

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.04.040

# 养生条件对乳化沥青冷再生混合料路用性能影响

杨普新

(四川交通职业技术学院,四川 成都 613000)

**摘要:**为提高乳化沥青冷再生混合料早期路用性能,通过室内试验研究了养生条件对乳化沥青冷再生混合料力学强度和稳定性的影响规律。结果表明:同一试验条件下,室内乳化沥青冷再生混合料可较好表征实体工程路用性能,现场混合料芯样较室内试件混合料稳定度和劈裂强度分别平均提高5.5%、10.7%;当养生时间 $\geq 7$  d,冷再生混合料稳定度、劈裂强度和冻融劈裂强度比满足《公路沥青路面再生技术规范》(JTGF41—2008)技术要求,稳定度、劈裂强度和冻融劈裂强度比提高速率分别为2.5%、0.8%、0.6%;在养生温度40℃时,冷再生混合料路用性能最优;随含水率增加,冷再生混合料空隙率先增加后减小,路用性能逐渐降低,当含水率为3.7%、4.2%,冷再生混合料劈裂强度不满足《公路沥青路面再生技术规范》(JTGF41—2008)技术要求。建议乳化沥青冷再生混合料养生时间为7 d,养生温度为25~40℃。

**关键词:**道路工程;养生条件;乳化沥青冷再生混合料;路用性能;试验研究

**中图分类号:**U414

**文献标志码:**A

## 0 引言

随着道路交通量和车辆轴载量日益提高,公路沥青路面出现不同程度的病害,导致路面维修养护里程逐年增大<sup>[1-3]</sup>,产生大量废旧沥青路面材料(Reclaimed Asphalt Pavement,简称RAP)。若对RAP进行合理再生利用,既减少优质砂石材料的消耗,又降低能源消耗和碳排放<sup>[3-5]</sup>,保护了生态环境。当前,乳化沥青冷再生技术因工艺简便、再生混合料性能良好、能耗低、污染小,逐步应用于沥青路面再生工程<sup>[6]</sup>。针对乳化沥青冷再生混合料设计、性能及应用研究,国内外学者取得了一定成果。Birgisson等<sup>[7]</sup>、Roncella等<sup>[8]</sup>等采用室内简单拉伸试验和三点弯曲梁试验评价了冷再生混合料抗裂性能;陈海民等<sup>[9]</sup>对比现有乳化沥青冷再生混合料配合比设计方法,提出基于冷再生混合料早期黏聚力、抗磨损性能及芯样强度的最佳乳化沥青用量设计方法;李锋等<sup>[10]</sup>研究了水泥掺量对乳化沥青冷再生混合料早期强度影响,过高水泥掺量导致冷再生混合料低温性

能降低;武泽锋等<sup>[11]</sup>对比研究了击实特性和养生时间对厂拌冷再生混合料体积参数的影响规律,“二次击实”时间间隔为4 h时,室内试件与现场混合料体积参数相近;江涛<sup>[12]</sup>研究了冷再生混合料摊铺碾压和上层碾压热拌沥青混合料碾压过程对冷再生混合料体积参数的影响,室内采用“二次击实”吻合实体工程压实效果;丁武洋等<sup>[13]</sup>依托S325省道路面大修工程研究了水泥掺量对冷再生混合料强度影响规律,并分析了其强度形成机理,提出了厂拌冷再生混合料设计方法;李瑞红<sup>[14]</sup>研究表明:乳化沥青冷再生混合料高温性能和抗永久变形性能优于热拌沥青混合料;裴晓梅等<sup>[15]</sup>依托旧路养护工程,验证了乳化沥青冷再生混合料具有良好的路用性能。

上述研究成果是基于试件标准养生方法得到,而现场自然环境与室内标准养生条件存在较大差异,室内标准养生乳化沥青冷再生混合料性能不能如实反映再生实体工程路用性能。乳化沥青冷再生混合料早期强度低,若混合料养生效果不佳,严重影响沥青路面使用性能。鉴于此,本文根据乳化沥青冷再生混合料试验路压实效果,并成型马歇尔试件,

