

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2024.04.004

基于3D打印试件的裂隙岩体断裂特性及 裂纹扩展特征研究*

余雷雷^a,徐颖^{a,b},葛进进^a,李洪伟^a,倪苏黔^a,张仲一^a,尚辉^a

(安徽理工大学 a. 土木建筑学院; b. 国家重点实验室, 淮南 232001)

摘要: 为探究不同倾角裂隙对岩石断裂特性的影响,本研究基于3D打印技术制备直切槽半圆盘弯曲(NSCB)试件,开展含裂隙岩体I型静态断裂特性的试验研究。为探究不同的预制裂隙角度对于岩石断裂特性的影响,本研究基于3D打印技术制备含裂隙倾角的直切槽半圆盘弯曲试件(NSCB),打印好的试件经过固化,烘烤处理后,将其放置在干冰中,待其表面温度达到 -30°C 时进行准静态三点弯曲试验,该试验揭示了预制裂隙倾角对于断裂韧度、起裂角、断裂能的影响规律。结果表明:含裂隙NSCB试件平均断裂韧度均小于标准NSCB试件,且试件断裂韧度与裂隙倾角成正相关;对于含裂隙的NSCB试件,在 β 介于 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 之间时,起裂角随着裂隙倾角的增大而增大,裂纹拓展路径则表现出明显的“偏折”现象;从断裂破坏的能量角度分析,断裂能随着裂隙倾角的增大而增大。

关键词: 3D打印; NSCB; 断裂韧度; 起裂角; 断裂能

中图分类号: TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2024)04-0025-10

Study on Fracture Characteristics and Crack Propagation Features of Fissured Rock Mass based on 3D Printed Samples

YU Lei-lei^a, XU Ying^{a,b}, GE Jin-jin^a, LI Hong-wei^a, NI Su-qian^a, ZHANG Zhong-yi^a, SHANG Hui^a

(a. School of Civil Engineering and Architecture; b. State Key Laboratory,
Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: To study the influence of rock fracture characteristics with different inclination angles, the notched semi-disk bending (NSCB) specimens were prepared based on the 3D printing technology for experiments on type I static fracture characteristics of rock mass. Specifically, the straight-cut groove half-disc bending specimens (NSCB) with crack angles were prepared by 3D printing technology to investigate the influence of different pre-fabricated crack angles on rock fracture characteristics. Furthermore, the printed specimens were placed in dry ice and subjected to quasi-static three-point bending tests when their surface temperature reached -30°C after the solidification and baking treatments. The experiment revealed the influence of pre-fabricated crack angles on fracture toughness, initiation angle, and fracture energy. The results show that the average fracture toughness of NSCB specimens containing fissures is smaller than that of standard NSCB specimens. The fracture toughness of specimens is positively correlated with the fissure inclination angle. For NSCB specimens containing fissures, the initiation angle increases with the in-

收稿日期 (Date of reception): 2024-01-24

网络首发日期 (Published online): 2024-05-20

作者简介: 余雷雷 (1993-), 男, 硕士研究生, 从事岩石断裂力学相关研究工作, (E-mail) 1393002202@qq.com。

通讯作者: 葛进进 (1988-), 男, 讲师, 从事深部岩石力学特性研究, (E-mail) jge2@foxmail.com。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52074009); 国家自然科学基金青年项目 (52104116)

About the author: YU Lei-lei (1993-), male, postgraduate student, engaged in research related to rock fracture mechanics, (E-mail) 1393002202@qq.com.

Corresponding author: GE Jin-jin (1988-), male, lecturer, engaged in research on deep rock mechanics properties, (E-mail) jge2@foxmail.com.

Fund Programs: National Natural Science Foundation General Project (52074009); National Natural Science Foundation Youth Program (52104116)

crease of the fissure inclination angle when β is between 0° and 90° , and the crack propagation path shows a distinct ‘deflection’ phenomenon. The fissure inclination angle significantly impacts the complexity of the NSCB specimen propagation path. The crack propagation path becomes more complex when the fissure inclination angle and fractal dimension increase. From the perspective of fracture energy, the fracture energy increases with the increase of the fissure inclination angle.

Key words: 3D printing; NSCB; fracture toughness; crack initiation angle; fracture energy

在外部荷载下岩体断裂实际上是一个复杂的物理过程^[1]。断裂力学被广泛地应用在爆破、边坡、地震等岩石工程问题研究中^[2], 现已发展成为研究岩石断裂问题的有效方法。岩石断裂问题中, 常用断裂韧性表征岩体阻止裂缝扩展的能力, 其值越小裂缝越容易产生延伸^[3]。

目前已有不少学者开展了岩体断裂韧性测试方面的研究。如: 赵子江等分别采用 NSCB 试样和 CCNBD 试样进行了三点弯曲试验^[4,5], 测定了层状页岩和大理岩的 I 型断裂韧度; Q Z Wang 等利用试验对多种岩石弹性模量及断裂韧度等力学参数进行了测试与修正^[6]; G Gao 等结合数字图像相关 (DIC) 方法和高速摄影技术^[7], 利用 SHPB 实验装置对 NSCB 花岗岩进行了动态断裂韧度研究; 赵毅鑫等采用三点弯曲试验法对 SCB 煤样进行了 I、II 型断裂韧度测试^[8], 并分析了 2 种断裂韧度的关系。

天然岩体是一种由不同节理、裂隙、夹层等组成的各向异性的非连续介质^[9]。许多岩土工程的失稳和破坏都是由岩体内部裂隙的扩展和贯通诱发而造成^[10], 节理裂隙的力学性质和破裂特征通常决定了整个岩体的承载能力与断裂模式^[11]。因此, 掌握裂隙岩石的断裂参数, 获得断裂韧性、断裂能、起裂角等是明确岩体破裂机制, 同时也是爆破、边坡支护等工程施工的关键。

