

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2024.05.002

二次热压实作用对乳化沥青冷再生混合料性能的影响

董长坤, 王宏*

(中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710068)

摘要: 为了量化分析现场二次热压实作用对乳化沥青冷再生混合料性能的影响, 基于常规力学性能试验、Overlay Tester 反射裂缝试验、低应变水平下的四点弯曲疲劳试验, 对比分析了现场铺筑上覆热拌沥青混合料前后乳化沥青冷再生芯样与室内马歇尔试样的力学性能差异。量化分析了现场二次热压实作用对乳化沥青冷再生混合料力学性能及耐久性能的增强效果, 并基于工业 CT 无损检测技术, 分析了现场二次热压实作用对乳化沥青冷再生混合料微观空隙结构的影响规律。结果表明: 现行规范推荐的马歇尔二次击实方法并不能很好地模拟现场实际压实状况, 现场二次热压实对乳化沥青冷再生混合料力学性能、抗反射裂缝性能和抗疲劳耐久性能均有明显增强作用; 现场压实乳化沥青冷再生混合料内部的大空隙数量和等效空隙直径均小于马歇尔击实成型, 二次热压实作用对乳化沥青冷再生混合料空隙级配影响显著; 现场二次压实作用对乳化沥青冷再生混合料力学性能和疲劳性能的改善机理在于二次压实作用增强了乳化沥青冷再生混合料密实度, 降低了微观空隙直径, 改善了微观空隙级配。

关键词: 道路工程; 乳化沥青冷再生混合料; 现场压实; 二次热压实; 微观空隙结构; 路用性能; 疲劳特性

中图分类号: U416.26

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2024) 05-0010-10

Influence of Secondary Thermal Compaction on Property of Emulsified Asphalt Cold Recycled Mixture

DONG Chang-kun, WANG Hong*

(CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710068, China)

Abstract: To quantify the influence of field secondary thermal compaction on the performance of emulsified asphalt cold recycled mixture, based on routine mechanical property test, Overlay Tester reflection crack test, and four-point bending fatigue test under low strain level, the mechanical properties of emulsified asphalt cold recycled core sample and indoor Marshall sample before and after laying hot mix asphalt on site are compared and analyzed. The enhancement influence of field secondary thermal compaction on mechanical properties and durability of emulsified asphalt cold recycled core sample is quantitatively analyzed. The influence of field secondary thermal compaction on microscopic void structure of emulsified asphalt cold recycled mixture is analyzed. The result indicates that the Marshall secondary compaction method recommended by the current regulations cannot simulate the actual field compaction condition well, and the field secondary thermal compaction can significantly enhance the mechanical properties, anti-reflective crack properties, and anti-fatigue durability of cold recycled asphalt mixture. The number of large voids and the diameter of equivalent voids in cold recycled mixture of emulsified asphalt are smaller than those with

收稿日期: 2023-11-20

基金项目: 交通运输行业重点科技项目 (2022-MS1-073)

作者简介: 董长坤 (1980-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 高级工程师. (33786567@qq.com)

* 通讯作者: 王宏 (1987-), 男, 陕西丹凤人, 硕士. (recyclecold@126.com)

Marshall molding method. The influence of secondary thermal compaction on voids gradation of cold recycled mixture is significant. The improvement mechanism of field secondary compaction on mechanical properties and fatigue properties of emulsified asphalt cold recycled mixture is that the density of emulsified asphalt cold recycled mixture is enhanced by using the secondary compaction. The micro-void diameter is reduced, and the microscopic void gradation is improved.

Key words: road engineering; emulsified asphalt cold recycled mixture; field compaction; secondary thermal compaction; microscopic void structure; road performance; fatigue characteristic

0 引言

废旧沥青路面材料的“高质化”、“高层位”回收利用是公路交通领域实现“碳达峰”、“碳中和”绿色低碳发展的重要途径。乳化沥青冷再生技术是实现沥青路面再生的主要方式之一,与传统热再生技术相比,乳化沥青冷再生技术具有冷拌冷铺施工便捷、RAP 掺量大、综合单价低等诸多优势^[1-3]。与泡沫沥青冷再生技术相比,乳化沥青冷再生混合料生产过程中不需要对水稳拌和站改造,仅需添加乳化沥青供应设备,包含乳化沥青输送管路、乳化沥青流量控制系统等。实体工程增加生产投入约为5万元,施工便捷。乳化沥青冷再生混合料可根据RAP 特性调整乳化沥青配方,具有早期强度高、水稳定性好、耐久性优良等优势^[4-5]。

配合比设计阶段,2019版《公路沥青路面再生技术规范》(JTG/T 5521—2019)延续了2008版规范马歇尔二次击实法制备乳化沥青冷再生混合料试件的方法,即将拌和均匀的乳化沥青混合料装入试模,放入马歇尔击实仪中首先双面击实各50次或75次(大马歇尔),待60℃养生至恒重(一般养生48h)后趁热立即进行双面击实各25次或37次(大马歇尔)。二次击实一方面是为了消除试件在养生过程中产生的膨胀变形,另一方面一定程度上模拟了现场摊铺上覆热拌沥青混合料对乳化沥青冷再生混合料的二次热压实作用。

对于乳化沥青冷再生混合料试件成型方法,不少学者从宏观和微细观角度进行了大量研究。郑南翔^[6]基于工业CT无损扫描技术研究了室内马歇尔试件二次击实作用对乳化沥青冷再生混合料微细观集料分布规律与空隙结构的影响,结果表明,二次热击实作用可以减少乳化沥青冷再生混合料中的有害空隙,增大一次击实功可以显著改善粗集料取向交角,最终推荐采用规范建议的“50+25”马歇尔成型方法。肖刘路等^[7]基于复合车辙板试件在室内模拟了加铺上覆热拌沥青混合料对乳化沥青冷再生混合

