文章编号:1672－9331(2021)03－0001－07

废胶粉/SBS 复合改性沥青混合料 CR/SHMA-13 的级配研究

王　辉,周争辉,詹诗浩,王　旭

(长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙　410114)

摘　要: 为了获得适用于废胶粉/SBS 复合改性沥青混合料 CR/SHMA-13 的级配范围,以粗集料骨架间隙率及骨架强度为评价指标,通过粗集料逐级填充试验,确定了主骨架间粗集料各级粒径的最佳比例。采用体积设计法确定粗细集料占比,然后采用正交试验对 CR/SHMA-13 混合料的级配进行优化,根据极差分析结果推荐出适用于 CR/SHMA-13 混合料的级配范围。结果表明:与 AC-13,SMA-13 混合料相比,CR/SHMA-13 混合料的路用性能与 SMA-13 混合料的相当,但比传统 AC-13 混合料的要好。

关键词: 沥青混合料;级配设计;逐级填充试验;正交试验;路用性能

中图分类号: U414　　　　**文献标志码:** A

Study on gradation of waste crumb rubber/SBS composite modified CR/SHMA-13 asphalt mixture

WANG Hui, ZHOU Zheng-hui, ZHAN Shi-hao, WANG Xu

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to obtain the suitable gradation range for waste crumb rubber/SBS composite modified asphalt CR/SHMA-13 asphalt mixture, through gradually filling test of coarse aggregate, percent voids in mineral aggregate and skeleton strength were used as evaluation indexes to determine the optimum ratio of coarse aggregates of all particle sizes between the main skeletons. The proportion of coarse and fine aggregate was determined by the volumetric design method, then the gradation of the CR/SHMA-13 mixture was optimized by orthogonal test. The gradation range applicable to the CR/SHMA-13 mixture was recommended according to the range analysis. The results show that the pavement performance of the CR/SHMA-13 mixture is comparable to that of SMA-13 mixture, but is better than that of the conventional AC-13 mixture.

Key words: asphalt mixture; gradation design; gradually filling test; orthogonal test; pavement performance

---

收稿日期: 2021-06-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478052);湖南省交通运输厅科技进步与创新计划项目(201825,201513);长沙理工大学研究生创新与创业项目(SJCX202011);长沙市科技计划项目(KQ2004067);湖南省交通运输厅地方标准制修订计划项目(B202112)

通讯作者: 王　辉(1970－),男,教授,主要从事路面结构与材料方面的研究。E-mail:wh.cs.cn@163.com

在沥青混合料体系中,集料的级配对沥青混合料的性能起着至关重要的作用,并对沥青路面的路用性能产生重要影响[1-2]。在沥青混合料力学体系中,粗集料主要起骨架支撑作用,细集料则用来填充粗集料空隙。谭忆秋等[3]结合数字图像处理技术,研究了沥青混合料内部空隙的空间分布和颗粒之间的接触关系,结果表明主骨架颗粒接触点的数量随压实次数的增加而增加,骨架结构强度也随之增大。黄优等[4]通过分析矿料间隙率等指标与最佳油石比之间的关系,论证了基于骨架最紧密状态配合比设计的可行性。蔡旭等[5]明确了沥青混合料粗集料骨架特征参数与路用性能之间的关系。

目前,矿料级配的设计方法主要分为两类:经验法和经验计算法。前者应用最多,使用起来简单易行,但是由于其应用范围较广,缺乏针对性,同时也略显滞后;后者在设计过程中以混合料组成材料的体积特征为基础,结合一定经验通过合理的体积计算确定矿料级配,贝雷法是其典型代表[6-7]。废胶粉改性沥青的级配设计主要有干法和湿法两种工艺。采用干法进行级配设计时,将废胶粉颗粒作为填充料替换部分细集料。由于废胶粉与细集料密度差异较大,传统级配设计方法不适用于橡胶沥青混合料的级配设计[8-9];湿法通过剪切等工艺制备废胶粉改性沥青,废胶粉与沥青中的轻质组分相互吸附,并出现溶胀现象,使废胶粉颗粒的体积增大为原来的2～3倍,而颗粒核心基本保持不变,然而在级配设计时往往忽略了这部分颗粒核心对级配设计的影响。由于废胶粉/SBS复合改性沥青砂浆具有优良的回弹性能,在施工中难以摊铺、压实;同时黏附在集料表面的油膜较厚,较小的间隙率不足以包裹较多的自由沥青,导致沥青混合料的高温稳定性较差。王新强等[10]通过采用不同比例的橡胶沥青和砂浆进行逐级填充试验,确定粗集料的最小骨架间隙率,结果表明:填充比例与动稳定度呈负相关关系,原因在于不同填充比例的沥青和砂浆将对粗集料骨架结构造成不同的影响,过高的填充比例使骨架结构趋向于悬浮密实结构,而较低的填充比例使骨架结构趋向于骨架空隙结构。因此,在级配设计时应注意矿料间隙率和沥青砂浆的填充比例。对于废胶粉/SBS复合改性沥青混合料,由于缺乏相应的级配设计方法和适用的级配范围,本研究通过粗集料逐级填充试验,确定骨架结构良好、密实度较佳时的粗集料各级粒径的最佳比例关系,然后设计CR/SHMA-13混合料的正交试验对其级配进行优化,并根据正交试验结果推荐出适用于CR/SHMA-13混合料的级配范围。

