

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2022.06.019

厂拌热再生 RAP 的分散特性研究*

万宁¹, 张烁¹, 胡林杰²

(1. 中交路桥华南工程有限公司, 广东 中山 528403; 2. 长沙理工大学, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为探究不同加热和拌和温度下旧沥青混合料(RAP)颗粒团中旧沥青与旧集料的分离程度,通过测定 RAP 在不同加热和拌和温度下分散后形成的有效级配,并与相同配比新拌沥青混合料分散后形成的标准级配进行对比,求得 RAP 的分散度,分析不同粒径 RAP 分散度随加热和拌和温度的变化规律。结果表明,加热温度升高有利于 RAP 的分散,拌和温度过高不利于 RAP 的分散,沥青的二次老化导致集料与沥青再次结团;对于粒径大于 2.36 mm 的粗型 RAP,粒径越大,其分散度越小,粒径小于 2.36 mm 的细型 RAP 的分散度较高;加热温度为 125 ℃、拌和温度为 190 ℃的条件下,RAP 的分散度最大,在该条件下配制的 AC-20C 热再生沥青混合料具有优良的路用性能。

关键词: 公路;厂拌热再生;旧沥青混合料(RAP);分散特性;加热温度;拌和温度;路用性能

中图分类号: U418.8

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)06-0082-06

厂拌热再生是沥青路面常用再生方式中最成熟、应用最广泛的技术。目前国外对沥青路面再生产生的旧沥青混合料(RAP)的研究取得了丰富成果,如:Bressi S.等验证了沥青路面再生中 RAP 的结团特性,研究了不同尺寸骨料在不同混合温度下的结团效应;Ma T.等在 BBR 中测试新黏结剂和与新黏结剂混合的细 RAP 材料,从黏结剂和砂浆性能估算 RAP 黏结剂的性能,证实了该工艺能捕捉到 RAP 材料中黏结剂的老化低温性能;Willis J. R.等研究了 RAP 黏结剂与原始沥青之间的关系,得出一旦 RAP 黏合剂掺量超过 30%,应使用较软等级的沥青来提高混合料的抗开裂性能;Sivilevicius H.等提出一种确定再生沥青混合料中 RAP 最大掺量的方法,并确定了混合料中其他组分最佳掺量的计算方法。国内对 RAP 的研究主要集中在质量控制与评价方面,如:姜严旭等通过冻融循环验证了再生混合料在长期水温作用下的耐久性能相较于新沥青混合料更差,且 RAP 掺量越高,耐久性能衰退越快;左锋等通过车辙试验、半圆弯曲试验、四点弯曲试验、冻融劈裂试验、汉堡车辙试验评价不同 RAP 掺量再生沥青混合料的性能,发现在较高 RAP 掺量(大于 30%)下,再生沥青混合料的各项性能均明显降低;程培峰等采用毛体积密度和马歇尔稳定度对新旧沥青融合性进行评价,分析了 RAP 粒径对

热再生沥青混合料性能的影响;曾俐豪对沥青和混合料两者再生特性进行试验研究,提出了适用于再生沥青混合料中 RAP 分散均匀性评价的质心距离与膨胀结团指标。现有研究结合路用性能在确定 RAP 掺量和提高 RAP 掺量方面取得了显著成效,但对于 RAP 在拌和和加热过程中级配特性以一定形式、比例和规律反映到热再生沥青混合料的合成级配方面的研究较少。厂拌热再生沥青混合料生产过程中,RAP 的加热、拌和均匀性是控制混合料质量的重要方面,通过分析不同加热、拌和温度下 RAP 的“有效级配”,研究 RAP 分散的均匀性和热再生沥青混合料生产过程中 RAP 随温度变化的分散规律,对于确定最佳加热和拌和温度、优化热再生混合料级配设计进而改善热再生沥青混合料的路用性能具有重要意义。本文以佛山一环西拓旧路改造工程为例,研究 RAP 在不同加热、拌和温度下的分散特性,对各档 RAP 分散度进行分析,为最佳加热、拌和温度确定和热再生沥青混合料级配设计提供参考。

1 RAP 分散特性

在热再生混合料级配设计中,RAP 集料的级配是经过抽提将旧集料和旧沥青分离后筛分得到的,结合 RAP 掺配比例与新集料调整得到总体集料的

* 基金项目: 湖南省科技计划项目(2018TP2038);长沙市科技计划项目(kc1804053)

