

文章编号:1007-9629(2022)06-0650-07

基于电磁混合理论的沥青路面密度预估方法

熊学堂¹, 谭忆秋^{1,2,*}, 张德津³, 肖神清¹, 王伟¹

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 哈尔滨工业大学
城市水资源与水环境国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090; 3. 深圳大学
广东省城市空间信息工程重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘要:为了实现沥青路面密度的准确预估,开展了沥青混合料的介电特性测试和密度预估模型对比研究.基于多相复合材料的电磁混合理论,推导出沥青混合料的4种密度预估模型(CRIM模型、Rayleigh模型、Böttcher模型和ALL模型);使用Percometer介电常数仪测定了沥青混合料旋转压实试件及其组分的相对介电常数,综合考虑了沥青混合料矿料级配类型和空隙率因素,进行了不同模型预估密度值与表干法实测密度值的误差分析;最后通过现场AC-20沥青路面探地雷达检测以及取芯检测验证了优选模型的准确性.结果表明:Percometer介电常数仪测得的沥青路面相对介电常数与探地雷达检测结果具有较好的一致性,沥青混合料密度预估模型的精度受到级配类型和空隙率的影响;与CRIM模型和Böttcher模型相比,Rayleigh模型和ALL模型更适用于沥青混合料密度预估,其中ALL模型预估精度最高.

关键词:沥青混合料;电磁混合理论;密度预估模型;相对介电常数

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.06.015

Density Prediction Method of Asphalt Pavement Based on Electromagnetic Mixing Theory

XIONG Xuetao¹, TAN Yiqiu^{1,2,*}, ZHANG Dejin³, XIAO Shenqing¹, WANG Wei¹

(1. School of Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;
2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of
Technology, Harbin 150090, China; 3. Guangdong Key Laboratory for Urban
Informatics, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: To realize the accurate estimation of the asphalt pavement density, the dielectric property test and density prediction model comparison of the asphalt mixture were carried out. Four density prediction models (CRIM model, Rayleigh model, Böttcher model and ALL model) of the asphalt mixture were derived from the electromagnetic mixing theory of the multiphase composite materials. The relative permittivity values of the asphalt mixture specimens prepared by superpave gyratory compactor and its components were measured by Percometer dielectric constant detector. Considering the gradation type and void ratio of the asphalt mixture, the errors between the density values estimated by different models and measured by surface dry method were thoroughly analysed. Finally, the density prediction accuracies of the optimal models were verified by the Ground Penetrating Radar detection and core data of the on-site AC-20 asphalt pavement. The results demonstrate that the consistency of asphalt pavement relative permittivity measurement between

收稿日期:2021-03-15; 修订日期:2021-07-05

基金项目:广东省城市空间信息工程重点实验室开放基金资助项目(SZU51029202005);国家自然科学基金资助项目(U20A20315)

第一作者:熊学堂(1991—),男,湖北鄂州人,哈尔滨工业大学博士生. E-mail: xuetangxiong@163.com

通讯作者:谭忆秋(1968—),女,吉林德惠人,哈尔滨工业大学教授,博士生导师,博士. E-mail: yiqiutan@163.com

Percometer and Ground Penetrating Radar can be obtained. The accuracy of asphalt mixture density prediction model is affected by gradation type and void ratio. Rayleigh model and ALL model are more suitable for the density prediction of asphalt mixture than CRIM model and Böttcher model. ALL model has the highest precision.

Key words: asphalt mixture; electromagnetic mixing theory; density prediction model; relative permittivity

施工过程中,沥青路面密度过大或过小,都会导致路面运营后产生车辙或水损害等早期病害,严重影响路面的使用性能和服役寿命,从而极大地增大路面的养护费用^[1].传统方法采用局部取芯来评定沥青路面的压实状况,这样会对路面造成损伤,并且所得数据代表性较差.因此对沥青路面密度的高效、无损和准确检测尤为重要.目前,电磁技术如探地雷达(GPR)可以高速、连续和全断面地测定沥青路面的相对介电常数^[2-3],而沥青路面的相对介电常数与其体积指标如密度、空隙率或含水量等有较好的相关性^[4-7].对沥青路面密度进行有效控制的关键在于探究沥青混合料密度与介电特性的关系.

