DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.047

基于分形与VCA_{DRF}法的沥青混合料空隙研究

张飞[1]，于江[2]
（1.新疆维吾尔自治区交通规划勘察设计研究院，新疆 乌鲁木齐 830006；2.新疆大学 建筑工程学院）

摘要：结合二度域分形级配定向化设计与VCA_{DRF}矿料级配检验方法，研究了矿料级配组成与沥青混合料空隙率之间的关联性。研究结果表明：二度域分形级配沥青混合料空隙率计算公式是矿料级配分形特性与沥青混合料空隙率之间的纽带；二度域分形级配沥青混合料设计方法有利于在沥青混合料配合比设计过程中定量分析矿料级配分形特性对沥青混合料空隙率的影响。

关键词：沥青混合料；分形特性；VCA_{DRF}；空隙率

分形是沥青混合料矿料级配的本质；分形参数可定量描述矿料级配的分布状况，与沥青混合料路用性能指标具有较好的相关性，是矿料级配定向化设计的理论依据；就二度域分形级配而言，可根据沥青混合料路用性能对矿料级配的要求确定分形参数的取值，初拟矿料级配，并通过路用性能比较确定沥青混合料最佳配合比。空隙率是沥青混合料配合比试验中的关键性控制参数之一，因此空隙率研究对沥青混合料配合比合理设计至关重要，目前空隙率研究主要集中在定性描述沥青、矿料级配、成型方法等因素与空隙率之间的变化规律方面，不能定量分析油石比、矿料级配与空隙率之间的关系，致使沥青混合料配合比试验过程中根据试验结果机械性地简单调整矿料级配或增减沥青用量来达到目标空隙率，而在此过程中沥青混合料路用性能指标如何变化却无法预知。这就产生沥青混合料配合比试验中沥青混合料空隙率达到目标空隙率要求，但其路用性能却不一定满足规范要求的问题。因此，沥青混合料矿料级配定向化设计的核心问题就是在沥青混合料配合比设计过程中建立描述矿料级配与沥青混合料空隙率关联性的计算公式，实现宏观把控矿料级配、沥青对沥青混合料路用性能的影响，定量分析与控制矿料级配、沥青对沥青混合料空隙率影响的目标。VCA_{DRF}矿料级配骨架检验法在保证沥青混合料矿料级配骨架密实结构的前提下，通过调整粗集料、细集料、填料和沥青的用量控制设计空隙率。

基于此，有必要探究VCA_{DRF}矿料级配检验方法与分形矿料级配之间的关联性，进而定量描述二度域分形级配与沥青混合料空隙率之间的关系，为沥青混合料矿料级配定向化设计提供依据。

1 二度域分形级配定向设计方法与VCA_{DRF}法的简述

1.1 二度域分形级配定向设计方法

二度域分形级配定向设计是指根据工程对沥青混合料路用性能要求，在矿料级配分形参数与沥青混合

[10] 康爱红，张吴红，孙立军.改性沥青荧光显微观测样本制备方法[J].四川大学学报：工程科学版，2012(2).
[11] 李志栋，黄晓明，侯曙光，等.应用测力延度试验评价改性沥青的低温性能[J].公路交通科技，2005(5).
[12] 岳学军，黄晓明，李文龙，等.测力延度试验以及韧性比评价指标的研究[J].公路交通科技，2007(2).
[13] JTG F40－2004 公路沥青路面施工技术规范[S].
[14] 丛玉凤，徐磊，黄玮，等.SBS－C9石油树脂改性沥青的研究[J].建筑材料学报，2016(3).
[15] Fuqiang Dong，Wenzhe Zhao，Yuzhen Zhang，et al. Influence of SBS and Asphalt on SBS Dispersion and the Performance of Modified Asphalt[J]. Construction and Building Materials，2014，62：1－7.
[16] Min Bai，Investigation of Low－Temperature Properties of Recycling of Aged SBS Modified Asphalt Binder[J]. Construction and Building Materials，2017，150：766－773.

