

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.04.049

# 高强冷铺沥青混合料室内试验对比研究

陈宏坡

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

**摘要:** 选取4种适用于不同工况的路面磨耗层混合料,通过室内试验对比分析了4种混合料抗压强度、抗永久变形、抗水损坏、抗疲劳破坏等工程特性;通过不同养生温度下的混合料试件劈裂强度、拉伸强度及动稳定度等指标,模拟了不同施工温度条件对环氧乳化沥青混合料路用性能的影响。试验结果表明:环氧乳化沥青混合料相比普通(改性)沥青混合料具备更好的工程性能和低温施工特性。

**关键词:** 环氧乳化沥青;冷铺沥青混合料;性能试验;对比研究

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)04-0206-04

## 0 引言

在健全绿色低碳循环发展经济体系和实施大气污染防治行动等政策指引下,市政工程建设绿色低碳理念愈发受到行业重视。对城市道路而言,降低热拌沥青混合料在路面(尤其是地下道路)建设和养护过程中的空气污染问题,全面采用高强度常温施工沥青混合料是大势所趋。常规乳化沥青混合料可以实现常温拌和施工,但限于材料各方面工程性能较差,难以直接用于沥青面层铺装。本文基于高分子聚合物固化体系,选择几种适用于不同工况的沥青磨耗层材料,通过室内试验对材料抗压强度、高温稳定性、水稳定性、抗疲劳性等进行了全面测试分析,并采用不同温度对其中的环氧乳化沥青混合料进行试件成型和养生,模拟测试了施工温度对其路用性能的影响,以期类似材料的研发应用提供参考。

## 1 试验样本设计

### 1.1 混合料选型

为了模拟不同的应用工况场景,选取常规路面、隧道铺装、桥面铺装最为常见的4种级配类型混合料:砂粒式连续密级配沥青混合料 AC-5(普通沥青)、细粒式连续密集配沥青混合料 AC-13(环氧沥青)、细粒式沥青玛蹄脂碎石混合料 SMA-10(SBS改性沥青)和细粒式连续密级配沥青混合料 DE-10

(环氧乳化沥青)。

### 1.2 沥青胶结料选取

基质沥青选用70号A级道路石油沥青;SBS改性沥青的改性剂选择星型SBS-403,同时加入0.3%的稳定剂,然后在180℃条件下用高速剪切机以6000~7000 r/min的转速剪切、研磨、挤压30 min后再搅拌90 min,最后在160℃左右的恒温烘箱中养生30 min。试验采用的SBS改性沥青的技术指标见表1。

表1 试验采用的SBS改性沥青的技术指标

项目	技术指标	实测值	
针入度(25℃、100g、5s)/(0.1mm)	30~60	55	
针入度指数PI	0~+1.0	0.321	
延度(5℃)/cm	≥20	41	
软化点/℃	≥60	87.7	
离析,48h软化点之差/℃	≤2.5	1.6	
130℃运动黏度/(Pa·s)	≤3	2.33	
密度(15℃)/(g·cm <sup>-3</sup> )	实测	1.035	
质量损失/%	±1.0	0.14	
163℃薄膜加热试验(5h)	残留针入度比/%	≥65	72
	残留延度(5℃)/cm	≥15	17

本次对比试验中沥青混合料AC-13采用双组分成品ChemCo环氧沥青。沥青混合料DE-10所用环氧乳化沥青亦采用双组分拌制,其中环氧树脂采用双酚A型环氧树脂(E-51),E-51环氧树脂的主要物理化学指标见表2。另外,为增强固化沥青的韧性,并使之在路面使用期内逐渐增加混合料的强度,在固化剂加入基质沥青前需进行酸酐化处理;为使得固化体系

收稿日期: 2023-06-12

作者简介: 陈宏坡(1981—),男,硕士,高级工程师,从事道路交通工程设计研究工作。

表2 试验采用的 E-51 环氧树脂主要物理化学指标

化学组分	黏度(23℃)/ (mPa·s)	环氧当量/ (g·mol <sup>-1</sup> )	密度(23℃)/ (g·cm <sup>-3</sup> )
双酚 A 二缩水 甘油醚	12 100~13 800	219~290	≤1.11

