

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20240117001

文章编号: 1672-9331(2024)01-0022-08

引用格式: 陈灿, 赵玥, 张艺锋, 等. 路面人造纹理定向设计及其抗滑性能研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2024, 21(1): 22-29, 99.

Citation: CHEN Can, ZHAO Yue, ZHANG Yifeng, et al. Directional design of pavement artificial textures and their skid resistance performance [J]. J. Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(1): 22-29, 99.

路面人造纹理定向设计及其抗滑性能研究

陈灿¹, 赵玥¹, 张艺锋², 刘西胤¹, 尹东¹, 郭雨¹, 陈思宇¹

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 211189; 2. 浙江省建筑设计研究院 市政交通设计院, 浙江 杭州 310056)

摘要:【目的】研究路面表面人造纹理与抗滑性能之间的关系。【方法】利用3D打印技术定向设计并制备不同形状的人造纹理试件(包含三角形纹理、矩形纹理和半圆形纹理3种形状和纹理高度为1、2、3、4、5 mm的5种纹理),并以4 mm高的三角形纹理设置了一组磨损纹理试件,采用摆式摩擦试验、构造深度试验以及提取纹理顶部接触区域对各个试件的抗滑性能进行评价。【结果】2 mm高的三角形纹理和3 mm高的矩形纹理的抗滑性能最好,摆值均可达到107。在构造深度和摆值两个方面,三角形纹理和矩形纹理的抗滑性能相近,且均明显大于半圆形纹理的抗滑性能。随着磨损率的增大,摩擦接触面积增大,但纹理表面粗糙程度降低,导致抗滑性能逐渐衰减。【结论】纹理的抗滑性能主要取决于纹理的粗糙程度,而接触面积的影响相对较小。本文提供了一种定向纹理设计方法,为深入理解路面表面纹理与抗滑性能之间的关系提供借鉴与指导。

关键词: 路面; 抗滑性能; 人造纹理; 定向设计; 3D打印; 磨损率

中图分类号: U416.21

文献标志码: A

Directional design of pavement artificial textures and their skid resistance performance

CHEN Can¹, ZHAO Yue¹, ZHANG Yifeng², LIU Xiyin¹, YIN Dong¹, GUO Yu¹, CHEN Siyu¹

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. Municipal Transportation Design Institute, Zhejiang Province Institute of Architectural Design and Research, Hangzhou 310056, China)

Abstract: [Purposes] The paper aims to investigate the effect of artificial surface texture on the skid resistance of pavements. [Methods] Different-shaped artificial texture specimens were designed and prepared using 3D printing technology, including three shapes (triangle, rectangle, and semicircle) and five texture heights (1, 2, 3, 4, 5 mm). A set of abrasion texture specimens with 4 mm high triangles was also prepared. The skid resistance of each specimen was evaluated using a pendulum friction test, construction depth test, and extraction of the contact area on the top of the texture. [Findings] The triangular texture with a height of 2 mm and the rectangular texture with a height of 3 mm can provide the best skid resistance for the pavement, and their pendulum values can reach 107. The skid resistance performance of the triangular texture and the rectangular texture is similar and significantly larger than that of the semicircular texture. As the wear rate increases, the friction contact area increases, but the roughness of the texture surface

收稿日期: 2024-01-17; 修回日期: 2024-01-30; 接受日期: 2024-01-30

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(52308446); 江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20220845)

通信作者: 陈思宇(1990—)(ORCID: 0000-0002-0356-1212), 男, 副研究员, 主要从事沥青路面抗滑性能、道路工程材料方面的研究。E-mail: chsy@seu.edu.cn

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

decreases, leading to a gradual decline in skid resistance. [**Conclusions**] The skid resistance of the texture mainly depends on the roughness of the texture. This study proposed a method to directionally design texture, which can provide guidance to better understand the relationship between pavement surface texture and skid resistance.

Key words: pavement; skid resistance performance; artificial texture; directional design; 3D printing; wear rate

Foundation item: Project (52308446) supported by the Young Fund of the National Natural Science Foundation of China; Project (BK20220845) supported by the Young Fund of Natural Science Foundation of Jiangsu Province

Corresponding author: CHEN Siyu (1990—) (ORCID: 0000-0002-0356-1212), male, associate professor, research interest: skid resistance performance of asphalt pavement, road engineering materials.

E-mail: chsy@seu.edu.cn

0 引言

确保道路安全是交通领域的重要任务,大量的调查研究表明道路安全与路面抗滑性能之间存在密切关系^[1]。轮胎与路面之间的摩擦主要受路面特性(如路面表面纹理、沥青与集料特性等)、轮胎特性(如橡胶性质、轮胎尺寸、胎面花纹等)、接触条件(如车速、滑移率、压力等)和接触界面的污染物(如水、沙、冰雪等)4种因素的影响^[2]。在这些影响因素中,路面表面纹理起主导作用。因此,设计一种具备优良抗滑性能的路表纹理具有重要的意义。

