

# 冷拌冷铺乳化沥青混凝土路面开放交通强度研究

徐世法<sup>1</sup>,任小遇<sup>2</sup>,郭倩芸<sup>2</sup>,冯建勇<sup>3</sup>,徐欣<sup>4</sup>

(1. 北京建筑大学未来城市设计高精尖创新中心,北京 100044;2. 北京建筑大学土木与交通工程学院,北京 100044;3. 北京路桥瑞通养护中心有限公司,北京 100097;4. 北京路新沥青混凝土有限公司,北京 102209)

**摘要** 目的 研究冷拌冷铺乳化沥青混凝土的开放交通强度,为道路标准的制定提供参考。方法 通过室内试验,探究冷拌冷铺乳化沥青混凝土在不同养生时间的劈裂强度、高温稳定性、水稳定性和低温抗裂性,依据普通热拌沥青混合料和改性沥青混合料的规范要求,提出冷拌冷铺乳化沥青混凝土开放交通强度。结果 当以热拌普通沥青混合料为标准时,初定开放交通强度为 0.58 MPa;以热拌改性沥青混合料的相关要求为判据时,初定开放交通强度。应用模拟车辆荷载试验,以劈裂强度及疲劳寿命损失率不大于5%为标准,最终确定了冷拌冷铺乳化沥青混凝土路面的开放交通强度。结论 冷拌冷铺乳化沥青混凝土路面开放交通标准可以依据路面强度与沥青混合料的规范要求综合确定,推荐冷拌冷铺乳化沥青混凝土路面的开放交通强度为 0.87 MPa。

**关键词** 冷拌冷铺乳化沥青混凝土;强度增长规律;路用性能;开放交通强度;有效性验证

中图分类号 TU528.37;U416

文献标志码 A

## Research on Open Traffic Strength of Cold Mixed Emulsified Asphalt Concrete Pavement

XU Shifa<sup>1</sup>, REN Xiaoyu<sup>2</sup>, GUO Qianyun<sup>2</sup>, FENG Jianyong<sup>3</sup>, XU Xin<sup>4</sup>

(1. Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing, China, 100044; 2. Beijing University of Civil Engineering and Architecture, School of Civil and Transportation Engineering, Beijing, China, 100044; 3. Beijing Ruitong Road and Bridge Management and Maintenance Group Co. Ltd., Beijing, China, 100097; 4. Beijing Luxin Asphalt Concrete Limited Company, Beijing, China, 102209)

**Abstract:** Studying the open traffic strength of cold mixed emulsified asphalt concrete can provide reference for the formulation of road standards. In this article, the splitting strength, high temperature stability, water stability and low temperature crack resistance of cold mixed modified

收稿日期:2021-11-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51978034,51678028);北京学者培养计划项目(NO.067);北京市自然科学基金与北京市教委联合基金项目(KZ202110016020)

作者简介:徐世法(1963—),男,教授,博士,主要从事路面材料与结构等方面研究。

emulsified asphalt concrete at different curing times were investigated by laboratory test. According to the specification requirements of ordinary hot-mixed asphalt mixture and modified hot-mixed asphalt mixture, the open traffic strength was proposed. The open traffic strength of cold mixed modified emulsified asphalt concrete pavement was determined to be 0.87 MPa with the splitting strength and fatigue life loss rate not more than 5% as the standard.

**Key words:** cold mixed emulsified asphalt concrete; intensity growth law; pavement performance; opening traffic strength; validity verification

时至2021年底,我国公路总里程达528.07万公里,其中高速公路已超过16万公里<sup>[1]</sup>。然而,传统的道路材料以热拌沥青混合料为主,所面临的环境污染与能源消耗过大等问题急需解决<sup>[2-3]</sup>。冷拌冷铺乳化沥青混合料以其常温下拌和、运输和摊铺,对人体无害等特点受到了众多研究学者的关注。目前,冷拌冷铺乳化沥青混合料多以微表处、稀浆封层、冷再生等方式应用于道路预防性养护或基层当中,但在面层结构上应用还处于起步阶段<sup>[4-6]</sup>。因冷拌冷铺乳化沥青混合料中有水及水泥的参与,铺筑后需要较长的养生周期,何时开放交通受养生温度、湿度等条件的影响<sup>[7-10]</sup>。因此,开展冷拌冷铺乳化沥青混凝土路面开放交通强度的研究,具有十分重要的意义。

A. Gandi等<sup>[11-13]</sup>在研究冷再生混合料的过程中,发现试件在低温状态下养生,其抗拉强度会偏低,乳化沥青中的含水量越高,冷再生混合料的空隙率会越大,抗拉强度越低。阎玉菡等<sup>[14-17]</sup>探究了乳化沥青冷再生混合料的强度发展规律,认为劈裂抗拉强度可以作为冷再生混合料早期强度的评价指标。刘