收稿日期：2018－09－15
基金项目：国家自然科学基金资助项目（编号：51168044）
作者简介：张飞，男，硕士.E－mail：zfxj1007@126.com

料路用性能指标之间关系数据库的基础上选取合理级配分形参数，通过二度域分形级配计算公式计算粗、细级配，并以粗细级配用量比为纽带合成矿料级配，最后对初拟矿料级配进行路用性能试验，并确定目标级配。其中，二度域分形级配定向设计基本计算公式如下：

(1) 粗集料级配计算公式：

$$P(r)=\frac{r^{3-D_c}-r_{DCF}^{3-D_c}}{r_{NMPS}^{3-D_c}-r_{DCF}^{3-D_c}}\times\left[100-\frac{100-P_0}{1-\frac{P(r_{DCF})}{100}}\right]$$

$$r\in[r_{DCF},r_{NMPS}] \tag{1}$$

(2) 细集料级配计算公式：

$$P(r)=\left(\frac{r}{r_{DCF}}\right)^{3-D_f}\times P(r_{DCF})\quad r\in[0.075,r_{DCF}] \tag{2}$$

(3) 粗细级配用量比的矿料级配分界尺寸处通过百分率表达式：

$$m_c/m_f=[100-P(r_{DCF})]/P(r_{DCF})=1-\frac{P(r_{DCF})}{100} \tag{3}$$

式中：$P(r)$为r筛孔处的通过百分率(%)；P_0为公称最大粒径处的通过百分率(%)；r_{NMP}为矿料级配公称最大粒径(mm)；$P(r_{DCF})$为粗细级配分界尺寸处的通过百分率(%)；r_{DCF}为矿料级配中粗细级配分界尺寸(mm)；D_c为粗级配分形维数；D_f为细级配分形维数。

1.2 VCA_{DRF}矿料级配检验方法

VCA_{DRF}矿料级配检验方法主要是利用粗集料干捣实空隙率进行粗级配骨架密实结构的检验，基本计算公式如下：

$$P_{ca}+P_{fa}+P_{fi}=100\% \tag{4}$$

其中，集料级配检验方法的基本方程为：

$$\frac{P_{ca}}{\rho_{c,DRC}}\times(VCA_{DRC}-VV)=\frac{P_{fa}}{\rho_{b,fa}}+\frac{P_{fi}}{\rho_{fi}}+\frac{P_b}{\rho_b} \tag{5}$$

式中：P_{ca}、P_{fa}、P_{fi}分别为矿料级配中粗集料、细集料、矿粉的质量百分数(%)；$\rho_{c,DRC}$为粗集料的干捣实密度(kg/m^3)；$\rho_{b,fa}$、ρ_{fi}分别为细集料和矿粉的毛体积密度(kg/m^3)；P_b为沥青混合料的油石比(%)；ρ_b为沥青密度(kg/m^3)；VV为沥青混合料的设计空隙率(%)。

2 二度域分形级配沥青混合料空隙率计算公式研究

鉴于VCA_{DRF}法可以在保证沥青混合料矿料级配骨架密实结构的前提下，可根据目标空隙率来试算并调整粗集料、细集料、填料和沥青的用量。因此，可依据VCA_{DRF}法反算出不同分形特性的粗细级配、粗细级配用量比及油石比下沥青混合料的空隙率，进而定量分析各因素对空隙率的影响规律。

就二度域分形级配而言，沥青混合料矿料级配是由粗级配和细级配两部分组成，因此基于VCA_{DRF}法的基本计算公式可转化为：

$$P_{ca}+P_f=100\% \tag{6}$$

$$\frac{P_{ca}}{\rho_{c,DRC}}\times(VCA_{DRC}-VV)=\frac{P_f}{\rho_f}+\frac{P_b}{\rho_b} \tag{7}$$

式中：P_{ca}、$\rho_{c,DRC}$、P_b、ρ_b、VV意义同前；P_f为二度域分形级配中细级配的质量百分数(%)；ρ_f为二度域分形级配中细级配的毛体积密度(kg/m^3)。

因此，由式(6)、(7)可以得出二度域分形级配沥青混合料空隙率的计算公式，即：

$$VV=VCA_{DRF}-\left(\frac{P_f}{\rho_f}+\frac{P_b}{\rho_b}\right)/\left(\frac{P_{ca}}{\rho_{c,DRC}}\right)=VCA_{DRF}-(V_x+V_b)/V_d \tag{8}$$

