

文章编号:1672-9331(2013)04-0001-08

# RAP 掺量对热再生沥青混合料性能影响分析

查旭东, 闵 斌, 宋 微

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410004)

**摘 要:** 为了确定热再生沥青混合料合理的旧沥青路面材料(RAP)掺量, 依托浙江省 102 省道杭昱线(临安段)旧沥青路面厂拌热再生利用试验路, 通过大量室内试验, 进行了不同 RAP 掺量的热再生沥青混合料 AC-20C 的目标配合比设计和路用性能分析. 研究表明, 旧沥青中掺加 5% 的再生剂和 70% 的新沥青, 再生后的调和沥青可以达到 A-70# 目标沥青的性能要求; 随着 RAP 掺量的增加, 热再生沥青混合料的总最佳油石比和新料最佳油石比线性增加, 而新沥青用量线性减少; RAP 掺量在 20%~40% 之间时, 热再生沥青混合料的各项路用性能均满足规范的技术要求, 且随着 RAP 掺量的增加, 热再生混合料的高温稳定性呈指数关系增强, 低温抗裂性、抗渗性和抗滑性呈线性减弱, 水稳定性在 RAP 掺量为 30% 时达到最大. 为此, 按 30% RAP 掺量铺筑了试验路, 经通车两年考验, 取得了优良的应用效果.

**关键词:** 旧沥青路面材料(RAP); 热再生沥青混合料; 掺量; 配合比设计; 路用性能

中图分类号: U412.221

文献标识码: A

## Influence analysis of RAP contents on performances of hot recycled asphalt mixture

ZHA Xu-dong, MIN Bin, SONG Wei

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China)

**Abstract:** In order to determine a reasonable content of reclaimed asphalt pavement (RAP) materials for hot recycled asphalt mixtures, relying on the test road of hot mix plant recycling of existing asphalt pavement in Hang-Yu Line (Lin'an Section) of 102 Provincial Highway in Zhejiang Province, and through a large number of laboratory tests, the design of target mix proportions and the analysis of pavement performances for hot recycled asphalt mixture AC-20C with different RAP contents have been carried out. The results show the old asphalt mixed with 5% of regenerant and 70% of new asphalt, and the blended asphalt after regeneration can be achieved the performance requirements of A-70# of target asphalt. With the increase of RAP content, the total optimal asphalt-aggregate ratios and the optimal asphalt-aggregate ratios of new mixture in hot recycled asphalt mixture increase linearly, but the new asphalt contents decrease linearly. When the RAP contents are between 20%~40%, all the pavement performances of hot recycled asphalt mixture can satisfy the technical requirements of specifications. In addition, with the increase of RAP contents, the high temperature stability of hot recycled asphalt mixture enhances exponential-

收稿日期: 2013-10-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51078045); 浙江省交通运输厅科技计划项目(2009H50)

作者简介: 查旭东(1970-), 男, 安徽岳西人, 长沙理工大学教授, 博士生导师, 主要从事路基路面工程方面的研究.

ly, the low temperature crack resistance, the impermeability and the anti-slip performance decrease linearly, and the water stability reaches the maximum in 30% of RAP content. Therefore, the test road has been paved in accordance with 30% of RAP content, and the good application effect has been achieved after 2 years of open traffic.

**Key words:** reclaimed asphalt pavement (RAP); hot recycled asphalt mixture; content; mix proportion design; pavement performance

沥青路面在运营过程中,随着使用年限的延长,在行车荷载和环境因素的反复作用下,沥青逐渐老化而变硬发脆并引起开裂、车辙、水损坏等病害,必须进行养护维修<sup>[1]</sup>.同时,沥青路面在我国高等级公路,特别是高速公路路面工程中占90%以上,随着越来越多的沥青路面相继进入大中修周期,未来我国必将面临着巨量旧沥青路面材料(RAP)处理的问题<sup>[2]</sup>.因此,如何对RAP材料进行再生利用,将是我国道路工程领域未来长期关注的技术课题之一.

