

DOI:10.11918/201810183

沥青混凝土结构表征与参数构建

孙 勇¹, 纪 伦¹, 孙维刚², 刘海权^{1,3}, 李 俊^{1,4}, 谭忆秋¹

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 黑龙江省八达路桥建设有限公司, 哈尔滨 150076;
3. 吉林省交通规划设计院, 长春 130021; 4. 中建丝路建设投资有限公司, 西安 710075)

摘 要: 为研究沥青混凝土的结构, 丰富表征沥青混凝土结构的参数, 首先对常见的体积参数进行总结, 分析沥青混凝土组成成分和结构特点. 然后, 从不同角度出发构建新的体积参数, 并对参数进行分类和分析. 最后, 在 AC-16 级配范围内通过改变细集料的比重得到了 5 个不同级配, 同时设置 4.2%、4.7%、5.2% (沥青占混合料的质量比) 3 种不同沥青用量, 研究沥青用量对参数的影响, 根据现行沥青混合料试验规程要求制作标准马歇尔试件, 并进行体积指标的测定, 通过计算得到构建的参数, 并分析参数随级配及沥青用量的变化规律. 结果表明: 体积参数随着沥青混合料的级配、沥青用量的改变有着明显的变化. 其中, 沥青类参数 VA、VM、 d_b 与混合料中的沥青用量有明显的线性关系, 同时 VM 还与 V_f 有关; 空隙类参数 VMA、 V_K 、VV 随 V_f 的增加先减小后增大. 只改变沥青用量时, VMA、 V_K 、VV 随沥青用量的增加而减小; 集料类参数 G 、 V_c 、 V_f 、 $V_{f/(1-c)}$ 、 F_{BV} 、 F_1 、 F_2 、 V_{eff} 与混合料中粗细集料以及矿粉的比例有关.

关键词: 沥青混凝土; 结构表征; 参数构建; 级配; 性能

中图分类号: U414 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2020)03-0038-06

Characterization and parameter construction of asphalt concrete structure

SUN Yong¹, JI Lun¹, SUN Weigang², LIU Haiquan^{1,3}, LI Jun^{1,4}, TAN Yiqiu¹

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Heilongjiang Bada Road & Bridge Construction Co., Ltd., Harbin 150076, China; 3. Jilin Traffic Planning and Design Institute, Changchun 130021, China; 4. Zhongjian Silk Road Construction Investment Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: To study the structure of asphalt concrete and enrich the characterization of asphalt concrete structure parameters, common volume parameters were summarized to analyze the composition and structural characteristics of asphalt concrete. Then, new volume parameters were constructed from different angles, and the parameters were classified and analyzed. Finally, within the scope of the AC-16 grading, five different gradations were obtained by changing the proportion of fine aggregate. Meanwhile, three different dosages of asphalt: 4.2%, 4.7%, and 5.2% (the percentage of asphalt by mass in asphalt mixture) were set to investigate the influence of asphalt content on parameters. Standard Marshall specimens were made according to the existing asphalt mixture production test code requirements, and the volume index was determined. The constructed parameters were obtained by calculation, and the variation of the parameters with gradation and asphalt content was analyzed. Results show that the volume parameters changed obviously with the gradation of asphalt mixture and the change of asphalt content. The asphalt parameters VA, VM, and d_b had obvious linear relationship with the amount of asphalt in the mixture, and VM was related to V_f . The void parameters VMA, V_K , and VV decreased first and then increased with the increase of V_f . When only changed the asphalt content, parameters VMA, V_K , and VV decreased with the increase of the asphalt content. The aggregate parameters G , V_c , V_f , $V_{f/(1-c)}$, F_{BV} , F_1 , F_2 , and V_{eff} were related to the proportion of coarse and fine aggregate and mineral powder in the mixture.