沥青路面是用机械设备将矿料和沥青材料拌和、摊铺,并在公路工程现场碾压而成的。路面表面纹理是由集料与沥青组合形成的,纹理形状不规则,在每个尺度下具有不同的表面粗糙度^[3-4]。纹理的不规则给研究沥青路面路表纹理的摩擦机理以及定向设计具有抗滑性能的路表纹理带来了巨大的挑战。

目前,国内外学者针对如何提高路面抗滑性能的研究有很多。部分学者^[5-6]研究发现可以通过提高路面集料的磨光值来提高路面抗滑性能;也有研究^[7-8]发现当路面同时采用两种耐磨性不同的材料时,在路面被磨耗的过程中,耐磨性弱的材料比耐磨性强的材料先被磨损,使路面表面纹理具有更多凹凸形状,从而提高路面的抗滑性能。但在进一步定向设计抗滑性能优异的路面表面纹理时,纹理的不规则给研究带来了很大的困难。

3D打印也称为增材制造,是基于离散-堆积

原理将三维模型经过切片处理,并通过二维层面堆积并沿成形方向逐层增加打印材料,制造出三维实体物品的技术。近年来,许多研究人员将3D打印技术引入路面工程领域的研究中,该技术在道路修复、材料、施工方面都取得了一定的进展^[9],如周思齐等^[10]通过3D打印模拟制备月壤道路材料,并探究其路用性能。WEI等^[11]利用3D打印混凝土纹理研究了其对轮胎应力分布的影响。MAHBOOB KANAFI等^[12]利用激光扫描仪和3D打印技术复刻了沥青路面表面纹理并对两者进行了比较,研究发现两者的摩擦系数差异约为0.2。但是3D打印技术在道路工程领域仍处于起步阶段,尤其是对抗滑性能具有高要求的特殊路段,并未见相关研究。

本研究的目的是利用3D打印技术初步探究不同纹理的抗滑性能。通过定向设计不同形状的规则的人造纹理,分析这些纹理特征对抗滑性能的影响。本研究中设定了纹理形状、纹理高度和磨损率3个变量,从摆值、构造深度和顶部纹理分析3个角度对人造纹理试件的抗滑性能进行了评价。本文提供了一种定向设计路面表面纹理的方法,为深入了解路表纹理与抗滑性能之间的关系提供借鉴与指导。

1 材料与试验

本研究通过3D打印技术设计人造纹理并探究其抗滑性能。3D打印机是武汉易成三维科技有限公司生产的型号为YC334打印机。这是一种采用熔融沉积成型工艺的3D打印机,其最大打印

尺寸为 300 mm×300 mm×400 mm, 打印精度为 0.2 mm。采用的打印材料为 PolyLite™ PLA, 它是一种兼具可靠性和打印易用性, 具有良好的强度和刚度的材料, 材料属性参数如表 1 所示。需要说明的是, 为了实现人造纹理将来在路面实际工程中直接应用的目标, 需要攻克路表纹理定向设计、材料制备、材料现场打印等难题, 其涉及道路、材料、机械、自动化等领域, 具有极强的交叉学科性质。本研究侧重于路表纹理的定向设计研究, 采用常用的 3D 打印材料在室内制备小尺寸试件, 并进一步进行摆式摩擦试验、构造深度试验和顶部纹理分析, 探究宏观人造纹理的抗滑性能。

表 1 3D 打印材料参数

Table 1 Parameters of the 3D printing material

参数	参数大小	参考标准
邵氏硬度(D型)	80	ASTM D2240
拉伸强度/MPa	56	ASTM D638M
弯曲强度/MPa	73	ASTM D790M
泊松比	0.4	ASTM D638M
热变形温度/°C	57	ASTM D648
缺口冲击强度/(J·m ⁻¹)	60	ASTM D256A

1.1 人造纹理制备

在人造纹理的设计过程中, 主要考虑了纹理形状、纹理高度 h 和纹理波长 λ 3 个变量。

目前, 已有许多学者^[13-14]对纹理参数与路面抗滑性能之间的关系进行了研究, 其中 LI 等^[15]在对比了多个纹理指标之后, 在表征路面抗滑性能时采用了偏斜度 R_{sk} 作为主要参数。故针对纹理形状, 本研究利用 R_{sk} 来表征路面轮廓形状, 其可由式(1)和(2)计算得到, 并用以区分路面纹理是正纹理还是负纹理。当 $R_{sk}=0$ 时, 表示纹理相对于路面基线呈均匀分布; 当 $R_{sk}>0$ 时, 表示纹理曲线的波峰尖锐, 波谷平坦, 为正偏态分布的正纹理; 当 $R_{sk}<0$ 时, 表示纹理曲线的波峰宽平, 波谷尖锐, 为负偏态分布的负纹理^[16]。

$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z^3(x_i) \quad (1)$$

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z^2(x_i)} \quad (2)$$

式中: N 为路面轮廓的总点数; i 为介于 1 和 N 之间的正整数, 为第 i 个点的标号; x_i 为第 i 个点的横坐标;

