

Influence of Compaction Temperature on Marshall Stability of Asphalt Mixture

Wei Liao¹, Xile Yan², Jianwen Tian², Xili Yan^{3*}

¹Sichuan Guang'an Traffic Investment Construction and Development Group Ltd., Guang'an Sichuan

²Shaanxi Yulin Highway Administration, Yulin Shaanxi

³School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

Email: 342440588@qq.com, *xili.yan@chd.edu.cn

Received: Aug. 16th, 2017; accepted: Aug. 31st, 2017; published: Sep. 11th, 2017

Abstract

To quantitatively study the influence of compaction temperature on Marshall stability of bituminous mixture, a compaction test at different temperature was carried out in this study by applying the Marshall test. AC-13 bituminous mixtures were made by using 3 types of warm mix bitumen with the same brand (ACMP1, ACMP2, ACMP3) and 2 kinds of hot mix bitumen (70# base and SBS modified), the compactness and Marshall stability of Marshall samples were measured, and their variation rules with different compaction temperatures were analyzed. The research shows that compactness and Marshall stability of bituminous mixtures increase linearly with the increase of compaction temperature within 90°C - 150°C; the Marshall stability of bituminous mixtures increases linearly with the increase of compactness, and in accordance with traditional results; the variation of every 10°C compaction temperature may make a difference of 0.8% for compactness and of 1.7 kN for Marshall stability; the compaction temperature greatly influences the samples quality and then the validity of mechanical test results.

Keywords

Road Engineering, Bituminous Mixture, Compaction Temperature, Sample Quality, Marshall Stability

试件成型温度对沥青混合料马歇尔稳定度的影响

廖伟¹, 延喜乐², 田建文², 延西利^{3*}

¹四川广安交通投资建设开发有限责任公司, 四川 广安

²陕西省榆林公路管路局, 陕西 榆林

*通讯作者。

³长安大学公路学院, 陕西 西安
Email: 342440588@qq.com, *xili.yan@chd.edu.cn

收稿日期: 2017年8月16日; 录用日期: 2017年8月31日; 发布日期: 2017年9月11日

摘要

为了定量研究试件成型温度对沥青混合料稳定度的影响, 利用马歇尔击实试验平台, 开展了沥青混合料的变温击实试验。研究选用了3种同品牌温拌沥青(ACMP1, ACMP2, ACMP3)和2种热拌沥青(70#基质、SBS改性), 制备了AC-13C型沥青混合料, 变化不同的初始击实温度, 成型了马歇尔试件, 测试了试件的压实度和稳定度, 分析了二者随击实温度的变化规律。结果表明: 在击实温度90℃~150℃范围内, 沥青混合料的压实度和稳定度随着击实温度的升高呈线性增长; 稳定度也随着压实度的增加呈线性增长, 符合传统试验结果; 击实温度每变化10℃, 会导致压实度约0.8%的变化和稳定度约1.7 kN的变化; 试件成型温度严重影响着试件成型质量, 从而影响着力学试验结果的有效性。

关键词

道路工程, 沥青混合料, 击实温度, 试件成型质量, 马歇尔稳定度

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

沥青混合料是一种温敏性极强的黏性材料, 因此, 温度对其技术性能的影响十分敏感且显著。在路用沥青混合料的技术设计中, 我国和世界许多国家或地区一样, 普遍采用了马歇尔试验作为基础性和前提性标准试验[1] [2]。事实上马歇尔试验可以考虑为两个部分: 试件制作和稳定度试验, 前者的成型质量直接影响着后者的准确性, 没有优质的试件, 便没有稳定可靠的力学试验数据。然而在实际工作中, 往往忽视了试件的成型质量, 尤其是试件的压实温度。在我国现行技术规范中[3], 推荐了马歇尔试件的压实温度: 基质沥青 120℃~150℃, 聚合物改性沥青 140℃~170℃。这样大的温差范围, 对试件成型质量和稳定度有没有影响和有多大的定量影响, 很是值得慎重考虑和细致研究。

