

内置裂隙几何特征对 类岩试样力学特性影响试验研究

蒋力帅, 吴琦, 高明涛, 杨一鸣, 吴朝磊, 李皓哲

(山东科技大学 露天煤矿灾害防治与生态保护全国重点实验室, 山东 青岛 266590)

摘要:深部巷道围岩力学性质软弱, 赋存大量尺寸不一、形态复杂的内置裂隙, 严重影响着围岩的力学性质。为探究内置裂隙的开度、直径及形状对岩体强度破坏特性的影响, 利用砂型3D打印技术制备了含不同几何特征内置裂隙的类岩试样, 对其开展单轴压缩试验, 并结合声发射监测技术, 对比分析不同几何特征下类岩试样的响应规律。研究结果表明:内置裂隙可显著改变试样强度、破坏特性及声发射特性;裂隙直径对单轴抗压强度影响最显著, 裂隙直径大的试样强度低于裂隙直径小的试样;裂隙形状与裂隙直径对破坏特性影响明显, 直径40 mm矩形裂隙试样会出现一段应力“平台期”, 且该阶段内振铃计数水平持续较高。

关键词:内置裂隙; 砂型3D打印; 裂隙几何特征; 强度破坏特性; 声发射特性

中图分类号: TU45

文献标志码: A

Experimental study on influence of internal crack geometrical features on mechanical properties of rock-like specimens

JIANG Lishuai, WU Qi, GAO Mingtao, YANG Yiming, WU Chaolei, LI Haozhe

(State Key Laboratory of Disaster Prevention and Ecology Protection in Open-pit Coal Mines,
Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: The mechanical properties of the surrounding rock in deep roadway are weak, and there are a large number of internal cracks of different sizes and complex shapes, which seriously affect the mechanical properties of the surrounding rock. To explore the influence of the opening, diameter and shape of internal cracks on the strength and failure characteristics of rock mass, this study first prepared rock-like specimens containing internal cracks with different geometrical features by using sand 3D printing technology. It then carried out uniaxial compression tests on the specimens and made comparative analyses of the response laws of rock-like specimens under different geometrical features by combining with acoustic emission monitoring technology. The results show that internal cracks can significantly change the strength, failure characteristics and acoustic emission characteristics of the specimens. The crack diameter has the most significant effect on uniaxial compressive strength, and the strength of large-diameter crack specimens are lower than that of small-diameter crack specimens. The crack shape and crack diameter have obvious influence on the failure characteristics. The 40 mm diameter rectangular crack specimens have a “plateau period” and the ringing count level in this stage is continuously high.

Key words: internal crack; sand 3D printing; crack geometrical features; strength and failure characteristics; acoustic emission characteristics

收稿日期: 2025-02-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(52474103); 山东省自然科学基金重大基础研究项目(ZR2024ZD22); 山东省自然科学基金项目(ZR2024ME031)

作者简介: 蒋力帅(1989—), 男, 江苏南通人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为矿山岩体力学与围岩控制。

E-mail: lsjiang@sdust.edu.cn

高明涛(2001—), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要研究方向为矿山岩体力学与围岩控制, 本文通信作者。

E-mail: gmt15954072022@163.com

我国煤炭资源开采现已进入深部开采阶段,深部地下工程规模逐年增加,深部复杂的地质力学环境给资源安全高效开采带来严峻挑战^[1-2]。受煤系地层沉积作用影响,巷道围岩中煤、泥岩、砂岩等常见岩石力学性质软弱、节理裂隙等结构缺陷广泛发育^[3]。围岩裂隙在深部高地应力环境下极易扩展,使岩体力学性质进一步劣化导致工程失稳灾害发生^[4]。煤岩体内部结构缺陷尺寸不一、形态复杂等结构缺陷与煤岩体的力学性质、破坏模式密切相关,显著影响巷道围岩的稳定性^[5]。因此,针对深部煤矿巷道围岩裂隙发育,探究裂隙煤岩体的劣化效应对于厘清围岩破坏机理具有重要意义。

从工程现场对煤岩体钻芯取样,利用计算机断层扫描(computed tomography,CT)技术可以观察到,表面看似完整的样品内部存在尺寸不一、形态复杂的孔洞、裂隙等缺陷结构,内置裂隙广泛分布于天然岩体中^[6-8]。内置裂隙的发育演化模式与贯穿裂隙差异较大且更加复杂,其扩展和贯通与岩体灾变失稳有着密切联系,是影响岩体力学特性的关键因素^[9-11]。李术才等^[12]对内含币状裂纹试样进行加载,并利用CT技术实时扫描,获得了内置裂隙随荷载增加扩展的全过程;Shi等^[13]对内含裂隙试样进行单轴压缩测试,研究了裂隙倾角、面积、摩擦系数等对力学特性和裂隙扩展的影响;Han等^[8]研究了动载冲击下内置裂隙的扩展规律;Jiang等^[14]基于真实岩样CT结果,制备了内含随机裂隙网的类岩试样,探究了不同裂隙密度对岩样力学和变形特征的影响。围绕内赋裂隙岩体,学者们开展大量力学试验研究,但同时考虑裂隙开度、直径及形状等因素的却鲜有报道,对于内置裂隙试验研究有待进一步探索和补充。

内置裂隙与岩样表面不贯通,仅通过切割无法形成,传统的内置裂隙试样制备方法主要包括胶合法^[15]、埋片浇筑法^[16-17],但胶合法由于胶合面存在会破坏试样的完整性,埋片法会造成试样内部出现多余线状缺陷。近年来3D打印作为一种新兴制造技术,为岩体力学试验研究提供了制备试样的新方法。Yu等^[18]研究表明砂型3D打印材料具有与天然岩石相似的性能,包括脆性特征、表面粗糙度、微观结构特征和裂纹扩展模式。基于大量相关试验研究,将3D打印技术应用于岩石力学领域得到学术界的充分认可^[19-21]。3D打印具有制造效率高、制造精度高、同批次重复制造试样力学性质稳定等优点,相比于原岩加工,3D打印制备的类岩试样不但具有更好的均质性^[10],而且一次成型工艺可避免二次加工损坏岩样的问题。此外,其增材制造特性突破了传统试样制备方法的局限,能够在不破坏试样连续性的前提下在试样内部形成裂隙结构。

基于此,本研究借助砂型3D打印技术,制备含内置裂隙类岩试样,开展单轴压缩试验,并结合声发射监测技术,研究内置裂隙对砂型3D打印试样的力学特性响应,探究裂隙的开度、直径及形状等几何特征对成型试样强度、破坏特性和声发射特性的影响规律,分析其内在机理;依据试验结果分析各因素对强度的定量关联度,厘清影响试样强度的主控因素;结合破坏形态及声发射结果分析内置裂隙的扩展路径和破坏过程。研究结果可反映内置裂隙不同几何特征对岩体强度、破坏特性及声发射特性的影响规律,也可在一定程度上证明砂型3D打印技术应用于内置裂隙研究的合理性,为采用砂型3D打印技术开展复杂内置裂隙岩体力学研究提供参考。

1 含内置裂隙类岩试样制备及试验设计

1.1 含内置裂隙类岩试样3D打印制备

本次试验采用微滴喷射砂型3D打印技术制备类岩试样,使用Easy-3DP-S450 3D打印机。研究^[22-23]表明,采用不同类型基质材料和胶结剂饱和度,成型试样力学特性或声发射特性会有显著差异,且不同成型方向(沿长边成型或沿短边成型)制备的试样强度和破坏形态也存在差异。经过对比、筛选^[22-24],最终确定打印参数为:以70~140目硅砂(粒径0.109~0.212 mm)为基质材料,按照6%质量比称取固化剂与硅砂混匀;以呋喃树脂为胶结剂,按照胶结剂100%饱和度、沿长边成型打印;设置打印层厚为0.2 mm,打印精度默认为0.2 mm。此外,为避免固化剂与空气接触氧化,在与砂粉混匀后立即填充送料缸执行打印操作,试样取出后室内静置养护7 d以上以保证力学性质稳定。打印及试件养护过程均在常温、湿度65%左右进行。

