

3D 打印技术应用于标准粗集料制备的可行性研究^{*}

何小刚¹, 冯宝平¹, 王凯¹, 李伟雄^{2,3}, 陈搏²

(1.中交二公局 东萌工程有限公司, 陕西 西安 710119; 2.华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641;

3.广州肖宁道路工程技术研究事务所有限公司, 广东 广州 510641)

摘要: 粗集料是沥青混合料的主要组成部分,其形态差异会对沥青混合料路用性能产生直接影响。受母岩特性、加工工艺的影响,不同规格粗集料的形状和成分差异明显,导致沥青混合料的力学试验结果存在较大离散性,不仅增加了工程试验量,还不利于沥青混合料配合比精准设计和质量管理。文中分析粗集料岩性和形态对沥青混合料性能的影响,探讨粗集料变异对沥青混合料试验带来的变异性;介绍 3D 打印技术的发展与应用领域,从原材料选择、扫描设备精度、打印精度、打印成本对 3D 打印标准集料进行可行性分析,结果表明,从科学研究和标准对比试验的需求出发,3D 打印技术在路面标准粗集料制备方面具有一定的应用价值。

关键词: 公路;沥青混合料;粗集料;增材制造技术(3D 打印技术);形态变异

中图分类号: U416.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)02-0047-05

沥青混合料是普遍采用的路面铺筑材料,粗集料是绝大多数类型沥青混合料必不可少的组成成分之一,占总质量的 50%~80%。目前沥青混合料配合比设计和力学性能研究多采用室内试验,由于粗集料的形态受母岩资源特性和加工工艺的影响,即使采用相同石场的石料,加工出来的粗集料无论是粒形还是棱角性均存在差别。同时由于试验操作过程与系统存在误差,试验结果存在较大变异性。传统的试验方法无法获得相同原材料在不同组合、不同环境、不同荷载工况下的力学试验结果,进而无法准确、直观地进行沥青混合料级配设计和施工工艺优化。将形态各异的粗集料原材料实现标准化,消除原材料形态产生的误差,有助于解决沥青混合料试验数据可重复性差的问题。增材制造技术(又称为 3D 打印技术)是按照标准的三维数字模型,通过逐层叠加黏结的方式将塑料或金属等材料打造为指定实体的方法,近年来在岩石领域得到快速发展。相关试验结果表明,应用 3D 打印技术可制作出材料性质与岩石类材料较接近的三维实体。该文对 3D 打印技术应用于粗集料特性研究的可行性进行分析。

1 粗集料对沥青混合料性能的影响

1.1 沥青混合料的组成研究

沥青混合料设计直接影响沥青路面的力学性能

与使用寿命,一直是道路行业的研究热点。传统的马歇尔混合料设计主要依靠经验,根据马歇尔试件密度、孔隙率、沥青饱和度、矿料间隙率、稳定度、流值等指标选择合理的矿料级配与沥青用量。但研究发现以上指标难以充分反映沥青混合料的路用性能,采用以马歇尔方法设计的沥青混合料铺筑的沥青路面出现较多的早期结构病害。随后,以体积设计法为代表的 Superpave 法、CAVF 法在兼顾沥青混合料高温、低温、水损害等路用性能的基础上对沥青混合料级配设计进行了优化。但这些方法与马歇尔设计方法存在共同的缺陷,即主要针对沥青混合料的宏观性能,缺乏微观指标研究。

随着对沥青混合料性能机理的深入认识,沥青混合料内部体积组成关系及均匀性得到重视,工业 CT 扫描技术、数字图像处理技术的发展为沥青混合料级配设计与评价带来革命性进步。Masad E.、Wang L. B.等通过 CT 扫描技术对沥青混合料内部结构组成进行扫描,评价了其内部各向异性,同时建立三维非均质数值模型进行了虚拟试验。但受 CT 扫描设备功率的影响,混合料内部各组分难以有效分割,集料边界模糊,三维模型处理技术还不成熟,虚拟试验仍集中于二维图像分析。

1.2 粗集料岩性的影响

粗集料的质量均匀性直接影响沥青混合料的力学性能。粗集料质量均匀性主要体现在材质的均匀

^{*} 基金项目: 中国博士后科学基金项目(2020M672639)

