doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.03.011

橡胶沥青低温评价指标

谭忆秋, 符永康, 纪 伦, 张 磊

(哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 150090 哈尔滨)

摘 要: 针对5 ℃延度指标在评价橡胶沥青低温性能上的局限性,为找寻能更好评价橡胶沥青低温性能的评价指标,通过BBR试验,对试验室制备的薄膜老化和压力老化橡胶沥青低温评价指标展开研究,分析基于BBR试验获取的劲度模量、劲度模量变化率、PG分级温度、低温连续分级温度、k指标及综合考虑沥青模量和松弛能力的评价指标S_A等橡胶沥青低温评价指标. 试验结果表明:随着橡胶粉的加入,沥青的低温抗裂性能显著提高,单一的S或m指标评价橡胶沥青低温性能存在一定片面性,兼顾考虑沥青模量和松弛能力的C_T、k及S_A指标能更加准确地反映和评价橡胶沥青的低温性能. 通过与橡胶沥青混合料低温弯曲应变能密度指标进行相关性分析及综合比选,得出结论:在工程上优先推荐采用k、C_T指标作为橡胶沥青低温性能的评价指标;进行研究工作时优先考虑S_A指标作为橡胶沥青低温性能的评价指标.

关键词: 弯曲梁流变试验;橡胶沥青;低温性能;评价指标;相关性分析

中图分类号: U414 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2016)03-0066-05

Low-temperature evaluation index of rubber asphalt

TAN Yiqiu, FU Yongkang, JI Lun, ZHANG Lei

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

Abstract: Aiming at the limitations of 5 ℃ ductility on evaluating the low-temperature properties, in order to find an index to evaluate the low-temperature properties of rubber asphalt more accurately, based on the bending beam rheometer test, the research on the low-temperature evaluation indexes of TFOT-aged and PAV-aged rubber asphalt which processed in the laboratory were carried out. The analysis was made on the low-temperature evaluation indexes of rubber asphalt based on the bending beam rheometer such as stiffness modulus, the rate of stiffness modulus, performance grade temperature, continuous grade temperature, k value and the S_A index which take asphalt modulus and relaxation capacity into consideration. Test results showed that, with the rubber powder adding into asphalt, its low temperature crack resistance improved significantly, one-sidedness was existed to evaluate the low-temperature properties of rubber asphalt by a single S index or a single m index; indexes which take asphalt modulus and relaxation capacity into consideration including C_T index and k index and S_A index were better applied to evaluate the low-temperature properties of rubber asphalt. By doing correlation analysis between these low-temperature evaluation indexes of rubber asphalt with the bending strain energy density of rubber asphalt mixture and by doing comprehensive comparison, conclusions were made as follows, on the substantial projects we gave priority to recommend k value and C_T index as the low-temperature evaluation indexes, while undertaking research work, we gave priority to recommend S_A index as the low-temperature evaluation index of rubber asphalt.

Keywords: bending beam rheometer test; rubber asphalt; low-temperature properties; evaluation indexes; correlation analysis

橡胶沥青作为一种道路新材料具有优良的性能,在寒冷的北方地区应用得越来越广泛. 但作为新材料,并没有较好的低温性能评价方法和评价指标,低温评价体系也不够完善,使橡胶沥青在寒冷地区的应用受到了很大的限制[1]. 现阶段我国规范仍采用5 ℃延度指标评价橡胶沥青的低温性能. 但相关研究[2]表明5 ℃延度指标并不能很好地表征橡胶沥青在低温下的延展性能,同时作为改性沥青的低温评价指标还需进一步研究和完善. 基于现行我国橡胶沥青低温评价指标上存在的局限性,对橡胶

收稿日期: 2014-12-30.
基金项目: 国家杰出青年科学基金(51225803).
作者简介: 谭忆秋(1968—),女,博士生导师,长江学者特聘教授.
通信作者: 谭忆秋,yiqiutan@163.com.

