

真空密封法测定沥青混合料毛体积相对密度试验

吴国雄^{1,2}, 杨锐¹, 杨大田², 袁传泯¹

(1. 重庆交通大学 土木建筑学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 山区道路结构与材料重庆市重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 使用真空密封法, 测定了不同碾压次数成型试件的毛体积相对密度, 探讨了测定时产生误差的原因; 与传统表干法以及蜡封法测定的结果进行对比分析。结果表明: 真空密封状态与密封袋的材质是影响试验误差的主要因素; 使用真空密封法测定的结果重复性较好, 其测定值与表干法以及蜡封法测定值间有良好的线性关系, 但测定值间存在显著性差异。

关键词: 沥青混合料; 毛体积相对密度; 真空密封法; 对比研究

中图分类号: U416. 217

文献标志码: A

文章编号: 1674-0696(2010)06-0896-04

Research on Asphalt Mixture Bulk Specific Gravity by Vacuum Sealing Method

Wu Guo-xiong^{1,2}, YANG Rui¹, YANG Da-tian², YUAN Chuan-min¹

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Chongqing Key Laboratory of Mountains Road Structure and Material, Chongqing 400074, China)

Abstract: Through vacuum sealing method, bulk specific gravity of rutting core samples after being rolled different times was measured, reasons for the errors were discussed; comparative analysis was made between results by conventional method of saturated-surface dry method and by wax-enveloped method. Results showed that the vacuum sealed condition and quality of sealed bag were the main factors for the error. The result by vacuum sealing method had good reproducibility, and its measured value had good linear relationship with the values measured by saturated-surface dry method and by wax-enveloped method; however, there were significant differences between values.

Key words: asphalt mixture; bulk specific gravity; vacuum sealing method; comparative research

压实沥青混合料的毛体积相对密度是反映沥青混合料体积特性的重要指标。许多试验方法可以用来测定压实沥青混合料的毛体积相对密度, 对于开口孔隙或连通孔隙较少的试件, 表干法是最常用的方法。近年来随着交通量和轴载的增加, 为了改善抗车辙等路用性能, 大量具有较多开口孔隙和连通孔隙的级配、大孔隙沥青混合料被应用到工程实践中。对于该类试件毛体积相对密度的测定, 蜡封法是最普遍的方法, 然而, 蜡封法测定时具有人为因素影响大、操作复杂、耗时长且导致试件不能进行其他试验的显著缺点^[1]。

为了解决上述问题, 近年来国外有不少学者尝试用其他新型方法来测定沥青混合料的毛体积相对密度, 其中真空密封法是研究较多的一个方法。美国佛罗里达州交通部(FDOT)、俄克拉荷马州交通部(ODOT)、国家沥青技术中心(NCAT)等机构利用

CORELOK 真空多功能密度测试仪, 与传统测定方法进行了大量可行性和精准度的对比试验研究, 结果表明: 真空密封法具有人为干扰少, 操作简单, 且精准度较高的优点^[2]。

目前, 在国内真空密封法测定压实沥青混合料的毛体积相对密度相关研究比较少, 缺乏大量试验资料。同时, 也没有生产用于真空密封法的专业设备及耗材, 因此推广该方法存在一定困难。笔者利用食品工业中的真空包装机, 使用真空密封法, 对比传统表干法和蜡封法, 测定了不同碾压次数成型的压实沥青混合料试件的毛体积相对密度, 探讨了真空密封法测定压实沥青混合料试件毛体积相对密度的适用性。

1 测定方法介绍

1.1 真空密封法

1.1.1 真空密封法原理

收稿日期: 2010-05-24; 修订日期: 2010-09-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51078374); 教育部博士点基金项目(20095522110001)

作者简介: 吴国雄(1966-), 男, 湖北崇阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事道路工程教学与科研工作。E-mail: wxg_ph.d@163.com。

从原理上分析,真空密封法与表干法、蜡封法相同,均是基于阿基米德的浮力原理。使用真空密封设备,将一种柔韧耐穿刺的塑料袋紧贴在沥青混合料试件表面包裹起来(图1),通过这种方式来阻止在水中称重时水分进入开口孔隙中,形成一种类似于蜡封的状态,从而测定毛体积相对密度。该方法与表干法、蜡封法最大的区别是,使用该方法测定时,试件内部孔隙分布状态不会影响到试验结果的精确程度。



