

文章编号:1005-0523(2014)02-0037-07

# 乳化沥青冷再生试验方法改进及性能研究

苏志翔,李淑明,吴小虎

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804)

**摘要:**对《公路沥青路面再生技术规范》(JTG F41-2008)中乳化沥青冷再生混合料试验规程中的最佳含水率OWC的确定方法以及试件成型的养生温度等进行改进,以完善和简化规范要求的试验方法,并通过室内试验对改进后的试验方法进行验证和对比研究。研究表明,使用最佳流体含量OFC作为乳化冷再生混合料外加水的控制指标优于规范要求的最佳含水量OWC指标;提高试验养生温度至110℃,可以获得与规范60℃养生温度相似的结果,并能够缩短试验所需时间,提高工作效率;乳化沥青冷再生混合料具有较好的水稳定性能及高温稳定性能,能满足或高于热拌沥青混合料的技术要求。

**关键词:**乳化沥青;冷再生;最佳含水量;最佳流体含量;养生温度;水稳定性;高温稳定性

**中图分类号:**U414

**文献标志码:**A

我国《公路沥青路面再生技术规范》(JTG F41-2008)中规定了乳化沥青冷再生混合料的配合比设计方法,明确了乳化沥青冷再生混合料配合比设计时的矿料级配、最佳含水率OWC的确定方法以及最佳乳化沥青用量OEC的确定方法等<sup>[1]</sup>。但是,通过试验发现,规范中规定的一些试验方法有时并不能得到预期的试验结果或者试验过程比较繁杂<sup>[2-7]</sup>。例如,通过较多的试验实践发现,对于规范要求的确定乳化沥青冷再生混合料的最佳含水量的试验方法,采用土工试验方法有时并不能得到很好的峰值曲线,难以确定击实的最佳含水量<sup>[8]</sup>;对于确定最佳乳化沥青用量,规范要求的试件的击实次数和养生方法为:双面击实各50次后60℃烘箱养生40h,然后取出双面击实各25次,常温冷却12h后脱模进行干湿劈裂试验<sup>[1]</sup>,整个过程需要持续5天,耗时较长。因此,本文对规范中要求的最佳含水量的确定方法以及试验养护温度等进行改进,并通过室内试验和对比研究对改进后的试验方法进行验证,以完善和简化规范要求的试验方法。

## 1 试验材料

### 1.1 乳化沥青

选用中石化生产的东海牌乳化沥青进行试验,乳液中纯沥青含量为65%,性能指标如表1。

### 1.2 集料

集料采用新鲜石灰岩和RAP旧料,两者的筛分结果如表2和表3。集料的各项指标分别满足文献[1]和[9]要求。

## 2 试验方案与结果分析

### 2.1 矿料级配设计

根据国内外经验,乳化沥青冷再生混合料宜采用连续密集配,国内规范要求的乳化沥青冷再生混合料设计级配范围比较宽泛,并且与热拌沥青混合料的级配相差不大<sup>[2-4]</sup>。因此,综合考虑[1]要求的乳化沥青

收稿日期:2013-11-21

作者简介:苏志翔(1990—),男,硕士研究生,主要研究方向为道路工程材料;李淑明(1975—),女,副教授,博士,主要研究方向为道路工程材料。

冷再生中粒式混合料工程级配范围和[9]要求的中粒式 AC-20 型混合料级配范围,设计乳化沥青冷再生混合料的矿料级配。试验中,尽量提高 RAP 旧料的使用比例,控制其使用量在 50% 以上。乳化沥青冷再生混合料矿料级配设计如表 4、表 5 和图 1 所示。

