化点时,石油树脂悬浮体主要依靠软固体的堵塞作 用封堵孔道,当温度大于树脂软化点后,树脂主要依 靠黏附在岩石表面降低渗透率,而树脂的封堵性能 和使用温度的关系目前缺少相关的研究,本文中通 过驱替实验研究软化点为91℃的石油树脂悬浮体 在不同温度下的封堵性能。根据实验结果(图4)计 算其在不同温度下的封堵率及残余阻力系数(表 1),发现当石油树脂的软化点与实验温度接近时, 石油树脂的封堵效果最好,封堵率高达98%以上, 但其在其他不同温度下仍然可以表现出较好封堵能 力,封堵率都在90%以上。



图 4 不同温度下水驱压力与时间关系

Fig. 4 Relationship between water flooding pressure and water driving time at different temperatures

表1 不同温度下的封堵性能

Table 1 Plugging performance at different temperatures

	渗透率/	$10^{-3} \ \mu m^2$	封堵率/	残余阻力	
価度/ U	封堵前	封堵后	%	系数	
75		600	92. 9	14. 2	
85		240	97.2	35.4	
95	8 500	140	98.4	60. 7	
105		180	97.9	47.2	
130		192	97.7	44.3	

2.2.2 双管封堵实验

采用级差为3的并联填砂管模拟非均质地层注 入石油树脂悬浮体前后,高渗、低渗层位分流量的变 化规律。结果表明,随着注入量的增加,高渗管与低 渗管分流量的比值逐渐减小。注入量达到0.5V_p时,高低渗流量比小于1,当注入量达到0.8V_p时, 石油树脂对低渗管造成伤害,说明悬浮体在进入高 渗管的同时也进入低渗管,对高渗管和低渗管同时 起封堵作用。因此建议根据地层的渗透率级差优选 石油树脂悬浮体的注入量。

2.3 油水选择性

首先测定的石油树脂软化点及在柴油中和水中

的溶解度见表 3。从表 3 可以看出,高温下石油树 脂在柴油中具有优异的溶解性,而在水中几乎不溶 解,且随着软化点的升高,溶解性降低,这主要是软 化点越高所用原料的馏程温度越低,非烯烃杂质含 量越少,产物聚合度越大的结果。根据其油溶性和 水溶性实验结果可以初步判断在地层条件下石油树 脂悬浮体可以实现选择性封堵的要求。

表 2 石油树脂悬浮体对非均质储层封堵效率的影响

 Table 2
 Effect of petroleum resin suspension on plugging

efficiency for heterogeneous reservoirs

序号	注入 量	渗透 率级 差	封堵前 渗透率/ 10 ⁻³ µm ²	封堵后 渗透率/ 10 ⁻³ μm ²	封堵前分 流量/ (mL・ min ⁻¹)	封堵后 分流量/ (mL・ min ⁻¹)	封堵 率/ %
	1 0.3 $V_{\rm P}$	3	15 000	6 000	0. 70	0. 55	60.0
I			5 000	5 000	0.30	0.45	0
2 0.51	0.51	3	15 000	4 200	0.71	0.43	72.0
	$0.5V_{\rm P}$		5 000	5 000	0.29	0.47	0
2	0.81	.8 <i>V</i> _P 3	15 000	1 320	0.73	0.24	91.2
3	0.0v _P		5 000	4 1 5 0	0.27	0.76	17.0
4	$1V_{\rm P}$	3	15 000	956	0.68	0.38	93.6
			5 000	2 1 8 0	0.32	0.62	56.4

表 3 石油树脂基本物理特性

Table 3 Basic physical properties of petroleum resins

石油树 脂编号	外观颜色	密度/(g・ cm ⁻³)	软化 点/℃	油溶解 度/%	水溶解 度/%
SZ-A	黄白色颗粒	1.02	91	100	0.08
SZ-B	黄色颗粒	1.05	99	100	0.06
SZ-C	黄棕色颗粒	1.07	109	100	0.02
SZ-D	褐色颗粒	1.07	120	100	0.01

