

# 液体沥青混合料强度生成规律研究及性能优化

易军艳<sup>1</sup>,阿卜杜海比尔·阿卜杜喀迪尔<sup>1</sup>,于文<sup>2</sup>,裴忠实<sup>1</sup>,范雷<sup>1,3</sup>

(1. 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院,黑龙江 哈尔滨 150090;2. 黑龙江省公路事业发展中心,黑龙江 哈尔滨 150009;3. 盐城市公路事业发展中心,江苏 盐城 224000)

**摘要** 目的 探究液体沥青混合料路面的劈裂抗拉强度生成规律与性能优化方法,提高液体沥青混合料路面使用寿命。方法 采用傅里叶红外光谱鉴别 110 °C 养生前后液体沥青官能团变化,确定粘聚力形成机理;根据广义时温等效原理,研究两种级配混合料劈裂抗拉强度增长模型;再根据液体沥青混合料特性提出相应的性能评价方法和指标;最后从填料和外掺剂两个角度提出性能优化方案。结果 液体沥青粘聚力提升的实质是稀释剂组分挥发的物理过程,Sigmoidal 模型较好地反映液体沥青混合料劈裂抗拉强度生成规律;相对于 AC 级配,LB 级配混合料性能更优,但两种级配混合料均存在水稳定性差、初始强度不足的问题,可采用添加水泥和矿粉的质量比为 3:7 复合填料和聚合 MDI 添加量为 3% 的措施进行性能优化。结论 在添加水泥和聚合 MDI 后,LB-16 级配液体沥青混合料的初始强度和水稳定性均满足使用要求。

**关键词** 道路工程;液体沥青混合料;强度生成规律;性能优化;聚合 MDI

中图分类号 TU528.42;U414.1

文献标志码 A

## Research on Strength Generation Law and Performance Optimization of Cutback Asphalt Mixture

YI Junyan<sup>1</sup>, ABDUKADIR · Abduhaibir<sup>1</sup>, YU Wen<sup>2</sup>, PEI Zhongshi<sup>1</sup>, FAN Lei<sup>1,3</sup>

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, 150090; 2. Department of Transportation of Heilongjiang Province, Harbin, China, 150009; 3. Yancheng Transportation Bureau, Yancheng, China, 224000)

**Abstract:** In order to improve the service life of cutback asphalt mixture pavement, the generation law of its splitting tensile strength and the method of performance optimization were explored. The changes of functional groups of cutback asphalt before and after curing at 110 °C were identified by Fourier transform infrared spectroscopy to determine the cohesive force mechanism of asphalt. And based on the generalized time-temperature equivalence principle, the splitting tensile strength

收稿日期:2022-06-15

基金项目:国家自然科学基金项目(52178420)

作者简介:易军艳(1983—),男,教授,博士,主要从事固废资源化与路面再生及养护材料研发等方面研究。

growth models of two graded mixtures are studied. According to the characteristics of cutback asphalt mixture, the corresponding performance evaluation methods and indicators are put forward. Finally, the performance optimization scheme is proposed from the two aspects of filler and admixture. The results show that the essence of improving the cohesive force of cutback asphalt is the physical process of the volatilization of diluent components, and the Sigmoidal model can reflect the generation law of the splitting tensile strength of cutback asphalt mixture. In addition, compared with AC gradation, LB gradation has better performance. However, the two graded mixtures have the problems of poor water stability and insufficient initial strength. The performance can be optimized by adding cement: mineral powder = 3:7 composite filler and 3% polymerized MDI. In general, the initial strength and water stability of LB-16 graded liquid asphalt mixture can meet the requirements after adding cement and polymeric MDI.

**Key words:** pavement engineering; cutback asphalt mixture; strength generation law; performance optimization; polymeric MDI

截止到2020年,我国公路总里程已近520万km,位居世界前列<sup>[1]</sup>。然而,受限于过去设计水平不高、施工质量难以控制等因素,在自然环境及轮载作用下,路面结构在设计使用寿命内出现较大面积的损坏。目前,工程中常采用热拌沥青混合料对其进行修补,但该方法存在明显的缺陷。首先在生产施工过程中能耗大,产生大量污染性烟尘,与我国减少碳排放目标相背离。其次,热拌料对施工季节和运距具有特定要求,在低温、远距、应急工程中并不适用<sup>[2]</sup>。在此背景下,具有环境污染小、常温下拌和摊铺、便于储存运输等特点的液体沥青混合料逐渐成为研究热点。

