

3D 打印技术在岩体物理模型力学试验研究中的应用研究与展望

江 权¹, 宋磊博²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 含内部三维缺陷的试样和含复杂地质结构的物理模型制作一直是制约岩石力学试验发展的主要原因之一, 鉴于 3D 打印(3D Printing, 3DP)技术可以便捷地制作含复杂结构的三维实体, 将 3DP 技术引入到岩体/岩石力学试验的研究中。以粉末性石膏为打印材料制作了含内部多孔洞结构和预制裂隙结构的模型试样, 力学试验表明, 这 2 种打印试样的变形特征、破坏特征、强度特征以及裂隙扩展过程与岩石类材料较为一致; 利用粉末性石膏和 PLA 材料为打印材料, 制作出了含单断层和含锚杆衬砌支护工程的隧道物理模型, 试验证明了断层的存在降低了隧道的稳定性, 而锚杆衬砌支护系统可以有效地提高洞室的承载能力, 而且 3DP 隧道模型的变形破坏过程与其他岩石类材料的物理模型试验结果和工程现场观测现象较为一致。同时, 将 3D 光学面扫描技术和 3DP 技术相结合建立一种含自然节理面模型的制作方法, 试验测试表明该方法能够较好地复制出节理面的形貌特征, 并且试样的剪切力学性质和破坏特征具有很好的稳定性和一致性。通过上述 3DP 试样的初步力学试验测试表明该技术在岩体力学试验研究中的可行性。最后, 进一步探讨了和挖掘了 3D 打印技术在岩石力学和岩体工程研究中的应用潜力。

关键词: 岩石力学; 3D 打印技术; 相似材料; 物理模型; 隧道模型; 节理面模型

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2018)01 - 0023 - 15

Application and prospect of 3D printing technology to physical modeling in rock mechanics

JIANG Quan¹, SONG Leibo²

(1. *State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;* 2. *Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China*)

Abstract: The production of rock/rock mass physical models with defects or complex geological structure has been one of the bottlenecks hindering the development of mechanical tests of rock. 3D printing(3DP) technology can create conveniently 3D entities with complex structures, which provides an unprecedented opportunity to break through this bottleneck. In this paper, the model samples with multiple holes and pre-existed cracks are prepared with the powder-gypsum as the printing material. The mechanical tests show that the two models are similar to those of rock materials in characteristics of deformation, failure and strength and in processes of crack

收稿日期: 2017 - 05 - 31; **修回日期:** 2017 - 09 - 17

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0600707); 国家自然科学基金资助项目(51379202); 湖北省杰出青年基金资助项目(2017CFA060)

Supported by the National Key Research and Development Program(Grant No. 2016YFC0600707), National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51379202) and Excellent Youth Foundation of Hubei Scientific Committee(Grant No. 2017CFA060)

作者简介: 江 权(1978 -), 男, 博士, 2001年毕业于中国地质大学(武汉)隧道与地下工程专业, 现任研究员, 主要从事地下工程数值模拟、大型洞室群稳定性分析、工程地质灾害治理等方面的研究工作。E-mail: qjiang@whrsm.ac.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0685

extension. The physical models of tunnel with a single fault and the lining with bolts are made by powder gypsum and PLA material. The experimental results of these models show that the existence of faults reduced the stability of tunnels, the support system of bolts and lining improved effectively the bearing capacity of the Chamber and the 3DP tunnel model simulate nicely the failure process of the tunnel. Moreover, a new method that combines 3D optical scanning and 3DP to prepare models with natural joint surface is presented. The proposed method replicated well the morphological features of natural joints, and the shear properties and failure characteristics are stable and consistent. In conclusion, the preliminary mechanical tests above have proved the feasibility of 3DP technique in the experimental study of rock mechanics. In the final part of the article, the broad prospect of 3DP technology in rock engineering was discussed.

Key words: rock mechanics; 3D printing technology; similar material; physical model containing defects; tunnel physical model; natural joint model

1 引言

众所周知, 岩体中往往含有复杂的内部结构特征, 例如纵横交错的节理裂隙、形态大小不一的孔洞, 这些缺陷直接影响整个岩体的变形、强度、渗流特征, 且直接关系到岩体工程中的稳定性^[1-7]。因此, 复杂岩体的力学行为特征一直是学术界和工程界关注的热点问题。

目前, 研究含人工结构的岩体宏观力学性质和变形破坏特征主要有 3 种途径: 现场原位观测试验^[8-12]、数值仿真计算分析^[13-16]和室内物理模型试验^[17-21]。由于室内物理模型试验可以比较全面、真实地模拟岩体与工程结构的相互作用关系, 能够较直观地观察岩体在人工开挖、开采、加载等扰动下的受力特性和变形特征, 一直是研究工程岩体稳定性的重要手段之一。但室内物理模型试验存在试验周期长、花费较大、复杂岩体结构制样难度高等问题。在数值模拟方法出现后的某一段时间内, 因其具有成本低廉等优势, 室内物理模拟试验方法受到了一定的冲击和削弱。然而, 由于数值模拟过程中, 往往将复杂工程岩体结构进行简化处理, 造成模型与真实岩体存在一定偏差, 并且在材料参数的选取、本构关系的确定等方面都遇到了一定的困难, 因而工程界一直对这一方法的可靠性存在疑虑^[22-25]。室内试验作为验证数值模拟计算结果的主要手段, 现阶段也变得越来越受重视。

利用室内模型试验研究工程岩体的性质和验证数值模拟的结果时, 需要试验试样满足现场岩体或数值模型的结构特征。由于自然岩体的复杂性, 想找到一批具有完全相同结构和性质的岩体试块是很难实现的, 这极大地制约了岩体力学的研究。相似材料模型试验较好地解决了该问题, 但在含复杂结

构试样的制作上似乎遇到了一个瓶颈: 利用传统的人工制样方法制作含复杂结构特征和内部缺陷的岩体模型具有很大难度, 例如含自然岩石节理面试样的制作、具有一些特殊内部结构(裂隙、孔洞等)要求的试样、现场洞室开挖模型试样等。而且由于这些结构特征对其力学性质、变形特征具有很大影响^[26-28], 因此如何高效、可重复性地制备与工程岩体相类似的或符合研究问题要求的试样模型, 是物理模型试验研究的关键, 也是促进室内物理模拟突破的基础。

近年发展起来的 3D 打印(3D Printing, 3DP)技术可以快速、便捷地制作出结构复杂的三维实体, 引起了国内外各个领域专家、学者的广泛关注。随着 3D 打印技术以及打印材料不断地发展和更新, 部分学者开始探索性地将 3D 打印技术引入了部分岩石力学的研究工作中。Y. Ju 等^[29]借助 CT 成像技术, 将 3D 打印技术与应力冻结技术相结合, 实现了真实地下岩体内部复杂结构与应力场的定量表征与可视化; 并且利用此项技术手段还制作出了与自然砂砾岩具有相同内部结构的透明试样, 分别研究了其内部结构对应力场分布、塑性区以及水压致裂下裂隙扩展的影响^[30-31]。S. Ishutov 等^[32]结合 X 射线计算机层析成像技术和 3D 打印技术, 利用塑料材料打印出了与砂岩含有相同内部孔隙特征的模型。C. Jiang 和 G. F. Zhao^[33]与 Q. Jiang 等^[34]试探性地分别将高分子 PLA(poly-lactic acid, PLA)材料和粉末印刷材料, 应用到力学模型试验的研究中, 发现粉末状石膏材料更适用于岩石力学性质的研究, 并且利用石膏材料打印出若干个含预制裂纹的试样, 观察了其在霍普金森试验下裂纹扩展的动态破坏过程, 发现其与含相同预制裂纹混凝土试块的破坏模式相类似^[33-34]。Q. Jiang 等^[35-36]以粉末状砂岩为主要打印材料, 证实了 3D 打印技术在制作具有特殊外观特征以及含内部缺陷岩体模型试样方面具有较

好的可行性。D. Head 和 T. Vanorio^[37]利用 3D 打印技术打印出内部含有不同微观尺度结构下的试样,研究了岩石微观结构变化对其渗透性的影响。这些研究展示了 3D 打印技术在岩体力学试验研究中的潜能和优势。

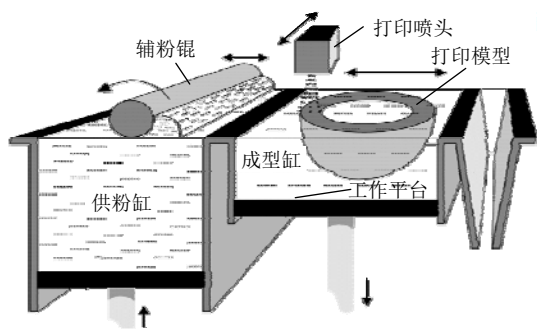
本文引入 3D 打印技术,以粉末性石膏和 PLA 材料为打印材料,分别利用石膏粉末层喷头型打印技术和熔融沉积打印技术,打印和制作了若干种含一定岩体结构特征的试样,分别开展含缺陷试样、含断层和支护结构隧道物理模型的压缩试验以及含自然结构面剪切试样的剪切试验,初步表明 3D 打印在岩石/岩体力学试验方面应用的可行性,并进一步探讨了和挖掘 3D 打印技术在岩石力学和岩体工程研究中的应用潜力。

2 3D 打印材料和模型制作方法

2.1 3D 打印设备和打印材料

目前,3D 打印技术一般根据打印所用材料进行分类,若根据此准则,本文所采用的打印机分别为石膏粉末层喷头型(plaster-based 3D printing, PP) 3D 打印机和熔融沉积型(fused deposition modelling, FDM)3D 打印机。