1 试验原材料

1.1 沥青胶结料

CR/SBS复合改性沥青的主要技术指标如表1所示。

表1 CR/SBS复合改性沥青的主要技术指标

Table 1 Main technical indexes of CR/SBS composite modified asphalt

技术指标	试验结果	技术指标	试验结果
针入度/(0.1 mm)	48.4	软化点差/℃	2.9
软化点/℃	76.8	弹性恢复率/%	81
延度(5 ℃)/cm	12.6	黏度(180 ℃)/(Pa·s)	2.9

1.2 集料

根据《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)中的要求对集料的主要基本性能进行测试,结果见表2。从表2可以看出:集料各项技术性能指标均符合规范的技术要求。

表2 集料的主要技术指标

Table 2 Main technical indexes of aggregates

集料类型	技术指标	试验结果	技术要求
粗集料	压碎值/%	14.3	≤26
	洛杉矶磨耗值/%	12.8	≤28
	表观相对密度	2.755	≥2.6
	针片状颗粒含量/%	9.2	≤15
	坚固性/%	8	≤12
	磨光值	50	≥42
细集料	砂当量/%	66	≥60
	棱角性/s	37	≥30

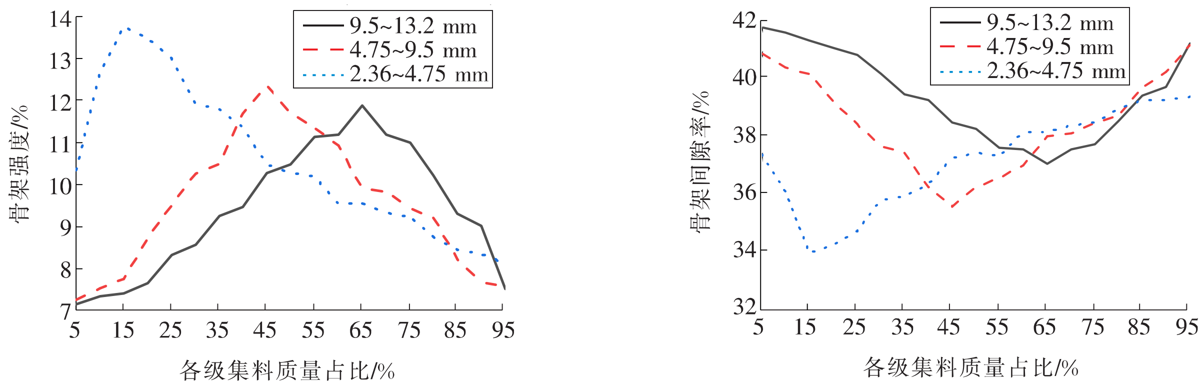
2 粗集料逐级填充试验

为了得到各级集料在最优状态下的含量,需进行粗集料的逐级填充试验[10-13]。采用逐级填充法对粒径大于2.36 mm的集料进行振动击实,计

算集料骨架间隙率和骨架强度，确定各档集料的比例，并最终确定粗集料骨架良好、密实度较佳时的级配。

粗集料逐级填充试验设计如下：Ⅰ级填充试验以粒径 13.2 mm 的粗集料作为骨架颗粒，用粒径 9.5～13.2 mm 的集料进行填充；Ⅱ级填充试验以粒径 9.5～16 mm 的集料作为骨架颗粒，用粒径 4.75～9.5 mm 的集料进行填充；Ⅲ级填充试验以粒径 4.75～16 mm 的集料作为骨架颗粒，用粒径 2.36～4.75 mm 的集料进行填充。