图1 密封后的试件

Fig.1 Sealed sample

1.1.2 操作步骤

使用真空密封法测定压实沥青混合料毛体积相对密度的过程可以分为如下几个步骤:①测定塑料密封袋的密度 γ_b (厂商提供或密封重物法测定,类似于测定蜡的密度方法),冷却试件至室温,称取干燥试件的空中质量 m_d ,将试件放进塑料密封袋中;②将放有试件的塑料密封袋放入真空密封机的真空室中,将真空密封机的密封盖按下至关闭状态,真空泵自动开始工作并抽取真空室内的空气至 -0.1 MPa,真空抽气一段时间后,密封盖自动打开,试件被密封好,称取密封后试件的空中质量 m_{ds} ;③将密封好的试件浸没在水中,并称取其水中质量 m_{ss} ,从水中取出试件;④完成上述步骤后,记录数据后按照

$\gamma_{mb} = \frac{m_d}{m_{ds} - m_{ss} - (m_{ds} - m_d) / \gamma_b}$ 的公式,便可计算出试件的毛体积相对密度。

1.1.3 误差来源分析

1) 真空密封状态

密封袋中的空气是否抽得彻底,是影响真空密封法测定结果的主要因素。若空气未抽尽,密封袋未紧贴在试件表面,密封后的试件的体积将大于试件的毛体积与密封袋的体积之和,从而导致比表积的增大,浸水后浮力增大,导致水中重的减小,即计

算公式 $\gamma_{mb} = \frac{m_d}{m_{ds} - m_{ss} - (m_{ds} - m_d) / \gamma_b}$ 中的分母项偏大,导致计算结果偏小。

本研究通过变化真空抽气时间(5, 10, 15, 30, 40, 45, 60 s),分析了不同真空密封效果对毛体积相对密度测定结果的影响,结果表明(图2、图3),当抽气时间小于30 s时,随着真空抽气时间的增加,密封后试件的水中重以及试件的毛体积密度明显增加,说明此条件下真空密封后的试件中仍然残留有较多的空气;当抽气时间达到30 s后,随着抽气时间的继续增加,密封后试件的水中重以及试件的毛体积密度达到稳定的状态,并没有随着时间的增加出现明显的变化,说明此条件下真空密封后的试件中的空气基本抽尽,试件已经达到较好的密封状态。

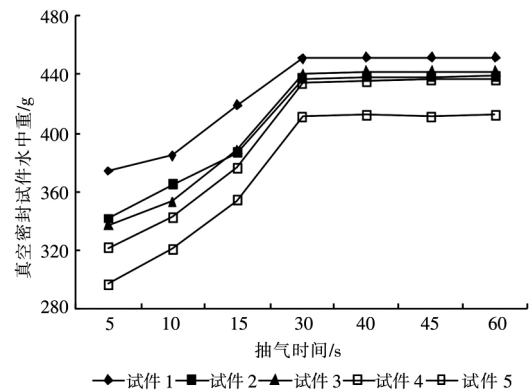


图2 抽气时间与真空密封试件水中重的关系

Fig.2 Relationship between period of exhaust and weight of submerged sealed samples

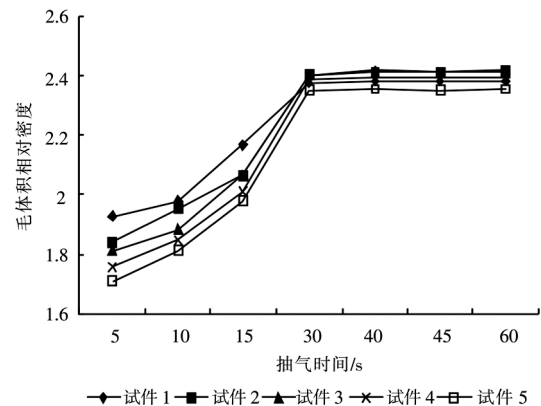


图3 抽气时间与试件毛体积相对密度的关系

Fig.3 Relationship between period of exhaust and γ_{mb}

2) 密封袋材质

密封袋材质柔韧性和耐穿刺性是影响测定结果的另外因素。当密封袋在抽真空瞬间收缩与试件接触时,若密封袋不满足柔韧耐穿刺的要求,极易被试件表面刺破而出现微小空洞,从而产生2种后果:一是空气的渗入,导致真空密封状态破坏;二是水中称重时,水渗入试件孔隙(类似蜡液渗入试件孔隙),产生误差。