料常规路用性能的增强作用,其中动稳定度提升超30%,低温弯曲应变能和弯拉强度增幅超20%,空隙率降低约2%。杨进^[8]结合昌九高速公路改扩建实践情况,对比分析了铺筑上覆热拌沥青混合料前后冷再生结构层的空隙率变化情况,结果表明,经二次压实作用后,乳化沥青冷再生结构层平均空隙率下降了约3%,并建议室内配合比设计时对成型条件加以修正。郝林等^[9]对比分析了旋转压实、马歇尔击实和振动成型3种成型方式对乳化沥青冷再生混合料常规力学性能与路用性能的影响,并基于CT扫描试验分析了不成型方式对乳化沥青冷再生微细观空隙结构的影响,结果表明,旋转压实成型试件内部粗集料嵌挤和接触程度最佳,乳化沥青砂浆厚度最大。王宏等^[10]对比分析了马歇尔击实、旋转压实、轮碾压实和冷再生芯样的微细观空隙结构与集料颗粒取向,发现旋转压实和振动成型试件的粗集料取向角与现场压实最为接近,马歇尔击实过程中会产生粗集料被击碎的现象。国外也有研究表明,乳化沥青冷再生混合料室内配合比设计阶段采用的二次热压实会破坏已经形成胶凝结构的水泥石晶体。60℃养生温度已超过了乳化沥青中沥青的软化点,二次热击实会破坏沥青的黏结状态,从而导致室内马歇尔击实确定的乳化沥青冷再生混合料强度偏大^[11-12]。

上述相关研究为室内配合比设计选择合理的试件成型方法奠定了良好的基础,但既有研究大多采用室内模拟试验,针对室内不同压实方法成型的试件开展的常规路用性能试验缺少现场二次热压实效果的量化分析^[12-18]。试验方法方面,已有研究较少涉及低应变水平下的疲劳试验和微细观空隙结构方面的研究^[16-20]。因此,本研究以马歇尔双面击实试件、现场钻芯试验为研究对象,基于常规力学性能试验、Overlay Tester 反射裂缝试验、低应变水平下的四点弯曲疲劳试验,量化分析了现场二次热压实作用对乳化沥青冷再生混合料力学性能及耐久性能的增强效果,并基于工业CT无损检测技术探讨了二

次热压实作用对乳化沥青冷再生混合料微观空隙结构的影响规律。研究成果为完善乳化沥青冷再生混合料试件成型方法及性能评价体系提供借鉴。

1 试验段路面结构与乳化沥青冷再生混合料配合比设计

1.1 试验段路面结构

改扩建项目位于内蒙古自治区,设计年限内的大客车和货车交通量为 1 294.7 万辆,设计交通荷载等级为重载交通。改扩建项目新建段设计采用的路面结构为 4 cm 厚 AC-13C 改性沥青混凝土+SBS 改性乳化沥青黏层+6 cm 厚 AC-20C 改性沥青混凝土+1 cm 厚 SBS 改性乳化沥青碎石封层+12 cm 厚中粒式厂拌乳化沥青冷再生混合料下面层+PC-2 乳化沥青透层+36 cm 厚骨架密实型水泥稳定碎石基层+20 cm 厚骨架密实型水泥稳定碎石底基层。新建段铣刨旧路 9 cm 沥青混凝土后铺设洒布乳化沥青透层,设计结构为 4 cm 厚 AC-13C 细粒式 SBS 改性沥青混凝土表面层+ SBS 改性乳化沥青黏层+6 cm 厚 AC-20C 中粒式改性沥青混凝土中面层+1 cm 厚 SBS 改性乳化沥青碎石封层+12~18 cm 厚中粒式厂拌乳化沥青冷再生混合料下面层,以乳化沥青冷再生为结构补强层兼调平层。

1.2 试验原材料

试验采用的原材料均来源于实体工程。RAP 混合料采用铣刨方式获得,自然风干后经二次筛分后分为 0~5, 5~15, 15~25 mm 共 3 档存放, RAP 主要技术指标见表 1。采用实验室自制乳化沥青,其主要技术指标见表 2。10~20 mm 新集料为石灰岩碎石,矿粉由石灰岩磨制而成,试验用水为自来水。经检验,原材料各项技术指标均满足 JTGT 5521—2019 规范要求。

表 1 RAP 技术性能

Tab. 1 Technical performance of RAP

材料	检测项目	试验结果	技术要求
RAP	含水率/%	<1	≤3
	沥青含量/%	4.4	—
	砂当量	62	≥60
	最大粒径/mm	≤26.5	<31.5
RAP 粗集料	针片状含量/%	9.7	≤15
	压碎值/%	22.8	≤26
RAP 细集料	流动时间(棱角性试验)/s	41	≥35
	砂当量	58	≥50

表 2 乳化沥青主要技术指标

Tab. 2 Technical indicators of emulsified asphalt

技术指标	试验结果	技术要求
破乳速度	慢裂	慢裂或中裂
粒子电荷	阳离子	阳离子
筛上残留物(1.18 mm 筛)/%	0	≤0.1
恩格拉黏度 E25	12.4	2~30
残留分含量/%	62.5	≤60
蒸发残留 溶解度/%	99.6	≥97.5
物 针入度(25℃)/(0.1 mm)	78	50~300
延度(15℃)/cm	69.5	≥40
与粗集料的黏附性	1	>2/3
与粗、细粒式集料拌和试验	矿料裹覆均匀 矿料裹覆均匀	
常温存储 1 d	0.2	≤1
稳定性/% 5 d	3.1	≤5

1.3 乳化沥青冷再生配合比设计

根据原材料筛分试验结果,经室内初步试验,确定乳化沥青冷再生混合料中的原材料 0~5 mm RAP, 5~15 mm RAP, 15~25 mm 碎石, 10~20 mm 碎石,矿粉配比为 39:20:25:10:6。RAP 掺量为 84%,外掺水泥用量为 1.5%,乳化沥青冷再生混合料矿料级配见表 3。经室内击实试验确定最佳拌和用水量为 4.1%,以劈裂强度峰值确定最佳乳化沥青用量为 3.8%,配合比设计结果汇总见表 4。

表 3 乳化沥青冷再生混合料矿料级配

Tab. 3 Mineral gradation of emulsified asphalt cold recycled mixture

筛孔/mm	26.50	19.0	13.20	9.50	4.75	2.36	0.30	0.075
通过率/%	100	95.8	82.3	71.5	44.7	28.8	10.3	4.4
规范要求/%	100	90~100	—	60~80	35~65	20~50	3~21	2~8

