

基于分形理论的就地热再生沥青混合料级配及性能分析

谢 成 刘豪斌 骆俊晖 陈江财 任天程 黄晓凤
广西北投交通养护科技集团公司 广西南宁 530025

摘 要: 为充分量化就地热再生沥青混合料级配及性能, 本文采用分形理论进行分析, 采用分形维数 D 、粗集料分形维数 D_c 、细集料分形维数 D_f 描述级配特征及混合料性能。研究表明: 分形理论能够定量描述就地热再生沥青混合料的级配特征, 旧路面级配的分形维数 D 、粗集料分形维数 D_c 与细集料分形维数 D_f 均大于原路面级配; 掺加新集料能够增强旧路面骨架作用, 改善效果随新集料掺量的增大逐渐放缓, 分形维数 D 随新集料掺配比例的增大逐渐降低, 相关系数 R^2 随新集料掺配比例的增大逐渐升高; 分形维数能够定量分析就地热再生沥青混合料性能, 且具有较好的相关性。

关键词: 道路工程; 沥青路面; 就地热再生; 分形理论; 性能研究

Research of gradation and performance of hot-in-place recycling asphalt mixture based on fractal theory

Cheng Xie, Haobin Liu, Junhui Luo, Jiangcai Chen, Tianzeng Ren, Xiaofeng Huang
Guangxi Beitou Transportation Maintenance Technology Group Co., LTD. Nanning, Guangxi 530025

Abstract: In order to fully quantify the gradation and performance of hot-in-place recycling asphalt mixture, this paper takes fractal theory as an analysis method. The fractal dimension D , coarse aggregate fractal dimension D_c and fine aggregate fractal dimension D_f are used as the indexes to describe the characteristics of gradation and mixture. The research results show that the fractal theory can quantitatively describe the gradation characteristics of hot-in-place recycling asphalt mixtures. The fractal dimension D of original pavement gradation, the fractal dimension D_c of coarse aggregate D_c and the fractal dimension D_f of fine aggregate D_f are all larger than the original pavement gradation. The skeleton effect of the original pavement is enhanced by the addition of new aggregates. The improvement effect gradually slows down with the increase of the content of new aggregate, the fractal dimension D gradually decreases with the increase of the proportion of new aggregate, and the correlation coefficient R^2 is opposite. The fractal dimension can quantitatively analyze the performance of hot-in-place recycling asphalt mixture, and has a good correlation.

Keywords: Road engineering; Asphalt pavement; Hot-in-place recycling; Fractal theory; Performance study

前言:

分形理论最初由Mandelbrot建立, 是一门定量描述

几何形态及颗粒填充的新兴学科^[1]。目前, 分形理论已广泛应用于研究自然界中常见的、不规则的、不稳定的现象。分形理论能够较好地适应材料学科中带有自相似性、非均匀性、模糊性等特征^[2]。沥青混合料是一种具有多维度多层次的复合材料体系, 级配尤为显著, 具有典型的非线性、无标度性、非规则性等特性。因此, 采用分形理论用以分析沥青混合料级配特性是可行的。

杨瑞华等人引用分形理论分析了沥青混合料级配特性, 揭示分形是集料级配的本质特征, 且分形理论能够适应现有级配设计理论, 能够较好的定量描述不同级配

项目来源: 2020年度交通部重点科技项目(2020-MS1-005)

作者简介: 谢成(1987-), 湖南娄底人, 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为道路工程材料与结构。

通讯作者简介: 刘豪斌(1992-), 河南周口人, 男, 硕士研究生, 主要研究方向为道路工程材料与结构。

之间的差异性^[3]。陈龙等人分析了分形理论与泡沫沥青冷再生混合料路用性能之间的关系,表明分形理论与泡沫沥青冷再生混合料路用性能具有较好的关联性^[4]。赵战利、张争奇等人引入分形理论分析沥青混合料抗滑性能,建立了基于分形维数与相关系数的抗滑级配双参数定量评价模型^[5]。李丽民等人在基于分形理论的基础上分析了柔性基层沥青路面车辙问题,建立起沥青混合料抗车辙性能与级配粒径分维数D之间的联系,并提出了基于骨架密实型沥青混合料抗车辙性能的预控方法^[6]。