1.2 试验设计与加载方案

以往学者进行内置裂隙研究时,通常将其简化为圆盘形状,本研究沿用前人圆盘形式设计内置裂隙。为观察到裂隙完整的扩展形式^[16-17],选用尺寸为 75 mm×75 mm×150 mm 的长方体试样,对试样端部进行打磨,确保其不平整度和不垂直度小于 0.02 mm。为探究裂隙不同几何特征对岩体力学特性影响,设计了裂隙开度、直径及形状 3 个因素,如图 1(a)所示。其中,直径 D 设 20、40 mm 2 个水平,开度 H 设 0.5、1.0、1.5、2.0、4.0 mm 5 个水平;裂隙形状为从侧面观察到的纵向形状,用 S 表示,设矩形与梭形两个水平。裂隙倾角统一设置为 45°,均位于试样几何中心。裂隙具体参数如表 1 所示,共 15 种含不同几何特征裂隙试样,每种试样制备 2 个,共制作 30 个,其中编号 WZ 为空白对照试样,无内置裂隙。制备完成试样如图 1(c)所示。

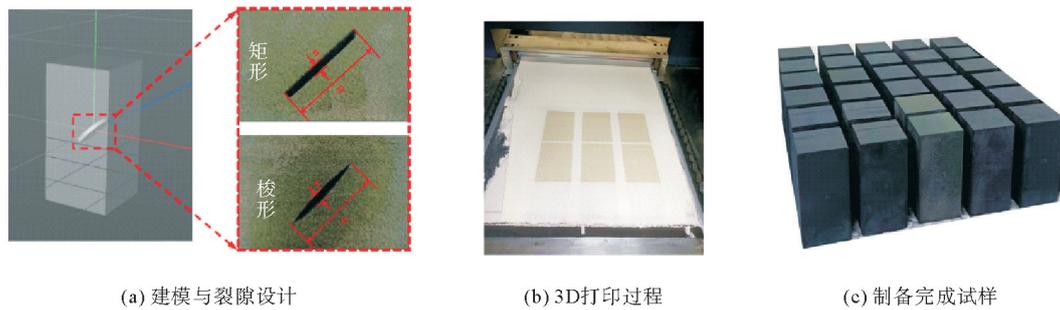


图 1 试样设计与制备

Fig. 1 Design and preparation of specimens

表 1 试验方案

Table 1 Experimental scheme

序号	试样编号	直径 D	开度 H	形状 S	序号	试样编号	直径 D	开度 H	形状 S
1	WZ	—	—	—	9	D2H1S1	40	0.5	矩形
2	D1H1S1	20	0.5	矩形	10	D2H2S1	40	1.0	矩形
3	D1H2S1	20	1.0	矩形	11	D2H3S1	40	1.5	矩形
4	D1H3S1	20	1.5	矩形	12	D2H4S1	40	2.0	矩形
5	D1H4S1	20	2.0	矩形	13	D2H5S1	40	4.0	矩形
6	D1H5S1	20	4.0	矩形	14	D2H4S2	40	2.0	梭形
7	D1H4S2	20	2.0	梭形	15	D2H5S2	40	4.0	梭形
8	D1H5S2	20	4.0	梭形					

试验在山东科技大学露天煤矿灾害防治与生态保护全国重点实验室进行,使用 RLJW-2000 型微机控制岩石伺服试验系统对砂型 3D 打印裂隙试样进行单轴压缩力学测试,采用位移控制方式加载,加载速度为 0.3 mm/min。加载过程中使用 Micro-II 型声发射动态数据采集系统收集声发射数据,该系统使用两个通道采集声发射信号。为消除加载机头与试样面摩擦及环境噪声影响,设置系统总增益为 34 dB(前方增益为 34 dB,前放电压为 28 V),阈值设为 40 dB,采样频率设为 5 MSPS。试验前在声发射探头端面涂抹凡士林作为耦合剂,并用胶带固定使其紧贴试验机下侧压头侧面,如图 2 所示。

2 裂隙几何特征对单轴抗压强度影响分析

根据试验得到的荷载数据,选取峰值荷载除以试样底面积得到每个试样的单轴抗压强度,对于同一组的 2 个试样取平均值,汇总后分别绘制不同裂隙开度、直径、形状的试样单轴抗压强度统计图,据此分析裂隙几何特征对强度的影响规律及其原因。



图 2 单轴压缩试验与声发射监测系统

Fig. 2 Uniaxial compression test and acoustic emission monitoring system

2.1 裂隙开度对单轴抗压强度影响分析

试样单轴抗压强度随裂隙开度 H 变化曲线如图 3(a)所示。由图 3(a)可见,裂隙直径 $D=20$ mm 时,单轴抗压强度随开度增加呈现先降低再小幅升高后小幅降低的趋势,且 $H \leq 1.5$ mm 时,单轴抗压强度与开度呈负相关。其中, $H=0.5$ mm 时单轴抗压强度最大,为 22.48 MPa; $H=1.5$ mm 时单轴抗压强度最小,为 21.70 MPa。裂隙直径 $D=40$ mm 时,单轴抗压强度随开度的增加也呈现先降低再小幅升高后小幅降低的趋势,且 $H \leq 1.5$ mm 时也满足单轴抗压强度与开度呈负相关,变化规律与直径 $D=20$ mm 时类似。开度 $H=0.5$ mm 时单轴抗压强度最大为 22.21 MPa,开度 $H=1.5$ mm 时单轴抗压强度最小为 18.46 MPa。在两种直径条件下,开度 $H \geq 1.5$ mm 时试样强度随开度变化均不明显。

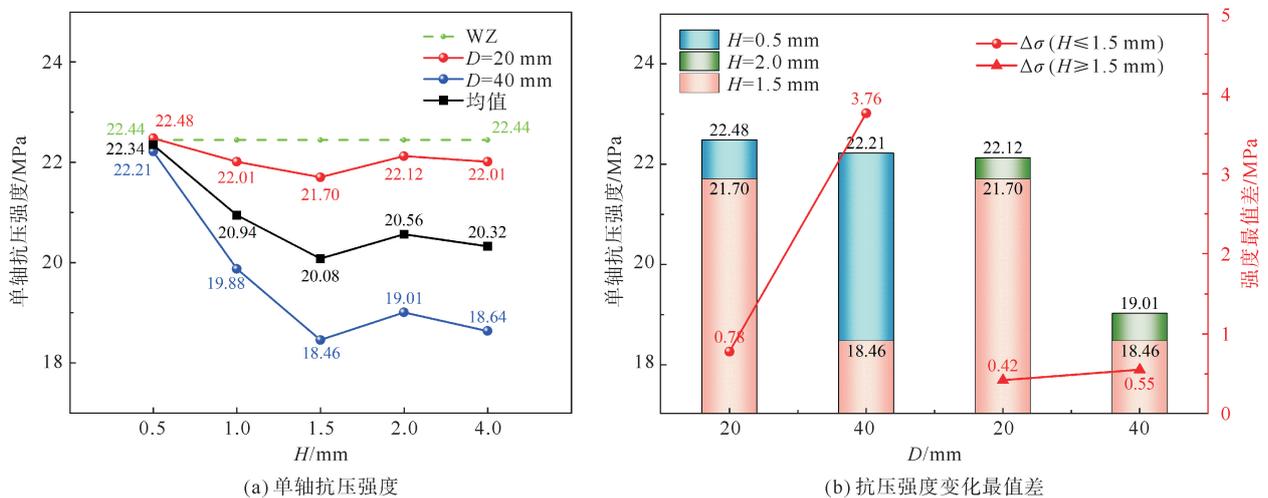


图 3 H 对单轴抗压强度影响

Fig. 3 Effect of H on uniaxial compressive strength

使用开度影响下强度变化的最值差(最大值-最小值)来表征该变量对于抗压强度的影响程度,因强度随开度变化可划分为变化显著阶段($H \leq 1.5$ mm)和变化不明显阶段($H \geq 1.5$ mm),故分别计算开度 $H \leq 1.5$ mm 和 $H \geq 1.5$ mm 两种情况下的最值差,以此表征不同阶段开度对于强度的影响程度,见图 3(b)。由图 3(b)可见,开度 $H \leq 1.5$ mm 时,开度对强度的影响程度分别为 0.78 MPa($D=20$ mm)、3.76 MPa($D=40$ mm),平均 2.27 MPa;开度 $H \geq 1.5$ mm 时,开度对强度的影响程度分别为 0.42 MPa($D=20$ mm)、0.55 MPa($D=40$ mm),平均 0.49 MPa。