沥青低温评价指标展开研究有重要意义. 目前对橡胶沥青低温性能研究可以在基质沥青低温性能研究基础上进一步开展和创新. 而在基质沥青低温性能研究方面，美国 SHRP 在此方面作出了卓越的贡献，特别是基于流变学的弯曲梁流变试验(BBR)目前已经成为研究沥青材料低温性能最常用、最实用和最有效的手段和方法之一. 当前越来越多的研究者已经开始采用 BBR 试验对聚合物改性沥青的低温性能及低温评价指标展开研究，取得了许多成果[2-4]. 但当前对于 BBR 试验的研究主要停留在单一的考虑模量或松弛能力指标上，综合考虑模量和松弛能力指标的研究相对较少. 而橡胶沥青性能复杂，其低温性能的优劣同时受低温时的变形能力和应力松弛能力等因素影响，单一考虑 S 或 m 评价其低温抗裂性是片面的[4-5]. 本文基于流变学的 BBR 试验，综合考虑模量和应力松弛能力，对橡胶沥青的低温评价指标展开进一步研究，以便更准确地评价橡胶沥青的低温性能，为更好地研究橡胶沥青低温性能及合理使用橡胶沥青提供一定的借鉴.

1　试验材料及方法

制备不同基质沥青、不同胶粉细度下的橡胶沥青. 合理选择橡胶沥青的制备原材料，包括 70#、90#、110# 3 种基质沥青，其三大指标见表 1. 采用辽宁某场生产的细度为 28、40、60 目胶粉，掺量定为 20%，内掺方式. 橡胶沥青现拌现用，在制备过程中不添加稳定剂.

表 1　基质沥青三大指标

沥青标号	25 ℃针入度/0.1 mm	软化点/℃	15 ℃延度/cm
70	73.0	81.0	102.0
90	48.0	47.0	45.5
110	>100.0	>100.0	>100.0

采用湿法制备橡胶沥青，拌合温度(185±5)℃、搅拌时间控制在(60±5) min、剪切速率定为5 000 r/min. 在此制备工艺上制备得到的橡胶沥青有着良好的高低温性能[1,6-8].

为了便于后续研究，每种橡胶沥青用代号表示，例如由 70#沥青加入 28 目胶粉改性得到的沥青代号记为 70-28，经过薄膜老化和压力老化后沥青代号分别记为 T-70-28 和 P-70-28，其他 8 种橡胶沥青的代号依此类推.

本次 BBR 试验采用的是 Cannon 公司生产的弯曲梁流变仪. 按照美国 SHRP 规范要求，分别采用薄膜老化沥青和压力老化沥青试样进行 BBR 试验，每种试样分别在-12、-18、-24、-30 ℃ 4 个温度条件下进行测试，每个工况取两个平行试件.

2　试验结果分析

2.1　劲度模量及劲度模量变化率指标分析

按照 ASTM D 6648[9] 的要求对各组工况进行 BBR 试验. 测得不同测试温度下的劲度模量和劲度模量变化率，分别以 S、m 表示. S 表征沥青在低温条件下的变形能力，相同测试温度条件下，S 越小，沥青低温变形能力越好；而 m 表征沥青在低温条件下的应力松弛能力，m 越大说明沥青材料的应力松弛能力越好. 各测试温度下 60 s 的 S、m 结果汇总见图 1.

由图 1 可知，对任意老化沥青，胶粉加入显著改善了沥青的低温性能. 基质沥青和橡胶沥青低温性能差别在-18 ℃条件下体现十分明显，此时基质沥青 S、m 均不满足 SHRP 推荐要求，而橡胶沥青的 S、m 均满足 SHRP 推荐要求. 而在-12 ℃条件下这种差别体现得不明显，此时橡胶沥青和基质沥青的 S、m 均满足 SHRP 规范推荐要求，且不同橡胶沥青间的 S、m 变化也不显著. 而测试温度为-24、-30 ℃时，沥青链段在较低温度下运动被冻结，沥青硬化，S、m 远超过规范推荐值. 故此时采用-18 ℃下 BBR 试验研究橡胶沥青的低温性能显得更加合理、有意义.

