

温拌橡胶沥青混合料级配路用性能试验研究

王贤良^{1,2}, 陈 尚³, 刘 昭⁴

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 安康市住房和城乡建设局, 陕西 安康 725000;

3. 安康市市政设施管理处, 陕西 安康 725000; 4. 安康市公路管理局, 陕西 安康 725000)

摘要: 本文通过试验对不同级配温拌橡胶沥青混合料路用性能的影响规律进行研究。对各粒径集料含量进行调整, 选取四种具有代表性的沥青混合料: 最佳油石比分别为 6.7%、7.5%、6.5% 和 7.4%。研究了不同级配下各沥青混合料的高温、低温、疲劳性能和水稳定性能, 结果表明: 亚利桑那州的沥青混合料具有更好的高温性能、疲劳性能及水稳定性能; 适当提高 2.36~4.75 mm 含量可提高混合料的路用性能; 可结合地区具体条件选择合适的沥青混合料进行设计和施工。最后, 采用最大理论密度曲线对本文的研究结果进行了验证。

关键词: 温拌; 橡胶沥青; 温拌剂; 级配; 路用性能

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)06-0895-06

Study on the road performance of warm mixed rubber asphalt mixture gradations

WANG Xianliang^{1,2}, CHEN Shang³, LIU Zhao⁴

(1. School of highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Ankang Housing and Urban-rural Development Bureau, Shaanxi Ankang 725000, China;

3. Ankang Municipal Facilities Management Office, Shaanxi Ankang 725000, China;

4. Ankang Highway Administration, Shaanxi Ankang 725000, China)

Abstract: In this paper, the influence of different gradations on the road performance of warm-mix rubber asphalt mixture is studied through experiments. Four representative asphalt mixtures were selected by adjusting the aggregate content of each particle size; the optimum asphalt-aggregate ratio is 6.7%, 7.5%, 6.5% and 7.4%. By studying the high-temperature performance, low-temperature performance, fatigue performance and water stability of asphalt mixtures with different gradations, the results indicated that the asphalt mixture grading proposed by Arizona has better high temperature performance, fatigue performance and water stability performance, and the road performance of mixtures can be improved by properly increasing the content of 2.36~4.75 mm. Combined with the specific conditions of the area, a right asphalt mixture can be selected for design and construction. Finally, the maximum theoretical density lines were used to verify the results of this study.

Key words: warm mixing; rubber asphalt mixture; warm-mixed agent; gradation; road performance.

橡胶沥青温拌技术是一种节能减排, 绿色环保的沥青铺面技术, 不仅能将胶粉废物利用, 解决橡胶沥青施工过程中不易压实的难题, 还能延长沥青路面施工季节, 延长路面服役寿命等, 是一项具有双重节能环保效益的沥青铺面技术。

国内外就橡胶沥青技术已经开展了相当丰富的

研究^[1-8], 关于温拌橡胶沥青技术也有部分学者进行了研究。周启伟^[9]研究了 Sasobit 和 EWMA-1 两种温拌剂对沥青混合料路用性能的影响, 研究结果表明, Sasobit 的掺量不宜超过 3%, EMWA-1 的掺量不宜超过 0.6%。Yu^[10]研究了五种温拌剂, Evotherm-DAT, Evotherm-3G, Sasobit, 56 # 石

蜡和 Aspha-Min 对温拌橡胶沥青路用性能的影响. Hyun HwanKim^[11] 研究了 LEADCAP 和 Sasobit 温拌剂对温拌橡胶沥青短期和长期老化性能的影响, 研究表明, 温拌剂可有效提高温拌橡胶沥青的老化性能. Farshad^[12] 研究了 Sasobit 再生剂掺量对再生沥青混合料性能的影响, 研究表明 5.5% 的掺量和 30% 的旧混合料掺量时, 混合料的路用性能最好. Yang^[13] 研究了表面活性剂对温拌橡胶沥青混合料力学性能的影响, 研究表明活性剂不仅可以提高混合料的强度, 还可以改善混合料的低温性能.

通过归纳和总结已有温拌橡胶沥青技术的相关研究发现, 各国或地区都提出温拌橡胶沥青混合料的级配组成, 但是何种级配下的温拌沥青混合料性能更优没有形成完全一致的认识. 因此, 本文结合各地区的温拌橡胶沥青混合料级配组成, 研究四种级配下温拌沥青混合料的路用性能, 同时分析 2.36~4.75 mm 集料含量与路用性能之间的关系, 明确级配优化机理, 以更好地指导温拌橡胶沥青混合料的设计和施工.

