

文章编号:1672-9854(2009)-04-0055-05

## 埋藏岩溶洞穴垮塌深度定量图版及其在碳酸盐岩缝洞型储层地质评价预测中的意义

郑兴平<sup>1,3</sup>, 沈安江<sup>1,3</sup>, 寿建峰<sup>1,3</sup>, 潘文庆<sup>2</sup>

(1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国石油塔里木油田分公司; 3 中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室)



郑兴平

**摘要** 通过对岩溶洞穴垮塌的岩石力学原理及塔里木盆地奥陶系实钻资料的分析,基本明确了洞穴埋藏垮塌的控制因素是岩石抗弯强度、洞穴尺度、洞穴距风化暴露面的距离等,并得到了洞穴垮塌深度的定量图版。该图版对于钻前预测现今埋藏于地下的碳酸盐岩洞穴是否已经垮塌、洞穴埋藏演化史精确恢复以及对裂缝—洞穴型储层的评价预测具有较强的实践意义。

**关键词** 塔里木盆地; 碳酸盐岩储层; 岩溶洞穴; 垮塌深度; 定量计算; 储层预测

**中图分类号**: TE112.23 **文献标识码**: A

**郑兴平** 1971年生,高级工程师,1996年硕士研究生毕业于石油大学(北京)。通讯地址:310023 浙江省杭州市西溪路920号;电话:(0571)85224940

表生岩溶造成的大尺度(0.5~100 m以上)洞穴是碳酸盐岩地层中的显著特征,盆地内洞穴在地震资料上也具有较强的振幅异常响应。作为油气勘探的重要对象之一,岩溶洞穴在现今盆地埋藏条件下是否为有效储集空间的研究是非常重要的。受到垮塌围岩角砾充填、异源泥沙充填、方解石胶结等破坏性作用影响,洞穴并非全部可保存如地表所见的大型空洞。判断洞穴内部及其周围是否发育储层的一个关键问题是埋藏载荷下的垮塌作用,这是本文论述的重点。

前人在岩溶洞穴三维构型、埋藏演化史概念模型及洞穴内部沉积物构成等方面取得了大量认识<sup>[1]</sup>。而关于碳酸盐岩洞穴在埋藏载荷条件下垮塌深度的定量认识目前仍比较模糊,主要依赖大量统计得出垮塌深度的大致范围,例如5 000~9 000 ft(约1 500~2 700 m)的浅—中埋深条件<sup>[2]</sup>。这些统计认识与许多勘探实践相矛盾,特别是塔里木盆地奥陶系大量探井放空的有效洞穴可保存至4 000~7 000 m(13 000~23 000 ft)埋深。

本文试图从岩石力学原理上分析洞穴垮塌的机

理和控制因素问题,解释深埋藏条件下可保存有效洞穴储层的原因,并对定量评价和预测盆地内大量碳酸盐岩洞穴的储集条件作一个初步的尝试。

### 1 岩溶洞穴在埋藏载荷下垮塌的岩石力学原理

如图1所示,在碳酸盐岩地层中发育了一个表生岩溶作用形成的洞穴。为简化计算,假设该洞穴的横截面为正方形,尺度大小为 $L \times L$ ,垂向上与形成洞穴的风化暴露面距离为 $h$ 。当上覆地层继续沉积,埋藏载荷 $F$ 加大,直到某一深度载荷超过洞穴围岩的抗弯强度 $R$ ,洞顶周围大量发育张性裂缝,岩石变形失去稳定性,岩块崩落到洞穴中,崩落的这个距离设为 $H$ 垮塌。

根据岩石物理力学原理,岩石的抗弯强度计算式<sup>[3]</sup>为:

$$R = \frac{3FL}{2bh^2} \quad \text{即: } R = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (1)$$

式中  $R$ ——地层岩石的抗弯强度,MPa;

收稿日期:2009-08-30

本文为国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发专项”成果(合同编号 2008ZX05004-002)、中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“海相碳酸盐岩大油气田勘探开发关键技术”及中国石油天然气集团公司“碳酸盐岩储层重点实验室”科研成果之一