沥青混合料又是一种颗粒性材料[4] [5], 其试件的成型质量必然取决于混合料的密实程度或压实度。因此, 论文研究对试件成型质量的识别主要以压实度为标准, 并以稳定度来验证。沥青混合料的压实性能从根本上影响着材料的结构特性及力学特性, 作为高等级公路的一种重要面层材料, 它的密实程度或压实度直接影响着其路用强度及使用质量。因此, 国内外许多学者总是致力于沥青混合料的压实性能、施工技术、路用性能分析、新材料研发等方面的研究, 并取得了丰硕成果[6]-[15], 但对马歇尔试件的成型质量, 特别是击实温度的控制, 却疏于严格控制或没有提出具体的数值影响, 必然难以正确评价沥青混合料的稳定度。定量研究试件击实温度对压实度和稳定度的影响, 现实意义显著。

论文研究选用了2种热拌沥青(70#基质沥青、SBS改性沥青)和3种同品牌温拌沥青(ACMP1、ACMP2和ACMP3), 制备了AC-13C型沥青混合料, 利用马歇尔击实试验平台, 变化不同的初始击实温度, 成型了马歇尔试件, 测试了压实度和马歇尔稳定度, 分析了二者随击实温度的变化规律及影响程度。结果表明, 击实温度每变化10℃, 会导致压实度约0.8%的变化和稳定度约1.7 kN的变化。试件成型温度极

大地影响着压实度和稳定度。

2. 沥青混合料设计

试验研究采用了 5 种沥青: 2 种热拌沥青(70[#]基质沥青、SBS 改性沥青)和 3 个同品牌不同型号的温拌沥青(ACMP1, ACMP2, ACMP3) [16], 按照规范[3]进行了沥青的基本技术性能测试, 结果见表 1。需要说明的是: 1) 对于上述 3 个不同型号的温拌沥青, ACMP 改性剂量依次为 10%、13%、17%, 以 70[#]石油沥青为基质; 2) ACMP 沥青改性剂的生产以废旧轮胎橡胶粉、废旧塑料粉为主要原料, 添加一部分有机助剂, 采用化学法合成, 变废为宝, 节约能源, 促进了环境保护, 具有良好的社会效益; 3) ACMP 温拌沥青常温下质地柔软呈膏状, 标准针入度试验难以操作, 故进行了低温针入度试验, 测试结果如图 1。

混合料集料采用 4 档石灰岩轧制碎石(1[#]~4[#]矿料)和石灰岩矿粉, 分别按技术规范[17]进行筛分试验, 并对 4 档矿料进行回配筛分, 得到基本符合 AC-13C 中值[18]的回配曲线, 同时测试了各档矿料的密度。矿料级配及密度测试结果见表 2。

按照技术规范[3]进行标准马歇尔试验, 测试分析了稳定度、流值、饱和度、剩余空隙率、矿料间隙率、毛体积密度等技术指标, 得到最佳沥青用量为 4.9%~5.1%。对于相同基质的沥青, 由于沥青用量基本上取决于矿料的比表面特性, 故采用相同矿料级配时, 针对试验研究选用的 5 种沥青, 统一取用 5% 的沥青用量, 制备了五种沥青混合料。并根据三相体系分析理论[4] [5], 按照下式(1)计算了 5 种沥青混合料的真密度亦即理论最大密度(γ_r), 结果见表 3, 以期后续计算混合料的压实度。

$$\gamma_r = \frac{100 + \omega}{\frac{\omega}{\gamma_b} + \sum \frac{a_i}{\gamma_i}} \quad (1)$$

式中: γ_b 为沥青的密度; γ_i 为各档矿料的密度; ω 为沥青用量; a_i 为各档矿料的用量百分数。

3. 变温击实试验

变击实温度试验(简称变温击实)充分利用现有的马歇尔击实试验平台, 设定不同的初始击实温度(T_d), 遵循试验规程[3], 对试件双面各击实 75 次, 量测试件的几何尺寸, 计算其压实度(K), 试验测试其马歇尔稳定度(MS), 以期定量分析沥青混合料的压实度变化规律 $K = f(T_d)$ 和稳定度的变化规律 $MS = f(T_d)$, 此处 f 为广义上的函数概念。

