

沥青路面真空压实的试验研究

陈世斌^{1,2}, 袁永强^{1,2}, 姚运仕^{1,2}, 李晓辉^{1,2}

(1. 长安大学 公路养护装备国家工程实验室, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要: 为了强化沥青路面微观结构、提高沥青路面压实度及服役性能, 提出了沥青路面真空压实技术. 采用理论分析与试验相结合的方法, 在分析真空压实机理的基础上, 设计并制造了小型真空压实样机, 对沥青混合料完成了静碾压、真空静碾压、振动压实、真空振动压实四种不同工况下的对比试验. 试验结果表明: 在相同试验条件下, 采用真空压实时, 得到的沥青路面中沥青饱和度更大、矿粉空隙率和路面空隙率更小且需要的压实遍数更少; 对沥青混合料进行内部结构 SEM 测试, 发现真空压实的微观结构更致密. 说明真空压实能有效强化压实过程, 为提高沥青路面压实质量提供了新思路.

关键词: 路面工程; 真空压实; 沥青路面; 微观结构; 空隙率

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)06-0901-05

Experimental study on vacuum compaction of asphalt pavement

CHEN Shibin^{1,2}, YUAN Yongqiang^{1,2}, YAO Yunshi^{1,2}, LI Xiaohui^{1,2}

(1. National Engineering Laboratory for Highway Maintenance Equipment, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment of MOE, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to strengthen the microstructure of asphalt pavement and improve the compaction degree and service performance of asphalt pavement, the vacuum compaction technology of asphalt pavement is proposed in this paper. Based on the analysis of the mechanism of vacuum compaction, the vacuum compaction prototype was designed and fabricated by the combination of theoretical analysis and experiment, and the contrast test (static compaction, vacuum static compaction, vibration compaction and vacuum vibration compaction) under different conditions was completed. The experimental results show that under the same experimental conditions, when the vacuum compaction is used, the asphalt pavement has less porosity and mineral powder porosity and more asphalt saturation, which also needs less compaction number. And it is found that the microstructure is denser under vacuum compaction by SEM test. It shows that vacuum compaction can effectively strengthen the compaction process and provide new ideas for improving the compaction quality of asphalt pavement.

Key words: pavement engineering; vacuum compaction; asphalt pavement; microstructure; void ratio

近年来, 随着我国公路交通的迅猛发展, 沥青路面已占据我国高速公路的 90% 以上, 伴随着我国从交通大国向交通强国的迈进, 提高沥青路面服役性能和寿命是重要一环^[1-3]. 压实是路面建设中一个重要过程, 相关研究表明高效的压实可使沥青路面取得更高的压实度、增强沥青路面抗变形能力、提高沥青路面使用寿命^[4-6]. 为提高路面的质量, 许多学者从材料压实特性、新的压实技术及工艺等方面展开了广泛的研究. 马士宾研究集了料棱角对沥青混合料性能的影响, 认为优化粗、细集料的棱角能改善沥青混合料的微观结

构、提高抗车辙性能、降低混合料的抗开裂性^[7]; 朱浩然研究了活性橡胶沥青胶结料的改性机理, 发现其能分散在沥青内部形成网状互联结构, 显著提高沥青胶结料高温性能^[8]; YOU 等认为纳米黏土改性沥青能够增加沥青路面承受剪切力, 提高粘结强度^[9]. 在压实技术和工艺方面, 除了传统的静压、振动压实技术, 也出现了一些新技术^[10-12]. YAO 设计了双频振动压路机, 实现更深的压实深度^[13]; JIANG 等的研究认为垂直振动压实方法能提高沥青混合料马歇尔稳定性、劈裂强度和抗剪切力^[14]; TAN 等采用光纤布拉格光栅传感技术对

收稿日期: 2018-03-12

修改稿日期: 2018-11-16

基金项目: 国家自然科学基金(51208044, 51508031); 陕西省自然科学基金项目(2017JM5020, 2017JM5105); 中央高校专项资金项目(300102258202)

第一作者: 陈世斌(1980—), 男, 副教授, 硕导, 主要从事工程机械作业质量控制研究. E-mail: sbchen@chd.edu.cn

沥青路面压实进行质量控制,有效提高压实均匀性及减少压实遍数^[15];XU 等评估了智能压实技术(IC),认为计算机辅助技术能够改善沥青路面压实质量^[16]。上述压实技术或工艺是基于传统压实方法的深化,沥青路面的空隙率仍然有降低可能。