Keywords: asphalt concrete; structural characterization; parameter construction; gradation; performance

目前针对沥青混凝土的研究主要集中在路用性能方面^[1-2], 而针对结构的相关研究较少. 但沥青混凝土的结构与性能密不可分, 一定程度上, 结构决定

性能, 故对沥青混凝土结构研究是十分重要的^[3-5]. 在沥青混凝土结构表征方面, 国内外开展了一些研究, 如: 文献[6]中所用的贝雷法由 Robert D. Bailey 提出, 是一种新的确定沥青混合料的方法. 其主要思路是通过控制粗集料和细集料关键筛孔的通过率, 贝雷法粗细集料临界筛孔采用的是 $0.22D$, 这样设计的矿料级配具有良好的骨架结构, 然后通过对粗细集料的比例进行调整, 获得比较合适的矿料间

收稿日期: 2018-10-29

作者简介: 孙 勇 (1996—), 男, 硕士研究生;

谭忆秋 (1969—), 女, 长江学者特聘教授, 博士生导师

通信作者: 纪 伦, jilun@hit.edu.cn

隙率,按照设计密度进行级配设计,同时以此来保证骨架结构. 最后用三参数 CA 、 FA_c 、 FA_f 来进行检验,以确保设计的沥青混合料具有较好的路用性能. 文献[7-8]在碾压混凝土设计中引入 BETA 和 ALPHA 两参数,二者能够反映混合料各项性能指标的变化趋势,可以作为沥青混合料配合比设计的指标;文献[9]基于 Delaunay 三角剖分建立了胶浆面积、颗粒间最小距离及颗粒重心距离等参数,但这些参数在分析时颇显繁琐,且不够全面.

为了进一步完善沥青混合料体积参数体系,在现有成果^[10-14]的基础上,本文从沥青混凝土材料的体积及体积项组成关系出发,对沥青混凝土组成成分和结构特点进行分析,总结并构建体积参数. 选取不同级配和不同沥青用量的沥青混合料来计算其体积参数的结果,分析级配和沥青用量与参数之间的关系. 基于此研究,能够更好地理解沥青混凝土的结构与各项性能之间的关系,为研究结构与性能的关系以及进行配合比设计、施工质量控制提供依据.

1 沥青混合料体积参数及构建

1.1 沥青混合料较常见的体积参数

沥青混合料的体积参数是用来描述沥青混合料中各项组成之间的关系以及沥青混合料的内部结构的,是沥青混合料配合比设计的重要指标,主要参数为:1)空隙率 VV . 压实的沥青混凝土中,空隙体积占混合料总体积的百分比. 2)沥青体积百分率 VA . 压实沥青混凝土中,沥青的体积与试件总体积的百分比为沥青的体积百分率. 3)矿料间隙率 VMA . 压实沥青混凝土中除去集料体积后剩余的体积占总体积的百分比称为矿料间隙率. 4)沥青饱和度 VFA . 压实沥青混凝土中,沥青部分体积占矿料骨架以外的空隙部分体积的百分比称为沥青饱和度. 5)沥青膜厚度 d_a . 在压实的沥青混合料中,沥青包裹在集料表面,所形成膜的厚度,mm. 6)粗集料体积百分比 V_c ^[15]. 压实的沥青混凝土中粗集料的体积占总体积的百分比. 7)细集料体积百分率 V_f ^[15]. 压实的沥青混凝土中细集料的体积占总体积的百分比. 8)胶浆体积百分率 VM ^[15]. 压实的沥青混凝土中胶浆体积占总体积的百分比.

1.2 与沥青、集料材料相关体积数的构建

沥青混凝土参数的构建基于各组成成分之间的体积关系,其体积组成示意图如图 1 所示,图中 VV 为空隙率; VA 为沥青体积百分率; VM 为胶浆体积百分率; V_f 为细集料体积百分率; V_c 为粗集料体积百分率.

