

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2024.04.015

引用格式: 匡强, 李浩, 方杨. RAP 抽提集料密度测试方法优化[J]. 公路与汽运, 2024, 40(4): 66-70.

Citation: KUANG Qiang, LI Hao, FANG Yang. Optimization of density test method of RAP extraction aggregate[J]. Highways & Automotive Applications, 2024, 40(4): 66-70.

RAP 抽提集料密度测试方法优化

匡强¹, 李浩², 方杨²

(1. 佛山市公路桥梁工程监测站有限公司, 广东 佛山 528000; 2. 佛山交通科技有限公司, 广东 佛山 528000)

摘要: 准确的集料密度测试方法对沥青混合料配合比设计非常重要。针对沥青混合料回收料(RAP)抽提后因三氯乙烯附着导致采用规范方法测试的密度偏小的问题, 提出采用负压超声法去除三氯乙烯的方法, 利用该方法对浸泡于三氯乙烯的新料及 RAP 进行负压超声处理。结果表明, 采用负压超声法能较好地清除集料表面附着的三氯乙烯, 对 0.00~2.36 mm、2.36~4.75 mm 及 5.00 mm 以上集料分别超声 3 次、2 次、1 次便可清除集料表面附着的三氯乙烯, 进而获得精准的集料密度测试结果。

关键词: 公路; 沥青混合料回收料(RAP); 密度测试; 三氯乙烯; 负压超声法

中图分类号: U418.6

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)04-0066-05

沥青混合料回收料(RAP)的毛体积密度准确与否, 影响集料间隙率计算, 进而影响沥青用量大小和混合料的耐久性。在进行厂拌热再生沥青混合料配合比设计之前, 原材料的密度是必检指标之一。RAP 外面裹覆一层沥青, 无法直接测试集料的密度。一般采用 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》^[1]对沥青混合料中沥青质量分数的测试方法(离心分离法), 利用三氯乙烯清洗裹覆在集料表面的沥青。但清洗后集料表面会裹覆一层三氯乙烯, 而三氯乙烯不溶于水, 残留的三氯乙烯会在集料表面形成一层膜, 阻止水进入集料的开口空隙, 造成采用网篮法测试集料密度时集料排开水的体积增大, 水中质量减小, 毛体积密度、表观密度及表干密度减小。采用较小的密度测试值合成毛体积密度会造成毛体积密度偏小, 在计算马歇尔体积指标时, 很容易造成集料间隙率不合格, 对配合比设计造成直接影响。

李定侯、刘士雯等在进行 RAP 厂拌热再生沥青混合料配合比设计时采用规范方法测试 RAP 集料密度, 所得密度值明显偏小, 为解决密度偏小带来的集料间隙率不满足规范要求的问题, 将级配调细, 并增加沥青用量, 从而增大集料间隙率^[2-3]。方杨分析 RAP 抽提集料与新集料的密度差异对混合料空隙率和级配的影响, 对 RAP 集料密度测试方法进

行改进, 提出采用阴离子表面活性剂处理三氯乙烯, 并以煤油作为测试溶剂的 RAP 集料密度测试方法, 但该方法过于复杂, 且与规范方法测试结果相差较大, 应用较少^[4-5]。JTG/T 5521—2019《公路沥青路面再生技术规范》提出了 RAP 掺量低于 25% 时 RAP 集料毛体积密度计算公式, 但该公式不适用于高掺量 RAP 密度计算^[6]。JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》提出可按细集料密度测试方法测定机制砂及石屑的密度, 也可以其中筛出的 2.36~4.75 mm 集料的毛体积相对密度代替^[7]。李泉等采用文献^[7]的方法进行厂拌热再生沥青混合料配合比设计, 结果显示 RAP 掺量较小时集料间隙率可满足规范要求, RAP 掺量达到 45% 时集料间隙率偏小^[8]。谢建明等分析 0.075 mm 通过率、筛分类型、浸泡类型、浸泡时间等因素对细集料密度测试的影响, 结果表明 0.075 mm 以下细集料对试验结果影响较大, 需对 0.075 mm 以下细集料进行单独测试^[9]。周水文等对采用玄武岩、卵碎石拌制的混合料进行模拟老化, 测试燃烧炉法、抽提法分离后原集料和 RAP 集料的密度, 分析不同 RAP 掺量下 RAP 集料密度对合成毛体积密度和矿料间隙率的影响, 结果表明分离方法和老化程度均对集料密度有影响^[10]。现有研究仍未能较好地解决 RAP 毛体积密度测试问题, 尤其是在高掺量 RAP 集料毛