在两种裂隙直径条件下,开度从 0.5 mm 增至 1.5 mm 过程中,单轴抗压强度与开度均呈负相关,这种现象可能与胶结剂渗流有关。打印过程中,喷头每次喷滴胶结剂至砂粉时,胶结剂由于浓度差会在砂粉一定范围内产生渗流扩散作用,加之打印过程中两个层面之间不可避免在裂隙中存留砂粉,因而在打印开度小于 1.5 mm 的裂隙时,裂隙上下面之间会产生一定的黏结作用,且开度越小,黏结作用越强。为详细说明此过程,绘制胶结剂渗流模型,如图 4 所示。已知每层铺砂厚度为 0.2 mm,斜线填充区域为每层胶结剂喷滴区,虚线包裹区为喷滴区渗流扩散影响区域,假定扩散影响范围为 0.4 mm。受影响层未喷滴区受上下喷滴区扩散作用影响形成扩散叠加区,叠加区叠加层数越高,胶结剂浓度越高,则该叠加区黏结强度越大。本研究规定叠加层数大于等于 5 形成强黏结区,叠加层数小于等于 4 形成弱黏结区。由图 5 可见,不同开度下受影响层未喷滴区均形成叠加区。开度 $H=0.5$ mm 时,受影响层未喷滴区均为叠加区且均为强黏结区(叠加层数 6~8),认为裂隙无有效宽度;开度 $H=1.0$ mm 时,受影响层未喷滴区均为叠加区,弱黏结区宽度为 0.29 mm 左右,认为裂隙有效宽度即为弱黏结区宽度;开度 $H \geq 1.5$ mm 时,受影响层未喷滴区部分形成零叠加区,此部分为无黏结强度区,通过模型观察到无黏结强度区宽度约为 0.28 mm,此时裂隙有效宽度为无黏结强度区宽度。

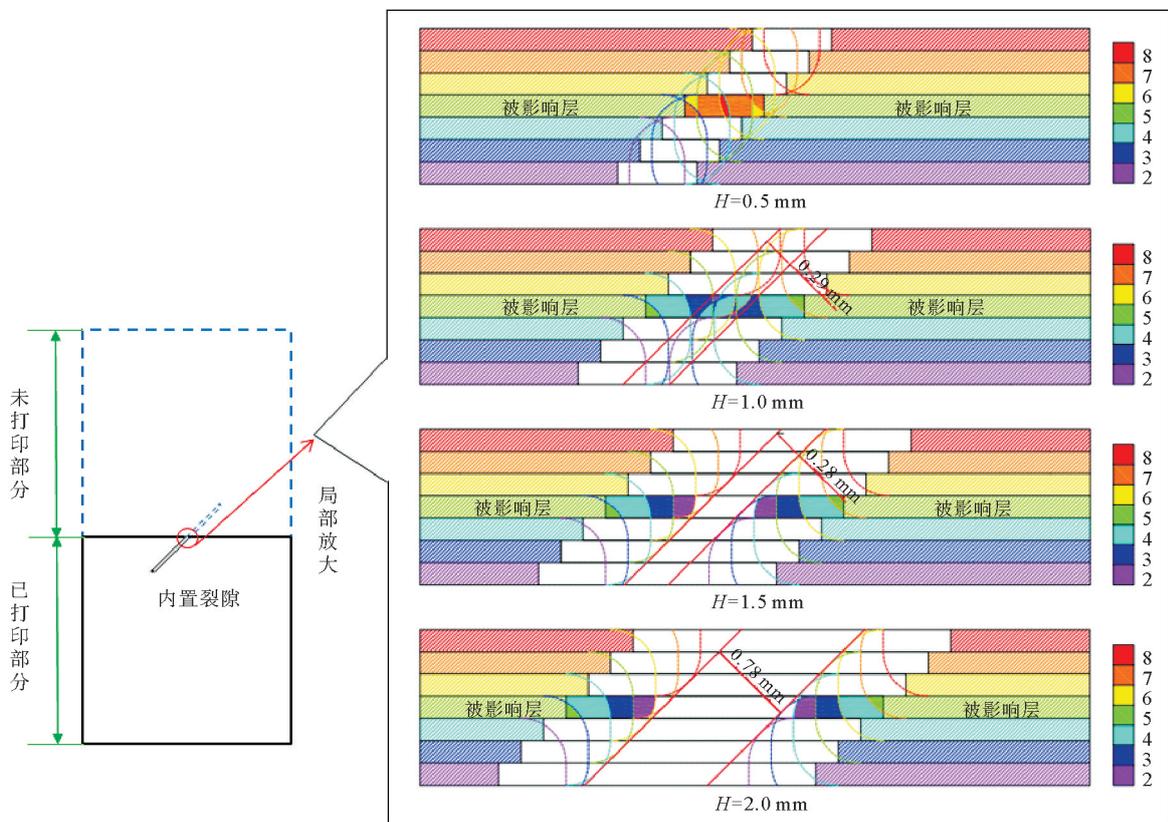


图 4 不同 H 下胶结剂渗流(比例尺为 10 : 1)

Fig. 4 Seepage of binder under different H (the scale is 10 : 1)

为验证该渗流模型及参数设定的合理性,设计制作了一个含不同开度(0.5、1.0、1.5、2.0、4.0 mm)贯穿裂隙试样,如图 5(a)所示。试样成型后使用吸尘器简单清理裂隙内部残留砂粉后,观察裂隙面黏连情况,如图 5(b)所示。可以看到,0.5、1.0 mm 开度的裂隙均无明显裂隙痕迹,表明该开度条件下裂隙面间存在黏结;1.5 mm 开度裂隙有明显裂隙痕迹,但由于有效宽度小未透光;2.0、4.0 mm 开度裂隙明显透光且 $H=4.0$ mm 的裂隙有效宽度大于 $H=2.0$ mm 的。符合上述渗流模型对于各个开度裂隙有效宽度的推测,说明了该渗流模型的合理性。

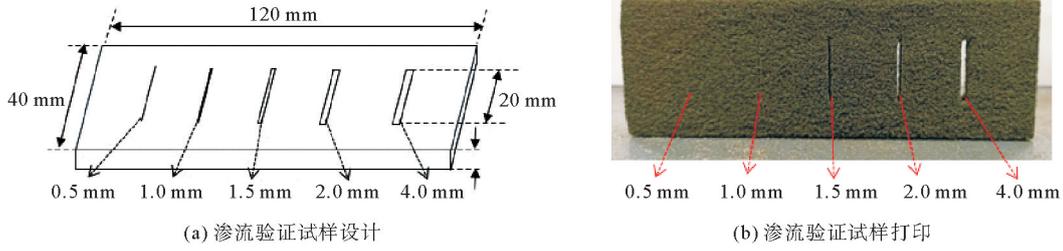


图 5 渗流验证试样

Fig. 5 Seepage verification of specimen

内置裂隙对试样强度的影响分为裂隙面无黏结作用和裂隙面有黏结作用两种情况讨论。裂隙面无黏结作用时,裂隙本身强度小,加载时次生裂隙将从原生裂隙边缘开始扩展,试件强度基本取决于裂隙以外区域(岩桥)的尺寸(裂隙开度会产生较小影响,相比岩桥的影响可忽略)。裂隙面存在黏结作用时,裂隙本身具备一定的抗拉剪强度,试件强度会受裂隙黏结和岩桥两个因素影响。结合胶结剂渗流模型,开度 $H \leq 1.5$ mm 时,试件强度取决于裂隙黏结和岩桥两个因素,随着开度增大岩桥尺寸没有变化,但胶结剂渗流导致裂隙黏结强度降低,因此单轴抗压强度与开度呈负相关。此外,与裂隙直径 $D = 20$ mm 的试样相比,直径 $D = 40$ mm 的试样在开度从 0.5 mm 增至 1.5 mm 过程中,单轴抗压强度下降更快(强度最大值差 $3.76 > 0.78$ MPa),表明 $D = 40$ mm 时胶结剂渗流对单轴抗压强度的影响更显著。

按照裂隙贯通率的定义、裂隙及岩桥的强度机理,可选取裂隙所在断面,根据裂隙及岩桥强度简化表征岩样平均强度 $\bar{\sigma}_c$,如图 6 所示。已知

$$S_1 = \frac{\pi D^2}{4}, S_2 = \sqrt{2} a^2 - S_1; \quad (1)$$

$$k_1 = \frac{S_1}{S_1 + S_2} = \frac{\pi D^2}{4\sqrt{2} a^2}, k_2 = \frac{S_2}{S_1 + S_2} = 1 - \frac{\pi D^2}{4\sqrt{2} a^2}; \quad (2)$$

$$\bar{\sigma}_c = k_1 \sigma_1 + k_2 \sigma_2. \quad (3)$$

则裂隙面黏结强度改变导致的试样强度变化值为:

$$\Delta \bar{\sigma}_c = k_1 \Delta \sigma_1 = \frac{\pi D^2}{4\sqrt{2} a^2} \Delta \sigma_1. \quad (4)$$