由于天然岩体内部微裂隙错综复杂, 既使得获取具有相同内部结构的同批次岩石试样难度较高, 又导致试验结果离散性较大。近年来, 随着 3D 打印技术的快速发展, 其在复杂结构上突出的优势, 具备几何适应性好、可个性化定制、天然模型还原度高、离散性小、高效便捷等优势, 能克服传统制样方法的诸多不足^[12], 目前越来越多学者运用 3D 打印技术解决岩石力学中传统方法无法解决的困难, 如: Zhou 等以陶瓷等 5 种原材料制备了 3D 打印岩体试样并开展了单轴压缩试验和直接拉伸试验^[13], 结果表明光敏树脂是模拟岩石的最佳原材料; Aliabadian 等对 3D 打印裂隙岩体开展了巴西劈裂抗拉、单轴压缩和直口半圆弯拉试验并结合 DIC 技术研究了裂纹萌生过程^[14]。以上研究成果表明 3D 打印技术

可以重构复杂实体, 为制备裂隙岩体提供有效途径。

基于裂隙对岩体断裂韧性的影响尚不清晰, 本文采用高分子光敏树脂材料打印含不同预制裂隙角度的直切槽半圆盘弯曲 (notched semi-circle bend, NSCB) 试件, 对其开展静载三点弯曲试验, 研究不同倾角裂隙岩体断裂参数 (断裂韧性、断裂能、起裂角) 与裂纹扩展特征, 揭示外荷载作用下裂隙岩体断裂机制, 研究成果对于防止外荷载作用下岩体失稳破坏导致灾难事件的发生具有重要理论与实践意义。

1 试验

1.1 3D 打印原理与设置

试验采用 Ray shape 系列 Shape 1 HD 3D 打印机, 该打印机采用 DLP 面曝光 UV 固化 3D 打印技术。光固化 3D 打印技术的核心机理是光固化化学反应, 光敏树脂遇 405 nm 蓝光会发生光固化反应, 由液态瞬间变成固态。Shape Ware 3D 打印软件会将需要打印的 *.STL 文件处理成片层文件, 然后 DLP UV 光机再逐层投影该文件。

由于打印机通过分层、层层堆叠的方式制作样本, 层厚过薄会导致打印时长增加, 而过厚会影响到模型精度, 因而需对打印的层厚进行设定。通过测试, 本试验设置打印层厚 0.025 mm, 以减小层厚对于试验结果的影响, 具体打印原理如图 1 所示。

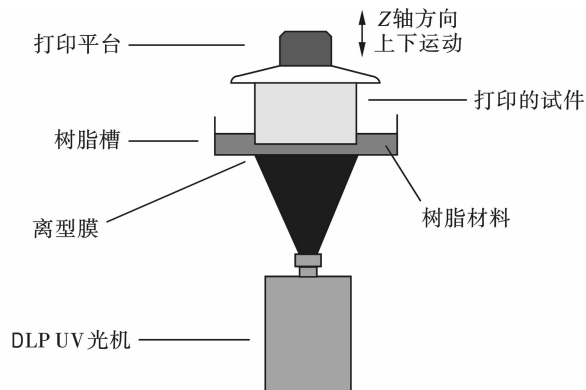


图 1 打印机原理图

Fig. 1 Schematic diagram of printer

依图 1 所示 3D 打印原理示意图,首先在树脂槽内盛放一定量的光敏树脂,点击开始打印后,打印平台降至树脂槽底部,然后 DLP UV 光机用 405 nm 蓝光投射出待打印文件的片层影像,该影像在树脂槽的底部成像并粘结在打印平台上;完成一层的固化后打印平台向上抬升固定高度,紧接着 DLP UV 光机投影固化下一层,如此循环往复将试件完整打印出来。在进行 3D 打印试件时需要注意:

(1) 倒入树脂前,需要检查离型膜是否有破损,槽内若有异物,及时清理。

(2) 在实际打印过程中,通常由于机器的原因造成第一层打印厚度高于其它层面,即底层 Z 轴的拉伸,从而引起整个模型变形。通过 Z 轴补偿可以消除这种影响。本次打印设置 Z 轴补偿为 0.4 mm。

(3) 打印平台通过树状支撑将试件连接起来。支撑过粗,导致支撑与试件难以分开,在清除支撑的过程中可能会损坏试件;支撑过细,会导致难以拉起整个试件,打印过程中试件脱落,从而导致打印失败。经过打印测试后,最终设置打印顶宽度 0.6 mm,顶球直径 0.6 mm(图 2 为树状支撑图,并标注出了顶球与顶宽位置)。

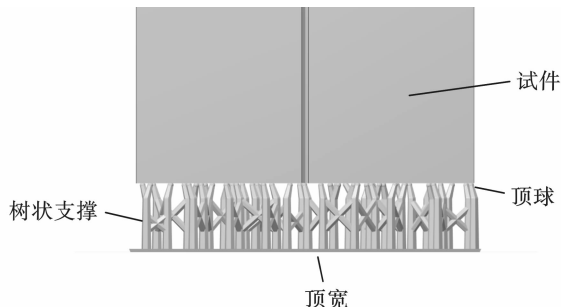


图 2 树状支撑图

Fig. 2 Tree support diagram

1.2 试件制备

试样制备过程如图 3 所示:(1)利用 sketch up 软件建立几何模型并导出*.STL 格式文件(2)在打印机自带软件 Shape Ware 输入*.STL 格式文件,进行支撑编辑、切片处理,并导出打印机可以识别的*.RS 文件。(3)选用 PJHC-10 透明色刚性树脂(用于模拟岩石脆性材料)加入料槽,插入 U 盘,启动打印机。(4)将打印完成的试件放入酒精中清理残留在表面的树脂,然后转入强紫外线光固化箱中旋转照射 20 min,最后用电动砂盘打磨机将试件支撑连接面打磨平整。(5)为提高试件透明度,磨平后的试件,最后放入烘箱进行烘焙(设定温度 70℃),烘烤 24 h 后试件由深棕色转变为透明色。

