

基于分形维数及考虑假集料影响的冷再生混合料级配控制方法

韩占闯, 刘黎萍, 孙立军

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 为了更好控制混合料级配, 以获取最佳路用性能, 对冷再生混合料级配分形特征以及沥青路面回收旧料(RAP)假集料特性开展了研究。首先选取了规范级配范围内 6 种代表性级配曲线, 借助分形几何理论, 建立了粒径分布函数, 得到了合成级配分形维数(D)、粗集料级配分形维数(D_c)及细集料级配分形维数(D_f), 并分析了三者与冷再生混合料干劈裂强度、冻融劈裂强度比、动稳定度和最大弯拉应变的相关性, 然后建立了基于级配分形维数的冷再生混合料路用性能预估模型, 最后通过分析级配变异性对冷再生混合料性能的影响, 提出了考虑假集料影响的冷再生混合料级配控制方法。结果表明: 分形维数可以定量描述冷再生混合料粒径分布及级配走向, 进而反映冷再生混合料各项路用性能, 基于分形维数的性能预估模型可以较好预测冷再生混合料各项路用性能, 预估与实测值相对误差基本在 15% 以内; 当冷再生混合料“抽提前后级配变化率方差”(D_v) 大于 85 或“抽提前后级配变化值”(V_a) 大于 3.6 时, 宜通过添加新粗集料或调整级配曲线靠近下限等措施来提升冷再生混合料高温抗力。

关键词: 分形维数; 假集料; 冷再生混合料; 级配; 预估模型; 路用性能

中图分类号: U414

文献标志码: A

Gradation Control Method of Cold-Recycled Mixture Considering Influence of Fractal Dimensions and False Aggregates

HAN Zhanchuang, LIU Liping, SUN Lijun

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to better control the mixture gradation and obtain the best road performance, the fractal

characteristics of the gradation of cold-recycled mixtures (CRM) and the characteristics of reclaimed asphalt pavement (RAP) false aggregates are studied in this paper, which involves the selection of six representative gradation curves within the standard gradation range. Further, the particle size distribution function is established with the help of the fractal geometry theory and the fractal dimension of composite gradation (D), the fractal dimension of coarse aggregate gradation (D_c), and the fractal dimension of fine aggregate gradation (D_f) are obtained. The correlation between the fractal dimension and dry splitting strength, freeze-thaw splitting strength ratio (TSR), dynamic stability, and maximum tensile bending strain of the CRM is analyzed. Subsequently, a road performance prediction model of the CRM based on the fractal dimension of gradation is established. Finally, by analyzing the influence of the variability of the gradation on the performance of the CRM, the gradation control method of the CRM considering the influence of false aggregates is proposed. The results indicate that the particle size distribution and gradation of the CRM can be quantitatively described by the fractal dimension so as to reflect the road performance of the CRM. Based on the performance prediction model of the fractal dimension, the road performance of the CRM can be well predicted, and the relative error between the predicted and measured values is basically within 15%. When the variance of gradation change rate before and after extraction (D_v) > 85 or gradation change value before and after extraction (V_a) > 3.6, the high-temperature resistance of the CRM should be improved by adding a new coarse aggregate or adjusting the gradation curve closer to the lower limit.

Key words: fractal dimension; false aggregates; cold-recycled mixture; gradation; prediction model; road performance

收稿日期: 2022-01-16

基金项目: 国家自然科学基金资助(51978521, 51778483)

第一作者: 韩占闯(1991—), 男, 博士生, 主要研究方向为道路工程方向。E-mail: 1911543@tongji.edu.cn

通信作者: 刘黎萍(1968—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为道路工程方向。

E-mail: llp@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

矿料级配是指把不同粒径大小的集料,按照一定的比例搭配起来,使其达到较高的密实度或强度,以满足设计施工的需要^[1]。矿料的级配几乎影响到冷再生混合料的所有重要特性,包括高低温稳定性、耐久性、水稳定性、施工和易性、抗疲劳开裂能力等^[2-3]。因此,展开针对冷再生混合料的级配控制研究具有重要意义,也是从源头把控混合料获取优异路用性能的手段之一。借助分形学理论来研究集料级配问题是近年来的热门课题之一。分形学是研究自然界中大量存在的不规则现象的理论工具,它是一门以不规则几何形态为研究对象的几何学,其作为一种新的概念和方法,已经在图形学、材料学、数学、地质地貌学等领域广泛应用^[4-6]。分形理论(fractal theory)是由美籍数学家本华·曼德博率先提出的,基本特点是用分数维数的视角和数学方法描述和研究客观事物,也就是用分形分维的数学工具来研究客观事物^[7-9]。沥青混合料颗粒分布在一定尺度范围内存在随机性和统计自相似性,很难用常规的数学语言加以准确描述,因此,国内外道路工作者开始尝试采用分形理论来研究集料级配问题。在国外,Yeggoni等^[10]认为粗集料形状及表面纹理对沥青混合料永久变形产生较大影响,而采用分形维数可有效分析集料颗粒形状及表面纹理,因而得出分形维数与沥青路面车辙具有较好相关性;Pan等^[11]基于级配分形理论对不同沥青路面回收旧料(reclaimed asphalt pavement, RAP)掺量下热再生混合料级配进行了研究,发现分形维数 D 可以用于评价热再生混合料级配离析程度,并以此取得了良好的应用效果。在国内,许志鸿等^[12]分析了分形级配理论与现有级配理论之间的关系,发现分形是集料级配的本质,分形级配理论可以涵盖泰波级配理论、林绣贤级配理论、前苏联伊万诺夫修正级配理论、粒子干涉级配理论、贝雷法级配理论等;张争奇等^[13]基于分形理论对沥青混合料的抗滑级配进行了定量评价,计算出抗滑级配分维数为2.5~2.6,矿粉质量分数合理范围为6%~10%;以上研究成果对沥青混合料级配优化设计做出了一定贡献,也为后续道路工作者研究集料级配提供了基础理论依据。然而,我国目前再生技术规范中推荐的矿料级配范围比较宽泛,根据以往工程级配设计经验,规范范围内的级配曲线并不都能满足路用性能要求,因此需要尝试多种级配方案进行冷再生混合料配合比设计,或者按规范推荐曲线中值进行级配设计,或者根据设计人员经验,首先判断铣刨旧料细化程度,当铣刨料偏细时,采用