式中：VV为沥青混合料的空隙率(%)；VCA_{DRF}为粗级配骨架间隙率(%)；V_x为细级配合成体积(%)；V_b为沥青混合料中沥青的体积(%)；V_d为粗级配捣实状态下的堆积体积(%)；其余参数意义同前。

3 二度域级配沥青混合料空隙定量分析

3.1 二度域分形级配设计

为分析粗、细级配的分形特性和粗细级配用量比与沥青混合料空隙率之间的变化关系，设计了5组级配，粗细级配用量比均为75∶25，分别见表1、2；同时，设计了3组粗级配，粗级配分维数均为2.5，粗细级配用量比分别为55∶45、65∶35和75∶25，见表3。

表1 5组不同分布情况的粗级配

(粗细级配用量比均为75∶25)

筛孔尺寸/mm	不同粗级配分维数D_c时各筛孔的通过率/%				
	2.10	2.30	2.50	2.70	2.90
16	100	100	100	100	100
13.2	95.00	95.00	95.00	95.00	95.00
9.5	65.18	66.83	68.47	70.09	71.69
4.75	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00

3.2 二度域分形级配沥青混合料空隙率计算分析

根据二度域分形级配沥青混合料空隙率计算公式

可知，沥青混合料的空隙率与粗级配的矿料间隙率、粗级配捣实状态下的堆积体积、细级配的合成体积及沥青的体积相关。

选取矿料进行筛分后，对每档集料及矿粉进行毛体积密度测定，集料及矿粉的毛体积密度详见表 4。

表 2　5 组不同分布情况的细级配

（粗细级配用量比均为 75∶25）

筛孔尺寸/mm	不同细级配分维数 D_f 时各筛孔的通过率/%				
	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8
4.75	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
2.36	16.43	17.62	18.90	20.27	21.74
1.18	10.84	12.46	14.32	16.46	18.92
0.6	7.23	8.89	10.93	13.44	16.53
0.3	4.77	6.28	8.28	10.92	14.39
0.15	3.15	4.44	6.28	8.87	12.53
0.075	2.08	3.14	4.76	7.20	10.91

表 3　3 组粗细级配用量比不同的粗级配

（粗级配分维数均为 2.5）

筛孔尺寸/mm	不同粗细级配用量比时各筛孔的通过率/%		
	55∶45	65∶35	75∶25
16	100	100	100
13.2	95.00	95.00	95.00
9.5	76.05	72.26	68.47
4.75	45.00	35.00	25.00

表 4　集料及矿粉毛体积密度

筛孔尺寸/mm	毛体积密度/(g·cm^{-3})	筛孔尺寸/mm	毛体积密度/(g·cm^{-3})
13.2～16	2.747	0.6～1.18	2.678
9.5～13.2	2.742	0.3～0.6	2.677
4.75～9.5	2.843	0.15～0.3	2.686
2.36～4.75	2.686	0.075～0.15	2.695
1.18～2.36	2.677	矿粉	2.729

根据 JTG E42—2005《公路工程集料试验规程》中粗集料堆积密度与空隙率试验方法及计算公式，测定、计算表 1 所列粗级配的合成表观密度、捣实密度及骨架间隙率。具体数据见表 5。

根据表 2 细级配的分布情况计算其合成毛体积密度及合成体积，具体数据见表 6。

对于骨架型沥青混合料级配而言，其最佳油石比一般为 5%，为对比不同油石比对沥青混合料空隙率的影响规律，初步拟定 5 个油石比，即：4.0%、4.5%、5.0%、5.5%和6.0%。所用沥青为克拉玛依 90# 沥青，其实测密度为1.003 g/cm^3，不同油石比下沥青体积见表 7。

表 5　表 1 粗级配合成表观密度、捣实密度和骨架间隙率

粗级配分维数 D_c	合成表观密度/(g·cm^{-3})	捣实密度/(g·cm^{-3})	粗级配骨架间隙率/%
2.1	2.987	1.719	42.46
2.3	2.990	1.730	42.14
2.5	2.993	1.741	41.83
2.7	2.996	1.747	41.70
2.9	2.999	1.753	41.55

