

# 沥青道路冷再生系统中水泥基胶结效应

马保国,王海峰,李相国

(武汉理工大学 硅酸盐材料工程教育部重点实验室,武汉 430070)

**摘要:**设定不同配比的再生沥青混合料(RAP)和不同水泥掺量,通过标准击实、无侧限抗压强度、水稳定性、模量性能以及 SEM 测试,研究了水泥在 RAP 中的胶结效应。结果表明:RAP 中沥青含量与稳定土的质量比(A/S)为 0.4 时,随着水泥掺量的增大,RAP 的最大干密度从 1.91 g/cm<sup>3</sup> 增加到 2.00 g/cm<sup>3</sup>。水泥掺量一定时,随着废旧沥青含量的增加,RAP 的最大干密度随随之增大;掺 6%水泥的 RAP 无侧限抗压强度从 1.48 MPa 增加到 2.63 MPa,随之减小到 2.28 MPa。使用的材料体系中,A/S=0.4,掺 6%水泥,用水量 9.5%时,再生料获得最好性能。试件浸水后抗压强度普遍降低,但与干燥试件无侧限抗压强度变化趋势一致。对 RAP 的模量试验表明高温状态下 RAP 混合料的路用性能最差。SEM 测试表明:水泥的水化使得混合料中有针状钙矾石和纤维状 C-S-H 凝胶相互交织搭接,形成网络结构,将集料颗粒包裹起来,这是 RAP 产生强度的主要因素。

**关键词:**冷再生;废旧沥青;水泥;胶结效应;再生沥青路面材料(RAP)

**中图分类号:**TU528.044 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2010)04-0044-05

## Cementation Effect with Cement during Cold In-Place Recycling System of Asphalt Pavement

MA Bao-guo, WANG Hai-feng, LI Xiang-guo

(Key Laboratory for Silicate Materials Science and Engineering of Ministry of Education;  
Wuhan University of Technology; Wuhan 430070, P. R. China)

**Abstract:** Different kinds of structures of RAP and different contents of cement were prepared. By means of standard compaction test, unconfined compressive strength, water stability, modulus and SEM test, the cementation effect with cement was studied. It was shown that the maximum dry density of RAP mixture rose from 1.91g/cm<sup>3</sup> to 2.00g/cm<sup>3</sup> with the increase of cement content when A/S was 0.4. The maximum dry density of RAP mixture would rise when adding more asphalt. The unconfined compressive strength rose from 1.48MPa to 2.63 MPa and then down to 2.28MPa when cement content was 6%. The best property could be got when A/S was 0.4 and the cement content was 6% with 9.5% water. The compressive strength of RAP mixture declined after it was cured in water for 24 h, but it had the same tendency with those of which had not been maintained in water. And it is also found that RAP does not obtain better stabilities in high temperature with modular test. From SEM test, it is shown that ettringite and C-S-H interlace and form the netted structure, and the aggregate would be enwrapped to increase the strength.

**Key words:** cold recycling; old asphalt; cement; cementation effect; reclaimed asphalt pavement (RAP)

收稿日期:2009-12-16

基金项目:国家 863 计划项目(2009AA11Z106)

作者简介:马保国(1957-),男,教授,博士生导师,主要从事建筑材料研究,(E-mail)mbgjob@163.com。

中国 20 世纪 80 年代末和 90 年代初修建的沥青路面已经进入了养护维修期,有些路面破损相当严重。近期修建的沥青路面随着路龄的增长,也进入了老化期,在中国,每年约有 12% 的路面要大修,估计每年路面沥青废弃量 220 万 t。因此,沥青道路的规模化快速修复成为中国面临的问题<sup>[1-2]</sup>。冷再生技术在欧、美、日等国家已经发展到规范化标准化的程度,早在 1920 年,沥青路面冷再生就在美国有一些形式的应用,但中国从 20 世纪 80 年代才开始研究沥青路面冷再生技术,进入 21 世纪后,中国开始了新一轮的研究,并引进国外机械设备<sup>[3-4]</sup>。以往,对破旧的沥青路面更新时都要将废旧沥青混合料丢掉,影响环境,而废旧的沥青混合料除了其中部分沥青材料发生部分老化以外,砂、石等集料从性能上并未失效。沥青混凝土路面冷再生技术可以完全利用旧路面材料,不但节约资源、保护环境,而且减少能耗、延长施工季节、改善工作条件。与其它传统的施工方法相比,冷再生一般可以节省总投资 40%~50%<sup>[5-6]</sup>。因此,路面冷再生工艺不断受到人们的重视。