$z(x_i)$ 为第 i 个点的高程; R_q 为纹理高程的均方根。

根据 R_{sk} 的正负, 本研究设计了 3 种形状的人造纹理, 分别为半圆形 ($R_{sk}<0$)、矩形 ($R_{sk}=0$) 和三角形 ($R_{sk}>0$), 如图 1 所示。在实际工程中, 路面纹理高度为从纹理波峰至纹理基准线的距离, 其基本上为 0.5~2.0 mm^[17-18], 而本研究中的纹理高度 h 指从纹理波峰到波谷的距离, 故为实际工程中纹理高度的两倍。本研究设置了 5 种纹理高度, 分别为 1、2、3、4 和 5 mm。三角形纹理、矩形纹理和半圆形纹理的纹理波长 λ 均为纹理高度 h 的两倍, 即 $\lambda=2h$, 如图 1 所示。

关于人造纹理试件板的尺寸, 考虑到摆值试验时要求试件长度不小于 126.0 mm, 宽度不小于 76.2 mm, 故设置试件底板为 200 mm×100 mm×5 mm, 如图 2 所示。

此外, 为初步探究纹理在被磨耗的过程中其抗滑性能衰减的情形, 本研究基于 4 mm 高度的三

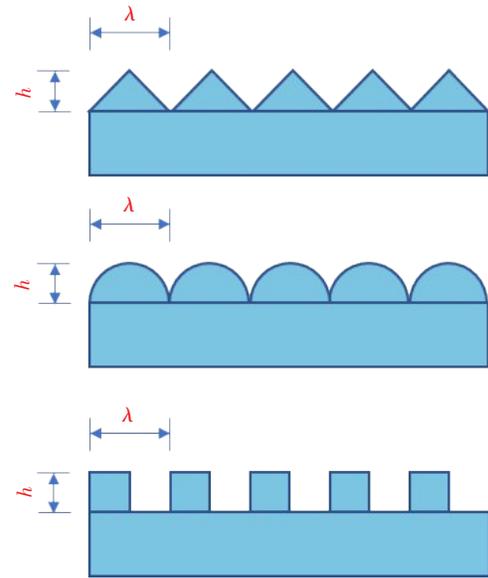


图 1 人造纹理轮廓示意图

Fig. 1 Sketch of artificial texture outline

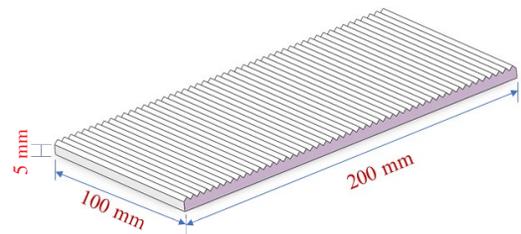


图 2 人造纹理设计图

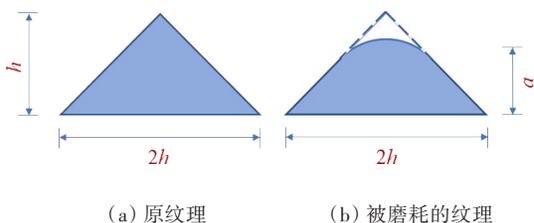
Fig. 2 Artificial texture design drawing

角形纹理,设置了磨损率 α 分别为0%、25%、50%、75%和100%的5种试件,其中 α 可以由式(3)计算得到。

$$\alpha = \frac{h - a}{h - A} \times 100\% \quad (3)$$

式中: h 为未被磨损时纹理顶部距离波谷的高度; a 为在相应的磨损率下纹理顶部距离波谷的高度(图3); A 为在100%磨损率下纹理顶部距离波谷的高度。

考虑100%磨损率下三角形纹理已经被磨得平坦圆滑,本研究中设置100%磨损率下纹理形状已变成与原三角形两边相切的弓形,计算得到 A 为1.65 mm。



(a) 原纹理 (b) 被磨损的纹理

图3 磨损纹理示意图

Fig. 3 Sketch of the wear texture

1.2 摆式摩擦试验

摆式摩擦试验是工程中广泛应用的评价路面抗滑性能的试验^[19],如图4所示。该试验利用能量守恒原理,先将摆锤下摆的势能转变为动能,在橡胶滑块划过路面后再将动能转换为势能,通过前后能量差来表征路面的抗滑性能,称为摆值(british pendulum number, BPN),为无量纲的量。本研究中每个试件的摆值均测量5次,且这5次的



图4 摆式摩擦试验

Fig. 4 British pendulum friction test

摆值最大差值不得大于3,最后取平均值作为该试件的摆值。

1.3 构造深度试验

目前,已有不少研究表明路面构造深度(texture depth, TD) d_{TD} 与抗滑性能密切相关^[20],该指标也被纳入规范当中。规范中采用铺砂法测量构造深度时,通常是将固定体积的细砂摊铺在检测点上,量取摊平后细砂所覆盖的面积,计算砂的体积与面积的比值,即得到构造深度。