腾爱等<sup>[18]</sup>围绕环氧沥青混凝土开展了恒温养生试验和自然养生试验,发现温度和养生时间对环氧沥青混合料的强度变化规律影响较大,并据此拟合了环氧沥青混合料的强度变化方程,为预测实体工程中环氧沥青混凝土的养生时间提供了参考。张业兴等<sup>[19-20]</sup>在研究聚合物混凝土的过程中,以劈裂强度、路用性能检测结果及加速加载验证结果构建了道面通车时间的预测模型。

现有研究关于冷拌冷铺乳化沥青混凝土路面开放交通强度的较少,且现行规范中未涉及冷拌冷铺乳化沥青混凝土路面早期强度的评价方法。基于此,笔者通过室内模拟试验,提出合适的开放交通评价指标,通过模拟试验验证所提出的开放交通条件在承受车辆荷载作用后,对后期强度和寿命的影响,从而达到指导冷拌冷铺乳化沥青混凝土路面应用的目的。

## 1 原材料及配合比设计

### 1.1 原材料

#### 1.1.1 乳化沥青

笔者采用SBS改性沥青制备阳离子冷拌冷铺乳化沥青,技术指标见表1。

表1 冷拌冷铺乳化沥青技术指标

Table 1 Technical specifications of cold mix emulsified asphalt

技术指标	固含量/%	破乳速率	筛上剩余量/%	恩格拉黏度	与矿料黏附性	残留物针入度/0.1 mm	残留物软化点/℃	残留物延度(5℃)/cm	储存稳定性(1 d)/%	储存稳定性(5 d)/%
技术要求	60~65	慢	<0.3	3~15	通过	40~90	>60	>30	≤1	≤5
测试结果	62.3	慢	0.021	5.1	通过	67.4	62.2	48.5	0.18	1.32
测试方法	T0651	T0658	T0652	T0622	T0654	T0604	T0606	T0605	T0655	T0655

### 1.1.2 矿料及外加剂

粗、细集料与填料均为石灰岩,外加剂采用 P·O 42.5 水泥,技术指标满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40—2004)的要求。

## 1.2 配合比设计

### 1.2.1 矿料级配设计

试验采用 AC-13 型沥青混合料级配,其级配曲线如图 1 所示。

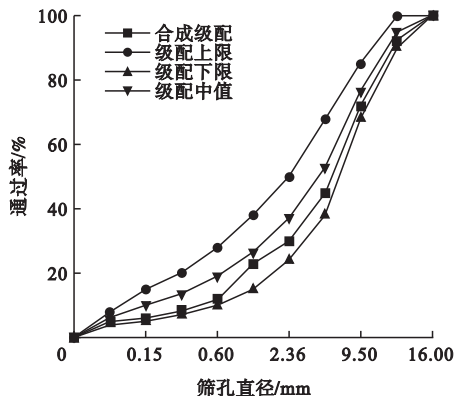


图 1 AC-13 型沥青混合料级配曲线图

Fig. 1 Gradation curves of AC-13 asphalt mixture

### 1.2.2 各组分掺量的确定

首先,采用试拌法预估外掺水用量,水的掺量取为 1%~2.5% (间隔 0.5%),通过混合料拌和状态,最终确定最佳外掺水掺量为 2%;其次,根据前期经验制作乳化沥青掺量为 7%~9% (间隔 0.5%) 的 5 组乳化沥青混合料试件,测定养生完全后(90 °C 的烘箱内养生 24 h)试件的力学和体积指标,确定最佳乳化沥青掺量为 8.0%;最后,分别加入掺量为 0%~2% (间隔 0.5%) 的水泥,制作乳化沥青混合料试件,进行稳定度、车辙、低温弯曲和冻融劈裂试验,确定水泥最佳掺量为 1%<sup>[21]</sup>。

对照组的热拌沥青混合料选用 SBS 改性沥青作为结合料,与乳化沥青混凝土相同的级配,经过试验确定最佳沥青掺量为 5%。

### 1.2.3 性能验证

按上述混合料配合比制作 SBS 改性沥青混合料和冷拌冷铺乳化沥青混凝土试件,并将冷拌冷铺乳化沥青混凝土试件放在 30% 湿度、25 °C 的条件下养生 14 d,测得两种混合料的性能如表 2 所示。

表 2 性能验证结果

Table 2 Performance verification results

技术指标	稳定度/kN	残留稳定度/%	冻融劈裂残留强度比/%	动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> )	低温弯曲试验破坏应变/10 <sup>-6</sup>
技术要求	>8.0	>85	>80	≥2 800	≥2 500
冷拌冷铺乳化沥青混凝土结果	11.7	89.2	84.6	11 685.4	2 854.2
SBS 改性沥青混凝土结果	10.4	90.6	89.1	3 628.7	3 560.8
测试方法	T0709	T0709	T0729	T0719	T0715