性(石料密度、硬度等力学性能)和集料的形状特性(轮廓形状、棱角性、表面纹理等)两方面。粗集料材质表征指标的优劣和均匀性对沥青混合料力学性能、水稳定性和耐久性能有直接影响。Wang Xudong 等通过工程研究发现集料的母岩晶体尺寸与磨耗值呈反相关关系,随着晶粒尺寸的减小,粗集料更加致密,磨耗值增大。张肖宁等研究发现玄武岩集料的表面轮廓分形维数高于辉绿岩与花岗岩,有利于提高集料的磨光值。

1.3 粗集料形态的影响

针片状集料含量是评价粗集料形态的常见工程指标,以集料的长轴与短轴的长度比值表示。Vavrik W.等的研究表明,针片状集料含量增加,混合料的矿料间隙率增大,针片状集料在成型过程中容易挤压破碎,影响混合料的级配稳定性。毕林昌等研究发现针片状集料含量增加 15% 时,混合料高温性能衰减超过 20%。

在粗集料加工过程中,机械破碎生产的每颗粗集料棱角皆有所差异。集料的粗糙度不同,则混合料的内摩擦角、机械嵌挤力不同,导致不同混合料试件所需拌合能量与压实功均不一样。矿料级配集料之间的相互嵌锁作用随着粗集料形状越接近立方体越显著(集料形态分类见图 1),杰出的棱角性对热拌沥青混合料高温稳定性的提升起决定性作用。谭忆秋等研究发现粗集料的棱角性系数高,有助于提高混合料的高温稳定性。

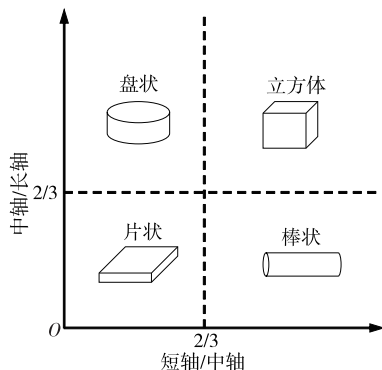


图 1 集料形态分类

粗集料棱角指标更偏向于宏观尺度(0.5 mm 以上)的形态参数,此外,还需考虑集料破碎面的微细观纹理形貌(0.001~0.5 mm)。Pan T.等选择不同纹理粗集料开展沥青混合料模量试验,发现混合料的回弹模量与集料破碎面的纹理粗糙度呈良好的正相关关系。陈国明等通过试验进一步验证了粗集料

纹理对沥青混合料内摩擦角的增强效应及对混合料低温抗裂和抗水损坏性能的提升作用。

1.4 沥青混合料试验的变异性

由于地域、开采条件、加工条件的差异,集料性能的均匀性难以控制。集料颗粒的变异性严重影响沥青混合料试验(如马歇尔试验和车辙试验等)结果的重复性和再现性,而且无法精确判定导致室内试验结果差异的原因(材料差异、仪器设备、人员操作、试验环境等),造成不同实验室间试验数据比对失败,进而误导沥青混合料配合比设计的改进方向。可见,试验数据的准确性与稳定性至关重要。由于集料颗粒形状的差异,试验结果往往出现较大组内偏差,为体现试验规律,通常使用多组平行试验结果计算其统计水平,更偏向于定性分析试验结果。混合料试验结果的离散性往往比单一原材料测试结果更显著,而路面工程质量评价依赖检测数据,不准确、不具备代表性的检测数据会误导路面施工质量的管理重心。

2 3D 打印技术概述

2.1 3D 打印技术简介

近年来,随着科学技术的发展,3D 打印技术、计算机模拟及 3D 数字建模得到长足进步,已应用于人类日常生活的诸多领域。3D 打印的大致流程为数字化点云获取→点云的预处理→三维模型的实体重建→模型优化与局部处理→导入打印计算机系统→轨迹优化与支撑添加→打印机打印→打印后处理(见图 2)。