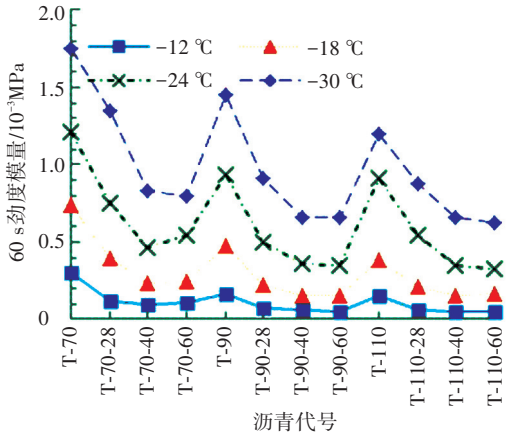
但是相关研究表明，单一地采用某个测试温度下的 S、m 评价沥青的低温性能会存在局限性. 沥青良好的低温性能需同时兼顾良好的低温变形能力和低温应力松弛能力. 所以建立一个综合考虑劲度模量和劲度模量变化率的指标十分重要[4-13].

2.2　PG 分级温度和低温连续分级温度结果分析

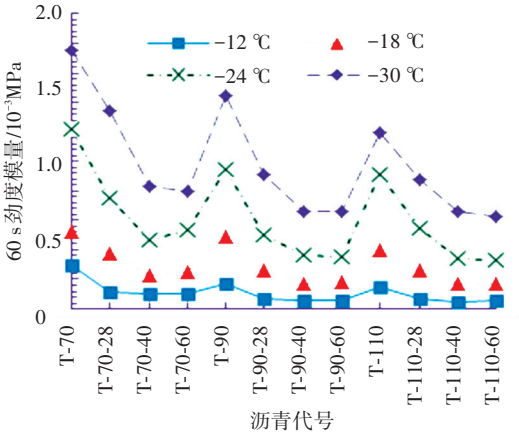
低温 PG 分级温度是指在沥青处在最低路面设计温度时，能保证在最低路面设计温度时不致开裂的一个分级温度等级. 根据 ASTM D 6816[10] 关于沥青 PG 分级温度的定义，由图 1 可知，基质沥青的 PG 分级温度均为 PG-22，而对应橡胶沥青的低温 PG 温度均为 PG-28. 此时，采用 PG 分级温度只能单纯地区分基质沥青和橡胶沥青低温性能差别，不能有效区分橡胶沥青间的低温性能差别. 这主要是因为 PG 分级温度的一个温度等级跨度大，导致具有相同 PG 分级温度的沥青，性能存在较大差别. 所以 PG 分级温度不能有效区分橡胶沥青的低温性能. 故此时可以考虑低温连续分级温度(continuous grade temperature 简称 C_T).

基于 BBR 试验获得的劲度模量和劲度模量变化率的基础上，美国 SHRP 提出了连续分级温度指标. 低温连续分级温度反应的是沥青材料满足使用要求时的一个临界温度，该温度越低，表明沥青材料低温开裂的可能性也随之减小. 根据 ASTM D 7643-10[11] 关于 C_T 的定义，得到压力老化沥青试样的 C_T 结果如图 2 所示. 此时相比 PG 分级温度，不同橡胶沥青有着

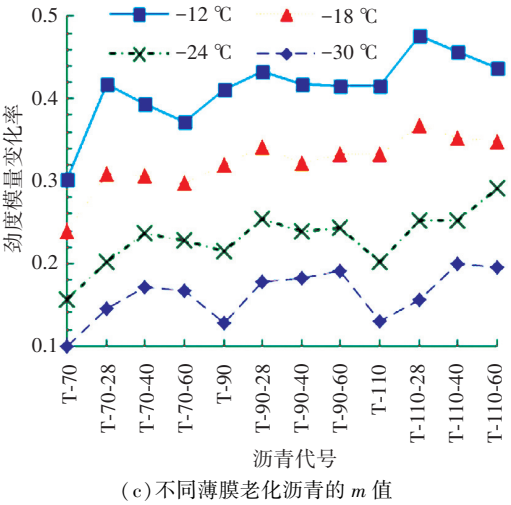
不一样的 C_T，且 110 系列橡胶沥青相对有着较低的 C_T 值. 且由 C_T 定义可知，该指标在一定程度上同时考虑了沥青材料的 S、m，较评价橡胶沥青低温性能较单一的 S 或 m 更加全面.



