

## 3D 打印技术在路面修复中的应用研究综述

肖庆一<sup>1,2</sup>, 苏刚<sup>1,2\*</sup>, 张恒<sup>1,2</sup>, 陈向伟<sup>1,2</sup>

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津市 300401; 2. 天津市交通工程绿色材料工程技术中心, 天津市 300401)

**摘要:**随着中国道路总里程的不断增加,路面灾害的修复对交通系统的运行愈发重要。但传统路面修复手段需要的交通管制时间过长,容易造成交通堵塞,甚至导致交通事故和人员伤亡。3D 打印技术作为新型快速制造技术,可以缩短路面修复工程的时间,避免大量的经济损失。该文首先概述路面灾害中裂缝和坑槽的几种传统修复方法,分析传统修复手段存在的不足;然后概述 3D 打印技术的现状,介绍 3D 打印技术的主要应用技术分类以及在建筑领域的运用。重点阐述 3D 打印技术应用于路面破损养护修复的间接法、直接法,基于引用的研究背景提出两种新兴修复技术可以改进的方向以及 3D 打印技术的发展前景。

**关键词:**3D 打印技术; 裂缝; 坑槽; 路面修复工程

随着中国交通行业的迅速发展,高速公路总里程数已经达到了世界第一<sup>[1]</sup>。但总里程的增加也加大了路面修复工程的工作强度。传统的路面修复手段不仅要实行交通管制来保证修补工作的正常进行,还要保证一段时间的养护期来确保修补料能形成强度,费时、费力,而且效率低。这就需要一种新型技术,既能快速有效完成路面养护工作,亦能保证修复质量。

信息化的发展带动国家的发展方向朝着智能化的

方向前进。3D 打印技术作为一种融合了多个领域研究成果的智能制造技术,其在各个领域得到广泛应用。从《3D 打印技术产业发展行动计划》到《增强制造业核心竞争力三年行动计划》等政策的出台,都体现国家对 3D 打印技术的重视。该文分别从路面常见病害和传统修复手段、3D 打印的关键技术、在建筑方面的应用以及 3D 打印在路面修复工程中的应用等角度进行叙述,对 3D 打印技术的应用趋势进行分析。

- \*\*\*\*\*
- [3] Young S. Kim, Hyun S. Yoo, Jeong H. Lee, et al. Chronological Development History of X-Y Table Based Pavement Crack Sealers and Research Findings for Practical Use in the Field[J]. Automation in Construction, 2009, 18(5): 513-524.
- [4] Xin Feng, Rene Mathurin, Steven A. Velinsky. Practical, Interactive, and Object-Oriented Machine Vision for Highway Crack Sealing: Proceedings of the American Society of Civil Engineers[J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 131(6): 451-459.
- [5] 马建, 赵祥模, 贺拴海, 等. 路面检测技术综述[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(5): 121-137.
- [6] Hyun-Seok Yoo, Young-Suk Kim. Development of an Optimal Trajectory Planning Algorithm for an Automated Pavement Cracker[J]. Journal of Construction

- Engineering and Project Management, 2012, 2(1): 35-44.
- [7] Young-Suk Kim, Carl T. Haas. A Man-Machine Balanced Rapid Object Model for Automation of Pavement Crack Sealing and Maintenance[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2002, 29(3): 459-474.
- [8] Bahram Ravani, Ty A. Lasky. Sensor-Based Path Planning and Motion Control for a Robotic System for Roadway Crack Sealing[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology: A Publication of the IEEE Control Systems Society, 2000, 8(4): 609-622.
- [9] 杨延. 基于机器视觉的路面补缝轨迹控制研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2017.
- [10] 王剑文, 戴光明, 谢柏桥, 等. 求解 TSP 问题算法综述[J]. 计算机工程与科学, 2008, 30(2): 72-74, 155.

