

富油 RAP 热再生沥青混合料路用性能研究

张晋媛

(山西省交通规划勘察设计院有限公司, 山西 太原 030000)

摘要:为分析富油 RAP 热再生沥青混合料的路用性能,分别对不同 RAP(富油 RAP)掺量的 AC-20 沥青混合料进行抗高温、抗低温、抗水损坏和抗疲劳性能试验。研究结果表明,随着 RAP 和富油 RAP 掺量的增加,可以显著降低热再生沥青混合料中新沥青用量,且沥青混合料低温抗裂性能和抗疲劳性能降低,而高温抗车辙能力增强,抗水损害能力先增加后降低,RAP-20(15)和 RAP-50(20)热再生沥青混合料的低温性能和水稳定性已无法满足规范要求;当 RAP 掺量为 40%(富油 RAP 掺量 15%)时,热再生沥青混合料综合路用性能较好,因此建议 RAP 掺量不宜超过 40%,其中富油 RAP 掺量不宜超过 15%。

关键词:富油 RAP;热再生沥青混合料;配合比设计;半圆弯曲试验;路用性能

中图分类号:U414 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2022)01-0120-07

0 引言

近年来,我国交通运输事业取得了高速发展,已建成四通八达的公路网。据统计,截至 2020 年底,公路密度达 0.52 km/km^2 ,公路行业也由最初的建设期逐渐转向养护管理期,2020 年底公路养护里程占公路总里程的 99%。我国每年路面翻修重建所产生的废旧沥青混合料(recycled asphalt pavement, RAP)近 1.6 亿 $\text{t}^{[1-2]}$,若不对其进行处理,会造成严重环境污染和资源消耗。沥青路面再生技术是指将收集的 RAP 经一定工艺处理后循环利用,既可节约资源,又实现环境保护,符合绿色交通发展理念,是我国乃至世界公路养护发展的热点^[3-5]。在沥青路面铣刨、回收 RAP 时,部分集料在荷载挤压、机械冲击等作用下必然会发生破碎,集料比表面积增大。文献[6]指出,将 RAP 分档后再进行配合比设计,可以降低集料粒径差异带来的影响,且分档越多,变异性越小,并将 RAP 分为粒径小于 5 mm 和大于 5 mm 2 档或 0~5 mm、5~10 mm 和大于 10 mm 3 档。0~5 mm 档集料由于比表面积较大,表面裹覆更多沥青,也被称作富油 RAP。文献[7]、文献[8]研究了 50%RAP 掺量的 AC-20 混合料,但富油 RAP 仅占 10%左右。而在实际工程中,富油 RAP 使用量也很少,甚至直接废弃。富油 RAP 沥青含量高,若能将其再生提高其利用率,既能节约资源,也能保护环境。

以 AC-20 沥青混合料为研究对象,分析了不同 RAP 掺量和富油 RAP 掺量的热再生沥青混合料的配合比设计和路用性能,以期今后 RAP 沥青混合料的研究和应用提供必要的理论依据。

1 试验材料

1.1 RAP 混合料

研究采用某高速公路铣刨回收的 RAP 混合料,将 RAP 预处理后筛分为 0~5 mm(富油 RAP)、5~10 mm、10~20 mm 3 档,筛分结果如表 1 所示。根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)规定的离心抽提法抽提回收旧沥青,并测试其基本性能,试验结果如表 2 所示。RAP 料中旧集料技术指标如表 3 所示。

收稿日期:2021-10-01 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20210210

作者简介:张晋媛(1985—),女,高级工程师,研究方向为公路道路与桥梁。E-mail:571387621@qq.com

张晋媛.富油 RAP 热再生沥青混合料路用性能研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2022,35(1):120-126.