逐级填充试验结果如图 1 所示。由图 1 可知：Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ级填充的骨架颗粒和填充集料的最佳质量比分别为 65∶35，45∶55，15∶85，粗集料骨架间隙率最小，为 33.89%，此时骨架强度最大。



(a) 骨架强度与各级集料质量占比的关系　　(b) 骨架间隙率与各级集料质量占比的关系

图 1　逐级填充试验结果

Fig. 1　Results of gradually filling test

3　CR/SHMA 级配正交试验研究

3.1　正交试验方案

表 3 为 CR/SHMA-13 混合料级配的正交试验表。

本研究将粒径分别为 13.2～16，9.5～13.2，4.75～9.5，2.36～4.75 mm 的 4 档集料的用量作为试验因素。此外，矿粉用量是影响级配的一个重要因素[14]，因此将矿粉用量也作为试验因素之

表 3　CR/SHMA-13 混合料级配的正交试验表

Table 3　Orthogonal test table of gradation of CR/SHMA-13 mixture　　%

试验编号	通过下列筛孔(mm)的质量百分率									
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
1	100	82	57	31	22	18	13	7	5	4
2	100	82	65	36	25	20	15	9	7	6
3	100	82	73	41	28	22	17	11	9	8
4	100	82	81	46	31	24	19	13	11	10
5	100	88	57	36	28	18	15	11	11	10
6	100	88	65	31	31	20	13	13	9	8
7	100	88	73	46	22	22	19	7	7	6
8	100	88	81	41	25	24	17	9	5	4
9	100	94	57	41	31	18	17	13	7	6
10	100	94	65	46	28	20	19	9	5	4
11	100	94	73	31	25	22	13	11	11	10
12	100	94	81	36	23	22	15	9	9	8
13	100	100	57	46	25	18	19	9	9	8
14	100	100	65	41	22	20	17	13	11	10
15	100	100	73	36	31	22	15	7	5	4
16	100	100	81	31	28	24	13	11	7	6

一。根据已有经验并参考与橡胶沥青设计级配相关的研究成果[15-18],将粒径为2.36 mm集料的筛孔通过率初步确定为25%,此时混合料的结构趋向于骨架密实结构;将矿粉的用量(即粒径为0.075 mm集料的筛孔通过率)初步确定为6%。根据粗集料骨架最佳时的骨架颗粒和填充集料的最佳质量比例关系,分别计算得到粒径为13.2,9.5,4.75 mm集料的筛孔通过率为88%,65%,36%,并将其作为各尺寸筛孔的初步基准通过率。将粒径为2.36,4.75,13.2,9.5 mm集料的筛孔通过率在基准通过率的基础上分别上下浮动3%,5%,6%,8%。特别地,由于矿粉的用量对沥青混合料有重要影响,因此将粒径为0.075 mm集料的筛孔通过率在基准通过率的基础上小范围地上下浮动2%。

3.2 试验结果分析

根据沥青膜厚和集料比表面积初定沥青用量,即油石比为5.4%,以试件空隙率、矿料间隙率及稳定度作为评价指标,正交试验结果如图2所示。对各指标进行试验结果的极差分析[19],结果见表4。

分析表4可知:粒径为0.075,2.36,4.75 mm的集料对试验结果有较大的影响,同时也佐证了矿粉用量对级配的重要性。有研究表明,沥青混合料的体积参数对沥青路面的路用性能有着重要的影响[20]。因此,本研究以矿料间隙率和空隙率为控制指标进行级配的设计与分析。在多因素方差分析中,常用预估的边际平均值考察某一变量对试验结果的影响。因此,本研究根据关键粒径预估矿料间隙率和空隙率的边际平均值,然后进行级配的设计与分析。关键粒径的预估边际平均值如图3所示。

分析图3可知:当粒径为13.2,9.5 mm集料的通过率增大时,矿料间隙率和空隙率呈增大趋势,这是因为粗集料颗粒之间相互接触形成了骨架结构,同时用于填充骨架结构的细集料的含量有所减小。建议粒径为13.2 mm集料通过率的范围为88%~100%,粒径为9.5 mm集料通过率的范围为60%~75%。当粒径为4.75 mm集料的通过率增大时,矿料间隙率呈减小趋势,空隙率呈增大趋势;当通过率大于41%时,矿料间隙率和空隙率受到通过率变化的影响较大。因此,建议粒径为4.75 mm集料通过率的范围为31%~