收稿日期: 2020-06-30

基金项目: 天津市重点科技项目(编号: 16ZXCSF00110); 天津市自然科学基金资助项目(编号: 15JCYBJ23100)

作者简介: 肖庆一, 男, 博士, 教授. E-mail: xiaoqingyi@hebut.edu.cn

\* 通信作者: 苏刚, 男, 硕士研究生. E-mail: 805585950@qq.com

## 1 路面常见病害及修复方法

### 1.1 路面常见病害

现代交通路面在通车之后,不免会承受各种荷载,经过一段时间后都会出现一些破坏、变形等路面病害。如今道路交通量日益增长,超载情况屡见不鲜,路面承受着自然环境和车辆静载与动载,更容易出现各种路面病害。受损部位若不及时修复,就会承受更多的冲击载荷,碎裂部分会越来越大,修补工作会愈发困难。路面病害最常见的就是裂缝和坑槽<sup>[2]</sup>。对于裂缝的自动识别可以使用基于四阶段边界框的图像分割技术<sup>[3]</sup>。路

面数据采集系统可以基于高速连续采集 1 mm 的路面三维数据,采用多种子融合算法对裂缝进行识别。

### 1.2 裂缝和坑槽的常用修复方法

#### 1.2.1 裂缝的修复

裂缝的传统修复手段是将要处理的部分先用刷子进行初步清理,去除较明显的泥土、旧填缝料等杂质。接缝槽的清理过程不能对槽口产生破坏。当槽口的黏结面过于光滑时,要用电锯对较光滑面进行破坏来增大黏结面的摩擦度,再用水冲完成清洁工作。清洁完成后,再用压缩空气对尘土等微小杂质进行深度清理,灌缝的常用材料是热沥青或乳化沥青,等固化后就完成了封堵修复过程。裂缝修复常用方法见表 1<sup>[4]</sup>。

表 1 修复裂缝常用方法

裂缝修补方法	基本工序
压注灌浆法	清洗裂缝区域,用压力灌浆器将加热融化且按比例配制的松香和石蜡压入裂缝内,盖薄膜进行养护完成修复
直接灌浆法	清洗裂缝区域,将聚氨酯底胶铺在裂缝和路面上,等灌入裂缝内的材料固化完成修复
条带罩面法	切两条和裂缝平行的 7~10 cm 的横缝。将横缝清理干净,把螺纹钢焊在螺钉上。在清洗干净的裂缝槽底放置螺纹钢,将混凝土填入槽内,直至收浆抹面
静压注射修复法	清洗裂缝区域,扩大裂缝的宽度至 5 mm。清洗完成后,将环氧类材料注入裂缝后完成修补
沥青混凝土加铺层法	直接铺层 在旧路面上加铺沥青混凝土,或在混凝土中加入钢纤维再加铺
	结合铺层 对旧路面进行清洗工作后,马上浇筑加铺层
	分离式加铺 对旧路面进行清洗工作后,先铺黏层油,再热拌热铺沥青混合料

#### 1.2.2 坑槽的修复

沥青路面坑槽是因为沥青的老化脱落而形成坑槽<sup>[5]</sup>。或者是没有及时处理沥青路面的裂缝,导致沥青层在车辆荷载下发生剥落现象,从而形成坑槽。当铺筑的路基承载力不达标时,沥青路面也会因为不均匀沉降而产生坑槽<sup>[6]</sup>。

坑槽的修复要基于损害深度程度。若是病害范围波及到路面基层,要将坑槽开挖直到基层,用修补材料对基层进行封堵,等基层修补完毕,再对面层进行处理。如果在基层修补之前就完成了面层,则新面层承受荷载的能力将大幅度下降,因为新面层的基础是破碎和不稳定的<sup>[7]</sup>。

水泥路面坑槽的形成一般因为横缝开裂使得板块发生错断。两块板不在同一高程,车辆经过时会对错开位置造成额外的冲击。冲击载荷的反复施加,会使平板的边缘发生碎裂,坑槽由此形成。

传统修复方式是清理干净受损区域之后,将新混

凝土填补在受损区域。同时,为了不使损伤部位对其他区域造成影响,必须用切割机打碎受损部位,对损伤区域进行清理,并重新浇筑混凝土。修复部位不会立即投入使用,需要等待混凝土完成水化反应形成强度。在养护期间需要对受损区域进行交通管制,防止车辆对修复部位的破坏。