1.2 表干法

表干法是国内外测定压实沥青混合毛体积密度最为普遍的方法,饱和面干状态的确定是该试验方法最为关键的因素(即开口孔隙中的水质量是否精确),而当混合料试件孔隙很大或者连通孔隙多时,当试件从水中取出时,开口孔隙中的水会流出,此外使用毛巾擦拭时容易吸出开口孔隙中的水,因此,国内外规范一致认为^[1-3],表干法不适合测定开级配、吸水率超过2%的压实混合料试件。其误差主要来源于人为因素和由于试件孔隙过大所导致的实测表干质量与真实表干质量间的差异。

1.3 蜡封法

为了解决表干法在测定开级配和吸水率超过2%的压实HMA试件时不准确的问题,蜡封法被广泛使用。蜡封法即通过使用石蜡涂在试件表面或者用石蜡膜包裹在试件表面,以此来封闭开口孔隙,来形成一种假想的饱和面干状态。

我国规范明确规定^[1],对于吸水率超过2%的试件,要采用蜡封法测定毛体积密度,但是对于试验温度、加入滑石粉的量并没有严格规定,蜡封法的精确性和可靠性主要决定于蜡封过程的精确,当石蜡融化过程的温度过高,石蜡将浸入到试件内部的孔隙中,从而导致试件毛体积的偏小,毛体积密度计算结果偏大。为了解决这一问题,我国规范中参照国外相关规范,提出了冷冻蜡封法,以减少蜡的浸入带来的误差。然而,于新^[4]、刘红瑛^[5]指出蜡封时的温度也不宜过低,如果温度太低,试件表面的蜡很多,试件取出后很快冷却,试件表面的蜡也很容易开裂,开裂后的试件放入水中,水的进入将影响试验结果,因此建议试验温度比规范上略高即可,同时其研究指出,加入的滑石粉的量对试验结果有影响,将会使结果变大,但影响不大。

此外,沙庆林^[6]还提出了钻件蜡封法,通过对标准试件进行切割后蜡封,以此减小由于表面不规则带来的误差;杨瑞华^[7]等的相关研究认为,对于最大公称粒径大于25 mm骨架密实型沥青混合料用钻件蜡封法比表干法更准确。

2 试验内容

2.1 试验材料

试验选用玄武岩和SBS改性沥青,矿粉采用石灰岩矿粉,纤维采用木质素纤维。材料技术性质均满足规范要求。

2.2 试件制备

混合料级配选用SMA-13(表1),确定最佳油石比为5.8%,分别碾压6次和12次成型2种不同孔隙状态的车辙试件,再通过钻芯得到直径10 cm,

高度为4 cm的圆柱形试件。

表1 SMA-13 矿料级配

Tab. 1 Gradation of SMA-13

孔径/mm	通过率/%	孔径/mm	通过率/%
16	100	1.18	16.9
13.2	90.9	0.6	13.8
9.5	63.3	0.3	12.4
4.75	26.6	0.15	11.9
2.36	21.1	0.075	11.4

2.3 试验设备

本试验采用的真空密封设备为重庆方广牌单室真空包装机,其真空泵的功率为0.9 kW,真空压力为-0.1 MPa,真空抽气时间范围为0~60 s。由于密封袋材质是影响测定结果的主要因素之一,为了避免密封袋被刺穿,本试验选用了质量较好的聚乙烯塑料袋(尺寸为200 mm×100 mm),测定结束后,对拆开的塑料袋充气,未漏气,说明该密封袋的材质能保证试验过程中柔韧耐穿刺的要求。