式中: a 为试样底边边长; S_1 、 S_2 分别为断面裂隙、非裂隙区域(岩桥)面积; k_1 为裂隙贯通率, k_2 为岩桥面积占比,分别用来表征裂隙及岩桥的强度因子; σ_1 为裂隙强度, σ_2 为岩桥强度。

因此,裂隙直径 $D = 40$ mm 时试样的裂隙尺寸更大,且 D 值越高,裂隙黏结强度变化导致的试样强度变化越显著,故直径为 40 mm 时开度对单轴抗压强度的影响更显著。

2.2 裂隙直径对单轴抗压强度影响分析

不同裂隙直径试样单轴抗压强度变化曲线如图 7(a)所示。5 种不同裂隙开度下,除 $H = 0.5$ mm 时两种裂隙直径试样强度无明显区别外,其他开度条件下裂隙直径为 40 mm 的试样单轴抗压强度均小于裂隙直径为 20 mm 的试样。用两种裂隙直径试样强度差值表征不同开度下直径对强度的影响程度,强度差值随裂隙开度变化如图 7(b)所示。可以看出,含两种直径裂隙试样强度差值随开度增加呈现先增高后趋于稳定的特征,开度从 0.5 mm 增至 1.5 mm 过程中,抗压强度差值与裂隙开度呈正相关。开度为 0.5 mm 时抗压强度差值最小,为 0.26 MPa;开度为 4.0 mm 时抗压强度差值最大,为 3.37 MPa。根据图 8 中数据计算可得两种裂隙直径试样的抗压强度差值平均值为 2.42 MPa。

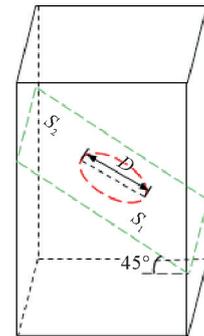


图 6 裂隙类岩试样强度简化表征

Fig. 6 Simplified representation of crack rock-like specimen strength

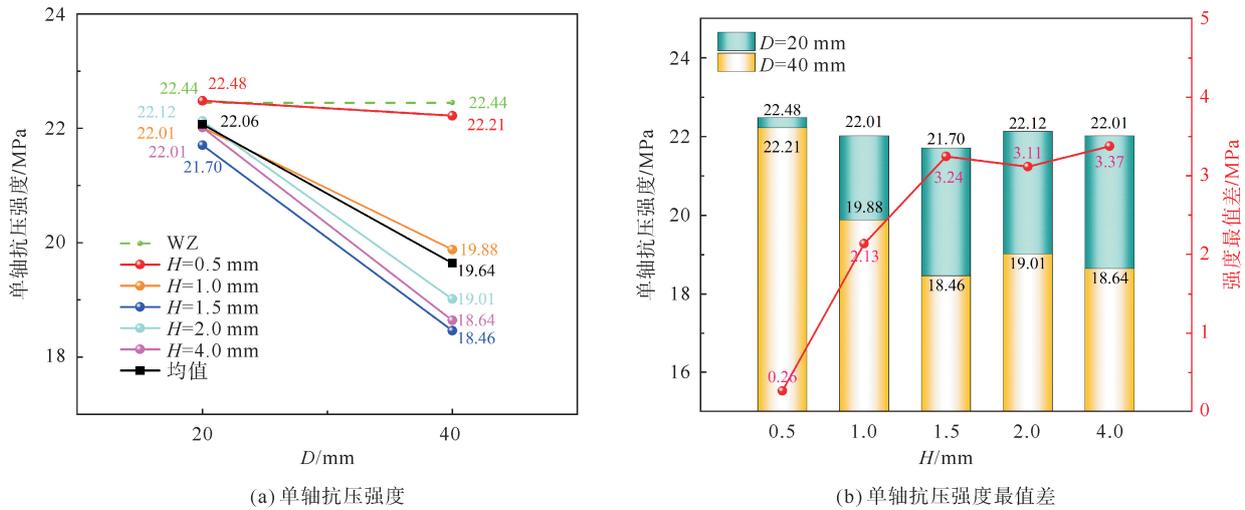


图 7 D 对单轴抗压强度影响

Fig. 7 Effect of D on uniaxial compressive strength

由上述分析可知,由裂隙直径改变导致的试样强度变化值为:

$$\Delta\sigma'_c = \sigma_1 \Delta k_1 + \sigma_2 \Delta k_2 = \frac{\pi \Delta D^2}{4\sqrt{2}a^2} (\sigma_2 - \sigma_1). \quad (5)$$

裂隙直径增大会导致主要承载结构岩桥尺寸减小,因此,不论裂隙面间是否存在黏结作用,裂隙直径大的试样强度均低于裂隙直径小的试样强度。但裂隙面黏结作用的强弱会影响直径变化对强度影响的比重。前面分析可知,裂隙开度 $H=0.5\text{ mm}$ 时,由于胶结剂渗流,裂隙面间全部为强黏结区,黏结作用最强, σ_1 值最大,此时直径变化导致的强度差值最小;随着开度增加,裂隙面黏结作用减弱, σ_1 值减小,裂隙直径变化对强度的影响程度也增加;直到开度 $H \geq 1.5\text{ mm}$,裂隙面间不再存在黏结作用, σ_1 值为 0,此时直径变化对强度的影响程度达到最大且趋于稳定。

需要特别说明的是,真实岩体内部裂隙面间不发生砂型 3D 打印试样中胶结剂渗流行为,因此本研究中由于胶结剂渗流导致裂隙面黏结的相关试验结果不能推广至裂隙煤岩体变化规律,即随内置裂隙开度变化,试样真实强度最大值平均为 0.49 MPa;随裂隙直径变化,试样真实强度差值平均为 3.24 MPa。

2.3 裂隙形状对单轴抗压强度影响分析

试验测试了 4 种裂隙直径与开度组合参数下裂隙形状对试样单轴抗压强度的影响,结果如图 8 所示。由图 8 可见,除 $40\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 裂隙参数下棱形内置裂隙试样的强度低于矩形内置裂隙试样外,其他内置裂隙参数下 ($20\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 、 $20\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 、 $40\text{ mm} \times 4\text{ mm}$) 棱形内置裂隙试样的强度比矩形的稍高,但 4 种参数下含不同形状裂隙试样单轴抗压强度变化均值为 0.35 MPa,即裂隙形状对试样的单轴抗压强度影响不大。

综上所述,大部分内置裂隙试样单轴抗压强度小于完整试样的 22.44 MPa,说明单一内置裂隙能够对砂型 3D 打印类岩试样起到弱化作用。当裂隙参数为 $D=40\text{ mm}$ 、 $H=1.5\text{ mm}$ 、形状为矩形时,单轴抗压强度最低为 18.46 MPa,相比完

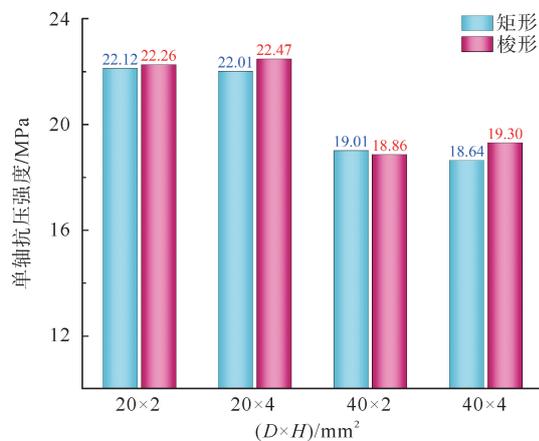


图 8 不同 S 试样单轴抗压强度

Fig. 8 Uniaxial compressive strength under different S

整试样的单轴抗压强度最高为 22.44 MPa,最低为 18.46 MPa。

整试样下降了约 17.74%。本次试验影响试样强度的主控因素为内置裂隙直径和开度。其中,直径对试样强度的影响最大(强度差值均值为 2.42 MPa),当开度 $H \geq 1.5$ mm 时开度对强度影响较大(强度最大值差均值为 2.27 MPa,本质为胶结剂渗流导致裂隙面黏结)、 $H \leq 1.5$ mm 时对强度影响较小(强度最大值差均值为 0.49 MPa),而裂隙形状对强度影响最小(强度变化值均值为 0.35 MPa)。