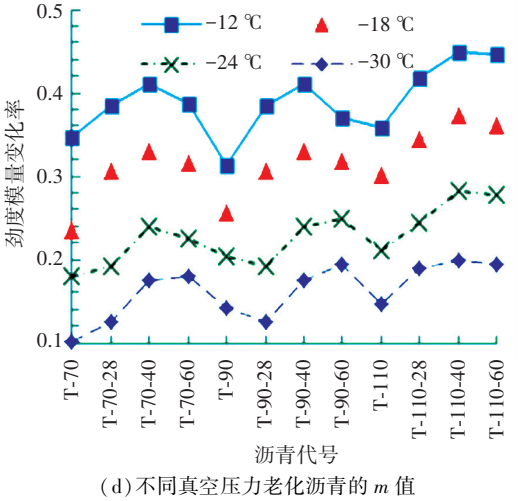
(a) 不同薄膜老化沥青的 S 值



(b) 不同真空压力老化沥青的 S 值



(c) 不同薄膜老化沥青的 m 值



(d) 不同真空压力老化沥青的 m 值

图 1　不同老化程度沥青 S 和 m

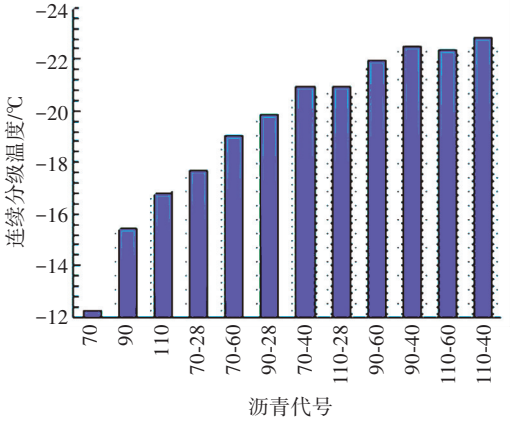


图 2　不同压力老化沥青 C_T 指标

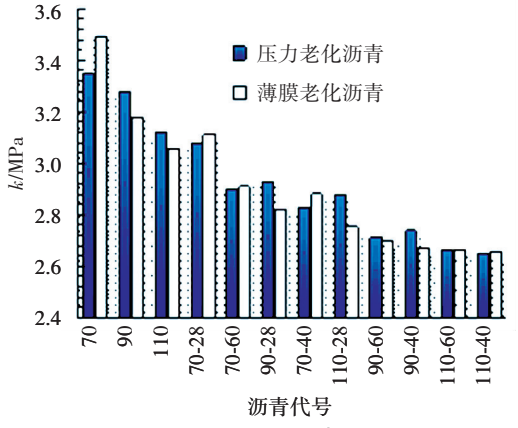


图 3　不同老化沥青 k 值

2.3　k 指标的建立与结果分析

为进一步建立同时考虑橡胶沥青低温变形能力和应力松弛能力的指标，构建指标. 根据 S、m 的物理意义，希望沥青在较低温度下有较小的 S，同时有较大的 m 值. 所以指标 k 越小，对应有着更好的低温变形能力和松弛性能. 此时选取 −18 ℃下的测试结果求得不同老化程度沥青的 k 值，结果见图 3.

考虑 SHRP 规定的 S 推荐上限值 300 MPa，m 不小于 0.3，此时 k 值定为上限. 基质沥青的 k 值在测试温度为 −18 ℃均大于 3.0，而橡胶沥青此时的 k 值基本上小于 3.0，而且不同橡胶沥青的 k 值有较为明显的差别，28 目胶粉改性得到的橡胶沥青 k 值相对较大，低温性能相对较差，与连续分级温度指标有着类似的结果. k 指标同时兼顾了沥青材料在低温

条件下变形能力和应力松弛能力.

