DOI：10.16285/j.rsm.2017.08.018

基于 CT 扫描与 3D 打印技术的岩体三维重构及力学特性初探

田 威，裴志茹，韩 女

（长安大学 建筑工程学院，陕西 西安 710061）

摘 要：无法直观认识和还原岩石内部结构一直是阻碍岩石力学试验研究的关键问题之一。以天然砂岩为研究对象，运用 CT 扫描和 2 种不同的 3D 打印工艺重构了与天然砂岩试样结构相接近的 3D 打印试样，并在此基础上通过单轴压缩和巴西劈裂试验对天然砂岩及 3D 打印试样进行了力学性能测试，对比了两者的强度和变形规律。试验结果表明：通过不同 3D 打印工艺制作的试样均能够高度还原天然砂岩试样的内部复杂结构。其中，采用 3DP 打印工艺制作的试样具有与天然砂岩试样更接近的物理力学性能，试验结果的离散性也相对较小。其研究结果可为今后岩石力学研究中材料的替换、室内试验的开展和数值模拟结果的印证提供新的研究途径。

关 键 词：岩石力学；相似材料；3D 打印；三维重构；力学性能

中图分类号：TU 452 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2017)08－2297－09

A preliminary research on three-dimensional reconstruction and mechanical characteristics of rock mass based on CT scanning and 3D printing technology

TIAN Wei, PEI Zhi-ru, HAN Nü

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710061, China)

Abstract: Reconstructing the inner structure of rocks has been one of the critical problems in the field of experimental rock mechanics. In this paper, natural sandstone specimens were selected as research objects, and CT scanning and two different kinds of three-dimensional (3D) printing methods were adopted to reconstruct 3D-printed specimens. It turns out that the structures of 3D-printed specimens were in proximity to natural sandstone specimens. Uniaxial compression tests and Brazilian tests were carried out on these two kinds of specimens to obtain mechanical properties. Then the strength and deformation law of natural sandstone specimens and two kinds of 3D-printed specimens were compared. The results indicated that specimens made by different methods of 3D printing technology could highly reconstruct the complex inner structure of natural sandstone specimens. In the meantime, physical and mechanical properties of 3D-printed specimens were closer to natural sandstone specimens, and the dispersion of experimental results was relatively small. Therefore, this study provides a new promising way that can conduct experimental research, produce substitutes for materials and verify numerical simulation results.

Keywords: rock mechanics; similar materials; 3D printing; 3D reconstruction; mechanical properties

1 引 言

目前岩石力学的研究多采用破坏性的室内试验，其试验结果具有较大的离散性。此外，传统试验方法无法获得同一试样在不同应力条件下的力学试验结果，进而无法准确直观地进行相关力学性能的比较。同时，现场取样需要耗费大量的人力物力，并受到场地环境、试验费用等条件的限制，无法开展大量的力学性能试验。因此，一些学者在研究岩石力学性能时采用不同配比的相似材料来替代原始

收稿日期：2016-06-14
基金项目：国家自然科学基金项目（No. 51009010，No. 51379015，No. 51579013）；中央高校基本科研业务费专项资金（No. 310828172001）。
This work was supported by the National Science Foundation of China (51009010, 51379015, 51579013) and the Special Fund for Basic Scientific Research of Central Colleges, Chang'an University (310828172001).
第一作者简介：田威，男，1981 年生，博士，副教授，主要从事岩土工程数值仿真、岩土材料细观力学分析方面的研究。E-mail: tianwei@chd.edu.cn

岩样[1−7]，虽然采用相似材料制得试样的力学性能与天然岩石比较接近，但此方法无法获得内部结构完全一致的多个试样，不具有可重复性；另外，其内部结构与天然原始岩样也相差较大，试样内部的孔隙率无法准确控制。

快速成型技术[8−9]又称 3D 打印技术。近年来，因其可以大量克隆制作结构复杂的三维实体而引起了国内外各个领域专家学者的广泛关注。3D 打印技术是一种通过逐层黏接累加的方式，将粉末状的塑料或金属材料构造成三维实体的方法。其主要工艺有：适用于金属材料打印的选择性激光熔化（selective laser melting, SLM）工艺、激光熔化沉积（1aser melting deposition, LMD）工艺、电子束熔炼（electron beam melting, EBM）工艺；适用于塑料丝材以及粉末材料打印的熔融层积成型（fused deposition modeling, FDM）工艺、选择性激光烧结（selective laser sintering, SLS）工艺、三维印刷（three dimension printing, 3DP）工艺；适用于光敏树脂材料打印的立体光固化成型（stereo lithography apparatus, SLA）工艺等[10]。