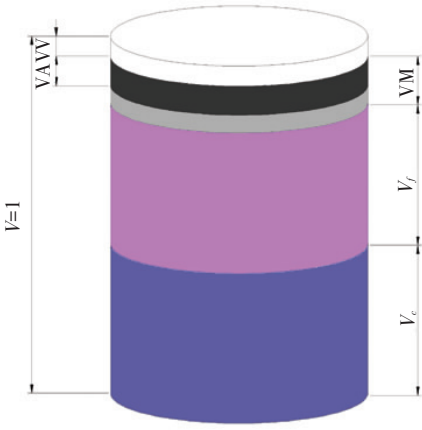


图 1 沥青混凝土体积组成示意图

Fig.1 Schematic diagram of volume composition of asphalt concrete

本文具体构建如下体积参数:

1)粗细集料体积比 $V_{c/f}$. 压实沥青混凝土中,全部粗集料(大于等于 4.75 mm 的颗粒)的体积与全部细集料(小于 4.75 mm 的颗粒)体积的比值. 计算公式为

$$V_{c/f} = \frac{V_c}{V_f}.$$

粗细集料体积比的建立是为了更好地建立粗细集料之间的关系,通过试验寻找最佳比例,以达到最优的结构和性能.

2)粉胶体积比 F_{AV} . 压实的沥青混凝土中矿粉的体积与沥青的体积比. 计算公式为

$$F_{AV} = \frac{VM - VA}{VA}.$$

3)粉浆体积比 F_{BV} . 压实的沥青混凝土中矿粉的体积与胶浆的体积比. 计算公式为

$$F_{BV} = \frac{VM - VA}{VM}.$$

4)浆集体积比. 沥青胶浆、空隙、集料三者构成沥青混合料,其中,胶浆(胶浆+空隙)与集料的比值对沥青混合料的结构和性能有着一定的影响.

(a) F_1 比. 在压实的沥青混凝土中胶浆(沥青+0.075 mm以下部分)的体积与集料(0.075 mm 及以上)体积的比值,计算公式为

$$F_1 = \frac{VM + VA}{V_c + V_f}.$$

(b) F_2 比. 在压实的沥青混凝土中胶浆的体积、空隙体积之和与集料体积的比值. 计算公式为

$$F_2 = \frac{VM + VV}{V_c + V_f}.$$

5)胶浆膜厚度 d_b . 在压实的混凝土中,胶浆包裹集料后形成的胶浆膜的厚度. 区别于沥青膜厚度.

胶浆膜厚度的计算为:将集料(除 0.075 mm 以下部分)假设称为球形颗粒,其直径为 $\frac{(d_i + d_{i+1})}{2}$, 其中 d_i 为第 i 档料的粒径,例如粒径为 4.75 mm 的颗粒,假设其直径全部为 $(4.75 \text{ mm} + 9.5 \text{ mm})/2 = 7.125 \text{ mm}$. 然后根据集料的表观密度 ρ_i 与集料的质量 m 计算集料总的表观体积 V , 用总的体积除去单个颗粒的体积 v 得到颗粒数量 N , 颗粒数量乘以单个颗粒的总表面积则得到该档集料总的表面积. 用胶浆的体积除以所有集料的表面积之和,即得到胶浆膜厚度.

1.3 与空隙相关的体积参数构建

1) 细集料填充率 $V_{f/(1-c)}$. 压实沥青混合料细集料占除去粗集料外剩余部分的体积百分率. 计算公式为

$$V_{f/(1-c)} = \frac{1 - V_c + \text{VMA}}{1 - V_c} \times 100\%.$$

2) 骨架系数 G . 用于描述沥青混合料在成型之后,沥青混合料中粗集料在细集料和胶浆中的分散情况. 测试方法为:同一种级配的沥青混合料,先用粗集料放入一定体积和质量容积升进行振实,计算其振实密度;然后成型沥青混合料试件,计算成型后试件中粗集料的质量与试件体积的比. 骨架系数的计算公式为

$$G = \frac{\rho_{cs}}{\rho_{zs}}.$$

式中 ρ_{cs} 为压实后的沥青混合料试件中粗集料(大于 4.75 mm 的颗粒)的质量与试件总体积的比, ρ_{zs} 为同样配比的粗集料灌入容量筒经振实后的质量与容量筒容积的比.