国内外很多学者深入测试研究了沥青混合料的介电特性,试图构建沥青混合料的毛体积相对密度与相对介电常数的关系模型,从而实现了对沥青路面密度的预估.在沥青混合料的介电特性测试方法方面,Fauchard等^[8]采用圆柱形谐振腔测量了沥青混合料及矿料的复介电常数,该方法测试精度较高,但对试件尺寸制作要求很高,否则会引起较大测量误差;于晓贺等^[9]通过高温介电常数平台测定了不同湿度沥青混合料试件的相对介电常数,测试样本尺寸为直径26 mm×高12 mm,因样本较小,故其代表性相对欠缺;Loizos等^[10]在实验室内将Percometer介电常数仪置于沥青路面芯样表面,可快速测得其相对介电常数,取得了较好的测试效果.在沥青混合料的密度预估模型方面,Al-Qadi等^[11]根据复合介质与组分之间的介电模型关系,得出了沥青混合料的理论密度预估模型(CRIM模型、Rayleigh模型和Böttcher模型),并初步验证了采用Rayleigh模型对沥青混合料密度进行预估的可行性;Leng等^[12]考虑矿料形状因子的影响,提出了改进的Böttcher模型,即ALL模型,该模型参数中不同类型沥青的相对介电常数均取经验值3,矿料的相对介电常数则根据标定芯样反算得到.然而实际上不同模型的反算结果存在一定差异.

综上所述,目前缺乏对不同沥青混合料密度预估模型的系统比较及适用性分析;同时,模型参数(矿料和沥青的相对介电常数)对沥青混合料密度

预估结果影响较大,还需要进一步确定.鉴于此,本文引入了4种密度预估模型,以期阐明它们之间的内在联系和区别,分析密度预估模型的影响因素;利用Percometer介电常数仪解决模型参数测定精度问题,通过室内多组常规简易试验来对模型进行优选;最后通过现场沥青路面取芯试验来验证模型的有效性,为沥青路面密度的准确检测提供技术参考.

1 密度预估模型

复合材料的介电常数与其组成相的介电常数及体积分数之间存在函数关系,这种关系式称为复合材料的介电模型,其中介电模型分为半经验混合模型和电磁混合理论模型.半经验混合模型主要起源于Lichtenecker-Rother(LR)方程^[13],其遵循幂律法则,如式(1)所示.电磁混合理论模型根据含散射体复合材料的有效介电常数自洽理论,可以构建电磁学宏观物理量(有效介电常数)与微观物理量(单位体积内散射体的数量和极化率)之间的理论关系式,见式(2)^[14].

$$\epsilon_{\text{eff}}^a = \sum_{i=1}^N V_i \epsilon_i^a \quad (1)$$

$$\frac{\epsilon_{\text{eff}} - \epsilon_k}{\epsilon_{\text{eff}} + u\epsilon_k + v(\epsilon_{\text{eff}} - \epsilon_k)} = \sum_{i=1}^N V_i \frac{\epsilon_i - \epsilon_k}{\epsilon_i + u\epsilon_k + v(\epsilon_{\text{eff}} - \epsilon_k)} \quad (2)$$

式中: ϵ_{eff} 为多相复合材料的有效介电常数; N 为材料的相数; V_i, ϵ_i 分别为第*i*相的体积分数和介电常数; a 为拟合参数, $-1 \leq a \leq 1$; ϵ_k 为第*k*相的介电常数,复合材料的第*k*相为背景介质($1 \leq k \leq N$),其他相散射体均匀分布于其中; u 为散射体形状因子; v 为相邻散射体间的影响系数.

针对三相复合材料,Brovelli等^[15]研究发现,当 $a=0.5$ 时,LR方程式(1)转变成CRIM介电模型,其计算的复合材料有效介电常数误差最小.而沥青混合料可看作由沥青、矿料和空隙空气组成的三相复合材料,将沥青混合料各组分体积参数和介电常数代入CRIM介电模型,其中空隙空气的相对介电常数为1,可得到用来预估沥青混合料密度的CRIM模型:

$$\gamma_f = \frac{\sqrt{\epsilon_{AC}} - 1}{\frac{P_b}{\gamma_b} \times \sqrt{\epsilon_b} + \frac{1 - P_b}{\gamma_{se}} \times \sqrt{\epsilon_s} - \frac{1}{\gamma_t}} \quad (3)$$

式中： γ_f 、 γ_t 分别为沥青混合料的毛体积相对密度和理论最大相对密度； γ_b 、 γ_{se} 分别为沥青相对密度和矿料有效相对密度； ϵ_{AC} 、 ϵ_b 、 ϵ_s 分别为沥青混合料、沥青和矿料的相对介电常数； P_b 为沥青的质量分数。