1.4 试验段铺筑

试验段单幅铺筑宽度为 11.25 m,两台摊铺机进行阶梯摊铺,摊铺机铺筑速度为 2.5 m/min。初压采用两台 15 t 双钢轮振动压路机以 2~3 km/h 速度碾压 3 遍,复压采用两台 30 t 胶轮以 3~4 km/h 速度碾压 8 遍,终压采用两台 13 t 双钢轮压路机静压 2 遍收光,碾压完成后检测乳化沥青冷再生结构层压实度与平整度满足规范要求。铺筑完成后现场自然养生,考虑到项目区内蒸发量大,养生期间通过喷洒水雾间断保湿,避免因水分快速蒸发导致的表面微裂缝。待养生 3~7 d 且能够钻出完整芯样后铺设 9~13.2 mm 单粒径 SBS 改性乳化沥青碎石封层,接着铺筑 6 cm 厚 AC-20C 中粒式改性沥青混凝土中面

表 4 乳化沥青冷再生混合料配合比设计结果

Tab. 4 Design result of mix design for emulsified asphalt cold recycled mixture

试验项目	配合比结果				力学性能与路用性能试验结果			
	乳化沥青 用量/%	最佳拌和 用水量/%	水泥掺量/%	空隙率/%	干劈裂强度/ MPa	干湿劈裂 强度比/%	冻融劈裂 强度比/%	车辙动稳定度/ (次·mm ⁻¹)
试验结果	3.8	4.1	1.5	11.6	0.66	93.6	84.5	8 745
技术要求	—	—	≤1.8	8~13	≥0.60	≥80.0	≥75.0	≥2 000

层。中面层沥青混凝土铺筑 2 d 后钻取乳化沥青冷再生混合料试样备用。

1.5 试样制备

选取室内马歇尔击实试样与现场未加铺中面层热拌沥青混合料的冷再生混合料钻芯样为对照组。

(1) 大型马歇尔试件。马歇尔试样采用 JTGT 5521—2019 规范附录 F 规定的成型方法成型大型击实试件。先双面各击实 112 次, 60 ℃ 养生 2 d 后再趁热双面各击实 37 次, 冷却 12 h 后脱模备用。后续试验过程中根据具体试验尺寸要求, 再切割或钻芯进行二次加工, 该方法制备的芯样计为室内成型试样。

(2) 现场钻芯取样。待加铺中面层热拌沥青混凝土后, 采用取芯机钻芯取样, 获取直径 150 mm、高 120 mm 乳化沥青冷再生混合料芯样, 计为现场二次热压实试样。待养生结束, 铺筑热拌沥青混凝土前现场钻取得乳化沥青冷再生混合料芯样计为现场压实试样。为避免因芯样加工过程中试样掉粒影响试样尺寸, 待获取芯样后统一在 25 ℃ 鼓风机烘箱中放置 3 d, 以确保后续试验与大型马歇尔试件在基本相同的含水率和养生龄期条件下进行。

2 力学性能

采用 20 ℃ 无侧限抗压强度试验、60 ℃ 贯入剪切试验和 20 ℃ 动态压缩模量试验评价乳化沥青冷再生混合料的力学性能。力学性能试验的试件尺寸、加载方式、试验温度等严格参照相关规范要求进行, 试验结果见表 5。

表 5 力学性能试验结果

Tab. 5 Test result of mechanical properties

试件成型方法	15 ℃ 劈裂 强度/MPa	20 ℃ 无侧限	60 ℃ 贯入	动态压缩模量/ MPa	
		抗压强度/ MPa	剪切强度/ MPa		
				5 Hz	10 Hz
室内成型	0.66	2.845	1.51	4 193	5 280
现场压实	0.74	3.177	1.68	4 683	6 106
现场二次热压实	0.82	3.493	1.96	5 092	6 674

由表 5 可知, 乳化沥青冷再生混合料的 20 ℃ 无

侧限抗压强度接近低剂量水泥稳定级配碎石, 且 60 ℃ 贯入剪切强度大于 1.5 MPa。同时 20 ℃ 动态压缩模量约为热拌沥青混合料的 50%, 乳化沥青冷再生混合料具有优异的力学性能。

3 种成型条件下, 乳化沥青冷再生混合料的 15 ℃ 劈裂强度、20 ℃ 无侧限抗压强度、60 ℃ 贯入剪切强度及动态压缩模量由大到小排序为现场二次热压实、现场压实、室内成型。现场二次压实成型乳化沥青冷再生混合料的 20 ℃ 无侧限抗压强度、60 ℃ 贯入剪切强度马歇尔击实乳化沥青冷再生混合料动态压缩模量分别提高了 24.2%, 22.8%, 29.8%。5 Hz 和 10 Hz 动态压缩模量分别提高了 21.4% 和 26.4%。现场二次热压实成型乳化沥青冷再生混合料的 20 ℃ 无侧限抗压强度、60 ℃ 贯入剪切强度比现场压实乳化沥青冷再生混合料动态压缩模量分别提高了 10.8%, 9.9%, 16.7%。5 Hz 和 10 Hz 动态压缩模量分别提高了 8.7% 和 9.3%。由此可见, 采用马歇尔击实方法测试的乳化沥青冷再生混合料力学性能低于现场压实, 室内马歇尔成型方式制备的试件低估了乳化沥青冷再生混合料的力学性能, 二次热压实作用对乳化沥青冷再生混合料力学性能影响显著。

3 乳化沥青冷再生混合料耐久性能

3.1 抗反射裂缝性能

Overlay Tester 试验的标准试件尺寸为 150 cm (半弧形)×75 mm (长)×38 mm (高)。将乳化沥青冷再生试件用环氧树脂固定在底板上, 可移动端以三角形波加载, 连续加载 5 s 达到最大位移 0.625 mm 后卸载 5 s, 位移归零, 三角形波之间无间歇时间。采用初始荷载峰值和 1 200 次加载结束后峰值荷载损失率这两个指标综合评价乳化沥青冷再生混合料的抗反射裂缝性能。试验结果见表 6。