合成级配即设计级配。在实际生产中,RAP 表面的沥青膜在高温加热作用下软化,加入到新混合料的高温拌和中,在短暂的加热和离心过程中往往达不到将旧集料和旧沥青完全分离的效果,热再生过程后获得的沥青混合料级配与设计级配存在一定偏差,导致再生沥青混合料的路用性能与新拌沥青混合料存在一定差异。

RAP 结团颗粒在高温作用下产生一定分散和迁移,最终形成的“有效级配”的集料比表面积高于原 RAP 级配,但低于抽提筛分后 RAP 集料级配。RAP 的分散程度和迁移程度能很好地反映热再生过程中所获取的沥青混合料的级配与设计级配的接近程度。下面结合具体试验测定不同加热和拌和温度下各档 RAP 胶团分散后的有效级配,分析不同加热和拌和温度对 RAP 级配分散特性的影响,从而确定最佳加热和拌和温度。

2 试验方案

热再生过程中测定 RAP 的分散程度需要将拌和后混合料中的新、旧集料分离,常规试验难以实现。因此,采用工业盐替代热再生过程中的新集料,通过水洗法将拌和后的工业盐去除,实现新、旧集料分离。由于不同粒径 RAP 在特定加热、拌和温度下的分散程度不相同,为有效评价 RAP 在热再生过程中的分散特性,对不同粒径 RAP 逐级测定其分散程度。

2.1 试验方法

采用佛山一环西拓旧路改造工程旧路铣刨、破碎的上面层 RAP 料,其级配通过直接筛分试验测定,沥青含量和集料级配由抽提及抽提后筛分试验测定。根据直接筛分试验结果将 RAP 分为 13.2~26.5 mm、9.5~13.2 mm、4.75~9.5 mm、2.36~4.75 mm、1.18~2.36 mm、0~1.18 mm 6 档,测定 1.18 mm RAP 的分散程度。试验方法如下:

(1) 通过抽提及筛分试验测得各档 RAP 的沥青含量和集料级配。

(2) 采用四分法,每档 RAP 取样 4.0 kg,把各档 RAP 原料置于恒温加热箱中,采用对应加热温度加热 2~3 h。

(3) 把加热后 RAP 原料倒入对应拌和温度的拌和锅内,加入与 RAP 原料等质量的工业盐,搅拌 120 s 后倒出混合料,再翻面倒回拌和锅内继续拌和 120 s。重复该操作直至 RAP 与工业盐分散均匀。

(4) 将拌和完成的混合料倒出,采用水洗法去除混合料中的工业盐,放置混合料至冷却后通过筛分试验测得各档 RAP 原料在不同加热、拌和温度下形成的 RAP“有效级配”。

(5) 在抽提筛分后得到的各档 RAP 集料中加入相应沥青含量的新沥青,高温拌和为新沥青混合料,冷却后重复第 2~4 步,最终测得各档 RAP 原料在不同加热、拌和温度下形成的同样集料级配且分散均匀的“标准级配”。

(6) 计算各档 RAP 在不同温度条件下形成的集料有效级配与标准级配的集料比表面积,据此计算其分散度 β ,公式如下:

$$\beta_i = S_{Ai} / S_{Ai0} \times 100 \quad (1)$$

式中: β_i 为第 i 档 RAP 分散度; S_{Ai} 为第 i 档 RAP 有效级配的集料比表面积; S_{Ai0} 为第 i 档 RAP 标准级配的集料比表面积。集料比表面积 S_A 按式(2)计算。

$$S_A = \sum (P_i F_{Ai}) \quad (2)$$

式中: P_i 为各粒径的分级筛余百分率; F_{Ai} 为相应于各粒径集料的比表面积系数,根据文献[16]的试验结果确定(见表 1)。

表 1 各粒径集料的比表面积系数

筛孔尺寸/ mm	$F_A /$ ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	筛孔尺寸/ mm	$F_A /$ ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)
19.000	0.08	1.180	0.96
16.000	0.09	0.600	1.71
13.200	0.11	0.300	3.48
9.500	0.15	0.150	5.25
4.750	0.27	0.075	10.72
2.360	0.46	0.000	113.77