PP 型打印机的基本原理(见图 1(a))是在工作平台上先铺一层粉末材料,然后打印喷头在计算机的控制下按照所设计的截面轮廓信息,对实心部分所在的位置喷射黏结剂,使粉末颗粒黏结在一起;一层材料黏结完毕后,成型缸下降一个分层厚度,供粉缸上升一定高度,推出若干粉末,并被辅粉辊推至成型缸,铺平并压实,打印喷头在计算机的控制下,根据下一截面的轮廓信息,有选择地喷射黏结剂建造层面;如此周而复始地送粉、铺粉和喷射黏结剂,直至打印出实体模型。采用的 PP 型打印机如图 1(b)所示,其分层厚度为 0.1 mm,打印分辨率



(a) PP 型打印原理^[38]



(b) PP 型打印机

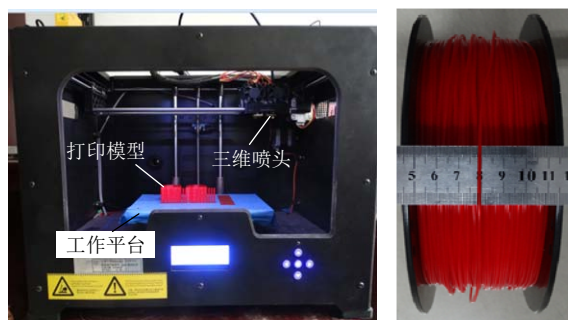
(c) 粉末性石膏打印材料

图 1 PP 型打印机和粉末型石膏打印材料

Fig.1 PP printer and plaster-powder printing material

为 600 dpi×540 dpi,打印精度为 0.1 mm,所采用的粉末颗粒为粉末性石膏(见图 1(c))。

FDM 型打印机的基本原理是在打印过程中将丝状的热熔性材料加热融化,同时三维喷头在计算机的控制下,根据所设计的截面轮廓信息,将材料选择性地涂敷在工作平台上,快速冷却后形成一层截面,一层成型完成后,机器工作平台下降一个高度(即分层厚度)再成型下一层,直至形成整个实体打印模型。本文中采用的 FDM 型打印机如图 2(a)所示,其分层厚度为 0.05~0.50 mm,打印精度为 0.1~0.2 mm,所采用的热熔性材料为 PLA 打印材料(见图 2(b)),直径为 1.75 mm。



(a) FDM 型打印机

(b) PLA 打印材料

图 2 FDM 型打印机和相应的 PLA 打印材料

Fig.2 FDM printer and corresponding PLA printing material

2.2 3D 模型的制作方法

3D 打印技术是一种以数字模型文件为基础的快速成型技术,目前虽然有很多种 3D 打印机类型,但 3DP 模型的制作大致可分为如下几个步骤:

(1) 3D 模型的建立:首先用计算机辅助设计软件(如 AutoCAD 等)设计出符合研究目的要求的模型,或利用相关数字成像技术(如 CT 成像技术、3D 扫描技术等)直接获取研究对象的数字信息并借助逆向软件建立 3D 数字模型(见图 3(a))。

(2) 切片处理:建立了 3D 模型以后需要进行切

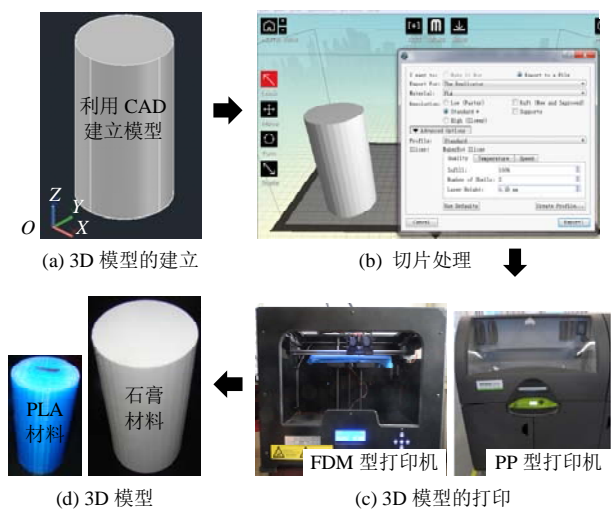


图3 3D模型的制作方法
Fig.3 Printing method of 3D model

片，其目的是要将模型以片层方式来描述。在切片处理时需要设置打印参数，如填充率、分层厚度等。本文中，用于试验的模型试样其填充率均设为100%，每层高度为0.1 mm。本文中模型的切片过程是借助相关切片软件完成的(如 MakerWare 软件)，如图3(b)所示。

(3) 3D模型的打印及后处理：将3D模型导入打印机中，根据相关操作，3D打印机通过逐层打印的方式进行模型的制作(见图3(c))；打印出的3D模型如图3(d)所示。

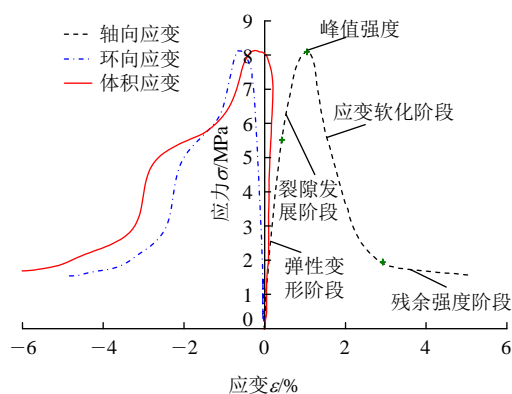
2.3 打印材料的力学性质

长期以来，岩石在法向荷载下的应力-应变曲线一直是研究岩石基本特性的方法之一^[39-41]。因此，为分析粉末性石膏和PLA材料的力学性质，以这2种材料各打印了3块圆柱形试块(见图3(d))，其中3DP石膏圆柱试样的尺寸为 $\phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ ，PLA圆柱试样的尺寸为 $\phi 35\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ 。

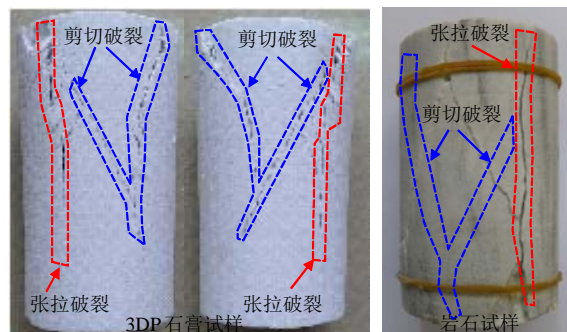
石膏试样的单轴压缩试验是利用MTS 815岩石力学试验系统完成的，如图4(a)所示，试验中轴向应变采用LVDT测量，环向应变采用链条与引伸计组合的方式测量，加载方式采用轴向变形控制，加载速率为0.001 mm/s。3DP石膏试样的基本力学参数如表1所示，典型的全应力-应变曲线如图4(b)所示。从图4(b)可知，在法向荷载加载过程中，首先，随着轴向变形的增加，3DP石膏试样的轴向应力呈线性或近似线性增加；而当达到峰值抗压强度后，轴向应力随着轴向变形的增加而迅速跌落，表现出明显的应变软化现象；最后轴向应力跌落到某一应力值后逐渐趋于稳定。由此可知，3DP石膏试样的应力-应变曲线与岩石材料具有十分相似的变



(a) 3DP石膏试样的单轴压缩试验



(b) 3DP石膏试样的全应力-应变曲线



(c) 3DP石膏试样与岩石试样的破坏对比

图4 3DP石膏试样的实验结果

Fig.4 Experimental results of the 3DP gypsum specimens

表1 打印石膏试样的基本力学性质

Table 1 Basic mechanical parameters of specimens with different proportions

类型	密度/ ($10^3\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	抗压强度 σ/MPa	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν
石膏试样	1.260	7.93	0.49	0.25
PLA 试样	0.758	32.44	1.53	-

形特征，即都经历了弹性变形阶段、裂隙发展阶段、应变软化阶段、残余强度阶段^[39-43]。而试样的环向应变和体积应变也与岩石材料的变形呈现类似的特

征。另外,图 4(c)给出了 3DP 石膏试样典型的破坏特征,其破裂形式主要为剪切和张拉破裂,表现为 1 条几乎贯穿整个试样的张拉垂直裂纹,2 条与试样轴线成一定倾角的剪裂面,这与岩石材料的破坏具有相似的特征。

PLA 圆柱试样的单轴压缩试验是在 RMT - 150C 岩石力学试验系统上完成的(见图 5(a)),试验中轴向应变采用 LVDT 测量,加载方式采用轴向变形控制,其加载速率为 0.005 mm/s。PLA 圆柱试样的基本力学参数如表 1 所示,其中 PLA 的强度为应变范围内最大的抗压强度。3 块 PLA 试样的应力 - 应变曲线(见图 5(a))在达到屈服强度前,轴向应力随着轴向变形呈线性增加,而随后轴向应力呈缓慢变化趋势,这表明 PLA 试样具有明显的弹塑性特征。图 5(b)给出了 PLA 试样典型的破坏特征,其表面并未出现破裂面,而是表现出明显的塑性膨胀,其破坏特征与铸铁试样基本一致。以上试验结果与 C. Jiang 和 G. F. Zhao^[33]研究中 PLA 试样的单轴压缩的结果是一致的。另外, C. Jiang 和 G. F. Zhao^[33]还进行了 PLA 试样的拉伸试验,并发现其还具有一定的

抗拉强度,并且抗拉强度随着打印充填率的增加而增加,当充填率为 50%时,其平均抗拉强度为 27.69 MPa。因本文充填率为 100%,故可推测 PLA 试样也具有较高的抗拉强度。