国外较早开始研制快速修补路面的液体沥青混合料,技术水平相对成熟<sup>[3]</sup>,但由于其价格昂贵,导致国内无法大规模推广使用。我国各研究机构也积极开展一系列研究,并提出适用于中国的液体沥青混合料几项技术要求,包括和易性、储存稳定性、强度、水稳定性等<sup>[4-5]</sup>。其中,LI Rui<sup>[6]</sup>、ZHANG Zhengqi等<sup>[7]</sup>指出水性环氧树脂的加入显著提高液体沥青黏结力、水稳定性和高温稳定性。DONG Qiao等<sup>[8]</sup>用水泥和膨胀土部分代替矿物填料,显著提高了混合料的初始强度和低温抗裂性。李青<sup>[9]</sup>、王双双等<sup>[10]</sup>提出了适用于液体沥青混合料的配合比设计方法。相

关研究主要集中在添加剂的研发、混合料配合比优化设计与性能评价等方面。关于其强度生成规律与性能优化的研究较少,而这将是关乎混合料施工工艺及其耐久性的关键因素之一。因此,笔者基于自主研发的寒区高性能液体沥青材料,探究混合料劈裂抗拉强度生成规律与性能优化设计方案。根据液体沥青粘结力形成机理研究液体沥青混合料强度的增长特性,针对其混合料的水稳定性、强度和动态模量进行评价,并推荐最优的级配类型和性能优化方案。研究表明:Sigmoidal模型能够较好地描述液体沥青混合料强度生成规律,笔者提出的添加水泥和聚合MDI的性能优化方案可有效改善其初始强度和水稳定性。

## 1 原材料及试验方案

### 1.1 原材料

#### 1.1.1 液体沥青

本研究采用的液体沥青材料主要由90#基质沥青、柴油、表面活性剂和粘结剂等组成。按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的测试方法对其技术指标测定,试验结果见表1,测试方法分别采用液体石油沥青蒸馏试验,沥青含水量试验,沥青针入度试验,沥青延度试验和沥青标准黏度试验。

表1 液体沥青技术指标

Table 1 The main technical indicators of cutback asphalt

馏分质量分数 (360℃)/%	残留物质量 分数/%	沥青 含水率/%	残留沥青针入度 (25℃, 100 g, 5 s)/0.1 mm	残留沥青延度 (25℃, 5 cm/min)/cm	标准黏度 (25℃, 5 mm)/s
18.8	81.5	0	160.5	>100	757.2

1.1.2 集料

本研究选用石灰岩轧制的集料,其各项指标均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)一级公路要求。

1.1.3 填料

本研究填料选用石灰岩磨制而成的矿粉、普通硅酸盐水泥(P. O 42.5)和氢氧化钙粉末。采用激光粒度分析仪测定填料的粒径分布,测试结果满足公路沥青路面施工技术规范(JTG F40—2004)规范要求。

1.1.4 外掺剂

外掺剂主要包括抗剥落剂、水性环氧树脂和聚合MDI。抗剥落剂为深褐色黏稠液体,黏度为1 000~1 500 mPa·s,密度为0.95 g/cm<sup>3</sup>;水性环氧树脂具体技术指标见

表2,水性环氧树脂和固化剂掺配比例为2:1;聚合MDI为透明棕褐色液体,黏度为150~200 mPa·s,密度为1.19 g/cm<sup>3</sup>。

表2 水性环氧树脂和固化剂技术指标

Table 2 The technical indexes of waterborne epoxy resin and curing agent

外掺剂	外观	黏度(25℃)/ (mPa·s)	密度(25℃)/ (g·cm <sup>-3</sup> )
水性环氧树脂	乳白色乳液	87.9	1.01~1.08
固化剂	淡黄色流体	1 030	1.00~1.08