体积密度测试方面。本文提出负压超声法去除三氯乙烯的方法,对浸泡于三氯乙烯的新料及 RAP 进行负压超声处理,清除集料表面附着的三氯乙烯后再进行集料密度测试,提高密度测试精度。

1 试验思路及设备选择

为获得准确的集料密度,在采用规范方法测试前,将吸附在集料表面的三氯乙烯去除干净。

1.1 溶剂

根据相似相溶原理,选择无毒、能溶解三氯乙烯的溶剂清除三氯乙烯。考虑到仍要采用网篮法测试密度,所选择的溶剂在溶解三氯乙烯后不能附着在集料表面且能与水互溶,即所选择的溶剂应既能溶解三氯乙烯,又能溶解于水。综合安全、低价、通用性、可获取性及溶解性,选择乙醇作为溶剂。

1.2 试验装置

现有沥青及沥青混合料试验体系及集料密度测试体系中,没有能直接去除三氯乙烯的通用试验设备,而定制专用仪器时间周期太长。为此,分析现有仪器设备的优势及特点,并加以结合利用。沥青混合料最大理论密度测试仪具有负压功能,采用乙醇作为溶剂,在负压作用下,可使乙醇充分进入集料开口空隙,尽可能地溶解三氯乙烯。超声波清洗机可使槽内乙醇溶剂中的微气泡在超声波作用下保持振动,冲击集料表面附着的三氯乙烯,更快地溶解三氯乙烯。因此,采用这两种设备清除集料表面残留的三氯乙烯。

2 试验要点

2.1 仪器设备清洗流程

要将集料表面残留的三氯乙烯去除干净,应保证乙醇和三氯乙烯充分接触。为此,先采用最大理论密度测试仪,利用其负压功能使三氯乙烯和乙醇充分接触;再采用超声波清洗机,以乙醇作为溶剂,借助其机械能清除三氯乙烯。

上述清洗流程为单次清洗流程。因集料开口空隙小,可能存在一次溶解不充分仍有三氯乙烯残留、清洗后与溶剂接触造成集料二次污染的情况,重复负压和超声清洗步骤,将残留于集料表面的三氯乙烯彻底清除干净。

2.2 抽提集料装样方式

试验采用 KQ-600DV 超声波清洗机,内槽尺寸为 $500\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 180\text{ mm}$,容量为 27 L,超

声频率为 40 kHz,超声频率可调范围为 40%~100%。超声波清洗机为敞口设计,槽底设排水口。若把集料直接倒入槽内,超声波清洗后,需先将溶剂全部放掉,再取出集料。存在以下问题:1) 超声波清洗后,乙醇溶剂振动造成抽提旧料表面附着的粉料同时被清洗掉,导致液体浑浊,不易直接取出集料;2) 直接清洗 0~3 mm 抽提旧料时,排水会将粉料带走,且余下的细集料黏附在槽内壁难以全部取出,造成最终取出的集料级配发生变化;3) 直接排水易造成排水口堵塞。因此,需在不改变现有超声波清洗机整体结构的前提下解决集料装样问题。

为确定集料装样方式,制定两种方案进行对比分析:水槽中加水后,不论集料粗细,均采用烧杯作为装料工具,仅在烧杯中加乙醇(方案 1);在水槽中注入乙醇,将粒径 2.36 mm 以上、2.36 mm 以下集料分别用尼龙布装好扎口后放入水槽中(方案 2)。方案 1 的优点是装入和取出集料简单、便捷,可同时进行多组试验。缺点是受烧杯的影响,超声波能量下降,可通过增加重复超声次数予以解决。方案 2 的优点是超声波能量不受损失,超声效率高。缺点是受超声波能量影响,单档集料中小粒径颗粒会从集料表面剥落,穿过尼龙布落到清洗机槽底,再次进行对比试验时质量会有损失。此外,单次超声后乙醇被污染,重复超声时需反复排出和重新注入乙醇,较烦琐。综合考虑便捷性、准确性、速度且节省乙醇,采用方案 1 的装样方式,通过重复超声解决超声波能量损失问题。

