

# 双钢轮振动压路机与路面有效接触 宽度研究及应用

焦生杰<sup>1</sup>,徐清刚<sup>1</sup>,刘秋宝<sup>2</sup>,张翠红<sup>1</sup>

(1. 长安大学 公路养护装备国家工程实验室,陕西 西安 710064; 2. 三一重工股份有限公司,湖南 长沙 410100)

**摘 要:**为了提高双钢轮振动压路机对路面的压实质量与压实效率,需确定出良好的压实速度与振动频率的匹配关系。从双钢轮振动压路机与路面的接触截面分析入手,基于半功率点的概念,提出有效接触宽度的概念并建立数学模型;在已有冲击间距理论基础上,引入重叠度来重新定义压实速度与振动频率的对应关系,并将有效接触宽度模型和重叠度值指标应用于沥青混合料压实试验进行验证。研究表明:有效接触宽度的概念模型可以作为选择双钢轮振动压路机工艺参数组合时的理论依据,在压实过程中随着碾压遍数的增加,材料由塑性逐渐变为弹性,有效接触宽度修正系数  $m$  由 0.5~1.0 逐渐变化;通过控制重叠度的大小,在相同压实遍数时材料的均匀性不同,当选取的重叠度获得的均匀性较好时,所对应的振动频率与压实速度具有较好的匹配关系;AC-13 沥青混合料的压实试验结果与理论结果吻合较好,当变异系数为 0.4% 时既可以保证压实度的均匀性,又可以保证压实效率,得出的压路机高频振动下每遍的压实速度能保证压实质量,路面压实度和平整度均符合沥青混合料高速公路交工验收标准。由有效接触宽度模型和重叠度概念确定的压实速度与振动频率的参数组合为提高路面压实质量提供了理论保障。

**关键词:**机械工程;双钢轮振动压路机;有效接触宽度;重叠度;压实速度;振动频率

**中图分类号:**U415.521

**文献标志码:**A

## Research and application on effective pavement contact width of double-drum vibratory roller

JIAO Sheng-jie<sup>1</sup>, XU Qing-gang<sup>1</sup>, LIU Qiu-bao<sup>2</sup>, ZHANG Cui-hong<sup>1</sup>

(1. Highway Maintenance Equipment National Engineering Laboratory, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Sany Heavy Industry Co., Ltd., Changsha 410100, Hunan, China)

**Abstract:** In order to improve the compaction quality and compaction efficiency of double-drum vibratory roller on pavement, the good matching relationship between compaction velocity and vibration frequency was determined. From the analysis on contact section between double-drum vibratory roller and pavement, and on the basis of half-power point, the concept of effective contact width of double-drum vibratory roller was put forward and its mathematical model was presented. Based on the existing impact spacing theory, the degree of overlap was introduced to redefine the corresponding relation of compaction velocity and vibration frequency. And the model

of effective contact width and index of overlap degree were used in the compaction test of asphalt mixture to verify it. The results show that the conceptual model of effective contact width can be used as the theoretical basis for selecting the process parameters combination of double-drum vibratory roller. It can be pointed out that with increasing rolling times in the compaction process, material is changed from plastic to elastic and correction coefficient of effective contact width gradually changes from 0.5 to 1.0. By controlling the size of degree of overlap, materials after the same compaction times will have different degree of uniformity. When the selected degree of overlap obtains good uniformity, the corresponding compaction velocity and vibration frequency has good matching relationship. The compaction test results of AC-13 asphalt mixture are in good agreement with the theoretical results. When the variation coefficient is 0.4%, compaction uniformity and compaction efficiency can be guaranteed. Then the compaction velocity of roller in every compaction time under high frequency vibration is also obtained. The pavement compactness and smoothness are in accordance with the acceptance standard of asphalt mixture highway. The parameter combination of compaction velocity and vibration frequency determined by the model of effective contact width and the concept of overlap degree provides a theoretical guarantee for improving the quality of pavement compaction. 2 tabs, 10 figs, 25 refs.