表 1 RAP 料筛分结果 %

RAP 粒径范围/ mm	通过下列筛孔的质量百分比											
	26.5	19.0	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
10~20	91.9	63.5	33.8	6.7	0.5	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
5~10	100	100	100	97.0	81.3	45.4	15.0	11.1	2.2	0.6	0.1	0.1
0~5	100	100	100	100	100	97.6	85.0	72.2	32.9	5.1	1.2	0.2

表 2 RAP 中旧沥青基本性能

技术指标	25 ℃针入度/ (0.1 mm)	软化点 /℃	10 ℃测力延度		沥青含量/%		
			行程/cm	荷载/N	0~5 mm RAP	5~10 mm RAP	10~20 mm RAP
实测值	31	68.5	7	51	8.5	5.3	3.2
试验方法	T0604	T0605	T0606		T0722		

表 3 旧集料主要技术指标

RAP 粒径范围/ mm	表观相对密度	毛体积相对密度	含水率 /%	压碎值 /%	磨耗损失 /%
10~20	2.731	2.801	1.3	13.9	20.9
5~10	2.793	2.805	1.4	—	21.6
0~5	2.785	—	1.3	—	—
技术指标	≥2.5	实测	≤3.0	≤28	≤30

1.2 新集料

研究所用的新集料和矿粉均为石灰岩,其主要技术指标如表 4 所示,均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)的相关规定。

表 4 集料及矿粉的技术指标

粒径范围/ mm	表观相对密度	毛体积相对密度	含水率/%	磨耗损失/%	压碎值/%
15~20	2.836	2.834	0.31	17.9	15.9
10~15	2.864	2.841	0.52	18.1	15.9
5~10	2.904	2.892	0.55	—	—
3~5	2.877	2.814	—	—	—
0~3	2.869	—	—	—	—
矿粉	2.734	—	—	—	—

1.3 新沥青与再生剂

以 70# 基质沥青作为新的沥青胶结料,其基本性能如表 5 所示,试验结果均满足 JTG F40—2004 规范的要求。再生剂选用陕西某公司产再生剂,其技术指标如表 6 所示。

表 5 70# 基质沥青技术指标

技术指标	25 ℃针入度/(0.1 mm)	软化点/℃	10 ℃延度/cm
实测值	72	49.5	48
技术要求	60~80	≥46	≥20

表 6 再生剂的主要技术指标

检测项目	60 ℃黏度/ (mm ² · s ⁻¹)	闪点/℃	饱和分/%	芳香分/%	薄膜烘箱试验 前后黏度比/%	薄膜烘箱试验 前后质量变化/%
实测值	2 800	265	26.7	48.2	1.3	-1.1

2 热再生沥青混合料配合比设计

2.1 热再生沥青混合料级配

在 RAP 热再生沥青混合料设计和施工过程中,级配组成是沥青混合料再生技术的关键^[9],应严格控制新旧沥青和再生剂的掺量,同时应控制好旧集料和新集料的比例。根据旧集料级配组成及现有研究经验,考虑 RAP 掺量分别为 0%(占混合料总质量比,下同)、30%、40%和 50%,同时在每一种 RAP 掺量下考虑不同富油 RAP 掺量带来的影响,富油 RAP 掺量分别为 10%、15%和 20%,再生剂掺量为旧沥青质量的 10%,简记为 RAP- $m(n)$ (m 为 RAP 掺量百分比, n 为 RAP 中富油 RAP 含量百分比),如 RAP-30(10)表示 RAP 掺量为 30%(富油 RAP 占 10%)的热再生沥青混合料。为降低级配产生的影响,取 JTGF 40—2004 规范规定的 AC-20 级配中值作为目标级配,级配设计过程中应使混合料级配尽可能贴近目标级配。各沥青混合料级配组成如表 7 所示。

表 7 再生沥青混合料级配组成

%

混合料类型	RAP 集料				石灰岩新集料				矿粉
	0~5 mm	5~10 mm	10~20 mm	15~20 mm	10~15 mm	5~10 mm	3~5 mm	0~3 mm	
新拌混合料	0	0	0	24	21	15	7	29	4
RAP-30(10)	10	10	10	20	15	12	8	13	2
RAP-30(15)	15	10	5	22	17	13	7	9	2
RAP-30(20)	20	5	5	19	18	19	7	5	2
RAP-40(10)	10	14	16	15	14	9	10	10	2
RAP-40(15)	15	10	15	17	15	12	9	5	2
RAP-40(20)	20	5	15	16	18	12	7	6	1
RAP-50(10)	10	25	15	15	14	8	5	7	1
RAP-50(15)	15	18	17	13	14	12	5	5	1
RAP-50(20)	20	10	20	16	12	14	5	2	1

