

文章编号:1671—6833(2006)04—0053—05

集料有效密度及混合料合理体积参数计算方法研究

张红春¹, 李小重²

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710061; 2. 河南省交通规划勘察设计院, 河南 郑州 450052)

摘 要: 体积参数是沥青混合料设计的基础, 但由于集料对沥青的吸收, 使得最大理论密度既不能准确测量, 又不能准确计算, 从而影响了体积参数计算的准确性. 提出了用沥青浸渍进行集料有效密度测定的试验方法. 试验结果表明, 对于改性沥青混合料, 按照新颁布实施规范中的公式计算集料有效密度是不合理的, 而用沥青浸渍法测量结果复现性好, 对试验条件要求不高, 试验人为因素影响小. 用沥青浸渍法实测的集料有效密度能够计算得到沥青混合料最大理论密度的真值. 对连续密级配沥青混合料试件空隙率组成进行了理论分析, 提出合理的试件密度测定方法, 并提出了沥青混合料体积参数计算公式.

关键词: 沥青混合料; 集料有效密度; 最大理论密度; 空隙率

中图分类号: O 414 **文献标识码:** A

0 引言

沥青混合料体积参数是马歇尔设计的基础, 研究表明体积参数对沥青混合料路用性能有较大影响^[1], 但由于试验方法的缺陷, 我们既无法得到准确的体积参数的真值, 又无法得到合理、稳定、能够横向比较的体积参数的相对值. 如此以来, 沥青混合料各种路用性能与体积参数相关关系的研究结论令人难以信服. JTG F40—2004 试图通过严格统一体积参数的测定和计算方法来计算合理的体积参数, 但却未触及基础数据的准确性这一核心. 比如规定采用真空法实测的最大理论密度(非改性沥青混合料)反算集料有效相对密度或根据集料合成表观相对密度、毛体积相对密度及吸水率计算(改性沥青混合料)集料有效相对密度, 而沥青混合料体积参数不能准确测定的根本原因正是因为真空法本身有缺陷, 粗细集料毛体积相对密度的准确测量更为困难, 且规范规定混合料

VMA 根据合成集料毛体积相对密度计算理论上也不合理. 因此从基础试验方法上进行研究, 准确、方便地实测集料有效相对密度并计算混合料各种体积参数, 才是解决问题的根本方法.

1 算法确定沥青混合料最大理论相对密度研究

采用算法确定沥青混合料最大理论相对密度方便, 但由于集料对沥青的吸收, 使得集料密度的取值变得极为复杂. 计算最大理论相对密度时既不能全用集料表观相对密度, 又不能全用集料的毛体积相对密度. 而应该用更接近于真实状况的考虑沥青吸收的集料的有效密度. 于是便出现了集料有效相对密度测量方法的研究及根据集料毛体积密度、表观相对密度及吸水率计算集料有效密度的研究^[2~5]. 但这些研究结果之间也存在较大的差别, 对于某种玄武岩, 按照不同的公式计算的混合料空隙率见表 1.

表 1 不同集料密度取值对沥青混合料空隙率影响

Tab.1 Effect of aggregate density to void of asphalt mixture

γ_{sc} 所用公式	集料相对 密度	油石比 /%	沥青相 对密度	最大理论 相对密度	试件相对 密度	空隙率 /%
γ_{sb}	2.696	4.8	1.037	2.511	2.433	3.1
γ_{sa}	2.877	4.8	1.037	2.660	2.433	8.5
$(\gamma_{sb} + \gamma_{sa})/2$	2.786	4.8	1.037	2.586	2.433	5.9
$\gamma_{sb} + 0.8(\gamma_{sa} - \gamma_{sb})$	2.840	4.8	1.037	2.631	2.433	7.5
JTG F40—2004 方法	2.773	4.8	1.037	2.575	2.433	5.5

收稿日期:2006—06—20; 修订日期:2006—09—11

基金项目:河南省科技攻关资助项目(0624450008)

作者简介:张红春(1968—), 男, 河南扶沟人, 长安大学博士研究生, 主要从事路面工程材料方面的研究.