2.4　S_A指标建立及结果分析

由于用不同温度的 S、m 指标评价橡胶沥青低温性能存在一定的差异和局限性，需要找到一个能够同时兼顾较宽温度域上 S、m 的指标. 因此利用时温等效原理，采用流变模型对劲度模量进行拟合，在更宽时间域和温度域上研究橡胶沥青低温性能. CAM 流变模型是 Zeng 等[12]在 CA 模型基础上改进的，可以更好地描述沥青及沥青混合料流变性能的模型，该模型相比其他模型有着良好的优越性. 故此时采用 CAM 流变模型对各测试温度下沥青劲度模量曲线进行拟合. 为了对比前文选定 −18 ℃ 下 BBR 试验，故此时曲线拟合过程中，以 −18 ℃ 为参考温度将各个温度下沥青的劲度模量曲线通过位移因子向 −18 ℃ 平移，分别得到各个沥青 −18 ℃ 条件下的劲度模量主曲线. 为了更清楚展示各沥青劲度模量主曲线，采用拟合后的曲线代替原曲线.

由于劲度模量主曲线能够在较宽的温度域上展现出沥青的流变性能，而且它不仅能够反应各个时刻沥青材料的劲度模量，也能够根据曲线的陡缓表征材料的应力松弛能力. 因此，双对数坐标下的劲度模量主曲线与时间轴所围成的面积 S_A 可以综合考虑材料模量及松弛能力[13-14]. 以 P−90−28 沥青为例，见图 4. S_A 即对应曲线下的面积. 显然 S_A 越小，说明沥青在温度降低时产生的温度应力小，沥青材料的低温性能也就越好. 采用 S_A 指标评价橡胶沥青低温性能具有两个优点：兼顾考虑材料低温变形能力和松弛能力、反映较宽温度域和时域条件下沥青材料的低温性能，评价更加全面.

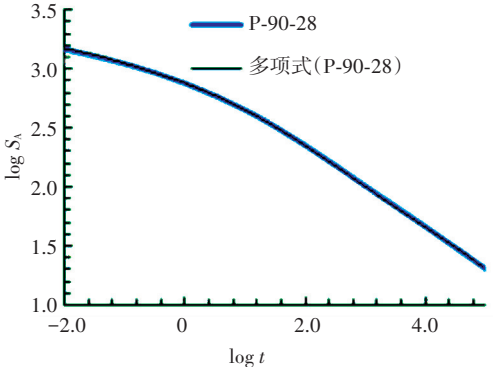


图 4　S_A指标的物理意义

按照上述处理方法，得到不同老化沥青的 S_A 指标，如图 5 所示. 由图可知：1）同一沥青标号和胶粉细度下，薄膜老化沥青的 S_A 均小于压力老化沥青的 S_A 值. 说明老化损失沥青的部分低温性能；2）在同样老化程度下，基质沥青的 S_A 显著大于对应橡胶沥青的 S_A 值；3）不同橡胶沥青 S_A 值有差别，考虑到 S_A 指标物理意义明确，反映沥青低温性能全面，故推荐作为橡胶沥青低温性能的一个评价指标. 至于何种老化程度沥青的 S_A 指标能更好地评价橡胶沥青低温性能需要后续混合料低温指标进行验证.

