

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2019.04.002

# 乳化沥青冷再生混合料初期抗磨耗性能 评价及技术要求

王杰<sup>1</sup>, 秦永春<sup>1</sup>, 刘然<sup>2</sup>, 方文达<sup>2</sup>, 崔洪海<sup>3</sup>

(1. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088; 2. 北京市交通委员会路政局房山公路分局, 北京 102488;  
3. 吉林省交通规划设计院, 吉林 长春 130021)

**摘要:** 针对我国现有规范关于乳化沥青冷再生混合料初期强度评价的空白, 选取磨耗试验作为评价方法, 用对比试验确定了试验的关键参数, 包括成型方式、养生温度、养生相对湿度以及养生时间; 分析了不同乳化剂种类、乳化剂剂量、乳化沥青用量、水泥剂量和矿料级配对乳化沥青冷再生混合料初期抗磨耗性能的影响, 据此提出相应的技术要求; 利用方差分析法, 分析了不同影响因素的显著性。结果表明: 提出的磨耗试验简单、可靠, 可用于评价乳化沥青冷再生混合料的初期抗磨耗性能; 马歇尔击实法或旋转压实法均可作为磨耗试验试件成型方式, 推荐采用大型马歇尔击实法(双面各击实75次)作为标准成型方式; 养生条件对乳化沥青冷再生混合料磨耗损失影响较大, 随温度的升高或养生时间的延长, 磨耗损失均逐渐减小, 随相对湿度的增加, 磨耗损失逐渐增大; 结合我国国情, 拟定磨耗试验试件标准养生温度为25℃, 养生相对湿度为70%, 养生时间为4h。以磨耗损失不大于3.5%为控制指标, 可作为优化乳化沥青冷再生混合料配合比设计的依据; 影响乳化沥青冷再生混合料初期抗磨耗性能的各因素依次为水泥剂量>乳化剂种类>矿料级配>乳化沥青用量>乳化剂剂量, 水泥剂量、乳化剂种类和矿料级配对冷再生混合料初期强度影响显著。

**关键词:** 道路工程; 技术要求; 磨耗试验; 乳化沥青冷再生混合料; 初期强度

中图分类号: U416.217

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2019)04-0008-07

## Evaluation of Early Anti-abrasion Performance of Emulsified Asphalt Cold Recycled Mixture and Technical Requirement

WANG Jie<sup>1</sup>, QIN Yong-chun<sup>1</sup>, LIU Ran<sup>2</sup>, FANG Wen-da<sup>2</sup>, CUI Hong-hai<sup>3</sup>

(1. Research Institute of Highway, of Ministry of Transport, Beijing 100088, China;  
2. Fangshan Highway Agency of Highway Administration of Beijing Municipal Commission of Transport, Beijing 102488, China;  
3. Jilin Traffic Planning and Design Institute, Changchun Jilin 130021, China)

**Abstract:** Aiming at the lack of evaluation of initial strength of emulsified asphalt cold recycling mixture in Chinese specification, by selecting abrasion test as the evaluation method, the key test parameters, including the compaction method, curing temperature, curing relative humidity and curing time, are determined by comparative test. The influences of different emulsifier types, emulsifier dosages, emulsified asphalt dosages, cement dosages and mineral gradations on the early anti-abrasion performance of emulsified asphalt cold recycled mixture are analyzed, and put forward the corresponding technical requirement. The variance analysis is used to analyze the significance of different influence factors. The result shows that (1) the

收稿日期: 2018-02-02

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAC07B01, 2014BAC07B05); 交通运输部标准化项目(JT2016-126); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2018-9002); 吉林省交通运输科技项目(2016-1-10)

作者简介: 王杰(1987-), 男, 四川成都人, 硕士。(j.wang@rioh.cn)

proposed abrasion test is simple and reliable, and can be used to evaluate the early anti-abrasion performance of emulsified asphalt cold recycling mixture; (2) Marshall compaction method or rotary compaction method can be used as the compaction method of the abrasion test specimens, and the Marshall multi compaction method (75 times for both sides) is recommended to be the standard compaction method; (3) the curing condition has great influence on the abrasion loss of the cold recycled mixture, the abrasion loss decreases as the temperature or curing time increases, while the abrasion loss increases as the relative humidity increases; (4) combining with national condition, it is determined that the standard curing temperature of the abrasion test is 25 °C, the curing relative humidity is 70% and the curing time is 4 h; (5) the abrasion loss of no more than 3.5% can be used as the control indicator and the basis for optimize the mix design; (6) the influencing factors of the early anti-abrasion performance of emulsified asphalt cold recycling mixture are as follows: cement dosage > emulsifier type > mineral gradation > emulsified asphalt dosage > emulsifier dosage, and the influences of cement dosage, emulsifier type and mineral gradation on the initial strength of the mixture are significant.