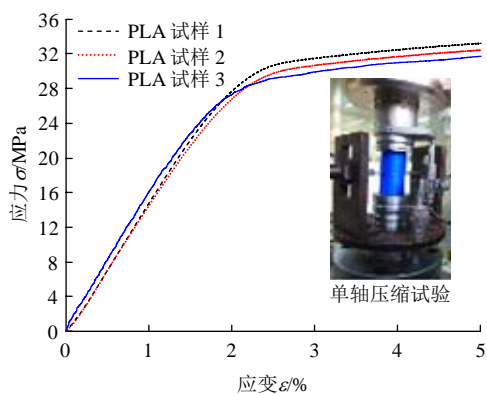
从以上分析可知,3DP 石膏试样的力学性质与岩石类材料类似,可直接应用于相关岩石力学的研究;而 PLA 材料的性质与岩石材料有明显的差别,它具有明显的弹塑性特征,且具有较高的抗拉强度和抗压强度,一定程度上可模拟工程锚杆、衬砌等支护结构。

3 含缺陷 3DP 试样及力学试验分析

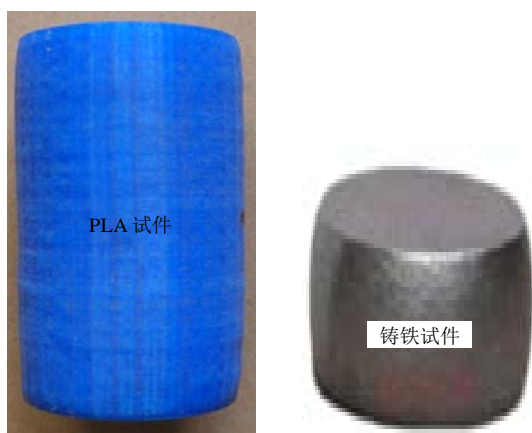
3.1 含大量孔洞的 3DP 石膏试样及压缩试验

岩石作为一种非均质工程材料,其内部往往含有大量的地质缺陷,例如孔洞、充填物、裂隙、节理等,这些地质缺陷对其强度和变形破坏特征有很大影响^[44-49],因此,研究缺陷岩石的力学性质对确保含内部缺陷岩体工程具有重要意义。但是,由于自然岩体的非均质性、各向异性等特点,找到一批具有相同内部结构的缺陷岩体几乎是不可能的,这也是制约含缺陷岩体研究工作的主要原因之一。目前,针对含孔洞岩体力学的研究,主要通过模型试块上人工开凿预制孔洞的方式实现^[47-49],但是这种方法所预制的孔洞往往数量很有限,一般为 1~2 个,并且大多数是贯通的。但工程现场中的孔洞往往隐含在岩体内部,且数量庞大,这些大量的孔洞对岩体的宏观变形和强度特征会产生很大影响^[44],因此,仅用单个或少数贯穿孔洞很难实现对其力学性能的准确研究。然而,传统制样方法几乎不可能制作内部含大量孔洞的试样,而借助 3D 打印技术可以较为容易地实现含大量孔洞模型的制作。

利用 CAD 软件构造了一个含孔洞的 3D 虚拟模型(见图 6(a)),孔洞为直径 2 mm 的球形空间,其中孔洞的空间分布如图 6(a)所示,共 1 657 个孔洞。利用 PP 型打印机打印出 3 块含孔洞石膏模型试样(见图 6(b)),并在 RMT - 150C 岩石力学试验系统完成单轴压缩试验,试样的破坏特征和试验曲线如图 6(b)~(c)所示。从图 6(b)可知,3DP 含孔洞试样的破坏特征与完整 3DP 试样有一定区别,它主要有 2 种类型的破坏特征:一类主要以剪切破坏为主,表现为 1 条与试样轴线成一定倾角的剪切裂纹,且在剪切裂纹的附近衍生有部分张拉裂纹;另一类是试样表面剪切破坏和张拉破坏均可明显地观察到。



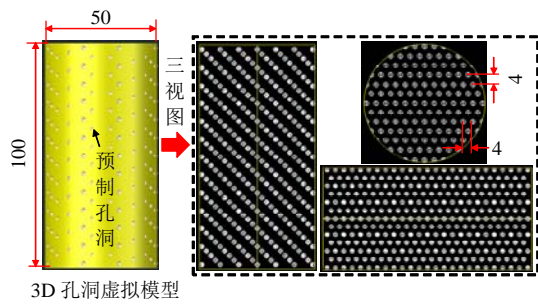
(a) PLA 试样应力 - 应变曲线



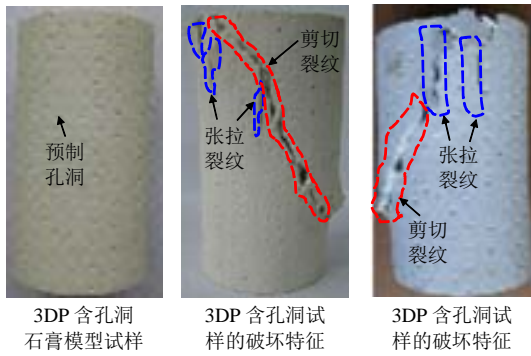
(b) PLA 试样与铸铁试样的破坏对比

图 5 PLA 试样试验结果

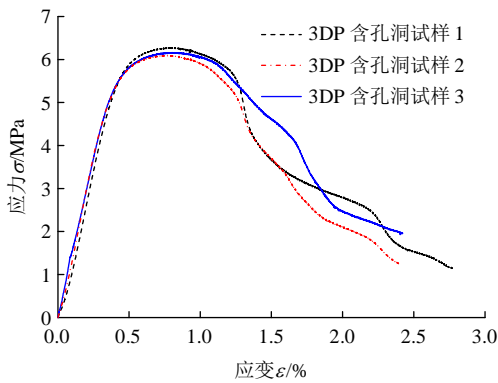
Fig.5 Experimental results of the PLA specimens



(a) 3D 含孔洞虚拟模型(单位: mm)



(b) 3DP 含孔洞试样及其破坏特征



(c) 3DP 含孔洞试样的应力 - 应变曲线

图 6 含孔洞试样的试验

Fig.6 Experimental results of the PLA specimens containing holes

从图 6(c)可知, 3DP 含孔洞试样的应力 - 应变曲线具有明显的孔洞压密阶段、弹性变形阶段、裂隙发展的塑性阶段以及峰值强度后的应变软化阶段, 这与杨圣奇等^[48]所得到的含孔洞试样的应力 - 应变曲线类似。另外, 3 块含孔洞 3DP 试样的平均抗压强度为 6.11 MPa, 相对于完整 3DP 石膏试样的强度减少约 29.95%, 并且与完整 3DP 石膏试样相比(见图 4(b)), 含多孔洞的石膏试样的弹性模量以及峰值应变均明显降低, 这与 C. A. Tang 等^[44-49]的普遍认识是相符的。

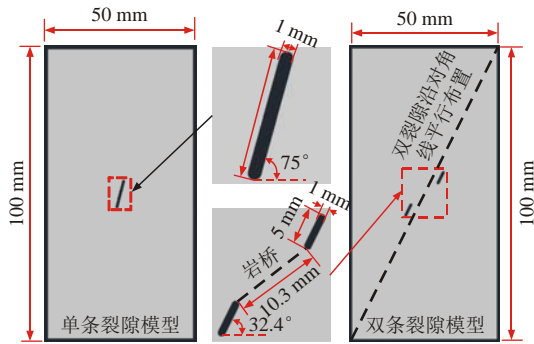
从以上分析可知, 含孔洞 3DP 物理模型的变形特征、破坏特征以及强度特征都与完整试样存在较

为明显的差异, 这与常规认识是相符的, 说明 3DP 技术所制作的含孔洞模型能够运用于含内部缺陷岩体的研究中。另外, 本文所制作孔洞模型其孔洞数量为 1 657 个, 这充分证实了 3D 打印技术具有还原出真实岩体中大量多孔洞的能力。值得一提的是, 若将可以观察岩体内部结构特征的技术(如 CT 技术)与 3DP 技术相结合, 就可以制出与岩体内部结构相一致的模型, 这将更有利于含缺陷岩体的研究。

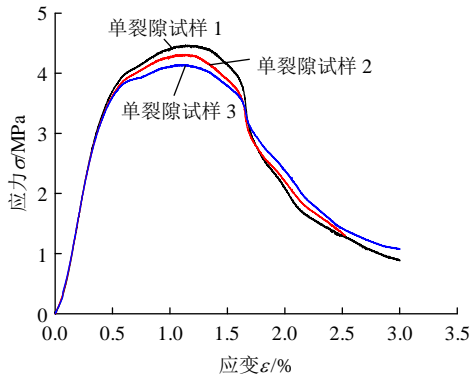
3.2 含预制裂隙的 3DP 石膏试样及压缩试验

岩体一般是由若干结构弱面(断层、节理、裂隙等)切割而成的多裂隙体, 而节理、裂隙的起裂、扩展直至最后的贯通, 往往是岩体失稳的主要原因之一, 因此, 含裂隙岩体的力学性质一直是研究的热点问题^[50-54]。由于自然裂隙岩体结构十分复杂且具有各向异性等特征, 对于含裂隙岩体的研究多通过人工预制裂隙的手段。含裂隙试样的制作主要分两类: 一类是利用工具(如铣刀、线锯、高压水射流等)在岩石试块上直接开凿预制裂隙^[50-51], 但是由于这些工具开凿能力的限制, 以及岩石因内部复杂的微观结构所造成其力学性质的差异性, 往往导致试验数据具有较大的离散型; 另一类是通过岩石类相似材料(石膏、混凝土等), 直接浇筑含预制裂纹的试样^[50, 52-54], 该方法一定程度上克服了试样本身的离散性, 但是仍然不可避免因浇筑过程中人工带来的误差。而 3DP 技术能较容易地克服以上缺点, 利用 CAD 等辅助软件可以设计任意尺寸、形状的裂隙, 高精度的打印过程充分地保证了裂隙的尺寸。