由于3D打印试件尺寸较小,难以使用传统的铺砂法来求得试件的构造深度。因此,本研究设计了一个用于人造纹理构造深度测量的装置,如图5所示。试验时将试件固定在容器中,将细砂摊平在试件表面后,采用量筒测量试件表面砂子的体积 V ,然后通过式(4)计算得到试件的构造深度。每个试件的构造深度测量3次,最大误差不超过0.01 mm,并取平均值作为该试件的构造深度^[21]。

$$d_{TD} = \frac{1\ 000V}{200 \times 100} = 0.05V \quad (4)$$

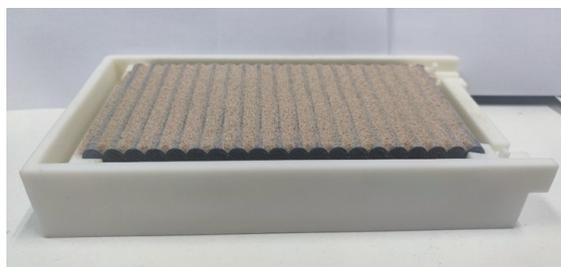


图5 铺砂法试验

Fig. 5 Sand patching method test

1.4 路表纹理顶部分析

相关研究表明,在橡胶轮胎与路面接触过程中,并不是全深度范围内的纹理都参与接触并提供摩擦力,而是路表纹理顶部贡献了大部分的摩擦力。有研究^[22]显示,当压力不同时路表纹理的有效接触区域不同。但根据DING等^[23]对路表纹理与实测摩擦系数的研究显示,与摆值相关的路表有效接触深度为距纹理顶部2 mm左右。本研究针对3种理想形状的人造纹理开展路表纹理顶部分析,同时根据这些纹理的设计参数,提取4 mm纹理高度试件的顶部2 mm的部分,用于抗滑性能的研究分析。此外,本研究还对不同磨损率下的三角形纹理顶部接触区域进行了分析。

2 试验结果分析

2.1 摆值结果

图6所示为3种理想形状的人造纹理的摆值测定结果。由图6可以看出,所有试件的摆值都大于85,由于实际路面的摆值基本上都在80以下^[5,24],这说明它们都具有较好的抗滑性能。已有研究^[25-26]表明,路表摩擦力主要由黏附摩擦力和迟滞摩擦力两部分组成,其中黏附摩擦力主要来自两个接触面的分子间作用力,迟滞摩擦力来自胎面橡胶变形导致的能量耗散。随着纹理高度的增加,3种纹理的试件摆值大体上均呈先增大后减小的变化趋势,原因是当纹理高度较小时,试件较平滑,由橡胶变形引起的能量耗散较小,随着纹理高度的增加,橡胶变形引起的能量耗散增大,摆值增加。然而,随着纹理逐渐增高,橡胶滑块与试件之间的摩擦接触面积减小,导致摆值减小。

从摆值结果中可以看出,对于不同形状的人造纹理,三角形纹理和矩形纹理的摆值相差很小,而半圆形纹理的摆值明显小于前两者的摆值。这表明三角形纹理、矩形纹理的抗滑性能相对较好,半圆形纹理抗滑性能稍差。抗滑性能最好的分别是2 mm高度的三角形纹理和3 mm高度的矩形纹理,其摆值均为107。

图7所示为不同磨损状态下磨损纹理的摆值。由图7可以看出,摆值随磨损率的增大而逐渐减小,即试件在磨损率为0%时,摆值最大,在磨损率为100%时,摆值最小,而且摆值的减小速度随着磨损率的增大而逐渐变大。原因是纹理从无磨损

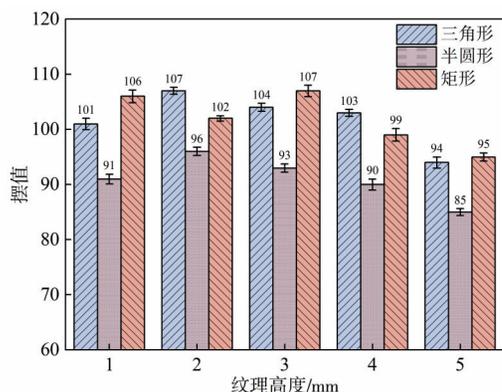


图6 3种理想形状人造纹理的摆值

Fig. 6 BPN values of three simple artificial textures

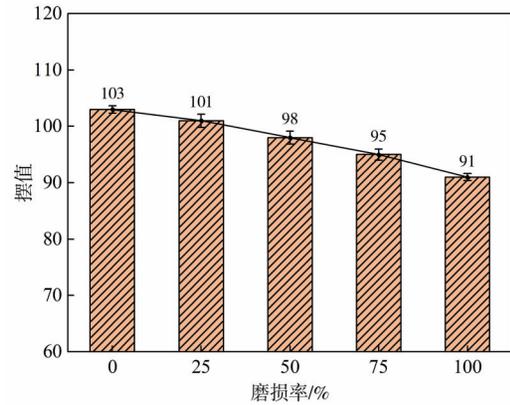


图7 磨损纹理的摆值

Fig. 7 BPN values of wear textures

状态到开始产生磨损,纹理顶部虽然开始变得光滑,但顶部纹理高度的下降导致橡胶滑块与纹理的接触面积变大,对抗滑性能的降低产生了延缓作用,随着磨损的逐渐增加,这种延缓作用抵抗纹理光滑化的效果逐渐变弱,故而随着磨损率的增加,试件的摆值减小速度逐渐变大。