收稿日期:2022-06-25

基金项目:四川交通职业技术学院科技教育发展基金资助项目(编号:2016-580-20)

作者简介:杨普新,女,高级工程师.E-mail:2979840950@qq.com

通过室内模拟不同自然条件,研究养生时间、养生温度及水对乳化沥青冷再生混合料路用性能的影响规律。

## 1 试验材料与配合比设计

### 1.1 试验材料

乳化沥青冷再生混合料路用性能试验材料选用RAP、乳化沥青、新集料、矿粉、水泥和水。

RAP选用湖南省某二级公路沥青路面铣刨料,旧沥青含量为4.58%,RAP筛分试验结果见表1;乳化沥青选用慢裂型阳离子乳化沥青,技术性质见表2;新集料选用石灰岩,公称最大粒径为26.5 mm,技术性质见表3,级配组成见表4;填料选用磨细的石灰岩矿粉和32.5级普通硅酸盐水泥,矿粉技术性质见表5,水泥技术性质见表6;水选用饮用水。

表1 RAP筛分试验结果

筛孔/ mm	通过质量 百分率/%	筛孔/ mm	通过质量 百分率/%
31.5	100.0	4.75	35.9
26.5	97.2	2.36	20.9
19.0	93.1	0.60	8.3
16.0	87.4	0.30	4.4
13.2	78.6	0.075	1.5
9.5	62.4		

表2 乳化沥青技术性质

测试项目	单位	测试值	规范值
溶解度	%	98.6	≥97.5
蒸发残 针入度(25℃)	0.1 mm	92	50~300
留物性质 延度(15℃)	cm	99	≥40
残留分含量	%	66.3	≥62
筛上残留物(1.18 mm筛)	%	0.05	≤0.1
储存稳定性	1 d	0.48	≤1
	5 d	2.7	≤5
与粗集料黏附性(裹覆面积)	—	≥2/3	≥2/3

表3 新集料技术性质

测试项目	单位	测试值	规范值
表观相对密度		2.73	≥2.45
压碎值	%	24.9	≤30
洛杉矶磨耗损失	%	27	≤35
吸水率	%	0.7	≤3.0
针片状颗粒含量	%	10.6	≤20

表4 新集料级配

筛孔/ mm	通过质量 百分率/%	筛孔/ mm	通过质量 百分率/%
31.5	100.0	4.750	0.3
26.5	96.2	2.360	0.3
19.0	70.6	0.600	0.2
16.0	37.5	0.300	0.1
13.2	14.2	0.075	0.1
9.5	0.9		

表5 矿粉技术性质

测试项目	单位	测试值	规范值
表观相对密度		2.57	≥2.45
含水率	%	0.1	≤1
粒度范围	<0.6 mm	100	100
	<0.15 mm	91.6	90~100
	<0.075 mm	80.4	70~100

表6 水泥技术性质

测试项目	单位	测试值	规范值
细度(80 μm)	%	7.8	≤10
安定性	mm	0.5	≤5
凝结时间	初凝 min	340	≥180
	终凝 min	425	≥360

### 1.2 配合比设计

按《公路沥青路面再生技术规范》(JTG F41—2008)设计粗粒式级配的乳化沥青冷再生混合料,RAP掺量为88%,新集料掺量为10%,矿粉掺量为2%;按《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)重型击实试验方法和《公路沥青路面再生技术规范》(JTG F41—2008)乳化沥青冷再生混合料设计要求,依次确定乳化沥青冷再生混合料最佳流体含量、最佳乳化沥青用量和最佳水泥掺量。

乳化沥青冷再生混合料矿料级配见表7,最佳流体含量为5.4%,最佳乳化沥青用量为3.5%,最佳水泥掺量为1.5%。

表7 矿料级配

筛孔/ mm	通过质量 百分率/%	筛孔/ mm	通过质量 百分率/%
31.5	100.0	4.750	33.6
26.5	97.5	2.360	20.4
19.0	91.0	0.600	9.3
16.0	82.7	0.300	5.9
13.2	72.6	0.075	3.3
9.5	57.0		

