

# 碾压工艺对沥青路面构造的磨损作用研究

赖智钦<sup>1</sup>, 陈搏<sup>2</sup>

(1. 保利长大工程有限公司, 广东 广州 510620; 2. 华南理工大学 土木与交通学院)

**摘要:**为解决沥青路面磨耗层压实度和抗滑构造完整性的均衡问题,从沥青混合料的压实机理和碾压温度控制着手,分析碾压模式、压实曲线特征对压实度的影响,并基于图像处理技术采集与计算不同碾压模式下的沥青路面构造破坏程度。结果表明:相同碾压遍数下,优先使用胶轮碾压可以显著提高路面压实度;沥青路面的压实度与碾压遍数可以使用对数模型表征,模型参数具有明确的物理意义;数字图像法可以提取路面磨损特征,提出的磨损率指标能够有效评价碾压工艺对路表构造的破坏程度;随着钢轮碾压温度的下降,路表构造磨损率显著增加,建议在保证沥青路面压实度所需遍数的前提下,避免钢轮低温振动碾压。

**关键词:** 沥青路面; 压实度; 碾压工艺; 图像处理技术; 磨损率

沥青路面的碾压工序是保证路面结构路用性能的关键环节,压实度不足,会致使沥青混合料密实度欠缺,空隙率偏大,容易产生后期渠化交通下的车辙和水损害。沥青混合料压实度增加1%,可以有效提高承载能力10%~15%,压实质量的重要性对延长道路使用寿命极其关键。当前碾压设备的更新换代十分迅速,市场上的大吨位、高频率压路机的研发显著改善了沥青路面的压实效果。近年来施工过程中发现,碾压工艺对路表构造的磨损破坏也成为了一个不容忽视的工程问题。一般压实度过大,容易导致路面集料棱角破碎,但是个别路段钻芯的压实度并未超过100%,亦出现大面积的“白斑”现象。新铺路面的早期棱角磨损,直接降低路面抗滑耐久性能,对于交通安全产生非常不利的影响。如何均衡沥青路面的压实度和表面抗滑功能,实现沥青路面碾压工艺的优化,是解决道路磨耗层施工质量问题的关键。该文通过高速公路上面层施工,进行不同碾压模式下的路面压实效果分析,并基于数字图像处理技术开展碾压机械和温度对构造磨损作用的影响,兼顾压实度和抗滑功能提出合理的碾压工艺,以期对磨耗层施工提供碾压技术指导。

## 1 沥青混合料的压实机理

沥青混合料的压实为松散的可塑状态到具有较高

模量的黏弹固态过程,通过压路机的竖向作用力克服热拌沥青混合料颗粒间的黏聚力和剪应力,使之重新排列至相对稳定状态。随着研究的深入发现,压实成型的关键在于发挥混合料中自由沥青的润滑作用,可以有效降低克服粗集料间嵌锁力所需的压实功。混合料内部的集料颗粒在碾压过程中发生空间平移与旋转,直至集料颗粒的内力(集料间摩阻力与沥青黏聚力)与外力(机械碾压作用)达到新的平衡。碾压机械主要包括双钢轮振动压路机和轮胎(胶轮)压路机。振动压路机通过调整振动轴的偏心块与振动轴转速,可以实现不同振频与振幅下的竖向激振力,并以压力波的形式传向受压结构层深部,达到较好的竖向压实效果。轮胎压路机主要依靠设备自重下轮胎滚动过程中产生的作用力,包括垂直方向的设备重力,以及轮胎纵向与侧向变形产生的水平向作用力,水平与垂直方向作用力交联形成搓揉作用,使得混合料粗颗粒发生竖向稳固,以及细集料、胶浆的水平向移动,实现更好的填充密实效果。此外,轮胎的搓揉作用还能够将下层多余的沥青胶浆泵吸到表层,改善表层的封水效果,同时消除钢轮碾压过程中的局部推移产生的微裂纹。沥青路面压实主要受混合料材料组成、压实设备、施工温度、碾压机具组合等因素的影响,国内外科研工作者基于压实度与路用性能方面做了大量研究,但是关于碾压工艺对路表功能的分析涉及较少。