进而通过流动实验测定石油树脂悬浮体对油相的封堵性能,结果表明注石油树脂悬浮体前油相的注入压力为4.02×10⁻⁵ MPa,注入1 V_p 石油树脂悬浮体后,用柴油驱至10 V_p 后,油相的注入压力为4.22×10⁻⁵ MPa(图5),油相渗透率由8500×10⁻³ μ m² 变为8050×10⁻³ μ m²,对油相的伤害率仅为5.29%。



说明石油树脂对高含油饱和度区域的伤害较小,具 有堵水不堵油的优势。

2.4 石油树脂封堵机制

2.4.1 高温流变性

采用流变仪测定不同温度下软化点为 91 ℃ 的 石油树脂黏度随剪切时间和剪切速率变化及石油树 脂的黏度随温度变化,结果见图 6 和 7。



图 6 石油树脂的黏度在不同温度下随剪切时间及剪切速率的变化





图 7 石油树脂黏度随温度的变化



测定不同温度下剪切应力随剪切速率变化及石 油树脂的黏弹模量和黏性模量,结果见图 8、9。



图 8 剪切应力随剪切速率的变化

Fig. 8 Change of shearing stress with shearing rate

从图 8 和 9 看出,剪切应力与剪切速率线性相

关且过原点,说明当温度超过石油树脂软化点后,石 油树脂转变为牛顿流体,表现出高黏特性。测定3 种软化点的石油树脂在不同温度下的黏度变化规 律,结果见图10。

从图 6 和 7 看出,当温度大于软化点时,石油树

脂的黏度不随时间和剪切速率的变化而变化,在

110、120、130、140、150 ℃下的黏度分别为 158、41、

14、5.2、2.2 Pa · s,在其软化点以上温度越高黏度

越小.且随温度升高黏度急剧下降但黏度下降速率

越来越慢。说明石油树脂可以利用其较高的黏度吸

附在岩石表面降低水相渗透率。



图 9 模量与剪切应力对应关系



由图 10 看出,99 ℃与 109 ℃软化点石油树脂 的性质与 91 ℃软化点石油树脂的性质基本相同,石 油树脂软化点越高,在同一温度下的黏度越高,109 ℃软化点石油树脂在 150 ℃温度下的黏度高达 230 Pa・s。

2.4.2 石油树脂在高温下的黏附性

将石油树脂悬浮体注入到地层后,在地层高温的作用下石油树脂悬浮体中的石油树脂颗粒逐渐发 生聚结(石油树脂在130℃高温下黏连在固体表面 现象见图11),同时由于悬浮体中的稳定剂(表面活 性剂和聚合物)在岩石表面的吸附造成悬浮体的稳定性降低,从而使得石油树脂进一步聚结并黏附在岩石孔隙表面和裂缝表面,使得岩石孔隙和裂缝的渗流面积减小,从而实现对水流通道的有效封堵。 而在油层中由于石油树脂本身具有优异的油溶性,因此可以逐渐溶解到原油中,实现堵水不堵油的选择性封堵效果。



图 10 不同软化点石油树脂在不同温度下的黏度 Fig. 10 Viscosity of petroleum resins at different temperatures for different softening points





3 结 论

(1)石油树脂体系在 130 ℃下可以稳定 5 h 以上,具有较好的耐温耐盐性。

(2)石油树脂悬浮体对水相封堵能力极强,对
 于渗透率大于8000×10⁻³ μm²的水层,封堵率高达
 80%以上,而对油层伤害率仅为5.29%。

(3)随着注入量的增加,高渗管与低渗管分流 量的比值逐渐减小,注入量达到0.5V_p时,高低渗流 量比小于1,当注入量达到0.8V_p时,石油树脂对低 渗管造成伤害。

(4) 当温度大于石油树脂软化点后转变为牛顿

流体,在地层中利用高黏特性吸附在岩石表面达到 封堵水层的目的。

参考文献:

- [1] 张建,李国君. 化学调剖堵水技术研究现状[J]. 大庆 石油地质与开发,2006,25(3):85-87.
 ZHANG Jian, LI Guojun. Research status of chemical profile control and water shutoff technology[J]. Daqing Petroleum Geology & Development, 2006,25(3):85-87.
- [2] 殷艳玲,张贵才. 化学堵水调剖剂综述[J]. 油气地质 与采收率,2003,10(6):64-66.
 YIN Yanling, ZHANG Guicai. A review of chemical water shutoff and profile control agents[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2003,10(6):64-66.
- [3] 熊春明,唐孝芬. 国内外堵水调剖技术最新进展及发展趋势[J]. 石油勘探与开发,2007,34(1):83-88.
 XIONG Chunming, TANG Xiaofen. Recent developments and development trends of water shutoff profiles at home and abroad [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007,34(1):83-88.
- [4] 纪朝凤,葛红江.调剖堵水材料研究现状与发展趋势
 [J].石油钻采工艺,2002,24(1):54-57.
 JI Chaofeng, GE Hongjiang. Research status and development trend of profile control and water shutoff materials
 [J]. Petroleum Drilling Production Process, 2002,24 (1): 54-57.
- [5] 孙乾,李兆敏,李松岩,等. 添加纳米 SiO₂ 颗粒的泡沫
 表面性质及调剖性能[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(6):101-108.
 SUN Qian, LI Zhaomin, LI Songyan, et al. Foam surface

properties and profile control properties of nano-SiO₂ particles [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016,40(6):101-108.

- [6] 史胜龙,王业飞,王振彪,等,微泡沫在高温高盐油藏中的驱油作用[J].油田化学,2017,34(1):96-102.
 SHI Shenglong, WANG Yefei, WANG Zhenbiao, et al. Oil displacement of micro-foam in high-temperature and high-salt reservoirs [J]. Oilfield Chemistry, 2017, 34 (1):96-102.
- [7] 郭志东,肖龙,朱红霞. CDG 与聚合物的驱油特征研究
 [J].油田化学,2009,26(1):84-90.
 GUO Zhidong, XIAO Long, ZHU Hongxia. Study on the characteristics of CDG and polymer flooding[J]. Oilfield Chemistry, 2009,26(1):84-90.
- [8] ZHANG Guicai, CHEN Lifeng, GE Jijiang, et al. Experimental research of syneresis mechanism of HPAM/Cr³⁺ gel[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2015,483:96-103

 [9] 蒋平,葛际江,张贵才,等. 稠油油藏化学驱采收率的 影响因素[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),
 2011,35(2):166-171.
 JIANG Ping, GE Jijiang, ZHANG Guicai, et al. Factors

influencing chemical flooding recovery in heavy oil reservoirs [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011,35(2):166-171.

- [10] CHEN Lifeng, ZHANG Guicai, GE Jijiang, et al. Ultrastable hydrogel for enhanced oil recovery based on double-groups cross-linking [J]. Energy Fuels, 2015: 29,7196-7203.
- [11] 李宜强,向刚,王彦升,等.沥青调剖颗粒与大庆喇嘛 甸油层配伍关系[J].中国石油大学学报(自然科学 版),2015,39(4):92-96.

LI Yiqiang, XIANG Gang, WANG Yansheng, et al. Compatibility relationship between asphalt profile control particles and Lamadian Reservoir in Daqing [J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2015,39(4):92-96.