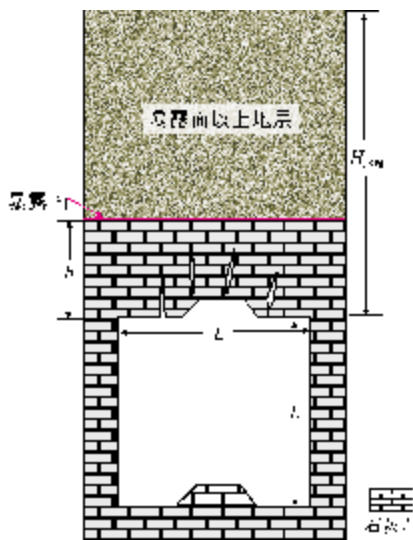


图1 洞穴尺度、与暴露面距离和埋藏深度关系示意图

- F——上覆地层载荷,N;  
L——洞穴高度或跨距,m;  
b——洞穴z轴向宽度(计算中可忽略),m;  
h——洞穴顶部至暴露面距离,m。

抗弯强度系数R是可查到或可试验的已知数据(石灰岩的平均抗弯强度 $R_{\text{石灰岩}} \approx 5\text{MPa}$ ,白云岩的平均抗弯强度 $R_{\text{白云岩}} \approx 8.5\text{MPa}$ )<sup>[3-5]</sup>,待求解的是与地层载荷F有关的埋藏深度。可以推导出以下公式(推导过程中b被抵消,另要考虑地下水承担了部分埋藏载荷):

$$H_{\text{垮塌}} = \frac{2Rh^2}{3L(\rho_{\text{岩}} - \rho_{\text{水}})} \quad \text{即: } H_{\text{垮塌}} = \frac{2Rh^2}{3L^2(\rho_{\text{岩}} - \rho_{\text{水}})} \quad (2)$$

式中  $H_{\text{垮塌}}$  ——埋藏载荷下洞穴岩块垮塌距离,m;

$\rho_{\text{岩}}$  ——地层岩石密度,  $\approx 2500\text{kg/m}^3$ ;

$\rho_{\text{水}}$  ——地层水密度,  $\approx 1000\text{kg/m}^3$ 。

代入上述  $\rho_{\text{岩}}$  和  $\rho_{\text{水}}$  值,简化得到以下埋藏载荷下洞穴垮塌距离计算式:

$$H_{\text{垮塌}} \approx 44.4R \left( \frac{h}{L} \right)^2 \quad (3)$$

此公式表明洞穴的埋藏垮塌深度受控于洞穴围岩的抗弯强度(R)、洞穴尺度( $L^2$ )及洞穴与风化暴露面的距离( $h^2$ )三个主要因素。简而言之,围岩强度愈大、洞穴尺度愈小、洞穴距风化暴露面愈深,则洞穴愈难垮塌,反之则容易垮塌。

根据以上公式,将井的洞穴投点到暴露面距离(h)/洞穴尺度(L)与埋藏深度的二维坐标上(其中h/L值取对数坐标),得到石灰岩洞穴初始垮塌埋藏深度

线。将实钻资料投点到二维坐标上,位于初始垮塌线左上侧的为未垮塌区,位于右下侧的为垮塌区,即得到洞穴垮塌深度定量图版(图2)。

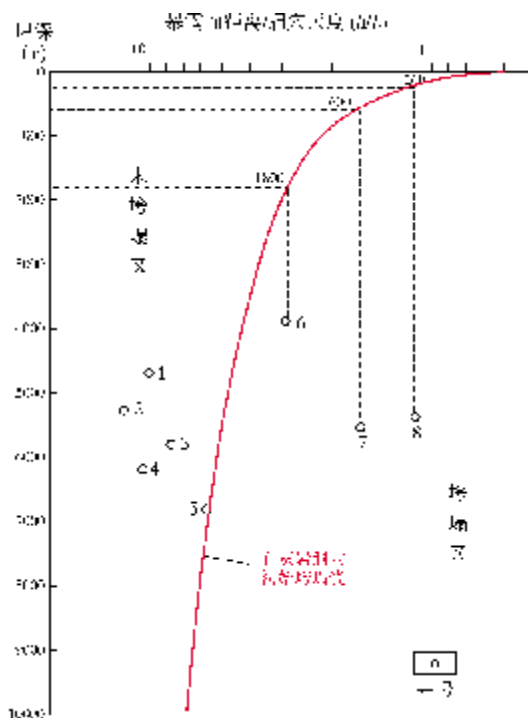


图2 埋藏载荷下石灰岩洞穴垮塌深度定量图版

关于h的取值,需要注意,它是指洞穴与形成它的风化暴露面之间的距离。这个垂向距离不能包括风化面之上的各种岩性的厚度,例如砂岩、泥岩、甚至碳酸盐岩,原因是暴露面之下的碳酸盐岩是一套已经成岩的、岩石强度相对均一的地层,而上覆地层各种岩性在暴露面之后刚沉积时未固结,不能作为洞穴的顶板保护层。