2.2 最佳油石比变化规律

不同 RAP 掺量下热再生沥青混合料最佳油石比(OAC)和新添加油石比(OAC_b)如图 1 所示。由图 1 可知,RAP-30%沥青混合料的 OAC 值小于 RAP-0 沥青混合料,这是由于老化沥青中掺入再生剂后,使沥青质含量降低,轻组分溶解能力增强,从而有效改善了沥青相溶性,因此该掺量下最佳沥青用量降低。但随着 RAP 含量的增加,RAP 旧料越多,有效沥青(具有黏结能力的沥青)占比越少,沥青混合料黏结强度衰减较快,而且当再生剂掺加量为 5%时,沥青性能可以恢复至原标号^[10],本研究中再生剂掺量 10%,对 RAP 料中老化沥青的再生能力较强,因此 OAC 增大。此外,由于 RAP 热再生沥青混合料的最佳油石比由新沥青和再生沥青 2 部分组成,但再生剂对旧沥青的再生效果与混合料类型、旧集料表明沥青裹附量等有关,故最佳油石比与富油 RAP 掺量无显著变化规律。对于新沥青掺量,掺入 RAP 料后,RAP 中旧沥青替代部分新沥青作为黏结材料,从而使新沥青用量减少,即 OAC_b 随着 RAP 掺量的增加而减少。由于富油 RAP 中集料粒径小,比表面积较大,表面裹覆旧沥青含量多,因此相同 RAP 掺量下,OAC_b 随着富油 RAP 掺量的增加而降低。

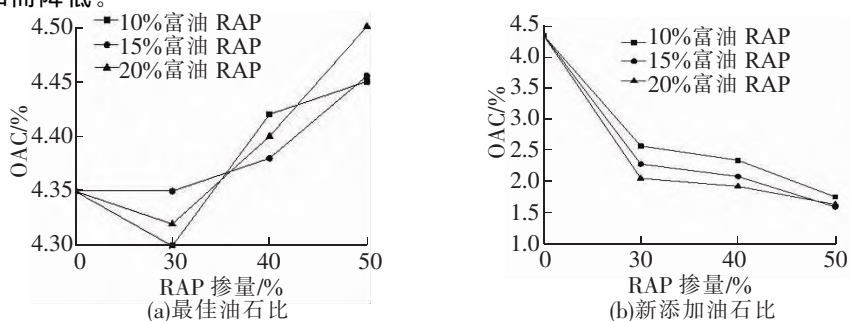


图 1 热再生沥青混合料最佳沥青用量变化规律

2.3 体积参数变化规律

在沥青最佳油石比掺量下,再生沥青混合料毛体积密度(γ_f)、空隙率(VV)、矿料间隙率(VMA)和沥青饱和度(VFA)变化如表 8 所示。

表 8 热再生沥青混合料体积参数

参数	RAP 含量									
	RAP-30 (10)	RAP-30 (15)	RAP-30 (20)	RAP-40 (10)	RAP-40 (15)	RAP-40 (20)	RAP-50 (10)	RAP-50 (15)	RAP-50 (20)	0
γ_f	2.534	2.529	2.519	2.518	2.506	2.503	2.492	2.497	2.486	2.514
VV	4.09	4.10	4.26	4.19	4.42	4.39	4.34	4.59	4.53	4.48
VMA	13.69	13.90	14.22	14.12	14.53	14.71	14.94	14.70	14.86	14.48
VFA	70.15	70.55	70.07	70.36	69.55	70.14	70.48	69.19	69.50	69.03

由表 8 可知,随着 RAP 掺量增加, OAC_b 逐渐变少,拌和时沥青流变特性变差,不能均匀地填充粗集料间的空隙。因此,热再生沥青混合料的毛体积密度逐渐降低,空隙率、矿料间隙率逐渐增大,而沥青饱和度并无明显变化。