为了更好地把握沥青混合料中骨架的形成情况,单靠粗集料体积占比和矿料间隙率是无法满足的,因此在基于研究需求的基础上建立了骨架系数这一参数,能清楚地反应沥青混合料在成型前后粗颗粒的分布变化,可以更加清晰地反映出骨架成型情况.

3) 胶浆空隙率 V_k . 混合料中的空隙分布,与胶浆密不可分,大部分散在胶浆中,仅有少部分分布在胶浆和集料界面. 压实的沥青混合料中,定义空隙体积占胶浆体积的百分率,为胶浆空隙率. 计算公式为

$$V_k = \frac{VV}{VM} \times 100\%.$$

2 体积参数与级配、沥青用量关系分析

通过上述的分析,构建体积参数,为了更方便研

究参数与级配的关系,进而进行更深一步的研究,在基于参数本身所表征的含义以及与沥青混合料结构组成材料方面的关系,将常见体积参数与构建参数进行分类,具体如下:1) 沥青类. 沥青体积百分率、沥青饱和度、沥青膜厚、胶浆体积百分率、胶浆膜厚度. 2) 空隙类. 空隙率、矿料间隙率、粗集料矿料间隙率、胶浆空隙率、骨架系数. 3) 集料类. 粗集料体积百分率、细集料体积百分率、粗细集料体积比、粉胶比、粉浆比、浆集体积比 F_1 、浆集体积比 F_2 、细集料填充率.

本文以 AC-16 中值作为中间级配,变化沥青用量(质量分数分别为 4.2%, 4.7%, 5.2%), 进行参数性能分析. 为了增大各级配的差别,以(新级配 1 = 级配中值 + (级配上限 - 级配中值) × 80%) 作为 J1, 以(新级配 2 = 级配中值 + (级配中值 - 级配上限) × 80%) 作为 J7. 然后不改变粗集料(大于等于 4.7 mm 的颗粒)的质量分数,细集料(大于等于 0.075 mm, 小于 4.75 mm 的颗粒)的质量分数由级配 1、级配 7 分别与级配曲线中值求均值得级配 2、级配 6, 如图 2 所示. 各级配沥青用量: J1、J2、J4、J6、J7 质量分数为 4.7%, J3 质量分数为 4.2%, J5 质量分数为 5.2%.

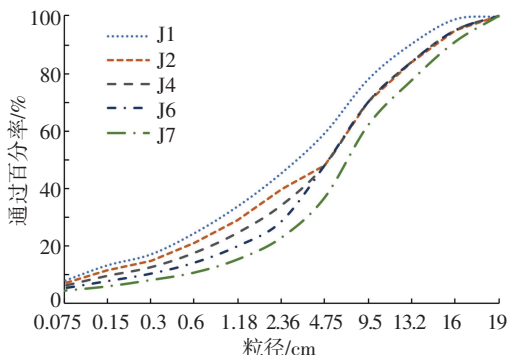


图 2 级配曲线

Fig.2 Gradation curve

2.1 体积参数的计算

按照规范规定的方法成型马歇尔试件,测其密度等物理量指标,然后计算其体积参数,计算结果见表 1.

2.2 级配变化与参数关系分析

沥青混凝土级配的变化实际上是混凝土中矿料占比的变化. 按照参数类别分析级配与参数的关系,如图 3 所示. 由图 3 可以看出,沥青类参数随级配变化波动较大,规律不统一,具体如下:1) 对于沥青体积百分率 VA 与沥青饱和度 VFA 来说,两者变化规律基本相同. J1、J2、J4、J6、J7 因为沥青用量相同,参数稍有波动,但变化不大;而对于 J3、J4、J5,因级配相同,沥青用量为线性增加,曲线呈线性上升趋势. 2) 由图 3(b) 可以看出,胶浆体积百分率 VM 在 J1、J2、J4、J6、J7 五个级配点上,呈下降趋势. 分析其

原因是随级配变化,细集料逐渐减少,矿粉比例减少,而沥青用量不变,所以随级配变化参数 VM 逐渐递减;而对于 J3、J4、J5 三个级配,因沥青用量的增加幅度大于矿粉减小的幅度,故参数 VM 逐渐增长. 3) 由图 3(d) 可以看出,胶浆膜厚度 d_b 随级配波动幅度较小,处于 0.04 mm 上下,但从 J3、J4、J5 三个级配任可以看出,沥青用量的增加会使胶浆膜厚度