表 1 乳化沥青性能指标

Tab. 1 Performance of emulsified asphalt

试验项目		试验结果	质量要求	试验方法
破乳速度		中裂	慢裂或中裂	T 0658
粒子电荷		阳离子(+)	阳离子(+)	T 0653
黏度	恩格拉黏度计法 E25	12	2~30	T 0622
	残留分含量/%	65	≥62	T 0651
蒸发残留物	溶解度	98	≥97.5	T 0607
	25℃针入度/(0.1 mm)	72	50~300	T 0604
	15℃延度/cm	93	≥40	T 0605
与粗集料的粘附性,裹覆面积		满足	≥2/3	T 0654
与粗、细粒式集料拌合试验		均匀	均匀	T 0659
常温贮存稳定性/%	1 d	0.5	≤1	T 0655
	5 d	1.2	≤5	

表 2 石灰石筛分结果

Tab. 2 Aggregate passing percentage

粒径范围/mm	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%											
	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
15~25	100	96	61.4	20.4	0.5	0.1	0	0	0	0	0	0
5~15	100	100	100	100	78.4	4.2	0.1	0	0	0	0	0
3~5	100	100	100	100	100	83.8	4.7	1.7	0	0	0	0
0~3	100	100	100	100	100	99.3	67.3	39.1	25.6	15.6	10.2	2.9
矿粉	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	97.8	87.5

表 3 RAP 旧料筛分结果

Tab. 3 Passing percentage of RAP

粒径范围/mm	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%												
	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
RAP 中档	100	100	100	88.5	66.4	26.6	1.6	1.1	0.9	0.7	0.5	0.4	0.2
RAP 细档	100	100	100	100	100	100	74.6	31.6	13.6	6.2	3.2	1.9	1.4

表 4 各粒径范围的矿料用量

Tab. 4 The percentage of each aggregate

矿料种类和粒径范围/mm	15~25	RAP 中档	RAP 细档	0~3	矿粉
用量/%	19	35	25	15	6

表 5 乳化沥青冷再生矿料级配表

Tab. 5 Gradation design

筛孔尺寸/mm	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率/%	100	100	99.2	88.6	73.1	55.4	40.1	24.4	15.6	11.7	9.3	8.0	6.1

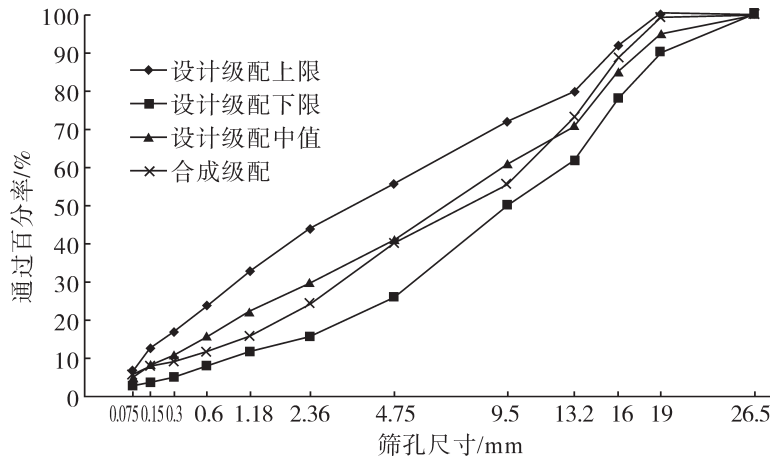


图1 乳化沥青冷再生矿料级配曲线

Fig. 1 Mineral aggregate gradation curves

乳化沥青冷再生混合料需要通过掺加水泥来增强混合料的强度,本试验中将20%的矿粉用水泥代替,因此,各矿料的用量调整如下表6,RAP旧料的总用量为60%,新集料的总用量为34%,矿粉用量4.8%,水泥用量1.2%。

表6 各种矿料的用量

Tab. 6 The percentage of each aggregate

矿料种类和粒径范围/mm	15~25	RAP中档	RAP细档	0~3	矿粉	水泥
用量/%	19	35	25	15	4.8	1.2

## 2.2 最佳含水率 OWC 及最佳流体用量 OFC

根据文献[1]要求,参照现行《公路土工试验规程》(JTG E40)T 0131的方法,对合成矿料进行击实试验,确定最佳含水率,乳化沥青的用量可定为4%,变化含水率进行击实试验,获得最大干密度时,其混合料的含水率即为最佳含水率 OWC<sup>[1]</sup>。试验得到干密度与平均含水率的关系曲线如图2。