影响废 RAP 冷再生效果的因素很多,不同刨铣深度、不同类型稳定土以及不同稳定剂的用法与用量等等都使得沥青路面冷再生的效果相差很大,目

前中国还没有统一的规范,冷再生的操作都需要先进行大量的试验来确定实际工程的施工设计,成为冷再生高效实施的一个瓶颈。因此,系统化的研究水泥基在 RAP 中的胶结效应显得尤为重要。该文以沥青路面冷再生技术为基础,模拟现场冷再生过程中废旧沥青混合料的不同条件,通过研究不同条件下稳定剂对 RAP 混合料中的性能影响,分析水泥基在 RAP 中的作用机理。

## 1 试验

### 1.1 原材料

土料为露天红粘土,通过筛分,确定稳定土的粒径级别为细粒土,见图 1。沥青料取自废旧沥青路面,符合《公路沥青路面施工技术规范》(JTJ 032-94)定义的 AK-13 型,其中沥青含量约 4.2%。所用的 PO425 水泥化学组成见表 1。

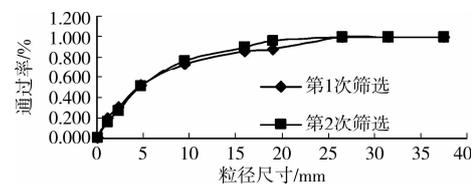


图 1 废旧沥青混合料粒径分布

表 1 水泥的化学组成

组分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sup>+</sup>
含量/%	21.73	4.25	2.67	63.59	2.21	2.39	0.55

### 1.2 实验方法

沥青料和稳定土的组成按照质量比 A/S=0.2; A/S=0.4; A/S=0.6; 混合料中水泥剂量均为 2%、4% 和 6% (水泥型号 P0.425); 不同水泥掺量的混合料加水量均为 6%、8%、10%、12%、15%, 试件尺寸为内径 100 mm, 高 127 mm 的圆柱形试件, 对 RAP 混合料击实以确定最佳含水率并进行无侧限抗压强度和间接抗拉强度测试。考虑到抗压强度与水稳定性具有较好的线性关系, 故将无侧限抗压强度实验的试件基本养护之后泡水 24 h, 进行抗压强度试验, 用试件浸水后的抗压强度值间接评价水泥基再生沥青混合料的水稳定性。试件宏观性能的好坏主要取决于微观结构的特性, 通过 SEM 测试, 从水泥的水化产物角度分析水泥对 RAP 性能影响的机理。

## 2 结果与分析

### 2.1 最佳含水量与最大干密度

对 RAP 混合料的击实试验中, A/S=0.4 时, 最

大干密度随水泥掺量的增大而增大, 而最佳含水量无明显改变; 随着 A/S 比值的增加, RAP 混合料的最佳含水量从 10% 降低到 6.5%, 最大干密度从 1.93 g/cm<sup>3</sup> 增加到 2.1 g/cm<sup>3</sup>。击实结果见表 2 所示。

表 2 RAP 混合料击实试验

A/S	水泥含量/%	最佳含水量/%	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
0.2	2	9.0	1.93
	4	10.0	1.85
	6	9.0	1.96
0.4	2	8.0	1.91
	4	6.0	1.97
	6	9.5	2.00
0.6	2	6.0	2.00
	4	7.2	2.10
	6	6.5	2.01

### 2.2 水泥对 RAP 混合料强度的影响

图 2 是不同水泥含量对 RAP 混合料抗压强度测试结果,从图上可以看出,混合料中 A/S 比值一定时,掺入水泥能够明显提高 RAP 混合料的强度。

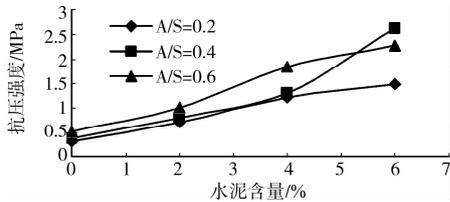


图 2 A/S 比值一定时,水泥含量与混合料抗压强度的关系

有研究认为<sup>[6]</sup>适当配比的 RAP 混合料的初期内部相连的微孔形成均匀、密实、孔隙闭合的整体,提高了混合料的总体强度。

如图 3 和表 3 所示:水泥的掺量均为 2% 和 4% 时,随着混合料中 A/S 比值的增大,无侧限抗压强度呈现增加的趋势;当水泥掺量均为 6% 时,随着混合料中废旧沥青含量的增加,混合料的无侧限抗压强度先从 1.48 MPa 增加到 2.63 MPa,随之减小到 2.28 MPa。

