第45卷 第4期
2013年4月
哈尔滨工业大学学报
JOURNAL OF HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY
Vol. 45 No. 4
Apr. 2013

# 水泥稳定 RAP 材料劈裂应力－应变特性

冯德成[1]，赵 银[2]，陈 剑[1]

（1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院，150090 哈尔滨；2. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司，430056 武汉）

**摘 要：** 为研究水泥稳定再生沥青混合料(RAP)基层材料的抗拉性能，根据不同的 RAP 掺量(质量分数分别为 0、15%、30%)和水泥剂量(质量分数分别为 4.5%、5.0%)设计了 4 种混合料，采用劈裂试验分析了 RAP 掺量和试验温度分别为 －15、5、20 ℃对材料劈裂强度、劈裂回弹模量、峰值应变、能密度和脆性指数等指标的影响. 结果表明：劈裂强度、劈裂回弹模量和脆性指数均随温度升高而降低，降幅随 RAP 掺量增加而增大；在 －15 ℃，随 RAP 掺量的增加，劈裂强度和峰值应变持续减小，脆性指数增大；正温条件下随 RAP 掺量增加，劈裂强度、峰值应变和能密度先增大后减小，劈裂模量和脆性指数趋于减小；模量、峰值应变、能密度和脆性指数与劈裂强度之间均呈现线性正相关关系，使各评价指标趋于改善的 RAP 推荐掺量为 15% ~20%.

**关键词：** 水泥稳定基层；再生废旧沥青路面材料；劈裂试验；应力－应变曲线

**中图分类号：** U416.217 **文献标志码：** A **文章编号：** 0367－6234(2013)04－0074－05

# Splitting stress-strain properties of cement stabilized reclaimed asphalt pavement

FENG Decheng[1], ZHAO Yin[2], CHEN Jian[1]

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;
2. Second Highway Investigation and Design Institute Co. Ltd. of Ministry of Communication of China, 430056 Wuhan, China)

**Abstract:** To evaluate splitting tensile stress-strain properties of cement stabilized reclaimed asphalt pavement (RAP), four types of mixture containing varying percentages of RAP (0, 15% and 30%) and cement (4.5% and 5.0%) were designed in this paper. A mix made from only virgin material and cement dosage of 4.5% was selected as the control mix for the investigation. Five indexes, splitting tensile strength, splitting resilient modulus, peak strain, energy density and brittleness index, were used to assess the influence of RAP content and test temperature (－15, 5, 20 ℃ and 35 ℃) on splitting properties via splitting tensile test. The test results have indicated that splitting tensile strength, splitting resilient modulus and brittleness index decrease with the increasing of temperature, and the decreasing amplitude increases with the increasing of RAP content. The splitting tensile strength and peak strain decrease persistently with the increasing of RAP content, while the brittleness index augments at －15 ℃. In positive temperature cases, splitting strength, peak strain and energy density increase first and then diminish with the increasing of RAP content, whereas, modulus and brittleness index tend to decrease. A positive linear correlation between splitting strength and other indexes exists, and the optimal RAP content is from 15% to 20%.

**Key words:** cement stabilized base; reclaimed asphalt pavement (RAP); splitting tensile test; tress-strain curves

随着再生废旧沥青路面材料(Reclaimed asphalt pavement, RAP)越来越多地利用于路面半刚性基层中，世界各国研究者对掺 RAP 水泥稳定碎石材料的相关力学性能开展了研究，Huang 的研究显示，掺加 RAP 能够提高水泥混凝土的韧

**收稿日期：** 2012－06－07.
**基金项目：** 黑龙江省自然科学基金资助项目(ZD201218).
**作者简介：** 冯德成(1968—)，男，教授，博士生导师.
**通信作者：** 冯德成，fengdecheng@hit.edu.cn.