假定复合材料中散射体统一为球形，即 $u=2$ ，则当 $v=0$ 时，忽略相邻散射体的影响，式(2)可转换成一维散射的Rayleigh介电模型；当 $v=2$ 时，式(2)可转换成三维散射的Böttcher介电模型。基于以上介电模型，将连续相沥青作为背景介质，则矿料和空隙空气作为散射体被沥青均匀包裹，可得用来预估沥青混合料密度的Rayleigh模型和Böttcher模型，分别见

$$\gamma_f = \frac{\frac{\epsilon_{AC} - \epsilon_b}{3\epsilon_{AC} - 2.3\epsilon_b} - \frac{1 - \epsilon_b}{1 + 2\epsilon_{AC} - 2.3\epsilon_b}}{\frac{\epsilon_s - \epsilon_b}{\epsilon_s + 2\epsilon_{AC} - 2.3\epsilon_b} \times \frac{1 - P_b}{\gamma_{se}} - \frac{1 - \epsilon_b}{1 + 2\epsilon_{AC} - 2.3\epsilon_b} \times \frac{1}{\gamma_t}} \quad (6)$$

2 介电特性试验

2.1 原材料与测试设备

本文设计了3种级配类型的沥青混合料，矿料级配分别取JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》中AC-13、AC-20和AC-25级配中值。沥青混合料的矿料均为石灰岩，沥青为90°沥青。Percometer介电常数仪由主机连接SF 177电容传感器探头，可将其探头置于料场未破碎矿石和大桶沥青表面，直接从主机上读取矿料和沥青的相对介电常数。该介电常数测试方法有效避免了矿料和沥青相对介电常数取值的不确定性，无需像传统方法那样通过标定多个试样来计算矿料的相对介电常数。

2.2 试验方法

为了较好地成型不同空隙率的沥青混合料试件，采用旋转压实仪将不同质量的沥青混合料统一制作成直径100 mm×高度84 mm的试件，不同类型的沥青混合料试件各成型12个。试件上、下面各切割一部分，切割后试件高度为70 mm，这样测试面可以与Percometer探头更好地有效接触。在试件上、下面不同方位各测量5次，取均值作为沥青混合料试件的相对介电常数。采用表干法测量切割后试件的毛体积相对密度。沥青混合料的理论最大相对密度通过真空法测得。

3 结果与分析

不同类型沥青混合料的实测参数值见表1。将各

式(4)、(5)：

$$\gamma_f = \frac{\frac{\epsilon_{AC} - \epsilon_b}{\epsilon_{AC} + 2\epsilon_b} - \frac{1 - \epsilon_b}{1 + 2\epsilon_b}}{\frac{\epsilon_s - \epsilon_b}{\epsilon_s + 2\epsilon_b} \times \frac{1 - P_b}{\gamma_{se}} - \frac{1 - \epsilon_b}{1 + 2\epsilon_b} \times \frac{1}{\gamma_t}} \quad (4)$$

$$\gamma_f = \frac{\frac{\epsilon_{AC} - \epsilon_b}{3\epsilon_{AC}} - \frac{1 - \epsilon_b}{1 + 2\epsilon_{AC}}}{\frac{\epsilon_s - \epsilon_b}{\epsilon_s + 2\epsilon_{AC}} \times \frac{1 - P_b}{\gamma_{se}} - \frac{1 - \epsilon_b}{1 + 2\epsilon_{AC}} \times \frac{1}{\gamma_t}} \quad (5)$$

实际情况下，沥青混合料的矿料和空隙空气并不是理想的球体，它们形态多样，而散射体形状因子 u 取决于散射体的形状。Leng^[16]基于Böttcher介电模型($v=2$)，对5种类型沥青路面芯样的密度与介电常数数据进行了非线性拟合，求得 u 的最优解为-0.3，进而得到了用来预估沥青混合料密度的ALL模型：

沥青混合料试件的毛体积相对密度与相对介电常数实测结果，以及表1中参数值分别代入密度预估模型式(3)~(6)，可得出相应模型的密度预估值。

表1 不同类型沥青混合料的实测参数值

Table 1 Measured parameter values of different types of asphalt mixtures

Mixture	ϵ_s	ϵ_b	$P_b/\%$	γ_b	γ_{se}	γ_t
AC-13	7.7	2.7	4.5	1.011	2.755	2.557
AC-20	7.7	2.7	4.1	1.011	2.751	2.569
AC-25	7.7	2.7	3.8	1.011	2.746	2.580