由表 2 可见,所配制的 SBS 改性沥青混凝土和冷拌冷铺乳化沥青混凝土的高温、低温和水稳定性指标都满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF 40—2004)要求。

## 2 开放交通强度初值的确定方法

### 2.1 开放交通强度研究范围的确定

根据冷拌冷铺乳化沥青混凝土劈裂强度随养生时间的变化规律,拟定开放交通强度的研究范围。乳化沥青混凝土劈裂强度随养生时间的变化规律如图 2 所示,劈裂强度与养生时间的对应关系见表 3。

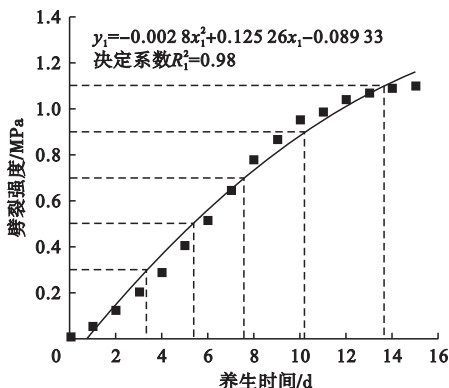


图 2 劈裂强度随养生时间的增长规律

Fig. 2 The law of the increase of splitting strength with the preservation time

表3 劈裂强度与养生时间的对应关系

Table 3 Corresponding relationship between splitting strength and preservation time

养生时间/d	劈裂强度/MPa
3.37	0.3
5.34	0.5
7.59	0.7
10.24	0.9
13.68	1.1

从图2可以看出,在湿度30%、温度15℃的养生条件下,养生13d后试件的劈裂强度稳定在1.1MPa左右,参照《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF 40—2004)对冷补沥青混合料马歇尔稳定度不宜小于3kN的技术要求,将冷拌冷铺乳化沥青混凝土开放交通强度取值0.3~1.1MPa。采用多项式拟合,得到冷拌冷铺乳化沥青混合料劈裂强度 $y_1$ 与养生时间 $x_1$ 的拟合方程:

$$y_1 = -0.0028x_1^2 + 0.1256x_1 - 0.08933. \quad (1)$$

将设定的劈裂强度数值(0.3MPa、0.5MPa、0.7MPa、0.9MPa和1.1MPa)分别带入式(1)中,即可得出对应的养生时间,反算出的劈裂强度与养生时间的对应关系。

## 2.2 开放交通强度标准的确定

以冷拌冷铺乳化沥青混凝土的路用性能达到《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF 40—2004)中热拌普通沥青混合料及热拌改性沥青混合料的相关要求为判据,反推劈裂强度。将两种标准下得到的开放交通强度初值进行混合料性能验证。两种热拌沥青混凝土路用性能要求见表4。

表4 两种热拌沥青混凝土路用性能要求

Table 4 Requirements for road performance of two kinds of hot mix asphalt concrete

技术指标	动稳 定度/ (次 $\text{mm}^{-1}$ )	残留 稳定度/ %	冻融劈裂 强度比/ %	低温弯曲 破坏应变/ $10^{-6}$
普通沥青混合料 技术要求	$\geq 1\ 000$	$\geq 80$	$\geq 75$	$\geq 2\ 000$
改性沥青混合料 技术要求	$\geq 2\ 800$	$\geq 85$	$\geq 80$	$\geq 2\ 500$
试验方法	T0719	T0709	T0729	T0715

## 3 开放交通强度的确定

### 3.1 高温稳定性与劈裂强度的关系

按照2.1中设定的五种养生时间的AC-13型冷拌冷铺乳化沥青混合料试件开展车辙试验,试验结果见图3。

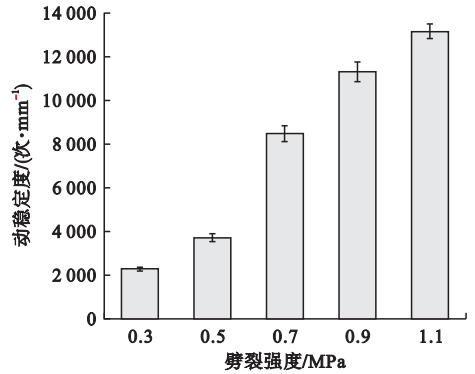


图3 试件在不同劈裂强度下的动稳定度  
Fig. 3 Dynamic stability of specimens under different splitting strengths