大量研究表明,在RAP中掺入新沥青、新集料和再生剂等材料,经重新拌和摊铺碾压后,可以对旧沥青路面进行再生利用,并恢复其使用性能<sup>[3]</sup>.RAP的再生利用不仅减少了沥青和砂石材料的开采与能源消耗,而且解决了废料弃放和污染问题,有利于保护环境,降低碳排放.而且由再生沥青混合料铺筑的沥青路面具有与新建沥青路面相似的良好使用性能,因而得到了国内外越来越多的重视<sup>[4,5]</sup>.

早在1915年,美国就开始进行了废旧沥青路面材料再生利用的试验研究.经过近一个世纪的发展,目前欧美等发达国家的沥青路面再生技术已经较为成熟,并形成了多项再生技术手册、指南和规范<sup>[6-8]</sup>.我国在沥青路面再生利用方面的研究起步较晚,始于20世纪80年代.早期的再生沥青混合料主要用于低等级公路和城市道路路面或者用于修补坑槽,在高等级公路路面中,一般用于冷再生的基层或底基层<sup>[9]</sup>.2000年以后,随着广佛、成渝等高速公路的大修,厂拌热再生技术逐渐得到关注和应用<sup>[10,11]</sup>.近年来,在高速公路养护维修工程中,现场热再生技术也得到较多的应用<sup>[12]</sup>.然而,总体来看,我国沥青路面再生利用技术相对较为落后,究竟是采用厂拌还是现场再生技术,各地经验也各不相同,因此有待进一步深入研究.

实际上,再生沥青混合料中的旧料掺量不仅影响到路面的使用性能<sup>[13,14]</sup>,而且对经济性也有影响.目前,在多数工程中,再生沥青混合料的RAP掺量都是按经验判断,缺乏科学数据的指导<sup>[15]</sup>.为此,作者依托浙江省102省道杭昱线(临安段)旧沥青路面厂拌热再生利用试验路,通过大量室内试验,分析不同RAP掺量对热再生沥青混合料AC-20C路用性能的影响规律,以期在工程应用中确定合理的RAP掺量提供参考.

## 1 原材料性能检验

### 1.1 沥青

选定A-70#道路石油沥青,并对现场采集的RAP进行抽提回收,测试得到旧沥青及其掺加5%再生剂后的再生沥青、新沥青,以及30%再生沥青与70%新沥青混合得到的调和沥青的主要技术性能如表1所示<sup>[16,17]</sup>.

从表1可以看出,由于旧沥青路面已运营5年,回收的旧沥青老化较为严重,与新沥青相比,其针入度和延度显著减小,软化点和粘度明显增加,所以有必要掺加再生剂;经掺入再生剂调和后,除延度偏小外,再生沥青的针入度和软化点均达到A-50#沥青的技术要求;进一步掺加新沥青后,调和沥青的三大指标均达到A-70#目标沥青的性能要求.因此,该种RAP经掺加再生剂和新沥青后,可进行再生利用.

### 1.2 集料

由于旧沥青路面沥青面层结构为4cm AK-13A上面层+5cm AC-16I下面层,根据厂拌热再生的技术要求,将现场铣刨的RAP筛分成9.5~26.5mm(1#)和0~9.5mm(2#)两档旧集料,经抽提回收后实测旧粗、细集料的主要技术性能,其中,1#和2#RAP的油石比分别为3.9%和5.4%.同时,测试了19~26.5mm(3#),

9.5~19 mm(4#), 4.75~9.5 mm(5#)和 0~4.75 mm(6#)4 档新集料和矿粉(7#)的主要技

术性能,结果如表 2 和表 3 所示<sup>[18]</sup>. 其中,矿粉的表现观相对密度为 2.701,满足 $\geq 2.50$ 的技术要求.