2.4 力学指标变化规律

马歇尔试验是沥青混合料配合比设计和路面施工质量控制过程中常用的质量控制方法,热再生沥青混合料在最佳油石比下的稳定度(MS)和流值(FL)变化如图 2 所示。

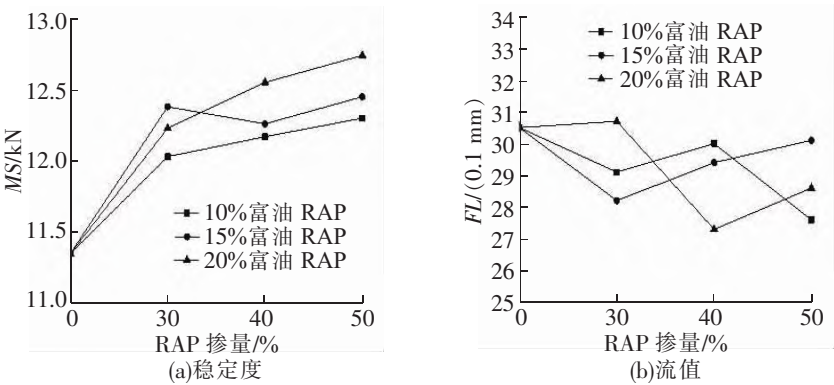


图 2 热再生沥青混合料马歇尔试验结果

稳定度表征混合料试件在加载受压过程中能承受的最大承载能力(破坏荷载),流值表征试件在最大荷载作用下产生的垂直变形量。由图 2 可见,热再生沥青混合料的 MS 值均大于新拌沥青混合料,说明热再生沥青混合料具有较好的承载能力,且 RAP 含量越高,MS 值越大。此外,在相同的 RAP 掺量下,随着富油 RAP 掺量增加,混合料密实度增加,集料间的嵌挤力增强,混合料刚度增大,承载能力提高。对于流值,随着 RAP 掺量增加,FL 值无显著变化规律,基本与普通沥青混合料相当,说明虽然 RAP 热再生沥青混合料的承载能力有所提高,但在破坏荷载下产生的竖向变形并无显著规律。这是由于沥青混合料是由集料-沥青和空隙组成的三相材料,其变形除了与荷载有关外,还与自身结构组成有关。

3 热再生沥青混合料路用性能

3.1 高温稳定性

车辙试验用于评价沥青混合料高温稳定性,车辙板尺寸为 30 cm×30 cm×5 cm(长×宽×高),按照 JTG E20—2011 规定的试验方法进行试验,为了便于对比分析热再生沥青混合料与新拌沥青混合料高温抗车辙能力的区别,计算热再生沥青混合料与新拌沥青混合料的动稳定度(DS)增长率,用 RDS 表示,即 $RDS = (DS_{RAP} - DS_{新}) / DS_{新}$,其中, DS_{RAP} 、 $DS_{新}$ 分别为 RAP 热再生沥青混合料和新拌沥青混合料的动

稳定度),得到试验结果如图 3 所示。

由图 3 可知,与新拌混合料相比,RAP 沥青混合料的 DS 值较新拌混合料提高了 17%~60%,且随着 RAP 掺量的增加, DS 值增大。当 RAP 掺量为 40% 和 50% 时,热再生沥青混合料 DS 值相差不大,但大于 RAP 掺量为 30% 的热再生沥青混合料。RAP 掺量为 30%、40%、50% 所对应 DS 平均值分别为 3 049 次/mm、3 731 次/mm、3 938 次/mm,说明热再生沥青混合料具有较好的高温稳定性,这是由于 RAP 中沥青老化严重,沥青组分中沥青质含量高,轻组分少,沥青硬度大,新旧沥青混溶后黏度增大,从而使再生沥青混合料具有较好的高温抗车辙能力。此外,当 RAP 总掺量相同时,随着富油 RAP 用量的增加,旧沥青含量增加,热再生沥青混合料的 DS 值呈增长趋势。

3.2 低温抗裂性

采用低温弯曲试验分析热再生沥青混合料的低温抗裂性能,试件尺寸为 250 mm×30 mm×35 mm(长×宽×高)的小梁试件,试验温度-10℃,加载速率 50 mm/min,试验方法参照 JTG E20—2011 相关规定执行。试验结果如图 4 所示。

