

# 南海石炭系潜山储层特征及地震识别<sup>\*</sup>

陈广坡<sup>1,2</sup> 徐国盛<sup>1</sup> 贾义蓉<sup>2</sup> 陈志宏<sup>3</sup>

(1. 成都理工大学 2. 中国石油勘探开发研究院西北分院 3. 中海石油南海西部公司)

陈广坡等. 南海石炭系潜山储层特征及地震识别. 天然气工业, 2007, 27(10): 42-45.

**摘要** 南海某盆地 A 凹陷基底石炭系碳酸盐岩遭受了二叠纪—白垩纪期间漫长地质时期的风化和侵蚀, 发育了大量的优质碳酸盐岩岩溶型储集层。但碳酸盐岩潜山岩溶型储层发育的复杂性, 一直制约着对其进一步的勘探。为此, 通过对岩溶型储集层的划分对比, 认为该区岩溶型储集层可以划分为表层岩溶带、渗流岩溶带和潜流岩溶带; 其储集层主要以溶蚀孔洞、洞穴以及构造裂缝组成, 其中溶蚀孔洞、洞穴是主要的储集空间, 构造裂缝主要起着连通基质孔隙、溶蚀孔洞、洞穴和改善储集层渗滤条件的作用。利用钻井资料对岩溶型储集层进行标定后, 认为表层岩溶带储集层为弱振幅、弱连续(低相干)和低阻抗的特征, 内幕储集层则为短轴状强振幅、高能量和低阻抗的特征, 能够利用地震属性对岩溶型储集层进行识别。

**关键词** 碳酸盐岩 古潜山 储集层 岩溶作用 地震勘探 南海

## 一、引言

南海某盆地 A 凹陷基底主要由石炭系碳酸盐岩组成, 经历了海西—燕山运动期间的多期构造运动, 使石炭系整体抬升, 遭受了二叠纪—白垩纪漫长地质时期的风化和侵蚀, 发育了大量的优质碳酸盐岩岩溶型储集层。

经过多年的勘探, 发现了多个潜山油气藏, 但碳酸盐岩潜山岩溶型储层发育的复杂性, 一直制约着对其进一步的勘探。笔者试图从钻井较多并已经开发的 W 区块入手, 对碳酸盐岩岩溶型储层的特征进行总结分析, 探索一套利用地震资料识别岩溶型储层的技术方法。

## 二、石炭系潜山岩溶的划分和对比

碳酸盐岩潜山的岩溶可划分为表层岩溶带、渗流岩溶带和潜流岩溶带<sup>[1,2]</sup>。笔者根据研究区的岩溶发育特点, 依据钻井过程中的钻井液漏失、钻具放空(图 1)和测井等资料, 并参考国内外岩溶学专家对各岩溶带的研究成果, 对研究区岩溶带进行了划分和对比。

表层岩溶带(风化淋滤岩溶带)主要指潜山顶面

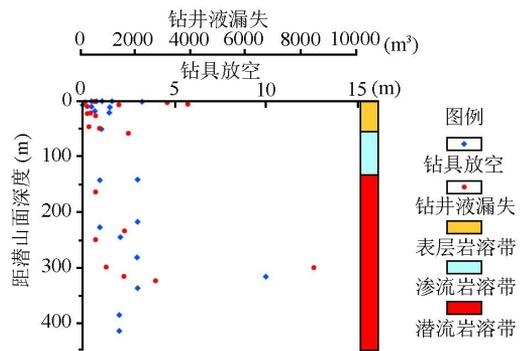


图 1 钻井液漏失、钻具放空井段与潜山顶部关系图

因大气降水淋滤、风化、剥蚀以及砂砾岩的充填等因素形成的岩溶化岩层的最表层部分。它是在石灰岩骨架的基础上发育形成的, 其厚度数米至数十米。表层岩溶带在本区是主要的储集层, 几米至几十米不等。主要由石灰岩、岩溶角砾岩、砂泥岩、风化土等组成, 储集空间主要为众多的溶蚀孔洞、溶蚀裂缝以及砂砾岩粒间孔隙等, 在钻井过程中往往会出现钻井液的大量漏失和钻具放空现象。如 E 井在钻遇此段时漏失钻井液 636 m<sup>3</sup>; F 井在钻遇此段时, 34 m 的井段发生 5 次钻具放空现象, 最大放空量为 4.5 m, 总放空量达 10.5 m (本井为斜井)。在测井