2.2 试验数据表示

为研究不同加热和拌和温度对 RAP 分散程度的影响,分别采用固定 115 °C 加热温度、变化拌和温度,固定 190 °C 拌和温度、变化加热温度的方法进行试验。105 °C、115 °C、125 °C 加热温度与 190 °C 拌和温度下得到的 RAP 有效级配分别记为 T_{105} 、 T_{115} 、 T_{125} ;115 °C 加热温度与 180 °C、190 °C、200 °C 拌和温度下得到的 RAP 有效级配分别记为 T_{180} 、 T_{190} 、 T_{200} ;各档 RAP 抽提后集料加入相同新沥青含量高温拌和后在相应加热和拌和温度下所测得的混合料“标准级配”,1.18~2.36 mm、2.36~4.75 mm、4.75~9.5 mm、9.5~13.2 mm、13.2~26.5 mm 5 档粒径 RAP 分别记为 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 、 R_5 。

3 试验结果与分散特性分析

RAP 有效级配和标准级配见表 2~6。

3.2 分散特性分析

3.1 试验结果

各档 RAP 在不同加热和拌和温度下所测得的

根据式(2)计算各档 RAP 在不同温度下形成的集料比表面积,结果见图1。从图1可看出:1) 在

表 2 1.18~2.36 mm RAP 级配分布

级配类型		下列筛孔(mm)的通过率/%					
		2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075
有效级配	T_{105}	100	2.8	0.3	0.1	0.1	0.0
	T_{115}	100	3.3	0.4	0.2	0.1	0.0
	T_{125}	100	4.0	0.5	0.2	0.1	0.1
	T_{180}	100	3.1	0.4	0.1	0.1	0.0
	T_{190}	100	3.3	0.4	0.2	0.1	0.0
	T_{200}	100	3.0	0.3	0.1	0.1	0.0
标准级配	R_1	100	4.1	0.6	0.3	0.2	0.1

表 3 2.36~4.75 mm RAP 级配分布

级配类型		下列筛孔(mm)的通过率/%						
		4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075
有效级配	T_{105}	100	2.7	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1
	T_{115}	100	3.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1
	T_{125}	100	4.1	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1
	T_{180}	100	2.8	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
	T_{190}	100	3.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1
	T_{200}	100	3.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
标准级配	R_2	100	4.3	0.6	0.2	0.1	0.1	0.1

表 4 4.75~9.5 mm RAP 级配分布

级配类型		下列筛孔(mm)的通过率/%							
		9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075
有效级配	T_{105}	100	6.7	1.1	0.5	0.2	0.1	0.1	0.1
	T_{115}	100	9.3	2.5	0.9	0.4	0.1	0.1	0.1
	T_{125}	100	12.1	6.4	3.0	0.8	0.2	0.1	0.1
	T_{180}	100	8.4	2.3	0.6	0.2	0.1	0.1	0.1
	T_{190}	100	9.3	2.5	0.9	0.4	0.1	0.1	0.1
	T_{200}	100	5.0	1.8	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0
标准级配	R_3	100	15.1	7.7	3.1	1.0	0.2	0.1	0.1

表 5 9.5~13.2 mm RAP 级配分布

级配类型		下列筛孔(mm)的通过率/%								
		13.200	9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075
有效级配	T_{105}	100	10.6	0.7	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
	T_{115}	100	12.0	2.5	1.2	0.6	0.2	0.1	0.0	0.0
	T_{125}	100	16.1	6.3	3.7	1.9	0.6	0.2	0.1	0.1
	T_{180}	100	10.6	1.9	1.1	0.5	0.1	0.1	0.0	0.0
	T_{190}	100	12.0	2.5	1.2	0.6	0.2	0.1	0.0	0.0
	T_{200}	100	9.8	1.3	0.8	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0
标准级配	R_4	100	26.5	9.1	5.9	3.0	0.7	0.1	0.1	0.1

表 6 13.2~26.5 mm RAP 级配分布

级配类型	下列筛孔(mm)的通过率/%										
	26.500	19.000	13.200	9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075
有效级配	T_{105}	100	99.8	66.4	13.1	5.8	3.4	1.9	1.1	0.6	0.2
	T_{115}	100	100.0	69.0	18.5	6.9	4.0	2.2	1.2	0.5	0.2
	T_{125}	100	100.0	74.3	23.2	7.3	4.8	3.1	1.8	0.6	0.1
	T_{180}	100	99.8	67.9	16.7	5.7	3.2	1.2	0.4	0.2	0.0
	T_{190}	100	100.0	69.0	18.5	6.9	4.0	2.2	1.2	0.5	0.2
	T_{200}	100	99.9	65.4	15.1	4.3	1.8	0.5	0.2	0.1	0.0
标准级配	R_5	100	100.0	83.4	40.4	15.2	10.6	7.8	5.1	1.7	0.1

