17.9	≤ 30	T0316-2000
洛杉矶磨耗损失(%)	15.9	≤ 40	T0317-2000
视密度(g/cm^3)	2.746	≥ 2.45	T0308-2000
吸水率(%)	0.6	≤ 3.0	
与沥青的粘附性(级)	4 级	3 级	T0616-1993
细长扁平颗粒含量(%)	7.2	≤ 20	T0312-2000
水洗法 $<0.075\text{mm}$ (%)	0.5	≤ 1.0	T0302-2000

表 4.3 石灰岩细集料的试验指标与技术要求

试验项目	试验指标	技术要求 ^[1]	试验方法 ^[11]
视密度(g/cm^3)	2.739	≥ 2.45	T0330-2000
砂当量(%)	91	≥ 50	T0334-1994

2、级配的选择

石料在冷拌沥青混合料中起骨架作用，它的最大粒径决定冷拌沥青混合料的摊铺厚度。一个好的矿料级配组成，应该是在热稳定性允许的条件下具有最小的矿料空隙率，以及有足够的裹附沥青所需的结构表面积，以保证矿料之间处于最紧密的状态，并为矿料与沥青之间的相互作用创造良好条件，使沥青混合料能够最大限度的发挥其结构强度的效应，从而获得最好的使用品质^[12]。

沥青混合料按其强度构成原则的不同可分为按嵌挤原则构成的结构和按密实级配原则构成的结构两大类。按嵌挤原则构成的沥青混合料的结构强度，是以矿质颗粒之间的嵌挤力和内摩阻力为主、沥青结合料的粘结力为辅而构成的。用这种混合料铺筑的路面是以较粗的、颗粒尺寸均匀的矿料构成骨架，沥青结合料填充其空隙，并把矿料粘结成一个整体。沥青贯入式路面、沥青表面处治、以及沥青稳定碎石路面均属此类结构。按密实级配原则构成的沥青结合料的结构强度，是以沥青与矿料之间的粘结力为主，矿质颗粒之间的嵌挤力和内摩阻力为辅而构成的。沥青混凝土路面和沥青碎石混合料路面属于此类。通常，密实的沥青混合料可具有较高的强度、较好的耐磨耗和抗疲劳性能，且不透水、耐老化，路面的使用寿命也长。因此对于用作面层的沥青混合料，多年来国内外大都趋向于采用密实型级配。

混合料最佳级配组成可按连续级配和间断级配两种方式考虑。连续级配的曲线平顺圆滑，相邻粒径之间有一定的重量比例，这种级配不易离析，成活容易。间断级配是综合干涉理论和填充理论而成，细料部分仍按连续级配原则以保持其凝结力。这种级配兼有嵌挤原则和级配原则的优点，其

摩阻力、凝聚力、密实度都达到最优。对于冷拌沥青混合料来说,有连续级配和间断级配两种形式,本文主要研究的是连续级配冷拌沥青混合料。关于级配问题,日本在《简易铺装要纲》里列出了用于表层的乳化沥青混合料的级配,此外还有西班牙、法国也列出了冷拌沥青混合料的级配范围^[13],我们国家阳离子乳化沥青课题组也给出了建议的阳离子乳化沥青混合料级配组成表,具体见 4.4~4.7,而美国对于密级配冷拌沥青混合料其级配要求只要满足 ASTM D3515 的规范。

表 4.4 日本乳化沥青混合料级配组成表

筛孔 (mm)	25	20	13	5	2.5	0.6	0.3	0.15	0.074
粗粒型	100	95~ 100	70~ 100	35~55	20~35	8~20	5~15	2~10	0~4
密粒型	100	95~ 100	80~ 100	50~70	35~50	14~26	8~18	3~11	0~5

表 4.5 西班牙冷拌沥青混合料级配组成表

筛孔 (mm)	40	25	20	10	5	2.5	0.63	0.32	0.16	0.08
级配 1 型	—	100	80~ 100	60~ 75	43~ 58	30~ 45	15~ 25	10~ 18	6~13	4~8
级配 2 型	—	100	80~ 100	50~ 80	30~ 60	20~ 45	10~ 25	8~20	5~15	3~12
级配 3 型	100	75~ 100	—	—	30~ 65	20~ 54	10~ 36	—	—	3~15

表 4.6 法国冷拌沥青混合料级配组成表

筛孔	20	12.5	8	5	3.15	2	1.25	0.8	0.5	0.31 5	0.2	0.12 5	0.0 8
级配	93 ~ 100	82.5 ~ 96.5	70 ~ 85	58 ~ 74	47 ~ 62	35 ~ 51	30.5 ~ 44	26 ~ 38.5	21.5 ~ 32.5	17~ 26.5	12.7 ~ 20.2	8.5 ~ 14	4~ 8

表 4.7 我国阳离子乳化沥青混合料级配组成表

结构类型		RL-20(I)	RL-20(II)	RL-10	RL-5
通过各筛的质量 (%)	20	87~100	95~100	—	—
	10	53~77	70~80	95~100	—
	5	35~55	50~65	55~70	95~100
	2.5	17~32	35~50	40~55	65~85
	1.2	11~25	25~40	30~40	45~65
	0.6	6~18	18~30	20~30	30~52
	0.3	4~13	13~21	16~21	17~37
	0.15	2~10	8~15	10~15	11~28
0.074	0~4	3~7	5~9	8~12	

注:表中 RL 代表乳液混合料,数字代表集料最大颗粒; I 代表粗级配, II 代表密级配

由各国冷拌沥青混合料级配范围的要求可以看出,相对于热沥青混合料来说,密级配冷拌沥青混合料对级配的要求基本相似。在国内的各个技术手册中,对于热拌和冷拌沥青混合料的级配的要求其实是差不多的。这是因为乳化沥青中的沥青与普通热沥青实质上是同一种材料,最终可取得相同的粘胶作用效果,只不过乳液有一个粘附,脱水与蒸干的过程,因此,它的材料组成及技术要求也与普通沥青混合料基本相同。例如《公路沥青路面施工技术》中,乳化沥青碎石混合料采用的级配和热拌沥青完全相同,《阳离子乳化沥青路面》中建议的四种乳化沥青混凝土级配组成和热拌沥青混凝土的级配相差不大,主要的差别在于矿粉用量的不同,这是因为当采用 OT 等季铵盐类乳化剂制备的乳化沥青拌制混合料时,当粉料含量多时,由于细料,特别是矿粉的比表面积相当大,与乳液接触后,吸水性很强,促使乳液过早破乳,使沥青较多地吸附于细料的表面,会出现不同粒径矿料裹覆不均匀的现象。因此,应根据实际情况控制矿粉用量,一般限制矿粉的用量范围为 0~7%,以 2~5%较为合适。

根据实际工程中冷拌沥青混合料的可能摊铺厚度为 3cm~4cm 以及三、四等级道路常用的热沥青混合料级配类型,本研究决定选用 AC-13 I 作为设计级配。具体级配组成如表 4.8 所示,下文提及的混合料试验如果不加说明,混合料级配均采用该级配。

表 4.8 混合料级配表

粒径(mm)	通过率(%)	范围中值(%)	要求范围(%)
16	100	100	100
13.2	96.6	97.5	95~100
9.5	76.6	79	70~88
4.75	60.2	58	48~68
2.36	43.5	44.5	36~53
1.18	33.5	32.5	24~41
0.6	23.1	24	18~30
0.3	14.6	17	12~22
0.15	10.6	12	8~16
0.075	7.1	6	4~8

4.4.2 乳化沥青

用于冷拌沥青混合料的乳化沥青类型主要有中裂和慢裂两种类型,其中中裂型乳液适用于开级配冷拌沥青混合料,慢裂型乳液适用于密级配冷拌沥青混合料。此外拌制冷拌沥青混合料的乳液,应符合 B-1 或 B-2 型规定的拌和用类型乳液技术指标,对于用作面层的冷拌沥青混合料(细粒式型)应符合 B-2 型规定的乳液技术指标。同时还要根据使用地区的气候条件、道路交通量、混合料结构类型等因素,选择乳液中沥青材料的技术性能指标。一般要求针入度范围是 60~200 (25℃, 0.1mm),对于冷拌沥青混合料,选择针入度在 60~140 (25℃, 0.1mm)的道路石油沥青更为适宜。

本次试验研究选用本文第三章所述研究开发的慢裂慢凝型阳离子乳化沥青,其技术指标分别见第三章表 3.7~表 3.9。

4.4.3 其他材料

1、填料

填料可分为具有化学活性的填料和不具有化学活性的填料。不具有化学活性的填料一般指矿粉

等, 具有化学活性的填料主要有水泥、石灰、硫酸铵粉、粉煤灰等。在添加具有化学活性的填料时, 应充分考虑填料与矿料、乳化沥青的反应及相容性, 应有利于冷拌沥青混合料的拌和、摊铺和成型, 保证混合料的整体强度。

填料的作用主要有以下几点:

- ◆ 改善级配;
- ◆ 提高冷拌沥青混合料的稳定性;
- ◆ 加快或减缓破乳速度;
- ◆ 提高混合料的强度。

本次试验的冷拌沥青混合料中加入了不具有化学活性的填料。不具有化学活性的填料为石灰岩矿粉, 其级配如下表:

表 4.9 矿粉级配表

孔径(mm)	分计筛余(%)	通过率(%)
0.15		100
0.075	15	85
<0.075	85	0

具有化学活性的填料采用普通硅酸盐水泥。普通的冷拌沥青混合料作为结构层可能会产生一些问题, 主要问题是初期的强度比较低并且达到完全强度的时间比较长, 另外, 在冷拌混合料强度形成早期容易因为环境因素而产生早期破坏。针对乳化沥青混合料存在的这些缺点, 国外也开展了一些研究以提高其早期强度, 其中一种做法是在乳化沥青混合料中掺加一定量的水泥, 这样既增加了填充料, 又利用了水泥水化强度高的特点, 同时水泥吸附混合料中的水分, 加速乳化沥青破乳。水泥水化物和沥青交织裹覆骨料, 形成一个交叉的空间立体网络。研究表明^[4], 这种方法对于乳化沥青混合料的早期强度的提高效果明显, 并且可以改善混合料其它方面的性能。关于掺加普通硅酸盐水泥对冷拌沥青混合料性能的影响将在本文第五章进行试验研究分析。

2、添加剂

冷拌沥青混合料的添加剂视需要而定。添加剂可分为促凝剂和缓凝剂, 其作用主要是加快或减缓乳化沥青在冷拌沥青混合料中的破乳速度, 满足拌和摊铺。

添加剂的类型应在室内试验时确定, 或由乳化剂生产厂配套指定。它可以是有机酸、碱、无机盐, 也可以是其它高分子聚合物、表面活性剂等, 如盐酸、氨水、硫酸铵、氯化铵、氯化钙等或其它乳化剂以及一些水乳性的高分子乳胶。另外, 如抗剥落剂、改性剂等也可以通过添加剂的方式添加到稀浆混合料中。

本研究中由于冷拌沥青混合料的级配合理, 破乳时间较理想, 因此没有加入添加剂。

3、水

使用阳离子乳化沥青拌制冷拌沥青混合料, 一般都需要加水预湿矿料。拌和添加的水、加上乳液中和矿料中的含水总和, 称为拌和总用水量。拌和总用水量的多少, 影响着冷拌沥青混合料试件的压实效果。因此在美国沥青协会的试验方法和伊利诺斯州等试验方法中, 都要求通过试验来确定合适的拌和用水量, 而我们国家, 在混合料试验中没有明确规定要进行最佳拌和用水量的试验, 而是通过各地试验情况总结提出了一个合适的范围。