3 裂隙几何特征对破坏形态影响规律分析

内置裂隙扩展贯通引起试样破坏后,会在破坏断面观察到显露的裂隙面^[16-17],故裂隙面显露与否能一定程度反映其是否对破坏起主要作用。本次试验发现,内含预制裂隙的试样破坏后裂隙面并非一定显露,所以本研究根据试样破坏后裂隙面显露情况进行了统计。同时发现不同几何特征裂隙试样破坏后内部结构形态差距较大,因此针对不同试样破坏后形成的内部结构形态分析内置裂隙对于试样的影响。

试样破坏后裂隙面显露情况统计如表 2 所示。对于内含直径 20 mm 裂隙试样:当开度为 0.5、4.0 mm 时,试样表面破坏形态类似完整试样,包括劈拉和剪切两种基本形式,如图 9(a)和图 9(b)所示,破坏后裂隙面均未显露;开度为 2.0 mm 的梭形裂隙试样表面破坏形态也类似完整试样,破坏后裂隙面亦未显露;当开度为 1.0、1.5、2.0 mm 且裂隙形状为矩形时,表面可观察到“倒 Y”形裂纹,如图 9(c)所示,试样破坏后裂隙面显露。对于内含直径 40 mm 裂隙试样:开度为 0.5 mm 时试样表面破坏形态和强度均接近完整试样,破坏后裂隙面未显露;两组梭形裂隙试样表面破坏形态与完整试样类似,破坏后裂隙面均未显露,但强度相较完整试样分别降低 15.8%和 13.8%;其他开度参数下($H = 1.0、1.5、2.0、4.0$ mm)破坏后裂隙面显露,试样表面表现为竖直劈拉裂纹。

表 2 试样破坏后裂隙面显露情况统计

Table 2 Statistics of crack surface's exposure after the failure of specimens

试样编号	裂隙面显露	裂隙面不显露	试样编号	裂隙面显露	裂隙面不显露
D1H1S1		✓	D2H1S1		✓
D1H2S1	✓		D2H2S1	✓	
D1H3S1	✓		D2H3S1	✓	
D1H4S1	✓		D2H4S1	✓	
D1H5S1		✓	D2H5S1	✓	
D1H4S2		✓	D2H4S2		✓
D1H5S2		✓	D2H5S2		✓

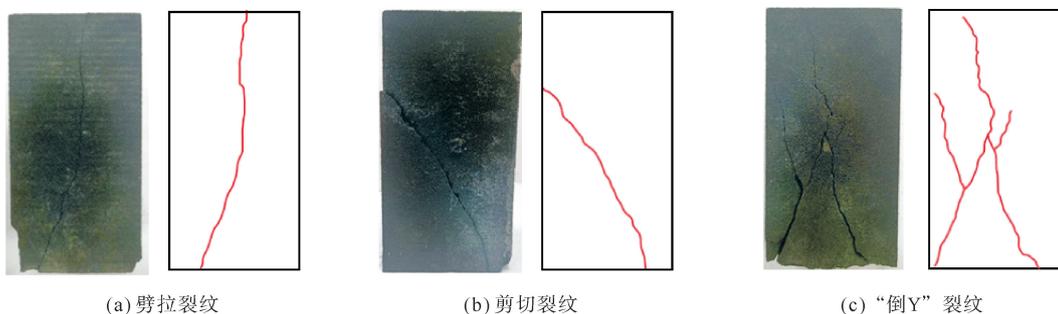


图 9 试样表面破坏形态

Fig. 9 Failure patterns of specimens' surface

总结试验中裂隙面显露的必要条件为:开度 $H \geq 1.0$ mm 且裂隙形状为矩形,同时直径大的裂隙要比直径小的裂隙更容易显露。由前文分析可知,开度为 0.5 mm 时裂隙面之间存在强黏结区,因此试样破坏后裂隙面不显露,且试样单轴抗压强度接近完整试样。以往学者进行内置裂隙研究时多围绕试样内部裂

隙扩展进行讨论^[10,12,16-17,25], 仅仅通过表面裂纹分析内置裂隙试样的破坏存在局限性, 因此本研究对裂隙面显露破坏时形成的试样内部结构形态进行了对比分析。

相关研究表明, 内置圆盘或椭圆盘裂隙在单轴压缩条件下会在尖端附近先扩展形成翼裂纹, 再进一步包裹预制裂隙边缘向加载方向延伸形成包裹式翼裂纹^[25], 如图 10(a)和图 10(c)所示。之后试样有两种破坏路径: ①包裹式翼裂纹沿加载方向扩展至上限值(约为初始裂隙尺寸的 1.0~1.5 倍)后, 与非裂隙区产生的裂纹扩展贯通, 导致试样最终破坏^[10,12]; ②包裹式翼裂纹以卷曲裂纹的形式继续扩展, 在预制裂隙上下端更远处逐渐发展成更大规模的张拉裂纹, 张拉裂纹扩展致使试样最终破坏^[16-17], 如图 10(b)和图 10(d)所示。

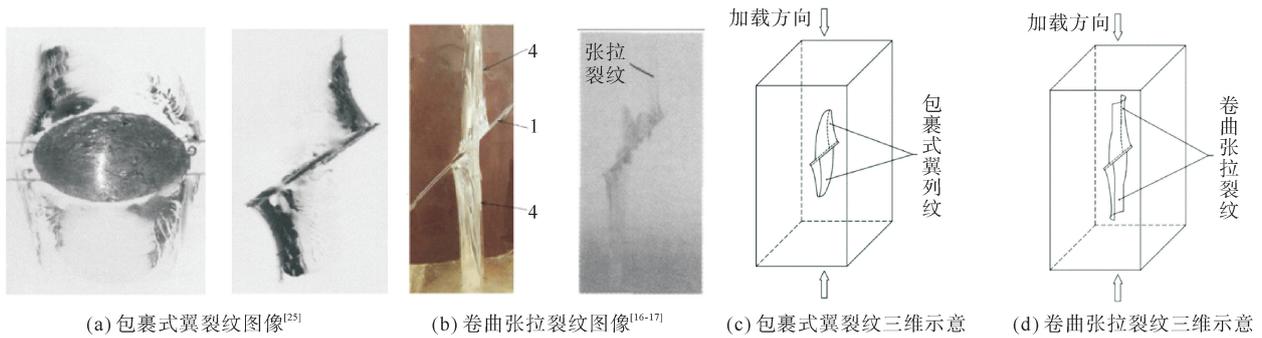


图 10 内置裂隙单轴压缩条件下扩展

Fig. 10 Extension of internal crack under uniaxial compression

本次试验观察到, 不论小直径裂隙还是大直径裂隙, 试样破坏裂隙面显露后均可在其附近观察到典型的包裹式翼裂纹, 如图 11(a)和图 11(b)所示, 说明内置裂隙在荷载作用下发生扩展行为, 但两种直径条件下试样破坏后内部结构形态差异较大, 不同的内部结构形态反映不同的破坏路径。裂隙直径为 20 mm 试样仅在内部观察到包裹式翼裂纹的扩展痕迹, 对应的破坏路径是: 包裹式翼裂纹扩展至上限后与非裂隙区产生的裂纹贯穿导致了试样最终破坏, 如图 11(a)所示; 裂隙直径为 40 mm 试样则在内部观察到了卷曲张拉裂纹扩展痕迹, 对应的扩展路径是: 包裹式翼裂纹扩展至上限后, 继续以卷曲的张拉裂纹形式扩展, 最终导致试样破坏, 如图 11(b)所示。

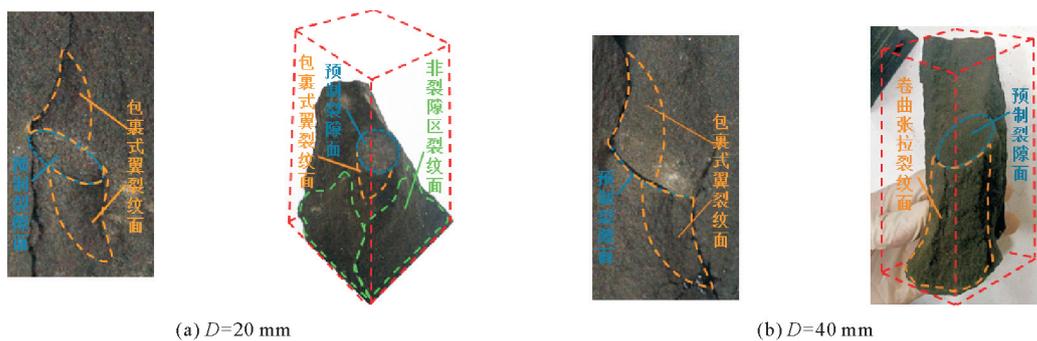


图 11 包裹式翼裂纹及试样内部结构形态

Fig. 11 Wrapped wing cracks and internal structure of specimens

4 裂隙几何特征对声发射特性影响规律分析

为探究裂隙在不同几何特征下扩展和贯通规律, 在试样受力变形直至破坏的全过程中, 同步进行声发射信号监测。根据监测数据, 绘制不同试样的声发射特性随加载时间变化图, 包括振铃计数柱状图、累计振铃计数曲线、能量柱状图、累计能量曲线, 结果表明: 荷载作用下试样的声发射现象主要与试样内裂纹的

