文章编号：1674-9057(2020)03-0542-04　　doi:10.3969/j.issn.1674-9057.2020.03.012

RAP 掺量对沥青混凝土路用性能影响试验

宁 世 凯

(中国铁建大桥工程局集团有限公司银吴项目经理部，银川　750101)

摘　要：针对宁夏地区废旧沥青混凝土再生利用效率低的问题，以AC-10沥青混凝土为对象，试验研究了掺量为30%、35%、40%、45%、50%、55%、60%和65%的RAP对沥青混凝土路用性能影响的规律。对40%RAP掺量的沥青混凝土掺入1%、3%、5%和7%的再生剂，研究其对恢复废旧沥青混凝土性能的变化规律。通过马歇尔试验和车辙试验研究了沥青混凝土的力学性能和高温稳定性。试验结果表明：随着RAP掺量的增加，沥青混凝土动稳定度呈先增加后减小的趋势，当沥青混凝土中掺入40%RAP时，其动稳定度的值达到峰值1 984次/mm；当沥青混凝土中掺入40%RAP和1%的再生剂时，其最大稳定度达到峰值16.71 kN，相对于再生剂掺量为零的沥青混凝土增幅为35.2%，再生剂掺量为3%时，其动稳定度达到峰值2 643次/mm，沥青混凝土的抗车辙能力最大。

关键词：再生沥青混合料(RAP)；再生利用；路用性能；动稳定度

中图分类号：U416.217；U416.26　　**文献标志码**：A

宁夏地区地处中国西北部，其北部日照充足，紫外线强烈，昼夜温差大，历史最低温度-30.6 ℃，这些特殊的气候特点及现有汽车数量的显著增加，加剧了沥青路面的破坏。旧沥青路面的维修产生了大量的废旧沥青混凝土，但在宁夏地区废旧沥青混凝土利用率相对较低。国内再生沥青混合料(RAP)的利用研究:在路面基层方面,薛勇刚等[1]研究了旧沥青混凝土水泥稳定基层的路用性能，文献[2-4]研究了掺废旧沥青混凝土的水泥稳定碎石的力学性能及可行性，王海朋[5]研究了掺细废旧料水泥稳定碎石抗裂性；在热拌沥青混凝土中，文献[6-9]研究了RAP掺量对热拌沥青混凝土的利用性能，文献[10-13]开展了RAP在温拌沥青混凝土中试验，张勤玲等[14]研究了再生橡胶颗粒沥青混凝土的抗拉性能。国内外对于RAP料掺量低于30%的热拌再生沥青混凝土技术已经较为成熟，且研究及应用效果表明,其具有不低于新拌沥青混凝土的性能,甚至在某些方面性能更好。

国内对于高比例RAP(掺量超过30%)再生沥青混凝土试验研究较少，结合宁夏地区气候特点，开展高掺量RAP的再生沥青混凝土试验研究，以期为宁夏地区RAP的利用提供依据和借鉴。

1　试验材料

1.1　沥青技术要求

试验选用标号为90号的石油沥青。依据《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF 40—2004)要求，对沥青相关技术指标进行测定，检测结果见表1，各项指标均符合规范要求。

1.2　矿料级配

试验采用AC-10级配矿料，合成级配的结果见表2。

1.3　废旧沥青混凝土技术指标

废旧沥青在经过老化之后其相关性能产生变化，在掺入到混合料中时，需要对旧料中的矿料和集料性能进行评估，试验结果见表3和表4。

收稿日期：2019-06-21
基金项目：中国铁建股份有限公司科技开发项目(16-C09)；中国铁建股份有限公司重大科技专项项目(18-A03)
作者简介：宁世凯（1987—），男，硕士，高级工程师，研究方向：道路材料与桥梁施工技术，zhtdqjt@126.com。
引文格式：宁世凯．RAP掺量对沥青混凝土路用性能影响试验［J］．桂林理工大学学报，2020，40（3）：542-545.

表 1　沥青技术指标

Table 1　Technical index of esphalt

检测项目	试验结果
延度/cm	10 ℃　36 15 ℃　102
软化点/℃	44
针入度(25 ℃,5 s,100 g)/0.1 mm	89
60 ℃动力粘度/(Pa·s)	153
PI	0.87

表 2　AC-10 矿料级配

Table 2　Mineral aggregate gradation of AC-10

筛孔孔径/mm	0.075	0.15	0.3	0.6	1.18	2.36	4.75	9.5
通过筛孔的质量分数/%	5	12	17	23	33	48	59	93

表 3　废旧沥青混凝土中集料性能

Table 3　Aggregate performance of waste asphalt concrete

测试项目	技术要求	测试结果
表观相对密度/($t\cdot m^{-3}$)	≥2.50	2.63
含泥量(<0.75 mm)/%	≤3	2.8
砂当量/%	≥60	86