- [12] CHEN Lifeng, ZHANG Guicai, GE Jijiang, et al. Property evaluation of a new selective water shutoff agent for horizontal well[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2014,446:33-45
- [13] 蒋方红. 石油树脂乳液的研制[J]. 金山油化纤, 2003,22(4):9-11.
 JIANG Fanghong. Development of petroleum resin e-mulsion[J]. Jinshan Oil Chemical Fiber, 2003,22 (4):9-11.
- [14] 董和滨,张美云,赵婉淞. 石油树脂在造纸工业中的应用[J]. 江苏造纸,2011,39(2):31-35.
 DONG Hebin, ZHANG Meiyun, ZHAO Wansong. Application of petroleum resin in papermaking industry
 [J]. Jiangsu Paper, 2011,39(2):31-35.
- [15] 褚夫强,邱化玉,陈夫山.阳离子分散石油树脂施胶剂的研制[J].中华纸业,2004,25(8):47-49.
 CHU Fuqiang, QIU Huayu, CHEN Fushan. Develop-

ment of cation-dispersed petroleum resin sizing agent [J]. China's Paper Industry, 2004, 25(8): 47-49.

- [16] 黄军左,张仕森. C_9 石油树脂的改性技术及应用
 [J]. 高分子通报,2010(4):62-67.
 HUANG Junzuo, ZHANG Shiseng. Modification technology and application of C_9 petroleum resin[J]. Polymer Bulletin, 2010(4):62-67.
- [17] 柴忠义. C9 石油树脂加氢技术进展[J]. 合成树脂及 塑料,2009,26(6):71-74.
 CHAI Zhongyi. Progress in hydrogenation of C9 petroleum resin [J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2009,26(6):71-74.
- [18] 米多,刘权益,刘建华. C_9 芳烃石油树脂生产技术进展[J]. 弹性体,2010,20(3):81-85.
 MI Duo, LIU Quanyi, LIU Jianhua. Progress in production technology of C_9 aromatic petroleum resins[J]. E-lastomers, 2010,20(3):81-85.
- [19] 杨靖华,许修强,曹祖宾.乙烯装置副产 C9 馏分制备 芳烃溶剂油及石油树脂[J].石油炼制与化工,2008, 39(2):26-30.
 YANG Jinghua, XU Xiuqiang, CAO Zubin. Preparation of aromatic solvent oil and petroleum resin from C9 fraction of by-product from ethylene plants [J]. Petroleum
- [20] 闫慧,孟邱,丛玉凤. C9 石油树脂的研究进展[J].应用化工,2011,40(6):1083-1088.
 YAN Hui, MENG Qiu, CONG Yufeng. Research progress of C9 petroleum resin[J]. Applied Chemicals, 2011,40(6):1083-1088.

Processing and Petrochemicals, 2008, 39(2):26-30.

[21] 吕维华,夏德强,石星丽,等.石油树脂技术应用发展 概况[J].化学工程与装备,2016(9):268-270.
LÜ Weihua, XIA Deqiang, SHI Xingli, et al. Overview of application development of petroleum resin technology [J]. Chemical Engineering and Equipment, 2016(9): 268-270.

(编辑 刘为清)

文章编号:1673-5005(2020)01-0131-10

可燃冰沉积物宏细观力学特性真三轴试验离散元模拟

周 博,王宏乾,王 辉,周世琛,薛世峰

(中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院,山东青岛 266580)

摘要:为了研究孔隙填充型可燃冰沉积物在复杂应力状态下的力学特性,采用三维离散元法对孔隙填充型可燃冰沉 积物试样进行在不同平均应力、不同中主应力系数下的真三轴压缩模拟试验,研究平均应力和中主应力系数对宏、 细观力学性质的影响以及细观力学机制的演化与宏观力学特性的联系。结果表明:平均应力的取值主要影响可燃 冰沉积物的峰值强度;大、中、小主应力以及大、中、小主应变受到中主应力系数的取值影响较大,其变化趋势与颗粒 接触的强接触组构主值表现出良好的相似性;在三向应力不等的情况下,可燃冰沉积物的破坏强度符合 Lade-Duncan 准则;随着中主应力系数逐渐增大,XY 平面上的法向接触力更倾向于朝着中主应力方向发展。

关键词:可燃冰沉积物;真三轴压缩试验;离散单元法;平均应力;中主应力系数;宏细观力学性质

中图分类号:TU 411 文献标志码:A

引用格式:周博,王宏乾,王辉,等.可燃冰沉积物宏细观力学特性真三轴试验离散元模拟[J].中国石油大学学报(自 然科学版),2020,44(1):131-140.