2.4 试验方案

所有试件按照风干至恒重→真空密封法→表干法→试件风干至恒重→蜡封法的顺序进行测定。为了减少不同人员操作带来的误差,每种方法固定单个操作人员。

3 试验结果及其分析

3种方法测定2种不同碾压次数的车辙钻芯试件的毛体积相对密度结果(表2)。

表2 试件毛体积相对密度测定结果

Tab. 2 Test results of bulk specific gravity of samples

试件 编号	碾压6次(往返)			试件 编号	碾压12次(往返)		
	真空密封法 A值	表干法 B值	蜡封法 C值		真空密封法 D值	表干法 E值	蜡封法 F值
1	2.304	2.376	2.277	1	2.409	2.450	2.385
2	2.319	2.373	2.306	2	2.419	2.453	2.394
3	2.355	2.393	2.348	3	2.405	2.448	2.387
4	2.300	2.368	2.289	4	2.428	2.460	2.396
5	2.319	2.376	2.296	5	2.424	2.460	2.387
6	2.321	2.375	2.307	6	2.423	2.457	2.396
7	2.314	2.372	2.301	7	2.425	2.458	2.385
8	2.324	2.365	2.310	8	2.421	2.455	2.393
9	2.337	2.364	2.312	9	2.427	2.456	2.387
10	2.331	2.374	2.313	10	2.418	2.457	2.397

3.1 测定方法精密度对比

表3中的精密度对比结果表明,与其他2种方法相比,使用真空密封法测定的2类试件的变异系数介于表干法和蜡封法之间,且其变异系数小于1%,若不考虑同类试件间的差异,由于方法本身导致的测定结果的变异更小。此外,随着碾压次数的增加,3种方法测定结果的变异系数均下降。分析3种方法测定结果的变异来源可知,当碾压次数增加

后,试件表面平整程度的提高,内部孔隙率降低;在使用表干法测定时,由于开口孔隙中水流失的现象减少;在使用真空密封法测定时,由于试件表面不平整导致密封袋刺穿的现象减少;使用蜡封法时,由于蜡液的渗入孔隙的现象减少。因此,3 种方法的变异程度都明显降低。

表 3 不同方法测定试件毛体积相对密度精密对比
Tab. 3 Comparison between precision and bulk specific gravity of samples by different methods

测定方法	毛体积相对密度均值		标准差		变异系数/%	
	碾压 6 次	碾压 12 次	碾压 6 次	碾压 12 次	碾压 6 次	碾压 12 次
真空密封法	2.322	2.420	0.016	0.007 6	0.687	0.313
表干法	2.374	2.455	0.008	0.004 0	0.341	0.163
蜡封法	2.306	2.391	0.002	0.004 9	0.808	0.206

3.2 测定结果相关性分析

此外,分别对真空密封法的测定结果和表干法、蜡封法进行线性回归分析,如图 4、图 5,真空密封法与另外 2 种方法测定结果的相关性均较好,相关系数分别高达 0.962 2 和 0.977 6。此外,随着密度的降低(碾压次数的减少),真空密封法与表干法以及蜡封法的差异更大;并且,回归趋势线并不与直线 $y = x$ 重合。

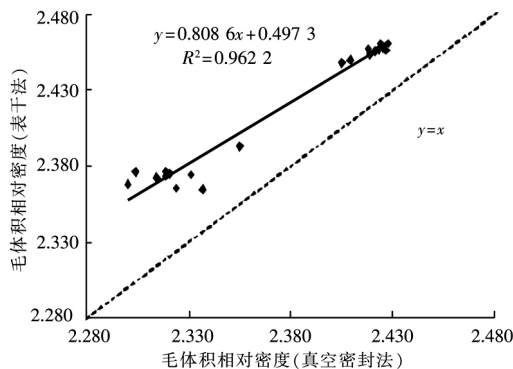


图 4 真空密封法与表干法测定试件毛体积相对密度值关系
Fig. 4 Relationship between γ_{mb} measured by vacuum sealing method and that by saturated-surface dry method

