

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2025.04.010

引用格式:周勇,邓星鹤,许新权,等.GAC-25 型沥青混合料矿料级配粗细量化评价及适宜值域研究[J].公路与汽运,2025,41(4):51-55.

Citation:ZHOU Yong,DENG Xinghe,XU Xinquan,et al.Quantitative evaluation of coarseness and fineness of mineral gradation of GAC-25 asphalt mixture and research on appropriate value range[J].Highways & Automotive Applications,2025,41(4):51-55.

GAC-25 型沥青混合料矿料级配粗细量化评价及适宜值域研究

周勇^{1,2}, 邓星鹤^{1,2}, 许新权^{1,2}, 李善强^{1,2}

(1.广东华路交通科技有限公司,广东 广州 510420;2.广东交科技术研发有限公司,广东 广州 510420)

摘要:采用分形理论对沥青混合料级配进行量化,求取其分维数值,通过灰色系统理论分析级配分维数值、合成毛体积密度、油石比对混合料体积指标及性能指标的影响。结果表明,利用分维数可有效、定量评价沥青混合料级配粗细,对混合料马歇尔体积指标及水稳定性指标的影响大小为分维数>合成毛体积密度>油石比,对动稳定度的影响大小为分维数>油石比>合成毛体积密度,混合料级配是保证其性能的最主要因素;变质砂岩类 GAC-25 型沥青混合料达到优良性能的适宜分维数为 2.484~2.491、2.528~2.533。

关键词:公路;沥青混合料;矿料级配;分维数;动稳定度;分形理论;灰色系统理论

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2025)04-0051-05

热拌沥青混凝土矿料级配设计中,根据粗细集料的加工特性,依据经验尽可能选择最理想的掺配比例,使混合料取得最优性能指标^[1]。按这种方法设计的矿料级配一般位于级配范围中值附近,但缺乏评价其粗细的明确方法与标准,一般认为级配范围中值上部区域为细级配,下部区域为粗级配,显然这是一个直观但不实用的方法。为保证沥青混合料的高温稳定性、耐久性等,一般将矿料级配设计为穿过级配范围中值线的 S 形曲线,经验方法已不适合评价矿料级配曲线的粗细、优劣,需要一个量化的标准来评判。为此,诸多学者采用级配分维的方式求得 SMA-13、AC-16、AC-20、SAC-16 等混合料粗细料部分分维数并进行调整,获得了相应分段级配分维数,由此设计的混合料具有良好的路用性能^[2-7]。

但对矿料级配整体粗细程度并没有进行评价研究,且未见对 GAC-25 型混合料的研究。因此,有必要对 GAC-25 型混合料矿料级配进行定量计算,更直观地描述混合料矿料粗细度,使其具有可比性。本文采用分形理论对变质砂岩类 GAC-25 型沥青混合料矿料级配粗细进行量化评价,研究其适宜的分维数值域。

1 混合料试验

采用产地不同的 7 种变质砂岩碎石进行 GAC-25 型沥青混合料试验,油石比为 4,矿料级配及试验结果见表 1、表 2。7 组级配除个别筛孔外无明显差别,无法评判级配粗细;各组混合料的技术指标均符合设计要求且较接近,无法区别矿料级配粗细。

表 1 GAC-25 型沥青混合料矿料级配

级配 编号	各筛孔(mm)通过率/%													
	31.500	26.500	19.000	16.000	13.200	9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075	
1#	100.0	99.8	83.3	71.7	61.6	50.7	32.8	26.2	19.1	15.4	12.2	8.3	5.5	
2#	100.0	100.0	77.7	69.0	58.0	47.8	30.5	20.5	14.3	11.7	8.4	6.5	5.0	
3#	100.0	99.3	76.9	68.8	62.7	52.2	33.9	25.0	18.3	13.2	8.3	6.9	5.8	

续表 1

级配 编号	各筛孔(mm)通过率/%												
	31.500	26.500	19.000	16.000	13.200	9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075
4#	100.0	99.4	83.2	73.3	63.0	49.4	33.2	25.6	19.0	14.2	10.5	8.2	6.0
5#	100.0	99.6	78.8	71.8	61.7	48.4	32.3	22.6	16.5	13.4	9.5	6.9	4.8
6#	100.0	97.3	82.8	69.2	59.5	49.6	31.3	20.4	14.0	10.5	8.1	6.6	5.6
7#	100.0	98.4	81.7	71.6	60.5	49.2	34.0	23.2	16.1	11.2	7.9	6.3	5.2