4.5 室内配合比试验研究

由于日前对冷拌沥青混合料的配合比设计方法在国际上没有公认的成熟方法, 本试验研究的配合比设计方法在采用修正马歇尔设计时, 考虑到它与路用性能并没有很好的相关性能, 将浸水马歇尔试验、飞散试验作为对修正马歇尔试验方法的补充和完善。

4.5.1 冷拌沥青混合料室内配合比程序

配合比试验研究的主要目的是研究冷拌沥青混合料的技术性质和使用性能, 为施工确定一个合适的配合比, 具体试验程序如图 4-2 所示:

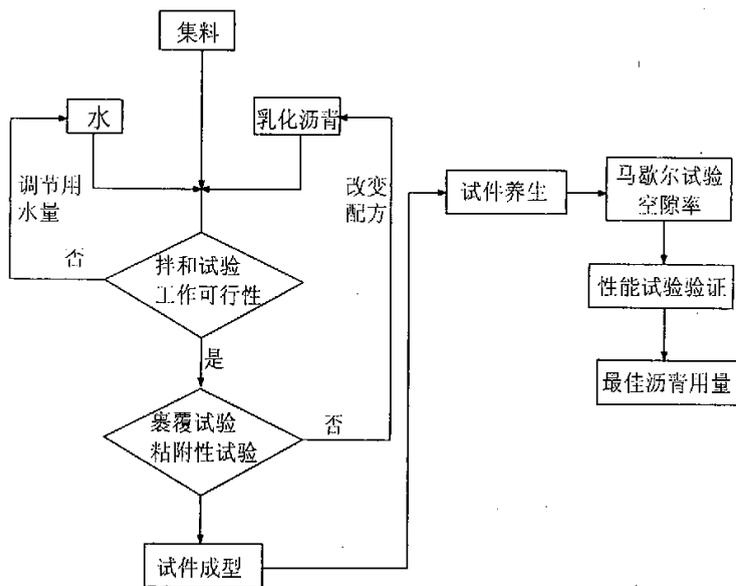


图 4-2 冷拌沥青混合料的配合比设计程序

4.5.2 裹覆试验

裹覆试验^[10]主要目的是消除不合适的乳液配方, 在试验基础上选择最合适的乳液。通常可以通过增加集料的外加水量来改善混合料的裹覆性, 但是过多的水会对混合料的压实产生不利的因素。理想的乳液应该在混合料达到压实效果的最佳流体含量下有着很好的裹覆性。裹覆试验的具体做法如下:

- 1、将集料在 110℃烘箱中烘至恒重;
- 2、称取 500 克干集料放入拌和用的锅内;
- 3、对于密级配混合料通常需要一定量的水预湿, 开始加入足够多的水(所谓足够多的水是指既能把集料表面预湿又没有自由水存在), 用力搅拌 10 秒或直至集料预湿均匀, 如果有水流出, 则说明用水量偏大, 可以减少用水量;
- 4、在预湿的混合料里加入乳化沥青, 用力搅拌 60 秒直至混合料裹覆均匀, 如果出现混合料结成块状, 则说明需要增加用水量;
- 5、将混合料摊铺在水平的桌面上, 用眼观察混合料的裹覆程度。

一般, 对于用于面层的冷拌沥青混合料的裹覆程度要求 $\geq 90\%$ 。如果能满足上述要求, 继续后面的试验; 如果不满足, 则需考虑更换乳液品种。

本试验研究中分别采用第三章所述的三种乳化沥青与石灰岩集料进行裹覆试验，三种混合料的编号分别对应于三种乳化沥青，编为1#、2#、3#混合料，其试验结果见表4.10。

表 4.10 混合料裹覆试验结果

混合料种类	试验结果 (%)	试验要求 ^[10]
1# 混合料	≥90	≥90%
2# 混合料	≥90	
3# 混合料	≥90	

试验结果表明，这三种混合料的裹覆试验均能满足要求，可以进行粘附力试验测试。

4.5.3 粘附性试验

粘附性试验^[10]作为裹覆试验的后续试验，也可以帮助我们消除不合适的乳液配方，其具体做法如下：

- 1、取裹覆试验用的混合料 100g 放在较浅的容器里在 60℃ 的烘箱中养生 24h；
- 2、在 600ml 的烧杯里装入 400ml 蒸馏水，将它煮沸，将养生后的 100g 混合料放入烧杯；
- 3、将烧杯中的水重新煮沸，并且以每秒转一圈搅动沸水三分钟；
- 4、将烧杯中的水倒出，取出混合料放在吸水纸上；
- 5、待混合物干燥以后，用眼观察估计残留的裹覆程度，对于用于面层的冷拌沥青混合料要求残留裹覆 ≥90%；如果不满足上述要求，需要考虑重新选择乳液，或者增加石灰、水泥等填料，或者增加抗剥落剂来改善混合料的粘附力。三种冷拌沥青混合料的粘附力试验结果见下表：

表 4.11 混合料粘附力试验结果

混合料种类	试验结果 (%)	试验要求 ^[10]
1# 混合料	≥90	≥90%
2# 混合料	≥90	
3# 混合料	≥90	

上述试验结果表明，三种冷拌沥青混合料均能满足粘附力试验的要求，在三种冷拌沥青混合料中分别加入 1%、2% 的水泥，其结果变化不是很明显。

4.5.4 工作可行性试验

本试验主要用来考察冷拌沥青混合料能否成功摊铺到路上和混合料打堆堆放的时间。之所以要进行此项试验是为了防止冷拌沥青混合料在摊铺过程、运输、打堆堆放中由于受环境和外力的影响而被乳从而导致摊铺失败。此试验一般凭工程师的经验判断，所以存在一定的主观性。瑞典已研制出专门的设备^[15]来进行冷拌沥青混合料的工作可行性测试，其试验设备主要原理见图 4-3，它主要测试刮板以 10mm/s 的速度匀速推进混合料时所受的最大阻力，其主要测试两个值，一个是混合料密封贮存 1 小时，在试验机再放 5 分钟后的值，另外一个数值是密封 1 小时后装入试验机放 1 小时后的值，通过测试两个数值可以看出混合料在堆放、运输、摊铺过程中的破乳趋势，此外之所以测试密封 1 小时，放入试验机 1 小时的值是用来模拟现场实际的施工情况，尽管混合料在拌和后可以立即进行摊铺，但在实际施工过程中从一开始拌和混合料到摊铺要考虑一些可能引起的延误时间以免混合料变硬后无法施工，从而造成不必要的浪费。具体试验步骤如下：

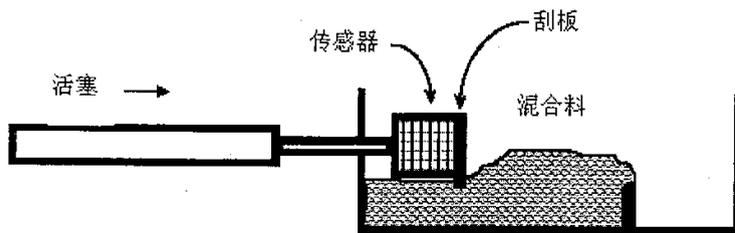


图 4-3 瑞典 Nynas 工作可行性试验机原理图

- 1、将 20kg 混合料拌和，放在密封的容器里贮存 1 个小时；
- 2、取出 10kg 混合料放在试验机里，5 分钟后开始启动试验机，将刮板以 10mm/s 的速度匀速推进，测出试验值；
- 3、将混合料取出，装入另外 10kg 混合料放在试验机，过 1 小时后再以同样的方法进行测试。一般要求 5 分钟后的值要 $\leq 100N$ ；而 1 小时后的值要求 $\leq 150 \sim 170N$ ，具体这个数值为多少应根据施工时所采用的设备而定。

本文所做的工作可行性试验研究由于受设备的影响，其工作性能采用下述的简易方法，具体做法如下：

- 1、拌和三份混合料，每份 10kg，装入密封罐（如图 4-4 所示），分别贮存 3d、7d 和 14d；
- 2、打开密封罐，观察混合料颜色等外观，如果混合料表面有轻微变硬现象属于正常情况，因为密封罐内留有部分空气与混合料接触，促使混合料破乳，将已破乳的混合料铲除，剩余的混合料用刮片刮开，观察混合料的颜色并感觉刮片的力度。



图 4-4 密封的储存罐

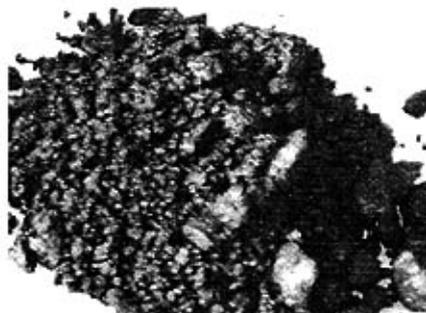


图 4-5 3# 混合料储存 3d 后的外观

三种混合料具体的工作可行性试验结果见下表：

表 4.12 冷拌沥青混合料工作可行性情况

贮存时间 混合料种类	贮存 3d 的情况	贮存 7d 的情况	贮存 14d 的情况
1# 混合料	混合料表面有轻微变硬现象	混合料表面有轻微变硬现象较 3d 前的稍微严重	混合料部分变硬
2# 混合料	混合料表面有轻微变硬现象	混合料表面有轻微变硬现象，较 3d 前的稍微严重	混合料小部分变硬

3# 混合料	混合料与刚拌混合料差不多,呈深褐色	混合料表面有轻微变硬现象	混合料表面小部分变硬
--------	-------------------	--------------	------------

由上述表中列出的三种混合料分别贮存 3d、7d、14d 的情况来看, 3# 混合料贮存时间最久, 具体为多长时间还应根据实际工程的密封措施、贮存温度、湿度等情况而定。

4.5.5 可压实性试验

本试验主要用来评价冷拌沥青混合料的可压实性。该试验的做法是采用旋转压实仪成型试件, 设定旋转压实仪的单位压力为 600kPa, 旋转角度为 1.25 度、旋转速度为 32rpm。试件直径采用 100mm, 设定目标旋转次数为 200 次, 通过旋转压实曲线来决定冷拌沥青混合料的可压实性^[15]。通常认为旋转 200 次后的试件的密度为目标密度, 96% 的目标密度要在旋转 30 次~70 次之间达到, 如果 96% 的目标密度所对应的旋转压实次数小于 30 次, 说明这种混合料为软性混合料, 如果大于 70 次则代表该混合料为干硬性混合料。图 4-6 给出了冷拌沥青混合料的压实曲线:

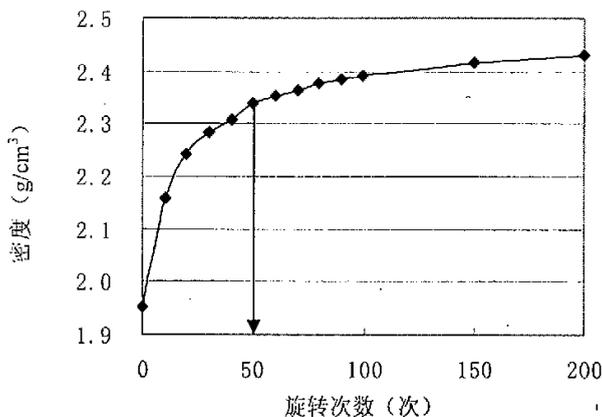


图 4-6 压实特性图

由上图可以看出, 压实 200 次后的混合料的毛体积密度为 2.432 g/cm^3 , 其 96% 的密度对应为 2.335 g/cm^3 , 所对应的旋转次数约为 50 次, 所以混合料是可压实的。

