

基于灰关联法的沥青路面抗滑性能影响因素研究

何俊辉¹, 陈海涛², 赵艳娜¹, 李平²

(1. 广西交通投资集团有限公司, 广西 南宁 530022; 2. 长沙理工大学)

摘要:为掌握沥青路面抗滑性能影响因素,实测了5种集料技术指标,利用灰关联法研究了集料主要性能指标与路面构造深度、摆值之间的关系和变化规律。结果表明:采用灰关联法能够较贴切地表征沥青路面抗滑性能在其他因素影响下的变化规律。基于灰关联理论排序结果,粗集料的形状因子是影响摆值与构造深度的最主要因素;细集料的棱角性与摆值、构造深度的灰关联度良好。

关键词:灰关联; 抗滑性能; 摆值; 构造深度; 集料

1 前言

随着中国高速公路的迅猛发展,运输需求不断增长,车流量逐年增加,同时随着汽车行驶速度的不断提高,交通事故发生率也是高发不下。众所周知,目前新建高速公路基本都是选用沥青路面,而行车安全与沥青路面的抗滑性能密切相关,路面抗滑性能不足会导致车辆在路面上发生滑移或者紧急刹车制动距离过长,从而引起交通事故。因此确定影响沥青路面抗滑性能的影响因素,对提高路面抗滑性能有着重要意义。

目前,较多国内外学者对路面抗滑性能进行研究,ArifChowdhury、EyadMasad等通过分析室内试验数据以及现场检测数据得出了基于集料纹理指数、棱角指数及级配参数的沥青混合料国际摩阻系数(*IFI*)预估模型,并基于PIARC抗滑性能评价模型将其转化为摆值;美国国家合作公路研究计划(NCHRP)108号报告指出集料性质、级配类型、沥青用量和施工工艺均会影响路面宏观纹理。其中集料形状特性和耐磨耗性能对路面抗滑性能影响较为显著;沥青用量过大或者黏度较低均会造成路面出现泛油,进而导致沥青路面摩擦系数下降;目标空隙率增加有助于提高构造深度,但过高空隙率会导致路面耐久性降低;David采用摆式摩擦系数测定仪测定渥太华市8条新建道路摆值,分析后发现摆值与细度模数、毛体积相对密度、4.75 mm筛孔通过率和沥青含量具有一定的相关性,根据上述

参数拟合得到摆值预估公式;Murat Ergun对具有不同路面特征的道路路段进行抗滑性能、宏观构造和微观纹理检测,并将测试结果进行回归拟合,建立路面摩擦系数预估模型,结果发现路面宏观构造和微观纹理均对路面抗滑性能有较强影响;ArashRezaei基于室内相关试验发现平均断面深度与韦布尔分布的尺寸参数和形状参数有一定相关性,根据上述参数拟合得到构造深度预估公式;NCHRP 441报告中研究人员通过对大量试验数据汇总,发现无离析区构造深度与集料最大粒径、4.75 mm筛孔通过率、曲率系数和不均匀系数具有一定相关性,根据上述参数拟合得到构造深度预估公式。但该公式用于估算间断级配构造深度时,预估值与实测值偏差较大;Bevan Sullivan测试17条NCAT环道试验段的平均断面深度,通过对大量试验数据汇总之后发现平均断面深度与级配最大密度线偏离距离加权值和沥青含量有一定相关性,根据上述参数拟合得到平均断面深度预估公式。研究人员测定了弗吉尼亚智能路面(Virginia Smart Road)构造深度,分析得出构造深度与公称最大粒径及4.75 mm筛孔通过率及沥青混合料的其他参数具有一定相关性,根据上述参数拟合得到构造深度预估公式;Long jia Chu基于轮胎一路面—水流的三维有限元模型模拟潮湿沥青路面抗滑性,并采用数值软件计算刹车距离,最后提出基于抗滑终值、刹车距离、滑水速度条件下的沥青混合料配合比设计方法,为级配选择提供理论依据,保证设计出的沥青混合料满足抗滑值和刹车距离的要