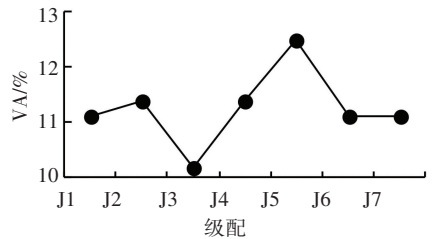
增大. 从上述分析可以看出,沥青类参数与混合料中的沥青用量有明显的线性关系,沥青用量越多,沥青体积百分率 VA 与胶浆体积百分率 VM 越大,胶浆膜厚度 d_b 越大,同时胶浆体积百分率还与沥青混合料中集料的比例有关.

空隙类参数与沥青混凝土结构密切相关,其随级配变化规律如图 4 所示.

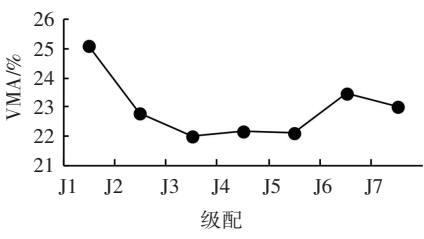
表 1 马歇尔试件体积参数

Tab.1 Volume parameters of Marshall specimen

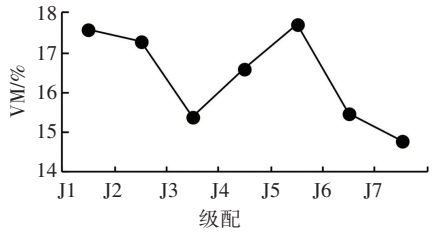
级配	VV	VA	VMA	VFA	V_f	VM	F_{BV}	$V_f/(1-e)$	V_c	F_1	F_2	V_c/f	G	d_b	V_K
J1	7.5	11.1	25.1	44.4	42.0	17.6	0.58	62.6	33.0	0.23	0.33	0.79	0.86	0.05	42.6
J2	5.5	11.4	22.8	50.1	34.2	17.3	0.52	60.0	3.0	0.22	0.30	1.26	0.96	0.02	31.7
J3	6.6	10.2	22.0	46.3	34.8	15.4	0.51	61.2	43.2	0.20	0.28	1.24	0.96	0.03	42.7
J4	5.6	11.4	22.2	51.2	34.8	16.6	0.46	61.0	42.9	0.21	0.29	1.23	0.96	0.04	34.1
J5	4.5	12.5	22.1	56.6	35.4	17.7	0.41	61.5	42.5	0.23	0.28	1.20	0.95	0.04	25.2
J6	8.0	11.1	23.5	47.3	34.6	15.5	0.40	59.6	41.9	0.20	0.31	1.21	0.96	0.04	51.5
J7	8.2	11.1	23.0	48.3	26.1	14.8	0.33	53.2	50.9	0.19	0.30	1.95	0.99	0.06	55.2