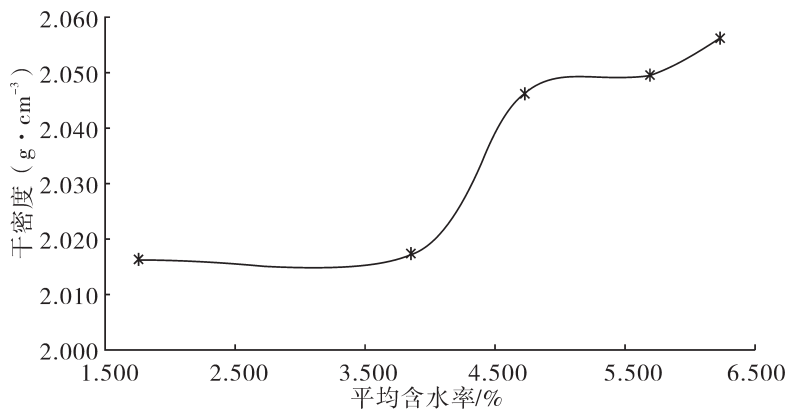


图2 确定最佳含水量

Fig. 2 Determination of OWC

从试验过程和试验结果的关系曲线得到如下结论:

1) 随着含水率的增加,干密度先增加后平稳保持不变,随着含水率的继续增加干密度又会出现增大的趋势,试验结果没有明显的峰值,补做试验后依然未能出现明显的峰值。因此通过此方法难以定出最佳含水率。

2) 试验过程中发现,含水量较小时,混合料中大粒径的集料被击碎严重;当含水率较大时,击实过程中

水和乳液流失较多。因此,试验得到的结果并不能真实的反应含水率与干密度之间的关系。

3) 尽管试验结果得不到明显的峰值,但是含水率过大显然不能满足试验的要求,因此,可以根据干密度达到平稳段的含水率作为最佳含水率,确定最佳含水率 OWC 为 5.0%。

通过上述方法并没有能准确的定出最佳含水率 OWC,因此需在其方法上做出一些改进,参照国内现有的研究,可以通过确定最佳流体用量 OFC 的方法来确定最佳的用水量<sup>[3,8]</sup>。

具体方法如下,将 5 个不同流体用量(水与乳化沥青的质量比为 1:1)的再生料进行土工击实试验,确定试件最大干密度,计算方法如公式(1)所示,根据试件干密度—流体含量关系曲线,回归得出最大干密度及其相应的最佳流体含量 OFC 作为后期试验控制外加水量的指标。试验的击实方法规范相同。试验得到干密度与流体用量的关系曲线如图 3。

$$D_{\text{干密度}} = \frac{100}{W_F + 100} \times \frac{M_B}{V_{\text{桶}}} \times 1000 \quad (1)$$

式中:  $D_{\text{干密度}}$  ——干密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;

$W_F$  ——试件在压实过程中的流体含量(质量百分比, %);

$M_B$  ——击实后试件的质量, g;