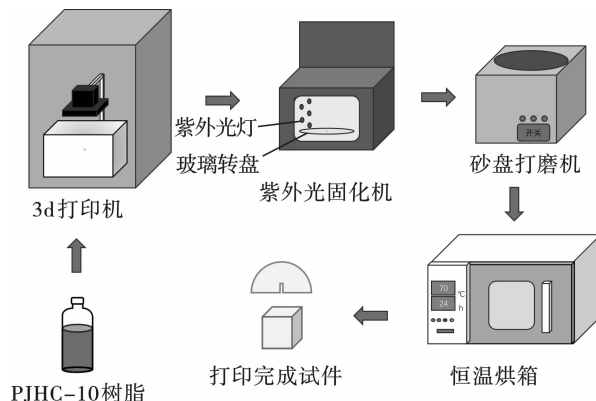


图 3 打印流程图

Fig. 3 Printing process

1.3 试件后处理

基于 1.2 小节试件制备方法流程,打印立方体(50 mm × 50 mm × 50 mm)试件进行单轴抗压试验,测试其应力-应变曲线如图 4(a)所示。通过图 4(a)可以看出,应力-应变曲线分为 3 个阶段:压密(OA)、弹性变形(AB)、塑性变形(BC),且塑性变形阶段的应变远大于压密与弹性变形阶段;在塑性变形(BC)段,试件逐渐趋于扁平状,内部储存能量急剧增大,但试件仍未产生裂隙。为防止试件突然爆裂飞出,在应力-应变曲线 C 点处对其进行卸载,卸载后试件仍能恢复部分变形。由此可见,压缩荷载下打印试件呈塑性变形,和岩石的脆性破坏特征不符,不能直接用于裂隙岩体断裂特性的试验研究。

由文献[15]可知,高分子材料在低温环境下会发生“脆化”现象,当温度降低到一定程度时,此时高分子材料由常规状态转变为玻璃化状态,发生转变的温度称为 T_g 。研究发现,玻璃材料的黏度可在相对较窄的温度范围内变化超过 15 个数量级。针对这一现象,Angell 引入了“脆性”指数 M 来表征材料动力学对温度依赖性的强弱^[16]

$$M = \left. \frac{\partial \log \tau}{\partial (T_g/T)} \right|_{T=T_g} \quad (1)$$

式中: τ 是结构松弛时间; T 为绝对温度。因此,在采用低温“增脆”方法时,需要找到该高分子打印原料的转变温度 T_g 。

参考田威等研究结果^[17],利用干冰对打印试件进行“增脆”处理。将试件用保鲜膜包裹后放入防爆干冰桶中,待其表面温度降至 -20℃、-30℃ 和 -40℃ 时分别开展单轴静态压缩试验。低温下试件应力-应变曲线如图 4(b)所示。试件处于 -20℃ 时,其压缩破裂形态相较于常温下的有所变化,虽然竖向压缩变形量依然较大,但此时试件表面开始出现压裂裂隙,由此表明温度降低可以使打印试件脆

性增强;在 -30°C 时,试件出现明显的脆裂裂纹,应力-应变曲线出现“塔尖”形状,这与齐振武等基于3D打印试件模拟岩石压缩破裂的结果较为接

近^[18];当温度降至 -40°C 时,此时打印试件内部因冰冻开始产生损伤,试件会发出噼里啪啦“响声”,并在压力机预加载阶段发生碎裂。

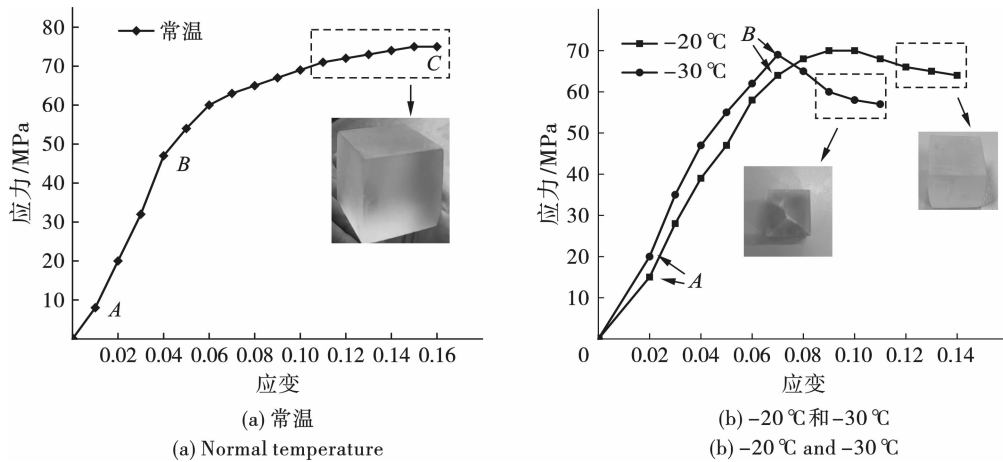


图4 不同温度下应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves at different temperatures

经过试验验证,最终确定打印试件的最佳冷冻温度为 -30°C ,其相应的物理力学参数如表1所示。

表1 固化光敏树脂静态物理力学性能

Table 1 Static physical and mechanical properties of photosensitive resin

波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	抗压强度/ MPa	弹性模量/ GPa
1315.8	1.204	75	1.353

1.4 NSCB 试验方案

采用如图5所示的试验装置,对NSCB模型试件进行静载三点弯曲试验。该试验装置包含:加载系统、摄像系统和数据记录系统,其中加载系统为中科院武汉岩土所研制的RMT-150B岩石压力机,试验采用负荷控制的加压方式,设置加载速率为 0.1 kN/s ;摄像系统由分辨率为5000万像素的Canon 5Dsr型相机,2台高功率LED灯构成,用来采集NSCB模型试件断裂过程图像。

