

# 橡胶颗粒沥青混合料级配分形与动稳定度的关系

武建民<sup>1</sup>, 郑平安<sup>1,2</sup>, 冀永安<sup>3</sup>

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 内蒙古交通设计研究院有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010010; 3. 商洛市交通设计院, 陕西 商洛 726000)

**摘 要:**为了研究掺加橡胶颗粒的沥青混合料级配分形特征及其与高温性能的关系,采用分形理论计算了掺加橡胶颗粒的 AC-16 沥青混合料集料级配分形维数  $D$ ;根据车辙试验结果,建立了其与动稳定度之间的回归关系;通过进一步计算二重分形维数,回归得到了粗、细集料分形维数与动稳定度的关系。研究表明:橡胶颗粒沥青混合料的集料分形维数与动稳定度之间具有较好的线性相关性,且粗集料分形维数对高温稳定性影响较大;要满足沥青混合料的动稳定度大于 800 次/mm 的要求,整体集料分形维数不宜大于 2.53,粗集料分形维数不宜大于 2.66。

**关键词:**道路工程;橡胶沥青混合料;级配;分形维数;二重分维;动稳定度

**中图分类号:**U411

**文献标志码:**A

## Correlational analysis of graded fractal dimension of rubber particle asphalt mixture and its dynamic stability

WU Jian-min<sup>1</sup>, ZHENG Ping-an<sup>1,2</sup>, JI Yong-an<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Special Area Highway Engineering of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Inner Mongolia Communication Design & Research Institute Co Ltd, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China; 3. Shangluo Traffic Design Institute, Shangluo 726000, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to study the correlation between the aggregate gradations fractal characteristics of asphalt mixture added rubber particle and its high-temperature behavior, the fractal theory was used to calculate the aggregate graded fractal dimension of AC-16 asphalt mixture added rubber particle. The regression relationship of fractal dimension  $D$  and its dynamic stability was established according to the rutting test. With further calculation of two-dimensional, the relationship between coarse, fine aggregate fractal dimension and its dynamic stability was established through regression analysis. The results show there is a good linear correlation between aggregate fractal dimension and the dynamic stability of rubber particle asphalt mixture, and the coarse aggregate fractal dimension has great influence on high temperature stability. In order to meet the requirement of the asphalt mixture dynamic stability which is greater than 800 times/mm, the overall aggregate fractal dimension should be less than 2.53, and coarse aggregate fractal dimension should be less than 2.66. 11 tabs, 12 figs, 15 refs.

**Key words:** road engineering; rubber particle asphalt mixture; gradation; fractal dimension; two-dimensional; dynamic stability

## 0 引言

随着汽车工业的发展,中国每年产生大量的废旧轮胎,其合理有效的利用成为中国关注的重大课题。掺加橡胶颗粒的沥青路面具有良好的降噪除冰效果,路用性能也得到很大改善,其应用已得到普遍重视。对其级配设计及路用性能研究也广泛展开。目前美国、法国、比利时及中国的一些学者都对掺加橡胶颗粒的沥青混合料路用性能进行了研究<sup>[1-2]</sup>。沥青混合料是由集料、沥青胶浆和空气组成的三相体系,其中集料是由粗细集料组成,是不连续的分散相,而沥青胶浆是由填料和沥青组成,是分散介质。沥青混合料中,级配、混合料的空隙率特征、路表特征,在一定尺寸范围内都存在一定的随机和统计自相似性<sup>[3]</sup>,近年来国内外道路研究工作者运用分形理论研究了混合料的级配特性及其与路用性能的关系,并取得了一定的成果。

国外学者在运用分形理论分析评价沥青混合料性能方面做了很多研究。Yeggoni 等研究了集料的形状、表面特性与沥青混合料蠕变之间的关系<sup>[4]</sup>; Cheng 等采用分形理论研究了路面的裂缝与坑槽<sup>[5]</sup>; Kokkalis 等研究了分形理论在路面抗滑中的应用<sup>[6]</sup>。中国研究人员通过对沥青混合料的分形维数研究,认为其可以揭示沥青混合料中集料的分布规律。蒋双全等通过研究认为,分形维数是表征分形特征的主要参数,它反映了混合料的微观静态结构参数<sup>[7-8]</sup>。分形理论作为一种新的理论,是非线性科学的前沿和重要的分支,又是一门新兴的横断学科。应用分形理论对于差别细微的级配的比较、描述、设计都颇具意义。

