文章编号：1001-4888(2022)05-0701-10

单轴压缩下透明类岩石损伤演化特征研究*

朱昌星，安烨明，李伟东

（河南理工大学 土木工程学院，河南焦作 454000）

摘要：为研究岩石变形破坏模式及内部裂纹扩展过程，采用环氧树脂、固化剂、熔融石英砂与玻璃砂制备非均质、各向异性的新型透明类岩石，通过室内单轴压缩试验及颗粒流(PFC2D)数值模拟，分析了其破坏模式及裂纹演化过程。室内试验中，透明类岩石峰值强度在砂岩强度范围内的破坏模式与砂岩相似，呈现劈裂剪切混合破坏，裂纹发育大多以层理面为起始点；对比PFC2D数值模拟与室内试验，两者应力-应变曲线相似，最终破坏模式及过程基本一致；将透明类岩石的PFC2D裂纹累积演化曲线划分为无损伤、初始损伤、损伤发展、损伤加速发展、损伤破坏阶段，并确定了其损伤门槛值。本文试验结果，可为直接观察岩石内部裂纹扩展提供参考。

关键词：透明类岩石；环氧树脂；裂纹扩展；PFC2D；损伤演化

中图分类号：TU45 **文献标识码**：A DOI：10.7520/1001-4888-21-267

0 引言

岩石内部裂纹扩展演化过程是影响围岩变形破坏的关键因素，且一直以来都是岩石力学界和工程地质界极为关注的研究课题。天然岩石或传统相似材料岩石都是不透明的，内部裂纹演化过程不能通过肉眼直接观测，而采用仪器探测的方法主要有声发射法[1-3]、CT扫描[4,5]等，这些观测方法属于局部观测，获得的数据有限。近年来，学者们利用环氧树脂制作透明类岩石，为直接观察荷载下岩石内部裂纹扩展提供了新思路。Changxing Zhu[6]、Chong Shi[7]、林恒星[8]、王海军[9]等采用环氧树脂材料制备可预制裂纹的透明类岩石，通过单轴压缩试验，分别研究了试样内部预制不同种类、不同角度裂纹的扩展规律及空间形态变化；林志斌[10]、任超[11]等利用硅胶粉、矿物油溶液制备出可用于模拟混合地层的透明材料，研究了在混合地层中隧道的变形破坏模式；Zhou Xiaoping等[12]通过聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)制备含有预制裂纹的透明类岩石，分析了试样在单轴压缩下原生裂纹的萌生、扩展过程及峰值强度与裂纹起裂应力间的联系；刘华博等[13]采用三维打印半透明树脂材料，研究了固化时间、加载速率、低温冷冻等对透明材料力学性质的影响。

在数值模拟研究裂纹扩展方面，PFC2D软件得到了广泛的应用，舒杨等[14]利用PFC2D模拟含交叉双裂纹岩石的直剪试验，分析了裂纹倾角对岩样破坏模式、次生微裂纹发育规律的影响；王俊光等[15]建立PFC2D模型，研究了泥岩在不同加卸载围压下的破坏模式及微裂纹发育情况；李学华等[16]研究了在单轴压缩下完整岩石和含孔洞岩石的裂纹扩展机制，试验结果与PFC2D数值模拟结果吻合较好；王煜等[17]利用PFC2D揭示了单轴压缩过程中岩石内部裂纹数量随预制裂纹倾角的增大而增加的现象。

树脂或PMMA材料属于均质各向同性材料，基于树脂材料开发的透明类岩石与天然岩石具备的

* **收稿日期**：2021-11-12；**修回日期**：2022-03-07

基金项目：国家自然科学基金资助项目(51874119)；河南省教育厅基金资助项目(2011A440003)；河南理工大学博士基金资助项目(B2009-96)

通信作者：朱昌星(1976－)，男，博士，副教授。主要研究方向为软岩巷道支护及可靠度计算。Email：zcx@hpu.edu.cn

非均质性、各向异性有偏差,且大多学者仅在预制裂纹条件下研究裂纹在均质试样内的扩展过程,而对内含较多繁杂介质的透明类岩石在荷载作用下如何起裂,裂纹如何扩展,其曲线特征、破坏模式及过程等研究还不足。天然岩石含有层理面,本文在前人研究基础上制备含有层理面且具备一定非均质性、各向异性的透明类岩石,通过单轴压缩试验,结合 PFC2D 软件,研究了透明类岩石破坏机理与裂纹演化过程。

1 透明类岩石制备方法

试样所需主要材料包括粒径 3～5mm 的透明白色熔融石英砂、粒径 2～3mm 的透明有色玻璃砂、环氧树脂与固化剂。具体制作步骤如下:

(1)用去离子水清洗熔融石英砂和玻璃砂表面附着的杂质后,将其放入烘干箱中烘干,熔融石英砂和透明有色玻璃砂如图 1(a)、(b)所示;按质量比 3∶1 称取环氧树脂和固化剂,倒入烧杯中搅拌均匀,制成透明胶液,如图 1(d)所示;将透明胶液放入真空桶中抽真空去除气泡,真空泵如图 1(e)所示。