**Key words:** road engineering; technical requirement; abrasion test; emulsified asphalt cold recycling mixture; initial strength

## 0 引言

根据沥青路面再生技术的分析,冷再生具有大体量消耗废旧材料的优势,具有显著的低碳环保效益,且能消除原路面多种病害、缓解反射裂缝的产生<sup>[1-3]</sup>。因而,在沥青路面改建和养护工程中逐渐受到重视。乳化沥青是冷再生应用中的一种主要结合料<sup>[4-5]</sup>,与热拌沥青混合料相比,乳化沥青冷再生混合料的最终强度需乳化沥青破乳凝结才能形成,而该过程需要一定的时间<sup>[6-7]</sup>。因此,在实体工程中需要进行养生。但经常由于施工路段交通量过大或无疏解通道,难以封闭7 d,甚至2~3 d都非常困难,需提前开放交通。此时,冷再生层强度未完全形成,在施工车辆和临时交通的作用下,面临产生松散、磨耗及坑槽等病害的风险。

关于乳化沥青冷再生混合料,吴超凡研究了其组成设计,提出了油石比的确定方法<sup>[8]</sup>。魏唐中揭示了乳化沥青冷再生混合料强度的形成过程,明确了水泥和乳化沥青的作用效应<sup>[9]</sup>。王之怡研究了乳化沥青冷再生混合料的疲劳性能,提出了应变控制指标<sup>[10]</sup>。综上,对于乳化沥青冷再生混合料目前还缺乏系统研究,控制指标单一,大多只关注冷再生混合料完全养生后的性能<sup>[11-12]</sup>。我国现有再生规范对于冷再生混合料的设计技术要求也是基于试件经历60 °C不少于40 h完全养生后的评价,缺乏初期强度评价方法和技术要求<sup>[13]</sup>。目前,部分学者借鉴美国材料与试验协会(American Society for Testing and Materials, ASTM)中D7196-06试验,利用磨耗前后

的质量损失来评价冷再生混合料的抗磨耗性能,以此来评定冷再生混合料的初期强度。但该标准未明确试验条件,如成型方式,养生条件(温度、相对湿度、时间)等,其次缺乏相应的技术要求,无法有效指导工程实际应用<sup>[14-15]</sup>。

因此,本研究首先通过研究,提出乳化沥青冷再生混合料磨耗试验的关键参数,确定适用于我国的磨耗试验方法;其次分析不同乳化剂种类、乳化剂剂量、乳化沥青用量、水泥剂量和级配条件下,冷再生混合料初期抗磨耗性能的变化规律,提出相应的技术要求;同时利用方差分析法,将不同试验条件导致的数据波动,以及试验误差导致的数据波动加以区分,以分析不同影响因素的显著性。最终为优化乳化沥青冷再生混合料配合比设计提供依据,从而实现加快开放交通和提高应用水平的目的。

## 1 试验

### 1.1 原材料

沥青混合料回收料(Reclaimed Asphalt Pavement, RAP)取自北京房山区新泗路,经检测, RAP砂当量为68.2%,满足现行《公路沥青路面再生技术规范》(JTG F41—2008)大于50%的技术要求,含水率实测为1.53%,沥青含量为4.0%。为了减小RAP级配变异性对试验结果的影响,将RAP进行多级分档,分档筛孔分别为:2.36, 4.75, 9.5, 13.2 mm。乳化沥青冷再生混合料共设计了粗、中、细3种级配,分别以A, B, C表示见表1。