1 原材料性质

试验采用 20 目的橡胶粉和 70 号沥青制备的橡胶沥青, 沥青材料性质见表 1. 矿粉选用辽宁小阳屯制造的矿粉, 水泥为 P.O 42.5 水泥, 矿粉和水泥的各项技术性质见表 2, 集料的各项技术标准见表 3 和表 4.

表 1 橡胶沥青技术性质

Tab. 1 Technical Properties of Rubber Asphalt

物理性质	数值
密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.049
针入度(0.1 mm)25℃	351
软化点/℃	69.5
粘度, 177℃/Pa·s	2.94
弹性恢复(25℃)	82

表 2 矿粉、水泥技术性质

Tab. 2 Technical Properties of Mineral powder and cement

物理性质	矿粉	水泥
表观密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	2.61	2.70
亲水系数	0.60	—
含水率	0.4	—

表 3 粗集料技术性质

Tab. 3 Technical Properties of Coarse aggregate

粒径/mm	表观密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	表干密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	吸水率 /%
2.36~4.75	2.703	2.615	2.013
4.75~9.5	2.729	2.701	0.581
9.5~13.2	2.748	2.717	0.642
13.2~16	2.736	2.721	0.312

表 4 细集料技术性质

Tab. 4 Technical Properties of Fine aggregate

粒径/mm	0.075~ 0.15	0.15~ 0.3	0.3~ 0.6	0.6~ 1.18	1.18~ 2.36
表观密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	2.681	2.723	2.723	2.723	2.732

2 沥青混合料级配设计

橡胶沥青最早源于美国, 并且橡胶沥青混合料在美国各州都得到了很好的发展, 其中亚利桑那州、加利福尼亚州、佛罗里达州及德克萨斯州应用最为广泛, 并且各州都提出了各自的橡胶沥青混合料级配范围. 其中亚利桑那州级配设计时考虑橡胶粉包含在混合料中, 其油石比比常规的混合料要高, 德州的橡胶沥青混合料级配设计是模仿 SMA 级配设计方法, 是采用粗集料建立骨架嵌挤结构, 然后采用细集料及橡胶沥青来填充骨架间隙. 国内对橡胶沥青混合料的研究, 主要有交通部公路科学研究院、山东交科院及其他高校. 各地的橡胶沥青混合料级配设计中值见表 5.

现选取上述四种级配曲线, 确定各筛孔含量如表 6, 分别标注为 A、B、C、D.

参照普通沥青混合料配合比设计方法, 采用马歇尔击实仪成型马歇尔试件, 确定 A 型沥青混合料的最佳油石比为 6.7%, B 级配下的沥青混合料最佳油石比为 7.5%, C 型沥青混合料的最佳油石比为 6.5%, D 型沥青混合料的最佳油石比为 7.4%.

表 5 不同地区橡胶沥青混合料的中值级配

Tab. 5 Median grade of rubber asphalt mixture in different regions

混合料类型	各级筛孔/mm 通过质量百分率									
	19	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
亚利桑那州	100	90	72.5	35	18	—	—	—	—	1.25
德州	100	78.5	60	37.5	22	17	14	10.5	8	7
山东交科院	100	92.5	60	26.5	16	—	—	—	—	3.5
公路院	100	97.5	66.5	30	24	19	15.5	12.5	10	8

表 6 四种沥青混合料级配

Tab. 6 Mixture grading of Four kinds of asphalt

级配类型	各级筛孔(方孔筛/mm)的通过质量百分率/%									
	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
A	100	93.2	69.8	32.7	16.8	12.9	8.2	4.5	3.2	2.8
B	100	92.5	67.8	35.9	23.2	18.9	15.1	11.2	9.4	3.9
C	100	93.5	68.2	27.2	18	13.3	7.4	3.8	2.9	2.5
D	100	97.5	66.5	29	22.4	19	15.5	12.5	10	4

注：表中 A 代表亚利桑那州，B 代表德州，C 代表山东交科院，D 代表公路院。

3 温拌橡胶沥青混合料级配路用性能研究

参照普通沥青混合料路用性能研究方法，成型相应的温拌橡胶沥青混合料，其中橡胶沥青中胶粉掺量为内掺 16%，温拌剂采用 Sasobit，掺加剂量为沥青质量的 2.5%，对比四种级配下沥青混合料的高温、低温、疲劳及水稳定性能，以确定较好的级配，指导温拌橡胶沥青混合料在工程中的实践。