<sup>\*</sup> 本文为中国石油物探应用基础研究重点攻关项目“碳酸盐岩孔洞发育区地球物理识别技术研究”(04A10101)的成果, 并受到中海石油湛江分公司的资助。

**作者简介:** 陈广坡, 1968 年生, 博士研究生, 高级工程师; 从事石油地质综合研究和油藏描述工作。地址: (730020) 甘肃省兰州市雁儿湾路 277 号。电话: (0931) 8686139, 13993140104。E-mail: cgp008@ sina.com

曲线上,表现为自然伽马曲线增高,电阻率曲线降低和声波时差的增大等现象。表层岩溶带一般厚度30~50 m。

渗流岩溶带(垂直渗流带)主要是指表层岩溶带以下,季节变动带以上,地表径流、大气降水依靠重力,沿裂缝或孔隙发育带向下渗滤的层段。它主要发生垂向的淋滤,因此容易形成溶蚀裂缝或形成孤立的溶蚀孔洞。在钻井过程中,可能会发生钻井液的漏失,或小的钻具放空。在测井曲线上,自然伽马和声波时差曲线均较平直,电阻率曲线呈现高值,只在裂缝发育段出现声波时差的瞬时升高现象。一般厚度为50~80 m。

潜流岩溶带(水平潜流带)位于岩溶带的最下部,它主要受季节水位变动的控制。在潜流岩溶带,岩溶的发育既受垂向淋滤作用,也受横向水流长期冲刷的影响,将岩层中易溶物质通过水流进行充分的交换,往往形成较大的横向连通的溶蚀孔洞或孔洞群。由于季节水位的升降,在一个地区往往形成多期次的横向分布的溶洞,在横向上具有一定的可对比性。由于潜流岩溶带大的溶洞比较发育,在横向上连通性较好,再加上裂缝的纵横向的相互沟通,因此是很好的油气储集空间。在钻井过程中,往往出现大量的钻井液漏失和大段的钻具放空现象。如E井在本段发生钻具放空3次,最大放空量为6 m; I井在本段发生钻具放空达5次,最大放空量为10 m,总放空量为16 m。本段在测井曲线上特征明显,孔洞在某一个井段密集发育,具有较大的厚度。这些孔洞也较易识别,如井径曲线的大幅增大、大段声波时差曲线的大幅度增大以及电阻率曲线的大幅度降低等。潜流岩溶带孔洞的发育受多期次季节水位的升降等因素的控制,它的厚度跨度较大,可从几十米至几百米不等。根据钻井证实,研究区的潜流岩溶带厚度大于200 m。

### 三、石炭系潜山储层特征

#### 1. 岩溶型储层的电性特征

图2为I井在钻井时钻井液漏失、钻具放空井段的测井曲线图。

在孔洞发育段,测井曲线往往表现出井径增大(未充填空洞),密度测井值降低、声波时差增大、电阻率测井系列不同程度的降低;未充填孔洞放射性测井呈现为低值(砂泥质充填孔洞为高值)、低阻抗的特征;在全波列阵列测井上出现明显的横向扰动现象<sup>[3]</sup>。