表 2 GAC-25 型沥青混合料马歇尔及性能试验结果

级配 编号	油石比/ %	合成毛体积密度/ (g·cm ⁻³)	空隙率/ %	矿料间隙 率/%	残留稳定 度/%	冻融劈裂强 度比/%	动稳定度/ (次·mm ⁻¹)
1#	4	2.639	4.2	12.2	99.3	98.6	2 365
2#	4	2.716	4.3	12.3	94.4	90.8	2 745
3#	4	2.683	4.5	12.5	83.1	82.5	2 226
4#	4	2.742	4.2	12.4	90.7	90.0	1 857
5#	4	2.672	4.4	12.4	87.4	86.5	2 344
6#	4	2.686	4.0	12.3	88.6	88.4	2 068
7#	4	2.633	3.8	12.2	93.7	90.0	2 332

2 混合料级配量化

2.1 级配量化及评价

分形理论解决了传统 Euclid 几何学无法准确描述不连续、不光滑、不规则图形几何特征的问题,它有自相似性与迭代生成两个重要基本原则,表征分形图形无论进行怎样的普通几何变换,整体结构并不会随之改变,且每个部分的特征与整体一样^[8]。沥青混合料矿料由多档同种加工工艺生产的集料混合而成,每档集料本身就具有分形体特征,混合在一起后,自然形成一种分形体,可采用分形理论的分维数描述其特征。分维数是表征分形体本质特征的一个稳定参数,可用于评判混合料的矿料级配。根据式(1)^[9]及分维数 d 大于其拓扑维数且小于所在空间维数(即 $2 < d < 3$)的特征,依据文献[10]利用线性回归求得线性斜率,从而根据式(2)求得沥青混合料矿料级配的分维数。

$$P(x) = M_x/M = V_x/V = (x/x_{\max})^{3-d} \quad (1)$$

式中: $P(x)$ 为级配集料质量分布函数; M_x 为级配集料中粒径小于 x 的集料颗粒累计分形质量; M 为整个级配集料的总质量; V_x 为级配集料中粒径小于 x 的集料的分形体积; V 为整个级配集料的分形体积; d 为级配集料分维数。

$$\ln M_x/M = (3-d)\ln x + a \quad (2)$$

式中: a 为线性方程的截距,为常数,不同级配的截距不同。

按式(2)求表 1 所示 7 组混合料矿料级配的分维数,结果见表 3。

表 3 GAC-25 型沥青混合料级配分维数计算结果

级配编号	分维数值	级配编号	分维数值
1#	2.530	5#	2.495
2#	2.487	6#	2.487
3#	2.504	7#	2.481
4#	2.526		

文献[10]的研究表明,细集料对级配分维数的影响最显著,细集料掺量越多,分维数越大,反之越小。由表 3 可知:1#级配的分维数最大,4#次之,两者较接近,即两组混合料中细集料(主要指 2.36 mm 及以下部分颗粒)含量最多,相应地 2.36 mm 以上颗粒含量较少,故其级配最细。事实上 1#、4#级配 2.36 mm 通过率分别为 26.2%、25.6%,1.18 mm 通过率分别为 19.1%、19.0%,明显大于其他几组混合料,印证了分析的正确性。同理,7#级配的分维数最小,细集料含量最少,2.36 mm 以上颗粒含量较

多,其级配最粗。矿料级配分维数大小包含混合料中粗细集料的组成信息,可反映其在级配范围中的位置情况,可以作为评价混合料级配粗细的一个量化指标,使同类型级配间具有可比性。

2.2 量化结果验证

为考察混合料级配分形分维量化结果的可靠性,采用贝雷法对混合料粗细程度进行验证,结果见表 4。由表 4 可知:1[#]、3[#]、5[#] 级配的 CA 值(粗集料的粗料率)适中,表明混合料粗细集料搭配较合理;4[#] 级配 CA 值偏大,表明混合料粗集料偏少,细

表 4 GAC-25 型沥青混合料级配贝雷法验证结果

级配编号	贝雷参数		
	CA 值	FA _c 值	FA _f 值
1 [#]	0.75	0.58	0.64
2 [#]	0.65	0.47	0.59
3 [#]	0.77	0.54	0.45
4 [#]	0.81	0.57	0.55
5 [#]	0.77	0.51	0.58
6 [#]	0.70	0.45	0.58
7 [#]	0.67	0.47	0.49
贝雷参数建议范围	0.70~0.85	0.35~0.50	0.35~0.50