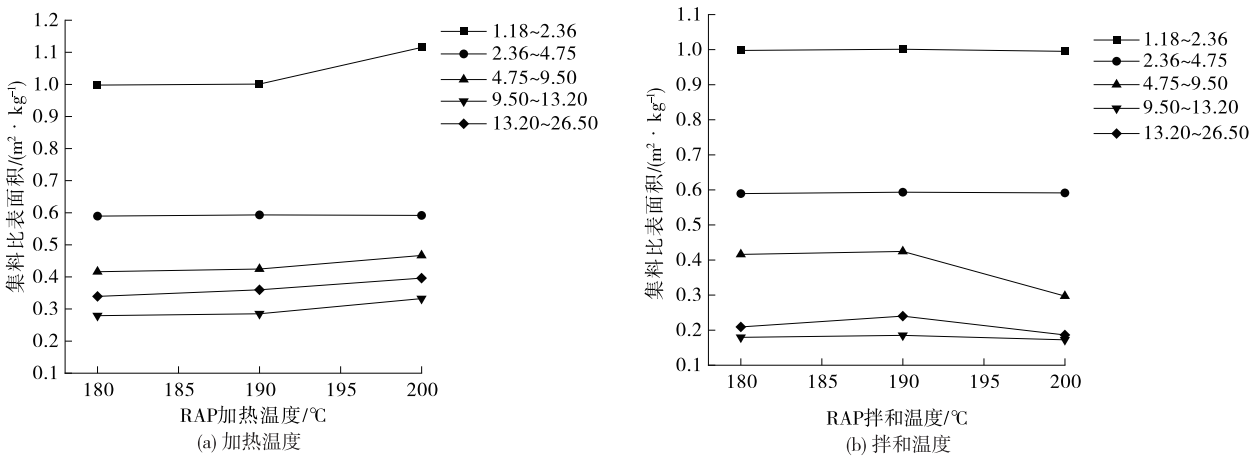


图 1 RAP 矿料比表面积随温度的变化

拌和温度固定的情况下,随着加热温度的提高,不同粒径 RAP 集料最终形成的比表面积增大。2) 在加热温度固定的情况下,随着拌和温度的提高,不同粒径 RAP 集料最终形成的比表面积先增大后减小,4.75~9.5 mm 粒径 RAP 尤为明显。说明拌和温度过高并不利于 RAP 集料的分散,温度过高时 RAP 中沥青会发生二次老化导致再次结团。拌和温度为 190 $^{\circ}\text{C}$ 更有利于 RAP 集料的分散。

按式(1)计算各档 RAP 在不同温度下的分散度,结果见表 7。由表 7 可知:RAP 分散度与其比表面积变化规律类似。各档 RAP 的分散度随着加热

温度的增高而增大,随着拌和温度的增高先增大后减小,说明拌和温度过高不利于 RAP 集料的分散,有可能形成二次结团;不同粒径 RAP 在相同温度下的分散度有所不同,13.2~26.5 mm 粒径 RAP 的分散度最低,2.36~4.75 mm 粒径 RAP 的分散度最高;对于粒径大于 2.36 mm 的粗型 RAP,粒径越大,分散度越小;粒径大于 9.5 mm RAP 的分散度远低于粒径小于 9.5 mm RAP 的分散度;各档 RAP 分散度随不同加热、拌和温度的变化规律一致,RAP 在 125 $^{\circ}\text{C}$ 加热温度和 190 $^{\circ}\text{C}$ 拌和温度时分散度最大。

表 7 不同温度下各档 RAP 的分散度

级配类型		下列筛孔(mm)的通过率/%				
		13.20~26.50	9.50~13.20	4.75~9.50	2.36~4.75	1.18~2.36
有效级配	T_{105}	59.8	74.8	82.8	98.4	88.7
	T_{115}	62.4	78.5	86.6	98.9	89.3
	T_{125}	67.0	90.1	96.6	99.6	99.1
	T_{180}	36.9	47.9	84.8	98.3	89.0
	T_{190}	42.3	49.5	86.6	98.9	89.3
	T_{200}	32.8	46.2	60.5	98.6	88.8

