

深层碳酸盐岩储层溶洞垮塌物理模拟及分布预测

吕心瑞¹, 邬兴威¹, 孙建芳¹, 夏东领¹, 李彦普², 丁炎志³, 王 斌³

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206; 2. 中国石油大港油田分公司 第一采油厂, 天津 300280;

3. 山东大学 岩土与结构工程中心, 山东 济南 250061)

摘要:大型古岩溶洞穴是深层碳酸盐岩储层的重要储集空间类型, 钻井揭示溶洞大多存在不同程度的垮塌角砾充填, 对溶洞垮塌机制、垮塌模式及分布规律的认识直接影响此类油藏的高效开发。依据相似性理论, 以塔河油田奥陶系储层大型溶洞为工程背景, 利用融蜡成腔方法制作未充填、砂泥充填和水充填3类球形溶洞, 开展溶洞垮塌的地质力学物理模型试验, 揭示不同充填类型溶洞的垮塌机制, 分析垮塌形态及破坏范围, 建立溶洞垮塌体模式, 根据其地震反射特征, 探索不同类型溶洞垮塌体地震预测方法。结果表明: 物理模型试验适用于塔河地区深层应力作用下溶洞垮塌研究, 弥补了传统方法在直观、真实方面的不足; 揭示了溶洞垮塌机制主要为压实破坏和剪切破坏, 溶洞顶板及周边原岩垮落, 并出现剪切滑移破坏带, 范围为2~3倍洞径; 砂泥充填溶洞稳定性大于水充填溶洞的稳定性, 未充填溶洞稳定性最差; 建立了2类溶洞垮塌模式, I类垮塌模式主要受上覆重力影响, II类垮塌模式主要受剪切应力影响, 二者地震反射特征存在局部差异, 综合有色反演、分频能量、GR反演及相干能量梯度等地震属性能够实现2类溶洞垮塌体的预测, 研究区不同类型垮塌体分布预测结果与油井产能具有较好对应关系。

关键词:溶洞垮塌; 物理模拟; 垮塌模式; 垮塌预测; 深层碳酸盐岩储层; 塔河油田

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Physical simulation and distribution prediction of karst cave collapsing in deep carbonate reservoirs

Lyu Xinrui¹, Wu Xingwei¹, Sun Jianfang¹, Xia Dongling¹, Li Yanpu², Ding Yanzhi³, Wang Bin³

(1. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China; 2. No. 1 Oil Production Plant, Dagang Oilfield Company, PetroChina, Tianjin 300280, China; 3. Geotechnical and Structural Engineering Center, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China)

Abstract: Large paleokarst caves constitute important storage space in deep carbonate reservoirs. Drilling data reveal that many such caves are filled to some extent by collapsed breccia. A better understanding of their collapse mechanisms, modes and distribution would be helpful in the highly efficient development of such reservoirs. This study applies the similarity theory to the making of unfilled, sand/mud-filled and water-filled spherical caves using the molten wax cavity method to simulate the large karst caves in the Ordovician carbonate reservoirs for geomechanical physical model test of karst cave collapsing. Collapse modes are established based on the revealed collapse mechanism, morphology and damage zone of simulated karst caves of different filling types and the possibility of seismic prediction is also explored based on the seismic reflection characteristics of the collapsed karst caves during the tests. The results demonstrate the effectiveness of using physical model test to analyze the karst cave collapsing in deep carbonate reservoirs under in-situ stress in the Tahe area. Being more visualized and real than traditional methods, the test reveals that compaction and shearing are the main causes of cave collapsing, during which the roof and surrounding rock of the cave sink in, with a shear-slip damage zone of 2 to 3 times larger than the cave diameter. The sand/mud-filled cave is shown to be more stable than the water-filled cave, and the unfilled cave is the least stable. Two cave collapse modes are established: Type I being mainly affected by overlying gravity and type II by shear stress. Their seismic reflections show local differences. If combined properly with colored inversion and GR inversion as well as seismic attribute like

收稿日期: 2021-04-18; 修订日期: 2022-09-19。

第一作者简介: 吕心瑞(1983—), 男, 高级工程师, 油气田开发工程。E-mail: lvxr.syky@sinopec.com。

基金项目: 国家科技重大专项(ZX201605014-002); 中国石化科技攻关项目(P20016, P18043)。

frequency division energy and coherent energy gradient, and etc., the reflection differences can be used to map the two types of collapsed karst caves. The prediction of collapsed karst caves shows a good correspondence with oil well productivity.

Key words: karst cave collapse, physical simulation, collapse mode, collapse prediction, deep carbonate reservoirs, Tahe oilfield

引用格式: 吕心瑞, 邬兴威, 孙建芳, 等. 深层碳酸盐岩储层溶洞垮塌物理模拟及分布预测[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1505-1514. DOI: 10.11743/ogg20220619.

Lyu Xinrui, Wu Xingwei, Sun Jianfang, et al. Physical simulation and distribution prediction of karst cave collapsing in deep carbonate reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1505-1514. DOI: 10.11743/ogg20220619.

中国碳酸盐岩油气勘探开发逐渐走向深层(埋深>4 500 m)和超深层(埋深>6 000 m)领域,先后在塔里木、四川和鄂尔多斯等盆地古老海相碳酸盐岩层取得重大突破,其中岩溶缝洞型储层占据重要地位^[1-3]。塔河油田位于塔里木盆地沙雅隆起上的阿克库勒凸起,奥陶系储层埋深在5 300~6 200 m,是经多期成藏、多期改造形成的典型深层碳酸盐岩缝洞型油气藏,大型古岩溶喀斯特洞穴系统是其主集储空间类型^[4-6]。古岩溶缝洞的充填现象在塔河油田普遍存在,部分区块储层中溶洞70%以上的空间被沉积砂泥和垮塌角砾等物质所充填,其中垮塌角砾约占30%,通过塔河160余口井的测井和地震资料综合解释,表明靠近断层和落水洞的部位垮塌角砾比较发育,原岩为薄层灰岩时也容易形成垮塌角砾,充填及垮塌的存在增强了岩溶缝洞型储层的非均质性,进而对油气产能产生明显影响^[7-9]。生产实践表明,溶洞的垮塌会形成更大范围的角砾及裂缝分布带,进而改善储层的储、渗性能,成为重要油气储集空间,使油井能够获得良好产能^[10]。因此,研究溶洞的垮塌机制、垮塌模式及影响因素,建立深层储层溶洞垮塌体的地震预测方法,揭示垮塌充填分布规律,指导高产井的部署,对于此类油藏的高效开发具有重要意义。

众多学者针对溶洞垮塌开展了研究工作,在垮塌角砾充填特征^[7]、垮塌类型及成因分析^[11-13]、临界垮塌深度^[14-15]、塌陷体结构及预测^[16-18]等方面取得诸多进展。通常储层浅部水平应力大于垂直应力,而深部水平应力小于垂直应力,但这种规律因区域构造、地质条件的不同也会有差异。由于深层碳酸盐岩储层溶洞的特殊性,传统方法在研究其垮塌机制、模式及垮塌后存在状态等方面直观性不够,矿场溶洞垮塌原位实验条件受限且费用昂贵,相比之下地质力学物理模拟试验具有直观、真实的特点,成为研究深部洞室、储气库、巷道等稳定性的重要手段,但在模拟深层溶洞垮塌时面临三维模型不确定性大、高压应力模拟难、