集料偏多,级配偏细。1[#]、4[#] 级配的 FA_c 值(细集料的粗料率)分别为 0.58、0.57,明显大于其他几组混合料,即细料部分偏多,级配明显偏细,验证了级配分形分维量化结果的合理性。FA_f (细集料的细料率)表征的涵义与 FA_c 类似,但其并没有前者作用显著,故不作详细分析。

3 影响混合料技术指标的关键因素

在试验条件相同的情况下,影响混合料性能的主要是碎石岩性、沥青性质及用量、矿料组成,这 3 个因素可以间接地以矿料合成毛体积密度、油石比、级配来表征,因而可以这些参数作为分析岩性、沥青用量及矿料组成对沥青混合料的影响因素。采用灰色系统理论分析合成毛体积密度、油石比、级配 3 个影响因素为比较数列,并进行无量纲化处理。2) 计算比较数列与参考数列的关联系数。3) 计算关联度,其值为某个比较数列与参考数列的关联系数的平均值。以空隙率为例,计算结果见表 5、表 6。

表 5 空隙率的原始数据及无量纲化处理结果

级配编号	原始数据				无量纲化处理结果			
	合成毛体积密度/(g·cm ⁻³)	分维数值 <i>d</i>	油石比/%	空隙率/%	合成毛体积密度	分维数值 <i>d</i>	油石比	空隙率
1 [#]	2.639	2.530	4	4.2	0.984	1.012	1.000	1.000
2 [#]	2.716	2.487	4	4.3	1.013	0.994	1.000	1.024
3 [#]	2.683	2.504	4	4.5	1.001	1.001	1.000	1.071
4 [#]	2.742	2.526	4	4.2	1.023	1.010	1.000	1.000
5 [#]	2.672	2.495	4	4.4	0.996	0.998	1.000	1.048
6 [#]	2.686	2.487	4	4.0	1.002	0.994	1.000	0.952
7 [#]	2.633	2.481	4	3.8	0.982	0.992	1.000	0.905

表 6 关联系数及关联度计算结果

级配编号	关联系数			级配编号	关联系数		
	合成毛体积密度与空隙率	分维数值 <i>d</i> 与空隙率	油石比与空隙率		合成毛体积密度与空隙率	分维数值 <i>d</i> 与空隙率	油石比与空隙率
1 [#]	0.763	0.823	1.000	5 [#]	0.478	0.484	0.507
2 [#]	0.831	0.619	0.580	6 [#]	0.488	0.530	0.487
3 [#]	0.396	0.398	0.400	7 [#]	0.375	0.347	0.392
4 [#]	0.686	0.851	0.644				
关联度					0.574	0.579	0.573

3.1 影响因素与体积指标的关联度

影响因素与 GAC-25 型沥青混合料体积指标的关联度计算结果见表 7。由表 7 可知:合成毛体积密度、级配分维数、油石比与空隙率的关联度分别为 0.574、0.579、0.573,即影响沥青混合料空隙率的因素按影响程度由大到小依次为级配分维数、合成毛体积密度、油石比;同理,影响沥青混合料矿料间隙率的因素按影响程度由大到小依次为级配分维数、合成毛体积密度、油石比。级配分维数对沥青混合料体积指标的影响最大,其次为合成毛体积密度,油石比的影响最小,与文献[11]的结果及沥青混合料试验规律一致。

表 7 影响因素与 GAC-25 型沥青混合料体积指标的关联度计算结果

考核指标	影响因素的关联度		
	合成毛体积密度	级配分维数值	油石比
空隙率	0.574	0.579	0.573
矿料间隙率	0.732	0.733	0.721

