

深层碳酸盐岩储层溶洞围岩应力分布研究

周汉国^{1,2}, 郭建春¹, 李静³, 彭成乐⁴, 王昌³, 高帅³, 郑金凯³

(1. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500;

2. 中国石化胜利油田分公司油气勘探管理中心, 山东 东营 257000;

3. 中国石油大学(华东)地质力学与工程研究所, 山东 青岛 266580;

4. 河北康保广恒新能源有限公司, 河北 张家口 075000)

摘要: 以冀中凹陷任北奥陶系碳酸盐岩储层为例, 基于油田测井资料及岩石力学实验确定了研究区岩石力学参数, 对目标储层典型的长椭圆形孤立落水溶洞围岩应力进行了数值模拟, 并根据第三强度理论研究了围岩破坏情况。研究表明, (1) 溶洞在上覆岩层压力和侧向压力的共同作用下, 长椭圆形溶洞围岩的应力集中效应带为9倍的半径范围; (2) 长椭圆形溶洞围岩应力以压应力为主, 主要集中分布在洞顶和洞底; (3) 溶洞填充性对其围岩主应力差及破坏范围影响很大。当填充压力小于0.1 MPa时, 溶洞围岩主应力差及破坏区域范围随填充压力的增大而增大; 而当填充压力大于0.1 MPa时, 溶洞围岩主应力差及破坏区域范围随填充压力的增大均呈减小的趋势。

关键词: 碳酸盐岩; 溶洞; 围岩应力; 数值模拟

中图分类号: P554

文献标识码: A

DISTRIBUTION OF SURROUNDING ROCK STRESS IN DEEP CARBONATE RESERVOIR KARST CAVE

ZHOU Hanguo^{1,2}, GUO Jianchun¹, LI Jing³, PENG Chengle⁴, WANG Chang³,
GAO Shuai³, ZHENG Jinkai³

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China;

2. Management Center of Oil and Gas Exploration of SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying 257000, Shandong, China;

3. Research Institute of Geological Mechanics and Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong, China;

4. Hebei Kangbao Guangheng New Energy Co., Ltd., Zhangjiakou 075000, Hebei, China)

Abstract: The Ordovician carbonate oil pool in northern Renqiu of the Jizhong depression is taken as an example in this article. The rock mechanical parameters in the study area were calculated based on the log data of the oil field, and the typical isolated water long elliptic karst cave of the target reservoir was selected, with its surrounding rock stress and its damage zone calculated by numerical simulation and third strength theory. The results show that: 1) Under the combined action of overburden pressure and lateral pressure, the stress concentration effect zone of the long elliptic karst cave surrounding rock is 9 times of the radius. 2) The surrounding rock stress of long elliptic karst cave is mainly compressive stress, mainly concentrating in the top and the bottom. 3) The filling property of karst cave has great influence on the principal stress difference and damage range of surrounding rock. For the long-elliptic

karst cave, the principal stress difference and shear damage of the surrounding rock increase with the increase of filling pressure when the filling pressure is less than 0.1 MPa; while the principal stress difference and the shear damage range of the surrounding rock gradually decrease with the increase of filling pressure when the filling pressure is more than 0.1 MPa.

Key words: carbonate rocks; karst cave; surrounding rock stress; numerical simulation

0 引言

孔、缝、洞是碳酸盐岩储集层的重要特征^[1-2], 纵横向常发育多套岩溶洞穴系统^[3]。针对碳酸盐岩而言, 岩溶是由大气水或地下流体对碳酸钙发生溶蚀, 导致碳酸盐岩岩石结构破坏并重组^[4-5], 其中孔隙和裂缝对碳酸盐岩储层的储集、渗透意义重大, 是油气田高产、稳产的关键, 但是溶洞却给油气开采带来了困难。在油气田钻井过程中, 钻遇溶洞通常会造井径异常扩大、钻具放空、钻井液漏失等钻井事故; 同时, 在油气开采过程中, 也会因溶洞内部油气被开采, 溶洞支撑压力减小, 发生溶洞失稳、坍塌等事故。据统计, 冀中坳陷任北地区奥陶系大型溶洞居多, 10口井有放空或扩径点共17处, 长者3 m, 短者0.4 m, 平均0.5~1 m, 溶洞率0.4%^[6]。51口钻入奥陶系的井, 有22口井的67个井段有井径异常扩大、钻具放空和泥浆漏失现象; 任76井在3199 m处发生2.16 m钻具放空, 并伴有泥浆漏失和井涌, 824井在3729 m处发生6139 m³的泥浆漏失, 并伴有扩径现象^[7]。溶洞围岩的应力场分布是其能否保持稳定不发生破坏、坍塌的主控因素。近年来, 虽已有学者对溶洞围岩的应力场分布进行了相关研究, 王晓楠等^[8]研究了桥梁基桩下溶洞围岩的应力状态, 饶军应等^[9]以平面弹性复变方法为基础, 研究了管状填充性椭圆形溶洞的围岩应力, 但是以上研究均是对于浅层的标准圆形或椭圆形溶洞岩体, 而对于处在地层深部形状复杂的油气储层溶洞围岩应力场分布研究, 至今鲜有报道。