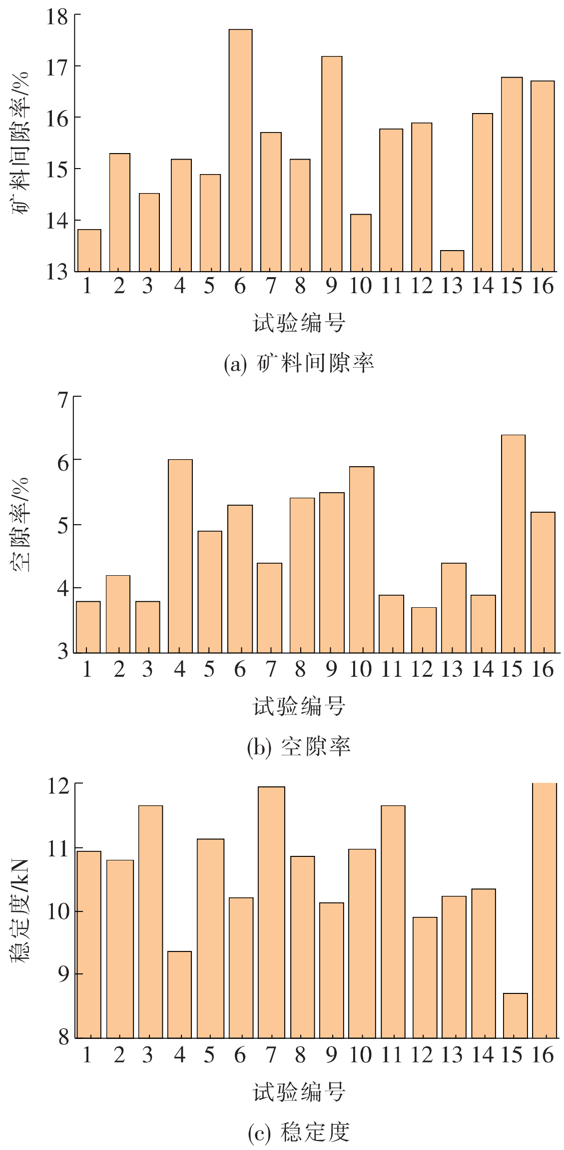


图2 正交试验结果

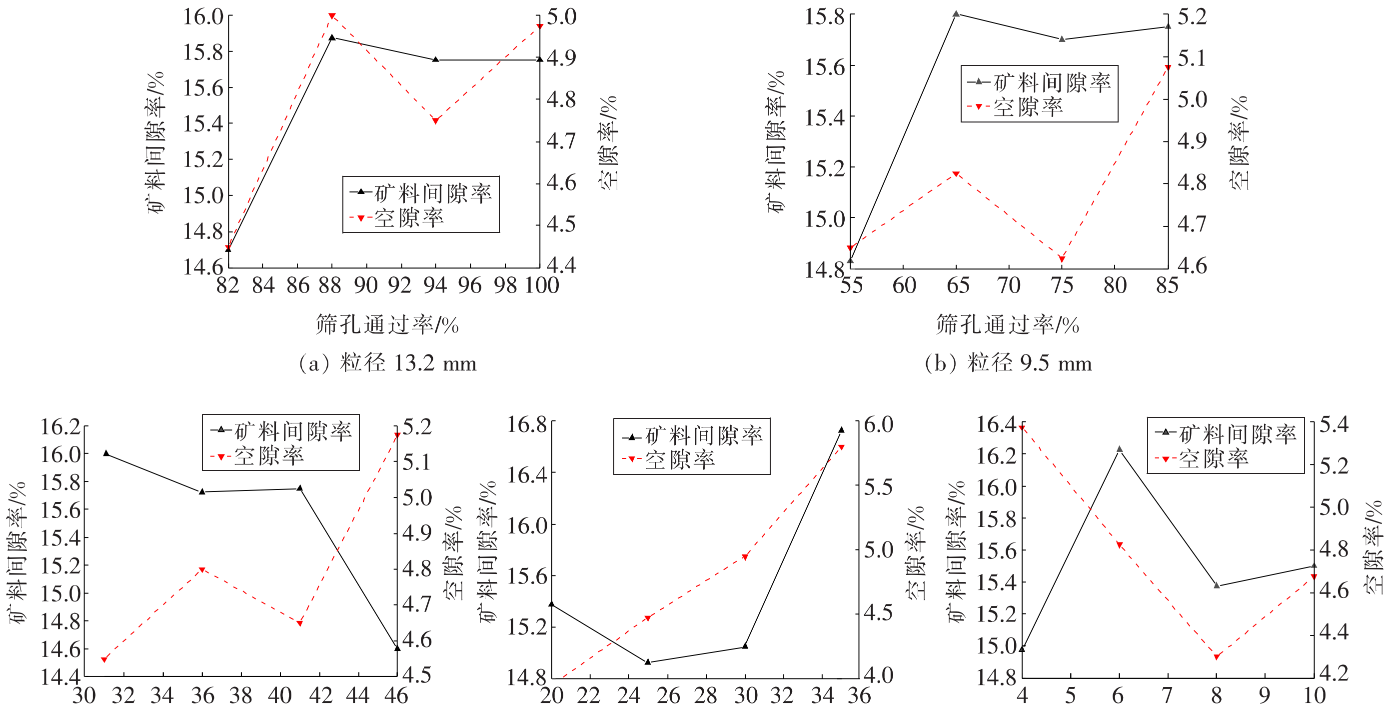
Fig. 2 Results of orthogonal test

表4 试验结果的极差分析

Table 4 Range analysis of test results

筛孔孔径/mm	各指标的极差		
	空隙率/%	矿料间隙率/%	稳定度/kN
13.2	0.6	1.2	0.69
9.5	0.5	1.0	0.42
4.75	0.6	1.4	1.09
2.36	1.9	1.7	1.87
0.075	1.1	1.3	0.88

41%,粒径为2.36,0.075 mm集料通过率的范围分别为20%~30%,6%~10%。依据集料公称最大粒径筛余量不超过10%的原则,将13.2 mm筛孔下限的集料通过率调整为90%。同时根据正交试验结果并结合相关橡胶沥青的级配设计经验,确定几档细集料(粒径分别为0.15,0.30,0.60,1.18 mm)的通过率范围,最终得到CR/SHMA-13混合料的级配范围,结果见表5。



(a) 粒径 13.2 mm　(b) 粒径 9.5 mm
(c) 粒径 4.75 mm　(d) 粒径 2.36 mm　(e) 粒径 0.075 mm

图 3　关键粒径的预估边际平均值

Fig. 3　Estimated marginal mean values of key particle sizes

表 5　CR/SHMA-13 混合料级配范围

Table 5　Gradation range of CR/SHMA-13 mixture　　%

级配范围	通过下列筛孔(mm)的质量百分率									
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
上限	100	100	75	41	30	22	19	16	12	10