现有研究表明分形理论能够较好地分析沥青混合料级配特征,然而就地热再生沥青混合料受制于加热温度与铣刨方式,导致旧沥青混合料级配变异性较高,掺加一定量新集料主要基于工程经验,从而导致不同地区的就地热再生沥青混合料性能出现较大变异性^[7]。因此,本文在基于广西某高速就地热再生实体工程,采用分形理论定量分析就地热再生级配及性能,为后续工程提供参考。

一、分形理论简介及级配特征表述

1. 分形理论简介

关于分形理论公式及其推导过程,国内已有大量学者进行了深入研究,本文不再进行赘述,集料粒径分布的分形模型如式(1)所示:

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

式中:

$P(r)$ 为集料质量分数;

r_{\min} 和 r_{\max} 分别代表最小和最大颗粒粒径;

D 为集料颗粒粒径分形维数。

对于常用级配, r_{\min} 远小于 r_{\max} ,故根据式(1)可导出式(2):

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

对式(2)两边分别取对数,可得出式(3):

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

因此,只需在双对数坐标图上绘制 $\lg P(r) - \lg(r/r_{\max})$ 图,用最小二乘法进行线性回归,即可通过式(4)计算得出级配的整体分形维数D。

$$D = 3 - k \quad (4)$$

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

当 $\lg P(r) - \lg(r/r_{\max})$ 图中曲线只取4.75mm以上或以下部分时,可分别计算得出粗集料和细集料的级配分形维数 D_c 和 D_f 。

2. 级配特征表述

本文以广西沿海片区某高速公路为实例,对上面层改性沥青混合料抽提后的旧集料进行筛分试验,确定旧沥青路面的级配。其试验结果如表1所示。

表1 旧路面级配抽提筛分结果

级配类型	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
旧路面级配	100	96.0	71.8	44.6	28.9	23.4	15.2	11.2	9.5	6.3
原设计级配	100	94.4	68.5	39.0	27.7	21.6	14.2	9.5	8.1	5.7
级配中值	100	95	76.5	53	37	26.5	19	13.5	10	6

采用分形理论对旧路面级配、原设计级配及AC-13级配中值进行定量描述,根据公式(3)分别计算不同级配的分形指标D、 D_c 和 D_f ,定量分析不同运营时间内级配变化特征结果如表2所示。

表2 不同级配分形指标计算结果

级配类型	D		D_c		D_f	
	值	R^2	值	R^2	值	R^2
旧路面级配	2.4850	0.9879	2.3063	0.9892	2.5430	0.9907
原设计级配	2.4635	0.9860	2.1948	0.9913	2.5318	0.9925
级配中值	2.4878	0.9982	2.4607	0.9940	2.4915	0.9960

由表2可知:

(1)旧路面在承受一定运营时间后,级配呈现偏细特征。分形指标D与相关系数 R^2 的排序为:级配中值>旧路面级配>原设计级配。这应是分形维数D与级配中细集料的含量成正比关系,随细集料含量的增大而逐渐升高;而 R^2 表示混合料的密实程度, R^2 越大,表明混合料的密实性越高。

(2)旧路面级配中粗集料含量降低,细集料含量升高。粗集料分形维数 D_c 值表明:级配中值>旧路面级配>原设计级配,而细集料分形维数 D_f 呈现出:旧路面级配>原设计级配>级配中值。这可能是旧路面承受常年交通荷载冲击碾压作用下,部分粗集料被压碎为细集料的缘故^[8]。

二、就地热再生沥青混合料级配表征

由于旧路面在承受自然条件侵蚀及交通荷载作用下,路面出现部分微车辙、裂缝、坑槽等病害;整体级配呈现偏细现象,导致路面抗滑性能衰减;同时考虑到施工期间会由于铣刨标线导致部分路面材料出现损耗。为了改善旧沥青路面抗滑性能,提升路面耐久性,需添加一部分新混合料,同时保证再生后路面厚度基本不发生变化,需对再生混合料的级配进行优化选择。