由图 4 可知,除了 RAP-20(15)和 RAP-50(20)热拌沥青混合料外,其余沥青混合料应变均满足(JTG F40—2004)规定的冬温区(温度>-9.0℃)不小于 2 000 $\mu\epsilon$ 的要求。随着 RAP 和富油 RAP 掺量的增加,热再生沥青混合料劲度模量逐渐增大,应变逐渐下降,说明 RAP 热再生沥青混合料的低温抗裂性能和抗变形能力降低。产生该现象的原因是因为 RAP 中的沥青老化后塑性降低、脆性增加,沥青混合料变硬,富油 RAP 用量或者 RAP 掺量越大,旧沥青含量越多,沥青黏度降低,从而导致沥青混合料低温抗变形能力降低。因此,建议 RAP 掺量不宜超过 40%,其中富油 RAP 掺量不高于 15%。

3.3 水稳定性

采用浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验分析热再生沥青混合料的抗水损坏性能,试验方法参照 JTG E20—2011 相关规定执行。得到各沥青混合料冻融劈裂强度比(TSR)和残留稳定度(MS_0)如图 5 所示。

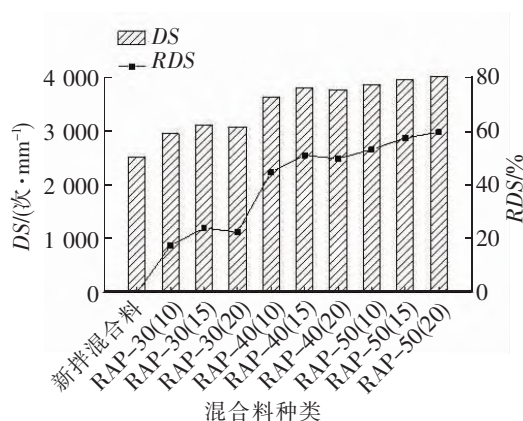


图 3 车辙试验结果

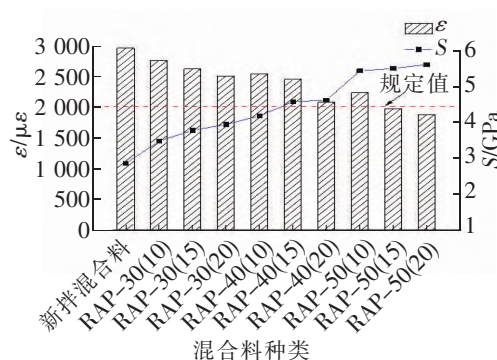
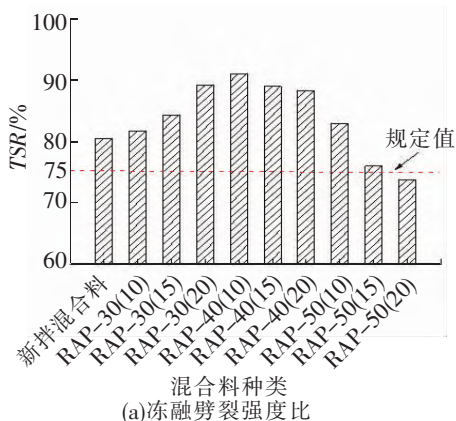
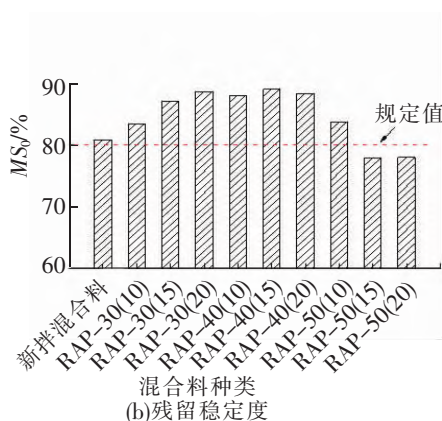


图 4 低温断裂试验结果



(a)冻融劈裂强度比



(b)残留稳定度

图 5 热再生沥青混合料水稳定性试验结果

由图 5 可知, TSR 和 MS_0 随着 RAP 掺量的增加而呈先增加而后下降的趋势,当 RAP 掺量为 40% 时, TSR 和 MS_0 值均取得最大,而当 RAP 掺量为 50%(富油 RAP 掺量 15% 和 20%)时, TSR 和 MS_0 值

