

级配对橡胶沥青混合料高温性能影响研究

谭继宗^{1,2}, 刘靖³, 徐升³, 李平³

(1. 广西道路结构与材料重点实验室, 广西南宁 530001; 2. 广西交科集团有限公司; 3. 长沙理工大学 交通运输工程学院)

摘要:为研究级配对橡胶沥青混合料高温性能的影响, 该文对基于贝雷法、CAVF法、经验法所设计的沥青混合料进行车辙试验和单轴贯入试验, 通过贝雷法和级配分形法进行级配评价, 结合级配评价指标分析级配对混合料高温性能的影响。试验结果表明: 级配对橡胶沥青混合料高温性能影响显著, 但CAVF法和贝雷法两种级配设计方法对橡胶沥青混合料高温性能影响不存在明显优劣, 应根据实际混合料性能进行级配优选; 单轴贯入模量与混合料动稳定度相关性良好; 级配评价指标中, 贝雷法评价参数CA值与动稳定度和单轴贯入模量相关性较好, 建议使用该指标用于级配设计的优化评价。

关键词:橡胶沥青; 高温稳定性; 级配; 车辙; 单轴贯入

1 前言

《交通强国建设纲要》对中国交通事业的发展提出了更高的要求, 其中“绿色发展节约集约、低碳环保”便是发展目标之一。废旧轮胎是不熔或难熔的高分子材料固体垃圾, 处置不当会危害人类健康、引发火灾、污染环境, 带来严重的“黑色污染”, 如何有效回收和利用

废旧轮胎一直是个难题。为解决这一问题, 道路科研工作者研发橡胶改性沥青技术, 将废旧轮胎重新加工成为筑路材料橡胶粉, 与基质沥青在高温条件下剪切混溶形成新型沥青胶结料, 对比应用广泛的SBS改性沥青技术, 可节省15%~20%的基质沥青, 符合当前“绿色环保”的发展理念。

虽然橡胶沥青混合料在中国公路建设中取得了一定应用, 但目前仍存在一定问题与不足。橡胶沥青具

- *****
- [3] Zhen-gang Feng, Wen-yu Rao, Chong Chen, et al. Performance Evaluation of Bitumen Modified with Pyrolysis Carbon Black Made from Waste Tyres[J]. Construction and Building Materials, 2016, 111: 495-501.
- [4] 珠力克. 废轮胎再生炭黑对沥青性能的影响[J]. 中国公路, 2018(7).
- [5] 郝培文, 刘红瑛. 炭黑改性沥青混合料低温抗裂性能的研究[J]. 石油沥青, 1993(4).
- [6] Chuangmin Li, Ziran Fan, Shaopeng Wu, et al. Effect of Carbon Black Nanoparticles from the Pyrolysis of Discarded Tires on the Performance of Asphalt and its Mixtures[J]. Applied Sciences, 2018, 8(4).
- [7] JTG E20-2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [8] JTG F40-2004 公路沥青路面施工技术规范[S].
- [9] JT/T 860.7-2017 沥青混合料改性添加剂第7部分: 废旧轮胎热解炭黑[S].
- [10] 李睿, 杨帆. 掺废轮胎热解再生炭黑的沥青制备工艺及技术性能探讨[J]. 石油沥青, 2018(5).
- [11] 汪莹. 沥青老化评价指标分析及老化程度研究[J]. 路基工程, 2014(6).
- [12] 高建立. 沥青指标的分析与评价及新指标的研究[D]. 东南大学博士学位论文, 2005.
- [13] 房斌, 吴奇峰, 张争奇. 橡胶改性沥青存储稳定性及改善措施研究[J]. 公路, 2012(3).
- [14] 李芳, 陈建. 炭黑改性沥青路用性能的研究[J]. 西安公路交通大学学报, 1996(3).
- [15] 许洪彬. 废胶粉及再生低密度聚乙烯复合改性沥青性能研究[D]. 湖南大学硕士学位论文, 2015.

