

柔性边界三轴压缩条件下含瓦斯水合物煤体宏观力学性质

高霞¹, 王楠楠², 秦程¹, 张保勇², 蒋静宇³, 吴强²

(1. 黑龙江科技大学 建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150022; 2. 黑龙江科技大学 安全工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150022; 3. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:为探究不同边界条件下围压对含瓦斯水合物煤体的宏观力学性质影响规律,对饱和度80%的煤样进行围压12、16、20 MPa下双轴离散元试验。首先,考虑颗粒形状效应、水合物胶结作用以及热缩管的影响,选取抗滚动阻力线性模型和平行黏结模型,分别构建了刚性边界和柔性边界的含瓦斯水合物煤体双轴数值模型。其次,通过与室内试验结果(偏应力-轴向应变曲线、体积应变-轴向应变曲线、内摩擦角、黏聚力以及试样破坏模式)对比,验证了数值模型的可靠性,并发现柔性边界能更好地反映试样轴向应变-偏应力特征、剪胀特性以及强度特性。基于所建数值模型,从试样内部位移场、力学平均配位数、平均孔隙率、接触力链以及水合物黏结破坏角度揭示围压和边界条件对含瓦斯水合物煤体宏观力学性质的影响规律。结果表明:①随着围压的增大,刚性边界的破坏型式多表现为单斜面剪切破坏;柔性边界的破坏型式由单叉型剪切破坏转变为单斜面剪切破坏。②随着围压的增加,2种边界的力学平均配位数均呈增大趋势,平均孔隙率均呈减少趋势,试样更密实,试样强度增加。③随着围压的增加,颗粒间法向接触力继续增加,试样强度增加,分布在轴向附近的法向接触力随之增大,而在水平向附近的法向接触力变化较小,竖向与水平向法向接触力差异越明显,各向异性更突出;在峰值强度处,随着围压从12 MPa增加到20 MPa,柔性边界法向接触力增加了54.50%,刚性边界法向接触力增加了45.70%。④在不同围压和边界条件下,试样产生张拉和剪切2种不同破坏形式,试样内部起裂主要以水合物和煤间剪切裂纹为主导;随着围压的增大,2种边界内部剪切裂纹数量呈逐渐减小趋势。研究结果从细观尺度上揭示围压对含瓦斯水合物煤体强度变形破坏等宏观力学特性的影响机制。

关键词:煤与瓦斯突出;含瓦斯水合物煤体;离散元;三轴压缩试验;围压;柔性边界

中图分类号:TD712 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2024)06-2691-20

Macro-meso mechanical properties of gas hydrate bearing coal under triaxial compression with flexible boundary condition

GAO Xia¹, WANG Nannan², QIN Cheng¹, ZHANG Baoyong², JIANG Jingyu³, WU Qiang²

(1. School of Architecture & Civil Engineering, Heilongjiang University of Science & Technology, Harbin 150022, China; 2. School of Safety Engineering, Heilongjiang University of Science & Technology, Harbin 150022, China; 3. Faculty of Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

收稿日期: 2023-05-28 修回日期: 2024-01-03 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0672

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U21A20111); 国家自然科学基金面上资助项目(51974112, 51674108)

作者简介: 高霞(1984—),女,山西忻州人,副教授,博士。E-mail: klgaoxia1984@163.com

通讯作者: 张保勇(1982—),男,安徽霍邱人,教授,博士。E-mail: zhangbaoyong2017@outlook.com

引用格式: 高霞,王楠楠,秦程,等. 柔性边界三轴压缩条件下含瓦斯水合物煤体宏观力学性质[J]. 煤炭学报, 2024, 49(6): 2691-2710.

GAO Xia, WANG Nannan, QIN Cheng, et al. Macro-meso mechanical properties of gas hydrate bearing coal under triaxial compression with flexible boundary condition[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(6): 2691-2710.



移动阅读

Abstract: To explore the influence of confining pressure on the macro-meso mechanical characteristics of gas hydrate bearing coal (GHBC) under different boundary conditions, the biaxial discrete element tests were carried out subjected to the confining pressures of 12, 16 and 20 MPa for GHBC with saturation of 80%. Firstly, the biaxial numerical models of GHBC were established for flexible and rigid boundaries, using the linear model of the rolling resistance and the parallel bonding model. These numerical models incorporated the influences of particle shape effect, the hydrate cementation and the heat-shrinkable pipe. Then, the reliability of the numerical model was verified, by comparing with the indoor test results (stress-strain curves, bulk strain curves, internal friction angle cohesion and specimen failure modes). It is found that the flexible boundary can better reflect the deviatoric, stress-axial strain, the shear expansion and the strength characteristics of the sample. Based on the established numerical model, the roles of the confining pressure and the boundary condition on the macro-meso mechanical properties of GHBC were clarified from the perspectives of the internal displacement field, the mean mechanical coordination number, the mean porosity, the contact force chain and the hydrate bond failure. The results show that: ① with the increase of confining pressure, the numerical sample with the rigid boundary mostly exhibits the single inclined plane shear failure, while that with the flexible boundary varies from the single fork shear failure to the single inclined plane shear failure. ② With the increase of confining pressure, for the two boundaries, the mean mechanical coordination numbers increase and the mean porosity decrease, leading to a denser and higher strength of the sample. ③ With the increase of confining pressure, the normal contact force between particles continues to increase, and the sample strength increases. The normal contact force distributed near the axial direction increases, while that near the horizontal direction varies weakly. The higher the confining pressure is, the more difference between the vertical and the horizontal normal contact forces have, the more prominent the anisotropy is. The normal contact force increases by 54.50%, at the flexible boundary, and increases by 45.70%, at the peak strength point, with the confining pressure increasing from 12 MPa to 20 MPa. ④ Under different confining pressures and boundary conditions, the samples fail with two different failure modes, tensile and shear. The samples mainly crack from the shear between the hydrate and coal. The research results reveal the mechanism of the influence of confining pressure on the strength deformation and failure of GHBC on the mesoscale.

Key words: coal and gas outburst; gas hydrate bearing coal; discrete element; triaxial compression test; confining pressure; flexible boundary

煤与瓦斯突出是一种复杂的动力灾害^[1-2],且随着煤层开采深度的增加,突出灾害愈加严重^[3-5]。在煤与瓦斯突出机制方面,综合作用假说得到了普遍认可,突出是地应力、瓦斯压力以及煤的物理力学性质等因素综合作用的结果^[6-10]。瓦斯固化防突技术能够降低瓦斯压力,改善煤体力学特性,从而达到预防煤与瓦斯突出的目的^[11]。其应用关键是掌握水合物生成前后煤体力学性质的变化规律。此外,研究表明围压对煤岩力学性质有重要影响^[12-14]。因此,研究不同围压条件下含瓦斯水合物煤体的力学性质对于利用瓦斯固化技术预防煤与瓦斯突出具有重要意义。

室内三轴试验是探究含瓦斯水合物煤体力学性质的有效手段。但目前对于含瓦斯水合物煤体力学性质研究较少,相关研究集中于含水合物沉积物力学性质方面。其主要影响因素有:围压^[15-17]、水合物饱和度^[18-19]、温度^[20-21]等。如:HYODO等^[15,20]、DONG等^[18]以及颜荣涛等^[21]研究发现水合物的生成能够改善沉积物的强度,且随着饱和度的增加,偏应力和残

余强度越大。HYODO等^[22]、ZHANG等^[23]、李彦龙等^[24]发现随着有效围压的增大,含水合物沉积物的应力-应变曲线由应变软化向应变硬化转变,体积应变曲线由剪胀向剪缩转变。通过以上研究表明,水合物的生成对沉积物具有强化作用,围压对含水合物沉积物的变形和破坏有重要影响。

近年来,随着计算机技术的发展,数值试验成为研究含水合物多孔介质宏观细观力学性质的一种新方法,能够拓展和丰富室内试验成果,获取室内试验难以测得的配位数、孔隙率、接触力链等细观演化规律,从而揭示其宏观破坏特征的细观机制。周世琛等^[25]选取平行黏结模型来表征水合物胶结作用,对刚性边界试样进行不排水剪切数值模拟试验,探究3种有效围压对水合物沉积物试样和饱和砂土试样在剪切过程中的细观力学特征。周博等^[26]采用平行黏结模型表征瓦斯水合物胶结作用,以水合物沉积物为研究对象,进行真三轴压缩实验,探究围压对初始弹性模量的影响规律。LIU等^[27]选取平行接触黏结模型表征

水合物间、水合物-沉积物间的胶结作用, 研究水合物分布不均匀性对水合物沉积物力学特性的影响, 发现水合物分布的非均匀性对水合物沉积物的弹性模量、抗剪强度和膨胀等力学参数有较大影响。BRUGADA 等^[28]选用黏结模型, 构建刚性边界试样, 发现水合物对沉积物强度有贡献的是内摩擦角, 而不是黏聚力。JIANG 等^[29]以水合物沉积物为研究对象, 选用粘结接触模型, 构建刚性边界试样, 研究围压对其力学特性的影响, 发现抗剪强度随着围压的增大而增大, 剪胀量随着围压的增大而减小。

上述研究中, 大多将包裹沉积物试样的橡胶膜设置为刚性边界条件, 忽略了其弹性变形对含水合物沉积物力学性质的影响。事实上, 对于含水合物多孔介质力学性质来说, 橡胶膜的弹性行为对试样的强度特性和变形破坏形式有较大影响^[30]。因此, 为更好地模拟室内三轴压缩试验条件, 开展柔性边界条件下的含瓦斯水合物煤体宏观力学性质研究十分必要。

在考虑柔性边界的岩土材料离散元数值模拟方面, 周世琛等^[30]采用 Wall-Zone 耦合方法模拟侧向柔性边界, 研究了胶结型水合沉积物试样的强度和变形特性。WANG 等^[31]通过双轴试验研究了胶结砂土的强度和变形特性, 发现团簇的存在不仅有助于维持整体的体积膨胀, 还可以防止力链屈曲, 增加试样强度。CHEUNG 等^[32]通过研究颗粒材料的柔性横向边界以及张强等^[33]以土石混合体为研究对象进行数值模拟试验, 两者均进行刚性和柔性边界双轴试验的应力-应变曲线的对比, 均发现在初始阶段两者基本一致, 但在峰前曲线出现差异, 柔性边界的峰值强度更低, 同时柔性边界的剪切带发育更完整, 说明刚性边界限制了试样局部变形和剪切带的发展。QU 等^[34]提出鲁棒算法重现柔性膜边界的三轴试验以及蒋成龙等^[35]对砾质土进行数值模拟试验研究, 两者均利用三轴试验侧向柔性边界与三维刚性边界进行对比研究, 发现不同边界条件下试样的变形、破坏模式、接触力链分布存在较大差异, 认为柔性边界更能真实地模拟室内试验。BINESH 等^[36]发现颗粒材料中三维刚性边界试样在内部容易出现应力集中现象。因此, 相较于刚性边界, 柔性颗粒边界能更好地反映试样的轴向应变-偏应力特征、剪胀特性以及强度特性。

上述研究表明, 三轴试验结合离散元法是研究含水合物多孔介质力学性质有效的技术手段, 对于水合物的模拟多采用平行黏结模型, 考虑其水合物的黏结行为。尽管有关考虑柔性边界的土体力学性质研究已经取得一些基本认识, 然而目前对于柔性边界条件下含瓦斯水合物宏观破坏特征研究却鲜见报道。

鉴于此, 笔者以含瓦斯水合物煤体为研究对象, 考虑水合物对煤体的胶结作用, 通过离散元 PFC^{2D} 构建不同围压下柔性边界含瓦斯水合物煤体的双轴试验数值模型, 分析不同围压 (12、16、20 MPa) 下试样内部位移场、力学平均配位数、平均孔隙率、接触力链以及水合物黏结破坏等演化规律, 揭示围压和边界条件对含瓦斯水合物煤体宏观力学性质的影响规律。研究成果可为含瓦斯水合物煤体及含水合物多孔介质三轴试验离散元建模提供理论基础, 为进一步揭示水合物对煤体力学性质的强化机理提供理论依据。