表 4　废旧沥青混凝土中矿粉性能

Table 4　Performance of mineral powder in waste asphalt concrete

测试项目	技术要求		测试结果
表观密度/($t\cdot m^{-3}$)	≥2.50		2.66
亲水系数	<1		0.53
粒度范围及质量分数/%	<0.6 mm	100	100
	<0.15 mm	90 ~100	93.7
	<0.075 mm	75 ~100	81.4

2　最佳沥青用量试验

2.1　试验配合比设计

据现有试验研究和设计资料可知，AC-10 型沥青混凝土的最佳沥青用量在 4.8%~7.5%，设计了 5.0%、5.5%、6.0%、6.5%、7.0%共 5 种不同沥青用量的沥青混凝土试验配比。研究了掺 RAP 的沥青混凝土的路用性能。

2.2　确定最佳沥青用量 OAC

依据现行规范《公路沥青路面施工技术规范》，试件拌合温度为 163 ℃，击实温度为 138 ℃，成型时双面各击实 75 次。将成型后的试件静置 24 h 后脱模。马歇尔试验前需对试件进行 30 min 恒温水浴。采用表干法测定试件的质量、表干质量和毛体积密度；采用真空法试验检测沥青混凝土的最大理论密度，计算试件的空隙率、矿料骨架间隙率和有效沥青饱和度指标；通过马歇尔试验测定试件的稳定度及流值。试件的体积参数和力学指标测定结果见表 5。

表 5　不同沥青用量的试件体积参数和力学指标

Table 5　Volume parameters and mechanical indexe of specimens with different asphalt contents

编号	沥青掺量/%	毛体积相对密度/($g\cdot cm^{-3}$)	空隙率/%	有效沥青饱和度/%	稳定度/kN	流值/mm	矿料间隙率/%
A1	5.00	2.260	7.10	56.40	5.05	0.98	14.30
A2	5.50	2.320	6.30	61.40	7.16	1.27	14.42
A3	6.00	2.490	5.80	69.40	10.45	2.28	14.57
A4	6.50	2.420	4.90	68.50	10.15	2.38	14.62
A5	7.00	2.360	4.70	63.50	6.59	2.42	14.92

依据马歇尔试验测定试件不同沥青用量的最大稳定度和流值可知：当沥青用量在 5.00% ~ 6.00%时，随着沥青用量的增加，沥青混凝土的稳定度由 5.05 kN 增大到 10.45 kN。当沥青用量由 6.00%增长到 7.00%时，其稳定度由 10.45 kN 减小到 6.59 kN；随着沥青用量的不断增大，沥青混凝土的流值也不断增大。沥青用量由 5.00%增加到 7.00%时，其流值由 0.98 mm 增大到 2.42 mm。根据测定结果绘制沥青用量与试件各技术指标的关系曲线，如图 1 所示。

空隙率要求范围的中值 a_1 = 5.44%，密度最大值所对应的沥青用量 a_2 = 6.24%，稳定度最大值对应的沥青用量 a_3 = 6.14%，对应于沥青饱和度中值的沥青用量 a_4 = 5.74%，计算其算数平均值得 OAC_1 = 5.89%。确定各项指标符合沥青混凝土的技术标准要求，计算得 OAC_2=6.08%。当沥青用量为 5.89%时，试件的矿料间隙率为 14.54%，满足≥13.00%的技术要求。考虑到宁夏属于季冻区，为最大发挥沥青混凝土的路用性能，综合确定最佳沥青用量 OAC=6.00%。

3　废旧沥青混凝土的最佳掺量试验

依据经验，初步拟定废旧沥青混凝土的 RAP 掺量范围在 30%~65%，设计了 8 种不同掺量进行试验，其设计配比见表 6。

按照废旧沥青混凝土掺量配比设计方案进行车辙试验，测定在不同 RAP 掺量情况下沥青混凝土的抗车辙性能，通过计算确定其动稳定度，结果见表 7。

车辙试验表明：随着 RAP 掺量的增加，混合料的动稳定度呈先增大后减小的趋势，当掺量为 40%时，其 45 和 60 min 时刻的变形量差值最小，动稳定度的值达到峰值 1 984 次/mm。掺量低于 40%时，其动稳定度随着掺量增加由 994 次/mm 增