由于橡胶颗粒的基本性能与石料有较大的差别,随着橡胶颗粒的掺入,改变了沥青混合料的内部组成结构和材料的接触状态,因此恰当的矿料级配是橡胶颗粒沥青混合料成功推广应用的关键。为此,本文以掺加橡胶颗粒 AC-16 沥青混合料为研究对象,在规范级配范围内选取 5 种代表性级配,根据分形理论定量计算这 5 种级配的分形维数。将分形理论应用于评价橡胶颗粒沥青混合料的矿料级配,通过试验研究其级配分形与高温稳定性之间的关系。

## 1 沥青混合料级配的分形特性

### 1.1 沥青混合料的分形特性

沥青混合料是一种多相复合材料,沥青是多相复合材料中惟一的连续相,其他的集料材料皆为分

散相。沥青混合料是具有复杂结构的非均值、多相和多层次的复合体系,其宏观力学行为呈现出不确定性、不规则性、模糊性和非线性性。由分形理论研究可知,虽然集料破碎的物理过程十分复杂,表现出一定随机性和不规则性,但其尺度却具有不变性,集料尺寸从大到小,其动力学机制是一样的,颗粒粒径分布具有分形特性,即在任意尺度下,它总有复杂的细节。沥青混合料具有复杂的微观结构,是一种多级层次的复合材料体系,尤其是其骨料的级配具有突出的自相似性,表现出明显的分形图像特征。

### 1.2 密级配沥青混合料集料粒径分布的分形模型

对于不同粒径的集料,表征集料特征尺寸的粒径(筛孔径)具有一定的分布特征。大量的研究已经提出集料粒径分布函数的分布模型<sup>[9-10]</sup>

$$P(r) = \frac{r_{\min}^{3-D} - r_{\max}^{3-D}}{r_{\min}^{3-D} - r_{\max}^{3-D}} \quad (1)$$

式中:  $r$  为集料粒径;  $P(r)$  为粒径  $r$  的通过率;  $D$  为集料不同粒径质量分布的分形维数。

因此只要在集料级配的双对数坐标图上,利用最小二乘法对级配曲线进行最佳曲线拟合,  $\ln(P(r)) = (3-D)\ln(r) + a$ , 求得斜率  $\lambda$ , 再利用  $3-D = \lambda$ , 即可求得沥青混合料集料粒径分布的分维数  $D = 3 - \lambda$ 。

## 2 原材料试验及配合比设计

### 2.1 原材料

沥青: 沥青为盘锦 90# 沥青。

集料: 粗集料为花岗岩, 细集料为石灰岩。

橡胶颗粒: 橡胶颗粒由轮胎胎侧加工而成, 粒径为 4 目, 粒径大小在 2.36~4.75 mm 之间。试验中采用的体积掺量分别是 0、2%、3%、4%、5%, 通过动稳定度试验, 结果表明动稳定度随橡胶颗粒体积掺量的增加而增长(图 1)。相关研究在综合沥青混合料水稳定性、低温抗裂性等路用性能后表明, 橡胶颗粒体积掺量不宜大于 5%<sup>[11]</sup>。因此本文选用橡胶颗粒体积掺量为 4%, 是为了达到明显的高温稳定性效果, 实际应用中应注意降低橡胶颗粒的用量。

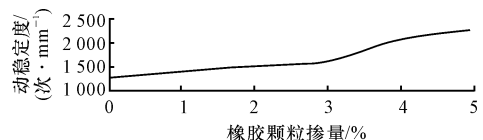


图 1 橡胶颗粒掺量与动稳定度之间的关系

Fig. 1 Relationship between dosage of rubber particle and dynamic stability

填料:石灰岩矿粉。

沥青按《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)进行测试,评价沥青性能<sup>[12]</sup>。集料按《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)进行测试<sup>[13]</sup>。经检验,原材料各项指标均满足相应试验规程要求。

