

文章编号:1672-9331(2019)01-0017-05

沥青混合料在重复荷载作用下的黏弹性变形

王 虎, 张化涛

(长安大学 理学院, 陕西 西安 710064)

摘 要: 为了研究沥青混合料在不同温度、不同应力下黏弹性变形响应,提出了基于三轴重复荷载试验评价沥青混合料抗车辙能力的方法,并对沥青路面车辙发展规律进行了分析。采用半正弦波荷载来模拟路面实际车辆荷载,基于黏弹性五单元八参数模型,推导了能够适用于三轴重复荷载试验的力学模型。结合三轴重复荷载试验的试验结果,利用 Origin 8.5 软件,对三轴重复荷载试验数据进行拟合,得到了相应的黏弹性参数。对比计算流动数和实测流动数,分析沥青混合料黏弹性变形特性。研究结果表明,温度越高、应力越大,混合料黏弹性变形越大,流变性越小;重复荷载作用下沥青混合料永久变形黏弹性力学模型参数拟合相关系数达到 95% 以上,表明该模型可以有效地反映沥青混合料黏弹性变形特性。

关键词: 道路工程; 沥青混合料; 永久变形; 黏弹性力学模型; 三轴重复荷载试验; 流动数

中图分类号: U416.2

文献标识码: A

Viscoelasticity study of asphalt mixture deformation under repeated loading

WANG Hu, ZHANG Hua-tao

(School of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to study the viscoelastic deformation response of asphalt mixture under different temperatures and different stresses, a method based on triaxial repeated load test to evaluate the anti-rutting ability of asphalt mixture was proposed, and the development law of asphalt pavement rutting was predicted. The semi-sinusoidal load is used to simulate the actual vehicle load on the road. Based on the viscoelastic five-element eight-parameter model, the mechanical model which can be applied to the triaxial repeated load test is derived. Combined with the test results of the triaxial repeated load test, the original 8.5 software was used to fit the three-axis repeated load test data to obtain the corresponding physical parameters. The flow numbers under different temperature and stress conditions were calculated and compared with the measured flow values. The results show that the higher the temperature and the higher the stress, the larger the permanent deformation of the mixture and the smaller the rheology. Under the repeated load, the correlation coefficient of the parameters of the permanent deformation viscoelastic mechanics model of asphalt mixture is over 95%. The model can effective reflects the permanent deformation characteristics of the asphalt mixture.

收稿日期: 2018-12-05

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2013JM7002)

通讯作者: 王 虎(1959-), 男, 陕西兴平人, 长安大学教授, 博士, 主要从事道路桥梁等方面的研究。E-mail: wh89@chd.edu.cn

Key words: road engineering; asphalt mixture; permanent deformation; viscoelastic mechanical model; triaxial repeated load test; flow number

沥青路面材料属于黏弹性材料,易产生永久变形。沥青混合料永久变形是高等级公路沥青路面的主要损坏类型之一^[1-3]。Peng等^[4]和Huang等^[5]利用黏弹性力学的方法,分析了沥青混合料的高温变形机理,但仅考虑了温度对沥青黏弹性影响,而未考虑应力的影响。李强等^[6]基于流变次数的应变公式,对不同类型沥青混合料黏弹性的发展过程进行了预估。杨宇明等^[7]利用Burgers模型,推导了浇注式沥青混合料在重复荷载作用下的总应变公式,并分析了浇注式沥青混合料的黏弹性变形的特性。高丹盈^[8]利用Burgers模型,增加黏性元件形成了五单元八参数黏弹性力学模型,该模型有效地描述了沥青混合料黏弹性变形响应,但其运用该力学模型仅对静态荷载下的沥青混合料黏弹性进行了分析,因此并不能反映实际路面车辆重复荷载下变形响应。

为进一步研究沥青混合料的黏弹性变形特性,作者采用三轴重复荷载试验,推导并验证重复荷载下沥青混合料黏弹性变形力学模型,分析沥青混合料的黏弹性变形规律受温度和荷载的影响,为沥青混凝土路面合理设计提供参考。