收稿日期: 2020-11-28(修改稿)

基金项目: 广西科技重大专项(编号: 桂科 AA18242032); 国家自然科学基金资助项目(编号: 51878075); 广西重点研发计划项目(编号: 桂科 AB19245019, 桂科 AB17292035)

作者简介: 谭继宗, 男, 高级工程师. E-mail: 522439984@qq.com

备“溶胀”特性,传统的 AC 连续型级配间隙率较小,难以满足橡胶沥青这一特性,有些地方标准、指南等仅基于经验法确定了橡胶沥青混合料的级配范围,并未给出明确的级配设计方法,而路用性能与级配之间存在明显相关性,因此,研究橡胶沥青混合料级配设计方法有利于提升工程设计中级配选取的有效性,提升沥青路面路用性能,提高工程质量。

国内外级配对橡胶改性沥青混合料高温性能研究取得了较多成果。Rongji Cao 开发了一种新型的间断级配橡胶沥青混合料 ARAC-13S,与 SMA-13 和 AC-13C 路用性能进行对比,发现 ARAC-13S 在高温下具有与 SMA-13 相似的抗车辙变形能力,ARAC-13S 在热裂解方面的性能优于常规沥青混合料。Zhaohui Min 在贝雷法的基础上,通过改变环氧沥青混合料的粗骨料比(CA)和细骨料粗粒率比(FA_c),得到了不同的混合料骨架结构并进行试验研究,提出环氧沥青混合料推荐 CA 值为 0.4,FA_c 值为 0.35 的致密级配结构,用于跑道覆盖或路面养护;Cui Wentian 为提高超薄耐磨层沥青混合料的抗车辙性能,采用 CAVF 法设计出 UTWC-10 沥青混合料,高温车辙试验数据表明:UTWC-10 沥青混合料的车辙动稳定度(DS)指标远远高于传统的磨层沥青混合料,具有更好的高温稳定性;蒋勇基于 PCG3 旋转压实设备,研究法国标准中 GB4 沥青混合料级配对压实特性的影响,发现 5 mm(4.75 mm)和 20 mm 通过率对 GB4 沥青混合料的压实特性影响明显;马峰以动稳定度为评价指标,对比分析了连续型、半间断型和间断型橡胶沥青混合料的路用性能,发现级配对橡胶沥青混合料高温性能影响显著,其中半间断型级配的动稳定度是间断型 SMA-13 的 1.5 倍,表明采用半间断型级配有助于提高橡胶沥青混合料的高温稳定性;游金梅等对比分析 4 种级配(AR-AC-13、AC-13、AR-SMA-13、SMA-13)下纤维橡胶沥青混合料的高温稳定性,结果表明:间断型橡胶沥青混合料高温稳定性优于连续型橡胶沥青混合料;张可强等选取 AR-AC-13 和 AR-SMA-13 级配分别进行车辙试验、水稳定等试验对比分析其路用性能,结果表明:AR-AC-13 低温抗裂性能和抗疲劳特性更优,而 AR-SMA-13 高温稳定性性能较好,两者水稳性能无明显差距;程培峰等针对不同矿料级配对温拌橡胶沥青混合料路用性能的影响,选取 SMA 型 5 种代表性级配和 AC 级配进行室内混合料路用性能试验并对比试验数据,结果表明:SMA 混合料相比于 AC 混合料具有更

优高温性能和水稳定性能,且温拌橡胶沥青混合料适用于间断级配;武建民等建立级配评价指标分形维数与 AC-16 橡胶沥青混合料高温性能关系发现,随着分形维数的增大混合料动稳定度减小,高温稳定性逐渐降低,进一步根据橡胶沥青混合料路用性能要求推荐级配整体分形维数值 D 宜小于 2.53,而粗集料分形维数 D_c 宜小于 2.66;苗超杰提出利用 Matlab 进行混合料级配设计,依据矿料级配设计原理和 CA 值、FA_c 值、FA_f 值的合理范围优化级配,实践证明应用效果较好。

现有对橡胶沥青混合料的高温性能侧重点在于对比连续型与间断型级配的路用性能,未针对级配范围内不同级配的路用性能进行对比分析,同时近年来涌现的贝雷法和 CAVF 等方法的对比如较少。在此背景下,该文分析同一级配范围内,不同级配设计方法下的橡胶沥青混合料高温性能,结合级配特性进行研究,有助于工程实际中的级配优选。