3.1 密度预估模型比较

各沥青混合料实测密度和预估密度见图1。由图1可见：各沥青混合料的密度与相对介电常数呈现正相关关系；沥青混合料的密度增大，即相对介电常数较小的空隙空气所占体积比例减小，则混合料的相对介电常数增大；由于试件高度方向的材料离析，故个别测量结果存在变异性。对于不同级配类型的沥青混合料，Rayleigh模型和ALL模型的预估密度结果接近，沥青混合料相对介电常数较小时，模型预估密度较实测密度偏小，相对介电常数较大时则反之；CRIM模型与Böttcher模型的预估密度结果相近，其变化趋势与Rayleigh模型和ALL模型预估密度的变化趋势基本一致，但CRIM模型与Böttcher模型的预估密度值始终小于Rayleigh模型和ALL模型。对模型预估密度与实测密度进行局部比较发现，沥青混合料相对介电常数存在一个临界值，在临界值以上CRIM模型和

Böttcher模型预估密度与实测密度较吻合(即模型预估精度较高),在临界值以下则Rayleigh模型和ALL

模型的预估精度较高.对于AC-13、AC-20和AC-25沥青混合料,相对介电常数临界值均为6.7.

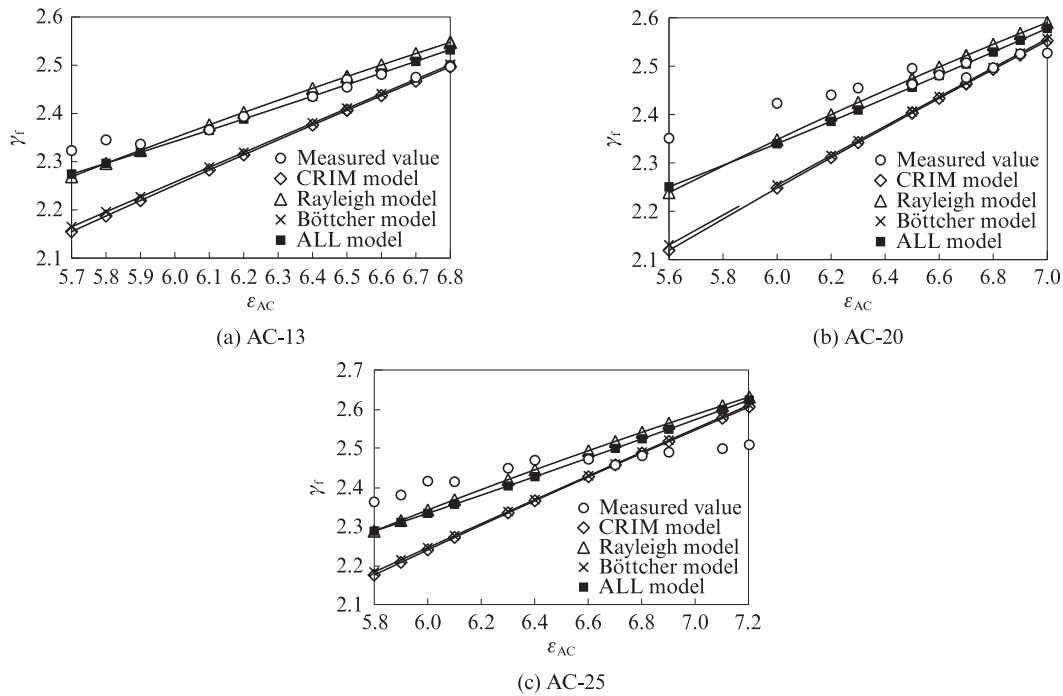


图1 各沥青混合料实测密度和预估密度
Fig. 1 Measured density and predicted density of different asphalt mixtures

为了量化比较不同模型对沥青混合料密度的预估精度,将4种模型对不同类型沥青混合料各12个试件的预估密度相对误差分别取均值,结果见图2.由图2可见:对于不同类型的沥青混合料,Rayleigh模型和ALL模型的预估密度平均相对误差都小于2.6%,明显小于CRIM模型和Böttcher模型;ALL模型预估密度的平均相对误差最小,说明其预估精度最高,其对AC-13、AC-20和AC-25沥青混合料密度的预估值平均相对误差分别为0.8%、1.6%和2.5%;此外,4种模型对AC-13、AC-20和AC-25沥青混合

料密度的预估值整体精度逐步递减.这与沥青混合料的最大公称粒径有关,最大公称粒径越大,混合料均匀性越差,则模型对该混合料的密度预估平均相对误差越大.