收稿日期:2020-09-24(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51878075);广西交通科技项目(编号:桂交科2013-100-28)

作者简介:何俊辉,男,硕士,高级工程师。

求;赵战利研究认为沥青混合料中 4.75 mm 筛孔通过率对构造深度具有显著的影响,4.75 mm 筛孔通过率越小构造深度越大;指出 Superpave 级配设计理念中的控制点和禁区的提出对沥青混合料的抗滑初值有一定的影响,但影响并不显著;黄宝涛根据统计自相似原理推出集料外露尺寸函数和级配分维值计算方法,利用上述方法计算出 AK-16A 和 OGFC 两种级配的集料外露尺寸函数值,并测定了上述两种级配成型车辙板的摆值。结果表明:级配分维值与路面的抗滑性有正向关系;杜雪松研究了 AC、OGFC 和 SMA 车辙板试件摆值和构造深度的变化规律,结果表明:级配对摆值的敏感性不强,而集料料源性质对摆值的敏感性较大;田强春通过相关研究得出了级配能用来作为表征沥青路面的抗滑指标;钱振东通过室内试验研究发现分维数 D 对抗滑性能有显著影响,两者构成向下抛物线,且分维数与构造深度为负相关关系;童申家通过室内试验和理论分析开展相关研究,结果表明表面纹理分维数对路面抗滑性能有显著影响。另有研究表明:雨天与晴天表面横向力系数比值为 0.54 : 1,交通事故概率提高 400%。

许多学者对路面抗滑性能相当关注,分别从集料、级配等方面进行研究,但是这些研究缺少多指标的综合分析。该文综合多种技术指标对 5 种集料进行抗滑性研究,以期为提高路面抗滑性能提供理论依据。

2 原材料及试验方法

2.1 原材料

(1) 试验材料

试验主要材料为木质纤维素、改性沥青和集料。木质纤维素掺量为 0.3%,沥青为 SBS(I-D),集料分别采用石灰岩 1、石灰岩 2、玄武岩 1、玄武岩 2、辉绿岩 5 种类别,其相关技术指标满足 JTG F40-2004《公路沥青路面施工技术规范》要求。

(2) 沥青混合料配合比设计

在探究粗集料性质对沥青混合料抗滑性能的影响时,5 种集料均采用同种 SMA-13 级配,探究细集料性质对沥青混合料抗滑性能的影响时,均采取 AC-13 级配,如表 1 所示。

表 1 沥青混合料级配

混合料 类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%									
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
SMA-13	100	94.1	66.0	25.4	17.2	16.0	14.4	12.2	11.6	10.4
AC-13	100	98.5	80.6	56.1	35.7	23.8	15.4	9.2	7.4	5.2

2.2 试验方法

试验方案见图 1。

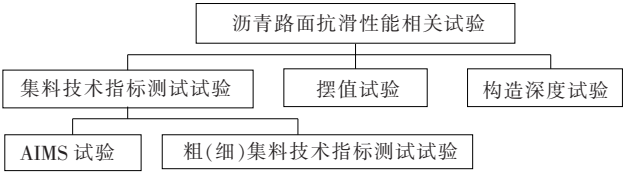


图 1 试验方案图

(1) 集料常规技术指标试验

根据试验规程,对集料的技术指标进行测试,采用 3 次平行试验,记录其均值,以此探究材料组成与技术指标的关系,主要测试指标为压碎值、磨耗值、磨光值、冲击值、松装空隙率、针片状含量等。将这 5 种集料制备成公称粒径为 2.36、1.18、0.6、0.3 mm 的细集料,测得其流动时间与未压实空隙率,以此来研究哪个指标能更好表征细集料的棱角性。