显著降低,甚至无法满足 JTG F40—2004 规范的要求,这一现象可能是由于沥青混合料中新、旧沥青融合差异带来的影响,当 RAP 掺量大于 40%时,沥青混合料空隙率增大,反而影响了热再生沥青混合料水稳定性。此外,当 RAP 掺量为 30%时,TSR 和 MS_0 值均随着富油 RAP 掺量的增加而增加,但当 RAP 掺量为 40%和 50%时,TSR 和 MS_0 值随着富油 RAP 掺量的增加而降低,说明由于大量的 RAP 导致热再生沥青混合料中集料分布不均匀,空隙率和矿料间歇率增大,使热再生沥青混合料抗水损坏能力降低。

3.4 抗疲劳性能

采用半圆弯曲试验(Semi-circular Bending Test,SCB)评价沥青混合料疲劳性能,沥青混合料空隙率为 $4\pm0.5\%$,半圆试件尺寸为 150 mm×75 mm(直径×高),试件底部中心处有深度 20 mm、宽度 1 mm 的切割缝。SCB 疲劳试验参数支座间距 120 mm,采用正弦波应力加载模式;应力比为 0.2、0.3 和 0.4;加载频率 10 Hz;加载温度 20 ℃。各沥青混合料疲劳试验结果如表 9 所示。

表 9 沥青混合料疲劳寿命(次)与拟合参数

混合料类型	应力比			$\lg N_f=a+bS$		
	0.2	0.3	0.4	a	b	R^2
新拌混合料	37 895	12 567	2 207	5.76	-6.27	0.967
RAP-30 (10)	2 8493	8 539	1 736	5.68	-6.18	0.987
RAP-30 (15)	27 822	7 483	1 726	5.66	-6.04	0.998
RAP-30 (20)	25 807	7 003	1 731	5.59	-5.87	0.999
RAP-40 (10)	24 368	6 907	1 728	5.55	-5.75	0.999
RAP-40 (15)	23 409	7 003	1 534	5.58	-5.92	0.991
RAP-40 (20)	21 874	5 180	1 720	5.42	-5.52	0.988
RAP-50 (10)	19 187	4 125	1 534	5.34	-5.49	0.969
RAP-50 (15)	17 940	3 939	1 343	5.35	-5.63	0.981
RAP-50 (20)	17 269	3 456	1 346	5.30	-5.54	0.956

由表 9 可知,随着应力比的增加,沥青混合料疲劳寿命下降,当应力比相同时,随着 RAP 掺量和富油 RAP 含量的增加,热再生沥青混合料疲劳寿命下降,这可能是由于旧沥青含量的增加,新旧沥青融合不充分,再生剂对旧沥青的再生能力有限,裹附在集料表面的沥青胶结料易产生应力集中,在重复荷载作用下,更容易产生疲劳破坏。研究表明^[5],疲劳寿命对数值与应力比具有较好的线性关系,即

$$\lg N_f=a+bS \tag{1}$$

式中, N_f 为疲劳寿命; S 为应力比; a 、 b 为拟合参数, a 越大表示疲劳寿命越好, b 为疲劳寿命对应力的敏感程度,其值越大说明疲劳寿命对应力变化越敏感。根据表 9 所示可知,疲劳方程具有较好的拟合效果,拟合优度大于 0.95;随着 RAP 掺量的增加, b 的绝对值逐渐降低,说明随着 RAP 掺量的增加,热再生沥青混合料对应力的敏感程度逐渐降低。

4 结论与展望

研究了 RAP 掺量及富油 RAP 掺量对热再生沥青混合料路用性能的影响,主要研究结论如下:

(1)RAP 回收混合料中的沥青可以代替部分新沥青,当 RAP 掺量为 50%(富油 RAP 含量 20%)时,新沥青油石比较新拌沥青混合料油石比降低了 64%。随着 RAP 和富油 RAP 掺量的增加,沥青混合料毛体积密度降低,马歇尔稳定度、空隙率和矿料间歇率增大,动稳定度较新拌混合料提高了 17%~60%;而低温条件下应变下降,尤其 RAP-20(15)和 RAP-50(20)热再生沥青混合料在-10 ℃的应变小于 2 000 $\mu\epsilon$,表明 RAP 热再生沥青混合料具有较好的高温稳定性,但低温抗裂性能较差。