由表 1, 不同公式所得到的混合料空隙率从最小为 3.1% 到最大为 8.5%, 极差 $R=5.6\%$, $C_v=40.7\%$. 这种差别充分说明仅靠公式便想解决复杂的沥青混合料最大理论密度问题是困难的. 要用计算法解决此问题, 最佳途径是找到可靠的试验方法实测集料的有效相对密度后计算沥青混合料最大理论相对密度.

1.1 集料有效相对密度测定方法

(1) 试验用具: 钢勺、沥青混合料容器(碗、盆等均可)、水中重法全套仪器、烘箱.

(2) 试验方法:

A. 将钢勺放入 1 号碗中, 称量钢勺及 1 号碗的总质量(m_1)及水中重(m_2). 称量用来测定沥青密度的 2 号碗的质量(m_6)及水中质量(m_7).

B. 将烘干至衡重的集料 500~800 g 装入放钢勺的 1 号碗中, 准确称量钢勺+1 号碗+集料的总质量(m_3).

C. 将装有钢勺及集料的 1 号碗放入 180℃ (非改性沥青 160℃) 的烘箱中加热 4 h.

D. 将沥青加热至 150~160℃ (非改性沥青为 130~140℃), 取出装有钢勺及混合料的 1 号碗, 将大量沥青加入碗中, 同时将沥青倒入 2 号碗中, 1 号碗用钢勺搅拌 3 min, 排出气泡, 2 号碗不用搅拌, 放入温度 140~145℃ (非改性沥青为 125~130℃) 的烘箱中, 每隔 20 min 搅拌一次, 共搅拌 2 次(即从第一次搅拌开始, 20 min、40 min 后各搅拌一次), 每次 3 min, 至 60 min 观察, 如表面无气泡, 即可将 1 号碗、2 号碗取出在室温下放置 12~24 h.

E. 称量装有钢勺、沥青及混合料的 1 号碗的总质量(m_4)及水中质量(m_5).

F. 称量装有沥青的 2 号碗的总质量(m_8)及水中质量(m_9).

G. 计算集料有效相对密度, 公式如下:

$$\gamma_{se} = \frac{m_3 - m_1}{(m_4 - m_5) - (m_1 - m_2) - \left[\frac{m_4 - m_3}{\gamma_b} \right]}$$
$$\gamma_b = \frac{m_8 - m_6}{(m_8 - m_9) - (m_6 - m_7)}$$

1.2 沥青浸渍法试验方法说明

(1) 测出各级粒径集料的有效密度后, 可计算出任意配比集料的有效密度和混合料的最大理论密度.

(2) 集料在加入沥青后 1 h 完成试验, 能更好的与现场相吻合.

(3) 沥青密度的准确测定是本方法成功的关键. 为解决此问题, 在试验时用水中重法测定沥青密度, 由于沥青与混合料处于同一温度下, 因此实际测定结果准确、可靠. 此法避免了保温的麻烦, 非常方便.

(4) 排除气泡是此试验方法成功的另一关键环节. 试验过程表明, 试验完成后无论是改性沥青还是普通沥青, 气泡均可排除干净, 试验条件宽松, 试验比较准确.

1.3 集料有效密度测量结果及分析

多孔玄武岩与石灰岩有效密度试验结果见表 2、表 3, 可以知道:

(1) 用改性沥青测定多孔玄武岩有效密度重复性(最大相差 0.03) 小于用普通沥青测定石灰岩有效密度的重复性(0.017).