$V_{\text{桶}}$  ——击实桶的体积,  $\text{cm}^3$ 。

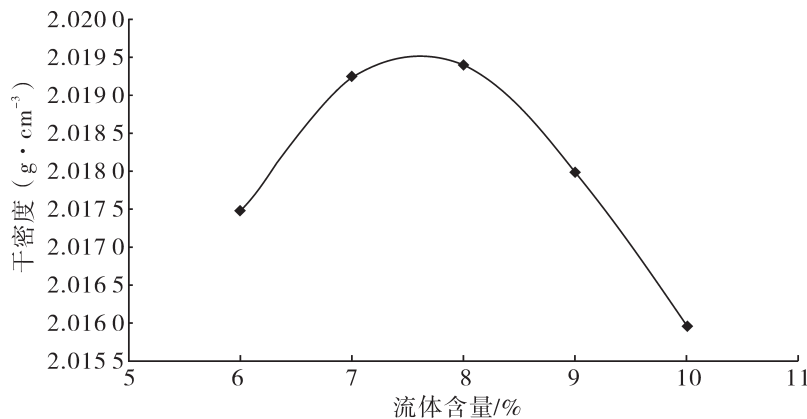


图 3 确定最佳流体用量

Fig. 3 Determination of OFC

由关系曲线可知,随着流体含量的增加,干密度先增大后减小,有明显的峰值。因此通过此方法可以确定最佳流体用量为 7.5%,此时对应的试件的含水量在 5.0% 左右,说明最佳含水率为 5.0% 是合理的。

通过两种不同的试验方法分别得到了最佳含水量 OWC 及最佳流体用量 OFC,对比两种试验方法可知:

1) 通过规范方法难以确定最佳用水量,试验结果没用明显的峰值,不能得到最大干密度。其原因可能有两点,第一含水量较小时集料破碎严重,含水量较大时水和乳液流失严重,使得试验结果差异性较大;第二,由于乳化沥青中纯沥青也是液体状态,单纯考虑水对击实过程中最大干密度的影响并不合理。

2) 通过确定最佳流体用量来控制混合料击实时的液体含量比较合理,击实的最大干密度与流体用量存在明显的峰值,并且此时对应的试件含水量与通过规范方法获取的最佳含水量相近。

综合以上两点考虑,取最佳流体用量 OFC=7.5% 作为试验控制外加水的指标。

### 2.3 最佳乳化沥青用量 OEC

根据文献[1]要求,本次试验方法在其基础上做一些修改,具体修改如下:

1) 以预估的沥青用量为中值,按照一定的间隔变化形成 4~5 个乳化沥青用量,保持最佳流体用量 OFC

不变控制外加水用量,制备马歇尔试件;

2) 试件第一次双面击实各50次后,试样连同试模一起侧放在110℃的鼓风烘箱中养生24h,后取出试模进行二次击实双面各25次。

其他试样过程与规范要求相同,试件成型养生后测其毛体积密度,并实测各油石比下的最大理论密度,将各组油石比试件进行15℃劈裂试验、浸水24h的劈裂试验。根据劈裂强度、浸水劈裂强度、干湿劈裂强度比、混合料的空隙率结合工程经验,综合确定最佳乳化沥青用量OEC。试验结果如表7和图4。

表7 最佳乳化沥青用量试验结果

Tab. 7 Result of OEC test

试验内容	乳液用量/%				规范要求
	2.3	3.1	3.8	4.6	
最大理论密度( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	2.550	2.532	2.516	2.498	
毛体积密度( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	2.290	2.253	2.234	2.279	
空隙率/%	10.2	11.0	11.2	8.8	9~14
15℃劈裂强度/MPa	0.99	1.09	1.02	1.47	$\geq 0.5$
浸水劈裂强度/MPa	0.75	0.85	0.82	1.18	
干湿劈裂强度比/%	75.8	78.0	80.4	80.3	75