产生、扩展和断裂有关,且不同试样的受力变形特点具有一致性,均先后经历初始压密、线弹性变形、裂纹稳定扩展、裂纹不稳定扩展及峰值后破坏等5个阶段。这里仅选取其中一个典型内置裂隙试样 D2H3S1,并对比完整试样,展示内置裂隙试样声发射特性随加载时间变化规律,如图12所示。

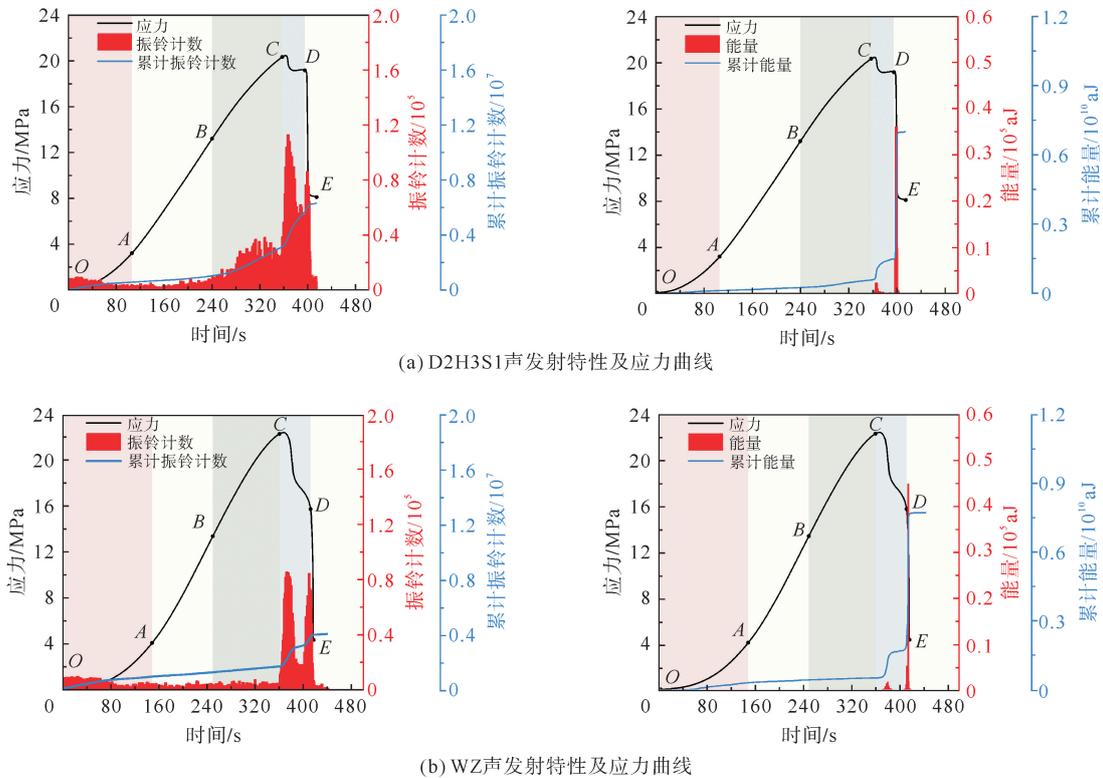


图12 不同试样声发射特性及应力曲线

Fig. 12 Acoustic emission characteristics and stress curves of different specimens

由图12可以看出,试样受压变形分为5个阶段。①0~100 s(OA段)为初始压密阶段:此阶段试样内部微裂纹受压闭合,因此应力-时间曲线呈现“上凹”形,声发射振铃计数很小,累计振铃计数曲线增长速率较低。②100~240 s(AB段)为线弹性变形阶段:此阶段应力随时间呈线性变化,因采用位移加载方式,应力随应变线性变化,服从胡克定律,收集到的声发射振铃计数很小或没有,累计振铃计数曲线平缓。③240~360 s(BC段)为裂纹稳定扩展阶段:此阶段应力-时间曲线变缓,裂隙试样与完整试样声发射振铃计数出现明显区别。完整试样振铃计数仍处于较低水平,但裂隙试样声发射振铃计数逐渐升高,累计振铃计数曲线增长速率明显升高。研究表明,对于内含圆盘或椭圆盘裂隙试样,包裹式翼裂纹发育结束于裂纹稳定扩展阶段^[10,12],因此推测此阶段声发射振铃计数升高与预制裂隙初始扩展有关。④360~400 s(CD段)为裂纹不稳定扩展阶段:此阶段应力保持在较高水平,振铃计数急剧增高,振铃计数达到峰值,累计振铃计数曲线增长速率亦显著提升。通过前文破坏形态分析推测,对于裂隙试样,包裹式翼裂纹与试样内其他部分产生的裂隙贯穿,或以卷曲张拉裂纹形式加速扩展导致试样宏观破裂,因此推测此阶段振铃计数急剧增高与两种裂纹扩展行为有关;⑤400 s之后(DE段)阶段:此阶段应力瞬时降低,声发射振铃计数瞬时升高后恢复至很小值,对应试样发生宏观脆性破裂瞬间。含裂隙试样的最终累计振铃计数高于完整试样,分别为 0.6×10^7 、 0.4×10^7 左右,推测其原因和内置裂隙扩展有关。

相较振铃计数,声发射能量随时间变化规律较简单。前三个阶段伴随小能量释放表现不明显,累计能量曲线保持稳定缓慢增长;在裂纹不稳定扩展阶段,伴随两次应力瞬时降低能量瞬时释放,对应累计能量曲线两次跳跃增长,第二次应力降低值与能量释放值均远大于第一次,且两次能量峰值间有持续小能量释放。裂隙试样与完整试样的声发射能量特性具有一致性,两次声发射能量的瞬时释放反映试样发生宏观