4 热再生混合料配制与路用性能

AC-20C 热再生沥青混合料配制原料如下:沥青采用改性沥青 SBS(I-D);新集料选自广西象州县磊石建材有限公司,分为 3 档,分别为 10~20 mm(记为 1[#]新料)、5~10 mm(记为 2[#]新料)、0~3 mm(记为 3[#]新料);RAP 来自佛山一环西拓旧路改造工程旧路铣刨、破碎的上面层,分为 4 档,分别为 20~26.5 mm(记为 1[#]RAP)、9.5~20 mm(记为 2[#]RAP)、4.75~9.5 mm(记为 3[#]RAP)、0~4.75 mm(记为 4[#]RAP)。参考 JTG/T 5521—2019《公路沥青路面再生技术规范》及《佛山一环西拓路改造路面

工程质量管理手册》要求的级配范围,结合粗型 RAP 分散度较低的试验结果,拟定混合料掺配比例为 $m(1^{\#}\text{RAP}) : m(2^{\#}\text{RAP}) : m(3^{\#}\text{RAP}) : m(4^{\#}\text{RAP}) : m(1^{\#}\text{新料}) : m(2^{\#}\text{新料}) : m(3^{\#}\text{新料}) = 5 : 5 : 7 : 8 : 46 : 12 : 17$ 。热再生过程中 RAP 原料越好的分散程度越有利于旧沥青、旧集料与新沥青、新集料的结合,从而更接近于设计级配。根据温度对佛山一环西拓工程旧路铣刨、破碎的上面层 RAP 原料分散程度的影响,确定热再生过程中加热温度为 125 ℃,与新料的拌和温度为 190 ℃。矿料合成级配见表 8。

根据合成级配拌和、成型热再生混合料试件进

表 8 AC-20C 热再生沥青混合料矿料合成级配

级配类型	下列筛孔(mm)的通过率/%											
	26.500	19.000	16.000	13.200	9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075
合成级配	100	98.3	82.9	65.1	51.2	31.2	23.8	18.6	13.1	9.0	6.6	4.9
级配上限	100	100.0	86.0	74.0	58.0	39.0	29.0	22.0	16.0	12.0	9.0	6.0
级配下限	100	90.0	74.0	62.0	46.0	29.0	19.0	13.0	9.0	6.0	4.0	3.0
级配中值	100	95.0	80.0	68.0	52.0	34.0	24.0	18.0	13.0	9.0	7.0	5.0

行马歇尔试验,根据试验结果综合确定热再生沥青混合料沥青最佳用量为 4.3%,并进行配合比设计检验。最佳油石比马歇尔试验结果见表 9,配合比设计检验结果见表 10。

表 9 热再生沥青混合料马歇尔试验结果

项目	试验结果	技术要求
毛体积密度/(g·cm ⁻³)	2.442	—
最大理论相对密度	2.543	—
空隙率/%	4.0	3~5
间隙率/%	12.5	—
饱和度/%	68.2	65~75
稳定度/kN	14.4	≥8
流值/(0.1 mm)	3.5	1.5~4

表 10 配合比设计检验结果

项目	试验结果	技术要求
稳定度/(次·mm ⁻¹)	>8 000	≥5 000
冻融劈裂残留强度比/%	90.8	>80

从表 9、表 10 可以看出:AC-20C 热再生改性沥青混合料目标配合比的各项验证试验结果均符合 JTG/T 5521—2019 的要求,也满足《佛山一环西拓路改造路面工程质量管理手册》的技术要求,具有优良的路用性能。

5 结论

该文通过 RAP 与同配比新拌沥青混合料在不同热再生温度下形成的级对比,提出一种计算各档 RAP 分散度的试验方法,结论如下:在 125 ℃加热温度和 190 ℃拌和温度下 RAP 的分散效果最佳;加热温度升高有利于 RAP 的分散,拌和温度过高会造成 RAP 中沥青老化导致二次结团;粒径越大的 RAP,加热拌和过程中分散度越低。在上述最佳加热温度和拌和温度下热再生沥青混合料具有优良的路用性能,但如何确定各档 RAP 的最佳掺量并通过分散度优化热再生沥青混合料的级配设计过程仍需进一步研究。

参考文献:

- [1] 董雨明,关彦斌,邢鹏.走近沥青路面材料再生技术[J].中国公路,2020(7):14-21.
- [2] BRESSI S,CAVALLI M C,PARTL M N,et al.Particle clustering phenomena in hot asphalt mixtures with high content of reclaimed asphalt pavements[J].Construction and Building Materials,2015,100:207-217.
- [3] MA T,MAHMOUD E,BAHIA H U.Estimation of reclaimed asphalt pavement binder low-temperature properties without extraction[J].Transportation Research