收稿日期:2020-02-08(修改稿)

基金项目:广东省科技厅科技计划项目(编号:2014B010105005)

作者简介:赖智钦,男,大学本科,高级工程师。E-mail:913265456@qq.com

## 2 依托工程概况

### 2.1 工程情况

依托项目为广东省某高速公路新建项目(双向四车道),上面层为 4.5 cm GAC—16C 结构。胶结料使用壳牌 SBS 改性沥青(PG 76—22),粗集料采用辉绿岩碎石(主要技术指标见表 1),细集料采用 0~3 mm 石灰岩机制砂,填料采用石灰岩细磨矿粉,等质量置换掺加 1.0% 的 P. O. 42.5 级缓凝水泥作为抗剥落材料。

表 1 粗集料技术指标

检验指标	单位	试验结果	设计要求	单项评定
石料压碎值	%	8.5	≤20	合格
洛杉矶磨耗损失	%	11.1	≤18	合格
表观相对密度		2.942	≥2.60	合格
与改性沥青的黏附性	级	5	5	合格
磨光值	PSV	44	≥42	合格

沥青面层混合料采用 4000 型拌和楼进行拌和;采用两台 2100—3L 摊铺机组成梯队并机摊铺;采用 3 台双钢轮压路机(11~13 t)及 3 台重型胶轮压路机(26~30 t)进行碾压作业。

### 2.2 沥青混合料配合比设计

为了提高沥青面层的高温稳定性与抗水损能力,采用广东省改进型骨架密实结构进行设计。通过降低 2.36~4.75 mm 档集料含量,减少对粗集料骨架的干涉效应。按泰波指数  $n=0.5$  设计 0.075~2.36 mm 细集料,以 4.0%~6.0% 作为设计目标空隙率,沥青饱和度(VFA)为 65%~75%,有利于形成密水结构,提升抗水损能力与高温稳定性,混合料级配见表 2。

表 2 GAC—16C 混合料级配

筛孔/ mm	通过率/ %	筛孔/ mm	通过率/ %
19	100	1.18	18.1
16	96.6	0.6	14.4
13.2	80.3	0.3	9.9
9.5	57.1	0.15	7.1
4.75	32.3	0.075	5.7
2.36	26.0		

### 2.3 施工过程的温度离析控制

为了实时控制不同施工现场的沥青混合料施工温度,采用 FLIR 手持式 E8 红外热像仪进行大范围的温

度监控。由于不同温度的物体表面会向外辐射红外线,热成像仪能够把辐射能量转换成电信号,显示为温度场图像。该设备具有全景拍摄功能,有效温度范围为-20~+250℃,热灵敏度为 0.06℃,红外图像分辨率为 320×240 像素。采用红外成像仪对施工过程中各阶段的混合料温度均匀性进行检测与评价。

## 3 路面压实度测试与分析

### 3.1 改性沥青混合料碾压温度

沥青路面施工温度主要根据沥青黏温曲线确定,规范规定以 $(0.28\pm0.03)\text{Pa}\cdot\text{s}$ 为最佳压实黏度,根据沥青混合料试验规程,该项目测定 SBS 改性沥青的不同温度对应布氏黏度结果如表 3 所示。根据推荐黏度值,可推算该项目沥青混合料最佳压实温度大于 195℃,明显偏高,可见采用布氏黏度试验方法确定的改性沥青施工温度与实际工程不符。根据文献[10]关于 SBS 改性沥青混合料有效压实温度研究,适合初压的温度区间为 150~170℃,复压温度为 105~150℃,终压前温度不应低于 105℃。实际施工过程中,沥青混合料表层的温度与内部温度存在差异,表面混合料暴露在开放环境中,与大气共同产生快速热交换,其温度下降较快,致使现场的温度离析严重,给工程施工质量带来一系列的问题。

表 3 SBS 改性沥青黏度试验结果

温度/℃	黏度/(mPa·s)	温度/℃	黏度/(mPa·s)
100	89 250	165	718
120	9 988	180	430
135	2 940	195	315
150	1 305		