## 2 研究方案

### 2.1 试验方案

为保证不同自然条件下乳化沥青冷再生混合料良好的路用性能,研究养生条件对乳化沥青冷再生混合料高温稳定性、低温稳定性和水稳定性的影响规律。具体方案如下:

(1) 研究养生时间对现场及室内乳化沥青冷再生混合料稳定度、劈裂强度影响规律,结合水泥稳定材料强度发展规律,养生时间拟采用 1 d、3 d、5 d、7 d、14 d。

(2) 研究养生温度对乳化沥青冷再生混合料稳定度和劈裂强度影响规律,结合季节性温度及《公路沥青路面再生技术规范》(JTG F41—2008)乳化沥青冷再生混合料养生温度,养生温度拟采用 10℃、25℃、40℃、60℃。

(3) 研究水对乳化沥青冷再生混合料稳定度和劈裂强度影响规律,评价乳化沥青冷再生混合料抗水损害能力,试件按表 8 进行养生处理。

表 8 试件养生处理方法

编号	下列养生时间(d)对应试件养生处理方法		
	0~2	3~5	6~7
A	(25±2)℃条件养生		
B	每 8 h 洒水 8 mL		
C	(25±2)℃ 条件养生	泡水 3 h/d	(25±2)℃ 条件养生
D	泡水 24 h/d		

### 2.2 试件制备

结合乳化沥青冷再生混合料试验路压实效果,以冷再生混合料空隙率为控制指标,采用“二次击实”试验法成型  $\phi 152.4 \text{ mm} \times 95.3 \text{ mm}$  马歇尔试件,马歇尔试件第一次击实次数为 100 次;60℃条件下,试件养生 48 h 后,第二次击实次数为 50 次。每组试验采用 5 个平行试件。现场乳化沥青冷再生混合料试件采用芯样。

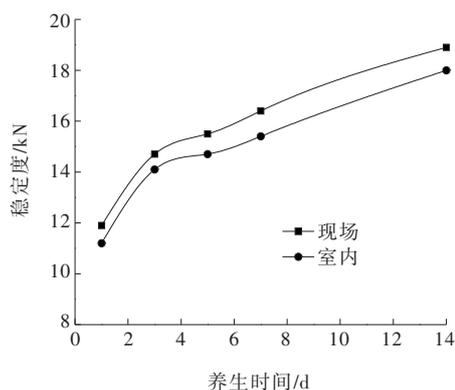
### 2.3 性能测试方法

按《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中马歇尔稳定度试验、劈裂(冻融)强度试验测定乳化沥青冷再生混合料路用性能。

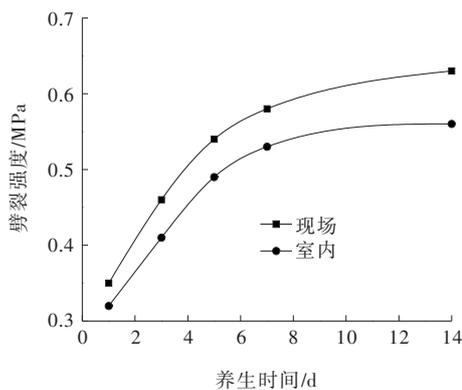
## 3 试验结果与分析

### 3.1 养生时间影响

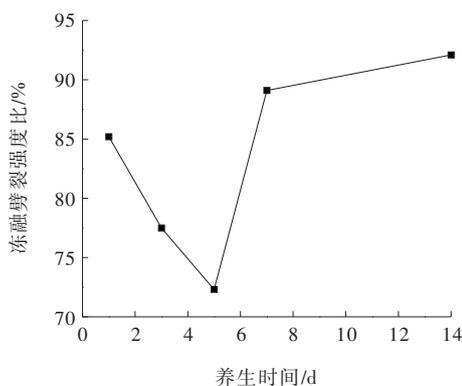
室内及现场养生条件下,养生时间对乳化沥青冷再生混合料路用性能影响见图 1。现场冷再生混合料试件养生 1 d 和 7 d 时,试件内部分别呈褐色和黑色,见图 2。室内养生温度为(25±2)℃,现场养生温度为 24~32℃。