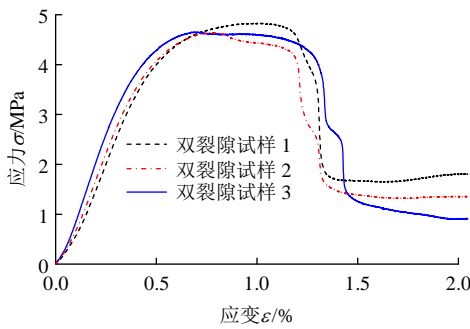
本文利用 CAD 软件建立了含单裂隙和双裂隙的模型, 其中模型的尺寸参数如图 7(a)所示, 每种模型利用 PP 型打印机各制作 3 块。在 RMT - 150C 岩石力学试验系统完成单轴压缩试验, 加载方式采用轴向变形控制, 其加载速率为 0.005 mm/s, 并在试验过程中利用摄像机进行录像, 为更好地观察裂隙的扩展程度, 在试样表面做了若干个等间距的标记点, 试验结果如图 7(b)~(d)所示。从单裂隙试样和双裂隙试样的应力 - 应变曲线可知(见图 7(b), (c)), 在单轴压缩的过程中, 2 种模型试样明显地经历了裂隙压密阶段、弹性变形阶段、塑性阶段和峰值强度后的应力跌落阶段, 这与 S. Yang 等^[51]所得到的含裂隙试样的试验曲线类似(见图 8(c))。另外模型试样的 3 条试验曲线表现出很好地一致性, 说明 3DP 技术可以保证所制作裂隙试样的均一性。从试样的破坏特征(见图 7(d))可知, 在单轴压缩下, 单裂隙试样以裂隙两端为起始分别萌生出了张拉裂



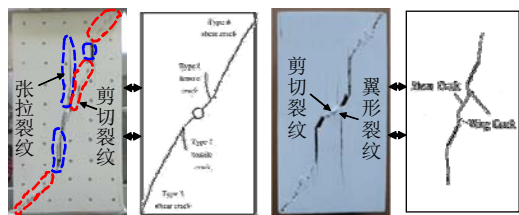
(a) 单裂隙和双裂隙的 3D 长方体模型



(b) 单裂隙试样的应力 - 应变曲线



(c) 双裂隙试样的应力 - 应变曲线



单裂隙试验结果 L. N. Y. Wong 和 H. H. Einstein^[50] 双裂隙试验结果 R. H. C. Wong 和 K. T. Chau^[55]

(d) 单裂隙和双裂隙试样的破坏特征

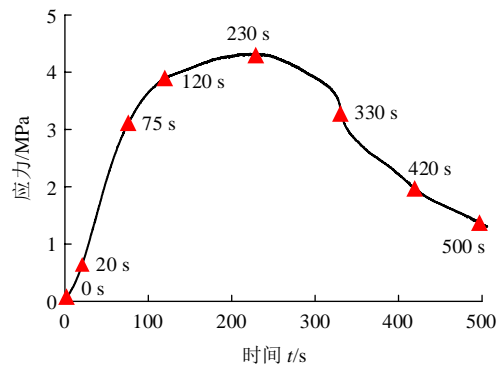
图 7 含裂隙试样的试验^[36]

Fig.7 Experimental results of the specimens with pre-existed cracks^[36]

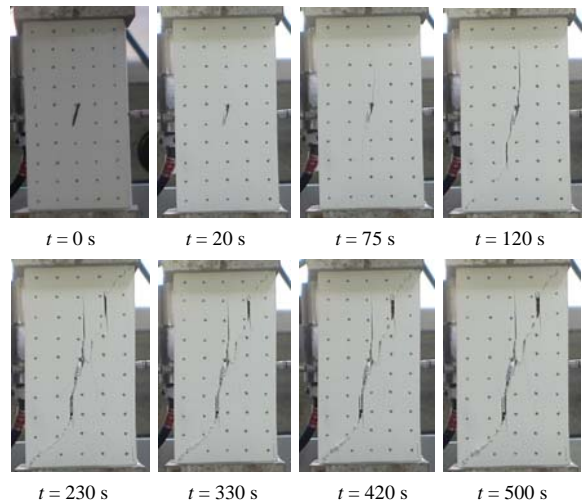
纹和剪切裂纹；而双裂隙试样从 2 个裂隙的外端萌生了张拉裂纹，两裂隙之间的岩桥发生剪切破坏；2 种模型试样的破坏特征与 L. N. Y. Wong 等^[50,55]的研究成果具有较好一致性。从以上分析可知，利用 3D 打印技术制作的裂隙模型能够有效地克服试样的离

散误差，模拟试样的破坏特征和变形特征，说明 3D 打印技术能够提供一种新的、较为可靠的制作裂隙模型的方法。

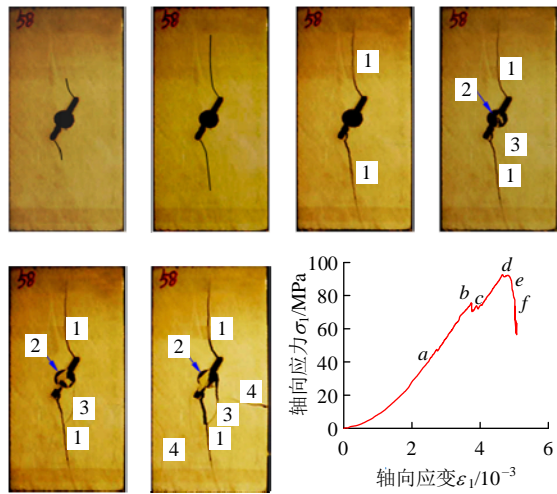
图 8 给出了单裂隙试样裂纹扩展过程与宏观变形特征的关系。为便于说明，将应力 - 应变曲线等价转化为应力 - 时间的曲线(见图 8(a))。从图 8(a), (b)可知，在 0~20 s 内，试样主要发生裂隙压密变形，在预制裂隙内可以明显地观察到表面剥落的现象；随后试样进入弹性变形阶段，直到在 $t = 75$ s 附近，预制裂隙尖端附近区域处萌生了 2 条翼形张拉裂纹，试样开始进入了塑性发展阶段；随着时间的推移，新生裂隙逐渐扩展，当 $t = 120$ s 时，在拉裂纹的下端出现了新的剪切裂纹，试样进入了不稳定发展阶段；在此阶段中，新生裂隙附近萌生了新的微观拉裂纹，在 $t = 230$ s 左右，预制裂隙尖端萌生了一条剪切裂纹，并且在试样的右上端也出现了一条剪切裂纹和张拉裂纹，形成了滑动面，试样达到峰值剪切强度；之后试样进入了裂隙快速发展阶段，试样的应力逐渐减小，在 $t = 330$ s 时，预制裂隙尖端萌生的剪切裂纹与一条张拉裂纹贯通，试样应力曲线上出现了跌落现象；最后随着裂隙的不



(a) 应力 - 时间的曲线



(b) 裂隙的起裂和扩展过程



(c) 含单裂隙砂岩试样的裂纹起裂和扩展过程^[51]

图8 含单条裂隙试样的裂隙扩展过程

Fig.8 Crack coalescence of the specimens containing a single flaw

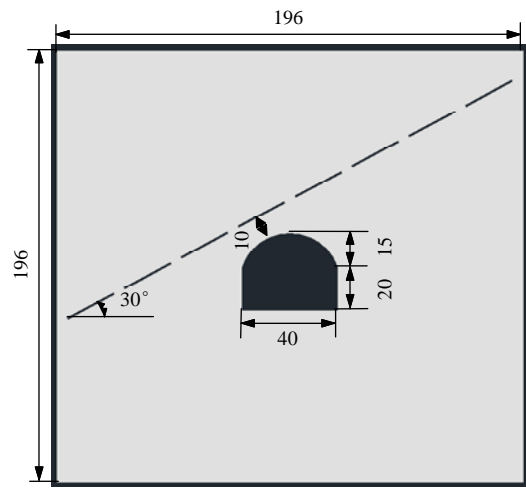
断发育，裂隙相互交叉贯通，逐渐形成了贯通的破坏面($t = 420, 500 \text{ s}$)。图 8(c)给出了含单裂隙砂岩试样的裂纹起裂和扩展过程^[51]，对比图 8(b)和(c)可知，在轴向荷载作用下，2 种试样的 2 条起始裂纹萌发都起于预制裂隙的尖端，然后随着轴向荷载的逐渐增加，2 条裂纹逐渐扩展，都最终形成了近乎贯通的宏观破坏面。由此可见，2 种试样具有相似的裂隙扩展过程，说明 3DP 所制作的含预制裂隙的试样可以应用于裂纹的起裂和扩展过程的研究。

4 3DP 隧道物理模型及力学试验

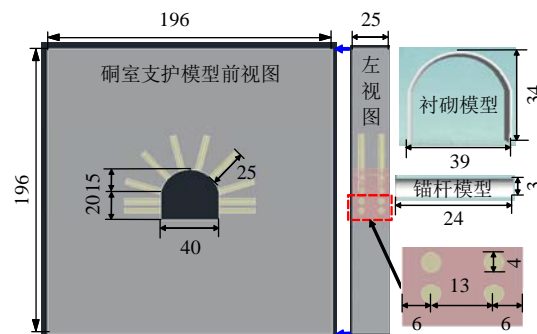
4.1 隧道物理模型试样及支护结构的制作

隧道模型试验可以较为真实地反映地质构造以及工程结构状况，可以直观地观察试验结果及洞室的破坏状况，使人更容易从全局上把握岩体工程整体的力学特征、变形趋势和稳定性特点，因此隧道模型试验一直是研究地下隧道洞室结构围岩稳定和支护系统优化设计、验证数值模拟结果的重要手段^[56-59]。然而，隧道模型的制作却是一种耗时、费力的事情，值得提出的是，对于复杂结构的隧道模型，利用传统的制作方法很难制作，往往需通过等效的办法来进行简化处理，例如，在支护系统中，常常以一个锚杆和锚索代替原型中的多根锚杆和锚索等^[57]。由于 3DP 打印技术只需利用计算机辅助软件画出设计原型的 3D 结构即可自行进行打印制作，可以克服复杂模型无法制作以及模型制作耗时、费力的问题。