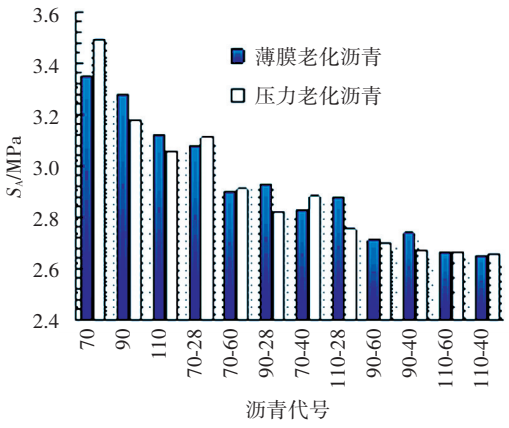


图 5　不同老化沥青的 S_A 指标

2.5　低温评价指标综合比选

2.5.1　相关性结果分析

混合料的低温抗裂性 80% 由沥青性质决定[13]，所以混合料的低温性能能较好反映沥青低温性能. 小梁弯曲试验获得的弯曲应变能密度可以较好的评价沥青混合料的低温抗裂性[13-14]. 所以本文将选用小梁弯曲试验作为橡胶沥青低温评价指标的验证试验，采用橡胶沥青混合料的小梁弯曲应变能密度作为验证指标，将橡胶沥青低温评价指标进行相关性分析，并综合考虑各指标测试上的难度、测试精度、物理意义并和混合料低温指标相关系数进行比选，优选出较合适的橡胶沥青低温评价指标.

选择常用的 SMA 类级配中值，在设计孔隙率为 4.0% 的条件下确定各沥青的最佳油石比，并进行沥青混合料 −10 ℃ 下的小梁弯曲试验，得到各沥青的低温弯曲应变能密度，结果见图 6.

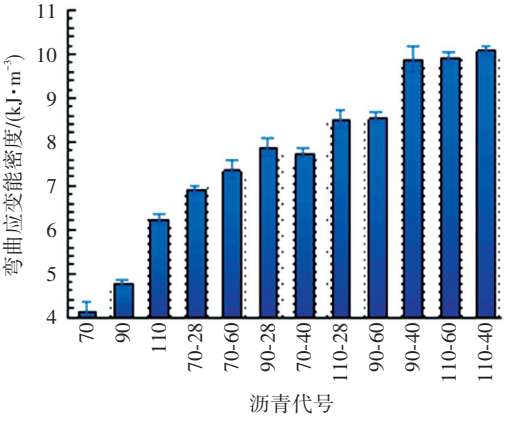


图 6　各沥青弯曲应变能密度

同时将基于 BBR 试验的橡胶沥青低温评价指标和弯曲应变能密度进行相关性分析，结果如表 2、3 所示，表 2 中指标为薄膜老化沥青式样对应的低

温评价指标,表3中的指标对应为真空压力老化后沥青的低温评价指标.

表2　薄膜老化沥青低温评价指标相关性分析结果

指标	k	S	m	S_A	C_T
相关系数	0.77	0.66	0.34	0.65	0.91

表3　压力老化沥青低温评价指标相关性分析结果

指标	k	S	m	S_A	C_T
相关系数	0.83	0.7	0.65	0.83	0.85

综合表2、3可知:1)压力老化沥青BBR试验得到的指标与混合料弯曲应变能密度的相关系数均大于采用薄膜老化沥青试验得到的指标. 说明采用压力老化沥青进行BBR试验能更好地评价橡胶沥青的低温性能. 2)压力老化沥青低温评价指标和混合料低温弯曲应变能密度都有着较好的相关性. S_A 指标能更好地表征和评价橡胶沥青的低温性能. 而-18 ℃的 m 及 S 与混合料应变能密度相关性相对较小,评价橡胶沥青低温性能相对较差, 原因主要是单一考虑 m 或 S 评价橡胶沥青低温性能较片面、存在局限,兼顾二者评价橡胶沥青低温性能更加全面.

2.5.2　橡胶沥青低温评价指标综合比选

通过前文分析知,涉及到的橡胶沥青低温性能指标主要包括 S 和 m 指标、C_T 指标、k 指标、S_A 指标.

1) S 和 m 指标. 该两项指标是SHRP弯曲梁流变试验中最常用的指标. 该两项指标测试快速方便,测试精度高,能很好地评价基质沥青的低温性能. 但是考虑到和橡胶沥青混合料低温指标相关性较低, 单独采用 S 或 m 作为橡胶沥青低温评价指标并不全面.

2) C_T 指标. 和应变能密度有着较高的相关性,物理意义明确,且运用较广,易被接受. 但需要通过线性回归求得,精度受到影响,而且至少需要测试两个以上温度的BBR试验方可获得指标.