原材料及其技术指标见表 1~表 3。

表 1 石油沥青技术指标

Tab. 1 Performance of petroleum asphalt

指 标	规范要求	试验结果
针入度(25 ℃,100 g,5 s)/0.1 mm	80~100	87.17
延度(5 cm/min,15 ℃)/cm	≥100	>100
软化点(环球法)/℃	42~52	50.6

表 2 集料技术指标

Tab. 2 Performance of aggregate

原材料	不同粒径(mm)的密度				矿粉	橡胶
	3~5	5~10	10~20	0~3		
毛体积密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.750	2.746	2.766	2.640	2.710	
表观密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.750	2.805	2.803	2.774	2.710	1.180

表 3 矿粉技术指标

Tab. 3 Performance of mineral powder

试验指标	规范要求	试验数据	试验方法
表观密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	≥2.5	2.71	T 0352
外观	无团粒结块	无团粒结块	

2.2 配合比

本试验沥青混合料的级配类型为连续密级配,最大公称直径为 16 mm。目前的相关研究主要集中在掺加橡胶颗粒的间断级配沥青混合料,对于连续级配的橡胶颗粒沥青混合料,相关研究已经表明其应用的可行性。由于大粒径、高弹性橡胶颗粒的掺入,改变了混合料的弹性模量和空隙率<sup>[11]</sup>,不仅能够降低行车噪音,而且相对于由间断级配沥青混合料组成的多孔弹性路面,具有耐久性好、容易养护的优点<sup>[14]</sup>。在规范级配曲线范围内选取 5 种代表性级配走向,5 种混合料级配符合规范要求(表 4),其级配曲线见图 2。

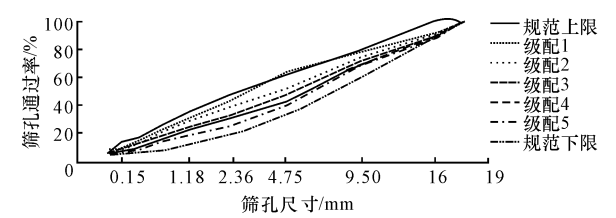


图 2 5 种混合料级配曲线  
Fig. 2 5 mixture gradation curve

研究过程中橡胶颗粒均以外掺的方式加入。5 种级配的橡胶颗粒体积掺量为 4%。掺加大粒径,高弹性的橡胶颗粒对混合料的物理性能有很大影响,在实际应用中应有一定限度,超过这一限度混合料物理性能会不再满足规范要求。

通过马歇尔试验得到 5 种级配的最佳沥青用量,见表 5。橡胶颗粒马歇尔试件成型效果较好,试验中未出现难以压实或松散现象。

表 4 5 种混合料级配

Tab. 4 5 mixture gradation

筛孔尺寸/mm	0.45 次方	级配 1	级配 2	级配 3	级配 4	级配 5	规范 上限	规范 下限
19	3.76	100	100	100	100	100	100	100
16	3.48	92	91	90	89	89	100	90
9.5	2.75	78	75	72	70	69	80	60
4.75	2.02	62	53	48	44	41	62	34
2.36	1.47	44	39	33	31	26	48	20
1.18	1.08	32	29	25	23	19	36	13
0.6	0.80	23	21	18	16	14	26	9
0.3	0.58	15	13	12	11	9	18	7
0.15	0.43	10	9	8	7	6	14	5
0.075	0.31	8	7	7	6	5	8	4

表 5 最佳沥青用量

Tab. 5 Optimum asphalt content

级配类型	级配 1	级配 2	级配 3	级配 4	级配 5
最佳沥青用量/%	4.60	4.65	4.47	4.54	4.38

3 集料分形维数与沥青混合料高温稳定性的关系

3.1 集料分形维数计算

根据筛孔尺寸和通过率的自然对数表(表 6),作出双对数坐标图,按照上述分形理论分别计算各级配粒径分布的分形维数  $D$ 。

表 6 5 种级配筛孔尺寸及通过率双对数

Tab. 6 Double logarithmic coordinate of mesh size and the pass rate of 5 gradations