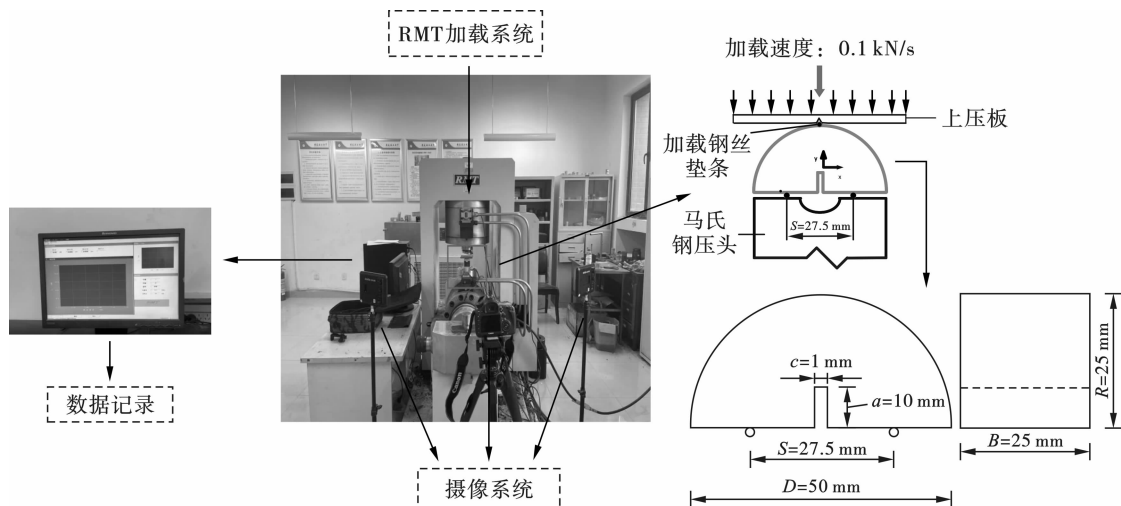


图5 加载装置图

Fig. 5 Test loading device

依据国际岩石力学学会(ISRM)要求设计直切槽半圆盘弯曲试件(NSCB)的几何尺寸^[19],其中预制切缝宽度 c 为1 mm,长度 a 为10 mm,支座距离 S

为27.5 mm,试件直径 D 为50 mm,厚度 B 为25 mm。

为探究不同倾角裂隙对岩石断裂特性的影响,

现设置 NSCB 试件上裂隙倾角 β 分别为 0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° 。裂隙位于预制切缝与半圆盘顶点的

中心点处,长度为 7.5 mm,宽度为 1 mm。如图 6 所示。

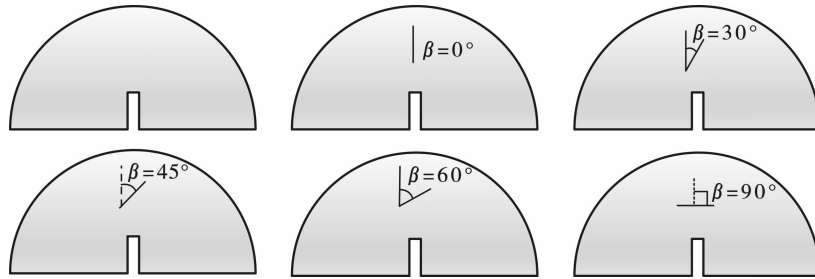


图 6 制备完成的试件

Fig. 6 Completed specimen

2 断裂特性分析

图 7 为不同倾角裂隙 NSCB 试件的荷载-位移曲线。

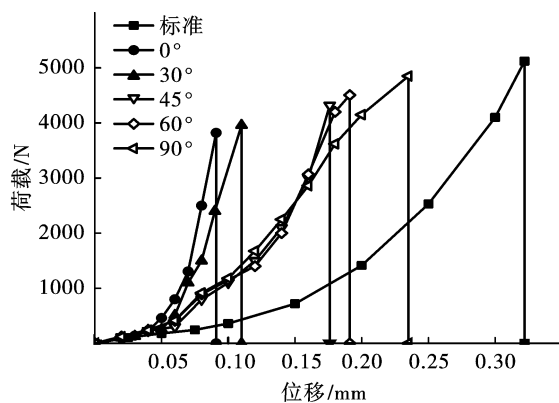


图 7 NSCB 试件荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curve of NSCB

从图 7 可知,NSCB 试件在达到断裂荷载后,曲线垂直跌落,并在试验中伴随着清脆的断裂声,材料表现出脆性破坏特征。含不同倾角裂隙 NSCB 试件的平均断裂荷载分别是 3750 N、3987 N、4260 N、4427 N、4707 N,平均峰值位移分别是 0.09 mm、0.11 mm、0.175 mm、0.19 mm、0.23 mm,显然断裂荷载与峰值位移均随着裂隙倾角的增大呈现出逐渐增大的趋势,此外,标准 NSCB 试件的平均断裂荷载为 4947 N,平均峰值位移为 0.32mm。NSCB 试件受载力学性能与其完整度、裂隙倾角密切相关,裂隙会降低 NSCB 试件的承载能力,且随着裂隙角度的减小削弱整体力学性能越多。

在岩石断裂力学中^[20],由 Griffith 理论可知,当预制裂纹尖端应力强度因子达到极限值时,裂纹将会快速扩展,直至扩展到加载端,此时临界应力强度因子即为断裂韧度。断裂韧度是表征裂纹抵抗扩展

能力的物理量,断裂韧度越大,试件抵抗开裂的能力越强。根据 ISRM 建议的方法^[21],NSCB 试样的断裂韧度 K_{IC} 计算公式为

$$K_{IC} = \frac{P \sqrt{\pi a}}{2RB} Y' \quad (2)$$

$$Y' = -4.9585 + 47.790\alpha_a - 107.69\alpha_a^2 + 101.21\alpha_a^3 \quad (3)$$

$$\alpha_a = a/R \quad (4)$$

式中: P 为试样破坏时的峰值加载值; Y' 为无量纲应力强度因子,与无量纲支撑间距有关; a_a 为无量纲的预制裂纹长度, $a_a = 0.4$;其它符号意义同前。

将 NSCB 试件的断裂荷载数据代入式 3 进行计算,得到 NSCB 试件断裂韧度如表 2 所示。

从表 2 中可以看出,标准 NSCB 试件平均断裂韧度为 $2.36 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$;而含有裂隙 NSCB 试件平均断裂韧度均小于标准 NSCB 试件,且随着裂隙倾角的增大,平均断裂韧度不断增加,其中平均断裂韧度最大值为 $2.27 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ($\beta = 90^\circ$)、最小值 $1.81 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ($\beta = 0^\circ$),由此可见裂隙倾角角度对于试件抵抗裂纹拓展的能力影响显著。

为进一步表征断裂韧度随裂隙倾角的变化规律,以表 2 中裂隙倾角为横坐标、平均断裂韧度值为纵坐标,将两者关系绘制于图 8 中。

从图 8 可以看出,含裂隙 NSCB 试件断裂韧度随裂隙倾角呈线性增大关系。通过对断裂韧度与裂隙倾角之间的关系进行拟合得到

$$K_{IC} = 0.0053\beta + 1.8$$

$$(R^2 = 0.97; 0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ) \quad (5)$$