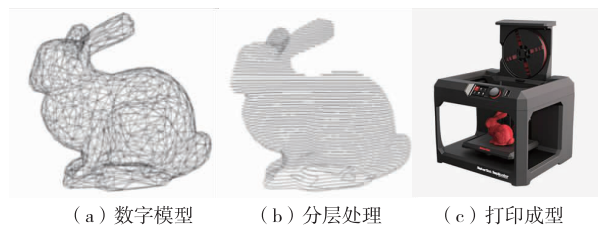


图 2 3D 打印示意图

3D 打印制造技术根据打印原理和材料的不同可分为熔融沉积(FDM)、光固化成型(SLA)、选择性激光烧结(SLS)、数字化光处理(DLP)、3D 喷墨(Ployjet)技术等。

(1) 熔融沉积。利用高温将丝状热熔性材料加热至非固态,将融解的材料通过一个尖细的喷嘴挤出,原料逐层凝固形成产品。

(2) 光固化成型。利用紫外光或其他光源照射使光敏树脂凝固,随着工作台树脂容器的升高与下

落,树脂逐层固化,最终形成完整的产品。

(3) 选择性激光烧结。以粉末材料为原料,通过激光照射作用进行烧结,利用计算机精准控制层叠堆积成型。

(4) 数字化光处理。以液态光聚合物为原料,利用高分辨率的数字光处理器投影仪逐层进行光固化成型产品。相比同类型的 SLA 立体平版印刷技术,该方式的处理时间更短,能制作较复杂的产品,同时产品表面非常光滑。

(5) 3D 喷墨技术。以光敏树脂为原材料,利用紫外线光逐层进行固化,效率较高。

2.2 3D 打印技术的应用

在医药工业领域,3D 打印技术在人造骨骼材料、心脏瓣膜、人体心脏支架乃至人体器官制造方面获得了非常丰富的成功经验。贾丹阳等利用 3D 打印技术成功打印活体胚胎干细胞,并通过试验证明 3D 打印的干细胞与人体胚胎干细胞一样具有正常分化能力。

在航空工业领域,3D 打印技术成功应用于多种飞机零部件的制造,并用于实体。航空公司尝试利用 3D 打印技术制造机翼、飞机机舱等大尺寸部件及飞机钛合金部件。

在军事领域,3D 打印技术成功应用于中国多种战斗机的研发、飞机部件及轻武器制造;美国运用 3D 打印技术制造导弹点火模型的部分零件、发动机及军事卫星零件等。

在建筑领域,3D 打印技术的应用主要体现在两方面:一是打印建筑物模型;二是整体建筑组块的实体打印,通过“搭积木”的方式组装。该技术相比传统施工方式具有显著优势:

(1) 减少建筑材料损耗垃圾的产生,并能以建筑垃圾为原料,有效解决城市污染问题。

(2) 充分发挥大型打印机的效率,既可现场打印施工,也可工厂预制,简化施工过程中“支、绑、浇”等复杂工序,极大提高施工效率,节约人工成本。

(3) 根据设计模型,一次性成型结构复杂的建筑形状,轻松实现结构的整体化成型。

(4) 3D 打印油墨为经过特殊玻璃纤维强化处理的砼材料,打印成品的强度满足使用要求。

3 3D 打印标准集料的可行性分析

3.1 原材料的可行性

沥青砼的集料由岩石加工而成,岩石是非常复

杂的集合体,在高温、高压环境下经历了漫长的形成阶段,其成分、结构均十分复杂,内部也充满了节理、孔隙等缺陷,在物理性质上表现出不连续性、不均匀性、非线性和各向异性。为解决岩石试验(如单轴压缩试验、直剪试验和三轴试验等)存在的重复性低、尺度效应干扰等问题,采用 3D 打印技术配合 CT 扫描模型重构岩石的内部结构,能更直观地研究岩石内部裂隙或孔隙网络情况。

华敏杰采用聚乳酸、类石膏和树脂等材料进行岩石 3D 打印成型,发现打印模型的抗压强度比实际岩石试样低、延性比实际岩石试样强。Fereshtenejad S.、Vogler D.、Zhou T.等研究发现:1) 调整打印参数和采用后处理技术可提高试样强度,减少试样延性并增加其脆性;2) 采用 3DP(粉层与喷墨头打印)技术打印的试件的粗糙度、抗拉强度和破裂过程等十分接近砂岩。Ju Y.等利用工业 CT 扫描的砼结构模型,以透明树脂材料为主体、非透明材料为骨料进行 3D 打印重构,实现了内部裂隙结构的可视化(见图 3)。目前主流的 3D 打印原材料性能可为标准集料打印加工奠定良好的基础。