2.2 构造深度结果

图8所示为3种理想形状的人造纹理试件的构造深度试验结果。由图8可以看出,3种人造纹理试件的构造深度随着纹理高度的增加而逐渐变大,且在纹理高度为1 mm时取得最小值,在5 mm时取得最大值。在相同纹理高度下,矩形纹理试件的构造深度略大于三角形纹理试件的,两者的构造深度均远大于半圆形纹理试件的;在构造深度增长速度方面,矩形纹理和三角形纹理试件的构造深度增长速度几乎一致,而半圆形纹理试件的增长速度较小。构造深度的结果反映出三角形纹理和矩形纹理的抗滑性能相对来说更好一些,半圆形纹理的抗滑性能稍微差一些。用铺砂法测量试件的构造深度时,随着纹理高度的增加,相同面积的试件所需要的砂子体积增大,导致构造深度逐渐增大,三角形纹理和矩形纹理试件需要的砂子的体积比半圆形纹理试件的大,且前两者的构造深度变化得更快。

图9所示为不同磨损纹理的构造深度试验结果。由图9可以看出,不同磨损状态下的纹理,其构造深度随磨损率的增大而逐渐减小,即试件在磨损率为0%时,构造深度最大,在磨损率为100%时,构造深度最小,总体呈递减趋势,这与摆式摩

擦试验得到的结果相符。但值得注意的是,构造深度随磨损率增大的降低速率在逐渐减小。

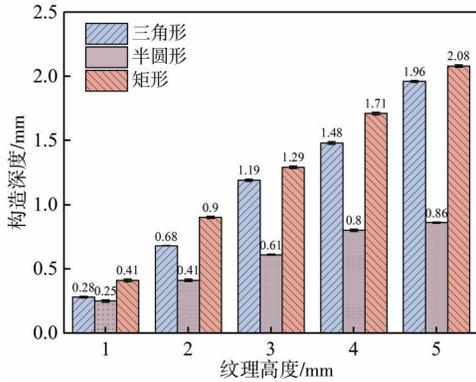


图 8 三种理想形状的人造纹理的构造深度
Fig. 8 d_{TD} of three simple artificial textures

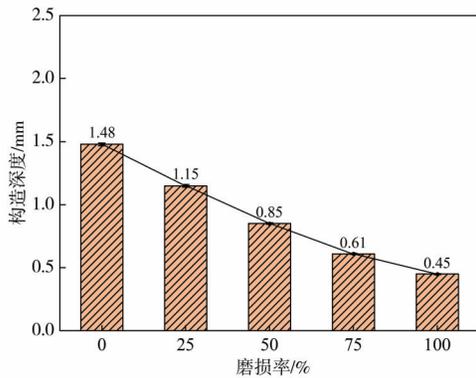


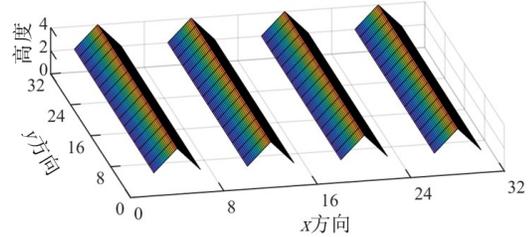
图 9 磨损纹理的构造深度
Fig. 9 Texture depth of wear textures

2.3 路表纹理顶部分析结果

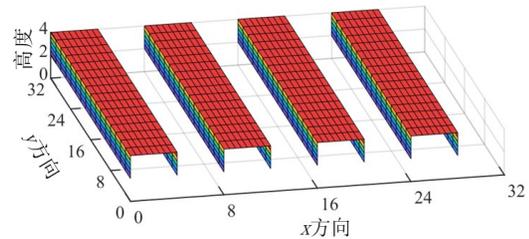
图 10 所示为 3 种 4 mm 高的理想形状的人造纹理的顶部接触区域。由图 10 可以看出,半圆形纹理的顶部接触面积大于矩形纹理的顶部接触面积,而三角形纹理的在三者中最小。顶部的粗糙程度恰恰相反,三角形纹理的顶部最粗糙,矩形纹理的次之,而半圆形纹理的顶部变化最平缓。由图 6 可以看出,三角形纹理的摆值为 103,半圆形纹理的摆值为 90,矩形纹理的摆值为 99。这说明在这个尺度下,纹理的粗糙程度比摩擦接触面积更容易影响抗滑性能。

为了进一步验证这个结论,图 11 展示了三角形纹理在不同磨损率下的顶部接触区域,其中磨损率为 0% 的初始状态如图 10(a) 所示。由图 11 可以看出,随着磨损率的逐渐增大,顶部接触区域的面积逐渐变大,纹理也逐渐平缓,结合图 7 给出的不同磨损率下的摆值结果可知,它们的摆值随