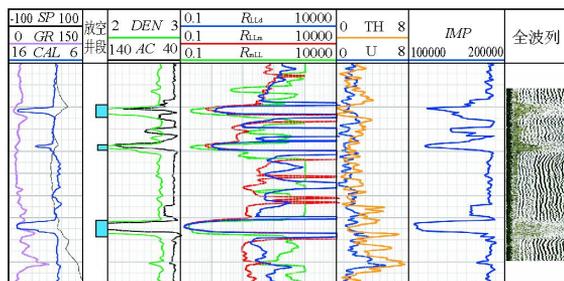


图2 I井储集层的电性响应特征图

#### 2. 岩性特征

石炭系潜山的岩性主要由潜山顶部风化剥蚀的原地堆积物或基岩骨架的溶蚀孔洞内的砂砾岩堆积物和基岩两部分组成。

潜山顶部风化剥蚀的原地堆积物或基岩骨架的溶蚀孔洞内的砂砾岩堆积物,这部分也称之为风化带。主要由风化剥蚀后残存的石灰岩以及浅灰—灰白色、含砾砂岩、砂砾岩组成。一些井的潜山顶部有一层棕红色铁质风化土、灰白色白垩土,直接指明了风化壳的存在。

基岩是指保存较完好碳酸盐岩。研究区的基岩岩性主要有浅灰—灰白色泥晶藻砂屑灰岩、含云质灰岩、白云岩、角砾状灰质白云岩等岩性,其中以白云岩和泥晶藻砂屑灰岩为主。岩性质纯,基本不含泥质。

#### 3. 物性特征

根据4口井的化验分析资料,风化带中含砾砂岩、砂砾岩的孔隙度和渗透率变化较大,孔隙度在4%~28.9%之间,渗透率在 $(0.012\sim 671)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,平均孔隙度为10.2%,平均渗透率为 $87\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,基本表现为碎屑岩的特征。

各种基岩岩石的物性统计结果表明,白云岩和泥晶藻砂屑灰岩物性较好,孔隙度平均在5%~12%,是主要的储集岩类;其他岩类(灰质白云岩、含云质灰岩等)的物性较差,平均孔隙度多小于5%,一般为非储层。

#### 4. 储集空间类型

(1)原生基质孔隙主要包括晶间孔和粒内孔,主要发育在白云岩、泥晶藻砂屑灰岩中。据E井岩心薄片统计,其面孔率一般为1.5%~3%,最大为8%。

(2)溶蚀孔、洞。根据钻井和测井资料的统计,目前所钻探的井,除C井未能钻遇岩溶型储层外,其余的井均钻遇了岩溶孔洞型储集层,出现了大量的钻井液漏失和不同程度的钻具放空。大型溶蚀洞穴

主要发育在表层岩溶带和渗流岩溶带,溶洞规模大,连通性好;大型溶蚀洞穴发育的岩层,往往伴随大量的溶蚀孔(小于2 mm)的发育,溶蚀孔也提供了巨大的储集空间,和溶蚀洞、大型洞穴相连通,构成一个大型的储集体,成为油气聚集成藏的有利场所。如I井在潜流岩溶带的1820~1904 m井段,发生钻井液漏失,共漏失钻井液和海水14275 m<sup>3</sup>,在1918~1928 m处钻具放空达10 m,致使钻井液有进无出,只好完钻。G井在钻开潜山顶面时,出现了5.5 m的钻具放空,并漏失钻井液和海水3130 m<sup>3</sup>,钻井液只进不出。

(3)构造裂缝。A凹陷经历了海西—喜山期的多期拉张应力的构造运动,尤其是石炭系潜山主要为脆性的碳酸盐岩地层,更容易造成构造裂缝的发育。根据岩心以及镜下薄片的观察,潜山灰岩裂缝非常发育;E井的5块岩心表面统计,面积450 cm<sup>2</sup>,共有裂缝250条,裂缝密度达0.56条/m,经图像分析仪分析的4块岩心样品,有微裂缝34条,密度为2.28条/m,其中半充填和未充填的裂缝占27%。岩心观察中还发现方解石半充填裂缝中发育晶洞,最大直径达45 mm。岩石薄片微裂缝也非常发育,观察的40块薄片,薄片有微裂缝,累计超过456条,平均11.4条/片。但早期的构造缝往往被方解石全充填或半充填,后期的未充填构造裂缝切割早期的全充填和半充填裂缝,对岩溶储集体起到了明显的积极的改造作用。