#### 1.2.3 传统方法存在的缺点

(1) 因为修补材料在修补过程中不能够承受大的荷载,所以强度形成之前需要进行长时间的交通管制。

(2) 不管是修复哪种材料的路面,都需要养护期,在交通管制期内更容易出现拥堵或者事故。

(3) 交通管制期间造成的经济影响很大,若是裂缝出现在关键的高速公路上则影响更严重。

路面病害往往出现在车辆来往密集的地方,若修复不及时,出现损伤的区域就更多。这就需要一种可以快速完成修复工作的方法来减少交通管制的时间以及避免更大损失。

## 2 3D 打印技术

### 2.1 3D 打印技术概况

3D 打印于 20 世纪 90 年代开始出现。第一款 3D 打印设备诞生于 1986 年,由美国的 3DSystem 公司制造。3D 打印技术是指通过数字模型,将材料进行快速打印的技术<sup>[8]</sup>。传统机加工技术是将材料进行消减,使产品成型,但 3D 打印技术属于“增材制造”<sup>[9]</sup>。如图 1 所示。

3D 打印技术融合多种技术,实现了产品从模型到实体的转变<sup>[10]</sup>。目前该技术可以使用的材料多种多样,按照不同领域可以应用不同的材料,3D 打印技术

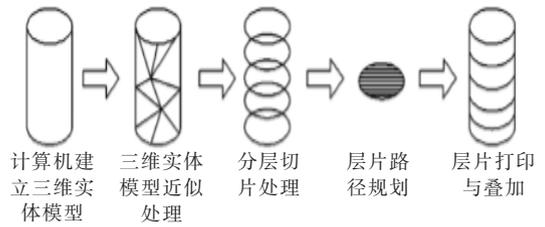


图 1 3D 打印过程图

中的三维扫描技术还可以帮助检测路面的粗糙度<sup>[11]</sup>,对路面的维修和养护都具有重要的作用。

### 2.2 3D 打印技术主要成型技术

3D 打印技术是多种智能技术的融合,随着科技的发展,新型材料不断问世,两者的结合诞生出多种 3D 打印技术的实践路径<sup>[12]</sup>。如表 2 所示。

表 2 3D 打印主要成型技术

成型技术	操作流程	特点	材料
熔融沉积成形技术	将材料在喷头中进行加热融化之后,使材料按模型截面进行打印	成本低、原料充足、污染小、精度高 <sup>[13]</sup>	蜡、ABS 塑料等
立体光固化成型技术	用紫光照射材料使之硬化,通过截面的堆叠成型使产品成型 <sup>[14]</sup>	精度高,成本也高	液态光敏树脂
选择性激光烧结技术	用红外激光束烧结铺平的材料,使产品成型 <sup>[15]</sup>	操作简单,自主化程度高,精度低	热塑性树脂粉末
分层实体制造成型技术	使用激光切割材料,用薄膜的层层黏合完成打印 <sup>[16]</sup>	操作简单,材料应用效率低,且成本高	薄片材料热熔胶
选择性激光熔化技术	用激光器来照射铺设在基板上的粉末,使之熔化成型,层层照射直至完成打印 <sup>[17]</sup>	致密性高、机械强度高、精度高	热塑性树脂粉末

### 2.3 3D 打印技术在建筑领域的应用

JosephPegna<sup>[18]</sup>是第一个在建筑领域应用 3D 打印技术的科学家。他采用的方法是先将砂子铺在底层,将层层水泥分批铺在砂子上进行蒸气养护,完成建筑构件的打印。3D 打印技术的 3 种建筑运用方法如表 3 所示。

表 3 3D 打印技术在建筑领域的运用

3D 打印技术	基本方法
D 型工艺	将喷嘴喷射的镁质黏合物和撒布的砂子结合,固化后的产物叠加,完成打印
轮廓工艺	根据设计图,从配备带有抹刀的喷嘴中将材料像挤牙膏一样在指定地点挤出,分层堆积打印混凝土。层层叠加完成打印
混凝土打印	层叠法建造产品,用喷嘴将研发出的聚丙烯纤维混凝土压出来 <sup>[19]</sup>