1 离散元 PFC^{2D} 数值模型建立

1.1 柔性边界构建

为了研究不同边界对含瓦斯水合物煤体变形破坏的影响规律, 分别建立柔性边界和刚性边界离散元数值模型进行双轴离散元试验。刚性边界是由上下左右四面刚性墙组成。柔性边界构建思路及流程如下:

(1) 在刚性侧墙边界外生成 2 条颗粒链。

(2) 颗粒间采用接触黏结模型, 以保证颗粒间只传递力而不传递力矩, 从而达到室内三轴试验中橡皮膜柔性加压的作用。

(3) 在膜颗粒上采用施加等效集中力 (图 1) 的方式, 来施加和保持围压稳定。施加在颗粒上的等效集中力, 按式 (1)^[37] 计算:

$$\begin{cases} F_x = 0.5(l_{12}\cos\theta + l_{23}\cos\beta)\sigma_3 \\ F_y = 0.5(l_{12}\sin\theta + l_{23}\sin\beta)\sigma_3 \end{cases} \quad (1)$$

式中, σ_3 为试验施加的围压。

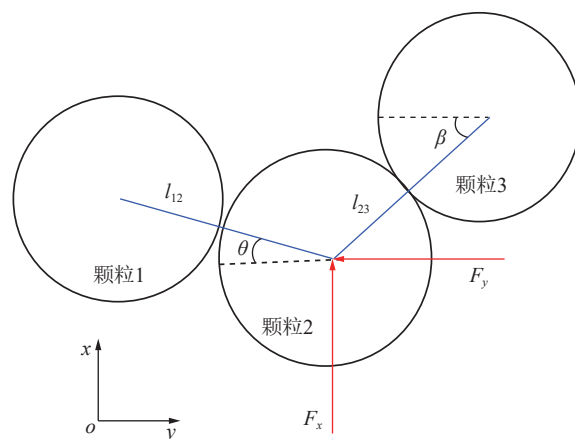


图1 柔性颗粒施加等效集中力计算示意^[37]

Fig.1 Schematic calculation diagram of the equivalent concentrated force applied by the flexible particles^[37]

图中 F_x 、 F_y 分别为施加到颗粒 2 上 x 、 y 方向的等效集中力; l_{12} 为颗粒 1 球心与颗粒 2 球心间的长度;

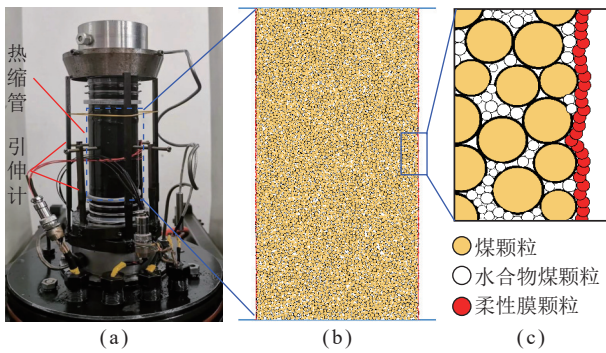


图4 双轴离散元数值模型

Fig.4 Biaxial discrete element numerical model

物饱和度计算水合物体积, 求出两者体积分数、试样初始孔隙率。使用“ball distribute”命令在墙内同时生成随机分布的煤和水合物颗粒, 通过循环求解减小颗粒间重叠以及试验内部颗粒间不平衡力。生成的二维离散元模型, 如图 5(a)、(b) 所示。其次预压: 通过刚性墙施加固结应力 1 MPa, 如图 5(c) 所示。然后生成颗粒边界以及施加预加力: 针对刚性边界条件, 保持刚性边界不变, 进行加载; 针对柔性边界条件, 在紧贴左右刚性墙外部生成模拟柔性膜的颗粒, 施加径向力以模拟围压, 上下加载板由刚性墙组成, 以实现轴向加载, 最后删除侧向刚性墙, 如图 5(d) 所示。

表1 数值试样物理参数

Table 1 Physical parameters of the numerical sample

$(R \times H)/(\text{mm} \times \text{mm})$	$R_{c,\min}/\text{mm}$	$R_{c,\max}/R_{c,\min}$	R_h/mm	$\rho_h/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\rho_c/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	p
50×100	0.4	1.66	0.1	900	2 650	0.4

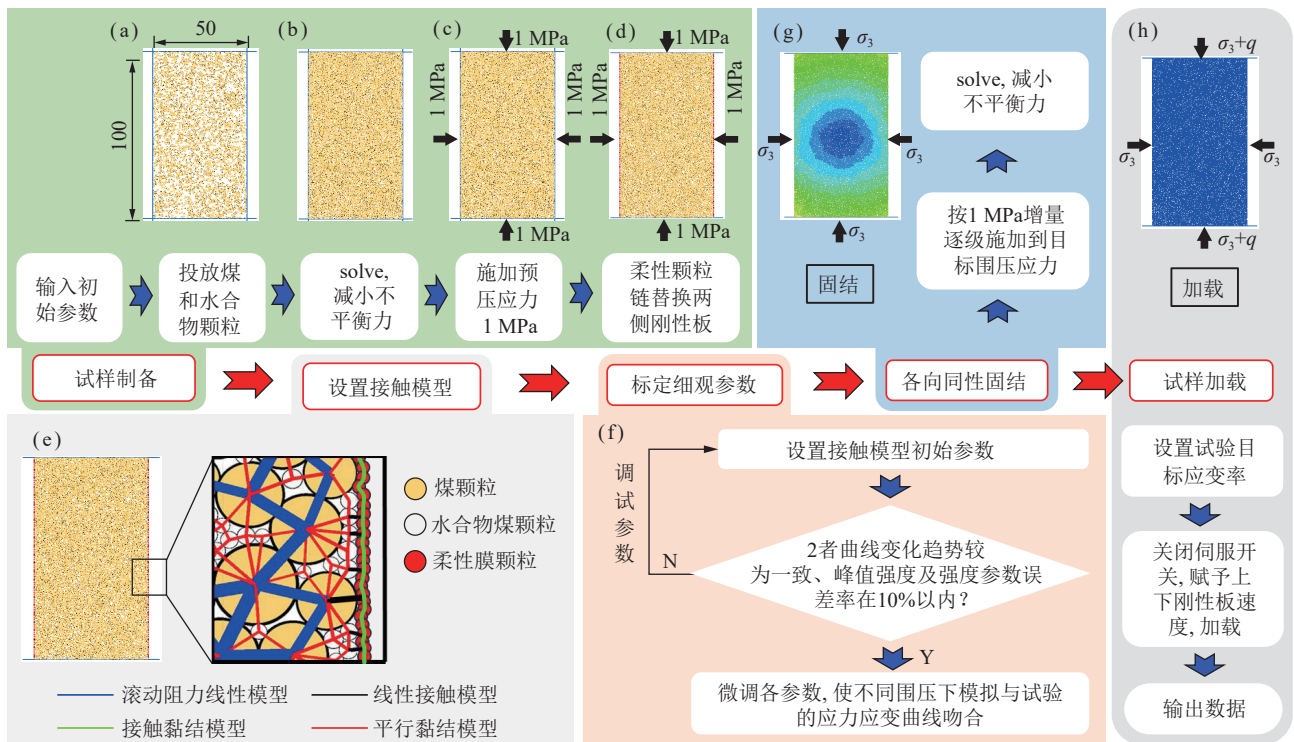


图5 含瓦斯水合物煤体数值模拟试验流程

Fig.5 Flow chart of the numerical simulation test of GHBC

(2) 设置接触模型及细观参数标定: 在煤颗粒间设置抗滚动阻力线性接触模型, 水合物颗粒之间、水合物颗粒与煤颗粒之间设置平行黏结模型, 试样与柔性膜颗粒和刚性上下板间采用线性接触模型, 颗粒膜之间采用接触黏结模型, 如图 5(e) 所示。细观参数标定流程, 如图 5(f) 所示。

(3) 各向同性固结: 刚性边界对刚性墙体施加速度以达到施压作用; 柔性边界采用柔性膜颗粒和上下刚

性墙逐级施加围压, 最终达到试验所需的目标围压条件, 如图 5(g) 所示。

(4) 试样加载: 在轴向加载过程中 (轴向力增加量为 q , 即偏应力为 q), 关闭上下加载板的伺服开关, 采用 cycle 20 000 步逐渐增加到目标加载速度, 以防止加载板对试样的冲击作用, 在每个时步下更新一次膜颗粒等效集中力及方向, 以维持围压 σ_3 稳定, 如图 5(h) 所示。

2 含瓦斯水合物煤体数值模型验证

细观参数确定是离散元数值模拟的关键。按照离散元常用手段“试错法”^[46-47]进行含瓦斯水合物煤体细观参数标定。表 2 给出了煤颗粒-煤颗粒、水合物-煤颗粒、水合物-水合物、柔性膜以及柔性膜-试样间的细观参数。

表 2 接触模型细观参数
Table 2 Meso-parameters of contact models

接触类型	特征参数	取值
煤颗粒-煤颗粒	有效模量/GPa	2.0
	法切向刚度比	0.1
	滚动阻力系数	7.0
	接触间摩擦因数	0.2
水合物-水合物、 水合物-煤颗粒	线性有效模量/GPa	0.25
	线性刚度比	0.1
	黏结有效模量/GPa	0.25
	黏结刚度比	0.1
	抗拉强度/MPa	8.0
	黏聚力/MPa	4.5
	内摩擦角/(°)	20.0
柔性膜	接触间摩擦因数	0.1
	黏结刚度比	1
	法向黏结强度/Pa	1.0×10^{300}
柔性膜-试样	切向黏结强度/Pa	1.0×10^{300}
	有效模量/GPa	0.1

2.1 偏应力-轴向应变曲线

基于表 2 标定的细观参数进行了围压 12、16、20 MPa 下的双轴压缩数值模拟试验,得到了不同边界条件下试样的偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ -轴向应变 ε_1 曲线,并与室内试验曲线进行对比,如图 6 所示。从图中可以发现:

(1) 不同边界、围压条件下,试样的偏应力-应变曲线的变化趋势大体上是一致的,均呈现应变硬化型。

(2) 室内试验中围压为 12、16、20 MPa 所对应的峰值强度 ($\varepsilon_1 = 14 \times 10^{-2}$) 分别为 22.26、33.07、33.06 MPa,柔性边界条件下峰值强度分别为 22.26、35.02、34.76 MPa,误差率分别为 0、5.9%、5.1%,3 者误差率均在 10% 以内;刚性边界条件下峰值强度分别为 25.44、30.68、37.45 MPa,误差率分别为 14.28%、7.2%、13.3%,误差率最大为 14.28%。不同边界条件下峰值强度误差率均在 15% 以内^[48]。