## 2 洞穴垮塌深度定量图版的实钻资料验证

随机挑选了塔里木盆地奥陶系石灰岩洞穴发育的8口井,相关参数如表1,投点到洞穴垮塌深度二维坐标定量图版上(图2)。

经实钻岩心观察及成像测井判识,其中5口井的5个洞穴未垮塌,大部分表现为空洞不同程度保存,导致钻井放空,少量被异源泥岩、砂岩、砾岩不同程度充填,或者不同程度胶结。

例如2号井埋深5267m处奥陶系石灰岩中,

表1 塔里木盆地奥陶系部分石灰岩洞穴数据表

井号	h (m)	L (m)	H (m)	备注
1	85	10	4712	未垮塌
2	123	12	5267	未垮塌
3	149	19.5	5811	未垮塌
4	70	9.5	6134	未垮塌
5	82	14	6791	未垮塌
6	19	7	3848	垮塌
7	55	32	5485	垮塌
8	76	71	5280	垮塌

注: h——洞穴顶部至暴露面距离; L——洞穴高度或宽度;  
H<sub>垮塌</sub>——埋藏荷载下洞穴岩块垮塌距离。

发育1个高约12 m的洞穴, 该洞穴距离风化暴露面123 m, 暴露面之上是石炭系碎屑岩, 钻井放空11.67 m。表明该洞穴未垮塌且保存了大部分的表生岩溶储集空间。

另外几口井如1号、4号、5号井情况类似, 未垮塌洞穴不同程度保留了空洞而导致钻井放空, 部分空间被泥沙和亮晶方解石胶结(图3)。



图3 4号井灰岩洞穴中的巨晶方解石胶结物,6 132.05 m

3号井发育19.5 m大洞穴, 尽管被异源的泥沙和角砾充填而没有放空现象, 但其角砾不是围岩的灰岩角砾, 而是上覆地层的碎屑岩砾石(图4), 因此该洞穴仍判识为未垮塌状态。

表1中的3个垮塌洞穴表现为被围岩角砾充填为主, 角砾间泥沙和方解石不同程度胶结, 整体储集空间较差, 局部可以有少量孔洞保存。

例如6号井在风化暴露面之下19 m发育7 m的垮



图4 3号井石灰岩洞穴被碎屑岩泥沙、砾石充填,5 829.6 m

塌洞穴, 充填物以围岩角砾为主, 下部夹少量泥沙, 顶部角砾间被亮晶方解石胶结。图5垮塌角砾与风暴砾屑顶底关系相反, 不能用沉积现象解释。



图5 6号井石灰岩洞穴被围岩角砾、钙质泥沙充填及亮晶方解石胶结,3 920.7 m

7号和8号两口井洞穴尺度大, 距离风暴面近, 在埋藏后遭受了强烈的垮塌, 被围岩角砾等充填(图6)。

上述8个案例投点于洞穴埋藏垮塌深度定量图版, 判识其是否垮塌的结果均与实钻资料相符。

3 洞穴垮塌深度定量图版的应用价值

洞穴埋藏垮塌深度定量图版具有较强的钻前碳



图6 7号井石灰岩洞穴被围岩角砾、钙质泥沙充填,5490.5 m

酸盐岩储层地质预测和评价功能。

(1) 钻前预测洞穴是否垮塌。地质提供探区暴露面层位和区域岩性条件,地震提供洞穴大小及与暴露面距离,将目标洞穴的 $h/L$ 和现今埋深 $H$ 参数投点到图版上,根据其投点位置所在的区域,判断目标洞穴是否垮塌。

如前所述,未垮塌洞穴具有不同程度的空洞保存,并且洞穴充填的异源沉积物也可以发育孔隙,因此储层评价条件比垮塌洞穴整体更优(图7)。

(2) 可以明确已钻井垮塌洞穴埋深的深度和所开始垮塌的年代,可以精确恢复洞穴演化史。将垮塌洞穴投点垂直方向引线,与洞穴初始垮塌线交点处做水平引线,与埋深坐标轴相交,所得到的焦点即是该洞穴开始垮塌的埋藏深度,对应的地层就是开始垮塌的地质时代(图7)。

如图版(图7)计算出8号井大洞穴是在其埋深260 m的早三叠世开始垮塌,7号井大洞穴是在其埋深600 m处晚奥陶世里塔格期后期开始垮塌,而6号井洞穴直到白垩纪埋深1800 m时才垮塌。

(3) 白云岩抗弯强度 $R_{\text{白云岩}}$ 平均为8.5 MPa<sup>[3-5]</sup>,是石灰岩平均抗弯强度( $R_{\text{石灰岩}} \approx 5 \text{ MPa}$ )的1.7倍,因此在其他条件相同的情况下,白云岩洞穴抗垮塌能力