借助 AutoCAD 软件设计了 2 种含特殊结构的隧道模型，分别为含单断层隧道模型和含锚杆衬砌支护隧道模型，其尺寸和设计图如图 9 所示。另外，为对比试验效果，同时也设计了与这 2 种隧道模型基本尺寸完全一致的普通隧道模型。以粉末性石膏为打印材料，利用 PP 打印机每种隧道模型各制作了 2 块，在打印过程中，模型的充填率均设为 100%，每层高度均为 0.1 mm。



(a) 含单断层的隧道模型



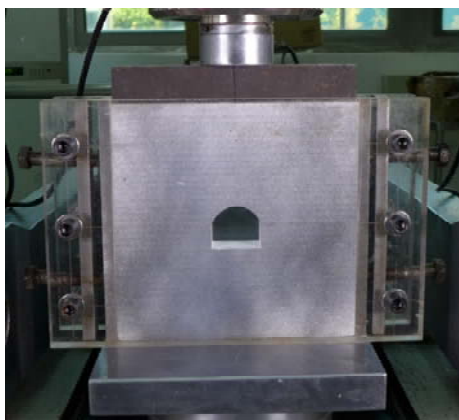
(b) 含锚杆衬砌支护结构的隧道模型和支护结构

图9 基于 3DP 制作的隧道模型及其支护结构(单位: mm)
Fig.9 Tunnel model based on 3DP and its supporting structure (unit: mm)

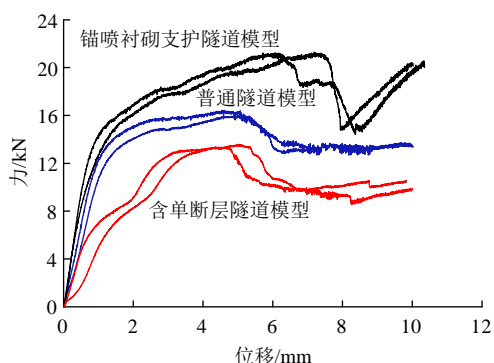
4.2 侧限条件下隧道物理模型的压缩试验

利用自制的加载模具在 RMT - 150C 岩石力学试验系统上完成单轴压缩试验(见图 10(a))，隧道模型两侧的变形受到模具的约束，加载方式采用轴向变形控制，加载速率为 0.005 mm/s，试验结果如图 10(b)~(c)所示。为了更好地观察隧道模型的变形，只展示了隧洞附近的破坏特征。

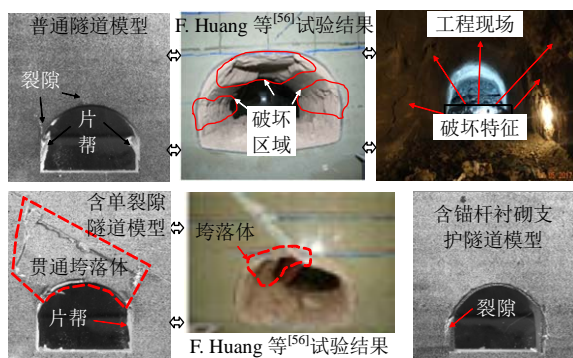
从隧道模型的试验曲线(见图 10(b))可知：(1) 每种隧道模型的 2 条曲线具有很好的一致性，这说明该制样方法一定程度上克服了人工误差所带来的离散性；(2) 与普通隧道模型的承载能力相比，含



(a) 隧道模型的单轴压缩试验



(b) 隧道模型的试验曲线



(c) 隧道模型的破坏特征

图 10 隧道模型的试验结果

Fig.10 Experimental results of the tunnel models

锚杆衬砌支护隧道模型的承载能力明显得到了提高, 而含单断层隧道模型的承载能力明显受到了削弱。为进一步分析含锚杆衬砌支护体和断层对隧道承载能力的影响, 表 2 给出了 3 种模型试样的承载力, 并且以普通隧道模型的承载力为基准, 定义了承载力提高系数:

$$K = \frac{F - F_{普通}}{F_{普通}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: K 为承载力提高系数, F 为含锚杆衬砌支护隧道模型和含断层隧道模型的承载力, $F_{普通}$ 为普通隧道模型的承载力。其中当 $K > 0$ 时, 表示承载能

表 2 隧道模型的承载力

Table 2 Bearing capacity of tunnel model

隧道模型类型	承载力/kN		承载力提高系数/%
	模型的承载力	平均承载力	
普通隧道模型	16.42	16.20	-
	15.98		
锚杆衬砌支护	20.98	21.07	29.75
	21.06		
含单断层	13.58	13.46	- 16.91
	13.34		

力提高, $K < 0$ 时, 表示承载能力降低。

利用式(1)的计算结果如表 2 所示, 与普通隧道模型相比较, 含锚杆衬砌支护隧道模型的承载力提高了 29.75%, 含单断层隧道模型的承载力降低了 16.91%。从隧道模型的破坏特征(见图 10(c))可知: (1) 未支护的普通隧道模型在加载过程中, 拱顶中部、左拱肩发生了裂隙破坏, 左右边墙出现了明显的片帮剥落现象, 并且这些发生破坏的区域与 F. Huang 等^[56]的试验结果以及工程现场相类似; (2) 含单断层隧道模型的拱顶中部、左右拱肩都出现了裂隙, 并且这 3 组裂隙与预制断层形成了贯通的垮落体, 这个垮落体的位置与 F. Huang 等^[56]的含断层隧道模型的试验类似, 都发生在断层的下盘位置; (3) 含锚杆衬砌支护隧道模型仅仅在左边墙上出现了裂隙, 并未出现片帮的剥落, 可见其破坏程度明显受到了抑制。

从以上分析可知, 同种隧道模型的试验曲线和承载力都具有较好的一致性, 说明 3DP 技术制作的隧道模型一定程度上克服了传统制样方法所带来的人工误差; 锚杆衬砌支护方式可以明显抑制隧道的破坏, 提高隧道的承载能力, 而断层的存在明显地加剧了隧道围岩的破坏, 降低了隧道的稳定性, 这些规律与人工制作的模型以及隧道工程相类似; 另外, 3DP 隧道模型在破坏特征上与人工制作的模型和工程现场也具有一定的相似性。由此可知, 3DP 技术可以应用于隧道物理模型的试验研究中。

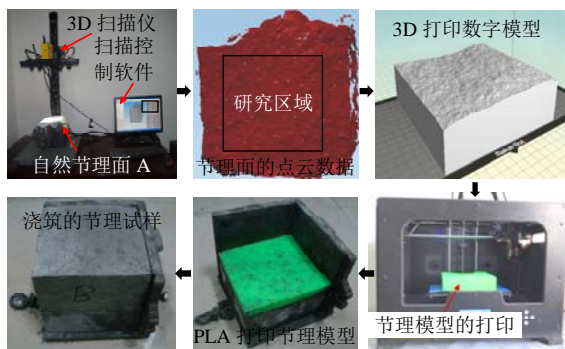
5 基于 3DP 模具的自然节理面试样的制作方法及其剪切力学试验分析

5.1 含自然节理面的 3DP 模具及试样制作方法

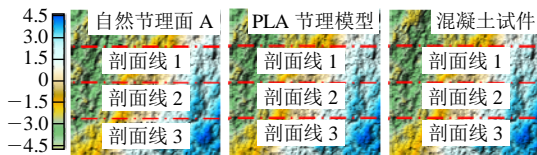
真实岩石节理表面形态复杂多样, 获取大批具

有相同表面形貌特征的岩石节理试样是非常困难的，这导致试验结果的重复性和稳定性较差，因此杜时贵等^[21, 60-61]利用岩石相似材料来浇筑含相同原岩节理面的试样用于试验研究，其方法是以原岩节理面作为模具来对节理面进行复制，但在浇筑过程中不可避免地会对原岩节理产生破坏，并且这种破坏是永久性的，这将直接影响节理面的复制浇筑工作，对研究十分不利。而本文将 3D 光学面扫描技术和 FEM 打印技术相结合，提出一种新的含自然节理面的浇筑方法，此方法能够较好地解决以上难题。

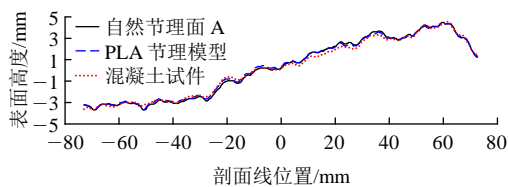
以制作含自然节理面 A 的模型试样为例(见图 11(a))，首先利用 3D 光学面扫描技术对节理面 A 进行测量，获得其节理面的点云数据；接着根据研究区域的点云数据建立 3D 数字打印模型，研究区域的尺寸为 150 mm×150 mm；然后将 3D 模型导入 FDM 型打印机，按照打印步骤制作出 PLA 打印节理模型；最后以 PLA 打印节理模型为模具，使用混



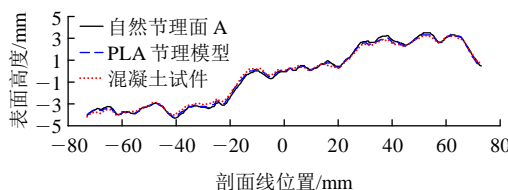
(a) 含自然节理面模型试样的制作过程



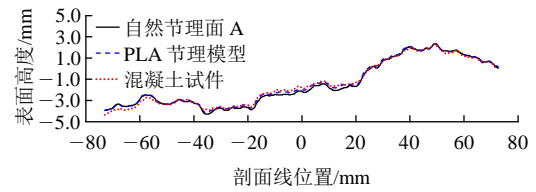
(b) 自然节理面 A, PLA 节理模型以及混凝土试件的 3D 表面形态



剖面线 1



剖面线 2



剖面线 3

(c) 自然节理面 A, PLA 节理模型以及混凝土试件的 2D 剖面线形态

图 11 含自然节理面试样的制作方法与可靠性分析

Fig.11 Manufacturing method and reliability analysis of the samples with natural joint