由图3可知,试件的动稳定度随劈裂强度的提高逐渐上升。养生初期(养生时间3.37d,劈裂强度达0.3MPa左右时)的动稳定度已远高于普通沥青混合料的规范要求;养生中期(养生5.34d,劈裂强度为0.5MPa左右时),试件的动稳定度达到3725次/mm,虽仅占最终动稳定度的28.3%,但已满足改性沥青混合料的规范要求;当劈裂强度提高至0.7MPa左右时,动稳定度达到8494次/mm,为最终动稳定度的64.4%;养生末期(养生10.24d,劈裂强度为0.9MPa左右时),动稳定度的增速越来越小,养生完成时的动稳定度为13182次/mm。分析原因可知,一方面是由于自制的冷拌冷铺乳化沥青弹性恢复和黏结能力较好,具备良好的抗车辙能力;另一方面,冷拌冷铺乳化沥青混合料中添加了水泥,水化后形成的钙矾石等产物提升了其动稳定度<sup>[22]</sup>。

为确定冷拌冷铺乳化沥青混凝土动稳定度达到规范要求时的最低劈裂强度,设 $x_2$ 作为劈裂强度值, $y_2$ 作为动稳定度值,进行多项式拟合,拟合结果见图4。

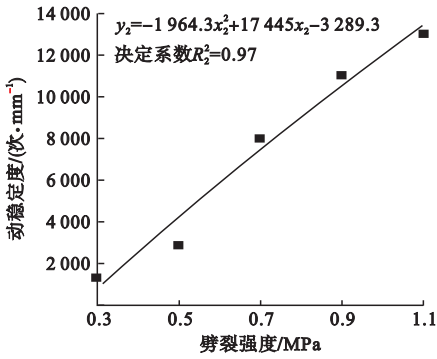


图4 劈裂强度与动稳定度拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of splitting strength and dynamic stability

拟合方程见式(2):

$$y_2 = -1964.3x_2^2 + 17445x_2 - 3289.3 \quad (2)$$

通过式(2)可知,若以改性沥青混合料的规范要求作为判据,即动稳定度达2800次/mm时,劈裂强度的值为  $Q_1 = 0.36$  MPa;若以普通沥青混合料的规范要求作为判据,即动稳定度达1000次/mm时,劈裂强度的值为  $G_1 = 0.25$  MPa。

### 3.2 水稳定性与劈裂强度的关系

对达到2.1中五种劈裂强度时的冷拌冷铺乳化沥青混凝土试件开展浸水马歇尔试验,试验结果见图5。

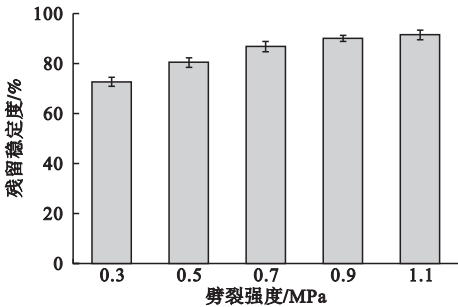


图5 试件在不同劈裂强度下的残留稳定度

Fig. 5 Residual stability of specimens under different splitting strengths

由图5可知,试件的残留稳定度随劈裂强度的提高逐渐提升。养生初期即劈裂强度刚开始形成的阶段,试件的残留稳定度提升最快,当劈裂强度达0.5MPa左右时,残留稳定度达到普通沥青混合料的规范要求;当

劈裂强度达0.7MPa左右时,残留稳定度达到改性沥青混合料的规范要求。

为确定冷拌冷铺乳化沥青混凝土残留稳定度达到规范要求时的最低劈裂强度,设  $x_3$  作为劈裂强度值,  $y_3$  作为残留稳定度,拟合残留稳定度和劈裂强度的多项式曲线,拟合曲线见图6。

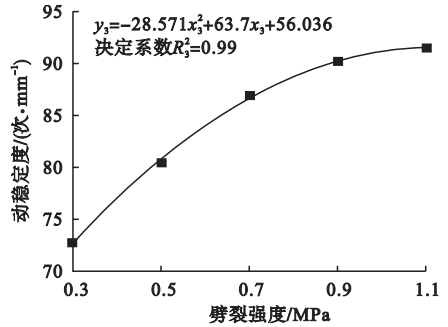


图6 劈裂强度与残留稳定度拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve of splitting strength and residual stability

拟合方程见式(3):

$$y_3 = -28.571x_3^2 + 63.7x_3 + 56.036 \quad (3)$$

分析式(3)可知,若以改性沥青混合料的规范要求作为判据,即残留稳定度达85%时,劈裂强度的值为  $Q_2 = 0.41$  MPa;若以普通沥青混合料的规范要求作为判据,即动残留稳定度达80%时,劈裂强度的值为  $G_2 = 0.29$  MPa。