偏粗的级配进行设计,如此将会导致级配选择的随意性,势必会造成所设计级配不能发挥出冷再生混合料的最佳路用性能^[14]。此外,冷再生混合料级配有着其自身的特殊性,RAP料是冷再生沥青混合料的主要成分,在混合料中的比例可达90%左右,RAP受到料源、服役寿命、维修及铣刨方式等因素的影响,在加工过程中,经常出现矿料和旧沥青胶结料粘聚在一起的现象,俗称“黑石”,这种“黑石”并不是真正的矿料,故命名为“假集料”。在级配设计过程中,“假集料”现象将会导致RAP料级配的失真,往往比实际设计的矿料级配偏细,这种在级配设计阶段产生的变异性将会影响冷再生混合料的路用性能。基于上述存在问题,本文从分形理论角度来分析冷再生混合料级配分形特征,拟找出级配分形特征与冷再生混合料路用性能的关系,以期在级配设计初期就能预测冷再生混合料路用性能,进而指导工程级配的优化设计;同时又以“假集料”问题为切入点,分析“假集料”对冷再生混合料性能的影响,提出降低“假集料”影响的冷再生混合料级配优化方法;最后借助分形维数和考虑假集料的影响,拟提出一种新的冷再生混合料级配控制方法,以保证混合料级配的稳定性及路用性能的提升。

1 分形维数及矿料变异性计算

(1) 矿料级配分形维数计算

分形维数 D 反映了复杂形体占有空间的有效性,它是复杂形体不规则性的量度。通过级配集料质量分形公式,可以求出已知各筛孔通过率条件下的级配集料的 D 值,在许志鸿^[12]、张争奇^[13]等的研究中,均有详细的矿料分形维数推导过程,即:

$$P(x) = \frac{m}{M} = \left(\frac{d}{d_{\max}} \right)^{3-D} \quad (1)$$

式中: $P(x)$ 为质量分布函数; m 为不大于粒径 d 的集料总质量; M 为最大公称粒径 d_{\max} 的集料质量。对式(1)两边取对数可得:

$$\ln\left(\frac{m}{M}\right) = (3-D)\ln d + a \quad (2)$$

令 $3-D$ 等于 b ,根据式(2),利用最小二乘法对冷再生混合料进行最佳曲线拟合,求参数 b 和 a ,即可求解级配分形维数 D 。

(2) 抽提前后级配变化值

采用级配分形理论来量化冷再生混合料抽提前后级配的变异性,式(2)中,可分别得到冷再生混合

料抽提前后的级配最佳拟合曲线,在横坐标区间内,采用两条拟合直线间的面积来表示级配变化程度,即抽提前后级配变化值,用 V_a 来表示。计算过程如图 1 所示,面积越大,说明抽提前后级配的变化就越大, V_a 计算公式如下:

$$V_a = \int_{a_1}^{a_2} |y_2 - y_1| dx \quad (3)$$

$$V_a = S_1 + S_2 \quad (4)$$

式(3)—(4)中: y_1 为抽提前级配最佳拟合直线; y_2 为抽提后级配最佳拟合直线;横纵坐标 ($\ln d, \ln(m/M)$) 参考公式(2); a_1, a_2 为横坐标固定区间,本文取 $[-2, 2]$; S_1, S_2 为两直线围成区域的面积。

(3) 抽提前后级配变化率方差

合成矿料抽提前后的级配变化可以反映老沥青在混合料中的分布状况以及 RAP 料的胶团程度。引用杨进提出的“抽提前后级配变化率的方差”来描述抽提前后冷再生混合料级配的变化程度,其计算方法为 13.2、4.75、2.36、0.3、0.075 mm 五个筛孔抽提前后通过率变化值的方差,见式(5):

$$D_v = \text{VAR}(g_{13.2(9.5)}, g_{4.75}, g_{2.36}, g_{0.3}, g_{0.075}) \quad (5)$$

式中: D_v 为抽提前后级配变化率的方程; $\text{VAR}(x)$ 为方差的函数形式; $g_{13.2(9.5)}$ 表示 13.2 mm(对粗粒式

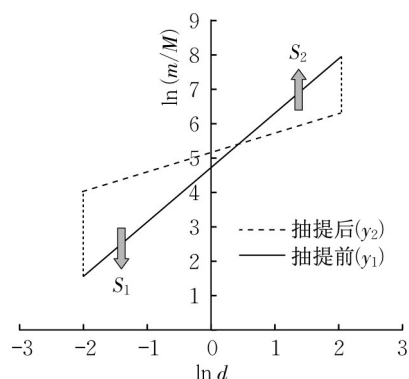


图 1 变异系数计算示意图

Fig. 1 Calculation of gradation variation value

级配)或 9.5 mm(对中粒式级配)筛孔抽提前后通过率之差,%; $g_{4.75}, g_{2.36}, g_{0.3}, g_{0.075}$ 类同。

2 原材料及试验方案

2.1 原材料

(1) 乳化沥青

本次试验采用的乳化沥青具体指标如表 1 所示。

表 1 乳化沥青性质试验结果

Tab.1 Test results of emulsified asphalt properties

试验项目	单位	试验数值	技术要求	试验方法	
筛上残留物(1.18 mm 筛)	%	0.03	≥0.1	T0652—1993	
粒子电荷	—	阳离子(＋)	阳离子(＋)	T0653—1993	
破乳速度	—	慢裂	慢裂或中裂	T0658—1993	
粘度(恩格拉粘度 E_{25})	—	11	2~30	T0622—1993	
粘度(赛博特粘度 V_s)	Pa·s	24.98	7~100	T0621—1993	
蒸发残留成分含量	%	62.6	≤62	T0651—1993	
残留物	针入度 25℃	0.1 mm	71.1	50~300	T0604—2000
	延度 15℃	cm	56.8	≤40	T0605—1993
	软化点 5℃	℃	45.8	—	T0606—2000
	溶解度	%	98.3	≤97.5	T0607—1993
常温储存稳定性:1 d	%	0.8	≥1	T0655—1993	
常温储存稳定性:5 d	%	3	≥5	T0655—1993	
与粗集料的粘附性		≥2/3	≤2/3	T0654—1993	