性，但抗拉压强度均有所降低[1]. Miró 等研究发现掺 RAP 对高模量沥青混合料的力学特性和开裂行为能力几乎没有影响，但随着 RAP 掺量的增加，混合料的劲度模量、密度、抗水损害和抗车辙的能力等逐渐降低，动态模量逐渐增强[2]. Taha 和 Ashley 开展了不同水泥剂量下掺 RAP 基层混合料的抗压强度特性研究. 研究表明，无侧限抗压强度随着 RAP 掺量的降低而增大，弹性模量随着 RAP 掺量的增大而减小[3-4]. Benner 等发现随着 RAP 掺量的增加，基层、底基层材料的 CBR 值和抗剪强度等性能均降低，而弹性模量增加[5]. 美国数个州交通管理部门均对 RAP 在路面中的应用作出了要求，基层中 RAP 的推荐掺量为 20%，最大允许掺量为 50%[6]. 吴晓春研究了冷再生水泥稳定基层的路用性能，结果表明，将适宜用量的 RAP 加入水稳基层中可以改善基层的抗冻性能和收缩性能[7]. 李强的研究表明，在高应力水平下，再生混合料具有比水泥稳定土更高的疲劳寿命，再生混合料的疲劳阻抗随应力水平降低而减小，其疲劳寿命对应力水平的敏感性比一般水泥稳定材料小[8]. 抗拉强度低是导致半刚性基层产生开裂的主要因素，而国内外对掺 RAP 水泥稳定材料抗拉性能的研究较少. 因此，研究 RAP 对水泥稳定级配碎石材料抗拉性能的影响，对于全面认识 RAP 在半刚性基层中应用的适用性具有积极意义.

掺 RAP 水泥稳定碎石材料是一种黏弹塑性材料，应力－应变全曲线反映了材料在受拉劈裂过程中裂缝扩张、贯通、损伤累积、极限强度及变形性能等一系列变化过程，是研究材料本构关系和结构承载能力的重要基础[9-12]. 因此，本文从材料劈裂应力－应变全曲线角度出发开展劈裂试验研究，以劈裂强度、劈裂回弹模量、峰值应变、能密度和脆性指数等为指标，分析不同的试验温度和 RAP 掺量对水泥稳定材料抗拉性能的影响规律，以期为 RAP 在半刚性基层中应用的适用性提供新的评价方法.

# 1　试验设计

## 1.1　原材料

RAP 为北安至黑河高速公路扩建产生的废旧料，其中，旧沥青质量分数为 4.4%，针入度为 2.8 mm，延度为 44 cm. 水泥为 PC32.5 普通硅酸盐水泥，其 80 μm 筛余为 1.4%，密度为 3.041 g/cm$^3$，初凝时间为 1.6 h，终凝时间为 4.0 h. 试验采用的新集料为玄武岩碎石，其技术指标见表 1.

**表 1　试验用集料技术指标**

| 集料类型 | 表观密度/(g · cm$^{-3}$) |
|---|---|
| 新碎石 20～30 | 2.697 |
| 新碎石 10～20 | 2.732 |
| 新碎石 5～10 | 2.750 |
| 新石屑 | 2.703 |
| 含有废旧沥青的 RAP | 2.515 |
| 去除废旧沥青的 RAP | 2.683 |

## 1.2　配合比设计

根据骨架密实型水泥稳定集料级配范围[13]，设计 4 种不同 RAP 掺量和水泥剂量的混合料，见表 2.

**表 2　劈裂试验混合料类别**

| 混合料编号 | RAP 质量分数/% | 水泥质量分数/% |
|---|---|---|
| Ⅰ | 0 | 4.5 |
| Ⅱ | 15.0 | 4.5 |
| Ⅲ | 30.0 | 4.5 |
| Ⅳ | 30.0 | 5.0 |

级配设计的原则是尽量使各混合料关键筛孔通过率接近，以减小级配对试验结果的影响. 试验级配曲线如图 1 所示.

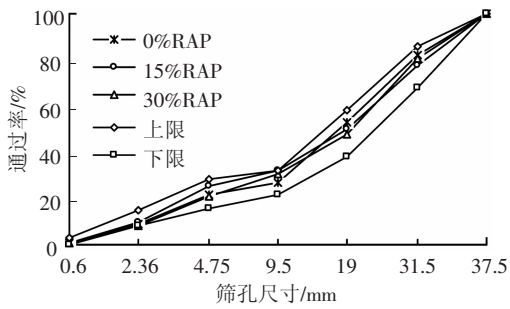
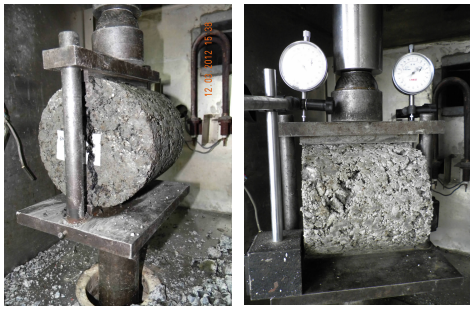