**Key words:** mechanical engineering; double-drum vibratory roller; effective contact width; degree of overlap; compaction velocity; vibration frequency

## 0 引言

双钢轮振动压路机是沥青混合料面层压实中的主要施工机械,其压实工艺参数的选取直接影响路面的施工质量和效率。目前,国内外学者对压路机施工参数与压实质量的关系进行了研究与探讨。美国国家公路与运输协会提出了典型级配沥青混合料在不同厚度下适宜的碾压工艺,包括机型、碾压遍数及方式等<sup>[1]</sup>。Hunter 等比较了室内不同成型方式与现场直接碾压的沥青混合料间的各项性能<sup>[2]</sup>; Kandil 研究了影响沥青路面压实质量的因素,并提出改进措施<sup>[3]</sup>; Zhao 采用离散元仿真对压路机的压实遍数、压实速度和压路机吨位等参数进行仿真计算,并以级配空隙率作为衡量最佳压实效果的指标<sup>[4]</sup>;柳朝印等总结了碾压厚度、速度、遍数、环境因素以及碾压工艺等对压实效果的影响<sup>[5-7]</sup>;胡涛等通过室内、室外试验分析了激振力、振幅、振动频率、静面压力对压实性能的影响<sup>[8-9]</sup>;徐永杰等提出了确定压路机压实作业参数的遵循依据和原则<sup>[10-11]</sup>。也有一些学者采用不同的研究方法确定了特定施工工况下所需要的压路机施工工艺参数。李汉光等从能量等效角度确定沥青路面达到一定的密实度所需要的碾压遍数<sup>[12]</sup>;张志峰等通过分析振动压实过程中土壤竖向应力沿轮宽方向的衰减特性,确定出了相应的重叠宽度<sup>[13]</sup>;李彦伟等提出了以压实指数为路

面压实效果的评价指标,通过调整碾压遍数、碾压相对位置等以达到较均匀的压实效果<sup>[14]</sup>。在压路机碾压工艺参数中,压实速度、振动频率对压实度的均匀性影响较大,确定好压路机作业过程中的压实速度与振动频率的匹配关系,对提高路面的压实质量与压实效率具有重要意义<sup>[15-19]</sup>。国外主要采用冲击间距理论研究压实速度与振动频率的匹配关系<sup>[20]</sup>。部分中国学者研究了振幅对压实均匀性的影响。车胜创指出路面压实机械在施工过程中的稳态响应“拍”是导致路面不平整和压实不均匀的主要原因<sup>[21]</sup>;周龙刚等分析得出沿轮宽方向上的振幅均匀性是确保压实均匀性的最基本要求<sup>[19]</sup>;张中华等通过采用实时提取的振动信号对压实频率进行控制的方法,确定出最大振幅时对应的振动频率,即振动压路机的最佳压实频率,但其并未进一步研究压实速度与振动频率之间的关系<sup>[22]</sup>;冯建亮等指出碾压速度主要由振动冲击间距即振动频率所决定<sup>[23]</sup>;张晓波等推导了压实速度与振动频率对应关系的表达式,认为基于碾压速度的变化波动不能过大,碾压速度和振动频率应与被压材料的状态相适应<sup>[24]</sup>,但并未进行更深入的理论研究,特别是其未考虑一个振动周期过程中压路机与路面的实际接触情况和有效作用区域。

本文从双钢轮振动压路机与路面的接触截面分析入手,基于半功率点的概念,提出有效接触宽度的

概念并建立数学模型,在前人提出的冲击间距理论基础上,引入重叠度指标,并通过控制重叠度的大小来影响路面材料的均匀性,当选取的重叠度获得的均匀性较好时,所对应的振动频率与压实速度具有较好的匹配关系。通过压实试验确定压路机在不同压实遍数时同一频率对应的压实速度,从而定量地确定出压实速度与振动频率的匹配关系,以期振动压路机的压实工艺参数研究提供借鉴。