2.2 体积应变-轴向应变曲线

图 7 给出了不同边界试样剪切破坏过程的体积

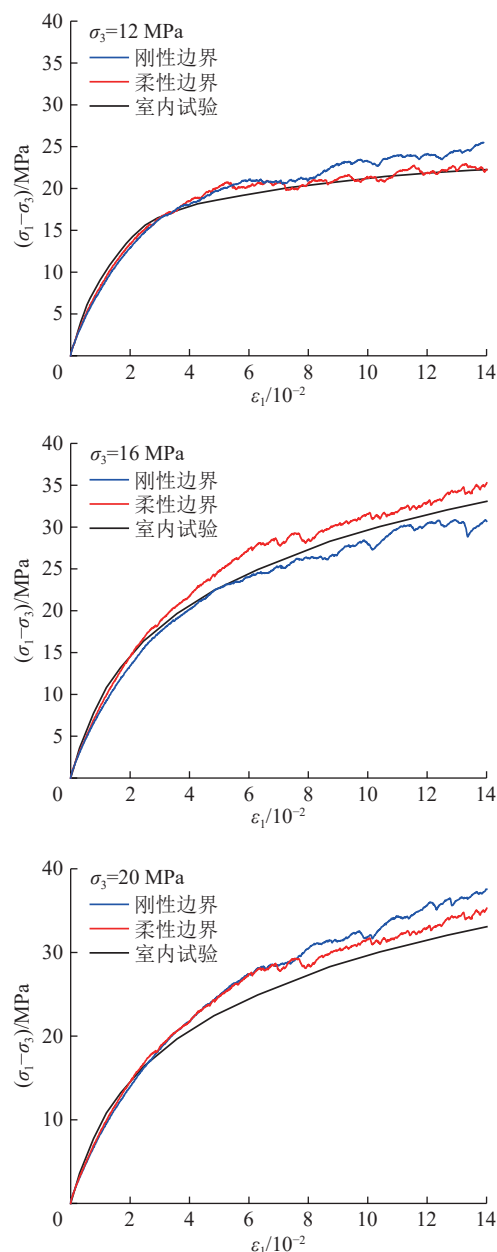


图 6 偏应力-应变曲线对比

Fig. 6 Comparison of deviatoric stress-strain curves

应变曲线,并与室内试验曲线进行对比。从图中可以发现:不同边界条件下,在轴向应变 4×10^{-2} 以内,数值模拟结果与试验结果较为吻合;随着轴向应变的增加,柔性边界和刚性边界条件下,两者体积均由剪缩向剪胀转变,均与室内试验剪胀破坏趋势相符合,柔性边界剪胀趋势更为显著。

体积应变 ε_v -轴向应变曲线数值模拟结果与室内试验结果偏差较大,其原因可能为:

(1) 体积应变的监测和计算原理不同:室内试验监测径向应变位置是在试样中部,随着加载的继续,测量位置会上移。同含瓦斯煤类似,含瓦斯水合物煤体不仅具有各向异性,同时也具有非均质性,含瓦斯煤体内的孔、裂隙发育不均,这些均是导致实验所测值

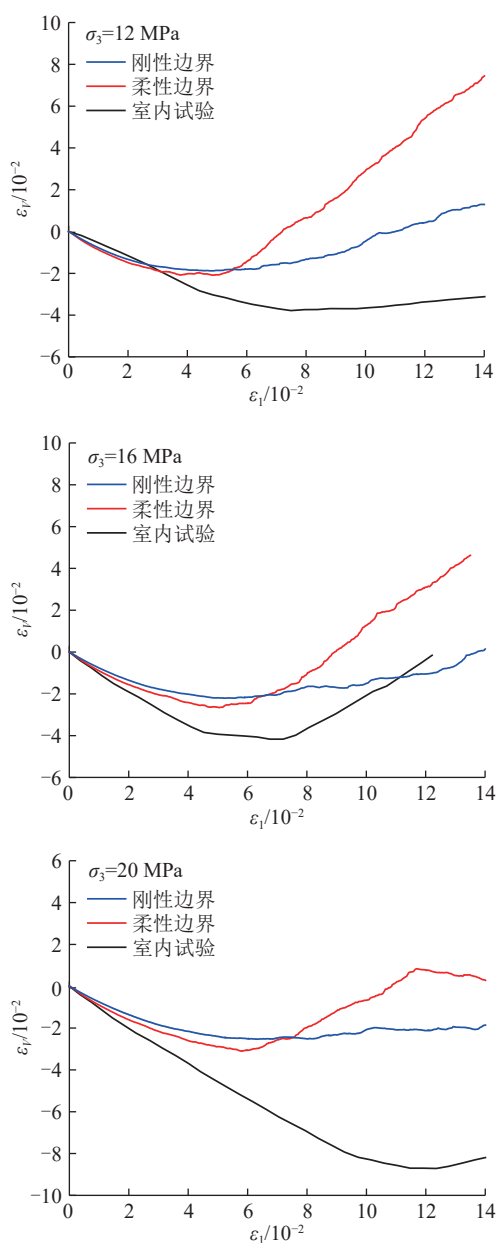


图7 体积应变-轴向应变曲线对比

Fig.7 Comparison of the volume strain - the axial strain curves 与理论计算值之间产生偏差的重要原因^[49];数值模拟是对整体进行监测,其检测方法为:利用测量圆,测量得到试样应变率张量,并乘以时间步累积得到应变,最后根据体积应变换算公式得到体积应变。

(2) 颗粒破碎的影响:在室内试验中,随着围压的增大,试样内的颗粒有可能会发生破碎,破碎的颗粒填充空隙,体积进一步密实;而在数值模拟中,随着围压的增加,体系空隙变小,颗粒间接触力增大并逐渐超过颗粒间黏聚力,直至“连接键”断裂。当达到峰值应力后,在克服摩擦力后,由于圆盘颗粒不如实际煤颗粒排列方式紧密,导致颗粒间咬合力较弱,造成体积迅速膨胀。认为采用圆盘颗粒且没有考虑颗粒破碎是模拟体积应变与试验结果偏差较大的主要原因。

2.3 强度参数

在围压 12、16、20 MPa 下,通过数值试验和室内试验的应力莫尔圆和强度包络线,计算出室内试验中黏聚力和内摩擦角分别为 2.24 MPa、24.83°,柔性边界的黏聚力和内摩擦角分别为 2.11 MPa、23.33°,误差率分别为 5.8%、6.0%,两者误差率均在 10% 以内。刚性边界的黏聚力和内摩擦角分别为 2.55 MPa、22.33°,误差率分别为 13.8%、10.1%,黏聚力最大误差率为 13.8%。不同边界条件下内摩擦角和黏聚力误差率均在 15% 以内^[48]。

2.4 破坏模式

图 8 为试样破坏对比,可以得出在柔性边界条件下,试样破坏后,侧向表现出不均匀鼓胀,横向膨胀现象明显,这与室内试验基本吻合;刚性边界条件限制了试样局部变形和剪切带的发展,体现不出室内试验的鼓胀现象。

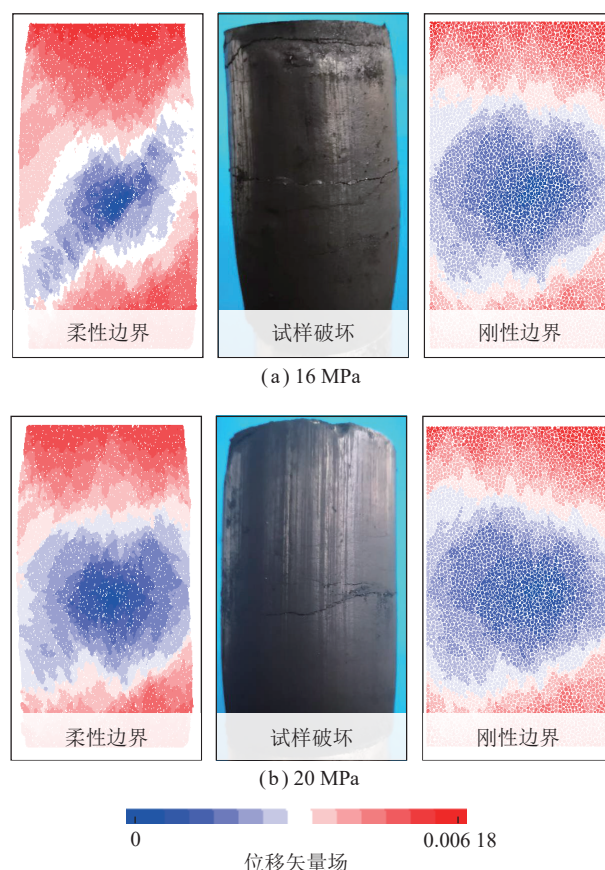


图8 试样破坏对比

Fig.8 Comparison of sample failure modes

综上所述,不同边界条件下离散元数值模型均能够有效地模拟出室内试验的偏应力与轴向应变曲线。刚性边界峰值强度误差率最大不超过 14.28%;柔性边界峰值强度误差率最大不超过 5.9%。刚性边界和柔性边界的体积应变曲线变化趋势均能体现出室内试验的剪胀破坏趋势;柔性边界内摩擦角和黏聚力误差

率不超过 6%; 刚性边界内摩擦角和黏聚力误差率均在 15% 以内。相比于刚性边界, 柔性边界变形破坏模式更与室内试验吻合。以上研究结果验证了柔性模型能更好地反映轴向应变-偏应力特征、剪胀特性以及强度特性。同时, 也验证了细观参数标定的合理性和离散元数值模型构建的可靠性。

3 含瓦斯水合物煤体宏观细观力学性质

3.1 剪切破坏特性

在围压 12、16、20 MPa 作用下, 对 2 种边界在加载过程中进行试样剪切破坏特征与变形规律分析, 即分析试样破坏后形成的剪切带, 如图 9 所示。

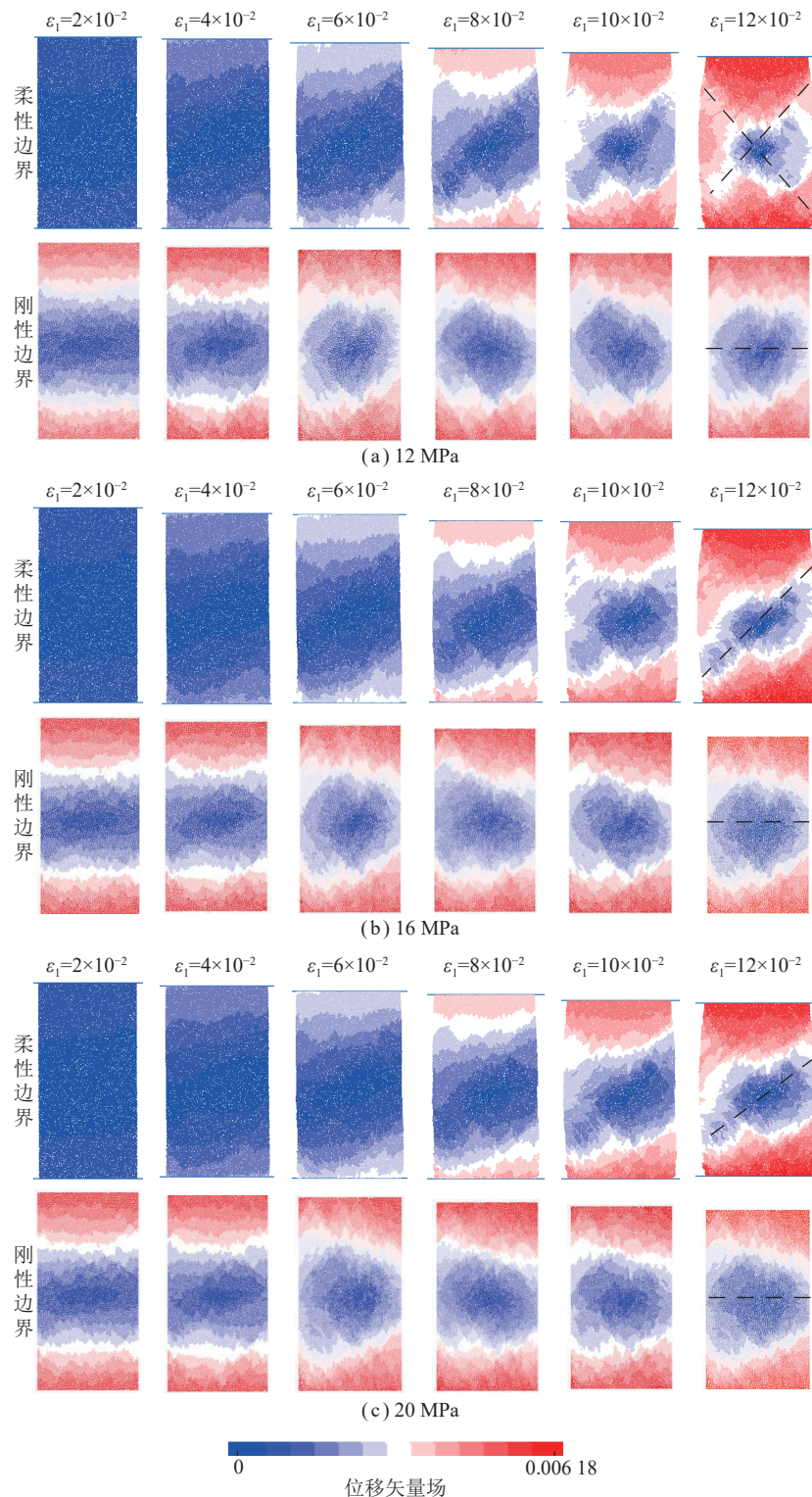


图 9 颗粒位移场云图

Fig.9 Cloud map of the particle displacement field

由图9可知, 2种边界试样内部的颗粒在加载过程中发生不均匀位移, 均体现出三轴压缩过程中剪切带的形成, 说明2种边界均能体现出三轴加载过程中试样的剪切破坏特征, 并得出以下结论:

(1) 在轴向应变 $\varepsilon_1=2 \times 10^{-2}$ 时, 2种边界两端均出现颗粒移动现象。在轴向应变 $\varepsilon_1=4 \times 10^{-2}$ 时, 柔性边界表面并未发生剪胀现象, 但颗粒内部微观尺度上已发生相应的颗粒移动集中行为, 可以视为剪切带的雏形; 同样刚性边界上下端颗粒移动现象较为明显, 剪切带逐渐形成。在轴向应变 $\varepsilon_1=6 \times 10^{-2}$ 时, 柔性边界开始发生剪胀现象, 剪切带继续加大; 刚性边界内部剪切带附近颗粒间孔隙加大, 试样剪胀, 从体积应变曲线也可以得出, 在轴向应变 $\varepsilon_1=6 \times 10^{-2}$ 时, 不同边界试样体积由剪缩向剪胀转变, 说明剪切逐渐形成, 试样开始发生破坏。在轴向应变 $\varepsilon_1=8 \times 10^{-2}$ 时, 柔性边界剪切带范围进一步扩大, 试样发生相应的剪胀变形, 这与室内试样在加载过程中的破坏形态相吻合^[45]; 刚性边界试样上下端颗粒位移加大, 中间颗粒位移较小, 剪切带形成, 试样发生剪胀现象。在轴向应变 $\varepsilon_1=10 \times 10^{-2}$ 时, 柔性边界试样变形更加明显, 而且剪切带厚度收缩, 颗粒移动更加集中; 刚性边界上下端颗粒位移继续加大, 中间颗粒位移继续减小, 剪切带厚度收缩, 试样剪胀现象减弱; 在轴向应变 $\varepsilon_1=12 \times 10^{-2}$ 时, 不同边界顶部和底部附近形成剪切面, 并在其中间形成一个剪切区, 剪切区域随轴向应变的增加逐渐呈减小趋势, 试样强度增强, 试样体系更稳定(图9)。

(2) 随着围压的增加, 在轴向应变 $\varepsilon_1=12 \times 10^{-2}$ 时, 柔性边界的上下端部位移量较大的颗粒数量呈逐渐减小趋势, 试样中间区域位移量较小的颗粒数量呈逐渐增加趋势, 剪切区域逐渐减小, 破坏方式由单叉型剪切破坏向单斜面剪切破坏转变(剪切带: 12 MPa 为非对称“X”型; 16、20 MPa 为由右上至左下约 45° 角), 试样呈现出剪切破坏模式; 刚性边界的顶部和底部的颗粒位移加大, 中间颗粒位移较小, 在轴向中间区域形成一个剪切区, 且剪切区逐渐呈减小趋势, 试样强度增强。

3.2 力学平均配位数

对于颗粒材料而言, 其力学特性主要受密度影响, 反映到微观层面, 则受到颗粒间接触点密度的影响^[50], 可以采用颗粒的力学平均配位数来描述(试样中平均每个颗粒所含有的接触数目, 不包含接触数不大于1的悬浮颗粒)^[51]。TORNTON^[52]认为在加载过程中, 某些颗粒周围仅有一个接触, 甚至没接触, 它们对整个试样维持稳定的应力状态没有影响, 故提出了力学平均配位数, 计算方法为

$$Z_m = \frac{2C - N_1}{N - N_0 - N_1} \quad (4)$$

式中, Z_m 为力学平均配位数; C 为颗粒体系内总的接触数目; N 为颗粒体系内总的颗粒数目; N_1 和 N_0 分别为只有一个或没有接触的颗粒数。

图10给出了2种边界在围压 12、16、20 MPa 作用下的力学平均配位数变化曲线, 可得出:

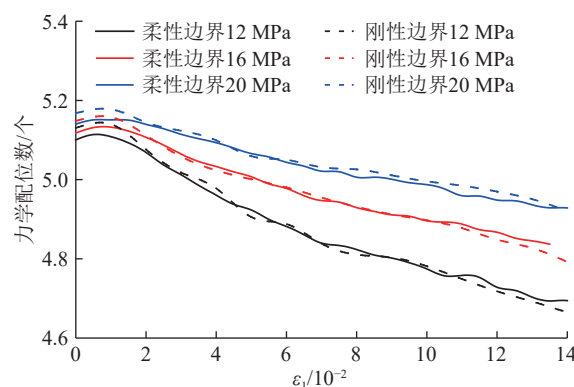


图10 力学平均配位数与轴向应变曲线

Fig.10 Variations of the mean mechanical coordination number with the axial strain

(1) 2种边界的力学平均配位数随着轴向应变的增加均呈先增加后减少的趋势。当轴向应变 $\varepsilon_1 < 2 \times 10^{-2}$ 时, 力学平均配位数增加, 分析认为试样在外荷载作用下, 细颗粒在挤压过程中会填充剩余的孔隙, 使试样更密实, 使得力学平均配位数相应增加, 试样强度增强, 试样体系更稳定; 轴向应变 $\varepsilon_1=2 \times 10^{-2}$ 时, 力学平均配位数曲线出现转变, 即试样内部剪切带开始形成; 当轴向应变 $\varepsilon_1 > 2 \times 10^{-2}$ 时, 力学平均配位数出现下降趋势, 说明试样体积开始出现剪胀现象。

(2) 随着围压增加, 力学平均配位数增大, 试样密实程度加大, 试样体系更加稳定, 剪胀现象不明显, 也较好验证了围压可以强化试样强度这一宏观现象。随着加载的进行, 围压 12 MPa 下, 2种边界的力学平均配位数降低率较大, 分别为柔性边界降低率 7.96%、刚性边界降低率 9.07%。

图11为在围压 12、16、20 MPa 作用下, 2种模型在加载过程中力学平均配位数云图的变化规律, 试样中部白色区域, 表示测量的力学平均配位数小于 4.2 个, 可得出:

(1) 相同围压条件下, 随着轴向应变的增加, 柔性边界的力学平均配位数云图中红色区域减少, 白色区域增多, 剪切带有 2 种破坏方式单叉型剪切破坏(12 MPa)和单斜面剪切破坏(16、20 MPa), 配位数减小, 试样剪胀, 这与图9位移场云图变化规律一致。分析认为试样内部颗粒发生错动、重排, 局部区域内会出现剪切

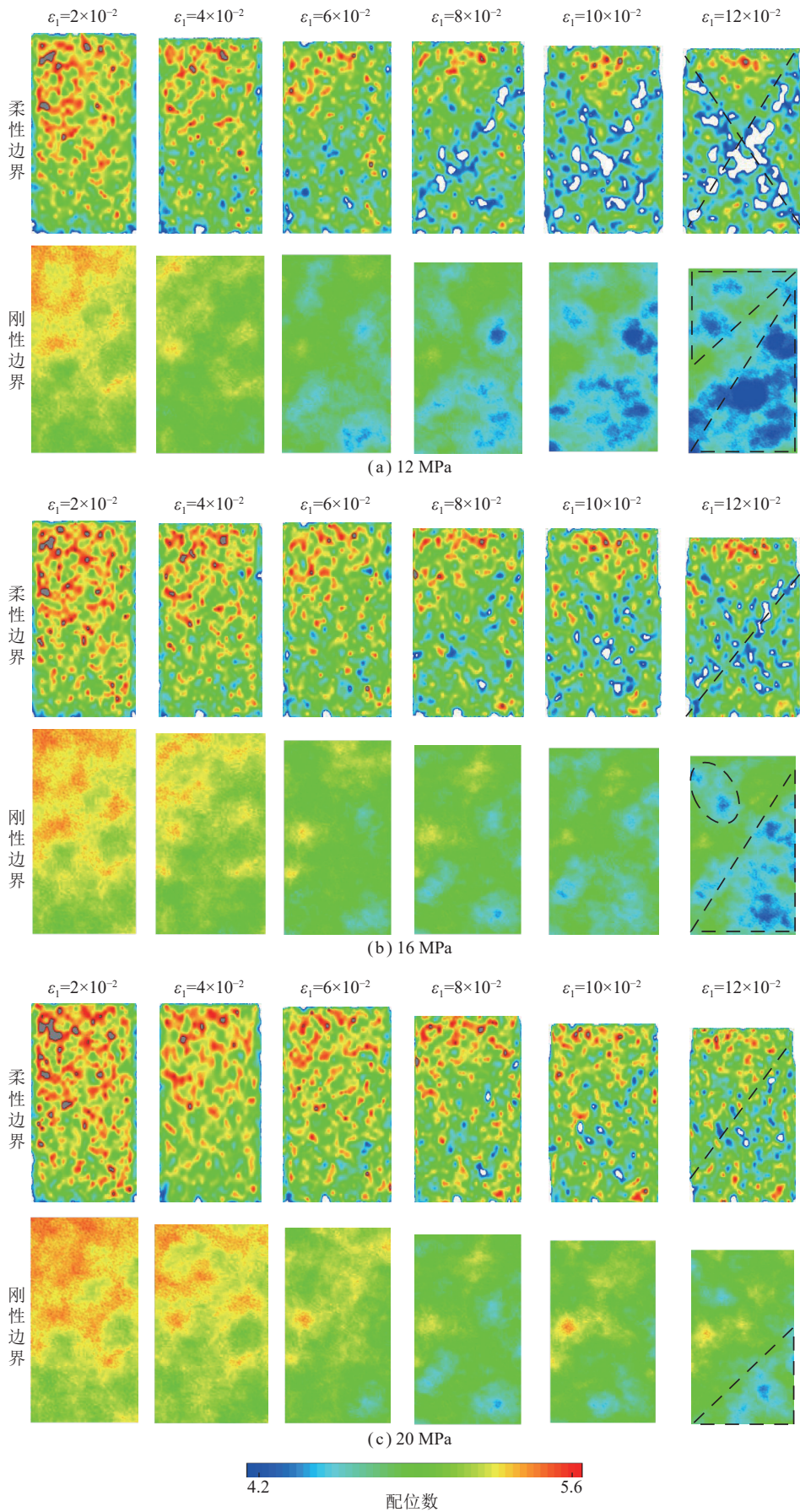


图 11 力学平均配位数云图

Fig.11 Cloud image of the mean mechanical coordination number

滑动, 导致剪切带内的力学平均配位数降低, 形成明显的单叉型剪切带, 反映到宏观上试样体积发生剪胀现象; 刚性边界的左上角及右下角区域的力学平均配位数小于斜 45° 区域的, 剪切带呈单斜面分布, 说明试样破坏从两端开始, 这与柔性边界存在区别的原因为刚性边界限制了试样局部变形和剪切带的发展。

(2) 相同应变条件下, 结合图 10、11 可知, 2 种边界在围压 12 MPa 作用下力学平均配位数减小速度较快, 柔性边界表现出明显的非对称“X”型剪切带, 试样剪胀现象显著; 刚性边界左上角及右下角区域力学平均配位数减小, 形成明显的斜 45° 剪切带, 试样破坏越明显。