充填特征表征难度大等问题^[19-21]。本文基于三维地质力学试验模拟深层碳酸盐岩溶洞垮塌过程,研究了不同充填特征溶洞的垮塌机制与破坏模式,揭示了垮塌溶洞形态及破坏范围,提出了主要受压实破坏和剪切破坏的两类溶洞垮塌模式,结合不同类型垮塌模式的地震响应特征,建立了以垮塌模式为指导、井-震结合的溶洞垮塌体预测识别方法与流程,明确了塔河中西部典型区两类垮塌体的分布特征,为井位部署和开发调整提供了指导。

1 深层碳酸盐岩溶洞垮塌物理模拟

1.1 相似性设计

按照现代岩溶划分标准,大于20 cm的洞体统称为洞穴。根据油藏多类型资料识别精度,塔河油田深层缝洞型储层中高度大于5 m的洞穴称为大型溶洞,多数通过地震信息可以识别,高度5 m以下的溶洞称为中、小型溶洞,主要利用钻、录、测井等资料进行识别^[22-24]。综合单井、露头、地震、动态等信息,多维互动识别描述,塔河油田溶洞主要有地下暗河管道系统、厅堂洞、断控溶洞和落水洞等类型,不同类型的溶洞形态各异,尺度差异大。其中,地下暗河系统相对较连续,规模较大,呈管道状分布,结构复杂,直径在2.0~10.0 m;厅堂型溶洞呈近圆或城门型,直径大于10.0 m,高度大于5.0 m,底部多有垮塌角砾充填;断控型溶洞分布受断裂控制,呈不规则长方体型,主体高度在0.2~10.0 m,多充填方解石或砂泥;落水洞呈不规则多边体型,大多分布在负地形内的汇水区^[22,25]。

根据溶洞实际特征抽象原型模型,基于相似性原理建立物理试验模型,试验模型与溶洞原型是两个相似系统,因此可利用试验模型模拟地下溶洞垮塌过程,为垮塌机制和模式的研究提供依据。按照相似理论定义相似系数 C_i 为溶洞原型 p 与试验模型 m 的比值,即:

$$C_i = \frac{i_p}{i_m} \quad (1)$$

式中: C 为相似比例系数,无量纲;定义变量 i 可以表示长度(L),m;重度(γ), N/m^3 ;应力(σ),Pa;应变(ε),无量纲;位移(δ),m;弹性模量(E),Pa;泊松比(μ),无量纲;摩擦系数(f),无量纲;或摩擦角(φ), $^\circ$ 等参数。

根据相似性原则,必须满足以下准则^[26]:

$$C_\sigma = C_r C_L \quad (2)$$

$$C_\delta = C_\varepsilon C_L \quad (3)$$

$$C_\sigma = C_\varepsilon C_E \quad (4)$$

$$C_\varepsilon = C_f = C_\varphi = C_\mu = 1 \quad (5)$$

式中: C_σ 为应力相似比,无量纲; C_r 为容重相似比,无量纲; C_L 为几何相似比,无量纲; C_δ 为位移相似比,无量纲; C_ε 为应变相似比,无量纲; C_E 为弹性模量相似比,无量纲; C_f 为摩擦系数相似比,无量纲; C_φ 为摩擦角相似比,无量纲; C_μ 为泊松比相似比,无量纲。

考虑塔河油田深层碳酸盐岩储层溶洞特征及模型制作的可操作性,将溶洞形状简化为圆球型,原型地层模型尺寸假设为:长 $\times$ 宽 $\times$ 高=35 m $\times$ 35 m $\times$ 35 m,模型溶洞直径为5 m。设计几何相似比例尺 $C_L=50$,根据物理模拟相似理论,物理模型尺寸为:长 $\times$ 宽 $\times$ 高=0.7 m $\times$ 0.7 m $\times$ 0.7 m,模型溶洞直径为100 mm。如图1所示,由实际储层应力状况计算出真实三维载荷作用于物理模型(垂直应力 $\sigma_1 \times$ 最大水平主应力 $\sigma_2 \times$ 最小水平主应力 $\sigma_3 = 3.00 \text{ MPa} \times 1.80 \text{ MPa} \times 1.08 \text{ MPa}$)。为了简化物理模型与溶洞原型工程物理参数的换算,尽量满足相似材料容重与碳酸盐岩储层岩体容重相近,选择以铁晶砂胶岩土相似材料为基础,通过改变各组分的含量,来获得符合塔河油田碳酸盐岩原岩及充填物力学性质的相似材料^[26]。

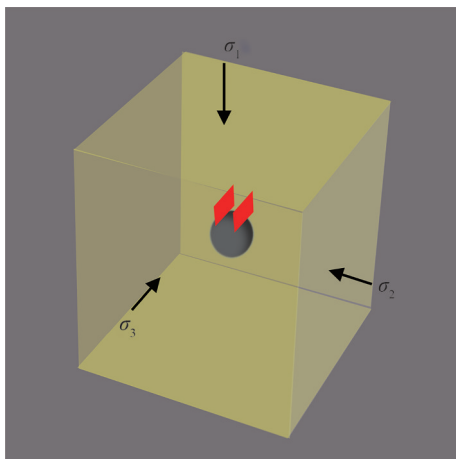


图1 塔河地区典型溶洞概念模型应力加载示意图

Fig. 1 Schematic diagram of conceptual model for stress loading on typical karst caves in the Tahe area

1.2 试验装置及模型制作

试验装置选用智能数控高压真三维加载模型试验系统,包括仿真储层地质力学模型试验台架、液压加载控制装置和数据采集系统,可实现真三维高地应力加载,加荷量值可达63 MPa,稳压性能好,能够满足塔河油田深层溶洞垮塌仿真物理模拟^[27]。图2为物理模拟试验系统内部构成示意图,其中试验台架内部包含由相似材料采用分层压实法制作的地质体及储层溶洞。在实际制作模型体时,首先制作溶洞石蜡体,将液态石蜡注入预制玻璃模具中,从模具正上方中心处竖直插入一根2倍模具高度的中空管,再将钢管与模具的相对位置固定,冷冻后将玻璃模具砸裂并剥除;接着利用相似材料采用分层压实法制作包含溶洞的模型体,用PVC膜将石蜡体包裹并固定在中空管上,并埋入预定位置,填铺相似材料直至完全覆盖石蜡,试验中使用的石蜡也可以用冰或者其他熔点低的物质代替;然后将石蜡体融化,用老虎钳夹住中空管,在其中插入加热棒,加热石蜡融化后抽出,放入导管将融化的石蜡抽出;最后待中空管冷却至常温,将中空管和PVC膜提出,模型内部洞腔形成,若需向洞内填充固体物质,可通过原中空管洞口处添加,若需向洞内填充水,则需要通过空洞上部预留孔把预制的乳胶气囊放入其中,将气囊内充满水并保持内压在0.1 MPa。