由表 6 可知, 3 种成型方式条件下乳化沥青冷再生混合料的加载周期均达到了 1 200 次, 且最大荷载损失率不超过 80%, 总断裂能大于 850 N/m, 符合重载交通沥青混合料面层的抗反射裂缝性能要求^[17]。3 种成型方式条件下乳化沥青冷再生混合料

表 6 Overlay Tester 试验结果
Tab. 6 Overlay Tester test result

成型方式	加载周期 数/次	最大荷载 损失率/%	最大 拉力/N	总断裂能/ (N·m ⁻¹)
室内成型	1 200	77.8	915	878.4
现场压实	1 200	74.4	1 158	982.6
现场二次热压实	1 200	71.5	1 283	1 078.9

的最大拉力和总断裂能由大到小排序为现场二次热压实、现场压实、室内成型。现场二次压实与现场压实试件的最大荷载损失率小于马歇尔击实。相较于室内马歇尔击实，现场二次热压实乳化沥青冷再生混合料的总断裂能、最大拉力提高了 22.8%和 40.2%，最大荷载损失率降低了 6.3%。相较于现场压实，现场二次热压实乳化沥青冷再生混合料的总断裂能、最大拉力提高了 10.8%和 9.8%，最大荷载损失率降低了 2.9%。

综合考虑最大荷载损失率、最大拉力、总断裂能 3 个评价指标，现场二次热压实乳化沥青冷再生混合料的抗反射裂缝性能最优。这主要是因为现场

压实乳化沥青冷再生混合料的抗反射裂缝性能优于马歇尔击实。这主要是由于现场压实的压实功大，且现场压实作用下集料在钢轮共振及胶轮揉搓作用下能够调整三维状态，以达到最稳定状态，乳化沥青冷再生混合料的密实度和稳定性更高。经现场二次热压实后乳化沥青冷再生混合料的抗反射裂缝性能进一步提高，这主要是因为铺筑上层热拌沥青混合料热量向下传递对乳化沥青冷再生混合料起到了类似加热作用，受沥青感温性影响，在二次补压作用下乳化沥青冷再生混合料更易于被压实。

3.2 疲劳性能

采用控制应变加载模式疲劳试验评价乳化沥青冷再生混合料的耐久性，疲劳试验在 UTM-10 材料试验机上进行，试验温度为 20 ℃，四点弯曲疲劳试验的应变水平为 150，200，250，300 $\mu\epsilon$ 。开启试验设备的断裂保护功能，设置疲劳试验终止条件为试件劲度模量下降到初始劲度模量的 50%，疲劳试验结果见表 7，疲劳试验拟合曲线见图 1。

表 7 乳化沥青冷再生混合料四点弯曲疲劳试验结果

Tab. 7 Four-point bending fatigue test result for emulsified asphalt cold recycled mixture

应变水平/ $\mu\epsilon$	室内成型		现场压实		现场二次热压实	
	劲度模量/MPa	疲劳寿命/($\times 10^4$ 次)	劲度模量/MPa	疲劳寿命/($\times 10^4$ 次)	劲度模量/MPa	疲劳寿命/($\times 10^4$ 次)
150	3 823	1 782.1	3 252	2 069.5	4 782	2 401.4
	3 596	1 974.4	3 330	2 130.7	4 944	2 691.9
	4 034	1 872.0	3 103	2 065.4	4 672	2 510.6
	3 701	1 973.4	3 207	2 170.7	4 752	2 578.6
200	2 782	93.6	2 297	106.1	3 615	1 390.0
	2 851	90.3	2 532	115.2	3 415	1 558.4
	2 696	94.0	2 220	106.6	3 320	1 454.5
	2 553	95.5	2 404	104.9	3 482	1 532.9
250	2 063	38.4	1 745	39.4	2 635	48.3
	1 965	35.7	1 815	44.4	2 519	51.8
	2 002	37.2	1 948	42.2	2 482	52.1
	2 178	35.5	1 988	42.1	2 602	48.0
300	1 554	4.9	1 439	5.1	1 964	7.7
	1 400	5.2	1 342	5.7	1 869	8.0
	1 544	5.2	1 364	5.8	1 979	8.5
	1 572	5.0	1 458	5.4	1 930	8.0

由表 7 和图 1 可知，随着疲劳试验施加的应变增大，3 种成型方式条件下乳化沥青冷再生混合料的弯曲劲度模量均呈线性减小。疲劳寿命与应变水平之间符合良好的双对数递减关系，拟合优化度 R^2 大于 0.95，疲劳试验结果及拟合方程与既有研

究基本一致^[13,16]。对比疲劳方程的拟合参数，现场二次热压实乳化沥青冷再生混合料的疲劳方程斜率绝对值最小，其次是现场压实，室内马歇尔成型的乳化沥青冷再生混合料疲劳方程斜率绝对值最大。这表明现场二次热压实乳化沥青冷再生混合料疲劳