表 6　表 2 细级配合成毛体积密度及合成体积

D_f	合成毛体积密度/(g·cm^{-3})	V_x/%
2.4	2.686	9.31
2.5	2.688	9.30
2.6	2.691	9.29
2.7	2.696	9.28
2.8	2.703	9.25

表 7　不同油石比下的沥青体积

油石比/%	V_b/%	油石比/%	V_b/%
4	3.99	5.5	5.48
4.5	4.49	6	5.98
5	4.99		

3.2.1　粗、细级配分维数与沥青混合料空隙率相关性计算分析

为了对比分析不同分形特性的粗、细级配对沥青混合料空隙率的影响规律，由表 1、2 合成的 25 组级配，即：$G_i(D_c, D_f; 75∶25)$，油石比初拟为 5.0%，根据式(8)计算沥青混合料空隙率，计算结果见表 8。

表 8　不同分布特征矿料级配对应沥青混合料空隙率

细级配分形维数 D_f	不同粗级配分形维数 D_c 时沥青混合料空隙率/%				
	2.1	2.3	2.5	2.7	2.9
2.4	5.43	4.87	4.32	4.06	3.78
2.5	5.45	4.89	4.34	4.09	3.81
2.6	5.48	4.92	4.37	4.12	3.84
2.7	5.53	4.97	4.42	4.17	3.89
2.8	5.60	5.04	4.49	4.24	3.96

由表 8 可以看出：对于宏观空隙率而言，在细级配一定的情况下，沥青混合料的空隙率随粗级配分维数

的增加而减小，D_c 由 2.1 增大为 2.9，VV 变化幅度为 1.64%；在粗级配一定的情况下，沥青混合料空隙率随细级配分维数的增大而增大，但其变化幅度很小，基本为一定值。

3.2.2 粗细级配用量比与沥青混合料空隙率相关性分析

在粗级配分形特性一定的情况下，矿料级配会随着粗细级配用量比的增大而相对变粗，为此有必要分析不同粗细级配用量比的情况下粗级配骨架间隙率变化情况。测取表 3 中粗级配合成毛体积密度、捣实密度和骨架间隙率，见表 9。

表 9 表 3 粗级配合成毛体积密度、捣实密度和骨架间隙率

粗细比	合成毛体积密度/(g·cm^{-3})	捣实密度/(g·cm^{-3})	骨架间隙率/%
55∶45	2.990 9	1.7425	41.74
65∶35	2.992 1	1.7419	41.76
75∶25	2.993 0	1.7429	41.78

由表 9 可以看出：在粗级配分维数不变的情况下，随着粗细级配用量比的逐渐增大，粗级配骨架间隙率逐渐增大，但增大幅度很小；同时，粗细级配用量比对级配捣实密度的影响也不大。因此，粗级配骨架间隙率由粗级配分形特性及集料特性决定，不受粗细级配用量比的影响。

鉴于粗级配堆积特性不受粗细级配用量比影响，因此根据式(8)可知：在油石比一定的情况下，沥青混合料空隙率与细级配的合成体积及粗级配的堆积体积相关。为进一步对比分析粗细级配用量比与沥青混合料空隙率之间的相关性，初步拟定 15 组级配，即：G1(2.1，2.5；m_c ∶ m_f)、G2 (2.3，2.5；m_c ∶ m_f)、G3(2.5，2.5；m_c ∶ m_f)、G4 (2.7，2.5；m_c ∶ m_f) 和 G5(2.9，2.5；m_c ∶ m_f)；粗细级配用量比 m_c ∶ m_f 分别为：72∶28、71∶29、70∶30、69∶31 和 68∶32。初拟油石比为5.0%。根据式(8)计算上述 15 组级配对应的沥青混合料空隙率，具体见表 10。

表 10 不同粗细级配用量比沥青混合料空隙率

粗细级配用量比	不同粗级配分形维数 D_c 时沥青混合料空隙率/%				
	2.1	2.3	2.5	2.7	2.9
68∶32	0.17	−0.43	−1.01	−1.28	−1.58
69∶31	1.71	1.12	0.55	0.29	−0.01
70∶30	3.20	2.62	2.06	1.81	1.52
71∶29	4.66	4.09	3.53	3.28	3.00
72∶28	6.07	5.51	4.97	4.72	4.44