试验设定了 4 个击实温度, 即 $T_d = 90^\circ\text{C}$ 、 110°C 、 130°C 、 150°C , 每组 4 个试件, 共击实成型了 $4 \times 4 \times 5 = 80$ 个试件。变温击实试验控制要点为: 1) 采用沥青混合料拌和机和自动击实仪, 严格按照试验规程[3]对沥青混合料进行拌和和击实; 2) 沥青混合料称重 1200 g, 分托盘平摊, 在烘箱中保温约 45 min, 控制保温温度约为 $T_d + (5^\circ\text{C} \sim 10^\circ\text{C})$; 3) 利用插入式温度计和红外温度计, 测量击实套筒内混合料的温度, 达到设定温度 T_d 时即启动击实。

Table 1. Technical parameters of 5 kinds of bitumen

表 1. 试验用 5 种沥青的技术性能指标

沥青种类	70 [#]	SBS	ACMP1	ACMP2	ACMP3
密度	1.031	1.004	1.022	1.019	1.017
针入度			(见图 1)		
15 [°] C 延度/cm	>150	75.6			
5 [°] C 延度/cm			120.5	>150	>150
软化点/ [°] C	47.8	57.3	33.3	30.7	26.1

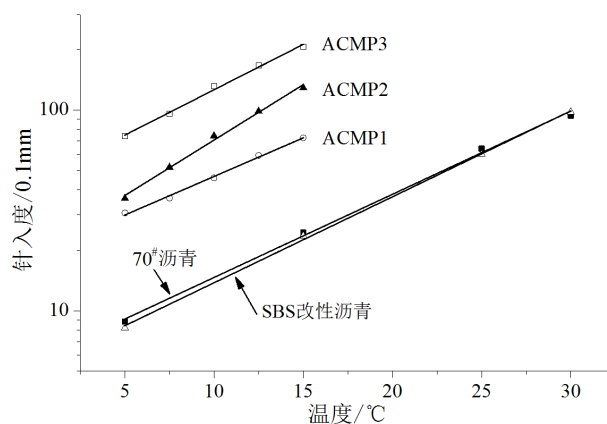


Figure 1. Variation of penetrability with temperature

图 1. 沥青针入度随温度的变化

Table 2. Aggregates composition and its density

表 2. 矿料级配组成及密度测试结果

矿料	1#料	2#料	3#料	4#料	矿粉
粒径/mm	9.5~16	4.75~9.5	2.36~4.75	0~2.36	0~0.075
配合比/%	22	21	17	36.5	3.5
密度	2.686	2.655	2.614	2.630	2.680

Table 3. Real density of 5 kinds of mixture by calculation

表 3. 五种沥青混合料的真密度计算结果

沥青混合料种类	70#	SBS	ACMP1	ACMP2	ACMP3
理论最大密度 γ_r	2.462	2.454	2.459	2.459	2.458

击实终了, 试件成型后, 通过量测试件的高度, 计算试件的视密度即表观密度(γ_a), 用以确定试件的压实度。压实度是一个相对于某个参照值的相对指标, 这个参照值在习惯上采用马歇尔理论密度[3]。但由于马歇尔理论密度是一个动态人为参数(如击实 50 次或 75 次、试验操作精度等), 不能真实稳定地反映颗粒性材料的结构密实程度, 故论文研究依然根据三相体系分析理论, 按下式(2)计算了试件的压实度 K , 结果见本文下节表 4。

$$K = \frac{\gamma_a}{\gamma_r} \times 100\% \quad (2)$$

式中: γ_r 为理论最大密度, 按表 3 取值; γ_a 为试件的表观密度, 通过称重量测体积确定。

变温击实试验每组 4 个试件的压实度相对误差均小于 0.2% [16], 试件高度均符合试验规程[3]的控制值 $63.5 \text{ mm} \pm 1.3 \text{ mm}$ 。然后测试了各个试件的马歇尔稳定度, 各组取其平均值为最终分析值, 详细结果见本文下节表 4。

4. 试验结果分析

汇总变温击实试验测试的压实度和稳定度结果见表 4 (均为 4 个试件的平均值), 并绘制分析关系图 $K \sim T_d$ 和 $MS \sim T_d$ 如图 2 和图 3 所示, 同时也绘制了 $MS \sim K$ 关系图如图 4 所示。