表 1 乳化沥青冷再生混合料的级配

Tab. 1 Gradation of emulsified asphalt cold recycled mixture

| 筛孔尺寸/mm | 质量通过率/% |      |      |      |      |             |      | 合成级配/% |      |      | 级配范围/% |     |
|---------|---------|------|------|------|------|-------------|------|--------|------|------|--------|-----|
|         | RAP     |      |      |      |      | 新料<br>10-30 | 矿粉   | A      | B    | C    | 上限     | 下限  |
|         | <2.36   | 2.36 | 4.75 | 9.5  | 13.2 |             |      |        |      |      |        |     |
| 37.5    | 100.0   | 100  | 100  | 100  | 100  | 100         | 100  | 100    | 100  | 100  | 100    | 100 |
| 26.5    | 100     | 100  | 100  | 100  | 99.3 | 100         | 100  | 99.8   | 99.9 | 99.9 | 100    | 80  |
| 13.2    | 100     | 100  | 100  | 97.9 | 4.9  | 7.8         | 100  | 68.5   | 72.3 | 78.0 | 80     | 60  |
| 4.75    | 100     | 99.0 | 1.5  | 0.2  | 0.9  | 0.2         | 100  | 36.4   | 43.3 | 49.2 | 60     | 25  |
| 2.36    | 99.5    | 2.7  | 0.3  | 0.0  | 0.0  | 0.0         | 100  | 24.3   | 28.3 | 31.4 | 45     | 15  |
| 0.3     | 21.0    | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0         | 98.3 | 5.8    | 6.6  | 8.8  | 20     | 3   |
| 0.075   | 11.8    | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0         | 90.2 | 3.6    | 4.1  | 6.0  | 7      | 1   |

乳化沥青由室内制备，共选用了 5 种乳化剂，分别以 WS，S，W，LS，KZ 表示，其主要技术指标见表 2。

表 2 乳化沥青主要技术指标

Tab. 2 Main technical indexes of emulsified asphalt

| 指标                 | WS   | S    | W    | LS   | KZ   | 规范要求   |
|--------------------|------|------|------|------|------|--------|
| 破乳速度               | 慢裂   | 中裂   | 满裂   | 慢裂   | 中裂   | 慢裂或中裂  |
| 筛余 (1.18 mm 筛)/%   | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | ≤0.1   |
| 25℃恩格拉黏度/(Pa·s)    | 4.7  | 8.5  | 6.8  | 3.2  | 5.7  | 2~30   |
| 蒸发 残留分含量/%         | 65.7 | 62.8 | 63.1 | 64.3 | 63.9 | ≥62    |
| 残留 25℃针入度/(0.1 mm) | 82   | 70   | 84   | 69   | 86   | 50~300 |
| 物 15℃延度/cm         | >100 | 47   | 69   | 55   | 82   | ≥40    |

1.2 试验方案设计

图 1 为试验仪器磨耗仪，关键结构有磨耗头、磨耗管和试件托盘，其技术参数可参考 ASTM D7196—06 的要求。



图 1 磨耗仪

Fig. 1 Abrasion instrument

磨耗试验过程规定如下：首先成型冷再生混合料试件，试件高度应满足  $(66 \pm 2)$  mm，然后将试件放入温湿控制箱进行规定条件下的养生；养生结束后，取出试件，称取试件质量，将试件放入磨耗仪的试件托盘中，并固定在磨耗仪上；开动仪器，使

磨耗头转动 15 min 后停止，试验在温度为  $(23 \pm 3)$ ℃的环境下进行；然后称取试件质量，计算磨耗损失，见式 (1)。一组试样有效个数不应少于 3 个，数据处理参照现行《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20) 中 (T0752) 的要求，最后取平均值作为该混合料的磨耗损失，以评价乳化沥青冷再生混合料的初期抗磨耗性能。

$$W = \frac{100 \times (m_a - m_b)}{m_a}, \tag{1}$$

式中，W 为乳化沥青冷再生混合料磨耗损失； $m_a$  为磨耗前的试件质量； $m_b$  为磨耗后的试件质量。

本研究首先分析了旋转压实法和大型马歇尔击实法对乳化沥青冷再生混合料磨耗损失的影响，以此确定适合的成型方式；然后设计对比试验，确定磨耗试验的养生条件，包括养生温度、养生相对湿度和养生时间；最后研究不同乳化剂种类、乳化剂剂量、乳化沥青用量、水泥剂量和矿料级配对磨耗损失的影响，以此确定磨耗损失的技术要求。