不管是大型的构造裂缝,还是小型的微裂缝,它既是储集空间,又是渗滤的通道。虽然裂缝所提供的储集空间很小,但裂缝能够沟通溶蚀孔洞,增大基岩的渗透能力,从而使较小的孔洞相互连通成为巨大的孔—洞—缝储集体,极大地改善油气的储集和渗滤条件;另一方面在采油过程中,也能增大单井的泄油半径,提高采油效率。

根据构造应力分析和用倾角测井处理的裂缝玫瑰花图,本区的构造裂缝主要有4组:和主断裂方向一致;伴随主断裂产生的一组近NE向的构造缝;一组和主断裂垂直的NW向的构造缝;一组共扼构造缝。

## 5. 储集层类型

### (1) 裂缝—孔洞型

裂缝—孔洞型储层储集空间既有孔洞,又有裂缝,两者对储集性能均有相当大的贡献。其中孔洞主要由孔(包括基质孔隙和溶蚀孔隙)和小—中洞组成,无大洞、巨洞。裂缝比较发育,既是主要的储集

空间之一,也是主要的沟通孔洞的渗流通道。该类储层具有储集空间大、渗透性好的特点,而且具有较高和稳定的产能。这类储层主要发育在表层岩溶带,为本地区主要的储层。

### (2) 裂缝型

主要是以构造裂缝为主要储集空间和渗流通道的储层。由于基质岩石的孔渗均比较低,构造裂缝密集发育区就能够形成以裂缝为主要储集和渗滤空间的储集层。这类储层主要发育在渗流岩溶带和局部的构造带。

### (3) 洞穴型

洞穴型储层储集空间为大型洞穴(包括大洞、巨洞),储集空间巨大,加之裂缝对沟通洞穴和改善渗流性能的作用,形成了储集空间巨大、储渗能力极好的最有利储层类型。这类储层主要发育在潜流岩溶带,是本地区最重要的一类储层。E、I井在潜流岩溶带发生的大段钻具放空以及大量的钻井液漏失,都是因为这类储层比较发育所致。

## 四、岩溶型储层的地震识别

### 1. 岩溶型储集层的地震响应特征

对岩溶型储集层地震响应特征的认识主要通过对比已钻井制作合成记录,对岩溶孔洞型储集层在地震上进行标定,然后对多口井进行分析和总结。

图3为I井岩溶型储集层发育段在地震上的标定结果。在碳酸盐岩内幕的孔洞发育段,表现为短轴状强振幅、低频率、高能量的地震反射特征;而在表层岩溶带,岩溶型储集层主要表现为较弱振幅、弱连续(低相干)、波形横向上有变化、低阻抗的地震反射特征。这和对孔洞型储集层的正演结果的分析相一致<sup>[4,5]</sup>。在碳酸盐岩内幕,如果没有孔洞的发育,则没有异常反射;在表层岩溶带,孔洞型储集层不发育的话,由于上覆的砂泥岩地层和较致密的灰岩地层存在很大的阻抗差,则会出现强振幅、强连续(高相干)的地震反射特征(C井)。因此利用地震的振幅属性可以对碳酸盐岩的岩溶型储集层进行识别和预测<sup>[6,7]</sup>。

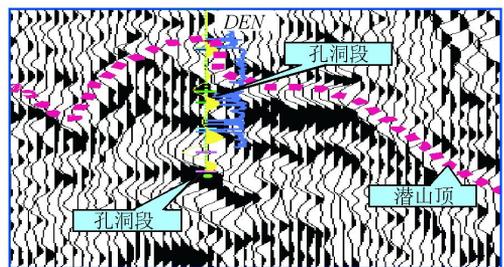


图3 I井储层地震剖面特征图(反极性剖面)

## 2. 岩溶型储集层的地震识别

根据对岩溶型储集层的地震反射特征的认识,采用根据钻井和测井资料对岩溶带划分和对比的结果,制定合理的地震时窗,进行沿层地震属性的提取,来对岩溶型储层在平面上的分布特征进行识别和分析。