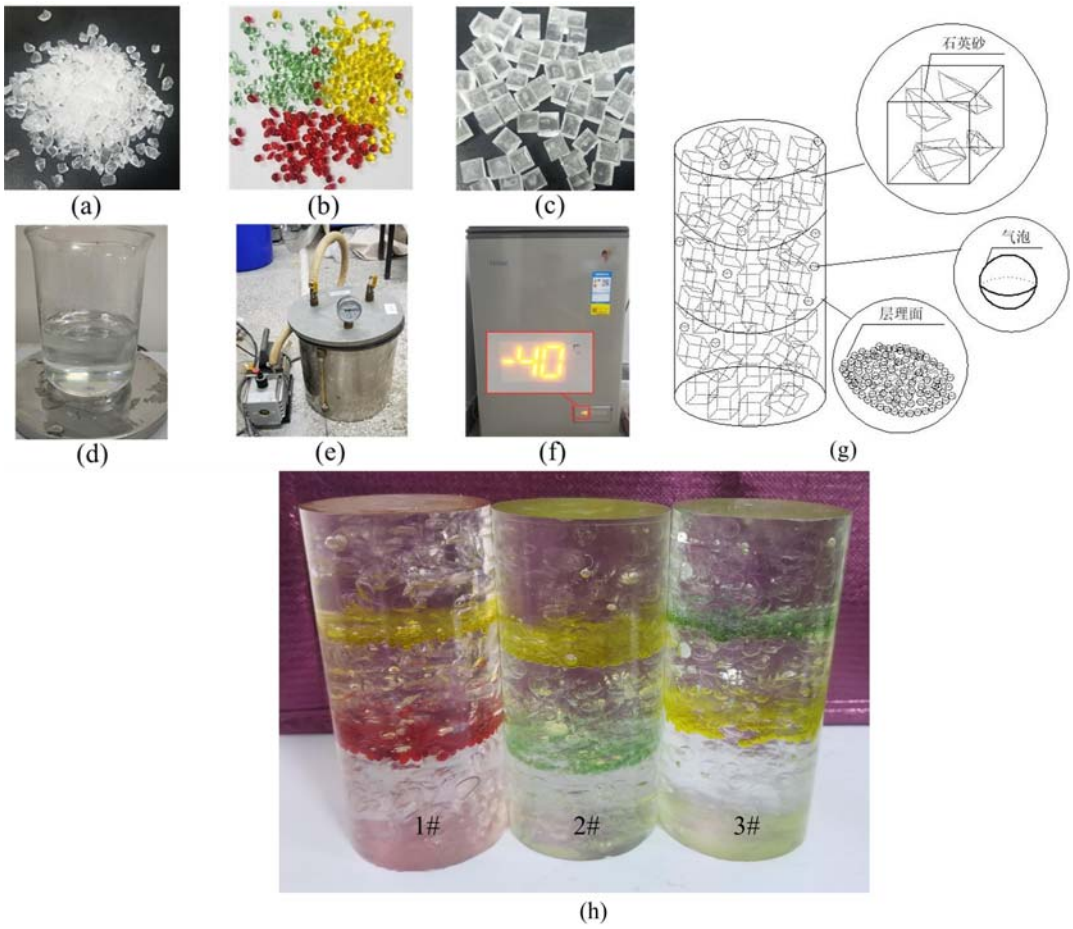


图 1 透明类岩石试样制作:(a)熔融石英砂;(b)透明有色玻璃砂;(c)透明胶块;(d)透明胶液;(e)真空泵;(f)低温冰箱;(g)透明类岩石试样结构图;(h)标准圆柱体的透明类岩石试样

Fig. 1 Fabrication of transparent rock sample: (a) fused quartz sand; (b) transparent colored glass sand; (c) transparent rubber block; (d) transparent glue liquid; (e) vacuum pump; (f) low temperature refrigerator; (g) structure diagram of transparent rock sample; (h) transparent rock sample of standard cylinder

(2)为避免石英砂相互重叠影响试样透明度,需制作包裹石英砂的正方体胶块,使其均匀分布在整个试样中;将石英砂放入 1cm 多孔硅胶模具中,每孔放置 2～3 粒,放置时避免其互相接触,然后用滴管将透明胶液滴入模具孔中,浸没颗粒并浇至模具 1/2 高度处,在室温下静置 24h 达到初凝;重复以上操作进行第 2 次浇筑,静置 48h 完全凝固后取出备用,制作的透明胶块如图 1(c)所示。

(3)制作含层理面的标准圆柱体试样需分 3 次浇筑。初次浇筑时,将正方体胶块倒入 50mm×

100mm 圆柱体硅胶模具至 1/3 高度处，将透明胶液缓慢引流至模具并浸没所有正方体胶块，静置 24h 达到初凝后，在表面铺撒一层透明有色玻璃砂，制备层理；重复以上操作再浇筑 2 次，待最后一次浇筑完成后静置 48h 脱模取出，制得透明类岩石，如图 1(g)、(h)所示；试验前 48h，将试样放入冰箱中，在－40℃下低温保存，提高其脆性。

从图 1(g)、(h)中可以看出，试样内部散乱分布了熔融石英砂等介质，因此是非均质的。为验证试样的各向异性，采用非金属声波测试仪对透明类岩石试样进行波速测试，由于标准圆柱形试样的曲面方位无法测得准确数据，因此制备边长为 100mm 的透明类岩石立方体试样，对其进行波速测试，其具体波速测试方位如图 2 所示。