1.2 配合比设计

目前已有的研究对于冷拌料最适用的级配类型仍未达成共识。本研究选择AC-16级配和LB-16级配两种级配方式进行对比,级配曲线见图1。

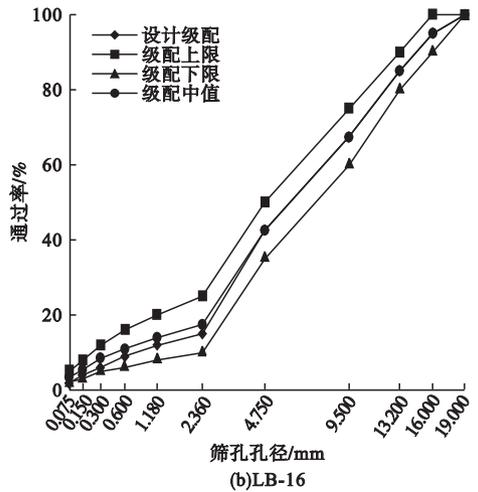
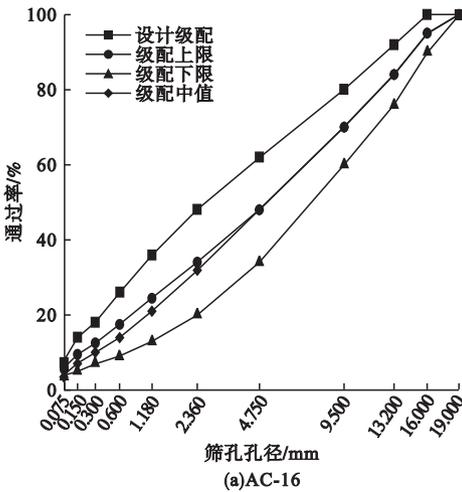


图1 液体沥青混合料级配设计曲线

Fig.1 The grading design curve of cutback asphalt mixture

液体沥青由于含有易挥发的稀释剂,因此不能采用常规马歇尔试验方法确定最佳沥青用量<sup>[11-12]</sup>。目前冷拌料最佳油量设计尚未有统一方法,笔者参考吕伟民等<sup>[12]</sup>提出经验公式估算初始沥青用量。在确定初始沥青

用量的基础上,绘制5种不同沥青用量与马歇尔稳定度关系曲线,试验结果见表3。综合确定最佳液体沥青用量,两种级配液体沥青最佳用量分别为AC-16: 5.5%, LB-16: 5.4%。

表3 液体沥青用量与马歇尔稳定度关系

Table 3 The relationship between the amount of liquid asphalt and Marshall stability

AC-16		LB-16	
沥青用量/%	稳定度/kN	沥青用量/%	稳定度/kN
4.2	27.23	4.0	18.07
4.9	29.53	4.7	19.87
5.6	29.35	5.4	21.40
6.3	24.88	6.1	20.09
7.0	24.88	6.8	17.65

### 1.3 混合料劈裂抗拉强度生成规律研究

#### 1.3.1 傅里叶红外光谱试验

傅里叶红外光谱是一种能快速识别官能团的检测手段之一,吸收峰的位置鉴别样品的官能团组成。通过对比液体沥青养生前后的红外光谱图,分析养生过程中沥青材料的成分变化。

#### 1.3.2 混合料劈裂抗拉强度增长试验

养生温度和养生龄期影响混合料强度增长速度。本研究选取养生温度分别为110℃、60℃、25℃、5℃、-20℃,研究液体沥青混合料随养生时间和时间的增长规律,建立劈裂抗拉强度增长模型。从而指导液体沥青混合料的设计与施工工艺<sup>[13]</sup>。

### 1.4 性能评价试验方法

国内外还没有形成系统评价液体沥青混合料性能的试验方法,目前主要关注其水稳定性和强度。本研究增加动态模量试验评价液体沥青混合料综合性能,同时提供重要的路面结构设计力学参数。

#### 1.4.1 水稳定性试验

液体沥青中添加的稀释剂会降低沥青与集料的黏附性。因此,在环境和轮载反复作用下更易产生水损害<sup>[14]</sup>。本研究选择冻融劈裂试验评价液体沥青混合料的水稳定性强度试验。

#### 1.4.2 初始强度试验

初始强度是评价冷拌沥青混合料摊铺初期抵抗车轮荷载作用的指标,较高的初始强度减少早期病害的出现,但对施工和易性不

利。本研究结合国内外学者提供的评价方法<sup>[15-16]</sup>和工程实际,采用马歇尔稳定度评价初始强度,并确定初始强度值在1.5~2.5 kN较为适宜。

具体实验方法<sup>[16]</sup>如下:取沥青混合料1 080 g左右,在(25±0.5)℃恒温箱中固化2 h,取出混合料装入马歇尔试模中并正反面各击实50次,脱模后于(25±0.5)℃水浴箱中保温60 min后测定其稳定度。

#### 1.4.3 成型强度试验

液体沥青混合料在环境和车辆荷载的作用下,液体沥青中稀释剂不断挥发,沥青的粘结性逐渐增强。为提高试验室成型强度试验的效率,本研究根据规范采用110℃养护24 h的试验方法加速稀释剂的挥发速度。在25℃水浴箱浸泡60 min,测试马歇尔稳定度作为成型强度。《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)要求其成型强度大于3 kN。

#### 1.4.4 动态模量试验

采用UTM-100对液体沥青混合料动态模量进行测试。根据时温等效原理,得到动态模量主曲线,其可反映液体沥青混合料对温度和加载频率的响应特性<sup>[17]</sup>。