表 1 沥青性能检验结果

Table 1 The test results of asphalt performances

沥青类型	25 °C 针入度/ 0.1 mm	软化点/ °C	15 °C 延度/ cm	15 °C 密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	135 °C 布氏粘度/ mPa · s
旧沥青	23	60.5	6.5	1.081	1 146.5
再生沥青	48	52.0	32.5	—	719.0
新沥青	65	48.0	>100	1.023	401.5
调和沥青	60	48.8	>100	—	467.8
A-50# 技术指标	40~60	$\geq 49$	$\geq 80$	实测	—
A-70# 技术指标	60~80	$\geq 46$	$\geq 100$	实测	—

表 2 新旧粗集料性能指标对比 1

Table 2 Comparisons of performance indexes for new and old coarse aggregates

集料类型	表观相对 密度	压碎值/ %	洛杉矶磨耗 损失/%	针片状颗粒 含量/%	软石含量/ %	吸水率/ %
旧集料	2.772	18.2	18.6	11.7	2.2	0.43
新集料	2.735	14.4	22.9	5.6	2.6	0.88
规范要求	$\geq 2.50$	$\leq 28$	$\leq 30$	$\leq 18$	$\leq 5$	$\leq 3.0$

表 3 新旧细集料性能指标对比 2

Table 3 Comparisons of performance indexes for new and old fine aggregates

集料类型	表观相对 密度	坚固性/ %	含泥量/ %	砂当量/ %
旧集料	2.638	13.5	2.3	71.4
新集料	2.706	14.7	2.8	80.0
规范要求	$\geq 2.50$	$\geq 12$	$\leq 3$	$\geq 60$

从表 2 和表 3 可知,新、旧粗、细集料的各项技术指标均达到《公路沥青路面施工技术规范》

(JTG F40-2004)规定的沥青混合料用集料质量技术要求,可用于生产再生沥青混合料.

通过筛分试验得到的新旧集料和矿粉的级配如表 4 所示<sup>[18]</sup>.

从表 4 可知,由于受到长期的交通荷载与环境因素的反复作用,以及回收铣刨的扰动影响,RAP 中的粗集料出现了少量细化现象,因此有必要通过补充相对较粗的新集料进行调整,以达到热拌沥青混合料的级配要求.

表 4 集料筛分试验结果

Table 4 Sieving test results of aggregates

集料	筛孔尺寸/mm											
	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
1#RAP	100.0	91.8	82.4	65.3	26.2	7.6	4.3	2.7	1.8	1.1	0.6	0.3
2#RAP	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	46.7	22.9	15.7	11.1	7.5	5.1	3.1
3#	100.0	6.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4#	100.0	100.0	66.0	32.8	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5#	100.0	100.0	100.0	95.9	60.1	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6#	100.0	100.0	100.0	100.0	99.9	87.0	55.4	41.1	29.1	19.0	12.7	7.0
7#	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	98.6	86.5

## 2 热再生沥青混合料配合比设计

### 2.1 级配设计

热再生沥青混合料中 RAP 掺量受回收沥青混合料的品质、再生沥青混合料的用途、施工条件以及所选用的沥青和集料等因素的影响,为了确定合理的掺量,作者参考国内外成功经验以及表 1 的再生沥青性能试验结果,在进行配合比设计时,在 20%~40% 范围内按 5% 的间隔选定了 5 种 RAP 掺量,并与不掺 RAP 的新沥青混合料进行对比.其中,RAP 掺量为其占再生集料混合料的百分比.同时,根据试验路沥青路面结构设计方案,热再生沥青混合料用于中面层 AC-20C 沥青混合料,为此,依据浙江省杭州地区近年来得到成功应用的 AC-20C 级配,选定目标级配,并进行再生沥青混合料级配设计.其中,矿料组成设计结果如表 5 所示,不同 RAP 掺量下的热再生沥青混合料合成级配曲线如图 1 所示<sup>[18]</sup>.

表 5 不同 RAP 掺量时的矿料组成设计

Table 5 Composition design of aggregates under different RAP contents %

RAP 掺量	1#RAP	2#RAP	3#	4#	5#	6#	7#
0	0	0	6	28	22	41	3
20	8	12	6	27	11	33	3
25	10	15	5	27	8	32	3
30	12	18	5	26	6	30	3
35	14	21	5	26	3	28	3
40	16	24	4	26	1	26	3

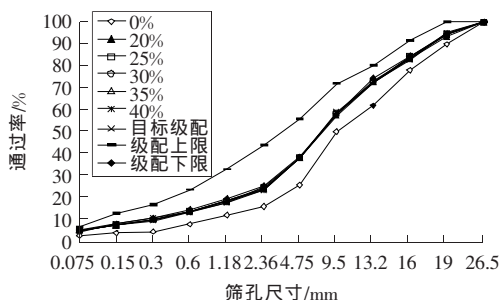


图 1 不同 RAP 掺量下的 AC-20C 合成级配曲线

Fig. 1 Composite gradation curves of AC-20C under different RAP contents

从表 5 和图 1 可以看出,不同 RAP 掺量的再

生沥青混合料合成级配与目标级配非常接近,且在《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004)规定的级配范围内,满足级配设计要求.