破裂,且能量值越大破裂的尺度越大。

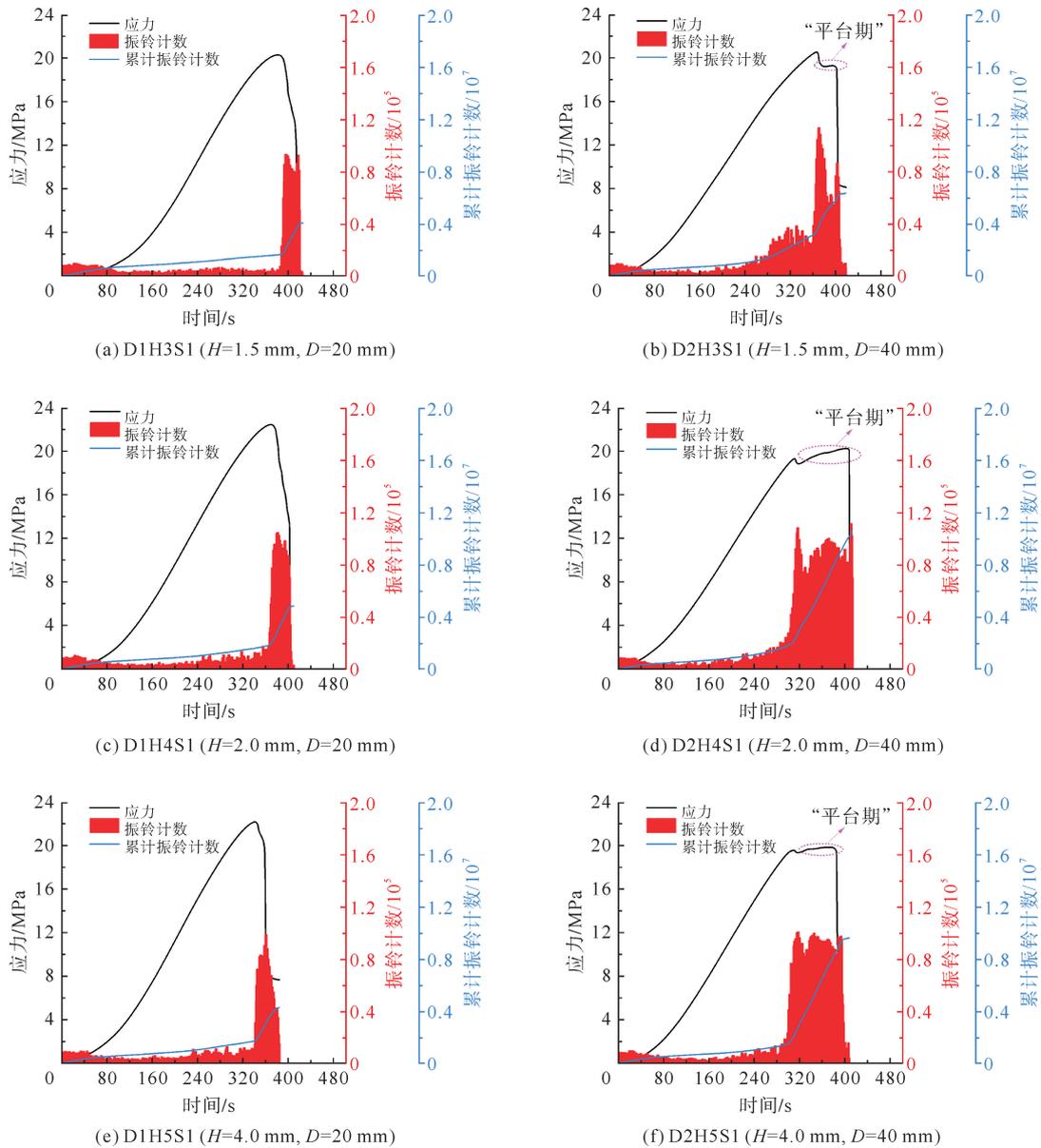


图 13 不同 D 试样振铃计数及应力曲线

Fig. 13 Ringing count characteristics and stress curves under different D

对不同内置裂隙参数下试样声发射特性进行对比,发现不同开度下裂隙试样声发射特性差别不明显 ($H=0.5\text{ mm}$ 除外),但在一些开度条件下 ($H=1.5、2.0、4.0\text{ mm}$) 声发射振铃计数随裂隙直径的改变存在明显不同,如图 13 所示。综合三组对照可以发现,稳定扩展阶段裂隙直径大的试样的振铃计数均值高于裂隙直径小的试样;在三种开度条件下,裂隙直径的增大使裂纹不稳定扩展阶段提前到来,而且应力-时间曲线出现一段明显的“平台期”(随加载时间增长应力保持高水平稳定)。“平台期”属于裂纹不稳定扩展阶段,“平台期”内声发射振铃计数水平持续较高,但振铃计数峰值未因直径改变有明显变化(均处于 $0.8\sim 1.2\times 10^5$ 间),因此内含直径 40 mm 裂隙试样的累计声发射振铃计数高于内含直径 20 mm 裂隙试样的。由前文分析可知,内含直径 40 mm 裂隙试样内包裹式翼裂纹以卷曲张拉裂纹形式持续扩展,而对于内含直径 20 mm 裂隙试样,其破坏是由于翼裂纹与无裂隙区产生的裂纹直接贯通,弯曲的扩展路径相较平直的路径扩展困难,因此推测此阶段出现一段时间的高应力持续“平台期”与卷曲张拉裂纹扩展有关。

对于不同形状裂隙,裂隙直径小的矩形和梭形裂隙试样声发射特性无明显区别,但裂隙直径大的试件之间存在差异。选取裂隙直径为 40 mm、开度为 4 mm 的不同形状裂隙的两个试样,对其声发射振铃计数进行对比分析,如图 14 所示。可以看到在稳定扩展阶段,矩形裂隙试样的振铃计数值高于梭形裂隙试样;而在不稳定扩展阶段,矩形裂隙试样应力和振铃计数保持高水平持续一段时间,而梭形裂隙试样没有此过程,也因此矩形裂隙试样的最终振铃计数累计值更高。不同形状裂隙试样加载过程中声发射振铃计数的差异和扩展路径不同有关。

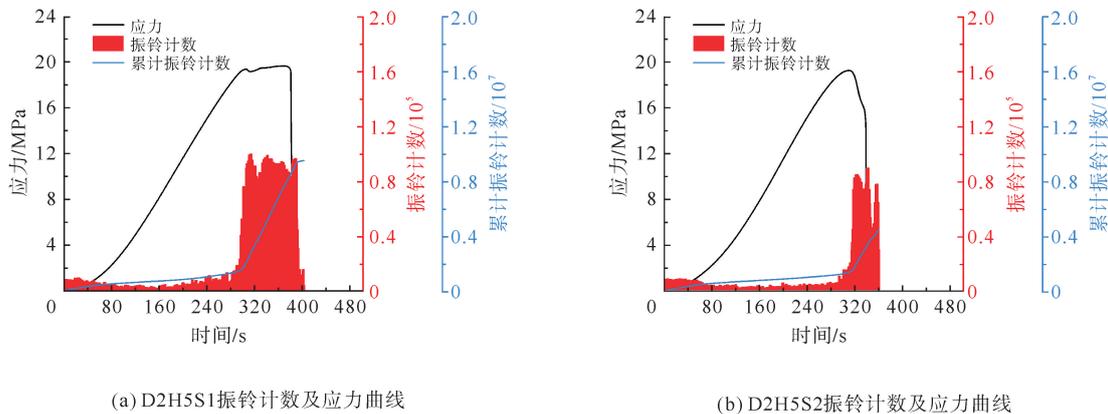


图 14 不同 S 试样振铃计数及应力曲线

Fig. 14 Ringing count characteristics and stress curves under different S

5 讨论

工程岩体中裂隙含充填物是普遍现象,充填物可使裂隙面产生胶结作用。真实裂隙岩体中裂隙面胶结本质为物质沉淀、结晶或重结晶形成,对裂隙面具有一定黏结作用的胶结物,对岩体的力学特性有显著影响。本次研究发现,在胶结剂渗流影响下,砂型 3D 打印试样内置裂隙面间残留砂粉可被聚合成块,对裂隙面有一定的黏结作用,与天然裂隙岩体裂隙面间的胶结机制相似,因此该现象或可用于模拟天然岩体裂隙面间的胶结作用,开展裂隙胶结作用研究。

对于梭形裂隙,小直径裂隙对试样无弱化作用,裂隙直径大的试样破坏后未观察到显露裂隙面及包裹式翼裂纹,但仍造成试样强度降低,具有弱化作用。内置梭形裂隙试样在扩展形式和破坏过程上与内置矩形裂隙试样不同。试验过程中还观察到反翼形裂纹的扩展痕迹,但其产生的条件尚不明确,由此可推测,工程岩体中不同形态的内置裂隙在不同应力环境下可能会有不同的扩展破坏机制。

6 结论

本研究基于微滴喷射砂型 3D 打印技术制备了含内置裂隙类岩体试样,探究了裂隙开度、直径及形状等几何特征对类岩体强度、破坏特性和声发射特性的影响规律及其成因机理,得到以下结论。

1) 单一内置裂隙对试样强度有弱化作用,不同裂隙几何特征对强度影响不同。其中,裂隙直径对试样强度影响显著,裂隙直径大的试样强度低于裂隙直径小的试样;裂隙开度对试样强度影响不大;四种开度和直径组合条件下,裂隙形状变化对试样的强度影响较小。

2) 不同裂隙几何特征对试样破坏形态影响不同,其中裂隙开度对破坏形态影响不显著。裂隙直径不同的矩形裂隙试样破坏形态差异较大,对应两种裂隙扩展破坏路径:裂隙直径小的试样破坏是包裹式翼裂纹与非裂隙区产生的裂纹扩展贯通导致,裂隙直径大的试样破坏是包裹式翼裂纹以卷曲张拉裂纹扩展导致;裂隙形状对试样破坏形态影响明显,梭形裂隙试样破坏后裂隙面不显露,表面类似完整试样。

3) 内置裂隙对试样的声发射特性产生显著影响。裂隙开度对试样声发射特性影响不明显。裂隙为矩形时不同直径裂隙试样的声发射特性有明显区别:裂隙直径大的试样稳定扩展阶段的振铃计数均值高于完整试样和裂隙直径小的试样,不稳定扩展阶段应力曲线出现一段“平台期”,该阶段内振铃计数水平持