## 2 混合料劈裂抗拉强度生成规律研究

### 2.1 液体沥青粘结力形成机理

将液体沥青未养生和110℃养生24 h试样的红外光谱图进行对比,试验结果见图2。在波数1 800~2 400 cm<sup>-1</sup>内处于仪器棱镜干扰区,且沥青在此区域没有明显吸收峰,因此将这部分光谱从图中删去。在波数600~1 800 cm<sup>-1</sup>和2 400~4 000 cm<sup>-1</sup>范围内沥青养生前后的官能团基本一致,在养生的过程中,没有产生全新的官能团,证明养生过程中基本没有发生化学变化。因此,养生过程的实质是稀释剂组分挥发的物理过程。

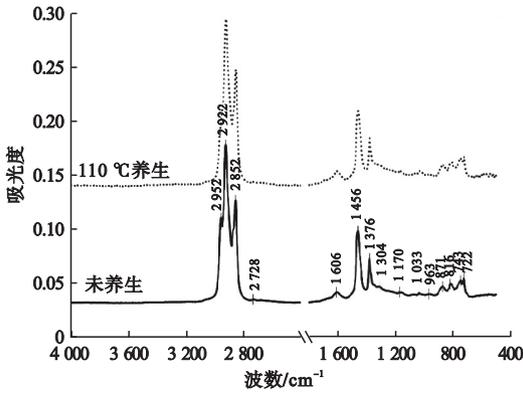


图2 液体沥青养生前后傅里叶红外光谱图对比

Fig. 2 The comparison of FTIR spectra between cutback asphalt before and after curing

### 2.2 混合料劈裂抗拉强度增长模型

将沥青时温等效原理合理外扩,提出广义时温等效原理,提高养生温度可以提高沥青中的稀释剂组分挥发速率,而延长其养生时间可以增加稀释剂的挥发量,两者均能实现混合料强度的增长。即养生温度与养生时间是等效,短期高温养生与长期低温养生效果相同。基于广义的 Sigmoidal 模型,提出主曲线拟合模型,并对劈裂抗拉强度随养生条件的变化规律展开研究。选定 25 °C 为基准温度,将液体沥青混合料劈裂抗拉强度进行数据拟合。

AC-16 级配和 LB-16 级配混合料劈裂抗拉强度拟合的主曲线公式和拟合曲线见图 3、图 4 所示。

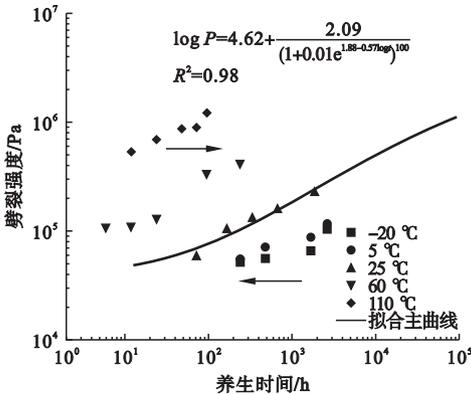


图3 AC-16 25 °C 条件下的劈裂抗拉强度主曲线

Fig. 3 The master curve of splitting tensile strength at 25 °C for AC-16

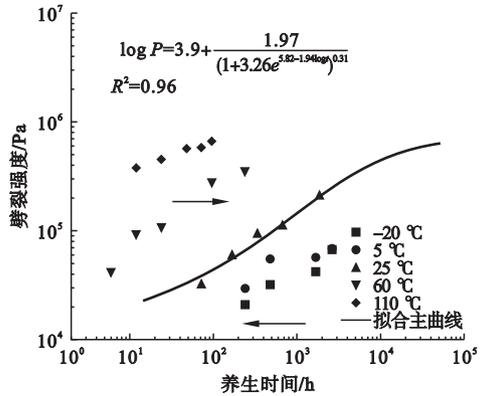


图4 LB-16 25 °C 条件下的劈裂抗拉强度主曲线

Fig. 4 The master curve of splitting tensile strength at 25 °C for LB-16

分析图 3 和图 4 拟合结果可知:对于两种液体沥青混合料,模型的拟合优度均在 0.95 以上;两种级配类型混合料在 25 °C 下的劈裂抗拉强度主曲线变化规律基本一致。在养生初期,混合料劈裂抗拉强度随养生时间的增长而迅速变大,到达一定强度后,随着稀释剂组分的量逐渐减少,其强度生成速率缓慢,并最终趋于稳定值。与 AC 级配的混合料相比,LB 级配的混合料尽管早期强度较低,但后期强度生成速率快,更先达到最终强度,而 AC 级配的混合料最终能达到一个较高的强度,但这个过程需要较长的时间。其原因是 LB 级配混合料为多空隙结构,稀释剂组分更易挥发,混合料强度生成较快。而 AC 级配结构密实,能达到更高的强度值。通过拟合的强度主曲线可以预测混合料不同温度和不同养生时间下的强度变化规律,为液体沥青混合料施工关键工艺控制及开放交通时间提供技术支持。