(2) RAP 及碎石

论文旧料 RAP 来源为内蒙某高速改扩建旧沥青面层铣刨料,分三档:0~5 mm、5~10 mm 及 10~30 mm,新集料采用石灰岩碎石。

(3) 矿粉、水泥、水

矿粉、水泥分别由内蒙某材料公司生产,其技术指标符合《公路沥青路面施工技术规范》^[15](JTG F40—2004)规定的技术要求;水选用自来水。

2.2 试验方案

(1) 冷再生混合料级配分形研究

按照《公路沥青路面再生技术规范》^[16]JTG/T 5521—2019 中推荐的级配范围选取具有代表性的 6 种级配,分别编号级配 1 至级配 6。级配 1 是靠近规范级配下限,级配 2 是沿着级配中值,级配 3 是靠近级配上限,级配 4 是筛孔尺寸在 0.075~13.2 mm 范围内靠近级配下限,13.2~31.5 mm 范围内靠近级配上限,级配 5 是筛孔尺寸在 0.075~13.2 mm 范围

内靠近级配上限,13.2~31.5 mm范围内靠近级配下限,级配6是在规范范围内任意挑选的级配曲线;选取课题组以往成功应用于高速公路冷再生项目上的级配,分别编号为级配7至级配12;上述12种冷再生混合料级配如表2所示。

分别计算级配1至级配12的合成级配分形维数(D)、粗集料级配分形维数(D_c)以及细集料级配分形维数(D_f),然后采用级配1至级配6进行冷再生混合料干劈裂强度、冻融劈裂强度比(freeze-thaw splitting strength ratio, TSR)、动稳度、低温小梁试验,分析级配分形维数与冷再生混合料路用性能的关系,提出路用性能

预估方程式,并采用级配7至级配12进行验证。其中 D_c 是指筛孔尺寸 ≥ 4.75 mm的级配分形维数, D_f 是指筛孔尺寸 < 4.75 mm的级配分形维数。

(2)考虑假集料影响的冷再生混合料级配控制方法研究

选取5种各档级配差异比较大的RAP料,分别编号为RAP-A、RAP-B、RAP-C、RAP-D、RAP-E,且这5种旧料均来自于同一高速公路改扩建工程,各档RAP抽提前后级配曲线结果如图2所示,其中,AE表示抽屈后,BE表示抽提前。

分别采用以上5种RAP料进行干劈裂强度及动

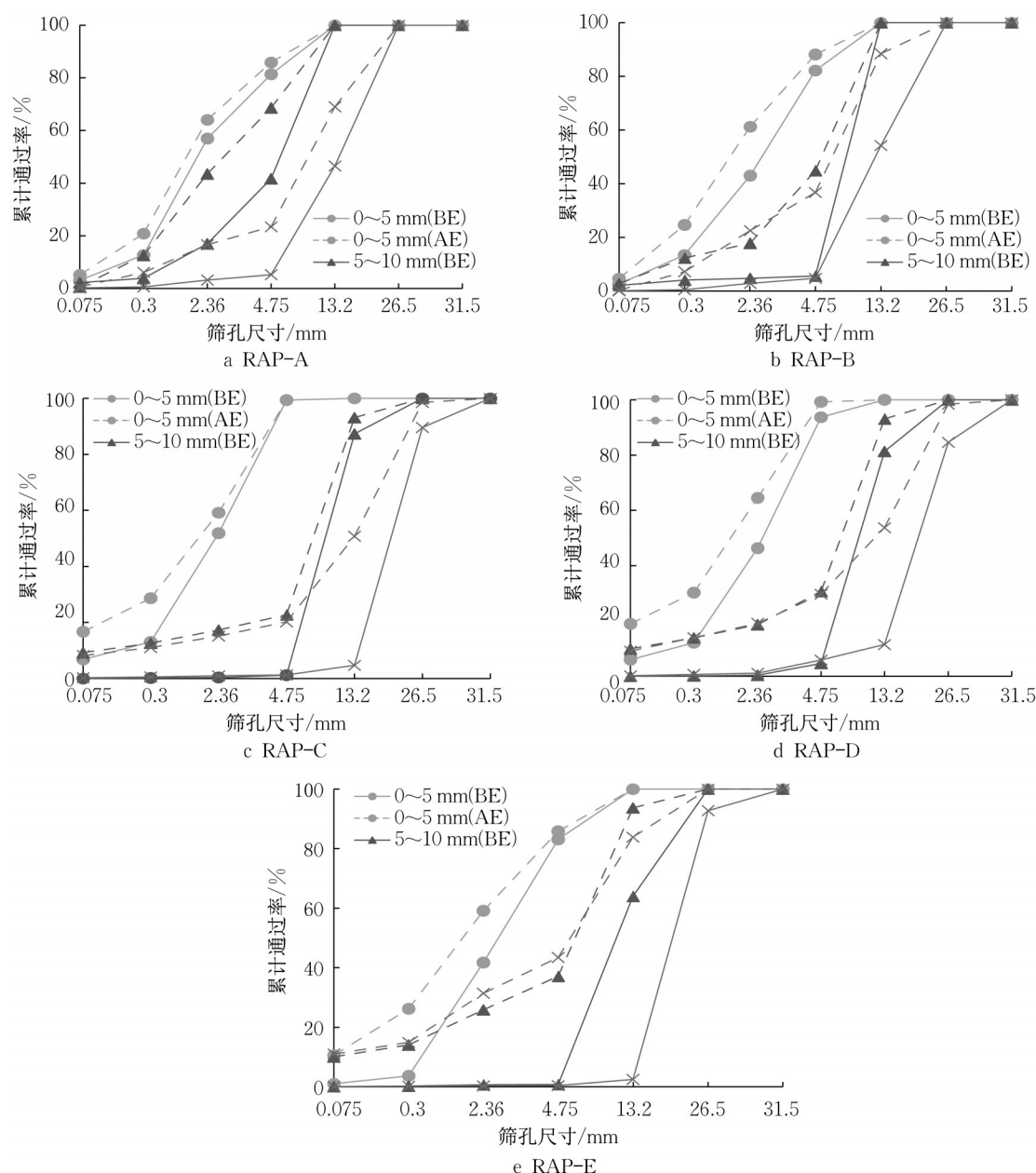


图2 冷再生混合料级配抽提前后差值分析图

Fig. 2 Difference analysis of cold recycled mixture gradation before and after extraction