因此,本文提出沥青路面真空压实方法,旨在突破传统压实方法的束缚,使沥青混合料在真空环境中压实,以强化其微观结构,进一步提高沥青混合料压实质量。

1 真空压实机理

沥青混合料是由气相(空气)、液相(沥青)和固相(集料)组成的三相体系。压实的实质是移除气相,使液相和固相发生重新排列而减少空隙率,因微观结构得到强化而提高宏观压实质量。

沥青混合料中的空气主要有两部分:一部分是存在于开口孔隙与大气连通的自由气体,另一部分是封闭于闭口孔隙的气体,见图 1。在压实时,对于开口孔隙,其中大部分自由气体被直接挤出,少部分自由气体因开口孔隙闭合形成新的封闭气体;对于闭口孔隙,其中的一部分封闭气体因气泡破裂而变成自由气体排出,其余部分则因闭口孔隙受挤压而分裂为多个更小气泡而被封闭。随着压实的进行,气体不断被排出,沥青混合料持续发生塑性变形而密实。当压实到一定程度,自由气体变得很少,剩下难于溢出存在于闭口孔隙的封闭气体,这些被沥青包裹的大量气泡形成了数量可观的“气体弹簧”,与所支撑的集料形成“弹簧质量系统”,抵抗沥青混合料塑性变形,见图 2,其法向和切向弹簧刚度可表征公式 1 和公式 2,压实中将耗散大量压实能量,同时也使压实变得困难,。因此,将沥青混合料置于真空室中,利用内外压力差打破气相、液相和固相间暂时的力平衡关系,消除“气体弹簧”效应,使液相和固相发生重新排列而减少空隙率、提高承载力。

$$K_{mm} = \frac{k_n^A k_n^B k_{mm}^B}{k_n^A k_n^B + k_n^A k_{mm}^B + k_n^B k_{mm}^B} = \frac{K_{mm}^B K_{mm}^A}{K_{mm}^B + K_{mm}^A} \quad (1)$$

$$K_{ms} = \frac{k_s^B k_s^A k_{ms}^B}{k_s^B k_s^A + k_s^A k_{ms}^B + k_s^B k_{ms}^B} = \frac{K_{ms}^B K_{ms}^A}{K_{ms}^B + K_{ms}^A} \quad (2)$$

式中: k_n^A 、 k_n^B 、 k_s^A 、 k_s^B 分别为集料单元 A、B 的法向和切向弹簧刚度, N/m; k_{mm}^B 、 k_{ms}^B 分别为沥青单元中 Maxwell 元件的法向和切向弹簧刚度, N/m。

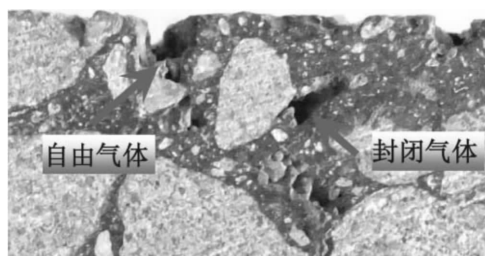


图 1 沥青混合料内部气孔分布

Fig. 1 Airhole distribution inside asphalt mixtures

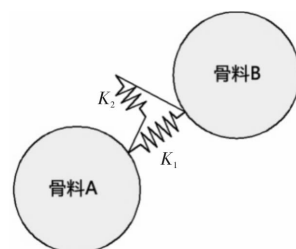


图 2 “气体弹簧”效应示意图

Fig. 2 Schematic diagram of “gas spring” effect

2 真空压实样机的设计

真空室作用于被压实材料时,即微孔网络处于真空室下,这样就破坏了沥青混合料内部相互作用的气、液、固三相间不稳定的力平衡,因此,需要在沥青混合料压实的时候形成一个真空环境,图 3 所示的真空压实样机结构示意图。图 3 中,通过前后两个钢轮、以及处于同一水平面的两边支撑架形成一个封闭空间,当需要形成真空时,采用高压离心风机抽出封闭空间的空气,最终形成一个真空室与压实的沥青材料共同作用的环境,当压路机行走时,路面材料始终处在一个真空压实的状态下。