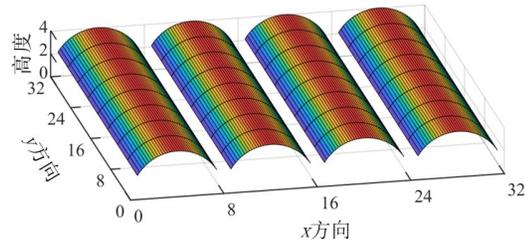
着磨损率的增加而减小。这进一步说明了在该尺度下,随着摩擦接触面积的增大,纹理粗糙度的减小,抗滑性能仍然在减小,纹理粗糙度相对来说占主导作用。



(a) 三角形纹理顶部接触区域



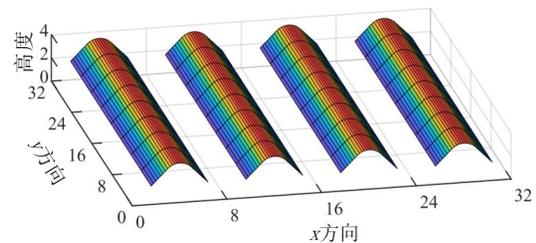
(b) 矩形纹理顶部接触区域



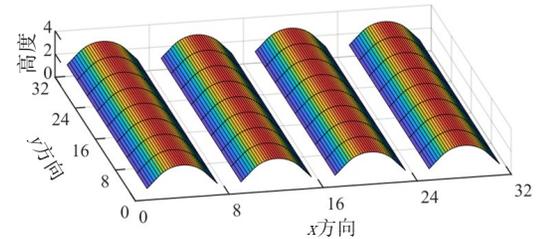
(c) 半圆形纹理顶部接触区域

图 10 4 mm 高度理想形状人造纹理的顶部接触区域
(单位:mm)

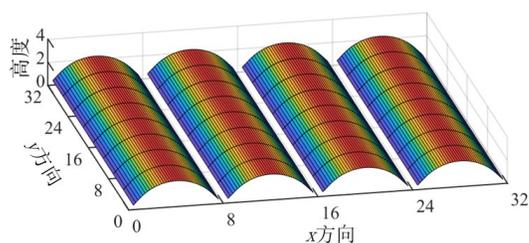
Fig. 10 Top contact area of simple artificial textures at with the height of 4 mm (unit:mm)



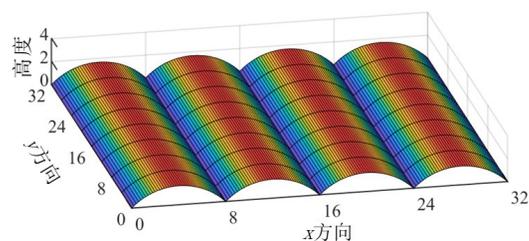
(a) 磨损率为 25% 的纹理顶部接触区域



(b) 磨损率为 50% 的纹理顶部接触区域



(c) 磨损率为75%的纹理顶部接触区域



(d) 磨损率为100%的纹理顶部接触区域

图11 磨损纹理的顶部接触区域(单位:mm)

Fig. 11 Top contact area of worn textures(unit:mm)

3 结论与展望

本研究侧重于路表纹理的定向设计研究,采用常用的3D打印材料在室内制备了3种理想形状的人造纹理试件,并进行了摆式摩擦试验、构造深度试验和顶部纹理分析,探究了人造纹理的抗滑性能。

1) 在理想形状纹理中,矩形纹理和三角形纹理具有较好的抗滑性能,并且在纹理高度达到2 mm左右时其抗滑性能较好;不同磨损状态下的纹理抗滑性能如下:在磨损率为0%时,该类路表纹理的抗滑性能最强,且抗滑性能随着磨损率的增大而逐渐减小,减小的速度随磨损率的增大而增加。但是部分试件的摆值差异甚至小于同一块试件摆值测定的标准差,使得用摆值来判定不同人造纹理的抗滑性能存在一定的局限性。

2) 与摆值相比,铺砂法的试验结果对不同形状、不同纹理高度的试件构造深度的差异有更好的体现。此外,对于高度为4 mm的纹理,其抗滑性能主要受纹理粗糙度的影响,而受摩擦接触面积的影响较小。

结合上述结论分析可知,一方面,摆值和构造深度对抗滑性能的测量与评定均有一定的局限性,而且本研究人造纹理的抗滑性能均在相应标

准要求的条件下测得,目的是比较不同纹理在相同条件下的抗滑性能,而路表的抗滑性能还会受到环境因素的影响,所以需要研究出更优、更全面的抗滑性能测量及评定方法;另一方面,本研究仅为对纹理定向设计的初步探究,所涉及的纹理为理想形状,且种类较少。此外,如何将定向设计出来的抗滑性能良好的人造纹理应用到实际工程当中,也需要结合不同领域开展进一步的研究。目前,已有研究实现了单独对沥青的3D打印和单独对集料的3D打印,但是如何将3D打印沥青技术和3D打印集料技术按一定的方法结合起来,并应用到实际工程中,是下一步急需攻克的问题。

[参考文献]