### 2.2 最佳油石比的确定

按照图 1 的 6 种合成级配,在 3.5%~5.5% 之间按 5% 的间隔分别选取 5 种总油石比(新旧沥青总质量与所有集料的质量比)进行马歇尔试验.根据马歇尔性能指标和体积指标的要求,得到最佳油石比结果如表 6 所示<sup>[18]</sup>.其中,OAC 为总最佳油石比;OAC<sub>1</sub> 为新沥青与总集料的最佳质量比;P<sub>0</sub> 为旧沥青与总集料的质量比,即 OAC = OAC<sub>1</sub> + P<sub>0</sub>;OAC<sub>n</sub> 为新沥青与新集料的最佳质量比.

表 6 最佳油石比试验结果

Table 6 Test results of the optimal asphalt-aggregate ratios %

旧料掺量	OAC	OAC <sub>1</sub>	P <sub>0</sub>	OAC <sub>n</sub>
0	4.00	4.00	0.00	4.00
20	4.46	3.50	0.96	4.37
25	4.58	3.38	1.20	4.51
30	4.72	3.28	1.44	4.69
35	4.86	3.18	1.68	4.89
40	5.00	3.08	1.92	5.13

从表 6 可以看出,随着 RAP 掺量的增加,OAC 和 OAC<sub>n</sub> 基本呈线性增加,而 OAC<sub>1</sub> 呈线性减少;数据显示,RAP 掺量每增加 5%,OAC 和 OAC<sub>n</sub> 分别平均升高约 0.13% 和 0.19%,而 OAC<sub>1</sub> 平均减少约 0.1%.这表明 RAP 掺量的增加,可减少新沥青用量,RAP 中的旧沥青得到有效利用.但总沥青用量有所增加,掺加的新混合料中油石比提高,说明 RAP 越多,需要更多的新料油石比来改善热再生沥青混合料的性能.

## 3 热再生沥青混合料性能分析

为了分析热再生沥青混合料的路用性能,根据表 5 和表 6 确定的不同 RAP 掺量的目标配合比来拌制热再生沥青混合料,分别进行车辙、低温弯曲、浸水马歇尔和冻融劈裂、渗水、构造深度等试验,以分别评价热再生沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性、抗渗性和抗滑性等路用性能,从而分析 RAP 掺量对各项路用性能的影响规律,以确定合理的 RAP 掺量.据此,得到各项

路用性能指标随 RAP 掺量的变化关系如表 7 和图 2~8 所示. 其中,为方便分析,图中未给出

RAP 的试验结果. 同时,通过回归分析,可以得到各路用性能随 RAP 掺量的相关关系(如表 8 所示).

表 7 不同 RAP 掺量下热再生沥青混合料路用性能试验结果

Table 7 Test results of pavement performances for hot recycled asphalt mixtures under different RAP contents

RAP 掺量 $p/\%$	高温稳定性		低温抗裂性		水稳定性		抗渗性	抗滑性
	动稳定度 $DS/(\text{次} \cdot \text{mm}^{-1})$	弯拉强度 $R_B/\text{MPa}$	弯拉应变 $\epsilon_B/\mu\epsilon$	劲度模量 $S_B/\text{MPa}$	浸水残留稳定度 $MS_0/\%$	冻融劈裂强度比 $TSR/\%$	渗水系数 $C_w/(\text{mL} \cdot \text{min}^{-1})$	构造深度 $TD/\text{mm}$
0	1 040	6.75	1 518	4 596	81.5	78.7	46.5	0.57
20	1 071	6.92	1 381	5 017	85.4	76.2	34.5	0.69
25	1 086	7.18	1 278	5 510	87.8	76.7	38.8	0.67
30	1 187	7.50	1 172	6 396	90.8	79.7	44.0	0.60
35	1 703	7.91	1 062	7 449	86.9	78.5	40.5	0.54
40	2 625	8.47	1 012	8 372	86.5	77.2	48.3	0.57