2 橡胶沥青混合料配合比设计

2.1 橡胶改性沥青制备

选用某高速公路工程实际配方,包括壳牌 70[#] 基质沥青,30~80 目橡胶粉,YH-791H 线型 SBS 改性剂,白色助剂 T₁ 与黑色助剂 T₂。剪切机为 AE300L-P 型试验室剪切乳化机,制备工序及制备时间如表 1 所示。

表 1 橡胶改性沥青制备工艺参数

制备工序	制备工艺时间/min
加热基质沥青(180 ℃)	—
添加 SBS 改性剂低速搅拌	30
添加橡胶粉及白色助剂 T ₁ 低速搅拌	20
添加黑色助剂 T ₂ 低速搅拌	10
沥青高速剪切	10
沥青低速搅拌	20

注:低、高速搅拌速率分别为 500、5 000 r/min。

橡胶沥青性能测试结果见表 2。

2.2 级配设计

采用 20 型橡胶沥青混合料 ARAC-20,基于贝雷法、CAVF 法、经验法得到合成级配如表 3 所示。贝雷法主要设计思想是将集料形成的骨架结构作为混合料承力主体,提升沥青路面的高温抗车辙性能,同时调整粗细集料所占比例,获取适当的矿料间隙率 VMA,

表 2 橡胶沥青性能测试结果

项目	针入度/ (0.1 mm)	5 ℃ 延度/cm	软化点/ ℃	180 ℃旋转黏 度/(Pa·s)	弹性恢 复/%
测试结果	34.9	11.9	73.5	2.4	94.5
技术要求	30~60	≥5	≥65	1.5~5.0	≥75

注:橡胶沥青质量要求采用广西地方标准 DB 45/T 1098—2014《橡胶沥青路面施工技术规范》。

表 3 沥青混合料合成级配

级配	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%											
	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
BL—1	100	95.6	77.6	67.7	46.6	31.0	21.6	14.8	10.7	7.4	5.9	4.9
BL—2	100	95.8	79.0	69.7	49.8	31.1	21.5	14.7	10.7	7.4	5.9	4.9
BL—3	100	96.3	81.3	73.0	55.0	31.2	21.4	14.7	10.6	7.4	5.9	4.9
BL—4	100	97.2	85.9	79.7	65.6	31.5	21.2	14.5	10.6	7.4	5.9	4.9
BL—5	100	98.1	90.6	86.4	67.5	31.8	21.0	14.4	10.5	7.4	5.9	4.9
CAVF—1	100	96.6	82.9	75.4	59.0	37.5	25.9	17.6	12.6	8.7	6.8	5.6
CAVF—2	100	97.5	87.3	81.7	64.0	34.6	23.3	17.9	12.8	8.8	6.9	5.7
CAVF—3	100	98.3	91.6	87.9	73.9	35.7	23.8	18.2	13.1	9.0	7.1	5.8
JY—1	100	95.3	76.1	65.6	43.0	25.0	17.4	12.1	8.9	6.4	5.2	4.4

提升所设计混合料的耐久性能。CAVF 法设计过程为按照经验选取合适的粗集料比例后根据泰波理论进行细集料部分设计,根据粗细集料、矿粉以及沥青相关技术参数,计算粗细集料总体比例,最终确定合成级配。按照该方法所设计矿料级配可以使集料骨架相互嵌挤,主骨架间隙由沥青胶浆充分填充,不会出现胶浆干涉作用,可提高沥青混合料性能。经验法是根据工程经验和 JTG F40—2004《沥青路面施工技术规范》确定的。

2.3 级配评价

(1) 贝雷法评价参数

贝雷法引入 CA 比、FA_c 比、FA_f 比 3 个参数评价所设计的级配,其中 CA 比反映矿料中粗集料填充特性,FA_c、FA_f 分别反映细集料中粗集料和合成集料中最细一级的嵌挤填充情况。由于试验设计的级配中细集料部分较为接近,FA_f、FA_c 差距不大,因此选取 CA 值作为评价指标,采用式(1)进行计算,结果如表 4 所示。

$$CA = \frac{P_{D/2} - P_{PCS}}{100 - P_{D/2}} \tag{1}$$

式中:CA 为粗集料比;P_{D/2} 为粒径为 D/2 的通过率 [D 为公称最大粒径(%),下文中 D 为分形维数];P_{PCS} 为第一控制筛孔通过率(%)。