筛孔尺寸 对数值	不同级配通过率的对数值				
	级配 1	级配 2	级配 3	级配 4	级配 5
2.94	4.61	4.61	4.61	4.61	4.61
2.77	4.52	4.51	4.50	4.49	4.49
2.25	4.35	4.31	4.28	4.25	4.23
1.56	4.14	4.00	3.88	3.80	3.71
0.86	3.78	3.63	3.49	3.39	3.27
0.17	3.47	3.34	3.20	3.09	2.97
-0.51	3.13	3.02	2.90	2.78	2.65
-1.20	2.68	2.61	2.51	2.38	2.23
-1.90	2.25	2.21	2.12	1.99	1.83
-2.59	2.08	2.05	1.97	1.84	1.68

集料级配的双对数坐标图如图 3~图 7 所示。图中: $x$  为  $\ln(\Phi)$ ; $y$  为  $\ln(P)$ 。

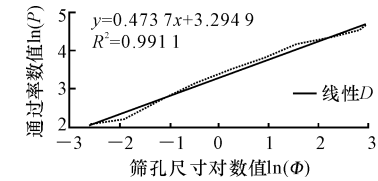


图 3 级配 1 的双对数坐标图  
Fig. 3 Double logarithmic coordinate of gradation 1

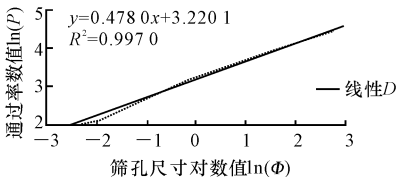


图 4 级配 2 的双对数坐标图  
Fig. 4 Double logarithmic coordinate of gradation 2

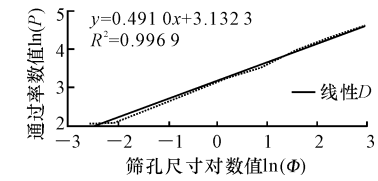


图 5 级配 3 的双对数坐标图  
Fig. 5 Double logarithmic coordinate of gradation 3

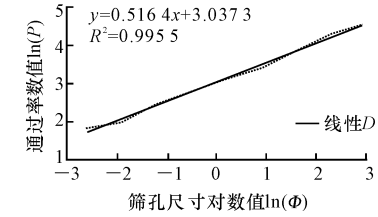


图 6 级配 4 的双对数坐标图  
Fig. 6 Double logarithmic coordinate of gradation 4

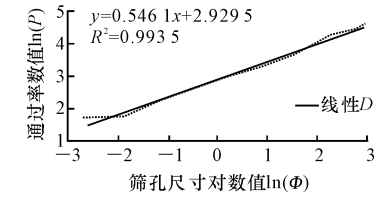


图 7 级配 5 的双对数坐标图  
Fig. 7 Double logarithmic coordinate of gradation 5

集料级配分形维数计算结果及相关系数见表 7。各级配的筛孔尺寸与筛孔通过率双对数图线性相关性好,相关系数都在 0.99 以上。

3.2 集料分形维数与沥青混合料高温稳定性的关系

沥青路面车辙是一种备受关注的路面损害类型。因此,在进行沥青混合料设计时,保证沥青混合

料的抗车辙能力就显得尤为重要。对 5 种级配的橡胶沥青混合料进行车辙试验,每种做 3 个车辙板,结果取平均值,其动稳定度试验结果见表 8。

表 7 级配分形维数

Tab. 7 Graded fractal dimensions

级配类型	斜率 $\lambda$	$D=3-\lambda$	相关系数
级配 1	0.473 7	2.526 3	0.991 1
级配 2	0.478 0	2.522 0	0.997 0
级配 3	0.491 0	2.509 0	0.996 9
级配 4	0.516 4	2.483 6	0.995 5
级配 5	0.546 1	2.453 9	0.993 5

表 8 车辙试验结果

Tab. 8 Results of rutting test

级配类型	$D$	动稳定度/(次 $\cdot$ mm $^{-1}$ )
级配 1	2.53	1 600.33
级配 2	2.52	2 639.13
级配 3	2.51	2 735.25
级配 4	2.48	5 879.80
级配 5	2.45	6 010.13