中允许水的加入,特选用水性环氧树脂固化剂。试验所用环氧树脂固化剂为有机胺类,呈碱性,故本次试验乳化剂选用阳离子慢裂快凝型 EM520。基质沥青仍选用 70 号 A 级道路石油沥青。

### 1.3 集料与级配设计

试验用集料规格采用 13.2~9.5 mm、9.5~4.75 mm、4.75~2.36 mm 和 2.36~0.075 mm 这 4 档。其中 2.36 mm 以上粗集料使用玄武岩,2.36~0.075 mm 档料选用石灰岩。集料基本性能测试结果见表 3。

表3 集料基本性能测试结果

种类	粒径/mm	毛体积密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	表观密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	吸水率/ %
	9.5~13.2	2.909	2.932	0.79
玄武岩	4.75~9.5	2.892	2.926	1.211
	2.36~4.75	2.882	2.882	
石灰岩	0~2.36	2.582	2.582	

由于是平行对比试验,混合料试件均采用马歇尔设计方法。其中试件 AC-5、AC-13 和 SMA-10 采用部标规范级配;试件 DE-10 的级配见表 4。试件 DE-10 的级配构成是结合我国筛孔尺寸规格在德国 De-0/8 级配基础上调整而来。

表4 环氧乳化沥青混合料 DE-10 级配构成

筛孔尺寸/mm	13.2	9.5	4.75	2.36	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率/%	100	90	71	20	13	11	10	8

### 1.4 最佳沥青用量的确定

通过马歇尔试验,采用 4.0% 目标空隙率,确定试件 AC-5 和 SMA-10 的最佳沥青用量分别为 4.4%、6.2%。普通环氧沥青混合料试件 AC-13 采用 3.0% 作为目标空隙率,对应最佳油石比为 6.6%;环氧乳化沥青混合料试件 DE-10 采用 3.5% 作为目标空隙率,试验确定不含水的结合料用量为 5.7%,但由于乳化沥青中固含量为 60%,因此实际含水乳化沥青用量为 9.5%。值得说明的是,由于沥青被乳化,其沥青膜厚度减小,沥青能更大程度地渗入骨料间的空隙中,混合料的闭口孔隙变得更少,这使得环氧乳化沥青具有更好的石料包裹性,因此较普通环氧沥青

而言,环氧乳化沥青混合料的沥青用量更为节省。

考虑到环氧乳化沥青混合料 DE-10 的标准马歇尔试件破乳较为困难,先采用旋转压实方法制备厚度为 1 cm 的薄饼试件(见图 1),再将薄饼试件利用环氧胶粘接成标准试件(见图 2)。



图1 薄饼试件成型



图2 薄饼试件粘接成马歇尔标准试件

## 2 性能对比试验

### 2.1 抗压强度

抗压强度测试采用《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ E20—2011)(以下简称《试验规程》)中 T0713—2000 试验方法。分别测试用于计算弯沉和验算拉应力的不同温度下的回弹模量。4 种类型试件的抗压强度测试结果见表 5。

由表 5 可知,环氧乳化沥青混合料试件 DE-10 的抗压回弹模量高于传统 SBS 改性沥青混合料试件 SMA-10,具备很高的刚度和强度。

### 2.2 高温性能测试

高温性能评价采用《试验规程》中 T0719—2011 车辙试验方法进行动稳定度指标测试。该测试能较好地检验材料在高温季节抵抗形成车辙的能力。试件车辙试验测试结果见表 6。

由表 6 可知,环氧乳化沥青混合料试件 DE-10 的高温稳定性虽低于环氧沥青混合料试件 AC-13,但其动稳定度测试值远高于传统 SBS 改性沥青混合

表5 试件抗压强度测试结果

试件类型	试验温度 /℃	试件编号	抗压强度 /MPa		回弹模量 /MPa	
			测试值	均值	测试值	均值
普通 AC-5	15	1	15.26		1 954.2	
		2	15.72	15.12	2 117.2	1 985
		3	14.37		1 882.1	
	20	1	13.47		1 482.2	
		2	13.75	13.67	1 531.4	1 544
		3	13.71		1 616.5	
改性 SMA-10	15	1	19.02		2 587.0	
		2	19.54	19.5	2 505.2	2 596
		3	20.01		2 696.5	
	20	1	16.46		2 191.4	
		2	17.43	17.0	2 321.2	2 275
		3	17.15		2 312.9	
环氧 AC-13	15	1	60.38		7 483.3	
		2	63.66	62.1	7 654.4	7 592
		3	62.31		7 638.8	
	20	1	56.80		7 153.1	
		2	55.57	57.0	7 011.2	7 258
		3	58.48		7 608.5	
环乳 DE-10	15	1	36.91		3 695.0	
		2	32.14	35.4	3 322.1	3 372
		3	37.23		3 099.6	
	20	1	31.38		3 132.7	
		2	32.30	31.7	2 968.6	3 070
		3	31.45		3 110.4	