## 3 性能评价及优化

### 3.1 性能评价

#### 3.1.1 水稳定性

冻融劈裂试验结果如表 4 所示。两种级配混合料强度比均低于技术要求 70%,表明液体沥青混合料的水稳定性较差。由于稀释剂的添加降低沥青与集料间的粘附性,水分

更容易进入薄弱的界面粘结处,导致沥青膜脱落。因此,提高液体沥青混合料使用寿命的关键因素之一在于提高其水稳定性。对比两种级配类型可知,AC级配的抗拉强度高于LB级配,但是冻融劈裂抗拉强度比远低于LB级配。

表4 液体沥青混合料冻融劈裂抗拉强度

Table 4 The freeze thaw splitting strength of cutback asphalt mixture

级配	冻融后强度/MPa	冻融前强度/MPa	强度比/%	强度比规范要求 <sup>[18]</sup> /%
LB-16	0.196	0.301	65.1	>70
AC-16	0.274	0.532	51.5	>70

### 3.1.2 初始强度和成型强度

两种级配混合料的初始强度与成型强度见表5。由表5可知, LB级配的初始强度较低, 不满足初始强度的最低要求, 而AC级配的初始强度满足使用要求。表明LB级配液体沥青混合料和易性更好, 适宜长时间的储存运输。两者的成型强度均达到了较高值, 表明液体沥青混合料长期使用性能满足路面使用要求。但在实际工程中, 液体沥青混合料破坏常发生在铺筑初期。因此, 延长其使用寿命的另一关键在于提高初始强度。

表5 液体沥青混合料强度

Table 5 The strength of cutback asphalt mixture kN

级配	初始强度	初始强度文献要求 <sup>[16]</sup>	成型强度	成型强度规范要求 <sup>[18]</sup>
LB-16	1.31	1.5~2.5	21.40	>3.0
AC-16	2.11	1.5~2.5	31.72	>3.0

### 3.1.3 动态模量

对试件在不同温度下施加不同频率的荷载来模拟真实道路环境下的车辆荷载。液体沥青混合料无法进行高温测试, 仅测试了常低温下动态模量。

本研究采用 Sigmoidal 函数模型, 利用 Excel 规划求解得出 5℃ 时函数模型各参数指标, 并根据主曲线方程绘制 AC-16 和 LB-16 的动态模量主曲线见图5。

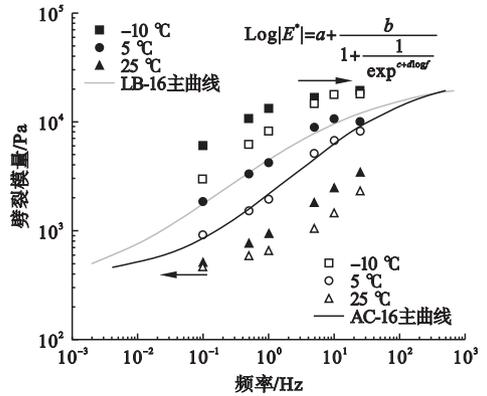


图5 液体沥青混合料动态模量主曲线

Fig. 5 The master curve of dynamic modulus for cutback asphalt mixture

由图5可知, 主曲线拟合度均在0.98以上, 说明可以通过 Sigmoid 函数模型构建液体沥青混合料主曲线, 对试验温度以外条件的动态模量进行预测。当温度为5℃时, LB级配液体沥青混合料动态模量高于AC级配, 更不易产生变形, 其抗永久变形能力较强。但LB级配混合料不同温度下的移位因子差异比AC级配大, 表明LB级配液体沥青混合料的温度敏感性更强。

### 3.2 性能优化方案

根据3.1节中两种级配液体沥青混合料性能评价试验结果可知, 需对LB级配混合料的初始强度和水稳定性加以改善, 相比于AC级配, LB级配更适宜作为液体沥青混合料的级配方式。