1.3 试验方案

根据塔河油田钻井揭示的深层碳酸盐岩储层溶洞实际情况,分别制作含3种不同充填类型球型溶洞的模型,模型1为未充填溶洞,模型2为全充填砂泥溶洞,

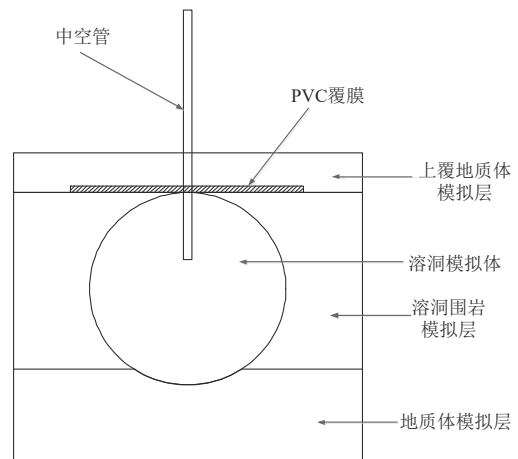


图2 物理模拟试验系统内部储层溶洞构成示意图

Fig. 2 Schematic diagram showing a physical simulation test system with karst caves inside reservoirs

模型3为全充填水溶洞,然后采用高地应力真三维地质力学模型试验系统对含预制溶洞的模型体逐渐进行初始地应力加载,根据相似比例模拟在加里东中、晚期构造应力和自重应力作用下溶洞的垮塌过程。模型试验模拟中采用信息监测系统全程记录3组模型在加载过程中洞周应力和位移变化信息。

为有效观测溶洞加载时的变形与应力变化状况,在模型体典型部位布设了监测点。其中微型多点位移计和微型应变砖用于监测洞周变形,微型压力盒用于监测洞周的应力。如图3所示,每条测线共埋设5个观测点,与洞壁的距离分别为5,50,100,200,300 mm。

2 物理模拟结果分析

2.1 洞周位移变化规律

通过对未充填、全充填砂泥和全充填水3类溶洞试验结果分析,发现在构造应力和自重应力逐渐作用下,未充填溶洞加载到最终荷载的50%时,溶洞顶板

就产生了裂缝并开始垮塌,此时溶洞处于不稳定状态,当加载到最终荷载时溶洞完全垮塌,已处于稳定状态,同时洞顶方向的变形远大于其他方向,说明顶板垮落是溶洞垮塌的重要表现;全充填砂泥溶洞加载到最终荷载的80%时已被压实,顶部变形较大,整体下移,溶洞被压成扁球状,洞周整体变形较小,处于稳定状态;全充填水溶洞当加载到最终荷载的70%后,溶洞形状不再变化,处于稳定状态。

图4为洞周测点径向位移随距洞距离的变化分布曲线,3种类型溶洞模型试验均表现为洞周向洞内收缩,距离洞壁越近,围岩径向位移越大,同一测点的径向位移3种类型相差较大,未充填溶洞的位移远大于充填溶洞,全充填水溶洞的位移大于全充填砂泥溶洞。在1倍洞径范围内围岩位移受加载影响变化显著,超过此范围应力加载对围岩变形的影响逐渐减小,2倍洞径部位仍有一定位移,最终在3倍洞径处位移均趋向于0,表明溶洞的垮塌影响范围在2~3倍洞径。

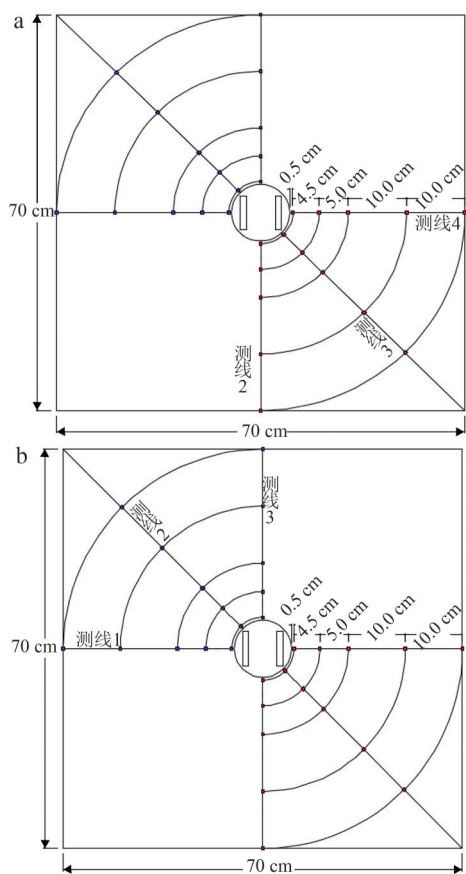


图3 物理模拟试验位移及压力测点布置俯视图

Fig. 3 Top view of displacement and pressure measurement points for the test

a. 位移测点布置图; b. 压力测点布置图

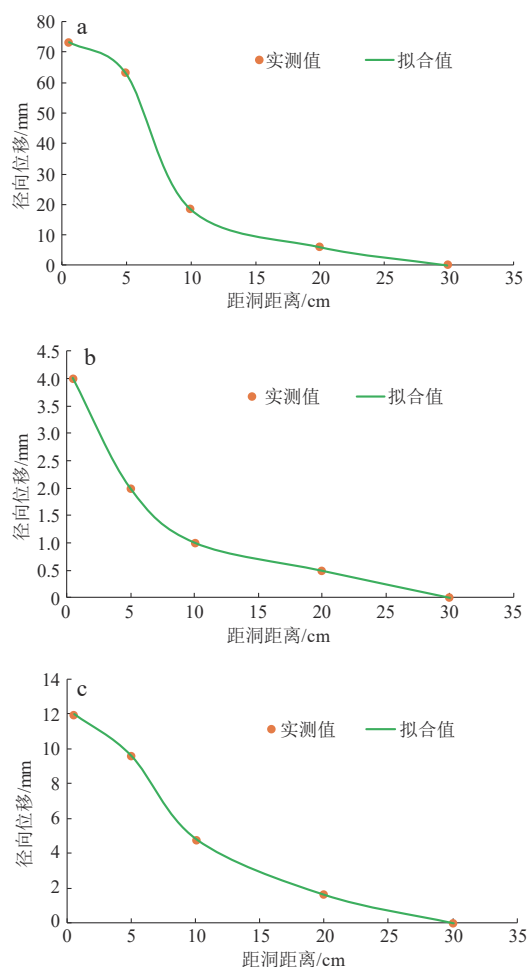


图4 物理模拟试验中洞周径向位移分布规律

Fig. 4 Radial displacement distribution pattern around a karst cave

a. 未充填溶洞; b. 全充填砂泥溶洞; c. 全充填水溶洞

2.2 洞周应力变化规律

通过对未充填、全充填砂泥和全充填水3类溶洞模型试验结果分析,在构造应力和自重应力逐渐作用下,加载后洞壁径向应力释放、切向应力增加,随距洞壁距离增加,围岩应力逐渐趋向原始应力,其中2倍洞径范围内围岩应力变化明显。