ZHOU Bo, WANG Hongqian, WANG Hui, et al. Discrete element simulation of true triaxial tests on macro and meso mechanical properties of combustible ice sediments [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2020,44(1):131-140.

Discrete element simulation of true triaxial tests on macro and meso mechanical properties of combustible ice sediments

ZHOU Bo, WANG Hongqian, WANG Hui, ZHOU Shichen, XUE Shifeng

(College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties of pore-filled combustible ice sediments under complex stress conditions, a series of true triaxial tests were carried out using the three-dimensional discrete element method with different mean effective stresses and different intermediate stress ratios. The effects of mean effective stress and the intermediate stress ratio on the macroscopic mechanical properties, and the relationship between the evolution of the mesoscopic mechanical mechanism and the macroscopic mechanical properties of combustible ice sediments were studied. The results show that the value of mean effective stress mainly affects the peak strength of combustible ice sediments. There is a great similarity between the variations in principal stresses (i. e. major, intermediate and minor principal stress), principal strains (i. e. major, intermediate and minor principal strains) and the stronger contact fabric tensor of the particles, and the principal stresses and principal strains are strongly effected by the intermediate stress ratios. The strength under complex stress conditions of combustible ice sediments obeys the Lade-Duncan failure criterion. With the increase of the intermediate stress ratio, the normal contact force in the *XY* plane tends to develop toward the direction of the intermediate principal stress.

Keywords: combustible ice sediments; true triaxial tests; discrete element method; mean effective stress; intermediate stress ratio; macro and meso mechanical properties

可燃冰是甲烷气体和水在低温高压下形成的笼 型类冰结晶化合物,广泛存在于陆域永冻区、极地大 陆架和大陆架边缘的深海沉积区^[14]。在标准大气压下,1 m³可燃冰分解可产生 164 m³ 甲烷气体和 0.87

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0307604)

作者简介:周博(1972-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为智能材料与结构力学、油气井工程力学、新能源工程力学和微尺度材料力学等。E-mail:zhoubo@upc.edu.cn。

收稿日期:2019-03-06

m³ 水, 是 21 世纪最具有商业开发前景的战略资 源[5]。2017年中国在南海神狐海域实现了可燃冰试 采成功,极大推动了中国在可燃冰开发领域的研 究^[67]。可燃冰开采需要以破坏可燃冰的相平衡条件 为前提,这容易引起井壁失稳、海底滑坡及地层变形 等一系列安全问题^[8-12]。研究可燃冰沉积物的力学 行为、揭示可燃冰储层的变形规律,对实现可燃冰安 全开采具有重要意义。天然可燃冰沉积物试样不易 提取和保存,目前主要采用人工合成可燃冰沉积物试 样来进行室内试验研究[13-14],但室内试验难以揭示可 燃冰沉积物力学行为的细观机制。离散元法(DEM) 在计算散粒体和表征沉积物几何特征方面存在优 势^[15]。贺洁等^[16]制备了可燃冰沉积物 DEM 试样, 并对其进行了固结排水三轴压缩 DEM 模拟试验,研 究了可燃冰沉积物的宏微观力学性质。Brugada 等^[17]利用离散元软件 PFC^{3D}对孔隙填充型水合物沉 积物进行了常规三轴排水模拟试验,分析了孔隙填充 型结构对力学特性的微观影响机制。肖俞等[18]建立 一种微观胶结型可燃冰沉积物 DEM 试样,对其进行 了常规三轴排水试验模拟研究。Jung 等^[19]针对可燃 冰在孔隙中的不同生长阶段,对孔隙颗粒型以及块状 团簇饱和型的可燃冰沉积物进行了离散元模拟,进一 步揭示了可燃冰形成环境对沉积物力学性质的影响。 上述常规三轴室内试验和 DEM 模拟试验均不便于描 述复杂应力状态下的可燃冰沉积物力学行为。贺洁 等^[20]对特定饱和度的孔隙填充型可燃冰沉积物,开 展了不同中主应力系数下真三轴压缩 DEM 模拟试 验,分析了中主应力对可燃冰沉积物力学行为的影 响。蒋明镜等^[21]提出了裹覆型可燃冰沉积物离散元 模拟方案.对裹覆型可燃冰沉积物试样进行真三轴压 缩试验模拟,探讨了裹覆型可燃冰沉积物在复杂应力 状态下的宏微观力学特性。这些研究主要集中在中 主应力对可燃冰沉积物的力学特性的影响,而对于可 燃冰沉积物的细观和微观力学性质的演化以及其与 宏观力学性质的联系,仍有待进一步研究。笔者采用 离散元软件 PFC^{3D}5.0 制备孔隙填充型的可燃冰沉积 物 DEM 试样,对其开展一系列在不同平均应力、不同 中主应力系数下的真三轴压缩试验模拟,分析平均应 力、中主应力系数对可燃冰沉积物强度、变形特征以 及摩擦角的变化规律的影响,并初步探讨中主应力系 数对细观和微观力学特性的影响。