1 钢轮与材料接触分析

1.1 接触截面分析

压路机与路面接触时,其接触部分在理想状态下是沿钢轮宽度上的一条线段,但由于被压材料具有一定的弹塑性,且钢轮对材料施加作用力,实际上钢轮与材料的接触部分是一条具有一定宽度的、横向长度等于钢轮宽度的弧面。对于静碾光轮压路机与振动压路机,这段接触截面的形状也有所区别。

静碾光轮压路机与材料接触截面的形状如图 1 所示<sup>[25]</sup>,其接触面的弧长取决于钢轮对混合料的压入深度。

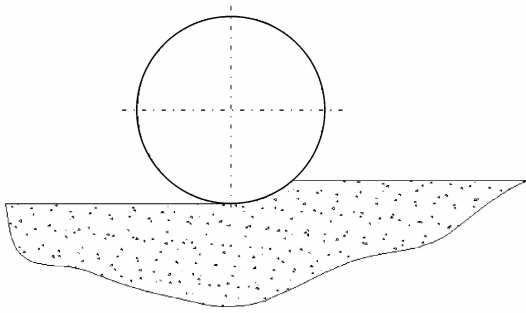


图 1 静碾光轮压路机与材料的接触截面

Fig. 1 Contact section between static compaction roller and material

对于振动压路机,由于激振器的高速旋转产生了激振力,在振动压路机压实过程中,激振器产生的激振力表达式为<sup>[10]</sup>

$$F_0 = M_e \omega^2 = m_i r \omega^2 \tag{1}$$

式中: $F_0$  为激振力(kN); $M_e$  为静偏心距(mm); $m_i$  为偏心块质量(kg); $r$  为偏心块偏心距(mm); $\omega$  为偏心块旋转的角速度(rad/s), $\omega = 2\pi f$ , $f$  为压路机的振动频率(Hz)。

则激振力垂直于地面方向的分力  $F$  为

$$F = F_0 \cos(\omega t) \tag{2}$$

式中: $t$  为压路机的振动时间(s)。

$F$  在压路机前进方向  $x$  上激振力的变化情况见图 2。压实设备对沥青混合料的作用力不同,其压

实程度也不同。振动压路机钢轮对材料施加的作用力除了重力之外,还有激振器产生的激振力;材料的压缩程度与只有重力作用时的压缩程度不同,其接触截面的形状与静碾光轮压路机不同。因此,在压路机前进过程中,由于  $F$  大小不同,振动压路机压实后的路面及其与被压材料的接触截面也不同,见图 3。

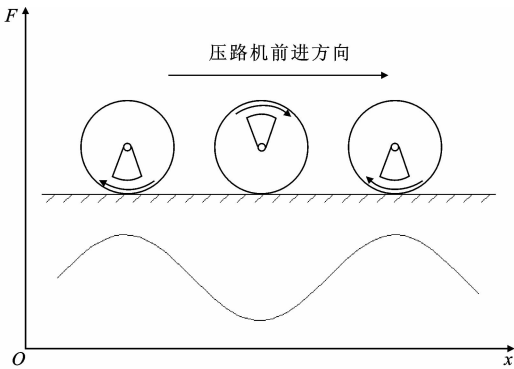


图 2  $F$  在压路机前进方向上的变化

Fig. 2 Change of  $F$  along direction of roller running

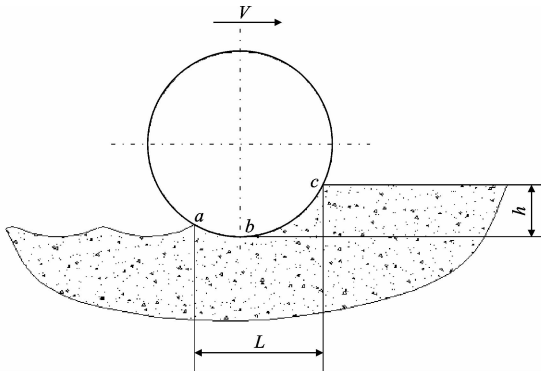


图 3 钢轮与材料的接触截面

Fig. 3 Contact section between drum and material

由图 3 可以看出,振动压路机压实后的路面并不是绝对的平面,而是近似波浪形,其中  $ab$  为经压实后的圆弧面, $bc$  为正在压实的圆弧面,钢轮与材料的接触截面是一个宽度为  $L$  的圆弧面,压路机以速度  $V$  行进,在压实过程中,每个振动周期均以钢轮与材料按接触宽度  $L$  对材料进行压实。