3.1 高温性能

根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011)中的沥青混合料试件制作方法(轮碾法)制备车辙块，成型后用马歇尔试模轻轻来回碾压整平试件。采用车辙试验测得 45 min 和 60 min 时沥青混合料的垂直变形，计算温拌橡胶沥青混合料的高温性能，试验结果见表 7。

通过对表 7 进行分析可知，四种温拌橡胶沥青混合料都具有较好的高温性能，但是亚利桑那州级配下的沥青混合料具有相对较好的高温性能，在温度高的地区可优先选用亚利桑那州级配下的沥青混合料。

表 7 四种温拌橡胶沥青混合料高温性能

Tab. 7 High temperature performance of four mixed rubber asphalt mixtures

混合料类型	车辙动稳定度/次·mm ⁻¹			
	1	2	3	平均
A	6 345	6 654	6 789	6 596
B	5 578	5 872	5 924	5 791
C	5 034	5 314	5 154	5 167
D	4 833	4 679	4 524	4 678

3.2 低温性能

弯曲试验所用的小梁试件为碾压成型后切制的长 250 mm±2.0 mm、宽 30 mm±2.0 mm、高 35 mm±2.0 mm 的棱柱体小梁，其跨径为 200 mm±0.5 mm。采用温度-10℃±0.5℃，加载速率宜为 50 mm/min，每个级配做 6 组试件，试验结果见表 8。

表 8 四种温拌橡胶沥青混合料低温性能

Tab. 8 Low temperature performance of four mixed rubber asphalt mixtures

混合料类型	抗弯拉强度	劲度模量	破坏应变/μ ϵ
	/MPa	/MPa	
A	7.90	2 688	2 937
B	7.87	2 732	2 878
C	7.92	2 678	2 957
D	7.78	2 654	2 931

通过对表 8 分析可知,四种温拌橡胶沥青混合料都具有较好的低温性能,且低温性能指标比较接近,这说明不同温拌橡胶沥青混合料的低温性能没有太大区别。

3.3 疲劳性能

采用疲劳试验研究温拌橡胶沥青混合料的疲劳性能,根据沥青混合料级配组成及油石比成型车辙试件,然后切割成 250 mm、宽 50 mm、高 50 mm 的小梁。疲劳试验采用应变控制式,控制应变变为 300 $\mu\epsilon$,试验温度为 15 $^{\circ}\text{C}$ 。将沥青混合料的模量降到初始时刻模量的 50% 时确定为疲劳破坏点,此时荷载的循环次数确定为沥青混合料的疲劳寿命,试验结果见表 9。

表 9 四种温拌橡胶沥青混合料疲劳性能

Tab.9 Fatigue properties of four mixed rubber asphalt mixtures

混合料类型	疲劳寿命/次
A	175 623
B	165 652
C	163 462
D	166 453

通过对表 9 进行分析可知,四种温拌橡胶沥青混合料都具有较好的抗疲劳性能。其中亚利桑那州级配下混合料的疲劳性能要好于其他级配下的沥青混合料,在车流量比较大的地区可优先选用亚利桑那州级配下的沥青混合料。

3.4 水稳定性能

水损害是沥青路面早期病害的重要形式,采用浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验来研究四种类型混合料的水稳定性,评价两类混合料抗水损害的能力。研究结果见表 10 和表 11。

表 10 四种温拌橡胶沥青混合料浸水马歇尔试验结果

Tab.10 Results of four kinds of mixed rubber asphalt mixture water immersion Marshall test

混合料类型	马歇尔 稳定度/kN	浸水马歇尔 稳定度/kN	残留稳定度 $S_0/\%$
A	10.7	10.1	94.8
B	10.2	9.2	90.6
C	9.8	8.7	88.8
D	9.5	8.5	89.5

表 11 四种温拌橡胶沥青混合料冻融劈裂试验结果

Tab.11 Results of freeze-thaw splitting test of four mixed rubber asphalt mixtures

混合料类型	劈裂抗拉强度 /MPa	冻融劈裂抗 拉强度/MPa	TSR/%
A	0.946	0.777	82.1
B	0.912	0.742	81.4
C	0.924	0.721	78.0
D	0.915	0.701	76.6

通过对表 10 和表 11 进行分析可知,四种温拌橡胶沥青混合料都具有较好的水稳定性能,其中亚利桑那州级配下沥青混合料的水稳定性要优于德克萨斯州级配下的沥青混合料,在降水丰富的地区可予以优先选用。