- Record, Journal of the Transportation Research Board, 2010, 2179(1): 58—65.
- [4] WILLIS J R, TURNER P, DE GOES PADULA F, et al. Effects of changing virgin binder grade and content on high reclaimed asphalt pavement mixture properties[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2013, 2371(1): 66—73.
- [5] SIVILEVIČIUS H, VISLAVIČIUS K. Simulation of composition of recycled hot-mix asphalt mixture produced in asphalt mixing plant[J]. Construction and Building Materials, 2019, 214: 17—27.
- [6] 姜严旭, 顾兴宇, 周洲. RAP 掺量对热再生沥青混合料水温耐久性能的影响[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2018, 39(3): 368—372.
- [7] 左锋, 叶奋, 宋卿卿. RAP 掺量对再生沥青混合料路用性能影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(4): 1403—1410.
- [8] 程培峰, 向银剑, 李炬辉, 等. RAP 粒径对热再生沥青混合料性能的影响研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(6): 81—86+91.
- [9] 曾俐豪. 厂拌热再生混合料中新旧沥青扩散及 RAP 分散特征研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019.
- [10] 张萌. 不同 RAP 温度泡沫沥青冷再生混合料性能及影响机理[J]. 公路工程, 2016, 41(4): 250—255.
- [11] JAMSHIDI A, WHITE G, HOSSEINPOUR M, et al. Characterization of effects of reclaimed asphalt pavement (RAP) source and content on dynamic modulus of hot mix asphalt concrete[J]. Construction and Building Materials, 2019, 217: 487—497.
- [12] 马辉, 茅荃, 李宁. 沥青路面厂拌热再生 RAP 料掺量影响因素分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(9): 97—104.
- [13] 王雪莲, 胡林, 黄晓明. 沥青路面厂拌热再生工艺关键技术研究[J]. 中外公路, 2019, 39(1): 210—214.
- [14] IM S, KARKI P, ZHOU F J. Development of new mix design method for asphalt mixtures containing RAP and rejuvenators[J]. Construction and Building Materials, 2016, 115: 727—734.
- [15] ABDALFATTAH I A, MOGAWER W S, STUART K. Quantification of the degree of blending in hot-mix asphalt (HMA) with reclaimed asphalt pavement (RAP) using Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX) analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 294: 126261.

收稿日期: 2022—05—26

(上接第 81 页)

γ 地质特征。

4 结论

本文考虑水体规模、地形特征及地质特征三项影响因素, 搭建各因素对山区公路线形设计影响的灰色关联分析数学模型。选取四类典型山区公路线形, 分别计算对应条件下不同因素对线形设计的关联程度, 得出山腰公路、跨岭公路、山脊公路线形与山地地形、丘陵地形、简单地质和一般地质的灰色关联程度最高, 沿水公路线形受水体规模的影响最明显。分析结果可为山区公路线形设计提供参考。

参考文献:

- [1] 刘运通. 道路交通安全指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [2] 符铎砂, 葛婷, 李海峰, 等. 基于公路三维线形几何特性的行车安全分析[J]. 中国公路学报, 2015, 28(9): 24—29.
- [3] FITZPATRICK K, WOOLDRIDGE M D, TSIMHONI O, et al. Alternative design consistency rating methods for two-lane rural highways[R]. Federal Highway Admini-

stration, 2000.

- [4] 崔洪军, 魏连雨, 朱敏清, 等. 公路平面设计中有关问题的探讨[J]. 中国公路学报, 2002, 15(1): 22—25.
- [5] FU R, GUO Y S, YUAN W, et al. The correlation between gradients of descending roads and accident rates[J]. Safety Science, 2011, 49(3): 416—423.
- [6] XU Min, HUANG Xing, ZHANG Chi, et al. Application of fuzzy synthesis evaluation to driving safety analysis of sharp curves on mountain expressways[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(6): 186—197.
- [7] LORENČÍK D, MACIAKOVÁ A. Safety of personal vehicles on mountain passes during the winter period[J]. Procedia Engineering, 2017, 192: 551—556.
- [8] 郭应时, 付锐, 袁伟, 等. 山区公路事故率与平面线形的关系[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(1): 63—71.
- [9] 郭忠印, 杨漾, 曹继伟, 等. 基于高速公路线形综合指标的安全评价模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(11): 1472—1476.
- [10] 宋传平, 施红星, 齐玉梅. 基于灰色关联分析的车辆交通事故规律研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(8): 40—43.

收稿日期: 2021—10—13