1.2 接触宽度  $L$  计算

钢轮静止时其与材料的接触状态如下页图 4 所示。此时,根据几何关系,接触宽度  $L$  计算式为

$$L = \overline{AB} = 2 \overline{MB} = 2 \sqrt{\frac{D^2}{4} - \left(\frac{D}{2} - h\right)^2} = 2 \sqrt{Dh - h^2} \tag{3}$$

式中: $\overline{AB}$  为图 4 中  $A$  点到  $B$  点的距离(mm); $\overline{MB}$  为  $\overline{AB}$  的一半(mm); $D$  为钢轮直径(mm); $h$  为每遍压

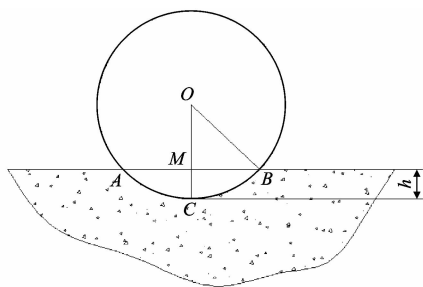


图 4 钢轮静止时与材料的接触截面

Fig. 4 Contact section between static drum and material

实后的沉降量(mm)。

振动压路机在压实过程中,材料的阻尼逐渐减小<sup>[16]</sup>,由塑性逐渐变为弹性。在压实初期,沥青混合料处于塑性阶段,沉降量  $h$  较大,图 3 中  $a$  点到  $b$  点的垂直距离与  $h$  相比很小,钢轮与被压材料的截面近似如图 5 所示,此时有

$$L = \sqrt{Dh - h^2} = 0.5 \overline{AB} \quad (4)$$

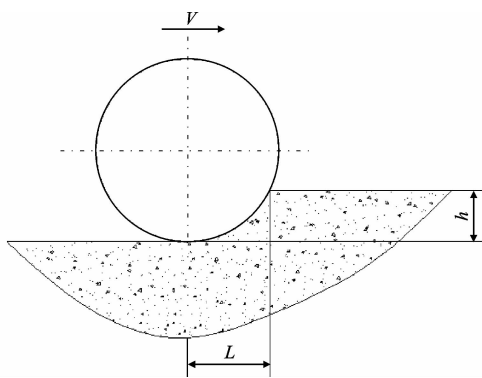


图 5 钢轮与材料的接触宽度(塑性)

Fig. 5 Contact width between static drum and material (plastic)

在压实中后期,沥青混合料主要表现为弹性,混合料已压缩到一定程度,此时沉降量  $h$  相对较小,且沥青混合料经钢轮压实后还有一定程度的回弹,可认为图 3 中  $a$  点到  $b$  点的垂直距离与  $h$  近似相等,钢轮与被压材料的截面如图 6 所示,此时有

$$L = 2 \sqrt{Dh - h^2} = \overline{AB} \quad (5)$$

可以认为,在压实过程中,每个振动周期钢轮与材料的接触宽度  $L$  为

$$L = 2m \sqrt{Dh - h^2} \quad (6)$$

式中: $m$  为量纲一化修正系数, $m$  的大小可根据材料的弹塑性确定,当材料由塑性到弹性变化时, $m$  由 0.5 到 1.0 逐渐增大。

## 2 有效接触宽度概念的提出及数学模型的建立

因为压路机振动的一个周期内激振力最大或接

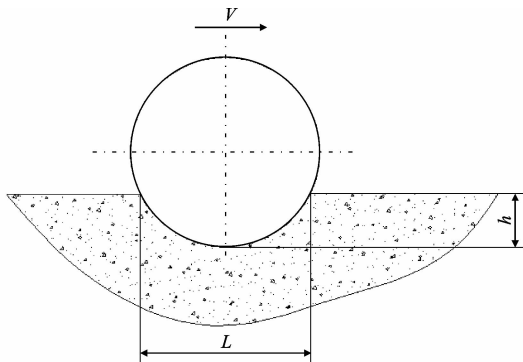


图 6 钢轮与材料的接触宽度(弹性)