**图 1　试验所用混合料级配曲线**

## 1.3　试验方法

劈裂应力－应变试验依据文献[14]方法进行. 首先分别按照各类型混合料的最佳含水量和最大干密度静压成型，试件为直径为 150 mm，高度为 150 mm 的圆柱体；成型后在标准养生室养护 28 d，其中温度为(20 ± 2)℃，湿度≥95%. 而后将试件分别置于(－15 ± 2)、(5 ± 2)、(20 ± 2)℃和(35 ± 2)℃的恒温恒湿箱中，养护 16 h后放入 MTS 中进行劈裂试验. 采用位移控制模式加载，速率 1.0 mm/min，并实时记录试件在劈裂过程中的竖向荷载－竖向变形曲线，采集频率为5 Hz. 试验过程如图 2 所示.



（a）劈裂强度试验　　（b）劈裂回弹模量试验

**图 2　劈裂试验**

依据采集的竖向荷载和竖向变形，按式(1)～(3)换算劈裂拉伸应力和应变[15-16].

$$\sigma = 0.004\ 178\frac{P}{h}. \tag{1}$$

式中：$\sigma$ 为间接拉伸应力，MPa；$P$ 为试验荷载，N；$h$ 为试验时试件的高度，mm.

劈裂拉伸应变的计算式为

$$\varepsilon_X = \frac{l_X(0.030\ 7 + 0.093\ 6\mu)}{1.35 + 5\mu}. \tag{2}$$

式中：$\varepsilon_X$ 为劈裂拉伸应变；$\mu$ 为泊松比，取 0.25；$l_X$ 为试件水平方向变形，mm，按下式进行计算.

$$l_X = \frac{l_Y(0.135 + 0.5\mu)}{1.794 - 0.031\ 4\mu}. \tag{3}$$

式中：$l_Y$ 为试件竖向变形，mm.

劈裂回弹模量为

$$E_i = \frac{p - p_0(0.27 + 1.0\mu)}{\mathrm{d}l_X}. \tag{4}$$

式中：$E_i$ 为劈裂回弹模量，MPa；$p$ 为各级荷载，N；$p_0$ 为初荷载，N.

## 2　结果与分析

### 2.1　对劈裂强度的影响

劈裂强度 $R_i$ 与 RAP 掺量和试验温度 $\theta$ 的关系如图 3 所示. 从中可见，随着温度由 −15 ℃升高到35 ℃，各类型混合料的劈裂强度均持续降低，35 ℃时 4 种混合料劈裂强度相对 −15 ℃时降低幅度分别为 25.3%、30.0%、42.6% 和 35.4%，可见 RAP 掺量越大，强度减小越明显.

在 −15 ℃条件下，Ⅰ号混合料的强度最高，其他 3 种分别比Ⅰ号降低了 2.2%、19.7% 和 3.3%，说明在负温下 RAP 的掺入将会导致水泥稳定材料劈裂强度降低，降低幅度随 RAP 掺量增加而增大. 当温度升高时，Ⅱ号强度相比Ⅰ号有较明显提高，提高幅度约为 24.5%，而Ⅲ号有所降低，35 ℃时降低幅度达到 29.8%. 说明 RAP 掺量对材料劈裂强度的影响比较明显，且适量的 RAP 能够提高劈裂强度，而 RAP 掺量过大时强度反而降低. 另外Ⅳ号的强度较Ⅲ号的强度高 19.5% 以上，可见增大水泥剂量能够提高材料的劈裂强度.

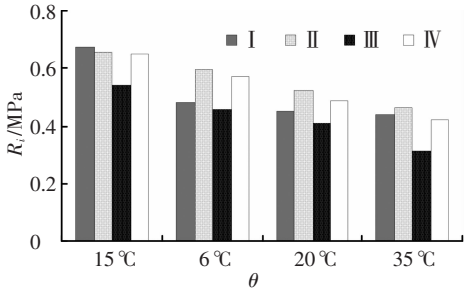



**图 3　劈裂强度与 RAP 掺量和试验温度的关系**

### 2.2　对劈裂模量的影响

劈裂回弹模量 $E$ 与 RAP 掺量和试验温度的关系如图 4 所示.