沥青混合料的高温稳定性是集料与沥青共同作用的结果,为了获得动稳定度与集料级配之间的关系,结合不同级配粗、细集料的比例,进行动稳定度与集料分形维数  $D$  的相关分析,如图 8 所示。图中: $x_1$  为  $D$ ; $y_1$  为动稳定度。

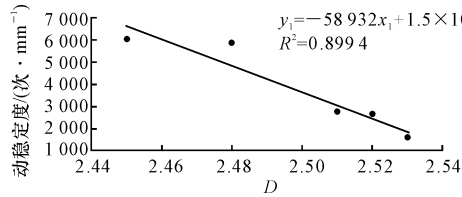


图 8 动稳定度与集料级配分形维数  $D$  的关系  
Fig. 8 Relationship of dynamic stability and graded fractal dimension  $D$

由图 8 可看出,沥青混合料的动稳定度与集料的分形维数存在着较好的相关性。集料的分形维数与动稳定度的线性相关系数高达 0.899 4。由表 8 可知,动稳定度级配 1<级配 2<级配 3<级配 4<级配 5。随着 5 种级配的分形维数的减小,粗料含量由 37% 增加到 59%,细料含量由 63% 减少到 41%(下页表 9),沥青混合料的热稳定性较好,动稳定度呈增加趋势,可知集料嵌挤效果变好,混合料由悬浮密实结构向骨架密实结构转变。根据本文的回归公式,动稳定度  $D_s=-58\ 932D+150\ 000$ ,可以预测 AC-16 沥青混合料不同级配曲线走向的动稳定度,为配合比设计过程中级配走向的选择提供参考,预估沥青混合料的路用性能。

表 9 5 种级配的粗、细集料用量

Tab. 9 Dosage of coarse and fine aggregates in 5 gradations					
级配类型	级配 1	级配 2	级配 3	级配 4	级配 5
细集料(<4.75 mm)/%	63	53	48	44	41
粗集料(≥4.75 mm)/%	37	47	52	56	59

同济大学杨瑞华博士在论文《沥青混合料分形级配理论》中提出了连续级配和间断级配分形维数分析方法,并给出相应的级配分形维数的模型公式<sup>[15]</sup>,见式(2)。本文就式(2)进一步对粗细集料分形维数与橡胶沥青混合料的动稳定度关系进行分析。

$$P(r)=\begin{cases} \left(\frac{r}{r_{\max}}\right)^{3-D_c}P_0 & r\in(4.75,r_{\max}) \\ \left(\frac{r}{4.75}\right)^{3-D_f}\left(\frac{4.75}{r_{\max}}\right)^{3-D_c}P_0 & r\in(0.075,4.75) \end{cases}$$

(2)

式中: $P_0$ 为公称最大粒径的通过率; $D_c$ 为集料颗粒粒径在 4.75 mm~ $r_{\max}$  范围的分形维数; $D_f$ 为集料颗粒粒径在 0.075~4.75 mm 范围的分形维数,4.75 mm 是粗细集料粒径的分界尺寸。

本试验集料公称最大粒径为 16 mm,按照集料分形维数的计算方法,将集料的分形维数  $D_c$ 、 $D_f$  结果汇总于表 10。

表 10 集料的分形维数  $D$ 、 $D_c$ 、 $D_f$  结果汇总

Tab. 10 Fractal dimension $D$ , $D_c$ , $D_f$ of aggregate					
类别	级配 1	级配 2	级配 3	级配 4	级配 5
$D_c$	2.651 3	2.595 2	2.536 8	2.498 0	2.475 6
$D_f$	2.487 1	2.492 5	2.516 5	2.498 6	2.482 9
$D$	2.526 3	2.522 0	2.509 0	2.483 6	2.453 9
动稳定度 $D_s$	1 600.33	2 639.13	2 735.25	5 879.8	6 010.13

分析粗、细集料分形维数、整体集料分形维数与动稳定度之间的相关性,如图 9~图 12 所示。图中: $x_2$ 、 $x_3$  为  $D$ ;  $y_2$  为  $D_c$ ;  $y_3$  为  $D_s$ 。