Fig. 6 Contact width between static drum and material (elastic)

近最大时对地面沉降量的影响最大,所以讨论有效压实宽度时,主要考虑激振力最大或接近最大时作用于地面的状态。此时在钢轮与材料的接触截面上,其对材料的作用力分布如图 7 所示。

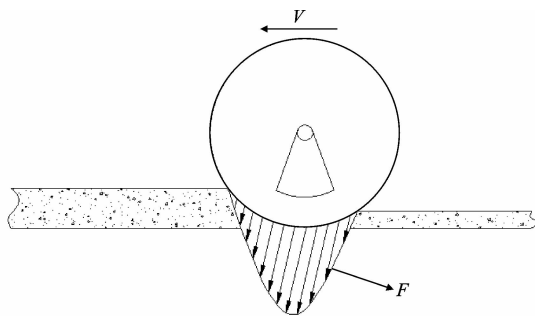


图 7 钢轮对材料作用力分布

Fig. 7 Force distribution of steel wheel on material

由于分布在接触截面各位置力的大小不同,材料的压实程度也有所区别,在接触截面内存在有效压实区域和未有效压实区域,如图 8 所示。

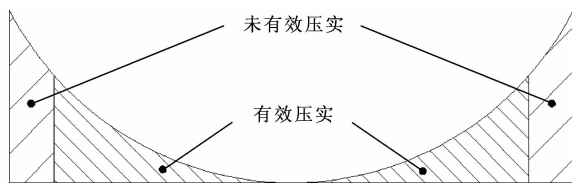


图 8 有效压实区域与未有效压实区域

Fig. 8 Effective compaction area and ineffective compaction area

压实的过程就是材料相互嵌挤排除空气,体积减小从而使密实度增加的过程。因此,从材料角度来看,将集料颗粒基本嵌挤密实的区域视为有效压实区域,将接触宽度  $L$  内有效压实部分的宽度定义为有效接触宽度,如下页图 9 所示。按照半功率点的概念,可得有效接触宽度  $L'$  为

$$L' = 0.707L = 1.414m \sqrt{Dh - h^2} \quad (7)$$

当压路机压实不同类型的沥青混合料,或处于不同压实阶段时,所对应的有效接触宽度  $L'$  也

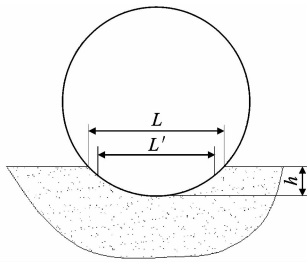


图 9 有效接触宽度示意  
Fig. 9 Sketch of effective contact width

不同。

### 3 有效接触宽度的实际应用

#### 3.1 利用有效接触宽度和重叠度确定压实速度与振动频率的匹配关系

由上文可知,在钢轮与材料接触截面的不同位置,材料的压实程度不同。因此,若 2 个振动周期间有效接触宽度重叠量不同,则材料的压实均匀性、压实后路面的平整度也有所不同。

重叠量越大,压实后的路面平整度越好。较大有效接触宽度的重叠量也可以避免 2 个振动周期间未有效压实区域的重叠,提高了压实度的均匀性。

重叠量确定后,压路机振动频率与压实速度的关系也就确定了。若压路机在某一遍压实时的有效接触宽度为  $L'$ ,振动频率为  $f$ ,重叠量为  $L''$ ,钢轮每一振动周期  $T$  需行走距离为  $L'-L''$ ,则钢轮的前进速度  $V$  为

$$V=0.003\ 6(L'-L'')f \tag{8}$$

相邻 2 个振动周期有效接触宽度的重叠量与每个振动周期有效接触宽度的比值为重叠度  $\lambda$ ,即

$$\lambda=L''/L' \tag{9}$$

通过控制重叠度  $\lambda$  的大小,相同压实遍数后的材料将有不同程度的均匀性,当选取的重叠度获得的均匀性较好时,所对应的振动频率与压实速度具有较好的匹配关系。