1 可燃冰沉积物 DEM 试样制备

根据文献[22]中所提出方法生成可燃冰沉积

物 DEM 试样。图 1 是饱和度为 10% 的可燃冰沉积 物 DEM 试样。试样为边长 3 mm 的立方体,采用圆 球颗粒模拟土体颗粒和可燃冰颗粒,其中浅黄色颗 粒表示土颗粒,粒径为 0.1~0.4 mm,为更好地与室 内试验结果相比较,其颗粒级配曲线与 Toyoura 砂 类似(图 2),密度为 2.65 g/cm³;深蓝色颗粒表示可 燃冰颗粒,密度为 0.9 g/cm³,考虑到可燃冰颗粒由 于土体孔隙生成及计算效率等因素,将可燃冰颗粒 粒径取为 0.06 mm。



图1 可燃冰真三轴主应力加载示意图

Fig. 1 Principal stresses of combustible ice sediment

生成特定饱和度可燃冰沉积物 DEM 试样的方法如下。

(1)可燃冰颗粒"转化"为土颗粒,二者同时生成。与文献[16]-[17]中试样生成方法不同,首先将特定饱和度的可燃冰颗粒通过计算转化为土颗粒的一部分,然后将两种颗粒统一由新生的颗粒级配曲线生成。这种做法既体现出可燃冰颗粒填充的随机性,又节省了试样生成时间,提高了计算效率。可燃冰饱和度是指可燃冰体积占试样孔隙体积的占比,即

 $S_{mh} = V_{mh} / V_{v}.$ (1) 式中, V_{mh} 和 V_{v} 分别为可燃冰体积和孔隙体积, mm³。

(2)消除重叠量,控制不平衡力。为了保证模拟的准确性,试样生成后对整体颗粒进行再平衡运动,使颗粒间的不平衡力小于某一特定值,消除生成颗粒产生的重叠量。

(3)试样固结。为模拟可燃冰沉积物初始的应 力状态,在试样上施加1.0 MPa的固结压力。

(4)赋予颗粒接触模型。土颗粒间接触赋予线 性接触模型,可燃性颗粒间、可燃冰与土颗粒间赋予 平行胶结接触模型。线性模型的法向和切向刚度均 为1.5×10⁷ N/m,摩擦系数为0.5。平行黏结模型的 法向和切向胶结刚度为均为1.5×10⁷ N/m,黏结强 度和拉伸强度均为8.3 MPa,墙体的法向和切向刚 度均为100 MN/m。

L





Fig. 2 Particle size distributions of granular material in DEM simulations and Toyoura sand