(a) 稳定度



(b) 劈裂强度



(c) 冻融劈裂强度比

图 1 养生时间对乳化沥青冷再生混合料路用性能影响



(a) 养生1 d

(b) 养生7 d

图2 不同养生时间的乳化沥青冷再生混合料试件

由图1可知:随着养生时间增加,室内及现场养生环境下乳化沥青冷再生混合料稳定性和劈裂强度增长规律一致,且现场养生条件下冷再生混合料性能优于室内养生条件的混合料,较同养生时间的室内混合料稳定性和劈裂强度分别平均提高5.5%、10.7%,这是因为室内混合料成型过程中受试模边界影响,较现场压实效果存在差异,从而导致现场芯样强度略高。另外,现场温度略高于室内养生温度,一定程度上加快了乳化沥青破乳和水泥水化速率,促进了混合料强度增长。因此,室内乳化沥青冷再生混合料可较好表征实体工程路用性能,本文以室内养生环境下冷再生混合料为例,分析养生时间对混合料路用性能影响规律。

(1) 乳化沥青冷再生混合料稳定度与养生时间正相关,随养生时间增加,冷再生混合料稳定度提高速率逐渐减小至稳定。这是因为随养生时间增加,冷再生混合料内部水分不断被消耗,乳化沥青、水泥水化产物等材料组成胶结性材料,包覆连接集料,提高混合料毛体积密度,减小空隙率,致使结构趋于稳定,从而冷再生混合料稳定度提高。同时,在养生初期,水泥水化反应生成较多的水泥硅酸钙等凝胶物质填充混合料空隙,而随养生时间增加,水泥不断被消耗,水化产物逐渐减小,因此冷再生混合料稳定度提高速率减缓。当养生时间 $\leq 3$  d,养生时间增加1 d,冷再生混合料稳定度平均提高12.9%;养生时间由3 d增加至5 d,冷再生混合料稳定度平均提高4.3%;养生时间 $\geq 5$  d时,养生时间增加1 d,冷再生混合料稳定度平均提高2.5%。说明养生龄期 $\geq 5$  d时,冷再生混合料稳定度增长速率减缓。

(2) 随养生时间增加,乳化沥青冷再生混合料劈裂强度逐渐增大,前7 d劈裂强度增长速率明显大于后7 d劈裂强度增长速率,试件养生至7 d时,其劈裂强度为0.53 MPa,满足《公路沥青路面再生技术规范》(JTG F41—2008)技术要求,即冷再生混合料劈

裂强度 $\geq 0.5$  MPa。这是因为破乳的乳化沥青增强了集料间的黏聚力,提高了冷再生混合料结构的整体性和稳定性。当养生时间 $\leq 7$  d,养生时间增加1 d,冷再生混合料劈裂强度平均提高4.1%以上;养生时间由7 d增加至14 d时,养生时间增加1 d,冷再生混合料劈裂强度平均提高0.8%。

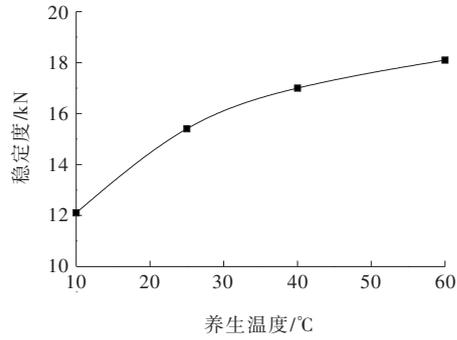
(3) 随养生时间增加,冷再生混合料冻融劈裂强度比先减小后增加。在养生时间5 d时,其冻融劈裂强度比最小,为72.3%,较养生1 d的混合料冻融劈裂强度比降低了15.1%;当养生时间 $\geq 7$  d,养生时间增加1 d,冷再生混合料冻融劈裂强度比平均提高0.6%。这是因为养生初期,大部分乳化沥青未发生破乳,冷再生混合料强度以内摩擦力为主;而随养生时间增加,破乳的乳化沥青、水泥水化产物、矿粉等材料组成具有胶结能力的填充集料,冷再生混合料初步形成整体结构,致使混合料劈裂强度逐步增大,但在低温应力和浸水条件下,具有胶结能力的填充集料对骨料固结作用减弱,从而混合料冻融劈裂强度比偏小;当养生时间达到7 d时,冷再生混合料形成稳定的整体结构,具有良好的劈裂强度,因此混合料冻融劈裂强度比提高。另外,养生时间 $\geq 1$  d,乳化沥青冷再生混合料冻融劈裂强度比满足《公路沥青路面再生技术规范》(JTG F41—2008)技术要求,即冷再生混合料冻融劈裂强度比 $\geq 70\%$ ,说明乳化沥青冷再生混合料水稳定性良好。对此,建议乳化沥青冷再生混合料养生时间为7 d。