凝土材料对节理面 A 进行复制浇筑。

为分析上述浇筑方法的可靠性，分别对打印的 PLA 节理模型和浇筑的混凝土节理试样也进行扫描以获得其点云数据，并画出 3 种点云数据的 3D 表面形态，如图 11(b)所示，自然节理面 A, PLA 节理模型以及混凝土试件的 3D 表面形态几乎完全一致，这说明从视觉上混凝土结构面几乎完全复制了原岩节理面的形貌特征。为进一步分析三者表面形态的差异性，分别在三者节理面上等间距截取 3 条剖面线，其位置如图 11(b)所示，并画出其曲线形态，如图 11(c)所示。从曲线形态可以看出，原岩节理面和打印节理面在相同位置的剖面线形态几乎完全一致；而原岩节理面和混凝土节理面的剖面线形态也大致相同，只存在细小差别。为定量分析这种差异性，利用表征节理面形态特征的统计参数坡度均方根 Z_2 ^[62]来定量描述两者的 3 条剖面线，并以原岩节理面为基准计算混凝土试样的相对误差，其中，剖面线的取点步距为 0.5 mm，其结果如表 3 所示，两者最大的相对误差为 6.135%，平均误差仅为 3.854%。由此可见，以 PLA 节理模型为模具所浇筑的节理面混凝土试样能够较好地复制原岩节理面。

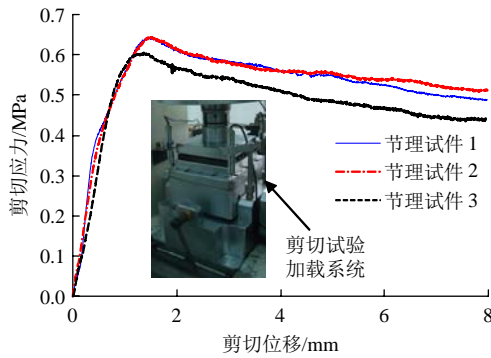
表 3 含自然节理面试样的制样误差

Table 3 Errors of sample preparation of the models with natural joint

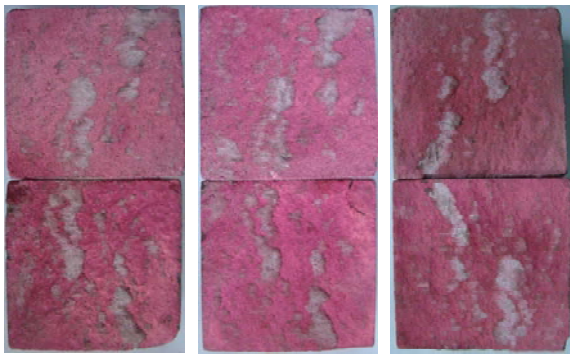
剖面线名称	坡度均方根 Z_2		相对误差/%	
	原岩节理面	混凝土试样	误差	平均误差
剖面线 1	0.181 6	0.170 5	6.135	
剖面线 2	0.195 6	0.189 3	3.224	3.854
剖面线 3	0.170 4	0.166 6	2.204	

5.2 基于 3DP 制作的节理面试样剪切试验分析

为分析所浇筑试样的均一性，在 RMT-150C 岩石力学试验系统上进行剪切试验(见图 12(a))，法



(a) 节理面试样的剪切应力 - 剪切位移曲线



(b) 节理面试样的剪切破坏特征

图 12 含自然节理面试样的力学试验

Fig.12 Mechanical experiments of specimens with natural joint

向应力为 0.27 MPa, 试验结果如图 12 所示。从图 12(a)可知, 3 个混凝土试样的剪切应力 - 剪切位移曲线基本一致, 以 3 个试样的平均峰值剪切强度为基础, 试样的最大离散性误差为 4.08%, 而一般利用相似材料所浇筑剪切试样的剪切强度离散性误差一般为 8%~20%^[21, 63-65]。另外, 从图 12(b)可知, 3 个混凝土试样剪切破坏特征的位置和范围也具有高度的一致性。因此, 本文利用 3DP 节理模型所浇筑的试样具有较好的一致性。

由以上分析可知, 利用 3D 光学面扫描技术和 FEM 打印技术所制作的含自然节理面试样, 能够较好地复制出原岩节理面的形貌特征, 并且试样的剪切力学性质和破坏特征也都具有很好的稳定性和一致性, 充分地说明了该制作方法的合理性。值得提出的是, 由于 PLA 材料具有一定的强度, 所制作的 PLA 节理模型可以重复使用; 另外节理 3D 数字模型可以永久保存, 在使用过程如若出现细小节理被充填或破坏的情况, 可利用数字模型重新制作 PLA 节理模型, 一定程度上解决了因原岩节理面受损带来的影响。

6 讨论与展望

本文利用 3D 打印技术制作了若干种含特殊结构的模型试样, 并对其进行了力学试验, 从变形特征、破坏特征以及强度特征进行了分析, 充分地展示了 3D 打印技术给岩体力学模型试验研究中所带来的极大优势和机遇, 相对于传统的制样方式, 3D 打印技术在模型制作中具有多个典型优势:

(1) 克服了传统制样方法无法制作复杂模型的困难: 传统的人工制样方法难以制作具有复杂结构试样, 例如含复杂地质构造或工程支护结构的隧道物理模型, 内部含裂隙、孔洞的模型, 自然节理模型等。计算机辅助设计软件能够较好地设计出研究问题的三维模型, CT 成像技术能够观察到研究对象的内部结构特征, 3D 扫描技术可以得到研究对象表面的形貌特征, 将三者有机地结合起来, 基本能够建立符合不同研究目的的三维模型; 然后借助 3D 打印技术制作复杂三维实体能力, 基本能够解决含任意复杂结构物理模型的制作问题。

(2) 克服了传统制样方法耗时、费力的问题: 3DP 打印技术是一种全自动成型技术, 将设计好的 3D 物理模型输入打印系统后, 打印喷头将根据设计要求按照指定的路径自动完成整个模型的制作, 全过程中无需投入任何人力和时间。当然, 有一些 3D 打印技术制作的模型在成型后可能做少许后处理, 例如为保证加载端面的平整, 需对模型的端部进行磨平处理等, 但此工作消耗的时间与传统制样消耗的时间相比是很少的。

(3) 克服了传统制样离散性较大的难题: 利用传统的人工制样方法制作物理模型, 在浇筑制作过程中, 由于人为操作的主观性问题以及设备本身的限制, 不可避免地会引起制样误差。而 3DP 打印技术能较为容易地克服以上缺点, 现在普通 3D 打印技术的打印精度一般都可达到 0.1 mm, 可以充分地解决因打印尺寸不均一所带来的模型离散性大的问题; 在打印过程中, 打印材料的供应是由一套全自动高质量给料系统控制, 可以避免因材料不均带来的离散性。

从以上分析可知, 利用 3D 打印技术可以快速、高效、均一地制作出含复杂结构的物理模型, 将在岩石室内试样制作、3D 工程物理模型制作、工程支护结构制作、3D 工程结构模型、工程岩体模具制造等岩体力学与工程方面, 发挥非常重要的作用(见图 13)。

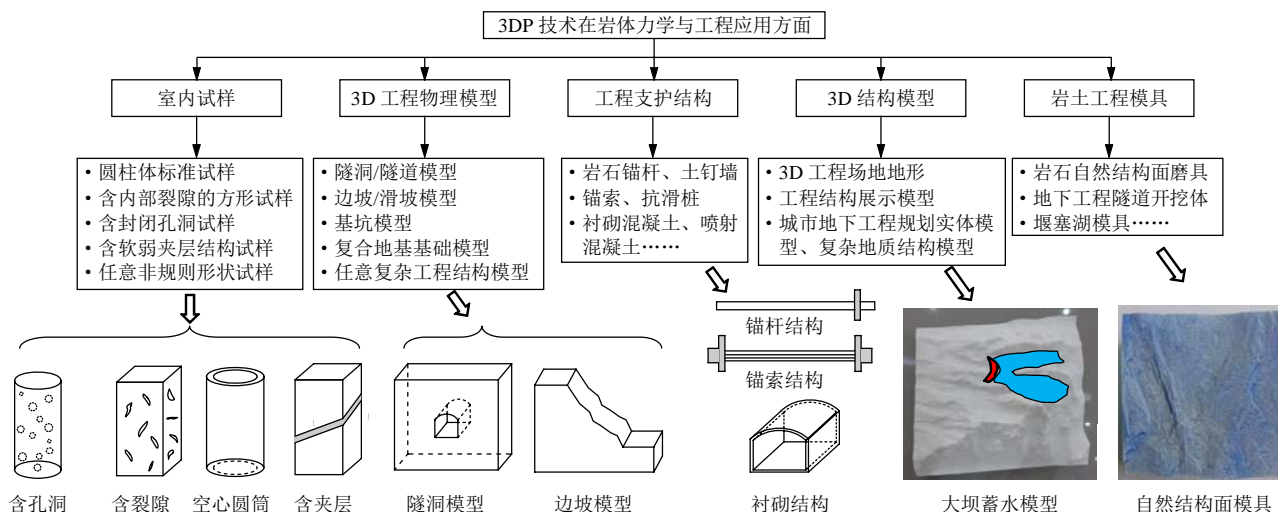


图 13 3DP 技术在岩体力学与工程中的应用

Fig.13 Applications of 3DP technology in rock mechanics and geotechnical engineering