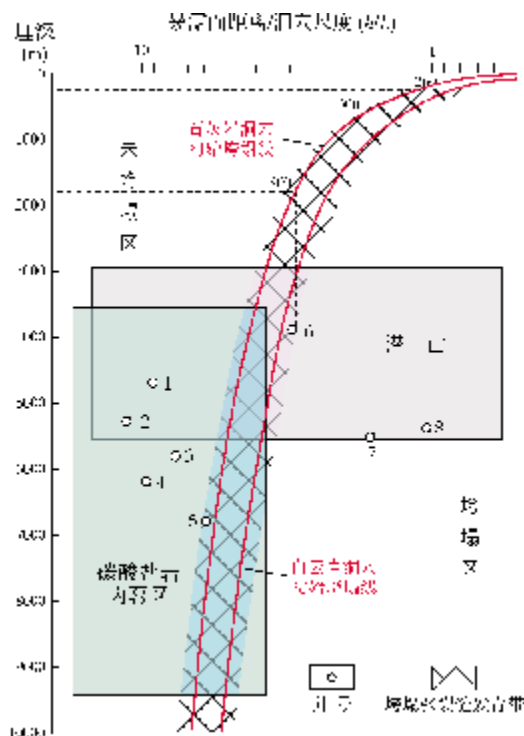


图7 洞穴埋藏垮塌深度定量图版储层评价预测作用示意图

比石灰岩洞穴更强,其埋藏垮塌深度比石灰岩洞穴加深70%,在图版上白云岩洞穴初始垮塌线相对石灰岩垮塌线向右下移动(图7)。

(4) 图7所示,洞穴投点在初始垮塌线附近具有一条崩塌张裂缝发育带,这些裂缝是古埋深接近现今埋藏环境的晚期形成的,大多没有被方解石完全胶结或钙质泥沙充填,也是重要的储集体。如5号井洞穴投点在张裂缝发育带,测井解释在洞穴顶部发育6.5 m裂缝-孔洞型储层。

(5) 碳酸盐岩内幕区一般情况洞穴尺度偏小,根据图版具有比潜山区洞穴保存到更大深度的潜力,这个认识为大规模开展碳酸盐岩内幕缝洞储层勘探提供了依据(图7)。

另外,洞穴埋藏垮塌深度定量图版可以为地球物理缝洞雕刻提供地质背景和基本参数,这里不再展开论述。

## 4 结 论

通过对岩溶洞穴垮塌的岩石力学原理及塔里木盆地奥陶系实钻资料的深入分析,基本明确了洞穴埋藏垮塌的控制因素是岩石抗弯强度、洞穴尺度、洞



穴距风化暴露面的距离等,也说明不存在一个统一的埋藏垮塌深度范围。得出了洞穴埋藏垮塌深度定量图版,基本解决了预测评价洞穴储集条件垮塌、充填、胶结等三个问题中的一个。该图版对于钻前预测现今埋藏于地下的碳酸盐岩洞穴是否已经垮塌、洞穴埋藏演化史得到精确恢复以及裂缝—洞穴型储层的评价预测具有较大的实践意义。

#### 参考文献

- [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] Loucks R G, John A, Jackson K G. Characterizing the three-dimensional architecture of a coalesced,collapsed-paleocave system in lower ordovician carbonates by integrating ground-penetrating radar, shallow-core,and outcrop data: application to potential deep knox reservoirs in mississippi: mississippi geological society[G]// Mississippi Geological Society. Spring symposium on recent activity and trends in the mississippi-alabama oil patch, Mississippi Geological Society,2002.
- [3] 佚名. 中华人民共和国地质矿产部岩石物理力学性质试验规程[M]. 北京:地质出版社,1988.
- [4] 刘佑荣. 岩体力学. 北京:中国地质大学出版社,1999
- [5] 托鲁基安 Y S,贾德 W R,罗伊 R F,等. 岩石与矿物的物理性质[M]. 单家增,李继亮,等,译. 北京:石油工业出版社,1990.

编辑:金顺爱

## A Quantitative Plate of Collapsed Karst Cave Depth and Its Application in Geological Prediction and Evaluation of Carbonate Reservoir

Zheng Xingping, Shen Anjiang, Shou Jianfeng, Pan Wenqing

**Abstract:** Karst caves are the significant feature in carbonate rocks. To determine whether a reservoirs develop or not in and around karstic caves, it is a key to know the existence of buried collapses under overlying load. The principle of rock mechanics for indicates that the buried collapses of karst caves are under control of three key parameters, i.e. the anti-bending strength of rock, the cave scale and the distance of a cave away from the exposed weathering surface. According to this principle, quantitative formulas and a plate of buried collapse depth of karst cave are obtained. Actual drilling data from Ordovician limestone caves in Tarim Basin prove the correctness of this conclusion and the plates of buried collapse depth can be applied in forecasting of collapsed caves present underground, an accurate burial evolution history of caves and evaluation of carbonate fractured-caved reservoirs.

**Key words:** Ordovician; Carbonate reservoir; Karst Caves; Collapsed depth; Quantitative calculation; Reservoir prediction; Tarim Basin

Zheng Xingping: male, Senior Geologist. Add: PetroChina Hangzhou Institute of Geology, 920 Xixi Rd. Hangzhou, 310023 China