3.2 影响因素与性能指标的关联度

影响因素与 GAC-25 型沥青混合料性能指标的关联度计算结果见表 8。由表 8 可知:合成毛体积密度、级配分维数、油石比与沥青混合料残留稳定度的关联度分别为 0.687、0.719、0.649,即影响沥青混合料残留稳定度的因素按影响程度由大到小依次为级配分维数、合成毛体积密度、油石比;同理,影响冻融劈裂强度比的因素按影响程度由大到小分别为级配分维数、合成毛体积密度、油石比;合成毛体积密度、级配分维数值、油石比与动稳定度的关联度分别为 0.729、0.764、0.737,影响动稳定度的因素按影响程度由大到小依次为级配分维数、油石比、合成毛体积密度,与残留稳定度、冻融劈裂强度比的规律略有不同,可能与沥青混合料动稳定度试验本身离散性较大有关。综上,级配分维数对沥青混合料性能指标的影响最大。

表 8 影响因素与 GAC-25 型沥青混合料性能指标的关联度计算结果

考核指标	影响因素的关联度		
	合成毛体积密度	级配分维数值	油石比
残留稳定度	0.687	0.719	0.649
冻融劈裂强度比	0.683	0.707	0.630
动稳定度	0.729	0.764	0.737

4 级配分维数的合理值域

由于级配分维数是沥青混合料体积及性能指标的最主要影响因素,以其为参数建立与沥青混合料指标的关系,确立最优级配分维数范围,为沥青混合料配合比试验提供参考。

4.1 分维数与体积指标的关系

级配分维数与 GAC-25 型沥青混合料空隙率、矿料间隙率的关系分别见图 1、图 2。级配分维数与沥青混合料体积指标呈抛物线关系,校正决定系数 R^2 均在 0.8 以上,表明拟合度良好,即级配分维数与混合料体积指标间存在良好的相关性。

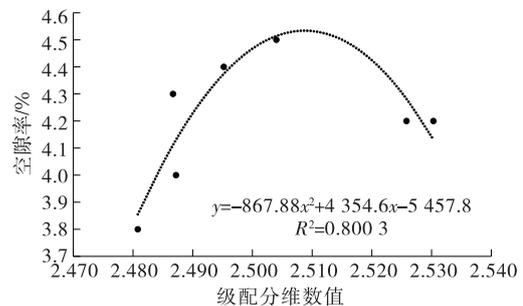


图 1 级配分维数与 GAC-25 型沥青混合料空隙率的关系

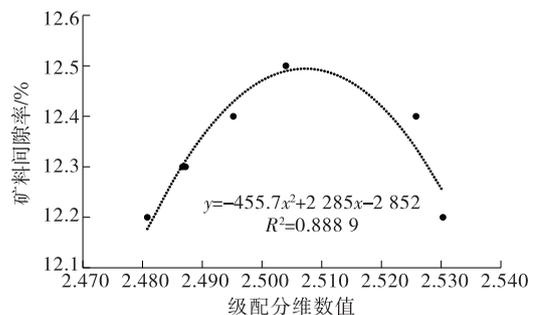


图 2 级配分维数与 GAC-25 型沥青混合料矿料间隙率的关系

由图 1~2 可知:对应空隙率与矿料间隙率,必然存在一个较优的分维数范围。由于 GAC-25 型沥青混合料较适宜的空隙率为 4.0~4.2,对应的矿料间隙率为 12.0~12.2,求得相同油石比情况下空隙率合适的级配分维数为 $2.484 \leq d \leq 2.490$ 、 $2.528 \leq d \leq 2.533$,矿料间隙率合适的级配分维数为 $2.478 \leq d \leq 2.486$ 、 $2.528 \leq d \leq 2.537$ 。鉴于矿料间隙率由于各种因素的影响较难与空隙率相匹配,可适当放宽范围,从拟合结果来看,矿料间隙率最大值为 12.4,对应级配分维数为 2.507,即矿料间隙率适宜的分维数为 $2.478 \leq d \leq 2.507$ 。同时满足空隙率与矿料间

隙率的级配分维数为 $2.484 \leq d \leq 2.507$ 、 $2.528 \leq d \leq 2.533$ 。

4.2 分维数值与性能指标的关系

级配分维数与 GAC-25 型沥青混合料残留稳定度、冻融劈裂强度比、动稳定度的关系见图 3~5。根据图 3、图 4 所示级配分维数与残留稳定度、冻融劈裂强度比的关系式,推导出保证残留稳定度不小于 85% 的分维数为 $d \leq 2.491$ 、 $d \geq 2.518$,冻融劈裂强度比不小于 85% 的分维数为 $d \leq 2.498$ 、 $d \geq 2.520$ 。由图 5 可知:受试验离散性影响,级配分维数与动稳定度的相关性不强,不再论述。