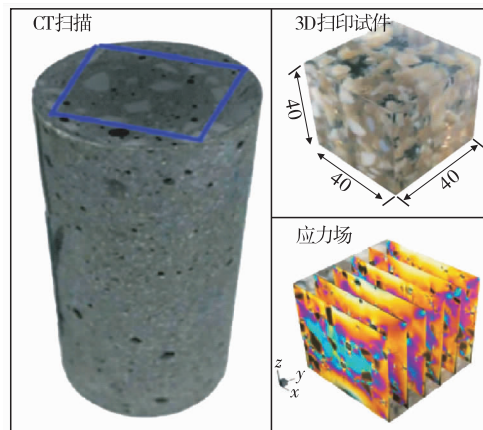


图 3 砼试件的 3D 打印(单位:mm)

3.2 扫描设备的精度分析

工业 CT 是应用于工业中的计算机断层扫描技术(见图 4)。它利用精确准直的射线束及极度灵敏的探测器对物体分层进行扫描,能清晰、准确地获得被探测物体内部结构组成信息,是目前世界上最成熟的无损检测手段。道路行业一般使用工业 CT 的 X 射线穿透混合料或碎石单元,通过测试 X 射线的入射强度和出射强度换算材料的厚度,进而重构集料三维形貌。但 CT 断层扫描技术的精度同样局限于粗集料的宏观形态,关于集料二、三维信息转换的基础性研究依旧不足,无法完全反映真实颗粒三维

表面的起伏变化。

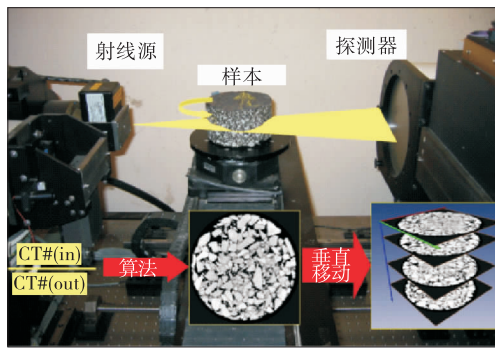


图 4 工业 CT 扫描设备

三维激光扫描技术主要通过高强度激光射线照射在物体表面,采集激光射线射入与反射后的接收时间差,确定相应测点的相对空间坐标值,形成三维点云数据,最后通过专业软件将点云数据拟合、重构三维模型。张肖宁等基于非接触式激光三角成像原理研制了粗集料纹理轮廓测试仪。陈搏研发了高精度(0.01 mm)三维激光扫描装置(见图 5),该装置采用线激光实现快速面域扫描,获取集料表面纹理的点云数据,可高效采集不同规格集料的三维形貌,与铺砂法检测相比,检测精度提升约 10 倍,检测效率提升约 800 倍。以上扫描技术为粗集料的宏观轮廓与微细观纹理扫描提供了技术支撑。

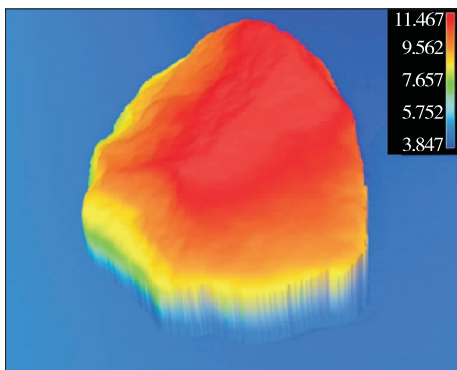


图 5 粗集料的三维激光扫描(单位:mm)

3.3 打印设备的精度分析

目前,3D 打印技术的精度已从毫米级提升到微米级。Stratasys 公司的 Dimension 1200es 以 FDM 技术为基础,可实现水平分辨率 0.178 mm、竖向层厚 0.254~0.33 mm 的构件成型。清华大学器官制造中心尝试使用明胶纤维蛋白原等基质材料打印 3D 细胞结构。各种不同精度的 3D 打印设备(见表 1)为沥青混合料的标准集料打印提供了技术保障。