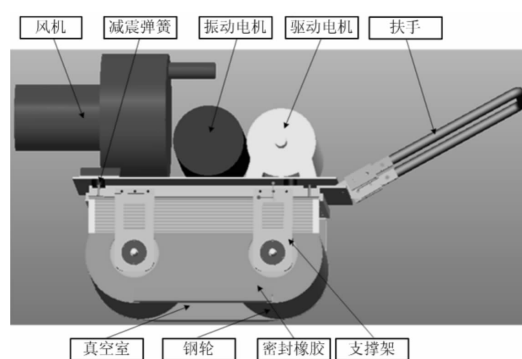


图 3 真空样机三维模型

Fig. 3 Three-dimensional model of vacuum prototype

真空压实试验样机主要包括动力装置、振动动力装置、真空罩、钢轮、机架和扶手等六部分。



图 4 真空压实样机

Fig. 4 Vacuum compaction prototype

真空度通过一个三通阀的开口来调节, 图 4 所示为真空压实样机, 表 1 为真空压实试验样机的主要参数. 通过控制振动电机及风机开启, 该样机能完成静压、振动压实、静压+真空和振动+真空等四种不同工况的对比试验.

表 1 真空压实试验样机主要参数

Tab. 1 Main parameters of vacuum compaction test prototype

项目	数值
工作质量/kg	350
振动轮直径/mm	300
振动轮宽度/mm	420
行走速度/ $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	1.5
振动频率/Hz	47
名义振幅/mm	0.3
激振力/kN	2.72
驱动功率/kW	2.2
振动功率/kW	3
轴距/mm	420
最大真空度/MPa	-0.02

3 沥青路面真空压实试验研究

3.1 试验方案

试验对象为细粒式 AC-13 冷拌沥青混合料, 配比见表 2. 采用双螺旋无轴搅拌机搅拌, 人工摊铺成原高度 7 cm 的 $4.5 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的松铺层. 试验共有四种工况: 常规静压、静压+真空、常规振动压实和振动+真空, 其中两种真空压实时真空度值为 -0.01 MPa . 四种工况的压实工艺相同, 首先预压 2 遍, 然后在不同的区域分别压实 2 遍、4 遍、6 遍、8 遍和 10 遍, 根据试验要求取芯进行试验测试.

表 2 冷拌沥青混合料的配比

Tab. 2 Mix proportion of cold mixed asphalt mixture

组分种类	配比百分含量/%
0~4 mm	30
4~11 mm	46
11~13 mm	24
水泥	0.3
水	2
乳化沥青	7.5

3.2 空隙率试验及结果分析

为了评价沥青路面微观结构, 采用表干法对沥青路面的空隙率进行测量, 图 5 为沥青路面在不同工况下的空隙率. 对比静压和静压+真空下沥青混合料空隙度, 在压实 2 遍后, 静压路面空隙率为 18.15%, 静压+真空路面空隙率为 15.17%; 随着压实遍数增加, 静压+真空的空隙率总体趋势是小于静压; 但在碾压遍数为 6 次之后, 静压+真空下的空隙率比单纯的静压变化小, 这表明静压+真空工艺在压实前期就具有较好的压实效果, 即需要较少的压实遍数就能达静压的压实效果. 随着压实遍数进一步增加, 静压+真空的空隙率还能进一步减小. 进一步对比振动压实与振动压实+真空的效果, 发现在压实 10 遍后, 振动压实+真空方法的空隙率始终低于普通的振动压实, 平均低 1% 左右, 表明振动压实在引入真空这一效应后, 起到了对路面微观效果强化的作用; 另一个特征是, 在压实 6 遍后, 振动压实+真空的空隙率变化不明显, 表明由于真空的作用, 其在很少的压实遍数下就能实现更好的压实效果.