3) k 指标. 与混合料有着较好的相关性,测试快速方便,测试精度较高,同时兼顾了和,且能准确区分基质沥青和橡胶沥青以及不同橡胶沥青低温性能差别.

4) S_A 指标. S_A 指标与混合料弯曲应变能密度相关性最好,物理意义十分明确. 但 S_A 指标需要进行多个温度下的BBR试验,需大量计算拟合,运用模型拟合时可能会受拟合精度的影响产生微小误差.

3　结　论

1)通过对橡胶沥青的BBR试验的系统研究,发现试验室制备的橡胶沥青相比基质沥青其低温变形能力和应力松弛能力都显著提高,其低温PG分级温度由PG-22提高到PG-28,体现出更好的低温性能.

2)沥青老化损失其部分的低温性能. 采用压力老化沥青进行BBR测试能更好地评价橡胶沥青的低温性能. 同时采用-18 ℃下BBR试验研究橡胶沥青的低温性能更加合理、有意义.

3)考虑单一采用 S、m 指标评价橡胶沥青低温性能存在局限性,进而分析和构建了 C_T 指标、k 指标、S_A 指标. 3个指标均在一定程度上兼顾考虑橡胶沥青低温变性能力和应力松弛能力,能更全面评价橡胶沥青低温性能.

4)通过对橡胶沥青低温评价指标和混合料弯曲应变能密度指标进行相关性分析及综合比选,最终推荐:在工程上优先采用 k 指标作为橡胶沥青低温性能的评价指标; 而进行研究工作时优先考虑 S_A 指标作为橡胶沥青低温性能的评价指标.

参考文献

[1] 王旭东,李美江,路凯冀,等. 橡胶沥青及混凝土应用成套技术[M]. 北京:人民交通出版社,2008.

[2] LUANZ H, LEI J Q, QU P. Evaluation methods of SBS modified-asphalt binders[J]. Journal of Wuhan University of Technology,2010, 32(2): 15-18.

[3] HUANG S C. Rubber concentrations on rheology of aged asphalt binders [J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2008, 20(3): 221-229.

[4] 冯中良,曹荣吉,贾渝. 采用特征温度指标评价沥青胶结料低温性能的研究[J]. 中外公路,2009,29(1):245-247.

[5] 张兴友,胡光艳,谭忆秋. 硅藻土改性沥青混合料低温抗裂性能研究[J]. 公路交通科技,2005,23(4):11-13.

[6] LIU S, CAO W, FANG J. Variance analysis and performance evaluation of different crumb rubber modified (CRM) asphalt[J]. Construction Build Material,2009,23(7): 2701-2708.

[7] BAHA V K, MEHMET Y, ALAADDIN G. Evaluation of low-temperature and elastic properties of crumb rubber and SBS modified bitumen and mixtures [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(2): 257-265.

[8] WEI H, LI Q S. Preparation and properties of anion rubber-modified asphalt [C]//Proceedings of 2011 International Conference on Materials for Renewable Energy & Environment. San Diego: IEEE, 2011:932-935.

[9] Standard test method for determining the flexural creep stiffness of asphalt binder using the bending beam rheometer (BBR): ASTM D 6648[S]. Wisconsin: ASTM Committee D04, 2012.

[10] Standard practice for determining low-temperature performance grade (PG) of asphalt binders: ASTM D 6816[S]. Wisconsin: ASTM Committee D04, 2012.

[11] Standard test method for determining the continuous grade of asphalt binder: ASTM D 7643-10[S]. Wisconsin: ASTM Committee D04, 2012.

[12] ZENG M, BAHIA U, ZHAI H C. Rheological modeling of modified asphalt binders and mixtures[C]. Washington: Transportation Research Board,2001: 8-35.

[13] 张磊.油改性沥青流变特性及改性机理研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.

[14] 葛折圣,黄晓明,许国光. 用弯曲应变能方法评价沥青混合料的低温抗裂性[J].东南大学学报,2002,32(4):653-654.

(编辑　魏希柱)