1 沥青混合料永久变形力学模型

1.1 黏弹性力学模型

黏弹性Burgers模型参数少,求解比较简单,常用于描述沥青混合料的黏弹性动态特性,可以有效地描述沥青混合料的蠕变变形过程和应力松弛过程。特别是在加载过程中,其优越性愈发明显,因此在道路工程领域被广泛采用。Burgers模型虽然能较好地反映静力荷载作用下沥青混合料流动变形特性,但是不能表征实际路面车辆重复荷载作用所引起的刚度衰减;此外,该模型即使初始应力很小,应变也会无限增长,不能很好地反映沥青混合料的变形特性。其本构关系模型为:

$$\sigma + p_1 \frac{\partial \sigma}{\partial t} = q_1 \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + q_2 \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中: p_1 、 q_1 、 q_2 为与 E 、 η 有关的材料参数。

在Burgers模型(如图1所示)基础上增加黏

性元件5,其黏度 $\eta_3(t) = \frac{\eta_0}{at^2 - bt + c}$ (式中: η_0 为元件5的初始黏度; a 、 b 、 c 均为其黏度参数)形成五单元八参数黏弹性力学模型如图2所示。通过小梁弯曲蠕变试验,对模型参数进行非线性拟合,得到加载卸载阶段模型参数,研究沥青纤维体积率和长径比对模型参数及沥青混合料黏弹性能的影响,得到其周期加载阶段蠕变方程为:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left[\frac{t_0}{\eta_1} + \frac{(1 - e^{-t \cdot E_2 / \eta_2}) e^{-t \cdot (t - t_0)}}{E_2} + \frac{a t_0^3 / 3 - b t_0^2 / 2 + c t_0}{\eta_0} \right] \quad (2)$$

式中: σ_0 、 t_0 、 E_1 、 η_1 、 E_2 、 η_2 均为与 E 、 η 有关的材料参数。

该模型能较好地描述拟合的蠕变变形曲线,相关系数较高,但仅适用于静力荷载下的变形特性。

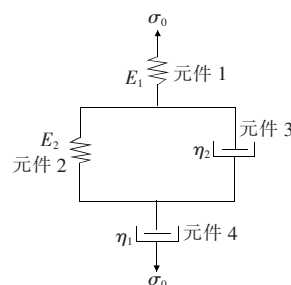


图1 Burgers模型

Fig. 1 Burgers model

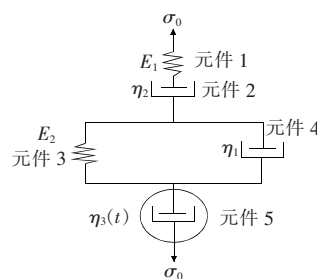


图2 五单元八参数模型

Fig. 2 Five-unit eight-parameter model

1.2 沥青混合料黏弹性力学模型的推导

实际轮载作用于路面的过程是一个重复荷载反复作用的过程,而其作用过程存在一定的间歇。本研究拟采用半正弦波间歇荷载来模拟路面在实际荷载作用下的应力应变状态变化过程。半正弦

波间歇荷载表达式^[9]为:

$$\sigma_t = \begin{cases} \sigma_0 \sin \frac{\pi t}{t_0}, & 0 \leq t \leq t_0 \\ 0, & t_0 < t \leq T \end{cases} \quad (3)$$

式中: σ_0 为半正弦波荷载峰值; T 为荷载作用周期, $T = t_0 + t_d$ 。

本研究以五单元八参数模型为基础,把模型看成是由四单元模型与黏性元件串联组成,这样将混合料黏性应变与弹性应变分开考虑,而重复荷载作用下的黏弹性应变就是黏性流动应变与残余黏弹性应变之和。

假定在第 i 个半正弦荷载作用 τ 时刻,在 τ 作用之前荷载作用时间为 $(i-1)t_0$,则串联黏性元件的黏度为:

$$\eta_{3i}(t) = \frac{\eta_0}{a[(i-1)t_0 + \tau]^2 - b[(i-1)t_0 + \tau] + c} \quad (4)$$

第 i 个正弦波荷载作用产生的弹性流动应变为:

$$\begin{aligned} \epsilon_{v,i} &= \int \frac{\sigma(\tau)}{\eta_{3i}(\tau)} d\tau = \frac{2a\sigma_0 t_0^3}{\pi\eta_0} (i-1)^2 + \\ &\quad \left[\frac{2a\sigma_0 t_0^3}{\pi\eta_0} - \frac{2b\sigma_0 t_0^2}{\pi\eta_0} \right] (i-1) + \\ &\quad \frac{\sigma_0}{\pi\eta_0} \left(2ct_0 + at_0^3 - bt_0^2 - \frac{4at_0^3}{\pi^2} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