2.3 被测试对象取样一致性

为最大程度减小因被测试对象变化而造成测试结果偏差,测试对象应保持一致性,三氯乙烯浸泡、负压处理、超声清洗等流程的测试对象应为同一组集料。

2.4 清除效果评定

JTG E42—2005《公路工程集料试验规程》^[11]给出了 ASTM C127 粗集料及 AASHTO T84 细集料密度试验结果的重现性精度要求(见表 1),当粗细集料连续两次测试的密度偏差在规范要求的范围内时,认为已清除干净。可根据连续 2~3 次清洗后密度测试结果的变化判断清除程度。

3 试验方案与试验结果

3.1 试验方案设计

以新料的密度作为对比,检验负压超声法对三

表 1 粗细集料密度试验结果重现性精度要求

项目	粗集料		细集料	
	标准差	两次结果的 允许偏差	标准差	两次结果的 允许偏差
表观相对密度	0.007	0.020	0.009 5	0.027
表干相对密度	0.007	0.020	0.009 5	0.027
毛体积相对密度	0.009	0.025	0.011 0	0.032
吸水率	0.008	0.250	0.110 0	0.310

氯乙烯的清除效果。方案如下：取拌和楼过筛后的热料，分别测试新集料在三氯乙烯浸泡前后及负压超声组合处理后的密度，并确定合理的负压超声组合次数；对 RAP 进行抽提、筛分，对抽提后集料进行密度测试，测试后进行负压超声试验，对比抽提后密度及负压超声后密度，并确定合理的负压超声组合次数。

3.2 新集料的清除效果

采用新集料进行负压超声法对三氯乙烯清除效果试验对比。试验步骤：1) 按 JTG E42—2005《公路工程集料试验规程》测试 0.0~3.5 mm、3.5~6.0 mm、6.0~11.0 mm、11.0~17.0 mm、17.0~23.0 mm、23.0~32.0 mm 新集料的密度 ρ_1 。2) 将烘干后的新集料分别在三氯乙烯中浸泡 24 h，三氯乙烯液体高出集料 1 cm，并将容器口密封防止三氯

乙烯挥发。浸泡完成后，将三氯乙烯溶液倒出，对三氯乙烯裹覆的集料进行冲洗，不烘干，采用网篮法测试集料密度 ρ_2 。3) 将测试密度后的集料放入最大理论密度测试仪中，进行负压、抽真空处理，溶剂采用乙醇。4) 将经负压处理后的集料放入超声波清洗机中，以水作为超声波槽中溶剂，将集料装入烧杯中，清洗溶剂选择工业乙醇。超声波频率为 54 kHz，清洗时间为 10 min，测试清洗完成后的集料密度 ρ_3 。5) 将经超声波清洗机处理后的集料装入烧杯中再次放入超声波清洗机，重复清洗，测试清洗完成后的集料密度 ρ_4 。6) 重复步骤 5，直至两次测试密度差小于规范要求。7) 烘干集料，复核集料的烘干质量，得到集料密度。因步骤 1 中已将集料泡水 24 h，为节省时间，步骤 2 和步骤 3 无须将上一步测试完的集料进行烘干处理后再泡水 24 h，但试验完成后应复核集料的烘干质量。

0.0~3.5 mm、3.5~6.0 mm、6.0~11.0 mm、11.0~17.0 mm、17.0~23.0 mm 新集料的密度测试结果见表 2。由表 2 可知：三氯乙烯浸泡 24 h 后，清洗前，新集料的毛体积相对密度、表干相对密度及表观相对密度、吸水率均减小，粒径越小，密度下降幅度越大。采用负压超声法处理后，集料密度及吸水率均提高，这是由于采用负压超声法处理后，附着在集料表面的三氯乙烯膜被穿破，水可以进入集料表