- [1] MCCULLOUGH B F, HANKINS K D. Skid resistance guidelines for surface improvements on Texas highways [R]. Austin: The Texas Highway Department, 1966: 204-217.
- [2] DO M T, CEREZO V. Road surface texture and skid resistance [J]. Surface Topography Metrology and Properties, 2015, 3(4): 043001. DOI: 10.1088/2051-672X/3/4/043001.
- [3] XIAO S Q, TAN Y Q, XING C, et al. Scale demarcation of self-affine surface of coarse aggregate and its relationship with rubber friction [J]. Road Materials and Pavement Design, 2020, 22(8): 1-18. DOI: 10.1080/14680629.2020.1728365.
- [4] 罗浩原, 黄晓明. 废油再生沥青二次老化后的性能与组分变化[J]. 中国公路学报, 2021, 34(10): 98-110. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2021.10.009. LUO Haoyuan, HUANG Xiaoming. Research on change of performance and component of recycled oil regenerated asphalt during secondary aging [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(10): 98-110. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2021.10.009.
- [5] 宁斌权. 沥青路面抗滑性能衰变规律及修复技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018. NING Binqun. Study on decay law and repair technology of anti-skid performance of asphalt pavement [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.
- [6] 许新权. 湿热地区沥青路面抗滑性能演化行为及长效抗滑表层设计研究[D]. 南京: 东南大学, 2023. DOI: 10.27014/d.cnki.gdnau.2021.004007. XU Xinquan. Study on evolution behavior of skid resistance of asphalt pavement design of long-term anti-skid surface in humid and hot areas [D]. Nanjing: Southeast University, 2023. DOI: 10.27014/d.cnki.gdnau.2021.004007.
- [7] LUO H, CHEN S, ZHU L, et al. Investigation of

- surface textures deterioration on pavement skid-resistance using hysteresis friction models and numerical simulation method [J]. *Friction*, 2024, 12 (4): 745-779. DOI: 10.1007/s40544-023-0811-1.
- [8] HUAN X, SHENG Y P, ZHAO X R, et al. Skid-resistance durability and wear/polish-resistance behaviors of ultra-thin friction course designed based on the differential polishing of aggregates [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 78 (3): 107585. DOI: 10.1016/j.jobeb.2023.107585.
- [9] 郭猛, 任鑫. 3D打印技术在道路工程的应用综述 [J]. *中国建材科技*, 2021, 30(3): 60-62.
GUO Meng, REN Xin. A state of the art review on application of 3D printing technology in road engineering [J]. *China Building Materials Science & Technology*, 2021, 30(3): 60-62.
- [10] 周思齐, 张荣荣, 杨湛宁, 等. 3D打印模拟月壤道路材料制备与性能研究 [J]. *中国公路学报*, 2022, 35 (8): 105-117. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2022.08.010.
ZHOU Siqi, ZHANG Rongrong, YANG Zhanning, et al. Preparation and performance evaluation on 3D printed road material based on lunar soil simulant [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(8): 105-117. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2022.08.010.
- [11] WEI S, WANG Y H, CHENG H L, et al. Stress distributions in the textures of prefabricated pavement surface created with the assistance of 3D printing technology [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2021, 24 (4): 1-17. DOI: 10.1080/10298436.2021.2005058.
- [12] MAHBOOB KANAFI M, TUONONEN A. Application of three-dimensional printing to pavement texture effects on rubber friction [J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2016, 629: 1-17. DOI: 10.1080/14680629.2016.1194883.
- [13] 任万艳. 沥青路面表面纹理磨损特性及其对噪声的影响研究 [D]. 西安: 长安大学, 2019. DOI: 10.26976/d.cnki.gchau.2019.000027.
REN Wanyan. Study on the abrasion characteristic of surface texture and its effect on noise for asphalt pavements [D]. Xi'an: Chang'an University, 2019. DOI: 10.26976/d.cnki.gchau.2019.000027.
- [14] 刘梦梅. 沥青路面多参数优化IFI模型及其在长期抗滑性能评价中应用研究 [D]. 西安: 长安大学, 2021.
LIU Mengmei. Study on multi-parameter optimization IFI model of asphalt pavement and its application in long-term anti-skid performance evaluation [D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [15] LI Q, ZHAN Y, YANG G W, et al. Pavement skid resistance as a function of pavement surface and aggregate texture properties [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2018, 21 (2): 1-11. DOI: 10.1080/10298436.2018.1525489.
- [16] CHEN C, LUO H Y, CHEN S Y, et al. Exploring the relationship between pavement surface texture and friction based on Hilbert-Huang Transformation [J]. *Tribology International*, 2023, 187: 108737. DOI: 10.1016/j.triboint.2023.108737.
- [17] MIAO Y H, CHEN G H, WANG W T, et al. Application of gray-tone difference matrix-based features of pavement macrotexture in skid resistance evaluation [J]. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 2015, 31(3): 389-395.
- [18] GUO F C, PEI J Z, HUANG G J, et al. Evolution of tire-pavement friction with the regular surface macrotexture characteristics and environmental factors using three-dimensional (3D) printing technology [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 382 (3): 135293. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.135293.
- [19] ZHAN Y, LIU C, DENG Q S, et al. Integrated FFT and XGBoost framework to predict pavement skid resistance using automatic 3D texture measurement [J]. *Measurement*, 2021, 188(7): 110638. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.110638.
- [20] CHEN S Y, CHEN C, MA T, et al. Rapid extraction of pavement aggregate gradation based on point clouds using deep learning networks [J]. *Automation in Construction*, 2023, 154(3): 105023. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.105023.
- [21] 李孔荡. 关于电动铺砂法检测路面构造深度的分析探讨 [J]. *福建建设科技*, 2022(4): 98-100.
LI Kongdang. Analysis and discussion for testing pavement texture depth by automatic sand paving method [J]. *Fujian Construction Technology*, 2022(4): 98-100.
- [22] 徐粒. 路表三维纹理重构及其与路面抗滑性能的关联性研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2021. DOI: 10.27429/d.cnki.gxjdu.2021.000519.
XU Li. Study on 3D texture reconstruction of pavement surface and its correlation with anti-skid performance [D]. Urumuqi: Xinjiang University, 2021. DOI: 10.27429/d.cnki.gxjdu.2021.000519.
- [23] DING S H, WANG K, YANG E H, et al. Influence of effective texture depth on pavement friction based on 3D texture area [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 287(5-6): 123002. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123002.
- [24] 唐胜刚. 基于路表纹理的沥青路面抗滑行为研究 [D]. 南京: 东南大学, 2022.
TANG Shenggang. Research on anti-skid behavior of asphalt pavement based on pavement texture [D].