表 2 多孔玄武岩有效密度测定结果(沥青为 SBS 改性沥青)
Tab-2 Effective density of porous basalt test result (SBS modified asphalt)

集料种类	盆勺重/g	盆勺水中重/g	集料重/g	盆勺油料重/g	盆勺油料水中重/g	有效相对密度	有效密度平均值	表观相对密度	毛体积相对密度
10~15	92.1	71.4	321.8	635.8	280.9	2.710	2.725	2.869	2.718
	86.3	64.8	312.7	645.2	270.8	2.740			
5~10	85.4	64.8	278.0	613.8	244.9	2.643	2.639	2.866	2.637
	80.7	61.5	223.4	571.9	207.9	2.643			
3~5	87.5	66.3	288.5	579.8	254.4	2.713	2.726	2.943	2.701
	96.1	74.1	287.2	602.5	262.8	2.738			
0~3	92.8	71.4	197.0	486.3	202.0	2.731	2.734	2.863	2.692
	104.2	81.0	291.6	584.3	271.5	2.736			
矿粉	119.5	90.5	321.1	645.6	228.3	2.731	2.734	2.810	—
	124.6	93.4	324.6	612.9	229	2.737			
合成	合成集料吸水率 2.53%						2.711	2.878	2.683

表 3 石灰岩有效密度测定结果(沥青为 70 号普通沥青)
Tab.3 Effective density of limestone test result (70# asphalt)

集料种类	盆勺重/g	盆勺水中重/g	集料重/g	盆勺油料重/g	盆勺油料水中重/g	有效相对密度	有效密度平均值	表观相对密度	毛体积相对密度
19~26.5	121.14	91.76	375.36	774.94	337.98	2.806	2.809	2.816	2.802
	120.98	90.78	408.98	880.57	360.19	2.813			
16~19	119.35	90.28	426.18	858.55	369.81	2.807	2.815	2.822	2.802
	124.19	95.26	379.19	789.08	344.91	2.824			
13.2~16	123.66	92.82	398.25	874.50	355.42	2.814	2.813	2.821	2.805
	116.33	88.01	415.71	804.88	360.39	2.811			
9.5~13.2	114.55	88.47	373.59	773.39	334.38	2.821	2.814	2.827	2.807
	114.47	87.63	375.19	793.15	334.18	2.807			
5~10	117.59	90.31	337.43	706.87	312.35	2.822	2.821	2.830	2.801
	117.93	89.42	349.53	721.28	319.22	2.820			
3~5	118.54	90.20	349.36	745.97	319.69	2.809	2.808	2.821	2.788
	117.41	88.59	362.84	789.02	327.38	2.807			
0~3	107.58	81.38	219.82	556.68	226.87	2.813	2.816	2.855	2.801
	113.65	88.12	200.79	501.90	220.77	2.818			
矿粉	119.63	89.56	152.46	484.80	191.80	2.836	2.836	2.8478	—
	119.50	91.70	145.08	513.00	189.75	2.836			
合成	合成集料吸水率 0.42%						2.816	2.835	2.802

(2)JTG F40—2004 对改性沥青混合料有效相对密度明确规定了计算方法(B.5.6).对于表 2,按照现行规范进行计算,有效相对密度为 2.761,而实测并计算的合成集料有效密度仅为 2.711,如果按照此有效密度计算,试件空隙率将相差 2%.这充分说明,规范提出的公式的使用条件确实值得再研究.如果不管什么沥青也不管什么集料,进行配合比设计时仅根据吸水率套用公式,极有可能得出错误的结果.

1.4 集料有效相对密度影响因素分析

为详细分析影响集料有效密度测量结果的因素,用改性沥青(I—C 级)、普通 70 号沥青分别浸渍多孔玄武岩(吸水率 3.31%)和石灰岩(吸水率 0.49%)进行有效相对密度试验,测定结果见表 4、表 5.

由表 4、表 5 可见,无论何种沥青,玄武岩的吸收系数 C 均大于石灰岩的吸收系数 C ,无论何种集料,普通沥青浸渍的集料的吸收系数 C 均大于改性沥青浸渍的集料的吸收系数.因此集料品种及沥青品种对吸收系数 C 有重大影响.即使同一种沥青,吸水率相差不大(表 3 吸水率 0.42%,表 5 吸水率 0.49%)的两种石灰岩,吸收系数 C 也有 0.42 与 0.66 的差别.