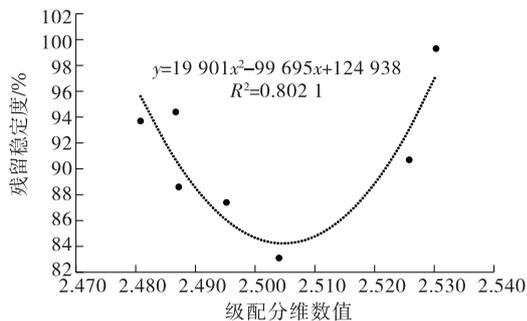


图 3 级配分维数与 GAC-25 型沥青混合料残留稳定度的关系

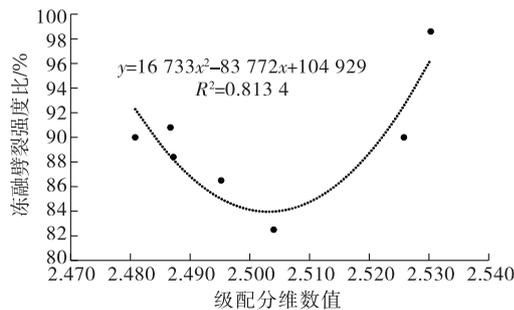


图 4 级配分维数与 GAC-25 型沥青混合料冻融劈裂强度比的关系

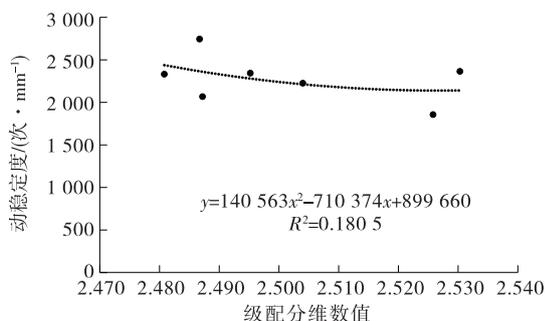


图 5 级配分维数与 GAC-25 型沥青混合料动稳定度的关系

综合级配分维数与 GAC-25 型沥青混合料体积指标及性能指标的分析结果,确定满足沥青混合料体积及性能指标适宜的级配分维数为 $2.484 \leq d \leq$

2.491 、 $2.528 \leq d \leq 2.533$ 。

5 结论

(1) 采用分形分维理论对 GAC-25 型沥青混合料矿料级配进行量化合理、可行,可定量评价混合料级配粗细。

(2) 级配分维数、合成毛体积密度、油石比 3 个影响因素中,级配分维数是影响 GAC-25 型混合料体积及性能指标的最关键因素。

(3) 级配分维数与混合料体积指标存在良好的相关性,与性能指标存在较好的相关性,存在一个适宜的级配分维数范围使变质砂岩类 GAC-25 型沥青混合料体积及性能指标达到优良水平。适宜的级配分维数值域为 $2.484 \leq d \leq 2.491$ 、 $2.528 \leq d \leq 2.533$ 。

参考文献:

- [1] 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:人民交通出版社,2004.
- [2] 袁昕.基于分形理论SMA-13级配设计与路用性能分析[J].湖南交通科技,2021,47(2):78-81.
- [3] 李胜.沥青混合料级配分形分析与路用性能研究[J].公路与汽运,2021(1):59-62+86.
- [4] 崔通.基于分形理论的沥青混合料级配组成分析研究[J].公路交通技术,2017,33(5):23-28+36.
- [5] 于江,郭欣,李林萍,等.基于分形理论SAC级配设计与改性沥青应用研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(3):22-26+50.
- [6] 黄维蓉,熊依筱,习磊.沥青混合料级配分维特征与路用性能相关性研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(8):45-50.
- [7] 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):804-809+840.
- [8] 曾冠博.基于分形的沥青混合料级配评价与路用性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2011.
- [9] 彭勇,孙立军,王元清,等.沥青混合料级配集料的分形特性[J].华中科技大学学报(自然科学版),2007,35(12):80-82.
- [10] 朱福,战高峰,仵磊.ATB-25 沥青混合料级配分形与马歇尔性能指标的相关性[J].公路交通科技,2013,30(3):1-6.
- [11] 梁锡三.沥青混合料设计及质量控制原理[M].北京:人民交通出版社,2008.

收稿日期:2024-04-21