3.2 空隙率对模型密度预估精度的影响

由图2可知, Rayleigh模型和ALL模型相对于另外2种模型更适用于沥青混合料的密度预估.本节进一步分析沥青混合料空隙率 V_v 对Rayleigh模型和ALL模型预估精度的影响.图3给出了不同类型沥青混合料预估密度相对误差与空隙率的关系.由图3可见, Rayleigh模型和ALL模型预估密度相对误差均随着沥青混合料空隙率的增大而呈现先减小后增大的趋势.这是由于图1中沥青混合料相对介电常数较小或较大时,模型预估密度与实测密度偏差变大;尤其当沥青混合料空隙率偏大时,会出现明显的电磁散射,从而降低相对介电常数的检测精度.由图3(a)可见:对于AC-13沥青混合料, ALL模型预估精度要高于Rayleigh模型;在AC-13沥青混合料空隙率为3.4%~7.5%时,2种模型预估密度相对稳定 and 准确, Rayleigh模型预估密度的相对误差在1.0%内,而ALL模型预估密度的相对误差均小于0.5%;在其他空隙率情况下,2种模型预估密度的相对误差均小于2.5%.由图3(b)可见:对于

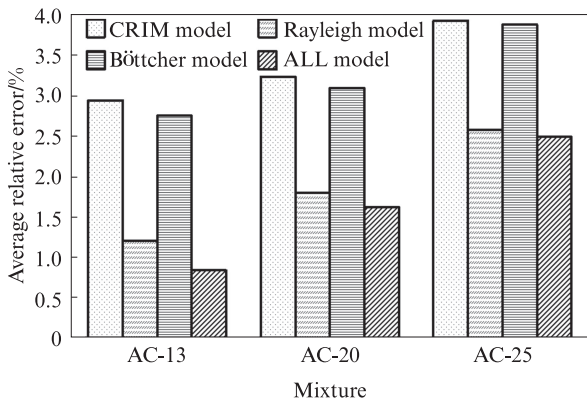


图2 沥青混合料密度预估模型的平均相对误差
Fig. 2 Average relative errors of asphalt mixture density prediction models

AC-20 沥青混合料, Rayleigh 模型和 ALL 模型预估精度相当; 在 AC-20 沥青混合料空隙率为 1.7%~4.4% 时, 2 种模型预估密度的相对误差均小于 2.0%; 而对于 $V_a \geq 5.7\%$ 的沥青混合料, 2 种模型预估密度的相对误差较大, 均超过了 3.0%。由图 3(c)

可见: 对于 AC-25 沥青混合料, 2 种模型预估密度的相对误差普遍偏大; 空隙率 3.8%~5.0% 的 AC-25 沥青混合料预估密度相对误差小于 2.5%; 当 $V_a \leq 3.4\%$ 或 $V_a \geq 6.3\%$ 时, 预估密度的相对误差明显增大。