由表 4、表 5 还可以看出,对于改性沥青混合料,无论是玄武岩还是石灰岩,实际的吸收系数 C 与根据 JTG F40—2004 中的公式计算的 C 值相差很大,对于石灰岩改性沥青混合料,根据规范计算的 C 值为实际 C 值的 2.85 倍.因此对于集料的有效密度,必须现场实测,后进行最大理论密度计算,仅靠公式便想解决问题是不现实的.

表 4 玄武岩集料密度表
Tab.4 Density of porous basalt

多孔玄武岩	普通沥青有效相对密度	改性沥青有效相对密度	表观相对密度	毛体积相对密度	料比例/%
9.5~16	2.656	2.584	2.733	2.457	48.1
4.75~9.5	2.730	2.726	2.902	2.641	14.2
0~4.75	2.754	2.731	2.760	2.572	33.6
矿粉	2.626	2.611	2.703	—	4.1
合成	2.697	2.653	2.760	2.529	100
实际吸收系数 C	0.73	0.530	合成集料吸水率 3.31%		
按照规范计算的吸收系数 C	—	0.324			

表 5 石灰岩集料密度表
Tab.5 Density of limestone

石灰岩	普通沥青有 效相对密度	改性沥青有效 相对密度	表观相 对密度	毛体积相 对密度	料比 例/%
10~30	2.723	2.717	2.741	2.719	40
10~20	2.721	2.718	2.722	2.701	20
5~10	2.718	2.718	2.727	2.693	6
3~5	2.723	2.717	2.72	2.678	8
砂	2.685	2.641	2.684	2.601	20
矿粉	2.626	2.611	2.703	2.703	6
合成	2.709	2.695	2.721	2.685	100
实际吸收系数 C	0.660	0.280	合成集料吸水率 0.49%		
按照规范计算的吸收系数 C	—	0.798			

2 沥青混合料试件合理密度取值探讨

现行沥青混合料试验规程中提出不同沥青混合料试件密度测定方法,其中有水中重法、蜡封法、表干法及体积法等.这些方法各有特点,测量结果也不尽相同.作者对连续密级配沥青混合料进行研究.

很显然,沥青混合料最大理论密度有真值,研究过程中可以不考虑沥青混合料其它性能,从而研究比较简单.沥青混合料试件密度却要复杂的多,它是与混合料功能及类型密切联系的指标.此密度指标如果定义适当,能够最大限度的考虑混合料性能,那么无疑是最理想的结果.如果能够得到沥青混合料最大理论密度真值,空隙率准确性、合理性将取决于试件密度的准确性、合理性.而对空隙率的定义直接决定了试验方法的选择.

2.1 沥青混合料试件密度合理取值理论探讨

对于连续级配沥青混合料,对其空隙组成做

以下分析:

混合料试件的空隙包括表面构造深度的空隙体积、试件开口空隙及试件闭口空隙.

首先构造深度的体积不能计入空隙率体积,因为构造深度的体积除了与路面抗滑能力有关外,几乎与其它路用性能无关.其次是闭口空隙,闭口空隙的体积必然计入沥青混合料空隙率体积之中.第三是开口空隙,如何定义(或测定)开口空隙是选择试件密度测定方法的关键.文献[6]表明,沥青混合料试件的空隙率一般以开口空隙为主,开口空隙占混合料空隙的 60%~70%.因此如何严密定义开口空隙并采用合适的试验方法进行测定十分重要.

2.2 蜡封法与表干法体积指标比较研究

将级配 A、B 的混合料在不同油石比下击实 75 次的马歇尔试件分别计算水中重法、表干法及蜡封法体积参数.级配见表 6,试件体积指标见表 7.