3.3 平均孔隙率

在试样中部矩形区域 $44\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ 内布置测量圆, 布置方式为: x 方向生成数量设为 100 个, y 方向生成数量设为 200 个, 测量圆半径为 5 mm, 并进行循环生成测量圆, 直至达到矩形区域范围, 最后计算求得所有测量孔隙率的平均值。

图 12 为 2 种边界在不同围压 (12、16、20 MPa)、不同应变 (0 、 2×10^{-2} 、 5×10^{-2} 、 12×10^{-2}) 条件下平均孔隙率变化曲线, 可得出:

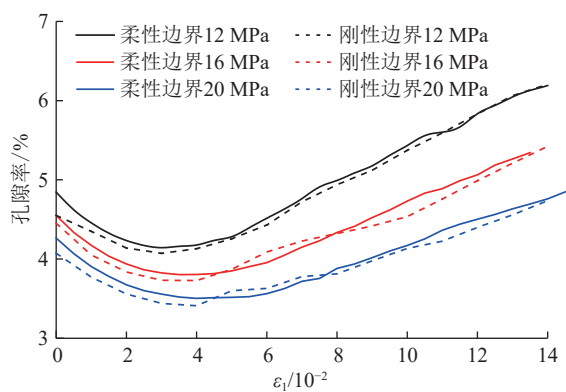


图 12 平均孔隙率与轴向应变曲线

Fig.12 Variations of the mean porosity with the axial strain

(1) 2 种边界的平均孔隙率随着轴向应变的增加均呈先减少后增加的趋势。当轴向应变 $\varepsilon_1 < 4 \times 10^{-2}$ 时, 平均孔隙率减小, 分析认为试样在外荷载作用下, 细颗粒在挤压过程中会填充剩余的孔隙, 使试样更密实; 轴向应变 ε_1 超过 5×10^{-2} 时, 平均孔隙率增加, 分析认为试样内部局部出现剪切滑动, 进行错位移动, 颗粒间距加大, 导致试样平均孔隙率增加。由此表明, 试样内部平均孔隙率演化曲线与体积应变曲线相似, 说明由体积应变曲线表现出剪缩与剪胀特性是试样内部平均孔隙率演化的宏观表现^[41]。其中, 随着加载的进行, 围压 12 MPa 下, 2 种边界的平均孔

隙率增加趋势较大, 增加率分别为柔性边界 31.16%、刚性边界 36.38%。

(2) 随着围压增加, 平均孔隙率整体均呈减小趋势, 原因为试样体系受力被挤压, 颗粒内部空间减少, 颗粒间距减小, 平均孔隙率下降。

图 13 为在围压 12、16、20 MPa 作用下, 不同边界试样在加载过程中平均孔隙率云图变化规律, 可得出如下结论:

(1) 相同围压条件下, 随着轴向应变的增加, 柔性边界的平均孔隙率云图中出现较多数量的红色区域, 剪切带附近颗粒孔隙变大, 并呈单叉型分布; 刚性边界的左上角及右下角区域的平均孔隙率大于斜 45° 区域的, 剪切带呈单斜面分布, 孔隙率增大, 试样剪胀。分析认为试样达到轴向应变 $\varepsilon_1 = 12 \times 10^{-2}$ 时, 水合物胶结性能失效, 整体力链开始重新演化, 引起颗粒间力链大量断开^[53], 导致平均孔隙率增大, 试样出现剪胀现象。

(2) 相同应变条件下, 随着围压增大, 2 种边界的平均孔隙率云图中红色数量逐渐减小。孔隙率减小, 试样剪胀现象弱化, 这是由于在较高围压 20 MPa 作用下, 体系内部颗粒运动受到约束, 试样被压实, 密实程度增高, 导致剪胀现象减弱。

3.4 接触力链

力链是体系传递应力的基本路径, 用来度量颗粒材料内部颗粒间相互作用程度^[54], 通过分析接触力链的演化规律来描述细观结构的变化对宏观力学特性的影响。

图 14 为围压 12、16、20 MPa 作用下 2 种边界内部颗粒间接触个数、平行黏结接触个数变化规律。由图可知, 随着轴向应变的增加, 2 种边界的颗粒间接触个数及平行黏结接触个数变化趋势一致, 均呈减低趋势。试样在加载过程和直至加载结束时, 刚性边界颗粒间的接触个数明显高于柔性边界 (图 14(a)), 分析原因为本文假设的墙体为刚性边界, 在加载过程中, 试样轴向不发生膨胀变形, 导致试样体系内部颗粒间距缩小, 试样更密实, 颗粒间接触个数增加。随着围压的增大, 2 种边界的颗粒间接触个数逐渐增加, 而 2 种边界的颗粒间平行黏结接触个数没有明显变化, 说明围压作用能够限制颗粒间接触的断裂。

为了定量描述试样在加载过程中接触力链的演化情况^[55-56], 将 360° 平分为 72 个角度区间, 统计了 2 种边界在不同围压 (12、16、20 MPa)、不同应变 (0 、 2×10^{-2} 、 5×10^{-2} 、 12×10^{-2}) 条件下试样内部颗粒间的接触法向和法向接触力分布。其中, 接触法向分布百分数中的实线表示接触法向落在某个角度区间内的接

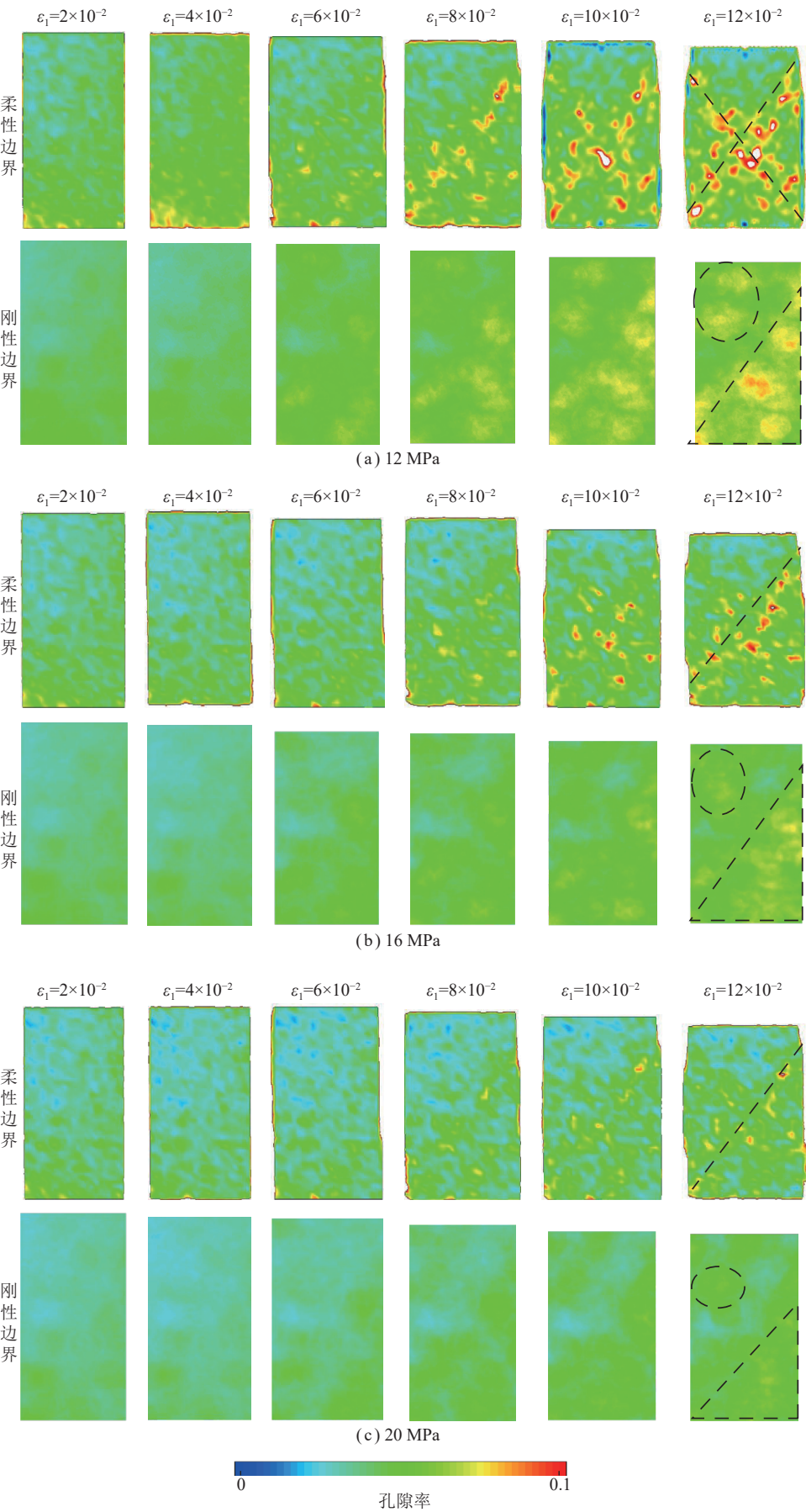


图 13 平均孔隙率云图

Fig.13 Mean porosity cloud map

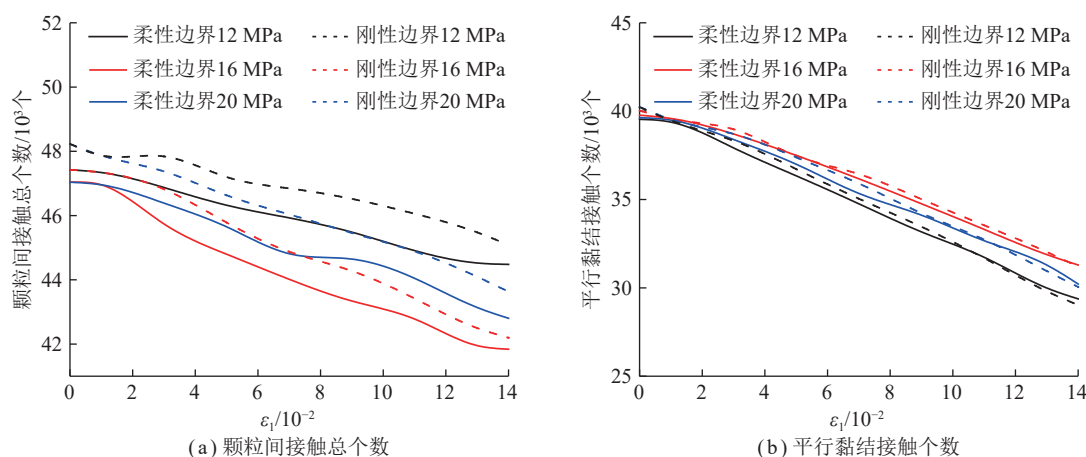


图14 颗粒间接触个数与轴向应变曲线

Fig.14 Number of contacts between particles and axial strain curves

触个数占试样总接触数的百分比。而在法向接触力分布中则表示接触法向落在某个角度区间内所有接触的法向接触力,如图15、16所示。

由图15可知,在围压12、16、20 MPa作用下,试样在加载过程中,2种边界的接触法向分布和演化规律基本一致,刚性边界的接触法向分布百分数在各个角度区间的分布个数均大于柔性边界。图15(a)、(b)中颗粒接触点方向基本为各向同性,说明水合物与周围颗粒的黏结作用较好。随着轴向应变的增加,2种边界的试样竖向接触法向个数增加,水平方向接触法向个数减少。在整个剪切过程中,不同边界的试样内部颗粒间接触法向分布由圆形向椭圆形演化,椭圆长轴始终倾向于轴向加载方向,且在约90°方向上。

由图16可知,不同围压、边界条件下,试样在加载过程中,各个角度的法向接触力分布和演化规律基本一致。在加载初始阶段(图16(a)、(b)),法向接触力分布均呈现各向同性特征,各个方向力基本相同。在加载阶段(图16(c)~(h)),法向接触力的分布由圆形变为椭圆形直至演变为花生形态,主方向上的平均应力最大,各向异性表现得更加明显,玫瑰花图形变形明显。其中,从轴向应变 $\varepsilon_1=12 \times 10^{-2}$ 可以看出,不同边界法向接触力主力链方向逐渐与试样的加载方向平行,且法向接触力逐渐增大,使得试样内部强度增强,抵抗变形能力增强。随着围压从12 MPa增加到20 MPa,柔性边界法向接触力增加了54.50%,刚性边界法向接触力增加了45.70%,表明围压对煤体细观力学性质有重要影响。

随着围压的增大,分布在轴向附近各角度区间内的法向接触力随之增大,而在水平向附近各角度区间内的变化较小,竖向与水平向法向接触力差异越明显,各向异性更突出。分析认为在外力作用下,颗粒间法

向接触力继续增加,弱法向接触力链逐渐变成强法向接触力链,且向试样轴向聚集,导致试样结构强度增强。可以看出,各向异性显著程度受围压影响较大。

3.5 水合物黏结破坏

试样宏观力学特性(强度、刚度、应力-应变关系等)与水合物黏结破坏相关^[57]。根据应力-应变曲线特征,将黏结破坏曲线分为3个阶段:弹性阶段(OA)、屈服阶段(AB)、强化阶段(BC),用于研究剪切试验过程中试样内部水合物黏结破坏类型及数量变化规律,如图17所示。由图17可得出:

(1) 含瓦斯水合物煤体的破坏模式主要由剪切破坏和张拉破坏组成,具体而言,裂纹数目从大到小的顺序分别为:水合物和煤、水合物间的剪切破坏、水合物和煤间以及水合物间的张拉裂纹。

(2) 在OA阶段,水合物颗粒周围的黏结在剪切作用下数量较少,颗粒间接触较好,传力路径丰富,未形成剪切带。

(3) 在AB阶段,水合破坏物周围的黏结发生大量破坏,增加趋势减缓,试样内部形成剪切带。剪切带的形成和发展伴随着试样内部黏结键断裂数的急剧增加,与图9颗粒位移场在轴向应变 $\varepsilon_1=6 \times 10^{-2}$ 时不同边界形成了相应的剪切带的结果一致。

(4) 在BC阶段,剪切带内水合物黏结发生了破坏,此时主要通过颗粒间摩擦及咬合作用传递力。在加载过程中,剪切带周围水合物黏结作用较好,发生较少破坏,且水合物的黏结破坏趋于稳定。

随着围压的增大,可以明显看出不同边界条件下水合物与煤颗粒之间剪切破坏数目均呈减少趋势,且柔性边界的数目大于刚性边界的数目。而两者的水合物和煤颗粒之间张拉破坏数目、水合物颗粒间的剪切破坏裂纹数目及张拉破坏数目变化不太明显,分析

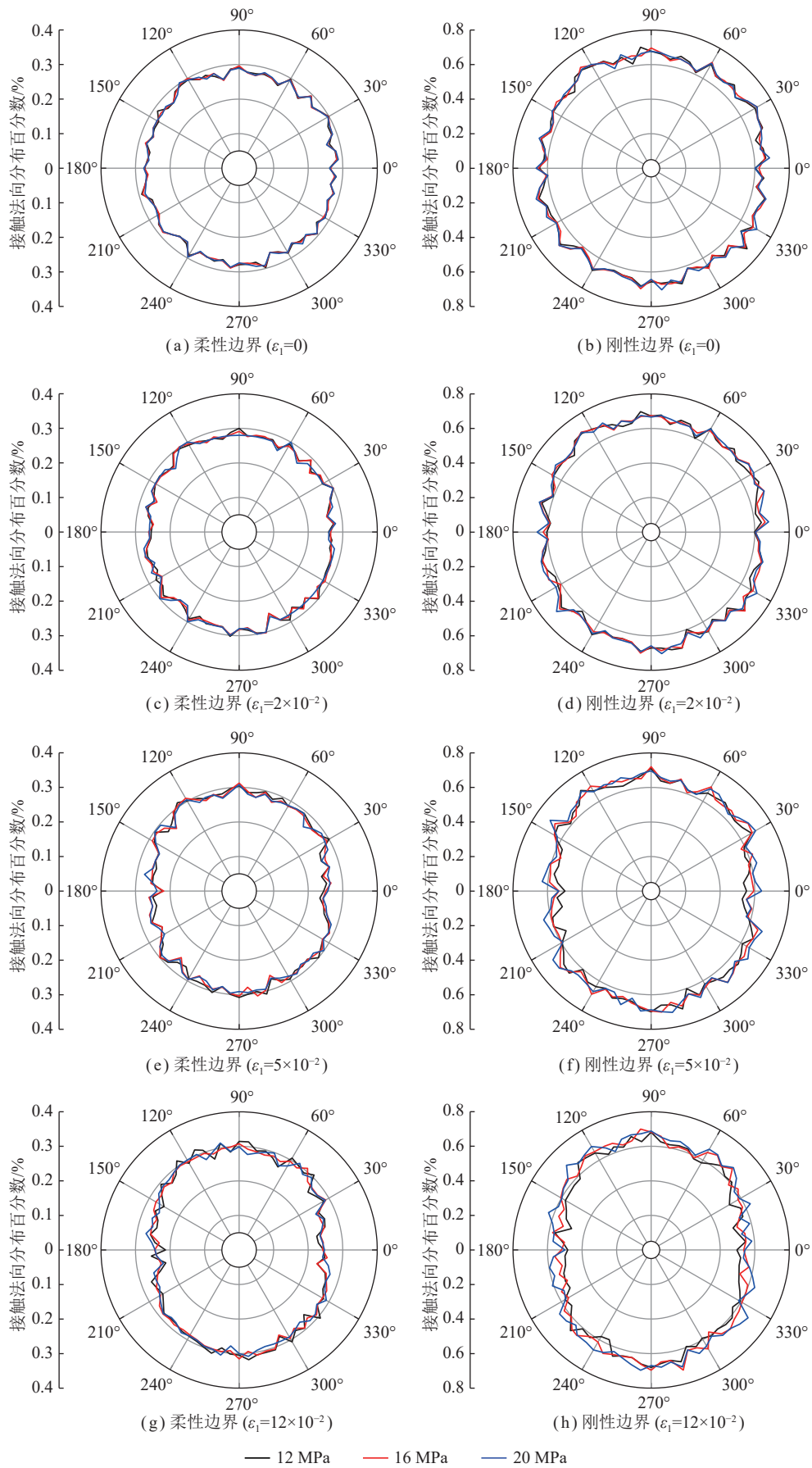


图 15 接触法向分布百分数

Fig.15 Percentage of contact normal distribution

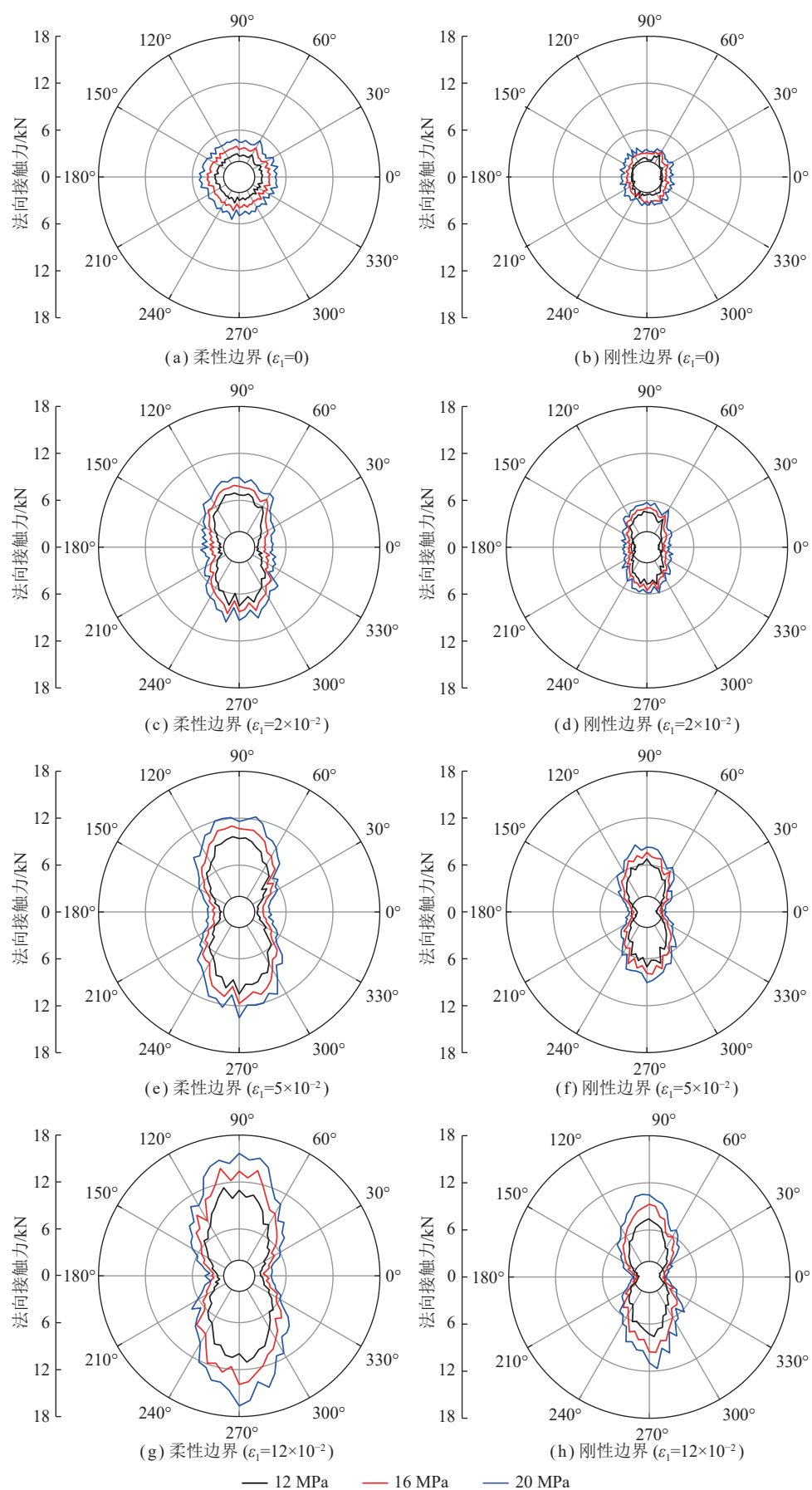


图 16 法向接触力分布

Fig.16 Distribution of the normal contact force

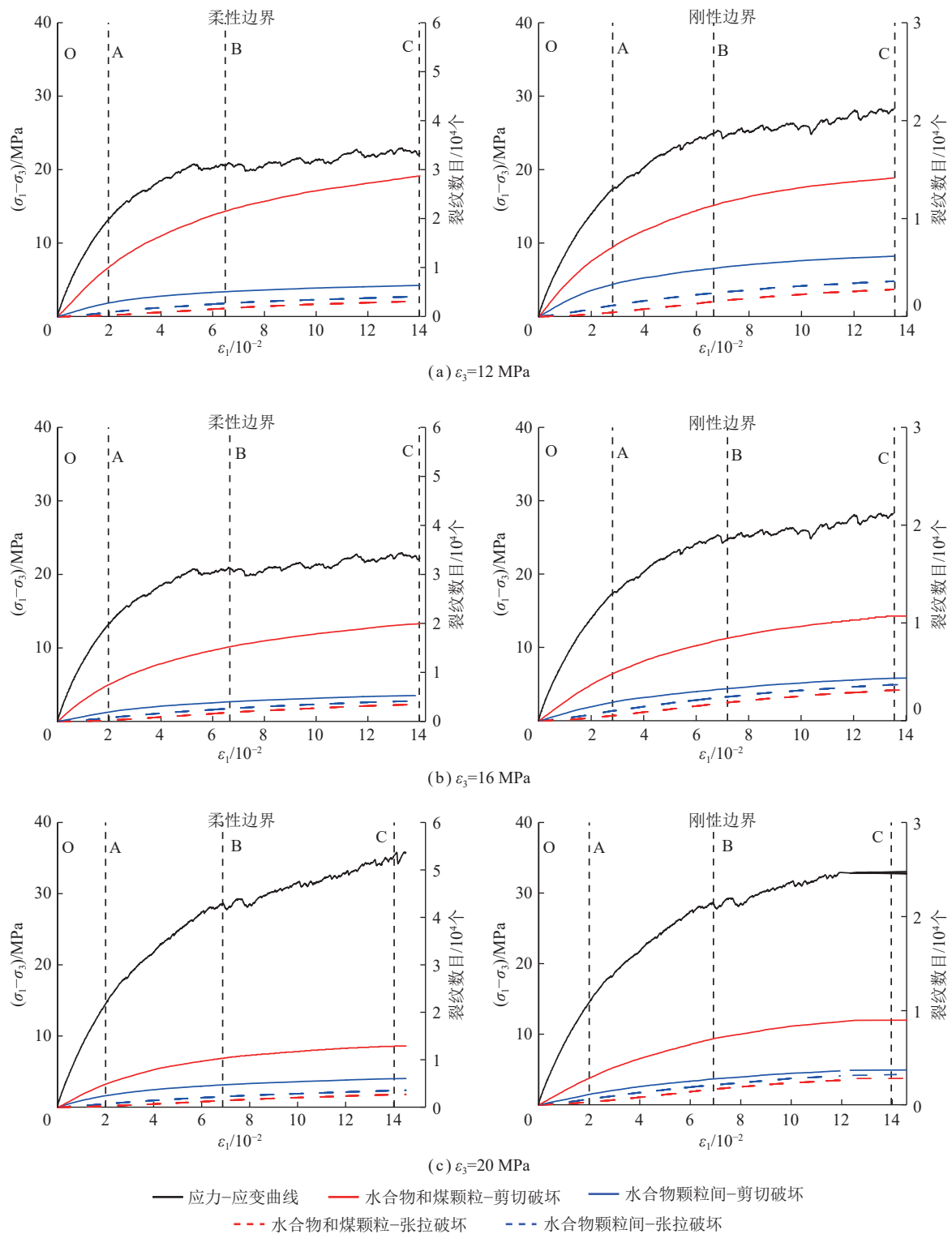


图 17 水合物黏结破坏数量与轴向应变曲线

Fig.17 Variations of the hydrate bond failure number and the stress-strain with the axial strain

认为随着围压的增大,试样胶结键断裂,水合物的胶结作用失效,试样发生剪切破坏,此时由颗粒间的摩擦力来维持试样细观力学体系的稳定。说明水合物颗粒周围的黏结主要发生剪切破坏,水合物的抗剪强度对试样强度有着重要影响。

为了进一步定量探究含瓦斯水合物煤体在双轴

压缩过程中的破坏形式,图 18 统计不同边界的裂纹分别占总裂纹的百分比,可得如下结论:

(1) 围压 12 MPa 下,不同边界均以剪切裂纹为主导,并存在拉剪混合破坏。其中,针对水合物和煤间剪切裂纹数量,柔性边界占比达到 67.9%,刚性边界占比达到 53.0%,分析原因为刚性边界约束试样轴向应

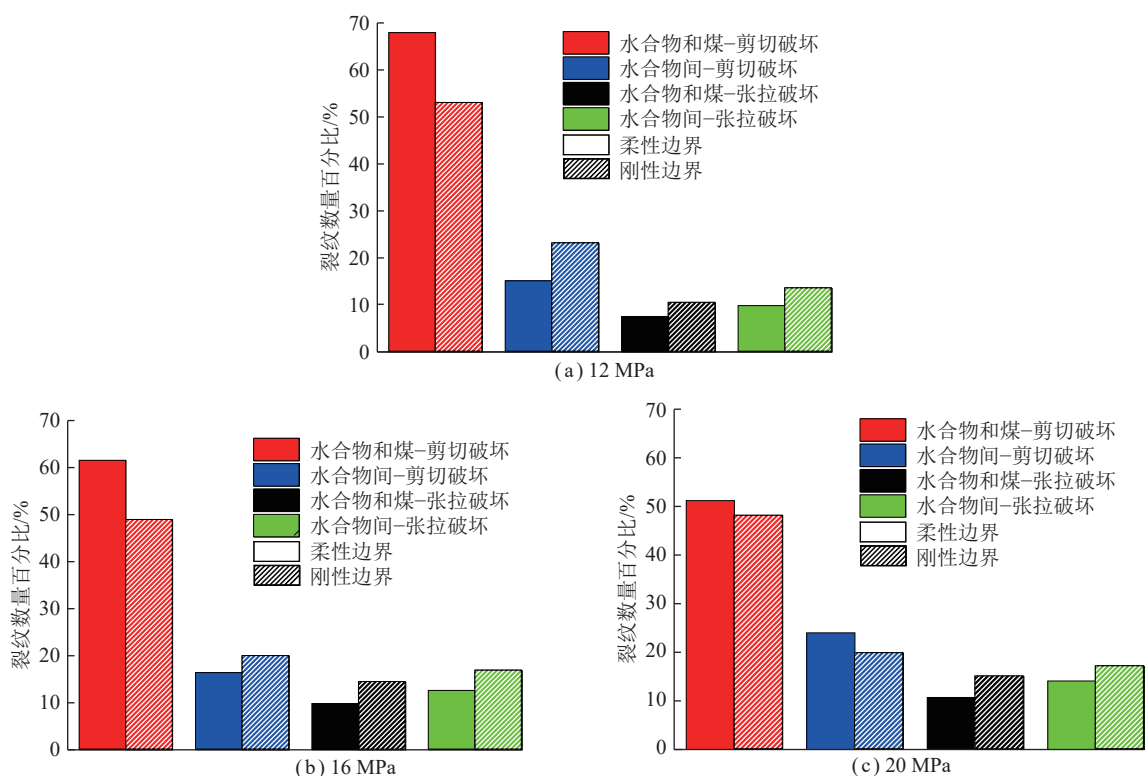


图 18 不同边界破坏裂纹分别占总裂纹的百分比

Fig. 18 Ratio of different cracks to the total cracks for different boundaries

变, 约束会增强试样抵抗剪切裂纹萌生和发展的能力, 从而提高试样抵抗剪切破坏的能力。

(2) 围压 16 MPa 下, 不同边界裂纹变化趋势与围压 12 MPa 相似, 双轴压缩条件下试样的细观破坏模式以剪切破坏为主, 具体而言, 关于水合物与煤间剪切裂纹, 柔性边界占比达到 61.9%、刚性边界占比达到 48.9%, 主要以颗粒间剪切裂纹为主导, 其次水合物内剪切裂纹, 水合物与煤拉伸裂纹最少。

(3) 围压 20 MPa 下, 由于高围压约束试样内部颗粒的运动, 试样内部主要以水合物与煤间剪切裂纹为主导, 柔性边界占比达到 51.2%、刚性边界占比达到 48.1%。对比发现随着围压增加, 煤-水合物颗粒剪切裂纹占比减小。进一步印证了随着围压的增加, 剪切带减小, 强度增大。

综上所述, 分析不同围压、边界条件下含瓦斯水合煤体内部颗粒间剪切破坏和张拉破坏数目, 可间接反映试样的变形破坏特征, 并为其破坏判据的建立提供理论依据。

4 结 论

(1) 对比室内三轴试验, 从轴向应力-应变曲线、体积应变-轴向应变曲线、黏聚力、内摩擦角以及破坏模式特征, 验证了所建立数值模型的正确性, 柔性边界条件下含瓦斯水合物煤体三轴试验的离散元模

型更能真实反应试验结果, 为较高饱和度和围压下含瓦斯水合物煤体的力学特性分析提供了新的分析模型。

(2) 围压和边界条件对试样剪切带形成和密实程度有重要影响, 具体表现为: 柔性边界两侧出现明显腰部鼓胀变形, 刚性边界的剪切带均在轴向中间部位形成, 柔性边界能更好反映剪切带的形成。随着围压的增加, 2 种边界的力学平均配位数均呈增大趋势, 平均孔隙率均呈减少趋势, 分布在轴向附近的法向接触力随之增大, 而在水平向附近的法向接触力变化较小, 竖向与水平向法向接触力差异越明显, 各向异性更突出。

(3) 不同围压作用下, 不同边界的接触法向和法向接触力变化趋势相一致, 其中, 刚性边界接触法向各向异性大于柔性边界接触法向, 而柔性边界法向接触力各向异性大于刚性边界接触法向, 说明柔性边界试样抵抗外部荷载强度明显高于刚性边界。在峰值强度处, 随着围压从 12 MPa 增加到 20 MPa, 柔性边界法向接触力增加了 54.50%, 刚性边界法向接触力增加了 45.70%, 表明围压对煤体细观力学性质有重要影响。

(4) 在不同围压和边界条件下, 试样产生张拉和剪切 2 种破坏形式, 随着围压增大, 2 种边界内部剪切裂纹数量呈逐渐减小趋势; 试样破坏模式为剪切型破坏, 且内部起裂主要以水合物和煤间剪切裂纹为主导。

参考文献(References):

- [1] TANG J, JIANG C L, CHEN Y J, et al. Line prediction technology for forecasting coal and gas outbursts during coal roadway tunneling[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 34: 412–418.
- [2] ZHAI C, XIANG X W, XU J Z, et al. The characteristics and main influencing factors affecting coal and gas outbursts in Chinese Pingdingshan mining region[J]. *Natural Hazards*, 2016, 82(1): 507–530.
- [3] GUAN P, WANG H Y, ZHANG Y X. Mechanism of instantaneous coal outbursts[J]. *Geology*, 2009, 37(10): 915–918.
- [4] FAN C J, LI S, LUO M K, et al. Coal and gas outburst dynamic system[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2017, 27(1): 49–55.
- [5] 唐巨鹏, 郝娜, 潘一山, 等. 基于声发射能量分析的煤与瓦斯突出前兆特征试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(1): 31–42.
TANG Jupeng, HAO Na, PAN Yishan, et al. Experimental study on precursor characteristics of coal and gas outbursts based on acoustic emission energy analysis[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(1): 31–42.
- [6] 王汉鹏, 张庆贺, 袁亮, 等. 基于 CSIRO 模型的煤与瓦斯突出模拟系统与试验应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(11): 2301–2308.
WANG Hanpeng, ZHANG Qinghe, YUAN Liang, et al. Coal and gas outburst simulation system based on csiro model[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(11): 2301–2308.
- [7] 俞启香. 矿井瓦斯防治[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1992: 66–67.
- [8] WOLD M B, CONNELL L D, CHOI S K. The role of spatial variability in coal seam parameters on gas outburst behaviour during coal mining[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2008, 75(1): 1–14.
- [9] WANG W, WANG X C, YAN J W. The main factor controlling the coal and gas outbursts in the Eastern Pingdingshan mining area[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2016, 34(6): 1825–1834.
- [10] YANG Y L, SUN J J, LI Z H, et al. Influence of soluble organic matter on mechanical properties of coal and occurrence of coal and gas outburst[J]. *Powder Technology*, 2018, 332: 8–17.
- [11] WU QIANG, HE XUEQIU. Preventing coal and gas outburst using methane hydration[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2003, 13(1): 7–10.
- [12] 刘恺德. 高应力下含瓦斯原煤三轴压缩力学特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(2): 380–393.
LIU Kaide. Mechanical properties of ram coal containing gas under high triaxial stress compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(2): 380–393.
- [13] 刘泉声, 刘恺德, 朱杰兵, 等. 高应力下原煤三轴压缩力学特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(1): 24–34.
LIU Quansheng, LIU Kaide, ZHU Jiebing, et al. Study of mechanical properties of raw coal under high stress with triaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(1): 24–34.
- [14] HOBBS D W. The strength and the stress-strain characteristics of coal in triaxial compression[J]. *The Journal of Geology*, 1964, 72(2): 214–231.
- [15] HYODO M, YONEDA J, YOSHIMOTO N, et al. Mechanical and dissociation properties of methane hydrate-bearing sand in deep seabed[J]. *Soils and Foundations*, 2013, 53(2): 299–314.
- [16] SUN Z M, ZHANG J, LIU C L, et al. Experimental study on the *in situ* mechanical properties of methane hydrate-bearing sediments[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 275–277: 326–331.
- [17] 李洋辉, 宋永臣, 于锋, 等. 围压对含水合物沉积物力学特性的影响[J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(5): 637–640.
LI Yanghui, SONG Yongchen, YU Feng, et al. Effect of confining pressure on mechanical behavior of methane hydrate-bearing sediments[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(5): 637–640.
- [18] DONG L, LI Y L, LIU C L, et al. Mechanical properties of methane hydrate-bearing interlayered sediments[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2019, 18(6): 1344–1350.
- [19] HYODO M, NAKATA Y, YOSHIMOTO N, et al. Bonding strength by methane hydrate formed among sand particles[C]//AIP Conference Proceedings. Golden (Colorado). AIP, 2009: 79–82.
- [20] HYODO M, LI Y H, YONEDA J, et al. Mechanical behavior of gas-saturated methane hydrate-bearing sediments[J]. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 2013, 118(10): 5185–5194.
- [21] 颜荣涛, 韦昌富, 傅鑫晖, 等. 水合物赋存模式对含水合物土力学特性的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(S2): 4115–4122.
YAN Rongtao, WEI Changfu, FU Xinhui, et al. Influence of occurrence mode of hydrate on mechanical behaviour of hydrate-bearing soils[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(S2): 4115–4122.
- [22] HYODO M, LI Y, YONEDA J, et al. A comparative analysis of the mechanical behavior of carbon dioxide and methane hydrate-bearing sediments[J]. *American Mineralogist*, 2014, 99(1): 178–183.
- [23] ZHANG X H, LU X B, ZHANG L M, et al. Experimental study on mechanical properties of methane-hydrate-bearing sediments[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2012, 28(5): 1356–1366.
- [24] 李彦龙, 刘昌岭, 刘乐乐, 等. 含甲烷水合物松散沉积物的力学特性[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2017, 41(3): 105–113.
LI Yanlong, LIU Changling, LIU Lele, et al. Mechanical properties of methane hydrate-bearing unconsolidated sediments[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2017, 41(3): 105–113.
- [25] 周世琛, 邹筱林, 陈宇琪, 等. 天然气水合物沉积物不排水剪切特性的离散元模拟[J]. *石油学报*, 2021, 42(1): 73–83.
ZHOU Shichen, HUAN Xiaolin, CHEN Yuqi, et al. DEM simulation on undrained shear characteristics of natural gas hydrate bearing sediments[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(1): 73–83.

- [26] 周博, 王宏乾, 王辉, 等. 水合物沉积物的力学本构模型及参数离散元计算[J]. 应用数学和力学, 2019, 40(4): 375–385.
- ZHOU Bo, WANG Hongqian, WANG Hui, et al. A mechanical constitutive model for hydrate-bearing sediments and calculation of material parameters with the discrete element method[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2019, 40(4): 375–385.
- [27] LIU J W, LI X S, KOU X, et al. Analysis of hydrate heterogeneous distribution effects on mechanical characteristics of hydrate-bearing sediments[J]. Energy & Fuels, 2021, 35(6): 4914–4924.
- [28] BRUGADA J, CHENG Y P, SOGA K, et al. Discrete element modelling of geomechanical behaviour of methane hydrate soils with pore-filling hydrate distribution[J]. Granular Matter, 2010, 12(5): 517–525.
- [29] JIANG M J, SUN Y G, YANG Q J. A simple distinct element modeling of the mechanical behavior of methane hydrate-bearing sediments in deep seabed[J]. Granular Matter, 2013, 15(2): 209–220.
- [30] 周世琛, 霍文星, 周博, 等. 柔性边界三轴压缩条件下胶结型水合物沉积物力学特性的离散元模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(3): 830–845.
- ZHOU Shichen, HUO Wenxing, ZHOU Bo, et al. DEM simulation of triaxial test on cementing type gas hydrate-bearing sediments under flexible boundary condition[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(3): 830–845.
- [31] WANG Y H, LEUNG S C. Characterization of cemented sand by experimental and numerical investigations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(7): 992–1004.
- [32] CHEUNG G, O'SULLIVAN C. Effective simulation of flexible lateral boundaries in two- and three-dimensional DEM simulations[J]. Particuology, 2008, 6(6): 483–500.
- [33] 张强, 汪小刚, 赵宇飞, 等. 基于围压柔性加载的土石混合体大型三轴试验离散元模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(8): 1545–1554.
- ZHANG Qiang, WANG Xiaogang, ZHAO Yufei, et al. Discrete element simulation of large-scale triaxial tests on soil-rock mixtures based on flexible loading of confining pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(8): 1545–1554.
- [34] QU T M, FENG Y T, WANG Y, et al. Discrete element modelling of flexible membrane boundaries for triaxial tests[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 115: 103154.
- [35] 蒋成龙, 许成顺, 张小玲, 等. 三维柔性边界构建方法及其对砾质土变形发展影响的离散元数值研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(5): 77–86.
- JIANG Chenglong, XU Chengshun, ZHANG Xiaoling, et al. Three-dimensional flexible boundary construction method and its influence on the deformation development of gravel soil by discrete element simulation[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(5): 77–86.
- [36] BINESH S M, ESLAMI-FEIZABAD E, RAHMANI R. Discrete element modeling of drained triaxial test: Flexible and rigid lateral boundaries[J]. International Journal of Civil Engineering, 2018, 16(10): 1463–1474.
- [37] 张强, 汪小刚, 赵宇飞, 等. 不同围压加载方式下土石混合体变形破坏机制颗粒流模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(11): 2051–2060.
- ZHANG Qiang, WANG Xiaogang, ZHAO Yufei, et al. Particle flow modelling of deformation and failure mechanism of soil-rock mixture under different loading modes of confining pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(11): 2051–2060.
- [38] 蒋明镜, 李秀梅, 胡海军. 含抗转能力散粒体的宏微观力学特性数值分析[J]. 计算力学学报, 2011, 28(4): 622–628.
- JIANG Mingjing, LI Xiumei, HU Haijun. Numerical investigation on macro-micro mechanical behaviours of granular materials incorporating rolling resistance[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2011, 28(4): 622–628.
- [39] 王辉, 周子钰, 周博, 等. 颗粒抗滚动作用对水合物沉积物宏观及微观力学特性的影响[J]. 石油学报, 2020, 41(7): 885–894.
- WANG Hui, ZHOU Ziyu, ZHOU Bo, et al. Impact of rolling resistance effect of particles on macro/micro mechanical properties of hydrate-bearing sediments[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(7): 885–894.
- [40] 张巍, 李承峰, 刘昌岭, 等. 多孔介质中甲烷水合物边界的 CT 图像识别技术[J]. CT 理论与应用研究, 2016, 25(1): 13–22.
- ZHANG Wei, LI Chengfeng, LIU Changling, et al. Identification technology of the CT images for distinguishing the boundary condition of methane hydrate in porous media[J]. Computerized Tomography Theory and Applications, 2016, 25(1): 13–22.
- [41] KUHN M R. A flexible boundary for three-dimensional Dem particle assemblies[J]. Engineering Computations, 1995, 12(2): 175–183.
- [42] Itasca Consulting Group Inc. PFC3D(Particle Flow Code in 3 Dimensions), Version 3.0[R]. Minneapolis: Itasca Consulting Group, 2002.
- [43] 张保勇, 于洋, 高霞, 等. 卸围压条件下含瓦斯水合物煤体应力-应变特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S1): 281–290.
- ZHANG Baoyong, YU Yang, GAO Xia, et al. Stress-strain characteristics of coal mine gas hydrate-coal mixture under confining pressure unloading[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S1): 281–290.
- [44] 王宏乾, 周博, 薛世峰, 等. 可燃冰沉积物力学特性的离散元模拟分析[J]. 力学研究, 2018, 7(3): 85–94.
- WANG Hongqian, ZHOU BO, Xue Shifeng, et al. Discrete element simulation analysis of mechanical behavior of the gas hydrate-bearing sediments[J]. International Journal of Mechanics Research, 2018, 7(3): 85–94.
- [45] 尹小涛, 郑亚娜, 马双科. 基于颗粒流数值试验的岩土材料内尺度比研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1211–1215.
- YIN Xiaotao, ZHENG Yana, MA Shuangke. Study of inner scale ratio of rock and soil material based on numerical tests of particle flow

- code[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(4): 1211–1215.
- [46] 李磊, 蒋明镜, 张伏光. 深部岩石考虑残余强度时三轴试验离散元定量模拟及参数分析[J]. *岩土力学*, 2018, 39(3): 1082–1090, 1099. LI Lei, JIANG Mingjing, ZHANG Fuguang. Quantitative simulation of triaxial test considering residual strength on deep rock using DEM and parameter analysis[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(3): 1082–1090, 1099.
- [47] 孔亮, 季亮亮, 曹杰峰. 应力路径和颗粒级配对砂土变形影响的微观机制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(11): 2334–2341. KONG Liang, JI Liangliang, CAO Jiefeng. Deformation mesomechanism of sands with different grain gradations under different stress paths[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(11): 2334–2341.
- [48] 张振平, 盛谦, 付晓东, 等. 基于颗粒离散元的土石混合体直剪试验模拟研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2021, 29(1): 135–146. ZHANG Zhenping, SHENG Qian, FU Xiaodong, et al. Research on numerical direct shear test of soil-rock mixture based on particle flow code simulation[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2021, 29(1): 135–146.
- [49] 王登科, 吕瑞环, 彭明, 等. 含瓦斯煤渗透率各向异性研究[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(4): 1008–1015. WANG Dengke, LÜ Ruihuan, PENG Ming, et al. Experimental study on anisotropic permeability rule of coal bearing methane[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(4): 1008–1015.
- [50] 朱海燕, 党益珂, 刘清友, 等. 凹土棒石的物理力学性质实验及数值模拟研究[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2019, 49(12): 107–117. ZHU Haiyan, DANG Yike, LIU Qingyou, et al. Experimental and numerical simulation research of the physical and mechanical properties of Attapulgitic clay[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2019, 49(12): 107–117.
- [51] 张伏光, 聂卓琛, 陈孟飞, 等. 不排水循环荷载条件下胶结砂土宏观力学性质离散元模拟研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(3): 456–464. ZHANG Fuguang, NIE Zhuochen, CHEN Mengfei, et al. DEM analysis of macro-and micro-mechanical behaviors of cemented sand subjected to undrained cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(3): 456–464.
- [52] THORNTON C. Numerical simulations of deviatoric shear deformation of granular media[J]. *Geotechnique*, 2000, 50(1): 43–53.
- [53] 刘君, 胡宏. 砂土地基锚板基础抗拔承载力 PFC 数值分析[J]. *计算力学学报*, 2013, 30(5): 677–682, 703. LIU Jun, HU Hong. PFC analysis of the uplift bearing capacity of plate anchors in sand[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2013, 30(5): 677–682, 703.
- [54] 王增会. 基于多尺度方法的颗粒材料破碎行为与损伤—愈合—塑性表征研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019. WANG Zenghui. Study on the particles breakage and damage-healing-plasticity characterization for granular materials based on multiscale approach[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [55] ZHAO S W, EVANS T M, ZHOU X W. Shear-induced anisotropy of granular materials with rolling resistance and particle shape effects[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2018, 150: 268–281.
- [56] GUO N, ZHAO J D. The signature of shear-induced anisotropy in granular media[J]. *Computers and Geotechnics*, 2013, 47: 1–15.
- [57] WU P, LI Y H, LIU W G, et al. Cementation failure behavior of consolidated gas hydrate-bearing sand[J]. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 2020, 125(1): e2019JB018623.