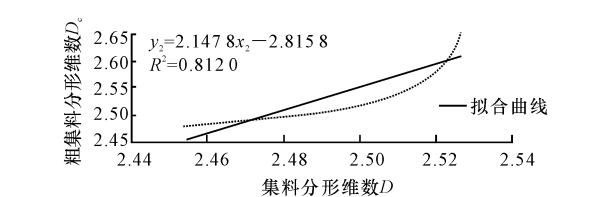


图 9  $D$  与  $D_c$  的关系

Fig. 9 Relationship of  $D$  and  $D_c$

通过回归分析,从表 11 中可以看出,集料分形维数  $D$  与粗集料分形维数  $D_c$  线性相关性好,但与细集料分形维数线性相关性差。粗集料分形维数随着粗集料通过率增加(表 9)而减小(表 10),而细集料分形维数(表 10)与细集料通过率(表 9)关系不明

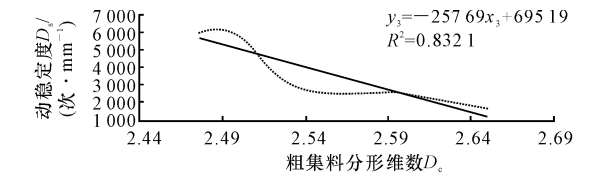


图 10  $D_c$  与  $D_s$  的关系

Fig. 10 Relationship of  $D_c$  and  $D_s$

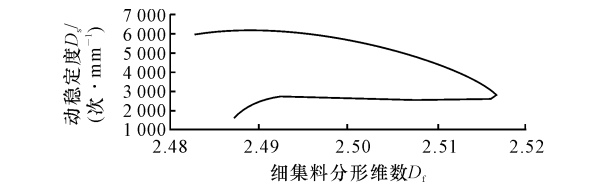


图 11  $D_f$  与  $D_s$  的关系

Fig. 11 Relationship of  $D_f$  and  $D_s$

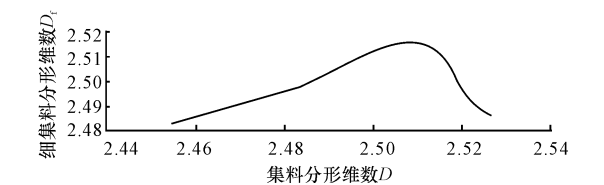


图 12  $D$  与  $D_f$  的关系

Fig. 12 Relationship of  $D$  and  $D_f$

显。对于这种橡胶沥青混合料,粗集料的分形特征与动稳定度相关性好,相关系数为 0.832 1,回归公式为  $D_s = -257.69D_c + 695.19$ 。细集料的分形维数变化不大,在 2.48~2.52 之间,且橡胶颗粒作为细集料,其掺加量固定,所以与动稳定度关系不明显。

对于本文所研究的掺加橡胶颗粒的 AC-16 沥青混合料,属于连续级配,可以用整体集料分形维数或粗集料分形维数来评价其高温稳定性。根据动稳定度与集料分形维数的回归公式可知,要满足沥青混合料的动稳定度大于 800 次/mm 的要求,整体集料分形维数不宜大于 2.53,粗集料分形维数不宜大于 2.66。

表 11 各参数之间的线性相关性

Tab. 11 Linear correlation of parameters				
类别	线性相关性( $R^2$ )			
	$D$	$D_c$	$D_f$	动稳定度 $D_s$
$D$		0.812 0	差	0.889 4
$D_c$	0.812 0		差	0.832 1
$D_f$	差	差		差
动稳定度 $D_s$	0.889 4	0.832 1	差	

4 结 语

(1)采用 AC-16 沥青混合料,其中掺加有 4% 的橡胶颗粒,在规范推荐级配范围内选取了 5 种代表

性级配,计算混合料的分形维数,通过车辙试验,表明该沥青混合料的动稳定度与集料分形维数 $D$ 之间具有较好的线性相关性。

(2) 掺加橡胶颗粒的沥青混合料的整体集料分形维数与集料中粗集料分形维数相关性好,与细集料分形维数相关性不明显,粗集料的分形维数是影响高温稳定性的主要因素。

(3) 根据动稳定度与集料分形维数的回归公式,要满足沥青混合料的动稳定度大于800次/mm的要求,整体集料分形维数不宜大于2.53,粗集料分形维数不宜大于2.66。