对达到上述五种劈裂强度时的试件开展冻融劈裂试验,试验结果见图7。

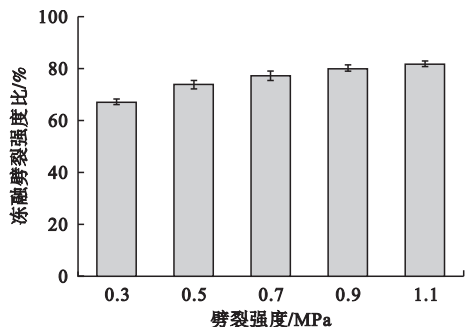


图7 试件在不同劈裂强度下的冻融劈裂强度比

Fig. 7 Freeze-thaw splitting strength ratio of specimens under different splitting strengths

由图7可知,冷拌冷铺乳化沥青混凝土的冻融劈裂强度比随劈裂强度的提高逐渐提升。养生初期,试件的冻融劈裂强度比提升最快;冷拌冷铺乳化沥青混凝土开放交通强度取值0.3~1.1 MPa时,劈裂强度每提高0.2 MPa,残留稳定度分别提高9.8%、4.6%、3.8%和2.1%,增长速率逐渐变缓;当劈裂强度达0.7 MPa时,冻融劈裂强度比已达到普通沥青混合料要求;当劈裂强度达0.9 MPa时,冻融劈裂强度比达到改性沥青混合料的要求。

为确定冷拌冷铺乳化沥青混凝土的冻融劈裂强度比达到规范要求时的最低劈裂强度,设 $x_4$ 作为劈裂强度值, $y_4$ 作为冻融劈裂强度比,拟合关于冻融劈裂强度比和劈裂强度的二次多项式,拟合曲线如图8所示。

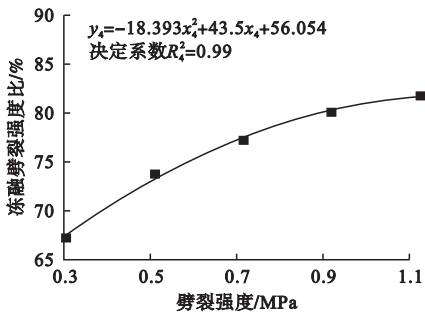


图8 劈裂强度与冻融劈裂强度比拟合曲线

Fig. 8 Fitting curve of splitting strength and freeze-thaw splitting strength ratio

拟合方程见式(4):

$$y_4 = -18.393x_4^2 + 43.5x_4 + 56.054. \quad (4)$$

由式(4)可知,若以改性沥青混合料的规范要求作为判据,即冻融劈裂强度比达80%时,劈裂强度的值为 $Q_3 = 0.87$  MPa;若以普通沥青混合料的规范要求作为判据,即冻融劈裂强度比达75%时,劈裂强度的值为 $G_3 = 0.58$  MPa。

### 3.3 低温抗裂性与劈裂强度的关系

对达到2.1中五种劈裂强度时的冷拌冷铺乳化沥青混凝土试件开展低温弯曲试验,试验结果见图9。

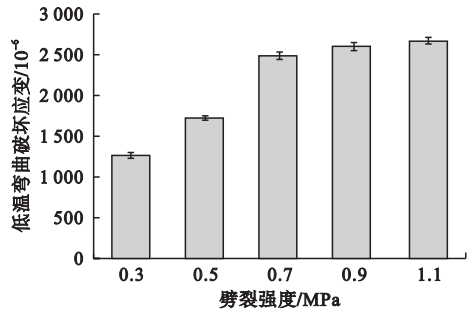


图9 试件在不同劈裂强度下的低温弯曲应变  
Fig. 9 Low temperature bending strain of specimen under different splitting strengths

由图9可知,冷拌冷铺乳化沥青混凝土的低温破坏应变及低温抗裂性能随劈裂强度的提高逐渐提升。乳化沥青混凝土的低温抗裂性能较弱,劈裂强度达0.5 MPa时,其低温弯曲破坏应变仅为 $1728 \times 10^{-6}$ ,低温破坏应变只有最终破坏应变的64.7%,此时低温性能仍未符合普通沥青混合料的规范要求;当劈裂强度提高至0.7 MPa左右时,低温破坏应变为 $2486 \times 10^{-6}$ ,达到最终破坏应变的93.1%,此阶段低温性能增长较快,且已符合普通沥青混合料的规范要求;当劈裂强度提高至0.9 MPa时,低温破坏应变为 $2603 \times 10^{-6}$ ,此时符合改性沥青混合料的规范要求,且动稳定度的增长速率逐渐变缓,养生完成时的低温破坏应变为 $2672 \times 10^{-6}$ 。