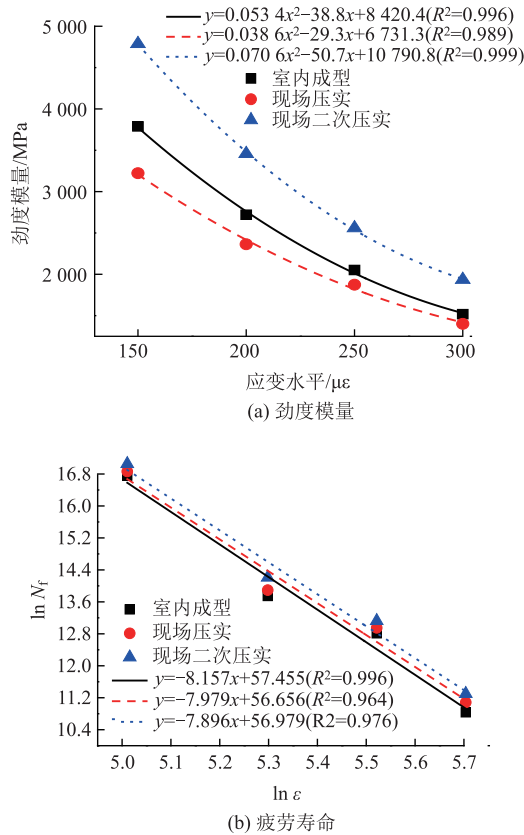


图1 疲劳试验拟合曲线

Fig.1 Fitting curves of fatigue test

寿命对应变水平的敏感性最低,抗疲劳性能相对较好。

参考已有研究成果^[16],取室内疲劳寿命达到1亿次对应的应变水平为乳化沥青冷再生混合料的疲劳极限,计算得到室内马歇尔成型、现场压实、现场二次热压实乳化沥青冷再生混合料的疲劳极限应变依次为119.7, 124.5, 132.1 $\mu\epsilon$ 。通过调整路面结构厚度,控制在此应变水平下,乳化沥青冷再生混合料符合长寿命沥青路面耐久性能要求。对比疲劳极限应变可以发现,经现场二次热压实后乳化沥青冷再生混合料抗疲劳性能有明显提高,相应的路面结构可适当减薄,按照室内成型马歇尔试件疲劳参数确定的路面结构厚度偏保守。

4 乳化沥青冷再生混合料空隙结构

4.1 空隙率

采用烘干法测试乳化沥青冷再生混合料的空隙率,为确保试验结果的准确性,每组8个平行试件,取8个试件标准值。现场二次热压实试样的钻芯取样位置尽量与现场压实试样保持在同一纵断面。计算空隙率标准值与变异系数,结果见表8。

表8 室内成型与现场压实乳化沥青冷再生混合料空隙率

Tab.8 Porosity of emulsified asphalt cold recycled mixture by indoor molding v. s. field compaction

试件成型方式	空隙率标准值/%	变异系数/%
室内成型试样	12.4	9.5
现场压实试样	11.3	7.4
现场二次热压实试样	9.2	7.9

由表8可知,3种成型方式下乳化沥青冷再生混合料的空隙率变异系数均小于10%,试验数据离散性小。现场二次热压实空隙率比室内成型试样空隙率降低了3.2%,乳化沥青冷再生混合料的现场压实空隙率小于室内成型试件。这主要是由于现场双钢轮压振动碾压与胶轮揉搓碾压的压实功大于马歇尔击实。此外,受钢膜的侧向约束作用,马歇尔击实过程集料与乳化沥青砂浆主要产生竖向位移,在现场振动碾压和揉搓碾压作用下,乳化沥青冷再生中的集料不仅产生竖向位移,也会产生水平移动和竖向转动,碾压作用下集料能够调整到相对最稳定状态,密实度达到最大,空隙率进一步降低。现场二次热压实试样空隙率比现场压实试样空隙率降低了2.1%,这表明铺筑上层沥青混凝土后乳化沥青冷再生混合料的空隙率进一步降低,铺筑热拌沥青混凝土会对乳化沥青冷再生产生二次压密作用,且二次压密效果显著。这主要是由于压实热拌沥青混合料过程中压实功传递会对下承层乳化沥青冷再生混合料产生二次压密作用,同时上层热拌沥青混合料热量向下传递会对乳化沥青冷再生混合料起到加热作用,沥青的感温性使得乳化沥青冷再生更易于压实。目前乳化沥青再生混合料配合比设计阶段采用60℃,养生不少于40h后立即二次击实,一定程度上模拟了现场的二次热压实作用。但从空隙率指标来看,现场压实效果优于室内成型,室内马歇尔击实与现场压实条件并不吻合,后续研究可通过调整压实功或增加二次击实次数以实现空隙率指标与现场相匹配。

4.2 微细观空隙结构

乳化沥青冷再生混合料的空隙率虽大,但乳化沥青冷再生混合料却表现出了致密、不透水的性质,现场实测渗水系数接近0,这与其独特的空隙结构特性有关。空隙率指标仅宏观反映了总空隙率大小,无法区分空隙大小分布特征及空隙在乳化沥青冷再生混合料中的分布规律。本研究基于德国某公司225 kV工业CT系统,获取3种成型方式的乳化沥青冷再生混合料CT切片,扫描间距为0.1 mm。利用VGStudio MAX软件的三维重构功能实现CT图像三

维可视化,并测算空隙率。以表干法实测空隙率与三维可视化测算空隙率相等或接近为基本原则,得到每个独立空隙在乳化沥青冷再生混合料内部的三维坐标、空隙体积、表面积等物理参数,每组4个平行试件。借鉴已有研究成果^[3,6,10],统计乳化沥青冷再生混合料空隙级配、等效平均空隙直径及空隙率沿竖向分布规律。

4.2.1 空隙级配

根据计算输出的 excel 表单统计乳化沥青冷再生混合料空隙级配,最大空隙体积为 100 mm^3 ,最小空隙体积为 0.1 mm^3 ,中间空隙体积按照接近 50% 上级空隙体积递减,空隙级配统计结果见表 9。

表 9 不同成型方式乳化沥青冷再生混合料空隙级配

Tab.9 Void gradation of emulsified asphalt cold recycled mixture with different forming methods

空隙体积 V/mm^3	试件成型方式空隙级配		
	室内成型	现场压实	现场二次热压实
≥ 100	0.065	0.049	0.033
$50 \leq V < 100$	0.207	0.130	0.104
$30 \leq V < 50$	0.280	0.202	0.156
$20 \leq V < 30$	0.426	0.345	0.220
$10 \leq V < 20$	0.398	0.370	0.293
$5 \leq V < 10$	1.867	1.666	1.522
$2 \leq V < 5$	2.675	2.470	2.378
$1 \leq V < 2$	3.594	3.268	3.041
$0.5 \leq V < 1.0$	9.352	9.328	9.008
$0.1 \leq V < 0.5$	9.959	9.155	8.909
$V < 0.1$	71.177	73.017	74.336

由表 9 可知,乳化沥青冷再生混合料中的总空隙密度约为 $0.117 \sim 0.136$ 个/ mm^3 ,空隙组成中小于 1 mm^3 空隙数量占总空隙 94% 以上,大于 10 mm^3 空隙数量占比不足 1%,小于 0.1 mm^3 空隙数量占比大于 70%。乳化沥青冷再生混合料内部空隙表现出了空隙数量多、微空隙占比高的特点。