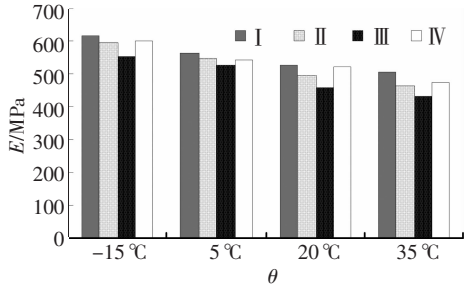



**图 4　劈裂模量与 RAP 掺量和试验温度的关系**

由图可见，总体上混合料劈裂回弹模量随温度升高而降低. 相对Ⅰ号混合料而言，Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ号混合料模量在不同温度下均有不同程度的降低，20 ℃时降低幅度分别为 6.1%、12.8% 和 0.5%，说明 RAP 能够使水泥稳定碎石材料的模量减小，且降幅随 RAP 掺量增加而增大，但总体降低效果不明显. 另外由于Ⅲ号模量比Ⅳ号模量略有提高，但最大不超过 10.0%，也说明水泥剂量对模量影响较小.

### 2.3　对峰值应变的影响

将应力 − 应变曲线上应力峰值点（劈裂强度）对应的应变定义为峰值应变 $\varepsilon_0$. 材料劈裂峰值应变 $\varepsilon_0$ 与 RAP 掺量和试验温度的关系见图 5 所示. 由图可见，在 −15 ℃条件下，峰值应变随 RAP 掺量增大而减小（其他 3 类种混合料相对比Ⅰ号的分别减小 6.9%、13.5% 和 5.5%）. 这主要与 RAP 中旧沥青性质有关，在 −15 ℃下旧沥青处于玻璃态，变形能力差，RAP 含量越大，对材料整体的影响也越大.

在正温下，随 RAP 掺量增加，峰值应变先增大后减小，相对Ⅰ号峰值应变 $\varepsilon_0$，Ⅱ号提高幅度大于 6.0%，Ⅲ号降低幅度甚至达到 14.3%. 这主要由两方面原因导致，一方面是 RAP 通过影响峰值应力而导致峰值应变呈现相似的变化趋势，另

一方面则是 RAP 自身较强的塑性变形能力促进了混合料的变形能力，前者占主导.

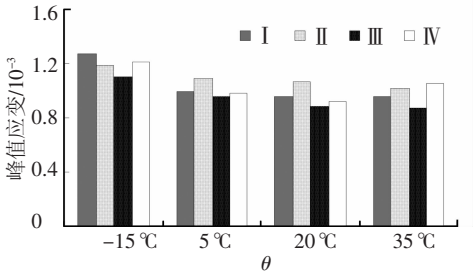



**图 5　峰值应变与 RAP 掺量和试验温度的关系**

温度对峰值应变的影响较小，随温度升高，峰值应力逐渐减小，相应的峰值应变也趋于减小，与此同时旧沥青的变形能力逐渐增强，材料塑性变形增大，试验结果是两方面综合作用的表现.

## 2.4　对曲线能密度的影响

应力－应变全曲线所包围的面积为劈裂中材料消耗的总能密度 $U$，曲线上升段即应变由 0 增加到峰值应变 $\varepsilon_0$，$\sigma-\varepsilon$ 曲线所包围的面积为材料在劈裂试验加载段吸收的能密度 $U_1$（临界能密度）. $U$ 表征了材料从加载至完全丧失承载力全过程中所消耗的能量，$U_1$ 是从零应力状态达到极限强度的过程中材料所需要能量的表征. 图 6、7 分别为材料 $U$ 和 $U_1$ 与 RAP 掺量和试验温度的关系.