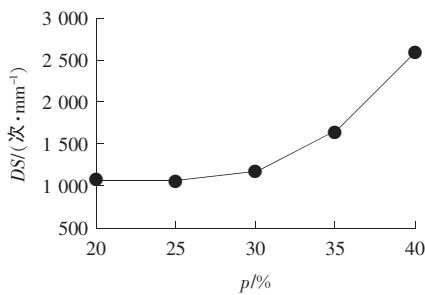


图 2  $DS-p$  关系曲线

Fig. 2 Correlation curve of  $DS-p$

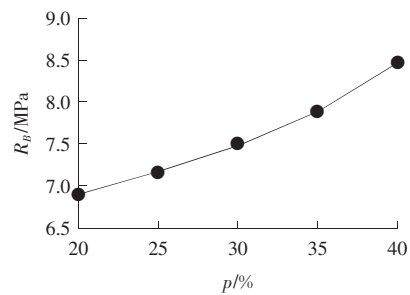


图 3  $R_B-p$  关系曲线

Fig. 3 Correlation curve of  $R_B-p$

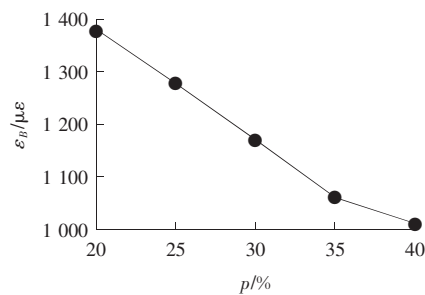


图 4  $\epsilon_B-p$  关系曲线

Fig. 4 Correlation curve of  $\epsilon_B-p$

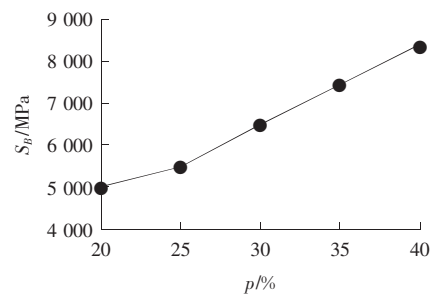


图 5  $S_B-p$  关系曲线

Fig. 5 Correlation curve of  $S_B-p$

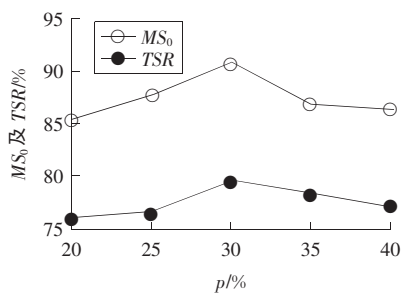


图 6  $MS_0$  及  $TSR-p$  关系曲线

Fig. 6 Correlation curves of  $MS_0$  and  $TSR-p$

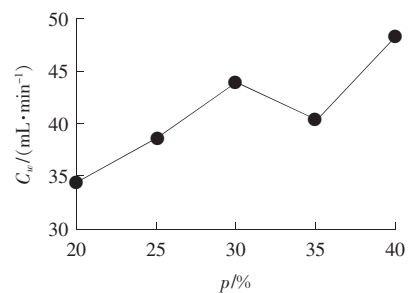


图 7  $C_w-p$  关系曲线

Fig. 7 Correlation curve of  $C_w-p$

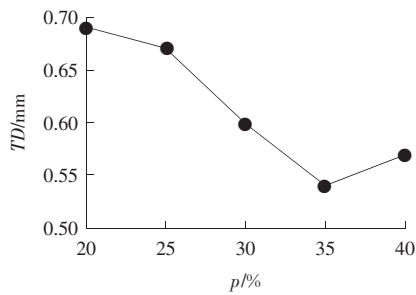


图8 TD-p关系曲线

Fig. 8 Correlation curve of TD-p

表8 热再生沥青混合料路用性能与RAP掺量之间的相关关系

Table 8 Correlation between pavement performances and RAP contents for hot recycled asphalt mixtures