近年来，3D 打印技术得到了快速发展，并已经应用于岩土材料研究领域。2012 年，Sustainable Oceans International（SOI）借助 3D 打印技术首次制造出高 1 m，重 500 kg 的砂岩礁[11]。同年，华盛顿大学的科研团队采用由氧化硅、铝、钙、铁、镁组成的材料打印出了模拟月球表层岩石的三维实体[12]。Ishutov 等[13]用塑料打印了砂岩孔隙模型，精确地复制了砂岩内部的孔隙特征。以上成果表明，应用 3D 打印技术可以制作出材料性质与岩石类材料较为接近的三维实体。这也为 3D 打印技术在岩石力学研究领域的应用奠定了基础。Jiang 等[14]采用聚乳酸为原材料进行 3D 打印来模拟岩石材料，但得到的试样与天然岩石试样的力学性能相差较大，因此，进一步研究的重点应在于寻找一种硬脆性材料作为 3D 打印的基材来模拟岩石材料。熊祖强等[15]借助三维扫描技术和 3D 打印技术制作了岩体自然结构面的模具，进而进行了岩体结构面的仿真制作，并展开了剪切试验来验证该方法的适用性。鞠杨等[16]将 3D 打印技术和应力冻结技术相结合，选用树脂材料制作出煤岩体的三维重构模型，直观定量地表征了煤岩体内部复杂结构和应力场分布特征。Jiang 等[17]以石膏为原材料打印出柱状模型，并预制了裂隙和孔洞，在进行单轴压缩试验后，发现其破裂形式与天然砂岩试样是比较接近的，但其三维模型直接采用 CAD 建模得到，未能制作出与天然岩石内部结构相一致的模型试样。以上研究在一定程度上反映出了岩石的内部结构，但选用塑料、树脂等塑性材料作为打印岩石的原材料，其力学性质与天然岩石材料相差较大，因此，重建所得 3D 打印试样无法作为岩石力学性能试验的模型试样。

基于此，本文以天然柱状砂岩为原型，尝试将 CT 扫描技术和三维重构技术相结合，建立出内部结构真实的砂岩三维数字模型，并通过 3D 打印技术中不同的打印工艺快速地制作出一系列与天然砂岩试样内部结构相一致的 3D 打印试样。并对天然砂岩试样和 3D 打印试样进行力学性能测试，对比两者强度与变形变化规律。以期通过上述方法大量复制三维实体试样来替代天然砂岩试样，为最终实现将 3D 打印技术应用于岩石力学研究当中奠定基础。

2 天然砂岩 3D 打印试样的制备方法

2.1 天然砂岩试样的 CT 识别

试验所用天然砂岩取自陕西省神木县大柳塔镇地下 190 m 左右深度处，根据《水利水电工程岩石试验规程》[18]进行取芯、切割，得到试验所需直径为 50 mm，高为 100 mm 的天然砂岩试样，试样两端面的平行度最大误差不超过 0.05 mm。

为了准确获得天然砂岩内部结构信息，CT 试验采用陕西省人民医院 Toshiba Aquilion One 螺旋 CT 机（见图 1）对试样进行扫描，扫描电压为 120 kV、电流为 300 mA。沿试样高度方向自上而下间隔 0.5 mm 连续扫描，获得天然砂岩试样 CT 图像，如图 2 所示。



图 1 Toshiba Aquilion One 螺旋 CT 机
Fig.1 Toshiba Aquilion One spiral CT scanner

为了识别和突出天然砂岩试样内部结构信息，借助 MIMICS®软件对图像进行预处理，以此可以区分出天然砂岩试样内部的低密度区域。从图 2 中可以看出：天然砂岩试样 CT 图像中分布着部分颜色较深的低密度区域，这表明天然砂岩试样内部含有

强度较低的薄弱区域，而此区域也是后期 3D 打印技术中重点处理的区域。通过三维重建得到天然砂岩试样三维几何模型和截面图如图 3 所示。重建后得到的模型可以真实地再现天然砂岩试样内部结构。

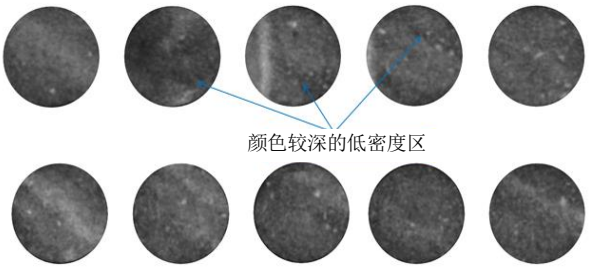


图 2　天然砂岩试样 CT 图像
Fig.2　CT images of natural sandstone specimens

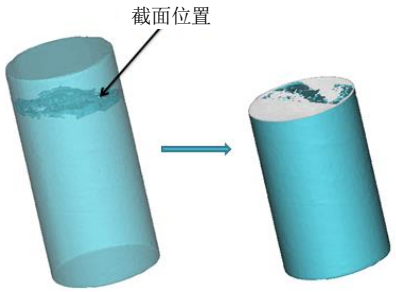


图 3　天然砂岩试样三维重建模型及截面图
Fig.3　3D reconstruction model and section diagram of natural sandstone specimen