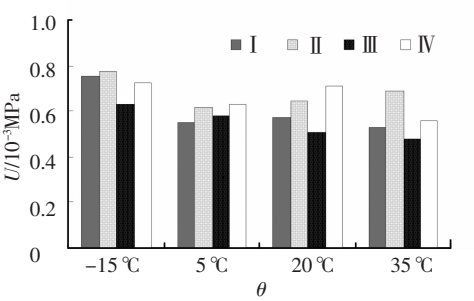



**图 6　全曲线能密度与 RAP 掺量和试验温度的关系**

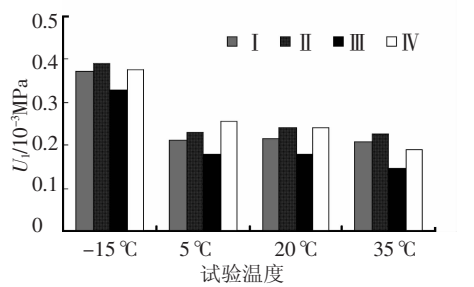



**图 7　临界能密度与 RAP 掺量和试验温度的关系**

由图可见，RAP 掺量和试验温度对曲线能密度的影响规律亦与劈裂强度相似. 20 ℃时Ⅱ号的曲线能密度 $U$ 和 $U_1$ 相对基准配合比Ⅰ号增幅分别达到了 13.0%、10.3%，Ⅳ号的曲线能密度 $U$ 和 $U_1$ 相对基准配合比Ⅰ号增幅分别达到了 23.9%、11.2%，而Ⅲ号的降幅分别为 11.1% 和 17.5%. 可见适宜的 RAP 掺量能够使曲线应变能密度有所提高，掺 RAP 水泥稳定材料在荷载作用下，从损伤的产生、发展直至破坏失去承载力的过程中需要耗散更多的能量.

## 2.5　对脆性指数的影响

将应力－应变曲线上升段面积与下降段面积的比值定义为材料脆性指数 $B_c$，即

$$B_c = \frac{U_1}{U - U_1}. \tag{5}$$

$B_c$ 越大，则材料韧性更小，在破坏后释放能量越剧烈，越趋于脆性破坏. 材料脆性指数与 RAP 掺量和试验温度的关系见图 8 所示.

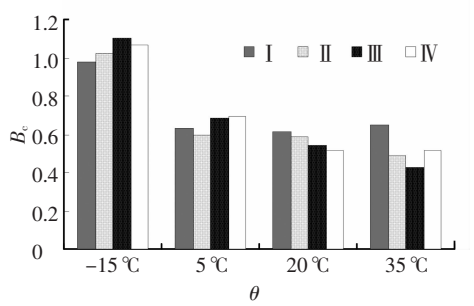



**图 8　脆性指数与 RAP 掺量和试验温度的关系**

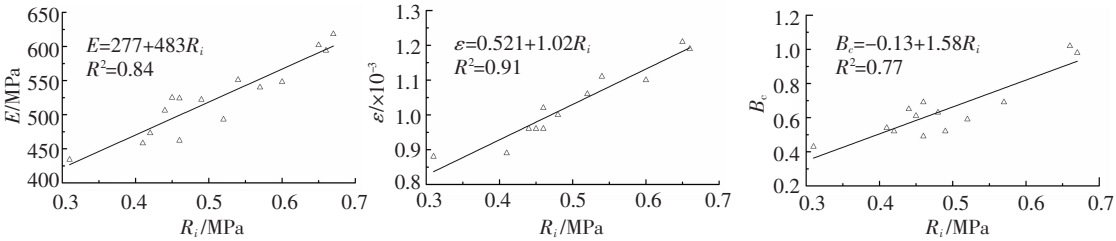
由图可见，在－15 ℃，Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ号配合比的脆性指数比Ⅰ号基准配合比的分别提高了 4.2%、13.1% 和 9.1%，RAP 的掺入会导致材料的脆性指数增大，这是由于在－15 ℃环境下，RAP 中的沥青已处于玻璃态，表现出明显的脆性性质，RAP 掺量越大，脆性性质越明显.

在正温条件下，RAP 的掺入能够在一定程度上降低水泥稳定碎石材料的脆性指数. 20 ℃时，Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ号配合比的脆性指数比Ⅰ号基准配合比的分别降低了 3.9%、11.1% 和 15.5%，35℃时，降低的幅度分别达到了 24.6%、33.6% 和 19.8%. 说明 RAP 掺量越大、温度越高，脆性指数降低的幅度越大，材料的脆性减弱，韧性增加. 这与材料的损伤发展有关，当荷载引起的应力达到材料的极限强度后，试件内部出现可见裂纹，并不断贯穿形成主要贯通裂缝，导致承载力衰减丧失. 材料模量越大，裂缝发展过程中越容易产生应力集中现象，使得试件破坏速度加快. 当掺入回弹模量较低的 RAP 后，在一定程度上消除了应力集中，从而延缓了材料裂缝的扩展和贯通.