研究以冀中坳陷任北奥陶系碳酸盐岩储层为例, 取剖面为典型的长椭圆形孤立落水溶洞为研究对象, 研究其在真实地应力环境下的应力分布规律; 同时, 计算相应应力分布状态下的溶洞破坏区域范围大小, 以期判断溶洞的稳定性, 指导碳酸盐岩油气藏的勘探开发。

1 研究区概况

冀中坳陷是渤海湾盆地的一个一级负向构造单元, 基底为太古界—下元古界变质结晶岩系, 中、上元古界和下古生界形成于浅海陆棚相环境, 发育厚达2000 m的碳酸盐岩。中生代开始, 构造运动十分强烈, 同时受北西—南东向压应力作用, 形成了北东、北北东、北西西向断层系, 将基底分成了大量块体^[10], 形成古山梁, 同时遭受风化剥蚀作用开始形成潜山。新生代古近纪开始, 构造活动减弱, 在北西—南东向拉应力作用下, 基岩块体发生翘倾, 形成“凹凸相间”的构造格局, 直到新生代诸山逐渐下沉被水淹没。在沉积之前一直暴露地表, 岩溶充分, 为溶洞型潜山储集层的发育提供了良好的条件。研究区位于冀中坳陷任丘潜山北部斜坡, 西至任西主断层, 东至马西断层, 南部至任47-91井断层, 向北以鞍部连接郑东潜山。任北奥陶系划分为两个统四个组, 储集层分布不稳定且物性变化很大, 其岩性以石灰岩为主^[11-13]。

2 岩石力学参数的确定

研究采用实验室岩石力学参数测定以及利用测井资料计算, 这两种方法综合确定研究区的岩石力学参数。

2.1 研究区岩石力学参数的计算

以冀中坳陷任76井3119.7~3204.4 m井段为研究区域, 根据任76井的测井资料来计算岩石力学参数^[2,14-17], 在计算过程中, 采用取平均值的方法, 将一定厚度的岩石分为若干层, 每一层的数据求和再取其平均值, 通过计算得出研究区岩石力学参数以及岩石力学特性参数如表1所示。

2.2 研究区岩石力学实验

根据研究区12块岩心的岩石三轴实验结果, 研究区岩石的弹性模量为 4.478×10^4 MPa, 泊松比

表 1 任 76 井岩石力学特性

Table 1 Rock mechanics parameters of Ren 76 well

岩层深度/m	纵波时差 $\mu\text{s}/\text{m}$	横波时差 $\mu\text{s}/\text{m}$	动态弹性模量/ 10^4 MPa	动态泊松比	静态弹性模量/ 10^4 MPa	静态泊松比	抗压强度/MPa	剪切强度/MPa	抗张强度/MPa	内摩擦角/ $(^\circ)$	垂直应力/MPa	最大水平主应力/MPa	最小水平主应力/MPa
3119.7	212.27	411.73	5.7945	0.445	4.1365	0.2381	177.02	17.91	14.75	19.23	105.47	108.35	97.44
3126.7	219.49	418.41	6.1218	0.483	4.3687	0.2476	168.21	16.46	14.02	19.29	105.69	107.93	97.31
3130.5	204.98	409.76	5.9362	0.458	4.2370	0.2413	177.76	18.62	14.81	19.20	105.79	109.57	98.33
3166.0	222.8	420.34	6.0547	0.452	4.3211	0.2398	166.63	16.09	13.89	19.30	106.56	108.88	98.03
3171.6	214.63	412.31	6.1642	0.453	4.3988	0.2401	177.27	17.76	14.77	19.24	106.73	109.50	98.55
3180.6	221.32	419.26	6.1818	0.480	4.4113	0.2468	167.78	16.30	13.98	19.30	106.87	109.36	98.42
3185.5	223.88	421.57	6.3947	0.505	4.5623	0.2531	164.86	15.85	13.74	19.31	107.02	109.29	98.45
3193.4	215.45	412.4	6.0991	0.491	4.3526	0.2496	177.64	16.74	14.80	19.24	107.22	109.95	98.97
3204.4	223.29	423.37	6.1386	0.495	4.3806	0.2507	160.62	15.45	13.38	19.33	107.47	109.89	99.03