式中: K_{IC} 表示断裂韧度; β 表示裂隙倾角。

3 裂纹扩展特征分析

3.1 裂纹尖端起裂角

起裂角可以反映裂纹扩展方向,预测裂纹扩展

路径,是揭示起裂机制的关键因素^[22]。现定义裂纹与预制裂隙延长线夹角为起裂角(如图 9 所示),笔者在使用 IMAGE J 测量裂纹长度时已经对裂纹进

行里提取,现测定起裂角度与预制裂隙 β 的关系及其拟合曲线如图 10 所示。

表 2 断裂韧性计算结果

Table 2 Calculation results of fracture toughness

试件编号	温度/°C	P_{\max}/kN	$K_{IC}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$	平均 $K_{IC}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$
DL-S-1	-31.1	5.02	2.42	
DL-S-2	-30.5	4.86	2.32	2.36
DL-S-3	-32.0	4.96	2.33	
DL-0°-1	-30.5	3.82	1.84	
DL-0°-2	-31.2	3.92	1.89	1.81
DL-0°-3	-30.8	3.51	1.70	
DL-30°-1	-31.3	3.96	1.90	
DL-30°-2	-30.3	4.12	1.99	1.92
DL-30°-3	-31.5	3.88	1.87	
DL-45°-1	-31.0	4.42	2.13	
DL-45°-2	-32.1	4.22	2.04	2.06
DL-45°-3	-31.1	4.14	2.00	
DL-60°-1	-30.1	4.32	2.09	
DL-60°-2	-30.4	4.44	2.14	2.14
DL-60°-3	-30.2	4.52	2.18	
DL-90°-1	-30.4	4.76	2.30	
DL-90°-2	-31.3	4.66	2.25	2.27
DL-90°-3	-30.6	4.70	2.27	

备注:S代表标准试件;DL-0°-1表示0°第一个平行试件。

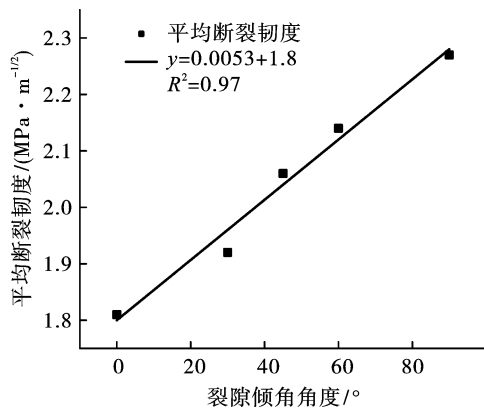


图 8 平均断裂韧度与裂隙倾角之间的关系

Fig. 8 Relationship between the average fracture toughness and angle

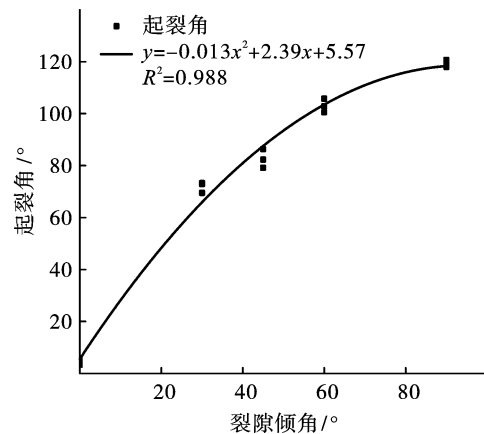


图 10 起裂角与裂隙倾角之间的关系

Fig. 10 Relationship between the crack initiation angle and the crack inclination angle

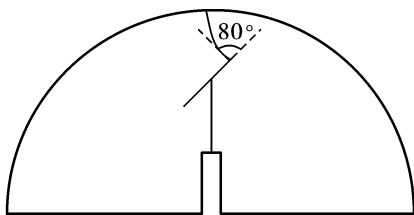


图 9 试件起裂角示意图

Fig. 9 Schematic diagram of crack initiation angle

起裂角随着预制裂隙倾角的增加而增加, $\beta = 0^\circ$ 时,起裂角趋于 0° ,介于 $3^\circ \sim 6^\circ$ 之间,当 $\beta = 90^\circ$ 时,起裂角在 $115^\circ \sim 120^\circ$ 之间,拟合曲线决定系数为 $R^2 = 0.988$,可以较准确地表征起裂角变化规律。 β 介于 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间时,起裂角随着预制裂隙倾角的增大而增大,将预制裂隙倾角作为横轴,起裂角作为纵轴进行拟合后可以得到

$$\sigma = -0.013\beta + 2.39\beta + 5.57$$

$$(R^2 = 0.988, 0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ) \quad (6)$$

式中: σ 表示起裂角; β 表示预制裂隙倾角角度。

3.2 裂纹拓展路径

就均质材料而言,NSCB试样的裂纹扩展过程受预制裂纹方向控制,扩展路径基本为直线,方向由裂尖指向加载点^[23]。对于含预制裂隙的NSCB试件,受裂隙角度的影响,裂纹拓展路径表现出明显的“偏折”现象。图11罗列了试件的最终破坏照片,并画出了受力模式,可以看出,当 $\beta = 0^\circ$ 时,裂纹从预制裂隙尖端处断裂,笔直通过预制裂纹,到达顶部加载点。当 $\beta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 时,试件均从预制裂隙尖端起裂,直线状态到达预制裂隙中点后,“绕过”预制裂隙,沿曲线向加载点拓展。

分析断裂后试件可知,之所以裂纹拓展至预制裂隙时发生“偏转”现象,是由于预制裂隙尖端处于高应力集中区,新的裂纹拓展一般都会发生在该区域^[20],而裂纹扩展过程是由无数新裂尖的起裂组成的,根据最大周向拉应力理论,脆性断裂裂纹在垂直于该力的平面内扩展,受预制裂隙角度影响,试样弹性对称轴发生变化,不同时刻新裂纹尖端的应力状态不同,使得最大周向拉应力发生改变,进而影响了裂纹的扩展方向。