同时，需看到的是，尽管利用 3D 打印技术在岩体物理模型制作方面具有极大优势和发展前景，但是目前由于 3D 打印技术和打印材料的限制，利用该项技术制备出完全与岩石材料具有相同性质的 3DP 模型确实是不可能的。若想将 3D 打印技术真正成熟地大范围运用到岩石/岩体力学的研究中，还需要解决以下几个问题：

(1) 打印材料的限制。目前能够直接用于岩石力学研究的打印材料并不多，并且其材料性质用于模拟自然界中复杂多样的各类岩石具有很大的限制，例如粉末性石膏材料的单轴抗压强度一般不超过 10 MPa，而在自然界中超过此强度的岩石比比皆是。但有理由相信随着打印材料研究日新月异的发展，满足岩土力学研究的类岩石材料必将很快出现。

(2) 打印尺寸的限制。大尺度模型试验在今后岩体力学模型试验研究中具有重要位置，但是目前 3D 打印技术还远不能满足大型模型试验的尺寸要求，例如目前 ProJet®x60 系列打印机的最大打印尺寸为 508 mm×381 mm×229 mm^[66]，此尺寸对于大型复杂模型是远远不够的。目前，大型、高效的 3D 打印机设备可以直接打印房子构建，因此，未来将 1~2 m 尺寸的物理模型试样一次性打印是完全可能的。

(3) 打印功能的改进。自然岩石是由多种造岩矿物按一定结构集合而成的地质体，如若使用 3D 打印技术实现岩石内部结构和成分的完全还原，需要对 3D 打印机的功能进一步完善，例如杏仁状玄武岩主要成分为斑晶斜长石、辉石，基质斜长石、玻璃质等，其中晶斑的分布对其强度特征和变形特

征有直接影响，而由于自然杏仁状玄武岩的晶斑分布是随机，很难找到一批具有相同晶斑结构的岩石，如若利用 3D 打印技术制作出一批含相同晶斑结构的岩石，3D 打印机就必须同时可以模拟这几种不同的矿物，这就要求多个喷头，多种疏密程度相互协调工作，而此过程的实现需要进一步对 3D 打印机的功能进一步改进和完善。此外现在堆积式 3D 打印方法制作出的 3DP 试样，还存在材料性质各向异性问题，如何通过技术处理和打印方式改进使得制作的试样完全各向均质还有待进一步发展。

(4) 打印模型致密度的限制。3D 打印技术是一种增材制造的技术，目前该技术主要是将粉末状性材料或塑料等可黏合材料，通过逐层打印的方式来构造 3D 实体，因而目前，无论使用何种打印材料，所制作 3D 模型的层与层之间不可避免地会有一些微空隙和各向异性问题。而自然界中，大部分岩石是在高温高压条件下形成的致密材料。因而，对于 3D 打印技术，如何制造出高致密材料模型，是一个在未来即便突破打印材料瓶颈也极具挑战性的课题。

7 结 论

本文以粉末性石膏和 PLA 材料为打印材料，分别利用 PP 型 3D 打印机和 FDM 型 3D 打印机，制作了若干种含一定岩体结构特征的 3D 模型试样，并开展了一系列的尝试性试验，得到了以下结论：

(1) 含多孔洞 3DP 模型能够很好地研究含内部缺陷的岩体性质，试样内部的缺陷确实影响着其变

形特征、破坏特征和强度特征, 并且与完整试样的单轴抗压强度相比, 其强度减少了约 29.95%; 含预制裂隙 3DP 模型试样的变形特征、破坏特征以及裂隙的起裂扩展与岩石类材料类似, 并且此方法制作试样的试验结果具有很好地稳定性和一致性。

(2) 以粉末性石膏和 PLA 材料为打印材料, 分别制作了含单断层和含支护工程隧道模型的试样; 经过试验证明支护系统可以有效地抑制洞室的破坏、提高洞室的承载能力, 而断层的存在明显加剧了隧道围岩破坏的程度, 降低了隧道的稳定性, 3DP 隧道模型可以模拟洞室的破坏过程; 与普通隧道模型相比, 含锚杆衬砌支护隧道模型的承载力提高了 29.75%, 含单断层隧道模型的承载力降低了 16.91%。

(3) 将 3D 光学表面扫描技术和 FEM 打印技术相结合, 提出一种新的含自然节理面模型的制作方法, 该方法制作的节理试样能够较好地复制出原岩节理面的形貌特征, 其剪切力学性质和破坏特征具有很好的稳定性和一致性, 并且在使用 PLA 节理模型的浇筑过程中, 如若出现细小节理特征被充填或破坏的情况, 可以利用节理的 3D 数字模型(可永久保存)重新制作 PLA 节理模型, 有效地解决了因制作过程中原岩节理面受损带来的影响。

本文试验测试分析初步表明了 3DP 技术在岩体/岩石试验力学研究将具有广阔的应用前景, 相信目前的一些应用局限必将随着 3DP 技术的进一步发展而得到解决, 并将最终极大地促进岩石试验力学的发展。

参考文献(References):

[1] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2 803 - 2 813.(HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2 803 - 2 813.(in Chinese))

[2] 谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究及探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2 161 - 2 178.(XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2 161 - 2 178.(in Chinese))

[3] 冯夏庭, 王泳嘉. 深部开采诱发的岩爆及其防治策略的研究进展[J]. 中国矿业, 1998, 7(5): 42 - 45.(FENG Xiating, WANG Yongjia. New development in researching rockburst induced by mining at great depth and its control strategies[J]. Journal of China Coal Industry, 1998, 7(5): 42 - 45.(in Chinese))

[4] 钱七虎. 非线性岩石力学的新进展——深部岩体力学的若干问题[C]//

中国岩石力学与工程学会编. 第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2004: 10 - 17.(QIAN Qihu. The current development of nonlinear rock mechanics: the mechanics problems of deep rock mass[C]// Chinese Society of Rock Mechanics and Engineering ed. Proceedings of the 8th Rock Mechanics and Engineering Conference. Beijing: Science Press, 2004: 10 - 17.(in Chinese))

[5] POLLARD D D, AYDIN A. Progress in understanding jointing over the past century[J]. Geological Society of America Bulletin, 1988, 100(8): 1 181 - 1 204.

[6] 谷德振. 岩体工程地质力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 198 - 221.(GU Dezhen. Basic mechanics of engineering geology for rock mass[M]. Beijing: Science Press, 1979: 198 - 221.(in Chinese))

[7] 夏才初, 孙宗硕. 工程岩体节理力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002: 100 - 101.(XIA Caichu, SUN Zongqi. Joint mechanics of engineering rock mass[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2002: 100 - 101.(in Chinese))

[8] HERGET G, UNRUG K. In situ, rock strength from triaxial testing[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts, 1976, 13(11): 299 - 302.

[9] JIANG Q, FENG X T, CHEN J, et al. Estimating in-situ rock stress from spalling veins: a case study[J]. Engineering Geology, 2013, 152(1): 38 - 47.

[10] NIZAMETDINOV F K, NAGIBIN A A, LEVASHOV V V, et al. Methods of in situ strength testing of rocks and joints[J]. Journal of Mining Science, 2016, 52(2): 226 - 232.

[11] 贾志欣, 汪小刚, 赵宇飞, 等. 岩石钻孔原位测试技术的应用与改进[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6): 1 264 - 1 269.(JIA Zhixin, WANG Xiaogang, ZHAO Yufei, et al. Application and improvement of rock borehole in-situ testing technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(6): 1 264 - 1 269.(in Chinese))

[12] 冯夏庭, 吴世勇, 李邵军, 等. 中国锦屏地下实验室二期工程安全原位综合监测与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(4): 649 - 657.(FENG Xiating, WU Shiyong, LI Shaojun, et al. Comprehensive field monitoring of deep tunnels at Jinping underground laboratory (CJPL - II) in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(4): 649 - 657.(in Chinese))

[13] GOODMAN R E, TAYLOR R L, BREKKE T L. A model for the mechanics of jointed rock[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, 1968, 94: 637 - 660.

[14] BARTON N, BANDIS S, BAKHTAR K. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts, 1985, 22(3): 121 - 140.

[15] 朱维申, 王平. 节理岩体的等效连续模型与工程应用[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(2): 1 - 11.(ZHU Weishen, WANG Ping. An equivalent continuum model for jointed rocks and its engineering application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(2): 1 - 11.(in Chinese))

[16] HART R. Enhancing rock stress understanding through numerical analysis[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(7/8): 1 089 - 1 097.

[17] BARTON N R. A model study of rock-joint deformation[J].