为 0.232。将表 1 的计算值与实验值进行对比分析, 得出静态弹性模量误差在 1.49% ~ 7.63% 之间, 静态泊松比误差在 2.63% ~ 9.09% 之间, 误差均在允许范围内, 表明上述岩石力学参数计算结果可靠。

2.3 研究区岩石力学参数的确定

从表 1 计算结果可知, 该井段岩体总体呈脆性, 故可将其看成线弹性体。综合分析取表 1 中计算所得的岩石力学参数的平均值作为数值模拟模型的力学特性参数, 如表 2 所示。

表 2 研究区岩石力学特性

Table 2 Rock mechanics parameters of the study area

岩石类型	静态弹性模量/ 10^4 MPa	静态泊松比	剪切强度/MPa	抗张强度/MPa	抗拉强度/MPa	内摩擦角/ $(^\circ)$	垂向应力/MPa	最大水平主应力/MPa	最小水平主应力/MPa
石灰岩	4.3521	0.2452	16.79	14.24	170.34	19.28	106.50	109.20	98.28

3 溶洞围岩应力数值模拟分析

3.1 碳酸盐岩溶洞围岩应力计算

以典型的长椭圆形孤立落水溶洞为例, 进行溶洞围岩应力的数值模拟分析。假定研究区碳酸盐岩溶洞周围为连续地层^[18], 地层岩石力学参数取表 2 计算结果。在有限元软件 COMSOL 中以 X 方向代表最大水平主应力方向, Z 方向为地层深度方向, 建立有限元模型, 进行溶洞应力数值模拟计算。

3.1.1 溶洞围岩应力集中效应带分析

建立模型时, 取长椭圆顶部半圆半径 $r = 2.5$ m, 底部半圆半径 $R = 3$ m, 上下半圆圆心间距 $h = 4$ m。取溶洞周围地区为 50 m \times 50 m 的正方形。应用平面应变模型对研究区储层进行数值模拟分析, 采用 4 节点四边形单元来进行网格划分, 溶洞周围网格采用加密方法进行处理, 共生成 60625 个节点, 37193 个计算单元。图 1 为长椭圆形溶洞几何模型及约束加载情况。

根据所建立的有限元模型, 按照上文的加载约束条件, 计算得到长椭圆形溶洞围岩最大、最

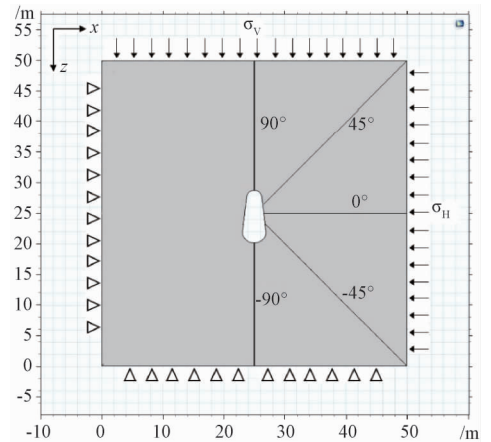


图 1 长椭圆形溶洞几何模型及约束加载图

Fig. 1 Schematic diagram of the geometric model and the constraint loading in the long ellipse karst cave