(2) AIMS 试验

美国 PINE 公司的 AIMS (Aggregate Imaging Measurement System) 主要由高倍率显微镜、相机、圆形转盘、照明系统和不透明黑箱组成,能快速获得集料三维形状,并提供客观的棱角及表面纹理等信息。对于粒径大于 4.75 mm 集料每次可以分析 50 颗,可测得球状因子、形状因子等指标。形状因子表征集料形状变化,其大小为 0~1,其值越接近 1 表征集料分布越均匀;球状因子表征颗粒的三维形状,大小为 0~1,其值越接近 1 表征集料形状越接近球体。

依据 AIMS 测试集料的三维信息。采用式(1)计算形状因子、采用式(2)计算球状因子。这两个指标能够有效地表征集料的形状特性。

$$SF = \frac{d_s}{\sqrt{d_L \times d_I}} \tag{1}$$

$$SP = \sqrt[3]{\frac{d_s \times d_I}{d_L^2}} \tag{2}$$

式中: SF 为形状因子; SP 为球状因子; d_L 为长轴长; d_s 为短轴长; d_I 为中间轴长。

(3) 摆值试验

依据试验设定的级配及最佳油石比制成 3 块车辙板试件。水平放置车辙板试件,用刷子扫除试件上灰尘等杂物,按照试验规程调整好摆式摩擦系数测定仪。当车辙板表面湿润后测试试件摆值,重复进行 5 次,取均值;再进行 3 次平行试验,取其均值,以此研究集料技术指标、级配评价参数与摆值的相关性。

(4) 构造深度试验

依据试验设定的级配及最佳油石比制成 3 块车辙板试件。水平放置车辙板试件,用刷子扫除试件上灰尘等杂物。按照试验规程装砂测量,进行 3 次平行试验,最终构造深度为其均值,以此研究集料技术指标、

级配评价参数与构造深度的相关性。

3 粗集料对沥青混合料抗滑性能的影响

3.1 粗集料技术指标分析

试验测得粗集料压碎值、磨耗值、形状因子、球状因子等技术指标,采用式(3)计算针片状含量、松装空隙率的加权平均值,结果见表 2。集料技术指标分为资源特性和加工特性。

$$I = \sum_{i=1}^n P_i I_{ai}$$
(3)

式中: I 为集料平均棱角性系数; P_i 为各粒径集料质量百分比(%); I_{ai} 为棱角性系数(%); n 为集料所含粒径组数。

表 2 粗集料技术指标

集料种类	压碎 值/%	磨耗 值/%	磨光值	冲击 值/%	形状 因子	球状 因子	针片状含量/%				松装空隙率/%			
							13.2	9.5	4.75	加权平	13.2	9.5	4.75	加权平
							mm	mm	mm	均值	mm	mm	mm	均值
石灰岩 1	20.9	17.9	38.6	21.1	0.47	0.64	10.4	11.1	10.2	10.6	45.9	45.4	41.8	43.5
石灰岩 2	24.3	17.1	39.4	24.5	0.44	0.62	11.6	11.7	12.2	12.0	45.5	45.0	41.3	43.0
玄武岩 1	11.8	10.7	55.4	10.3	0.49	0.64	9.7	10.4	8.3	9.2	48.1	47.4	44.8	46.0
玄武岩 2	11.6	11.3	53.6	10.1	0.48	0.64	9.4	10.2	8.1	9.0	47.3	46.8	43.2	44.9
辉绿岩	10.5	9.4	53.8	9.2	0.51	0.68	8.3	9.2	8.4	8.7	49.0	48.5	45.9	47.1

集料料源特性存在显著差异,玄武岩和辉绿岩明显比石灰岩更硬更耐磨,表现为具有较低的压碎值、磨耗值和冲击值,以及更大的磨光值。同是岩质集料指标存在明显差异,例如两种石灰岩的压碎值相差达到 3.4%,玄武岩压碎值相差 0.2%。集料的产地不同,出产的矿料品质不同,集料矿物成分不同,从而影响集料的坚硬程度。