表 6 级配表
Tab.6 Asphalt mixture gradation

级配	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
A	100	97.5	35	35	26	20	15	11	8
B	100	97.5	30	30	24	20	16	13	10

表 7 级配 A 和 B 体积指标表
Tab.7 Volume parameter of gradation A & B

级配	油石比 /%	理论最大 相对密度	水中重法			表干法				蜡封法		
			相对 密度	空隙率 /%	饱和度 /%	相对 密度	空隙率 /%	饱和度 /%	吸水率 /%	相对 密度	空隙率 /%	饱和度 /%
A	4.0	2.662	2.525	5.2	65.0	2.462	7.5	55.4	2.5	2.459	7.6	55.0
	4.5	2.641	2.521	4.6	70.4	2.496	5.5	66.2	1.0	2.498	5.5	66.4
	5.0	2.620	2.539	3.1	79.7	2.53	3.4	78.0	0.4	2.521	3.4	76.2
	5.5	2.601	2.557	1.7	88.9	2.552	1.9	87.8	0.2	2.544	1.9	85.9
	6.0	2.597	2.544	1.5	91.0	2.540	1.7	89.9	0.2	2.530	1.6	87.9
B	4.0	2.663	2.508	5.8	62.0	2.429	8.8	51.2	3.1	2.426	8.9	62.0
	4.5	2.643	2.519	4.7	69.7	2.495	5.6	65.6	1.0	2.489	5.8	69.7
	5.0	2.622	2.521	3.9	75.9	2.510	4.3	73.7	0.4	2.498	4.7	75.9
	5.5	2.602	2.546	2.2	86.1	2.536	2.5	84.1	0.4	2.530	2.8	86.1
	6.0	2.583	2.541	1.6	90.1	2.538	1.7	89.5	0.1	2.526	2.1	90.1

由表 7 可见：

(1)对于 A、B 两种级配的混合料，当试件吸水率大于 0.4%时，水中重法与表干法相差很大，对于级配 A，最大相差 2.5%，对于较粗的级配 B，最大相差 3.0%。

(2)表干法和蜡封法相比，对于较细的级配 A，由于试件表面比较平滑，表干法和蜡封法在不同油石比下的空隙率差别很小，最大相差 0.1%，而对于较粗的级配 B，虽然试件表面比较粗糙，但表干法和蜡封法在不同油石比下的空隙率差别亦很小，最大仅相差 0.4%。

(3)在吸水率大于 2%时，两种级配的表干法和蜡封法体积指标几乎相同。

综上所述，理论上，表干法与蜡封法均可用于测定沥青混合料试件的密度。但何种方法更为合适，需要进行进一步分析。沥青混合料试件密度是一个定义值，如果此定义值的试验方法比较简便，数据重复性、数据复现性及试验过程中的对数据准确性的影响因素比较小，且此指标与沥青混合料路用性能联系最为密切，那么此方法便是理想的试验方法。

表干法将混合料试件的空隙率用表干状态（毛巾擦干）定义，这种方法优点明显：

首先试验准确，因为对于较密实的混合料试件，表面积较小，表干状态的少许差别对试验结果影响不大。

其次，表干法认为不能被毛巾擦去的水占的体积为试件开口空隙，这也有其科学性。如果认为密实沥青混合料试件浸入水中，能流出去的水及能被毛巾擦去的水与混合料水破坏无关的话，那么表干法正好与此相对应，从而表干法定义的空隙率与混合料抗水破坏能力联系起来。

第三，表干法测量方便，工作量比蜡封法小。

第四，试验数据表明，表干法和蜡封法在试件吸水率达到 3%时差别也不大，因此建议用表干法测量混合料试件的毛体积密度。

3 连续密级配沥青混合料合理体积参数计算方法

(1)沥青混合料试件密度采用表干法毛体积相对密度(γ_f)。

(2)用沥青浸渍法实测集料有效相对密度，后根据 T0705—2000 的方法计算合成集料的有效相对密度(γ_{se})。

(3)根据合成集料有效相对密度(γ_{se})及沥青密度(γ_b)计算混合料最大理论相对密度(γ_t)。

(4)根据试件表干毛体积相对密度(γ_f)及最大理论相对密度(γ_t)计算空隙率、矿料间隙率等。

$$VV = \left[1 - \frac{\gamma_f}{\gamma_t} \right] \times 100\%,$$
$$VMA = \left[1 - \frac{\gamma_f}{\gamma_t} \times P_s \right] \times 100\%.$$