根据模型正演以及地震标定对地震参数变化特征的分析,对岩溶型储集层特征最为敏感的地震属性主要为振幅属性、能量属性、波阻抗属性等<sup>[3]</sup>。因此对表层岩溶带、内幕岩溶带进行不同时窗敏感地震属性的提取,在分析时依据在剖面上对地震标定的认识,再结合地震剖面判断岩溶型储集层在纵向上以及在平面上的分布特征进行识别和预测。图4为研究区反映内幕岩溶分布的均方根振幅平面图。根据地震标定的结果,内幕岩溶储集层为强振幅、高能量、低阻抗的反射特征,再根据已钻井中岩溶的发育程度进行平面的标定,如E、I、B并在内幕均钻遇优质的厚层孔洞发育段,在平面图中均表现为强振幅、低阻抗、高能量的特征,因此图中强振幅、低阻抗、高能量分布区域即为内幕岩溶型储集层。再结合其他的敏感地震属性(如相干、分频振幅属性等<sup>[6,8]</sup>)平面特征,进行综合分析,就可以准确地确定岩溶储集层的分布特征,对下一步的勘探起到积极的指导作用。

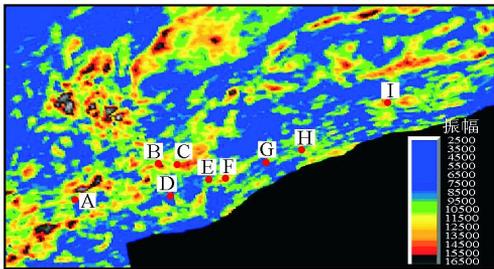


图4 潜山内幕岩溶型储层均方根振幅平面图

## 五、结 论

(1)区内岩溶在纵向上可划分为表层岩溶带、渗

流岩溶带和潜流岩溶带;其中表层岩溶带和潜流岩溶带岩溶型储集层最为发育,是本区重要的油气储集空间。

(2)除了白云岩、泥晶藻砂屑灰岩有一定的基质孔隙外,其他的岩类孔渗均较差。潜山储集层是以次生的岩溶孔洞型储层为主要储集层,储集空间主要为次生溶蚀孔、洞以及大的洞穴。构造裂缝比较发育,它能够连通基质孔隙、溶蚀孔洞、洞穴,对改善储层的渗滤条件起着积极作用。

(3)岩溶型储集层在电性上表现为高声波时差、低密度、低电阻率、低阻抗的特征;在地震剖面上内幕岩溶型储集层表现为短轴状强振幅、高能量、低阻抗的特征,而表层岩溶型储集层则表现为较弱振幅、弱连续(低相干)、低阻抗的特征。

(4)根据岩溶型储层的地震反射特征,能够利用地震资料对岩溶型储层反应敏感的地震属性进行岩溶储层的分布识别和预测。

## 参 考 文 献

- [1] 袁道先.中国岩溶学[M].北京:地质出版社,1994.
- [2] 袁静.埕北30区块潜山油气藏下古生界储层特征[J].天然气工业,2004,24(11):22-25.
- [3] 祁兴中,潘懋,潘文庆,等.轮古碳酸盐岩储层测井解释评价技术[J].天然气工业,2006,26(1):49-51.
- [4] YAOYAO. Research seismic wave field of karst cavern reservoirs nears deep carbonate weathered crusts [J]. Applied Geophysics, 2005, 2(2):94-102.
- [5] 陈广坡.碳酸盐岩岩溶型储层的地球物理响应特征分析[J].天然气勘探与开发,2005,28(3):43-46.
- [6] CHENGUANGPO. Application of prediction techniques in carbonate karst reservoir in Tarim Basin [J]. Applied Geophysics, 2005, 2(2):111-118.
- [7] 龙建东.缝洞型碳酸盐岩内部局域振幅横向差异性储层预测法[J].石油地球物理勘探,2003,38(1):58-61.
- [8] 蔡瑞.基于谱分解技术的缝洞型碳酸盐岩溶洞识别方法[J].石油勘探与开发,2005,32(2):82-85.

(收稿日期 2007-05-09 编辑 韩晓渝)