#### 3.2 重叠度的确定方法

为了研究在压实过程中重叠度的取值范围,选取中国产某型号 13 t 双钢轮振动压路机,以 AC-13 沥青混合料为路面材料进行压实试验。压路机钢轮直径  $D$  为 1 250 mm,松铺厚度为 50 mm,碾压遍数为 6,压实工艺为前轮振动,振动频率为 50 Hz。通过对每遍压实厚度的测量,计算出每遍压实后的沉降量,见图 10。

由图 10 可以看出,在前 2 遍压实时,沉降量较大,在其后的压实过程中,沉降量趋于稳定并接近于

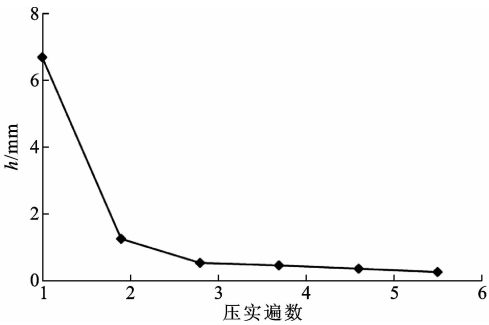


图 10 沉降量的变化  
Fig. 10 Change of settlement

0。可以认为,在前 2 遍压实时,材料主要呈塑性,在其后的压实过程中,材料主要呈弹性,根据压实后的沉降量,将各参数代入式(7)后求得不同压实遍数后的有效接触宽度,见表 1。

表 1 不同压实遍数时的  $m$  和有效接触宽度取值

Tab. 1 Valves of  $m$  and contact width in different compaction times

压实遍数	1	2	3	4	5	6
$m$	0.5	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0
有效接触宽度/mm	72.2	55.1	52.4	41.8	31.6	27.4

根据计算的有效接触宽度,在另外一个碾压段,控制压路机每遍压实重叠度为  $-\frac{17}{20} \sim \frac{17}{20}$  (重叠度为负值表示 2 个振动周期间的有效接触宽度不重合,且相邻距离为负值的绝对值),并结合式(8)控制压路机的行驶速度。每遍压实后检测路面压实度,并按照式(10)计算压实度的变异系数  $C_v$  [11]

$$C_v=S/\bar{k} \times 100\% \tag{10}$$

式中: $\bar{k}$  为压实度的平均值(%), $\bar{k}=\sum k_i/n$ , $k_i$  为每个测量点  $i$  的压实度, $n$  为压实度的测量次数; $S$  为压实度的标准差, $S=[\sum (k_i-\bar{k})^2/(n-1)]^{\frac{1}{2}}$ 。

压实度的变异系数可评价压实的均匀性,从而评价重叠度选取的合理性。压实度变异系数位于 0.2%~0.6% 时均匀性较好;当变异系数为 0.4% 时既可以保证压实度的均匀性,又可以保证压实效率,在高频振动压实时,该型号的压路机在不同压实遍数时压实的速度选取范围见下页表 2。

压实结束后,检测路面的压实度和平整度。压实度的平均值为 94.1%,大于热沥青混合料高速公路压实度要求(即最大理论密度的 92%),压实度的变异系数为 0.32%~0.4%,平整度的最大值和标准差分别为 2.5 mm 和 0.6 mm(平整度要求为:最大值 3.0 mm、标准差 1.2 mm),压实效果符合施工要求。

表 2 不同压实遍数时压实速度选取范围

Tab. 2 Values range of compaction speed in different compaction times

压实遍数	重叠度范围	速度范围/ (km·h <sup>-1</sup> )	最佳重叠度	最佳速度/ (km·h <sup>-1</sup> )
1、2	7/10~17/20	2.0~4.0	3/4	3.5
3、4	1/4~3/4	2.0~5.5	1/2	3.5
5、6	—1/5~9/20	2.5~6.0	0	5.0
7、8	—4/5~3/20	3.0~6.0	—7/10	5.5