4.5.6 初始最佳用水量的确定

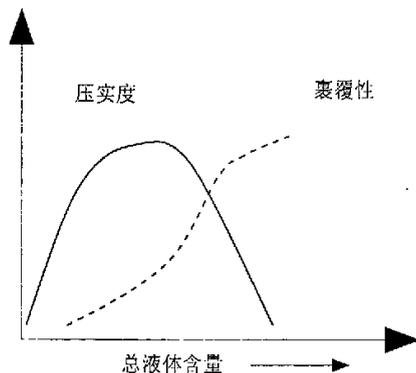


图 4-7 拌和用水量与压实度和裹覆性的关系图

拌和总用水量是指拌和添加的水, 加上乳液中和矿料中的含水总和, 用矿料干重的百分比表示。

如图 4-7 所示, 拌和用水量的多少, 对冷拌沥青混合料的压实度和裹覆性起着十分重要的作用。对于这个用水量, 各国的确定方法不一, 美国在建议的冷拌沥青混合料设计方法里提出密级配冷拌沥青混合料的外加水用量是通过试验来确定最佳流体含量, 具体做法如下: 称取一定质量的集料, 用水量从 1% 以 0.5% 或 1% 的间隔变化, 分别用旋转压实仪压实 50 次, 不需要经过养生测定各流体含量下的密度, 最大的密度所对应的流体含量就是最佳流体含量。美国德克萨斯运输部评价冷铺(溶剂型)沥青混合料工作性的方法, 采用无侧限抗压强度试验来确定混合料的最佳用水量^[16]。但在瑞典, 外加水确定方法是依靠工程师的经验来完成的, 其主要判断标准为冷拌沥青混合料能很好的裹覆但是当把混合料摊铺在纸上时, 没有多余的水或者乳液溢出。他们凭着多年的经验认为预加水不是冷拌沥青混合料的关键问题。我国没有明确规定要进行确定最佳用水量的试验, 而是通过各地试验情况总结提出了一个合适的范围。对于拌制中粒式沥青混凝土混合料, 拌和总用水量通常采用 4.5%~7.5%。对于拌制细粒式乳化沥青混凝土混合料、乳化沥青砂, 则采用 8%~16%。当矿料中细料或矿粉多时, 取高限拌和用水量, 反之, 取用低限拌和用水量。下表是交通部阳离子乳化沥青课题组确定的用水量范围。

表 4.13 乳化沥青混合料拌和总用水量范围

混合料种类	粗级配混合料	密级配混合料	不含粉料的沥青砂	含粉料的沥青砂
拌和总用水量(%)	4.5~6.0	5.5~7.0	8~12	12~16

本试验研究过程中, 笔者曾按照美国在建议的冷拌沥青混合料设计方法里介绍的方法来确定最佳用水量, 发现如果外加水用量小于 1%, 混合料则较难以拌和, 但外加水超过 1.8%, 旋转压实 50 次后, 就有水与乳液溢出, 这样容易导致乳液的损失和测出的试验数据不准确, 用美国德克萨斯运输部评价冷铺(溶剂型)沥青混合料工作性的方法, 采用无侧限抗压强度试验来确定混合料的最佳用水量也碰到类似的情况, 所以外加水的多少与工程师的经验密切相关。根据拌和情况及裹覆情况, 本次试验确定总用水量为 5.5%。

4.5.7 乳化沥青用量的确定

4.5.7.1 修正马歇尔设计方法

1、初始沥青用量的确定

为了确保冷拌沥青混合料有着良好的质量品质, 必须严格控制沥青膜的厚度。

根据沥青膜厚度和集料表面积按如下公式^[17]估算沥青用量。

$$\text{集料表面积} = 0.41 + 0.41a + 0.82b + 1.64c + 2.87d + 6.14e + 12.29f + 32.77g \quad (\text{m}^2/\text{kg})$$

a、b、c、d、e、f、g 分别表示 4.75mm、2.36mm、1.18mm、0.6mm、0.3mm、0.15mm 和 0.075mm 筛孔的通过率。

$$\text{估算沥青用量} = \text{假定膜厚} \times \text{集料表面积} \times \text{沥青密度}$$

表 4.14 沥青膜平均厚度计算表

筛孔尺寸	通过率 (%)	表面积系数 (m ² /kg)	表面积 (m ² /kg)
16	100	0.41	0.41
13.2	96.6		
9.5	76.6		
4.75	60.2	0.41	0.2468
2.36	43.5	0.82	0.3567
1.18	33.5	1.64	0.5494
0.6	23.1	2.87	0.6630
0.3	14.6	6.14	0.8964
0.15	10.6	12.29	1.3027
0.075	7.1	32.77	2.3267
总表面积A (m ² /kg)		6.7517	
油石比 (%)	4.7	4.1	5.4
沥青膜厚度D (μm)	7	6	8

参照相关研究结果, 普遍认为平均沥青膜厚度的最佳范围为 $6\sim 8\mu\text{m}$ ^[17], 即平均沥青膜厚度若低于 $6\mu\text{m}$, 则沥青混合料易于老化而不能保证其耐久性, 若高于 $8\mu\text{m}$, 则经济上不合理, 且沥青混合料由于自由沥青过多在使用后(特别在高温炎热的气候条件下)容易造成路面泛油这一不利后果。如果取沥青膜厚为 $7\mu\text{m}$, 则估算沥青用量为4.7%, 折合成乳液用量为7.87%, 初始乳液用量可取8%。

2、马歇尔试验

由于乳化沥青是一种含水的粘结材料, 因而具有不同于普通热沥青的特性, 这些特性决定了用乳化沥青铺筑的路面具有与热拌沥青混合料铺筑的路面不同的形成机理, 因此在试验方法中也需要考虑其特性采取相应的成型和养护措施, 尽可能模拟现场的实际情况, 使室内试验结果具有指导现场施工的作用。本试验以3#乳化沥青为例设计最佳乳液用量。

乳化沥青的马歇尔稳定度试验方法修正的要点在于“试件的击实和养生”、试件的试验条件以及试件拌和用水的确定, 具体修正如下^[8]:

a、一组试样采用6个试件, 常温试件与高温试件各3个。常温试件在室温下($15^{\circ}\text{C}\sim 25^{\circ}\text{C}$)模内和模外分别养生24h, 然后在 20°C 条件下试压; 高温试件在 110°C 烘箱中于模内养生24h, 脱模后在室内静置24h, 然后在 60°C 的条件下试压。

b、试件的拌和用水量是总用水量减去乳化沥青中的水和矿料中的水, 对于密级配混合料, 建议的总用水量为5.5%~7.0%, 在本次试验中总用水量为5.5%。

c、每个试件在制作时, 上、下两面各击实50次, 并且分为两遍击实。首先在混合料试件拌制入模时, 于试件上下两面各击实25次, 经过24h模内养生后, 在养护温度条件下, 再于上下两面各补击25次, 然后冷却脱模并在室温下养生24h。

d、高温养生试件在 $60\pm 1^{\circ}\text{C}$ 的恒温水槽中浸泡30分钟后进行试验, 常温养生试件置于 $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ 密闭恒温箱中30分钟后进行试验。

上述修正要点是基于对乳化沥青混合料性能的研究和试验路面施工成型的实际情况提出来的。乳化沥青混合料是用冷拌冷铺方法施工的, 在刚经过碾压之后, 由于乳液中的沥青微粒只是发生吸附聚结, 并没有发挥粘结的作用, 其中又有一定的水分, 路面强度比较低。但是, 由于新铺路面必

须在短期内开放交通经过一段时间的行车碾压之后，其中的水分不断蒸发，乳化沥青混合料被进一步压实，其强度和密实度不断增长直至达到“后期”强度，因此，采用 20℃ 条件下的稳定度作为乳化沥青混凝土混合料初期强度的评定指标，而经过 110℃ 高温养生的试件在 60℃ 条件下的稳定度则作为乳化沥青混合料后期强度的评价指标。

下表是有关文献建议的技术指标^{[8][18]}：

表 4.15 建议的马歇尔试验技术指标

项目	单位	修正马歇尔试验		标准马歇尔试验
		常温试件	高温试件	其他等级公路
击实次数	次	50	50	50
稳定度	kN	>2.0	>4.0	>5.0
流值	(1/10)mm	20~45	20~40	20~45
空隙率	%		5~8	3~6
饱和度	%		60~75	70~85
密度（湿）	g/cm ³	>2.20		
密度（干）	g/cm ³		>2.25	

1) 常温修正马歇尔试验

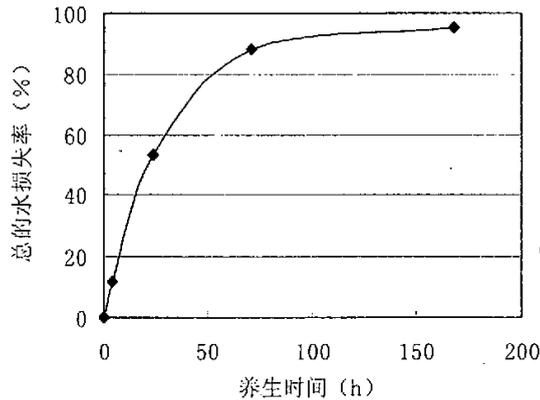


图 4-8 失水率随常温养生时间变化图

由上图可知，常温下养生的试件，在试件成型 4~5 天后大部分的水消失，剩余的水在随后几天逐渐消失，但好像不完全消失。24h 后的失水率为 52% 左右，因此含水量仍比较大，强度也不够高，因此不宜采用水中重法测定其密度。此时可用游标卡尺测量试件的高度和直径，用普通天平称取试件在空气中的质量，再计算其体积和密度。这样测得的结果与水中重法测得结果可以用下式进行换算：