表 2 三氯乙烯浸泡前后及清洗后新集料密度测试结果

粒径/mm	类别	毛体积相对密度	表干相对密度	表观相对密度	吸水率/%
0.0~3.5	新料	2.681	2.663	2.735	0.74
	三氯乙烯浸泡 24 h 后	2.641	2.652	2.681	0.56
	负压超声第一次后	2.661	2.683	2.708	0.65
	超声第二次后	2.668	2.689	2.719	0.70
	超声第三次后	2.681	2.701	2.735	0.74
	超声第四次后	2.682	2.701	2.736	0.74
3.5~6.0	新料	2.702	2.713	2.732	0.41
	三氯乙烯浸泡 24 h 后	2.671	2.682	2.691	0.28
	负压超声第一次后	2.688	2.699	2.713	0.34
	超声第二次后	2.699	2.716	2.731	0.43
6.0~11.0	新料	2.704	2.715	2.732	0.38
	三氯乙烯浸泡 24 h 后	2.687	2.693	2.702	0.21
	负压超声第一次后	2.692	2.701	2.715	0.31
	超声第二次后	2.701	2.715	2.729	0.38
	超声第三次后	2.702	2.716	2.730	0.38

续表2

粒径/mm	类别	毛体积相对密度	表干相对密度	表观相对密度	吸水率/%
11.0~17.0	新料	2.711	2.729	2.741	0.40
	三氯乙烯浸泡 24 h 后	2.699	2.708	2.724	0.34
	负压超声第一次后	2.712	2.727	2.742	0.40
	超声第二次后	2.711	2.726	2.741	0.40
17.0~23.0	新料	2.716	2.733	2.748	0.43
	三氯乙烯浸泡 24 h 后	2.697	2.706	2.720	0.31
	负压超声第一次后	2.714	2.727	2.746	0.43
	超声第二次后	2.715	2.727	2.746	0.42

面的开口空隙中,密度和吸水率增大。随着超声次数的增加,密度和吸水率增大。

根据清除效果判定原则,清除 0.0~3.5 mm、3.5~6.0 mm、6.0~11 mm、11.0~17.0 mm、17.0~23.0 mm 新集料表面附着的三氯乙烯,需采用负压超声法分别进行 3 次、2 次、2 次、1 次、1 次清洗。随着集料粒径的增大,所需清洗次数减小,这是由于粒径越小,比表面积越大,清除难度越大。

3.3 抽提后旧料的清除效果

对 RAP 进行抽提、筛分后,进行负压超声法对三氯乙烯清除效果试验对比。试验步骤:1) 从 RAP 成品料仓取样,对 RAP 进行抽提、筛分,将筛分后属于同一粒径范围的集料归类存放,采用规范方法进行密度测试。2) 按照 3.2 节步骤 3~5 对测

试密度后的集料进行处理。3) 重复 3.2 节中步骤 5,直至集料密度接近新料密度。4) 烘干集料,复核集料的烘干质量,得到集料密度。同理,步骤 2 和步骤 3 无须将上一步测试完的集料进行烘干处理后再泡水 24 h,但试验完成后应复核集料的烘干质量。

对 RAP 进行抽提、筛分后,按 0.00~2.36 mm、2.36~4.75 mm、4.75~9.50 mm、9.50~16.00 mm、16.00~26.50 mm 进行归类。清洗前后各档 RAP 密度测试结果见表 3。由表 3 可知:RAP 清洗前后的密度和含水率变化规律与新集料基本一致。进行负压超声处理后,RAP 抽提集料的密度及吸水率增大,增大幅度随粒径增加而下降;集料粒径越小,三氯乙烯对密度及吸水率的影响越大。

根据清除效果判定原则,清除 0.00~2.36 mm、

表 3 RAP 抽提后集料及清洗后集料密度测试结果

粒径/mm	类别	毛体积相对密度	表干相对密度	表观相对密度	吸水率/%
0.00~2.36	抽提后集料	2.617	2.633	2.649	0.46
	负压超声第一次后	2.635	2.651	2.669	0.48
	超声第二次后	2.645	2.661	2.681	0.51
	超声第三次后	2.656	2.675	2.693	0.52
	超声第四次后	2.657	2.674	2.694	0.52
2.36~4.75	抽提后集料	2.631	2.653	2.672	0.58
	负压超声第一次后	2.652	2.672	2.699	0.66
	超声第二次后	2.662	2.681	2.712	0.69
	超声第三次后	2.664	2.682	2.713	0.68
4.75~9.50	抽提后集料	2.646	2.662	2.691	0.63
	负压超声第一次后	2.666	2.682	2.715	0.68
	超声第二次后	2.675	2.692	2.727	0.71
	超声第三次后	2.676	2.693	2.727	0.70