压实试验得出了每遍压实时有效接触宽度,通过选取合适的重叠度得出了在选定频率下的压实速度:前 2 遍压实时速度不能超过 4 km/h;第 3、4 遍压实时速度不能低于 2 km/h,且不能超过 5.5 km/h;在后面的压实过程中可用较高速度压实,但最高速度不能超过 6 km/h,最低速度应不小于 2.5 km/h。

4 结 语

(1)通过分析激振力在压路机压实行驶过程中的变化,对振动压路机与被压材料的接触截面进行了理论分析。

(2)提出有效接触宽度的概念,并建立了数学模型。指出在压实过程中,材料由塑性逐渐变为弹性,有效接触宽度修正系数  $m$  在 0.5~1.0 内逐渐变化。

(3)引入重叠度并通过控制其大小影响路面材料的均匀性,当选取的重叠度获得的均匀性较好时,所对应的振动频率与压实速度具有较好的匹配关系。

(4)进行压实试验时,以中国产某型号双钢轮振动压路机及 AC-13 沥青混合料为例,确定了在高频振动时压实速度的选取范围。

(5)本文并未涉及压路机激振力和振幅对压实速度和频率匹配关系的影响,以及不同级配和不同厚度沥青混合料的施工参数对路面压实均匀性和压实度的影响,这方面的工作量还非常大,需要持续不断的研究。

参考文献:

References:

[ 1 ] American Association of State Highway and Transportation Officials, Federal Aviation Administration, Federal Highway Administration, et al. Hot-mix asphalt paving handbook[M]. Washington DC: Transportation Research Board,2000.

[ 2 ] HUNTER A E,MCGREAVY L,AIREY G D. Effect

of compaction mode on the mechanical performance and variability of asphalt mixtures [J]. Journal of Transportation Engineering,2009,135(11):839-851.

[ 3 ] KANDIL K A. Analytical and experimental study of field compaction of asphalt mixture[D]. Ottawa:Carleton University,2002.

[ 4 ] ZHAO Xi. Parameters selection of asphalt pavement compaction based on virtual experiment[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013 ( 361/362/363 ): 1584-1589.

[ 5 ] 柳朝印. 公路沥青混凝土路面压实控制及影响因素研究[D]. 天津:河北工业大学,2007.

LIU Chao-yin. Study on compaction control and impact factors of highway asphalt concrete pavement [D]. Tianjin:Hebei University of Technology,2007.

[ 6 ] 高 源. 沥青路面压实过程控制研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2013.

GAO Yuan. Research on the control of compacting asphalt pavement[D]. Chongqing:Chongqing Jiaotong University,2013.

[ 7 ] 陈小龙. 基于混合料压实特性的沥青路面压实工艺研究[D]. 西安:长安大学,2011.

CHEN Xiao-long. Study of compaction technology in asphalt pavement based on compaction characteristics of mixture[D]. Xi'an:Chang'an University,2011.

[ 8 ] 胡 涛. 沥青混合料压实特性分析[D]. 西安:长安大学,2012.

HU Tao. Study on asphalt mixture compaction characteristics[D]. Xi'an:Chang'an University,2012.

[ 9 ] 尚云龙. 沥青混凝土压实工艺的研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2003.

SHANG Yun-long. Study on compaction technology of asphalt concrete[D]. Harbin: Northeast Forestry University,2003.

[10] 徐永杰,王秀明. 压路机压实作业参数的合理选择 [J]. 工程机械与维修,2003(11):96-97.

XU Yong-jie, WANG Xiu-ming. Proper selection of roller compaction operation parameters[J]. Construction Machinery & Maintenance,2003(11):96-97.

[11] 郭蔚虹,高希敏,许志勇. 高速公路加宽路面压实度控制技术研究[J]. 筑路机械与施工机械化,2017,34(4):44-48.

GUO Yu-hong,GAO Xi-min,XU Zhi-yong. Study on control technology for compaction degree of widening expressway pavement[J]. Road Machinery & Construction Mechanization,2017,34(4):44-48.