卸载后,第 i 个半正弦波荷载产生的黏性流动应变不能随时间恢复,荷载间歇时间对其没有影响,因此 N 次荷载作用以后,黏性流动应变为:

$$\begin{aligned} \epsilon_{v,N} &= \int \frac{\sigma(\tau)}{\eta_{3i}(\tau)} d\tau = \frac{2a\sigma_0 t_0^3}{\pi\eta_0} \frac{N(N-1)(2N-1)}{6} + \\ &\quad \left[\frac{2a\sigma_0 t_0^3}{\pi\eta_0} - \frac{2b\sigma_0 t_0^2}{\pi\eta_0} \right] \frac{N(N-1)}{2} + \\ &\quad \frac{\sigma_0}{\pi\eta_0} \left(2ct_0 + at_0^3 - bt_0^2 - \frac{4at_0^3}{\pi^2} \right) N \end{aligned} \quad (6)$$

修伯格斯模型中黏弹性蠕变柔量为:

$$J(t) = \frac{1}{E_1} (1 - e^{-E_1 t / \eta_1}) \quad (7)$$

由 Boltzman 线性叠加原理可知,从第 i 个半正弦波间歇荷载产生的黏弹性变形到第 N 个半正弦波间隙荷载作用时刻结束时,残余的黏弹性变形为:

$$\epsilon_{R,Ve,j} = \int_0^{t_0} J[t - (i-1)T - \tau] \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} d\tau =$$

$$\frac{\pi\sigma_0 t_0}{\eta_1 \left(\pi^2 + \frac{E_1^2 t_0^2}{\eta_1^2} \right)} \left(1 + e^{-\frac{E_1}{\eta_1} [N-(i-1)]T} \right) \quad (8)$$

N 次应力作用后,材料残余的黏弹性变为:

$$\begin{aligned} \epsilon_{R,Ve,N} &= \sum_{i=1}^N \epsilon_{R,Ve,j} = \\ &\quad \frac{\pi\sigma_0 t_0 e^{-\frac{E_1}{\eta_1} T}}{\eta_1 \left(\pi^2 + \frac{E_1^2 t_0^2}{\eta_1^2} \right) (1 - e^{-\frac{E_1}{\eta_1} T})} \left(1 - \right. \\ &\quad \left. e^{-\frac{E_1}{\eta_1} NT} \right) \left(1 + e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t_0} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{令 } \alpha = \frac{2at_0^3}{3\eta_0\pi} \beta = \frac{bt_0^2}{\pi\eta_0} \gamma = \frac{6\pi^2 ct_0 + \pi^2 at_0^3 - 12at_0^3}{3\eta_0\pi^3},$$

$$K = \frac{E_1}{\eta_1} \lambda = \frac{\pi t_0 \left(1 + e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t_0} \right) e^{-\frac{E_1}{\eta_1} T}}{n_1 \left(\pi^2 + \frac{E_1^2 t_0^2}{\eta_1^2} \right) (1 - e^{-\frac{E_1}{\eta_1} T})} \quad (10)$$

故在第 N 个半正弦波间歇作用结束时,变形为:

$$\begin{aligned} \epsilon_{PN} &= \epsilon_{v,N} + \epsilon_{R,Ve,N} = \\ \sigma_0 \alpha N^3 - \sigma_0 \beta N^2 + \sigma_0 \gamma N + \sigma_0 \lambda (1 - e^{-KNT}) \end{aligned} \quad (11)$$

2 三轴重复荷载永久变形试验

考虑行驶车辆运行间距,文献[12]认为,荷载间歇时间接近加载时间的 10 倍已足够充分,故本研究采用半正弦波加载时间 $t_0 = 0.1$ s,荷载间歇时间 $t_d = 0.9$ s,荷载应力峰值为 0.3, 0.6, 0.9 MPa, 对不同温度和荷载条件进行组合其试验数。对于有侧限的重复荷载变形试验,流动数与沥青混合料高温性能具有很好的相关性。因此,本研究采用流动数 F_N 作为分析指标。重复荷载作用下沥青混合料的黏弹性变形可划分为三个阶段: 第一个阶段,应变迅速增大,但应变率随时间逐渐减小; 第二个阶段,应变稳定增长,应变速率基本保持稳定; 第三个阶段,应变和应变率均急剧增大,直至损坏。第二阶段和第三阶段的分界点所对应的荷载作用次数即为流动数^[10]。通过沥青混合料试验数据 AC-13、AC-16、AC-20 分析^[11]可得,AC-16 具有最高的 F_N 值,AC-13C 次之,而 AC-20 流动数相对较小。