续表3

粒径/mm	类别	毛体积相对密度	表干相对密度	表观相对密度	吸水率/%
9.50~16.0	抽提后集料	2.659	2.671	2.692	0.46
	负压超声第一次后	2.677	2.681	2.713	0.50
	超声第二次后	2.679	2.702	2.715	0.49
16.00~26.50	抽提后集料	2.662	2.674	2.696	0.47
	负压超声第一次后	2.681	2.694	2.718	0.51
	超声第二次后	2.683	2.696	2.720	0.51

2.36~4.75 mm、4.75~9.50 mm、9.50~16.00 mm、16.00~26.50 mm RAP 抽提集料表面附着的三氯乙烯,需采用负压超声法分别进行 3 次、2 次、2 次、1 次、1 次清洗。

4 结论

针对 RAP 抽提后因三氯乙烯附着导致采用规范方法测试的密度偏小的问题,利用传统最大理论密度测试仪负压功能使三氯乙烯与乙醇充分融合、超声波清洗机超声碰撞二次清洗的特点,提出采用负压超声技术去除附着于集料表面的三氯乙烯的方法。该方法以乙醇作为溶剂,先负压后超声,采用玻璃杯装样,超声频率为 54 kHz。分别采用该方法清除新集料、RAP 抽提集料表面附着的三氯乙烯,结果显示:采用负压超声法,粒径 0.00~2.36 mm、2.36~4.75 mm、5.00 mm 以上集料分别超声 3 次、2 次、1 次便可清除集料表面附着的三氯乙烯,从而获得精准的集料密度测试结果。该方法不仅适用于沥青混合料回收料毛体积密度测定,也可用于沥青混合料油石比测试。

参考文献:

[1] 交通运输部公路科学研究院.公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTG E20—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.

- [2] 李定侯,付蓉,张桂铭,等.不加再生剂高掺量 RAP 厂拌热再生沥青混合料配合比设计[J].公路交通科技(应用技术版),2020,16(6):146-149.
- [3] 刘士雯.关于厂拌热再生混合料(AC-25C)配合比设计的探讨[J].公路交通科技(应用技术版),2016,12(5):207-208.
- [4] 方杨,张国民,王水声.基于厂拌热再生技术的集料密度影响规律[J].建筑材料学报,2014,17(3):548-552.
- [5] 方杨,黄建跃,吴传海,等.一种回收沥青路面材料中矿料的密度测试方法:CN104215549B[P].2017-04-12.
- [6] 交通运输部公路科学研究院.公路沥青路面再生技术规范:JTG/T 5521—2019[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.
- [7] 交通部公路科学研究所.公路沥青路面施工技术规范:JTG F 40—2004[S].北京:人民交通出版社,2005.
- [8] 李泉,韩庆奎,张继森,等.高废旧料掺量厂拌热再生技术性能研究[J].中外公路,2018,38(6):301-304.
- [9] 谢建明,甘有为.影响细集料密度及吸水率的试验因素分析[J].公路与汽运,2017(1):83-87.
- [10] 周水文,张晓华,张蓉,等.分离方法对 RAP 集料性能指标影响研究[J].石油沥青,2017,31(6):36-43.
- [11] 交通部公路科学研究所.公路工程集料试验规程:JTG E42—2005[S].北京:人民交通出版社,2005.

收稿日期:2023-08-03

(上接第 65 页)

- [17] 马云艳,赵红艳,谢绿武,等.泥炭和腐泥对风沙土理化性质和白菜生长的影响[J].西北农业学报,2010,19(2):172-176.
- [18] 陈佳钰,李永梅,廖学圆,等.基施缓释肥等氮替代化肥对径流氮素流失和青贮玉米生长的影响[J].水土保持研究,2023,30(3):188-194.
- [19] 张东北,王秀花,周志春,等.容器规格和缓释肥施加

- 量对 3 种速生树种 1 年生容器苗生长的影响[J].西部林业科学,2022,51(6):94-100.
- [20] 李陈财,璩继立,刘宝石.麦秸秆形状对上海粘土强度影响的试验研究[J].地下空间与工程学报,2015,11(6):1408-1413.

收稿日期:2023-05-18