$$\rho_w = \rho_s \cdot C$$

ρ_w ——水中重法测得的密度 (g/cm³)；

ρ_s ——测量试件尺寸计算的密度 (g/cm³)；

C——换算系数，对于密级配混合料取 1.02，对于粗级配混合料取 1.03。

图 4-9 是本次常温修正马歇尔试验的曲线图：

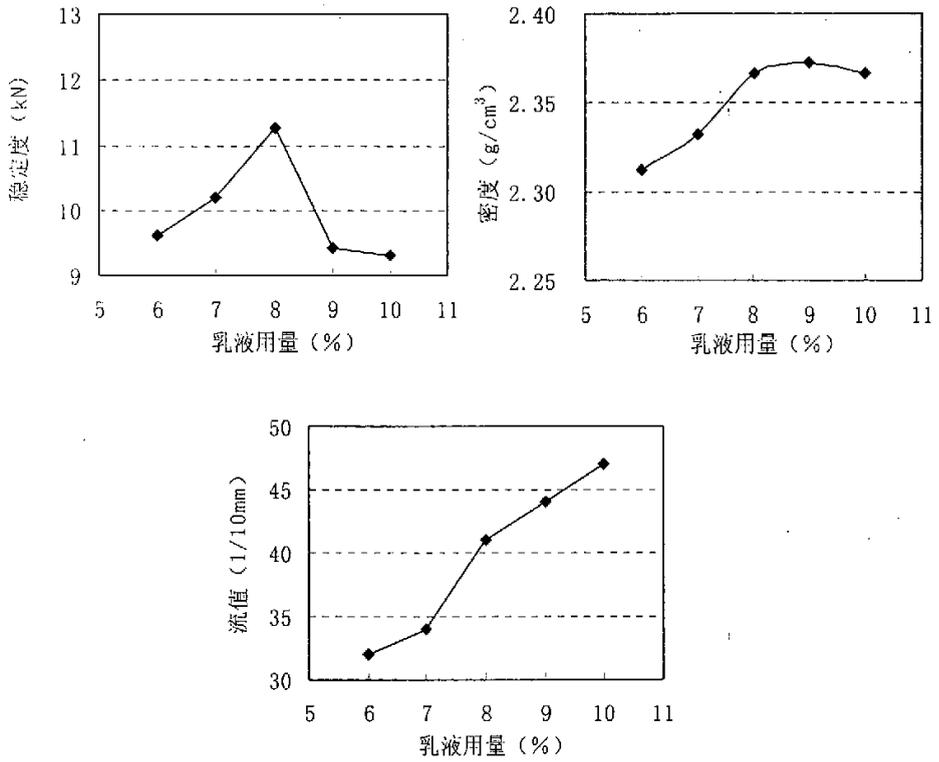
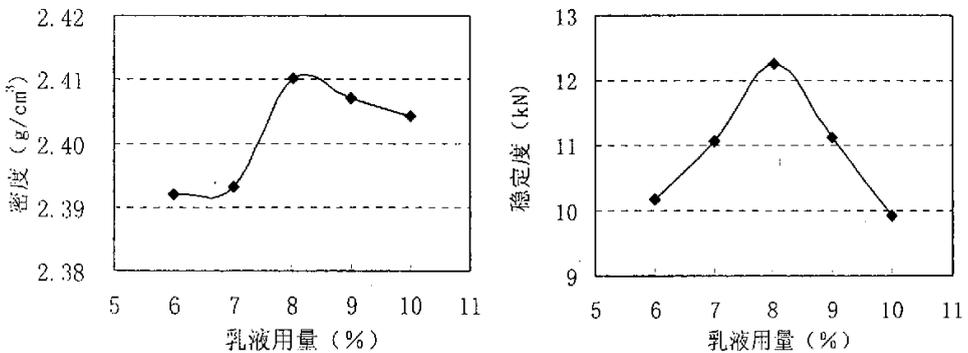


图 4-9 常温修正马歇尔试验结果曲线图

将试验结果对照表 4.15, 可以得出合适的乳化沥青用量范围为 6.0%~9.2%。

2) 高温修正马歇尔试验

图 4-10 是本次高温修正马歇尔试验的曲线图:



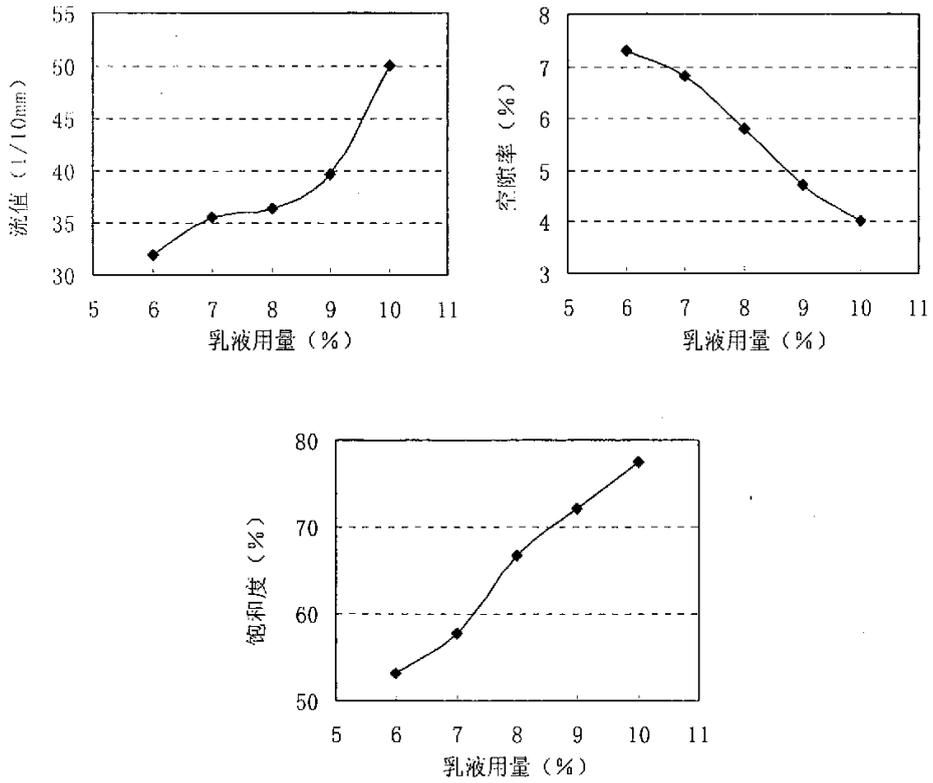
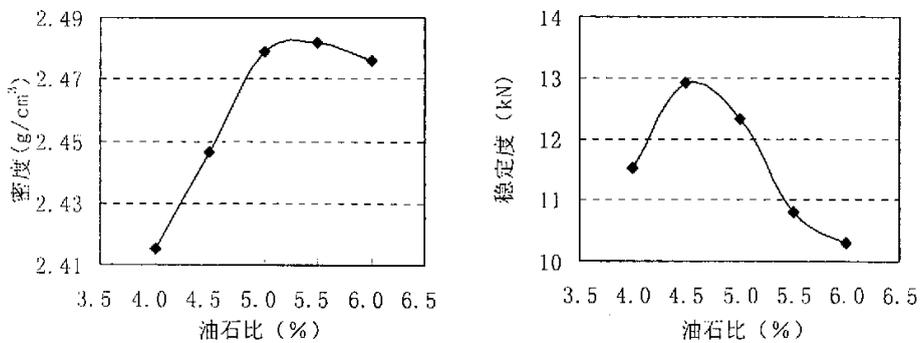


图 4-10 高温修正马歇尔试验结果曲线图

3) 标准马歇尔试验

本研究中的标准马歇尔试验采用冷拌沥青混合料所用级配，沥青采用制备乳化沥青的基质沥青即埃索 AH-70 号沥青，试验结果见下图：



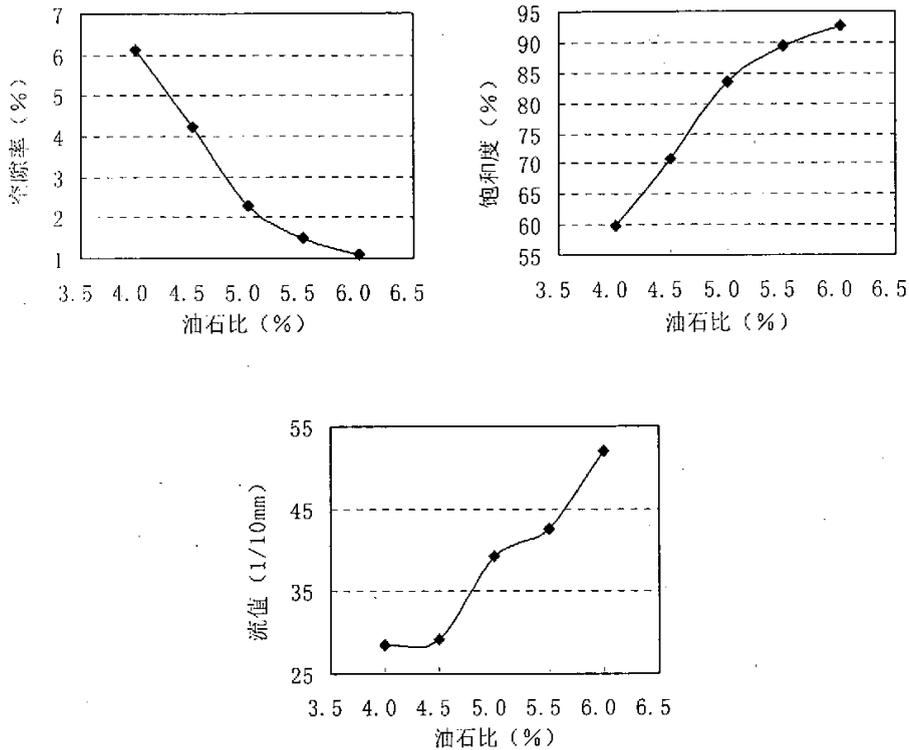


图 4-11 标准马歇尔试验结果曲线图

将试验结果对照表 4.15, 根据公路沥青路面技术规范附录 B.4 热沥青混合料最佳油石比确定的方法求得最佳油石比为 4.7%。

4) 修正马歇尔试验结果分析

(1) 乳化沥青用量的确定

最佳乳化沥青用量的确定可以参照公路沥青路面技术规范附录 B.4 热沥青混合料最佳油石比确定的方法确定冷拌沥青混合料最佳乳化沥青用量:

①由图 4-10 中曲线及沥青混合料技术标准可知, 密度最大值的沥青 $a_1=8.1\%$, 稳定度最大值的沥青用量 $a_2=8\%$, 相应于空隙率范围 $5\% \sim 8\%$ 的中值的沥青用量 $a_3=7.4\%$, 则最佳乳化沥青用量的初始值 $OAC_1=(a_1+a_2+a_3)/3=(8.1+8.0+7.4)\%/3=7.8\%$ 。

②由图中曲线可知, 各项指标均符合沥青混合料技术标准的乳化沥青用量范围为: $7.3\% \sim 8.8\%$, 即 $OAC_{min}=7.3\%$, $OAC_{max}=8.8\%$ 则中值 $OAC_2=(OAC_{min}+OAC_{max})/2=(7.3\%+8.8\%)/2=8.1\%$ 。

③按最佳初始乳化沥青用量的值 OAC_1 在上图中求取相应的各项指标值, 均符合规范规定的马歇尔设计配合比技术标准, 由 OAC_1 和 OAC_2 综合决定最佳乳化沥青用量 OAC , 初步确定最佳乳化沥青用量约为 8.0% , 折合成油石比为 4.8% 。

可以看出冷拌沥青混合料采用热沥青混合料的马歇尔试验方法得到的结果与热沥青混合料的结果相差不大。

(2) 冷拌沥青混合料空隙率分析

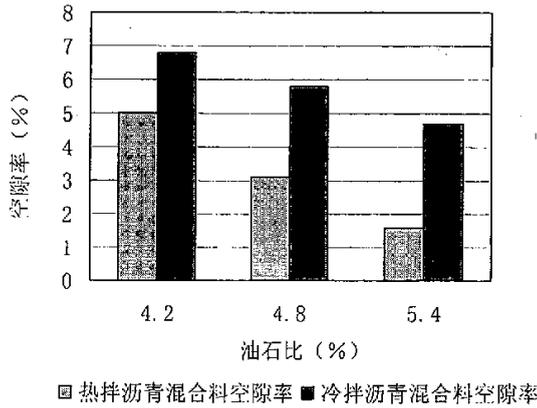


图 4-12 冷、热拌沥青混合料空隙率比较

以乳液用量 8% 即油石比 4.8 为例，冷拌沥青混合料的空隙率为 5.8%，而对应相同级配的热拌沥青混合料为 3.1% 左右，由此可知，冷拌沥青混合料由于混合料中水的存在，其空隙率普遍比热拌沥青混合料大，如果路面压实度为 96%，分别对应到路面空隙率为 9.6%、7.0%。在国外已经应用的实体工程中一般测得的冷拌沥青混合料的空隙率均在 10% 以上。