为确定冷拌冷铺乳化沥青混凝土低温弯曲应变达到规范要求时的最低劈裂强度,设 $x_5$ 作为劈裂强度值, $y_5$ 作为低温弯曲应变,拟合关于低温弯曲应变和劈裂强度的二次多项式,拟合曲线如图10所示,拟合方程见式(5):

$$y_5 = -2544.6x_5^2 + 5405x_5 - 181.85. \quad (5)$$

分析式(5)可知,以改性沥青混合料的规范要求作为判据,即低温弯曲应变达 $2500 \times 10^{-6}$ 时,劈裂强度的值为 $Q_4 = 0.79$  MPa;以普通沥青混合料的规范要求作为判据,即低温弯曲应变达 $2000 \times 10^{-6}$ 时,劈裂强度的值为 $G_4 = 0.54$  MPa。

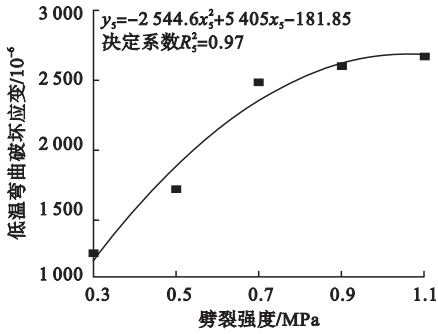


图10 劈裂强度与低温弯曲应变拟合曲线

Fig. 10 Fitting curve of splitting strength and low temperature bending strain

### 3.4 开放交通强度的初定

由冷拌冷铺乳化沥青混凝土在五种劈裂强度(0.3 MPa、0.5 MPa、0.7 MPa、0.9 MPa、1.1 MPa)下路用性能的测定结果可知,若以改性沥青混合料的规范要求作为判据,动稳定度、残留稳定度、冻融劈裂强度比、低温弯曲应变符合规定的最低劈裂强度分别为  $Q_1 = 0.36$  MPa,  $Q_2 = 0.41$  MPa,  $Q_3 = 0.87$  MPa,  $Q_4 = 0.79$  MPa, 由此初定符合改性沥青混合料规范要求的冷拌冷铺乳化沥青混凝土路面开放交通强度  $Q = \max(Q_1, Q_2, Q_3, Q_4) = 0.87$  MPa, 结合图2中养生时间与劈裂强度的拟合曲线方程,需要的养生时间为9.76 d。

若以普通沥青混合料的规范要求作为判据,动稳定度、残留稳定度、冻融劈裂强度比、低温弯曲应变符合规定的最低劈裂强度分别为  $G_1 = 0.25$  MPa,  $G_2 = 0.29$  MPa,  $G_3 = 0.58$  MPa,  $G_4 = 0.54$  MPa, 由此初定符合普通沥青混合料规范要求的AC-13型冷拌冷铺乳化沥青混合料开放交通强度  $G = \max(G_1, G_2, G_3, G_4) = 0.58$  MPa, 结合图2中养生时间与劈裂强度的拟合曲线方程,需要的养生时间为6.18 d。

## 4 开放交通强度的验证

### 4.1 开放交通强度的验证方法及标准

设置试验组和对照组进行验证试验。试验组依靠车辙仪模拟车辆荷载的反复作用

(试验组轮压0.7 MPa、温度25℃、频率42次/min;对照组试件放25℃常温静置),在冷拌冷铺乳化沥青混凝土车辙板养生强度达到初定开放交通强度后,对车辙板进行车辙碾压直至养生完全后停止(养生13 d认为养生完全)。在车辙处进行取芯,进行劈裂试验。避开轮迹处切割小梁试件,进行四点疲劳试验(应变为  $400 \times 10^{-6}$ )。根据前期试验基础和经验,采用对照组的最终劈裂强度和疲劳寿命损失率不大于5%作为初定的开放交通强度可行性的标准。

### 4.2 验证结果及分析

当冷拌冷铺乳化沥青混凝土养生至劈裂强度为0.58 MPa或0.87 MPa时开放交通,开放交通后试验组和对照组试件的最终劈裂强度值见表5。

表5 试验组和对照组的劈裂强度

Table 5 Splitting strength of test group and control group

类别	劈裂强度/MPa	劈裂强度均值/MPa	劈裂强度损失率/%
试验组1 (0.58 MPa)	0.94	0.93	15.5
	0.92		
	0.89		
	0.95		
试验组2 (0.87 MPa)	1.05	1.05	4.5
	1.02		
	1.07		
	1.04		
对照组	1.12	1.10	—
	1.09		
	1.10		
	1.08		

分析表5可知,以普通沥青混合料的规范要求为判据,初定的开放交通强度为0.58 MPa,在该强度下开放交通后,试验组1试件的最终劈裂强度均值为0.93 MPa,对照组试件的最终劈裂强度均值为1.10 MPa,试验组1劈裂强度损失率为15.5%,说明冷拌冷铺乳化沥青混凝土路面在劈裂强度为0.58 MPa时开放交通对后期强度影响较大。以改性沥青混合料的规范要求为判据,初定的开放交通强度为0.87 MPa,在该强度下开