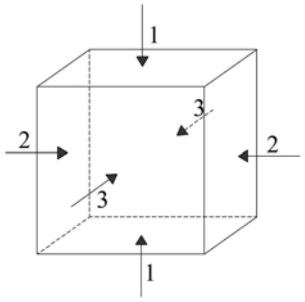


图 2　波速测试方位

Fig. 2　Wave velocity test azimuth

由表 1 波速测试结果可知，3 组立方体试样在 1-1 面、2-2 面、3-3 面(见图 2)上的波速均不一致，说明试样内部不同方向上存在不同的空洞、裂纹、介质，其赋存方式、大小、形状均不一样。通过以上分析，制备的透明类岩石试样具有一定的非均质性、各向异性，但与天然岩石的非均质性、各向异性相比，还有差别。

表 1　波速测试结果（单位：km/s）

Tab. 1　Wave velocity test results (unit: km/s)

立方体试样编号	1-1 面	2-2 面	3-3 面
1	1.953	1.869	1.979
2	1.798	1.764	1.806
3	1.787	1.893	1.817



图 3　试验设备示意图

Fig. 3　Schematic diagram of test equipment

2　单轴压缩试验研究

2.1　试验方案

试验在型号为 YNS-300 的万能试验机上进行，系统施加的最大轴向压力为 300kN。本文试验加载速率设为 1kN/s，破坏过程由 2 台 Lucam 工业高速摄像机拍摄记录，分别放置在试验机前、后方向，拍摄帧数设为 90fps。利用激光仪照射试样，以提高内部裂纹扩展演化清晰度，试验设备如 3 所示。

2.2　试验结果分析

图 4、图 5 为透明类岩石在单轴压缩下的试验结果，3 组试样峰值应力分别为 102.89MPa、94.08MPa、97.63MPa，在砂岩[18－20]的强度范围内(70MPa～120MPa)，单轴压缩下透明类岩石最终破坏模式与砂岩[20]相似，属劈裂剪切混合破坏，采用以上方法制备的非均质透明类岩石，试验可重复性较好。下面将以图 1(h)中 3＃透明类岩石为例，分析其应力-应变曲线、破坏模式及过程。

图 6 为 3＃透明类岩石的单轴压缩试验应力-应变曲线，选取具有代表性的点分析(见图 6 中 A、B、C、D、E、F)。图 7 展示了在单轴压缩下利用前、后 2 台高速摄像机捕捉到的试样裂纹扩展图与绘制的大致示意图，其中实线表示正面、表面裂纹扩展路径，虚线表示背面、内部裂纹扩展路径。图 7(a)～(f)分别对应图 6 应力-应变曲线上的 A～F 点。图中内部阴影为激光穿透试样照射在破裂面产生的反光，

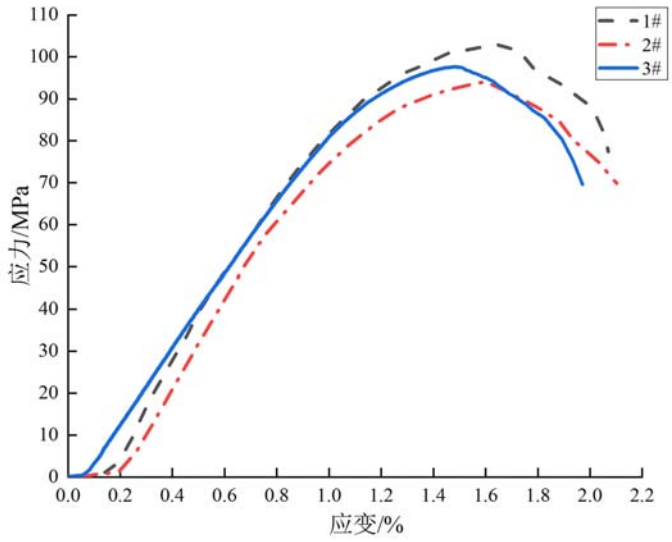


图 4 透明类岩石应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curve of transparent rock

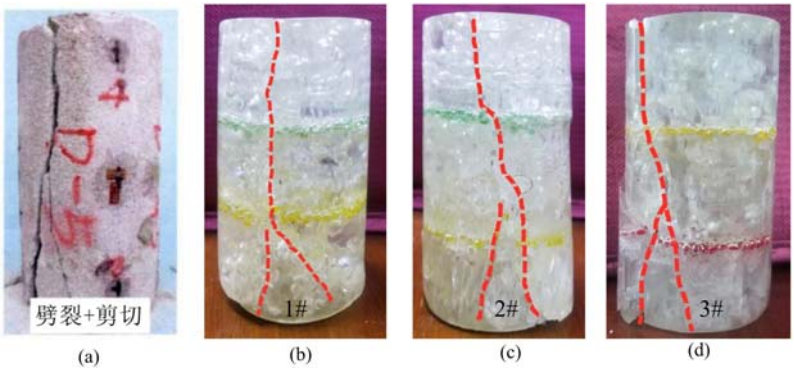


图 5 透明类岩石与砂岩[20]破坏模式对比图

Fig. 5 Comparison between failure mode of transparent rock and sandstone[20]

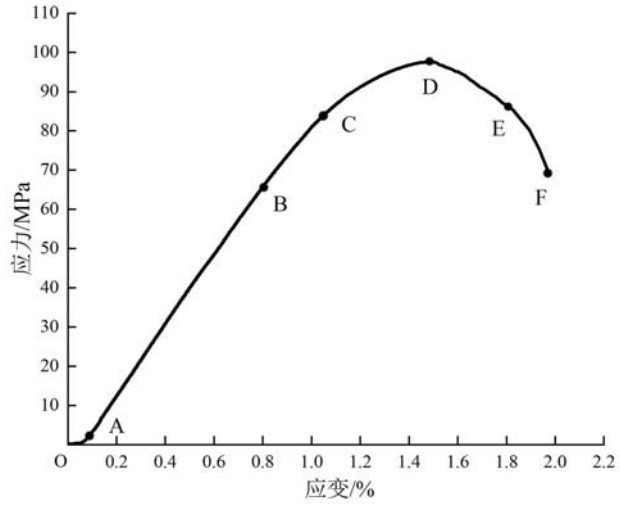


图 6 3#透明类岩石应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curve of 3# transparent rock