4 级配优化机理分析

4.1 级配分析

相关研究表明^[14-15],沥青混合料中 2.36~4.75 mm 集料含量影响沥青混合料的性能,通过分析 2.36~4.75 mm 集料含量与温拌橡胶沥青的路用性能的相互关系,以指导温拌沥青的级配设计。路用性能与 2.36~4.75 mm 含量之间关系如图 1 所示。

如图 1 所示,2.36~4.75 mm 含量对温拌橡胶沥青混合料的低温性能影响较小,而混合料的高温性能、疲劳性能以及抗水损害性能都与 2.36~4.75 mm 含量具有较强的相关性,从图 1 还可以发现,在级配要求的范围内选取较高(16%)的 2.36~4.75 mm 含量,可以提高混合料的路用性能。

4.2 级配优化验证

采用最大理论密度曲线来验证前述级配研究结果。最大理论密度曲线是通过大量试验提出的一种理想曲线。该理论认为固体颗粒按粒度大小,有规则的组合排列,粗细搭配,可以得到密度最大、空隙率最小的混合料。最大理论密度曲线集料各级配粒径(d_i)与通过量(p_i)的关系为

$$p_i = 100 \left(\frac{d_i}{D} \right)^{0.5} \quad (1)$$

式中: d_i 为集料各级粒径; p_i 为集料各级粒径通过率,%; D 为矿质混合料最大粒径,mm。

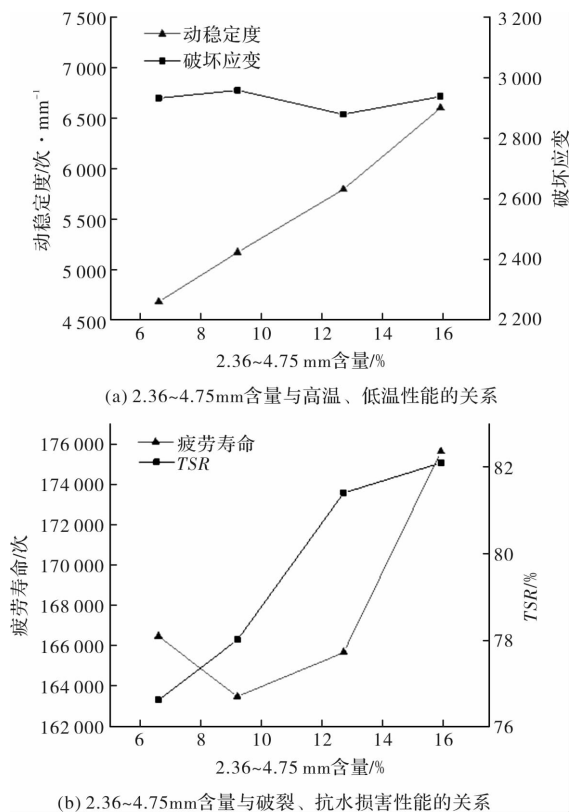


图1 路用性能与2.36~4.75 mm含量之间关系

Fig. 1 Relationship between road performance and content of 2.36~4.75 mm

通过计算发现, 2.36~4.75 mm 集料的含量为14.8%时, 混合料的密度最大. 与上述试验研究中2.36~4.75 mm 含量15.9%时, 混合料路用性能最佳相匹配. 这说明本文的研究结果是合理可信的.

5 结论

通过试验对不同级配对温拌橡胶沥青混合料路用性能的影响规律进行研究, 本文所做主要工作和得到的结论如下:

(1) 基于亚利桑那州和德克萨斯州的级配设计, 提出了四种沥青混合料的级配组成, 采用马歇尔试验, 确定四种温拌橡胶沥青混合料的最佳油石比分别为6.7%、7.5%、6.5%和7.4%.

(2) 亚利桑那州级配下的温拌沥青混合料在保证低温性能的前提下, 其高温性能、疲劳性能及抗水损害性能均要优于其他级配下的混合料, 可结合具体条件优先选择亚利桑那州级配下的温拌沥青混合料进行设计和施工.

(3) 在合理的级配范围内, 2.36~4.75 mm 筛

孔的集料含量越多, 温拌橡胶沥青混合料的路用性能越好, 可选择适当的筛孔的集料进行温拌橡胶沥青混合料的设计和施工.