集料加工特性存在显著影响,辉绿岩的棱角性明显比玄武岩和石灰岩好,表现为辉绿岩的松装空隙率最大。针片状含量主要受破碎设备的影响,但是石质不同,对其存在一定影响。如石灰岩针片状含量的加权平均值相差 1.4%,玄武岩相差 0.2%。因此集料的岩质不同,对其棱角性、针片状含量存在明显影响。

针片状含量与形状因子相关性最好,且形状因子与球状因子相关性显著,因此可用 AIMS 试验中形状因子表征针片状含量(表 3)。由表 3 可知:形状因子与针片状含量相关系数达到-0.918 6。AIMS 系统测量的形状因子和球状因子两项指标和按规范测得的针片状含量均能反映集料的形状特性。球状因子越

大,表明集料越向圆球靠近,集料的针片状含量会逐渐降低。

表 3 针片状含量与形状因子、球状因子的相关系数

形状指标	形状因子	球状因子
针片状含量	-0.918 6	-0.760 3
形状因子	—	0.918 2

3.2 粗集料性质与沥青混合料抗滑性能灰关联分析

进行粗集料指标对构造深度与摆值的影响试验时,材料中 4.75 mm 及以上集料为石灰岩 1 与 2、玄武岩 1 与 2、辉绿岩,4.75 mm 以下集料为石灰岩 1 加工而成,石灰岩矿粉。采用 SMA-13 级配进行马歇尔配合比设计,确定 5 种集料最佳油石比:5.9%、5.9%、6.0%、6.0%、6.0%,并制成车辙板试件。进行 3 次平行试验,测得摆值和构造深度如表 4 所示。

(1) 粗集料技术指标与摆值灰关联分析

以摆值为参考序列,以表 5 中的参数因素为比较序列,计算得灰色关联度如表 5 所示。

由表 5 可知:① 形状因子、松装空隙率、磨光值与

表 4 SMA-13 沥青混合料摆值及构造深度

集料种类	摆值/ BPN	构造深 度/mm	油石比/ %	VV/ %	VMA/ %
石灰岩 1	69.0	1.37	5.9	3.9	17.9
石灰岩 2	64.8	1.38	5.9	3.7	17.8
玄武岩 1	71.0	1.42	6.0	3.5	17.3
玄武岩 2	75.2	1.46	6.0	3.6	17.1
辉绿岩	78.8	1.62	6.0	3.2	17.4

表 5 各影响因素与摆值灰色关联度

因素	集料种类					与摆值 灰色关 联度
	石灰 岩 1	石灰 岩 2	玄武 岩 1	玄武 岩 2	辉绿岩	
压碎值	1.00	0.61	0.43	0.40	0.36	0.561
磨耗值	1.00	0.76	0.35	0.42	0.37	0.579
磨光值	1.00	0.81	0.46	0.54	0.58	0.679
冲击值	1.00	0.62	0.40	0.37	0.33	0.543
松装空隙率	1.00	0.81	0.87	0.78	0.78	0.848
形状因子	1.00	0.97	1.00	0.82	0.84	0.925

摆值灰关联度显著。原因为:粗集料微观构造突出部位被磨平的过程即为磨光,磨光值越大,集料抗滑性能衰减速率越小,路面抗滑性能越好;松装空隙率大,集料的棱角性丰富,粗集料颗粒的凸起部分越来越明显,摆值增大;形状因子越大,集料分布越均匀,集料相对排列紧密,摆锤橡胶块与试件有效接触面积大。② 由试验结果可知:摆值与形状因子灰关联值最大,且两者的线性方程为 $y=190.34x-18.919$,其相关系数为 0.799 7(图 2)。由于形状因子越大,集料分布越均匀,集料相对排列紧密,摆值与接触面积成正向关系。所以随着形状因子增大,摆值不断增大。