激光点大小可以反映出试样部分裂纹及破裂面的发育状态,基于此,将加载破坏过程分为 5 个阶段:

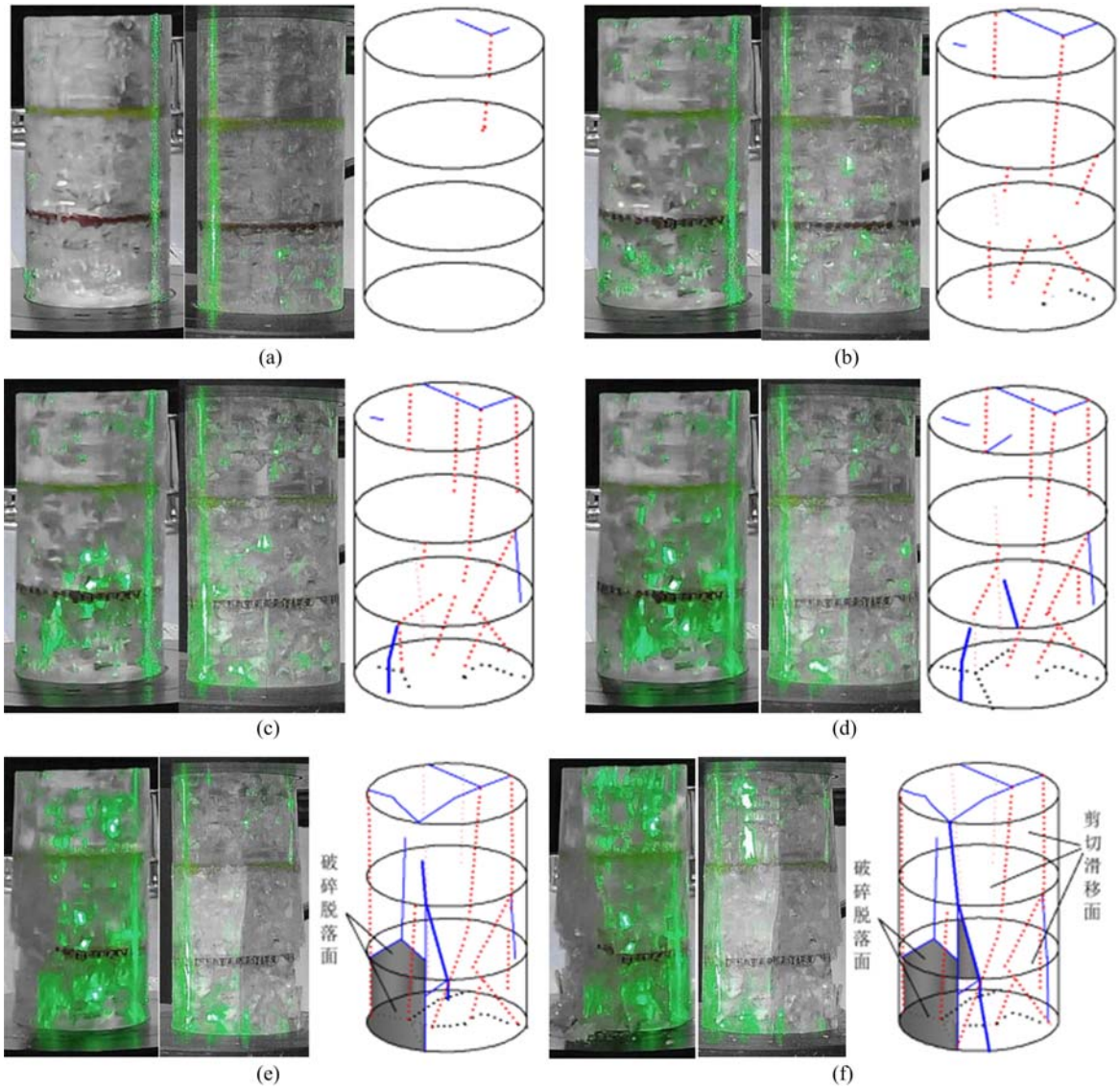


图 7　透明类岩石裂纹演化过程

Fig. 7　Crack evolution process of transparent rock

第 1 阶段(O～A 段)，压密阶段。在加载初期，曲线有较短的下弯现象，原因是透明类岩石试样浇筑过程中产生的气泡、微裂纹在压缩过程中发生了闭合导致的，与砂岩相比，透明类岩石内部较致密，压密阶段较短。在试样被压密后，内部有零星激光斑点产生，表明随荷载增加，由于试样的非均质性，内部石英砂、气泡部位产生应力集中，裂纹开始萌生，如图 7(a)所示。

第 2 阶段(A～B 段)，弹性阶段。当加载至 B 点时，内部石英砂碎裂，从无色透明逐渐变为不透明灰白色；内部零星激光绿点逐渐增多，表明内部裂纹少量发育，但开裂尺度较小，且主要位于模型两端；层理面方向产生横向张拉裂纹，上端表面形成一条主裂纹，如图 7(b)所示。