图5为不同测线径向及切向应力随距洞距离的变化曲线。对于未充填溶洞,围岩径向应力产生应力释放,距洞壁越近径向应力越小,随着与洞壁距离的变大,围岩切向应力发生应力集中,随着与洞壁距离由近及远呈现先增加后减小的趋势,最终均趋向于原岩应力,在围岩深处形成了范围更远的压力拱,可见围岩应力向围岩深部发生了应力转移;对于全充填砂泥溶洞,随加载应力的增大,同一测线上各测点间应力增大速率无明显差异,表明溶洞处于稳定状态,内部的砂泥已被压实,能

够完全传递力的作用,在加载过程中,溶洞产生微小变形的同时,应力会部分释放,距离洞壁越近,应力释放越大,径向应力越小,洞周切向应力产生应力集中,随距洞壁距离增大逐渐减小,最终趋于原岩应力;对于全充填水溶洞,在加载过程中,洞周应力会部分释放,距离洞壁越近,径向应力越小,洞周切向应力产生应力集中,随距洞壁距离增大逐渐减小,最终趋于原岩应力。

2.3 溶洞垮塌模式

将完成垮塌试验的未充填溶洞模型切割打开,观测如图6所示溶洞垮塌后的具体情形。通过对试验前后模型进行对比,发现溶洞顶板产生了整体下沉,垮塌后的溶洞顶板呈M形,溶洞下半部呈扁球状,这是由于随上覆重力加大,溶洞顶板承受能力固定,更易产生重力主控的垮塌破坏。溶洞下半部周边出现剪切滑移破坏线,两簇破裂带在洞底周围相交彼此切割,这是由于

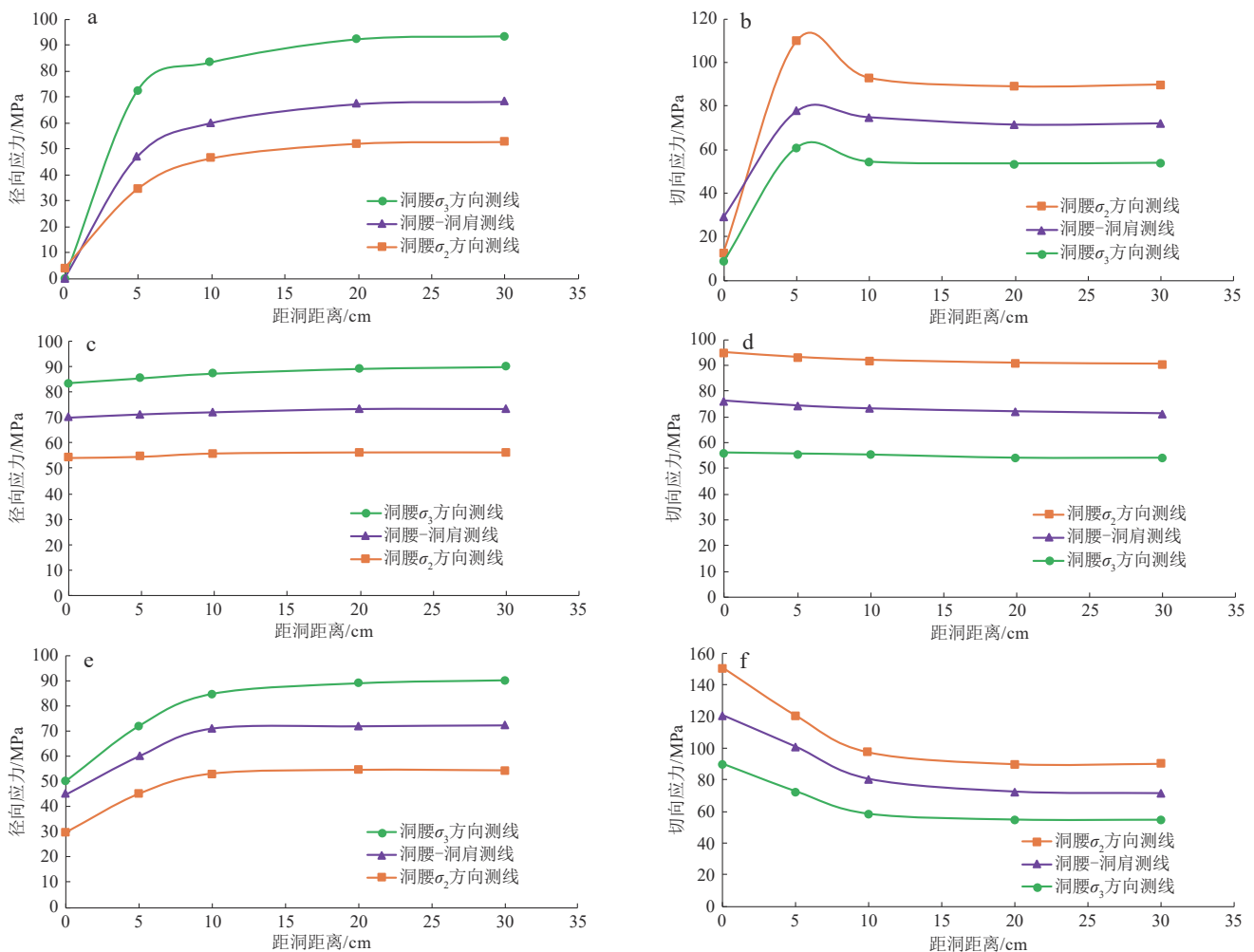


图5 物理模拟试验中不同测线径向及切向应力随距洞距离变化曲线

Fig. 5 Radial and tangential stress variation curves with distance from the karst cave for different measurement lines

- a. 未充填溶洞径向应力; b. 未充填溶洞切向应力; c. 全充填砂泥溶洞径向应力; d. 全充填砂泥溶洞切向应力; e. 全充填水溶洞径向应力; f. 全充填水溶洞切向应力