2 试件成型方式的确定

选用粗型级配 A，以及由乳化剂 WS 制备的乳化沥青，根据现行《公路沥青路面再生技术规范》进行乳化沥青冷再生混合料配合比设计，确定水泥剂量为 1.5%，乳化沥青用量为 3.5%，最佳含水率为 4.1%。马歇尔击实次数为双面各 75 次，通过试件高度预先调整装料质量，装料质量经反复试验，约为 2 600 g；旋转压实次数同样通过试件高度来控制，经过预先试验，表明旋转压实 30 次较为合理。试件养生温度为 25℃，养生相对湿度为 70%，养生时间 4 h 下磨耗损失见表 3，本研究平行试件均为 4 个。

表3 不同成型方式条件下的试验结果 (单位:%)

Tab.3 Test result using different modeling methods (unit:%)

| 成型方式    | 磨耗损失 | 标准差  |
|---------|------|------|
| 大型马歇尔击实 | 3.1  | 0.42 |
| 旋转压实    | 3.5  | 0.37 |

通过马歇尔击实法或旋转压实法成型试件均能立即脱模,并完整取出,由表3可知两者磨耗损失并无明显差别。美国 ASTM D7196—06 推荐采用旋转压实仪成型试件,考虑马歇尔击实仪在我国的普遍性,决定采用大型马歇尔击实法(双面各击实75次)作为磨耗试验的试件成型方式。

### 3 养生条件的确定

养生条件对乳化沥青冷再生混合料的初期强度至关重要<sup>[16-18]</sup>,而 ASTM D7196—06 并未作明确规定,因而限制了其应用。本研究将分析养生温度、养生湿度、养生时间这3个关键因素对冷再生混合料抗磨耗性能的影响,以确定适合的养生条件。试件成型均采用大型马歇尔击实法,级配类型为A,水泥用量为1.5%,乳化沥青由乳化剂WS制备,乳化沥青用量为3.5%,最佳含水率为4.1%。

#### 3.1 养生温度的确定

设定养生相对湿度为70%,养生时间为4h,不同养生温度条件下的磨耗损失见表4。

表4 不同养生温度条件下的试验结果

Tab.4 Test result at different curing temperatures

| 养生温度/℃ | 磨耗损失/% | 标准差/% |
|--------|--------|-------|
| 15     | 4.6    | 0.46  |
| 25     | 3.1    | 0.42  |
| 35     | 1.8    | 0.31  |

由表4可知,温度对乳化沥青冷再生混合料的磨耗损失影响较大,随温度的升高,磨耗损失减小,表明提高温度可增强乳化沥青冷再生混合料的初期强度。由于磨耗试验是在室温下进行,温度过高或过低,都无法较好模拟其初期强度形成过程;美国 ASTM D7196—06 推荐温度为18~24℃,考虑我国现行沥青混合料试验规程中大多室温试验温度均为25℃,因此,拟定磨耗试验养生温度为25℃。

#### 3.2 养生相对湿度的确定

养生相对湿度直接关系到水泥水化反应的进行,不同相对湿度条件下冷再生混合料的磨耗损失见表5。养生温度统一为25℃,养生时间为4h。

表5 不同养生相对湿度条件下的试验结果 (单位:%)

Tab.5 Test result in different curing relative humidities (unit:%)

| 养生相对湿度 | 磨耗损失 | 标准差  |
|--------|------|------|
| 40     | 0.4  | 0.17 |
| 60     | 2.3  | 0.29 |
| 70     | 3.1  | 0.42 |
| 80     | 4.9  | 0.46 |

由表5可知,随着相对湿度的增加,乳化沥青冷再生混合料的磨耗损失逐渐增大。这主要是因为高湿环境下,减弱了冷再生混合料中水分的蒸发,影响了混合料强度的形成。相对湿度为40%时,磨耗损失仅0.4%,数值过小,可能无法有效区分不同类型乳化沥青冷再生混合料的抗磨耗性能,同时相对湿度过小,会影响水泥水化反应的进行。

表6列举了我国由北向南部分省市的相对湿度情况。

表6 我国部分省市相对湿度 (unit:%)