放交通后,试验组2试件的最终劈裂强度均值为1.05 MPa,劈裂强度损失率为4.5%。

当冷拌冷铺乳化沥青混凝土养生至劈裂强度为0.58 MPa或0.87 MPa时开放交通,开放交通后试验组和对照组试件的疲劳寿命结果见表6。

表6 试验组和对照组的疲劳寿命

Table 6 Fatigue life of test group and control group

类别	疲劳寿命/万次	疲劳寿命均值/万次	疲劳寿命损失率/%
试验组1 (0.58 MPa)	14.81	14.28	19.9
	12.95		
	15.64		
	13.73		
试验组2 (0.87 MPa)	17.18	17.04	4.4
	16.78		
	16.94		
	17.27		
对照组	17.38	17.82	—
	18.09		
	17.68		
	18.14		

分析表6可知,冷拌冷铺乳化沥青混凝土试件在劈裂强度为0.58 MPa时开放交通,经过荷载作用后试件的最终疲劳寿命平均值为14.28万次,对照组试件的最终疲劳寿命平均值17.82万次,试验组1的疲劳寿命损失率为19.9%,说明在劈裂强度为0.58 MPa时开放交通对路面的长期寿命影响较大。冷拌冷铺乳化沥青混凝土试件在劈裂强度为0.87 MPa时开放交通后,经过荷载的作用试件最终的疲劳寿命均值为17.04万次,与对照组相比,试验组2的疲劳寿命损失率为4.4%。

综合考虑冷拌冷铺乳化沥青混凝土开放交通后对试件最终的强度及疲劳寿命的影响,认为在劈裂强度达到0.87 MPa时开放交通较为合适。

## 5 结论

(1)根据冷拌冷铺乳化沥青混合料劈裂强度随养生时间的变化规律,将冷拌冷铺乳化沥青混凝土开放交通强度取0.3~1.1 MPa。

(2)建立冷拌冷铺乳化沥青混凝土的劈裂强度与动稳定度、残留稳定度、冻融劈裂强度比及低温弯曲破坏应变的关系方程。当以热拌普通沥青混合料为标准时,初定开放交通强度为0.58 MPa;以热拌改性沥青混合料的相关要求为判据时,初定开放交通强度为0.87 MPa。

(3)当路面强度达到0.58 MPa时开放交通,以车辙试验模拟开放交通后荷载的影响,测得最终劈裂强度为0.93 MPa,损失率为15.5%;最终疲劳寿命为14.28万次,损失率为19.9%。当路面强度达到0.87 MPa时开放交通,模拟开放交通之后,测得试件最终劈裂强度为1.05 MPa,损失率为4.5%;试件最终疲劳寿命为17.04万次,损失率为4.4%。

(4)模拟验证结果表明,采用改性沥青混合料标准确定的开放交通强度,使最终的劈裂强度和疲劳寿命损失率在5%以内,因此确定冷拌冷铺乳化沥青混凝土路面开放交通强度为0.87 MPa。

## 参考文献

- [1] 交通运输部综合规划司. 2021年交通运输行业发展统计公报[J]. 交通财会, 2022(6): 92-97.  
(Department of Integrated Planning, Ministry of Transport. Statistical bulletin of transportation industry development in 2021 [J]. Transportation accounting, 2022(6): 92-97.)
- [2] 郑木莲, 金佳宏, 刘侠, 等. 溶剂型冷补沥青的开发及性能评价[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(1): 342-353.  
(ZHENG Mulian, JIN Jiahong, LIU Xia, et al. Development and performance evaluation of solvent cold patching asphalt [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2022, 41(1): 342-353.)
- [3] 王文平. 冷拌冷铺沥青混合料在公路工程中的应用[J]. 交通世界, 2021(增刊2): 57-58.  
(WANG Wenping. Application of cold mix cold spread asphalt mixture in highway engineering [J]. Transport world, 2021(S2): 57-58.)
- [4] 李书飞. 残留水对冷拌冷铺乳化沥青混合料性能影响研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.  
(LI Shufei. Research on the effect of residual