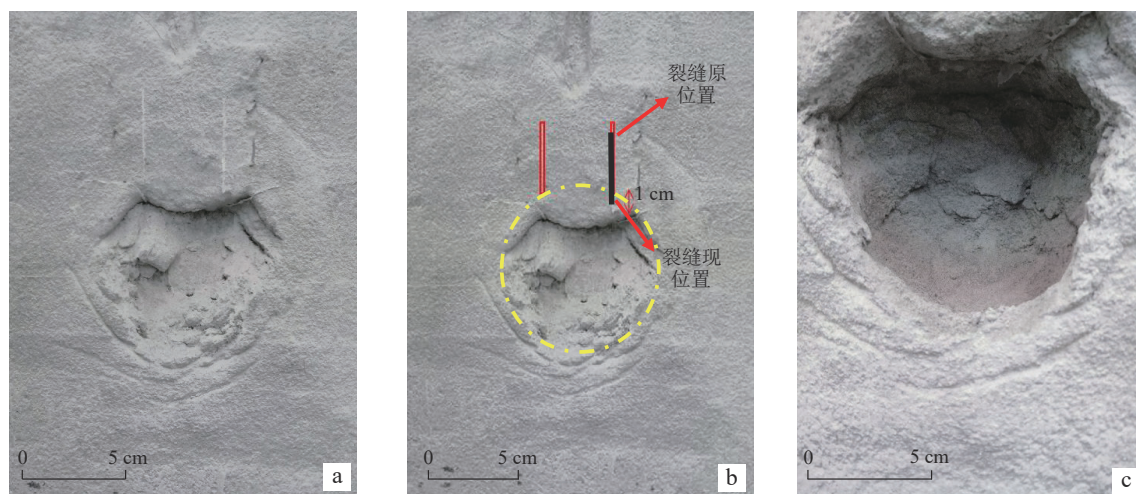


图6 物理模拟试验中未充填溶洞模型试验完毕剖开垮塌结果

Fig. 6 Dissection of an unfilled cave after collapsing simulation test

a. 模型剖开图; b. 试验前、后缝洞结合部位对比; c. 清渣后残余洞腔

随剪切应力的加大,溶洞周边岩体松动破裂,部分掉落至洞底,并出现环绕洞壁的劈裂破坏带。清理后的空腔内部洞壁出现大量裂缝和松动破裂带,距洞壁2倍洞径外仍隐约可见细微裂纹。切割观测出现的现象与试验过程中通过检测元件得到的数据结果基本吻合。

根据物理试验揭示的垮塌机制、洞周位移及应力变化特征,结合物理试验模型剖切结果,分析溶洞垮塌原因主要是上覆地层重力和构造剪切应力造成周围地层受力失稳所致,结合前人研究^[10-12,16],建立了塔河油田2类深层溶洞垮塌模式。Ⅰ类溶洞垮塌主要受上覆地层重力作用影响,当溶洞顶板之上负载作用超出顶板岩石抗压强度时,溶洞就会出现变形垮塌,上覆地层下凹,大量的顶部角砾掉落洞底形成充填,受垮塌作用及剪切应力影响溶洞周边会产生裂缝,形成灰岩裂缝带,宽度约2~3倍洞径,裂缝密度自洞壁向外逐渐减

小,建立图7a所示Ⅰ类溶洞垮塌体模式。Ⅱ类溶洞垮塌主要受构造剪切应力作用影响,构造运动导致溶洞受力不平衡,溶洞周边断层及伴生裂缝数量规模不断增加,围岩抗压强度降低导致溶洞形成张性垮塌,顶部及边缘角砾均出现掉落形成充填,溶洞周边也会产生大量裂缝,形成微裂缝发育区,垮塌系统体积扩大,宽度2~3倍洞径,建立图7b所示的Ⅱ类溶洞垮塌体模式。

3 不同类型溶洞垮塌体预测方法

以塔河中西部典型区奥陶系油藏溶洞垮塌体分布预测为例,根据不同类型垮塌模式的地震响应特征,选取典型井进行精细井震标定,确定溶洞垮塌体识别模式,建立两类典型溶洞垮塌体的预测方法和流程。

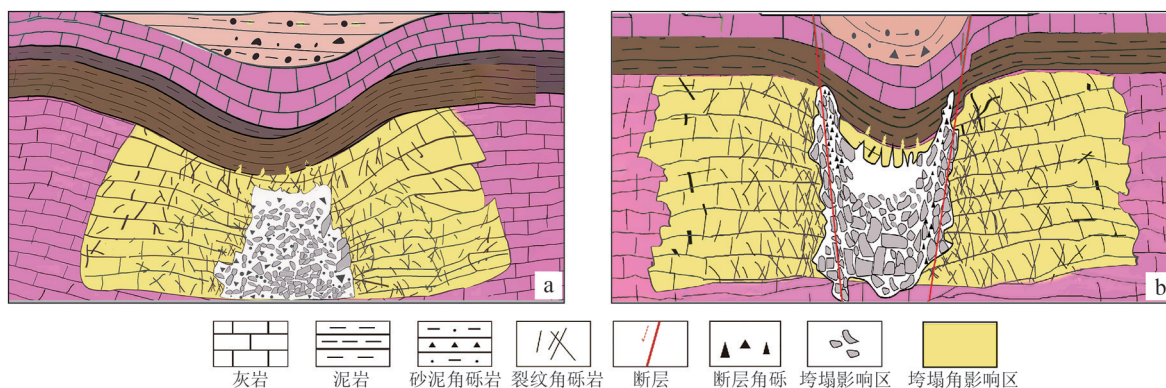


图7 两种类型溶洞垮塌体模式

Fig. 7 Two karst cave collapsing modes

a. 受上覆重力影响的Ⅰ类溶洞垮塌体模式; b. 受剪切应力影响的Ⅱ类溶洞垮塌体模式

3.1 地震响应特征

研究区Ⅰ类溶洞垮塌断开层位主要为巴楚组及其以下地层,由于岩溶洞穴上覆地层上奥陶统和石炭系沉积后,重力负载作用超过古溶洞系统的支撑能力,造成溶洞的垮塌,伴随洞穴周缘产生裂隙角砾岩和洞底角砾岩堆积物。塌陷体上部石炭系厚度增大,总体上奥陶系岩溶古地貌呈下凹状。结合前人地震正演模拟研究结果表明:溶洞垮塌体及上覆地层地震同相轴出现“下凹”,并存在缺失现象;垮塌体内部会出现多组强“串珠”状反射或大片杂乱反射特征;垮塌体与围岩边界较为清晰,多以同相轴扰动或“串珠”状反射为界^[16,18]。而Ⅱ类溶洞垮塌断开层位较新,一般终止于卡拉沙依组以上地层,由于海西运动早期南北向挤压

形成北北东-南南西向和北北西-南南东向压扭断裂,断裂作用和岩溶作用增加了溶洞周边裂缝数量,导致了部分缝洞系统的张性垮塌;海西运动晚期构造运动促使沿断裂带发育的溶洞系统在石炭系负载和断裂联合作用下,形成沿断裂带的局部垮塌。地震反射特征主要为:T₄界面出现明显错断,大型断裂附近溶洞是垮塌产生有利地带;垮塌体内部同样具有多组“串珠”状反射或大片杂乱反射特征;垮塌体周围和内部存在比较复杂的断裂系统,通常也会以同相轴错断或强“串珠”反射为边界^[10,18]。