不同成型方式条件下乳化沥青冷再生混合料空隙级配差异较大。这主要表现在,室内成型乳化沥青冷再生混合料试件中大于 100 mm^3 空隙数量为现场压实和现场二次热压实空隙数量的 1.33 倍和 1.97 倍;大于 50 mm^3 空隙数量为现场压实和现场二次热压实空隙数量的 1.52 倍和 1.99 倍;大于 20 mm^3 空隙数量为现场压实和现场二次热压实空隙数量的 1.26 倍和 1.71 倍;小于 1 mm^3 空隙数量比现场压实

和现场二次热压实空隙数量降低了 0.72% 和 1.27%;其中小于 0.1 mm^3 空隙数量比现场压实和现场二次热压实空隙数量降低了 2.52% 和 4.25%。综上可见,现场压实乳化沥青冷再生混合料内部的大空隙数量明显低于室内马歇尔成型方法,二次热压实作用能进一步降低乳化沥青冷再生混合料内部的大空隙数量,同时增加微空隙数量,二次热压实作用对乳化沥青冷再生混合料空隙级配影响显著,现场压实效果优于室内马歇尔压实二次击实。

4.2.2 等效空隙直径

将乳化沥青冷再生混合料内部所有空隙等效为直径相等的球体,根据空隙个数和总空隙体积反算等效空隙直径,并统计沿试件高度方向等效空隙直径分布规律,结果如图 2 所示。

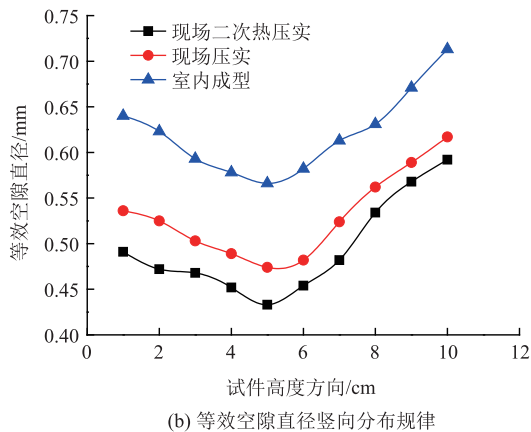
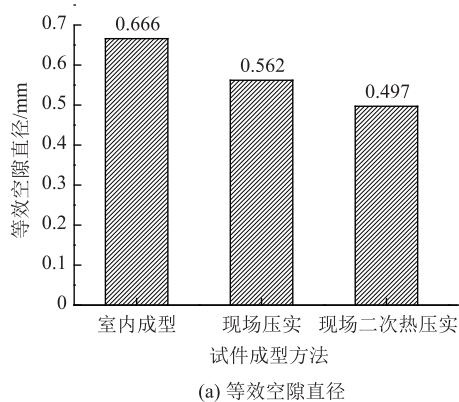


图 2 乳化沥青冷再生混合料等效空隙直径

Fig.2 Equivalent void diameter of emulsified asphalt cold recycled mixture

由图 2 可知,室内成型、现场压实、现场二次热压实乳化沥青冷再生混合料的等效空隙直径分别为 0.666, 0.656, 0.497 mm,现场压实与现场二次热压实乳化沥青冷再生混合料的等效空隙直径比室内成型乳化沥青冷再生混合料等效空隙直径降低了

15.6%和25.4%。现场压实等效空隙直径小于室内马歇尔击实,这主要是由于振动压实与马歇尔击实压实功及压实机理差异所致。经现场二次热压实后,乳化沥青冷再生混合料的等效空隙直径进一步减小,这主要是由于铺筑上层热拌沥青混合料对乳化沥青冷再生混合料的加热作用使冷再生中的老化沥青与新沥青软化,施工和易性提高,从而更易于压实,同时二次热压实也同样有“补压”作用。沿试件高度方向等效空隙直径呈先减小后增大趋势,