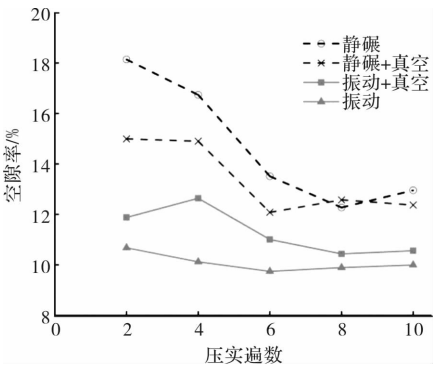


图 5 空隙率随压实遍数的变化

Fig. 5 The variation of void fraction with compaction number

图 6 与图 7 分别为四种不同压实工况沥青路面的沥青饱和度和矿料空隙率随压实遍数的变化. 从图 6 上可知, 从整体趋势上看, 在不同工况下,

随着压实遍数的增加沥青饱和度呈现增大的趋势,在碾压的前6遍中,增加较为明显,压实6遍后,增加趋势减缓;对比普通压实与真空压实下的沥青饱和度与压实遍数的变化,发现加入真空作用后,无论是静压还是振动压实,沥青路面的沥青饱和度大于未加入真空前,其中振动压实更为明显,在碾压10遍后,路面沥青饱和度平均增加值1.98%,在压实4遍时更是从42.1%增加到47.2%,高于普通振动压实10遍时的值,试验结果表明引入真空压实能够有效的增加沥青路面中沥青的饱和度,增加微观结构的紧密型.图7中同样能够看出,当引入真空压实效应后,无论是静压还是振动压实,矿粉间隙率比未引入真空时有明显减小,表明在真空环境下能够起到强化作用.

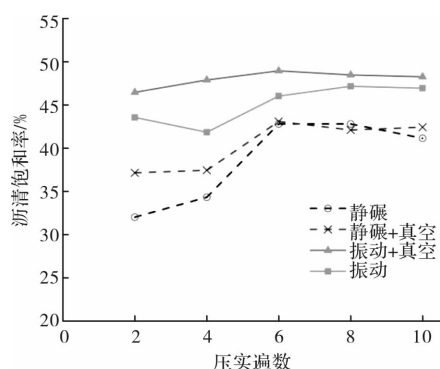


图6 沥青饱和度随压实遍数的变化

Fig. 6 Variation of saturation of asphalt with compaction number

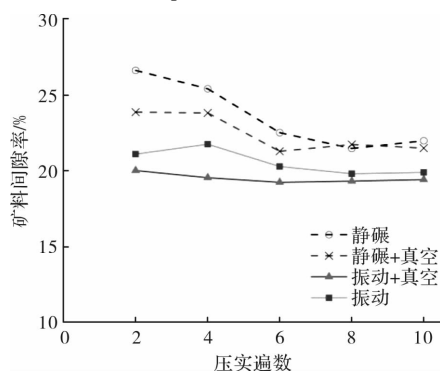


图7 矿料间隙率随压实遍数的变化

Fig. 7 Variation of mineral clearance rate with compaction number

为进一步验证真空压实对沥青路面微观结构的强化作用,对四种工况下沥青路面微观结构进行分析,图8为四种工况下沥青路面内部的SEM.由图8(a)知,在静压下,沥青路面的沥青胶浆与集料界面处有宽度较大的连续裂纹,且分界面清晰并分布较多窄小的微裂纹;由图8(b)可知,在静压+真空下,沥青混合料沥青胶浆与集料界面

处也出现一些裂纹,但其宽度不大、不连续且彼此相互独立;由图8(c)看出,在振动压实下,沥青胶浆与集料界面处有少许断断续续的裂纹,裂纹宽度较小,边界模糊,沥青胶浆-集料界面成丝絮状粘接相互间较独立;由图8(d)可知,在振动压实+真空下,在沥青胶浆与集料界面间几乎没有微裂纹,与其它工况相比,界面粘结紧凑、平滑微观结构最好.可见,无论静压还是振动压实,引入真空时沥青混合料中沥青胶浆-集料界面处的裂纹数量明显减少,宽度较窄,呈现出更为紧凑的微观结构.

由上述试验可知,真空压实能够极大的强化沥青路面的微观结构,增加颗粒间的紧密型,最终实现压实度的提高.其原因主要归结于以下两点:一方面沥青混合料中存在大量的微孔网络,当真空室与其相连并作用时,由于负压的作用,破坏了沥青混合料内部相互作用的气、液、固三相间不稳定的力平衡,沥青混合料中形成了压力差,通道中的气体就会朝气压低的真空室内流动,使颗粒之间更为紧密;另一方面,正常压实下难以刺破的闭口孔隙将有一部分破裂,其中封闭气体更易排出,一部分孔隙受挤压而分裂为多个更小的气泡孔.这两种现象在压实过程同步交叉发生,不断相互演变,随着压实的进行,气体不断被排出,沥青混合料持续发生塑性变形而密实.