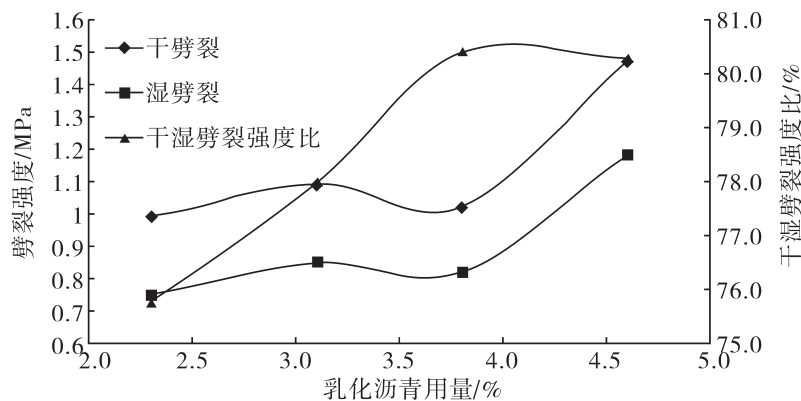


图4 确定最佳乳化沥青用量

Fig. 4 Determination of OEC

通过试验可的如下结论:

1) 前三个乳化沥青用量下的空隙率基本都能满足规范要求的9%~14%,乳化沥青用量为4.6%时的空隙率为8.8%,小于规范的要求;干、湿劈裂强度都在0.75 MPa以上,远高于规范要求的0.50 MPa,乳化沥青用量为4.6%时的劈裂强度出现明显的增大,可能是由于空隙率偏小导致的;四个乳化沥青用量下的干湿劈裂强度比都大于75%,都能满足规范要求。

2) 不同乳化沥青用量下的干、湿劈裂强度与乳化沥青用量关系没有明显的峰值,根据干、湿劈裂强度得不到最佳乳化沥青用量。干湿劈裂强度比随着乳化沥青用量的增加有先增大后减小的趋势,根据干湿劈裂强度比可以确定最佳乳化沥青用量为4.2%。

3) 通过与文献[6]的试验结果进行研究可知,将试件养生温度从60℃提高到110℃,干湿劈裂强度值都有一定的提高,但是其值仍然保持在同一水平,试验所需时间从5天缩短到3天,因此,可以通过提高养生温度的方法来缩短试验时间,提高试验效率。

## 2.4 水稳定性

冷再生沥青混合料的水稳定性能通过冻融劈裂试验来评价,按照最佳乳化沥青用量成型试件,试件成



型养生方法与上述方法相同,分为两组,每组四个平行试件,根据文献[10]规定的试验方法进行试验,一组在25℃水浴中浸泡2h后测试劈裂强度;另一组0.09 MPa浸水抽真空后-18℃冰箱养生16h,后60℃水浴恒温24h,最后25℃水中浸泡2h后测其劈裂强度。其冻融劈裂强度比TSR需满足文献[1]规定的技术要求。试验结果如表8所示。

表8 冻融劈裂试验结果

Tab. 8 Result of TSR

劈裂强度/MPa	冻融劈裂强度/MPa	空隙率/%	冻融劈裂强度比TSR/%	规范要求/%
0.60	0.48	9.2	79.96	≥70

试验所得的冻融劈裂强度比为79.96%,远大于规范要求,因此完全能满足冷再生混合料水稳定性能的要求。

## 2.5 高温稳定性

乳化沥青冷再生混合料的高温稳定性能通过车辙试验进行评价,根据文献[10]规定的试验方法做一些修改后进行试验,试验方法具体修改如下:

1) 根据最佳乳化沥青用量成型试件,成型试件前根据空隙率对质量进行预估,确保车辙板的空隙率与马歇尔试件的空隙率大致相同。

2) 分两次碾压,第一次碾压次数为12次(具体碾压次数可根据高度进行控制,确保第一次碾压后试件的高度高于试模3~5 mm),第一碾压完成后,试件连同试模放入110℃的鼓风烘箱中养生24h,而后取出进行二次碾压,碾压次数6次左右(具体碾压次数根据试件高度控制,确保二次碾压后试件与试模同高)。

3) 根据规范方法进行60℃的车辙试验,获取位移曲线和动稳定度,而后对试件进行切割,切割成9块,测其空隙率,验证其空隙率是否满足要求,若不满足要求则修正后重新成型试件进行试验。