表2 不同冷再生混合料级配

Tab. 2 Gradation of different cold recycled mixtures

级配类型	通过下列筛孔质量分数/%						
	31.5 mm	26.5 mm	13.2 mm	4.75 mm	2.36 mm	0.3 mm	0.075 mm
级配1	100	83.2	63.5	27.9	17.2	4.6	1.5
级配2	100	91.8	67.8	43.1	31.4	12.9	3.5
级配3	100	98.5	78.2	59.3	43.1	17.5	4.8
级配4	100	96.7	73.6	37	23.9	7.9	3.1
级配5	100	86.1	70.7	52.2	38.5	15.3	4
级配6	100	87.9	69.1	47.9	36	12	3.1
级配7	100	85.1	65.2	34	20	7	2
级配8	100	99.8	71.9	36.9	24.9	5.8	2.7
级配9	100	99.1	70	37	18	4.1	4
级配10	100	99.2	78.1	44.8	28.7	11.7	4.7
级配11	100	97.5	78.6	40.8	23.1	6.9	3
级配12	100	99.7	77	37.8	24.5	6.4	3.1

表3 冷再生混合料级配分形维数方程回归和相关系数

Tab. 3 Regression and correlation coefficient of fractal dimension equation of cold recycled mixture gradation

不同分形维数指标	系数	分形维数方程回归和相关系数					
		级配1	级配2	级配3	级配4	级配5	级配6
D	a	2.262 7	2.890 2	3.153 2	2.695 3	3.020 8	2.844 6
	b	0.686 4	0.520 9	0.474 0	0.579 0	0.490 9	0.542 6
	R^2	0.997 5	0.977 4	0.955 5	0.997 2	0.957 8	0.964 7
D_F	a	2.279 1	3.025 9	3.339 1	2.699 3	3.214 9	3.079 8
	b	0.702 1	0.620 3	0.621 0	0.587 9	0.640 4	0.706 0
	R^2	0.995 7	0.951 7	0.954 3	0.995 9	0.952 8	0.968 1
D_C	a	2.362 1	3.073 4	3.635 6	2.829 7	3.439 3	3.279 3
	b	0.649 5	0.442 8	0.284 8	0.530 8	0.323 7	0.374 6
	R^2	0.979 4	0.999 9	0.995 8	0.976 4	0.979 8	0.993 0

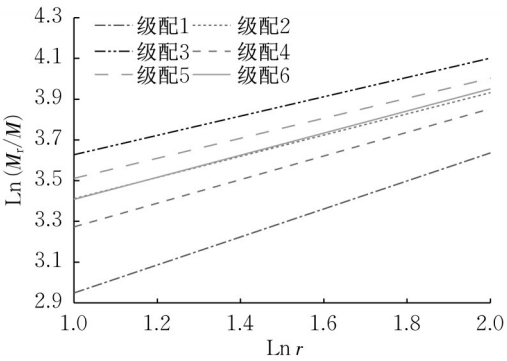


图3 不同分形维数拟合直线方程

Fig. 3 Fitting linear equation with different fractal dimensions

由表3和图3可知,合成级配分形维数(D)、粗集料级配分形维数(D_C)及细集料级配分形维数(D_F)随级配走向的不同而发生改变,最佳拟合方程 R^2 值较高,说明双对数模型可以较好拟合冷再生混合料级配,即分形维数值可较好区分不同冷再生混合料级配。随着 D 值的增大,冷再生混合料颗粒构成更

稳定度试验,同时计算5种RAP料抽提前后合成级配变化值以及抽提前后合成级配变化率方差,分析级配变异性对冷再生混合料力学性能的影响。

3 试验结果及分析

3.1 冷再生混合料级配分形维数

根据1节中计算方法,求得冷再生混合料合成级配分形维数(D)、粗集料级配分形维数(D_C)、细集料级配分形维数(D_F)回归方程系数及相关系数如表3所示,图3是分形维数(D)双对数坐标最佳拟合方程。

加无序,级配也就更细, D_C 与 D_F 分别表示集料粗细颗粒占比,占比越大, D_C 、 D_F 也就越大。因此可以推测,不同分形特征参数可以反映不同级配走向之间的结构特征,进而影响冷再生混合料的路用性能。

3.2 冷再生混合料级配分形维数与路用性能相关性

级配1至级配6冷再生混合料干劈裂强度(R_T)、TSR、动稳定度(D_s)、最大弯拉应变(ϵ_B)试验结果及分形维数值如表4所示,采用表4试验结果分别对 D 、 D_C 、 D_F 做回归方程拟合分析,如图4所示。

由表4和图4可知,不同级配走向冷再生混合料表现出不同的路用性能, R_T 、TSR、 D_s 、 ϵ_B 与 D 、 D_C 呈现出较好的线性相关性,相关系数基本在0.90以上,与 D_F 相关性比较差。当 D 从2.526 0降低到2.313 6时, R_T 、TSR、 D_s 、 ϵ_B 值分别至少变化了43 %、25 %、407 %、120 %,尤其是高、低温性能变化特别显著,以上性能的明显变化也验证了3.1中的推测,不同分形特征参数可以反映不同级配走向之间的结构特征,进而影响冷再生混合料的路用性能。

表 4 不同级配分形维数下冷再生混合料路用性能试验结果

Tab. 4 Road performance test results of cold recycled mixture with different fractal dimensions

不同级配		级配 1	级配 2	级配 3	级配 4	级配 5	级配 6
分形维数	D	2.313 6	2.479 1	2.526 0	2.421 0	2.509 1	2.457 4
	D_F	2.297 9	2.379 7	2.379 0	2.412 1	2.359 6	2.294 0
	D_C	2.350 5	2.557 2	2.715 2	2.469 2	2.676 3	2.625 4
干劈裂强度/MPa		0.99	0.82	0.69	0.91	0.73	0.79
TSR/%		70	82	88	80	84	83
$D_s/(\text{次}\cdot\text{mm}^{-1})$		8 370	4 126	1 649	6 152	3 029	4 782
最大弯拉应变/ ϵ_B		1 479	2 937	3 257	2 689	3 149	2 845