2.2　3D 打印材料与试样的制备

目前，3D 打印常见材料主要包括工程塑料、光敏树脂、金属材料、石膏材料和砂材料[19]。其中，塑料、树脂和金属材料是典型的塑性材料，其力学特性与砂岩材料相差较远；石膏材料在加载过程中的裂纹扩展机制类似于岩石材料，但仍没有较好地模拟天然岩石材料的脆性断裂特性。而砂岩作为一种沉积岩，主要由石英颗粒（砂粒）胶结而成，其中砂粒含量一般大于 50%。因此，本文选择了与砂岩主要成分相近的 2 种粉末状砂性打印材料，如表 1 所示。通过采用树脂作为黏接剂，制定了 2 种打印方案：①选用覆膜砂粉末材料为打印基材，借助 HRPS-Ⅵ 3D 打印机采用选择性激光烧结（SLS）工艺[20]进行 3D 打印试样的制备，打印层厚为 0.2 mm；②选用呋喃树脂和砂粉末进行合理配比作为打印基材，借助 VX1000 3D 打印机采用三维印刷（3DP）工艺[21]进行 3D 打印试样的制备，打印层厚为 0.1 mm。所采用的 3D 打印机如图 4 所示，采用 2 种工艺打印出的试样如图 5 所示。

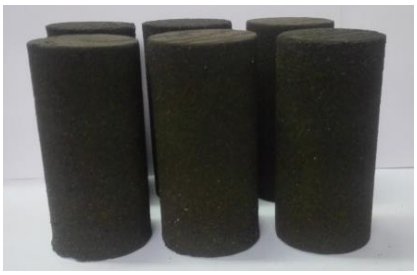
表 1　打印材料的基本物理指标对比
Table 1　Physical and mechanical properties comparison of 3D-printed materials

打印工艺	打印基材组成	粉层厚度 / mm	抗弯强度 / MPa
3DP	石英砂；烧结陶粒；黏接剂	0.1	2.5
SLS	石英砂；烧结陶粒；黏接剂	0.2	1.5



(a) HRPS-Ⅵ 3D 打印机　　(b) VX1000 3D 打印机

图 4　3D 打印机
Fig.4　3D printers



(a) SLS 工艺打印试样



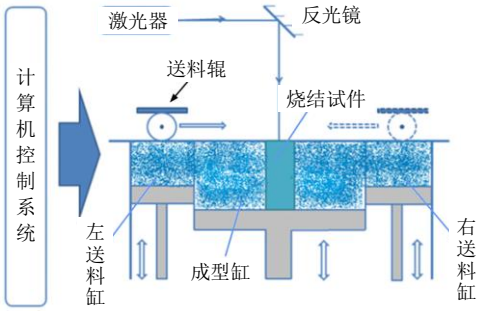
(b) 3DP 工艺打印试样

图 5　3D 打印试样
Fig.5　3D-printed specimens

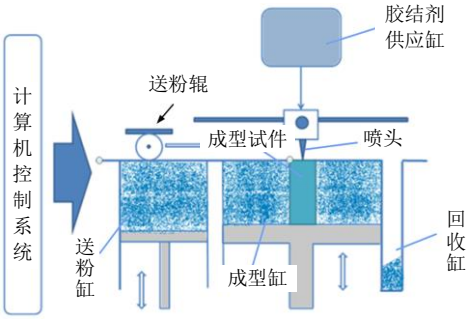
本文选用的选择性激光烧结（SLS）工艺是采用激光器对覆膜砂粉末有选择地进行烧结，每一层烧结成型后，层层堆叠形成三维实体的打印方法。其加工过程是：铺粉辊将一层粉末均匀地铺在成型缸的工作活塞上，激光束在计算机的控制下选择性地进行烧结，形成试样的第 1 个层面；然后工作活

塞下降一个层厚，铺粉辊又在上一个层面上铺一层粉末，进行新一个层面的烧结，并与已成型层面进行黏结；重复操作，直至整个试样打印完成，其工作原理如图 6(a)所示。在打印完成后，将试样从成型缸中取出，刷去多余粉末后，放入烘箱中烘烤加固处理，烘烤完成后得到 3D 打印试样。

三维印刷（3DP）工艺与 SLS 工艺类似，都是采用粉末材料层层堆叠为三维实体。所不同的是 3DP 工艺通过黏结剂将粉末黏接成型。铺粉辊将送粉缸中的砂性粉末均匀地铺在工作活塞上，打印机的喷头将黏接剂按照计算机预定的截面形状喷洒在粉末上进行黏接，完成第 1 层打印。然后成型缸下降一个层厚，铺粉辊再一次铺粉，再进行黏结。重复上述过程直至整个试样打印完成，其工作原理如图 6(b)所示。