液体沥青添加稀释剂, 导致沥青结合料损失部分性能。性能优化主要是弥补和改善液体沥青损失的性能, 使混合料不仅能够常温环境下作业, 且在工程应用时有较好的强度和较快的强度增长, 以满足实际工程要求。笔者从填料和外掺剂两个角度达到性能改善的目的。

#### 3.2.1 填料

笔者采用添加氢氧化钙和水泥增强液体沥青与集料的粘结力, 氢氧化钙和水泥含有氢氧化钙等碱性成分, 裹附在集料表面与酸性沥青牢固结合, 以此达到提高早期强度和

水稳定性的目的。根据相关文献<sup>[8]</sup>,当填料部分代替矿粉时,既能提高性能,又不影响施工和易性。

### 3.2.2 外掺剂

笔者采用三类外掺剂:抗剥落剂、水性环氧树脂材料和聚合 MDI。

抗剥离剂是在酸性矿料表面产生物理作用或形成一定的化学结构使得沥青与矿料进行反应,从而提高结合料与矿料的黏附性,使混合料具有良好的抗水损害性能。根据相关文献<sup>[19]</sup>,其掺量取沥青用量的 0.3%。

水性环氧树脂是一种粘结性很强的高分子化合物,与一定用量的固化剂反应后,生成一种不可逆的三维网状结构的固化产物,使的固化产物的强度增长<sup>[20-22]</sup>。其掺量根据预试验结果确定为液体沥青用量的 2%。

聚合 MDI 与液体沥青中的活性氢发生亲核加成反应,生成软段和硬段的聚氨酯链<sup>[23-25]</sup>。过量的 MDI 发生聚合反应,将短的聚氨酯链转变为复杂的分支网络结构,在液体沥青中形成了稳定的化学键,从而提高了沥青的韧性<sup>[25-26]</sup>。

## 3.3 性能优化结果

### 3.3.1 水稳定性

针对 LB 级配,提出五类 11 种改性措施,具体方案如表 6 所示,试验结果如图 6 所示。

表 6 水稳定性改善措施

Table 6 The improvement measures for water stability

编号	改善措施
PO-0	空白组(纯矿粉)
PO-1.1	30% 矿粉替代水泥
PO-1.2	填料全为水泥
PO-2	30% 矿粉替代氢氧化钙
PO-3	0.3% 抗剥落剂
PO-4.1	2% 水性环氧树脂
PO-4.2	30% 矿粉替代水泥 + 2% 水性环氧树脂
PO-4.3	填料全为水泥 + 2% 水性环氧树脂
PO-5.1	3% 聚合 MDI
PO-5.2	30% 矿粉替代水泥 + 3% 聚合 MDI
PO-5.3	全水泥 + 3% 聚合 MDI
PO-5.4	5% 聚合 MDI

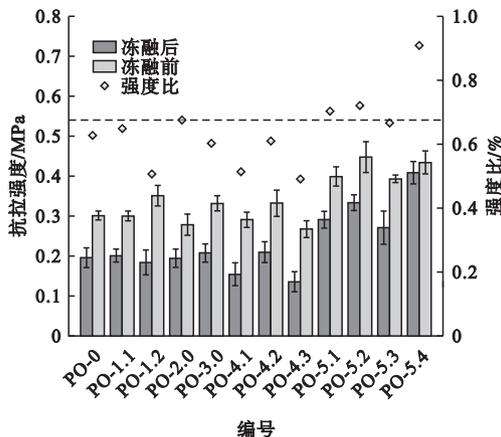


图 6 液体沥青混合料改性后冻融劈裂抗拉强度  
Fig. 6 The freeze thaw splitting strength of modified cutback asphalt mixture

由图可知,PO-5 改性措施对液体沥青混合料的水稳定性提高的效果最好,PO-2 效果次之,其余措施均不能有效提高水稳定性,甚至出现强度比降低的现象。添加 MDI 产生的大分子聚合物利于提高沥青的抗拉强度和稳定性,当 MDI 添加量达到 5% 时抗拉强度远高于空白组,强度比接近 95%,仅添加量为 3% 就能够满足使用要求。值得注意的是,如 PO-1、PO-4、PO-5 强度比显示,水泥代替量并非越高越好,30% 的水泥代替量具有较高的强度比,但是仅添加水泥混合料强度比无法达到要求值。与水泥相比,氢氧化钙粉末的改性效果更好,这是由于氢氧化钙的 PH 值高于水泥,能促进沥青中的酸碱反应。同时,其粒径偏粗在养生过程中稀释剂更易挥发,较快恢复沥青胶浆的凝胶结构,从而提高强度比。但添加氢氧化钙粉末降低混合料的抗拉强度。