## 3 3D 打印技术修复路面的应用

### 3.1 3D 打印与传统方法的区别

目前,在城市道路养护施工中,传统修复手段需要施工车辆、养护人员长期待在受损路段。但高速公路上的车辆行驶速度很快,极易与施工车辆或者养护人员发生碰撞刮擦事件,甚至会造成维修设备和成果的损坏以及人员伤亡。若是发生车辆追尾,损失将会更大。2006—2017 年,仅上海市因道路养护工作造成的事故就有 178 起,死亡 54 人、受伤 106 人<sup>[20]</sup>。

车辆荷载主要集中在路面上,所以病害在路面上出现的比例最高,因此路面养护是以修复路面病害为主<sup>[21]</sup>。为减少因路面养护而出现的交通事故,必须减少交通管制时间。只有把路面灾害的修复过程加快,

并且减少养护时间,事故发生率才会有所下降。

路面病害中最常见的裂缝和坑槽的形状是独特的,而3D打印技术可以根据计算机软件中的扫描模型快速打印出对应的修复块,用以修补路面病害。因为避免了修复部位在道路上的养护时间,所以交通管制时间也会相应减少。与传统的方法相比,将3D打印应用于道路修复不仅节省道路养护时间,还保障了受损路段附近交通网络的正常运转。所以如何更好地将3D打印与路面修复结合起来非常关键。

### 3.2 3D打印修复破损路面方法

随着智能检测设备的发展,已经可以完成对受损区域信息的采集<sup>[22]</sup>。通过路面管理系统对病害的精确识别,交通机构官员可以快速对路面灾害的养护或修复方面做出决策<sup>[23]</sup>。通过三维光学系统与打印技术的结合,可以帮助计算机更好地绘制受损部位模型,根据模型完成对受损部位的修复,具体步骤如下:

(1) 路面病害识别模块<sup>[24]</sup>对拍摄到灾害状况的图片进行数字图像扫描,通过智能路面检测系统检测灾害类型。

(2) 用3D扫描系统测量坑槽或者裂缝的三维高程,形成点云数据。将点云数据进行拼接,得到灾害坑槽或裂缝的三维坐标数字模型,当然也可以使用成本更低的摄影测量学法完成对点云的采集,但点云更少,精度不如3D激光扫描仪。

(3) 3D打印系统根据扫描所得的三维坐标数字模型,可以有两种方法修补受损区域<sup>[25]</sup>:①通过制作模具预制修补块;②在裂缝处直接完成修复工作。

#### 3.2.1 间接3D打印修复方法

JaeheumYeon等<sup>[26]</sup>参照3D打印牙齿的过程研究出3D打印修复块修补受损部位的新型路面修复手段。间接3D打印修复方法是预制三维混凝土修补块<sup>[27]</sup>,将修补块与受损区域黏结起来完成修补过程。修补块的三维模型可以通过三维激光扫描仪得到。扫描受损区域得到的数据点连接起来形成很多三角形曲面,将曲面结合起来即为受损区域的高精度三维计算机模型。摄影测量也可以完成扫描功能,成本相对要低得多,但精度较低。

若要直接打印修复块,精度要求最少是1 mm。目前有两种类型的打印机可以用于建筑材料的打印:一种是设计的轮廓工艺打印机<sup>[28]</sup>,但这种打印机是用宽约40 mm、高约10 mm的混凝土柱来完成造型的打印,精度太低;另一种由恩里科·迪尼设计的D型工艺<sup>[29]</sup>。它通过黏合剂与砂子的结合形成每一层的

造型,层层结合完成整体造型。这种方法可以满足精度的要求,但砂子与黏合剂的结合体不能满足强度的要求,要求生产的修补块能够承受正常的车辆荷载。

通过3D打印机可以选择直接打印修补块,而是采用适宜的材料打印与修补块相对应的模具,在模板中完成对修补板块的预制,基本步骤为:

(1) 清洁损伤部位,防止杂质影响到破损模型的精度。

(2) 用摄影测量完成对受损部位的测量。摄影测量技术需要在受损区域某一高度拍摄12张照片,每张相差30°,然后改变高度再拍摄12张照片,以捕捉垂直方向的形态变化,如图2所示。

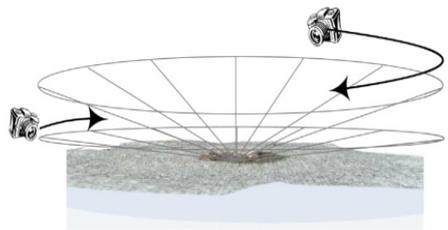


图2 摄影测量法

(3) 用计算机软件创建受损部位三维模型,根据实际情况调整其大小。通过3D打印系统,参照三维模型完成模板的打印。三维模型如图3所示;模板如图4所示。

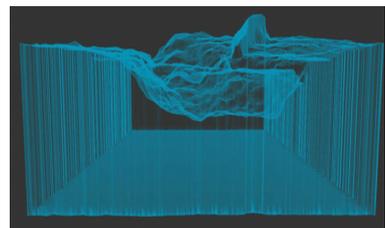


图3 破损部位三维模型

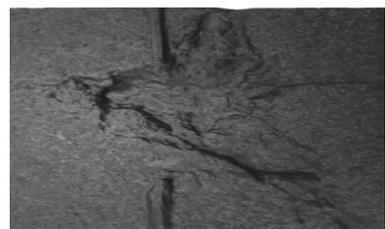


图4 3D打印模板实体

(4) 在模板中添加混凝土,养护28 d。混凝土的收缩不可避免,所以一方面对温湿度的把握要到位,尽量减少收缩;另一方面是通过收缩的比例适当放大三维模型的体积,以此来抵消混凝土的收缩。

(5) 使用合适的黏合剂将预制块与损害部位连接。在黏合剂的作用下, 仅需保持 1 h 的交通管制时间, 就可以完成修复过程。

### 3.2.2 直接 3D 打印修复方法

直接 3D 打印修复方法对于材料数量是有限制的, 目前只能打印一种材料, 所以不能完成沥青混合料的直接打印; 打印原理是用一种基于物体图像分析 (OBIA) 方法的激光扫描技术<sup>[30]</sup>将裂缝的三维轮廓和裂缝属性提取出来。控制电脑中的软件使热电阻的温度升高, 沥青颗粒在高温状态下通过螺旋挤压机, 喷嘴将软化后的沥青流入裂缝内, 完成对裂缝的修复。裂缝的修补对尺寸和精度的要求很高, 所以喷嘴的尺寸不宜过大。3D 打印机如图 5 所示; 修复效果如图 6 所示。

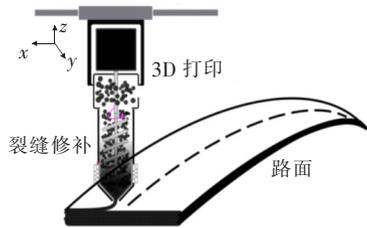


图 5 路面破损 3D 打印机



图 6 直接 3D 打印修复效果

现阶段, 直接 3D 打印修复方法还无法实现复合材料的应用, 但可以实现高精度的需求。并且打印过程是在受损原位进行, 可以直接完成修复工作; 间接法是通过打印模具完成对修补块的预制, 对材料没有限制, 可以应用于坑槽的修补。但因为修复块的预制需要养护时间 (28 d), 在这期间受损部位可能会发生变化, 再加上预制块硬化过程产生的收缩, 可能会导致预制块的误差过大, 达不到预期的修复效果。要解决这个问题, 有两种方法: ① 先打印塑料材质的修补块黏结在受损区域, 以保证受损部位不会产生更大的破坏, 且确保修补块容易拆除; ② 使用可以更快凝结的材料代替混凝土, 这样可以在受损变形之前完成预制块。高明月<sup>[32]</sup>采用以环氧树脂混凝土为材料的正方形片状修复块也能达到快速修复坑槽的目的, 如图 7 所示。