### 3.2 碾压模式的影响

规范中关于碾压环节未作明确的碾压遍数要求,建议使用压实工艺控制来替代压实遍数。为了更加清晰了解不同碾压工艺对沥青混凝土的压实影响,该项目分别设计 3 种碾压方案,见表 4。双钢轮压路机具有静力碾压和振动压实功能,复压时通过振动轮的高频振动档位(63~67 Hz),振幅调整为低振幅(0.3~0.5 mm)。为了防止碾压过程的黏轮问题,钢轮采用小水量雾状喷洒,胶轮采用植物油与水的混合物(比例 1:2)作为隔离剂。

3 种方案的碾压遍数相同,差别在于复压过程的胶轮与双钢轮排序:方案 A 采用胶轮与双钢轮交替碾压模式;方案 B 为“胶轮 3 遍+钢轮振压 2 遍”;方案 C

表 4 碾压方案设计

项目	初压			复压			终压
方案 A	双钢轮前静	胶轮静	双钢轮振	胶轮静	双钢轮振	胶轮静	双钢轮静
	后振/1 遍	压/1 遍	压/1 遍	压/1 遍	压/1 遍	压/1 遍	压/1 遍
方案 B	双钢轮前静	胶轮静	胶轮静	胶轮静	双钢轮振	双钢轮振	双钢轮静
	后振/1 遍	压/1 遍	压/1 遍	压/1 遍	压/1 遍	压/1 遍	压/1 遍
方案 C	双钢轮前静	双钢轮振	双钢轮振	胶轮静	胶轮静	胶轮静	双钢轮静
	后振/1 遍	压/1 遍	压/1 遍	压/1 遍	压/1 遍	压/1 遍	压/1 遍
碾压速度	2~3			3~4			3~5

注：① 压路机前进、后退一次为一遍；② 碾压速度单位：km/h。

为“钢轮振压 2 遍+胶轮 3 遍”。3 种方案的初压均为双钢轮前静后振 1 遍，终压使用钢轮静压 1 遍收光。

采用 PQI380 无核密度仪检测不同碾压遍数的密度值，以最大理论密度值作为标准密度，换算为压实度指标。从压实度结果来看（图 1），初压前后的沥青路面压实度差异不大，而经过不同复压工艺，最终压实度以方案 B 最大（95.2%）、方案 A 次之（94.9%），方案 C 最小（94.4%）。

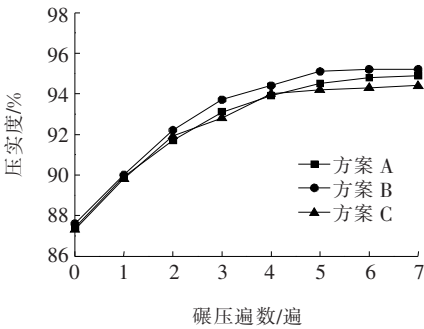


图 1 不同碾压模式下的压实度变化

根据压实度曲线变化特征，复压阶段的前 2 遍压实度变化较大，提取复压前 2 遍的压实度与温度数据（表 5）。方案 A 和方案 B 复压第 1 遍均采用胶轮，方案 C 采用钢轮振压，压实度增加幅度为 1.8%~2.2%，较为接近。而经过双钢轮碾压的路表温度下降较快，体现在方案 C 第 1 遍与第 2 遍碾压后温差为 19.8℃，而方案 A 与方案 B 胶轮碾压后温度下降幅度分别为 16.3℃和 14.9℃，温度下降主要与碾压设备轮的防黏材料有关，清水的传热系数远高于植物油，因而钢轮上的水比胶轮上的油更容易散热，该规律与第 2、3 遍温度下降规律一致。复压过程使用 2 遍胶轮碾压的方案 B 压实度最大，相应的温度损失最低；而方案 A 次之（1 遍胶轮加 1 遍钢轮）；方案 C 压实度最小，温度损失最大（2 遍钢轮）。究其原因：① 轮胎压路机通过高温下的搓揉，混合料粗集料平移与旋转重