(3) 冷拌沥青混合料的强度分析

经过 24 小时常温养生的试件，其失水率为 52% 左右，类似于冷拌沥青混合料早期的情况，因此采用 20℃ 条件下的稳定度作为乳化沥青混合料初期强度的评定指标。而经过 110℃ 高温养生 24 小时的试件，其失水率达到了 95% 以上，且压实度较高，比较接近路面后期的情况，因而将经过 110℃ 高温养生的试件在 60℃ 条件下的稳定度作为乳化沥青混合料后期强度的评价指标。

从修正马歇尔试验结果中可以看出，常温试件的稳定度最大值为 11.26kN，而高温试件的稳定度峰值为 12.25kN，低值也达到了 9.90kN 以上，试件的密度也普遍得到了提高，可见，路面在一定时期内其压实度和强度是一个不断增长的过程。

同样，将高温修正马歇尔试验同热沥青标准马歇尔试验的结果进行对比可以发现，由于热沥青混合料中没有水所以试件得到了进一步的压实，试件的密实度和稳定度均有所提高。这表明，在一般情况下，即使在冷拌沥青混合料成型的后期，其强度和密实度也没有达到理论的最佳水平。如果能在冷拌沥青混合料摊铺早期适当时机对其进行适当碾压则将有利于提高后期的压实度和强度。

3、浸水马歇尔试验

无论是热沥青混合料还是冷拌沥青混合料，水损害都是一个不容忽视的问题。水损害破坏的作用机理主要依据是粘附理论，也就是说由于水的影响使得沥青与集料之间的粘附性降低。所以对冷拌沥青混合料进行水稳定性检验是必要的。

1、试验过程

分别用基质沥青、1#、2#、3# 普通乳化沥青及改性乳化沥青按最佳沥青用量制作马歇尔试件，进行浸水马歇尔试验。试件分为两组，其中一组试件在 60℃ 水浴中保持 30min 后进行试验，另一组试件在 60℃ 水浴中保温 48h 后进行试验。试验结果见下表：

表 4.16 浸水马歇尔试验结果

沥青	基质沥青	1# 普通乳化沥青	2# 普通乳化沥青	3# 普通乳化沥青	改性乳化沥青
浸水残留稳定度 (%)	82.3	78.7	75.6	77.2	81.7

2、试验结果分析

(1) 1#、2#、3# 普通乳化沥青混合料的浸水残留稳定度值相差不大，这是因为这三种乳化沥青采用同一种基质沥青制作而成。

(2) 改性乳化沥青混合料的残留稳定度值较前三种乳化沥青混合料的值明显提高了很多，这表明加入 SBR 改性剂后的乳化沥青，可以改善冷拌沥青混合料的水稳定性。

4、飞散试验

飞散试验可以用以评价由于沥青用量或粘结性不足，在交通荷载作用下，路面表面集料脱落而散失的程度，以马歇尔试件在洛杉矶试验机旋转撞击规定的次数，混合料散落材料的质量的百分率表示。本试验以 3# 乳化沥青为例采用高温修正马歇尔方法成型的试件，试件在 20℃ 的恒温水浴中养生 20h。可以用来检验冷拌沥青混合料的最小沥青用量。具体试验结果如下表：

表 4.17 不同沥青用量下的飞散试验结果

乳液用量 (%)	6	7	8	9	10
飞散损失 (%)	10.3	7.4	5.7	4.0	3.9

绘制不同沥青用量与飞散损失的关系曲线图，如图 4-13 所示：

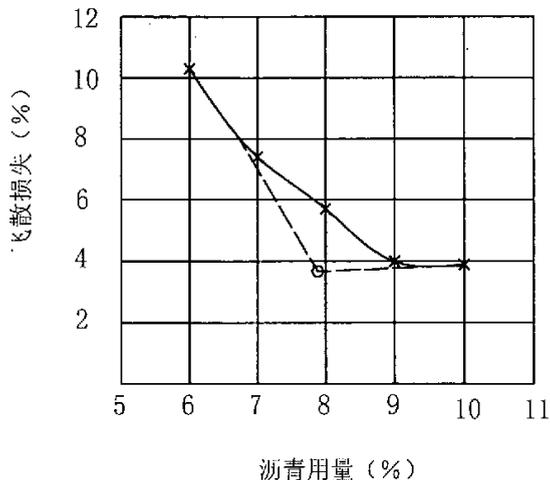


图 4-13 冷拌沥青混合料飞散试验图

根据图中的曲线可知最小沥青用量约为 7.9%。

4.5.7.2 国外旋转压实法

自 SHRP 计划引入旋转压实仪 (SGC) 以来，由于旋转压实仪的压实情况更能模拟路面的实际情况，已经在各国道路界普遍被采用。国外一些研究冷拌沥青混合料的机构认为旋转压实仪也适用于冷拌沥青混合料，但也有人提出将其成型试件的模子进行专门的改进，以利于冷拌沥青混合料中水的排出。利用旋转压实仪成型试件的方法来确定冷拌沥青混合料最佳沥青用量有两种标准，一种就是稳定度曲线最高点所对应的沥青用量为最佳沥青用量，另外一种方法就是同 superpave 设计法，对应空隙率为 4% 的沥青用量为最佳沥青用量，通常这两种标准决定的沥青用量非常接近，但在冷拌沥青混合料中，通常会采用第一种标准，即稳定度最大对应的沥青用量为最佳沥青用量，这是因为一般对于冷拌沥青混合料的设计旋转次数采用 30 次，而 30 次很难将空隙率压实到 4%。

关于试件的旋转次数，争议比较大的在 N_{initial} ，因为很多人认为 N_{initial} 并不适用于冷拌沥青混合

料, 而 N_{design} 一般认为在 30~75 次之间, 这个次数主要取决于冷拌沥青混合料的硬度, 至于 N_{max} 通常在 200 次左右。本次试验旋转次数为 30 次。

关于试件的养生世界各地方法不一, 国外某文献^[19]采用下面三种养生条件来模拟不同时期路面的实际情况。

- ◆ 在 25℃ 下养生 4h, 用于模拟路面现场施工 1 天后的强度;
- ◆ 在 25℃ 下养生 24h, 用于模拟路面现场施工 4~7 天后的强度;
- ◆ 在 60℃ 下养生 48h, 用于模拟路面实际最终所达到的强度。

之所以要分为上述三种情况来测定强度主要是用来评价冷拌沥青混合料不同时期的强度发展情况。下图是不同养生情况下的稳定度值变化曲线图。

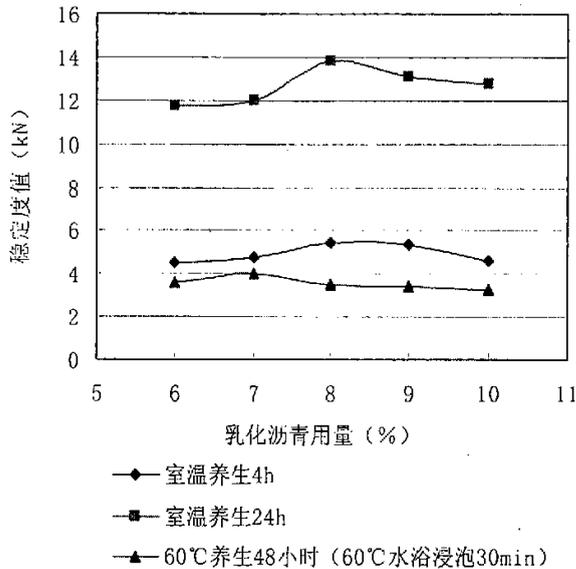


图 4-14 不同时期的冷拌沥青混合料稳定度值

由上图可以得出如下几个结论:

1、图中给出了室温养生 4h 与 24h 后的试件在室温下测得的稳定度值随沥青用量的变化曲线以及 60℃ 下养生 48h 的试件在 60℃ 的水浴中浸泡了约 30 分钟后测定的稳定度随沥青用量的变化曲线, 60℃ 下养生 48h 的试件在室温下的稳定度值由于强度很低, 无法测得数据;

2、不同时期的稳定度峰值所对应的乳液用量不尽相同, 在 25℃ 下养生 4h 和在 25℃ 下养生 24h 的混合料稳定度峰值出现在乳液用量为 8% 左右, 而在 60℃ 下养生 48h 情况下养生的试件稳定度最大值出现在乳液用量为 7% 左右;

3、室温养生 4h 的试件的稳定度值是用来模拟冷拌沥青混合料现场施工 1 天后的强度, 室温养生 24h 的试件稳定度用于模拟路面现场施工 4~7 天后的强度, 在 60℃ 下养生 48h, 用于模拟路面实际最终所达到的强度, 从图中曲线可以看出冷拌沥青混合料的强度是个随着养生时间增长的过程; 而 60℃ 下养生 48h 的试件在 60℃ 的水浴中浸泡了约 30 分钟稳定度只有 3kN~3.9 kN (同种材料的热拌沥青混合料的稳定度 10.2 kN~13 kN), 这说明虽然冷拌沥青混合料在施工初期具有一定的强度, 且随着时间的增长强度在增加, 但是它无法达到热拌沥青混合料的强度;

4、最佳乳化沥青用量可以取三种养生条件下稳定度对应沥青用量的平均值, 即 7.7%。

4.6 本章小结

本章主要通过材料选择确定 AC-13I 作为本次研究的试验级配, 通过裹覆试验、粘附性试验、工作可行性等一系列试验选择第三章所述研究开发的 3# 乳化沥青进行配合比试验设计, 主要得出如下几个结论:

1、用修正马歇尔试验设计的最佳乳液用量为 8%, 折合油石比为 4.8%, 而同级配的热沥青混合料设计的最佳油石比为 4.7%, 两者相差不大;

2、冷拌沥青混合料的高温养生马歇尔试件空隙率在 6% 左右, 而现场空隙率一般在 10% 左右, 它与热沥青混合料有较大的差异;

3、浸水马歇尔试验、飞散试验可作为冷拌沥青混合料最佳沥青用量的验证性试验。

第五章 冷拌沥青混合料性能试验研究

冷拌沥青混合料作为结构层可能会出现一些问题，主要是因为其初期的强度比较低并且达到完全强度的时间比较长，另外，在冷拌沥青混合料的强度成熟之前容易因为环境因素而产生早期破坏。针对冷拌沥青混合料存在的这些缺点，国外开展了一些以提高其早期强度为目的的研究，其中一种做法是在冷拌沥青混合料中参加一定量的水泥，这样既增加了填充料，又利用了水泥水化强度高的特点，同时水泥吸附混合料中的水分，加速乳化沥青破乳。水泥水化物和沥青交织裹覆骨料，形成一个交叉的空间立体网络。研究表明，这种方法对于乳化沥青混合料的早期强度的提高效果明显，并且可以改善混合料其它方面的性能。还有一种做法就是使用改性乳化沥青。本章试验研究借鉴国外已有研究成果结合自身课题的实际情况，拟从马歇尔稳定度、劈裂强度试验、浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验等来分析加入不同剂量水泥对冷拌沥青混合料强度、低温抗裂性及水稳定性等路用性能的影响。