由表 10 可以看出：在粗级配分形维数一定的情况下，随着粗细级配用量比的减小沥青混合料的空隙率逐渐减小；并且当粗细级配用量比减小到一定程度时，较细粗级配所对应的沥青混合料空隙率出现负值。这主要说明两点：① 细级配分布状况一定的情况下，其填充体积随粗细级配用量比的增大而减小，粗级配的空隙容纳量随粗细级配用量比的增大而增大；② 在粗细级配用量比一定的情况下，粗级配骨架间隙率不变，但其骨架空隙大小分布与粗级配分维数相关，粗级配分维数越小，粗级配的空隙分布有利于容纳细级配，矿料级配易于形成骨架。

3.2.3 细级配的分形维数与最佳油石比的关系

文献[11]研究结果表明：不同的矿料比面和沥青用量，将导致沥青膜厚度不同，所产生的“结构沥青”和“自由沥青”的比例也不同。高强度沥青混合料最佳沥青用量取决于矿料比面，而粗级配对沥青混合料矿料比面的贡献率相对于细级配而言，可以不予考虑。因此，沥青最佳用量主要受细级配的影响。

为分析沥青最佳用量与细级配之间的变化规律，设计了 10 组不同矿料级配，计算在粗级配、粗细级配用量比及最佳沥青膜厚度相同情况下，不同细级配对沥青混合料最佳沥青用量的影响。沥青混合料的沥青用量随细级配分维数 D_f 的变化情况如图 1 所示。

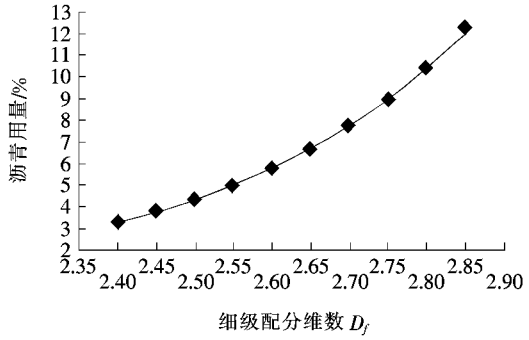

图 1 沥青用量随细级配分维数 D_f 的变化关系曲线

由图 1 可以看出：在粗级配、粗细级配用量比和最佳沥青膜厚度相同情况下，沥青混合料最佳油石比随细级配分维数的增大而增大，两者呈指数关系，其拟合方程为：$y=0.003\ 1\ e^{2.903\ 6x}$ ($R^2=0.998$)。这说明，细级配越细，沥青用量越大。

3.3 二度域分形级配沥青混合料空隙率试验分析

为进一步揭示粗级配、细级配、粗细级配用量比和油石比对沥青混合料空隙率的影响，有必要依据试验结果进行分析。

3.3.1 粗级配分形特性与沥青混合料空隙率相关性试验分析

初拟 5 组矿料级配，分别为：G1(2.1，2.7；70∶30)，G2(2.3，2.7；70∶30)，G3(2.5，2.7；70∶30)，G4(2.7，2.7；70∶30)，G5(2.9，2.7；70∶30)，初拟油石比为 4.6%，采用马歇尔进行试件成型，测定其空隙率。试验结果如图 2 所示。

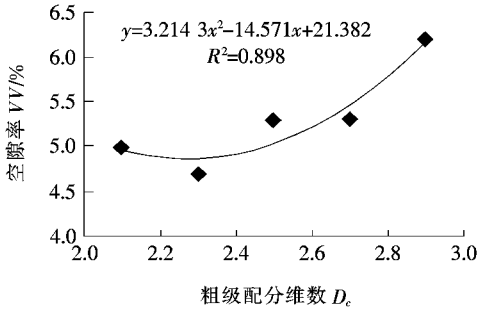

图 2　粗级配分维数 D_c 与沥青混合料空隙率关系曲线

由图 2 可以看出：沥青混合料空隙率随着粗级配分维数 D_c 增大呈现出先减小后增大的凹形抛物线变化趋势。这说明，随着粗级配分维数逐渐增大，粗级配骨架空隙分布粗细程度相对变细；D_c<2.4 时，粗级配形成骨架，细级配主要起填充作用，干涉作用较小；D_c>2.4 时，细级配对粗级配的骨架空隙干涉作用逐渐增强，填充作用逐渐减弱。