### 3.3.2 初始强度

根据水稳性的五类改性方案研究,各选出效果较好的一种措施作为初始强度改性方案,改善后初始强度测试结果见图 7。

由图可知,五类措施不同程度上提高了两种级配混合料初始强度。对于 LB-16 级配的混合料,五类改性措施初始强度提升幅

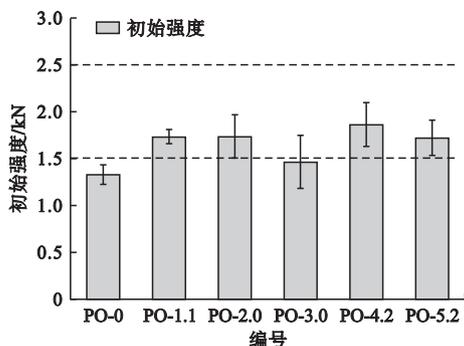


图7 液体沥青混合料改性后初始强度

Fig. 7 The initial strength of modified cutback asphalt mixture

度相对较小, PO-3 初始强度无法达到 1.5 kN, 无法满足使用要求。PO-4.2 效果最佳能达到 1.86 kN, 初始强度提升了 40%。分析其原因是水性环氧树脂与固化剂产生的固化产物和与水泥产生的水化产物穿插在沥青中, 提高液体沥青的黏度, 进而增大集料间的黏聚力, 快速提升其早期强度, 可用于需要快速开放交通的施工状况。其余三组初始强度能达到 1.7 kN 以上, 提升了近 30%, 均满足使用要求。

## 4 结 论

(1) 液体沥青混合料强度增长是稀释剂组分挥发的物理过程; 25 °C 条件下养生的强度增长规律符合根据时温等效原理提出的广义 Sigmoidal 模型, LB 级配的混合料强度生成速率快, 而 AC 级配混合料能达到更高的强度。

(2) 通过对比 LB-16 和 AC-16 两种级配混合料的性能, 确定 LB 级配更适宜作为液体沥青混合料的级配方式。

(3) 当采用水泥和矿粉的质量比为 3:7 的复合填料且聚合 MDI 添加量为 3% 时, 液体沥青混合料的初始强度和水稳定性改性效果最优, 均能达到使用要求。

## 参考文献

[1] 中华人民共和国交通运输部. 2020 年交通运输行业发展统计公报[J]. 交通财会, 2021

(6): 92 - 96.

(Ministry of Transport of the People's Republic of China. Statistical bulletin on the development of transportation industry in 2020 [J]. Finance & accounting for communications, 2021 (6): 92 - 96.)

[2] 唐锐. 基于分子模拟的冷拌沥青强度生成机制与路用性能优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.

(TANG Kai. Strength generation mechanism and road performance optimization of cold-mixed asphalt based on molecular simulation [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.)

[3] 王丽艳. 生物基溶剂型冷补沥青混合料评价指标的研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2020.

(WANG Liyan. Research on evaluation indexes of biosolvent based cold patching asphalt mixture [D]. Ji'nan: Shandong Jianzhu University, 2020.)

[4] 孟文专. 冷补沥青混合料的制备及改良[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2012.

(MENG Wenzhuan. Preparation and improvement of cold patch asphalt mixture [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2012.)

[5] 王佳旭. 冷补沥青混合料设计及其耐久性性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

(WANG Jiayu. Design of cold repair asphalt mixture and research on durability [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.)

[6] LI Rui, LENG Zhen, ZHANG Yuan, et al. Preparation and characterization of waterborne epoxy modified bitumen emulsion as a potential high-performance cold binder [J]. Journal of cleaner production, 2019, 235: 1265 - 1275.

[7] ZHANG Zhu, LI Jiusu, WANG Zhengyuan, et al. Preparation and performance characterization of a novel high-performance epoxy resin modified reactive liquid asphalt [J]. Construction and building materials, 2020, 263: 120113.

[8] DONG Qiao, YUAN Jiawei, CHEN Xueqin, et al. Reduction of moisture susceptibility of cold asphalt mixture with Portland cement and bentonite nanoclay additives [J]. Journal of cleaner production, 2018, 176: 320 - 328.

[9] 李青. 冷补沥青混合料配合比设计方法研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2017.

(LI Qing. Study on mix proportion design of cold patching asphalt mixture [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2017.)

[10] 王双双. 冷补沥青混合料配合比设计及路用性能研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019.

(WANG Shuangshuang. Study on mix design and pavement performance of cold-repaired asphalt mixture [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2019.)