表 4 不同级配贝雷法 CA 值计算结果

级配	CA 值	级配	CA 值
BL—1	0.29	CAVF—1	0.52
BL—2	0.37	CAVF—2	0.82
BL—3	0.53	CAVF—3	1.46
BL—4	0.99	JY—1	0.32
BL—5	1.10		

(2) 级配分形评价参数

分形理论能较好地适应沥青混合料的非匀质性、非线性、非规则性及模糊性等特征,引入分形维数 D (粒径为 0.075~19 mm)、粗集料分形维数 D_c (粒径为 4.75~19 mm)、细集料分形维数 D_f (粒径为 0.075~4.75 mm) 3 个参数用以评价所确定的合成级配。由于试验设计的级配中细集料部分较为接近,D_f 差距不大,因此选取分形维数 D、粗集料分形维数 D_c 作为评价指标,采用级配分形评价参数 D、D_c 对上述级配进行线性回归分析。

对于常用级配,集料质量分数 P(r) 可用式(2)计算:

$$P(r) = (r/r_{\max})^{3-D} \tag{2}$$

式中:P(r) 为集料质量分数;r_{max} 为最大颗粒粒径;D 为集料颗粒粒径分形维数。

对式(2)两边取对数,可得式(3):

$$\lg P(r) = C + (3 - D) \lg(r/r_{\max}) \tag{3}$$

绘制 $\lg P(r) - \lg(r/r_{\max})$ 坐标图(图 1),线性回归分析后即可通过式(4)计算得出级配的整体分形维数 D 。

$$D = 3 - k \tag{4}$$

式中: k 为 $\lg P(r) - \lg(r/r_{\max})$ 拟合图中的直线斜率。

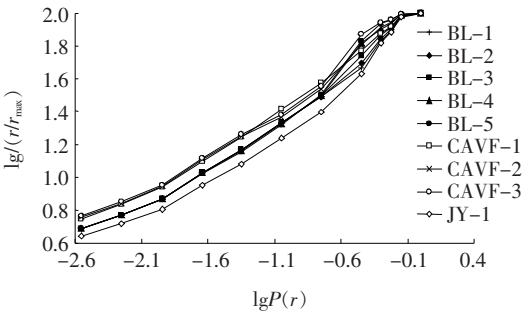


图 1 $\lg P(r) - \lg(r/r_{\max})$ 拟合图

当 $\lg P(r) - \lg(r/r_{\max})$ 图中曲线只取 4.75 mm 以上部分时,可计算得出粗集料级配分形维数 D_c 。

D 和 D_c 计算结果如表 5 所示,其中 R^2 为选用级配与级配分形理论模型拟合度,其值越大表明级配的分形特征越明显。

表 5 不同级配分形维数计算结果

级配	D		D_c	
	计算值	R^2	计算值	R^2
BL-1	2.46	0.983 1	2.26	0.969 2
BL-2	2.45	0.983 6	2.27	0.973 9
BL-3	2.45	0.983 6	2.28	0.969 5
BL-4	2.43	0.979 8	2.31	0.924 8
BL-5	2.43	0.976 7	2.31	0.896 4
CAVF-1	2.47	0.991 2	2.39	0.973 6
CAVF-2	2.47	0.984 9	2.35	0.938 0
CAVF-3	2.46	0.981 9	2.39	0.878 2
JY-1	2.43	0.968 7	2.23	0.971 4

由表 5 可得:① 9 种级配均表现出良好的分形特征,其中以基于 CAVF 法设计的级配略优。9 种级配中整体分形维数 D 的 R^2 最小值为 0.968 7,表明实际级配与级配分形理论相关性显著。9 种级配中 R^2 最大值 0.991 2 为 CAVF 法设计的级配,且 CAVF 法设计级配的 R^2 均值大于贝雷法和经验法设计级配的 R^2 均值,由此可知 CAVF 法设计的级配分形特征较好;② 基于 CAVF 法所设计的级配 D 值与 D_c 值均