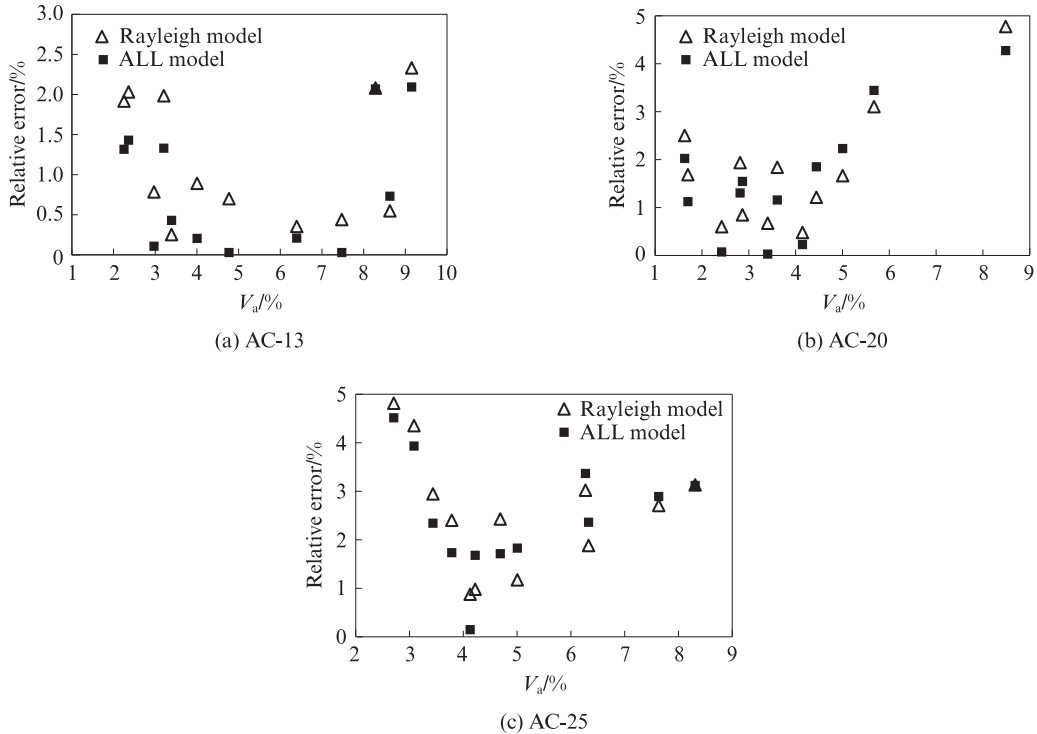


图3 不同类型沥青混合料预估密度相对误差与空隙率的关系
Fig. 3 Relationship between predicted density relative errors and void ratios of different asphalt mixtures

3.3 现场路面模型验证

室内试验优选出了 Rayleigh 模型和 ALL 模型, 为了验证这 2 种模型对现场沥青路面密度预估的适用性, 开展了沥青路面 GPR 检测和取芯验证研究. 在铺筑国道京抚公路木兰段大中修工程沥青上面层之前, 对施工完的长度为 1 km 的 AC-20 沥青下面层标记出 5 处取芯位置, 分别进行 GPR 检测、取芯和 Percometer 介电常数仪测量. 采用 MALA 探地雷达, 中心频率 1.2 GHz 的天线, 测点间距 0.4 cm, 快速检测沥青下面层标记点, 其横断面 GPR 图见图 4. 从图 4 沥青层取芯点的单道反射波形中, 提取电磁波从沥青层表面到层底传播的双程走时 Δt , 当沥青层厚度 h 已知时, 可推算出 GPR 检测的沥青混凝土等效相对介电常数 ϵ_{AC} [17].

$$\epsilon_{AC} = \left(\frac{c\Delta t}{2h} \right)^2 \quad (7)$$

式中: c 为电磁波在真空中的传播速率, $c=30 \text{ cm/ns}$.

沥青下面层 5 个芯样的厚度和相对介电常数测量值见表 2. 由表 2 可见, 由 GPR 厚度反算法即式(7)

计算的 ϵ_{AC} 与 Percometer 介电常数仪直接测量值之间的误差较小, 平均相对误差为 1.0%.

Percometer 与 GPR 所得相对介电常数的关系见图 5. 由图 5 可见, 两者与等值线的拟合优度 $R^2=0.934$, 表明 Percometer 介电常数仪和 GPR 厚度反算法的结果具有较好的一致性.

在铺筑沥青下面层测试路段当天, 对拌和站的 90# 基质沥青、石灰岩矿料和热拌沥青混合料进行检测分析, 获取 AC-20 沥青下面层密度预估模型所需的参数值, 见表 3. 将表 2 中 Percometer 介电常数仪测量的芯样相对介电常数和表 3 中参数值代入 Rayleigh 模型和 ALL 模型, 计算得到沥青下面层芯样的模型预估密度和实测密度, 结果见表 4.