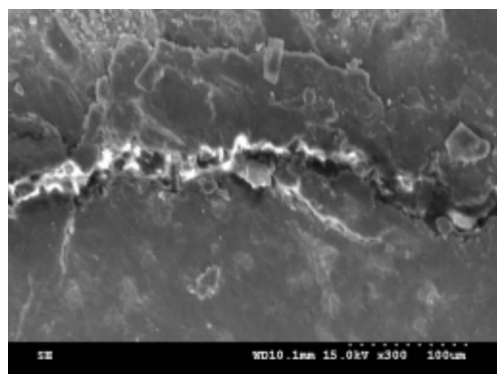
4 结论

对真空压实样机进行设计并制造,利用真空压实样机对沥青混合料进行了不同工况下的压实试验对比,主要结论如下:

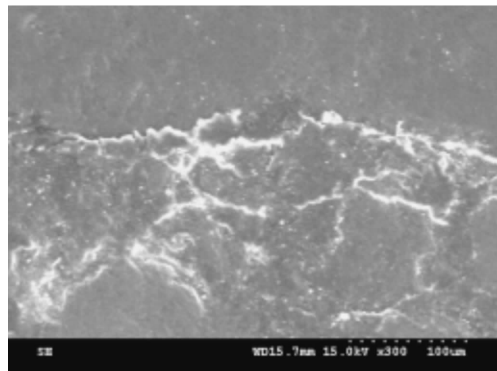
(1)分析了真空压实机理,完成了手扶式真空样机设计与制造,实现静压、静压+真空、振动压实、振动压实+真空四种不同工况下的压实试验;

(2)无论静压、振动压实,在加入真空作用后,静压+真空下沥青路面空隙率比静压下减小了4.53%,振动+真空下比振动下降低了5%,矿粉间隙率和沥青饱和度也显示真空压实具有更好的效果.

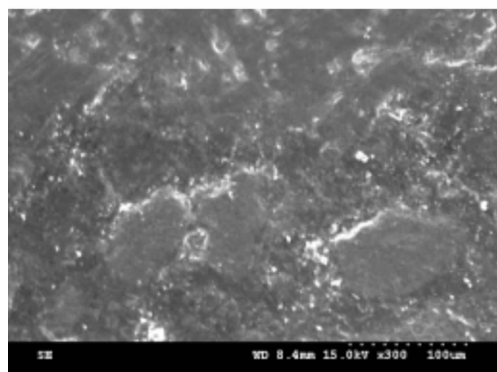
(3)对四种工况下的沥青混合料进行SEM发现,带真空压实时沥青混合料中沥青胶浆-集料界面处的裂纹数量明显减少,宽度较窄,对内部颗粒的微观结构具有明显的强化作用.



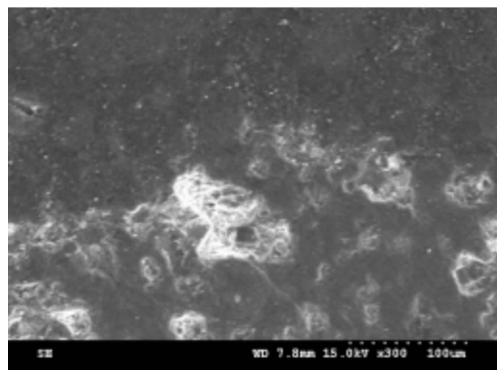
(a)静碾压



(b)静碾压+真空



(c)振动压实



(d)振动压实+真空

图8 不同压实工况下沥青混合料的SEM图像

Fig.8 SEM images of asphalt mixtures under different compacting conditions

参考文献 References

- [1] 高建纲. 城市沥青路面施工质量控制研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [2] 张占军,王笑风. 沥青路面使用性能的双参数修正预测模型[J]. 交通运输工程学报, 2007,7(5):54-57.
ZHANG Zhanjun, WANG Xiaofeng. Service performance prediction model of asphalt pavement with two corrected parameters[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007,7(5):54-57.
- [3] HAININ M. R, YUSOFF N. I. M, MOHD. K, et al. The effect of lift thickness on permeability and the time available for compaction of hot mix asphalt pavement under tropical climate condition[J]. Construction and Building Materials, 2013,48: 315-324.
- [4] 吴旷怀,张肖宁. 相同条件下大样本沥青混合料的疲劳性能[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2007, 35(7):31-36.
WU Kuanghuai, ZHANG Xiaoning. Fatigue properties of large-sample asphalt mixture under the same conditions[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2007, 35(7): 31-36.
- [5] SCOTT Shuler, MICHAEL. D. Nobe. Edge cracking in residential development hot mix asphalt pavements [J]. International Journal of Construction Education and Research, 2007,3:179-197.
- [6] SHU Xiang, HUANG Baoshan. Dynamic modulus prediction of HMA mixtures based on the viscoelastic micromechanical model [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2008,20(8):530-5381.
- [7] 马士宾,袁文瑞,王清洲,张彩利. 集料棱角对沥青混合料性能影响研究[J]. 中外公路,2015, 35(2): 207-212
MA Shibin, YUAN Wenrui, WANG Qingzhou, ZHANG Caili. Study on the influence of the angular of aggregate on the performance of asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2015, 35(2): 207-212.
- [8] 朱浩然,蔡海泉,李峰,等. 活性橡胶沥青胶结料微观结构分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016,35(4):35-39.
- [9] ZHU Haoran, CAI Haiquan, LI Feng, et al. Micro-structure analysis of the reacted and activated rubber asphalt binder[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2016,35(4):35-39.
- [10] YOU Z P, MILLS-BEALE J, FOLEY J M, et al. Nanoclay-modified asphalt materials: Preparation and characterization[J]. Construction & Building Materials, 2011,25(2):1072-1078.