分布，细集料挤压填充，压实度增长更快；而钢轮振动稳压之后，粗集料之间快速嵌挤达到一个较高的内摩阻力稳定状态；② 胶轮的涂油防黏措施对路表温度影响比钢轮的洒水措施更小，同时胶轮的搓揉作用可以把内部沥青胶浆揉压上来，一定程度上可以减缓表层温度下降。

表 5 不同碾压遍数的压实度与温度

碾压遍数(方式)/遍	方案 A		方案 B		方案 C	
	压实度/%	温度/℃	压实度/%	温度/℃	压实度/%	温度/℃
1(初压)	89.9	147.7	90.0	149.1	89.8	148.3
2(复压)	91.7	131.4	92.2	134.2	91.9	128.5
3(复压)	93.1	120.5	93.7	124.1	92.8	116.2

3.3 压实度变化规律表征

不同碾压模式的沥青路面压实规律相似：高温碾压初期的压实度增加迅速，随着碾压遍数增加，路面压实度趋向平缓增长至相对稳定状态。文献[12]尝试使用幂指数函数进行回归，但其经验公式中各参数的物理意义不够清晰。相较之下，压实度与碾压遍数的关系与对数函数变化较类似，故该研究采用对数模型进行拟合回归，见表 6。不同碾压方案下的压实度与碾压遍数呈现良好的对数关系，相关性系数均达到 0.95 以上。因此，压实度与碾压遍数的数学关系可使用  $Y=a \ln X+b$  的对数模型描述，其中  $a$  为压实度增长变化率， $b$  为初压后、复压前的初始压实度，模型物理意义明确，具有良好的表征意义。

表 6 不同碾压组合的对数回归模型

碾压方案	对数模型	相关性系数
A	$Y=2.701 \times \ln X+89.967$	0.989
B	$Y=2.812 \times \ln X+90.261$	0.972
C	$Y=2.453 \times \ln X+90.071$	0.964

注：Y 为压实度；X 为碾压遍数。



## 4 基于数字图像技术的路表构造磨损评价

过去的诸多研究主要从原材料、混合料级配方面开展路面抗滑能力研究,在碾压环节的研究较少。尤其是施工过程中的碾压工艺对路表构造的磨损,只有较主观的目测判定,构造深度等宏观指标难以准确反映。道路抗滑性能与其表面的纹理密切相关,路表构造的磨损是道路抗滑性能衰减的必经过程,因而,碾压过程产生的构造磨损问题将直接影响道路后期运营过程的抗滑耐久性。宋永朝、张争奇等基于数字图像处理技术计算二值化图像的下凹区域数量与面积、平均宽度等特征指标,以此表征路表构造分布状态和集料离析程度,取得了良好的应用效果。新建沥青路面构造在沥青膜的裹覆下,通常为较深的黑色。而路表构造出现磨损的位置,由于集料的复杂矿物组成致使其颜色较浅,为灰白色调。磨损区域与背景区域具有明显的颜色差异,可为数字图像技术提供良好的灰度特性依据。

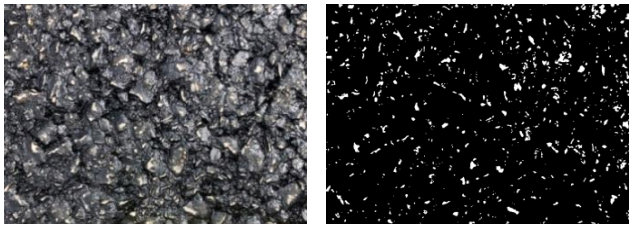
### 4.1 数字图像的基本原理

数字图像技术基本原理为通过光学元件将采集的图像信息转换为离散的数字矩阵信息,通过软件的识别可以提取为二维矩阵数据。使用 CCD 相机采集沥青路面的平面构造图像,通过将数字图像进行像素值量化,可以获得路面构造像素分布矩阵。