- International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts, 1972, 9(5): 579 - 582.
- [18] 林韵梅. 实验岩石力学——模拟研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984: 1 - 2.(LIN Yunmei. Simulation research on rock mechanics experiment[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1984: 1 - 2. (in Chinese))
- [19] 陈春利, 殷跃平, 门玉明, 等. 全长黏结注浆格构锚固工程模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(4): 881 - 889.(CHEN Chunli, YIN Yueping, MEN Yuming, et al. Model test on fully grouted lattice beam anchorage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(4): 881 - 889.(in Chinese))
- [20] VOGLER U W, KOVARI K. Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics And Mining Sciences, 1978, 15(2): 47 - 51.
- [21] 杜时贵, 黄曼, 罗战友, 等. 岩石结构面力学原型试验相似材料研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(11): 2 263 - 2 270.(DU Shigui, HUANG Man, LUO Zhanyou, et al. Similar material study of mechanical prototype test of rock structural plane[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(11): 2 263 - 2 270.(in Chinese))
- [22] GARBOCZI E J, CHEOK G S, STONE W C. Using LADAR to characterize the 3D shape of aggregates: Preliminary results[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(6): 1 072 - 1 075.
- [23] HÄFNER S, ECKARDT S, LUTHER T, et al. Mesoscale modeling of concrete: Geometry and numerics[J]. Computers and Structures, 2006, 84(7): 450 - 461.
- [24] 尚岳全, 孙红月. 岩土力学数值模拟结果应用中应注意的问题[J]. 地质灾害与环境, 1997, (4): 22 - 26.(SHANG Yuequan, SUN Hongyue. The application problems of numerical simulation results rock mass mechanics[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1997, (4): 22 - 26.(in Chinese))
- [25] WANG Z M, KWAN A K H, CHAN H C. Mesoscopic study of concrete I: generation of random aggregate structure and finite element mesh[J]. Computers and Structures, 1999, 70(5): 533 - 544.
- [26] CUI H Z, LO T Y, MEMON S A, et al. Effect of lightweight aggregates on the mechanical properties and brittleness of lightweight aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2012, 35(10): 149 - 158.
- [27] KIM H, BUTTLAR W G. Discrete fracture modeling of asphalt concrete[J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 46(13): 2 593 - 2 604.
- [28] WU K R, CHEN B, YAO W, et al. Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(10): 1 421 - 1 425.
- [29] JU Y, XIE H, ZHENG Z, et al. Visualization of the complex structure and stress field inside rock by means of 3D printing technology[J]. Science Bulletin, 2014, 59(36): 5 354 - 5 365.
- [30] JU Y, WANG L, XIE H, et al. Visualization and transparentization of the structure and stress field of aggregated geomaterials through 3d printing and photoelastic techniques[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(6): 1 383 - 1 407.
- [31] LIU P, JU Y, RANJITH P G, et al. Visual representation and characterization of three-dimensional hydrofracturing cracks within heterogeneous rock through 3D printing and transparent models[J]. International Journal of Coal Science and Technology, 2016, 3(3): 284 - 294.
- [32] ISHUTOV S, HASIUK F J, HARDING C, et al. 3D printing sandstone porosity models[J]. Interpretation, 2015, 3(3): SX49 - SX61.
- [33] JIANG C, ZHAO G F. A Preliminary study of 3D printing on rock mechanics[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(3): 1 041 - 1 050.
- [34] JIANG C, ZHAO G F, ZHU J, et al. Investigation of dynamic crack coalescence using a gypsum-like 3d printing material[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(10): 1 - 16.
- [35] JIANG Q, FENG X, GONG Y, et al. Reverse modelling of natural rock joints using 3D scanning and 3D printing[J]. Computers and Geotechnics, 2016, 73(3): 210 - 220.
- [36] JIANG Q, FENG X, SONG L, et al. Modeling rock specimens through 3D printing: tentative experiments and prospects[J]. Acta Mechanica Sinica, 2016, 32(1): 101 - 111.
- [37] HEAD D, VANORIO T. Effects of changes in rock microstructures on permeability: 3D printing investigation[J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43(14): 7 494 - 7 502.
- [38] OFweek 3D 打印网. 超级大百科: 全球最流行的七大 3D 打印技术详解[EB/OL]. <http://3dprint.ofweek.com/2016-09/ART-132109-8500-30040401.html>, 2016-09-20.(OFweek 3D Printing Network. Super Encyclopedia: the world's most popular seven 3D printing techniques[EB/OL]. <http://3dprint.ofweek.com/2016-09/ART-132109-8500-30040401.html>, 2016-09-20. (in Chinese))
- [39] COOK N G W. The failure of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1965, 2(4): 389 - 403.
- [40] 王明洋, 严东晋, 周早生, 等. 岩石单轴试验全程应力应变曲线讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(1): 101 - 106.(WANG Mingyang, YAN Dongjin, ZHOU Zaosheng, et al. Discussion on complete stress-strain curves of rocks under uniaxial loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(1): 101 - 106.(in Chinese))
- [41] FAIRHURST C E, HUDSON J A. Draft ISRM suggested method for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts, 1999, 36(3): 281 - 289.
- [42] JIANG Q, FENG X T, HATZOR Y H, et al. Mechanical anisotropy of columnar jointed basalts: an example from the Baihetan hydropower station, China[J]. Engineering Geology, 2014, 175(3): 35 - 45.
- [43] 尤明庆, 华安增. 岩石试样单轴压缩的破坏形式与承载能力的降低[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(3): 292 - 296.(YOU Mingqing, HUA Anzeng. Fracture of rock specimen and decrement of bearing capacity in uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(3): 292 - 296.(in Chinese))
- [44] TANG C A, LIN P, WONG R, et al. Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws — Part II: numerical approach[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(7): 925 - 939.
- [45] 刘晓丽, 王思敬, 王思志, 等. 单轴压缩岩石中缺陷的演化规律及

- 岩石强度[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1 195 - 1 201.(LIU Xiaoli, WANG Sijing, WANG Enzhi, et al. Evolutionary rules of flaws in rock subjected to uniaxial compression and rock strength[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6): 1 195 - 1 201.(in Chinese))
- [46] 胡盛斌, 邓 建, 马春德, 等. 循环荷载作用下含缺陷岩石破坏特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2 490 - 2 495. (HU Shengbin, DENG Jian, MA Chunde, et al. Experimental study of failure characteristics of rock containing flaw under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12): 2 490 - 2 495.(in Chinese))
- [47] WONG R H C, LIN P, TANG C A. Experimental and numerical study on splitting failure of brittle solids containing single pore under uniaxial compression[J]. *Mechanics of Materials*, 2006, 38(1/2): 142 - 159.
- [48] 杨圣奇, 吕朝辉, 渠 涛. 含单个孔洞大理岩裂纹扩展细观试验和模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(6): 774 - 781.(YANG Shengqi, LU Zhaohui, QU Tao. Investigations of crack expansion in marble having a single pre-existing hole: experiment and simulations[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2009, 38(6): 774 - 781.(in Chinese))
- [49] 杜明瑞, 靖洪文, 苏海健, 等. 孔洞形状对砂岩强度及破坏特征的影响[J]. 工程力学, 2016, 33(7): 190 - 196.(DU Mingrui, JING Hongwen, SU Haijiang, et al. Effects of holes' geometrical shape on strength and failure characteristics of a sandstone sample containing a single hole[J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(7): 190 - 196.(in Chinese))
- [50] WONG L N Y, EINSTEIN H H. Systematic evaluation of cracking behavior in specimens containing single flaws under uniaxial compression[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(2): 239 - 249.
- [51] YANG S, JING H, XU T. Mechanical behavior and failure analysis of brittle sandstone specimens containing combined flaws under uniaxial compression[J]. *Journal of Central South University*, 2014, 21(5): 2 059 - 2 073.
- [52] 黄凯珠, 林 鹏, 唐春安, 等. 双轴加载下断续预制裂纹贯通机制的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 808 - 816.(WONG ROBINA H C, 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.(in Chinese))
- [53] GROTE D L, PARK S W, ZHOU M. Dynamic behavior of concrete at high strain rates and pressures: I. experimental characterization[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 25(9): 869 - 886.
- [54] DYSKIN A V, SAHOURYEH E, JEWELL R J, et al. Influence of shape and locations of initial 3D cracks on their growth in uniaxial compression[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2003, 70(15): 2 115 - 2 136.
- [55] WONG R H C, CHAU K T. Crack coalescence in a rock-like material containing two cracks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1998, 35(2): 147 - 164.
- [56] HUANG F, ZHU H, XU Q, et al. The effect of weak interlayer on the failure pattern of rock mass around tunnel—Scaled model tests and numerical analysis[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, 35(4): 207 - 218.
- [57] 朱维申, 李 勇, 张 磊, 等. 高地应力条件下洞群稳定性的地质力学模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1 308 - 1 314.(ZHU Weishen, LI Yong, ZHANG Lei, et al. Geomechanical model test on stability of cavern group under high geostress[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(7): 1 308 - 1 314.(in Chinese))
- [58] 刘泉声, 雷广峰, 肖龙鸽, 等. 十字岩柱法隧道开挖地质力学模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(5): 919 - 927.(LIU Quansheng, LEI Guangfeng, XIAO Longge, et al. Geomechanical model test on the tunnel excavation with cross rock pillar method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(5): 919 - 927.(in Chinese))
- [59] 徐前卫, 程盼盼, 朱合华, 等. 跨断层隧道围岩渐进性破坏模型试验及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(3): 433 - 445.(XU Qianwei, CHENG Panpan, ZHU Hehua, et al. Experimental study and numerical simulation on progressive failure characteristics of the fault-crossing tunnel surrounding rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(3): 433 - 445.(in Chinese))
- [60] ATAPOUR H, MOOSAVI M. Some effects of shearing velocity on the shear stress deformation behaviour of hard-soft artificial material interfaces[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2013, 31(5): 1 603 - 1 615.
- [61] JOHNSTON I W, LAM T S K. Shear behavior of regular triangular concrete/rock joints-analysis[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1989, 115(5): 711 - 727.
- [62] TSE R, CRUDEN D M. Estimating joint roughness coefficients[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts*, 1979, 16(5): 303 - 307.
- [63] ASTM. Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory(ASTM Standard C192)[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2012.
- [64] 沈明荣, 张清照. 规则齿形结构面剪切特性的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 713 - 719.(SHEN Mingrong, ZHANG Qingzhao. Experimental study of shear deformation characteristics of rock mass discontinuities[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(4): 713 - 719.(in Chinese))
- [65] 朱小明, 李海波, 李 博, 等. 含一阶和二阶起伏体节理剪切强度的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(9): 1 810 - 1 818. (ZHU Xiaoming, LI Haibo, LIU Bo, et al. Experimental study of shear strength of joints with first-order and second-order asperities[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(9): 1 810 - 1 818.(in Chinese))
- [66] 3D Systems Inc.. ProJet@ x60 Series: Professional 3D Printers [EB/OL]. https://www.3dsystems.com/sites/default/files/projet-x60-series-us_0.pdf, 2013 - 4.