DOI：10.3724/1000-6915.jrme.2025.0488

基于 PVA 水溶材料的含随机分布裂隙类岩石试件的制备及强度模型

石 浩[1, 2*]，冯吉昊[1]，吴疆宇[2]，荣传新[1]，宋 雷[2]，张后全[2]，赵 艺[1]

（1. 安徽理工大学 土木建筑学院，安徽 淮南 232001；2. 中国矿业大学 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室，江苏 徐州 221116）

摘要：研究随机分布裂隙与岩石强度间的定量关系，对地下工程灾害防控意义重大。结合聚乙烯醇（PVA）水溶材料，探索含随机分布裂隙类岩石试件的制备方法。在此基础上，通过试验分析裂隙分布及围压影响下的岩石抗压强度演化规律；统筹考虑裂隙数量、尺度、倾角及围压的影响，通过准确量化单个裂隙的损伤效应并合理表征分布裂隙的统计特征，建立裂隙岩石强度模型，并对其可靠性进行验证。研究结果表明：（1）将 PVA 水溶材料与水泥砂浆一同搅拌浇筑，并对养护完成后的试件进行温浴处理，实现了含随机分布裂隙类岩石试件的制备。（2）岩石强度与围压及裂隙总面积分别呈正、负线性相关关系；保持裂隙总面积不变，岩石强度与裂隙数量呈正线性关系。（3）理论强度与试验强度高度吻合，证明了所建模型能够有效描述围压、裂隙分布参数耦合影响下的岩石强度演化规律。（4）岩石强度对围压变化的敏感度与裂隙总面积呈负相关，而岩石强度对裂隙总面积变化的敏感度与围压呈正相关。

关键词：岩石力学；PVA 水溶材料；随机分布裂隙；裂隙岩石制备；强度特性；强度模型

中图分类号：TU 45 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－6915(2026)01－0099－19

***通信作者：**石 浩（1991－），现任副教授，主要从事岩石力学试验及理论方面的研究工作。E-mail：shihao_aust@163.com

Preparation and strength model of rock-like specimens containing randomly distributed fractures based on PVA water-soluble material

SHI Hao[1, 2*], FENG Jihao[1], WU Jiangyu[2], RONG Chuanxin[1], SONG Lei[2], ZHANG Houquan[2], ZHAO Yi[1]

(1. *School of Civil Engineering and Architecture*, *Anhui University of Science and Technology*, *Huainan*, *Anhui* 232001, *China*; 2. *State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering*, *China University of Mining and Technology*, *Xuzhou*, *Jiangsu* 221116, *China*)

Abstract: Quantifying rock strength with randomly distributed fractures is essential for preventing and controlling disasters in underground engineering. This study investigates the incorporation of polyvinyl alcohol (PVA) water-soluble materials in the preparation of rock specimens. The evolution of rock compressive strength in specimens featuring randomly distributed fractures prepared with PVA materials is analyzed, taking into account the influence of confining pressure. Ultimately, a strength model for fractured rock is established by accurately quantifying the damage effects of individual fractures and characterizing the statistical properties of distributed fractures, with its reliability subsequently verified. The results indicate that: (1) Rock specimens with randomly distributed fractures are prepared by mixing PVA water-soluble materials with cement mortar, pouring the mixture, and subjecting the cured specimens to a warm bath treatment. (2) Rock strength exhibits a positive linear relationship with confining

收稿日期：2025－07－07；**修回日期：**2025－08－26

基金项目：国家自然科学基金资助项目（52404108）

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.52404108)

pressure and a negative linear relationship with total fracture area. While maintaining a constant total fracture area, rock strength demonstrates a positive linear correlation with the number of fractures. (3) The theoretical strength model successfully reproduces the experimental strength, demonstrating that the established model effectively characterizes the evolution of rock strength under the combined effects of confining pressure and fracture distribution parameters. (4) The sensitivity of rock strength to confining pressure is negatively correlated with total fracture area, while its sensitivity to changes in total fracture area shows a positive correlation with confining pressure.

Key words: rock mechanics; PVA water-soluble material; randomly distributed fractures; fractured rock preparation; strength characteristics; strength model

***Corresponding author:** SHI Hao (1991－), associate professor, is engaged in research on experimental and theoretical research in rock mechanics. E-mail: shihao_aust@163.com

1　引　言

岩石作为天然地质材料，受温度、工程扰动、化学侵蚀及构造运动等诸多因素的耦合影响[1-4]，内部赋存尺度跨越多数量级(从亚微米～千米)的结构缺陷，如孔隙、裂隙、节理、断层等[5-8]。裂隙等缺陷的存在，致使岩石材料呈现显著的非均质性及各向异性特征，其数量、类型、组合形式等赋存状态与岩石强度直接关联[9-11]。对裂隙岩石强度特性认识不清，难以充分掌握各类岩石灾害的孕育机制，更无法预测其发展趋势，严重制约深部资源开采、核废料处置等工程的灾变防控效果。因此，为了保障各类工程的有序建设以及施工人员、设备的安全，有必要就岩石内部裂隙分布对其强度特性的影响规律开展研究。

实验室制备裂隙岩石试件是对其强度特性等进行研究的物理基础，在岩石力学领域一直备受关注。天然岩石试件裂隙的预制通常采用金刚砂线或水力切割技术实现[12-14]，由于砂线或水力刀本身的尺寸不可忽略，辅以加工误差，导致所制作的裂隙仅可能是张开型的；并且切割加工方法所得裂隙直接贯穿试件，基本不具备三维特征[14-15]。此外，受切割加工合格率的影响，裂隙预制数量一般不多于 3[16-19]。相较于天然岩石，采用类岩石材料(如石膏、树脂以及水泥砂浆等)制备试件，可通过埋置金属片或云母片的方式实现裂隙预制[20-21]；但为了消除预埋材料对试件力学性质的干扰，一般需要在养护过程中及时将其拔出去除，致使试件产生额外损伤。近年来，Y. Ju 等[22-24]利用 X-CT 扫描获取裂隙信息，并通过 3D 打印技术制备了内置裂隙试件。但目前为止，由于 X-CT 和 3D 打印精度的限制[22]，该技术难以充分还原破裂细节，主要应用于含宏观破裂面试件的重建[22-23]。总之，无论是岩石材料还是类岩石材料，其内部裂隙的制备一般均采用较规则的裂隙形态，主要体现在二维角度，且数目较少[20, 25]。鉴于天然岩体是多裂隙介质，目前所制备的裂隙试件远无法有效还原实际裂隙岩石的物理力学性质[20, 26]。在裂隙岩石的实验室制备过程中，如何避免研究者意志对裂隙形态及分布的影响，实现对预制裂隙的随机分布及其影响的统计研究，是目前亟待解决的技术难题。

由于裂隙试件制备的限制，目前对裂隙岩石强度特性的试验研究主要集中在预制单、双及三裂隙层面上。研究人员通过改变裂隙的数量[21, 27]、长度[28-29]、倾角[25, 30-31]、位置[32-33]、粗糙度[34]、张开程度[33, 35]及组合方式[33, 36-37]等，分析岩石强度演化以及加载破坏过程中的裂隙扩展规律，存在的突出问题如下：(1) 在研究对象层面，受试件制备所限，没有充分考虑裂隙的形状、贯通模式及裂隙间的三维组合方式对试件强度特性的影响[1]；(2) 在分析层面，通常花费大量篇幅对试验过程或现象进行主观描述，缺乏理论上的有效论证[1, 6]；(3) 在成果层面，所得规律难以推广应用于实际裂隙岩石，工程应用及借鉴价值有限[20]。由于在分布裂隙试件的室内制备方面存在难以突破的瓶颈，研究人员转而在数值模拟领域耕耘求索。利用数值方法能够较容易建立裂隙岩石试件，裂隙种类也可以根据研究需要自行设定，包括不规则内置裂隙及裂隙群等[7, 9, 23]。但不可否认的是，数值模拟本身存在固有的缺陷，主要体现在本构模型选择及模型参数确定的合理性方面，是否有数据支撑直接决定模拟结果是否有效[1]。然而，分布裂隙岩石强度特性在试验及理论研究方面的成果十分缺乏[1, 6, 9]，导致数值模拟方法暂时只能是“空中楼阁”。可以预见的是，在分布裂隙试件制作及试验研究方面一旦取得突破，数值模拟方法便具有极为广阔的研究及应用空间。

笔者团队注意到，随着材料科学的发展，多类型的自融材料(在某种临界条件下会发生不可逆融

化或分解的材料，如超支化聚胺酯、锡片、铟片以及聚乙烯醇(PVA)等材料，其力学性质都易受高低温的影响发生不可逆弱化)逐渐被发现并开发出来。材料的自融特性规避了利用其制作裂隙需要额外拔出的操作，由此可解除裂隙预制数量、形态、位置范围及分布形式的限制。若能成功将其应用于含分布裂隙岩石试件的制备，则对裂隙形态的分析可由目前的二维层面延伸至复杂但更为真实的三维空间，这对裂隙岩石性质的研究无疑具有里程碑式的意义。赵洪宝等[20]回顾现有裂隙岩石研究成果后指出，针对裂隙岩石强度特性的研究不应仅着眼于较小尺度下人为设定的各种结构缺陷的影响，而是应将裂隙分布信息纳入研究范畴；在此基础上，更重要的是能够建立反映三维裂隙分布信息对岩石强度影响的相关理论，才能真正显著提升研究成果的工程应用价值。

因此，本文拟结合自融材料，探索含随机分布裂隙类岩石试件的制备方法；在此基础上，通过单、三轴压缩试验，对裂隙分布参数及围压影响下的岩石强度演化规律进行分析；然后，考虑裂隙分布参数以及围压的影响，通过准确量化单个裂隙的损伤效应，并合理表征分布裂隙的统计特征，推导并建立裂隙岩石的强度模型；最后，基于试验结果，探讨所建模型的可靠性及岩石强度的四维空间分布规律。

2　随机分布裂隙类岩石试件的制备

2.1　类岩石相似材料配制

针对分布裂隙参数对岩石强度的定量研究，采用天然岩石加工、制作标准试件不具备可行性，因此，本文基于相似模拟理论，采用类岩石材料模拟天然裂隙岩石的力学行为。以淮南矿区深井巷道围岩为模拟对象，钻芯取样并加工成标准的圆柱体试件后开展单轴压缩试验。考虑测试结果离散性的影响，试件制备数量为 3 个，编号分别为 Y－1，Y－2 及 Y－3。试验机选择与后文一致，为中国矿业大学 GCTS 单、三轴加载系统，如图 1 所示。

试验全程采用位移控制，加载速度为 0.002 mm/s，得到的全应力－应变曲线及破坏形态如图 2 所示。可以看出，在峰前阶段，试件先后经历了孔隙压密阶段、弹性变形阶段和塑性变形阶段；峰后应力迅速跌落，呈现出明显的脆性破坏特征，对应试件发生劈裂破坏。鉴于本文重在分析裂隙岩石的变形及强度特性，可计算得到 3 个试件强度及弹性

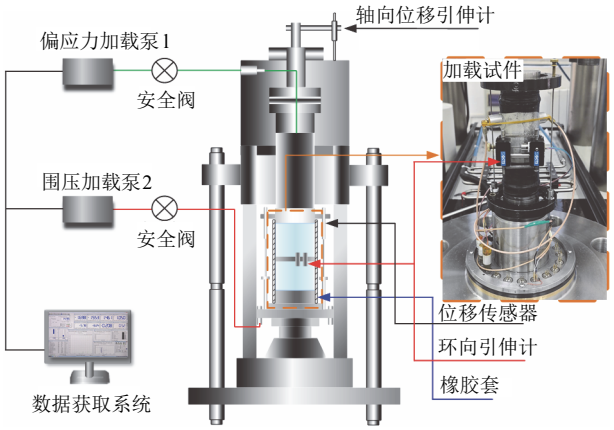


图 1　GCTS 单、三轴加载系统

Fig.1　GCTS uniaxial and triaxial loading system

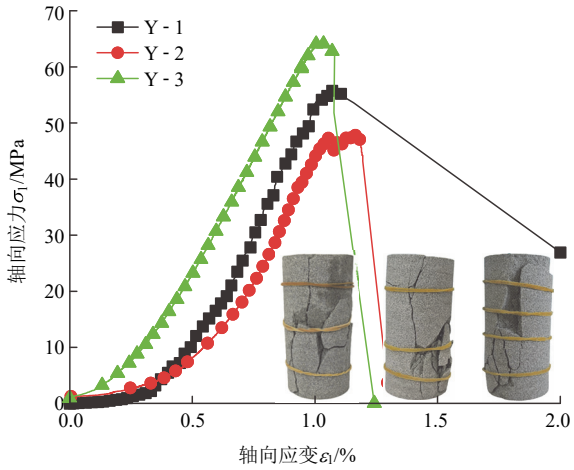


图 2　天然砂岩试件全应力－应变曲线及破坏模式

Fig.2　Complete stress-strain curves and failure modes of natural sandstone specimens

模量的平均值，分别为 56.06 MPa 及 8.90 GPa，以此为主要依据，配置类岩石相似材料。

为了降低对裂隙位置赋存随机性的影响，相似材料粒径需尽可能小。基于此考量并综合现有类岩石相似材料的力学特性，确定选用河砂(粒径≤1 mm)和II型硅酸盐水泥(P. II 52.5R)作为相似材料配置类岩石试件。在参考刘一鸣等[19-21]研究成果，并经多次试验尝试的基础上，得出与图 2 中天然岩石试件力学特性最为接近的 3 组材料配比方案及对应试件的变形、强度如表 1 所示。

根据表 1 可知，考虑试件测试结果离散性的影响，在每一配比下测试试件数同样设置为 3 个。可以看出，试件强度随水灰比的增加而降低，水灰比由 0.35 增加至 0.45 时，试件强度的平均降低幅度达 7.81 MPa；而弹性模量随水灰比增加整体上呈先增加后降低的变化趋势。仔细观察可知，S1 配比

表 1　类岩石材料配比方案及试件单轴压缩变形、强度测试结果

Table 1　Mix ratio design of rock-like materials and deformation and strength test results under uniaxial compression

配比编号 (mix number)	材料质量配比(水泥:河砂:水) (mass ratio(cement:sand:water))	单轴压缩强度(uniaxial compressive strength) σ_{1c} /MPa				弹性模量(elastic modulus)E/GPa			
		1#	2#	3#	平均值(average value)	1#	2#	3#	平均值(average value)
S1	1:1:0.35	60.69*	58.16	61.59	60.15	8.06	6.96	8.96	7.99
S2	1:1:0.40	54.27	56.78*	57.63	56.23	7.45	8.96	9.06	8.49
S3	1:1:0.45	55.30	54.74*	53.78	54.61	7.32	7.22	8.25	7.59

注：带“*”数据表示在对应配比下最接近平均值。

下 2#试件的数据出现异常，剔除该数据后弹性模量整体上符合单调降低规律。另外，表 1 结果显示，在同一配比下试件单轴抗压强度的离散性较小，表明试验结果的稳定性较高。以此为前提，在同一配比下，选取抗压强度最接近平均值的试件(见表 1 中带“*”的数值)作为典型代表，将其与最接近天然岩石强度平均值的试件 Y－2 进行曲线走势及破坏模式的对比分析，如图 3 所示。

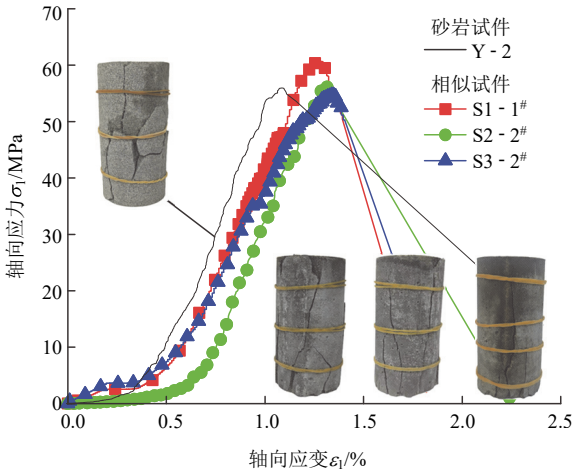


图 3　天然岩石及类岩石典型试件的全应力－应变曲线及破坏模式对比

Fig.3　Comparison of complete stress-strain curves and failure modes between natural rock and typical rock-like specimens

根据图 3 可知，3 种配比下的试件曲线及破坏模式与天然岩石均较为相似，即孔隙压密、线弹性及塑性屈服过程在峰前阶段均有体现，峰后阶段应力快速跌落，呈现出明显的脆性劈裂破坏特征，证明了所选相似材料的合理性。在此基础上，结合表 1 数据可知，S1，S2，S3 配比下的试件强度及弹性模量平均值相对天然岩石试件的误差分别为 7.3%，10.2%，0.3%及 4.6%，2.6%，14.7%，表明 S2 配比下的类岩石试件的变形及强度特性与天然岩石试件具备更高的相似性。鉴于此，本文采用 S2 配比进行类岩石试件的制备。

2.2　裂隙预制材料的选择

区别于传统裂隙预制使用的预埋薄片并拔出的方法，本文创新性地使用 PVA 水溶材料进行裂隙预制。PVA 水溶材料的主要组成包括 PVA 及淀粉[38]，其中，PVA 的含量占比超过 75%，对材料强度及透明度等参数起主导作用[39]。PVA 是一种有机聚合物，化学式为$[\text{-CH}_2\text{-CHOH-}]_n$，分子结构如图 4 所示。由图可知，PVA 本身的主链由碳－碳单键构成，化学性质相对稳定；但在一定的温度及酸碱条件下，PVA 能够发生水溶反应，生成 CO_2 和 H_2O，反应过程如下式[39]：

$$\text{PVA}+\text{H}_2\text{O}\rightarrow\text{CH}_3\text{CHO}+\text{CH}_3\text{COOH} \tag{1a}$$

$$\text{CH}_3\text{CHO}+\text{O}_2\rightarrow\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O} \tag{1b}$$

$$\text{CH}_3\text{COOH}\rightarrow\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O} \tag{1c}$$

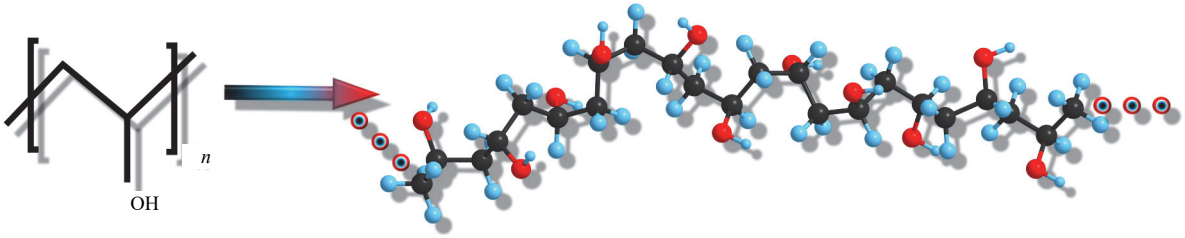


图 4　PVA 分子结构

Fig.4　Molecular structure of PVA

不考虑酸碱条件情况下，PVA 的水溶温度为 80 ℃～90 ℃；通过掺加淀粉、表面活性剂、增塑剂和防黏剂等，能够使复合材料的水溶温度下探至 40 ℃以下[39-40]，该特性使其在可降解包装及洗衣凝珠等领域被广泛使用。相对其他自融类材料(如超支化聚胺酯、锡片、铟片等)，PVA 水溶材料自融温度可调节至常温附近[39]，较为温和，能够降低溶解操作本身对试件造成的影响。根据本文研究要求，定制的 PVA 水溶材料为膜状，厚度为 80 μm，水溶温度介于 50 ℃～55 ℃范围。

2.3　随机分布裂隙试件分组试验方案

本文同时考虑预制裂隙总面积 S、数量 N 及围压 σ_3 的耦合影响，设计的裂隙试件分组方案如下：

(1) 按照预制裂隙总面积分别为 6.25 cm^2(2.5 cm×2.5 cm)，25 cm^2(5.0 cm×5.0 cm)，56.25 cm^2(7.5 cm×7.5 cm)，100 cm^2(10.0 cm×10.0 cm)，156.25 cm^2(15.0 cm×15.0 cm)制备 5 组试件，依次命名为 A～E 组，如图 5 所示。

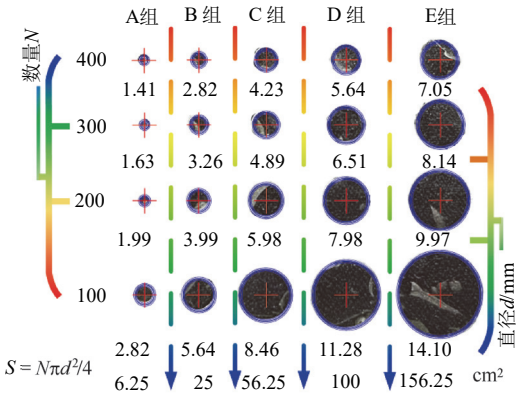


图 5　裂隙试件分组信息

Fig.5　Grouping information of fractured specimens

(2) 各组内按照裂隙数量分别为 100，200，300，400，再对预制裂隙总面积进行均分，由此可计算出对应的单个裂隙面积 $s(S/N)$。为方便后文理论分析，设计裂隙形状为标准圆形，故易计算出单裂隙直径 d。在此基础上，利用高精度激光切割设备对 PVA 水溶材料进行裁切，即可获得对应的裂隙预埋单元(见图 5)。

(3) 针对图 5 中所有裂隙数量与单裂隙直径组合对应的试件，加载围压均设置 4 个梯度，分别为 0 MPa(单轴)，5，10 及 15 MPa。考虑试件强度离散性的影响，同一组合参数下(裂隙总面积 S、裂隙数量 N、围压 σ_3)制备 3 个试件，并根据试验结果是否存在异常考虑补充。

综上可知，在不考虑试验结果异常的情况下，共需制备 5(裂隙总面积 S)×4(裂隙数量 N)×4(围压 σ_3)×3(组合参数试件)=240 个裂隙试件。此外，为了量化分析裂隙分布及水溶操作对试件损伤的影响，需同时平行制备相应的完整试件。

2.4　随机分布裂隙试件制备流程

裂隙试件制作流程如图 6 所示。首先根据节 2.1 确定的类岩石相似材料、配比以及节 2.2 设计的裂隙、围压组合信息进行备料；而后使用砂浆搅拌机先干拌均匀再进行湿拌，减少湿拌时间，以降低搅拌过程对 PVA 水溶材料的撕扯效应；搅拌完成后，将混合料浇筑至钢质模具中并进行振动，振动频率为 2 860 次/min，时长为 15～20 s，以表面泛浆、气泡基本消除为终止条件；待试件成型后(约 24 h)，拆模放入养护箱进行为期 28 d 的标准养护。

养护完成后的各组试件如图 7 所示，裂隙试件编号为组别与裂隙数量简写的组合。以试件编号 A－1 为例，A 表示 A 组试件，对应的预制裂隙总面积 S = 6.25 cm^2，1 表示裂隙数量 N = 100。图 7 中，温浴组试件不含裂隙，用作与完整试件对比，分析试件经水溶操作制备裂隙过程中的损伤情况。将裂隙试件及温浴试件完全浸泡在纯净温水中，使用智能温控装置保证不同区域的水温均匀，并将其严格控制在(55±0.5) ℃范围内。经预试验确认，浸泡时长达 6 h 才能保障 PVA 水溶材料完全溶解，实际试验浸泡时长为 12 h。浸泡完成后，A～E 组统一选取裂隙数为 400 的试件进行 CT 扫描分析，结果如图 8 所示。

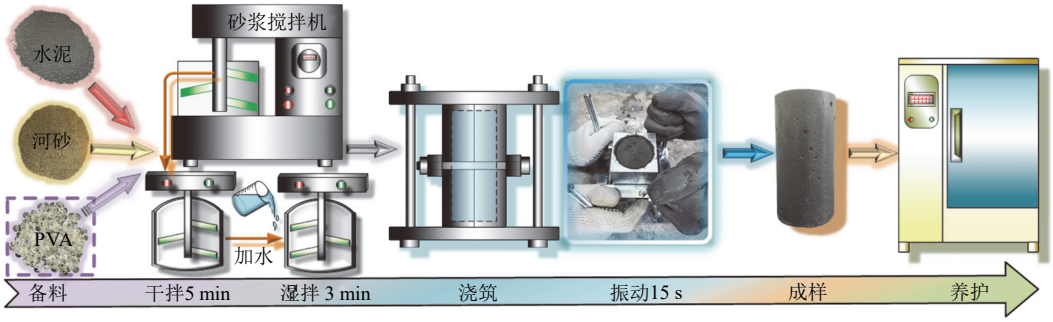


图 6　裂隙试件浇筑及养护流程

Fig.6　Casting and curing process of fractured specimens

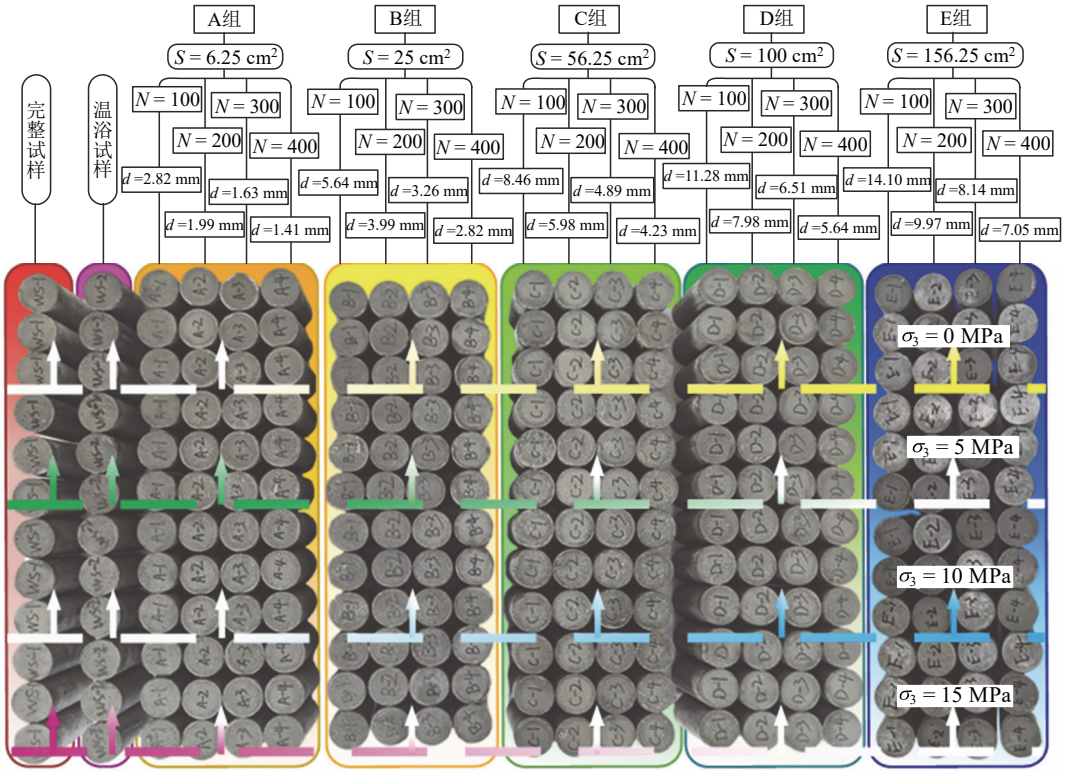
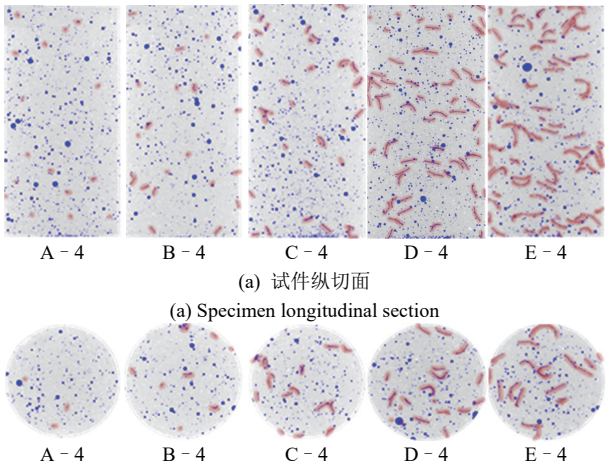


图 7　养护完成后的标准试件

Fig.7　Standard specimens after curing



(a) 试件纵切面

(a) Specimen longitudinal section

(b) 试件横切面

(b) Specimen transverse section

图 8　不同裂隙总面积下的试件 CT 扫描切面(N = 400)

Fig.8　CT scan sections of specimens under different total fracture areas(N = 400)

根据图 8 可知，除 A 组试件预制裂隙因面积较小识别相对困难外，B～E 组裂隙均较为清晰，验证了水溶温度、浸泡时长设置的合理性。使用 PVA 水溶材料制备裂隙试件的难点在于水溶温度的选择，温度过高可能导致试件因温浴操作产生额外损伤，而温度过低可能因试件初凝过程释放的水化热造成材料提前溶解。但仔细观察图 8 可知，无论单裂隙面积大小，各组试件内部的裂隙尺寸均基本一致，且十分均匀，说明对于本文定制的 PVA 水溶材料，其在温浴操作前是完整的。由此可推断出，受所研究试件尺寸的影响，试件在浇筑完成后至拆模养护前的水化温升效应不会造成 PVA 材料提前溶解[41]；实测结果也证明了这一结论，试件在 27 ℃环境温度下的温升最大幅值仅约 7 ℃。此外，图 8 也证明了 PVA 水溶材料不会在混合搅拌过程中发生撕扯破断。需要指出的是，试件浇筑过程虽有振动操作，但仍不可避免地存在一定数量的孔隙(见图 8 中的蓝色圆点)，完整试件利用水饱和法测得的孔隙率为 17.87%。考虑到相似试件的材料是以岩石试件变形、强度及破坏模式作为参照依据配置的(见节 2.1)，本质上已排除了孔隙分布对试件强度的削弱作用。此外，裂隙试件与完整试件的胶凝材料组成完全一致，两者的差异仅在于分布裂隙，故基于本文制备的裂隙试件分析裂隙分布等参数对岩石变形、强度特性的影响是可行的。

2.5　水溶操作影响分析

虽然裂隙试件与完整试件的物理组成差异仅为裂隙结构，但裂隙试件在制备过程中需要进行温浴这一重要操作，需对该操作产生的影响进行分析，以判断裂隙试件与完整试件的强度差值是否能够完全代表由分布裂隙引发的损伤。利用图 1 所示的 GCTS 试验机对图 7 中的完整试件及温浴试件进行单、三轴压缩试验，所得强度对比情况如图 9 所示。

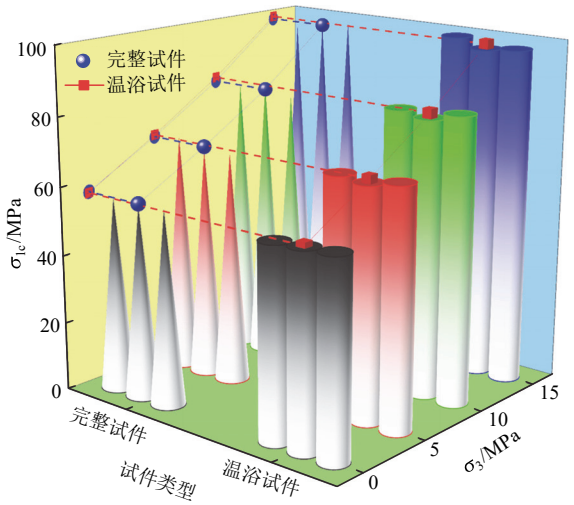


图 9　不同围压下完整试件与温浴试件强度对比

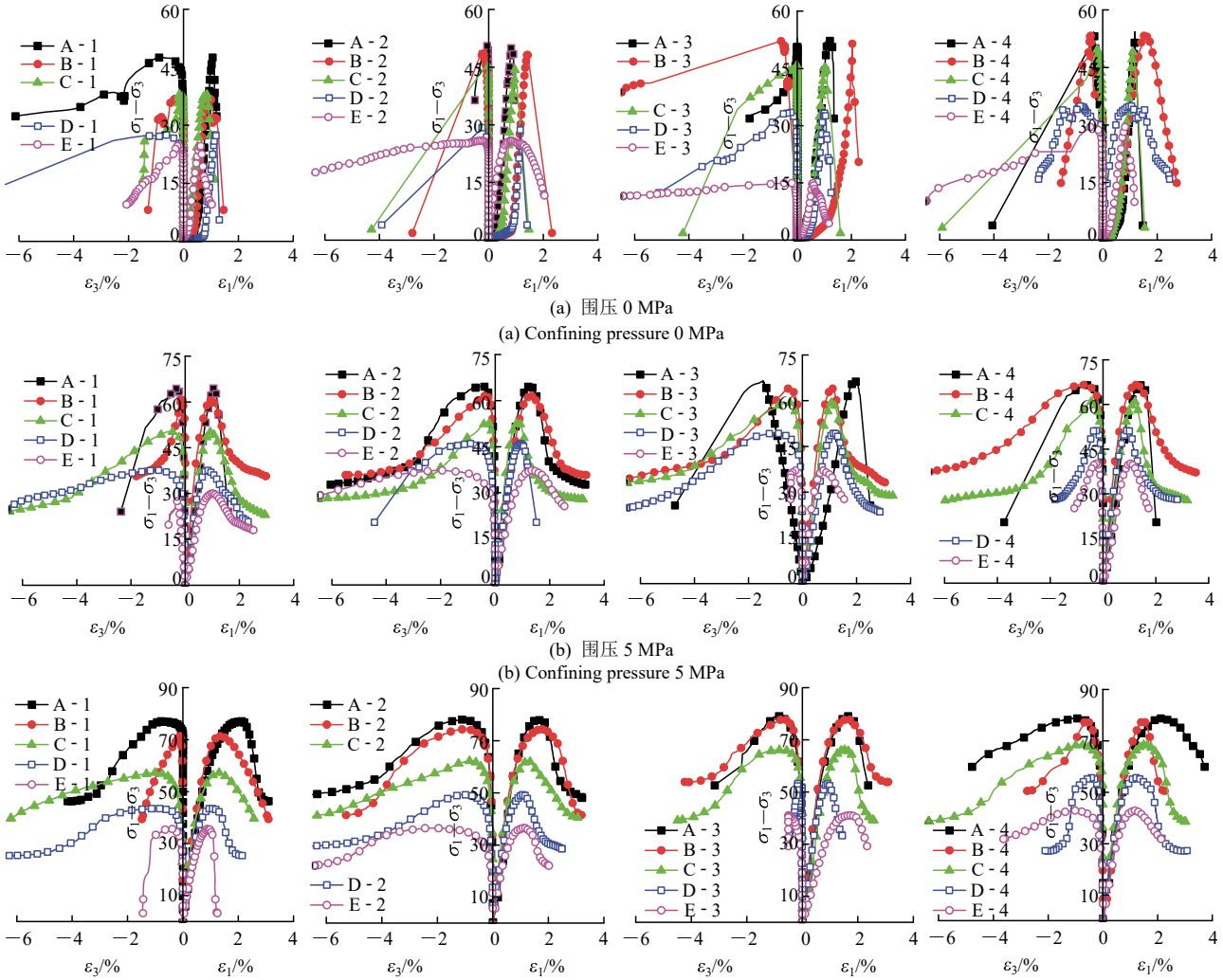
Fig.9　Strength comparison between intact specimens and temperature-bath specimens under different confining pressures

图 9 显示，完整试件及温浴试件在不同围压下的强度离散性均较小，并且两者的均值强度高度重合。计算可得最大相对误差在围压为 10 MPa 下取得，仅约为 3%。表明针对本文设定的水溶温度，温浴操作不会对试件造成实质性损伤。观察平均强度投影曲线可以看出，温浴试件强度整体上略高于完整试件，这是因为水溶温度(55 ℃±0.5 ℃)高于标准养护温度(20 ℃±2 ℃)，更利于岩石相似材料强度的增长。总之，温浴操作的影响可以忽略，裂隙试件相对完整试件的损伤可认为完全由分布裂隙导致的。

3　随机分布裂隙岩石的强度特性

3.1　裂隙试件的全应力－应变曲线

针对养护完成后的裂隙试件，使用图 1 所示的 GCTS 试验机进行单、三轴加载。加载前需在试件中部绑扎试验机自带的环向引伸计(见图 1)，用以同步采集试件的环向变形信息 ε_3。加载结束后，统计同一组合参数下 3 个试件的强度平均值，选取强度最接近平均值的试件为代表，其全应力－应变曲线如图 10 所示。



(a)　围压 0 MPa

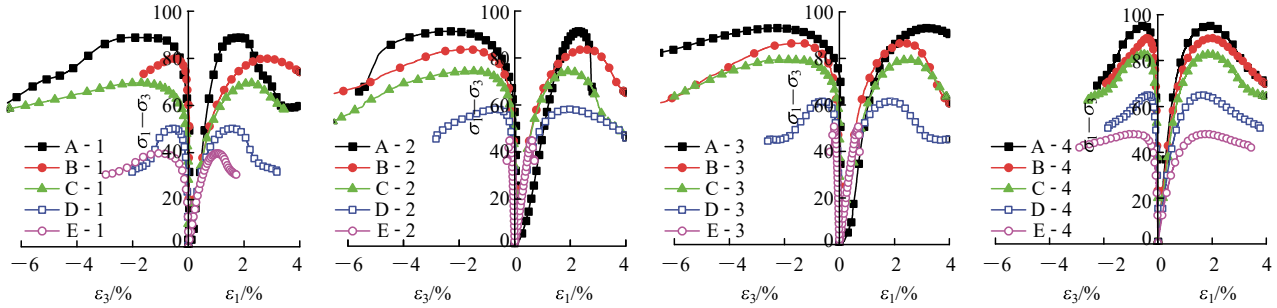
(a) Confining pressure 0 MPa

(b)　围压 5 MPa

(b) Confining pressure 5 MPa

(c)　围压 10 MPa

(c) Confining pressure 10 MPa



(d) 围压 15 MPa

(d) Confining pressure 15 MPa

图 10　代表性裂隙试件的全应力－应变曲线

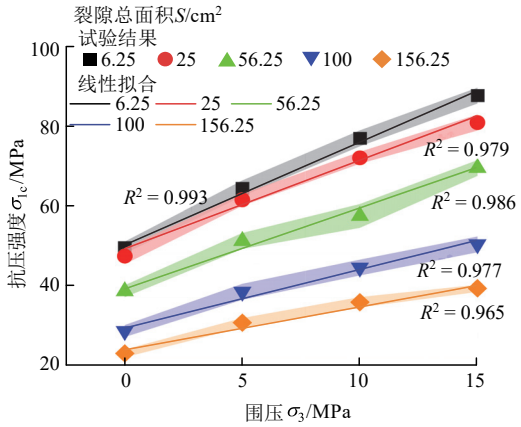
Fig.10　Complete stress-strain curves of typical fractured specimens

由图 10 可知，试件强度与峰值应变基本呈正相关关系，弹性模量与裂隙总面积大体呈负相关关系。在同一围压下，试件强度整体上随裂隙总面积的增加而减小，随裂隙数量的增加(对应单裂隙面积减小)而增加；当裂隙分布参数一致时，试件强度随围压的增加而增加。观察可知，当围压较小(如 σ_3 =0 MPa)时，试件主要发生脆性破坏，峰后应力急剧跌落、试件沿环向发生快速且猛烈扩张，对应峰后轴向及环向应力点分布均较为稀疏(见图 10(a))。随着围压的增大，试件沿环向发生急剧扩张的趋势逐渐被抑制，试件破坏形式由脆性向延性转变；对应试件峰后应力下降过程逐渐平缓、应力点密度增加，开始进入残余变形阶段对应的应变值逐渐增大(见图 10(b)～(d))。此外，在低围压(如 σ_3 = 0 MPa)下，试件脆性破坏特征随裂隙总面积的增加而减弱。这是因为裂隙总面积越大，对应试件在峰值应力处积攒的变形能越低，加之大面积裂隙影响下的试件弹性模量较小、损伤分布范围较大[1, 18]，致使对应试件峰后能量释放路径相对分散，程度相对轻缓[1, 18-19]。但在高围压(如 σ_3 =15 MPa)下，试件脆性破坏特征随裂隙总面积的增加而增强。这是由于受高围压的约束作用，不同裂隙总面积下的试件内部能量释放均不会过于猛烈，而裂隙总面积越大，对应试件内部的损伤分布范围越大，发生整体性、联动性结构失稳的风险越高[1, 11]。

3.2　围压及分布裂隙耦合影响下试件的强度特征

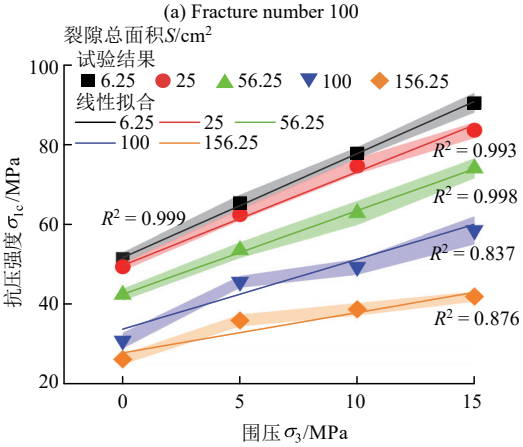
3.2.1　试件强度随围压的变化规律

根据全应力－应变曲线进行信息提取，可得试件强度随围压的变化规律，如图 11 所示。由图可知，在裂隙总面积及裂隙数量一定时，裂隙试件强度随围压的增加基本均呈线性增长趋势，相关性系数 R^2 均大于 0.83(见图 11(b))，主要分布在 0.94 以上。并且预制裂隙总面积越小，线性拟合曲线斜率越大，说明裂隙总面积越小，试件强度对围压增加的响应程度越高。裂隙作为试件内部的“软弱结构面”，通过割裂岩石的连续承载结构，降低了试件完整性，导致试件中的有效承载区域减小[1, 9, 11, 17]。因此，在裂隙数量一定的情况下，预制裂隙总面积越大，对应试件内部的损伤程度越高，因此试件强度随裂隙总面积的增加而减小。但在裂隙总面积一定的情况下，试件强度并不是一成不变的，而是随预制裂隙数量的增加而小幅度增加。这是因为在裂隙总面



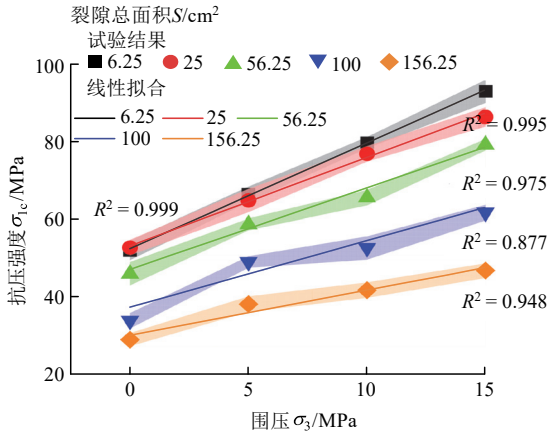
(a) 裂隙数量 100

(a) Fracture number 100



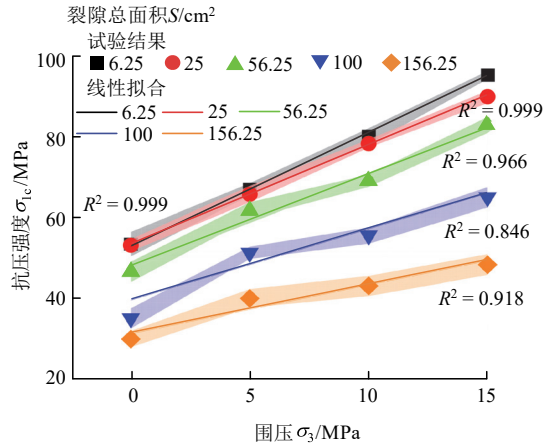
(b) 裂隙数量 200

(b) Fracture number 200



(c) 裂隙数量 300

(c) Fracture number 300



(d) 裂隙数量 400

(d) Fracture number 400

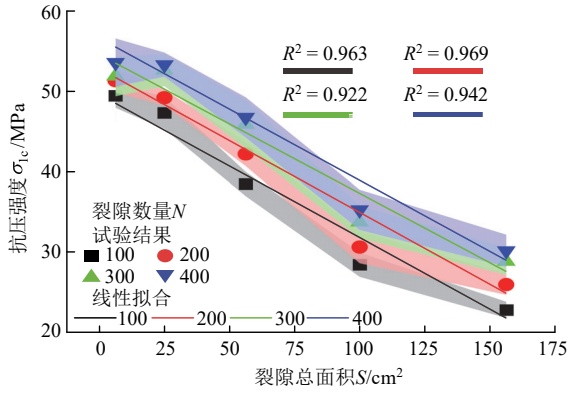
图 11　裂隙试件强度随围压的变化规律

Fig.11　Variation of fractured specimen strength with confining pressure

积一定的情况下，裂隙数量的增加对应单裂隙面积的减小(见图 5)，弱化了裂隙间的相互作用；并且裂隙数量的增加在一定程度上提高了试件损伤的均质性，根据 Weibull 分布理论可知试件强度将相应增加[6]。

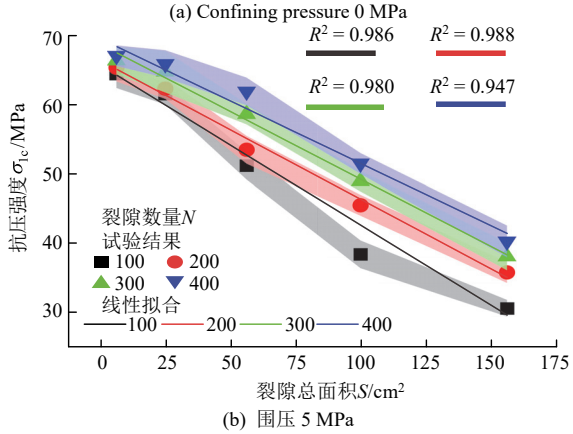
3.2.2　试件强度随裂隙面积的变化规律

基于图 11 所示重组裂隙及围压信息，可得在裂隙数量及围压一定的情况下，试件强度随预制裂隙总面积的变化规律，如图 12 所示。由图可知，试件强度随裂隙总面积的增大而显著降低，并且随着裂隙总面积的增大，试件抗压强度降低幅度也基本呈逐渐增大的变化趋势。以围压 5 MPa、裂隙数量 200 的试件为例，其抗压强度降幅依次为 4.63%，14.21%，14.98%以及 21.36%。但通过拟合可知，试件强度随裂隙总面积的增加而降低，整体上依然呈近线性的变化规律，线性度最低也达 0.922(见图 12(a))；这是由于方案设计的裂隙总面积等效的是正方形边长而



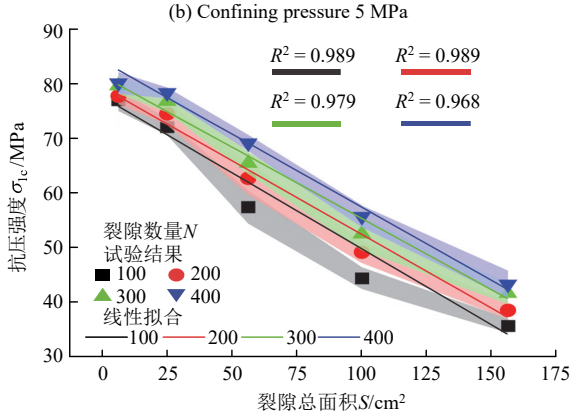
(a) 围压 0 MPa

(a) Confining pressure 0 MPa



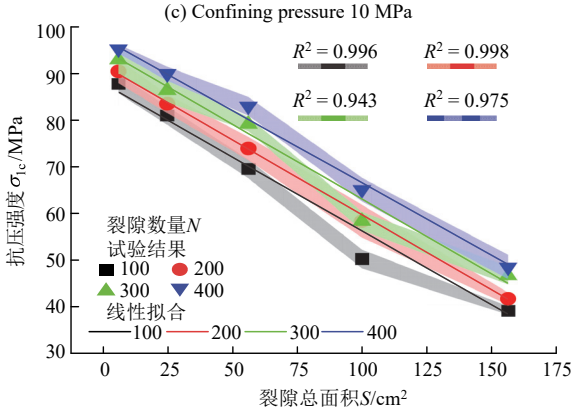
(b) 围压 5 MPa

(b) Confining pressure 5 MPa



(c) 围压 10 MPa

(c) Confining pressure 10 MPa



(d) 围压 15 MPa

(d) Confining pressure 15 MPa

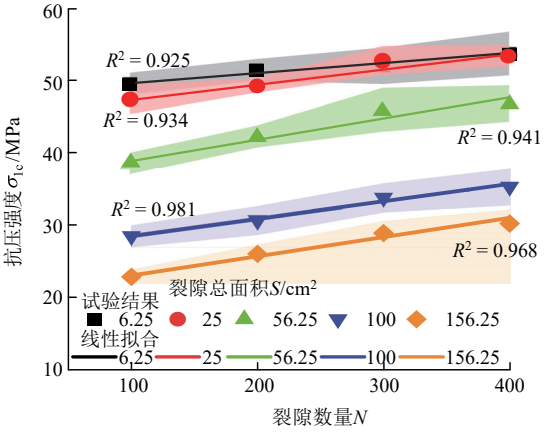
图 12　裂隙试件强度随裂隙总面积的变化规律

Fig.12　Variation of fractured specimen strength with total fracture area

非面积本身是线性变化的(见节 2.3)，致使相邻裂隙总面积之间的差值并不均匀。此外，不同围压下，裂隙数量在 100～400 范围内变化时，对应的试件强度最大差值均约为 10 MPa，十分稳定，表明裂隙数量对试件强度的影响基本不受围压的影响；并且，裂隙数量的变化几乎不影响试件强度与裂隙总面积间的拟合直线斜率，显示出试件强度对裂隙总面积变化的响应程度与裂隙数量变化基本无关。

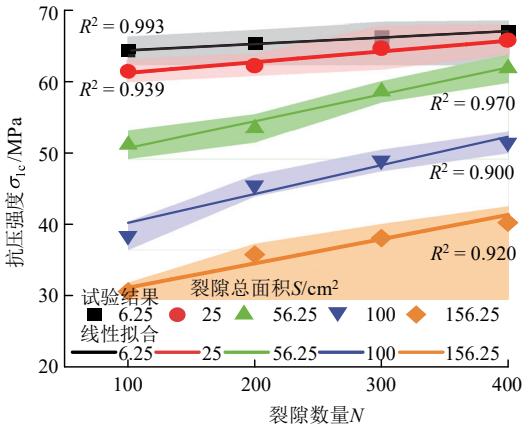
3.2.3 试件强度随裂隙数量的变化规律

在裂隙总面积及围压一定的情况下，试件强度随裂隙数量的变化规律同样可以通过重组图 11 中的数据获得，如图 13 所示。由图可知，试件强度与裂隙数量呈正相关关系，该关系同样可以利用线性方程拟合，相关系数 R^2 均不低于 0.899。在同一围压下，拟合曲线斜率随裂隙总面积的增加而变大，对应试件强度受裂隙数量变化的响应程度与裂隙总面积呈正相关关系。可从细观层面理解为，预制裂隙总面积越大，裂隙数量变化引起的单裂隙绝对尺度变化越大，对裂隙间相互作用以及试件均质性的影响越显著。而在相同的裂隙总面积下，拟合曲线斜率随围压的变化并不明显。比较可知，针对本文的研究参量单位与分布范围设置，试件强度对裂隙数量变化的响应程度相较于裂隙总面积，受围压变化的影响更小。



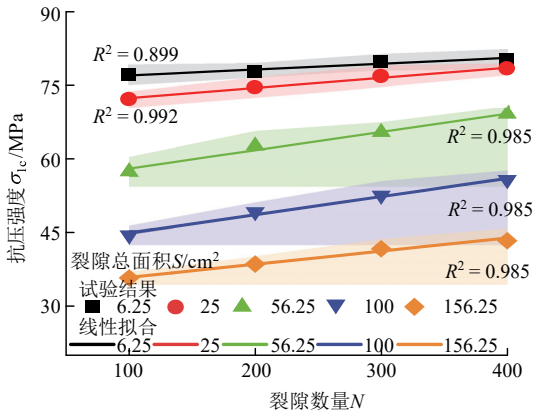
(a) 围压 0 MPa

(a) Confining pressure 0 MPa



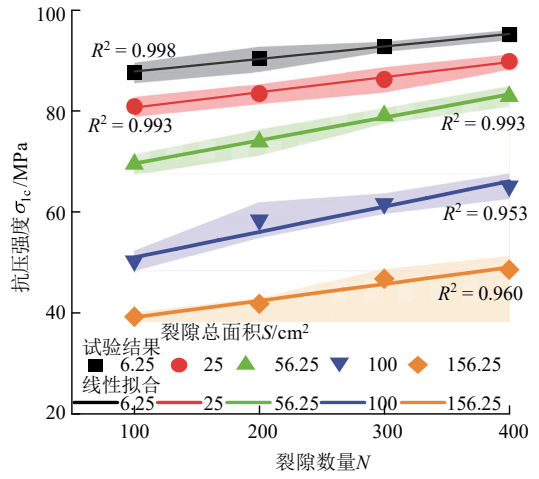
(b) 围压 5 MPa

(b) Confining pressure 5 MPa



(c) 围压 10 MPa

(c) Confining pressure 10 MPa



(d) 围压 15 MPa

(d) Confining pressure 15 MPa

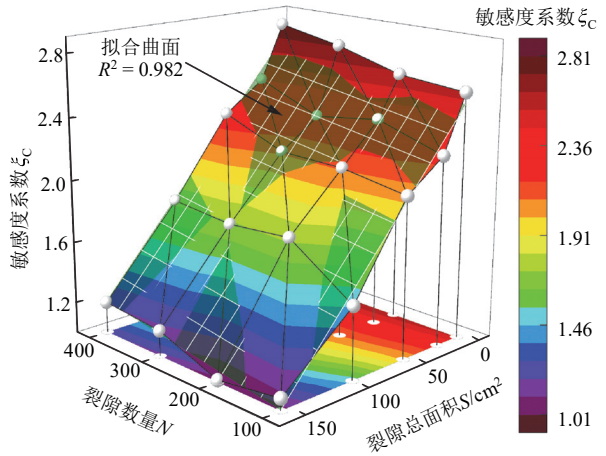
图 13　裂隙试件强度随裂隙数量的变化规律

Fig.13　Variation of fractured specimen strength with fracture number

3.3 试件强度敏感度系数演化规律

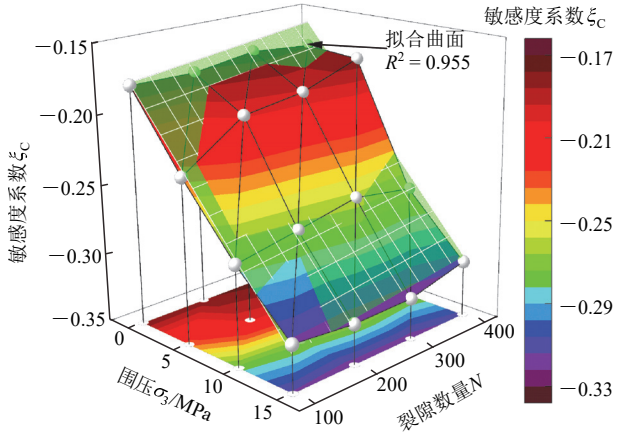
节 3.2 定性分析了试件强度对裂隙总面积、围压及裂隙数量 3 个参量变化的响应规律。为了进一步量化各参量对试件强度的影响，基于图 11～13 中试件强度与各参量间均满足线性方程这一规律，统一提取拟合方程斜率作为灵敏度系数，建立其与 3 参量耦合作用下的空间曲面关系[42]，如图 14 所示。

由图 14(a)可知，试件强度随围压变化的敏感度系数 ζ_C 主要分布在 1.0～2.8 范围，受裂隙数量的影响微乎其微，但随裂隙总面积的增加呈明显的线性降低特征。根据图 14(b)可知，试件强度随裂隙总面积变化的敏感度系数 ζ_S 主要分布在－0.3～－0.17



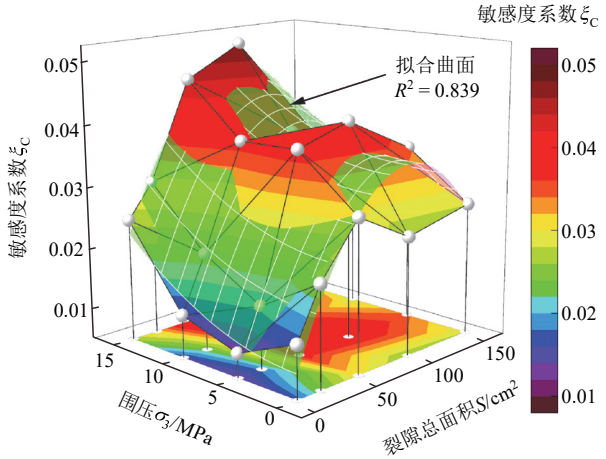
(a) 围压主导下的敏感度系数

(a) Sensitivity coefficient dominated by confining pressure



(b) 裂隙总面积主导下的敏感度系数

(b) Sensitivity coefficient dominated by total fracture area



(c) 裂隙数量主导下的敏感度系数

(c) Sensitivity coefficient dominated by fracture number

图 14　裂隙总面积、围压、裂隙数量耦合影响下的试件强度敏感度系数演化规律

Fig.14　Evolution of sensitivity coefficient of specimen strength under coupled effects of total fracture area，confining pressure and fracture number

范围内，受裂隙数量的影响同样可以忽略不计，随围压的增加而降低的趋势亦呈较明显的线性特征。

需要指出的是，对比围压及裂隙总面积主导下的敏感度系数，仅能反映出当前参量在所采用单位及分布范围内对试件强度影响的强弱关系。另外，根据图 14(c)可知，试件强度随裂隙数量变化的敏感度系数 ζ_N 主要分布在 0.01～0.05 范围，其值随预制裂隙总面积的增加呈减速增加趋势，而随围压增加呈波动增加趋势，在三维空间内呈现出显著的非线性分布特征。

为了进一步探讨围压及裂隙分布参数对岩石强度敏感度系数的影响规律，在上述针对图 14 分析的基础上，考虑工程应用方便，尝试采用一次多项式拟合围压及裂隙总面积主导下的敏感度系数演化规律，而裂隙数量主导下的敏感度系数演化规律使用二次多项式进行拟合，表达式如下：

$$\zeta_C = -1.00N + 6.93\times10^{-4}S + 2.5 \tag{2a}$$

$$\zeta_S = -9.77\times10^{-3}\sigma_3 + 5.73\times10^{-5}N + 0.96 \tag{2b}$$

$$\zeta_N = 5.78\times10^{-5}\sigma_3^2 - 3.03\times10^{-6}S^2 - 1.26\times10^{-6}\sigma_3 S + 4.52\times10^{-5}\sigma_3 + 6.04\times10^{-4}S + 5.32\times10^{-3} \tag{2c}$$

多项式拟合效果如图 14 所示。根据图 14(a)～(b)可以看出，一次多项式拟合曲面能够极为准确地反映围压及裂隙总面积主导下的敏感度系数空间分布，相关系数均高达 0.95 以上。式(2a)中敏感度系数与裂隙数量间的系数为－1.00，远大于其与裂隙总面积间的系数；式(2b)中敏感度系数与围压间的系数为-9.77×10^{-3}，也远大于其与裂隙数量间的系数。由此可推断出图 14(a)～(b)中拟合曲面与底面的夹角均约为 45°。图 14(c)显示，由于裂隙数量主导下的敏感度系数三维曲面波动性强，拟合相对困难，即使采用二次多项式进行描述，相关系数也仅为 0.839，分布规律性相对较弱。

4　随机分布裂隙岩石强度模型

4.1　基于岩块与裂隙结构变形叠加的岩石损伤模型

裂隙岩石由完整岩块及裂隙复合结构组成，其整体变形包含岩块变形及裂隙变形[43]。对裂隙变形沿法向及切向进行分解，则单轴作用下沿荷载作用方向的总位移 U 可分成 3 个部分[44]，分别为岩块沿荷载方向的位移 U_b、裂隙结构发生的法向位移沿荷载方向的分量 U_n 以及裂隙结构发生的剪切位移沿荷载方向的分量 U_s，如图 15 所示。总位移 U 可表达为[44]

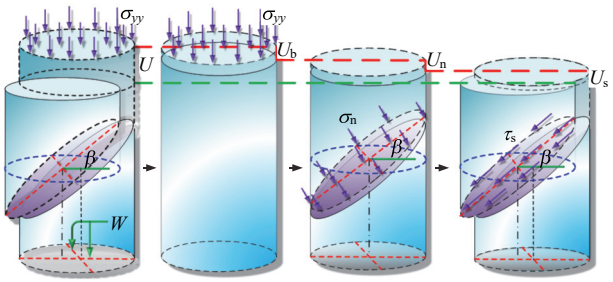


图 15　贯通裂隙岩石变形分解示意图

Fig.15　Schematic diagram of deformation decomposition in fractured rock with through-going fractures

$$U = U_{\mathrm{b}} + U_{\mathrm{n}} + U_{\mathrm{s}} \tag{3}$$

图 15 中，岩石试件的直径为 W、高为 H、施加的竖向应力为 σ_{yy}、完整岩块弹性模量为 E、裂隙结构面所受的法向应力及切向应力分别为 σ_{n} 和 τ_{s}、裂隙结构面的法向刚度和切向刚度分别为 K_{n} 和 K_{s}，则可分别推导式(3)等号右侧 3 种位移的表达式。

首先，考虑完整岩块沿加载方向的贡献。岩块的竖向位移可直接根据应力与应变间的关系以及应变的定义得到[43]：

$$U_{\mathrm{b}} = \frac{\sigma_{yy} H}{E} \tag{4}$$

然后，考虑裂隙结构法向位移及切向位移沿加载方向的贡献。假定加载方向与裂隙结构面法向的夹角为 β (见图 15)，由弹性力学对任一点应力状态的描述可得如下关系：

$$\left.\begin{aligned} \sigma_{\mathrm{n}} &= \frac{1}{2}(\sigma_y + \sigma_x) - \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\cos(2\beta) - \tau\sin(2\beta) \\ \tau_{\mathrm{s}} &= \frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_x)\sin(2\beta) + \tau\cos(2\beta) \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

式中：σ_x，σ_y 分别为微元体沿 x 及 y 方向所受的正应力；τ 为微元体所受的切应力。对于图 15 所示的试件受力状态，有下式成立：

$$\left.\begin{aligned} \sigma_y &= \sigma_{yy} \\ \sigma_x &= 0 \\ \tau &= 0 \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

将式(6)代入式(5)，可得裂隙结构面上的正应力及剪切应力的表达式，即

$$\left.\begin{aligned} \sigma_{\mathrm{n}} &= \frac{1}{2}\sigma_{yy}[1 + \cos(2\beta)] \\ \tau_{\mathrm{s}} &= \frac{1}{2}\sigma_{yy}\sin(2\beta) \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

结合法向刚度与切向刚度的定义以及式(7)，可得裂隙结构面的法向位移 $U_{\mathrm{n}}^{\mathrm{f}}$ 及切向位移 $U_{\mathrm{s}}^{\mathrm{f}}$，如下式[44]：

$$\left.\begin{aligned} U_{\mathrm{n}}^{\mathrm{f}} &= \frac{1}{2K_{\mathrm{n}}}\sigma_{yy}[1 + \cos(2\beta)] \\ U_{\mathrm{s}}^{\mathrm{f}} &= \frac{1}{2K_{\mathrm{s}}}\sigma_{yy}\sin(2\beta) \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

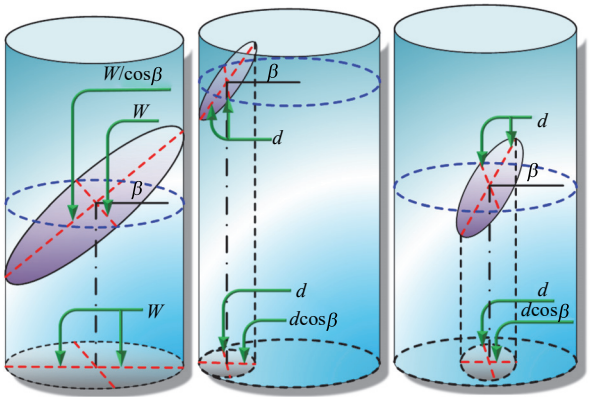
将式(8)中的结构面法向及切向位移分别沿加载方向进行分解，可得结构面法向及切向位移沿加载方向的位移贡献[43-44]，即

$$\left.\begin{aligned} U_{\mathrm{n}} &= \sigma_{yy}[1 + \cos(2\beta)]\cos\beta / (2K_{\mathrm{n}}) \\ U_{\mathrm{s}} &= \sigma_{yy}\sin(2\beta)\sin\beta / (2K_{\mathrm{s}}) \end{aligned}\right\} \tag{9}$$

最后统筹含分布裂隙岩石沿荷载作用方向的总位移。综合式(3)，(4)及(9)，对于包含多个裂隙结构面的岩石，当合理忽略裂隙尺寸对于试件高度的微小影响时，沿荷载作用方向的总位移可近似表达为

$$U = U_{\mathrm{b}} + \sum_{k=1}^{N} U_{\mathrm{s}}^{k} + \sum_{k=1}^{N} U_{\mathrm{n}}^{k} \tag{10}$$

需要指出的是，式(10)是针对图 15 所示的贯通裂隙推导得到的，并不能覆盖所有形态的裂隙岩石变形特征。图 16 展示了 3 种典型的裂隙分布形态，其中，沿试件宽度方向贯通的裂隙形态 Type I与图 15 一致，式(10)显然是适用的；但对于裂隙形态 Type II及 Type III，式(10)的推导过程未能充分体现其特征，需要分别予以修正。



(a) Type I　　(b) Type II　　(c) Type III

图 16　3 类典型裂隙形态

Fig.16　3 types of typical fracture morphologies

由图 16 可以看出，即使 3 类裂隙的倾角完全一致，但尺度及边界效应的差异也决定了其对岩石沿加载方向的位移贡献不同。仔细观察可知，Type II 形态裂隙也对应为贯通裂隙，其与 Type I形态裂隙的主要差异在于，对岩石总位移的贡献在加载面方向上的分布是不均匀的。考虑到 Type II形态裂隙在

加载面上产生的等效位移与其在岩石宽度方向的投影面积成正比，由此可将利用式(9)计算得到的位移乘以裂隙投影面积与加载面尺寸(试件横截面面积)的比值进行修正。即对于 Type II形态裂隙，式(9)应修正为

$$\left.\begin{aligned} U_{\mathrm{n}} &= \frac{d^2\cos\beta}{W^2}\sigma_{yy}[1+\cos(2\beta)]\cos\beta/(2K_{\mathrm{n}}) \\ U_{\mathrm{s}} &= \frac{d^2\cos\beta}{W^2}\sigma_{yy}\sin(2\beta)\sin\beta/(2K_{\mathrm{s}}) \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

式中：d 为 Type II形态裂隙的直径。计算可知，式(11)对于 Type I形态裂隙也同样适用。当裂隙分布倾角与加载方向一致($\beta=90°$)时，对应修正系数为 0，也即说明裂隙变形对岩石加载方向的位移贡献为 0，符合现实情况。

对于 Type III形态的非贯通裂隙，相对于 Type I及 Type II形态的贯通裂隙，受到的尖端约束作用更强，这决定了其在相同的法向及切向载荷作用下发生的位移必然小于 Type I及 Type II形态的贯通裂隙。借鉴杨建平等[43]的研究，引入约束系数 r 对式(11)进一步修正，可得下式：

$$\left.\begin{aligned} U_{\mathrm{n}} &= \frac{rd^2\cos\beta}{W^2}\sigma_{yy}[1+\cos(2\beta)]\cos\beta/(2K_{\mathrm{n}}) \\ U_{\mathrm{s}} &= \frac{rd^2\cos\beta}{W^2}\sigma_{yy}\sin(2\beta)\sin\beta/(2K_{\mathrm{s}}) \end{aligned}\right\} \tag{12}$$

式中：r 的取值范围为 0～1，值越小表示裂隙的端部约束越强。r =1 表征裂隙端部处于无约束状态，对应为贯通裂隙；而 $r=0$ 表征裂隙端部处于强约束状态，无法发生任何位移。

综上，对于含随机分布裂隙的岩石，在竖向应力 σ_{yy} 作用下，沿 y 向产生的总位移 U 可合并表示为

$$\begin{aligned} U = {} & \frac{\sigma_{\mathrm{yy}}H}{E} + \\ & \sum_{k=1}^{N} r_k \frac{d_k^2\cos\beta_{ky}}{W^2}\frac{\sigma_{\mathrm{yy}}[1+\cos(2\beta_{ky})]\cos\beta_{ky}}{2K_{\mathrm{n}}} + \\ & \sum_{k=1}^{N} r_k \frac{d_k^2\cos\beta_{ky}}{W^2}\frac{\sigma_{\mathrm{yy}}\sin(2\beta_{ky})\sin\beta_{ky}}{2K_{\mathrm{s}}} \end{aligned} \tag{13}$$

式中：d_k 为第 k 个裂隙的直径，r_k 为第 k 个裂隙的约束系数，β_{ky} 为第 k 个裂隙的法线方向与加载方向的夹角。

裂隙岩石沿加载方向的等效变形模量 $\widetilde{E}$ 为

$$\widetilde{E} = \sigma_{yy}H/U \tag{14}$$

将式(13)代入式(14)可得

$$\begin{aligned} \widetilde{E} = H/\Bigg\{ & \frac{H}{E} + \sum_{k=1}^{N} r_k \frac{d_k^2\cos\beta_{ky}}{W^2}\frac{[1+\cos(2\beta_{ky})]\cos\beta_{ky}}{2K_{\mathrm{n}}} + \\ & \sum_{k=1}^{N} r_k \frac{d_k^2\cos\beta_{ky}}{W^2}\frac{\sin(2\beta_{ky})\sin\beta_{ky}}{2K_{\mathrm{s}}}\Bigg\} \end{aligned} \tag{15}$$

根据式(15)可知，试件中的裂隙总面积越大，对应试件的有效弹性模量越小，该结论与节 3.1 针对试件全应力－应变曲线的分析一致。利用弹性模量法定义的岩石损伤程度 D 如下式[6, 45]：

$$D = 1 - \frac{\widetilde{E}}{E} \tag{16}$$

将式(15)代入式(16)，可得考虑分布裂隙数量、长度、方位、约束形态的岩石损伤模型，如下式：

$$\begin{aligned} D = 1 - H/\Bigg\{ & H + E\Bigg\{\sum_{k=1}^{N} r_k \frac{d_k^2\cos\beta_{ky}}{W^2}\cdot \\ & \frac{[1+\cos(2\beta_{ky})]\cos\beta_{ky}}{2K_{\mathrm{n}}} + \\ & \sum_{k=1}^{N} r_k \frac{d_k^2\cos\beta_{ky}}{W^2}\frac{\sin(2\beta_{ky})\sin\beta_{ky}}{2K_{\mathrm{s}}}\Bigg\}\Bigg\} \end{aligned} \tag{17}$$

根据推导过程可知，式(17)所示模型能够同时适用于含贯通及非贯通裂隙试件损伤的描述。因此，针对本文研究的圆柱体试件尺寸，若预制裂隙为标准圆裂隙，其直径最大可达 50 mm；若为非圆裂隙，损伤模型能够适应的最大裂隙面为过试件中心轴的矩形，尺寸为宽×高=50 mm×100 mm。本文设计的预制裂隙最大直径仅为 14.10 mm(见节 2.3)，远小于试件最小维度尺寸(50 mm)；除在试件拐角处存在零星贯通裂隙外，其余主要为非贯通裂隙(见图 8)。由此，本文假定所有预制裂隙均符合图 16 中的 Type III形态，则式(17)可简化如下：

$$D = 1 - \frac{1}{1+\dfrac{rE}{HW^2}\left[\displaystyle\sum_{k=1}^{N} d_k^2\left(\frac{\cos^4\beta_{ky}}{K_{\mathrm{n}}} + \frac{\cos^2\beta_{ky}\sin^2\beta_{ky}}{K_{\mathrm{s}}}\right)\right]} \tag{18}$$

4.2　基于数理统计方法的损伤模型简化

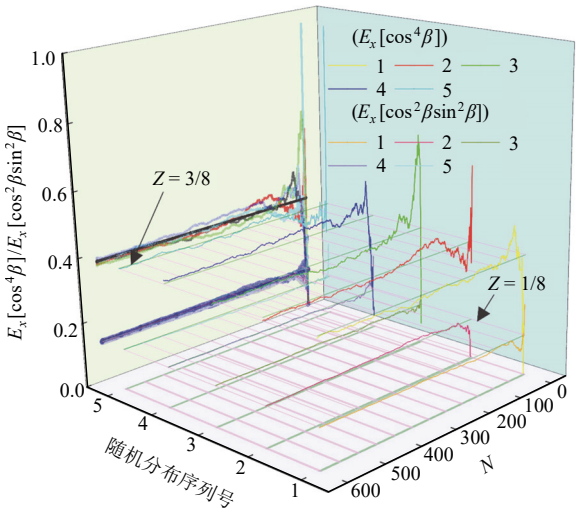
由于本文预制裂隙倾角在 0°～360°范围内随机、均匀分布，并且预制裂隙数量足够多(100～400)，故式(18)中的裂隙角度三角函数无需针对所有预制裂隙逐一计算，直接进行概率期望 E_x 求解即可，结果如下：

$$\left.\begin{aligned} E_x[\cos^4\beta] &= 3/8 \\ E_x[\cos^2\beta\sin^2\beta] &= 1/8 \end{aligned}\right\} \tag{19}$$

对于本文设置的样本量(裂隙数量 N)，式(19)合理性的验证如图 17 所示。图中针对 $\cos^4\beta$ 和 $\cos^2\beta\sin^2\beta$ 分别设置了 5 个随机分布数(见图 17(a))。可以看出，随着样本量的增加，期望误差整体上均呈降低趋势，并且三角函数 $\cos^4\beta$ 的期望值相对误差明显大于 $\cos^2\beta\sin^2\beta$ (样本量梯度设置为 50，见图 17(b))。误差均值最大值对应 $\cos^4\beta$ 且样本量为 150 时，数值约为 5.3%。在其他情况下的误差均不超过 4%；特别地，对于 $\cos^2\beta\sin^2\beta$，其期望误差均未超过 1%。

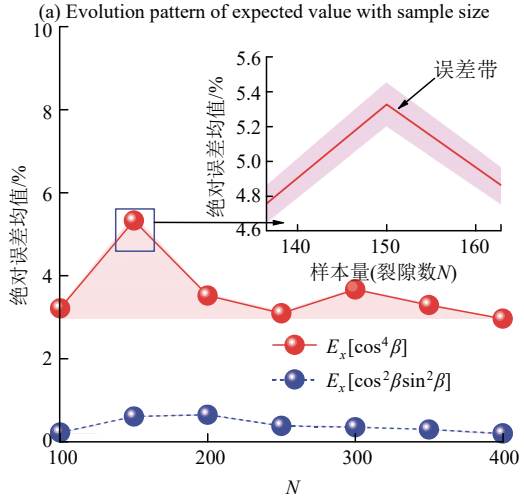
此外，根据节 2.3 可知，对于同一试件内分布的裂隙，其直径 d 是完全一致的。式(18)可进一步简化如下：

$$D=1-\frac{1}{1+\dfrac{rNEKd^2}{8HW^2}} \tag{20a}$$



(a) 期望值随样本量的演化规律

(a) Evolution pattern of expected value with sample size



(b) 相对误差均值随样本量的演化规律

(b) Evolution pattern of mean relative error with sample size

图 17　三角函数期望取值合理性验证

Fig.17　Rationality verification of trigonometric function expected values

其中，

$$K=\frac{3K_s+K_n}{K_nK_s} \tag{20b}$$

4.3　考虑围压与分布裂隙耦合影响的岩石强度模型

结合式(20)及损伤度的定义，可得含分布裂隙岩石强度 σ_{1c} 的表达式如下[6, 45]：

$$\sigma_{1c}=\sigma_a(1-D) \tag{21}$$

式中：σ_a 为完整试件的单轴压缩强度与围压之和。

假设无宏观缺陷的岩石材料始终服从线弹性变化，即岩石破坏前的受力变形行为满足虎克定律，则可将式(21)推广至三向受力状态[46]，如下式：

$$\sigma_{1c}=\sigma_a(1-D)+\mu(\sigma_2+\sigma_3) \tag{22}$$

式中：σ_2 及 σ_3 分别为第二及第三主应力(围压)，μ 为泊松比。值得强调的是，在三向受力状态下，对于本文研究的圆柱体(假三轴)试件，第二及第三主应力满足如下关系：

$$\sigma_2=\sigma_3 \tag{23}$$

由此，结合式(20a)，(22)及(23)，可得考虑围压及分布裂隙耦合影响的岩石强度模型，如下式：

$$\sigma_{1c}=\frac{\sigma_a}{1+\dfrac{rNEKd^2}{8HW^2}}+2\mu\sigma_3 \tag{24}$$

4.4　强度模型修正及可靠性验证

针对标准尺寸的单、三轴压缩试件而言，H 和 W 均为已知量，数值分别为 0.1，0.05 m；对于裂隙的刚度参数 K_n，K_s，基于笔者团队的前期研究均取为 2 GPa/m[1, 6, 9]；根据完整试件的单轴压缩应力－应变曲线，可计算得到 E 和 μ 分别为 8.49 GPa 和 0.27；根据图 9 可确定 σ_a 组成中的完整试件单轴抗压强度为 56.23 MPa。由此可知，对于已知围压及分布裂隙组合参数作用的裂隙试件，式(24)中仅系数 r 是待定的。对于图 7 中的试件(包括完整试件及裂隙试件)，按照作用围压、裂隙总面积及裂隙数量的先后顺序由小至大依次排列，利用式(24)对其强度进行回归分析，可得约束系数 $r=4.72\times10^{-3}$，对应的试验与理论强度结果对比如图 18 所示。图 18 显示，试件理论强度与试验强度较为吻合，相关性系数 R^2 达 0.927，一定程度上验证了节 4.3 所建强度模型的合理性。但仔细观察可知，对于本文的裂隙参数设计，各组试件中的裂隙数量与裂隙直径是联动变化的，导致式(24)中裂隙数量与裂隙直径平方的乘积为恒值。所以当裂隙总面积保持恒定的情况下，

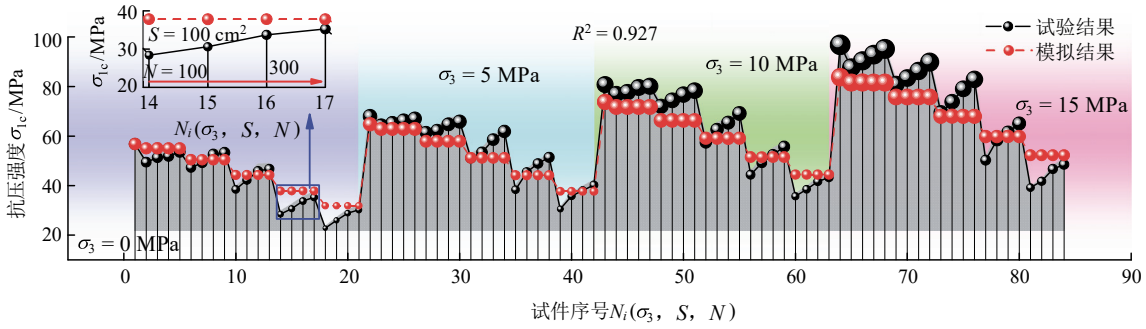
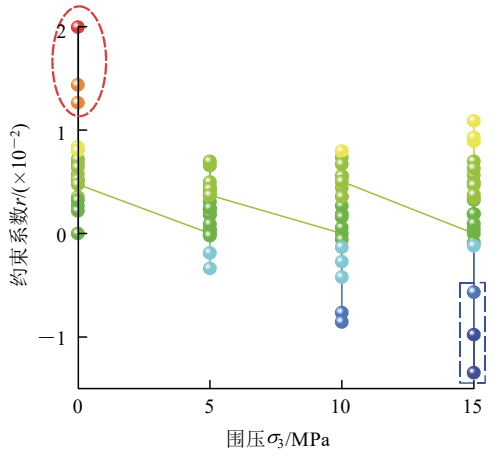


图 18　不同试样试验及理论强度分布对比

Fig.18　Distribution comparison between experimental and theoretical strength

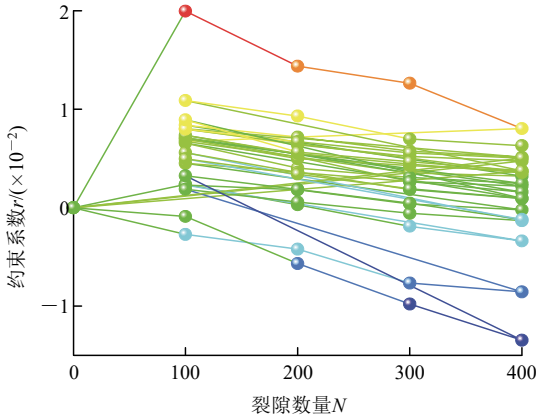
其无法反映裂隙数量变化对于试件强度的影响(见图 18 中的放大图)。另外，完整试件内部的预制裂隙总面积及数量均为 0，也采用统一的约束系数值进行描述显然是不合理的。综上分析可知，式(24)对应的强度模型仍需进一步修正。

考虑到能够对约束系数产生影响的参数无外乎裂隙直径、裂隙数量及围压；针对图 18 中的 84 个强度值，基于所建强度模型(式(24))，可逐一计算出对应的约束系数，由此可建立约束系数与上述 3 参数的对应关系，如图 19 所示。根据图 19 可知，在相同的裂隙数量及围压参数下，约束系数的变化幅值均较大，最大达约 2.5×10^{-2}(见图 19(a)～(b))，表明约束系数与裂隙数量、围压的相关性均较差。而在相同的裂隙直径下，可以看出除阴影区域内的数据点外，约束系数分布表现出收敛特征，变化幅值仅约为 5×10^{-3}(见图 19(c))，呈现出明显的相关性，且整体走势与裂隙直径呈明确的正线性关系。此外，考虑到裂隙直径为 0 的试件内部无裂隙分布(完整试件)，约束系数必然为 0，由此可假定如下对应关系：



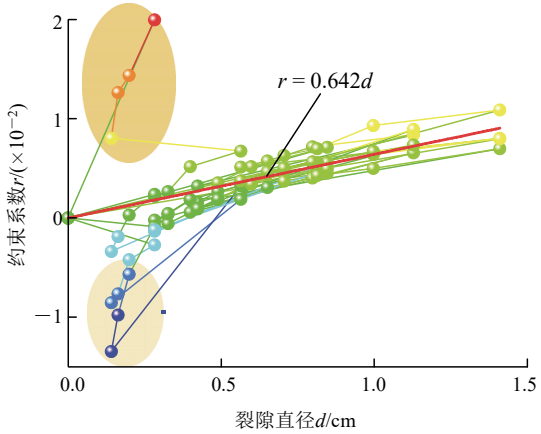
(a) 约束系数与围压的对应关系

(a) Relationship between constraint coefficient and confining pressure



(b) 约束系数与裂隙数量的对应关系

(b) Relationship between constraint coefficient and fracture number



(c) 约束系数与裂隙直径的对应关系

(c) Relationship between constraint coefficient and fracture diameter

图 19　约束系数与裂隙直径、数量及围压的对应关系

Fig.19　Relationship between constraint coefficient and fracture diameter，number and confining pressure

$$r = ad \tag{25}$$

式中：a 为待定系数，量纲为$[L^{-1}]$。需要指出的是，图 19(c)阴影区域内的数据点较为发散，是因为该位置对应的裂隙直径仅约为 1.41 mm，试件本身的材料属性而非预制裂隙对破坏过程的影响占主导地位，导致约束系数与试件强度间的相关性较弱。剔

除阴影区域内离散性较大数据的干扰(见图 19(c))，利用式(25)进行拟合可得 $a = 0.642$，相关性系数 R^2 为 0.803，验证了式(25)假定的合理性。

将式(25)代入式(24)可得修正强度模型，如下式：

$$\sigma_{1c} = \frac{\sigma_a}{1+\dfrac{aNEKd^3}{8HW^2}} + 2\mu\sigma_3 \tag{26}$$

将系数 a 的拟合值代入式(26)进行计算，可得到试验与修正理论强度结果的对比，如图 20 所示。可以看出，试件理论强度与试验强度值高度吻合，相关性系数 R^2 增至 0.971。此外，式(25)所示修正强度模型有效解决了其无法描述裂隙数量演化对试件强度影响的问题(见图 20 中的放大图)，充分验证了式(26)所示修正强度模型的合理性，利用其描述围压、裂隙总面积、裂隙数量等多参量复杂耦合影响下的岩石强度是可靠的。

结合系数 a 的拟合值及式(25)，可得约束系数 r 的变化范围为 0～9.05×10^{-3}，所有数据均分布在其定义区间(0～1)内，并接近区间下界，符合本文所预制裂隙为闭合裂隙的特征(PVA 水溶材料厚度为 80 μm，见节 2.2)，说明裂隙结构变形受到的约束作用较强。需要指出的是，根据式(26)可知，约束系数 r 的数值与裂隙的刚度参数 K_n 和 K_s 的取值密切相关，即裂隙结构变形的难易程度本质上是由其组合确定的。

为了进一步验证所建模型对于不同参数组合下试件强度描述的准确性，有必要逐点进行误差分析。结合图 20 中的数据信息，可得理论强度与试验结果的线性回归误差，如图 21 所示。由图可知，理论结果与试验结果之间的线性程度较高，所有数据点相对试验结果的偏差基本均在 10%以内。具体地，理论结果在低强度区间(20～60 MPa)内相对偏高，偏差范围主要分布在 0～10%，最大偏差小于 20%；而在高强度区间(60～90 MPa)内相对偏低，最大偏差不超过 10%(见图 21)。根据图 19(c)可知，这是由于小直径裂隙分布下，试件本身的材料属性对破坏过程的影响占主导地位，试件强度受预制裂隙分布控制弱，离散性强。而围压能在一定程度上加强小直径裂隙的边界约束，致使在低围压下的约束系数偏高(见图 19(a)中椭圆框)，对应约束作用弱，体现为低强度范围区间内的理论结果偏大；在高围压下的约束系数偏低(见图 19(a)中矩形框)，对应约束作用强，体现为高强度区间内的理论强度偏小。

4.5　裂隙岩石强度四维空间分布规律

结合对图 20 及 21 的分析可知，理论模型能够准确描述试验结果，据此可利用所建强度模型，对研究参数区间内的裂隙岩石强度进行预测。为了保证变量间的独立性，将裂隙总面积 S 转化为单裂隙面积 s，与围压 σ_3、裂隙数量 N 共同作为自变量，并进行数据扩充加密，利用节 4.4 所建模型可计算得到裂隙岩石强度的四维空间立体关系 $\sigma_{1c} = f(N, \sigma_3, s)$，如图 22 所示。

图 22 显示，在所研究变量区间内，抗压强度主要在 7～95 MPa 范围内连续分布。单裂隙面积越大、裂隙数量越多、围压越小，对应的岩石强度值越小，反之越大。在 s-N 平面内，岩石强度等值线近似呈反函数分布形式，表明其与单裂隙面积和裂隙数量的乘积(即裂隙总面积)成正比(见图 22)；并且等值线密度随围压的增加而增加，说明围压越大，岩石强度对裂隙总面积变化的敏感度越强，与节 3.2 针对试验数据的分析一致。s-σ_3 平面与 N-σ_3 平面的岩石强度等值线分布规律基本一致，本质上均是裂隙总面积与围压共同作用下的岩石强度演化规律；并且等值线距围压轴越近，与围压轴的相交角度越小、密度越高(见图 22)；对应裂隙总面积越小，岩石强度对围压变化的敏感度越大，符合节 3.2 针对试验数据的分析。在给定岩石基础参数(单轴压缩强度、弹性及泊松比等)的条件下，可利用所建模型(见

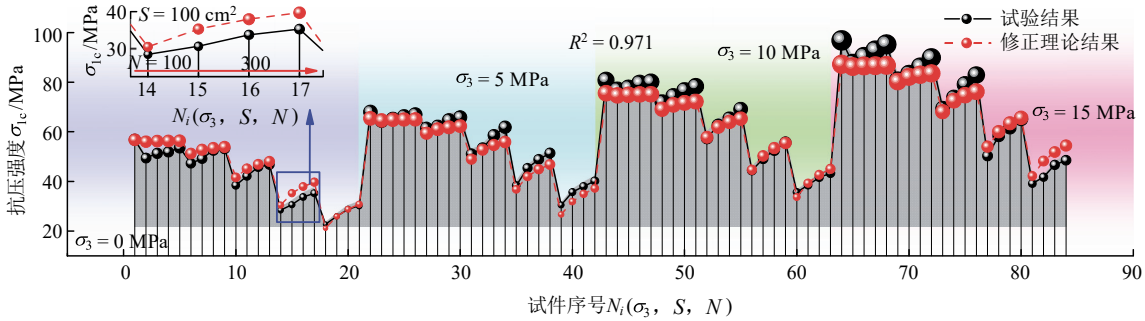


图 20　试验及修正理论强度分布对比

Fig.20　Distribution comparison of experimental and modified theoretical strength

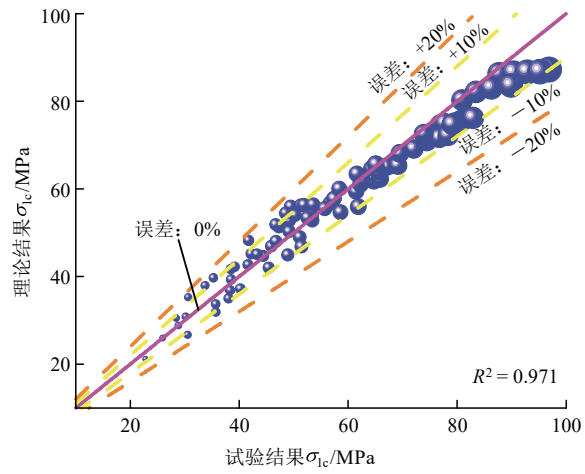


图 21　理论结果与试验结果线性回归误差

Fig.21　Linear regression error between theoretical and experimental results

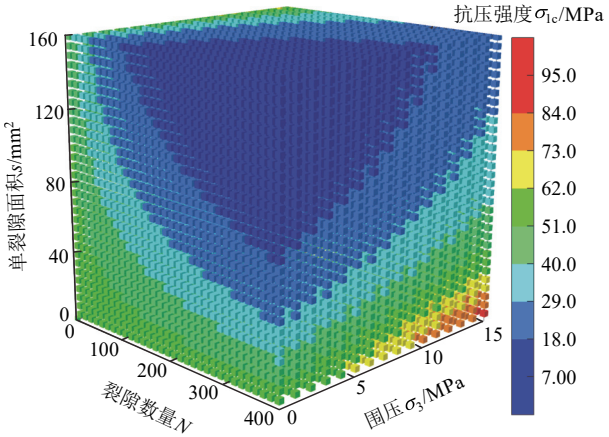


图 22　基于强度模型的岩石强度四维空间分布规律

Fig.22　4D spatial distribution pattern of rock strength based on the strength model

式(26))或在参数空间(见图 22)中进行搜索匹配，对岩石强度或损伤程度进行预测、评估。此外，在指定岩体强度及裂隙部分分布参数(如面积或数量)开展相似试验时，可利用所建强度模型指导试件的制备。

5　结　论

本文结合 PVA 水溶材料，探索了含分布裂隙类岩石试件的制备方法；在此基础上，通过单、三轴压缩试验，对裂隙分布参数及围压影响下的岩石强度演化规律进行了分析；然后，统筹考虑裂隙数量、尺度、倾角以及围压的影响，通过准确量化单个裂隙的损伤效应并合理表征分布裂隙的统计特征，推导建立了裂隙岩石的强度模型，并对其可靠性及岩石强度四维空间分布规律进行了探讨。主要研究结论如下：

(1) 通过将指定形状、数量、尺度的 PVA 水溶材料与水泥砂浆一同搅拌浇筑，并对养护完成后的试件进行温浴处理，实现了含随机分布裂隙类岩石试件的制备。CT 扫描及单、三轴压缩试验结果表明，PVA 水溶材料在混合搅拌过程中能够保持完整，温浴操作也不会额外增加试件损伤。

(2) 随着围压的增大，裂隙岩石破坏形式由脆性向延性逐渐转变。岩石脆性破坏特征在低围压下随裂隙总面积的增加而减弱，而在较高围压下随裂隙总面积的增加而增强。裂隙岩石的抗压强度与围压呈正线性相关关系，与裂隙总面积呈负线性相关关系。在预制裂隙总面积保持不变的情况下，裂隙数量通过影响损伤分布的均质性与单裂隙尺度，与岩石强度呈正线性相关关系。

(3) 理论结果与试验结果高度吻合，相关性系数达 0.971；相对偏差主要分布在 10%以内，最大不超过 20%。证明了所建强度模型能够有效描述围压、裂隙分布参数复杂耦合影响下的岩石强度演化规律。

(4) 基于强度模型进行扩充计算，建立了围压、裂隙数量及单裂隙面积影响下的岩石强度四维空间立体关系 $\sigma_{1c} = f(N, \sigma_3, s)$，即裂隙面积越大、裂隙数量越多、围压越小，对应的岩石强度越小。岩石强度对围压变化的敏感度与裂隙总面积负相关，而岩石强度对裂隙总面积变化的敏感度与围压正相关。针对本文的参量单位及分布范围设置，岩石强度随围压、裂隙总面积、裂隙数量变化的敏感度系数分布区间分别为 1.0～2.8，−0.3～−0.17，0.01～0.05。

参考文献(References)：

[1] 石　浩，宋　雷，王敦显，等. 基于裂纹长度幂律排布的损伤砂岩强度模型[J]. 中国矿业大学学报，2022，51(2)：263－272.(SHI Hao，SONG Lei，WANG Dunxian，et al. Strength model for damaged sandstone based on power-law distribution of crack length[J]. Journal of China University of Mining and Technology，2022，51(2)：263－272.(in Chinese))

[2] 袁　亮，张　通，王玥晗，等. 深部煤炭资源安全高效开采科学问题及关键技术[J]. 煤炭学报，2025，50(1)：1－12.(YUAN Liang，ZHANG Tong，WANG Yuehan，et al. Scientific problems and key technologies for safe and efficient mining of deep coal resources[J]. Journal of China Coal Society，2025，50(1)：1－12.(in Chinese))

[3] 田　森，赵　映，司　鹄，等. 寒区露天矿岩质边坡裂隙岩体冻融损伤特征及力学特性试验研究[J]. 煤炭学报，2024，49(12)：4 687－4 700.(TIAN Sen，ZHAO Ying，SI Hu，et al. Experimental study on freeze-thaw damage characteristics and mechanical properties of fractured rock mass of surface mine slope in cold region[J]. Journal of China Coal Society，2024，49(12)：4 687－4 700.(in Chinese))

[4] 田永超，何　璠，殷　源. 基于 3D 打印和 FDEM 算法的层状岩体力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报，2023，42(增 1)：3 331－3 343.(TIAN Yongchao，HE Fan，YIN Yuan. Study on mechanical properties of layered rock mass based on 3D printing technology and FDEM algorithm[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2023，42(Supp.1)：3 331－3 343.(in Chinese))

[5] 崔哲森，柴青平，刘志龙，等. 爆堆块度分布对孔隙结构分形特征影响研究[J]. 岩石力学与工程学报，2025，44(增 1)：134－145.(CUI Zhesen，CHAI Qingping，LIU Zhilong，et al. Study on the influence of fragmentation distribution of blasting heap on fractal characteristics of pore structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2025，44(Supp.1)：134－145.(in Chinese))

[6] 石　浩，张后全，吴疆宇，等. 考虑微元强度韦伯分布与裂纹长度幂律排布的砂岩强度预测模型[J]. 西北工业大学学报，2023，41(6)：1 114－1 124.(SHI Hao，ZHANG Houquan，WU Jiangyu，et al. Prediction model for sandstone strength based on Weibull distribution of micro-element strength and power-law distribution of crack length[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University，2023，41(6)：1 114－1 124.(in Chinese))

[7] 石　浩，张后全，宋　雷，等. 动载下含预制裂纹砂岩的力学特性及破裂过程研究[J]. 振动与冲击，2023，42(4)：28－38.(SHI Hao，ZHANG Houquan，SONG Lei，et al. A study on mechanical properties and fracture process of sandstone with prefabricated cracks under dynamic loading[J]. Journal of Vibration and Shock，2023，42(4)：28－38.(in Chinese))

[8] LEI Q H，GAO K. A numerical study of stress variability in heterogeneous fractured rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences，2019，113：121－133.

[9] SHI H，CHEN W L，ZHANG H Q，et al. Dynamic strength characteristics of fractured rock mass[J]. Engineering Fracture Mechanics，2023，292：109678.

[10] WANG S S，YANG S Q，ZHANG Q，et al. A modified phase-field model simulating multiple cracks propagation of fissured rocks under compressive or compressive-shear conditions[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics，2024，133：104549.

[11] 杨圣奇，陶焱，唐劲舟. 循环加载下单节理砂岩三轴强度与变形试验研究[J]. 中国矿业大学学报，2020，49(5)：819－825.(YANG Shengqi，TAO Yan，TANG Jinzhou. Experimental study of triaxial strength and deformation of single jointed sandstone under cyclic loading[J]. Journal of China University of Mining and Technology，2020，49(5)：819－825.(in Chinese))

[12] 王述红，庄贤鹏，王　菲，等. 循环荷载下双裂隙砂岩弹性模量及裂纹动态演化[J]. 东北大学学报：自然科学版，2024，45(3)：361－371.(WANG Shuhong，ZHUANG Xianpeng，WANG Fei，et al. Elastic modulus and dynamic evolution of fracture in double-fractured sandstone under cyclic loading[J]. Journal of Northeastern University：Natural Science，2024，45(3)：361－371.(in Chinese))

[13] LI Z Y，YANG B，XIA Z G，et al. Experimental study and particle flow code numerical simulation of crack propagation and failure characteristics of prefabricated double-fissured rock samples[J]. Computational Particle Mechanics，2025，12(3)：1 565－1 578.

[14] MA W Q，MA Y H. A synthetic study of cracking behavior and fracture mechanism of sandstone containing two non-connected fissures under uniaxial compression[J]. Computational Particle Mechanics，2025，12(2)：1 075－1 097.

[15] 王　磊，商瑞豪，刘怀谦，等. 荷载作用下多裂隙煤体力学特性与起裂角研究[J]. 岩土力学，2024，45(3)：659－673.(WANG Lei，SHANG Ruihao，LIU Huaiqian，et al. Mechanical properties and crack initiation angle of multi-fractured coal under load[J]. Rock and Soil Mechanics，2024，45(3)：659－673.(in Chinese))

[16] 唐劲舟，唐文豪，杨　科，等. 循环荷载作用下含倾斜单裂隙砂岩力学响应特征及渗流演化规律[J]. 岩土力学，2025，46(1)：199－212.(TANG Jinzhou，TANG Wenhao，YANG Ke，et al. Mechanical response characteristics and seepage evolution pattern of sandstone with an inclined single fracture under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics，2025，46(1)：199－212.(in Chinese))

[17] 王春萍，刘建锋，刘　健，等. 围压和裂隙倾角对花岗岩力学行为的影响研究[J]. 岩土工程学报，2024，46(3)：578－586.(WANG Chunping，LIU Jianfeng，LIU Jian，et al. Influences of confining pressure and fracture inclination on mechanical behavior of granite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2024，46(3)：578－586.(in Chinese))

[18] 张庆海，许晓亮，李建林，等. 冲击荷载下双裂隙砂岩渐进破坏特性及裂纹扩展机制研究[J]. 岩石力学与工程学报，2025，44(5)：1 242－1 256.(ZHANG Qinghai，XU Xiaoliang，LI Jianlin，et al. Study on progressive failure characteristics and crack propagation mechanism of double-flawed sandstone under impact load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2025，44(5)：1 242－1 256.(in Chinese))

[19] 刘一鸣，李　振，冯国瑞，等. 循环加卸载下裂隙砂岩声-热响应特征及前兆规律[J]. 岩土力学，2025，46(9)：2 773－2 791.(LIU Yiming，LI Zhen，FENG Guorui，et al. Acoustic-thermal response characteristics and precursor law of fractured sandstone under cyclic loading and unloading[J]. Rock and Soil Mechanics，2025，46(9)：2773－2 791.(in Chinese))

[20] 赵洪宝，胡桂林，李　伟，等. 预制裂隙岩石裂纹扩展规律的研究进展与思考[J]. 地下空间与工程学报，2016，12(增 2)：899－906.(ZHAO Hongbao，HU Guilin，LI Wei，et al. Research progress and thinking on the crack propagation law of pre-fractured rock[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering，2016，12(Supp.2)：899－906.(in Chinese))

[21] HU J，WANG H K，XIA Z G，et al. Mechanical properties and acoustic emission characteristics of two dissimilar layers of rock-like specimens with prefabricated parallel fissures[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources，2024，10(1)：19.

[22] JU Y，XIE H P，ZHENG Z M，et al. Visualization of the complex structure and stress field inside rock by means of 3D printing technology[J]. Chinese Science Bulletin，2014，59(36)：5 354－5 365.

[23] 王晓卿，高富强，娄金福. 基于 3D 打印的复杂裂隙岩体模型制备试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2023，42(增 2)：3 913－3 920.(WANG Xiaoqing，GAO Fuqiang，LOU Jinfu. Experimental research on model preparation of highly fractured rock mass based on 3D

printing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2023，42(Supp.2)：3 913－3 920.(in Chinese))

[24] WANG S Y，YU S Y，HU X Y，et al. Insights into fracture modes of 3D sand-printed rock-like models with T-shaped crossed fissures[J]. Natural Hazards，2025，121(10)：11 459－11 487.

[25] 罗丹旋，卢思航，苏国韶，等. 含预制单裂隙花岗岩的真三轴单面临空岩爆试验研究[J]. 岩土力学，2023，44(1)：75－87.(LUO Danni，LU Sihang，SU Guoshao，et al. Experimental study on rock burst of granite with prefabricated single crack under true-triaxial stress condition with a free face[J]. Rock and Soil Mechanics，2023，44(1)：75－87.(in Chinese))

[26] 赵阳升. 岩体力学发展的一些回顾与若干未解之百年问题[J]. 岩石力学与工程学报，2021，40(7)：1 297－1 336.(ZHAO Yangsheng. Retrospection on the development of rock mass mechanics and the summary of some unsolved centennial problems[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2021，40(7)：1 297－1 336.(in Chinese))

[27] 余伟健，周明娟. 不同次裂隙数目条件下岩石力学特性及破坏模式[J]. 采矿与安全工程学报，2025，42(2)：394－403.(YU Weijian，ZHOU Mingjuan. Rock mechanics characteristics and failure modes under different number of secondary fractures[J]. Journal of Mining and Safety Engineering，2025，42(2)：394－403.(in Chinese))

[28] 王建明，王延廷，陈忠辉，等. 卸荷条件下不等长共线双裂隙相互作用规律分析[J]. 煤炭学报，2020，45(11)：3 759－3 771.(WANG Jianming，WANG Yanting，CHEN Zhonghui，et al. Interaction analysis of two collinear cracks with unequal length under the condition of unloading[J]. Journal of China Coal Society，2020，45(11)：3 759－3 771.(in Chinese))

[29] LI T，CHEN G B，LI Q H. Experimental study on rock-coal-rock composite structure with different crack characteristics[J]. Geomechanics and Engineering，2022，29(4)：377－390.

[30] LING K，LIU D Q，WANG S Y，et al. Experimental study on the fracture evolution process of pillar burst based on acoustic emission under horizontal bidirectional unloading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，2025，58(5)：4 983－5 002.

[31] GUO T F，LIU K W，WANG H Q，et al. Mechanical characteristics and fracturing behavior of rock-concrete composite specimens with two pre-existing parallel flaws under uniaxial compression based on AE and DIC systems[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics，2025，136：104866.

[32] LI T，CHEN G B，LI Q H，et al. The effect of crack characteristics on the mechanical properties and energy characteristics of coal-rock composite structure[J]. Acta Geodynamica et Geomaterialia，2022，19(2)：127－142.

[33] YANG J，YANG S Q，LIU G J，et al. Experimental study of crack evolution in prefabricated double-fissure red sandstone based on acoustic emission location[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources，2021，7(1)：18.

[34] 刘红岩，薛　雷，张光雄，等. 考虑裂隙粗糙度的岩体单轴压缩动态损伤模型[J]. 爆炸与冲击，2025，45(6)：45－55.(LIU Hongyan，XUE Lei，ZHANG Guangxiong，et al. A uniaxial compressive dynamic damage model for rockmass considering the crack roughness[J]. Explosion and Shock Waves，2025，45(6)：45－55.(in Chinese))

[35] MEI Y X，WANG S B，YANG N P，et al. Study on fracture damage caused by polymer fracturing fluid to sandstone with different fracture widths[J]. Chemistry and Technology of Fuels and Oils，2025，61(2)：566－579.

[36] WONG L N Y，LAI V S K，TAM T P Y. Joint spacing distribution of granites in Hong Kong[J]. Engineering Geology，2018，245：120－129.

[37] YANG J P，CHEN W Z，YANG D S，et al. Estimation of elastic moduli of non-persistent fractured rock masses[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，2016，49(5)：1 977－1 983.

[38] OSOLNIK U，VEK V，KOROS R C，et al. Integration of wood-based components-Cellulose nanofibrils and tannic acid-into a poly(vinyl alcohol) matrix to improve functional properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules，2024，256(2)：128495.

[39] CHEN X W，WANG M H，ZHANG H X，et al. Enhancing thermal performance of PVA films by doping 2D fluorographene nanosheet relying the self-assembly[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers，2022，134：104332.

[40] QIAN Z Y，WANG M H，LI J L，et al. Preparation and adsorption photocatalytic properties of PVA/TiO2 colloidal photonic crystal films[J]. Gels，2024，10(8)：520.

[41] 孙浩杰，李北星，纪宪坤，等. 水化温升抑制剂对掺钙镁复合膨胀剂混凝土温控与变形性能的影响[J]. 硅酸盐通报，2025，44(6)：2 079－2 088.(SUN Haojie，LI Beixing，JI Xiankun，et al. Effect of temperature rise inhibitor on temperature control and deformation properties of concrete with calcium and magnesium oxides based expansive agent[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society，2025，44(6)：2 079－2 088.(in Chinese))

[42] 吴疆宇. 胶结充填体的宏细观力学特性及蠕变模型[博士学位论文][D]. 徐州：中国矿业大学，2019.(WU Jiangyu. Macroscopic and microscopic mechanical properties and creep model of cemented waste rock backfill[Ph. D. Thesis][D]. Xuzhou：China University of Mining and Technology，2019.(in Chinese))

[43] 杨建平，陈卫忠，戴永浩. 裂隙岩体变形模量尺寸效应研究II：解析法[J]. 岩土力学，2011，32(6)：1 607－1 612.(YANG Jianping，CHEN Weizhong，DAI Yonghao. Study of scale effect of deformation modulus for fractured rock mass-part II：Analytical method[J]. Rock and Soil Mechanics，2011，32(6)：1 607－1 612.(in Chinese))

[44] JIAO F Y，WANG H D，LI T，et al. Multi-domain equivalent method for prediction of elastic modulus of complex fractured rock mass[J]. Journal of Mountain Science，2023，20(3)：859－872.

[45] LEMAITRE J，SERMAGE J P. One damage law for different mechanisms[J]. Computational Mechanics，1997，20(1-2)：84－88.

[46] 赵桐德，高全臣，王纪伟，等. 多组贯穿闭合裂隙岩体变形模型研究[J]. 应用力学学报，2021，38(3)：1 119－1 126.(ZHAO Tongde，GAO Quanchen，WANG Jiwei，et al. Study on deformation model of rock mass with multi-group penetrative and closed crack sets[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics，2021，38(3)：1 119－1 126. (in Chinese))