(下转第912页)

- [14] 王洋,方创琳,王振波. 中国县域城镇化水平的综合评价及类型区划分[J]. 地理研究, 2012, 31(7): 1305-1316.
WANG Yang, FANG Chuanglin, WANG Zhenbo. The study on comprehensive evaluation and urbanization division at county level in China[J]. Geographical Research, 2012, 31(7): 1305-1316.
- [15] 李国柱. 经济增长与环境协调发展的计量分析[M]. 北京: 中国经济出版社, 2007.
LI Guozhu. The coordinated development of economic growth and environment: an econometric analysis[M]. Beijing: China Economic Publishing House, 2007.
- [16] 刘万红,周义,周怡. 中部地区省会城市房地产与城市经济系统耦合协调研究[J]. 资源开发与市场, 2017, 33(6): 699-704.
LIU Wanhong, ZHOU Yi, ZHOU Yi. Analysis on coupling development between real estate and urban economic in Provincial Capitals of Central China[J]. Resource Development & Market, 2017, 33(6): 699-704.
- [17] 仇兵奎, 张惠. 武汉市城镇化与房地产发展耦合协调度分析[J]. 地域研究与开发, 2015, 34(2): 81-84.
QIU Binkui, ZHANG Hui. Study on the coordination between urbanization and real estate development of Wuhan city[J]. Areal Research and Development, 2015, 34(2): 81-84.
- [18] 刘玉, 潘瑜春, 唐林楠. 京津冀地区县域农业发展与农民收入的时空耦合特征[J]. 经济地理, 2017, 37(2): 141-147.
LIU Yu, PAN Yuchun, TANG Linnan. Spatiotemporal coupling characteristics of agricultural development and farmers' income at county-level in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Economic Geography, 2017, 37(2): 141-147.

(编辑 吴海西)

(上接第 905 页)

- [11] 曾国东,罗青,陈群. 集料级配对沥青混合料压实性影响的试验研究[J]. 中外公路, 2010, 30(3): 296-300.
ZENG Guodong, LUO Qing, CHEN Qun. Experimental study on the effect of aggregate gradation on compaction of asphalt mixtures[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2010, 30(3): 296-300.
- [12] 徐清刚. 双钢轮振动压路机面层压实工艺研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
XU Qinggang. Study on the compaction technology of double-drum vibratory roller for asphalt pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [13] VINCENT Dubois, ROCHE Chantal De La, BURBAN Livier. Influence of the compaction process on the air void homogeneity of asphalt mixtures samples[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(6): 885-897.
- [14] YAO Yunshi, FENG Zhongxu, CHEN Shibin, et al. Design and Fabrication of a Road Roller with Double-Frequency Composed Vibration and Its Compaction Performance[J]. Arab J Sci Eng, 2014, 39(12): 9219-9225.
- [15] JIANG Y. J., FAN L. F., An experimental investigation of optimal asphalt-aggregate ratio for different compaction methods[J]. Construction and Building Materials, 2015, 91: 111-115.
- [16] TAN Yiqiu, WANG Haipeng, MA Shaojun, et al. Quality control of asphalt pavement compaction using fibre Bragg grating sensing technology[J]. Construction and Building Materials, 2014, 54(3): 53-59.
- [17] XU Qinwu, CHANG George K., Evaluation of intelligent compaction for asphalt materials[J]. Automation in Construction, 2013, 30: 104-112.

(编辑 吴海西)