### 3.2 养生温度影响

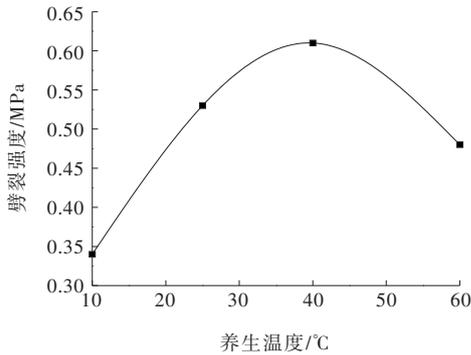
养生温度对室内乳化沥青冷再生混合料路用性能影响见图3。

由图3可知:

(1) 随养生温度升高,乳化沥青冷再生混合料稳定度逐渐提高,说明高温养生环境有利于提高冷再生混合料的稳定度。养生温度由10℃升高至25℃,冷再生混合料稳定度提高了27.3%;温度由25℃升高至40℃,混合料稳定度提高了10.4%;温度从40℃升高至60℃,混合料稳定度提高了6.5%。这是因为高温环境下乳化沥青破乳和水泥水化速率加快,破乳的乳化沥青、水泥水化产物、矿粉等材料组成更多的具有胶结能力的填充集料,增强了混合料内部黏聚力,从而混合料结构整体性和稳定性进一步提高,稳定度逐渐提高。



(a) 稳定度



(b) 劈裂强度

图3 养生温度对乳化沥青冷再生混合料路用性能影响(养生时间:7 d)

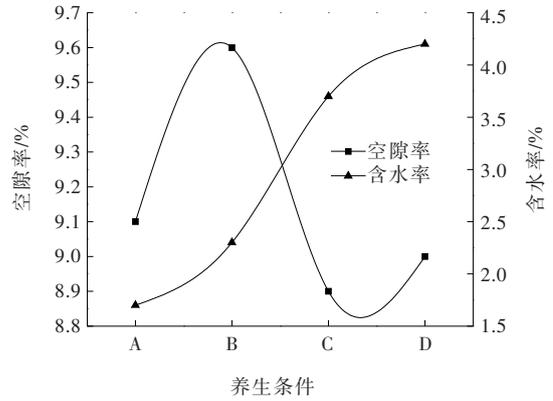
(2) 随养生温度升高,乳化沥青冷再生混合料劈裂强度先提高后减小,在养生温度 40 °C 时,混合料劈裂强度达到最大值,为 0.61 MPa;在养生温度 10 °C、60 °C 时,混合料劈裂强度分别为 0.34 MPa、0.48 MPa,不满足《公路沥青路面再生技术规范》(JTGF41—2008)的技术要求,较养生温度 40 °C 条件下冷再生混合料劈裂强度分别降低了 44.3%、21.3%。这是因为低温环境下乳化沥青破乳和水泥水化速率较慢,产生的胶结料较少,不能较好地黏结骨料,致使混合料结构稳定性偏低;随着养生温度升高,水泥沥青胶浆体含量增多,可有效地固结骨料和填充骨料间的空隙,增强混合料结构密实性和稳定性;当温度升高至 60 °C,乳化沥青破乳和水泥水化速率加快,混合料内部黏聚力增大,致使试件第二次击实成型中压实度降低、空隙率增大,从而温度从 40 °C 升高至 60 °C,马歇尔试件劈裂强度降低。对此,建议乳化沥青冷再生混合料养生温度为 25~40 °C。