小主应力在 -90° 、 -45° 、 0° 、 45° 和 90° 5 个径向上的变化曲线图, 如图 2、图 3 所示。

从图 2 和图 3 可以看出, 最大主应力和最小主应力均是负值, 为压应力。溶洞洞壁内, 不同位置的应力状态大不相同, 在 -90° 和 90° 处最大主应力和最小主应力均最大, 0° 、 45° 和 -45° 处相对较小, 结合图 1 也说明, 该种荷载工况下, 长椭圆

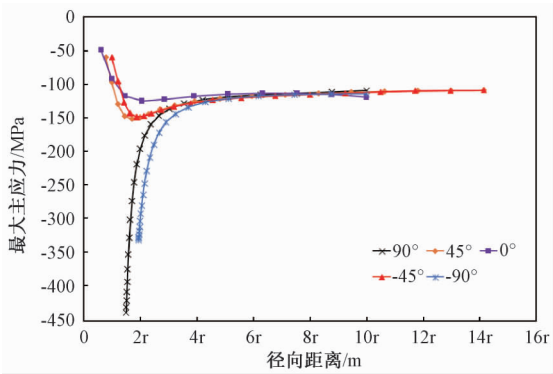


图2 长椭圆形溶洞围岩最大主应力沿径向变化图
Fig.2 Diagram of the radial variation of maximum principal stress of the surrounding rock in long ellipse karst cave

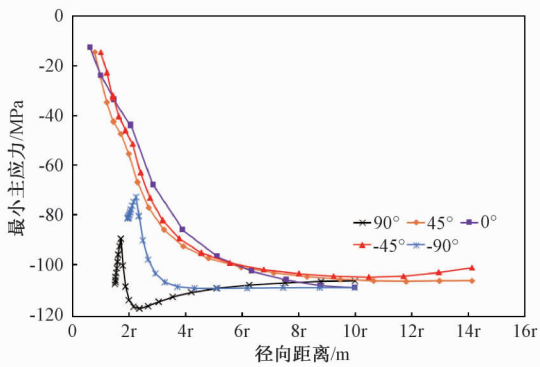


图3 长椭圆形溶洞围岩最小主应力沿径向变化图
Fig.3 Diagram of the radial variation of minimum principal stress of the surrounding rock in long ellipse karst cave

形溶洞洞顶和洞底所在位置为应力集中处，两侧壁处应力较小且分布比较均匀。随着径向距离的增大，长椭圆形溶洞不同位置处的最大主应力和最小主应力均趋于同一值，且保持稳定，其中，当径向距离大于 $6r$ 后，溶洞各处的最大主应力趋于一致不再变化，当径向距离大于 $9r$ 后，溶洞各处的最小主应力趋于一致，因此，长椭圆形溶洞围岩应力集中效应带为9倍的半径范围。

3.1.2 溶洞围岩应力集中效应带分析

在图1所示的围压状态下，研究区最大、最小主应力差云图如图4所示。

图4表明，洞顶和洞底处围岩主应力差最大，约为 $150 \sim 400$ MPa，产生应力集中，溶洞两侧围岩主应力差大约在 $70 \sim 150$ MPa。结合图2中 0° 、 45° 和 -45° 方向上的应力变化曲线可得看出，溶洞两侧围岩的应力随着径向距离的增大呈先增大后略微减小的变化趋势，即该种荷载工况下，溶洞两侧围岩的应力最大值并不是出现在溶洞侧壁处，

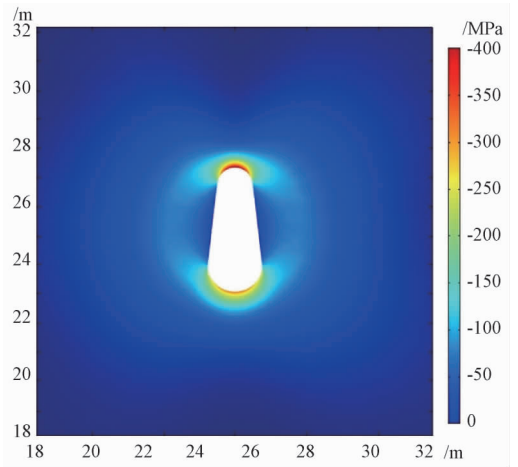


图4 长椭圆形溶洞围岩主应力差分布图（负为压）
Fig.4 Distribution of principal stress difference of the surrounding rock in long ellipse karst cave (Pressure is negative)