本研究以 AC-16 为例,依据式(10)对三轴重复加载试验数据进行拟合,采用 Origin 8.5 软件拟合数据,可得沥青混合料力学模型的拟合参数(见表 1)。

表1 模型的物理参数

Table 1 Physical parameters of the model

温度/ ℃	应力峰 值/MPa	η_0 / (GPa·s)	a / ($\times 10^{-6} \text{ s}^{-2}$)	b / ($\times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$)	c	E_1 / MPa	η_1 / (MPa·s)
30	0.3	60.168	0.995	1.31	0.604	14.3	7 389.0
30	0.6	15.773	0.388	0.35	0.208	11.0	926.0
30	0.9	7.902	0.668	0.64	0.139	10.7	1 685.0
40	0.3	9.617	5.382	2.38	0.513	5.1	531.0
40	0.6	3.653	71.450	8.72	0.494	9.2	163.0
40	0.9	1.648	926.780	39.90	0.604	2.6	135.0
50	0.3	4.409	9.089	3.26	0.465	2.8	295.6.0
50	0.6	2.781	155.370	13.10	0.533	1.3	176.0
50	0.9	1.238	4 400.000	52.60	0.561	1.1	118.0

图3~5为30,40,50℃下AC-16试件拟合曲线。由拟合曲线可得,温度越高、应力越大,混合料的永久变形越大。拟合的相关系数达到95%以上,拟合曲线和实测结果吻合较好,表明该模型可以有效地反映沥青混合料的黏弹性变形响应。

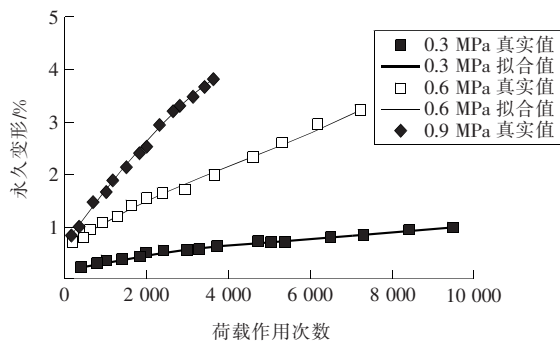


图3 AC-16 沥青混合料 30℃下实际值与拟合值对比

Fig. 3 Comparison of actual and fitted values of AC-16 asphalt mixture at 30 °C

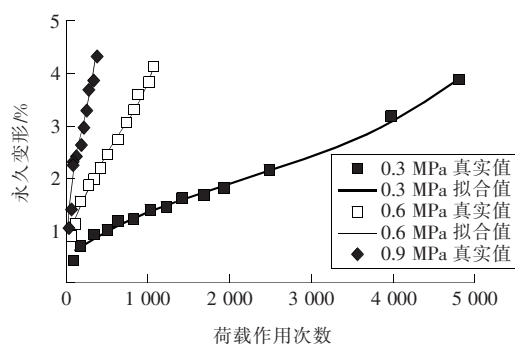


图4 AC-16 沥青混合料 40℃下实际值与拟合值对比

Fig. 4 Comparison of actual and fitted values of AC-16 asphalt mixture at 40 °C

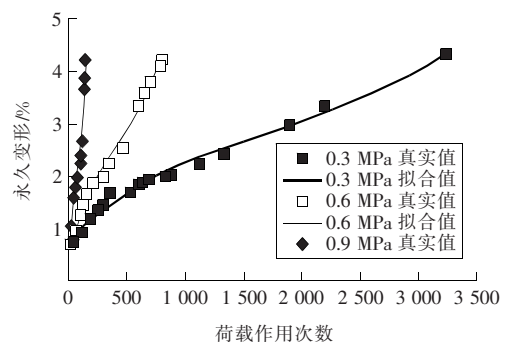


图5 AC-16 沥青混合料 50℃下实际值与拟合值对比

Fig. 5 Comparison of actual and fitted values of AC-16 asphalt mixture at 50 °C

$$\dot{\epsilon}_{PN} = 6\sigma_0 \alpha N - 2\sigma_0 \beta - (KT)^2 \sigma_0 \lambda e^{-KNT}. \quad (12)$$