- water on the performance of cold-mixed cold-paved emulsified asphalt mixture [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020. )
- [5] 杨野,徐剑,杨彦海,等.冻融循环作用下乳化沥青冷再生混合料损伤分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2020,36(5):869-876. (YANG Ye, XU Jian, YANG Yanhai, et al. Damage analysis of cold recycled mixes using asphalt emulsion under freeze-thaw cycles [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(5):869-876.)
- [6] 王月欣,翟赫,张倩.阳离子沥青乳化剂的应用性能研究[J].日用化学工业,2011,41(3):187-190. (WANG Yuexin, ZHAI He, ZHANG Qian. Application of cationic asphalt emulsifier [J]. China surfactant detergent & cosmetics, 2011, 41(3):187-190.)
- [7] 徐世法,黄玉颖,蔡硕果,等.冷拌冷铺沥青混合料技术进展[J].筑路机械与施工机械化,2018,35(2):34-36. (XU Shifa, HUANG Yuying, CAI Shuoguo, et al. Progress of technologies for cold mix asphalt [J]. Road machinery & construction mechanization, 2018, 35(2):34-36.)
- [8] 李凯.AC-13型冷拌冷铺乳化沥青混合料配合比设计方法研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2020. (LI Kai. Research on design method of AC-13 cold-mixed cold-laid emulsified asphalt mixture [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2020.)
- [9] 徐世法,卢兆洋,房聪,等.紫外光及温度老化对冷拌冷铺乳化沥青混合料的性能影响评价[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2022,38(1):111-119. (XU Shifa, LU Zhaoyang, FANG Cong, et al. Evaluation of the influence of temperature and UV aging on the properties of cold mix emulsified asphalt mixture [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2022, 38(1):111-119.)
- [10] 胡超峰,徐世法,祝闯,等. OGFC-13冷拌冷铺乳化沥青混合料路用性能评价[J].石油沥青,2019,33(1):38-44. (HU Chaofeng, XU Shifa, ZHU Chuang, et al. Road performance evaluation of OGFC-13 cold mix cold application emulsified asphalt mixture [J]. Petroleum asphalt, 2019, 33(1):38-44.)
- [11] GANDI A, CARDENAS A, SOW D, et al. Study of the impact of the compaction and curing temperature on the behavior of cold bituminous recycled materials [J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2019, 6(4):349-358.
- [12] DIAZ L G. Creep performance evaluation of cold mix asphalt patching mixes [J]. International journal of pavement research & technology, 2016, 9(2):149-158.
- [13] DOYLE T A, MCNALLY C, GIBNEY A, et al. Developing maturity methods for the assessment of cold-mix bituminous materials [J]. Construction & building materials, 2013, 38(38):524-529.
- [14] 阎玉菡.乳化沥青冷再生混合料劈裂强度试验研究[J].四川建材,2017,43(6):88-90. (YAN Yuhan. Research of splitting strength experiment of cold recycled mixture with asphalt emulsion [J]. Sichuan building materials, 2017, 43(6):88-90.)
- [15] 石福周,贾小军,王震,等.复合改性乳化沥青的制备及其微表处混合料路用性能[J].兰州理工大学学报,2021,47(2):138-143. (SHI Fuzhou, JIA Xiaojun, WANG Zhen, et al. Preparation of composite emulsified asphalt and its properties of micro-surface mixtures [J]. Journal of Lanzhou university of technology, 2021, 47(2):138-143.)
- [16] 黄维蓉,孟乔,赵可,等.阴离子乳化沥青储存稳定性研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2021,40(3):98-102. (HUANG Weirong, MENG Qiao, ZHAO Ke, et al. Storage stability of anionic emulsified asphalt [J]. Journal of Chongqing jiaotong university (natural science), 2021, 40(3):98-102.)
- [17] CUSTER R S. Polyphenolic surfactant compositions as universal bitumen/water emulsifiers [P]. United States Patent 5650000, 1995.
- [18] 刘腾爱,钱振东.环氧沥青混凝土自然养生强度增长特性分析[J].盐城工学院学报(自然科学版),2008(2):54-57. (LIU Tengai, QIAN Zhendong. Analysis of the increasing characterization of natural strength of epoxy asphalt mixture [J]. Journal of Yancheng institute of technology (natural science edition), 2008(2):54-57.)
- [19] 张业兴.聚合物混凝土强度形成规律及开放交通时机预测模型研究[D].北京:北京建筑大学,2021. (ZHANG Yexing. Research on the strength formation law and the opening traffic timing forecast model of polymer concrete [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2021.)
- [20] DIAZ L G. Creep performance evaluation of cold mix asphalt patching mixes [J]. International journal of pavement research & technology, 2016, 9(2):149-158.
- [21] 李思童.冷拌冷铺沥青混合料长期路用性能研究[D].北京:北京建筑大学,2019. (LI Sitong. Evaluation on long-term performance of cold mixed asphalt pavement [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2019.)
- [22] 逯艳华,武泽锋.水泥-乳化沥青混凝土的路用性能研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2019,35(2):285-293. (LU Yanhua, WU Zefeng. Research on road performance of cement-emulsified asphalt concrete [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(2):285-293.)