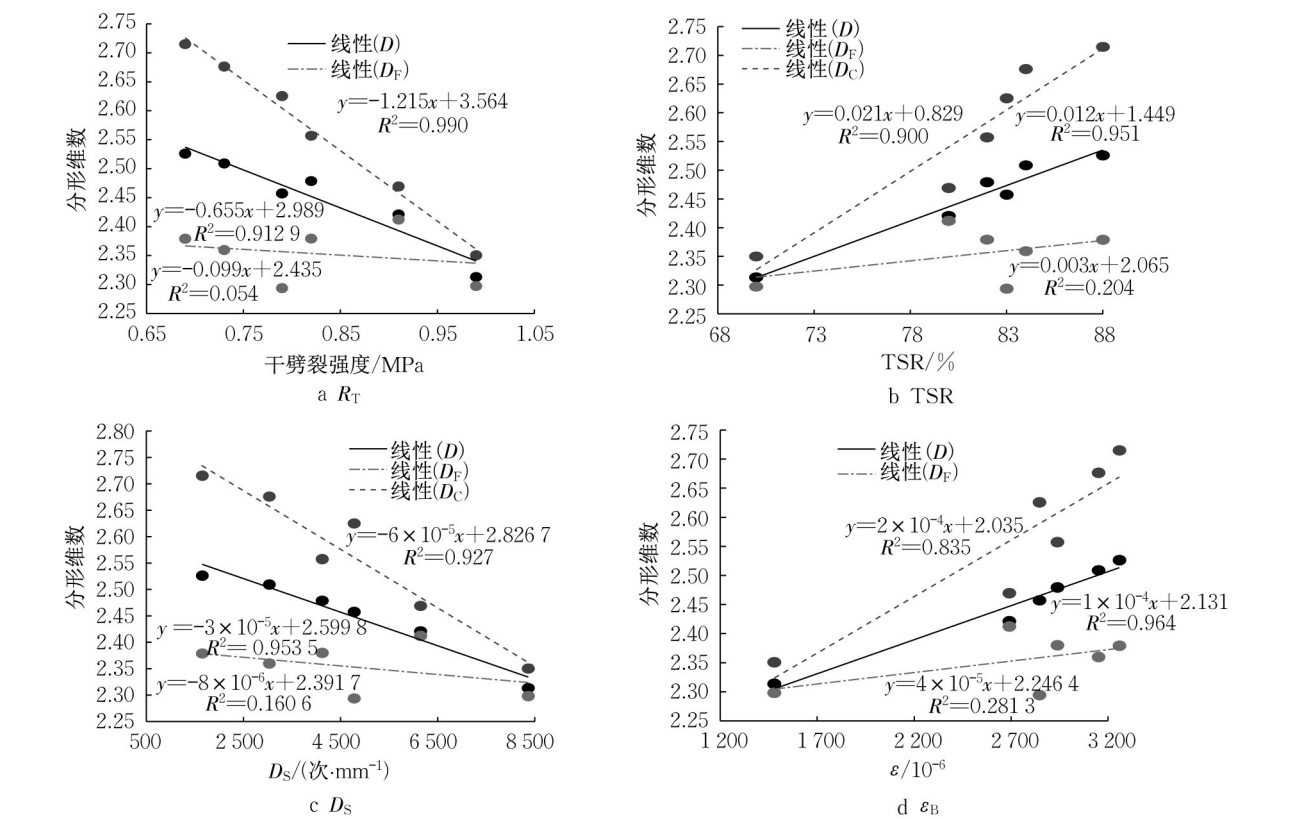


图 4 不同分形维数与冷再生混合料路用性能线性相关性分析

Fig. 4 Linear correlation analysis of different fractal dimensions and road performance of cold recycled mixture

3.3 冷再生混合料路用性能预估方程及验证

根据 R_T 、TSR、 D_s 、 ϵ_B 与 D 、 D_C 、 D_F 的相关性分析可知,调整冷再生混合料中级配构成可有效改善其路用性能,因此,通过对混合料级配微调、选择,就可预知冷再生混合料的路用性能。为找出分形维数和性能之间的定量关系,本文采用表1中级配1至级配6方案建立基于分形维数的路用性能分形预测模型,然后采用级配7至级配12对所提预估方程进行验证。

(1) 预估方程建立

考虑到 D 、 D_C 对路用性能指标具有较大影响,线性相关系数比较大,因此通过MATLAB编程分别建立 R_T 、TSR、 D_s 、 ϵ_B 相对 D 、 D_C 的二元线性预测模型。编程时,设因变量 Z 为路用性能指标,两个自变

量分别为 $x = D$ 、 $Y = D_C$,即二元线性方程式为: $Z = X_1 + X_2 \cdot D + X_3 \cdot D_C$;式中 X_1 、 X_2 、 X_3 均为常数。基于MATLAB程序计算回归路用性能预估方程分别为

$$R_T = 3.03 - 0.109 \quad 8 \cdot D - 0.755 \quad 9 \cdot D_C, \quad R^2 = 0.990 \quad 9$$

$$R_{TS} = -92.58 + 60.96 \cdot D + 9.483 \times D_C, \quad R^2 = 0.955 \quad 3$$

$$D_s = (6.865 \times 10^4) - (1.976 \times 10^4) - 6 \quad 056 \cdot D_C, \quad R^2 = 0.964 \quad 8$$

$$\epsilon_B = (-1.926 \times 10^4) + (1.017 \times 10^4) - 1 \quad 149 \cdot D_C, \quad R^2 = 0.970 \quad 4$$

由以上方程可以看出,冷再生混合料路用性能

与 D 、 D_c 具有较好的相关性,二元线性相关系数可达0.95以上,说明本研究建立的基于分形维数的二元线性预估模型具有较高的精度。

(2) 预估方程验证

采用级配7至级配12对所提预估方程验证结果

如图5所示。其中相对误差指的是预估值所造成的绝对误差与实测值之比,设预估结果 y 减去试验实测值 t ,所得的误差或绝对误差为 Δ 。将绝对误差 Δ 除以约定真值 t 即可求得相对误差。一般来说,相对误差越小越能反映预估值的可信程度。