根据式(10),取其一阶导数永久应变率及二阶导数应变加速度分别为:

$$\dot{\epsilon}_{PN} = 3\sigma_0 \alpha N^2 - 2\sigma_0 \beta N + \sigma_0 \gamma + KT \sigma_0 \lambda e^{-KNT}. \quad (13)$$

令 $\ddot{\epsilon} = 0$,可求得方程(12)的解,即为流动数 F_N 。当 $0 < N < F_N$ 时, $\epsilon > 0$, $\dot{\epsilon} > 0$, $\ddot{\epsilon} < 0$;当 $N > F_N$ 时, $\epsilon > 0$, $\dot{\epsilon} > 0$, $\ddot{\epsilon} > 0$ 。这与沥青混合料变形性能较符合,故该模型能有效地反映沥青混合料黏弹性变形特性。

将试验拟合参数代入式(13),可以计算不同温度和应力条件下的流动数,结果如表2所示。

比较两组数据计算结果可知,流动数与实测值较为接近,证明此模型能有效地描述沥青混合料黏弹性变形特性。计算结果表明,随着温度的不断升高,荷载应力逐渐增大,其流动数越小,沥青混合料越容易被破坏。

表 2 实测流动数和计算流动数

Table 2 Measured flow number and calculated flow number

试件编号	实测 F_N	计算 F_N
30-0.3	10 000	10 089
30-0.6	7 250	7 020
30-0.9	3 610	3 680
40-0.3	4 775	4 668
40-0.6	1 065	1 085
40-0.9	365	348
50-0.3	3 215	3 185
50-0.6	790	805
50-0.9	160	141

注:30-0.3 为试验编号,表示试验温度为 30 ℃,试验荷载峰值为 0.3 MPa;其他的编号类似。

3 结论

1) 基于沥青混合料三阶段永久变形特性,运用五单元八参数黏弹性模型,推证出适用于三轴重复荷载试验的力学模型和解析公式。

2) 以 AC-16 为例,借助 Origin 8.5 软件,结合三轴重复荷载试验数据,分别在 30,40,50 ℃ 温度和 0.3,0.6,0.9 MPa 三种偏应力水平下对力学模型进行参数拟合,得到相应的黏弹性模型参数。

3) 对沥青混合料永久变形进行了分析,采用流动数 F_N 作为混合料抗永久变形能力的评价指标,根据试验数据进行拟合和验证,计算了不同温度和荷载条件下的流动数,并与实测流动数值进行了比较。对比分析结果表明,此模型能可靠地反映沥青混合料永久变形特性。

〔参考文献〕

- [1] 沈毅,何兆益.基于黏弹性沥青路面疲劳性能的数值模拟研究[J].公路工程,2017,42(5):312-315,326.
SHEN Yi, HE Zhao-yi. Numerical simulation of fatigue performance of viscoelastic asphalt pavement [J]. Journal of Highway Engineering, 2017, 42(5): 312-315, 326.
- [2] 朱浩然,孙璐,朱耀庭.基于热力学的沥青混合料黏弹-黏塑性损伤本构模型[J].中国公路学报,2013,26(3):57-64.
ZHU Hao-ran, SUN Lu, ZHU Yao-ting. Viscoelastic - viscoplastic damage constitutive model of asphalt mixture based on thermodynamics[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(3): 57-64.
- [3] 李善强,李浩.基于油蚀度的沥青混合料油蚀评价方法研究[J].武汉理工大学学报:自然科学版,2015,37(7):33-37.
LI Shan-qiang, LI Hao. Study on oil erosion evaluation method of asphalt mixture based on oil erosion [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Natural Science Edition, 2015, 37(7): 33-37.
- [4] Peng M J, Xu Z H. Research on nonlinear constitutive relationship of permanent deformation in asphalt pavements [J]. Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy, 2006, 49(6): 671-682.
- [5] Huang C W, Al-Rub R K A, Masad E A, et al. Three-dimensional simulations of asphalt pavement permanent deformation using a nonlinear viscoelastic and viscoplastic model [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23(1): 56-68.
- [6] 李强,高磊,王宏畅,等.重复荷载作用下沥青混合料流变次数试验[J].公路交通科技,2013,30(12):1-6, 14.
LI Qiang, GAO Lei, WANG Hong-chang, et al. Experiment on the rheological number of asphalt mixture under repeated loading [J]. Highway Transportation Technology, 2013, 30(12): 1-6, 14.
- [7] 杨宇明,钱振东,胡靖.重复荷载作用下浇注式沥青混合料黏弹特性[J].东南大学学报:自然科学版,2014, 44(2):391-395.
YANG Yu-ming, QIAN Zhen-dong, HU Jing. Viscoelastic properties of cast asphalt mixture under repeated loading [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2014, 44(2): 391-395.
- [8] 高丹盈,黄春水.纤维沥青混凝土五单元八参数黏弹性力学模型[J].中国公路学报,2014,27(2):1-9.
GAO Dan-ying, HUANG Chun-shui. Five - unit eight-parameter viscoelastic mechanical model of fiber asphalt concrete [J]. Journal of Chinese Highway Society, 2014, 27(2): 1-9.
- [9] Witczak M W, Kaloush K, Pellinen T. Simple performance test for superpave mix design [R]. Washington D C: National Academy Press, 2002.
- [10] 张久鹏,黄晓明,李辉.重复荷载作用下沥青混合料的永久变形[J].东南大学学报:自然科学版,2008, 38(3):511-515.