续较高;大直径裂隙条件下,内置梭形裂隙试样的应力曲线和声发射特性与内置矩形裂隙试样不同,不存在应力“平台期”。

本研究仅针对单一裂隙试样进行了单轴压缩试验研究,而天然岩体中裂隙往往以裂隙群或裂隙网络的形式存在,且应力环境复杂,在复杂工况下的裂隙岩体劣化效应和失稳机理尚不明晰,针对深部巷道裂隙围岩的失稳破坏研究还需进一步深入。

参考文献:

- [1] 谢和平,张茹,张泽天,等.深地科学与深地工程技术探索与思考[J].煤炭学报,2023,48(11):3959-3978.
XIE Heping,ZHANG Ru,ZHANG Zetian,et al. Reflections and explorations on deep earth science and deep earth engineering technology[J]. Journal of China Coal Society,2023,48(11):3959-3978.
- [2] 何满潮,武毅艺,高玉兵,等.深部采矿岩石力学进展[J].煤炭学报,2024,49(1):75-99.
HE Manchao,WU Yiyi,GAO Yubing,et al. Research progress of rock mechanics in deep mining[J]. Journal of China Coal Society,2024,49(1):75-99.
- [3] 李杨杨,侯嘉琦,张士川,等.不同倾角穿层裂隙组合岩石力学性能及破坏特征研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2025,44(1):18-27.
LI Yangyang,HOU Jiaqi,ZHANG Shichuan,et al. Study on mechanical properties and failure characteristics of cross-layer fracture composite rock with different dip angles[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science),2025,44(1):18-27.
- [4] 刘学伟,王赛,刘滨,等.不同注浆材料填充双裂隙类岩石试样力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(3):623-638.
LIU Xuewei,WANG Sai,LIU Bin,et al. Effect of filling grouting material on mechanical properties and mechanism of rock-like samples with double-crack[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2024,43(3):623-638.
- [5] 李国锋,王九红,刘建荣,等.巷道围岩锚固结构面剪切特性与破坏特征研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2022,41(4):47-55.
LI Guofeng,WANG Jiuhong,LIU Jianrong,et al. Study on shear properties and failure characteristics of bolted joint of roadway surrounding rock[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science),2022,41(4):47-55.
- [6] 郎丁,张子鑫,伍永平,等.基于煤样主控裂隙尺度筛选的等效DFN模型构建[J].煤炭科学,2025,53(3):435-449.
LANG Ding,ZHANG Zixin,WU Yongping,et al. Construction of equivalent DFN model based on screening of main control fracture scale of coal samples[J]. Coal Science and Technology,2025,53(3):435-449.
- [7] 王帅,许莹,张艳博,等.粗颗粒砂砾岩内矿物颗粒和孔隙结构的非均匀性及量化表征细观试验研究[J].煤炭学报,2024,49(增2):832-844.
WANG Shuai,XU Ying,ZHANG Yanbo,et al. Microscopic experimental study on the heterogeneity and quantitative characterization of mineral grains and pore structures in coarse-grained glutenites[J]. Journal of China Coal Society,2024,49(S2):832-844.
- [8] HAN Z Y,LI J J,WANG H J,et al. Initiation and propagation of a single internal 3D crack in brittle material under dynamic loads[J/OL]. Engineering Fracture Mechanics,2023,285, DOI:10.1016/j.engfracmech.2023.109299.
- [9] ZHANG Z T,WANG H J,ZHONG L W,et al. Experimental and numerical research of the behavior of 3D internal cracks under uniaxial compression using 3D-ILC technology[J/OL]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics,2023, DOI:10.1016/j.tafmec.2023.103819.
- [10] 朱珍德,林恒星,孙亚霖.透明类岩石内置三维裂纹扩展变形试验研究[J].岩土力学,2016,37(4):913-921.
ZHU Zhende,LIN Hengxing,SUN Yalin,et al. An experimental study of internal 3D crack propagation and coalescence in transparent rock[J]. Rock and Soil Mechanics,2016,37(4):913-921.
- [11] 蒋力帅,杨一鸣,赵阳,等.动载下含内部裂隙类岩体力学响应与能量耗散规律[J].煤炭科学技术,2025,53(2):137-150.
JIANG Lishuai,YANG Yiming,ZHAO Yang,et al. Mechanical response and energy dissipation law of rock-like mass with internal fractures under dynamic load[J]. Coal Science and Technology,2025,53(2):137-150.
- [12] 李术才,李廷春,王刚,等.单轴压缩作用下内置裂隙扩展的CT扫描试验[J].岩石力学与工程学报,2007,26(3):484-

- 492.
- LI Shucai, LI Tingchun, WANG Gang, et al. CT real-time scanning tests on rock specimens with artificial initial crack under uniaxial conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 484-492.
- [13] SHI C, ZHANG C H, JIN C, et al. Experimental study and numerical simulation of propagation and coalescence processes of pre-existing flaws in a transparent rock-like material[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2019, 11(5): 863-888.
- [14] WANG X Z, JIANG L S, LI Y Y, et al. Experimental study on the mechanical behavior and failure characteristics of rock analogs with filled internal fractures: A new method by sand powder 3D printing[J/OL]. Construction and Building Materials, 2024, 427. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2024.136261.
- [15] DYSKIN A V, JEWELL R J, JOER H, et al. Experiments on 3-D crack growth in uniaxial compression[J]. International Journal of Fracture, 1994, 65(4): R77-R83.
- [16] FU J W, CHEN K, ZHU W S, et al. Progressive failure of new modelling material with a single internal crack under biaxial compression and the 3-D numerical simulation[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2016, 165: 140-152.
- [17] 付金伟, 朱维中, 曹冠华, 等. 岩石中三维单裂隙扩展过程的试验研究和数值模拟[J]. 煤炭学报, 2013, 38(3): 411-417.
- FU Jinwei, ZHU Weishen, CAO Guanhua, et al. Experimental study and numerical simulation of propagation and coalescence process of a single three-dimensional flaw in rocks[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(3): 411-417.
- [18] YU C, TIAN W. Application and prospective of sand-type 3D printing material in rock mechanics: a review[J]. Rapid Prototyping Journal, 2024, 30(6): 1057-1069.
- [19] 王文海, 蒋力帅, 何鑫, 等. 基于砂型 3D 打印的复杂节理岩体变形破坏特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(3): 754-767.
- WANG Wenhai, JIANG Lishuai, HE Xin, et al. Experimental study on deformation and failure characteristic of complex jointed rock mass based on sand-powder 3D printing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(3): 754-767.
- [20] 蒋力帅, 吴星宇, 王庆伟, 等. 砂型 3D 打印类煤试样动静组合加载力学特性[J]. 煤炭学报, 2022, 47(3): 1196-1207.
- JIANG Lishuai, WU Xingyu, WANG Qingwei, et al. Dynamic mechanical behaviors of sand-powder 3D printing rock-like specimens under coupled static and dynamic loads[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 1196-1207.
- [21] ZHAO Y, JIANG L S, LI C A, et al. Experimental investigation into the mechanical behavior of jointed soft rock using sand powder 3D printing[J/OL]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023. DOI:10.1007/s00603-023-03346-8.
- [22] 蒋力帅, 王鑫哲, 徐清, 等. 砂型 3D 打印材料对类软岩力学特性影响规律及机理[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(11): 84-94.
- JIANG Lishuai, WANG Xinzhe, XU Qing, et al. Influence and mechanism of printing materials on the mechanical properties of sand powder 3D printed weak rock-like materials[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(11): 84-94.
- [23] 蒋力帅, 李春盎, 徐清, 等. 砂型 3D 打印成型方向对含裂隙软岩试样力学特性的影响研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2023, 42(5): 22-29.
- JIANG Lishuai, LI Chun'ang, XU Qing, et al. Study on the influence of sand mold 3D printing direction on mechanical properties of soft rock specimens with crack[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2023, 42(5): 22-29.
- [24] ZHANG Z, JIANG L, LI C A, et al. Characteristics and mechanism of time on sand powder 3D printing rock analogue: A new method for fractured rock mechanics[J/OL]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2023, 9(1). DOI:10.1007/s40948-023-00707-z.
- [25] DYSKIN A V, SAHOUREYEH E, JEWELL R J, et al. Influence of shape and locations of initial 3-D cracks on their growth in uniaxial compression[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2003, 70(15): 2115-2136.

(责任编辑: 齐敏华)