(a) SLS 工艺原理图



(b) 3DP 工艺原理图

图 6 3D 打印工艺工作原理图

Fig.6 The functional diagram of 3D printing processes

由于天然砂岩具有层理性，为了更好地模拟此特点，采用 3D 打印技术进行制样时，以圆形面为层面经层层堆叠形成 3D 打印试样。在 3D 打印试样中对薄弱区域的处理方法是：在 CT 识别出的低密度区域进行铺粉但不进行烧结（黏接），然后将这些粉末封固在 3D 打印试样的内部。此种处理方法的依据是：由于 3D 打印试样内部未经烧结（黏接）材料强度比周围已烧结（黏接）材料强度要低得多，以此可以尝试用此方法来模拟天然砂岩内部一些强度较低的薄弱区域。

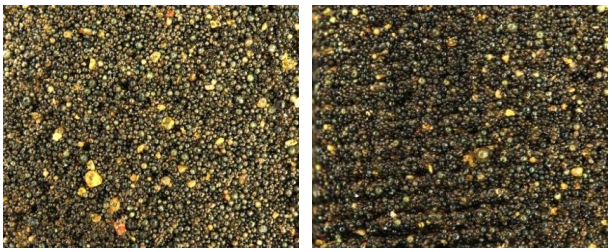
2.3 3D 打印试样表面微观结构

借助德国卡尔蔡司公司生产的 Stemi 508 研究级体视显微镜（见图 7）对试样的表面微观特征进行了观察，所采集到的表面信息如图 8 所示。



图 7 Stemi 508 研究级体视显微镜

Fig.7 Stemi 508 study level stereo microscope



(a) 上表面结构微观图像 (b) 侧表面结构微观图像

图 8 3D 打印试样表面微观结构

Fig.8 The surface microstructure of 3D-printed specimens

由图中可以看出，3D 打印试样具有以下特征：

（1）横观各向同性：3D 打印试样是将较为均匀的粒状砂性材料黏结在一起而成层的。由图 8(a)可以看出，打印所用的砂性材料在每一个层面上分布均匀，即在垂直于轴线的各个层面上物理性质不随方向的改变而改变，体现了横观各向同性的特点。

（2）成层性：3D 打印试样的微观图像表现出了明显的成层性质。图 8(b)中能够清晰地看到试样的侧表面图像包含多条平行的条形线，这表明 3D 打印试样具有明显的层状结构，这是由 3D 打印时采用的打印工艺和打印方向所决定的。

3 力学性能试验

为了进一步分析 2 种 3D 打印工艺制作的试样是否与天然砂岩试样的各项物理力学性质相接近。文中对 3D 打印试样和天然砂岩试样分别开展了单

轴压缩和巴西劈裂试验进行验证。

3.1　单轴压缩试验

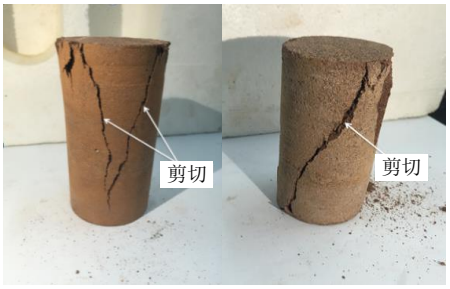
3.1.1 试验方法及步骤

将单轴压缩试验中的试样分为 3 组，每组 3 块，其中第 1 组为天然砂岩试样，编号为 1-1、1-2、1-3；第 2 组为采用 SLS 工艺打印的试样，编号为 2-1、2-2、2-3；第 3 组为采用 3DP 工艺打印的试样，编号为 3-1、3-2、3-3。单轴压缩试验在长安大学建筑工程实验室 WAW31000 微机控制电液伺服试验机上进行，如图 9 所示。

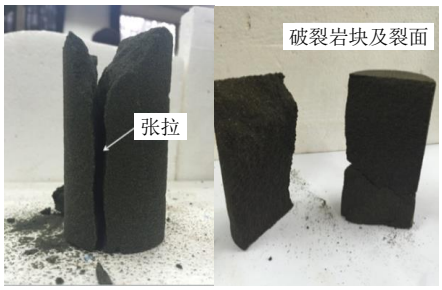
试验时将试样置于试验机承压板中心，保证试样上下表面与承压板均匀接触，在试样的顶端垫一层聚乙烯四氟板和凡士林制作的减摩材料进行减摩，试验采用应力控制，以 0.1 kN/s 的加载速率进行加载，直至试样破坏。



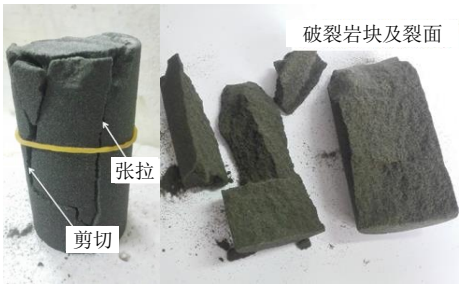
图 9　WAW31000 微机控制电液伺服试验机
Fig.9　WAW31000 electric-fluid servo compression machine