而是离侧壁一定距离处。综合判断，溶洞围岩应力主要集中在洞顶和洞底，没有拉应力出现，因而溶洞的主要破坏方式以剪切破坏为主。

3.1.3 长椭圆形溶洞破坏分析

根据弹性力学理论可知，任意点处的剪应力与该处的最大、最小主应力之间的关系如下：

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (1)$$

式中： σ_1 和 σ_3 分别是最大和最小主应力，MPa； τ 为岩石所受的剪切应力，MPa。

剪切破坏程度 T 为：

$$T = \frac{\tau}{|\tau_n|} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2|\tau_n|} \quad (2)$$

式中： T 为围岩剪切破坏程度，无量纲； τ_n 为围岩的剪切强度，MPa；若 $T > 1$ ，则围岩发生剪切破坏； $T < 1$ ，则围岩不发生破坏； $T = 1$ ，围岩处于临界状态。将图4中主应力差的结果除以2，就可得到研究区剪应力分布云图，再除以 τ_n ，便得到围岩发生剪切破坏程度的分布云图，为了方便查看破坏区域，将剪切破坏程度的分布云图分成 $T \geq 1$ （破坏区域）和 $T < 1$ （未破坏）两部分，绘制出长椭圆形溶洞围岩剪切破坏程度分布如图5所示。

3.2 溶洞应力状态的影响因素分析

影响溶洞应力状态的因素有很多，如溶洞的形状、尺寸、埋深、上覆岩层压力、侧向压力、地下水位、溶洞填充性等，研究中溶洞处于冀中拗陷北奥陶系碳酸盐岩储层，埋深大，并经历了复杂的地质构造运动，大多数溶洞被岩屑、水、油气填充^[19-20]，填充物对深层溶洞的应力分布状

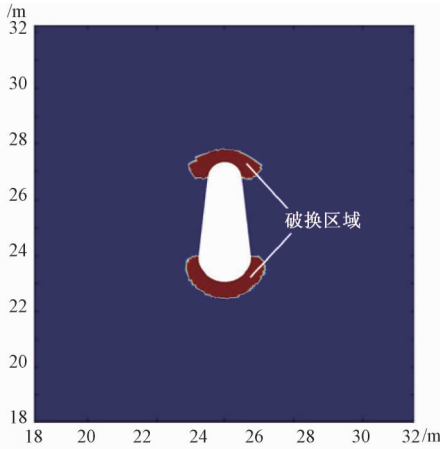


图 5 长椭圆形溶洞围岩破坏区域分布图
Fig. 5 Distribution of failure zone of the surrounding rock in long ellipse karst cave

态的影响很大。假设填充物对溶洞壁的作用力为压力, 且大小相等, 方向垂直于洞壁。取填充压力 P 大小分别为 0.05 MPa、0.1 MPa、0.5 MPa、1.0 MPa、10 MPa、20 MPa、30 MPa、50 MPa 这 8 种情况进行填充性对溶洞应力分布的影响研究。

在长椭圆形溶洞内分别施加上述 8 种填充压力进行计算, 提取溶洞壁上 0° 、 90° 和 -90° 位置处的主应力差值, 绘制其随洞内填充压力的变化曲线如 6 所示。

从图 6 可以看出, 对于长椭圆形溶洞, 当 $P < 0.1$ MPa 时, 随着填充压力的增大溶洞壁主应力差增大; 当 $P > 0.1$ MPa 时, 洞壁主应力差随填充压力的增大呈减小趋势。比较 3 条曲线, 得出溶洞顶部 (90°) 和底部 (-90°) 的应力变化较大, 且

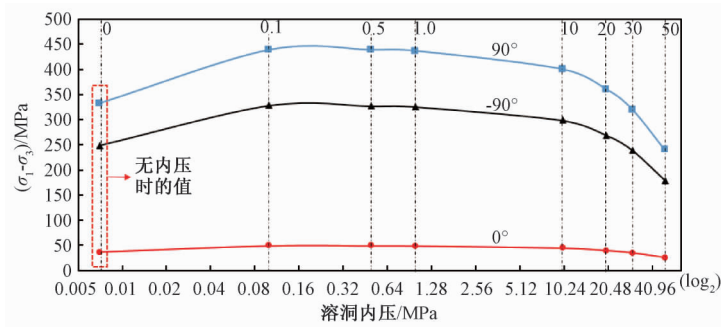


图 6 长椭圆形溶洞应力随填充压力的变化曲线
Fig. 6 Curves of the change of stress with the filling pressure in long ellipse karst cave