下限	100	90	60	31	20	16	13	10	8	6

4　路用性能分析

为进一步判断 CR/SHMA-13 级配设计的优劣，通过车辙试验、小梁弯曲试验、浸水马歇尔试验对 CR/SHMA-13 沥青混合料的路用性能进行评价。在 CR/SHMA-13 级配设计中选取中值级配，最佳油石比为 5.4%，而在 AC-13 和 SMA-13 中值级配的设计中，最佳油石比分别为 6.2%和 5.0%。

4.1　高温稳定性

根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)，通过车辙试验对混合料高温稳定性进行评价，试验结果见表 6。

分析表 6 可知：混合料 CR/SHMA-13 具有良好的抗车辙能力，且与混合料 SMA-13 的抗车辙能力相当，主要原因是在级配设计时对混合料 CR/SHMA-13 进行了混合料骨架结构的设计。

表 6　车辙试验结果

Table 6　Results of rutting test

混合料类型	动稳定度/(次·mm^{-1})				变异系数/%
	结果 1	结果 2	结果 3	均值	
CR/SHMA-13	7 851	7 198	8 234	7 761	7.2
AC-13	5 145	4 767	5 238	5 050	10.2
SMA-13	7 643	7 957	6 958	7 519	7.4

4.2　低温抗裂性

根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)，通过小梁弯曲试验对混合料低温抗裂性能进行评价。试验温度为−10 ℃，加载速率为 50 mm/min，试验结果见表 7。

分析表 7 可知：3 种级配的混合料均有良好的低温抗裂性，与混合料 AC-13 相比，混合料 CR/SHMA-13 具有更大的抗弯拉强度和弯曲挠度，且其低温性能略优于混合料 SMA-13。