路用性能	相关关系	相关系数
动稳定度 $DS$	$DS = 374.7e^{0.0449p}$	0.921
弯拉强度 $R_B$	$R_B = 0.0766p + 5.298$	0.988
弯拉应变 $\epsilon_B$	$\epsilon_B = -19.1p + 1753.4$	0.993
劲度模量 $S_B$	$S_B = 173.0p + 1359.4$	0.993
渗水系数 $C_w$	$C_w = 0.586p + 23.64$	0.886
构造深度 $TD$	$TD = -0.0074p + 0.836$	0.910

从表7,8和图2~8可以得到:

1)  $DS$ 均满足不小于1000次/mm的技术要求,说明热再生沥青混合料的高温稳定性良好。同时,随着RAP掺量的增加, $DS$ 逐渐增大,且增加趋势呈指数函数关系,说明RAP含量越高, $DS$ 增加越明显。这主要是因为RAP中旧沥青老化后,软化点升高,粘度增大,劲度提高,从而增强了热再生沥青混合料的抗车辙能力。因此,RAP的掺入有利于提高沥青混合料的高温稳定性。

2) 随着RAP掺量的增加, $R_B$ 和 $S_B$ 基本呈线性增加,而 $\epsilon_B$ 呈线性减小,表明RAP的掺入降低了热再生沥青混合料的低温抗裂性。这主要是因为沥青老化后塑性大大降低,变硬发脆,致使热再生沥青混合料抵抗低温变形的能力减弱。

3)  $MS_0$ 和 $TSR$ 分别满足不小于80%和75%的技术要求,表明热再生沥青混合料具有良好的水稳定性。同时, $MS_0$ 和 $TSR$ 随着RAP掺量的增加均呈现单峰抛物线关系,且在RAP掺量为30%时达到峰值。与未掺RAP相比,热再生沥青混合

料的 $MS_0$ 均超过新沥青混合料。这主要是因为随着RAP掺量的增加,需要更多的新料油石比调和,使得热再生沥青混合料中总的沥青含量增加,从而增加了沥青膜厚,致使水更难侵入沥青-集料界面而减弱其剥离作用。 $TSR$ 主要取决于混合料的级配和空隙率,由于各热再生沥青混合料目标级配接近,所以 $TSR$ 相差不大,变化幅度小于5%。然而,过多的RAP会因老化沥青含量偏高而降低沥青与集料之间的粘附性,所以 $MS_0$ 和 $TSR$ 在RAP掺量超过30%后出现降低的现象。因此,适宜的RAP掺量有利于提高热再生沥青混合料的水稳定性。

4) 热再生沥青混合料的 $C_w$ 均小于120 mL/min,表明其具有良好的抗渗性。随着RAP掺量的增加, $C_w$ 基本呈线性增加。这主要是因RAP级配变异性较大,过多的RAP会影响其级配的稳定性而造成抗渗性减弱。

5)  $TD$ 均大于0.5 mm,满足技术要求,表明热再生沥青混合料具有良好的抗滑性。随着RAP掺量的增加, $TD$ 基本呈线性减小。这主要是因为RAP增多后,总的沥青含量增加,热再生沥青混合料中填充的沥青胶浆增多,从而造成表面构造深度的减小。

总体上,随着RAP掺量的增加,热再生混合料的高温稳定性增强,低温抗裂性、抗渗性和抗滑性减弱,水稳定性在RAP掺量为30%时达到最大。当RAP掺量在20%~40%之间时,热再生沥青混合料的路用性能均达到《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40-2004)的技术要求;当RAP掺量在20%~30%范围内时,热再生沥青混合料的各项性能变化幅度相对较小,而在30%~40%之间时,各项性能变化较大。为此,综合考虑调和沥青及热再生沥青混合料的路用性能和经济性,确定RAP的适宜掺量为30%。