(2) 粗集料技术指标与构造深度灰关联分析

以构造深度为参考序列,以表 6 中各参数因素为比较序列,其灰色关联度结果如表 6 所示。

表 7 细集料技术指标

集料种类	流动时间/s					未压实空隙率/%				
	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	加权平均值	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	加权平均值
石灰岩 1	64.3	62.8	51.7	38.4	58.2	47.8	49.3	52.8	52.4	49.7
石灰岩 2	59.4	64.1	43.4	36.3	54.7	47.3	50.0	50.9	51.0	49.1
玄武岩 1	55.7	68.1	45.3	40.7	55.0	45.1	51.1	52.0	52.8	48.9
玄武岩 2	53.2	70.3	42.7	37.9	53.6	44.3	51.6	51.0	52.1	48.4
辉绿岩	57.6	64.8	44.3	37.3	54.4	47.0	50.7	51.6	51.2	49.3

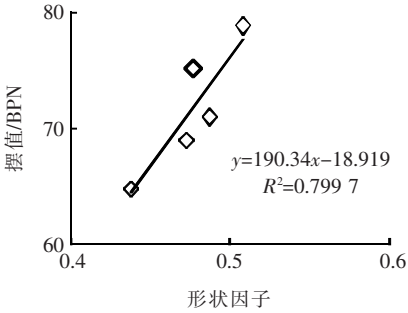


图 2 形状因子与摆值相关关系

表 6 各影响因素与构造深度灰色关联度

因素	集料种类					与构造 深度灰 色关联度
	石灰 岩 1	石灰 岩 2	玄武 岩 1	玄武 岩 2	辉绿岩	
压碎值	1.00	0.66	0.49	0.53	0.63	0.661
磨耗值	1.00	0.78	0.46	0.36	0.36	0.592
磨光值	1.00	0.71	0.44	0.42	0.36	0.585
冲击值	1.00	0.71	0.40	0.39	0.33	0.567
松装空隙率	1.00	0.85	0.85	0.76	0.60	0.812
形状因子	1.00	0.83	0.97	0.87	0.78	0.889

由表 6 可知:相对而言,形状因子、松装空隙率、压碎值与构造深度灰关联度更为显著。原因为:松装空隙率大,集料的棱角性丰富,粗集料颗粒的凸出部分越来越明显,路面矿料间的间隙越大,构造深度越大。形状因子表征集料均匀排布情况,粗集料分布越均匀,则路表裸露的骨料间空隙越大,构造深度越大。

4 细集料对沥青混合料抗滑性能的影响

4.1 细集料技术指标分析

细集料的棱角性是沥青路面增大抗滑力的影响因素,有必要开展相关研究。因此,对其流动时间和未压实空隙率进行测定,结果如表 7 所示。

流动时间与未压实空隙率相关性良好,流动时间试验误差小,能更好表征细集料棱角性。表7表明:流动时间与未压实空隙率加权平均值排序,石灰岩>玄武岩>辉绿岩;不同粒径下,未压实空隙率与流动时间相关性良好,达到0.8以上(表8)。集料的空隙率、流动时间值越大,其棱角性越丰富,流动时间与未压实空隙均能表征集料棱角性,但流动时间测试方法简单,误差相对较小,更加适合表征集料棱角性。

表8 流动时间与未压实空隙率的相关系数

集料粒径/mm	流动时间与未压实空隙率相关系数	集料粒径/mm	流动时间与未压实空隙率相关系数
2.36	0.816 7	0.6	0.871 6
1.18	0.883 0	0.3	0.829 5

4.2 细集料性质与沥青混合料抗滑性灰关联分析

细集料指标对构造深度与摆值的影响试验中,4.75 mm及以上集料为玄武岩1,4.75 mm以下集料为石灰岩1与2、玄武岩1与2、辉绿岩制作细集料,石灰岩制矿粉,采用SMA-13级配进行马歇尔配合比设计,确定5种集料最佳油石比:5.0%、5.0%、4.9%、4.9%、5.0%,按规范制成试件,并进行3次平行试验,结果如表9所示。