(a) 天然砂岩试样破裂形式



(b) SLS 工艺打印试样破裂形式



(c) 3DP 工艺打印试样破裂形式

图 10　天然砂岩试样及 3D 打印试样单轴压缩破裂形式
Fig.10　Failure modes of sandstone specimens and 3D-printed specimens after uniaxial compression

3.1.2 破裂形式

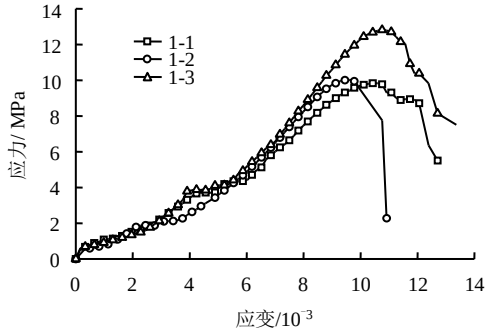
单轴压缩条件下天然砂岩试样和 3D 打印试样的破裂形式如图 10 所示，由图中可以看出：试样的破裂形式主要表现为剪切和张拉破裂。

天然砂岩试样破裂时有明显的剪裂面，剪裂面与试样轴向成一定的倾角，破裂形式主要表现为压剪破坏，剪裂面处有较多粉末，试样破裂成 2～3 块，如图 10(a)所示。SLS 工艺打印试样的破裂形式主要以张拉破坏为主，表现为贯穿于整个试样的 1～2 条垂直裂纹，端部有少量的剪切裂纹出现，试样破裂成大小不一的数块。原因是此工艺打印时胶结程度较差，制作的 3D 打印试样抗拉强度偏低，施加轴向荷载之后，试样由于拉应力而发育成张性贯通裂纹，如图 10(b)所示。3DP 工艺打印试样的破裂形式与天然砂岩破裂形式较为接近，主要为剪切破坏模式，表现为贯穿于整个打印试样的斜向裂纹。一般破裂成 2～4 块，如图 10(c)所示。

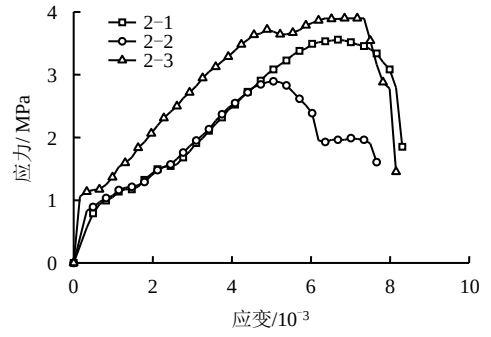
3.1.3 抗压强度特征

根据试验结果得到各组天然砂岩试样及两种不同打印工艺的 3D 打印试样在单轴压缩条件下的应力–应变曲线，如图 11 所示。

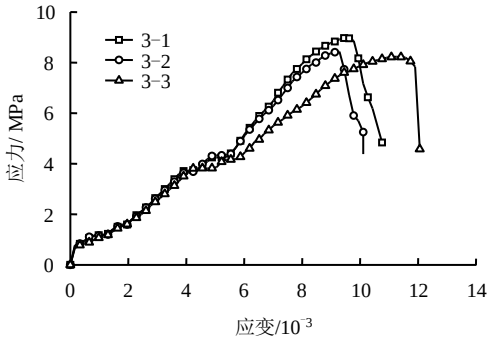
由图发现，天然砂岩试样和 3DP 工艺打印试样的应力–应变曲线具有一定的相似性：受压初始阶段出现了短暂压密段，曲线呈上凹形状；在压密段后表现出一个明显的线弹性段，随着应力的逐渐增大，试样的应力–应变曲线在峰前接近峰值强度处一般有明显的塑性段；峰后曲线呈现为折线段，应力迅速下降，产生少量的塑性变形，试样呈突然脆性破坏。SLS 工艺打印试样加载初期未发现压密段，直接进入线弹性段，曲线较平直；达到峰值前，出现了较大塑性变形；达到峰值强度后，曲线无明显折线段，塑性变形加速，即产生不稳定的变形，塑性破坏特征显著。从表 2 中可以看出，天然砂岩抗压强度平均值为 9.92 MPa，3DP 工艺打印试样的抗压



(a) 天然砂岩试样应力−应变曲线



(b) SLS 工艺打印试样应力−应变曲线



(c) 3DP 工艺打印试样应力−应变曲线

图 11 天然砂岩和 3D 打印试样单轴压缩下应力−应变曲线

Fig.11 Axial stress-stain curves of natural sandstone specimens and 3D-printed specimens

表 2 单轴压缩试验结果

Table 2 Results of uniaxial compression tests

试样类型	编号	极限荷载 / kN	极限荷载平均值 / kN	抗压强度 / MPa	抗压强度平均值 / MPa
天然砂岩试样	1-1	19.35	19.50	9.83	9.92
	1-2	19.64		10.02	
SLS 打印试样	2-1	6.98	6.78	3.56	3.45
	2-2	5.70		2.90	
	2-3	7.65		3.90	
3DP 打印试样	3-1	17.6	16.78	8.98	8.55
	3-2	16.55		8.43	
	3-3	16.15		8.23	