等效空隙直径大致呈“C”形分布。这主要是由于等效空隙直径计算方法不同于总空隙率,试件两端更容易形成连通空隙,空隙数量减少,导致等效空隙直径增大。

5 微观空隙结构与宏观性能的拟合关系

分别建立了3种成型方式下乳化沥青冷再生混合料等效空隙直径与其动态压缩模量、疲劳寿命、力学性能之间的拟合关系(见图3)。

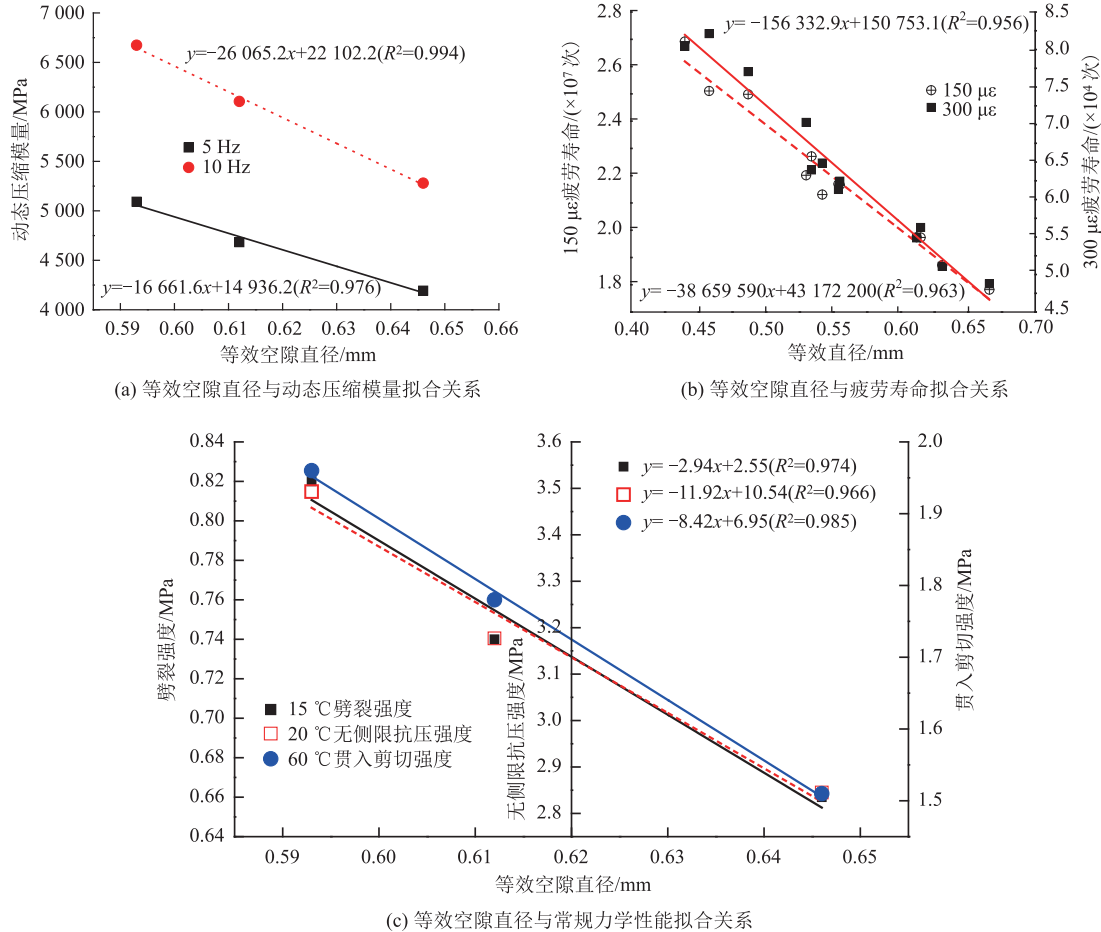


图3 等效空隙直径与动态压缩模量、疲劳寿命、力学性能拟合关系

Fig.3 Fitting relationship of equivalent void diameter with dynamic compression modulus, fatigue life, and mechanical property

由图3拟合结果可知,随着等效空隙直径增大,乳化沥青冷再生混合料力学性能与疲劳性能呈负线性关系减小,且拟合优化度均大于0.95,负线性拟合关系良好。由此可见,现场压实乳化沥青冷再生混合料力学性能优于室内成型,主要与不同压实方法下乳化沥青冷再生混合料的均匀性、集料稳定性和密实度有关。经二次热压实后空隙率减小,同时微观空隙级配变化,等效空隙直径减小是二次热压实作用改善乳化沥青冷再生混合料力学性能与疲劳性能的主要原因。

6 结论

基于现场钻芯取样试验、室内力学性能试验和疲劳性能试验,量化分析了现场二次热压实作用对乳化沥青冷再生混合料力学性能及耐久性能的增强效果,并基于工业CT无损检测技术分析了现场二次热压实对乳化沥青冷再生路面微观空隙结构的影响规律,得到了如下结论。

(1) 根据试验段数据和实体工程跟踪检测结果,推荐现场12~18 cm厚乳化沥青冷再生下面层的摊铺

速率为 2.5 m/min。初压采用 15 t 双钢轮振动压路机以 2~3 km/h 速度碾压 3 遍,复压采用 30 t 胶轮以 3~4 km/h 速度碾压 8 遍,终压采用两台 13 t 双钢轮压路机静压 2 遍收光,可为同类项目提供借鉴。

(2) 3 种成型条件下,现场二次压实成型乳化沥青冷再生混合料的 20 ℃ 无侧限抗压强度、60 ℃ 贯入剪切强度马歇尔击实乳化沥青冷再生混合料动态压缩模量分别提高了 24.2%, 22.8%, 29.8%, 5 Hz 和 10 Hz 动态压缩模量分别提高了 21.4% 和 26.4%,现场二次热压实作用对乳化沥青冷再生混合料力学性能有明显的增强作用。

(3) 现场二次压实成型乳化沥青冷再生混合料的总断裂能、最大拉力比室内马歇尔二次压实分别提高了 22.8% 和 40.2%,最大荷载损失率降低了 6.3%。以疲劳寿命达到 1 亿次对应的应变水平作为乳化沥青冷再生混合料的疲劳极限,计算得到室内马歇尔成型、现场压实、现场二次热压实乳化沥青冷再生混合料的疲劳极限应变依次为 119.7, 124.5, 132.1 $\mu\epsilon$ 。现场二次热压实作用对乳化沥青冷再生混合料抗反射裂缝性能和抗疲劳耐久性能有明显增强作用。

(4) 现场二次热压实空隙率比室内成型试样空隙率降低了 3.2%,比加覆上层热拌沥青混合料前空隙率降低了 2.1%。经现场二次热压实作用,乳化沥青冷再生混合料内部的大空隙数量减少,等效空隙直径减小,二次热压实作用对乳化沥青冷再生混合料性能的增强机理在于二次热压实作用增强了乳化沥青冷再生混合料密实度,降低了微细观空隙直径,改善了微细观空隙级配。

参考文献:

References:

- [1] 徐剑,石小培,秦永春. 乳化沥青冷再生路面性能衰变与病害特征分析 [J]. 公路, 2015, 60 (5): 207-212.
XU Jian, SHI Xiao-pei, QIN Yong-chun. Distress Characteristics and Performance Decay Law of Asphalt Emulsion Stabilized Cold Recycling Pavement [J]. Highway, 2015, 60 (5): 207-211.
- [2] 王秋平. 在役乳化沥青冷再生路面与冷再生混合料性能衰变规律 [J]. 公路交通科技, 2021, 38 (12): 1-11, 46.
WANG Qiu-ping. Study on In-service Emulsified Asphalt Cold Recycled Pavement and Decay Rule of Cold Recycled Mixture Performance [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38 (12): 1-11, 46.
- [3] 王宏. 不同水泥掺量乳化沥青冷再生混合料细微观空

隙分布特征 [J]. 公路交通科技, 2016, 33 (7): 27-34, 67.

WANG Hong. Meso-micropic Void Distribution Characteristics of Emulsified Asphalt Cold Recycled Mixture with Different Cement Content [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33 (7): 27-34, 67.

- [4] 田迎春,王宏. 在役泡沫沥青冷再生混合料性能研究 [J]. 公路, 2019, 64 (1): 223-231.

TIAN Ying-chun, WANG Hong. Study on Property of In-service Foam Asphalt Cold Reclaimed Mixture [J]. Highway, 2019, 64 (1): 223-231.