初步确定三条合成级配曲线,新料掺加比例为0%、10%、20%。级配曲线如图1所示。

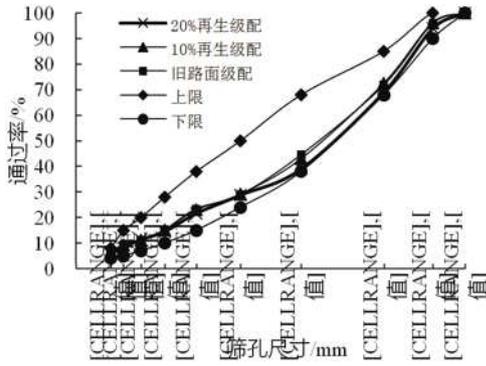


图1 不同再生级配曲线

常规评价级配粗细方式为关键筛孔通过率，然而这种方式不足以涵盖级配整体特征。为此，本文采用分形理论对再生级配特征进行评价。线性拟合结果如图2所示，拟合结果如表3所示。

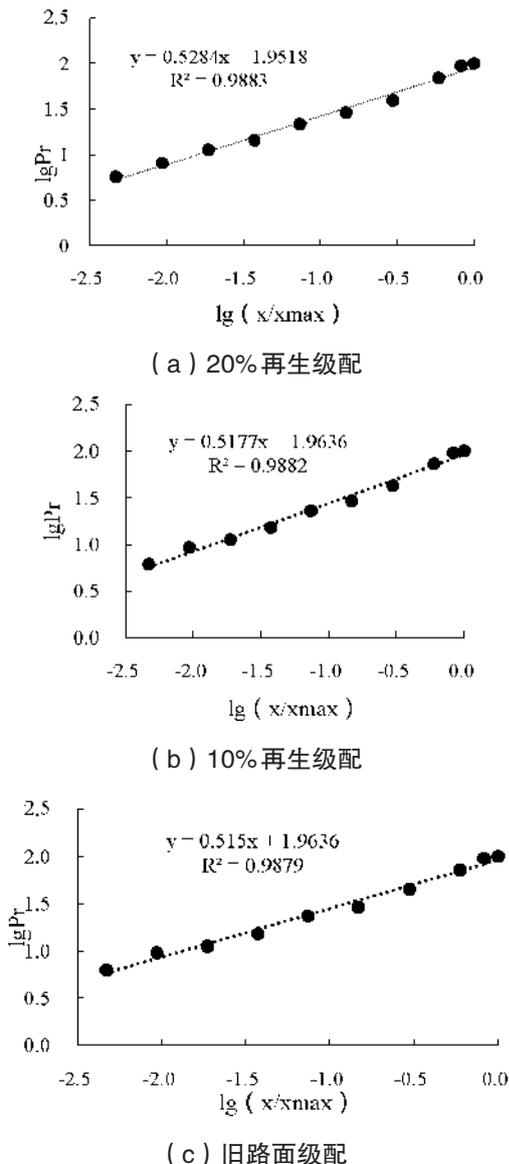


图2 不同再生级配分形拟合曲线

表3 不同再生级配分形指标拟合结果

级配类型	斜率K	分形维数D	相关系数R ²
20%再生级配	0.5284	2.4716	0.9883
10%再生级配	0.5177	2.4823	0.9882
旧路面级配	0.5150	2.4850	0.9879

由图2、表3可知：

1. 分形维数D随新集料掺配比例的增大呈现逐渐降低的趋势。随着新集料的加入，分形维数D由2.4850逐步下降至2.4716。这可能是因为旧路面级配中细集料含量最高，随新级配中粗集料的加入，旧路面级配中的细集料含量逐渐降低，而分形维数D与级配中细集料的含量成正相关关系，随细集料含量的降低而逐渐下降。

2. 级配的连续性随新集料掺配比例的增大逐渐变好。相关系数R²由0.9879逐步上升至0.9883，其中20%再生级配的R²最大，10%再生级配R²次之，旧路面级配的R²最小。这应是相关系数反映了级配的连续程度，二者呈正比关系，即R²越高，级配连续程度越好。