第 3 阶段(B～D 段)，裂纹的扩展阶段。该阶段应力-应变曲线的斜率不断减小，当加载至 C 点时，伴随着脆性声响，更多裂纹萌生，试样内部裂纹出现分枝并孕育出新裂纹，裂纹发育大多以层理面为起始点，底端绿色激光点连接成若干剪切面，如图 7(c)所示。当加载至峰值应力 D 点时，试样表面中端出现一条明显的主裂纹，且中端绿色激光面增大，表明裂纹向中端扩展，与其他内部裂纹贯通连接，扩展至试样表面，如图 7(d)所示。

第 4 阶段(D～E 段)，裂纹加速扩展与贯通阶段。从这一阶段开始，应力-应变曲线逐渐向下弯曲，试样表面中端主裂纹向上下两端同时扩展，绿色激光面迅速贯穿整个试样，裂纹扩展速率继续加快，大

量裂纹扩展贯通至表面,逐渐整合成几个大小不等的板、片状破裂面,如图 7(e)所示。

第 5 阶段(E～F 段),破坏阶段。伴随着颗粒弹射,整个试样处于失稳状态,随着一声脆响,试样失去承载力,岩块、岩片弹射脱落,粉末状岩屑崩落,最后形成垮落区,宏观上表现为劈裂剪切混合破坏,如图 7(f)所示。从试样的破坏过程伴随着颗粒的崩落以及破坏形态上看,试样有较高脆性。

透明类岩石试样的破裂演化过程为试样内部孔洞、裂纹等薄弱部位被压实,石英砂被压碎。透明类岩石试样内部应力集中,试样出现拉剪复合裂纹,随着荷载增加,内部裂纹向表面延伸、贯通,宏观上表现为与加载方向成一定角度的劈裂剪切混合破坏,裂纹发育大多以层理界面为起始点,层理面出现与加载方向垂直的横向拉伸裂纹。

2.3 微观裂纹分析

通过观测透明类岩石试样脱落的破裂面,可将裂纹断口分为光滑断口、纹理断口、粗糙断口(见图 8)。光滑断口如光滑的镜面,由于试样内部存在原有微裂纹、空洞,在荷载作用下,原有的微裂纹、空洞沿着这些缺陷张拉开裂产生光滑断口;断口裂纹如河流般向周围扩展,呈放射状纹理,是光滑断口与粗糙断口的过渡区;粗糙断口的粗糙度最深,其形成原因有如下 2 种:第 1 种是被压碎的石英砂等弱介质产生的粗糙断口;第 2 种是由于试样的非均质性,裂纹在扩展过程中,受到路径上石英砂等介质阻力影响,沿多处方向随机并相互交错扩展,致使断口粗糙程度最深。光滑断口主要是由张拉裂纹引起的,而粗糙断口则主要由剪切裂纹引起,这反映出透明类岩石试样的破坏是由张拉-剪切共同作用引起的。

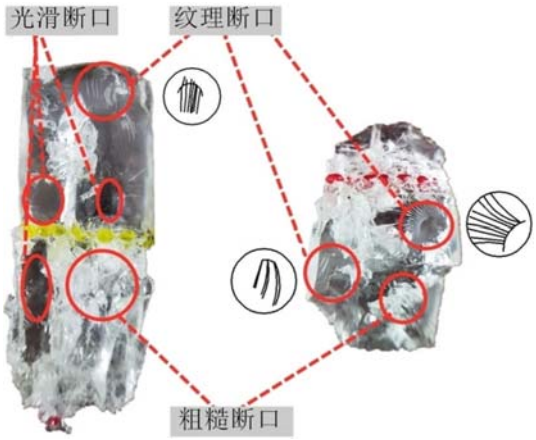


图 8 透明类岩石微观裂纹

Fig. 8 Microscopic crack of transparent rock

3 PFC2D 数值模拟研究

3.1 破裂过程分析

在 PFC2D 中,通过颗粒黏结建立模型。PFC2D 包括接触黏结模型和平行黏结模型,对于类岩石材料,平行黏结模型是一种较为理想的模型,主要参数包括粒径、法向抗拉强度、黏聚力、摩擦系数和刚度比以及阻尼比等。

建立的 PFC2D 模型高 100mm,宽 50mm,由 3696 个颗粒组成,图 9 中数值模型图片分界处颗粒表示试样层理面,将室内单轴压缩试验中的 2 个承重板简化为 2 个无摩擦刚性墙体,上墙移动,下墙固定。根据室内试验透明类岩石的应力-应变曲线特征、峰值强度及破坏模式,采用试错法[21,22]标定各类参数,其主要微观力学参数见表 2。

表 2　PFC2D 主要参数

Tab. 2　Main parameters of PFC2D

颗粒参数	数值	平行黏结模型参数	数值
颗粒粒径 /mm	0.5～0.75	平行黏结模量	3.8e9
层理粒径 /mm	0.4～0.5	平行黏结法向与切向刚度比	3.9
密度 /(kg/m^3)	2.1e3	法向临界阻尼比	0.5
颗粒间接触模量	2.4e9	法向抗拉强度	2.9e7
颗粒法向与切向刚度比	1.9	平行黏结黏聚力	6.1e7