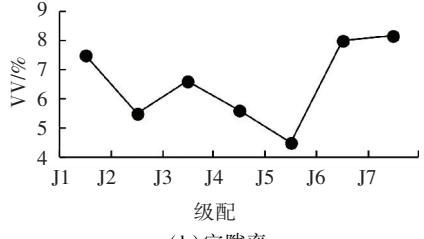
(a) 沥青体积百分率



(b) 胶浆膜厚度



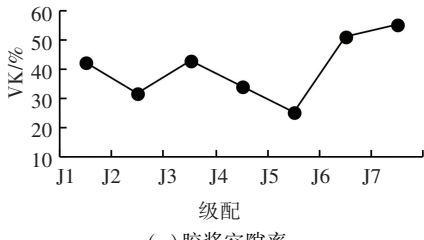
(c) 沥青饱和度



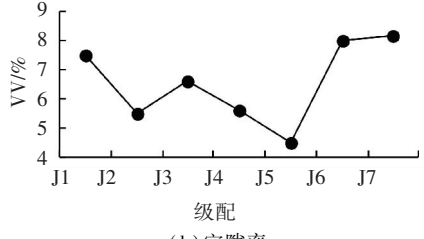
(d) 胶浆膜厚度

图 3 沥青类参数与级配变化分析

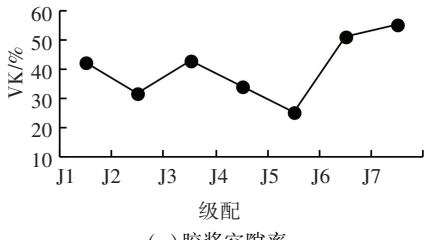
Fig.3 Variation analysis of asphalt parameters and gradation



(a) 矿料间隙率



(b) 空隙率



(c) 胶浆空隙率

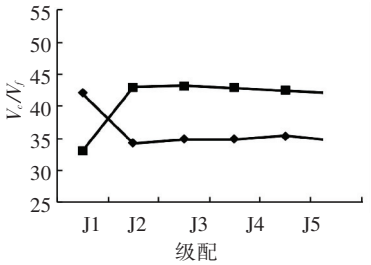
图 4 空隙类参数与级配关系

Fig.4 Relationship between void parameters and gradation

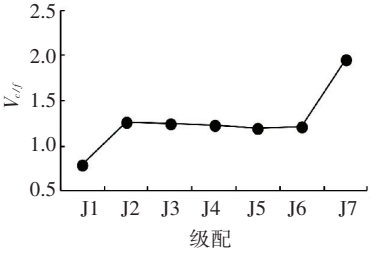
由图 4(a)、4(b)、4(c) 可以看出,在排除 J3、J4、J5 三个点后,曲线均表现为先增加后减小的趋势. 表明矿料间隙率 VMA、空隙率 VV 与胶浆空隙率 V_K 随着级配中粗集料的比例的增加而呈现先减少后增加的趋势;而从图 4(b)、4(c) 中 J3、J4、J5 三个点可以看出,随沥青用量逐渐增加,参数 VV、 V_K 逐渐递减. 表明沥青用量增多,集料的空隙被逐渐

增加的沥青所填充,空隙体积减少,空隙率下降. 从上述分析可以看出,只考虑粗细集料比例时,当细集料较少时,由于没有足够的集料填充骨架空隙,空隙类参数较大;随着细集料的逐渐增加,空隙被逐渐填充,空隙体积减少,结构逐渐密实;随后细集料继续增加,撑开了粗集料构成的骨架,空隙增加. 而粗细集料比例不变,只改变沥青用量时,由于沥青用量的增加充分填充了集料的空隙,使得结构变密实,空隙减小.