(下转第99页)

- ZHANG Wengang, GU Xin, LIU Hanlong, et al. Probabilistic back analysis of soil parameters and displacement prediction of unsaturated slopes using Bayesian updating[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(4): 1112–1122. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1150.
- [17] GILKS W R, RICHARDSON S, SPIEGELHALTER D. Markov chain Monte Carlo in practice[M]. Boca Raton: CRC press, 1995.
- [18] SONG C, ZHAO T Y, XU L, et al. Probabilistic prediction of uniaxial compressive strength for rocks from sparse data using Bayesian Gaussian process regression with synthetic minority oversampling technique (SMOTE)[J]. *Computers and Geotechnics*, 2024, 165: 105850. DOI: 10.1016/j.compgeo. 2023. 105850.
- [19] JAWORSKI P, DURANTE F, HARDLE W K, et al. Copula theory and its applications [M]. Berlin: Springer, 2010.
- [20] GRONAU Q F, SARAFIOGLOU A, MATZKE D, et al. A tutorial on bridge sampling [J]. *Journal of Mathematical Psychology*, 2017, 81: 80–97. DOI: 10.1016/j.jmp.2017.09.005.
- [21] YAN W M, YUEN K V, YOON G L. Bayesian probabilistic approach for the correlations of compression index for marine clays [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135 (12) : 1932–1940. DOI: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000157.
- [22] PUPPALA A J, MOHAMMAD L N, ALLEN A. Engineering behavior of lime-treated Louisiana subgrade soil [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1996, 1546(1): 24–31. DOI: 10.1177/0361198196154600103.
- [23] VANHATALO J, RIIHIMÄKI J, HARTIKAINEN J, et al. GPstuff: Bayesian modeling with Gaussian processes [J]. *The Journal of Machine Learning Research*, 2013, 14(1): 1175–1179.
- [24] 陈向阳,王岩.建筑废弃物改良红黏土填料的力学特性研究[J].*交通科学与工程*, 2023, 39(4): 47–53. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021092623081974.
CHEN Xiangyang, WANG Yan. Investigation on mechanical properties of red clay filler modified by construction waste[J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2023, 39 (4) : 47–53. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021092623081974.
- [25] 丁继承.含水率和应力比对路基红砂土回弹模量及累积塑性应变的影响研究[J].*公路与汽运*, 2021 (6) : 74–79, 87. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668. 2021. 06.018.
DING Jicheng. Study on the influence of water content and stress ratio on resilience modulus and cumulative plastic strain of subgrade red sand [J]. *Highways & Automotive Applications*, 2021 (6) : 74–79, 87. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2021.06.018.

(责任编辑:石月珍;校对:刘平;英文编辑:吴高桥)

(上接第29页)

- Nanjing: Southeast University, 2022.
- [25] 黄晓明,郑彬双.沥青路面抗滑性能研究现状与展望[J].*中国公路学报*, 2019, 32(4): 32–49. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.04.003.
HUANG Xiaoming, ZHENG Binshuang. Research status and progress for skid resistance performance of asphalt pavements [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32 (4) : 32–49. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.04.003.
- [26] 孙志林,高超,马帅杰.高抗滑性微表处混合料的制备及性能研究[J].*长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 20 (6) : 80–90. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220415001.
SUN Zhilin, GAO Chao, MA Shuaijie. Study on preparation and performance of micro-surfacing mixture with high skid resistance [J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2023, 20(6): 80–90. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220415001.

(责任编辑:刘平;校对:石月珍;英文编辑:李岳林)