表6 试件车辙试验测试结果

试件类型	动稳定度 / (次·mm <sup>-1</sup> )	平均动稳定度 / (次·mm <sup>-1</sup> )	规范要求 / (次·mm <sup>-1</sup> )	变形量 /mm	平均变形量 /mm
普通 AC-5	680			5.021	
	664	657	≥2 800	5.041	5.031
	626			5.032	
改性 SMA-10	3 179			1.931	
	3 050	3 192	≥2 800	1.938	1.902
	3 347			1.837	
环氧 AC-13	13 262			1.137	
	13 956	13 599	≥1 600	1.113	1.166
	13 581			1.249	
环乳 DE-10	9 167			1.504	
	11 391	9 966	≥1 600	1.657	1.636
	9 341			1.748	

料试件 SMA-10。

### 2.3 水稳定性测试

试件的水稳定性选择《试验规程》中 T0729—2000 冻融劈裂试验与浸水车辙试验 2 种方法分别进行评价。其中浸水车辙试验是基于《试验规程》中

T0719—2011 车辙试验方法,在正式测试前对试件增加 60℃ 泡水养生 2 h。

#### 2.3.1 浸水车辙试验

对浸水养生后的 4 类试件进行测试。试件浸水车辙试验测试结果见表 7。

表7 试件浸水车辙试验测试结果

试件类型	动稳定度 / (次·mm <sup>-1</sup> )	变形量 /mm	相对变形 /%
普通 AC-5	340	11.313	20.374
改性 SMA-10	2 150	5.956	19.276
环氧 AC-13	11 380	2.948	12.2
环乳 DE-10	7 580	3.808	15.25

#### 2.3.2 冻融劈裂试验

对经过冻融循环后的 4 类试件进行测试。试件冻融劈裂试验测试结果见表 8。

表8 试件冻融劈裂试验测试结果

养生方式	试件类型	冻融劈裂强度均值 /kN	抗拉强度 /MPa	冻融劈裂强度比 /%
冻融循环	普通 AC-5	3.91	0.61	77.22
	改性 SMA-10	6.81	0.71	87.65
	环氧 AC-13	17.45	1.83	84.33
	环乳 DE-10	8.46	0.87	76.99
常温放置	普通 AC-5	4.43	0.79	
	改性 SMA-10	7.62	0.81	
	环氧 AC-13	20.2	2.17	
	环乳 DE-10	11.67	1.13	

浸水车辙试验结果显示,环氧类沥青混合料在抗水损坏性能上有明显优势;但冻融劈裂试验结果显示,环氧乳化沥青混合料的抗水损坏性能略低于普通沥青混合料,SBS 改性沥青混合料的抗水损坏性能表现最优。

### 2.4 抗疲劳性能测试

抗疲劳性能测试参照《试验规程》中 T0739—2011 的 4 点弯曲疲劳寿命试验,试验机采用澳大利亚 BFA(Beam Fatigue Analyzer)。

试验采用 1 000 μm/m 恒应变控制的 10 Hz 半正弦波荷载,疲劳判断标准选取 AASHTO 的  $N_{150}$  法<sup>[1]</sup>。

图 3 展示了某个试件的劲度模量随加载次数的变化关系。由图 3 可知,此试件的初始劲度模量  $S_0$  为 2 645 MPa, $S_0$  的 50% 即 1 322 MPa,查此图可得到对应疲劳寿命  $N_{150}=67 723$  次。