强度平均值为 8.55 MPa，两者相差 13%，较为接近。而 SLS 工艺打印试样抗压强度平均值仅为 3.45 MPa，与天然砂岩相差较大，主要是由于打印工艺的差异对打印试样强度的影响较大。

3.2 巴西劈裂试验

3.2.1 试验方法及步骤

试验采用巴西劈裂法测定试样的抗拉强度。劈裂试验在长安大学建筑工程实验室 YA−300 微机控制全自动压力试验机上进行，如图 12 所示。试验前将天然砂岩试样和 3D 打印试样加工为直径 50 mm，厚度 25 mm 的圆柱体标准试样。加工好的试样分为 3 组，每组 3 块。其中第 1 组为天然砂岩试样，编号为 4-1、4-2、4-3；第 2 组为采用 SLS 工艺打印试样，编号为 5-1、5-2、5-3；第 3 组为采用 3DP 工艺打印试样，编号为 6-1、6-2、6-3。

试验时将直径 2 mm 的钢丝作为垫条放在加载基线上，两根钢丝用橡皮筋固定，将装配好垫条的试样放在试验机的承压板上，调整球形支座使试样受力均匀。试验时采用应力控制，以 0.1 kN/s 的加载速率进行试验，直至试样发生破坏。考虑到打印试样的成层性对试验结果的影响，本文选择同一加载方向（加载方向垂直于打印方向）对试样进行加载，这样可以保证成层性对强度的影响较小以及试验结果具有可对比性，加载示意图如图 13 所示。



图 12 YA−300 微机控制全自动压力试验机

Fig.12 YA-300 computer-controlled full automatic pressure testing machine

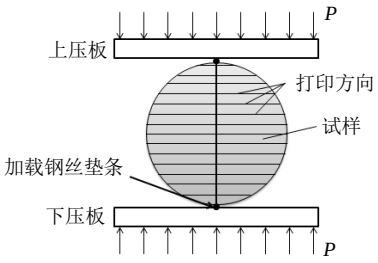


图 13 巴西劈裂试验加载示意图

Fig.13 Load diagram of Brazilian test

3.2.2 破裂形式

天然砂岩试样和 3D 打印试样在巴西劈裂试验下的破裂形式如图 14 所示。由于砂岩的抗拉强度远小于其抗压强度，因此，在施加线荷载后，试样发生平行于加载方向的快速劈拉破裂。由图中还可以看出：天然砂岩试样和 3D 打印试样破裂形式较为接近，大都沿着加载基线（上下钢丝垫条）破裂，破裂为对称的半圆盘形式，且破裂面平直新鲜，表现出显著的拉伸破坏特征。在巴西劈裂试验条件下，天然砂岩试样和3D打印试样均有少数呈弧形破坏，张拉裂纹偏离加载基线方向。主要原因是试样内部存在着强度较低的薄弱区域，加载时此区域产生的裂纹与张拉主裂纹扩展贯通导致试样破坏，破裂时则宏观表现为试样裂纹方向的偏离。



(a) 天然砂岩试样劈裂试验破裂形式



(b) SLS 工艺打印试样劈裂试验破裂形式



(c) 3DP 工艺打印试样劈裂试验破裂形式

图 14 天然砂岩试样及 3D 打印试样巴西劈裂破裂

Fig.14　Failure modes of sandstone specimens and 3D-printed specimens after Brazilian tests

3.2.3 抗拉强度特征

根据式（1）进行抗拉强度计算，结果如表 3 所示。

$$R_t = \frac{2P}{\pi DL} \tag{1}$$

式中：R_t 为试样的抗拉强度（MPa）；P 为试样破坏荷载（N）；D 为试样的直径（mm）；L 为试样的厚度（mm）。

表 3 给出 3 种试样巴西劈裂的试验结果，这里参考文献[22]中提出的方法，将加载方向极限变形量看作由试样变形和钢丝变形两部分组成。结果表明：3DP 工艺打印试样抗拉强度平均值与天然砂岩试样抗拉强度平均值相差 16.16%，两者加载方向压缩极限变形量相差为 15.95%。

表 3　巴西劈裂试验试验结果

Table 3　Results of Brazilian tests

试样类型	试样编号	直径 / mm	厚度 / mm	抗拉强度 / MPa	压缩极限变形量 / mm
天然砂岩试样	4-1	49.7	25.3	0.98	0.161
	4-2	49.6	25.5	0.99	0.161
	4-3	49.8	25.1	1.01	0.168
（平均值）				0.99	0.163
SLS 工艺打印试样	5-1	49.8	25.0	0.52	0.231
	5-2	49.9	25.3	0.54	0.266
	5-3	50.0	25.2	0.52	0.217
（平均值）				0.53	0.238
3DP 工艺打印试样	6-1	50.0	25.2	0.85	0.214
	6-2	50.0	24.9	0.83	0.156
	6-3	50.0	25.1	0.81	0.196
（平均值）				0.83	0.189