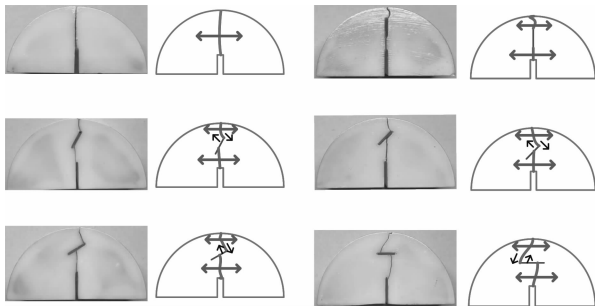


图11 试件破坏模式受力图

Fig. 11 Stress diagram of specimen failure mode

基于断裂力学理论、裂隙倾角对起裂角的影响规律以及试件破坏模式受力图,尝试解释2.2小节中断裂韧度随裂隙倾角增大的原因: NSCB试件在三点压缩荷载作用下,其内部产生横向拉伸应力,并在切缝尖端处形成应力集中,当应力超过材料所承受极限时,NSCB试件内部开始产生I型拉伸断裂,裂纹沿着切缝开始拓展一直延伸到预制裂隙中点处,此过程中裂纹始终呈I型扩展。在横向拉伸应

力的持续作用下,新生裂纹开始沿预制裂隙的应力集中点(距离顶点较近的一端)开始拓展,此时受预制裂隙角度的影响,作用在裂纹尖端处的拉伸应力随着裂隙角度的增大而减小,导致试件越不容易发生断裂,也即断裂韧度就会增大。

4 断裂能分析

试样承受拉伸载荷,裂缝扩展单位面积所需要的能量,即断裂能,系统弹性应变能的释放是促使裂纹扩展的动力,假设外部载荷所做的功全部用于形成新的断裂面,基于试验中记录加载点的荷载-位移曲线求解断裂能。断裂能计算公式如下

$$G_f = \frac{W + mg\delta}{A} \quad (7)$$

$$W = \int_0^\delta P d\delta \quad (8)$$

式中: G_f 为断裂能; W 为外荷载所做的功; m 为试件质量; g 为重力加速度; δ 为试样断裂破坏位移; P 为荷载; A 为断裂面面积; B 为试样厚度。

计算断裂面面积 A 时,可用IMAGE J图像分析软件对长度 L 进行测量, $A = L \times B$ 。外荷载所做的功 W 为荷载-位移曲线(图7)下方阴影面积,可以通过对其积分得到。 $mg\delta$ 是断裂过程中试样自重做的功,这里直切槽半圆盘弯曲试件质量较小,自重做功可以不予考虑。

依据公式9计算得到三点弯曲试验中NSCB试件扩展裂纹所需断裂能,如表3所示。

由表3可知,标准NSCB试件断裂能最大,由于其无预制裂隙,断裂韧度较大,试件抵抗开裂破坏能力较强,裂纹拓展阻力较大,因此断裂破坏过程中所消耗的断裂能也相对较大。对于含裂隙NSCB试件,断裂能随着预制裂隙角度的增大而增大。

根据龚江宏的研究裂纹的拓展应导致系统的总能量最低^[24],为了使系统的总能量最低,裂纹在材料中倾向于沿能量释放率 G 最大方向扩展。能量释放率与裂纹起裂角度 θ 或 φ 的关系可以用下图12描述。可以发现在起裂角度为 0° 时,能量释放率最大,裂纹沿偏离原平面的任何方向扩展都会导致能量释放率的降低。

在3.1小节的分析已经得出:预制裂隙角度的增大会导致裂纹拓展路径起裂角度的增大。在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内,裂纹扩展偏离原扩展平面的角度(起裂角度)越大,能量释放率越低,这一现象在断裂试验

中表现为表观断裂能的增加。

表 3 断裂能计算

Table 3 Calculation of fracture energy

试件编号	宏观裂纹倾角/ $^{\circ}$	断裂面面积/ mm^2	断裂能/ $(\text{J} \cdot \text{mm}^{-2})$	平均断裂能/ $(\text{J} \cdot \text{mm}^{-2})$
DL-S-1	无	406.600	2.07	
DL-S-2	无	384.125	2.14	2.11
DL-S-3	无	391.450	2.12	
DL-0 $^{\circ}$ -1	0 $^{\circ}$	208.750	1.27	
DL-0 $^{\circ}$ -2	0 $^{\circ}$	217.100	1.22	1.24
DL-0 $^{\circ}$ -3	0 $^{\circ}$	208.125	1.23	
DL-30 $^{\circ}$ -1	30 $^{\circ}$	264.575	1.39	
DL-30 $^{\circ}$ -2	30 $^{\circ}$	253.000	1.46	1.43
DL-30 $^{\circ}$ -3	30 $^{\circ}$	255.790	1.44	
DL-45 $^{\circ}$ -1	45 $^{\circ}$	314.375	1.58	
DL-45 $^{\circ}$ -2	45 $^{\circ}$	303.320	1.63	1.60
DL-45 $^{\circ}$ -3	45 $^{\circ}$	326.854	1.59	
DL-60 $^{\circ}$ -1	60 $^{\circ}$	327.375	1.74	
DL-60 $^{\circ}$ -2	60 $^{\circ}$	320.560	1.79	1.76
DL-60 $^{\circ}$ -3	60 $^{\circ}$	330.550	1.75	
DL-90 $^{\circ}$ -1	90 $^{\circ}$	414.325	1.98	
DL-90 $^{\circ}$ -2	90 $^{\circ}$	409.454	2.03	2.01
DL-90 $^{\circ}$ -2	90 $^{\circ}$	410.250	2.02	

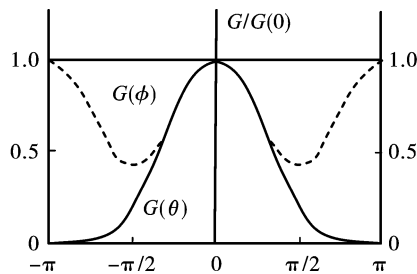


图 12 裂纹扩展能量释放率与起裂角关系图

Fig. 12 Relationship between energy release rate during crack propagation and crack initiation angle

5 结论

本研究基于 DLP 面曝光 UV 固化 3D 打印技术制备 NSCB 试件,同时利用干冰对打印试件进行“增脆”处理用于裂隙岩体断裂特性的试验,探究不同倾角裂隙对岩石断裂特性的影响,研究结论如下:

(1)由断裂荷载-位移曲线和断韧度计算结果得到,NSCB 试件受载力学性能与其完整度、裂隙倾角密切相关,裂隙会降低 NSCB 试件的承载能力,且随着裂隙角度的减小削弱整体力学性能越多,其中承载力最大值($\beta = 90^{\circ}$)是最小值($\beta = 0^{\circ}$)的 1.26 倍;含有裂隙 NSCB 试件平均断裂韧度均小于标准 NSCB 试件,断裂韧度与裂隙倾角之间的拟合呈线

性函数关系。

(2)基于 NSCB 试件裂纹尖端起裂角、拓展路径以及裂纹分形维数对其扩展特征分析,宏观预制裂隙角度对于 NSCB 试件拓展路径复杂程度存在显著影响。在 β 介于 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 之间时,起裂角随着预制裂隙角度的增大而增大;标准 NSCB 试样的裂纹扩展路径基本为直线,方向由裂尖指向加载点;对于带宏观裂纹的 NSCB 试件,裂纹拓展路径则表现出明显的“偏折”现象。

(3)从断裂破坏的能量角度分析,标准 NSCB 试件断裂能最大,而对于含裂隙 NSCB 试件,断裂能随着预制裂隙角度的增大而增大。预制裂隙角度的增大会导致裂纹拓展路径起裂角度的增大,而在 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 范围内,裂纹扩展偏离原扩展平面的角度(起裂角度)越大,能量释放率越低,这一现象在断裂试验中表现为表观断裂能的增加。

参考文献 (References)

- [1] 范天佑. 断裂动力学原理与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2006.
- [2] DING C, YANG R, CHEN C, et al. Space-time effect of blasting stress wave and blasting gas on rock fracture based on a cavity charge structure[J]. Int J Rock Mech

- Min Sci,2022,160:105238
- [3] 龚爽,赵毅鑫,王震,等.层理对煤岩动态裂纹扩展分形特征的影响[J].煤炭学报,2021,46(8):2574-2582.
- [3] GONG Shuang,ZHAO Yi-xin,WANG Zhen,et al. Effect of bedding on fractal characteristics of dynamic crack propagation in coal and rock[J]. Journal of China Coal Society,2021,46(8):2574-2582. (in Chinese)
- [4] 赵子江,刘大安,崔振东,等.半圆盘三点弯曲法测定页岩断裂韧度(KIC)的实验研究[J].岩土力学,2018,39(增1):258-266.
- [4] ZHAO Zi-jiang,LIU Da-an,CUI Zhen-dong,et al. Experimental study of determining fracture toughness KIC of shale by semi-disk three-point bending[J]. Rock and Soil Mechanics,2018,39(S1):258-266. (in Chinese)
- [5] 赵文峰,张盛,王猛,等.用两种ISRM推荐圆盘试样测试岩石断裂韧度的试验研究[J].实验力学,2020,35(4):702-711.
- [5] ZHAO Wen-feng,ZHANG Sheng,WANG Meng,et al. Experimental study on testing rock fracture toughness with two types of disc specimens recommended by ISRM[J]. Journal of Experimental Mechanics,2020,35(4):702-711. (in Chinese)
- [6] WANG Q,FENG F,NI M,et al. Measurement of mode I and mode II rock dynamic fracture toughness with cracked straight through flattened Brazilian disc impacted by split Hopkinson pressure bar[J]. Engineering Fracture Mechanics,2011,78(12):2455-2468.
- [7] GAO G,HUANG S,XIA K,et al. Application of digital image correlation(DIC) in dynamic notched semi-circular bend(NSCB) tests[J]. Experimental Mechanics,2015,55(1):95-104.
- [8] 赵毅鑫,孙莊,刘斌.忻州窑烟煤I型和II型断裂特性的半圆弯曲试验对比研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(8):1593-1604.
- [8] ZHAO Yi-xin,SUN Zhuang,LIU Bin. Comparative study of semi-circular bending tests for modes I and II fracture characteristics of Xinzhouyao bituminous coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2019,38(8):1593-1604. (in Chinese)
- [9] 李银平,王元汉,陈龙珠,等.含预制裂纹大理岩的压剪试验分析[J].岩土工程学报,2004,26(1):120
- [9] LI Yin-ping,WANG Yuan-han,CHEN Long-zhu,et al. Experimental research on pre-existing cracks in marble under compression[J]. Chin J Geotech Eng,2004,26(1):120(in Chinese)
- [10] 宋选民,顾铁凤,柳崇伟.受贯通裂隙控制岩体巷道稳定性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(12):1781
- [10] SONG Xuan-min,GU Tie-feng,LIU Cong-wei. Experimental study on roadway stability in rockmass with connected fissures[J]. Chin J Rock Mech Eng,2002,21(12):1781(in Chinese)
- [11] 杨圣奇,渠涛,韩立军,等.注浆锚固裂隙砂岩破裂模式和裂纹扩展特征[J].工程力学,2010,27(12):156.
- [11] YANG Sheng-qi,QU Tao,HAN Li-jun,et al. Failure mode and crack propagation of sandstone with pre-existing fissures under different anchorages by grouting[J]. Eng Mech,2010,27(12):156(in Chinese)
- [12] 王乐华,胡永搏,付寅韬,等.3D打印技术在岩石力学试验中的应用与展望[J].土木工程学报,2023,56(11):137-154.
- [12] WANG Le-hua,HU Yong-bo,FU Yin-tao,et al. Application and prospect of 3D printing technology in rock mechanics tests[J]. Journal of Civil Engineering,2023,56(11):137-154. (in Chinese)
- [13] ZHOU T,ZHU J. Identification of a suitable 3D printing material for mimicking brittle and hard rocks and its brittleness enhancements[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2018,51(3):765-777.
- [14] ALIABADIAN Z,SHARAFISAFI M,TAHMASEBINIA F,et al. Experimental and numerical investigations on crack development in 3D printed rock-like specimens with pre-existing flaws[J]. Engineering Fracture Mechanics,2021,241:107396.
- [15] 袁琦璐,杨镇岳,徐文生.高分子玻璃化熵理论研究进展[J].中国科学:化学,2023,53(4):616-627.
- [15] YUAN Qi-lu,YANG Zhen-yue,XU Wen-sheng. Research progress in the theory of glass transition entropy of polymers[J]. Chinese Science: Chemistry,2023,53(4):616-627. (in Chinese)
- [16] ANGELL C A. Formation of glasses from liquids and biopolymers[J]. Science,1995,267:1924-1935. DOI:10.1126/science.267.5206.1924.
- [17] 田威,王肖辉,云伟,等.基于不同后处理方法的砂型3D打印类岩石试样力学性能研究[J].岩土力学,2023,44(5):1330-1340,1352.
- [17] TIAN Wei,WANG Xiao-hui,YUN Wei,et al. Research on the mechanical properties of sand 3D printed rock specimens based on different post-processing methods[J]. Geotechnical Mechanics,2023,44(5):1330-1340,1352(in Chinese)
- [18] 齐振武,王培涛,张博,等.基于3D打印的类节理岩体模型及力学特性试验研究[J/OL].煤炭学报,1-8. [2024-05-06]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2022.1544>.
- [18] QI Zhen-wu,WANG Pei-tao,ZHANG Bo,et al. Experimental study on 3D printed jointed rock mass model and mechanical properties[J/OL]. Journal of Coal Science: 1-8. [2024-01-04]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2022.1544>. (in Chinese)