### 3.3 水影响

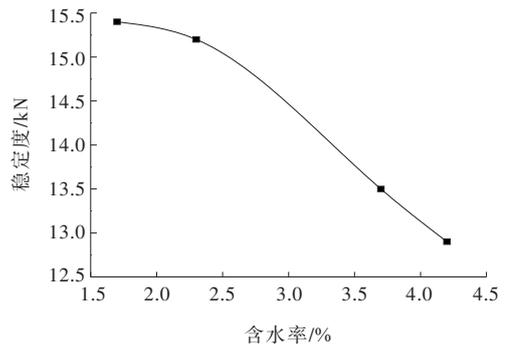
水对室内乳化沥青冷再生混合料影响见图4。

由图4可知:

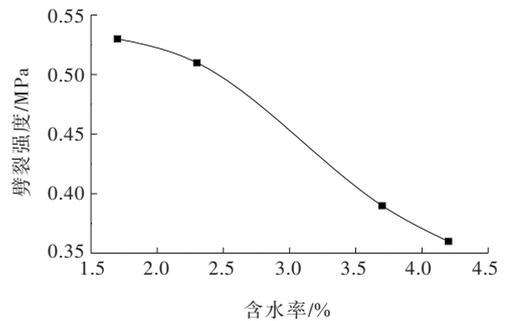
(1) 不同养生条件下,乳化沥青冷再生混合料含



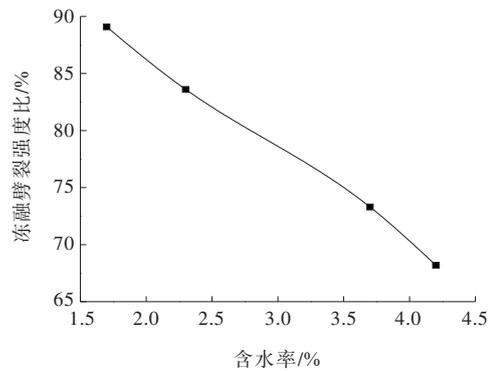
(a) 含水率和空隙率



(b) 稳定度



(c) 劈裂强度



(d) 冻融劈裂强度比

图4 水对乳化沥青冷再生混合料路用性能影响

水率相差较大,D组马歇尔试件含水率最高,为4.2%,较A、B、C组试件含水率分别提高了147%、82.6%、

13.5%;随冷再生混合料含水率增加,试件空隙率先增加后减小,在含水率2.3%时,混合料空隙率最大;含水率为1.7%时,混合料空隙率几乎降至最低。这是因为B养生条件下,试件表面水分增加,混合料内部水分蒸发量减少,致使试件在第二次击实中,试件密实度降低,空隙率相对增大;养生条件从B到C、D,混合料内部含水率提高明显,多余水分填充骨料间空隙,试件毛体积相对密度提高,从而空隙率降低。

(2) 随含水率增加,马歇尔试件稳定度、劈裂强度、冻融劈裂强度比逐渐减小,抗水损害能力减弱。这是因为冷再生混合料试件含水率增加,抑制乳化沥青破乳和水泥水化反应,影响沥青水泥胶浆体的产生,其与骨料的黏聚力减弱,降低冷再生混合料结构整体稳定性,且多余水分填充骨料间空隙,致使试件在第二次击实中,试件密实度相对降低,抵抗外部荷载作用能力降低,从而冷再生混合料稳定度和劈裂强度降低。

(3) 当养生条件由A到B,即冷再生混合料含水率由1.7%增加至2.3%,其稳定度、劈裂强度和冻融劈裂强度比分别降低了1.3%、3.8%、6.2%;养生条件从B到C,即冷再生混合料含水率由2.3%增加至3.7%,其稳定度、劈裂强度和冻融劈裂强度比分别降低了11.2%、23.5%、12.3%;养生条件从C到D,即冷再生混合料含水率由3.7%增加至4.2%,其稳定度、劈裂强度和冻融劈裂强度比分别降低了4.4%、7.7%、7.0%;养生条件C、D下,冷再生混合料劈裂强度不满足《公路沥青路面再生技术规范》(JTGF41—2008)的技术要求。