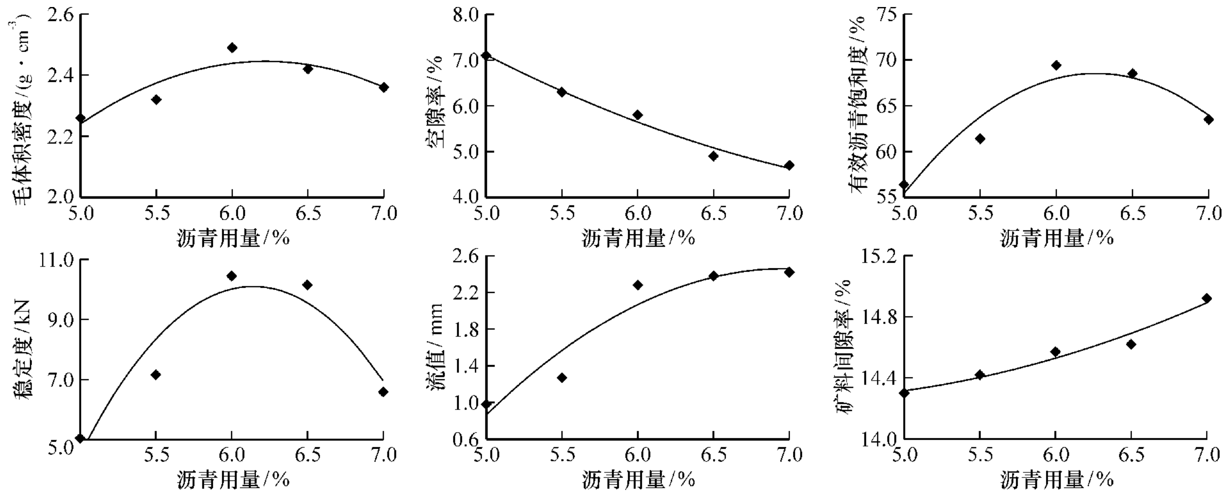

图 1 沥青用量与试件各技术指标关系

Fig. 1 Relationship between asphalt content and various technical indicators of specimes

表 6 废旧沥青混凝土掺量配比设计

Table 6 Design of mix ratio of waste asphalt concrete w_B/%

RAP 掺量	沥青混凝土含量	
	沥青	骨料
30	5.00	65.00
35	4.50	60.50
40	4.00	56.00
45	3.80	51.20
50	3.50	46.50
55	3.20	41.80
60	2.80	37.20
65	2.50	32.50

表 7 不同 RAP 掺量下的废旧沥青混凝土动稳定度

Table 7 Dynamic stability of waste asphalt concrete in different RAP dosages

RAR 掺量/%	动稳定度(60 ℃1 h)/(次·mm^{-1})	变形量/mm	
		45 min	60 min
30	994	4.562	5.196
35	1 562	3.184	3.587
40	1 984	2.623	2.941
45	1 623	2.923	3.311
50	1 295	3.635	4.121
55	1 088	5.723	6.302
60	1 077	5.968	6.553
65	1 009	5.368	5.992

长到 1 984 次/mm，其增长率为 99.6%；掺量在 40%~65%时，其动稳定度随掺量增加由 1 984 次/mm 下降为 1 009 次/mm，高温稳定性减弱幅度为 49.1%。通过比较不同掺量情况下高温抗车辙试验性能，确定最佳的废旧沥青混凝土的掺量约为 40%。

4 再生剂的最佳掺量的试验

加入一定量的再生剂恢复废旧沥青混凝土的相关性能，研究了 1%、3%、5%、7%掺量再生剂对 40%RAP 废旧沥青混凝土的影响规律，试验结果见表 8 和表 9。

表 8 不同再生剂掺量的废旧沥青混凝土最大稳定度

Table 8 Maximum stability of waste asphalt concrete in different regenerant dosages

再生剂掺量/%	最大稳定度/kN	流值/0.1mm
0	12.36	1.26
1	16.71	3.15
3	13.94	3.98
5	10.53	4.67
7	8.65	5.04

表 9 不同再生剂掺量下的废旧沥青混凝土动稳定度

Table 9 Dynamic stability of waste asphalt concrete in different regenerant dosages

再生剂掺量/%	动稳定度(60 ℃1 h)/(次·mm^{-1})	变形量/mm	
		45 min	60 min
0	1 984	2.623	2.941
1	1 867	2.461	2.797
3	2 643	3.152	3.390
5	2 386	3.625	3.889
7	2 451	2.874	3.131

再生剂掺量为 1%时其最大稳定度值达到峰值，为 16.71 kN，比未掺再生剂的沥青混凝土的最大动稳定度高了 35.2%；随着再生剂掺量增加，其最大稳定度逐步减小，混合料稳定性显著下降；对于流值和再生剂掺量的关系而言，其流值的大小是随着再生剂掺量的增加而增大。通过车辙试验测定其不同掺量下沥青混凝土的抵抗车辙能力，试验表明，随着再生剂掺量逐渐增加，动稳定度呈现先增强后减弱的趋势，当再生剂掺量为 3%

时，其动稳定度达到峰值 2 643 次/mm。

5 结　论

通过试验研究了废旧沥青混凝土和再生剂掺量对沥青混凝土的性能影响，分别掺入不同用量的废旧沥青和不同掺量的再生剂改良沥青混凝土，用马歇尔试验和车辙试验测定混合料的最大稳定度和动稳定度，研究其不同掺量配比下混合料的性能变化规律，得出以下结论：