由表 4 可见: 2 种模型预估的芯样密度均小于表干法实测的密度值, 这与芯样空隙率均大于 5.0% (即相对介电常数较小) 有关, 这与图 1(b) 的分析结果相符; 2 种模型预估密度的相对误差均随着芯样空隙率的增大而增大, 特别是在空隙率 $V_a > 6\%$ 时, 相对误差增大且超过 3.0%, 这与图 3(b) 的规律相吻合;

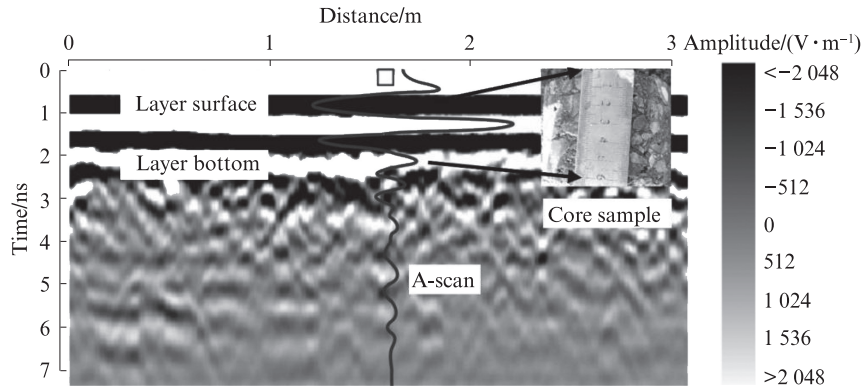


图4 沥青下面层横断面GPR图

Fig. 4 GPR image of asphalt lower layer cross section

表2 沥青下面层5个芯样的厚度和相对介电常数测量值

Table 2 Thickness and relative permittivity measured values of 5 cores in asphalt lower layer

Core specimen No.	h/cm	$\Delta t/ns$	ϵ_{AC} from GPR	ϵ_{AC} from Percometer	Relative error/%
1	5.7	0.919 61	5.857	5.8	1.0
2	6.0	0.939 26	5.514	5.6	1.5
3	5.2	0.858 04	6.126	6.1	0.4
4	5.3	0.878 23	6.178	6.1	1.3
5	5.5	0.901 42	6.044	6.0	0.7

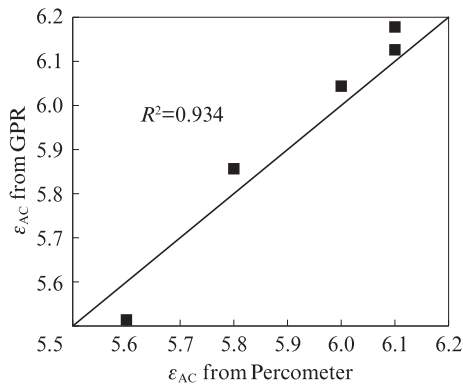


图5 Percometer与GPR所得相对介电常数的关系

Fig. 5 Relationship between relative permittivity derived from Percometer and GPR

Rayleigh模型和ALL模型预估密度的平均相对误差分别为2.7%和2.5%,均方根误差RMSE分别为0.070 2和0.061 8,说明Rayleigh模型和ALL模型的预估精度接近.以上密度误差分析结果验证了Rayleigh模型和ALL模型对AC-20沥青层密度预估的准确性和可行性.

表3 下面层沥青混合料实测参数值

Table 3 Measured parameter values for asphalt mixture of lower layer

Mixture	ϵ_s	ϵ_b	$P_b/\%$	γ_b	γ_{se}	γ_t
AC-20	7.5	2.8	4.3	1.018	2.686	2.509

表4 沥青下面层芯样的实测密度和模型预估密度

Table 4 Measured γ_f and predicted γ_f of cores in asphalt lower layer

Core specimen No.	Measured γ_f	$V_a/\%$	Rayleigh model		ALL model	
			Predicted γ_f	Relative error/%	Predicted γ_f	Relative error/%
1	2.351	6.3	2.266	3.6	2.275	3.2
2	2.320	7.5	2.210	4.7	2.232	3.8
3	2.378	5.2	2.345	1.4	2.343	1.5
4	2.383	5.0	2.345	1.6	2.343	1.7
5	2.373	5.4	2.319	2.3	2.320	2.2

4 结论

(1)Percometer介电常数仪可以快速、直接测定沥青、矿料和沥青混合料试件的相对介电常数,并且

其测量值与GPR检测结果的相对误差不超过1.5%,证明了Percometer介电常数仪测试方法的有效性.因此,Percometer介电常数仪能有效消除道路材料相对介电常数经验取值的随机性,保证测试结果的代表

性,为路面材料介电特性研究提供一种高效技术手段。

(2)4种密度预估模型中, Rayleigh模型和ALL模型整体精度明显高于CRIM模型与Böttcher模型;而ALL模型的预估密度平均相对误差最小,采用ALL模型得到的AC-13、AC-20和AC-25沥青混合料预估密度平均相对误差分别为0.8%、1.6%和2.5%。