表 7 小梁弯曲试验结果

Table 7 Results of beam bending test

混合料类型	抗弯拉强度 R_B/MPa	最大弯拉应变 ε_B/($\times 10^{-6}$)	弯曲劲度模量 S_B/MPa
CR/SHMA-13	9.27	3 273	2 832
AC-13	8.84	2 851	3 101
SMA-13	8.35	3 015	2 769
技术要求	—	≥ 2 500	—

4.3 水稳定性

根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011),通过浸水马歇尔试验对沥青混合料的水稳定性进行评价,试验结果见表 8。

表 8 浸水马歇尔试验结果

Table 8 Results of immersed Marshall test

混合料类型	浸水马歇尔稳定度/kN	马歇尔稳定度/kN	浸水残留稳定度/%
CR/SHMA-13	11.38	12.27	92.7
AC-13	9.25	10.73	86.2
SMA-13	11.31	12.16	93.0
技术标准	—	—	≥ 85

分析表 8 可知:混合料 CR/SHMA-13 的水稳定性与混合料 SMA-13 的相当,但优于传统混合料 AC-13。

综上所述,用本研究提出的级配设计得到的混合料 CR/SHMA-13 满足规范要求的高、低温性能及水稳定性要求,其路用性能与 SMA-13 的相当,但比传统混合料 AC-13 的更优。

5 结论

以粗集料骨架间隙率及骨架强度为控制指标,对粗集料进行了逐级填充试验,然后设计了 CR/SHMA 复合改性沥青混合料的正交试验并对级配进行了优化,最终得出如下主要结论:

1) 基于粗集料的逐级填充试验,得到了粗集料骨架结构最密实、最稳定时各级粒径集料的最佳比例。

2) 设计正交试验对混合料 CR/SHMA-13 的级配进行了优化,并根据正交试验结果推荐了适用于 CR/SHMA-13 混合料的级配范围。

3) 采用本研究提出的级配设计得到的混合料 CR/SHMA-13 的路用性能与 SMA-13 混合料的相当,但比传统混合料 AC-13 的更优。

〔参考文献〕

[1] WANG H, ZHOU Z, HUANG W, et al. Investigation of asphalt mixture permanent deformation based on three-dimensional discrete element method[J]. Construction and Building Materials, 2021, 272(4): 121808.

[2] LYU Q, HUANG W, ZHENG M, et al. Influence of gradation on asphalt mix rutting resistance measured by Hamburg wheel tracking test[J]. Construction and Building Materials, 2020, 238: 117674.

[3] 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):1-8.
TAN Yi-qiu, XING Chao, REN Jun-da, et al. Research on mesostructured characteristics of asphalt mixture based on particle packing theory[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(7): 1-8.

[4] 黄优,刘朝晖,王旭东,等. 基于骨架最紧密状态的沥青混合料配合比设计方法[J]. 中外公路,2016,36(5):216-221.
HUANG You, LIU Zhao-hui, WANG Xu-dong, et al. Design method of asphalt mix ratio based on the closest skelet on state[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2016, 36(5): 216-221.

[5] 蔡旭,祝凤丹,吴旷怀,等. 沥青混合料骨架稳态参数及模型[J]. 中国公路学报,2019,32(2):39-46.
CAI Xu, ZHU Feng-dan, WU Kuang-huai, et al. Steady state parameters and model for asphalt mixture skeletons[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(2): 39-46.

[6] 张黎红,董则军,郭绍成. 矿料级配对温拌橡胶沥青混合料压实特性的影响[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2017,36(8):44-48.
ZHANG Li-hong, DONG Ze-jun, GUO Shao-cheng. Influence of aggregate gradation on compaction characteristics of warm mix rubber asphalt mixture[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2017, 36(8): 44-48.

[7] 李平,王秉纲,张争奇. 基于高温性能的沥青混合料级配设计方法[J]. 交通运输工程学报,2010,10(6):9-14.
LI Ping, WANG Bing-gang, ZHANG Zheng-qi. Design method of asphalt mixture aggregate gradation

based on high-temperature performance[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10 (6): 9-14.

[8] 陈渊召，李振霞. 橡胶颗粒沥青混合料的级配设计[J]. 公路交通科技，2012，29(11)：19-24.
CHEN Yuan-zhao, LI Zhen-xia. Gradation design of crumb rubber asphalt mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(11): 19-24.