表 1 3D 打印设备精度对比

设备名称	精度/mm
FDM(熔融沉积)	0.025~0.762
SLA(光固化成型)	0.025~0.100
SLS(选择性激光烧结)	0.100~0.200
DLP(数字化光处理)	0.040
3DPG(三维喷涂黏结)	0.013~0.100
Ployjet(3D 喷墨)	0.100

3.4 打印成本分析

不同类型 3D 打印技术所使用的原材料成型固结原理有差异,对应打印材料的性质(强度和刚度)根据所打印物品需要进行选择。可根据目前较成熟的 3D 打印基本材料,通过筛选确定非常接近实际沥青路用集料性能的材料与打印工序。根据 2020 年 3D 打印的不同材料报价,考虑到集料力学性能特性,主要选用 3DP 打印技术、FDM 熔融沉积打印技术、SLA 光固化成型技术进行对比,打印材料价格为 2~24 元/g。虽然总体上常用的工业级 3D 打印材料价格偏高,难以大范围、大体量普及应用。但从科学研究上讲,人工打印工程集料可行,可使集料颗粒实现标准化,进而使沥青混合料不同实验室间试验比对成为可能,有效改善工程检测数据的质量和可靠性,提高工程质量管理水平,改善沥青路面施工质量。

4 结语

受岩石资源特性的限制,优质集料的选择范围非常有限,因而更加关注粗集料的加工特性。沥青混合料的力学性能在一定程度上依靠粗集料形成的骨架嵌挤作用,粗集料的形态特征关系到混合料空间骨架的构建及沥青砂浆、集料间的相互作用,进而引起混合料抗疲劳性能和力学强度、耐久性能的变化。而粗集料的颗粒形态受料源、生产工艺、成分等影响,集料均匀性难以控制,集料颗粒存在变异性,严重影响沥青混合料试验结果的重复性和再现性。

随着科学技术的发展,计算机模拟、3D 数字建模及 3D 打印技术得到长足进步,并在建筑行业率先尝试应用,取得了较好的效果。该文从 3D 打印技术原材料性能、打印设备精度、打印成本三方面进行分析,论证了 3D 打印技术在粗集料特性研究中具有较好的可行性。通过 3D 打印标准集料的沥青混合料性能试验研究,有望提出实际沥青混合料试验修正方法和实验室水平评价标准,有利于提高工

工程项目检测数据质量和可靠性,为沥青路面设计与施工及养护方案制订提供指导,具有重要的科学与工程应用价值。

参考文献:

- [1] 任永利,刘涛,梁锡三.沥青路面集料加工质量控制[J].长安大学学报(自然科学版),2008,28(1):37—40+50.
- [2] 陈泰浩,刘涛,吴枚良,等.用传统方法加工的集料质量评价[J].公路交通技术,2007(2):33—36.
- [3] 甘富延.沥青路面集料加工质量通病分析和控制措施[J].科技信息,2009(14):653.
- [4] 徐龙,毕玉峰,于大海.骨架密实型沥青混合料级配优化设计及性能分析[J].山东建筑大学学报,2017,32(3):263—268+283.
- [5] 邓冲,罗蓉,钟昆志.沥青—集料表面能指标与沥青混合料路用性能关系研究[J].公路,2019(10):8—13.
- [6] 杜群乐,孙立军,黄卫东,等.不同设计方法下沥青混合料疲劳性能研究[J].同济大学学报(自然科学版),2007,35(9):1204—1208.
- [7] 马天才,白素霞,琚晓辉.基于 Superpave 沥青混合料水准 I 的混合料设计方法[J].公路交通科技(应用技术版),2016(12):60—64.
- [8] 韩丁丁,张金喜,魏连雨.沥青混合料不同配合比设计方法设计效果的试验研究[J].公路,2015(10):204—208.
- [9] 郭乃胜,尤占平,谭忆秋,等.基于 CT 技术的沥青混合料均匀性评价方法[J].中国公路学报,2017,30(1):1—9+55.
- [10] 赵毅,杨旋,郝增恒,等.沥青混合料均匀性数字图像评价方法研究进展[J].材料导报,2020,34(23):23088—23099.
- [11] MASAD E, MUHUNTHAN B, SHASHIDHAR N, et al. Internal structure characterization of asphalt concrete using image analysis[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 1999, 13(2): 88—95.
- [12] WANG L B, WANG Y, MOHAMMAD L, et al. Voids distribution and performance of asphalt concrete[J]. International Journal of Pavements, 2002, 1(3): 22—33.
- [13] 刘占良,郝景贤.粗集料性能对沥青混合料性能的影响[J].公路,2015(7):255—258.
- [14] WANG Xudong, XIA Hongjun. Functional design of wind turbine airfoils based on roughness sensitivity characteristics[J]. High Technology Letters, 2014, 20(4): 442—445.
- [15] 张肖宁,孙杨勇.粗集料的表面微观纹理的激光测量方法及分形性质研究[J].公路交通科技,2011,32(1):56—60.
- [16] VAVRIK W, FRIES R, CARPENTER S. Effect of flat and elongated coarse aggregate on characteristics of gyratory compacted samples[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2000, 1681: 28—36.
- [17] 毕林昌,申爱琴,郭寅川.针片状颗粒含量对沥青混合料高温稳定性的影响[J].公路,2011(7):212—217.
- [18] 谭忆秋,宋宪辉,纪伦,等.粗集料性能对沥青混合料高温性能的影响[J].中国公路学报,2009,22(1):29—33.
- [19] PAN T, TUTUMLUER E, CARPENTER S H. Effect of coarse aggregate morphology on permanent deformation behavior of hot mix asphalt[J]. Journal of Transportation Engineering, 2006, 132(7): 580—589.
- [20] 陈国明,周纯秀,谭忆秋.粗集料表面纹理的分形评定及沥青混合料性能试验[J].交通运输工程学报,2009,9(4):1—5.
- [21] 赵艳纳. SMA—13 施工过程中集料质量变异性研究[J].公路,2015(9):240—244.
- [22] 姚岢,黎侃,张肖宁.沥青比对试验数据一致性分析[J].广东公路交通,2008(2):5—8.
- [23] PROWELL B D, WEINGART R. Precisions of flat and elongated particle tests ASTM D4791 and VDG—40 videograder[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1999, 1673: 73—80.
- [24] MASAD E. The development of a computer controlled image analysis system for measuring aggregate shape properties[R]. Washington D C: NCHRP-IDEA Program Project Final Report, NCHRP-IDEA Project 77, National Research Council, 2003.
- [25] 朱艳青,史继富,王雷雷,等.3D 打印技术发展现状[J].制造技术与机床,2015(12):50—57.
- [26] 董海涛.熔融沉积快速成型的工艺分析[J].制造技术与机床,2013(10):96—98.
- [27] 李东方,陈继民,袁艳萍,等.光固化快速成型技术的进展及应用[J].北京工业大学学报,2015,41(12):1769—1774.
- [28] 吴琼,陈惠,巫静,等.选择性激光烧结用原材料的研究进展[J].材料导报,2015,29(增刊2):78—83.
- [29] 张强,张意,胡峻铭,等.基于数字光处理技术的多材料增材制造装置研究[J].轻工机械,2020,38(4):88—91.
- [30] 王志华.3D 喷墨打印带来陶瓷行业新革命[J].中国印刷,2015(8):79—83.

(下转第 88 页)