表9 AC-13 沥青混合料摆值及构造深度

集料种类	摆值/BPN	构造深度/mm	油石比/%	VV/%	VMA/%
石灰岩1	83.2	0.70	5.0	5.3	18.3
石灰岩2	79.4	0.69	5.0	3.7	18.7
玄武岩1	80.8	0.66	4.9	3.5	18.2
玄武岩2	77.8	0.62	4.9	3.5	18.4
辉绿岩	81.4	0.67	5.0	3.2	17.8

(1) 细集料技术指标与摆值灰关联分析

以摆值为参考序列,以流动时间为比较序列,其灰色关联度如表10所示。

表10 流动时间与摆值灰色关联度

因素	集料种类					与摆值灰色关联度
	石灰岩1	石灰岩2	玄武岩1	玄武岩2	辉绿岩	
流动时间	1.00	0.60	0.46	0.61	0.34	0.6

流动时间与摆值的灰关联度明显,与路面抗滑性能密切相关。由试验结果分析可知,流动时间与摆值

灰关联度达到0.6。流动时间与细集料棱角性成正向关系。细集料棱角性一方面可能部分外露从而影响试件摆值;另一方面,可能影响到粗集料的空间排列,造成更为丰富的表面构造,进而影响摆值测试。

(2) 细集料技术指标与构造深度灰关联分析

以构造深度为参考序列,以流动时间为比较序列,其灰色关联度如表11所示。

表11 流动时间与构造深度灰色关联度

因素	集料种类					与构造深度灰色关联度
	石灰岩1	石灰岩2	玄武岩1	玄武岩2	辉绿岩	
流动时间	1.00	0.33	0.91	0.39	0.51	0.63

流动时间对路面构造深度影响显著。由试验数据分析得:构造深度与流动时间的灰关联度良好,达到0.63。细集料棱角性随着流动时间的增大而变得丰富,集料之间接触点增多,道路表面纹理丰富,测得的构造深度增大,行车安全性提高。

5 结论

(1) AIMS系统测得的形状因子和球状因子以及规范测得的针片状含量均可反映集料的针片状特性,而且形状因子与球状因子和针片状的相关性均为强相关,鉴于此,建议采取形状因子表征集料针片状特性。

(2) 利用灰关联法研究了集料主要性能指标与路面构造深度、摆值之间的关系和变化规律,结果表明:灰色关联分析法能准确衡量各因素间的影响程度,并且能基于灰色关联度优选出影响沥青路面抗滑性能的关键指标,具有较高的实用价值。

(3) 为提高沥青路面抗滑性能,建议选取压碎值高、磨光值高、松装空隙率大、形状因子大的粗集料,棱角性丰富的细集料。

参考文献:

[1] Chowdhury A,Kassem E,Aldagari S,et al. Validation of Asphalt Mixture Pavement Skid Prediction Model and Development of Skid Prediction Model for Surface Treatments[R]. Texas: Texas A & M University,2017.

[2] Smith, K. L, Titus—Glover, et al. NCHRP 108: Guide for Pavement Friction[R],2009.

[3] Masad E,Rezaei A,Chowdhury A,et al. Predicting Asphalt Mixture Skid Resistance Based on Aggregate Char-