[9] 周纯秀，谭忆秋. 橡胶颗粒沥青混合料除冰雪性能的影响因素[J]. 建筑材料学报，2009，12(6)：672-675.
ZHOU Chun-xiu, TAN Yi-qiu. Study of deicing performance of crumb rubber granular asphalt mixture [J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(6): 672-675.

[10] 王新强，王国清，王庆凯，等. 高掺量胶粉改性沥青 SRA-20 混合料设计及性能研究[J]. 硅酸盐通报，2018，37(9)：2 985-2 990.
WANG Xin-qiang, WANG Guo-qing, WANG Qing-kai, et al. High content rubber powder modified asphalt SRA-20 mixture design and performance research[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(9): 2 985-2 990.

[11] 陈忠达，袁万杰，高春海. 多级嵌挤密实级配设计方法研究[J]. 中国公路学报，2006，19(1)：32-37.
CHEN Zhong-da, YUAN Wan-jie, GAO Chun-hai. Research on design method of multilevel dense built-in gradation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1): 32-37.

[12] 吴传海. 基于贝雷法的逐段填充对混合矿料骨架特性影响分析[J]. 公路，2010(7)：161-167.
WU Chuan-hai. Analysis of the effect of section-by-section filling on the skeleton characteristics of mixed minerals based on the beryl method [J]. Highway, 2010(7): 161-167.

[13] 张业茂，陈拴发，胡光伟. 逐级填充式沥青混合料粗集料骨架级配设计[J]. 武汉理工大学学报，2011，33(11)：44-48，59.
ZHANG Ye-mao, CHEN Shuan-fa, HU Guang-wei. Coarse aggregate gradation design of asphalt mixture by gradually filling test[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(11): 44-48, 59.

[14] 纪伦，李云良，孙维刚，等. 沥青混合料中矿粉用量、细度和密度指标的控制[J]. 公路交通科技，2014，31(8)：25-29，52.
JI Lun, LI Yun-liang, SUN Wei-gang, et al. Controlling dosage, fineness and density index of mineral filler in asphalt mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31 (8): 25-29, 52.

[15] 张肖宁，王绍怀，吴旷怀，等. 沥青混合料组成设计的 CAVF 法[J]. 公路，2001(12)：17-21.
ZHANG Xiao-ning, WANG Shao-huai, WU Kuang-huai, et al. CAVF method of asphalt mixture composition design[J]. Highway, 2001 (12): 17-21.

[16] 吕松涛，张超，樊喜雁，等. 水泥替代矿粉对橡胶沥青混合料性能的影响[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版)，2019，16(4)：57-63.
LYU Song-tao, ZHANG Chao, FAN Xi-yan, et al. The effect of cement substituting mineral powder on the performance of rubber asphalt mixture[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science), 2019, 16(4): 57-63.

[17] 文华，费占黎. 基于分形几何理论的橡胶沥青混合料配合比设计[J]. 兰州交通大学学报，2016，35(3)：24-28.
WEN Hua, FEI Zhan-li. Design of mix proportion of rubber-asphalt mixture based on fractal geometric theory [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2016, 35(3): 24-28.

[18] 马峰，张耀，傅珍，等. 新型橡胶粉和抗车辙剂复合改性沥青混合料级配优化[J]. 武汉大学学报(工学版)，2019，52(8)：687-693.
MA Feng, ZHANG Yao, FU Zhen, et al. New rubber powder and anti-rutting agent compound optimization of modified asphalt mixture grading[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2019, 52(8): 687-693.

[19] 高琼，田军. 正交设计法在环保型橡胶沥青试验配比中的应用研究[J]. 公路工程，2019，44(6)：115-118.
GAO Qiong, TIAN Jun. Study on the application of orthogonal design method in the matching of environmental protection rubber asphalt test[J]. Highway Engineering, 2019, 44(6): 115-118.

[20] 刘卫东，冯建华，覃攀越. 沥青混合料体积参数 VMA、VCA 与路用性能关系研究[J]. 盐城工学院学报(自然科学版)，2018，31(2)：1-7.
LIU Wei-dong, FENG Jian-hua, QIN Pan-yue. Research on relationship between volume parameters VMA, VCA and pavement performance of asphalt mixture[J]. Journal of Yancheng Institute of Technology(Natural Science Edition), 2018, 31(2): 1-7.