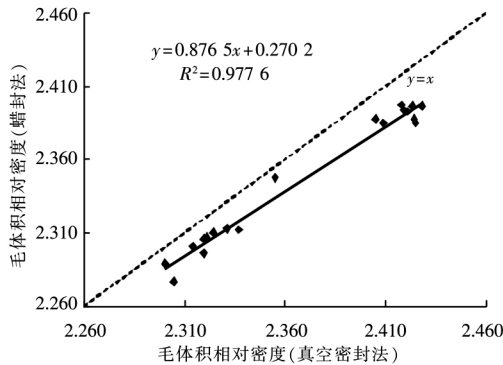


图 5 真空密封法与蜡封法测定试件毛体积相对密度值关系
Fig 5 Relationship between γ_{mb} measured by vacuum sealing method and that by wax-enveloped method

图 3 中回归趋势线位于直线 $y = x$ 之上,说明真空密封法的测定结果要比表干法偏小。而图 4 中回归趋势线位于直线 $y = x$ 下方,说明真空密封法要比蜡封法偏大。故而说明真空密封法测定值介于

表干法和蜡封法之间。Buchanan^[8] 等从误差来源分析认为,使用表干法测定的毛体积相对密度将比真值大,而使用蜡封法测定的毛体积相对密度将比真值小。真空密封法测定值介于上下限之间,故而更加接近真值。

3.3 测定结果均值 t 检验

表 4 t 检验
Tab. 4 Table of t -test

编号	碾压 6 次		碾压 12 次	
	$B - A$	$A - C$	$E - D$	$D - F$
1	0.072	0.027	0.041	0.024
2	0.054	0.013	0.034	0.025
3	0.038	0.007	0.043	0.018
4	0.068	0.011	0.032	0.032
5	0.057	0.023	0.036	0.037
6	0.054	0.014	0.034	0.027
7	0.058	0.013	0.033	0.040
8	0.041	0.014	0.034	0.028
9	0.027	0.025	0.029	0.040
10	0.043	0.018	0.039	0.021
平均值	0.051	0.017	0.036	0.029
标准差 S	0.014	0.007	0.004	0.008
统计量 T	11.217	7.983	26.209	11.860

从表 4 中可知,2 类试件使用真空密封法测定的结果与表干法和蜡封法测定结果的平均差值都很小,最高为 0.051。为了进一步验证使用真空密封法测定 2 类试件的毛体积密度与表干法和真空密封法是否有显著差异,对测试结果用 t 检验法进行统计假设检验。假定每两组样本对应数据之差服从正态分布,检验两总体均值是否相等,即检验 $\mu_1 = \mu_2$ 的问题,相当于检验 $\mu_1 - \mu_2 = 0$ 的问题^[9]。首先检验碾压次数为 6 次的沥青混合料试件,真空密封法与表干法的测定结果是否有显著差异。

假设 $H_0: \mu = 0$,即认为真空密封法与表干法的测试结果没有显著差异。对立假设 $H_1: \mu \neq 0$,选择统计量 $T = \frac{(x - y)}{(S/\sqrt{n})} \sim t(n - 1)$,式中 x 与 y 分别表示不同方法测定的结果, $(x - y)$ 为表中的平均值, S 为表 4 中的标准差。拒绝域为 $P\{|T| >$
(下转第 983 页)