试验结论与表 8 中计算结果变化规律不一致。这说明：沥青混合料空隙率计算时未考虑细级配对粗级配的干涉作用。因此，二度域分形级配沥青混合料计算公式在进行计算时需考虑细级配对粗级配的干涉作用及粗细级配的重组效应。

3.3.2 细级配分形特性与沥青混合料空隙率相关性试验分析

初拟 5 组矿料级配，分别为：G1(2.5，2.4；70∶30)，G2(2.5，2.5；70∶30)，G3(2.5，2.6；70∶30)，G4(2.5，2.7；70∶30)，G5(2.5，2.8；70∶30)，初拟油石比为 4.6%，采用马歇尔进行试件成型，测定其空隙率。试验结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出：随着细级配分维数的逐渐增大，沥青混合料空隙率逐渐减小，并且两者呈线性关系。

试验结论与表 8 中计算结果变化规律不一致。这说明：细级配分布状况对细级配的填充体积影响较小；细级配的实际有效填充体积与细级配分布情况相关，并随细级配分维数的增大而减小。

3.3.3 粗细级配用量比与沥青混合料空隙率相关性试验分析

初拟3组矿料级配，分别为：G1(2.5，2.7；65∶35)，G2(2.5，2.7；70∶30)，G3(2.5，2.7；75∶25)，初拟油石比为 4.6%，采用马歇尔进行试件成型，测定其空隙率。试验结果见表 11。

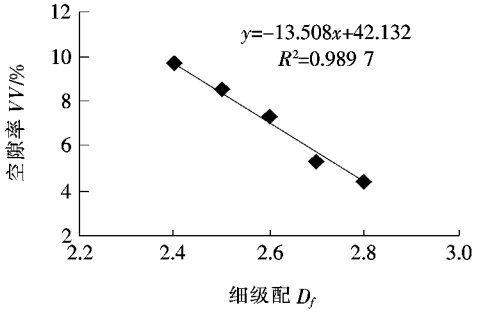

图 3　细级配分维数 D_f 与沥青混合料空隙率关系曲线

由表 11 可以看出：随着粗细级配用量比的逐渐增大，沥青混合料空隙率逐渐增大。这说明：随着粗细级配用量比的逐渐增大，细级配对粗级配的干涉、填充作用减少，粗级配的有效容纳量逐渐增大，致使沥青混合料空隙率随粗细级配用量比的增大而增大。

表 11　不同粗细级配用量比下的沥青混合料空隙率

粗细级配用量比	空隙率 VV/%	粗细级配用量比	空隙率 VV/%
65∶35	3.9	75∶25	7.7
70∶30	5.3		

试验结论与表 10 中计算结果变化趋势一致。

3.3.4 油石比与沥青混合料空隙率相关性试验分析

初拟 1 组矿料级配，即(2.5，2.7；70∶30)，选取 3 组油石比，分别 4.2%、4.6%和 5.0%。采用马歇尔进行试件成型，测定其空隙率。试验结果见表 12。

表 12　不同油石比下沥青混合料空隙率数据

油石比/%	空隙率 VV/%	油石比/%	空隙率 VV/%
4.20	5.8	5.00	3.5
4.60	5.3		

由表 12 可以看出：随着沥青用量的增大，沥青混合料空隙率逐渐减小。

试验结论与表 7 中计算结果变化趋势一致。

4　二度域分形级配沥青混合料空隙率计算公式优化分析

基于二度域分形级配沥青混合料空隙计算与试验验证分析，可以看出：二度域分形级配沥青混合料空隙

由粗级配骨架间隙容纳体积、细集料有效填充体积和沥青有效填充体积三部分组成。

粗级配骨架间隙容纳体积主要受粗级配骨架间隙率、粗级配分布状况、粗细级配用量比及粗集料特性的影响。粗级配骨架间隙率主要由粗集料特性决定，粗集料特性主要与集料的矿物组成、成岩条件、粗集料破碎加工过程等因素相关；粗级配骨架间隙容纳量随粗级配分维数的增大而变小，特别是粗级配的骨架间隙分布大小相对变小。粗细级配用量不影响粗级配的骨架间隙率，但粗级配骨架间隙容纳量随粗细级配用量比的增大而增大。