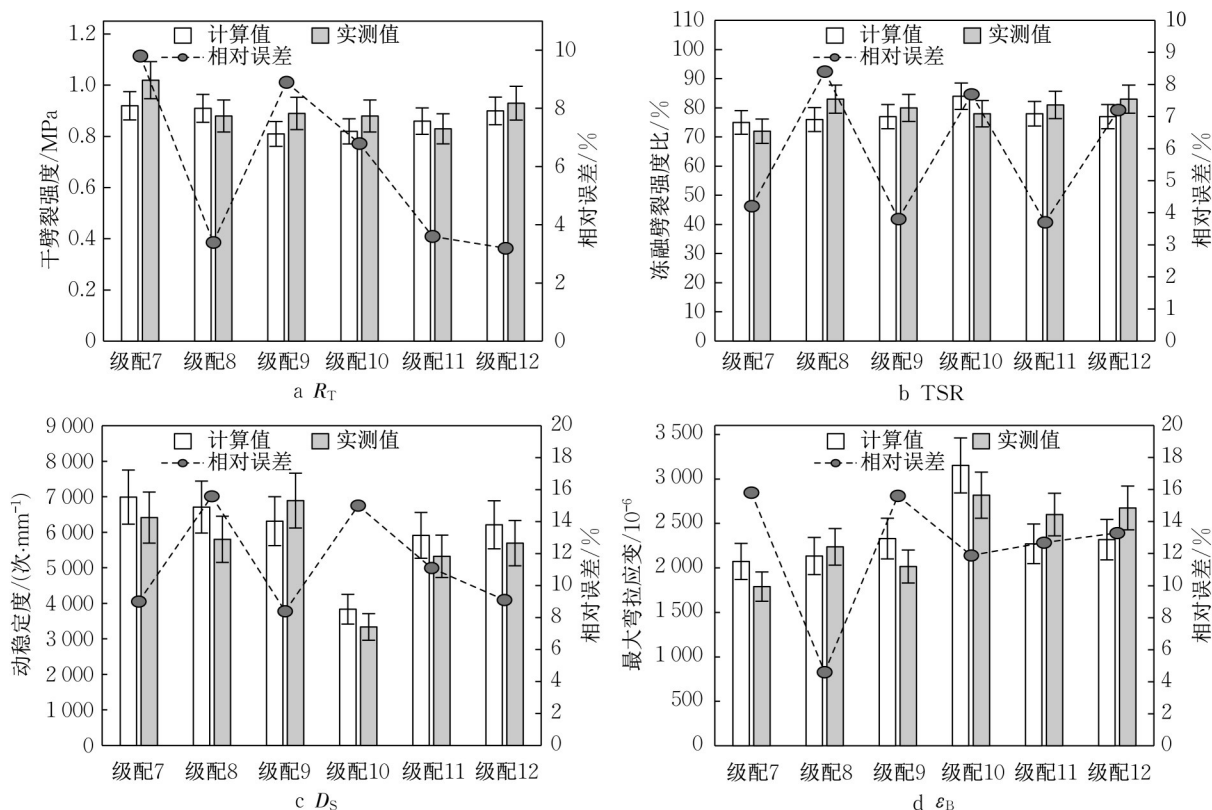


图5 基于分形维数冷再生混合料路用性能预估方程验证结果

Fig. 5 Validation results of pavement performance prediction equation of cold recycled mixture based on fractal dimension

由图5可知,采用级配7至级配12对式(1)中所提预估方程预测值与实测值相对误差基本在15%以内,其中干劈裂强度和TSR验证结果相对误差基本都在10%以内,因此,经由图5冷再生混合料路用性能计算与试验结果验证,说明基于分形维数 D 、 D_c 的预估方程可以准确预测不同级配走向的冷再生混合料路用性能,从而达到减少室内试验量以及提高混合料级配设计效率的目的,同时还可以有针对性地进行冷再生混合料级配选择和优化设计。需要注意的是,本文提出的预估方程仅根据同一地区旧料料源的12种冷再生混合料级配所得,后续会扩大旧料料源对该预估方程进一步验证及修正。

3.4 考虑假集料影响的冷再生混合料级配控制方法

(1) 抽提前后级配变化对冷再生混合料性能影响 RAP-A、RAP-B、RAP-C、RAP-D、RAP-E 5种

冷再生混合料干劈裂强度及动稳定度试验结果以及根据第1节中计算方法,得出的RAP-A、RAP-B、RAP-C、RAP-D、RAP-E 5种冷再生混合料抽提前后级配变化率方差(D_v)及级配变化值(V_a)结果如表5所示。

由表5试验结果可知,5种冷再生混合料的干劈裂强度和动稳定度变化较大,数据大小依次为RAP-A、RAP-B、RAP-C、RAP-D、RAP-E,通过计算“抽提前后级配变化率方差”(D_v)、“抽提前后级配变化值”(V_a),发现二者数据的大小均与干劈裂强度和动稳定度变化趋势一致,随着“ D_v ”、“ V_a ”的增大,冷再生混合料的干劈裂强度和动稳定度逐渐减小。因此,认为“ D_v ”、“ V_a ”均可作为冷再生混合料抽提前后级配变异程度的判断依据,级配变化越大,冷再生混合料力学性能越不稳定。由表中数据可知,当冷再

表5 不同冷再生混合料干劈裂强度及动稳定度试验结果

Tab. 5 Test results of R_T and D_S of different cold recycled mixtures

不同冷再生混合料	干劈裂强度/MPa	动稳定度/(次·mm ⁻¹)	抽提前后级配变化率方差	抽提前后级配变化值
RAP-A	0.94	6 989	33.6	2.763 2
RAP-B	0.91	5 800	54.2	2.912 1
RAP-C	0.87	5 612	77.9	3.428 0
RAP-D	0.72	3 649	91.2	3.919 6
RAP-E	0.68	3 300	110.3	4.208 8

生混合料“ $D_v=91.2$ ”、“ $V_a=3.919\ 6$ ”时,冷再生混合料干劈裂强度和动稳定度分别为0.72 MPa、3 649 次·mm⁻¹,虽然性能仍满足规范要求,但相比于“ $D_v=77.9$ ”、“ $V_a=3.428\ 9$ ”时的冷再生混合料力学性能下降较大,因此,为保证冷再生混合料配合比设计质量,当 $D_v>85$ 、 $V_a>3.6$ 时(为保证可靠度,“ D_v ”、“ V_a ”的阈值定为RAP-C、RAP-D级配变异程度的中间值),则需要考虑抽提前后级配变化对冷再生混合料性能的影响。