2 可燃冰沉积物真三轴压缩试验 DEM 模拟分析

2.1 常规三轴压缩试验 DEM 模拟

为了验证真三轴 DEM 试验模拟的有效性和可 靠性,利用编制的真三轴伺服程序对制备的孔隙填 充型可燃冰沉积物试样进行固结排水三轴压缩模拟 试验,并将试验模拟结果与室内试验结果进行对比。 图 3 给出的是饱和度为 40.9% 的可燃冰沉积物试 样在有效围压 1.0 MPa 下的 DEM 模拟结果与 Masui 等^[23]对可燃冰沉积物在有效围压 1.0 MPa 条件下 开展的固结排水三轴压缩室内试验结果对比。



数值模拟试验与室内试验对比 Fig. 3 Comparison between DEM simulation and



由图 3 可以看出, DEM 数值模拟结果能较好地 反映可燃冰沉积物的主要应力-应变特性, 数值模 拟结果与试验结果吻合较好, 从而说明将本文中提 出的可燃冰沉积物离散元试样制备方法应用于真三 轴压缩试验是可行的。

2.2 真三轴压缩试验 DEM 模拟

土力学中将平均应力 p 和中主应力系数 b 定义为

$$P = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} , \qquad (2)$$

$$=\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}.$$
 (3)

式中, σ_1 、 σ_2 与 σ_3 分别为第一、第二、第三主应力, MPa;p为平均应力,MPa;b为中主应力系数;当b=0时, $\sigma_2=\sigma_3$,对应于常规三轴压缩状态;当b=1时, $\sigma_2=\sigma_1$,对应三轴拉伸状态。

联立式(2)、(3),中主应力 σ_2 和小主应力 σ_3 可以由已知的平均应力 p、中主应力系数 b 和大主 应力 σ_1 表示,使得 σ_2 和 σ_3 在真三轴压缩过程中可 以监测得到

$$\sigma_2 = \frac{3p(1-b) + (2b-1)\sigma_1}{2-b} , \qquad (4)$$

$$\sigma_3 = \frac{3p - (1+b)\sigma_1}{2-b} \,. \tag{5}$$

加载边界条件的控制是成功进行可燃冰沉积物真 三轴压缩 DEM 模拟试验的关键,通过编写 PFC 真三轴 伺服控制程序对已制备好的可燃冰沉积物试样进行伺 服加载并实时监测大主应力 σ_1 ,通过计算求出式(4)、 (5)中的中主应力 σ_2 、小主应力 σ_3 与大主应力 σ_1 的 关系,将计算得到的 σ_2 、 σ_3 重新施加到 DEM 模型加载 板上,保持整个过程中 b 不变。整个试验过程采用恒 应变加载方式,应变率为7%/min。

真三轴压缩试验得到的结果是用偏应力 q、体 应变 ε_v 和偏应变 ε_s 的关系来表示的,其中对于偏 应力 q、偏应变 ε_s 和体应变 ε_v 的定义如下:

$$q = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}, \qquad (6)$$

$$\varepsilon_{s} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[\left(\varepsilon_{1} - \varepsilon_{2} \right)^{2} + \left(\varepsilon_{2} - \varepsilon_{3} \right)^{2} + \left(\varepsilon_{3} - \varepsilon_{1} \right)^{2} \right] .$$
(7)

 $\varepsilon_{v} = \varepsilon_{1} + \varepsilon_{2} + \varepsilon_{3}. \tag{8}$

式中, ε_1 、 ε_2 、 ε_3 分别为大、中、小主应变,无量纲;q为偏应力,MPa。

当 b=0 时,试验状态对应于常规三轴压缩试验,偏应力 $q=\sigma_1-\sigma_3$,偏应变为 $\varepsilon_s=2(\varepsilon_1-\varepsilon_3)/\sqrt{3}$ 。

真三轴 DEM 模拟试验主要分为两组:①平均应 力 p 保持定值,中主应力系数 b 取不同数值 0、0.2、 0.4、0.5、0.6、0.8、1.0 对特定可燃冰饱和度的沉积 物试样进行真三轴压缩试验模拟;②中主应力系数 b 保持定值,平均应力 p 分别取 1.0、1.5、2.0、2.5 MPa,对特定可燃冰饱和度的沉积物试样进行真三