3.2 I 类溶洞垮塌体预测

根据 I 类溶洞垮塌体的发育模式,研究区储层上覆石炭系增厚、奥陶系顶面 T₄ 强反射界面明显具有下凹的

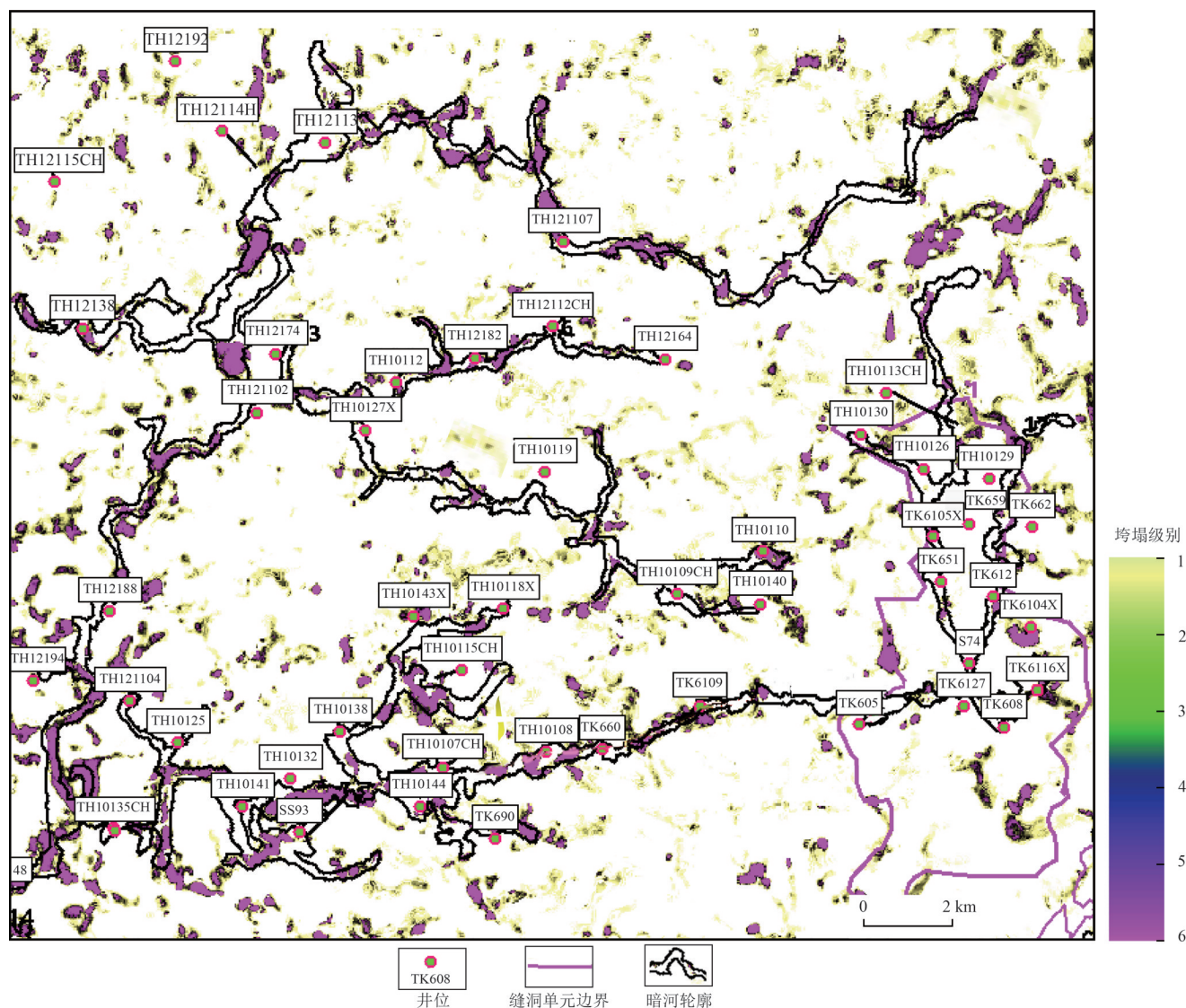


图8 塔河中西部典型区 I 类溶洞垮塌体平面分布

Fig. 8 Plan view of a type I collapsed karst cave in the typical block of midwestern Tahe area

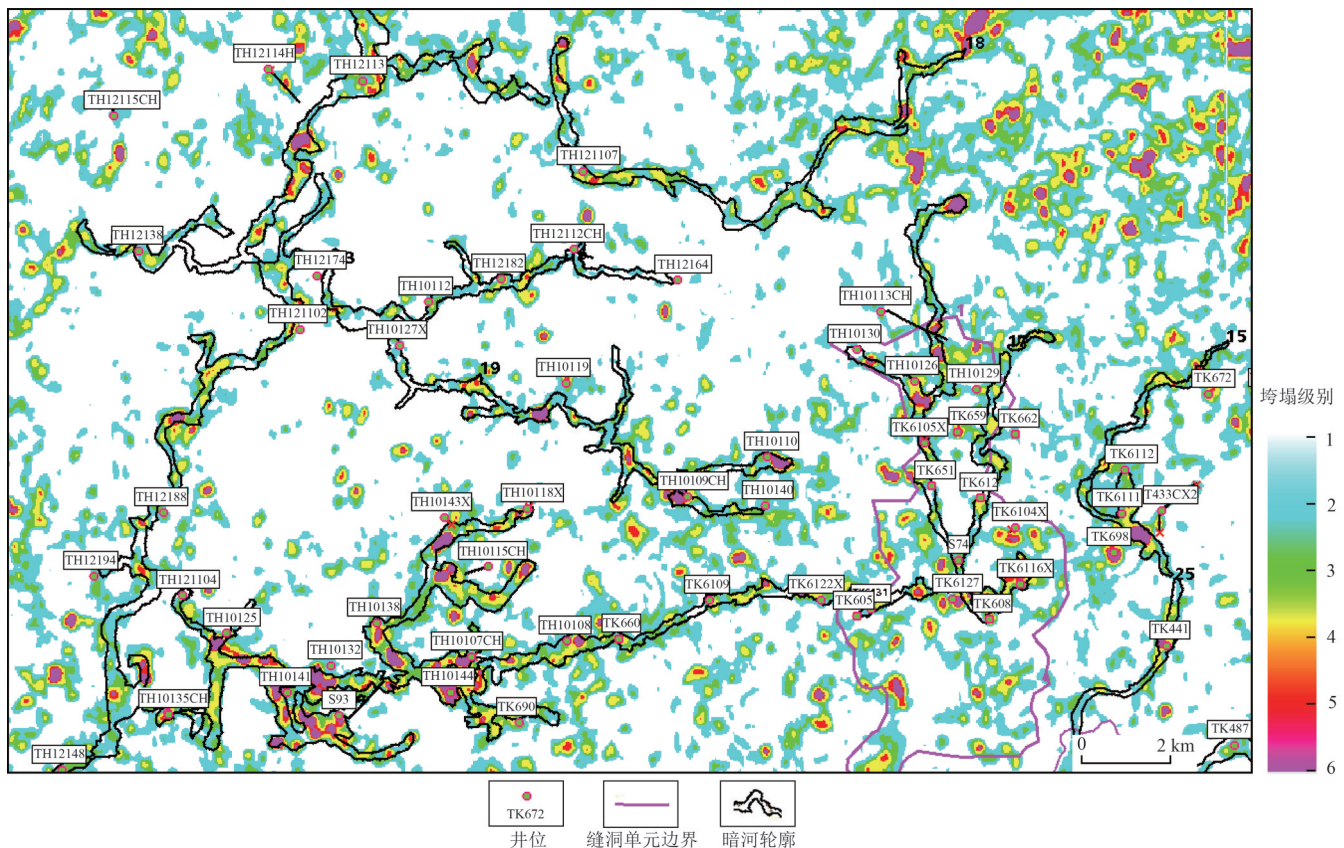
特征,据此判别 I 类溶洞垮塌发育区,利用钻遇此类垮塌溶洞的典型井测井解释结果,井-震结合建立其识别方法与流程。首先,根据地震有色反演属性预测顶面低洼地形处的储集体展布特征;其次,利用地震 AVF(振幅随频率的变化关系)反演属性预测充填程度,明确溶洞垮塌区的展布范围;最后,利用 T_4 趋势面约束 AVF 反演数据确定垮塌范围内的有利区域。由于 I 类溶洞塌陷区泥质充填成分较多,利用 GR 泥质充填反演方法结合地形洼地分布特征,实现了奥陶系顶面负地形内 I 类溶洞垮塌体展布预测。