3. 再生级配随新集料掺加比例的上升逐渐呈粗型级配，改善效果随新集料掺量的增大逐渐放缓。20%再生级配与10%再生级配的分形维数D差值为0.0007，小于10%再生级配与旧路面级配的分形维数差值0.0027。从改善旧路面粗集料受车辆荷载导致破碎偏细状况考量，掺20%新集料的再生级配效果最佳。

三、分形维数与就地热再生沥青混合料性能的关系

依据工程经验，确定再生剂掺量为旧沥青质量的4%，同时添加0.2%的热沥青；为了进一步量化级配与就地热再生沥青混合料性能之间的关系，本章将马歇尔体积参数、力学指标及混合料性能指标（车辙试验与浸水马歇尔试验）与分形维数建立关系，为选取最优级配提供试验数据支撑。

1. 马歇尔体积参数

对不同级配的混合料进行马歇尔试验，其马歇尔体积参数试验结果如表4所示。

由表4可知：

(1) 再生沥青混合料的马歇尔体积指标均满足规范要求，且均优于旧沥青混合料。掺10%与20%的再生沥青混合料的最大理论相对密度、毛体积相对密度、VV、VFA均优于旧沥青混合料，而再生沥青混合料VMA低于旧沥青混合料。

(2) 再生沥青混合料的马歇尔体积指标均随新集料的增加呈增大趋势，且增长趋势逐渐放缓。相较于10%再生混合料，20%再生混合料的VV、VMA、VFA的变化

表4 再生混合料马歇尔体积指标试验结果

混合料级配类型	分形维数D	油石比 (%)	最大理论相对密度	毛体积相对密度	空隙率 VV (%)	沥青饱和度 VFA (%)	矿料间隙率 VMA (%)
20%再生级配	2.4716	5.0	2.642	2.531	4.2	71.2	14.5
10%再生级配	2.4823	5.0	2.641	2.526	4.6	70.9	14.6
旧路面级配	2.485	5.0	2.638	2.477	6.1	68.6	14.8
技术要求	-	-	实测	实测	3 ~ 6	65 ~ 75	≥ 14.3

值低于10%再生混合料与旧沥青混合料的变化值。

(3) 再生沥青混合料最大理论相对密度、毛体积相对密度、VFA的变化趋势与分形维数D的变化趋势呈负相关关系；而VV、VMA的变化趋势与分形维数D变化趋势呈正相关关系。

2. 马歇尔力学指标

马歇尔稳定度与流值，能在一定程度上反应沥青混合料抵抗外力效果，不同级配的马歇尔力学指标试验结果如表5所示。

表5 再生混合料马歇尔力学指标试验结果

混合料级配类型	分形维数D	稳定度MS (kN)	流值FL (0.1mm)
20%再生级配	2.4716	13.46	32.8
10%再生级配	2.4823	13.01	30.7
旧路面级配	2.4850	11.04	26.1
技术要求	-	-	实测

由表5可知：再生沥青混合料的稳定度和流值均优于旧沥青混合料，且变化趋势与分形维数D相似，均呈现先增大后变缓的趋势。10%再生混合料比旧沥青混合料稳定度MS与流值FL分别增长了1.97kN、4.6mm，20%再生混合料比旧沥青混合料仅分别增大了0.45kN、2.1mm。这种变化趋势与分形维数D保持一致。

3. 混合料性能指标

为了进一步量化分形维数D与就地热再生混合料性能的关系，本文采用动稳定度DS与浸水马歇尔残留稳定度MS₀表示沥青混合料的高温性能与抗水损害性能。试验结果如表6所示。

表6 再生混合料性能指标试验结果

混合料级配类型	分形维数D	动稳定度 (次/mm)	浸水马歇尔残留稳定度MS ₀ (%)
20%再生级配	2.4716	6160	89.5
10%再生级配	2.4823	5845	88.2
旧路面级配	2.485	4351	86.1
技术要求	-	≥ 2800	≥ 85