由黏性的沥青和具有内摩阻塑性的集料组成的沥青混合料, 在击实(或压实)时必然会发生重大的黏塑性变形, 服从黏塑性流变模型[19], 变形的大小取决于集料的骨架结构变形, 并受到沥青的黏度性质(大

Table 4. Compactness and Marshall stability of bituminous mixtures in different compaction temperature
表 4. 不同击实温度下沥青混合料的压实度和稳定度

混合料种类	击实温度/°C	压实度/%	稳定度/kN
70#混合料	90	91.5	4.4
	110	93.1	9.0
	130	95.0	12.0
	150	96.2	14.5
SBS 混合料	90	91.0	5.6
	110	92.7	10.0
	130	93.8	12.9
	150	95.4	15.4
ACMP1 混合料	90	92.3	4.1
	110	94.3	8.3
	130	96.2	10.7
	150	97.5	13.8
ACMP2 混合料	90	92.9	3.6
	110	94.6	8.1
	130	96.6	10.5
	150	97.9	13.0
ACMP3 混合料	90	93.3	3.5
	110	95.2	7.5
	130	96.8	10.0
	150	98.0	12.5

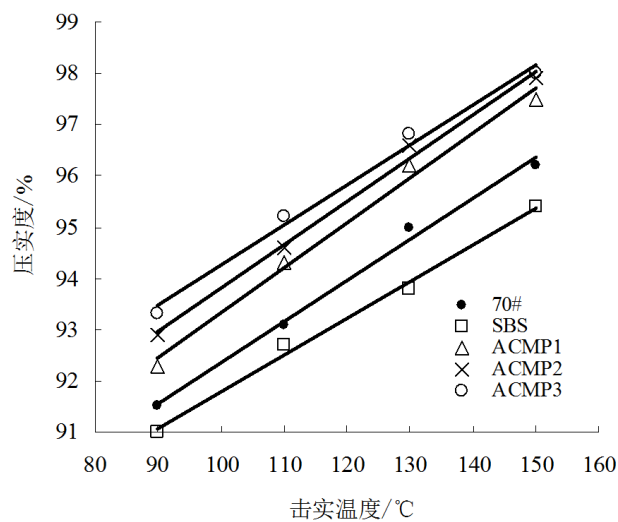


Figure 2. Variation of compactness with compaction temperature
图 2. 压实度随击实温度的变化

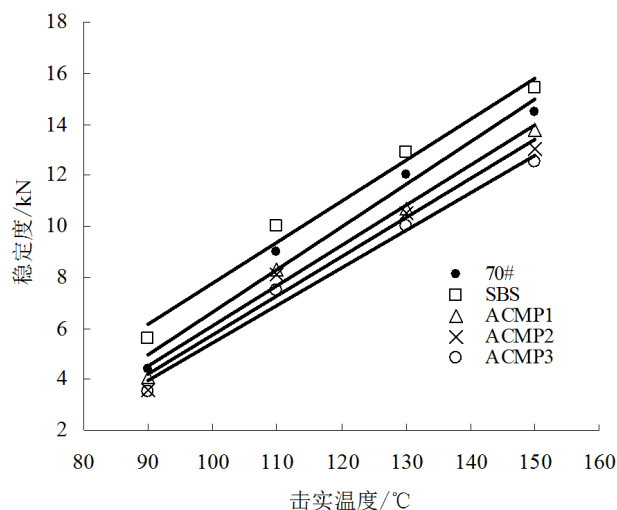


Figure 3. Variation of stability with compaction temperature
图 3. 稳定度随击实温度的变化

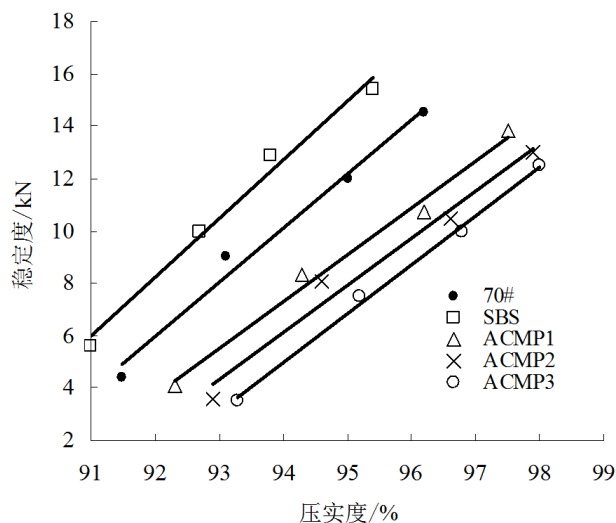


Figure 4. Marshall stability and compactness
图 4. 马歇尔稳定度与压实度

小、温敏性)影响。因而,对于相同级配的沥青混合料(如 AC-13C),压实变形的变化规律应该相同,差别仅在于沥青的种类即黏度不同。

事实上,由图 2 发现:在击实温度范围内,随着温度的升高,沥青混合料的压实度随之线性增大,且 5 种沥青混合料基本上相互平行。压实度(K)和击实温度(T_d)的这种试验关系可表示为:

$$K = \alpha_1 \cdot T_d + \beta_1 \quad (3)$$

式中: α_1 、 $\beta_1 > 0$, 为试验分析常数。显然,对于论文研究选用的 5 种沥青混合料,具有相同的 α_1 值,反映了相同的矿料级配;具有不同的 β_1 值,反映了不同沥青的黏度值不同[16]。

可见,如果集料是给定相同的,那么压实度随击实温度线性变化的斜率值必然相同,反映了相同基质沥青具有相同的温敏性[20]。而随着温度升高,沥青胶结体的黏度大幅减小,和易性增加,混合料变形随之增大,亦即压实度增大。