图 8 为利用上述技术方法及流程,对塔河中西部典型区 I 类溶洞垮塌体分布的预测结果图。该区整体上存在较多 I 类溶洞垮塌体,且区内暗河系统较发育,在河道发育段该类型溶洞垮塌体大量分布,这是由于长期的水流冲刷,使得暗河系统规模扩大,顶板宽度逐渐变大,上覆重力作用增强,易导致溶洞垮塌,造成垮塌角砾充填。同时,由于水流的机械搬运作用,使得 I 类溶洞垮塌体内砂泥充填也较为严重,有效储集空间少,钻遇该类垮塌体的井多为低产、低效油井,日产油多低于 15 t,能量不充足,无水生产期短,生产过程中呈间歇式或波动式含水。

3.3 II 类溶洞垮塌体预测

根据 II 类溶洞垮塌体的发育模式,研究区该类型垮塌多是在早期洞穴基础上受构造剪切力作用形成,多集中在厅堂洞等处,规模较大,主要受控于奥陶系发育的二级断裂,多期构造断裂活动会导致溶洞垮塌,垮塌体内充填角砾、砂泥,储层物性非均质性强,为较好勘探开发目标。井-震结合对 II 类溶洞垮塌体进行识别,采用地震有色反演属性预测洞穴内部岩性及厚度变化,结合分频能量确定构造垮塌体发育位置,利用相干能量梯度对能量差异变化的敏感性,预测垮塌体边界和轮廓,最后进一步对相干能量梯度进行求导得到能量曲率体,用来预测该类型溶洞垮塌体的横向和垂向物性变化趋势。

图 9 为利用上述技术方法及流程,对塔河中西部典型区 II 类溶洞垮塌体分布的预测结果图。该区存在多个 II 类溶洞垮塌体,受暗河系统及断裂发育的影响,该类型垮塌体在不同溶洞区发育程度不一,暗河交汇处和断裂交汇处在是该类型垮塌体的集中发育段。由于其主要受剪切力作用使得围岩剥落,并在洞周产生大量裂缝,大大增强了垮塌体的储渗能力,钻遇 II



类溶洞垮塌体的井多为高效井,日产油多大于25 t,能量较充足,初期油压稳定,自喷生产期大于1年,见水后含水上升较快,油井累计产油量较高。在52口累产 2×10^4 t以上的高产井中,43口与Ⅱ类溶洞塌陷体预测相吻合。

4 结论

1) 可融体成型后易融的特性满足了物理模拟中溶洞预制的需求,装置加荷量值最大可达63 MPa,该物理试验方法及流程适用于深层碳酸盐岩溶洞垮塌的模拟,弥补了传统方法在直观、真实性方面的不足。

2) 物理模拟揭示了溶洞垮塌机制主要为压实破坏和剪切破坏,溶洞顶板变形垮落,洞壁岩体挤压剥落,形成角砾充填,洞周边出现剪切滑移破坏带,裂纹明显,范围为2~3倍洞径;砂泥充填溶洞稳定性大于水充填溶洞稳定性,未充填溶洞稳定性最差,垮塌影响范围相近。

3) 基于物理模拟结果建立了两类溶洞垮塌模式,二者主控因素不同,Ⅰ类溶洞垮塌模式主要受重力影响,Ⅱ类溶洞垮塌模式主要受剪切应力影响,在实际油藏中均有存在,部分成为良好储层。

4) 两类溶洞垮塌体地震反射特征存在局部差异,根据垮塌体的地震反射特征,综合有色反演、分频能量、GR反演及相干能量梯度等属性能够实现2类垮塌体的预测,塔河中西部典型区综合预测结果与油井产能具有较好对应关系。

参 考 文 献

- [1] 何治亮,马永生,朱东亚,等. 深层-超深层碳酸盐岩储层理论技术进展与攻关方向[J]. 石油与天然气地质,2021,42(3): 533-546.
He Zhiliang, Ma Yongsheng, Zhu Dongya, et al. Theoretical and technological progress and research direction of deep and ultra-deep carbonate reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(3): 533-546.
- [2] 庞雄奇,林会喜,郑定业,等. 中国深层和超深层碳酸盐岩油气藏形成分布的基本特征与动力机制及发展方向[J]. 地质力学学报,2020,26(5):673-695.
Pang Xiongqi, Lin Huixi, Zheng Dingye, et al. Basic characteristics, dynamic mechanism and development direction of the formation and distribution of deep and ultra-deep carbonate reservoirs in China[J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(5): 673-695.
- [3] 马永生,黎茂稳,蔡勋育,等. 海相深层油气富集机理与关键工程技术基础研究进展[J]. 石油实验地质,2021,43(5): 737-748.
Ma Yongsheng, Li Maowen, Cai Xunyu, et al. Advances in basic research on the mechanism of deep marine hydrocarbon enrichment and key exploitation technologies [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(5): 737-748.
- [4] 窦之林. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏开发技术[M]. 北京: 石油工业出版社,2012:1-20.
Dou Zhilin. Development technology of carbonate fractured-vuggy reservoir in Tahe Oilfield[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012: 1-20.
- [5] 张希明,杨坚,杨秋来,等. 塔河缝洞型碳酸盐岩油藏描述及储量评估技术[J]. 石油学报,2004,25(1):14-18.
Zhang Ximing, Yang Jian, Yang Qiulai et al. Reservoir description and reserves estimation technique for fracture-cave type carbonate reservoir in Tahe Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(1): 14-18.
- [6] 吕心瑞,李红凯,魏荷花,等. 碳酸盐岩储层多尺度缝洞体分类表征—以塔河油田S80单元奥陶系油藏为例[J]. 石油与天然气地质,2017,38(4): 813-821.
Lyu Xinrui, Li Hongkai, Wei Hehua, et al. Classification and characterization method for multi-scale fractured-vuggy reservoir zones in carbonate reservoirs: An example from Ordovician reservoirs in Tahe oilfield S80 unit[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 813-821.
- [7] 金强,田飞,鲁新便,等. 塔河油田奥陶系古径流岩溶带垮塌充填特征[J]. 石油与天然气地质,2015,36(5):729-735.
Jin Qiang, Tian Fei, Lu Xinbian, et al. Characteristics of collapse breccias filling in caves of runoff zone in the Ordovician karst in Tahe oilfield, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(5): 729-735.
- [8] 胡文革. 塔里木盆地塔河油田潜山区古岩溶缝洞类型及其改造作用[J]. 石油与天然气地质,2022,43(1):43-53.
Hu Wenge. Paleokarst fractured-cavity types and their reconstruction in buried hill area, Tahe oilfield, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1):43-53.
- [9] 金强,田飞. 塔河油田岩溶型碳酸盐岩缝洞结构研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2013,37(5):15-21.
Jin Qiang, Tian Fei. A study on constructions of fracture-cave in karst carbonates in Tahe Oilfield[J]. Journal of China University of Petroleum(Natural Science Edition), 2013, 37(5): 15-21.
- [10] 李新华,康志宏,刘洁,等. 塔河油田奥陶系岩溶塌陷体结构识别及成因分析[J]. 现代地质,2021,35(6):1830-1843.
Li Xinhua, Kang Zhihong, Liu Jie, et al. Characteristics identification and formation of Ordovician karst collapse reservoir structure in Tahe Oilfield[J]. Geoscience, 2021, 35(6): 1830-1843.
- [11] Loucks R G. Paleocave carbonate reservoirs: Origins, burial-depth modifications, spatial complexity, and reservoir implications [J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(11): 1795-1834.
- [12] 王建峰,邓光校,李涛,等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩古岩溶塌陷体特征及成因[J]. 新疆石油地质,2017,38(4):385-391.
Wang Jianfeng, Deng Guangxiao, Li Tao, et al. Characteristics and genesis of paleo-karst collapses in Ordovician carbonate rocks, Tahe