4 种类型试件的抗疲劳试验测试结果见表 9。

由表 9 可知,环氧类沥青混合料在抗疲劳性能上具有明显优势,且环氧乳化沥青混合料仍然表现

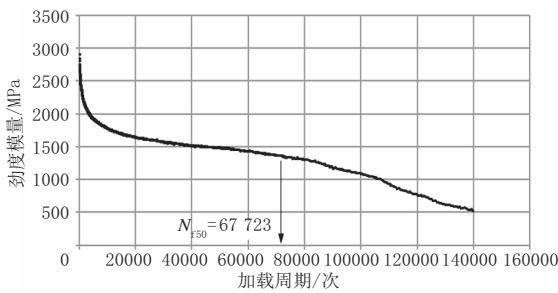


图3 试件劲度模量随加载次数的变化图

表9 试件疲劳试验测试结果

试件类型	试件编号	初始劲度模量 $S_0$ /MPa	疲劳寿命 $N_{f50}$ / 次
普通 AC-5	1	3 080	7 700
	2	3 050	5 680
	3	2 910	9 610
改性 SMA-10	1	3 950	26 120
	2	3 720	35 730
	3	3 590	32 400
环氧 AC-13	1	12 820	437 200
	2	11 730	415 500
	3	12 280	450 240
环乳 DE-10	1	6 410	292 940
	2	6 150	310 810
	3	6 090	245 000

出较高的抗疲劳性能。

### 3 施工温度模拟试验

为了模拟不同施工温度对环氧乳化沥青混合料性能的影响,选取 40℃(高温施工)、20℃(常温施工)、0℃(低温施工)以及 -20℃(极限低温施工)4个温度等级进行混合料的环氧固化和养生。混合料配合比选用常用的 AC-13,养生时间固定为 24 h。对不同固化养生温度下环氧乳化沥青的拉伸强度及其混合料性能进行对比测试分析。

#### 3.1 环氧乳化沥青拉伸强度测试

热拌沥青混合料属于热塑性材料,温度降低到一定程度后强度达到顶峰,施工完成即可立刻开放交通。冷拌环氧乳化沥青混合料属于反应型材料,其强度是随着破乳、固化反应逐渐形成并达到最大值。温度在养生过程中会对环氧乳化沥青的固化效果产生显著影响,试件拉伸强度将随着养生温度的升高而增大。不同固化养生温度下环氧乳化沥青拉伸强度试验结果见表 10。

表 10 不同固化养生温度下环氧乳化沥青拉伸强度

固化养生温度 /℃	40	20	0	-20
拉伸强度 /MPa	3.21	2.87	1.74	1.62

#### 3.2 沥青混合料性能测试

以马歇尔试件强度、动稳定度、冻融劈裂强度比 3 个指标对环氧乳化沥青混合料受固化养生温度的影响进行测试分析。不同固化养生温度下环氧乳化沥青混合料性能见表 11。

表 11 不同固化养生温度下环氧乳化沥青混合料性能

固化养生温度 /℃	马歇尔试件强度 /kN	动稳定度 / (次·mm <sup>-1</sup> )	冻融劈裂强度比 /%
40	15.61	12 280	98.8
20	14.22	12 336	96.2
0	13.54	11 030	92.1
-20	11.20	10 120	90.8

由表 11 可知,固化养生温度对环氧乳化沥青混合料的强度产生了显著影响,施工温度越高,其强度性能越好,但不同固化养生温度对环氧乳化沥青混合料高温性能的影响并不显著。

### 4 结语

(1)冷拌冷铺环氧沥青混合料 AC-13 的最佳油石比可选择 6.6%;环氧乳化沥青混合料 DE-10 不含水时的最佳沥青用量为 5.7%,实际含水的乳化沥青用量为 9.5%。

(2)冷拌冷铺环氧沥青混合料 AC-13 具有最高的高温性能,其次是环氧乳化沥青混合料 DE-10,且这两类混合料高温性能测试结果均高出其余对比混合料数倍,远超《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》最低指标。

(3)环氧类沥青混合料在抗水损坏和抗疲劳性能上均有明显优势,但环氧乳化沥青混合料的冻融劈裂试验结果表现不佳,环氧沥青混合料 AC-13 的试验数据变异性较大。

(4)施工环境温度对环氧乳化沥青固化性能、混合料强度性能具有显著影响,养生温度越高,固化强度与混合料强度形成越快。

#### 参考文献:

[1] American Association of State Highway and Transportation Officials, Standard test method for determining the fatigue life of compacted hot mix asphalt (HMA) subjected to repeated flexural bending AASHTO designation TP8-94 (Reapproved 1996)[S].