## 2.6　各评价指标间的关系

以上分析可见，掺 RAP 水泥稳定碎石材料的劈裂强度 $R_i$ 与其他劈裂行为评价指标有一定的关系. 对各项指标与劈裂强度间的关系进行回归

分析,如图 9 所示. 可见,劈裂强度与其他指标呈现简单的线性正相关关系. 由于劈裂强度随 RAP 掺量增加先增大后减小,为使材料的劈裂行为趋于改善,推荐 RAP 适宜掺量(质量分数)为 15% ~20%.




(a)劈裂回弹模量-劈裂强度 (b)峰值应变-劈裂强度 (c)脆性指数-劈裂强度

**图 9 指标间的相关关系**

## 3 结 论

1)通过不同的 RAP 掺量和水泥剂量,设计了 4 种水泥稳定碎石混合料,采用劈裂试验研究 RAP 掺量和试验温度对材料劈裂强度、劈裂回弹模量、峰值应变、能密度和脆性指数等指标的影响,发现各类材料的劈裂强度、劈裂回弹模量和脆性指数均随温度升高而趋于降低,降低幅度随 RAP 掺量增加而增大.

2) 在 -15 ℃,随 RAP 掺量的增加,劈裂强度和峰值应变持续减小,脆性指数增大. 正温条件下随 RAP 掺量增加,劈裂强度、峰值应变和能密度先增大后减小,劈裂模量和脆性指数趋于降低.

3) 回归分析表明,劈裂模量、峰值应变、能密度和脆性指数与材料劈裂强度之间均呈现简单的线性正相关,使各评价指标趋于改善的 RAP 推荐掺量(质量分数)为 15% ~20%.

## 参考文献

[1] HUANG Baoshan, SHU Xiang, LI Guoqiang. Laboratory investigation of portland cement concrete containing recycling asphalt pavement [J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35: 2008 -2013.

[2] MIRO R, VALDES G, MARTINEZ A, *et al.* Evaluation of high modulus mixture behavior with high reclaimed asphalt pavement (RAP) percentages for sustainable road construction [J]. Construction and Building Materials, 2011, 4:15 -21.

[3] TAHA R, AL-HARTHY A, AL-SHAMSI K. Cement stabilization of reclaimed asphalt pavement aggregate for road bases and subbases [J]. Journal of Material in Civil Engineering, 2002, 14(3): 239 -245.

[4] BROWM A V. Cement stabilization of aggregate base material blended with reclaimed asphalt pavement[D]. Utah: Brigham Young University, 2006.

[5] THOMAS B, ALI M. The development of performance specification for granular base and subbase material [R]. New Jersey: New Jersey Department of Transportation, 2005.

[6] MCGARRAH E J. Evaluation of current practices of reclaimed asphalt pavement/virgin aggregate as base course material[R]. Washington DC:Washington State Department of Transportation,2007.

[7] 吴晓春. 冷再生的水泥稳定基层路用性能的研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.

[8]李强, 马松林, 李鹏飞. 沥青路面冷再生混合料疲劳性能[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(1): 7 -10.

[9]孔丽娟, 葛勇, 袁杰, 等. 混合骨料混凝土应力 - 应变全曲线的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(7): 18 -21.

[10]LU Xiaobin, HSU C T. Stress-strain relations of high-strength concrete under triaxial compression [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19(3): 261 -268.

[11]PAUL D K, GANNENDRAN C T. Prediction of nonlinear stress-strain relationship of lightly stabilized granular materials from unconfined compression testing[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 24(8): 1118 -1124.

[12]杜婷. 高性能再生混凝土微观结构及性能试验研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2006.

[13]JTG D50—2006. 公路沥青路面设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.

[14]JTG E51—2009. 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S]. 北京:人民交通出版社, 2009.

[15]谭忆秋, 张魁, 吴思刚, 等. 应用数字散斑技术的沥青混合料劈裂应变研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(9): 56 -58.

[16]JTG E20—2011. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. 北京:人民交通出版社, 2011.

(编辑 魏希柱)