(2)级配控制方法的提出

尝试采用“级配设计曲线靠近下限”、“15~25

mm档碎石”两种方法来提前控制级配变异性比较大的冷再生混合料。图6a是RAP-A、RAP-E两种混合料抽提前后级配曲线图,其中RAP-A-1、RAP-A-2分别表示RAP-A混合料抽提前后合成级配曲线,RAP-E类似命名;图6b是针对RAP-E抽提前后级配变异性比较大做的设计调整,其中RAP-E-2表示不对级配设计做调整,RAP-E混合料抽提后级配曲线图,RAP-E-a1、RAP-E-a2表示RAP-E级配设计时靠近下限抽提前后合成级配曲线,RAP-E-b1、RAP-E-b2表示RAP-E级配设计时采用15~25 mm档新集料抽提前后合成级配曲线。

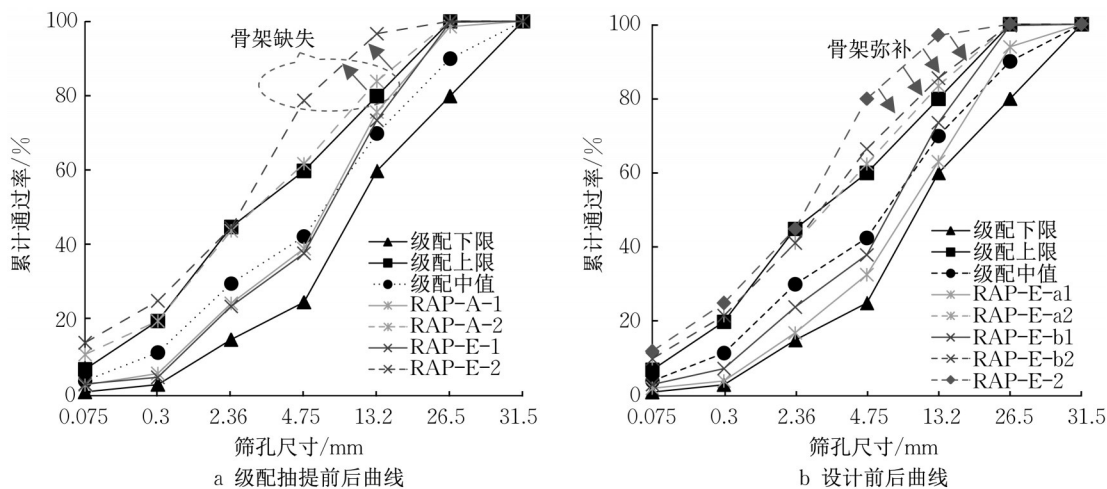


图6 不同冷再生混合料抽提前后级配曲线图

Fig. 6 Gradation of different cold recycled mixtures before and after extraction

由表6可知,RAP-E冷再生混合料采用“级配设计曲线靠近下限”、“15~25 mm档碎石”两种方法调整后,干劈裂强度和动稳定度均得到明显提升,与级配调整前相比,干劈裂强度分别至少提升26 %、32 %,动稳定度分别至少提升75 %、88 %,同时“抽提前后级配变化率方差”(D_v)、“抽提前后级配变化值”(V_a)也明显降低。这是因为RAP-E料含有大量假集料,如图6a所示,抽提后级配偏离规范级配上限较多,且主要是粗集料缺失严重,进而导致抽提前后级配变异性比较大,最终表现为冷再生混合料力学

性能下降。当将设计级配往偏离下限方向调整或者采用15~25 mm的新粗集料补充时,冷再生混合料抽提前后级配变异性大大降低,混合料骨架得到了充分的弥补,所以冷再生混合料力学性能较高。

因此,综合(1)、(2)内容,可得当冷再生混合料“抽提前后级配变化率方差” $D_v>85$ 、“抽提前后级配变化值” $V_a>3.6$ 时,为保证下面层冷再生混合料的力学性能,建议采用“级配设计曲线靠近下限”、“15~25 mm档碎石”两种方法调整级配。

(3)考虑假集料影响的乳化沥青冷再生混合料

表 6 设计级配调整前后干劈裂强度及动稳定度试验结果

Tab. 6 Test results of R_T and D_s before and after adjustment of design gradation curve

不同冷再生混合料	干劈裂强度/MPa	动稳定度/(次·mm ⁻¹)	抽提前后级配变化率方差	抽提前后级配变化值
RAP—A	0.94	6 989	33.6	2.763 2
RAP—E	0.68	2 900	110.3	4.208 8
RAP—E—a	0.86	5 061	66.3	3.259 3
RAP—E—b	0.90	5 452	64.9	3.122 4

级配设计

综合上述研究内容,论文提出考虑分形维数和

假集料影响的乳化沥青冷再生混合料级配设计流程,如图 7 所示。

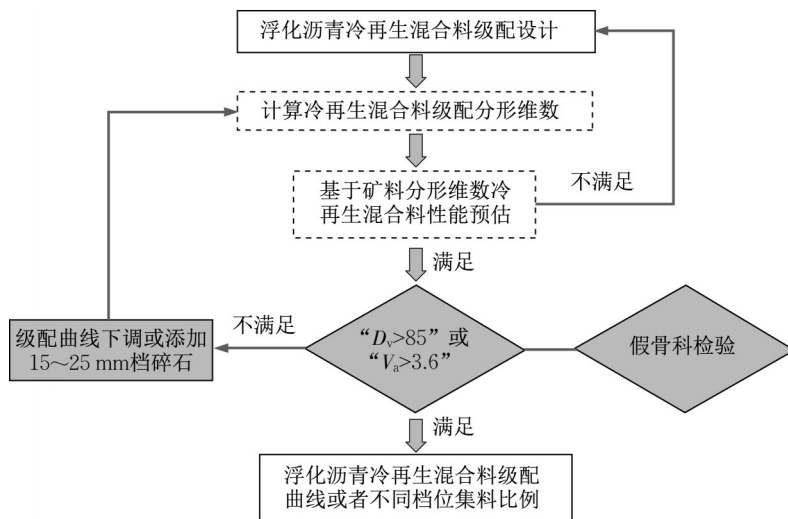


图 7 乳化沥青冷再生混合料级配设计流程图

Fig. 7 Flowchart for gradation design of emulsified asphalt cold recycled mixture