顶部变化大于底部, 而溶洞侧壁 (0°) 的应力变化不明显。

由图 6 可得, 在填充压力从 0 MPa 增大到 50 MPa 的过程中, 长椭圆形溶洞洞壁的主应力差随填充压力的增大呈现先增大后减小的趋势。分析出现这种现象的原因是无填充压力时, 对于溶洞壁上的岩石, 处于一维受压状态, $\sigma_3 = 0$; 而施加填充压力后, 岩石处于二维受压状态, $\sigma_3 \neq 0$, 开始增大, σ_1 也开始增长, 由于溶洞形状的原因, 长椭圆形溶洞壁上的岩石单元体在填充压力较小时 σ_1 的增长大于 σ_3 的增长, 当填充压力大于 0.1 MPa 后, σ_1 的增长开始小于 σ_3 的增长, 故溶洞壁主应力差随填充压力的增大呈先增大后减小的趋势。

根据公式 (1) 和 (2) 绘制出各种填充压力作用下的溶洞围岩剪切破坏分布如图 7 所示。(为清晰地观察溶洞周围围岩破坏区域, 图中只呈现模型 18 ~ 32 m 范围内的区域)

图 7 表明, 长椭圆形溶洞的剪切破坏主要发生在洞顶和洞底, 当 $P \leq 0.1$ MPa 时, 随着 P 的增大溶洞围岩剪切破坏的区域逐渐增大, 当 $P > 0.1$ MPa 时, 随着 P 的增大溶洞围岩的破坏区域逐渐减小, 这种现象和图 6 中呈现的长椭圆形溶洞主应力差的变化趋势一致。因此, 可以得出对于长椭圆形溶洞, 洞内填充物对溶洞的支撑压力越大对溶洞稳定越有利, 支撑压力较小时, 对溶洞稳定不利。

4 结论

1) 冀中拗陷任北奥陶系碳酸盐岩储层处在高应力区, 其垂向应力为 106.50 MPa, 最大水平主应力为 109.20 MPa, 最小水平主应力为 98.28 MPa; 储层岩石总体呈脆性, 其弹性模量为 43.521 GPa, 泊松比为 0.2452。

2) 研究区储层溶洞在上覆岩层压力和侧向压力的共同作用下, 围岩产生应力集中。通过数值

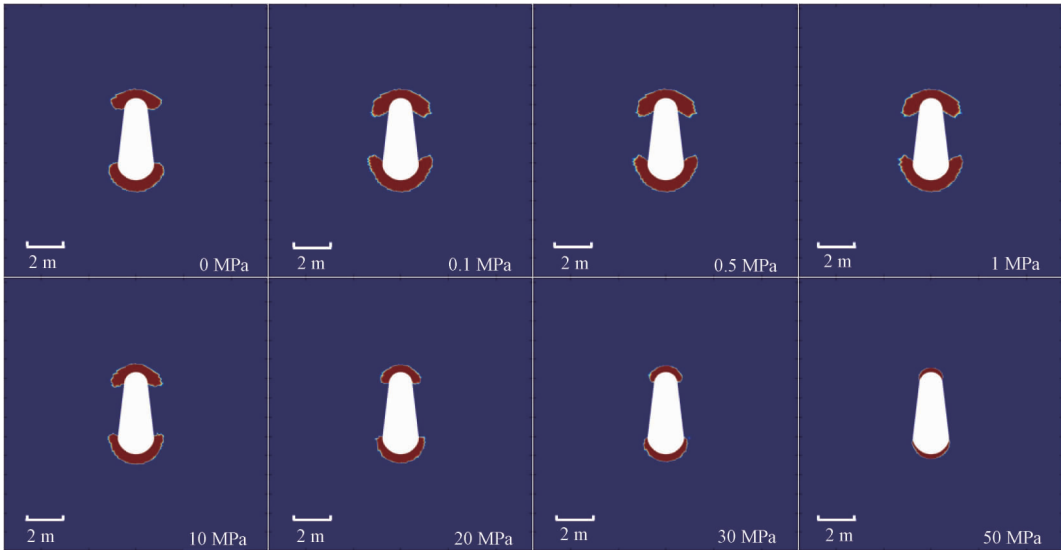


图7 长椭圆形溶洞围岩在填充压力作用下的剪切破坏图

Fig. 7 Shear failure of the surrounding rock in long ellipse karst cave under the filling pressure