- [5] 高磊. 乳化沥青冷再生混合料的裂纹发展行为及抗裂机理研究 [D]. 南京: 东南大学, 2016.

GAO Lei. Cracking Behavior and Fracture Mechanism of Cold Recycled Emulsified Asphalt Mixtures with Emulsion [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.

- [6] 郑南翔. 基于 X-RayCT 乳化沥青冷再生混合料马歇尔击实方法研究 [J]. 公路, 2018, 63 (1): 165-172.

ZHENG Nan-xiang. Study on Marshall Compaction Method of Cold Recycled Mixture Based on X-ray CT [J]. Highway, 2018, 63 (1): 165-172.

- [7] 肖刘路,黄晚清,曹明明. 乳化沥青冷再生混合料二次热压实室内试验模拟与路用性能增幅量化 [J]. 公路, 2022, 67 (7): 80-87.

XIAO Liu-Lu, HUANG Wan-qing, CAO Ming-ming. Research on Laboratory Simulation and Road Performance Enhancement Quantification of Secondary Thermal Compaction of Emulsified Asphalt Cold Recycled Mixture [J]. Highway, 2022, 67 (7): 80-87.

- [8] 杨进. 冷再生沥青混合料二次压实过程分析 [J]. 城市道桥与防洪, 2012 (4): 46-48.

YANG Jin. Analysis on Secondary Compaction Process of Cold Reclaimed Asphalt Mixture [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2012 (4): 46-48.

- [9] 郝林,王文路,吴建灵,等. 乳化沥青冷再生混合料成型方法优化研究 [J]. 公路, 2023, 68 (1): 333-344.

HAO Lin, WANG Wen-lu, WU Jian-ling, et al. Research on Optimization Forming Method of Emulsified Asphalt Cold Recycled Mixture [J]. Highway, 2023, 68 (1): 333-344.

- [10] 王宏,刘锋. 不同成型方式泡沫沥青冷再生混合料细微观结构性性能研究 [J]. 公路交通科技, 2016, 33 (2): 19-27.

WANG Hong, LIU Feng. Research of Microstructure Performance of Foamed Asphalt Cold Recycled Mixture in Different Compaction Methods [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33

- (2): 19-27.
- [11] CHAKRAVARTHI S, KUMAR G R, SHANKAR S, et al. Effect of Emulsified Asphalt Content on Creep Behavior and Mechanical Properties of Cold Recycled Emulsified Asphalt Bases [J]. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 2021, 9 (4): 133-147.
- [12] DUAN W D, LIU T, LI Q P, et al. Evaluation and Technical Requirements of the Initial Anti-wear Performance of an Emulsified Asphalt Cold Recycled Mixture: A Case Study in Northern China [J]. *Sustainability*, 2022 (14): 15469-15481.
- [13] 王之怡, 郝培文, 柳浩, 等. 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, et al. Study on Fatigue Performance of Emulsified Asphalt Cold Recycled Mixture [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2015, 32 (2): 28-32.
- [14] 户桂灵, 韩文扬, 余四新. 乳化沥青冷再生混合料动态模量的试验研究 [J]. *科学技术与工程*, 2018, 18 (4): 339-343.
- HU Gui-ling, HAN Wen-yang, YU Si-xin. Experimental Investigation on the Dynamic Modulus of the Emulsion Asphalt Cold Recycling Mixture [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18 (4): 339-343.
- [15] 孙立军, 程怀磊, 刘黎萍, 等. 在役乳化沥青冷再生混合料的疲劳性能 [J]. *同济大学学报 (自然科学版)*, 2017, 45 (11): 1648-1654.
- SUN Li-jun, CHENG Huai-lei, LIU Li-ping, et al. Fatigue Characteristics of In-situ Emulsified Asphalt Cold Recycled Mixtures [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2017, 45 (11): 1648-1654.
- [16] 丛培, 凌涛. 泡沫沥青冷再生混合料疲劳特性及其长寿命冷再生沥青路面结构优化 [J]. *公路*, 2021, 66 (12): 8-16.
- CONG Pei, Ling Tao. Fatigue Characteristics of Foamed Asphalt Cold Recycled Mixture and Structural Optimization of Long-life Cold Recycled Asphalt Pavement [J]. *Highway*, 2021, 66 (12): 8-16.
- [17] 郝培文, 李万军, 韩钰祥, 等. 基于 OT 试验的乳化沥青冷再生面层混合料抗反射裂缝性能研究 [J]. *材料导报*, 2021, 35 (增2): 150-157.
- HAO Pei-wen, LI Wan-jun, HAN Yu-xiang, et al. Crack Resistance of Cold Recycled Mixture with Emulsified Asphalt for Surface Course Based on OT Test [J]. *Materials Reports*, 2021, 35 (S2): 150-157.
- [18] 王梦浩, 王朝辉, 高璇, 等. 公路路面乳化沥青冷再生技术综述 [J]. *材料导报*, 2023, 37 (7): 46-51.
- WANG Meng-hao, WANG Chao-hui, GAO Xuan, et al. Emulsified Asphalt Cold Recycled Technology for Highway Pavement: A State-of-the-art Review [J]. *Materials Reports*, 2023, 37 (7): 46-51.
- [19] 王振军, 阎凤凤, 张含笑, 等. 乳化沥青与 RAP 再生界面融合特征研究进展 [J]. *材料导报*, 2023, 37 (7): 57-66.
- WANG Zhen-jun, YAN Feng-feng, ZHANG Han-xiao, et al. Research Progress of Interfacial Fusion Characteristics Between Emulsified Asphalt and RAP [J]. *Materials Reports*, 2023, 37 (7): 57-66.
- [20] 杨彦海, 王汉彬, 杨野. 冻融循环作用下乳化沥青冷再生混合料空隙特性 [J]. *材料导报*, 2022, 36 (16): 65-71.
- YANG Yan-hai, WANG Han-bin, YANG Ye. Characterization of Air Voids in Cold Recycled Mixtures with Emulsified Asphalt Under Freeze-thaw Cycles [J]. *Materials Reports*, 2022, 36 (16): 65-71.