根据上述确定的RAP掺量进行热再生沥青混合料AC-20C的生产配合比设计,并于2011年8~9月间在浙江省102省道杭昱线(临安段)K48+700~K49+200段铺筑了500m的试验路。试验路方案为将旧路面9cm沥青面层铣刨5cm后,加铺6cm厂拌热再生AC-20C下面层和4cmAC-13C上面层。试验路经2个周期的高、

低温季节和雨季的考验,现有路表弯沉代表值为 34.9(0.01 mm),小于设计弯沉值 37(0.01 mm),路面使用性能指数 PQI 为 97.6,表明试验路总体使用性能优良,达到了预期的效果。

#### 4 结论

依托浙江省 102 省道杭昱线(临安段)旧沥青路面厂拌热再生利用试验路,通过大量室内试验,进行了不同 RAP 掺量的热再生沥青混合料 AC-20C 的目标配合比设计,并分析了 RAP 掺量对热再生沥青混合料路用性能的影响,得到以下结论:

1) 在行车荷载和环境因素的反复作用下,旧沥青路面出现较为严重的老化,RAP 集料因压碎及铣刨而产生细化。通过在抽提回收的旧沥青中掺加 5% 的再生剂和 70% 的新沥青,再生后的调和沥青可以达到 A-70# 目标沥青的性能要求。

2) 通过选定合理的目标级配,采用马歇尔试验对不同 RAP 掺量的热再生沥青混合料进行了目标配合比设计。结果显示,随着 RAP 掺量的增加,总最佳油石比和新料最佳油石比线性增加,而新沥青的总用量线性减少,表明 RAP 中旧沥青得到有效的再生利用。但 RAP 掺量越多,需要更多的新料油石比来恢复热再生沥青混合料的性能。

3) 在最佳油石比下,通过室内各项路用性能试验,进行了 RAP 掺量对热再生沥青混合料性能的影响分析。结果显示,RAP 掺量在 20%~40% 之间时,热再生沥青混合料的各项路用性能均满足规范的技术要求。同时,随着 RAP 掺量的增加,热再生沥青混合料的动稳定度呈指数增加;弯拉强度、劲度模量和渗水系数呈线性增加,而弯拉应变和构造深度呈线性减小;浸水马歇尔稳定性和冻融劈裂强度比呈单峰曲线关系。这表明随着 RAP 掺量的增加,热再生混合料的高温稳定性增强,低温抗裂性、抗渗性和抗滑性减弱,水稳定性在 RAP 掺量为 30% 时达到最大。

综合考虑路用性能和经济性,确定适宜的 RAP 掺量为 30%,并据此铺筑了试验路。经过二年多的运营考验,至今性能优良。因此,厂拌热再生技术可以在未来路面养护维修工程中大力推广。

#### 〔参考文献〕

- [1] 杨平,聂忆华,查旭东. 旧沥青路面材料再生利用调查和评价[J]. 中外公路,2005,25(1):98-101.  
YANG Ping, NIE Yi-hua, ZHA Xu-dong. Investigation and evaluation for regeneration utilization of reclaimed asphalt pavement material[J]. Journal of China and Foreign Highway,2005,25(1):98-101.
- [2] 颜彬,徐世法,高金岐,等. 沥青再生技术的现状与发展[J]. 北京建筑工程学院学报,2005,21(1):72-75.  
YAN Bin, XU Shi-fa, GAO Jin-qi, et al. An overview and development analysis of asphalt recycling technology[J]. Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture,2005,21(1):72-75.
- [3] 黄煜镔,吕伟民,周小平. 沥青路面再生技术的原理与应用[J]. 重庆建筑大学学报,2004,26(6):129-133.  
HUANG Yu-bin, LV Wei-ming, ZHOU Xiao-ping. Principle and application of the asphalt pavement recycling technology[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University,2004,26(6):129-133.
- [4] 韦琴,杨长辉,熊出华,等. 旧沥青路面再生利用技术概述[J]. 重庆建筑大学学报,2007,29(3):128-131.  
WEI Qin, YANG Chang-hui, XIONG Chu-hua, et al. Recycling technology of aged asphalt pavement[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2007, 29(3):128-131.
- [5] Paul H R. Evaluation of recycled projects for performance[M]. Baton Rouge: Louisiana Transportation Research Center,1998.
- [6] Kim S. Evaluation of use of high percentage of reclaimed asphalt pavement (RAP) for superpave mixtures; research report[R]. USA: Florida State Materials Office,2007.
- [7] NAPA. Recycling practices for HMA[R]. USA: National Asphalt Pavement Association,2000.
- [8] JTG F41-2008. 公路沥青路面再生技术规范[S]. 北京:人民交通出版社,2008.  
JTG F41-2008, Technical specifications for highway asphalt pavement recycling[S]. Beijing: China Communications Press,2008.
- [9] 李秀君,张永平,拾方治. 泡沫沥青冷再生基层路面结构力学性能分析[J]. 同济大学学报:自然科学版,2009,37(1):47-51.  
LI Xiu-jun, ZHANG Yong-ping, SHI Fang-zhi. Anal-