参考文献 References

- [1] 肖川. 橡胶沥青及混合料高温性能与施工工艺研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2009.
XIAO Chuan. Study on high temperature performance and construction technology of rubber asphalt and mixture[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2009.
- [2] SUBHY A, PRESTI D L. Fatigue and healing properties of low environmental impact rubberized bitumen for asphalt pavement[J]. Coatings, 2017, 7(5): 666-675.
- [3] 高诗龙, 洪盛祥. 基于 Superpave 设计方法的橡胶沥青混合料老化特征研究[J]. 中外公路, 2016, 36(6): 260-263.
GAO Shilong, HONG Shengxiang. Study on aging characteristics of rubber asphalt mixture based on superpave design method[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2016, 36(6): 260-263.
- [4] 虞峥, 彭德清, 谢鑫华. 橡胶沥青应力吸收层设计[J]. 中外公路, 2015, 35(2): 213-217.
YU Zheng, PENG Deqing, XIE Xinhua. Design of absorption layer for rubber asphalt stress design[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2015, 35(2): 213-217.
- [5] 周纯秀, 谭忆秋. 橡胶颗粒沥青路面应用技术研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2008, 4(S1): 18-23.
ZHOU Chunxiu, TAN Yiqiu. Research on application technology of rubber granular asphalt pavement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 4(S1): 18-23.
- [6] LIU W, YAN K, GE D, et al. Effect of APAO on the aging properties of waste tire rubber modified asphalt-binder[J]. Construction & Building Materials, 2018, 175: 333-341.
- [7] PRESTI D L, IZQUIERDO M A, CARRIÓN A J D B. Towards storage-stable high-content recycled tyre rubber modified bitumen[J]. Construction & Building Materials, 2018, 172: 106-111.
- [8] 段功臻. 贝雷法用于橡胶粉改性沥青混合料的级配优化研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2017.

- DUAN Gongli. Gradation optimization of crumb rubber modified asphalt mixture based on bailey design method[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2017.
- [9] 周启伟, 吴雪柳, 杨波. 温拌剂对橡胶沥青及沥青混合料路用性能影响分析[J]. 中外公路, 2016, 36(4): 302-306.
- ZHOU Qiwei, WU Xueliu, YANG bo. Analysis of the influence in warm mixing agent on road performance of rubber asphalt and asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2016, 36(4): 302-306.
- [10] YU H, LENG Z, DONG Z, et al. Workability and mechanical property characterization of asphalt rubber mixtures modified with various warm mix asphalt additives[J]. Construction & Building Materials, 2018, 175: 392-401.
- [11] KIM H H, MAZUMDER M, LEE S J, et al. Characterization of recycled crumb rubber modified binders containing wax warm additives[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2018, 5(3).
- [12] FARSHAD S K, FAKHRI M, AZAMI A. Evaluation of warm mix asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement and crumb rubber [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 165.
- [13] YANG X, YOU Z, HASAN M R M, et al. Environmental and mechanical performance of crumb rubber modified warm mix asphalt using evotherm[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 159.
- [14] 徐慧宁, 谭忆秋, 李晓民, 等. 级配曲线走向与沥青混凝土空隙率关系的研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2012, 36(3): 458-462.
- XU Huining, TAN Yiqiu, LI Xiaomin. Research on the relationship between grading curve trend and air voids in asphalt mixtures[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2012, 36(3): 458-462.
- [15] 邢明亮, 陈拴发, 陈华鑫, 王秉纲. 级配组成对排水性混合料空隙率影响研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(17): 62-65.
- XING Mingliang, CHENG Shuanfa, CHENG Huaxin, Wang Binggang. Research on influence of gradation to air void of porous asphalt mixture[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(17): 62-65.

(编辑 吴海西)

(上接第 889 页)

- [19] 周莉, 席光. 高层建筑群风场的数值分析[J]. 西安交通大学学报, 2001, 35(5): 471-474.
- ZHOU Li, XI Guang. Numerical analysis of wind field in high-rise buildings[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 35(5): 471-474.
- [20] XIE Zhenyu, YANG Ne. Optimization design tactics for high-rise building shape on improvement of outdoor wind environment[J]. Architectural Journal, 2013, 4(1): 76-81.
- [22] BIAO Li, JING Liu, MEI Lingli. Wind tunnel study on the morphological parameterization of building nonuniformity [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 121: 60-69.
- [23] TETSU Kubotaa, MASAO Miurab, YOSHIHIDE Tominagac, et al. Wind tunnel tests on the relationship between building density and pedestrian-level wind velocity: Development of guidelines for realizing acceptable wind environment in residential neighborhoods[J]. Building and Environment, 2008, 43(10): 1699-1708.

(编辑 吴海西)