(3)模型预估精度与沥青混合料的级配类型和空隙率密切相关;4种模型对于AC-13、AC-20和AC-25沥青混合料预估密度的平均相对误差均依次递增;沥青混合料的空隙率较小或较大时, Rayleigh模型和ALL模型预估密度的相对误差会明显增大。

(4)现场AC-20沥青层取芯验证试验结果表明, Rayleigh模型和ALL模型密度预估精度均较高,平均相对误差分别为2.7%和2.5%,均方根误差RMSE分别为0.070 2和0.061 8,2种模型均适用于现场AC类沥青路面的密度预估。

参考文献:

- [1] 杨博,郑健龙,刘宏富,等. 沥青混合料级配离析定量评价划分标准的研究与探讨[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(6):1099-1105, 1116.
YANG Bo, ZHENG Jianlong, LIU Hongfu, et al. Quantitative evaluation of criteria for asphalt mixture gradation segregation[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(6):1099-1105, 1116. (in Chinese)
- [2] LIU H, SATO M. In situ measurement of pavement thickness and dielectric permittivity by GPR using an antenna array[J]. NDT and E International, 2014, 64:65-71.
- [3] GEORGIU P, LOIZOS A. Parametric optimization of Ground Penetrating Radar approach for assessing asphalt pavement surface layers compaction[J]. Journal of Applied Geophysics, 2020, 182:104187.
- [4] STEINER T, HOEGH K, TESHAI E Z, et al. Method for assessment of modeling quality for asphalt dielectric constant to density calibration[J]. Journal of Transportation Engineering Part B: Pavements, 2020, 146(3):04020054.
- [5] MULLER W, SCHUERMAN A, REEVES B. Quantitative moisture measurement of road pavements using 3D noise-modulated GPR[C]// International Conference on Ground Penetrating Radar. Shanghai: IEEE, 2012:517-523.
- [6] ARAUJO, S, BEAUCAMP B, DELBREILH L, et al. Compactness/density assessment of newly-paved highway containing recycled asphalt pavement by means of non-nuclear method[J]. Construction and Building Materials, 2017, 154: 1151-1163.
- [7] WANG S Q, ZHAO S, AL-QADI I L. Continuous real-time monitoring of flexible pavement layer density and thickness using Ground Penetrating Radar[J]. NDT and E International, 2018, 100:48-54.
- [8] FAUCHARD C, LI B, LAGUERRE L, et al. Determination of the compaction of hot mix asphalt using high-frequency electromagnetic methods[J]. NDT and E International, 2013, 60: 40-51.
- [9] 于晓贺,罗蓉,王锦腾,等. 相对湿度对沥青混合料介电特性的影响[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(1):106-109.
YU Xiaohe, LUO Rong, WANG Jinteng, et al. Influence of relative humidity on the dielectric properties of asphalt mixture[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(1):106-109. (in Chinese)
- [10] LOIZOS A, PLATI C. Accuracy of pavement thicknesses estimation using different ground penetrating radar analysis approaches[J]. NDT and E International, 2007, 40(2):147-157.
- [11] AL-QADI I L, LENG Z, LAHOUAR S, et al. In-place hot-mix asphalt density estimation using Ground-Penetrating Radar[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2010, 2152:19-27.
- [12] LENG Z, AL-QADI I L, LAHOUAR S. Development and validation for in situ asphalt mixture density prediction models[J]. NDT and E International, 2011, 44(4):369-375.
- [13] GONCHARENKO A V, LOZOVSKI V Z, VENGER E F. Lichteneker's equation: Applicability and limitations[J]. Optics Communications, 2000, 174(1-4):19-32.
- [14] BEHARI J. Microwave dielectric behavior of wet soils[M]. New York: Springer, 2005:114-120.
- [15] BROVELLI A, CASSIANI G. Effective permittivity of porous media: A critical analysis of the complex refractive index model [J]. Geophysical Prospecting, 2008, 56(5):715-727.
- [16] LENG Z. Prediction of in-situ asphalt mixture density using Ground Penetrating Radar: Theoretical development and field verification [D]. Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2011.
- [17] PLATI C, LOIZOS A, GKURTIS K. Integration of non-destructive testing methods to assess asphalt pavement thickness[J]. NDT and E International, 2020, 115:102292.