分析图 3 发现:在击实温度范围内,随着击实温度的升高,沥青混合料的马歇尔稳定度随之也呈线

性增大, 具有如下试验关系式:

$$MS = \alpha_2 \cdot T_d + \beta_2 \quad (4)$$

式中: α_2 、 $\beta_2 > 0$, 为试验分析常数。在力学原理上, 沥青混合料的强度与压实度具有线性增长关系[4] [5], 结合试验分析结果(图 4), 稳定度(MS)与压实度(K)存在如下试验关系:

$$MS = \alpha \cdot K + \beta \quad (5)$$

式中: α 、 $\beta > 0$, 为试验分析常数。将式(3)代入式(7), 即可得式(4), 进一步解释了稳定度随击实温度的变化规律。

5. 分析与认识

利用式(3)和式(4)对 $K \sim T_d$ 关系图和 $MS \sim T_d$ 关系图进行数值分析计算, 作为分析示例, 计算了击实温度每变化 10°C 时的压实度(K)和稳定度(MS)的变化, 结果如表 5 所列。

综合分析表 4 和表 5 所列数据、图 2~图 4 所示的变化规律, 可以发现: 1) 在 $90^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$ 的击实温度范围内, 沥青混合料的压实度、稳定度、击实温度互为线性增长关系, 稳定度随压实度的增长符合传统试验结果; 2) 击实温度每 10°C 的变化, 会导致约 0.8% 的压实度差, 并最终导致约 1.7 kN 的稳定度差, 试件成型操作及成型质量控制的重要性可见一斑, 很大程度上影响着后期力学试验和技术检测的准确性和有效性; 3) 相同击实温度下, ACMP 温拌沥青由于黏度较小[16], 比热拌沥青具有更好的和易性, 因而其混合料的压实度较大; 4) 同时, 在相同击实温度下, 尽管 ACMP 温拌沥青混合料的压实度较大, 但由于 ACMP 沥青的黏度较小, 对混合料的胶结力较小, 因而其马歇尔稳定度相对较小; 5) 达到相同压实度时, 温拌沥青混合料的击实温度比热拌混合料降低约 $15^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$, 说明 ACMP 沥青具有良好的温拌性能。

结果也表明, 尚若按规范[3]推荐的压实温度范围 $120^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$ (基质沥青)或 $140^\circ\text{C} \sim 170^\circ\text{C}$ (聚合物改性沥青), 对马歇尔试件进行击实, 或试件的成型温度差达到 $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ 时, 那么试件的压实度最大差值即可达到 2.4%, 并最终会导致稳定度差值达到 5.1 kN。显然, 试件的成型温度对试件的成型质量乃至力学试验结果会产生重大影响。因此, 在试件制作时, 对于同批次的试件, 必须控制好试件的成型温度, 以确保试件成型质量和后续力学试验结果的有效性。