- [19] KURUPPU M D, CHONG K P. Fracture toughness testing of brittle materials using semi-circular bend (SCB) specimen [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2012, 91:133-150.
- [20] 丁遂栋, 孙利民. 断裂力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997:106-107.
- [21] KURUPPU M D, OBARA Y, AYATOLLAHI M R, et al. ISRM-suggested method for determining the mode I static fracture toughness using semi-circular bend specimen [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(1):267-274.
- [22] 高 玮, 崔 爽, 肖 婷, 等. 基于最小塑性区半径准则的岩石裂纹起裂规律 [J]. *煤炭学报*, 2021, 46(10):3193-3202.
- [22] GAO Wei, CUI Shuang, XIAO Ting, et al. Crack initiation of rock based on the minimum plastic zone radius criterion [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(10):3193-3202. (in Chinese)
- [23] ALIHA M R M, AYATOLLAHI M R, SMITH D J, et al. Geometry and size effects on fracture trajectory in a limestone rock under mixed mode loading [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2010, 77(11):2200-2212.
- [24] 龚江宏. 陶瓷断裂力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.

(上接第 24 页)

- [12] 章征林, 王 源, 孙阳阳, 等. FBG 应变测试技术在混凝土内爆炸试验中的应用 [J]. *压电与声光*, 2017, 39(2):281-283, 288.
- [12] ZHANG Zheng-lin, WANG Yuan, SUN Yang-yang, et al. Application of FBG strain measuring technique to the concrete inward detonation test [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2017, 39(2):281-283, 288. (in Chinese)
- [13] 黄家蓉, 刘光昆, 吴 飏, 等. 爆炸冲击作用下混凝土中动态应力波测试与仿真 [J]. *防护工程*, 2020, 42(4):23-28.
- [13] HUANG Jia-rong, LIU Guang-kun, WU Biao, et al. Testing and simulation of dynamic stress wave in concrete under explosion and impact [J]. *Protective Engineering*, 2020, 42(4):23-28. (in Chinese)
- [14] KONG X, FANG Q, CHEN L, et al. A new material model for concrete subjected to intense dynamic loadings [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018(120):60-78.
- [15] 刘 鑫, 兰 涛, 秦广冲, 等. 地应力对混凝土材料中爆炸应力波传播影响规律研究 [J]. *爆破*, 2023, 40(3):151-157, 205.
- [15] LIU Xin, LAN Tao, QIN Guang-chong, et al. Study on influence of in situ stress on propagation of explosion stress wave in concrete [J]. *Blasting*, 2023, 40(3):151-157, 205. (in Chinese)
- [16] 王志斌, 杨立云, 钱桂安, 等. 混凝土抗拉与抗压强度尺寸效应统计模型 [J]. *矿业科学学报*, 2022, 7(2):193-199.
- [16] WANG Zhi-bin, YANG Li-yun, QIAN Gui-an, et al. A statistical model of size effect on concrete tensile and compressive strength [J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 7(2):193-199. (in Chinese)
- [17] WANG Y, KONG X, FANG Q, et al. Modelling damage mechanisms of concrete under high confinement pressure [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2021(150):103815.
- [18] YANG S, KONG X, WU H, et al. Constitutive modelling of UHPCC material under impact and blast loadings [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2021(153):103860.
- [19] 侯福金, 李术才, 管晓明, 等. 隧道爆破荷载作用下中隔壁动力响应与破坏机理研究 [J]. *中国公路学报*, 2019, 32(3):109-117
- [19] HOU Fu-jin, LI Shu-cai, GUAN Xiao-ming, et al. Dynamic response and destruction mechanism of center diaphragm support wall under tunnel blasting [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(3):109-117. (in Chinese)
- [20] 赵 凯, 王肖钧, 卞 梁, 等. 混凝土介质中不同药形装药爆炸波传播特性的数值模拟 [J]. *中国科学技术大学学报*, 2007(7):711-716.
- [20] ZHAO Kai, WANG Xiao-jun, BIAN Liao, et al. Numerical study on the propagation and damage behavior of the blasting wave with differently shaped explosives in concrete [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2007(7):711-716. (in Chinese)
- [21] 董永香, 夏昌敬, 段祝平. 平面爆炸波在半无限混凝土介质中传播与衰减特性的数值分析 [J]. *工程力学*, 2006(2):60-65.
- [21] DONG Yong-xiang, XIA Chang-jing, DUAN Zhu-ping. Numerical analysis of plane explosive wave propagation with its attenuation behavior in semi-infinite medium [J]. *Engineering Mechanics*, 2006(2):60-65. (in Chinese)
- [22] 郝海明, 赵光明, 孟祥瑞. 爆破对不同龄期混凝土喷层破坏的数值分析 [J]. *地下空间与工程学报*, 2013, 9(1):173-178.
- [22] HAO Hai-ming, ZHAO Guang-ming, MENG Xiang-rui. Numerical analysis of blasting on the rupture of concrete spray layer at different ages [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2013, 9(1):173-178. (in Chinese)