### 4.2 图像采集与分析

为减少图像采集过程的信息误差,需要按照规范的方法进行操作。数字图像采集前需将道路清扫干净,尤其是构造破损产生石粉覆盖的地方。图像采集过程中,须避免阳光直射,同时,拍摄镜头应保持与路面平行,拍摄距离固定为 50 cm 左右,采集的图像如图 2(a)所示。由于光照强度的不均匀、沥青膜的反光现象,给路表构造磨损特征辨识带来一定困难。因此,须对路面图像进行滤波去噪、图像增强和灰度处理等,然后进行二值化处理,提取目标特征。二值化方法较多,确定特征阈值是关键,目前 OTSU 法(最大类间方差法)为较有效的方法。根究磨损位置灰度值比背景灰度值大的特点,通过 OTSU 法计算灰度阈值,进行磨损特征与背景图像的分割,来获取磨损信息,如图 2(b)所示,白色小区域代表沥青路面被磨损的构造。

提取二值化图像的白色区域形态特征,通过 Matlab 编写程序统计图像的非零像素数量,进而可以



(a) 原始图像 (b) 二值化图像

图 2 图像处理过程

得到磨损区域累计面积的比例,可定义为磨损率( $w$ )。

$$w = \frac{\sum S_i}{S_0} = \frac{N_w}{N_0} \times 100\% \tag{1}$$

式中: $S_i$  为第  $i$  个磨损位置的面积( $\text{mm}^2$ ); $S_0$  为图像对应的路表总面积( $\text{mm}^2$ ); $N_w$  为二值图像中的非零像素点个数; $N_0$  为二值图像的像素总数。

### 4.3 测试与分析

对每一种碾压成型路段选择 5 个测点为摊铺机中部非离析带位置,每个测点间隔约为 30 m,以保证样本的代表性。图像采集区域面积约为  $400\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ ,相应的图片分辨率为  $2\,016 \times 1\,512$ ,即一个像素点的区域尺寸为  $0.2\text{ mm} \times 0.2\text{ mm}$ 。经过图像灰度处理与二值化计算,统计各碾压方案路段各测点的磨损结果,见表 7。3 种碾压方案路段,方案 C 的路表构造磨损率最小,基本可视为棱角完好的构造;方案 B 的构造磨损率最严重,基本为 10% 以上;方案 A 路段

表 7 数字图像法计算结果

方案	测点	总像素/ 个	磨损区 像素/个	磨损率/ %	磨损率 均值/%
A	1	3 048 192	70 413	2.31	2.88
	2	3 048 192	107 906	3.54	
	3	3 048 192	84 739	2.78	
	4	3 048 192	46 637	1.53	
	5	3 048 192	129 548	4.25	
B	1	3 048 192	317 621	10.42	10.98
	2	3 048 192	302 990	9.94	
	3	3 048 192	358 467	11.76	
	4	3 048 192	316 097	10.37	
	5	3 048 192	378 280	12.41	
C	1	3 048 192	0	0.00	0.17
	2	3 048 192	15 545	0.51	
	3	3 048 192	3 353	0.11	
	4	3 048 192	0	0.00	
	5	3 048 192	7 315	0.24	

的构造磨损率为 1%~5%。

结合碾压设备的压实机理,振动压路机通过振动频率与振幅参数的调节可以获得较大的竖向激振力,对沥青混合料产生周期性冲击作用。混合料在高温时呈现塑性状态,大部分冲击能量被吸收转变为克服混合料颗粒内嵌摩阻力和沥青黏度所做的功。而随着表层温度下降混合料劲度模量提高,沥青混凝土表面形成一层相对较硬的薄壳结构,此时路面达到较平整密实状态,钢轮的有效接触面积大大减少,采用钢轮振压容易导致表层构造棱角被碾压破碎,形成“白斑”现象。