- [10] Li Jijun. The environmental effects of the uplift of the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Quaternary Science Reviews. 1991, 10(6): 479-483.
- [11] 李吉均. 中国西北地区晚更新世以来环境变迁模式 [J]. 第四纪研究, 1990(3): 197-203.
- [12] 陈发虎, 张宇田. 兰州九州黄土沉积年代综合研究 [J]. 沉积学报, 1989, 7(3): 105-111.
- [13] 况明生, 曾艳, 张远瞩. 云南小江流域第四纪洪积-泥石流沉积年代与地层划分 [J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2002, 6(27): 974-980.
- [14] 李吉均, 况明生. 小江流域第四纪沉积物的 ESR 年代、山原红壤发育年龄与地层划分的研究 [C] // “八五”攀登计划青藏高原项目 1995 年学术年会论文集. 兰州: 兰州大学出版社, 1995: 64-78.
- [15] 况明生. 云南小江流域第四纪环境变迁与泥石流发育史 [M]. 重庆: 西南大学出版社, 2003.
- [16] Fe ZiLi, Cui Peng, Chen Xiaoqing, et al. Relation between precipitation and initiation of debris flows in the Jiangjia ravine, Yunnan province, southwest china [J]. International Journal of Sediment Research, 2006, 21(4): 294-311.
- [17] 杜榕桓, 康志成, 陈循谦, 等. 云南小江泥石流综合考察与防治规划研究 [M]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1987.
- [18] 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 甘肃泥石流 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1982.
- [19] Wang Yuyi, Tian Bing, Liu Shuzhen. Close relationship between the fragility of Mountain Eco-environment and mountain disasters: a case study of Dongchuan, Kunming in Yunnan Province [J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2007, 12(4): 721-728.
- [20] 李吉均. 青藏高原的地貌演化与亚洲季风 [C] // 李吉均院士论文集. 北京: 科学出版社, 2006: 87-97.

(上接第 899 页)

$t_{\alpha/2}(n-1) = \alpha$, 取 $\alpha = 0.05$, 根据文献 [4] 知 $t_{0.025}^9 = 2.2622$, 计算 $T = 11.639$, $|T| > t_{0.025}^9$, 拒绝 H_0 , 接受 H_1 , 即认为在测定碾压次数为 6 次的试件毛体积相对密度时, 真空密封法与表干法存在显著差异。同样, 可知在测定碾压次数为 12 次的试件毛体积相对密度时, 真空密封法与蜡封法测试结果也存在显著差异(表 4), 测定碾压次数为 12 次的试件毛体积相对密度时结论相同。

4 结论及建议

本研究对碾压 2 种不同次数成型的压实沥青混合料试件采用真空密封法, 测定了其毛体积相对密度, 探讨了使用该方法测定时产生误差的原因, 并与传统表干法以及蜡封法测定的结果进行了对比分析。误差分析表明, 真空密封状态与密封袋的材质是影响试验误差的主要因素, 为了确保试验精准度, 真空抽气时间应超过 30 s, 且应选用耐穿刺的密封袋。此外, 与表干法和蜡封法相比, 真空密封法具有操作简便, 人为因素影响小, 并且测试过程对试件没有任何影响的优点; 对比测定结果表明: 真空密封法重复性较好, 且其测定值与表干法和蜡封法测定值间有良好的线性关系; 而均值假设检验表明: 对于孔隙分布不同的 2 类试件, 真空密封法与表干法和蜡封法的测定值均有显著差异。

由于本试验仅研究了不同碾压次数成型的试件, 且试件的数量有限, 因此, 后期研究中将采用不

同类型、不同最大公称粒径、以及不同成型方式的试件(或现场钻芯)系统研究真空密封法测定沥青混合料毛体积相对密度的适用性。

参考文献:

- [1] JTJ 052—2000 公路工程沥青及沥青混合料试验规程 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [2] Tarefder R A, Zaman M, Hobson K. Evaluating the Corelok measurement of bulk specific gravity for hot mix asphalt samples [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2002, 30(4): 274-282.
- [3] AASHTO. Standard specifications for transportation materials and methods of sampling and testing [S]. Washington D. C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2005.
- [4] 于新, 黄晓明. 沥青混合料压实试件毛体积密度测定方法的研究 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2001, 31(3): 1-6.
- [5] 刘红瑛. 沥青混合料毛体积密度测定方法的研究 [J]. 重庆交通学院学报, 2003, 22(3): 49-51.
- [6] 沙庆林. 用更严密的方法确定沥青混凝土试件的体积指标 [J]. 广西交通科技, 2003, 106(4): 1-24.
- [7] 杨瑞华, 许志鸿, 胡尚军, 等. 沥青混合料压实试件毛体积密度试验方法的比较 [J]. 中外公路, 2007, 27(2): 70-74.
- [8] Buchanan M S. An evaluation of selected methods for measuring the bulk specific gravity of compacted Hot Mix Asphalt (HMA) mixes [J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2000, 69: 608-634.
- [9] 周概容. 概率论与数理统计 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1984.