大于基于贝雷法所设计的级配,表明 CAVF 法设计的级配集料体系内的不规则程度更大。

3 橡胶沥青混合料高温性能试验

3.1 车辙试验

车辙试验采用 LHC-2 型沥青混合料恒温车辙试验机,在 60 ℃ 试验环境下对前述 9 组 ARAC-20 级配进行测定,以动稳定度 DS 为评价指标。每个合成级配成型 3 个车辙板试件,试验结果取其平均值,9 组级配车辙试验结果如表 6 所示。

表 6 不同级配沥青混合料车辙试验结果

级配	DS 均值/ (次 \cdot min $^{-1}$)	级配	DS 均值/ (次 \cdot min $^{-1}$)
BL-1	6 886	CAVF-1	8 044
BL-2	7 275	CAVF-2	8 773
BL-3	8 634	CAVF-3	7 120
BL-4	9 286	JY-1	6 228
BL-5	7 553		

由表 6 可得:

(1) 沥青混合料高温抗车辙性能受级配影响显著。不同级配橡胶沥青混合料动稳定度差异较大,最大差值可达 3 058 次/mm。表明在规范级配范围内对级配进行优化的必要性。

(2) 车辙试验中,贝雷法与 CAVF 法两种级配设计方法均体现出较好的适用性但有较大波动,二者无明显差异。经验法由于数据量不足,不纳入对比,贝雷法与 CAVF 法两种设计方法下动稳定度均值分别为 7 986 与 7 979 次/mm,均满足路用性能要求,但数据波动较大,因此两种级配设计方法未表现出明显差异。

(3) 涉及的级配评价指标中,CA 值(表 4)与沥青混合料抗车辙性能具备良好的线性相关关系。根据表 4~6 绘制图 2。

由图 2 可得: D 、 D_c 与混合料动稳定度间关联性较弱, R^2 仅为 0.142 5、0.012 9。但沥青混合料动稳定度随着 CA 值增大而增大,CA 值与沥青混合料动稳定度之间相关性较好, R^2 达到 0.803 3,表明在一定范围内改善矿料中粗集料含量有助于提高混合料抗车辙性能。

3.2 单轴贯入试验

单轴贯入试验采用 WDW 型电子万能试验机,贯入试验压头为 28.5 mm,加载速度为 1 mm/min。从

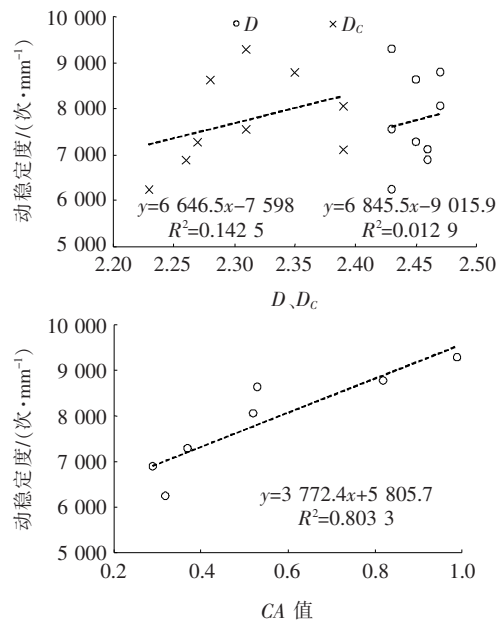


图 2 动稳定度与分形维数值、CA 值相关性

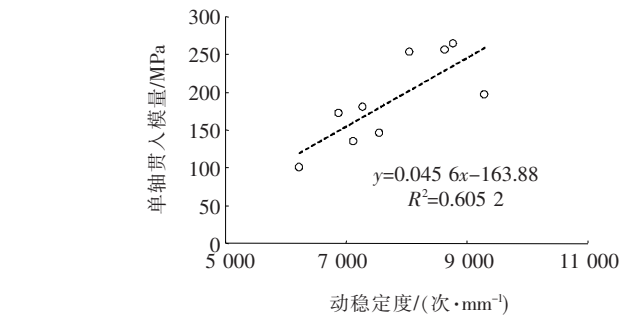


图 3 动稳定度与单轴贯入模量相关性

由表 7、图 3 可得:

(1) 单轴贯入模量与混合料动稳定度之间具有一定的相关性, R^2 为 0.605 2。表明单轴贯入模量可较为有效地评价橡胶沥青混合料高温抗车辙性能, 可从另一角度为橡胶沥青混合料高温抗车辙性能提供评价指标。车辙试验和单轴贯入试验在一定范围内可相互通用, 但车辙试验在油石比变化较大导致的空隙率变化较大时, 就丧失了评价混合料高温稳定性的能力, 而单轴贯入试验恰好弥补了这一缺点。且贯入试验更多反映沥青结合料的黏结作用, 而车辙试验则更倾向于对级配的状态进行评价, 因而两者也存在一定的不同。

(2) 级配对橡胶沥青混合料单轴贯入试验结果影响显著。不同级配的橡胶沥青混合料贯入模量值呈现较大差异, 差值可达 164.8 MPa。表明选取合适的级配设计方法可有效提高橡胶沥青混合料抗剪性能。

(3) 基于沥青混合料贯入试验结果, 针对橡胶沥青混合料高温抗剪性能, 两种级配设计方法不存在明显的优劣。采用 CAVF 法设计的级配贯入模量均值较采用 BL 法设计级配高出 27 MPa, 但贯入模量最低值也是 CAVF 法所设计的级配, CAVF 法设计级配的贯入模量值并不稳定; BL 法设计的级配单轴贯入模量均值较低但是其值分布较稳定, 因此两种方法不存在对高温抗剪性能影响的优劣。

(4) 级配评价指标中, CA 值与单轴贯入模量相关性较好。基于高温抗剪性能考虑, 推荐采用 CA 值进行级配评价。根据表 4、5、7 绘制图 4。

由图 4 可知: 分形维数 D 、粗集料分形维数值 D_c 与单轴贯入模量相关度较弱, 而 CA 值与单轴贯入模量相关系数为 0.622 6, 相关性较好, 表明在一定范围内改善 CA 值可有效提升沥青混合料高温抗剪性能。当 CA 比小于 0.9 时, 单轴贯入模量随着 CA 比的增加而增大, 这是由于当 CA 比较小时, 粗集料中较大粒径含量较高, 虽然细集料填充了一部分粗集料留下的

试验便利性角度出发, 直接采用马歇尔击实成型的试件进行贯入试验。

为正确评价及反映沥青混合料高温抗剪性能, 选取贯入模量(E_f)作为抗剪强度评价指标, 计算公式如下:

$$\sigma_f = \frac{F}{A} \tag{5}$$

$$\epsilon_f = \frac{\Delta s}{H} \tag{6}$$

$$E_f = \frac{\sigma_f}{\epsilon_f} \tag{7}$$

式中: F 为试件破坏时最大荷载(kN); A 为压头横截面面积(mm^2); ϵ_f 为应变; σ_f 为应力(MPa); Δs 为破坏荷载峰值所对应位移(mm); H 为试件高度(mm); E_f 为贯入模量(MPa)。

基于贯入试验方法及参数, 对前述 9 种级配橡胶沥青混合料在最佳油石比下进行贯入试验, 每个级配成型 3 个马歇尔试件, 试验结果取其平均值, 试验结果如表 7 所示。根据表 6、7 绘制动稳定度与单轴贯入模量关系曲线如图 3 所示。

表 7 各组合级配橡胶沥青混合料单轴贯入试验结果

级配	贯入模量/MPa	级配	贯入模量/MPa
BL-1	172.2	CAVF-1	253.6
BL-2	180.7	CAVF-2	264.8
BL-3	255.5	CAVF-3	135.1
BL-4	197.3	JY-1	100.0
BL-5	146.0		