（1）通过马歇尔试验测定混合料的稳定性，同时分析毛体积相对密度、沥青混凝土的最大理论密度、空隙率、矿料骨架间隙率、有效沥青饱和度指标数据，综合考虑宁夏地区道路材料的路用性能，确定最佳的沥青含量为 6.00%。

（2）RAP 掺量最佳为 40%，其动稳定度的值达到峰值 1 984 次/mm，45 和 60 min 时刻的变形差量最小。

（3）在最佳 RAP 掺量确定的基础上，掺入再生剂恢复废旧沥青的软化点、延度等相关路用性能指标，增强其稳定性能和抗车辙能力。试验结果表明，1%再生剂掺量的沥青混凝土对混合料的马歇尔稳定度的提升作用最佳，其增长率为 35.2%；3%掺量再生剂的混合料的抵抗车辙能力效果最佳，其增幅为 33.2%。

参考文献：

[1] 薛勇刚，宋云祥，韩志斌．大掺量废旧沥青混合料水泥稳定基层路用性能研究[J]．中外公路，2014，34(5)：298-301.

[2] 李宏波，杨明成，刘占江．废旧沥青砼稳定碎石力学性能参数敏感性分析［J］．广西大学学报（自然科学版），2014，39（1）：112-118.

[3] 李宏波，刘占江，邹媛媛，等．大掺量废旧沥青混凝土水泥稳定碎石的试验研究［J］．铁道建筑，2012（10）：147-149.

[4] 张晓天，刘占江，杨明成．废旧沥青砼纤维水泥稳定碎石的力学性能试验［J］．桂林理工大学学报，2014，34（1）：58-62.

[5] 王海朋．掺细废旧料水泥稳定碎石抗裂性研究［D］．西安：长安大学，2011.

[6] 李泉，吴超凡，韩庆奎．厂拌热再生技术在潭邵高速公路大修中的应用［J］．中外公路，2018，38（5）：217-221.

[7] 贾军．硅藻土与纤维复合添加剂对高比例 RAP 掺量热再生混合料耐久性能的增强作用［J］．公路，2018，63（1）：183-190.

[8] 王小明．温拌大比例 RAP 厂拌热再生沥青混合料应用研究［D］．重庆：重庆交通大学，2016.

[9] 钟成雨．废旧道路沥青热拌再生剂的开发研究［D］．青岛：中国石油大学（华东），2014.

[10] 徐世法，郭虹良，何志敏，等．温拌改性再生剂对 AC-13 废旧普通沥青混合料的性能影响评价［J］．新型建筑材料，2018，45（6）：33-36.

[11] 陈少军．温拌再生沥青混合料路用性能研究［J］．西部交通科技，2017（3）：20-23.

[12] 刘军，柴林林，周和庆，等．废旧 SBS 改性沥青混合料 AC-13C 温拌再生性能评价［J］．中外公路，2016，36（4）：319-322.

[13] 韩永强．温拌再生沥青混合料的试验研究与应用效益分析［D］．哈尔滨：东北林业大学，2015.

[14] 张勤玲，杨保存，王成．硫酸盐腐蚀再生橡胶颗粒沥青混合料冻融劈裂试验［J］．桂林理工大学学报，2016，36（2）：289-293.

Influence of RAP content on pavement performance of asphalt concrete

NING Shi-kai

(Yinchuan-Wuzhong Construction Project Management Team, China Railway Major Bridge Engineering Group, Yinchuan 750101, China)

Abstract: To improve the recycling efficiency of waste asphalt concrete in Ningxia, from AC－10 asphalt concrete, the influence of RAP content of 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55%, 60% and 65% on the pavement performance of asphalt concrete was studied. The performance of asphalt concrete with 40% RAP was studied by adding 1%, 3%, 5% and 7% recycling agent. The mechanical properties and high temperature stability of asphalt concrete were studied by Marshall test and rutting test. Experimental results show that with the increase of RAP content, the dynamic stability of asphalt concrete increases first and then decreases. When 40% RAP is added into asphalt concrete, the dynamic stability of asphalt concrete reaches peak value of 1 984 times $\cdot$ mm^{-1}. When 40% RAP and 1% recycling agent are added into asphalt concrete, the maximum stability of asphalt concrete reaches peak value of 16.71 kN, similar to the asphalt concrete with zero recycling agent content. The dynamic stability reaches a peak value of 2 643 times $\cdot$ mm^{-1} when the increase is 35.2% and the dosage of regenerant is 3%. Secondly, the rutting resistance of asphalt concrete is the greatest.

Key words: RAP (recycled asphalt pavement); recycling; road performance; dynamic stability