巴西劈裂试验中 SLS 工艺打印试样和 3DP 工艺打印试样的抗拉强度和变形量均相差较大，分析其原因是由于打印试样时选用的黏接剂用量和打印工艺自身特点不同造成的。在拉应力作用下，打印试样的强度主要由黏接剂的抗拉强度和胶砂比决定。SLS 工艺打印试样采用覆膜砂材料通过激光烧结熔化砂粒表面附着的树脂进行黏接，而 3DP 工艺打印试样采用喷胶黏接，因此，SLS 工艺打印试样中的胶砂比较低，则抗拉强度也相对较低。

4　试验结果

对天然砂岩试样和采用两种工艺打印的试样进行力学性能测试，所得相关力学性能指标的综合对比如表 4 所示。由表中的数据对比可以看出：①SLS、3DP 工艺打印试样的密度与天然砂岩密度均较为接近，但仍存在一定差异。其原因主要是打印试样的胶砂比不同而造成的，当砂粒自身的密度

大于黏接剂的密度，打印试样的胶砂比越低，其打印试样的密度越大，抗拉强度越低。②SLS 工艺打印试样弹性模量、抗拉、抗压强度等力学性能与天然砂岩试样相差较远，而 3DP 工艺打印试样弹性模量、抗拉和抗压强度与天然砂岩试样都较接近。因此，在今后的室内试验研究中，可以将呋喃树脂与砂粉末进行合理配比作为原材料，借助 3D 打印技术中常见的 3DP 工艺打印试样，以此进行相关力学性能的研究。

表 4 3D 打印试样与砂岩试样物理力学特性对比
Table 4 Physical and mechanical properties comparison of 3D-printed specimens and sandstone specimens

模型	密度 / (g/cm^3)	弹性模量 / GPa	抗压强度 / MPa	抗拉强度 / MPa
天然砂岩试样	1.879	2.29	10.89	0.99
SLS 模型试样	1.798	1.38	3.45	0.53
3DP 模型试样	1.692	1.70	8.55	0.83

5 结 论

（1）采用 3D 打印技术制作的三维实体模型，可以高度还原天然砂岩试样的内部结构信息，制作出的 3D 打印试样具有与天然砂岩试样相一致的内部结构特征。此外，借助 3D 打印技术可以大量复制内部结构一致的试样，并以此开展重复性试验。

（2）通过对天然砂岩试样和 3D 打印试样进行力学性能试验，得到试样的强度特征和破裂形式，试验结果表明：采用 SLS 工艺打印试样，其强度和破裂形式与天然砂岩试样有较大的差别；而采用 3DP 工艺打印试样具有与天然砂岩试样相似的强度特征和破裂形式。因此，3DP 工艺打印试样比 SLS 工艺打印试样更接近天然砂岩试样的物理力学性质，今后可以用于砂岩室内试验的研究当中。

参 考 文 献

[1] 白世伟, 任伟中, 丰定祥, 等. 平面应力条件下闭合断续节理岩体破坏机理及强度特性[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 635－640.
BAI Shi-wei, REN Wei-zhong, FENG Ding-xiang, et al. Failure mechanism and strength properties of rockmass containing close intermittent joints under plane stress condition[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(6): 635－640.

[2] 周辉, 孟凡震, 张传庆, 等. 不同位置和尺寸的裂隙对岩体破坏影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 3018－3028.
ZHOU Hui, MENG Fan-zhen, ZHANG Chuan-qing, et al. Experimental study on effect of joints with different locations and sizes on rock failure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(1): 3018－3028.

[3] 黄凯珠, 林鹏, 唐春安, 等. 双轴加载下断续预置裂纹贯通机制的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 808－816.
HUANG Kai-zhu, LIN Peng, TANG Chun-an, et al. Mechanisms of crack coalescence of pre-existing flaws under biaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(6): 808－816.

[4] BANDIS S, LUMSDEN A C, BARTON N R. Experimental studies of scales effects on the shear behaviour of rock joints[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geo-mechanics Abstracts**, 1981, 18(1): 1－21.

[5] FARDIN N, STEPHANSSON O, JING L. The scale dependence of rock joint surface roughness[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001, 38(5): 659－669.

[6] FARDIN N. Influence of structural non-stationarity of surface roughness on morphological characterization and mechanical deformation of rock joints[J]. **Rock Mechanics & Rock Engineering**, 2008, 41(2): 267－297.

[7] 路亚妮, 李新平, 吴兴宏. 三轴压缩条件下冻融单裂隙岩样裂缝贯通机制[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1579－1584.
LU Ya-ni, LI Xin-ping, WU Xing-hong. Fracture coalescence mechanism of single flaw rock specimen due to freeze-thaw under triaxial compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(6): 1579－1584.