国外有关资料^[15]显示，进行结构性测试的试件需在 60℃烘箱中养生 3 天。本章试验借鉴国外经验对进行冷拌沥青混合料路用性能试验的试件采用 60℃烘箱中养生 3 天。为了了解乳化沥青沥青种类、水泥对冷拌沥青混合料的影响，对冷拌沥青混合料共进行了 5 组混合料试验，从而为冷拌沥青混合料应用到实际提供了试验依据。下文提及的混合料名称所代表的含义如下：

- A 混合料——不加水泥+3#乳化沥青；
- B 混合料——加 1%水泥+3#乳化沥青；
- C 混合料——加 2%水泥+3#乳化沥青；
- D 混合料——加 3%水泥+3#乳化沥青；
- E 混合料——不加水泥+SBR 改性乳化沥青；
- F 混合料——同种级配的热沥青混合料。

5.1 强度性能试验

本研究通过进一步修正的马歇尔试验、单轴压缩试验、劈裂强度试验测定沥青混合料的早期强度、后期强度、抗压强度、劈裂强度、劈裂劲度模量。

5.1.1 进一步修正马歇尔试验

目前已有的乳化沥青混合料的研究都按照适于乳化沥青混合料特点的修正马歇尔试验方法进行，较少考虑加入水泥对混合料的影响。

修正马歇尔试验方法要求一组试件在常温下养生，另外一组试件在 110℃下高温养生，以常温养生试件的马歇尔稳定度作为路面早期强度的评价，以 110℃高温养生条件下试件的马歇尔稳定度作为路面后期强度的评价。但水泥水化有一定的温度要求，一般情况下随着养生温度的提高，水泥水化速度加快，但当温度达到 110℃的高温时，反而会遏制水泥的水化反应，使其只能达到填充作用而没有起到粘结的作用，不能反映水泥对冷拌沥青混合料的后期的强度影响。

此外修正马歇尔试验要求试件分两次击实，一次为混合料拌制入模时，一次为模内养生 24h 以后。这个过程较好地模拟了实际路面的强度形成情况。但是在混合料中加入水泥后，混合料一开始与预湿水拌和，水泥即与水接触发生水化反应，同时加速乳化沥青的破乳，使冷拌沥青混合料的强度形成时间大为缩短，而且水泥水化有一定的凝结时间，例如本次试验采用的水泥为 325# 水泥，

其初凝时间为 3 小时 55 分, 终凝时间为 5 小时, 所以对于 24h 后进行第二次击实对加入水泥的冷拌沥青混合料是不合理的, 因为这样会把形成一定强度的水泥石击碎, 破坏水泥与石料间的粘结, 降低水泥对冷拌沥青混合料整体强度的改善作用。

针对上述特点, 对修正马歇尔进行进一步修正^[20], 进一步修正的马歇尔试验方法主要修正之处主要有如下两点:

1) 每组采用 6 个试件, 其中 3 个放在室温条件下养生, 试件在试模内养生 3.5 小时后进行第二次击实, 击实后脱模, 在试模外养生 45 小时, 然后在 20℃ 条件下试压; 另外 3 个试件放在 60℃ 恒温恒湿箱内养生 3.5 小时后进行第二次击实, 击实完冷却脱模, 模外养生 69 小时, 然后在 60℃ 的条件下试压。

2) 每个试件在制作时, 上下两面击实并分两次进行, 第一次击实在混合料拌制入模时进行, 第二次击实在水泥初凝时进行, 击实次数各为 50 次, 第二次击实后将试件脱模养生。

此外, 对于加料方式, 国内曾有人进行过研究, 建议的加料方式为: 将水泥与矿粉拌和均匀后加入混合料中, 这种加料方式不但工序简单, 而且混合料性能最好。对于拥有较好设备的单位, 建议施工时的矿料中先加水泥和矿粉, 后加乳化沥青, 在拌和设备比较落后, 路面施工只能实行人工路拌的地区, 建议采用先将矿料与乳液拌和均匀再加入水泥与矿粉的施工方法, 以保证施工质量^[20]。

为了增强试验的可比性, 不加水泥的试件也按进一步修正马歇尔试验方法成型。其试验结果如下:

表 5.1 进一步修正马歇尔试验稳定度结果

材料类型	早期稳定度 (kN)	后期稳定度 (kN)	后期稳定度 (kN) (浸水)
A	9.8	12.4	3.5
B	13.6	16.7	6.2
C	15.7	—	11.3
D	16.8	—	13.4
E	11.2	14.8	5.8

从上表试验数据可以看出:

(1) 加入水泥明显提高了冷拌沥青混合料的早期强度, 按进一步修正马歇尔试验方法对混合料进行 60℃ 高温养生, 因为水泥水化完全, 其对混合料的后期高温稳定性的改善作用也能充分体现出来, 仅加入 1% 水泥就能将混合料的后期高温稳定性提高 77%;

(2) 由上表可知冷拌沥青混合料的稳定度值随着养生温度的升高及时间的增加而增大, 在测定后期稳定度时如果不在 60℃ 水浴中浸泡 30min, 加入 2%、3% 水泥的冷拌沥青混合料试件很硬, 无法读得稳定度值;

(3) E 组混合料的早期、后期稳定度均得到了较大的提高, 其中后期的稳定度较 A 组混合料提高了 66% 左右, 这说明加入 3% SBR 胶乳可以增加冷拌沥青混合料的强度, 提高其高温稳定性能。

(4) 将 A 组混合料的试验数据与图 4-10 比较, 高温 110℃ 养生的试件浸水 30min 测得的稳定度为 12.3kN, 而 60℃ 养生的试件浸水 30min 后测得的稳定度仅为 3.5kN, 试验结果之所以有这么大差距主要是因为 110℃ 下进行第二次击实更容易使试件密实。下图为 A 组混合料在不同养生条件下进行第二次击实后的空隙率比较图。

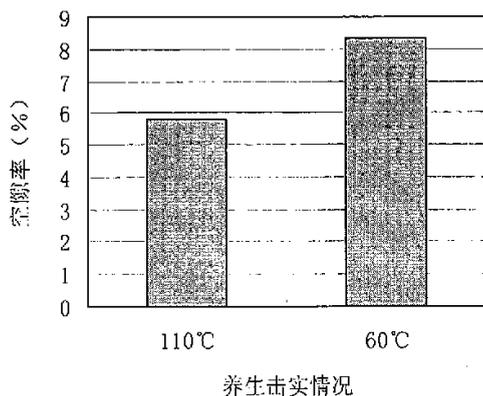


图 5-1A 组混合料在不同养生条件下的空隙率比较图

5.1.2 单轴压缩试验

试件采用静压法成型，试件尺寸为直径 100mm，高度为 100mm 的圆柱体试件，试件在 60°C 烘箱中养生 3 天，试验温度采用 20°C，5 组混合料的抗压强度试验结果如表 5.2 及图 5-2 所示：

表 5.2 20°C 单轴压缩试验结果

材料类型	抗压强度/MPa
A	3.69
B	4.97
C	5.44
D	5.70
E	4.20

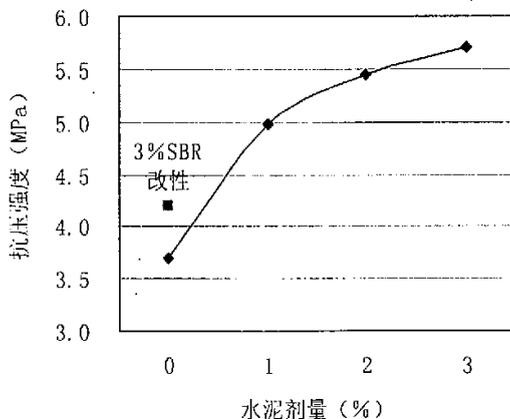


图 5-2 抗压强度对比图

从抗压试验结果可以看出：

- (1) A 组混合料的抗压强度为 3.69 MPa，E 组混合料的抗压强度为 4.20 MPa，E 组混合料较 A 组混合料提高了将近 14%，说明加入 SBR 胶乳可以提高混合料的承载力；
- (2) 前四组混合料的抗压强度随着水泥用量的增加而增大，说明水泥有助于提高冷拌沥青混合

料的抗压强度。

5.1.3 劈裂强度试验

5组混合料分别采用马歇尔击实仪以最佳沥青用量成型试件，试件在60℃烘箱中养生3天，试验温度采用25℃。

表 5.3 劈裂强度试验结果 (25℃)

材料类型	破坏荷载/kN	水平变形/mm	劈裂强度/MPa	劲度模量/MPa
A	5.4	0.27	0.53	207.51
B	6.6	0.18	0.66	408.77
C	7.4	0.13	0.74	577.11
D	8.3	0.13	0.82	644.70
E	5.7	0.21	0.57	288.02

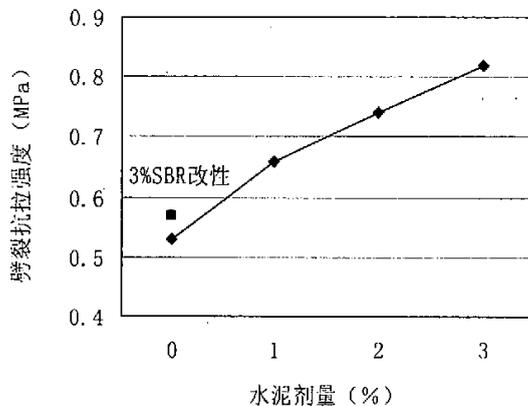


图 5-3 劈裂强度比较图

从劈裂强度试验结果可以看出：

- (1) 前4组沥青混合料的劈裂强度是随着水泥用量的增加而逐渐增大，A组混合料劈裂抗拉强度最小，D组混合料劈裂抗拉强度最大；
- (2) E组冷拌沥青混合料的劈裂抗拉强度略高于A组冷拌沥青混合料，比A组冷拌沥青混合料仅提高8%左右，说明3%SBR改性乳化沥青对混合料的抗裂性能有所改善，但效果不明显；
- (3) 5组沥青混合料中，D组混合料的抗劈裂性能最优。

5.2 水稳定性能

沥青混合料的水稳定性是指抵抗受水侵蚀后逐渐产生的沥青膜剥落、掉粒、坑槽等破坏的能力。沥青混合料在泡水的情况下强度降低越小说明水稳定性越好。本研究采用浸水马歇尔试验和冻融劈裂强度试验评价沥青混合料的水稳定性。

5.2.1 浸水马歇尔试验

进行浸水马歇尔试验时, 沥青混合料分别以最佳乳液用量成型试件, 试件在 60℃烘箱中养生 3 天。试件分为两组, 每组 3 个平行试件, 一组在 60℃恒温水槽中保温 48h 后测定其浸水稳定度, 另一组以标准马歇尔试验方法测定其标准马歇尔稳定度, 然后计算残留稳定度。结果如下表所示:

表 5.4 浸水马歇尔试验结果

材料类型	浸水稳定度/kN	浸水流值/0.1mm	残留稳定度/%
A	1.8	4.0	51.4
B	4.8	3.8	77.4
C	8.8	2.2	77.9
D	10.5	2.1	78.4
E	4.8	2.0	82.8

5.2.2 冻融劈裂试验

冻融劈裂试验主要用来评价冷拌沥青混合料抗水损害能力^[21], 试件按最佳乳液用量成型, 试件分为两组, 每组 4 个平行试件, 一组在 25℃水浴中浸泡 2h 后测试劈裂强度 R_{T1} ; 另外一组试件先在 25℃水中浸泡 2h, 然后在 0.09MPa 浸水抽真空 15min, 再在 -18℃冰箱中置放 16h, 而后放到 60℃水浴中恒温 24h, 再放到 25℃水中浸泡 2h 后测试其劈裂强度 R_{T2} ; 取出试件立即进行劈裂强度试验, 求得最大荷载, 冻融劈裂抗拉强度比按式 5.1 计算。5 组沥青混合料冻融劈裂强度试验结果如表 5.5 所示。

$$TSR = \frac{R_{T2}}{R_{T1}} \times 100 \quad (5.1)$$

式中: TSR ——冻融劈裂强度比, %;

R_{T2} ——冻融循环后第二组试件的劈裂抗拉强度, MPa;

R_{T1} ——未冻融循环的第一组试件的劈裂抗拉强度, MPa。

表 5.5 冻融劈裂强度试验结果

材料类型	R_{T1} /MPa	R_{T2} /MPa	TSR/%
A	0.53	0.18	34.0
B	0.66	0.47	71.2
C	0.74	0.55	74.3
D	0.82	0.62	75.6
E	0.57	0.45	78.9

5.2.3 试验结果分析

从浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验可以得出如下结论:

(1) A 组沥青混合料的浸水马歇尔稳定度为 1.8kN, 浸水残留稳定度仅为 51.4%, 远小于规范要求 ($\geq 75\%$), 而劈裂抗拉强度比仅为 34%, 说明不加水泥的冷拌沥青混合料水稳定性很差, 不

能满足规范要求:

(2) B、C、D、E 组沥青混合料的浸水残留稳定度均大于规范要求 ($\geq 75\%$), 冻融劈裂强度均在 0.47MPa 以上, 劈裂抗拉强度比 TSR 都大于 71% , 根据美国 Lottman 试验残留劈裂强度比不低于 70% , 说明水泥可以改善冷拌沥青混合料的水稳定性;

(3) A、B、C、D 四组冷拌沥青混合料的浸水残留稳定度和劈裂抗拉强度比随着水泥用量的增加而加大, 且只加入 1% 水泥, 就可以使得浸水残留稳定度提高 51% , 劈裂抗拉强度比提高 1 倍多, 但是随着水泥用量的增加浸水残留稳定度及劈裂抗拉强度比增加幅度并不大;

(4) E 组冷拌沥青混合料浸水残留稳定度及劈裂抗拉强度比最大, 说明 SBR 改性剂能大大提高冷拌沥青混合料的水稳定性。

(5) 将 A 组混合料的浸水马歇尔试验数据与表 4.16 比较, 110°C 养生的试件浸水残留稳定度为 78.7% , 而 60°C 养生的试件浸水残留稳定度为 51.4% , 仅为前者 65% 左右, 这主要是因为 110°C 下进行第二次击实更容易使得试件密实。

5.3 低温性能

众所周知, 沥青混合料的低温抗裂性能直接与沥青路面的开裂相关, 因而是沥青混合料最重要的使用性能。而沥青混凝土的低温变形能力在很大程度上取决于沥青材料的低温性能、沥青与矿料的粘结强度、级配类型以及沥青混合料的均匀性。国内外用于研究沥青混合料低温抗裂性能的方法有很多, 本试验研究采用劈裂试验来评价冷拌沥青混合料的低温性能。

5.3.1 试验基本条件及要求

1、采用从美国引进的 MTS-810 材料试验系统进行试验研究, 这是一套精密的闭环伺服液压系统, 通过计算机对整个试验过程进行自动控制, 试验资料由计算机自动采集、存贮和处理。另外 MTS 还有专门配备的温控系统, 温控精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。图 5-3 是 MTS-810 材料试验系统的外观。

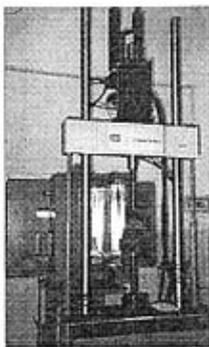


图 5-3 MTS-810 材料试验机

- 2、试件采用马歇尔试件;
- 3、加载速率采用 $1\text{mm}/\text{min}$;
- 4、试验温度采用 0°C

表 5.6 劈裂强度试验结果 (0℃)

材料类型	劈裂强度/MPa	水平变形/mm	破坏应变 (10^{-3})	劲度模量 /MPa
A	2.38	0.13	2.65	1748.53
B	1.76	0.11	2.46	1240.31
C	1.95	0.10	2.15	1556.45
D	1.91	0.10	2.00	1660.03
E	2.52	0.14	2.87	1516.41

5.3.2 试验结果分析

从 0℃ 劈裂强度试验结果可以看出：

(1) 前 4 组沥青混合料的破坏应变是随着水泥用量的增加呈现递减趋势，其中 A 组混合料劈裂破坏应变最大，D 组混合料劈裂破坏应变最小；

(2) E 组冷拌沥青混合料的破坏应变高于前四组冷拌沥青混合料，说明 3% SBR 改性乳化沥青对混合料的低温抗裂性能有较好的改善作用，且效果很明显；

(3) 5 组沥青混合料中，E 的低温破坏应变最大，抗裂性能最优。

5.4 本章小结

本章通过马歇尔稳定度试验、单轴压缩试验、劈裂试验、浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验研究了普通冷拌沥青混合料、加水泥的冷拌沥青混合料以及改性冷拌沥青混合料的路用性能试验，得出如下结论：

(1) 五组沥青混合料中，D 组混合料的早期强度、后期强度、抗压强度、25℃ 劈裂强度均为最大，说明水泥能提高冷拌沥青混合料的强度；

(2) 五组混合料中 E 组混合料低温性能和水稳定性均为最优，说明 3% SBR 胶乳改性能够显著改善混合料的低温性能和水稳定性；

(3) 普通冷拌沥青混合料无论早期强度、后期强度、抗压强度均为最差，对于冷拌沥青混合料应用到低等级道路中的面层，考虑到节约造价等因素，推荐使用 1% 水泥的冷拌沥青混合料。

第六章 冷拌沥青混合料的社会经济效益分析

冷拌沥青混合料相对于传统的热拌沥青混合料来说,有明显的社会效益和经济效益。从社会效益来讲节约能源,减少环境污染等,从经济效益上来讲可以节省资金。

6.1 冷拌沥青混合料的经济效益

6.1.1 冷拌沥青混合料的成本估算

1、主要原材料及其单价

通过计算对5种冷拌沥青混合料和热沥青混合料(编号同上)的材料成本进行对比,由于是进行成本估算,所以表6.1提供的原材料单价为估算单价。

表 6.1 原材料及其单价

原材料种类	普通沥青	乳化沥青沥青	改性乳化沥青	集料	矿粉	水泥
单价(元/t)	2200	1800	3000	50	120	280

2、原材料成本估算

本研究中 AC-13I 处于路面的面层,设计厚度为4cm,计算每公里宽度为1m(体积为40m³)所需的沥青混合料原材料成本,然后进行比较,具体计算结果见表6.2。

表 6.2 每公里 1m 宽原材料成本清单及汇总

比较项目 混合料种类	沥青费用 /元	集料费用 /元	矿粉费用 /元	水泥费用 /元	原材料总 费用/元
A	13246	4369	552	—	18167
B	13289	4384	443	258	18374
C	13317	4393	333	518	18561
D	13378	4413	222	780	18793
E	22075	4369	552	—	26996
F	9757	4482	566	—	14805

注:上述费用的单位为每40m³沥青混合料

从上表的计算结果可以看出:

(1) 前四组冷拌沥青混合料的原材料总费用随着水泥用量的增加略有提高,但都较热沥青混合料高,这是因为乳化沥青的用量要比普通沥青多;

(2) E 组混合料为改性乳化沥青拌制的冷拌沥青混合料,其原材料总费用最高,这是因为改性乳化沥青的价格较乳化沥青、普通沥青高许多。

3、施工成本估算

沥青混合料施工包括拌和、运输和铺筑三个部分,所以施工成本包括这三部分的费用。施工费用中的人工工日和机械台班单价依据预算定额估算得出的。冷拌沥青混合料施工工艺与热沥青混合料不尽相同,所以施工成本也不相同。表6.3为每公里1m宽热沥青混合料施工费用计算结果,表6.4为冷拌沥青混合料的施工费用计算表。

表 6.3 每公里 1m 宽热沥青混合料施工成本清单及汇总

	施工配备项目	单位	单价 / 元	工作量	费用/元
拌和	人工	工日	30	7.12	214
	2m ³ 以内轮胎式装载机	台班	750	0.43	323
	100t/h 以内电动沥青拌和设备	台班	15000	0.22	3300
	4t 以内自卸汽车	台班	550	0.20	110
	2t/h 以内工业锅炉	台班	980	0.35	343
运输	沥青混合料运输第一个 1km (12t 以内)	台班	1350	0.53	716
	沥青混合料运输每增运 1km (12t 以内)	台班	180	0.08	274
铺筑	人工	工日	30	5.36	161
	6~8t 光轮压路机	台班	300	0.44	132
	12~15t 光轮压路机	台班	350	0.33	116
	6m 以内自找平沥青摊铺机	台班	2900	0.22	638
	9~16t 光轮压路机	台班	350	0.22	77
每 40m ³ 沥青混凝土施工总费用/元					6404

注：上述费用的单位为每 40m³ 沥青混合料，运距计算按 20 公里计。

表 6.4 每公里 1m 宽冷拌沥青混合料施工成本清单及汇总

	施工配备项目	单位	单价 / 元	工作量	费用/元
拌和	人工	工日	30	7.12	214
	2m ³ 以内轮胎式装载机	台班	750	0.43	323
	25m ³ /h 以内混凝土搅拌站	台班	500	0.49	245
	4t 以内自卸汽车	台班	550	0.20	110
运输	沥青混合料运输第一个 1km (12t 以内)	台班	1350	0.53	—
	沥青混合料运输每增运 1km (12t 以内)	台班	180	0.08	—
铺筑	人工	工日	30	5.36	161
	6~8t 光轮压路机	台班	280	0.44	123
	12~15t 光轮压路机	台班	350	0.33	116
	120kW 以内自行式平地机	台班	1200	0.24	288
每 40m ³ 沥青混凝土施工总费用/元					1580

注：上述费用的单位为每 40m³ 沥青混合料，冷拌沥青混合料采用现场拌和。

从上述施工成本估算看出，冷拌沥青混合料的施工成本远低于热沥青混合料的施工成本。

4、总成本估算

总成本包括沥青混合料原材料成本和施工成本两部分组成，五组冷拌沥青混合料和热沥青混合料的总费用见表 6.5，并列各组混合料每立方米的成本单价。

表 6.5 每公里 1m 宽原材料总成本费用及成本单价

比较项目 混合料种类	原材料成本 /元	施工成本 /元	总成本 /元	成本单价 /元/m ³
A	18167	1580	19747	494
B	18374	1580	19954	499
C	18561	1580	20141	504
D	18793	1580	20373	509
E	26996	1580	28576	714
F	14805	6404	21209	530