- acteristics[R]. Texas: Texas A & M University, 2009.
- [4] Noyce D A, Hussain P E, Yambó J M, et al. Incorporating Road Safety into Pavement Management: Maximizing Asphalt Pavement Surface Friction for Road Safety Improvements[R]. Midwest Regional University Transportation Center, 2007.
- [5] Ergun M, Iyınam S, Iyınam A F. Prediction of Road Surface Friction Coefficient Using only Macroand Microtexture Measurements[J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 131(4): 311—319.
- [6] Rezaei A, Masad E. Experimental—Based Model for Predicting the Skid Resistance of Asphalt Pavements[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2013, 14(1): 24—35.
- [7] Stroupgardiner M, Brown E R. NCHRP Report 441: Segregation in Hot—Mix Asphalt Pavements[R], 2000.
- [8] Sullivan B W. Development of a Fundamental Skid Resistance Asphalt Mix Design Procedure[J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 128(4): 1—15.
- [9] Davis R M. Comparison of Surface Characteristics of Hot—Mix Asphalt Pavement Surfaces at the Virginia Smart Road[R], 2001.
- [10] Chu L J, Fwa T F. Pavement Skid Resistance Consideration in Rain—Related Wet—Weather Speed Limits Determination[J]. Road Materials & Pavement Design, 2018, 19(2): 334—352.
- [11] Chu L, Fwa T F. Incorporating Pavement Skid Resistance and Hydroplaning Risk Considerations in Asphalt Mix Design[J]. Journal of Transportation Engineering, 2016, 142(10).
- [12] 赵战利, 张争奇, 胡长顺. 集料级配对沥青路面抗滑性能的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2005(1).
- [13] 黄宝涛, 田伟平, 李家春, 等. 沥青路面抗滑性能定量评价的分形方法[J]. 中国公路学报, 2008(4).
- [14] 杜雪松. 基于胎/路相互作用的路面抗滑特性研究[D]. 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2012.
- [15] 田强春. 基于集料特性与级配的沥青路面抗滑性能预测研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文, 2015.
- [16] 钱振东, 薛永超, 张令刚. 沥青路面三维纹理分形维数及其抗滑性能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016(10).
- [17] 童申家, 谢祥兵, 赵大勇. 沥青路面纹理分布的分形描述及抗滑性能评价[J]. 中国公路学报, 2016(2).
- [18] 朱洪洲, 廖亦源. 沥青路面抗滑性能研究现状[J]. 公路, 2018(1).
- [19] JTG F40—2004 公路沥青路面施工技术规范[S].
- [20] 贾渝, 曹荣吉, 李本京. 高性能沥青路面(Superpave)基础参考手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [21] 陈爱文, 郝培文. 应用贝雷法设计和检验级配[J]. 中外公路, 2004(5).
- [22] 张肖宁, 王绍怀, 吴旷怀, 等. 沥青混合料组成设计的CAVF法[J]. 公路, 2001(12).
- [23] JTG E42—2005 公路工程集料试验规程[S].
- [24] Luce A D. Analysis of Aggregate Imaging System (AIMS) Measurements and their Relationship to Asphalt Pavement Skid Resistance[R]. Texas: Texas A & M University, 2009.
- [25] Mahmoud E, Ortiz E. Implementation of AIMS in Measuring Aggregate Resistance to Polishing, Abrasion, and Breakage[R], 2006.
- [26] Zhang X, Sun Y. Research on Measurement of Surface Micro—Texture of Aggregate Using Laser and its Fractal Character[J]. Journal of Highway & Transportation Research & Development, 2011, 28(1): 19—24.
- [27] 王火明, 杨敏, 符德省, 等. 粗集料棱角性试验方法研究[J]. 公路交通技术, 2012(6).
- [28] DB50T 591—2015 沥青路面集料加工技术规范[S].
- [29] 艾长发, 赵静, 阳恩慧, 等. 石灰岩与玄武岩混合粗集料性能试验研究[J]. 公路, 2014(1).
- [30] 汪海年, 郝培文, 肖庆一, 等. 粗集料棱角性的图像评价方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2008(4).
- [31] 赵振军. 粗集料棱角性的评价方法及对混合料性能影响研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2018.
- [32] 刘福明. Superpave 矿料级配对沥青路面抗滑性能的影响[J]. 中外公路, 2005(6).
- [33] 范倩. 细集料对沥青混合料抗滑性能影响研究[D]. 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2016.
- [34] 马宏岩, 林铭彬, 侯亚丽. 冻融作用下沥青混合料中骨料级配的差异分析[J]. 中外公路, 2019(2).