式中：VV 是空隙率；VMA 是矿料间隙率； P_s 是各种矿料在沥青混合料总质量的百分率之和。

4 结论

(1)按照新颁布实施的《沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)中的公式计算集料有效密度不尽合理，而应该用沥青浸渍法实测集料有效密度，并按照 T0705—2000 的公式计算沥青混合料理论最大相对密度。

(2)对沥青混合料试件空隙率组成的理论分析及试验结果表明，表干法毛体积密度作为连续密级配沥青混合料试件密度是合理的。

(3)考虑到沥青混合料各体积参数（包括 VMA、VFA（饱和度）、VV）意义及功能，根据实测的集料有效密度进行计算更为合理。

参考文献：

[1] 傅搏峰. 沥青路面水损害疲劳破坏过程的数值模拟分析[J]. 郑州大学学报(工学版) 2006, 27(1): 51~58.

[2] 卢永贵. 集料有效密度测试方法研究[J]. 中国市政工程, 2001, (3): 9~12.

[3] 王 勤, 游国兰. 沥青混合料中集料有效密度测定方法与计算方法研究[J]. 华东公路, 2001, (6): 47~50.

[4] 沙庆林. 高速公路沥青路面早期破坏现象及预防[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001. 159~162.

[5] 于叔藩. Superpave 水准 I 沥青混合料设计[R]. 重庆: 交通部重庆公路交通科学研究所, 1997.

[6] 王旭东. 沥青混合料空隙率的研究[J]. 重庆交通学院学报, 2000, 19(4): 18~21.

(下转第 115 页)

A new Method to Simulate Fire Based on Particle System

JIA Yan—guo, ZHANG Wei, TANG Yong

(College of Information Science & Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: To solve the key problem of real time and reality in fire simulation based on particle system, a new fire model based on particle system was proposed in this paper. In this model, the attributes of particles are initialized by the emitter. In addition, the change of the attributes such as colour, position, lifetime were optimized, and the move of particles was controlled by low pressure points. The type of particles was squares. We used the texture mapping technology to improve the effect and efficiency of rendering, and the textures were changed according to the time interval to simulate the the actual combustion process. Experimental results show that our algorithm achieves real—time simulation to both the animation and appearance of fire in consumer PC platform.

Key words: modeling for irregular object; fire simulation; particle system; texture mapping

(上接第 57 页)

Study on Computing Method of Aggregate Effective Density and Asphalt Mixture's Volume Parameter

ZHANG Hong—chun¹, LI Xiao—zhong²

(1. College of Road, Changan University, Xi'an 710061, China; 2. Henan Provincial Communication Planning Surevry & Design Institue, zhengzhou 450052, China)

Abstract: Air void is key criterion in asphalt mixture design. Because of the absorption of aggregate to asphalt, theoretical maximum density of asphalt mixture can not be measured accurately. The accuracy of air void is affected accordingly. Using asphalt as medium, the new test method —asphalt immersing test method is put forward. Test results indicate that for modified asphalt mixture, using specification's method to calculate aggregate's effective density is irrational. At the same time, new method has the characteristic of small variability and little influence by individual factors. Theoretically, using new method, the true value of asphalt mixture theoretical maximum density can be obtained. In addition, continuous density gradation asphalt mixture's air void composition is analyzed. Finally, asphalt mixture sample's scientific measuring method of density and reasonable computing method of volume parameter is brought forward.

Key words: asphalt mixture; effective density of aggregate; theoretical maximum density; air void