模拟计算得出,长椭圆形溶洞围岩的应力集中效应带为9倍的半径范围。长椭圆形溶洞围岩应力以压应力为主,发生剪切破坏,其最大应力及其剪切破坏均发生在溶洞顶部和底部区域。

3) 溶洞填充性对其围岩应力大小及破坏区域范围影响很大。对于长椭圆形溶洞,当填充压力 $P \leq 0.1$ MPa时,溶洞围岩主应力差及破坏区域范围随填充压力 P 的增大呈增大趋势;而当填充压力 $P > 0.1$ MPa时,溶洞围岩主应力差与破坏区域范围均呈减小的趋势。

参考文献/References

[1] Loucks R G. Paleocave carbonate reservoirs: origins, burial-depth modifications, spatial complexity, and reservoir implications [J]. AAPG Bulletin, 1999, 83 (11): 1795 ~ 1834.

[2] 李静, 查明, 刘震. 基于声波测井资料的地应力分布研究——以饶阳凹陷任北奥陶系潜山为例 [J]. 岩土力学, 2011, 32 (9): 2765 ~ 2770.

LI Jing, ZHA Ming, LIU Zhen. Research on crustal stress distribution based on acoustic logging data-taking North Region of Renqiu Ordovician Buried Hill of Raoyang Depression for example [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (9): 2765 ~ 2770. (in Chinese with English abstract)

[3] 王光付. 碳酸盐岩溶洞型储层综合识别及预测方法 [J]. 石油学报, 2008, 29 (1): 47 ~ 51.

WANG Guangfu. Integrative identification and prediction methods for carbonate rock cave reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29 (1): 47 ~ 51. (in Chinese with English abstract)

[4] 王思敬. 论岩石的地质本质性及其岩石力学演绎 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (3): 433 ~ 450.

WANG Sijing. Geological nature of rock and its deduction for rock mechanics [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (3): 433 ~ 450. (in Chinese with English abstract)

[5] 王鹏昊, 汤良杰, 邱海峻, 等. 塔里木盆地西北地区岩石力学格架及其地质意义 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2012, 42 (S3): 101 ~ 110.

WANG Penghao, TANG Liangjie, QIU Haijun, et al. Rock mechanics framework and its geological implication in Northwest Tarim Basin, China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42 (S3): 101 ~ 110. (in Chinese with English abstract)

[6] 余家仁, 李彦尊. 应用井径曲线研究任丘古潜山岩溶 [J]. 石油勘探与开发, 1981, 8 (5): 33 ~ 39.

YU Jiaren, LI Yanzun. Study on the karst of Buried Hill in Renqiu by well diameter curve [J]. Petroleum Exploration and Development, 1981, 8 (5): 33 ~ 39. (in Chinese)

[7] 刘之葵, 梁金城, 朱寿增, 等. 岩溶区含溶洞岩石地基稳定性分析 [J]. 岩土工程学报, 2003, 25 (5): 629 ~ 633.

LIU Zhikui, LIANG Jincheng, ZHU Shouzeng, et al. Stability analysis of rock foundation with cave in karst area [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25 (5): 629 ~ 633. (in Chinese with English abstract)

[8] 王晓楠, 张燕奇, 王建良. 桥梁基桩下伏溶洞围岩应力状态分析 [J]. 科学技术与工程, 2012, 12 (14): 3390 ~ 3393, 3410.