为了进一步明晰分形维数D与动稳定度、浸水马歇尔残留稳定度的关系，建立如图3所示的关系图。

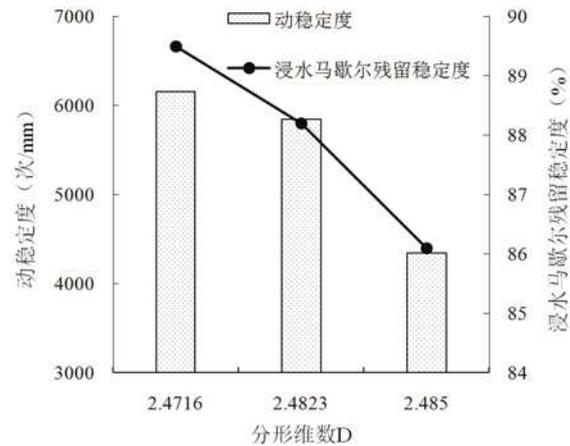


图3 分形维数D与混合料性能指标关系

由表6、图3可知：

(1) 再生沥青混合料的高温稳定性与抗水损害性能与分形维数D呈负相关关系，即随分形维数的增大而逐渐下降。再生沥青混合料的动稳定度与浸水马歇尔残留稳定度随掺量的增大分别降低1809次/mm、3.4%。

(2) 再生沥青混合料性能随掺量的增大呈现先增大而后放缓的趋势。10%再生混合料比旧沥青混合料动稳定度与浸水马歇尔残留稳定度分别增长了1494次/mm、2.1%，20%再生混合料比10%再生沥青混合料仅分别增大了315次/mm、1.3%。

四、结论

1. 分形理论能够定量描述就地热再生沥青混合料的级配特征，旧路面级配变细的主要原因是由于粗集料被压碎为细集料，且旧路面级配的D、D_c、D_f均大于原设计级配。

2. 掺入新集料能够增强旧路面骨架作用，分形维数D随新集料掺配比例的增大呈现逐渐降低，相关系数R²表明级配的连续性随新集料掺配比例的增大逐渐变好；再生级配随新集料掺配比例的上升逐渐呈粗型级配，改善效果随新集料掺量的增大逐渐放缓。

3. 再生沥青混合料的马歇尔体积指标均随新集料的增加呈增大趋势，且增长趋势逐渐放缓，最大理论相对密度、毛体积相对密度、VFA的变化趋势与分形维数D

的变化趋势呈负相关关系, 而VV、VMA的变化趋势与分形维数D变化趋势呈正相关关系; 马歇尔稳定度、流值、动稳定度与浸水马歇尔残留稳定度随级配变粗逐渐变好。

4. 分形维数能够在定量分析就地热再生沥青混合料性能, 分形维数评价就地热再生沥青混合料的性能具有较好的相关性。

参考文献:

[1]MANDELBROT, BENOIT B. The Fractal Geometry of Nature[J]. American Journal of Physics, 1998,51(3): 468.

[2]XU Y, WANG F, YANG X, et al. Fractal dimension in concrete and implementation for meso-simulation[J]. Construction and Building Materials, 2017,143: 464-472.

[3]杨瑞华, 许志鸿, 张超, 等. 沥青混合料分形级配理论[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2008, 36 (12): 5.

[4]陈龙, 何兆益, 陈宏斌. 基于分维度指标的泡沫沥青冷再生基层路用性能研究[J]. 公路交通科技, 2016, 33 (2): 5.

[5]赵战利, 张争奇, 薛建设, 等. 基于分形理论的沥青混合料抗滑级配评价[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28 (3): 5.

[6]李丽民, 陈云勇, 蒋建清. 基于体积指标与分形理论的骨架密实型沥青混合料抗车辙性能预控[J]. 材料科学与工程学报, 2018, 36 (5): 7.

[7]马登成, 任化杰, 马尉倘. 沥青路面就地热再生混合料级配优化设计[J]. 公路交通科技, 2014, 31 (8): 1-6.

[8]李健. 改性沥青路面就地热再生关键技术研究[D]. 东南大学, 2016.