由图 7 可知,冷再生混合料级配设计时,首先应根据经验初选冷再生混合料级配曲线,并计算合成级配分形维数(D)、粗集料级配分形维数(D_c),然后基于分形维数 D 和 D_c 对冷再生混合料 R_T 、 TSR 、 D_s 、 ϵ_B 进行预估,若满足要求则进行冷再生混合料假集料检验(不满足要求则需重新调整级配曲线,直到满足要求为止),当“抽提前后级配变化率方差” $D_v > 85$ 或者“抽提前后级配变化值” $V_a > 3.6$ 时,即可设计出冷再生混合料级配曲线,确定出不同档集料的比例,当 D_v 和 V_a 不满足要求时,则需将冷再生混合料级配曲线靠近下限进行调整或者采用 15~25 mm 档碎石进行调整级配,然后重新进行混合料性能预估以及假集料检验,直到满足要求为止。

4 结论

矿料级配是影响冷再生混合料路用性能重要因素之一,同时也是平衡和协调各项性能的重要手段。矿料级配分形维数对冷再生混合料级配设计具有良好的指导意义,本文通过考虑级配分形维数和假集料影响,

探讨了冷再生混合料的级配控制方法,得出如下结论:

(1)分形维数可以定量描述冷再生混合料级配走向,进而反映冷再生混合料各项路用性能。随着 D 值的增大,冷再生混合料颗粒构成更加无序,级配也就更细,当 D 值从 2.31 增加到 2.53 时,冷再生混合料 TSR 、 ϵ_B 分别增加了 25 %、120 %, R_T 、 D_s 分别降低了 43 %、407 %。

(2)基于合成级配分形维数(D)、粗集料级配分形维数(D_c)建立了冷再生混合料路用性能二元线性预测方程,该方程可以较好预测冷再生混合料性能,预估值与实测值相对误差基本在 15 % 以内。

(3)当冷再生混合料“抽提前后级配变化率方差” $D_v > 85$ 、或“抽提前后级配变化值” $V_a > 3.6$ 时,为保证混合料的力学性能,建议采用“级配设计曲线靠近下限”、“15~25 mm 档碎石”两种方法调整级配。对于阈值 D_v 和 V_a 的选择,本文由 5 组级配数据得出,后续会继续补充完善,增加试验材料样本,以获取更为可靠的阈值。

(4)考虑矿料级配分形特征及 RAP 假集料影响,同时结合分形维数路用性能预估方程,本文提出

了一种新的冷再生混合料级配设计方法,该方法减少了试验工作量,大幅度提高了混合料级配设计效率。由于试验条件限制,该设计方法后续需要选择更大范围的旧料料源进行验证。

作者贡献声明:

韩占闯:试验方法设计、实际调查研究、试验数据分析和解释以及论文初稿撰写。

刘黎萍:研究内容的监管与指导、试验设计验证与核实以及论文审阅与修订。

孙立军:研究构思与设计以及论文审阅与修订。

参考文献:

- [1] POURANIAN M R, HADDOCK J E. Determination of voids in the mineral aggregate and aggregate skeleton characteristics of asphalt mixtures using a linear-mixture packing model [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 188: 292.
- [2] WANG Z, LIANG Q, YAN F, *et al.* Strength improvement of cement emulsified asphalt mixture through aggregate gradation design [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 299: 124018.
- [3] LI X, CHEN S, XIONG K, *et al.* Gradation segregation analysis of warm mix asphalt mixture [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(4):04018027.
- [4] PERFECT E, KAY B D. Fractal theory applied to soil aggregation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55(6): 1552.
- [5] DOSS S. An analysis on the lateral displacement of earth retaining structures using fractal theory [J]. *Plos Genetics*, 2015, 31(4):19.
- [6] PAN J, WANG K, HOU Q, *et al.* Micro-pores and fractures of coals analysed by field emission scanning electron microscopy and fractal theory [J]. *Fuel*, 2016, 164(15):277.
- [7] FERNÁNDEZ E, JELINEK H F. Use of fractal theory in neuroscience: Methods, advantages, and potential problems [J]. *Methods*, 2001, 24(4): 309.
- [8] KLINKENBERG B. A review of methods used to determine the fractal dimension of linear features [J]. *Mathematical Geology*, 1994, 26: 23.
- [9] WANG L, ZENG X, YANG H, *et al.* Investigation and application of fractal theory in cement-based materials: A review [J]. *Fractal and Fractional*, 2021, 5(4): 247.
- [10] YEGGONI M, BUTTON J W, ZOLLINGER D G. Fractals of aggregates correlated with creep in asphalt concrete [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 1996, 122(1): 22.
- [11] PAN Y, LI J, YANG T, *et al.* Optimization of gradation design of recycled asphalt mixtures based on fractal and Mohr-Coulomb theories [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 248: 118649.
- [12] 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):1642.
YANG Ruihua, XU Zhihong, ZHANG Chao, *et al.* Fractal gradation theory of asphalt mixture [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2008, 36(12): 1642.
- [13] 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(3):6.
ZHAO Zhanli, ZHANG Zhengqi, XUE Jianshe, *et al.* Evaluation of anti-sliding gradation of asphalt mixture based on fractal theory [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2008(3): 6.
- [14] LI H, ZHANG C, ZOU X, *et al.* Analysis of the rheological performance of composite asphalt rubber and the influence of gradation types on its mixture prepared under the optimal specifications [J]. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2022, 15(3): 659.
- [15] 交通部公路科学研究所. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2004 [S]. 北京: 交通部公路科学研究所, 2004.
Highway Science Research Institute of the Ministry of Communications. Technical specification for construction of highway asphalt pavement: JTG F40—2004 [S]. Beijing: Highway Science Research Institute of the Ministry of Communications, 2004.
- [16] 交通部公路科学研究所. 公路沥青路面再生技术规范: JTG/T 5521—2019 [S]. 北京: 交通部公路科学研究所, 2019.
Highway Science Research Institute of the Ministry of Communications. Technical specification for highway asphalt pavement recycling: JTG/T 5521—2019 [S]. Beijing: Highway Science Research Institute of the Ministry of Communications, 2019.