(4) 在级配规范范围内,根据本文提出的回归公式,可以预测AC-16不同级配曲线走向的动稳定度,为配合比设计过程中级配走向的选择提供参考,而且可以预估沥青混合料的路用性能。

## 参考文献:

## References:

- [1] 谭忆秋,周纯秀. 橡胶颗粒路面抑制路面结冰技术[M]. 北京:科学出版社,2012.  
TAN Yi-qiu,ZHOU Chun-xiu. The technology of the rubber particles pavement inhibiting road from icing [M]. Beijing:Science Press,2012. (in Chinese)
- [2] Zhou H P, Holikatti S, Vacura P. Caltrans use of scrap tires in asphalt rubber products; a comprehensive review[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering; English Edition, 2014, 1(1): 39-48.
- [3] 孙霞,吴自勤,黄响. 分形原理及其应用[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2003.  
SUN Xia, WU Zi-qin, HUANG Yun. Fractal theory and its application[M]. Hefei: Press of Chinese University of Science and Technology, 2003. (in Chinese)
- [4] Yeggoni M, Button J W, Zollinger D G. Fractals of aggregates correlated with creep in asphalt concrete[J]. Journal of Transportation Engineering, 1996, 122(2): 22-28.
- [5] Cheng H D, Miyojim M. Synthesized images for pavement management system design[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 1996, 10(1): 60-66.
- [6] Kokkalis A Q, Tsohos G H, Panagouli O K. Consideration of fractals potential in pavement skid resistance evaluation[J]. Journal of Transportation Engineering, 2002, 128(11): 591-595.
- [7] 蒋双全,张争奇,杨博. 分形几何理论在沥青混合料研究中的应用[J]. 公路, 2009(10): 198-203.  
JIANG Shuang-quan, ZHANG Zheng-qi, YANG Bo.

Application of fractal geometry theory in researching the asphalt mixture[J]. Highway, 2009(10): 198-203. (in Chinese)

- [8] 黄宝涛,梁轶,崔娥,等. 沥青混合料抗车辙性能的分形描述方法[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(6): 59-63.  
HUANG Bao-tao, LIANG Yi, CUI E, et al. Fractal description method of asphalt mixture rut resistance [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(6): 59-63. (in Chinese)
- [9] 李国强,邓学钧. 级配骨料的分形效应[J]. 混凝土, 1995(1): 3-7.  
LI Guo-qiang, DENG Xue-jun. Fractal effect of graded aggregate[J]. Concrete, 1995(1): 3-7. (in Chinese)
- [10] 陈国明,谭忆秋,王哲人,等. 沥青混合料级配曲线走向的分形研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(1): 1-4.  
CHEN Guo-ming, TAN Yi-qi, WANG Zhe-ren, et al. The fractal research of asphalt mixture gradation curves[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(1): 1-4. (in Chinese)
- [11] 高明星. 连续级配橡胶颗粒沥青路面降噪特性的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2009.  
GAO Ming-xing. Study on noise reduction characteristics of continuous gradation rubber particles asphalt pavement[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- [12] JTG E20—2011, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].  
JTG E20—2011, Test methods of bitumen and bituminous mixture for highway engineering[S]. (in Chinese)
- [13] JTG E42—2005, 公路工程集料试验规程[S].  
JTG E42—2005, Test methods of aggregate for highway engineering[S]. (in Chinese)
- [14] 曹卫东,陈旭,吕伟民. 简述国内外低噪声沥青路面研究状况[J]. 石油沥青, 2005, 19(1): 50-54.  
CAO Wei-dong, CHEN Xu, LU Wei-min. International and domestic status quo of research on low noise asphalt pavement [J]. Petroleum Asphalt, 2005, 19(1): 50-54. (in Chinese)
- [15] 杨瑞华. 沥青混合料分形级配理论[D]. 上海:同济大学, 2008.  
YANG Rui-hua. Fractal gradation theory of asphalt mixture[D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese)