

中文引用格式:高霞,赵宇贤,王柏琨,等. 颗粒形状对含瓦斯水合物煤体细观力学性质的影响[J]. 中国安全科学学报,2025,35(5): 106-115.

英文引用格式:GAO Xia, ZHAO Yuxian, WANG Baikun, et al. Study on influence of particle shape on meso-mechanical properties of gas hydrate-bearing coal[J]. China Safety Science Journal, 2025,35(5):106-115.

颗粒形状对含瓦斯水合物煤体细观力学性质的影响^{*}

高霞¹副教授,赵宇贤¹,王柏琨¹,吴强²教授,崔祥龙³

(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 浙江中科依泰斯卡岩石工程研发有限公司,浙江 杭州 310051)

中图分类号:X936

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.05.0582

基金项目:国家自然科学基金联合基金资助(U21A20111);国家自然科学基金面上项目资助(51974112)。

【摘要】 为探究和预测含瓦斯水合物煤体三轴压缩作用下试样内部的破坏及失稳特征,首先基于瓦斯水合固化方法进行含瓦斯水合物煤体室内三轴压缩试验;同时根据扫描电镜(SEM)图像构建组合 Clump 颗粒模板,利用颗粒流离散单元法(DEM)模拟方法建立不同颗粒形状(不规则、圆形)、饱和度(40%、60%、80%)的双轴压缩模型,并开展三轴压缩试验;然后从宏观和细观2个方面对比分析 Clump 颗粒与圆形颗粒对含瓦斯水合物煤体力学性质的影响特征。研究表明:不同颗粒形状含瓦斯水合物煤体试样峰值强度随水合物饱和度的增大均提高,在高饱和度条件下峰值强度增长不明显;不规则颗粒试样强度均大于圆形颗粒试样,最高提升142.01%;饱和度和颗粒形状对试样破坏模式影响较小,不同颗粒形状试样均发生鼓胀破坏且剪切带均呈X型分布;圆形颗粒试样发生旋转颗粒数目明显多于不规则试样,发生破坏的范围更大;随着加载进行,不规则颗粒间能够稳定地分担外部荷载;且不规则颗粒模型平均配位数远大于圆形颗粒试样;在表征含瓦斯水合物煤体力学行为方面,不规则颗粒模型更具优越性。

【关键词】 颗粒形状; 含瓦斯水合物煤体; 力学性质; 三轴压缩试验; 柔性边界

Study on influence of particle shape on meso-mechanical properties of gas hydrate-bearing coal

GAO Xia¹, ZHAO Yuxian¹, WANG Baikun¹, WU Qiang², CUI Xianglong³

(1 School of Architectural Engineering, Heilongjiang University of Science & Technology, Harbin Heilongjiang 150022, China; 2 School of Safety Engineering, Heilongjiang University of Science & Technology, Harbin Heilongjiang 150022, China; 3 Zhejiang Zhongke Itasca Rock Engineering R&D Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang 310051, China)

Abstract: In order to investigate and predict the internal failure and instability characteristics of gas hydrate coal samples under triaxial action, laboratory triaxial compression tests were first conducted based on the gas hydrate solidification method. Using scanning electron microscope(SEM) images as reference,

composite Clump particle templates were constructed to establish biaxial compression models through discrete element method (DEM). The models were featured different particle shapes (irregular and spherical) and saturation levels (40%, 60%, 80%), followed by simulated triaxial compression tests. A comparative analysis was then performed from both macroscopic and mesoscopic perspectives to examine the effects of Clump particles versus spherical particles on the mechanical behavior of gas hydrate-bearing coal. The results demonstrate that the peak strength of specimens increases with hydrate saturation for both particle shapes. The enhancement becomes less pronounced at higher saturation levels. Irregular particle specimens exhibit significantly greater strength than spherical ones, with maximum strength improvement reaching 142.01%. Both saturation and particle shape show limited influence on failure modes. All specimens exhibit bulging failure and X-shaped shear band distribution. Spherical particle specimens display substantially more particle rotations and larger failure zones compared to irregular particles. During loading, irregular particles form stable load-bearing networks through interlocking, supported by their notably higher average coordination number than spherical particles. These findings confirm the superior performance of irregular particle models in characterizing the mechanical behavior of gas hydrate-bearing coal.

Keywords: particle shape; gas hydrate-bearing coal; mechanical property; triaxial compression test; flexible boundary

0 引言

煤炭是我国的主要能源消耗品,随着煤炭开采逐渐进入深部,煤层所处的地质条件越来越复杂,煤与瓦斯突出等矿井动力灾害日益加重,造成了大量的人员伤亡和经济损失^[1]。瓦斯水合固化是防治煤与瓦斯突出的新型技术方法,其通过将煤层中164倍体积的瓦斯转化为1倍体积的水合物,这样即可降低瓦斯压力并增强煤体强度,从而有效抑制灾害发生^[2]。含瓦斯水合物煤体是由瓦斯、水合物、煤体和水组成的非连续、非均质多相介质,具有复杂的力学特性和破坏机制,其力学行为主要受赋存环境条件和水合物饱和度等因素调控^[3]。张保勇等^[4]已从宏观尺度揭示了水合物饱和度、围压、粒径、加载速率及应力路径等参数对煤体力学性能的影响特征。因此,深入研究含瓦斯水合物煤体的变形破坏特征及其演化机制,不仅对完善瓦斯水合固化防突技术体系具有重要理论价值,更能为煤矿安全开采提供科学依据。

传统室内试验难以全面揭示试样内部的变形破坏机制,而离散单元法(Discrete Element Method, DEM)作为研究非连续介质问题的有效数值手段,能够深入揭示传统室内试验难以观察到的试样内部变形破坏的细观机制,是预测颗粒材料力学行为的重要工具^[5-6]。杜锋等^[7]利用DEM模拟方法开展不同倾角下煤岩组合体单轴压缩试验,探究不同倾

角对煤岩组合体失稳破坏的影响。BRUGADA等^[8]通过DEM模拟孔隙填充型水合物沉积物的宏观力学行为,系统分析了水合物含量、围压等因素对沉积物强度和变形参数的影响特征;JIANG Yujing等^[9]则考虑了多种水合物赋存状态的共存情况,深入研究了水合物含量及加载速率对能源土强度、刚度、黏聚力和内摩擦角等力学参数的影响机制。此外,为准确表征颗粒材料的宏微观力学特性,颗粒形状效应不容忽视。张翀等^[10]构建了4种不同形状的颗粒模型,研究发现,非圆颗粒间的咬合作用可显著提升材料强度;孔亮等^[11]通过建立不同圆形度和凹凸度的砂土双轴试验模型,证实颗粒形状不规则度与试样峰值强度呈正相关关系;史旦达等^[12-13]采用颗粒流刚性颗粒簇方法,系统研究了非圆颗粒砂土的剪切力学特性,发现颗粒形状不仅影响剪切带厚度,还会显著改变试样的峰值强度和变形行为。

综上所述,颗粒形状对材料宏观力学特性有重要影响,但针对柔性边界下不同颗粒形状对含瓦斯水合物煤体力学性质研究却鲜有开展。基于此,笔者将开展煤体中不同饱和度的水合物生成试验及试样三轴压缩试验,同时利用扫描电镜(Scanning Electron Microscope, SEM)还原煤颗粒真实几何形态,开展柔性边界条件下不同颗粒形状和饱和度含瓦斯水合物煤体DEM模拟,探究加载过程中颗粒形状对试样力学性质的影响特征,以期含瓦斯水合物煤体力学性质的研究提供新的方法,并准确预测

其力学特性。

1 室内三轴压缩试验概况

采用自主研发的瓦斯水合固化与力学性质测试一体化装置(图1),开展室内三轴压缩试验,煤粉取自双鸭山七星煤矿,煤粉颗粒粒径为0.245~0.198 mm,试验室型煤试样为 $D\times H=50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 圆柱体。含瓦斯水合物煤三轴压缩试验分为瓦斯水合物生成阶段和三轴压缩试验阶段。水合物生成于三轴室内进行,水合物生成后立即进行三轴压缩试验。试验采用过量气法生成水合物,通过精确调控初始含水量,可以有效控制目标饱和度。假设煤体中所有的水均参与反应,饱和度 S_h 计算方法如下:

$$S_h = \frac{V_h}{V_p} \times 100\% \quad (1)$$

式中: V_h 为瓦斯水合物体积, m^3 ; V_p 为煤样孔隙体积, m^3 。

具体饱和度计算公式参见文献[14],其中,煤样(粒径0.18~0.25 mm)孔容为0.072 8 mL/g,设计40%、60%、80% 3种饱和度方案,试样的初始含水量分别为5.34、7.80和10.8 g。将型煤放置在三轴室内,通入压力为4 MPa的瓦斯气体16 h后进行降温,在温度为0.5℃的条件下反应18 h。该温度与压力条件位于瓦斯水合物形成相平衡关系曲线的稳定区域,从而可使瓦斯气体与水结合形成水合物。

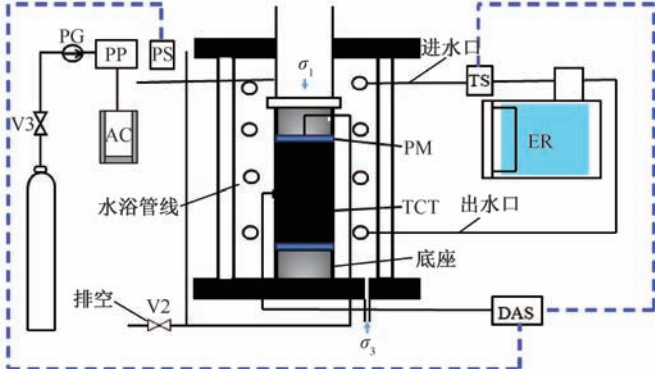


图 1 瓦斯水合固化与力学性质测试一体化装置

Fig. 1 Gas hydration solidification– mechanical property test device

根据我国地应力测量结果^[15],处于深度为600 m的地层所受地应力可按照下式计算:

$$\begin{cases} \sigma_l = 0.017\ 66H + 1.058\ 3 \\ \sigma_L = 0.029\ 89H + 2.798\ 4 \\ \sigma_v = 0.025\ 32H + 0.817\ 7 \end{cases} \quad (2)$$

式中: H 为地下埋深,m; σ_v 为垂直应力,MPa; σ_l 、 σ_L 为最小、最大水平应力,MPa。模拟埋深为600 m的煤层最小水平应力,计算得 $\sigma_l=11.66\text{ MPa}$,进而确定试验初始应力为12 MPa,具体室内三轴压缩试验步骤参见文献[14],室内试验应力应变曲线及试样破坏结果如图2、图3所示。由图3可知:随着饱和度增加,试样表面裂纹逐渐变少,试样强度增加,固化效果较好。

2 颗粒形状对含瓦斯水合物煤体力学性质的影响

2.1 真实颗粒形状模拟

在基于DEM的颗粒程序(Particle Flow

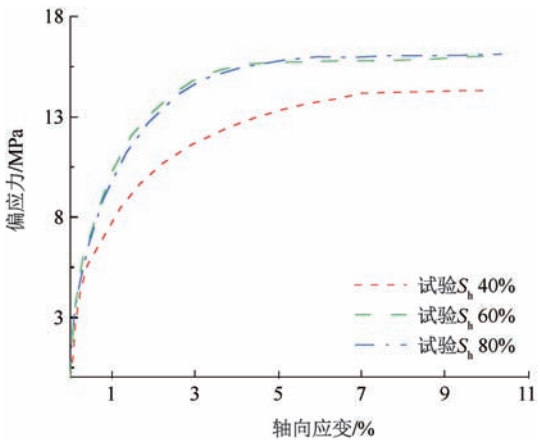


图 2 室内试验应力-应变曲线

Fig. 2 Experimental results of stress-strain curve

Code, PFC) 软件中生成不规则颗粒有2种方法:刚性颗粒簇 Clump 和柔性颗粒簇 Cluster,其中 Clump 单元可以视为1个刚性体,不会发生破坏,而 Cluster 单元是由颗粒胶结而成,在外力作用下会发生破坏。煤颗粒粒径相对较小,可以忽略在加载过程中煤颗粒破碎对含瓦斯水合物煤体试样强度的影响。因

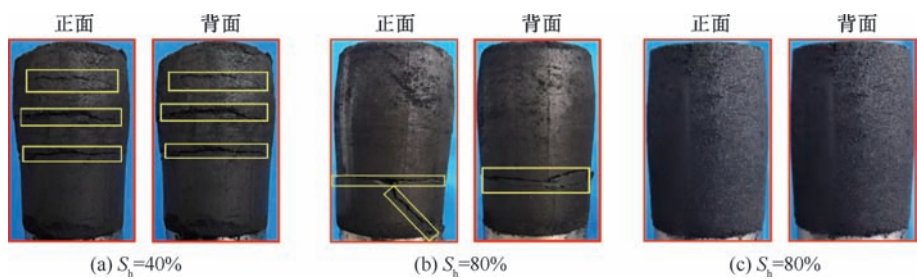


图 3 含瓦斯水合物煤体破坏情况
Fig. 3 Failure diagram of gas hydrate-bearing coal

此,文中采用 Clump 单元在 PFC^{2D} 中创建不规则颗粒模型。

首先,利用 SEM 获得煤颗粒真实形状;随后使用 Image-Pro Plus 6.0 软件测量煤颗粒,以获得尺寸与形状参数,测得的煤颗粒二维基本几何尺寸见表 1;矢量化处理扫描得到的图片,提取出轮廓曲线,并利用计算机辅助设计检查煤颗粒轮廓线闭合情况;最后在闭合轮廓线中填充子球生成刚性颗粒簇 Clump 模板,模板建立过程如图 4 所示。

表 1 煤颗粒基本几何尺寸

参数	尺寸
颗粒平面投影面积/mm ²	0.040
颗粒外轮廓长度/mm	0.788
沿颗粒轮廓最小外切多边形周长/mm	0.785
最大直径/mm	0.288
最小直径/mm	0.175

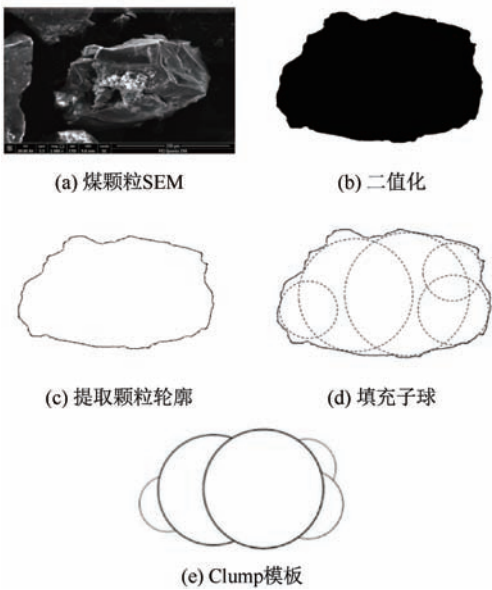


图 4 刚性颗粒簇模板生成过程
Fig. 4 Clump template generation process

2.2 三轴压缩数值模型建立及数值模拟方案

文中针对含瓦斯水合物煤体中固相的煤与瓦斯水合物,依照不同颗粒形状,将模拟试验划分为 2 组,每组开展 3 种饱和度试验,共 6 组。具体数值模拟方案见表 2,不同颗粒形状与饱和度如图 5 所示。具体建模流程如下:

- 1) 生成圆形颗粒,导入 Clump 煤颗粒模板,原位替换圆形颗粒。
- 2) 根据水合物饱和度计算方法填充水合物颗粒。
- 3) 施加 1 MPa 固结压力并为颗粒添加接触模型。
- 4) 施加 12 MPa 围压。
- 5) 生成柔性颗粒膜替换刚性墙并添加柔性伺服。
- 6) 设置测量圆并以 0.01 mm/s 的速率进行加载。

表 2 数值试验方案

Table 2 Numerical simulation scheme				
序号	围压/MPa	尺寸/mm×mm	颗粒形状	$S_h/\%$
1	12	50×100	圆形	40
2				60
3				80
4			不规则	40
5				60
6				80

本文采用柔性边界条件进行 DEM 模拟:上下端部为刚性边界,左右两侧基于 WANG Youhang 等^[16]方法构建柔性边界。柔性边界通过规则排列的颗粒链施加线性接触黏结模型实现,仅传递力而不传递力矩,准确模拟热缩管边界效应(图 6)。该方法有效克服了刚性边界对侧向变形的限制,显著提升了剪切带变形特征的模拟精度。

采用柔性边界不仅能够对试样施加及维持围压,而且还能还原试样加载过程中径向的自由变形。

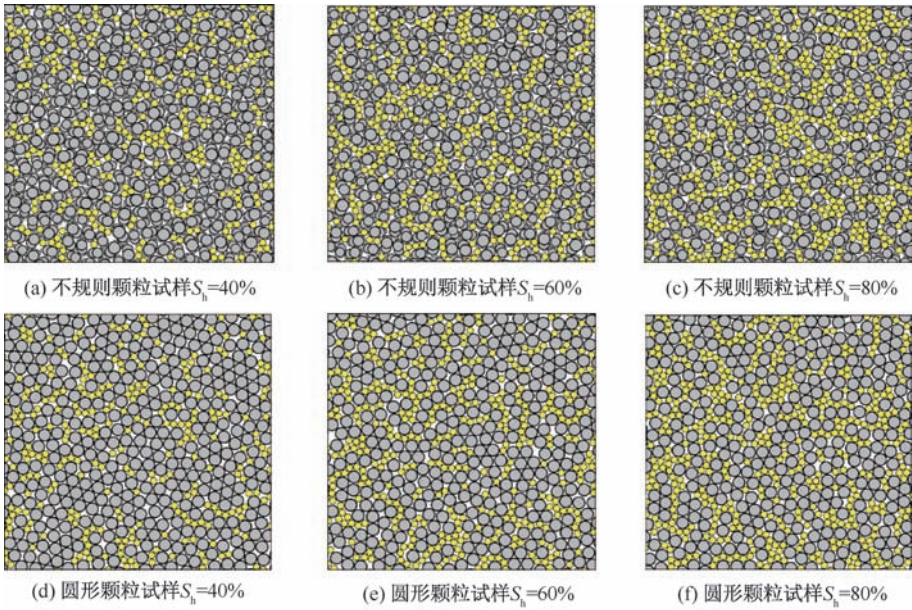


图5 不同颗粒形状与饱和度 DEM 试样

Fig. 5 Diagram of DEM samples with different particle shapes and saturations

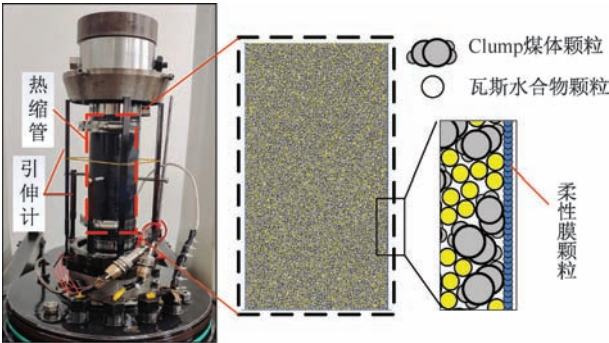


图6 柔性边界

Fig. 6 Flexible boundary schematic

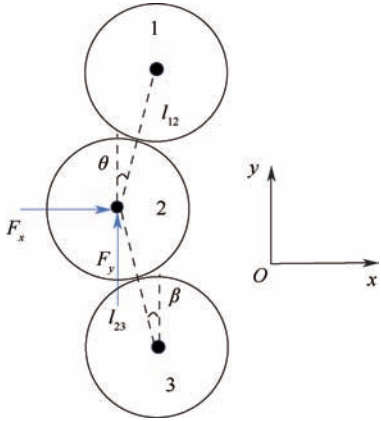


图7 柔性膜颗粒等效集中力计算^[17]

Fig. 7 Calculation diagram of equivalent concentrated force on flexible boundary particles^[17]

加载过程中柔性膜颗粒的等效集中力计算如图7所示,对于柔性膜中任意1个颗粒,等效集中力 F 可以按下式计算^[17]:

$$\left. \begin{aligned} F_x &= 0.5(l_{12}\cos\theta + l_{23}\cos\beta)\sigma_3 \\ F_y &= 0.5(l_{12}\sin\theta + l_{23}\sin\beta)\sigma_3 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: F_x 、 F_y 分别为施加到颗粒2上 x 、 y 方向的等效集中力,N; l_{12} 、 l_{23} 为颗粒2球心与颗粒1、3球心的长度和,m; θ 为颗粒2法线方向与 l_{12} 方向的夹角,(°); β 为颗粒3法线方向同 l_{23} 方向的夹角,(°); σ_3 为施加的伺服围压,MPa。

在PFC模拟中,接触模型决定了颗粒之间相互作用的物理力学性质。根据不同颗粒的相邻情况,将含瓦斯水合物煤体试样内部分为4种接触类型,即煤与煤接触、煤与水合物接触、水合物与水合物接触以及颗粒与墙体接触。YONEDA等^[18]发现水合

物与相邻颗粒有胶结作用,故选取平行黏结模型作为水合物颗粒与水合物颗粒及煤颗粒间的接触模型,煤-煤和颗粒-墙体接触选取线性接触模型。接触模型的选择与接触类型分布如图8所示。

平行黏结模型描述了颗粒间有限范围内胶结材料的本构关系,可传递力和力矩,能够反映材料受压、受拉和受弯的力学行为,可用以模拟水合物对煤体的固化作用。线性接触模型只有线性部分,只能传递力,用以模拟煤体颗粒间的力学作用。平行黏结模型由线性部分和黏结部分2部分组成。水合物胶结力学行为由黏结部分控制,用以模拟室内试验中水合物对煤体的固化作用,数值模型加载过程中平行黏结模型的黏结部分破坏对应于室内试验中煤

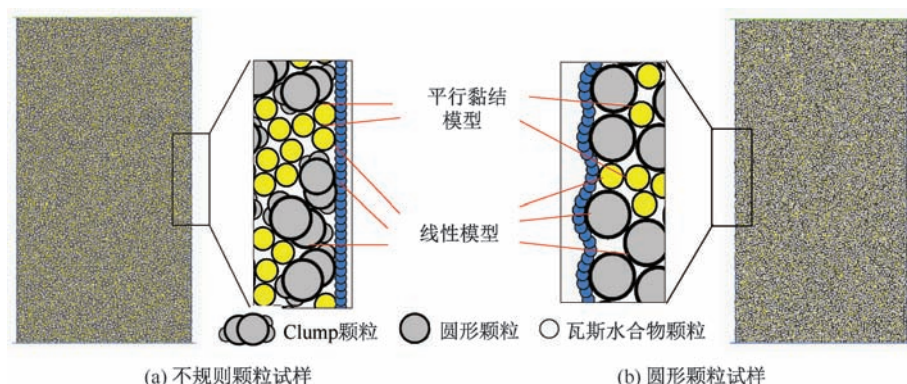


图 8 接触模型分布

Fig. 8 Contact model distribution

体颗粒间的水合物胶结力学破坏。

平行黏结模型由 4 个参数定义,分别是法向刚度 k_n 、切向刚度 k_s 、黏结法向强度 $\bar{c}$ 和黏结切向强度 $\bar{\sigma}_c$ 。平行黏结模型对应的总接触力和总力矩表达式如下:

$$\left. \begin{aligned} \bar{F}_i &= \bar{F}_i^n + \bar{F}_i^s \\ \bar{M}_i &= \bar{M}_i^n + \bar{M}_i^s \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $\bar{F}_i$ 、 $\bar{F}_i^n$ 和 $\bar{F}_i^s$ 分别为总接触力、法向接触力和切向接触力, N; $\bar{M}_i$ 、 $\bar{M}_i^n$ 、 $\bar{M}_i^s$ 分别为总力矩、法向力矩和切向力矩, N · m。

作用在黏结模型周边上的最大拉应力 $\sigma_{\max}$ 和最大剪应力 $\tau_{\max}$ 的计算方法如下:

$$\sigma_{\max} = \frac{-\bar{F}^n}{S} + \frac{|\bar{M}_i^n|}{I} \bar{R} \quad (5)$$

$$\tau_{\max} = \frac{\bar{F}_i^s}{S} + \frac{|\bar{M}_i^s|}{J} \bar{R} \quad (6)$$

表 3 接触模型参数

Table 3 Contact model parameter

接触类型	线性接触模型参数			平行黏结模型参数					
	E/MPa	刚度比	接触间 摩擦因数	$\bar{E}^*/\text{MPa}$	黏结刚度 比 $\bar{\kappa}^*$	$\bar{\sigma}_c/\text{MPa}$	$\bar{c}/\text{MPa}$	摩擦角 $\bar{\phi}/(^{\circ})$	摩擦因 数 μ
煤-水合物接触	6 000	1.0	0.2	5.0	1.0	8.0	8.0	20	0.2
水合物-水合物接触	6 000	1.0	0.2	5.0	1.0	8.0	8.0	20	0.2
煤-煤接触	6 000	1.0	0.2	—	—	—	—	—	—
颗粒-墙接触	100	—	—	—	—	—	—	—	—

不同饱和度条件下室内试验与数值模拟偏应力曲线对比情况如图 10 所示,室内试验与数值模拟所获得的应力—应变曲线基本吻合,图中点 A 、 B 、 C 是数值模拟的峰值强度点, A' 、 B' 、 C' 为室内试验的峰值强度点。经计算可知:二者最大峰值强度误差为 9.92%,最大弹性模量误差为 15.89%,这说明数值

式中: S 为接触面积, m^2 ; I 为惯性矩, m^4 ; J 为截面系数, $\text{kg} \cdot \text{m}^3$; $\bar{R}$ 为接触半径, m , 接触关系如图 9 所示。

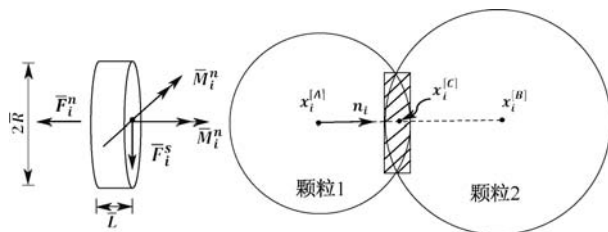


图 9 平行黏结模型接触示意(改编自文献[19])

Fig. 9 Parallel bonding model contact schematic (Modified from literature [19])

2.3 离散元模型试验验证

文中依据应力应变曲线线型、峰值强度和弹性模量 3 个指标标定细观参数,并结合相关数据^[20],通过“试错法”最终标定出细观参数,见表 3。

模拟结果与室内试验应力-应变曲线结果相吻合,验证了数值模型的可靠性。

不同颗粒形状模型应力-应变关系对比如图 11 所示,从图 11 可以看出,应力应变曲线总体呈应变硬化型,水合物饱和度对圆形颗粒试样及不规则颗粒试样峰值强度的影响均较强,点 A'' 、 B'' 和 C'' 分

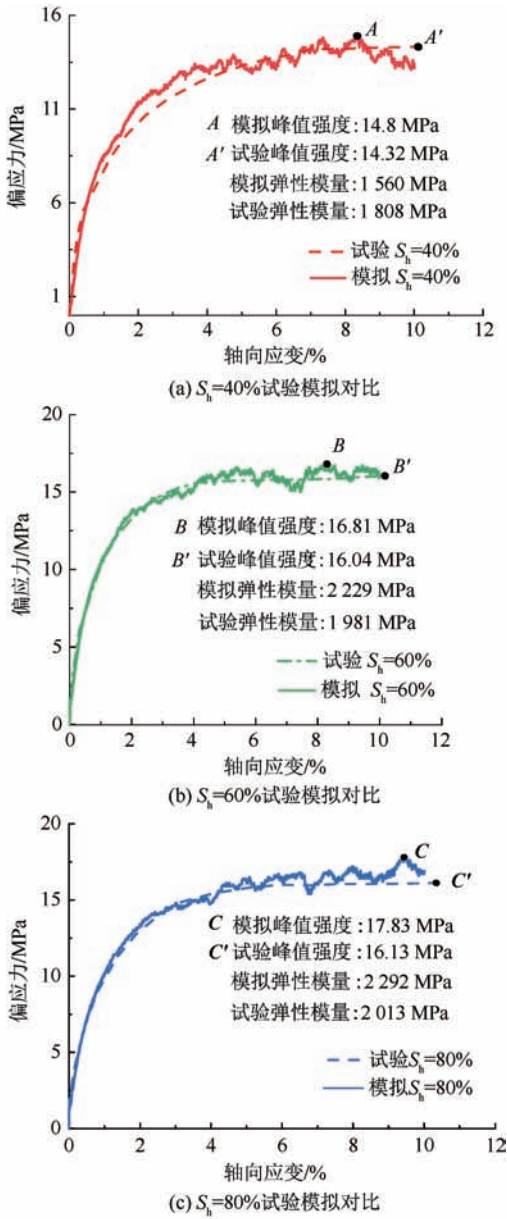


图 10 数值模型验证

Fig. 10 Diagram of numerical model validation

别是饱和度为 40%、60% 和 80% 的圆形颗粒试样峰值强度特征点。不规则颗粒试样中饱和度为 60% 的试样相较于饱和度为 40% 的试样强度提高了 7.38%，饱和度为 80% 的试样相较于饱和度为 60% 的试样强度提高了 4.30%。可见水合物饱和度增大，偏应力相应提高，在高饱和度条件下峰值强度增量不明显；不规则形状颗粒模型强度明显大于圆形颗粒，饱和度为 40%、60% 和 80% 不规则颗粒试样峰值强度相较于圆形颗粒试样分别提升了 142.01%、71.46% 和 40.34%。分析认为试样强度由滑动摩擦与咬合摩擦 2 部分构成，外力作用大大增强了不规则颗粒间的咬合约束，颗粒不易发生转动与移动，增

强了试样的强度。

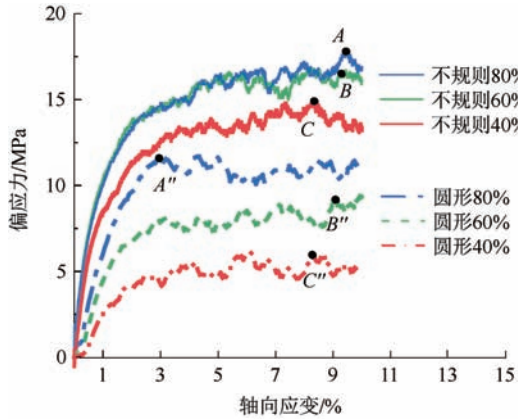


图 11 不同颗粒形状模型应力应变关系对比

Fig. 11 Stress-strain relationships of different particle shapes

3 含瓦斯水合物煤体细观力学性质研究

3.1 剪切带形成演化分析

对于颗粒材料而言，产生屈服破坏时，应变往往会集中于某一局部区域，进而形成一个局部化剪切带^[21]，剪切带内的颗粒会产生相对的错动和转动。不同颗粒形状模型试样在应变为 2%、6% 和 10% 处颗粒的转动量云图如图 12 所示，由图 12 可以看出，在加载过程中，不同颗粒形状试样剪切带的发育部位和形态有明显的不同，2 种颗粒形状试样宏观均表现出鼓胀破坏，这与室内三轴压缩试验条件下的破坏形态相吻合，与图 3 破坏模式相符，这也从宏观上验证了数值模拟结果的可靠性。随着轴向应变的增加，最先在试样内部形成小剪切带，小剪切带慢慢发展贯通并逐渐合并，最终在试样中心形成类 X 型剪切带，表现出了一个渐进破坏的过程。

在不同加载状态下，圆形颗粒试样发生转动的颗粒数明显多于不规则颗粒的试样。分析原因为水合物黏结失效后，圆形颗粒试样颗粒间只有摩擦作用，没有相互咬合作用，圆形颗粒更容易发生旋转。此外，随着饱和度的增加，2 种颗粒形状试样在相同轴向应变下数值试样剪切带的形状与位置均有明显差异，饱和度越高，试样密实度越好，剪切带位置越集中。因此，含瓦斯水合物煤体局部化剪切带的形成过程和变形破坏不仅受控于水合物饱和度，而且也取决于颗粒的不规则形状。

3.2 颗粒间接触力演化过程分析

在加载过程中，试样内部颗粒的剪切滑移、转动

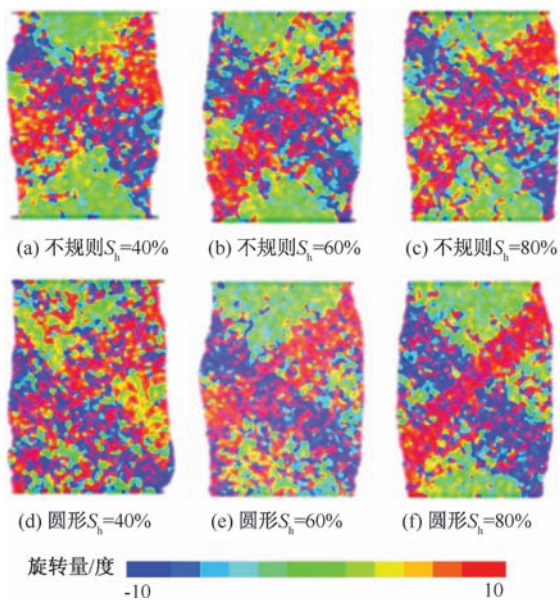


图 12 不同颗粒形状试样颗粒转动量云图
Fig. 12 Image of particle rotation of different particle shapes samples

和重排会引起接触各向异性。相互毗邻的颗粒间的接触处形成诸多传递外荷载的路径,该路径通常呈准直线型的链状结构,称为力链^[22],力链网络的复杂动力学响应决定颗粒体系的宏观力学性能。PETERS 等^[23]认为,力链由 3 个或 3 个以上颗粒组成且组成力链的颗粒最小主应力要大于所有颗粒最小主应力的平均值。SUN Qicheng 等^[24]提出,强力链颗粒受到的接触力大于所有接触力的平均值,即强力链由高应力颗粒构成。

图 13 展示了加载过程中不同饱和度试样高应力颗粒占比的变化特征。结果表明:2 种试样中高应力煤颗粒占比均呈递减趋势;不规则试样中高应力水合物颗粒占比持续下降,而圆形试样呈现先降后升趋势;加载终止时,煤颗粒高应力占比随饱和度增加而降低,不规则试样(40%、60%、80%饱和度)分别为 34.17%、31.10%、29.45%,圆形试样则为 36.63%、34.19%、31.41%。值得注意的是,圆形试样高应力水合物颗粒占比始终高于不规则试样,这源于 Clump 颗粒的刚性假设忽略了煤颗粒的变形破碎特性,导致低饱和度时应力主要由煤颗粒承担,而饱和度提升使水合物颗粒参与应力分配。不规则颗粒通过嵌套内锁作用形成稳定骨架结构,抑制颗粒运动,从而减少高应力煤颗粒数量。该现象从力链演化角度揭示了水合物饱和度影响煤体强度的机制,同时验证了不规则颗粒模型在表征含瓦斯水合物煤体力学行为方面的优越性。

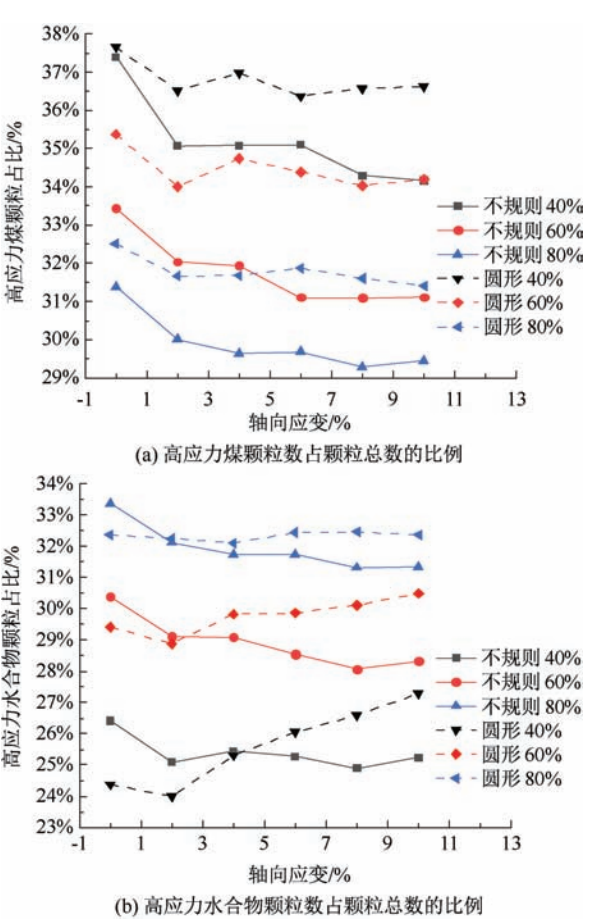


图 13 高应力颗粒数量占比
Fig. 13 Proportion of the number of highly stressed particles

3.3 孔隙率及配位数

颗粒材料力学特性主要受材料密度影响,反映到细观层面则是受到颗粒间接触点密度的影响。在模拟过程中设置多个测量圆用以监测加载过程中试样内部力学配位数的变化,得到的结果有所差异,取平均值作为最终结果。配位数是统计所有接触数目多于 1 的颗粒的平均接触数目,其数学表达式为:

$$z = 2N_c / N_p \tag{7}$$

式中 N_c 和 N_p 分别为数值模型内部总的接触数和颗粒数,个。

不同时步下平均配位数变化曲线如图 14 所示,由图 14 可知:不规则颗粒试样力学配位数大于圆形颗粒试样,当轴向应变小于 8% 时,2 种颗粒试样力学配位数均随轴向应变增加而增加。这是因此时试样被压密且部分颗粒间的黏结作用开始失效,导致颗粒位置发生变化,颗粒位置发生重新排列,颗粒逐渐充分接触,此阶段配位数相应增加,强度也不断增加。当轴向应变大于 8% 时, $S_h = 40\%$ 的不规则试样

配位数曲线呈下降趋势,宏观表现为试样体积的增大增加了颗粒间的孔隙,此时应力应变曲线呈现弱软化趋势。饱和度为 60% 的试样曲线逐渐趋于平缓,饱和度为 80% 试样曲线仍处于增加状态。这有力说明煤体内部细观演化决定了含瓦斯水合物煤体的宏观力学性质发展。

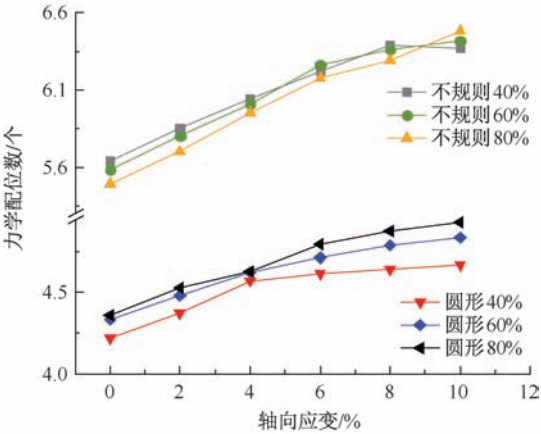


图 14 平均配位数与轴向应变关系

Fig. 14 Relationship between average coordination number and axial strain

4 结 论

1) 不同颗粒形状试样的应力-应变曲线线型均呈应变硬化型;水合物饱和度增大,峰值强度相应增大;相同饱和度条件下,不规则颗粒形状试样的强度比圆形颗粒试样的强度更高。

2) 饱和度和颗粒形状对试样破坏模式的影响较小,试样发生鼓胀破坏,含瓦斯水合物煤体中央剪切带呈 X 型分布,剪切带的形成过程受颗粒的形状影响,水合物饱和度对剪切带形态无明显影响。圆形颗粒试样发生旋转颗粒数目明显大于不规则试样。

3) 加载过程中,不规则颗粒通过嵌套内锁形成稳定骨架结构,显著抑制颗粒位移和转动,有效增强了承载能力。相较于圆形颗粒,不规则颗粒试样具有更高的配位数,煤体内部细观结构演化主导了含瓦斯水合物煤体宏观力学特性的发展。研究表明:不规则颗粒模型在表征煤体力学行为方面较圆形颗粒模型更具优势。

参 考 文 献

[1] 张美长, 白晨浩, 祁云, 等. 含水率影响下煤样拉伸与压缩力学特性试验[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(6): 146-156.
ZHANG Meichang, BAI Chenhao, QI Yun, et al. Experimental study on tensile and compressive mechanical properties of coal samples under influence of water content[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(6): 146-156.

[2] WU Qiang, HE Xueqiu. Preventing coal and gas outburst using methane hydration[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 13(1): 7-10.

[3] 吴强, 张保勇. 煤体中瓦斯水合固化的力学作用研究进展[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 720-738.
WU Qiang, ZHANG Baoyong. Progress in the mechanical effects of gas solidification by hydrate in coal[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 720-738.

[4] 张保勇, 高橙, 高霞, 等. 高饱和度下含瓦斯水合物煤体应力-应变特性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(2): 429-435.
ZHANG Baoyong, GAO Cheng, GAO Xia, et al. Experimental research on stress-strain behavior of gas hydrate-bearing coal with high saturation [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(2): 429-435.

[5] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Géotechnique, 1979, 29(1): 47-65.

[6] KRUGGEL-EMDEN H, RICKELTS, WIRTZ S, et al. A study on the validity of the multi: sphere discrete element method[J]. Powder Technology, 2008, 188(2): 153-165.

[7] 杜锋, 王凯, 孙加智, 等. 单轴压缩下不同倾角煤岩组合体力学特性及破坏特征[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(6): 136-145.
DU Feng, WANG Kai, SUN Jia zhi, et al. Mechanical properties and failure characteristics of coal rock combinations with different inclination angles under uniaxial compression[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(6): 136-145.

[8] BRUGADA J, CHENG Y P, SOGA K, et al. Discrete element modelling of geo-mechanical behavior of methane hydrate soils with pore-filling hydrate distribution[J]. Granular Matter, 2010, 12(5): 517-525.

[9] JIANG Yujing, GONG Bin. Discrete-element numerical modelling method for studying mechanical response of methane-hydrate-bearing specimens[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2020, 38(9): 1 082-1 096.

[10] 张翀, 舒赣平. 颗粒形状对颗粒流模拟双轴压缩试验的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8): 1 281-1 286.
ZHANG Chong, SHU Ganping. Effect of particle shape on biaxial tests simulated by particle flow code [J]. Chinese

Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(8): 1 281–1 286.

- [11] 孔亮, 彭仁. 颗粒形状对类砂土力学性质影响的颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(10): 2 112–2 119.
KONG Liang, PENG Ren. Particle flow simulation of influence of particle shape on mechanical properties of quasi-sands [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(10): 2 112–2 119.
- [12] 史旦达, 周健, 刘文白, 等. 砂土直剪力学性状的非圆颗粒模拟与宏细观机理研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10): 1 557–1 565.
SHI Danda, ZHOU Jian, LIU Wenbai, et al. Exploring macro- and micro-scale responses of sand in direct shear tests by numerical simulations using non-circular particles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(10): 1 557–1 565.
- [13] 史旦达, 周健, 刘文白, 等. 砂土单调剪切特性的非圆颗粒模拟[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9): 1 361–1 366.
SHI Danda, ZHOU Jian, LIU Wenbai, et al. Numerical simulation for behaviors of sand with non-circular particles under monotonic shear loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(9): 1 361–1 366.
- [14] 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(增1): 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.
- [15] 孙叶, 谭成轩. 中国现今区域构造应力场与地壳运动趋势分析[J]. 地质力学学报, 1995, 1(3): 1–12.
SUN Ye, TAN Chengxuan. An analysis of present-day regional tectonic stress field and crustal movement trend in China[J]. Journal of Geomechanics, 1995, 1(3): 1–12.
- [16] WANG Youhang, LEUNG S C. Characterization of cemented sand by experimental and numerical investigations[J]. Geotech Geoenviron Eng, ASCE, 2008, 134(7): 992–1 004.
- [17] 石崇. 颗粒流数值模拟技术与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018: 177–178.
- [18] YONEDA J, JIN Y, KATAGIRI J, et al. Strengthening mechanism of cemented hydrate-bearing sand at microscales[J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43(14): 7 442–7 450.
- [19] 尹小涛, 葛修润, 李春光, 等. 基于数值实验的岩石试样最佳长径比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增2): 3 608–3 615.
YIN Xiaotao, GE Xiurun, LI Chunguang, et al. Study of optimal length-diameter ratio of rock specimen based on numerical tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S2): 3 608–3 615.
- [20] 王楠楠, 高霞, 张吉哲, 等. 基于平行黏结模型的含瓦斯水合物煤体宏细观力学性质研究[J]. 煤炭学报, 2024, 49(增1): 314–326.
WANG Nannan, GAO Xia, ZHANG Jizhe, et al. Macro-micro mechanical behavior research on gas hydrate bearing coal based on parallel bonding model[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(S1): 314–326.
- [21] 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.
- [22] 孙其诚, 辛海丽, 刘建国, 等. 颗粒体系中的骨架及力链网络[J]. 岩土力学, 2009, 30(增1): 83–87.
SUN Qicheng, XIN Haili, LIU Jianguo, et al. Skeleton and force chain network in static granular material [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(S1): 83–87.
- [23] PETERS J F, MUTHUSWAMY M, WIBOWO J, et al. Characterization of force chains in granular material[J]. Physical Review E, 2005, 72(4): DOI: 10.1103/PhysRevE.72.041307.
- [24] SUN Qicheng, JIN Feng, LIU Jianguo, et al. Understanding force chains in dense granular materials[J]. International Journal of Modern Physics B, 2010, 24(29): 5 743–5 759.

作者简介: 高霞 (1984—), 女, 山西忻州人, 博士, 副教授, 主要从事煤岩力学方面的研究。E-mail: klgaoxia1984@163.com。