Tab.6 Relative humidities of some regions in China (unit:%)

| 地区  | 全年平均相对湿度 |       |       | 每年6—9月平均相对湿度 |       |       |
|-----|----------|-------|-------|--------------|-------|-------|
|     | 2014年    | 2015年 | 2016年 | 2014年        | 2015年 | 2016年 |
| 北京市 | 45.3     | 49.4  | 48.8  | 55.4         | 56.9  | 56.7  |
| 江西省 | 70.6     | 74.8  | 75.7  | 78.6         | 78.4  | 76    |
| 湖北省 | 63.3     | 65.3  | 66.9  | 73.1         | 72.0  | 72.8  |
| 广东省 | 73.3     | 75.9  | 76.3  | 79.1         | 78.9  | 78.5  |
| 平均值 | 63.1     | 66.4  | 66.9  | 71.6         | 71.6  | 71.0  |

由表6可知,近3年来,这4个省市全年平均湿度为65.5%,6—9月平均相对湿度为71.4%。结合其他地区相对湿度情况,以及冷再生路面的施工期,相对湿度70%能较大范围覆盖我国主要省市。因此,拟定磨耗试验养生相对湿度为70%。

#### 3.3 养生时间的确定

设定养生温度为25℃,养生相对湿度为70%,不同养生时间条件下的磨耗损失见表7。

表7 不同养生时间条件下的试验结果

Tab.7 Test result using different curing time

| 养生时间/h | 磨耗损失/% | 标准差/% |
|--------|--------|-------|
| 2      | 5.3    | 0.46  |
| 4      | 3.1    | 0.42  |
| 6      | 1.7    | 0.26  |

由表7可知,养生时间对乳化沥青冷再生混合料磨耗损失有较大影响。随养生时间的延长,冷再生混合料磨耗损失逐渐减小,表明其强度逐渐形成。由于本研究主要是评价乳化沥青冷再生混合料的初期强度,养生时间不宜过长,结合美国 ASTM D7196—

06 推荐养生时间 4 h, 本研究拟定磨耗试验养生时间为 4 h。

4 磨耗损失技术要求的确定

经上节研究, 拟定乳化沥青冷再生混合料磨耗试验的成型方式: 大型马歇尔击实法 (双面各击实 75 次); 试件养生条件: 温度为 25 ℃, 相对湿度为 70%, 时间为 4 h。

试验条件统一后, 对于乳化沥青冷再生混合料磨耗损失的影响主要包括: 乳化剂种类、乳化剂剂量、乳化沥青用量、矿料级配、水泥剂量等。本研究将对这几项关键因素进行分析, 以制定冷再生混合料磨耗损失的技术要求。

4.1 乳化剂种类

不同乳化剂种类条件下乳化沥青冷再生混合料的磨耗损失见表 8。级配类型为 A, 乳化沥青用量为 3.5%, 水泥剂量为 1.5%, 最佳含水率为 4.1%。

表 8 不同乳化剂种类条件下的试验结果 (单位: %)  
Tab. 8 Test result using different emulsifier types (unit: %)

| 乳化剂种类 | 乳化剂剂量 | 磨耗损失 | 标准差  |
|-------|-------|------|------|
| WS    | 2.4   | 3.1  | 0.42 |
| S     | 2.4   | 3.4  | 0.46 |
| W     | 3.0   | 3.8  | 0.35 |
| LS    | 2.2   | 6.4  | 1.79 |
| KZ    | 3.2   | 2.8  | 0.96 |

由表 8 可知, 不同乳化剂对乳化沥青冷再生混合料磨耗损失有影响, 其中 LS 乳化剂的磨耗损失最大, 明显大于其他乳化剂。其余 4 种乳化剂磨耗损失的平均值为 3.3%。

4.2 乳化剂剂量

乳化剂的剂量直接关系乳化沥青的性能。因此, 本研究分析了乳化剂剂量对乳化沥青冷再生混合料磨耗损失的影响, 见表 9。级配类型为 A, 乳化剂选用 WS, 乳化沥青用量为 3.5%, 水泥剂量为 1.5%, 最佳含水率为 4.1%。

表 9 不同乳化剂剂量条件下的试验结果 (单位: %)  
Tab. 9 Test result using different emulsifier dosages (unit: %)

| 乳化剂剂量 | 磨耗损失 | 标准差  |
|-------|------|------|
| 1.4   | 2.4  | 0.57 |
| 2.4   | 3.1  | 0.42 |
| 3.4   | 3.3  | 0.59 |

由表 9 可知, 不同乳化剂剂量对乳化沥青冷再生混合料的磨耗损失有影响, 但差异不大。3 种乳

剂剂量条件下的磨耗损失平均值为 2.9%。

4.3 乳化沥青用量

不同乳化沥青用量条件下乳化沥青冷再生混合料的磨耗损失见表 10。乳化剂选用 WS, 乳化剂剂量为 2.4%, 级配类型为 A, 水泥用量为 1.5%, 最佳含水率为 4.1%。

表 10 不同乳化沥青用量条件下的试验结果 (单位: %)  
Tab. 10 Test result using different emulsified asphalt dosages (unit: %)

| 乳化沥青用量 | 磨耗损失 | 标准差  |
|--------|------|------|
| 3.0    | 3.6  | 0.56 |
| 3.5    | 3.1  | 0.42 |
| 4.0    | 2.5  | 0.33 |

由表 10 可知, 乳化沥青用量对冷再生混合料磨耗损失有影响, 提高乳化沥青用量可以提高其抗磨耗性能。3 种乳化沥青用量条件下乳化沥青冷再生混合料磨耗损失的平均值为 3.1%。

4.4 水泥剂量

不同水泥剂量条件下乳化沥青冷再生混合料的磨耗损失见表 11。乳化剂选用 WS, 乳化剂剂量为 2.4%, 级配类型为 A, 乳化沥青用量为 3.5%, 最佳含水率为 4.1%。

表 11 不同水泥剂量条件下的试验结果 (单位: %)  
Tab. 11 Test result using different cement dosages (unit: %)

| 水泥剂量 | 磨耗损失 | 标准差  |
|------|------|------|
| 0.8  | 8.5  | 0.83 |
| 1.5  | 3.1  | 0.42 |
| 2.3  | 2.0  | 0.67 |

由表 11 可知, 水泥剂量对乳化沥青冷再生混合料磨耗损失影响较大, 水泥剂量过低, 造成冷再生混合料初期强度下降明显。

4.5 矿料级配

不同级配条件下乳化沥青冷再生混合料的磨耗损失见表 12。乳化剂选用 WS, 乳化剂剂量为 2.4%, 乳化沥青用量为 3.5%, 水泥用量为 1.5%,

表 12 不同矿料级配条件下的试验结果 (单位: %)  
Tab. 12 Test result using different aggregate gradations (unit: %)

| 级配类型 | 最佳含水率 | 磨耗损失 | 标准差  |
|------|-------|------|------|
| A    | 4.1   | 3.1  | 0.42 |
| B    | 4.3   | 2.3  | 0.78 |
| C    | 4.3   | 2.4  | 0.39 |

由表 12 可知, 不同级配条件下乳化沥青冷再生混合料磨耗损失存在差异, 级配较粗时, 磨耗损失

较大,3种级配的磨耗损失平均值为2.6%。

我国实际工程应用中,乳化沥青冷再生混合料水泥剂量一般不超过1.5%,乳化沥青用量一般不低于3.0%,该两项指标过高或过低都会对混合料性能带来负面影响。前文4.4节表明,水泥剂量为1.5%时,磨耗损失为3.1%;4.3节表明,乳化沥青用量为3.0%时,磨耗损失为3.6%;结合4.1节结果,除LS乳化剂,其余4种乳化剂的磨耗损失的平均值为3.3%;加上矿料级配和乳化剂剂量试验结果,结合国内外资料调研,本研究拟定乳化沥青冷再生混合料的磨耗损失应不大于3.5%。

此外,不同因素条件下的磨耗损失标准差较小,表明磨耗试验可用于评价冷再生混合料的初期强度。

## 5 方差分析

表13列出了乳化剂种类、乳化剂剂量、乳化沥青用量、水泥剂量和矿料级配对冷再生混合料磨耗损失的方差分析结果。其中,SS为离差平方和,DOF为自由度,MS为均方差,F为F分布的统计量,P为F值对应的概率,显著性水平为0.05。当 $P < 0.05$ 时,表明该因素对试验结果有显著影响。

表13 乳化沥青冷再生混合料磨耗损失方差分析结果

Tab. 13 ANOVA result of abrasion loss of emulsified asphalt cold recycled mixture

| 级配类型   | SS      | DOF | MS     | F       | P                      |
|--------|---------|-----|--------|---------|------------------------|
| 乳化剂种类  | 16.382  | 4   | 4.096  | 4.411   | 0.015                  |
| 乳化剂剂量  | 0.872   | 2   | 0.436  | 1.547   | 0.264                  |
| 乳化沥青用量 | 2.422   | 2   | 1.211  | 1.948   | 0.198                  |
| 水泥剂量   | 102.962 | 2   | 51.481 | 117.970 | $3.490 \times 10^{-7}$ |
| 矿料级配   | 2.66    | 2   | 1.33   | 4.290   | 0.049                  |

由表13通过比较SS可知,乳化沥青冷再生混合料磨耗损失的影响因素依次为水泥剂量>乳化剂种类>矿料级配>乳化沥青用量>乳化剂剂量,水泥对乳化沥青冷再生混合料初期强度影响巨大。主要是因为:乳化沥青冷再生混合料掺入水泥后,水泥颗粒在较短时间内被乳化沥青裹覆,一定程度延缓水泥的水化反应,继而影响强度的形成,但水泥会加快乳化沥青的破乳,致使初期强度迅速增大,同时破乳沥青和水化物会形成加筋结构<sup>[9]</sup>,使初期强度进一步增大。

由P值还可知,水泥剂量、乳化剂种类和矿料级配对磨耗损失影响显著。因此,在乳化沥青冷再生混合料配合比设计时,对于初期强度应重点考虑水泥剂量、乳化剂种类和矿料级配这3个影响因素。

## 6 结论

(1) 提出了适用于我国的乳化沥青冷再生混合料初期抗磨耗性能评价方法,明确了磨耗试验的关键参数;该方法试验结果偏差较小,简单、可靠。

(2) 提出了乳化沥青冷再生混合料初期抗磨耗性能的评价指标和技术要求,以磨耗损失不大于3.5%作为控制指标,可作为优化混合料配合比设计的依据。

(3) 乳化沥青冷再生混合料初期磨耗损失的影响因素依次为水泥剂量>乳化剂种类>矿料级配>乳化沥青用量>乳化剂剂量,其中水泥剂量、乳化剂种类和矿料级配对混合料初期强度影响显著。

## 参考文献:

## References:

- [1] 徐剑,黄颂昌,邹桂莲.高等级公路沥青路面再生技术[M].北京:人民交通出版社,2011.  
XU Jian, HUANG Song-chang, ZOU Gui-lian. Recycling Technology of Asphalt Pavement for High-grade Highway [M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [2] KIM Y, LEE H, HEITZMAN M. Dynamic Modulus and Repeated Load Tests of Cold In-place Recycling Mixtures Using Foamed Asphalt [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2009, 21 (6): 279-285.
- [3] MOGHADAM B B, MOLLASHAHI H F. Suggesting A Simple Design Method for Cold Recycled Asphalt Mixes with Asphalt Emulsion [J]. Journal of Civil Engineering & Management, 2017, 23 (7): 966-976.
- [4] 徐剑,黄颂昌,秦永春,等.乳化沥青和泡沫沥青冷再生混合料性能研究[J].公路交通科技,2010,27(6):20-24.  
XU Jian, HUANG Song-chang, QIN Yong-chun, et al. Performance of Cold Recycled Mixtures with Emulsified Asphalt or Foam Asphalt [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27 (6): 20-24.
- [5] ARIMILLI S, JAIN P K, NAGABHUSHANA M N. Optimization of Recycled Asphalt Pavement in Cold Emulsified Mixtures by Mechanistic Characterization [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28 (2): 04015132.
- [6] KIM Y, IM S, LEE H D. Impacts of Curing Time and Moisture Content on Engineering Properties of Cold In-place Recycling Mixtures Using Foamed or Emulsified Asphalt [J]. Journal of Materials in Civil Engineering,

- 2011, 23 (5): 542–553.
- [7] 张迪, 方琳, 王建伟. 养生期乳化沥青冷再生混合料强度及疲劳损伤特性 [J]. 公路工程, 2016, 41 (1): 236–241.  
ZHANG Di, FANG Lin, WANG Jian-wei. Characteristics of Strength and Fatigue Damage for Emulsified Asphalt Cold Recycled Mixture [J]. Highway Engineering, 2016, 41 (1): 236–241.
- [8] 吴超凡, 曾梦澜, 钟梦武, 等. 乳化沥青冷再生混合料设计方法试验研究 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2008, 35 (8): 19–23.  
WU Chao-fan, ZENG Meng-lan, ZHONG Meng-wu, et al. Experimental Study of the Design Method for Cold Recycled Mixture Using Asphalt Emulsion [J]. Journal of Hunan University: Natural Science Edition, 2008, 35 (8): 19–23.
- [9] 魏唐中, 洪锦祥, 林俊涛. 水泥与乳化沥青对冷再生强度的影响及作用机理 [J]. 建筑材料学报, 2017, 20 (2): 310–315.  
WEI Tang-zhong, HONG Jin-xiang, LIN Jun-tao. Effect and Action Mechanism of Cement and Emulsified Asphalt on the Strength of Cold Regeneration [J]. Journal of Building Materials, 2017, 20 (2): 310–315.
- [10] 王之怡, 郝培文, 柳浩. 乳化沥青冷再生混合料疲劳性能研究 [J]. 公路交通科技, 2015, 32 (2): 28–32.  
WANG Zhi-yi, HAO Pei-wen, LIU Hao. Study on Fatigue Performance of Emulsified Asphalt Cold Recycled Mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32 (2): 28–32.
- [11] MA T, WANG H, ZHAO Y. Laboratory Investigation on Residual Strength of Reclaimed Asphalt Mixture for Cold Mix Recycling [J]. International Journal of Pavement Research & Technology, 2015, 8 (1): 17–22.
- [12] ZHAO Y, NI F, ZHOU L, et al. Three-dimensional Fracture Simulation of Cold In-place Recycling Mixture Using Cohesive Zone Model [J]. Construction & Building Materials, 2016, 120: 19–28.
- [13] JTG F41—2008, 公路沥青路面再生技术规范 [S].  
JTG F41—2008, Technical Specifications for Highway Asphalt Pavement Recycling [S].
- [14] 耿九光, 陈忠达, 李龙. 水泥-乳化沥青冷再生混合料配合比设计 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29 (1): 10–14.  
GENG Jiu-guang, CHEN Zhong-da, LI Long. Mixing Design of Cement-emulsified-asphalt-cold-recycle Mixture (CEACRM) [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29 (1): 10–14.
- [15] LIN J, WEI T, HONG J. Research on Development Mechanism of Early-stage Strength for Cold Recycled Asphalt Mixture Using Emulsion Asphalt [J]. Construction & Building Materials, 2015, 99: 137–142.
- [16] 王宏, 刘锋, 余建荣, 等. 乳化沥青冷再生混合料养生方式研究 [J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2015 (3): 641–646.  
WANG Hong, LIU Feng, YU Jian-rong, et al. Research on Curing Methods of Emulsified Asphalt Cold Recycled Mixture [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering Edition, 2015 (3): 641–646.
- [17] 高磊, 倪富健, 罗海龙, 等. 乳化沥青冷再生混合料的透水性及空隙特征 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2015, 45 (3): 581–585.  
GAO Lei, NI Fu-jian, LUO Hai-long, et al. Permeability and Air Voids of Cold Recycled Mixtures with Asphalt Emulsion [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2015, 45 (3): 581–585.
- [18] GRAZIANI A, GODENZONI C, CARDONE F, et al. Effect of Curing on the Physical and Mechanical Properties of Cold-recycled Bituminous Mixtures [J]. Materials & Design, 2016, 95: 358–369.

(上接第7页)

- [17] 谈至明, 姚祖康, 田波. 水泥混凝土路面的荷载应力分析 [J]. 公路, 2002 (8): 15–18.  
TAN Zhi-ming, YAO Zu-kang, TIAN Bo. Analysis of Loading Stresses in Cement Concrete Pavements [J]. Highway, 2002 (8): 15–18.
- [18] 李金凤, 田波, 牛开民. 基层开裂状态下水泥混凝土路面结构应力试验分析 [J]. 公路交通科技, 2012, 29 (9): 19–23.  
LI Jin-feng, TIAN Bo, NIU Kai-min. Experimental Analysis of Stress of Cement Concrete Pavement with Base Cracking [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29 (9): 19–23.
- [19] 梁旭, 于伟. 刚性路面柔性联接层有限元分析 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2013, 33 (3): 1–6.  
LIANG Xu, YU Wei. Finite Element Analysis of Rigid Pavement Flexible Context Layer [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2013, 33 (3): 1–6.