- ysis of mechanical performance of cold recycled pavement with foamed asphalt[J]. Journal of Tongji University; Natural Science, 2009, 37(1): 47-51.
- [10] 刘先森, 朱战良, 王欣, 等. 厂拌热再生沥青技术在广佛高速公路路面大修工程的应用[J]. 公路, 2004(11): 131-136.  
LIU Xian-miao, ZHU Zhan-liang, WANG Xin, et al. Application of hot mix plant recycling technology of asphalt in pavement repair engineering of Guangfo Expressway[J]. Highway, 2004(11): 131-136.
- [11] 熊出华, 凌天清, 张永兴, 等. 厂拌热再生技术在成渝高速公路维修工程中的应用[J]. 中外公路, 2008, 28(2): 193-197.  
XIONG Chu-hua, LING Tian-qing, ZHANG Yong-xing, et al. Application of hot mix plant recycling technology in maintenance engineering of Cheng-yu Expressway[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2008, 28(2): 193-197.
- [12] 车法, 蒋双全, 李洪印. 现场热再生沥青混合料性能试验研究及评价[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(14): 65-69.  
CHE Fa, JIANG Shuang-quan, LI Hong-yin. Research on performance test and appraisal of hot in-place recycling of asphalt mixture [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(14): 65-69.
- [13] 薛彦卿, 黄晓明. 厂拌热再生沥青混合料力学性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(4): 507-511.  
XUE Yan-qing, HUANG Xiao-ming. Experimental research on mechanical property of asphalt mixture from central plant hot recycling [J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(4): 507-511.
- [14] 朱梦良, 孟华君. 回收料掺量对沥青混合料马歇尔物理力学指标的影响[J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2012, 9(1): 12-16.  
ZHU Meng-liang, MENG Hua-jun. The content of the recycled asphalt mixture effect on the Marshall volume parameters[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology; Natural Science, 2012, 9(1): 12-16.
- [15] 乔志勇, 庄江涛. 回收沥青混合料掺量对再生沥青混合料性能的影响[J]. 石油沥青, 2013, 27(6): 19-24.  
QIAO Zhi-yong, ZHUANG Jiang-tao. Effect of content on recycled asphalt mixtures properties[J]. Petroleum Asphalt, 2013, 27(6): 19-24.
- [16] 查旭东, 曾军, 蔡诚秀. 新沥青对再生沥青性能影响分析[J]. 交通科学与工程, 2013, 29(1): 7-11.  
ZHA Xu-dong, ZENG Jun, CAI Cheng-xiu. Analysis of influence of new asphalt on performances of regenerated asphalt [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2013, 29(1): 7-11.
- [17] 查旭东, 杨胜丰, 侯英, 等. 再生剂选择及其对旧沥青性能影响分析[J]. 公路与汽运, 2013(3): 147-150.  
ZHA Xu-dong, YANG Sheng-feng, HOU Ying, et al. Regenerant selection and its influence analysis on performances of old asphalt [J]. Highways and Automotive Applications, 2013(3): 147-150.
- [18] 宋微. 浙江省 02 省道沥青路面厂拌热再生技术应用研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2012.  
SONG Wei. Application research on technology of central plant hot recycling of asphalt pavement of provincial road 02 in Zhejiang province [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2012.