[8] KRUTH J P, LEU M C, NAKAGAWA T. Progress in additive manufacturing and rapid prototyping[J]. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, 1998, 47: 525－540.

[9] MILLER B W, MOORE J W, BARRETT H H, et al. 3D printing in X-ray and gamma-ray imaging: A novel method for fabricating high-density imaging apertures[J]. **Nuclear Instruments & Methods in Physics Research**, 2011, 659: 262－268.

[10] 王修春, 魏军, 伊希斌, 等. 3D 打印技术类型与打印材料适应性[J]. 信息技术与信息化, 2014, (4): 86－90.
WANG Xiu-chun, WEI Jun, YI Xi-bin, et al. 3D Printing Technology and Printing Material Adaptability[J]. **Information Technology & Informatization**, 2014, (4): 86－90.

[11] Sustainable Oceans International (SOI) Pty Ltd. World's first 3D printed reef[EB/OL]. http: www.sustainableoceans.com.au/, 2012.

[12] HOLLOWAY J. 3D printer creates objects from moon rocks[EB/OL]. http://www.gizmag.com/3d-printing-moon-rock/25212/, 2012.

[13] ISHUTOV S, HASIUK F J, HARDING C, et al.3D printing sandstone porosity models[J]. **Society of Exploration Geophysicists and American Association of Petroleum Geologists**, 2015, 3: 2324－8858.

[14] JIANG C, ZHAO G F. A Preliminary study of 3d printing on rock mechanics[J]. **Rock Mechanics & Rock Engineering**, 2015, 48(3):1041－1050.

[15] 熊祖强, 江权, 龚彦华, 等. 基于三维扫描与打印的岩体自然结构面试样制作方法与剪切试验验证[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1557－1565.
XIONG Zu-qiang, JIANG Quan, GONG Yan-hua, et al. A method for preparing natural joints of rock mass based on 3D scanning and printing techniques and its experimental validation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(6): 1557－1565.

[16] 鞠杨, 谢和平, 郑泽民, 等. 基于 3D 打印技术的岩体复杂结构与应力场的可视化方法[J]. 科学通报, 2014, 59(32): 3109－3119.
JU Yang, XIE He-ping, ZHENG Ze-min, et al. Visualization of the complex structure and stress field inside rock by means of 3D printing technology[J]. **Chinese Science Bulletin**, 2014, 59(32): 3109－3119.

[17] JIANG Q, FENG X T, SONG L B, et al. Modeling rock specimens through 3D printing: Tentative experiments and prospects[J]. **Acta Mechanica Sinica**, 2016, 32(1): 101－111.

[18] 长江水利委员会长江科学院. SL264－2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
Changjiang River Scientific Research Institute of Chanjinag Water Resources Commission. SL264－2001 Specifications for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2001.

[19] 张胜, 徐艳松, 孙姗姗, 等. 3D 打印材料的研究及发展现状[J]. 中国塑料, 2016, (1): 7－14.
ZHANG Sheng, XU Yan-song, SUN Shan-shan, et al. A review on the progress of 3D printing materials[J]. **China Plastics**, 2016, (1): 7－14.

[20] PHAM D T, GAULT R S. A comparison of rapid prototyping technologies[J]. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. 1998, 38(10－11): 1257－1287.

[21] SACHS E, CIMA J. Three-dimensional printing: Rapid tooling and prototypes directly from a CAD model[J]. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, 1992, 39(1): 201－204.

[22] 苏承东, 张盛, 唐旭. 砂岩巴西劈裂疲劳破坏过程中变形与强度特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1): 41－48.
SU Cheng-dong, ZHANG Sheng, TANG Xu. Experimental research on deformation and strength characteristics in process of Brazilian split fatigue failure of sandstone[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(1): 41－48.

上接第 2296 页

[40] 郑永来, 周澄, 夏颂佑. 岩土材料黏弹性连续损伤本构模型探讨[J]. 河海大学学报, 1997, 25(2): 114－116.
ZHENG Yong-lai, ZHOU Cheng, XIA Song-you. Discussion on viscoelastic continuum damage constitutive model of rock and soil[J]. **Journal of Hohai University**, 1997, 25(2): 114－116.

[41] 周光泉, 刘孝敏. 黏弹性理论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1996: 8－35.
ZHOU Guang-quan, LIU Xiao-min. Viscoelascity theory[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1996: 8－35.

[42] 杨军, 金乾坤, 黄风雷. 岩石爆破理论模型及数值计算[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 26－38.
YANG Jun, JIN Qian-kun, Huang Feng-lei. Theoretical model of rock blasting and numerical simulation[M]. Beijing: Science Press, 1999: 26－38.

[43] JAEGER J C, COOK N G W. Fundamentals of Rock Mechanics(Third Edition)[M]. London: Chapman and Hall, 1979.

[44] 杨桂通, 树学峰. 塑性力学[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2000.
YANG Gui-tong, SHU Xue-feng. Plastic mechanics[M]. Beijing: China Building Materials Press, 2000.