但是材料成本明显更高, 且对原路面结构破坏更大。所以 3D 打印技术修复路面坑槽的方式更经济, 对原路面的损伤也更小。

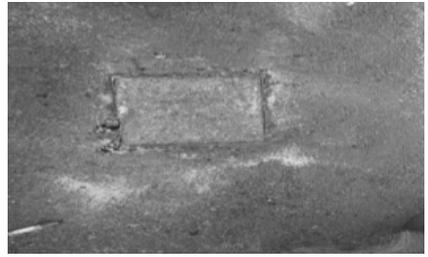


图 7 快速养护技术效果图

### 3.3 困难与挑战

3D 打印技术的成型速度快, 可以将 7 d 的养护工作缩短为 1~2 h, 大幅度减少交通管制的时间, 而且修复部位的均匀稳定性和强度等都能满足要求。劣势也很明显: 3D 打印技术对材料的要求高。若要更好地将 3D 打印应用于道路工程, 材料的研发是关键。只有打破材料的限制, 才能使 3D 技术更快发展。

对于水泥混凝土, 在保证强度要求的前提下, 同时尽量减少凝结时间<sup>[32]</sup>, 寻找适宜的骨料形状与最大粒径, 既要符合 3D 打印机的使用要求, 又要考虑到材料的流变性; 对于沥青混凝土, 成型慢、容易离析等特点阻碍了 3D 打印的应用, 因此要选用温拌、黏结力强和易固化的沥青, 同时要考虑成本, 使其满足打印机的要求。现阶段的打印机成本昂贵、尺寸小, 还不能普及应用。未来要进一步降低成本, 提高精度, 将 3D 打印和传统制造技术综合, 达到规模量产, 这样才能实现 3D 打印在路面修复上更好的应用。

## 4 结语

3D 打印技术以节省材料、高精度、三维模型制造的特点已经对传统建筑行业产生了巨大的影响。基于 3D 打印技术的两种道路破损修复方法都可以很好地完成路面修复工作, 大大减少了因为路面修复造成的交通管制时间, 降低了因路面修复造成的交通事故和经济损失, 缓解了交通堵塞现象。面对如今巨大流量的交通网络和里程数激增的道路长度, 道路修复工作日益繁重, 3D 打印作为快速修补技术, 应该尽快地应用于路面修复工程。尽管 3D 打印修复技术存在着很多限制, 还有些不足, 但作为一种可以对传统路面养护与修复行业产生根本性变革的新型技术, 应用前景是很广阔的。同时 3D 打印技术只是 3D 技术的一种, 还