(下转至第 65 页)

- of tunnel surrounding rock cloud based on ResNet model[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2018.
- [5] 罗启强.基于 PHP+MySQL 的高校教务管理系统的设计与实现[D].长春:吉林大学,2016.
LUO Qi-qiang. Design and implementation of college educational administration management system based on PHP+MYSQL[D].Changchun: Jilin University, 2016.
- [6] 李荣国,王见.MySQL 数据库在自动测试系统中的应用[J]. 计算机应用,2011,31(S2):169-171,175.
LI Rong-guo, WANG Jian. Application of MySQL database in automatic test systems [J]. Journal of Computer Applications, 2011, 31(S2): 169-171, 175.
- [7] 张永梅.MySQL 数据库技术在公民健康信息管理系统中的应用[D].西安:西安电子科技大学,2010.
ZHANG Yong-mei. The application of MySQL database technology in citizen's health information Management System[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.
- [8] 王飞飞.MySQL 数据库应用从入门到精通[M].北京:中国铁道出版社,2014:44-56.
WANG Fei-fei. MySQL database application from entry to mastery[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2014: 44-56.
- [9] 杨利荣,李伟.基于 PHP 语言系统的计算机辅助教学系统开发实现[J]. 自动化与仪器仪表,2016(6): 251-253.
YANG Li-rong, LI Wei. Development and implementation of computer assisted instruction system based on PHP language[J]. Automation and Instrumentation, 2016(6): 251-253.
- [10] 戴明儒,陆启军.基于 PHP 技术的电子相册系统分析与设计[J]. 计算机光盘软件与应用,2013,16(22): 281-283.
DAI Ming-ru, LU Qi-jun. Analysis and design of electronic photo album system based on PHP technology[J]. Computer CD Software and Applications, 2013, 16(22): 281-283.
- [11] 邓民.基于 MySQL 的诗歌翻译语料库系统数据库设计[J].计算机技术与发展,2015,25(10):179-182.
DENG Ming. Database design on poetry translation corpus system based on MySQL[J]. Computer Technology and Development, 2015, 25(10): 179-182.
- [12] 邱均平,邹菲.基于 PHP 技术的电子商务 WEB 数据库开发[J]. 情报科学,2003(9):970-973.
QIU Jun-ping, ZOU Fei. Application of web database based on PHP in e-business[J]. Information Science, 2013(9): 970-973.

(上接第 21 页)

- ZHANG Jiu-peng, HUANG Xiao-ming, LI Hui. Permanent deformation of asphalt mixture under repeated loading[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2008, 38(3): 511-515.
- [11] 赵毅,郭志敏,梁乃兴.沥青混合料永久变形黏弹性力学模型通用性研究[J]. 公路工程, 2018, 43(2): 192-196, 200.
- ZHAO Yi, GUO Zhi-min, LIANG Nai-xing. Study on the universality of permanent deformation viscoelastic mechanics model of asphalt mixture [J]. Highway Engineering, 2018, 43(2): 192-196, 200.
- [12] Bouldin M G, Dongre R D, Angelo J. Proposed refinement to the superpave high temperature specification parameter for performance graded binder[J]. Transportation Research Record, 2001(1766): 40-47.