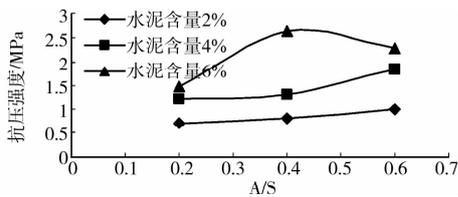


图 3 水泥含量一定时,废沥青含量与混合料抗压强度的关系

表 3 RAP 混合料水稳定性试验结果

A/S	水泥含量/%	抗压强度/MPa	浸水 24 h 后的抗压强度/MPa
0.2	2	0.70	0.66
	4	1.22	0.75
	6	1.48	1.18
0.4	2	0.80	0.76
	4	1.31	0.63
	6	2.63	2.02
0.6	2	1.00	0.85
	4	1.85	1.82
	6	2.28	1.92

### 2.3 RAP 混合料水稳定性研究

试件浸水后的无侧限抗压强度普遍比未浸水试件的强度低,但与未浸水试件无侧限抗压强度的变化趋势一致,见表 3 所示。

水泥含量为 6%,A/S=0.4 和 A/S=0.6 的试件具有较好的水稳定性。新鲜阶段的再生沥青混合料性能还与沥青的老化程度有关,沥青老化越严重,再生沥青混合料的水稳定性能上升越慢<sup>[7]</sup>。有研究<sup>[8-9]</sup>表明:二次再生沥青混合料的抗水损坏性能明显低于第一次再生沥青混合料的抗水损坏性能。

### 2.4 RAP 模量性能

根据路面车辙的形成原因以及沥青混合料试验经验,选用动态弹性模量试验评价混合料的模量指标<sup>[10]</sup>。采用 15℃ 试验温度。加载频率为 10 Hz,测定各种沥青混合料的最大弯拉应变,然后在 45℃ 和 55℃ 2 种温度下施以不同加载频率,测定沥青混合料的动态弹性模量。

表 4 (15℃、10 Hz)条件下沥青混合料最大弯拉应变

A/S	水泥含量/%	最大弯拉应变/ $\mu\epsilon$
0.2	2	10016
	4	11 327
	6	12 368
0.4	2	11 079
	4	11 576
	6	12 283
0.6	2	11 013
	4	13 279
	6	12 076

由表 4 分析,普通 RAP 中掺入适量的水泥,其动态模量均有提高,其中水泥含量为 6%,A/S=0.4 和 A/S=0.6 的 RAP 效果最好。根据表 4 的数据,选用 A/S=0.4 和普通 RAP 在 45℃ 和 55℃,不同加载频率下研究 RAP 的动态弹性模量,测试结果见图 4 和图 5。

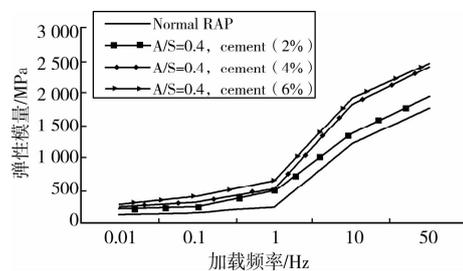


图 4 RAP 弹性模量 (45℃)

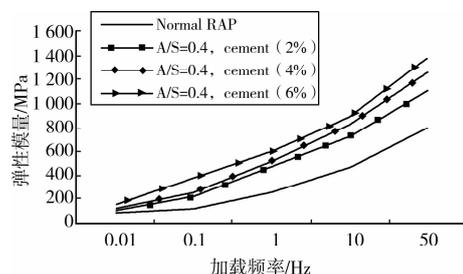


图 5 RAP 弹性模量 (55℃)

试验结果表明:混合料的动态模量随着加载频率的升高而增大,随着试验温度的升高而减小。加载频率相同时,试验温度越高,混合料的动态模量越小;温度相同时,加载频率越低,混合料的动态模量越小。因此,沥青混合料在高温状态下的路用性能最差<sup>[11]</sup>。

### 3 机理分析

粘土和水结合时,会表现出一定的胶体特征,表面带有  $\text{Na}^+$  和  $\text{K}^+$ ,能和水泥水化生成的氢氧化钙中的  $\text{Ca}^{2+}$  进行当量吸附交换,使较小的土颗粒形成较大的土团粒,从而使土体强度提高<sup>[10]</sup>。