在细集料材料组成及集料特性一定的情况下，细级配分布状况对其填充体积影响较小。但细级配的有效填充体积受细级配分布状况、粗细级配用量比的影响较大。细级配有效填充体积随细级配分维数的增大而增大，随粗细级配用量比的增大而减小。

沥青混合料中的沥青主要以沥青膜的形式黏结于集料表面，但有少量沥青被集料孔隙吸附。

此外，在粗细集料用量比较小、粗细级配分布不合理时，细级配对粗级配的干涉作用加强，粗级配无法形成骨架，致使粗细级配重新组合。

因此，式(8)二度域分形级配沥青混合料空隙率计算公式需加入骨架间隙有效容纳系数 A、细级配填充干涉系数 B、沥青有效填充系数 C 来进行修正与优化。优化后二度域分形级配沥青混合料空隙率计算公式如下：

$$VV=A\cdot VCA_{DRF}-(B\cdot V_x+C\cdot V_b)/V_d \quad (9)$$

系数 A、B、C 可根据沥青配合比试验进行拟合，与材料特性、成型方法相关。

5 结论

通过对二度域分形级配沥青混合料空隙进行研究分析，得出如下结论：

(1) 二度域分形级配沥青混合料空隙组成与粗级配、细级配、粗细级配用量比及油石比相关，空隙率不是各部分体积的简单叠加。

(2) 二度域分形级配沥青混合料空隙率计算公式是矿料级配分形特性与沥青混合料空隙率之间的纽带，有助于定量分析矿料级配分形特性对沥青混合料空隙率的影响。

(3) 二度域分形级配沥青混合料空隙率计算公式有助于沥青混合料配合比设计针对性调整设计参数，为沥青混合料定向化设计提供理论依据。

(4) 文章单纯考虑了矿料级配、集料特征和沥青用量与沥青混合料空隙特征之间的关系，而忽略了使用干捣法测定 VCA_{DRF} 时的压实功与成型沥青混合料试件时的压实功的不一致性和击实功是影响沥青混合料空隙特征的重要因素，致使文章中理论计算与试验结果相悖。因此，有必要进一步从压实功角度对二度域分形级配沥青混合料空隙率计算公式进行研究分析。

参考文献：

[1] 李国强.集料的分形级配研究[J].重庆交通学院学报，1995(2).

[2] 于江，张飞，张帆，等.基于分形的沥青混合料集料组成三阶段系统设计[J].中外公路，2014(3).

[3] 张飞.基于分形理论的温拌沥青混合料宏细观空隙研究[D].新疆大学硕士学位论文，2015.

[4] 沙庆林.矿料级配检验方法之一 VCA_{DRF} 方法[J].公路，2005(2).

[5] 李林萍，胡帮艳，张飞，等.多因素对沥青混合料空隙率影响的正交试验分析[J].重庆交通大学学报：自然科学版，2016(4).

[6] 李林萍，艾贤臣，于江，等.沥青混合料矿料级配分形特性研究[J].中外公路，2016(2).

[7] 孙兆辉，杨国峰，于保阳，等.基于分形理论的沥青混合料级配检验方法[J].沈阳建筑大学学报：自然科学版，2010(5).

[8] JTG E42－2005 公路工程集料试验规程[S].

[9] Li Lin Ping，Zhang Fei，Yu Jiang，et al.Study on Gradation Fractal Cartesian Coordinate System of Asphalt Mixture[J].Advanced Materials Research，2013，779－780：212－221.

[10] 张飞，于江，李林萍，等.嵌挤密实型沥青混合料级配分形评价[J].中外公路，2013(6).

[11] 李立寒，张南鹭.道路建筑材料[M].北京：人民交通出版社，2007.