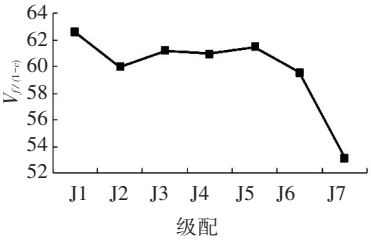
集料类参数随级配变化规律如图 5 所示. 由图 5(a)可以看出,图中,粗集料体积百分率 V_c 与细集料体积百分率 V_f 两条曲线呈现相反的变化,因为 J1、J2、J4、J6、J7 五个级配由细到粗,粗集料逐渐增多相应细集料减少,粗细集料变化规律相反. 而 J3、J4、J5 三个级配则基本不变. 图 5(b)中,粗细集料体积比 V_{cf} 与粗集料体积百分率的变化趋势基本相同. 图 5(c)、5(d)中细集料填充率 $V_{f/(1-c)}$ 与粉浆体积比 F_{BV} 随级配变化均呈现递减的趋势,这是因为细集料的减少使得沥青,矿粉的比例相对减少,粗集料增加,细集料无法全部填充粗集料的空隙. 而两者区别在于图 5(c)中 J3、J4、J5 三个级配细集料填充率 $V_{f/(1-c)}$ 变化不大. 这说明沥青用量对细集料填充率 $V_{f/(1-c)}$ 影响不大. 而图 5(d)则相反,J3、J4、J5 三个级配的粉浆体积比 F_{BV} 逐渐递减. 这说明,粉浆体积比 F_{BV} 与沥青用量具有线性相关性. 图 5(e)中浆集体积比 F_1 、 F_2 两条曲线变化规律大致相同,整体呈递减趋势,出现差异的原因是 F_2 中加入的空隙的体积,使得曲线出现波动. 从 J3、J4、J5 三个级配可以看出, F_2 比 F_1 更加平缓,因为在不计入空隙时,增加沥青用量使得胶浆体积增加,会导致浆集体积比 F_1 增大;在计入空隙体积后,增加沥青用量,部分沥青用来填充空隙,空隙体积增加,虽然胶浆体积仍增加,但不明显,浆集体积比 F_2 变化不大. 图 5(f)中曲线呈现梯度上升,对比其各级配发现,J2、J3、J4、J5、J6 五个级配粗集料比例相同,骨架系数基本不变. 而 J1 粗集料含量最少,骨架系数最小,J7 则最多,骨架系数最大. 这说明骨架系数 G 与混合料中粗集料的体积比有关,受其他因素的影响很小. 从上述分析可以看出,集料类参数都与混合料中粗细集料以及矿粉的比例有关,与沥青用量关系不大. 具体表现为:随着细集料的减少,细集料体积百分率减少,粗集料体积百分率增加,粗细集料体积比增大,细集料的填充率下降,浆集体积比、粉浆体积比均下降;而粉浆体积比 F_{BV} 、浆集体积比 F_1 与沥青用量有明显的线性关系. 沥青用量越大, F_{BV} 越小,浆集体积比 F_1 越大.



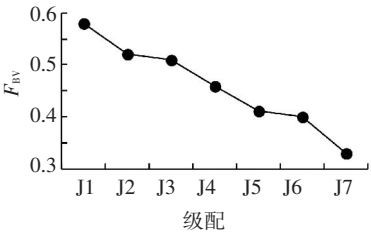
(a) 粗细集料体积百分比



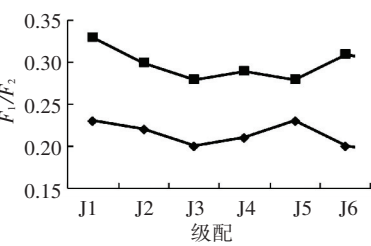
(b) 粗细集料体积比



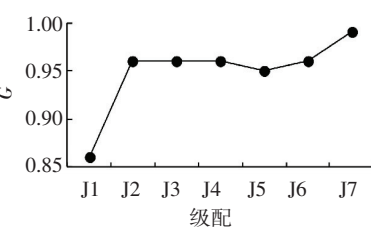
(c) 细集料填充率



(d) 粉浆体积比



(e) 浆集体积比



(f) 骨架系数

图 5 集料类参数与级配关系

Fig.5 Relationship between aggregate parameters and gradation

3 结 论

1) 沥青类参数与混合料中的沥青用量有明显的线性关系, 沥青用量越多, 沥青体积百分率 V_A 与胶浆体积百分率 V_M 越大, 胶浆膜厚度 d_b 越大, 同时胶浆体积百分率还与沥青混合料中集料的比例有关。

2) 对于空隙类参数, 只考虑粗细集料比例时, 细集料较少时, 由于没有足够的集料填充骨架空隙, 空隙类参数较大; 随着细集料的逐渐增加, 空隙被逐渐的填充, 空隙体积减少, 结构逐渐密实; 随后细集料继续增加, 撑开了粗集料构成的骨架, 空隙增加。而粗细集料比例不变只改变沥青用量时, 由于沥青用量的增加充分填充了集料的空隙, 使得结构变密实。