试验结果如表9所示。从结果可以看出,乳化沥青冷再生混合料的动稳定度DS均远远超过文献[9]中对基质沥青和改性沥青混合料动稳定度的技术要求,说明冷再生混合料有非常好的高温稳定性能。对比文献[6]的试验结果可知,两者的动稳定度在同一水平,因此提高养生温度、缩短养生时间对冷再生混合料的动稳定度影响不大。

表9 车辙试验结果

Tab. 9 Result of rutting test

45 min 位移/mm	60 min 位移/mm	动稳定度(次/mm)	孔隙率/%
1.005	1.065	9843	9.6

## 3 结论

1) 规范要求的土工击实方法有时难以确定冷再生混合料的最佳含水量OWC,较难得到明显的峰值曲线,采用文中所述的修正后的土工击实方法以及计算公式可以确定乳化沥青冷再生混合料的最佳流体用量OFC,并通过试验发现其能够较好的控制混合料拌合及成型时的用水量。

2) 若将乳化沥青冷再生混合料试件成型时的养生温度提高到110℃,尽管温度的升高导致了干湿劈裂强度的提高,但是与60℃养生试件相比仍然保持在同一水平,且能满足规范要求。此外,试验时间缩短为3天。因此,可以通过提高试验养生温度的方法来缩短试验时间,提高工作效率。

3) 乳化沥青冷再生混合料具有较好的水稳定性能及高温稳定性能,能满足或高于热拌沥青混合料的技术要求,并且提高养生温度、缩短养生时间对冷再生混合料的动稳定度影响不大。

**参考文献:**

- [1] 中华人民共和国交通运输部. JTG F41-2008 公路沥青路面再生技术规范[S].北京:人民交通出版社,2008.
- [2] 钟梦武,吴超凡,于永生,等.掺加水泥的乳化沥青冷再生沥青混合料设计方法研究[J].公路,2008(1):195-199.
- [3] 王坤,陈景雅,王谦,瞿翔. DAT与SA温拌排水沥青混合料路用性能对比[J].华东交通大学学报,2013,30(3):65-70.
- [4] 王海峰. 乳化沥青混合料冷再生技术研究[D].长沙理工大学,2008.
- [5] 吴超凡,曾梦澜,赵明华,等. 乳化沥青冷再生混合料路用性能试验研究[J]. 公路交通科技,2009,07:27-32,37.
- [6] 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(6):20-24.
- [7] 吕伟民. 乳化沥青冷再生技术关键与应用前景[J]. 石油沥青,2009(6):29-34.
- [8] 严金海. 沥青路面冷再生设计方法及性能评价[D].东南大学,2006.
- [9] 中华人民共和国交通部. JTG F40-2004 公路沥青路面施工技术规范[S].北京:人民交通出版社, 2004.
- [10] 中华人民共和国交通部. JTJ 052-2000 沥青及沥青混合料试验规程[S].北京:人民交通出版社,2000.
- [11] 中华人民共和国交通部. JTG D50-2006 公路沥青路面设计规范[S].北京:人民交通出版社, 2006.

## Improvement and Performance of Cold-recycled Mixtures with Emulsified Asphalt

Su Zhixiang, Li Shuming, Wu Xiaohu

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** In this paper, the determination method of OWC (optimum water content) and the specimens curing temperature stipulated by cold recycling mixture test procedures of emulsified asphalt in “Technical Specifications for Highway Asphalt Pavement Recycling” were ameliorated to improve and simplify the test methods. Some laboratory tests and comparative study were carried out to verify them. The results show that: (1) Using OFC (optimum fluid content) as the optimum water content control index of the emulsified asphalt cold recycling mixture is superior to OWC that required by specification; (2) The similar results can be obtained when the curing temperature is improved from 60°C to 110°C, and the test time can be decreased greatly and the work efficiency can be improved; (3) The water stability and the high temperature stability of the mixture are superior to HMA to some extent.

**Key words:** emulsified asphalt; cold recycling; OWC; OFC; curing temperature; water stability; high temperature stability