注：以上成本单价为直接工程费。

从上表可以看出：

(1) 前四组冷拌沥青混合料的成本单价低于热沥青混合料的成本单价，这主要是因为冷拌沥青混合料的施工成本远低于热沥青混合料的施工成本；

(2) E 组混合料的成本单价最高，主要是改性乳化沥青价格高的缘故。

纵上所述，冷拌沥青混合料（改性除外）的总成本费用低于热沥青混合料，具有较好的经济效益，如果再考虑按拆一座拌和设备、机械折旧费、能源、环境等方面的因素，冷拌沥青混合料的经济效益更显著，所以对于偏远地区、远离热拌和厂的地区的低等级道路及农村公路，冷拌沥青混合料具有广阔的应用前景，且具有显著的经济效益。

6.1.2 节约能源

采用热沥青修路时，一般需要消耗大量能源为沥青材料和矿料加热，而且在施工过程中，为了时刻保持沥青应有的温度，常常对沥青要进行重复加热与持续加温，在沥青的运输和使用过程中，沥青每倒运一次要加热一次，如果在施工中出现故障，或因气候、材料、人员等各种意外情况造成停工时，运到现场的沥青必须持续不断地进行保温，这就需要消耗大量的燃料，并且容易引起沥青材料的老化。如果不考虑上述影响因素，从理论上计算 1t 沥青从 18℃ 升温到 180℃ 需要 1t 燃煤，或用 1.2t 烧柴。而采用乳化沥青筑路时，只需在沥青乳化时一次加热，而且沥青加热的温度一般只要达到 120℃~140℃，仅此就比热沥青降低 50℃，因此生产 1t 乳化沥青只需 0.1t 燃煤，它比用热沥青可节约 90% 热能。

6.2 社会效益

因热沥青修路时，施工时现场常常要支锅熬油，工人们经常在烟雾缭绕的环境下进行操作，烧伤、烫伤、火灾等安全事故不同程度地时有发生。尤其在热沥青蒸汽中，含有致癌物质苯并(a)吡，危害工人的身体健康。盛夏的季节又是热沥青路面施工的最好时机。工人们常常头顶烈日，脚踩滚烫的热沥青混合料，施工条件相当艰苦，在这种条件下，工人们患呼吸道感染等疾病的明显增多。此外，热沥青释放的有害气体明显要比乳化沥青厂多，表 6.6 是从两个厂周围监测到一些有害气体的数据。

表 6.6 热沥青厂与乳化沥青厂周围环境监测比较

监测地点 检测内容	热沥青厂	乳化沥青厂	结果比较 (降低倍数)
苯并(a)吡	1.49×10^{-4}	2.0×10^{-5}	7.5
酚	3.14	0.023	136
总烃	22.27	2.5	9
苯	未检出	未检出	—
二甲苯	未检出	未检出	—

6.3 综合效益

由于乳化沥青的粘度比热沥青低，工作度好，便于拌和与喷洒，均匀地裹覆在骨料表面，保持骨料之间足够的自由沥青，但又不出现油包与泛油现象。还由于生产乳化沥青时，沥青加热温度低，加热时间短，较热沥青的热老化损失小（热沥青混合料中沥青的热老化损失达 50%）。初铺的路面不如热沥青的黑，但随着行车碾压，路面进一步被压实，路面越来越好。此外无论是酸性骨料还是碱性骨料都可以使用，从而扩大骨料来源，便于就地取材，显著降低工程造价。

虽然乳化沥青的价格比热沥青价格还要高（见表 6.7），但是发达国家的乳化沥青使用量很大，除了上述的因素外，还有是因为发达国家对保护环境与改善施工条件十分重视，对于污染环境与损害工人健康的现象要实行严格的限制，所以要算总帐，核算综合效益，采用乳化沥青的经济效益、社会效益、综合效益更为突出。

表 6.7 外国乳化沥青与热沥青价格表

国别	沥青每吨价格	乳化沥青每吨价格
瑞典	sek 1200	sek 1200
英国	T 88~95	T 90~120
以色列	US \$ 200	US \$ 250
南非	US \$ 170	US \$ 190
澳大利亚	澳元 400	澳元 400
新西兰	NI 450	NI 550

综上所述，冷拌沥青混合料不仅具有很好的经济效益，其社会效益、综合效益也非常突出，虽然它不能完全成为热沥青的替代品，但是对于偏远地区、远离热拌和厂的三、四等级道路及农村公路来说，冷拌沥青混合料具有显著的社会经济效益。

第七章 结论与展望

7.1 研究结论

本文参照国内外有关的文献资料,通过大量室内试验,对慢裂乳化沥青的研究开发及其应用于冷拌沥青混合料做了较为全面的分析,本文研究主要得出以下结论:

1、通过乳化剂的选择、乳化剂用量的确定、乳化剂水溶液 pH 值的确定,研究开发了适用于冷拌沥青混合料的乳化沥青,在此基础上研究开发了 SBR 胶乳的改性乳化沥青。

2、本试验研究表明 AC-13I 可作为冷拌沥青混合料的级配,其高温马歇尔试件的空隙率在 6% 左右,而现场空隙率一般都在 10% 左右,它与热沥青混合料有较大的差异。

3、浸水马歇尔试验、飞散试验可作为冷拌沥青混合料最佳沥青用量的验证试验。

4、水泥对冷拌沥青混合料的性能影响显著,与改性乳化沥青混合料相比,1%水泥的冷拌沥青混合料具有良好的路用性能,且费用相对较低。

5、对于偏远地区、远离热拌和厂等地方的低等级道路及农村公路,冷拌沥青混合料具有广阔的应用前景,且具有显著的社会经济效益。

7.2 尚待进一步研究的问题

虽然本文对使用于冷拌沥青混合料的乳化沥青、冷拌沥青混合料的配合比设计及冷拌沥青混合料路用性能及社会效益作了较系统的研究,但仍有一些工作有待进一步深入研究。

1、冷拌沥青混合料的级配研究有待进一步深入。

2、冷拌沥青混合料的施工性能及路用性能有待通过实体工程检验。

致 谢

拙文完成之际，也就是自己向硕士学习生活道别之时，蓦然回首间，才发现自己对母校已有了一份难以割舍的感情，庄严的大礼堂、挺拔的六朝松、古朴的宿舍楼乃至校园的一草一木，无不引起我无限的回味，当往事一幕幕浮现在眼前时，心中一股感激之情也油然而生。

首先要感谢我的导师倪富健教授，是他两年多来在学习上悉心的指导和生活中无私的关怀使我得以顺利地完论文。在两年多的研究生学习期间，恩师不仅教会我严谨求实、精益求精的研究作风，更教会我自信、自强的为人之道，所有的这些都将令我受益终生，永难忘怀。

同时也非常感谢实验室的沈恒老师、詹谦老师、王晓老师以及赵永利老师的帮助和支持，特别要感谢试验工周俊、周义在试验中的大力支持。还要感谢同学吴一鸣、马翔、尹应梅和蒯海东等人的热心帮助，在课题研究以及论文撰写过程中他们都给予我很大的帮助并提出了许多有益的建议。另外还要感谢同一研究室的师弟师妹们的关心和帮助，你们的关心和帮助使我受到极大的鼓舞，让我的生活充满了暖暖的友情，在此谨向你们表示我深深的谢意！另外本论文的乳化沥青研究开发得到了美国 MeadWestvaco 公司上海实验室的马卫民先生及 MeadWestvaco 公司总部 Everett Crews, Ph.D 的人力帮助，在此表示最诚挚的感谢！

最后，谨以此文献给我的家人，你们的支持和鼓励永远是我动力的源泉。

李 萍

2005 年 3 月于东南大学

参考文献

- [1]虎增福,曾赞.乳化沥青及稀浆封层技术[M].北京:人民交通出版社,2001
- [2]徐燕莉.表面活性剂的功能[M].北京:化学工业出版社精细化工出版中心,2000
- [3]姜云焕,钦兰成,王立志.改性稀浆封层技术[M].北京:石油工业出版社,2001
- [4]交通部公路科学研究所.JTJ 032-94 公路沥青路面施工技术规范[S].北京:人民交通出版社,1994
- [5]徐剑,李储鹏,孙霖,等.国外阳离子乳化沥青技术要求的对比与启示[J].中外公路,2004,24(2):67-70
- [6]交通部公路科学研究所.JTJ 052-2000 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].北京:人民交通出版社,2000
- [7]Mike Hemsley JR.The Evolution of Cold Mix-Mix Design[CD].2003:116-120
- [8]交通部阳离子乳化沥青课题协作组.阳离子乳化沥青路面(修订版)[M].北京:人民交通出版社,1997:99-101
- [9]徐培华,王安玲.公路工程混合料配合比设计与试验技术手册[M].北京:人民交通出版社,2001
- [10]Delmar Salomon.Proposed Cold Mix Design Method[EB / OL].<http://www.aema.org>,2002.3
- [11]交通部公路科学研究所.JTJ058-2000 公路工程集料试验规程[S].北京:人民交通出版社,2000
- [12]叶恒鑫.新型面层沥青混合料 AK-16C 的研究[D]:[硕士学位论文].南京:东南大学,2001
- [13]Everett Crews.Grave Emulsion Mixes:Method,Formulations and Field Experience[Z].
- [14]Professor S F Brown1, Dr D Needham . A Study of Cement Modified Bitumen Emulsion Mixtures.Paper offered for the 2000 Annual Meeting of the Association of Asphalt,Paving Technologists
- [15]Gunnar Hillgren,Alan James Tomas Svenson,Thomas Wallin.In-Plant Cold Recycling and Cold Mix in Sweden-Developments in Laboratory Testing[EB / OL]. <http://www.aema.org>,1998
- [16]王海林,李江,陈忠达,等.乳化沥青混合料技术性能评价方法研究[J].公路交通科技,2004,6(21):44-46
- [17]杜鹃.储存式冷铺沥青混合料的研究[D]:[硕士学位论文].西安:长安大学,2001
- [18]交通部公路科学研究所.JTJ032-94 公路沥青路面设计规范[S].北京:人民交通出版社,1997
- [19]Everett Crews.Cold Mix Design[Z].2004
- [20]高英,凌天清,梁富权,等.水泥-乳化沥青混合料性能测试方法研究[J].重庆交通学院学报,1999,6 :71-75.
- [21]沈金安.沥青及沥青混合料路用性能[M].北京:人民交通出版社,2001 :434-437
- [22]弥海晨,王秉纲,韩瑞民.乳化沥青混合料的水稳性研究[J].中外公路,2002,01:1-3
- [23]严家俊.道路建筑材料[M].北京:人民交通出版社,1995
- [24]弥海晨.沥青乳化剂及其应用技术研究[D]:[硕士学位论文].西安:长安大学,2001
- [25]Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot Mistypes, The Asphalt Institute, Ms-2,Six Edition,1993

硕士在读期间发表的论文

1. 李萍, 倪富健, 王立明. 适用于凝灰岩的改性乳化沥青的开发和试验研究[J]. 中国公路学会 2004 年学术年会, 2004:41-44