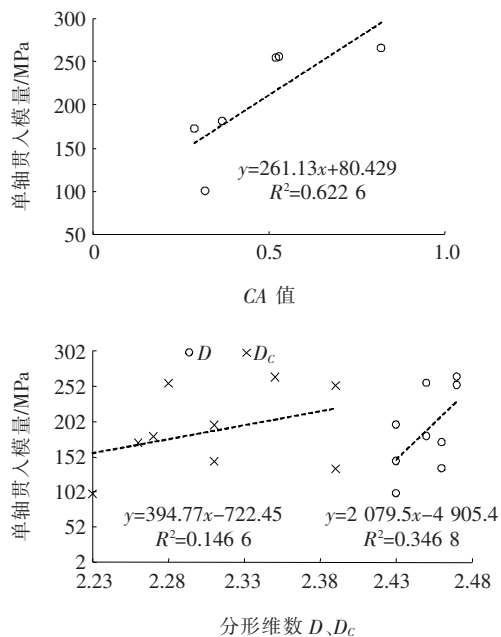


图 4 单轴贯入试验指标与 CA 值、分形维数相关性

空隙,但二者的嵌挤作用不够显著,随着 CA 比的增大,混合料逐渐密实,当 CA 比超过 1 时,粗集料中较细部分的含量增加,干涉颗粒易于破坏粗集料内部的平衡结构,从而导致混合料难于压实,容易产生推移。

4 结论

(1) 级配评价指标中,贝雷法评价参数 CA 值与动稳定度和单轴贯入模量相关性较好,而分形维数评价参数 D 、 D_c 与其相关性较差,基于高温性能考虑,推荐采用 CA 值进行级配评价。

(2) 级配对橡胶沥青混合料高温性能影响显著,但 CAVF 法和 BL 法对橡胶沥青混合料高温性能影响不存在明显优劣,应根据实际混合料性能进行级配优选。

(3) 单轴贯入模量与混合料动稳定度指标之间具有一定的相关性,表明单轴贯入模量可较为有效地评价橡胶沥青混合料高温抗车辙性能。但贯入试验更多反映沥青结合料的黏结作用,而车辙试验则更倾向于对级配的状态进行评价,因而两者也存在一定的不同。

参考文献:

- [1] 郑健龙,陈胜营,张劲泉,等. 为建设交通强国努力奋斗——《交通强国建设纲要》专家谈[J]. 中国水运,2019(12).
- [2] Evaluation of New Generation of Gap Graded Asphalt Rubber Mixtures: Asphalt Rubber Conference, Nanjing (CN)[C],2009.
- [3] Min Z, Sun L, Wang Q, et al. Influence of Aggregate Packing on the Performance of Uncured and Cured Epoxy Asphalt Mixtures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2020,32(5).
- [4] Wentian C, Kuanghuai W, Xu C, et al. Optimizing Gradation Design for Ultra-Thin Wearing Course Asphalt[J]. Materials (Basel, Switzerland),2020,13(1).
- [5] 蒋勇,马华宝,孟会林,等. 基于 PCG 的 GB4 沥青混合料旋转压实特性研究[J]. 中外公路,2020(5).
- [6] 马峰,冯乔,傅珍,等. 不同级配复合改性沥青混合料路用性能[J]. 广西大学学报(自然科学版),2019(1).
- [7] 游金梅. 不同级配纤维橡胶沥青混合料路用性能研究[J]. 公路工程,2015(1).
- [8] 张可强. 级配对橡胶沥青混凝土路用性能的影响[J]. 公路,2015(6).
- [9] 程培峰,范平. 矿料级配对温拌橡胶沥青混合料性能的影响[J]. 公路交通科技,2014(3).
- [10] 武建民,郑平安,冀永安. 橡胶颗粒沥青混合料级配分形与动稳定度的关系[J]. 长安大学学报(自然科学版),2015(1).
- [11] 苗超杰,王火明. 基于 Matlab 的沥青混合料级配优化设计[J]. 中外公路,2018(6).
- [12] 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).
- [13] 吴帮伟,刘黎萍,孙立军. 不同参数对沥青混合料抗剪性能的影响[J]. 公路交通科技,2019(10).
- [14] 颜可珍,葛冬冬,游凌云. 沥青混合料单轴贯入抗剪试验的细观分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2015(5).
- [15] 陈浩,樊统江,范芳芳. 单轴贯入试验试件高度对沥青混合料剪切强度的影响[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2012(3).
- [16] 任钰芳,孙皓,颜可珍,等. SBR/TLA 复合改性沥青混合料性能试验研究[J]. 中外公路,2020(2).
- [17] 杨侣珍,张允宝. 老化 CR/SBS 复合改性沥青混合料弯曲疲劳特性试验研究[J]. 中外公路,2020(4).