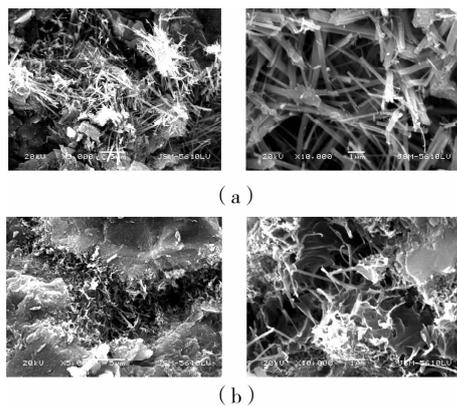


图4 RAP水化产物SEM照片

水泥的各种水化物生成后,有的自身继续硬化,形成水泥石骨架;有的与其周围具有一定活性的粘颗粒发生反应生成不溶于水的稳定结晶化合物,这种结晶物呈纤维状,不断延伸填充到颗粒间的孔隙中,并进一步形成空间网状结构,从而增大水泥强度<sup>[10-11]</sup>。图4(a)和图4(b)是水泥基再生沥青混合料中水泥水化产物形成网状结构的SEM照片,混合料中有针状钙矾石和纤维状C-S-H凝胶相互交织搭接,形成网络结构,将集料颗粒包裹起来,使其逐渐产生强度。

RAP中沥青料含量较高而水泥用量较少时,混合料的强度较低,这可能是因为较少量的水泥,不但不能形成网络结构,反而影响RAP的相互粘接<sup>[12-14]</sup>。虽然水泥稳定土的强度随水泥用量、龄期的增加而增长,但并非水泥剂量越大越好。有研究<sup>[15]</sup>认为,过多的水泥用量,在经济上不合理,在效果上也不一定显著。稳定粒料时,水泥用量超过一定比例,混合料的收缩性大,容易产生严重的收缩裂缝。因此,改善集料级配以减少水泥用量是减少水泥稳定土基层裂缝的重要措施之一<sup>[16]</sup>。研究中,RAP在A/S=0.4时,用水量9.5%,RAP中水泥

掺量6%时强度达到最大,但是当A/S>0.6时,掺入0.6%水泥的RAP强度反而降低,进一步说明并非水泥掺量越高越好。

### 4 结论

1)材料体系中,RAP混合料A/S比值一定时,混合料的无侧限抗压强度随水泥掺量的增大呈明显增长趋势。沥青混合料中A/S=0.2且水泥掺量≤6%时,对混合料的最大干密度与最佳含水量无明显影响;A/S=0.4时,混合料的最大干密度随水泥掺量的增大依次增大,最佳含水量无明显变化;随着A/S的增大,RAP的最佳含水量从10%降低到6.5%,最大干密度从1.93 g/cm<sup>3</sup>增加到2.1 g/cm<sup>3</sup>。

2)水泥掺量小于4%时,各种配比RAP的抗压强度均随A/S的增加而增加,掺6%水泥的RAP抗压强度曲线斜率达到最大,且在A/S=0.4时,抗压强度达到最大值2.63 MPa,然后逐渐降低到2.28 MPa,因此在材料体系中A/S=0.6,水泥掺量4%的条件下,RAP具有最优的配比区间。

3)RAP中水泥水化产物形成空间结构,将集料颗粒包裹起来,是使RAP产生强度的最主要因素。试件进水后抗压强度普遍降低,但与未浸水试件无侧限抗压强度变化趋势一致。

### 参考文献:

- [1] 夏英志,刘新民. 道路废旧沥青混合料再利用试验分析[J]. 平顶山工学院学报, 2008,17(6):73-74.  
XIA YING-ZHI, LIU XIN-MIN. Experimental analysis of recycled asphalt mixture[J]. Journal of Pingdingshan Institute of Technology, 2008,17(6):73-74.
- [2] ROGGE D F, HICKS R G, SCHOLZ TV, et al. Use of asphalt emulsions for in-place recycling Oregon experience[J]. Transportation Research Record, 1992: 1342:1-8.
- [3] MURPHY DANIEL T, EMERY JOHN J. Modified cold in-place asphalt recycling [J]. Transportation Research Record, 1996:1545:43-50.
- [4] 拾方治,李秀君,孙大权,等. 冷再生沥青混合料设计方法概述 [J]. 公路, 2004(11):103-107.  
SHI FANG-ZHI, LI XIU-JUN, SUN DA-QUAN, et al. Discussion about design methods for recycling cold mix asphalt[J]. Highway, 2004(11):103-107.
- [5] National Center for Asphalt Technology (NCAT). Pavement Recycling Guide Lines for State and Local Governments [R]. U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 1997.
- [6] 耿九光,陈忠达,李龙,等. 水泥-乳化沥青冷再生混合