在加载过程中，PFC2D 试样颗粒受到墙体挤压发生移动，当颗粒间应力超过给定的黏结力时，颗粒间黏结力链发生断裂，产生裂纹。图 9 为室内试验与 PFC2D 模拟试验对比图，图中透明类岩石试样室内试验与模拟试验的应力-应变曲线特征相似、破坏过程基本一致，破坏模式为与加载方向呈一定角度的劈裂剪切混合破坏。

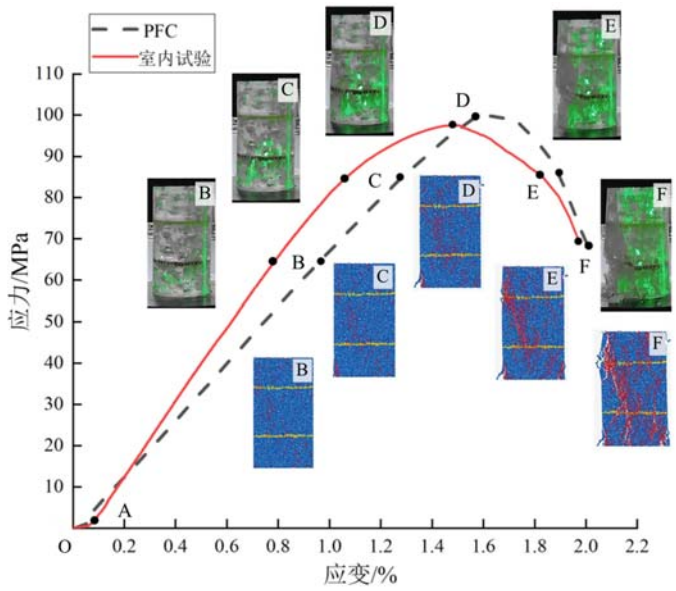


图 9　室内试验与 PFC2D 模拟试验对比图

Fig. 9　Comparison of failure process between indoor test and PFC2D numerical simulation

透明类岩石具体破坏过程为：加载初期，图 9 中 A 点无裂纹产生；加载至 B 点，颗粒间应力大于其黏结力，黏结力链断裂，层理面附近出现微裂纹，同时在模型端部出现受挤压而产生的微裂纹；加载至 C 点，裂纹数量增多，主要沿斜截面方向扩展，模型左下角大量黏结力链断开产生新裂纹，且由于裂纹贯通致使颗粒块体脱落，而其他部位裂纹发育相对较少；当曲线降至峰后 E 点时，斜截面部位新旧裂纹部分贯通，初步形成宏观破坏轮廓，且两侧有滑动错开的趋势；随后曲线降至 F 点，斜截面主裂纹沿模型完全贯通，当主裂纹扩展至下方接近层理部位时会产生分支裂纹，且分支裂纹与左下角破裂面贯通，造成块体颗粒崩落，最终表现为与加载方向呈一定角度的劈裂剪切混合破坏。由上述模拟试验过程可知，标定的微观力学参数所生成的 PFC2D 模型能再现透明类岩石在单轴加载下的破坏模式及过程。

3.2　损伤演化特征分析

在 PFC2D 中，当颗粒间应力超过给定的黏结力时，黏结力链断裂产生裂纹，模型发生损伤破坏。图 10 为单轴压缩下 PFC2D 模型裂纹数目与应力-应变的变化关系图，图中损伤变量 D 为已产生的裂纹数和裂纹总数的比值：

$$D = n/N \tag{1}$$

式中：n 为已产生的裂纹数；N 为裂纹总数 2563，数据可从 PFC2D 中获取。

根据图 10,可将模型损伤程度划分为 5 个阶段:第 1 阶段,无损伤阶段,损伤变量 D 为 0,无裂纹产生,对应前文的压密阶段(O～A 段);第 2 阶段,初始损伤阶段,损伤变量 D 小于 0.02,裂纹累积曲线增幅较小,裂纹萌生较少,扩展速率较慢,损伤发展缓慢,对应前文的弹性阶段(A～B 段);第 3 阶段,损伤发展阶段,损伤变量 D 介于 0.02～0.15,裂纹累积曲线逐渐陡峭,裂纹扩展速率加快,损伤发展加快,对应前文的裂纹扩展阶段(B～D 段);第 4 阶段,损伤不稳定发展阶段,损伤变量 D 介于 0.15～0.35,裂纹累积曲线呈现出阶梯性增长,表明部分裂纹受到荷载作用发生闭合,但整体上裂纹呈扩展趋势,且部分裂纹贯通,损伤发展迅速,对应前文的裂纹加速扩展与贯通阶段(D～E 段);第 5 阶段,损伤破坏阶段,损伤变量 D 大于 0.35,裂纹累积曲线在短时间内近乎垂直增长,大量裂纹产生并贯通形成宏观破裂面,试样发生破坏,仅这一阶段产生的裂纹数目就占裂纹总数的 65%,损伤发展剧烈,对应前文的贯通与破坏阶段(E～F 段)。

综合以上分析,在整个模型损伤演化中,裂纹数的变化反映试样损伤演化程度,损伤变量 $D=0.35$ 为模型损伤破坏的门槛值,当 $D>0.35$ 时,模型发生损伤破坏。

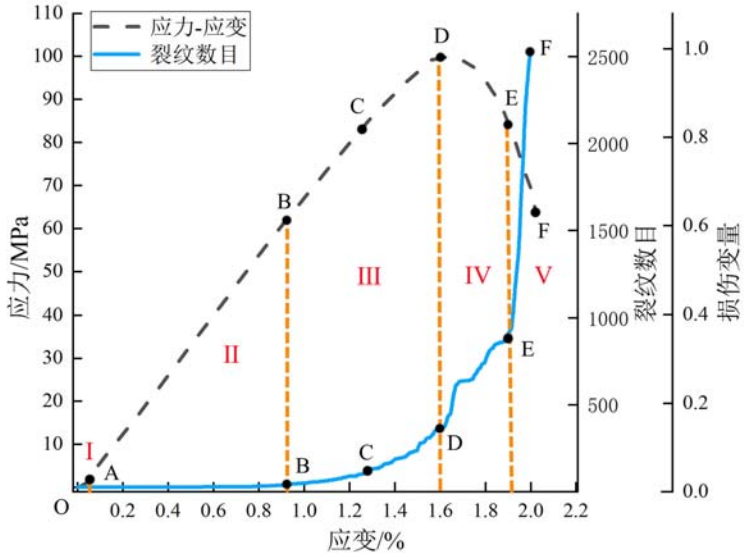


图 10 裂纹数目与应力-应变的变化关系

Fig. 10 Variation of crack number with axial strain

4 结论

(1) 制备的非均质性、各向异性的新型透明类岩石,其平均峰值强度为 98.2MPa,在砂岩强度范围内,破坏模式与砂岩相似,表现为劈裂剪切混合破坏,试验可重复性较好。

(2) 透明类岩石的破裂演化过程为最初试样内部孔洞、裂纹被压实,石英砂被压碎,应力集中,产生的拉剪复合裂纹向表面逐渐延伸、贯通,试样破坏;裂纹发育大多以层理面为起始点;按照破裂面断口粗糙程度,将其分为光滑断口、纹理断口、粗糙断口。

(3) 对比 PFC2D 模拟与室内试验,两者应力-应变曲线特征相似,破坏模式与破坏过程基本一致,PFC2D 软件能再现透明类岩石的破坏模式及其破坏过程;根据 PFC2D 裂纹数与应力-应变的变化关系,将模型损伤划分为无损伤、初始损伤、损伤发展、损伤不稳定发展、损伤破坏 5 个阶段;在整个损伤演化中,裂纹数的变化反映透明类岩石损伤演化程度,当损伤变量 D 大于损伤门槛值 0.35 时,模型发生破坏。

参考文献:

[1] 董志凯, 李浩然, 欧阳作林, 等. 单轴荷载下大理岩声发射时空演化特征研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(S2): 609－615 (DONG Zhikai, LI Haoran, OUYANG Zuolin, et al. Reserach on temporal and spatial

evolution characteristics of acoustic emission of marble under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(S2):609－615 (in Chinese))

[2] 邓川. 循环荷载作用下煤岩力学及声发射特征研究[J]. 煤矿安全, 2020, 51(2):63－69 (DENG Chuan. Study on mechanical and acoustic emission characteristics of coal rock under cyclic loading[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(2):63－69 (in Chinese))

[3] 耿志伟, 苏占东, 王磊, 等. 高径比对砂岩单轴压缩声发射特性的影响研究[J]. 实验力学, 2021, 36(2):250－258 (GENG Zhiwei, SU Zhandong, WANG Lei, et al. Effect of height diameter ratio on acoustic emission characteristics of sandstone under uniaxial compression[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2021, 36(2):250－258 (in Chinese))

[4] 赵阳, 周宏伟, 钟江城. 人工砂岩物理力学性质的实验研究[J]. 实验力学, 2018, 33(3):385－394 (ZHAO Yang, ZHOU Hongwei, ZHONG Jiangcheng. Experimental study on physical and mechanical properties of artificial sandstone[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(3):385－394 (in Chinese))

[5] 王本鑫, 金爱兵, 赵怡晴, 等. 基于 CT 扫描的含非贯通节理 3D 打印试件破裂规律试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(10):3920－3927, 3936 (WANG Benxin, JIN Aibing, ZHAO Yiqing, et al. Fracture law of 3D printing specimen with non-consecutive joints based on CT scanning[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(10):3920－3927, 3936 (in Chinese))

[6] Changxing Zhu, Weidong Li, Yeming An. Split Hopkinson pressure bar test and its numerical analysis based on transparent rock samples[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2022, 26(9):4128－4135.

[7] Chong Shi, Chenghui Zhang, Cheng Jin, 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):1－11.

[8] 林恒星, 朱珍德, 孙亚霖, 等.透明类岩石预制裂隙不同赋存方式起裂扩展研究[J]. 固体力学学报, 2015, 36(S1):58－64 (LIN Hengxing, ZHU Zhende, SUN Yalin, et al. Experimental study on PRE-existing crack in different ways propagation and occurrence in transparent rock[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2015, 36(S1):58－64 (in Chinese))

[9] 王海军, 张九丹, 任然, 等. 含三维内裂纹透明类岩石材料破坏红外热像试验研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(12):228－234 (WANG Haijun, ZHANG Jiudan, REN Ran, et al. Experimental study on infrared thermal image of transparent rock-like material failure with 3-D internal cracks[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(12):228－234 (in Chinese))

[10] 林志斌, 张勃阳, 李元海, 等. 透明岩体三维数字照相量测技术开发与应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(5):1077－1084 (LIN Zhibin, ZHANG Boyang, LI Yuanhai, et al. Development of three-dimensional digital photogrammetry technology and its application in transparent roc[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(5):1077－1084 (in Chinese))

[11] 任超, 孙晓明, 李元海, 等. 深部复合地层 TBM 隧道支护结构作用的透明岩体试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(1):59－69 (REN Chao, SUN Xiaoming, LI Yuanhai, et al. Experimental study on TBM tunnel support structure in deep composite stratum using transparent rock[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(1):59－69 (in Chinese))

[12] Zhou X P, Fu L, Ju W, et al. An experimental study of the mechanical and fracturing behavior in PMMA specimen containing multiple 3D embedded flaws under uniaxial compression[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics,, 2019, 101:207－216.

[13] 刘华博, 孟凡净, 花少震, 等. 三维打印半透明材料本构关系及应用探讨[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2021, 40(6):176－181 (LIU Huabo, MENG Fanjing, HUA Shaozhen, et al. Discussion on the constitutive relation and application of three-dimensional printing semitransparent material[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2021, 40(6):176－181 (in Chinese))

[14] 舒杨, 吴继敏, 岳翎, 等. 基于颗粒流数值模拟的交叉裂隙岩体剪切力学特征研究[J]. 水电能源科学, 2017, 35(1):132－137 (SHU Yang, WU Jiming, YUE Ling, et al. Study on shear mechanical characteristics of cross fractured rock mass based on particle flow numerical simulation[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(1):132－137 (in Chinese))

[15] 王俊光，杨鹏锦，梁冰，等. 基于颗粒流程序的不同加卸载条件下泥岩蠕变破裂规律研究[J]. 实验力学，2019，34(5)：873－882 (WANG Junguang，YANG Pengjin，LIANG Bing，et al. Study on creep fracture law of mudstone under different loading and unloading conditions based on particle flow code[J]. Journal of Experimental Mechanics，2019，34(5)：873－882 (in Chinese))

[16] 李学华，牛志军，姚强岭，等. 孔洞式三叉裂隙砂岩裂纹扩展特征颗粒流分析[J]. 煤炭学报，2020，45(11)：3735－3747 (LI Xuehua，NIU Zhijun，YAO Qiangling，et al. Particle flow analysis of crack propagation characteristics of hole-type trident cracks sandstone[J]. Journal of China Coal Society，2020，45(11)：3735－3747 (in Chinese))

[17] 王煜，付建新，汪杰. 单裂隙岩石力学特性的单轴加载速率效应及破裂细观机理研究[J]. 矿业研究与开发，2020，40(8)：66－74 (WANG Yu，FU Jianxin，WANG Jie. Study on uniaxial loading rate effect and fracture meso mechanism of mechanical properties of single fractured rock[J]. Mining Research and Development，2020，40(8)：66－74 (in Chinese))

[18] Fakhimi A，Hemami B. Axial splitting of rocks under uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences，2015，79：124－134.

[19] 宁汉章. 富水隧道砂岩单轴压缩力学特性试验研究[J]. 资源信息与工程，2020，35(1)：84－87，93 (NING Hanzhang. Experimental study on mechanical properties of sandstone in water-rich tunnel under uniaxial compression[J]. Resource information and Engineering，2020，35(1)：84－87，93 (in Chinese))

[20] 侯宪港. 单轴压缩条件下弱胶结砂岩的力学及声发射特性研究[D]. 沈阳：东北大学，2014 (HOU Xiangang. Study on mechanical and acoustic emission characteristics of weakly cemented sandstone under uniaxial compression [D]. Shenyang：Northeast University，2014 (in Chinese))

[21] 陈鹏宇，孔莹，余宏明. 岩石单轴压缩 PFC^{2D} 模型细观参数标定研究[J]. 地下空间与工程学报，2018，14(5)：1240－1249 (CHEN Pengyu，KONG Ying，YU Hongming. Research on the calibration method of microparameters of a uniaxial compression PFC^{2D} model for rock[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering，2018，14(5)：1240－1249 (in Chinese))

[22] 龙恩林，陈俊智. 花岗岩颗粒流模型循环压缩作用下裂纹特征分析[J]. 中国安全生产科学技术，2019，15(4)：39－44 (LONG Enlin，CHEN Junzhi. Analysis on energy characteristics of granite particle flow model under cyclic compression[J]. Journal of Safety Science and Technology，2019，15(4)：39－44 (in Chinese))

Research on damage evolution characteristics of transparent rock under uniaxial compression

ZHU Changxing，AN Yeming，LI Weidong

(School of Civil Engineering，Henan Polytechnic University，Jiaozuo 454000，Henan，China)

Abstract：To analyze the deformation and failure characteristics and internal crack propagation process of rock，a new heterogeneous and anisotropic transparent rock was prepared with epoxy resin，curing agent，fused quartz sand，and glass sand. Its failure mode and crack evolution process were analyzed by indoor uniaxial compression test and particle flow (PFC2D) numerical simulation. In the laboratory test，the peak strength of transparent rock is within the range of sandstone strength，and the failure mode is similar to sandstone，showing split shear mixed failure. Most of the cracks start from the bedding plane. Furthermore，compared with PFC2D numerical simulation and laboratory test，their stress-strain curves are similar，and the final failure mode and process are basically the same. In addition，based on the PFC2D crack cumulative evolution curve of transparent rock，the damage is divided into five stages：no damage，initial damage，damage development，accelerated damage development，and damage failure，and the damage threshold is determined. The test results can provide reference for direct observation of crack propagation in rock.

Keywords：transparent rock mass；epoxy resin；crack propagation；PFC2D；damage evolution