- Oilfield[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2017, 38(4): 385-391.
- [13] 丁晓琪,张哨楠,潘怀孝,等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田奥陶系“垮塌”型岩溶储层发育规律[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2): 210-217.
- Ding Xiaoqi, Zhang Shaonan, Pan Huaixiao, et al. Development patterns of collapse-type karst reservoirs in the Ordovician of Daniudi gasfield, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 210-217.
- [14] 郑兴平,沈安江,寿建峰,等. 埋藏岩溶洞穴垮塌应力的空间变化图版及其在碳酸盐岩缝洞型储层地质评价预测中的意义[J]. 海相油气地质, 2009, 14(4): 55-59.
- Zheng Xingping, Shen Anjiang, Shou Jianfeng, et al. A quantitative plate of collapsed karst cave depth and its application in geological prediction and evaluation of carbonate reservoir[J]. Marine Oil and Gas Geology, 2009, 14(4): 55-59.
- [15] 王超,张强勇,刘中春,等. 缝洞型油藏溶洞临界垮塌深度预测模型及其应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(1): 103-110.
- Wang Chao, Zhang Qiangyong, Liu Zhongchun, et al. A prediction model for collapse of karst caves in fractured-vuggy oil reservoirs and its application[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(1): 103-110.
- [16] 康志宏,鲁新便,唐湘蓉,等. 塔里木盆地奥陶系古洞穴垮塌体地震反射结构与识别[J]. 新疆地质, 2014, 32(4): 540-545.
- Kang Zhihong, Lu Xinbian, Tang Xiangrong, et al. Recognition and seismic reflection structure of Ordovician paleocave collapse in Tahe Oilfield[J]. Xinjiang Geology, 2014, 32(4): 540-545.
- [17] João A, David L C, Thales E S J, et al. Characterization of collapsed paleocave systems using GPR attributes[J]. Journal of Applied Geophysics, 2014, 103: 43-56.
- [18] 杨瑞召,金圣林,杨敏,等. 塔里木盆地塔河油田不同岩溶塌陷类型地震响应特征与识别[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(3): 391-396.
- Yang Ruizhao, Jin Shenglin, Yang Min, et al. Seismic response characteristics and identification of different types of karst collapse in Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(3): 391-396.
- [19] 戴永浩,陈卫忠,杨春和,等. 金坛盐岩储气库运营模型试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3574-3580.
- Dai Yonghao, Chen Weizhong, Yang Chunhe, et al. A study of model test of Jintan rocks salt gas storage's operation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3574-3580.
- [20] 段抗,张强勇,向文,等. 盐岩地下储气库注采气套管运行安全的物理模型试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1605-1612.
- Duan Kang, Zhang Qiangyong, Xiang Wen, et al. Physical model test on operational safety of injection and recovery casing of underground salt rock gas storages[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1605-1612.
- [21] 陈旭光,张强勇,刘德军,等. 高地应力深部巷道开挖锚固特性的三维地质力学模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(9): 107-113.
- Chen Xuguang, Zhang Qiangyong, Liu Dejun, et al. A 3D geomechanics model test study of the anchoring character for deep tunnel excavations[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(9): 107-113.
- [22] 夏日元,邹胜章,梁彬,等. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩缝洞系统模式及成因研究[M]. 北京:地质出版社, 2011, 47-62.
- Xia Riyuan, Zou Shengzhang, Liang Bin, et al. Study on the patterns and forming mechanism of fracture-cavity systems in Ordovician carbonate, Tarim Basin[M]. Beijing: Geological Publishing Press, 2011, 47-62.
- [23] 吕心瑞,孙建芳,邬兴威,等. 缝洞型碳酸盐岩油藏储层结构表征方法—以塔里木盆地塔河S67单元奥陶系油藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(3): 728-737.
- Lyu Xinrui, Sun Jianfang, Wu Xingwei, et al. Internal architecture characterization of fractured-vuggy carbonate reservoirs: A case study on the Ordovician reservoirs, Tahe Unit S67, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(3): 728-737.
- [24] 李阳,李永强,侯加根. 碳酸盐岩缝洞型储集体特征及分类分级地质建模[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 600-606.
- Li Yang, Li Yongqiang, Hou Jiagen. Features and hierarchical modeling of carbonate fracture-cavity reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4): 600-606.
- [25] Zeng H, Loucks R, Janson X, et al. Three-dimensional seismic geomorphology and analysis of the Ordovician paleokarst drainage system in the central Tabei Uplift, northern Tarim Basin western China[J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12): 2061-2083.
- [26] 张强勇,李术才,郭小红,等. 铁晶砂胶结新型岩土相似材料的研制及其应用[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2126-2130.
- Zhang Qiangyong, Li Shucai, Guo Xiaohong, et al. Research and development of new typed cementitious geotechnical similar material for iron crystal sand and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(8): 2126-2130.
- [27] 张强勇,向文,张岳,等. 超高压智能数控真三维加载模型试验系统的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(8): 1628-1637.
- Zhang Qiangyong, Xiang Wen, Zhang Yue, et al. Development and application of ultra high pressure 3D loading model test system with intelligent numerical control function[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(8): 1628-1637.

(编辑 张亚雄)