有3D摊铺技术等。随着科技的发展,3D技术运用会愈发成熟,可以应用的领域也会越来越多。

### 参考文献:

- [1] Wang Linbing,王含笑,赵千,等.智能路面发展与展望[J].中国公路学报,2019,32(4):50-72.
- [2] 薛爱新,王洁光,王海军,等.高速公路沥青路面裂缝发展对路面结构性能的影响研究[J].中外公路,2019,39(3):59-63.
- [3] Li Lin, Wang K. C. P. Bounding Box - Based Technique for Pavement Crack Classification and Measurement Using 1 mm 3D Laser Data[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2016, 30(5): 13.
- [4] Kessler, A., R. Hickel, M. Reymus. 3D Printing in Dentistry - State of the Art[J]. Operative Dentistry, 2020, 45(1): 30-40.
- [5] Jackson, R. J., A. Wojcik, M. Miodownik. 3D Printing of Asphalt and its Effect on Mechanical Properties[J]. Materials & Design, 2018, 160: 468-474.
- [6] 齐文庆. 沥青路面裂缝及坑槽养护维修技术分析[J]. 四川水泥, 2019(11): 167.
- [7] Tsai, Y. C., Y. C. Wu, G. Price. A Cost - Effective and Objective Full - Depth Patching Identification Method Using 3D Sensing Technology with Automated Crack Detection and Classification[J]. Transportation Research Record, 2018, 2672(40): 50-58.
- [8] 袁子燕. 3D打印技术及其在建筑领域的应用分析[J]. 建材与装饰, 2018(33): 294.
- [9] Meurisse, A., Willsch, C., Makaya, A, et al. Solar 3D Printing of Lunar Regolith[J]. Acta Astronautica, 2018, 152: 800-810.
- [10] 张学军,唐思熠,肇恒跃,等. 3D打印技术研究现状和关键技术[J]. 材料工程, 2016, 44(2): 122-128.
- [11] Sarker, M., D. Dias - da - Costa, S. A. Hadigheh. Multi - Scale 3D Roughness Quantification of Concrete Interfaces and Pavement Surfaces with a Single - Camera Set - Up[J]. Construction and Building Materials, 2019, 222: 511-521.
- [12] Ligon, S. C., Liska R., Jürgen S., et al. Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing [J]. Chemical Reviews, 2017, 117(15): 10 212-10 290.
- [13] 刘秘卿. 3D打印技术的现状和关键技术分析[J]. 数字技术与应用, 2019, 37(6): 221-223.
- [14] 马富豪. 3D打印技术的发展现状及前景分析[J]. 南方农机, 2018, 49(10): 104.
- [15] 王子明,刘玮. 3D打印技术及其在建筑领域的应用[J]. 混凝土世界, 2015(1): 50-57.
- [16] 侯良衡. 3D打印技术及其应用[J]. 电子制作, 2019(12): 53-55, 73.
- [17] 陶岩. 3D打印技术的现状和关键技术分析[J]. 化工设计通讯, 2019, 45(5): 87-88.
- [18] Pegna, J.. Exploratory Investigation of Solid Freeform Construction [J]. Automation in Construction, 1997, 5(5): 427-437.
- [19] 成莞莞. 3D打印技术在建筑领域的应用前景分析[J]. 山西建筑, 2017, 43(22): 257-258.
- [20] Mechtcherine, V., Nerella V. N., Will, F., et al. Large - Scale Digital Concrete Construction - CONPrint 3D Concept for On - Site, Monolithic 3D - Printing [J]. Automation in Construction, 2019, 107: 16.
- [21] 张起森,李雪连. 70年来中国沥青路面结构设计方法发展沿革[J]. 中外公路, 2019, 39(6): 30-38.
- [22] 王静,李波,马伟中,等. 甘肃省河西走廊地区高速公路沥青路面养护对策[J]. 中外公路, 2018, 38(1): 67-72.
- [23] 朱瑞峰. 对于路面状况智能检测设备应用发展的思考[J]. 科学技术创新, 2019(13): 143-144.
- [24] Serigos, P. A., Prozzi J. A., de Fortier S. A., et al. Evaluation of 3D Automated Systems for the Measurement of Pavement Surface Cracking [J]. Journal of Transportation Engineering, 2016, 142(6): 1-8.
- [25] 李结义,何凡,石红磊,等. 3D打印技术在路面修复工程的应用探讨[J]. 公路, 2019, 64(4): 51-55.
- [26] Yeon, J., J. L. Kang, W. Yan. Spall Damage Repair Using 3D Printing Technology [J]. Automation in Construction, 2018, 89: 266-274.
- [27] Scott, J., S. Stagnell, I. Downie. The Use of 3D Model Planning in the Management of Impacted Teeth [J]. Oral Surgery, 2018, 11(2): 125-130.
- [28] Khoshnevis, B.. Automated Construction by Contour Crafting - Related Robotics and Information Technologies [J]. Automation in Construction, 2004, 13(1): 5-19.
- [29] Lim, S., Buswell R. A., Le T. T., et al. Developments in Construction - Scale Additive Manufacturing Processes [J]. Automation in Construction, 2012, 21(1): 262-268.
- [30] Gui Rong, Xu Xin, Zhang Dejin, et al. Object - Based Crack Detection and Attribute Extraction from Laser - Scanning 3D Profile Data [J]. IEEE Access, 2019, 7: 172 728-172 743.
- [31] 高明月. 沥青路面坑槽快速养护应用技术研究[J]. 福建交通科技, 2020(1): 24-26.
- [32] 吕润华,周游佳,陈爽,等. 路面快速养护技术的研究现状[J]. 中外公路, 2019, 39(2): 316-319.