- 应的影响[J].重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, 29(4): 544—547.
- [14] 胡迎斌.考虑横观各向同性的粘弹性沥青路面力学响应分析[D].长沙:湖南大学, 2017.
- [15] 鲁巍巍, 郑健龙.横观各向同性黏弹性沥青路面的动力响应[J].中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(4): 964—970.
- [16] 颜可珍, 满建宏, 石挺魏, 等.考虑层间接触状态的横观各向同性结构动力响应解析解[J].湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(11): 97—105.
- [17] 肖鑫, 张肖宁.排水沥青混合料各向异性空隙结构对渗水特性的影响[J].华南理工大学学报(自然科学版), 2018, 46(1): 91—96.
- [18] 李来建.沥青路面改建设计的实践与探讨[J].中外公路, 2004, 24(6): 23—25.
- [19] 王德印.沥青路面加铺沥青层在交通荷载作用下的寿命分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2005.
- [20] 倪亚敏.旧路改建沥青加铺层结构分析研究[D].西安:长安大学, 2007.
- [21] 陶峰, 张鹏, 张虎.沥青路面现场冷再生技术在路网改建工程中的应用[J].交通世界(建养·机械), 2007(5): 74—76.
- [22] 周文.海南沥青路面现场热再生沥青混合料性能研究[D].长沙:长沙理工大学, 2009.
- [23] 王旭东.沥青路面弯沉指标的探讨[J].公路交通科技, 2015, 32(1): 1—12+24.
- [24] 郑健龙.基于状态设计法的沥青路面弯沉设计标准[J].中国公路学报, 2012, 25(4): 1—9.
- [25] 武淑玲.交通荷载对路基作用的研究现状[J].交通标准化, 2011(18): 81—84.
- [26] 林骋.交通荷载作用下沥青路面数值模拟分析[D].杭州:浙江大学, 2015.
- [27] 黄万坦, 魏为成.半刚性基层沥青路面动力响应分析[J].黑龙江交通科技, 2012(1): 53—54.
- [28] 中交路桥技术有限公司.公路沥青路面设计规范: JTG D50—2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司, 2017.
- [29] UZAN J. Resilient characterization of pavement materials[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1992, 16(6): 453—459.
- [30] WANG L, HOYOS L R, WANG J, et al. Anisotropic properties of asphalt concrete: Characterization and implications for pavement design and analysis[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2005, 17(5): 535—543.

收稿日期: 2021—03—16

(上接第 51 页)

- [31] 刘中正, 梁岩, 韩涛, 等. 3D 打印技术在临床医学中的应用[J].解放军医药杂志, 2016, 28(11): 6—9.
- [32] 贾丹阳, 李琦君, 孙忠逸, 等. 三维打印模型技术在制药领域中的研究进展[J].中国医药工业杂志, 2018, 49(2): 135—141.
- [33] 张杨阳, 胡宇凡, 万欣宇. 3D 打印技术在航空制造领域的发展探究[J].电脑编程技巧与维护, 2015(9): 89—90+94.
- [34] 金大元. 3D 打印技术及其在军事领域的应用[J].新技术新工艺, 2015(4): 9—13.
- [35] 季安康, 王海飙. 基于 BIM 的 3D 打印技术在建筑行业的应用研究[J].科技管理研究, 2016, 36(24): 184—188.
- [36] 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.
- [37] 华敏杰. 3D 打印技术在岩石力学试样制备方面的应用探讨[D].南京:南京大学, 2015.
- [38] FERESHTEJAD S, SONG J J. Fundamental study on applicability of powder-based 3D printer for physical modeling in rock mechanics[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(6): 2065—2074.
- [39] VOGLER D, WALSH S D C, DOMBROVSKI E, et al. A comparison of tensile failure in 3D-printed and natural sandstone[J]. Engineering Geology, 2017, 226: 221—235.
- [40] ZHOU T, ZHU J. An experimental investigation of tensile fracturing behavior of natural and artificial rocks in static and dynamic brazilian disc tests[J]. Procedia Engineering, 2017, 191: 992—998.
- [41] JU Y, WANG L, XIE H, et al. Visualization of the three-dimensional structure and stress field of aggregated concrete materials through 3D printing and frozen-stress techniques[J]. Construction and Building Materials, 2017, 143: 121—137.
- [42] HUANG W, ZHANG X, YIN Y, et al. A numerical implementation of the three-dimensional viscoelastic model for asphalt mastic[J]. International Journal of Civil Engineering, 2018, 16(5): 543—551.
- [43] 张肖宁, 孙杨勇. 粗集料的表面微观纹理的激光测量方法及分形性质研究[J].公路交通科技, 2011, 32(1): 56—60.
- [44] 陈搏. 基于胎/路有效接触特性的沥青路面抗滑性能评价方法研究[D].广州:华南理工大学, 2018.

收稿日期: 2021—05—27