WANG Xiaonan, ZHANG Yanqi, WANG Jianliang. Analysis of the stress state of the cave wall-surrounding body under bridge foundation pile in karst region [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12 (14): 3390 ~ 3393, 3410. (in Chinese with English abstract)

- [9] 饶军应, 傅鹤林, 刘运思, 等. 管状填充性椭圆形溶洞的围岩应力弹性解析分析 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2015, 46 (7): 2605 ~ 2612.
RAO Junying, FU Helin, LIU Yunsi, et al. Stress analysis of rocks surrounding a tubular filled elliptical karst cave with complex function of elastic mechanics [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46 (7): 2605 ~ 2612. (in Chinese with English abstract)
- [10] 高长海, 张新征, 查明, 等. 冀中坳陷潜山油气藏特征 [J]. 岩性油气藏, 2011, 23 (6): 6 ~ 12.
GAO Changhai, ZHANG Xinzheng, ZHA Ming, et al. Characteristics of buried hill reservoir in Jizhong Depression [J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23 (6): 6 ~ 12. (in Chinese with English abstract)
- [11] 华北油田石油地质志编写组. 中国石油地质志 (卷五) [M]. 北京: 石油工业出版社, 1987.
Huabei Oilfield Petroleum Geology Editorial. Petroleum geology of China volume 5 [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1987. (in Chinese)
- [12] 刘震. 冀中探区古潜山裂缝的有限元模拟 [D]. 东营: 中国石油大学 (华东), 2010.
LIU Zhen. The Finite Element Simulation of fracture in buried hills of Jizhong region [D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2010. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李静, 查明, 刘震, 等. 岩石力学参数概率统计特性研究 [J]. 勘察科学技术, 2010, (2): 20 ~ 22.
LI Jing, ZHA Ming, LIU Zhen, et al. Study on probability statistics property of rock mechanical parameters [J]. Site Investigation Science and Technology, 2010, (2): 20 ~ 22. (in Chinese with English abstract)
- [14] 胡国忠, 王宏图, 贾剑青, 等. 岩石的动静弹性模量的关系 [J]. 重庆大学学报 (自然科学版), 2005, 28 (3): 102 ~ 105.
HU Guozhong, WANG Hongtu, JIA Jianqing, et al. Relationship between dynamic and static value of elastic modulus in rock [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2005, 28 (3): 102 ~ 105. (in Chinese with English abstract)
- [15] 王冠贵. 声波测井理论基础及其应用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1988.
WANG Guangui. Theoretical basis and its application of acoustic logging [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1988. (in Chinese)
- [16] 王子振, 王瑞和, 单珣, 等. 常规方法预测碳酸盐岩地层压力的偏差分析 [J]. 中国石油大学学报 (自然科学版), 2014, 38 (5): 96 ~ 101.
WANG Zizhen, WANG Ruihe, SHAN Xun, et al. Uncertainty analysis of pore pressure prediction in carbonate formation Using conventional methods [J]. Journal of China University of Petroleum, 2014, 38 (5): 96 ~ 101. (in Chinese with English abstract)
- [17] 黄荣樽. 地层破裂压力预测模式的探讨 [J]. 华东石油学院学报, 1984, 8 (4): 335 ~ 347.
HUANG Rongzun. A model for predicting formation fracture pressure [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 1984, 8 (4): 335 ~ 347. (in Chinese with English abstract)
- [18] 于崇, 李海波, 李国文, 等. 大连地下石油储备库地应力场反演分析 [J]. 岩土力学, 2010, 31 (12): 3984 ~ 3990.
YU Chong, LI Haibo, LI Guowen, et al. Inversion analysis of initial stress field of Dalian underground oil storage cavern [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31 (12): 3984 ~ 3990. (in Chinese with English abstract)
- [19] 李宝刚, 高日胜. 塔里木盆地柯坪塔格构造带南缘古溶洞特征及主控因素分析 [J]. 现代地质, 2014, 28 (1): 149 ~ 155.
LI Baogang, GAO Risheng. Characteristics and main controlling factors of karst caves in the southern margin of Kepingtage tectonic belt, Tarim Basin [J]. Geoscience, 2014, 28 (1): 149 ~ 155. (in Chinese with English abstract)
- [20] 吴孔友, 王雨洁, 张瑾琳, 等. 冀中坳陷前第三系岩溶发育规律及其控制因素 [J]. 海相油气地质, 2010, 15 (4): 14 ~ 22.
WU Kongyou, WANG Yujie, ZHANG Jinlin, et al. Development rule and controlling factors of pre-tertiary karst in jizhong depression, Bohaiwan Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2010, 15 (4): 14 ~ 22. (in Chinese with English abstract)