- 料配合比设计[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2009, 29(1):11-12.
- GENG JIU-GUANG, CHEN ZHONG-DA, LI LONG, et al. Mixing design of cement-emulsified-asphalt-cold-recycled-mixture(CEACRM)[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(1):11-12.
- [7] 吕伟民. 沥青混合料设计原理与方法[M]. 上海: 同济大学出版社, 2001.
- [8] 季节, 高建立, 罗晓辉, 等. 热再生沥青混合料的配合比设计[J]. 公路, 2004(3):73-77.
- JI JIE, GAO JIAN-LI, LUO XIAO-HUI, et al. A design method for hot recycled asphalt mixtures[J]. Highway, 2004(3):73-77.
- [9] 程一鸣, 田晋跃. 再生沥青混合料目标配合比设计方法及应用[J]. 中外公路, 2006, 26(3):263-265.
- CHENG YI-MING, TIAN JIN-YUE. Mix design and usage of reclaimed asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2006, 26(3):263-265.
- [10] 光同文. 路面混凝土劈裂强度与弯拉强度的相关关系[J]. 当代建设, 2002(1):46-47.
- GUANG TONG-WEN. Relationship between splitting strength and flexural-tensile strength of pavement concrete [J]. Current Construction, 2002(1):46-47.
- [11] 姚辉. 沥青混合料冷再生技术研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2007:14-15.
- [12] BAMES P. Structure and Performance of Cement[M]. Applied Science Publishers LTD, 1983. 238-251, 262-268.
- [13] STEPHAN D, MALLMANLL R, KXLOFEL D, et al. Influence on the hydration properties[J]. Cement and Concrete Research, 1999(12), 1959-1967.
- [14] 钟梦武, 吴超凡, 于永生, 等. 掺加水泥的乳化沥青冷再生沥青混合料设计方法研究[J]. 公路, 2008(1):196-197.
- ZHONG MENG-WU, WU CHAO-FAN, YU YONG-SHENG, et al. A study on design method of cold reclaimed mixture using emulsion asphalt and cement [J]. Highway, 2008, (1):196-197.
- [15] 李龙. 沥青混合料再生利用研究[D]. 西安: 长安大学, 2003.
- [16] 刘海英, 孔玉坤. 水泥稳定土的材料对强度的影响[J]. 北方交通, 2007(2):23-24.
- LIU HAI-YING, KONG YU-KUN. Effect of materials of cement-stabilized soil on strength [J]. Northern Communications, 2007(2):23-24.

(编辑 胡英奎)

(上接第 43 页)

- TANG LIAN-SHENG, LIAO HUA-RONG, ZHANG QING-HUA. Structural entropy of soil and quantitative research for soil structure characteristics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10):1997-2002.
- [9] 龚晓南, 熊传祥, 项可祥. 黏土结构性对其力学性质的影响及其形成原因分析[J]. 水利学报, 2000, 44(10):43-47.
- GONG XIAO-NAN, XIONG CHUAN-XIAN, XIANG KE-XIANG. The formation of clay structure and its influence on mechanical characteristics of clay [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 44(10):43-47.
- [10] 王国欣, 肖树芳, 周旺高. 原状结构性土先期固结压力及结构强度的确定[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2):249-251.
- WANG GUO-XIN, XIAO SHU-FANG, ZHOU WANG-GAO. Determination of preconsolidation pressure and structural strength of undisturbed structural soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2):249-251.
- [11] 李涛, 钱守易. 土样扰动影响的评议及其先期固结压力的确定[J]. 岩土工程学报, 1987, 9(5):21-30.
- LI TAO, QIAN SHOU-YI. Evaluation of soil sample disturbance and determination of its reconsolidation pressure [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 9(5):21-30.
- [12] 张超杰, 王立忠, 陈云敏, 等. 结构性扰动土一维固结行为的定量分析[J]. 江南大学学报:自然科学版, 2006, 5(6):715-720.
- ZHANG CHAO-JIE, WANG LI-ZHONG, CHENG YUN-MIN, et al. The quantitative analysis of the consolidation behavior of disturbed structural soil[J]. Journal of Southern Yangtze University: Natural Science Edition, 2006, 5(6):715-720.
- [13] LIU M D, CARTER J P. Modeling the destructuration of soils during virgin compression[J]. Geotechnique, 2000, 50(4):479-483.

(编辑 王秀玲)