[11] Lü Songtao, WANG Shuangshuang, XIA Chengdong, et al. A new method of mix design for cold patching asphalt mixture [J]. Frontiers

- in materials, 2020, 7: 182.
- [12] 吕伟民, 李立寒, 周海生, 等. 冷铺沥青材料的特性与配制技术[J]. 华东公路, 2002(2): 67-69.  
(Lü Weimin, LI Lihan, ZHOU Haisheng, et al. Characteristics and preparation technology of cold paving asphalt materials [J]. East China highway, 2002(2): 67-69.)
- [13] OTIENO M N, KALULI W K, KABUBO C. Strength prediction of cold asphalt emulsion mixtures using the maturity method [J]. Journal of materials in civil engineering, 2020, 32(5): 4020096.
- [14] REZAEI M, HASHEMIAN L, BAYAT A, et al. Investigation of rutting resistance and moisture damage of cold asphalt mixes [J]. Journal of materials in civil engineering, 2017, 29(10): 04017193.
- [15] SUN Zhilin, LI Yawen, ZHANG Junhui, et al. Preparation and performance evaluation of cold mix asphalt mixture [J]. Journal of nanoscience and nanotechnology, 2020, 20(8): 4824-4831.
- [16] 顾成. 冷补沥青混合料的结构特性及试验评价[D]. 南京: 东南大学, 2017.  
(GU Cheng. Structural characteristics of cold patch asphalt mixture and experimental evaluation [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.)
- [17] 刘伟胜, 李思童, 黄玉颖, 等. 冷拌冷铺沥青混合料动态模量及其主曲线研究[J]. 新型建筑材料, 2018, 45(10): 150-153.  
(LIU Weisheng, LI Sitong, HUANG Yuying, et al. Research on dynamic modulus and master curve of cold-mixed and cold-paved asphalt mixture [J]. New building materials, 2018, 45(10): 150-153.)
- [18] 交通部公路科学研究所. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2004 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.  
(Institute of Highway Science in the Ministry of Communications. Technical specification for construction of highway asphalt pavement: JTG F40—2004 [S]. Beijing: People's Communications Press, 2005.)
- [19] 孙志林. 溶剂型冷补沥青混合料及其制备方法: 中国. 201711432640. X [P]. 2017-12-26.  
(SUN Zhilin. Cutback asphalt mixture and its preparation method: China. 201711432640. X [P]. 2017-12-26.)
- [20] 赵富强, 王素青, 路国栋, 等. 水性环氧新型冷补沥青混合料的性能对比分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2019, 43(1): 56-61.  
(ZHAO Fuqiang, WANG Suqing, LU Guodong, et al. Comparative analysis on performance of new type waterborne epoxy cold patching asphalt mixture [J]. Journal of Wuhan university of technology (transportation science & engineering), 2019, 43(1): 56-61.)
- [21] 张争奇, 赵勤胜, 张伟, 等. 水性环氧-SBR低温型冷补沥青研发及其混合料性能[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2020, 41(6): 731-737.  
(ZHANG Zhengqi, ZHAO Qinsheng, ZHANG Wei, et al. Preparation and mixture performance of waterborne epoxy-SBR low temperature cold patch asphalt [J]. Journal of Jiangsu university (natural science edition), 2020, 41(6): 731-737.)
- [22] 陈静云, 马强. 温拌-再生改性沥青 SMA 混合料性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2012, 28(2): 286-290.  
(CHEN Jingyun, MA Qiang. Properties of warm mix-recycled modified asphalt SMA mixture [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2012, 28(2): 286-290.)
- [23] ORTEGA F J, NAVARRO F J, GARCIA-MORALES M, et al. Effect of shear processing on the linear viscoelastic behaviour and microstructure of bitumen/montmorillonite/MDI ternary composites [J]. Journal of industrial and engineering chemistry, 2017, 48: 212-223.
- [24] 孙敏, 郑木莲, 毕玉峰, 等. 聚氨酯改性沥青改性机理和性能[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(2): 49-58.  
(SUN Min, ZHENG Mulian, BI Yufeng, et al. Modification mechanism and performance of polyurethane modified asphalt [J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2019, 19(2): 49-58.)
- [25] SHAO Linlong, WANG Hainian, ZHANG Ran, et al. Analysis of the chemical properties and high-temperature rheological properties of MDI modified bio-asphalt [J]. Construction and building materials, 2021, 267: 121044.
- [26] LIU Mengmei, HAN Sen, HAN Xiao, et al. Microcapsule and polymer reinforcement techniques developed asphalt for use of pothole repairs in winter and rainy seasons [J]. Cold regions science and technology, 2019, 167: 102865.  
(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)