## 4 结论

(1) 同一试验条件下,现场养生条件下乳化沥青冷再生混合料较同养生时间的室内混合料稳定度和劈裂强度分别平均提高5.5%、10.7%。

(2) 随养生时间增加,乳化沥青冷再生混合料路用性能整体呈提高趋势,提高速率减缓。当养生时间 $\geq 7$  d,冷再生混合料路用性能满足《公路沥青路面再生技术规范》(JTGF41—2008)技术要求。建议乳化沥青冷再生混合料养生时间为7 d。

(3) 随养生温度升高,乳化沥青冷再生混合料稳定度逐渐提高,劈裂强度先提高后减小。在养生温度40℃时,冷再生混合料路用性能最优,其稳定度较

10℃、25℃分别提高了40.5%、10.4%,劈裂强度较10℃、25℃分别提高了79.4%、15.1%。建议乳化沥青冷再生混合料养生温度为25~40℃。

(4) 随含水率增加,乳化沥青冷再生混合料路用性能逐渐降低。在冷再生混合料含水率为2.3%时,试件空隙率最大;含水率为3.7%、4.2%时,试件冷再生混合料劈裂强度不满足《公路沥青路面再生技术规范》(JTGF41—2008)技术要求。

## 参考文献:

- [1] 闫东辉. 泡沫沥青冷再生混合料性能及路面结构力学响应研究[D]. 西安:长安大学,2019.
- [2] 孙斌,张嘉林. 水份对乳化沥青厂拌冷再生混合料强度的影响研究[J]. 公路,2018,63(7):295-298.
- [3] 王俊华. 高速公路沥青路面冷再生技术应用[J]. 中国公路,2020(12):102-103.
- [4] 卢勇. 冷再生混合料在高速公路中的深入研究及推广应用[D]. 南京:东南大学,2016.
- [5] 刘志勇. 对乳化沥青冷再生混合料设计及施工应用的研究[J]. 公路交通科技(应用技术版),2019,15(10):108-110.
- [6] 刘娜,杨发林. 厂拌乳化沥青冷再生混合料节能减排效果分析[J]. 公路与汽运,2019(2):149-152,156.
- [7] BIRGISSON B, MONTEPARA A, ROMEO E, et al. Determination and prediction of crack patterns in Hot Mix Asphalt (HMA) mixtures[J]. Engineering Fracture Mechanics,2008,75(3):664-673.
- [8] RONCELLA R, ROMEO E, FORLANI F. Image based microstructural analysis in fracture mechanics[C]// Proceedings of the 7th Optical 3-D Measurement Techniques,2005.
- [9] 陈海民,邹静蓉,李胜强. 乳化沥青冷再生混合料的早期强度性能评价研究[J]. 路基工程,2016(5):34-37,49.
- [10] 李锋,严金海,韩鹏. 乳化沥青冷再生混合料早期强度评价[J]. 中外公路,2016,36(4):273-275.
- [11] 武泽锋,张俊,朱浮声. 厂拌冷再生马歇尔试件击实与养生方法[J]. 东北大学学报(自然科学版),2009,30(5):737-740.
- [12] 江涛. 冷再生沥青混合料用于重交路面改建时若干关键问题研究[D]. 上海:同济大学,2008.
- [13] 丁武洋,刘强,吴旻. 乳化沥青厂拌冷再生混合料关键技术研究及应用[J]. 中外公路,2012,32(5):216-219.
- [14] 李瑞红. 乳化沥青冷再生混合料高温稳定性试验研究[J]. 公路工程,2017,42(5):132-135,177.
- [15] 裴晓梅,王选仓,张义. 乳化沥青冷再生基层混合料配合比及施工质量控制[J]. 公路交通科技(应用技术版),2018(11):75-79.