进一步分析双钢轮振动碾压时的混合料温度对构造磨损的影响,根据不同测点的最后一遍钢轮振动碾压前的温度和磨损率绘制变化曲线图,如图 3 所示。

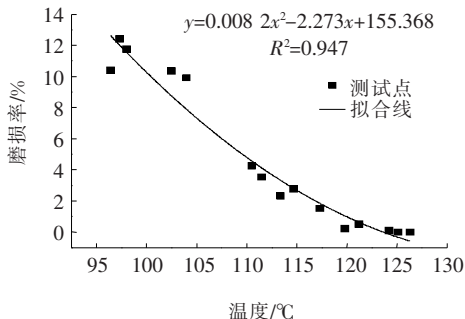


图 3 钢轮碾压温度与路表构造磨损率的关系

由图 3 可知:随着路表温度的下降,钢轮振动碾压对路表构造磨损率呈现递增趋势,钢轮碾压温度与路表构造磨损率之间为良好的半抛物线关系,相关性系数为 0.947。该项目测试数据表明:当路面温度低于 105℃时,使用钢轮振压将导致 10%以上的构造磨损率,说明该温度下的振动压实功大部分不能被混合料吸收;当路面温度为 110~120℃时,路表构造磨损率为 1%~5%;当路面温度高于 120℃,钢轮振压对路面构造磨损较小(小于 1%),此时钢轮的振动压实能量可以大部分被混合料吸收,压实效果较好。因此,复压过程应严格控制双钢轮振动碾压的路面温度,避免低温时振动冲击能量对顶部构造的破坏。

## 5 结论

(1) 相同碾压遍数下,优先采用胶轮碾压可以获得更大的混合料压实度,主要与轮胎的搓揉作用、防黏轮物质的传热系数有关。

(2) 随着复压过程碾压遍数增加,路面压实度趋向平缓增长至相对稳定状态,压实度与碾压遍数可以

使用对数模型表征,拟合相关性系数达到 0.95 以上,模型参数具有明确的物理意义。

(3) 使用数字图像处理技术对碾压成型道路表面构造进行分析,提出棱角磨损率评价不同碾压工艺对路面构造的破坏程度;随着钢轮振动碾压温度的下降,路表构造磨损率显著增加。建议在保证沥青路面压实度所需遍数的前提下,避免低温时振动冲击能量对顶部构造的破坏。

(4) 依托项目标段的工程实际,主要针对碾压模式对路表构造的磨损作用开展了试验研究,后续将持续开展不同原材料、碾压厚度等影响因素的相关研究。

## 参考文献:

- [1] 谭忆秋,王海朋,马韶军,等. 基于光纤光栅传感技术的沥青路面压实监测[J]. 中国公路学报,2014(5).
- [2] 潘宇. 沥青面层压实度与振动碾压关系研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文,2014.
- [3] Yiqiu T, Haipeng W, Shaojun M, et al. Quality Control of Asphalt Pavement Compaction Using Fibre Bragg Grating Sensing Technology[J]. Construction and Building Materials, 2014, 54(5):53-59.
- [4] 高希敏. 沥青混凝土路面组合式碾压实施措施及现场质量控制[J]. 筑路机械与施工机械化,2016(4).
- [5] 杨国峰,王浩仰,潘玉利. 基于多线纹理的路面磨损检测及评价方法[J]. 中国公路学报,2016(3).
- [6] 熊剑平,邓祥明,周智密,等. 基于数字图像技术的集料表面纹理指数研究[J]. 公路,2019(7).
- [7] Zhang X, Liu T, Liu C, et al. Research on Skid Resistance of Asphalt Pavement Based on Three-Dimensional Laser Scanning Technology and Pressure-Sensitive Film[J]. Construction and Building Materials, 2014, 69(10):49-59.
- [8] 张红春. 沥青路面组合式碾压机理及压实效果研究[J]. 筑路机械与施工机械化,2011(10).
- [9] 高源. 沥青路面压实过程控制研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文,2013.
- [10] 禚炜安,刘斌清. 基于红外热像仪的沥青路面施工过程温度离析状况评价[J]. 中外公路,2016(3).
- [11] 姜伟,张阳. 基于体积指标的沥青混合料有效压实温度研究[J]. 中外公路,2018(1).
- [12] 许新权,吴传海,严超,等. 基于 PQI 的沥青混合料现场压实参数研究[J]. 筑路机械与施工机械化,2016(6).
- [13] 张争奇,徐耀辉,胡红松,等. 沥青路面离析的数字图像评价方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2016(9).
- [14] 石立万,王端宜. 基于数字图像处理的沥青混合料主骨架评价标准[J]. 中国公路学报,2017(5).