3) 集料类参数都与混合料中粗细集料以及矿粉的比例有关, 与沥青用量关系不大。具体表现为: 随着细集料的减少, 细集料体积百分率减少, 粗集料体积百分率增加, 粗细集料体积比增大, 细集料的填充率下降, 浆集体积比、粉浆体积比均下降; 而粉浆体积比 F_{BV} 、浆集体积比 F_1 与沥青用量有明显的线性关系。沥青用量越大, F_{BV} 越小, 浆集体积比 F_1 越大。

参考文献

- [1] 陈渊召, 李振霞. 基于离散元法的橡胶颗粒沥青混合料细观结构分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(4): 116
CHEN Yuanzhao, LI Zhenxia. Meso-structure of crumb rubber asphalt mixture based on discrete element method[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(4): 116. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2013.04.021
- [2] 谭忆秋. 沥青与沥青混合料[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007: 52
TAN Yiqiu. Asphalt and asphalt mixture[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2007: 52
- [3] 郭辉. 基于多参数描述的沥青混合料构成研究[D]. 南京: 东南大学, 2017
GUO Hui. Research on asphalt mixture composition based on multi-parameter description[D]. Nanjing: Southeast University, 2017
- [4] 张磊. 粗集料级配及形貌对沥青混合料结构和性能的影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017
ZHANG Lei. Effect of coarse aggregate gradation and morphology on structure and performance of asphalt mixture[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017

- [5] 沈振宗. 真空压实沥青混合料细观结构特性的试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2017
SHEN Zhenzong. Experimental study on fine microstructure characteristics of vacuum compacted asphalt mixture[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017
- [6] VAVRIK W R, PINE W J, HUBER G, et al. The Bailey method of gradation evaluation: the influence of aggregate gradation and packing characteristics on voids in the mineral aggregate[J]. Proceedings of the Society for Experimental Biology & Medicine Society for Experimental Biology & Medicine, 2001, 118(2): 517
- [7] BO L I, TAO L I, TENG X Q, et al. Mix design method for asphalt mixtures based on the fractal characteristic of aggregate[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008
- [8] RAO C, TUTUMLUER E, KIM I T. Quantification of coarse aggregate angularity based on image analysis[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2002, 1787(1): 117
- [9] 张蕾. 基于细观分析的沥青混合料组成结构研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008
ZHANG Lei. Research on composition and structure of asphalt mixture based on microscopic analysis[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008
- [10] 徐慧宁. 体积指标对沥青混合料路用性能的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007
XU Huining. Effect of volume index on pavement performance of asphalt mixture[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007
- [11] 李云龙. 级配离析对沥青稳定碎石技术特性影响研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2015
LI Yunlong. Study on the influence of gradation segregation on technical characteristics of asphalt stabilized macadam[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2015
- [12] 谭忆秋, 邢超, 任俊达, 等. 基于颗粒堆积理论的沥青混合料细观结构特性研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(7): 1
TAN Yiqiu, XING Chao, REN Junda, et al. Study on the meso-structure characteristics of asphalt mixture based on particle accumulation theory[J]. China Highway Journal, 2017, 30(7): 1
- [13] 张起森, 肖鑫. 沥青及沥青混合料本构模型与微观结构研究综述[J]. 中国公路学报, 2016, 29(5): 26
ZHANG Qisen, XIAO Xin. Research review on constitutive model and microstructure of asphalt and asphalt mixture[J]. China Highway Journal, 2016, 29(5): 26
- [14] 谭忆秋, 姚李, 张锐, 等. 级配对密级配沥青混合料体积指标的影响[J]. 中外公路, 2012(1): 213
TAN Yiqiu, YAO Li, ZHANG Rui, et al. Influence of volume index of grade-matched and dense gradation asphalt mixture[J]. China & Foreign Highway, 2012(1): 213
- [15] 黄云涌, 刘宏富, 胡贵华. AC-13 沥青混合料级配优化设计研究[J]. 中外公路, 2008, 28(3): 172
HUANG Yunyong, LIU Hongfu, HU Guihua. Study on the optimization design of AC-13 asphalt mixture gradation[J]. Sino-Foreign Highway, 2008, 28(3): 172

(编辑 魏希柱)