此外, 沥青混合料的路用试验结果也表明[21], ACMP 温拌沥青混合料具有良好的路用技术性能, 可用于干线公路的路面铺筑和高速公路的路面应急抢险工程。

6. 结语

1) 在沥青混合料的常规压实温度范围内, 马歇尔试件的压实度、稳定度、成型时的击实温度, 三者互为线性增长关系。

2) 击实温度每变化 10°C , 会导致混合料压实度约 0.8% 的变化和稳定度约 1.7 kN 的变化, 试件成型温度严重影响着试件质量及后续力学试验结果的有效性。

3) 以传统的热拌基质沥青混合料为基准, 进行变温击实试验, 通过数值分析压实度和稳定度的变化,

Table 5. Difference of compactness and Marshall stability by every 10°C variation of compaction temperature

表 5. 压实温度每变化 10°C 时压实度和稳定度的变化

混合料种类	70 [#]	SBS	ACMP1	ACMP2	ACMP3
K/%	0.800	0.715	0.875	0.850	0.785
MS/kN	1.789	1.729	1.661	1.661	1.571

可以定量评价温拌沥青混合料的温拌效果。

4) 试验研究仍需扩展到其它类型沥青混合料的相关研究, 如 AC-20、SMA、OGFC 等, 以期进一步实证和推广研究成果。

基金项目

四川省交通科技项目(2011A7-4-1), 陕西省交通科技项目(12-03K)。

参考文献 (References)

- [1] 申爱琴. 道路建筑材料[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [2] 邓学钧. 路基路面工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [3] JTG E20-2011, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [4] 张登良. 沥青路面[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [5] Yan, X.L. (1992) Comportement Mécanique des Enrobés au Bitume et au Bitume-polymère Application des Essais Triaxiaux de Révolution. Institut National des Sciences Appliquées et Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Lyon, Thèse de Doctorat.
- [6] 《中国公路学报》编辑部. 中国道路工程学术研究综述·2013[J]. 中国公路学报, 2013, 26(3): 1-36.
- [7] 李宇峙, 杨瑞华, 邵腊庚, 等. 沥青混合料压实特性分析[J]. 公路交通科技, 2005, 22(3): 29-33.
- [8] Corrigan, M. (2005) Warm Mix Asphalt Technology. AASHTO Standing Committee on Highways Technical Meeting, September 16 2005.
- [9] AASHTO Designation: MP2-02 Specification for Superpave Volumetric Mix Design.
- [10] 李立寒, 李新军, 钟陡鑫. 沥青混合料压实特性的影响因素分析[J]. 中国公路学报, 2001, 14(4): 31-34.
- [11] 蒋玮, 沙爱民, 裴建中, 等. 多孔沥青混合料旋转压实特性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2010, 30(5): 11-16.
- [12] 鲁正兰, 孙立军, 孙希瑾. 成型温度对沥青混合料体积参数的影响分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 2(34): 187-193.
- [13] U.S. Department of Transportation, *et al.* (1998) Simulation, Imaging and Mechanics of Asphalt Pavement. McLean Turner-Fairbank Highway Research Center.
- [14] 左锋, 叶奋. 国外温拌沥青混合料技术与性能评价[J]. 中外公路, 2007, 27(6): 164-165.
- [15] 李宁利, 李铁虎, 陈华鑫, 等. 改性沥青混合料的拌和与压实温度[J]. 中国公路学报, 2007, 20(2): 40-44.
- [16] 安舒文. 热拌和温拌沥青混合料的马歇尔击实性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2014.
- [17] JTG E42-2005. 公路工程集料试验规程[S].
- [18] JTG F40-2004. 公路沥青路面施工技术规范[S].
- [19] 延西利, 梁春雨, 艾涛, 等. 基于沥青与石料界面剪切的黏塑性流变模型研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(2): 136-144.
- [20] 延梦璐. 沥青的布氏黏度测试及流变特性分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2013.
- [21] 杜鹏. ACMP 温拌沥青混合料的路用性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2013.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：hjce@hanspub.org