[12] 李汉光,高 英,余文斌. 沥青混合料压实特性及沥青路面碾压遍数确定[J]. 东南大学学报:自然科学

- 版,2011,41(1):186-189.
- LI Han-guang,GAO Ying,YU Wen-bin. Compaction characteristics of hot mixed asphalt and number of roller passes [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition,2011,41(1):186-189.
- [13] 张志峰,郝 飞,冯忠绪. 振动压实重叠宽度的确定[J]. 工程机械,2009,40(6):25-28.
- ZHANG Zhi-feng,HAO Fei,FENG Zhong-xu. Determination of overlapping width in vibratory compacting [J]. Construction Machinery and Equipment, 2009,40(6):25-28.
- [14] 李彦伟,范换持,陈小龙,等. 沥青路面压实效果评价指标[J]. 长安大学学报:自然科学版,2012,32(3):34-39.
- LI Yan-wei,FAN Huan-chi,CHEN Xiao-long, et al. Compaction effect evaluation parameter of asphalt pavement[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2012,32(3):34-39.
- [15] 孙祖望. 压实技术与压实机械的发展与展望[J]. 筑路机械与施工机械化,2004,21(5):4-7.
- SUN Zu-wang. Development and prospect of compaction technology and compaction machinery[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2004, 21 (5):4-7.
- [16] 沈培辉. 动力压实技术的发展及未来[J]. 中外公路, 2010,30(6):41-44.
- SHEN Pei-hui. The development and future of dynamic compaction technology[J]. Journal of China & Foreign Highway,2010,30(6):41-44.
- [17] ANDEREGG R,KAUFMANN K. Intelligent compaction with vibratory rollers:Feedback control systems in automatic compaction and compaction control[J]. Transportation Research Record,2004(1868):124-134.
- [18] 李立民,冯忠绪,张艺莎,等. 中国与外国双钢轮振动压路机的主要差距[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2011,31(3):102-106.
- LI Li-min,FENG Zhong-xu,ZHANG Yi-sha, et al. Main performance difference of double-drum vibration roller made in China compared with that made in other countries[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2011,31(3):102-106.
- [19] 周龙刚,刘亚娟,段永波,等. 双钢轮振动压路机的作业质量控制[J]. 工程机械,2012,43(8):19-23.
- ZHOU Long-gang,LIU Ya-juan,DUAN Yong-bo, et al. Operation quality control of dual drum vibratory compactor[J]. Construction Machinery and Equipment,2012,43(8):19-23.
- [20] SEHEROEMAN J A. Factors affecting compaction of asphalt pavements[R]. Washington DC: Transportation Research Board,2006.
- [21] 车胜创. “拍”对路面平整度和压实度的影响分析与研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2004, 36(4):486-489,505.
- CHE Sheng-chuang. Analytical study: The influence of “clap” on the road compaction and flatness[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology: Natural Science Edition, 2004, 36 (4): 486-489,505.
- [22] 张中华,王 莉. 振动压路机最佳压实频率研究[J]. 建筑机械,2012(5):77-80,84.
- ZHANG Zhong-hua,WANG Li. Research on best compaction frequency of vibratory roller [J]. Construction Machinery,2012(5):77-80,84.
- [23] 冯建亮,赵 真,冯忠绪. 振动压路机碾压速度的选择[J]. 建筑机械,2012(5):76-78.
- FENG Jian-liang,ZHAO Zhen,FENG Zhong-xu. The safety and dynamic detection device of a brake[J]. Construction Machinery,2012(5):76-78.
- [24] 张晓波,徐伯青. 压实均匀性的影响因素及其评价[J]. 筑路机械与施工机械化,2011,28(7):60-63.
- ZHANG Xiao-bo,XU Bo-qing. Influential factors and evaluation of compaction uniformity [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2011, 28 (7): 60-63.
- [25] DELGADILLO R,BAHIA H U. Effects of temperature and pressure on hot mixed asphalt compaction: Field and laboratory study[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2008,20(6):440-448.