(2)热再生沥青混合料劈裂强度比和残留稳定度随着 RAP 掺量的增加呈先增加后下降的趋势,当

RAP 掺量为 40% 时,二者达到最大值,水稳定性最好,而 RAP-20(15)和 RAP-50(20)热拌沥青混合料的 TSR 和 MS_0 值已无法满足规范要求。随着 RAP 掺量和富油 RAP 含量的增加,热再生沥青混合料疲劳寿命下降。

(3)综合考虑 RAP 热再生沥青混合料的路用性能,建议 RAP 掺量不宜超过 40%,其中富油 RAP 掺量不宜超过 15%。此外,本研究未对热再生过程中旧沥青的再生比例进行探索,未来研究可从热再生效率入手,这对提高沥青材料及 RAP 利用率具有重要意义。

参 考 文 献

- [1]郭鹏,谢凤章,孟建玮,等. 沥青再生过程中新旧沥青界面混溶行为综述[J]. 材料导报, 2020, 34(13): 13100-13108.
- [2]朱涵,王林照,于泳. 低温法改善橡胶颗粒在砂浆中上浮的研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2018, 31(3): 36-43.
- [3]杜艳花. 高速公路沥青路面行驶质量评价方法的探讨[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2013, 26(2): 74-77.
- [4]Lee S H, Tam A B, Kim J, et al. Evaluation of rejuvenators based on the healing and mechanistic performance of recycled asphalt mixture [J]. Construction and Building Materials, 2019, 220(30): 628-636.
- [5]Zhang J, Sun H, Jiang H, et al. Experimental assessment of reclaimed bitumen and RAP asphalt mixtures incorporating a developed rejuvenator [J]. Construction and Building Materials, 2019, 215(10): 660-669.
- [6]徐世法,徐立庭,郑伟,等. 热再生沥青混合料新技术及其发展展望[J]. 筑路机械与施工机械化, 2013, 30(6): 39-43.
- [7]朱钰,张亚财,牛龙,等. 高掺量 RAP 厂拌热再生在干线公路养护中的应用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2017, 34(5): 73-77.
- [8]高磊,林鹏. 厂拌热再生沥青混合料的最佳 RAP 掺量研究[J]. 华东交通大学学报, 2018, 35(1): 103-108.
- [9]张丽娟,孟昕娜. 正交设计和响应面设计在路用混凝土配合比优化中的应用与比较[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2021, 34(3): 119-126.
- [10]张炜. 沥青混合料热再生配合比设计分析[J]. 黑龙江交通科技, 2021, 44(3): 69-70.

Study on Road Performance of Oil-Rich Hot Recycled Asphalt Mixture

Zhang Jinyuan

(Shanxi Province Transportation Planning Surveying and Designing Institute Co. Ltd., Taiyuan 030000, China)

Abstract: In order to investigate the road performance of oil-rich RAP hot recycled asphalt mixtures, AC-20 asphalt mixtures with different RAP (oil-rich RAP) contents were tested for their resistance to high temperature, low temperature, water damage and fatigue. The results show that with the increase of RAP or oil-rich RAP, the new asphalt dosage in the hot recycled asphalt mixture decreases significantly, and the low-temperature crack resistance and fatigue resistance of asphalt mixture decreases, while the high-temperature rutting resistance increases, and the water damage resistance increases first and then decreases. The low-temperature performance and water stability of RAP-20 (15) and RAP-50 (20) hot recycled asphalt mixtures can no longer meet the specification requirements. When the RAP dose of 40%, including oil-rich RAP is 15%, the comprehensive road performance of hot recycled asphalt mixture is improved, so it is suggested that the RAP content should not exceed 40%, including oil-rich RAP content should not exceed 15%.

Key words: oil-rich RAP; hot recycled asphalt mixture; proportion design; semicircular bending test; road performance