

塔北隆起奥陶系古岩溶的电成像测井识别*

钟广法¹ 刘瑞林² 柳建华³ 祁兴中⁴ 马勇³

(1. 同济大学海洋地质教育部重点实验室 2. 长江大学地球物理系
3. 中国石化西北石油局 4. 中国石油塔里木油田分公司)

钟广法等. 塔北隆起奥陶系古岩溶的电成像测井识别. 天然气工业, 2004; 24(6): 57~60

摘 要 基于电成像测井解释, 结合岩心标定和常规测井约束, 建立了塔北隆起下奥陶统溶洞及其充填物的电成像测井识别模式。在电成像测井图像上, 未充填溶洞一般呈黑色, 而充填溶洞则可呈现出黑、棕、黄、白等各种颜色, 这取决于充填物的类型和特征。溶洞充填物主要有角砾岩、砂泥岩和结晶碳酸盐岩三种类型: 角砾岩呈斑状, 其中浅色斑块解释为从围岩垮塌下来的角砾, 斑块间深色部分为砂、泥质充填物; 洞穴砂、泥岩一般呈黑色—棕色高导显示, 其中常见图像纹理, 解释为各种层理构造; 洞穴结晶碳酸盐岩因电阻率最高, 图像呈白色, 并可见纹层状生长构造。洞穴及其充填物与碳酸盐围岩浅棕—亮黄色中高阻电成像测井特征易于区别。研究表明, 利用高分辨率电成像测井图像, 结合岩心标定和常规测井资料, 能够有效地识别碳酸盐岩地层中的古洞穴, 并判断其充填与否及充填物的性质。

主题词 成像测井 古喀斯特 碳酸盐岩 测井解释 奥陶纪 塔北隆起

我国古岩溶储层的储集空间以溶洞、裂缝为主, 其非均质性强烈, 常规测井和地震资料仅能用于古岩溶发育带位置的大致估计, 很难提供古岩溶形态、大小等方面的参数。最近十多年来发展起来的高分辨率电成像测井技术通过测量井壁地层电阻率的微小变化, 对井壁表面进行成像, 为直观研究地下古溶洞及其充填物的特征提供了重要途径。本文以塔里木盆地塔北隆起下奥陶统为例, 在岩心标定和常规测井约束下, 利用电成像测井图像识别古岩溶, 建立古溶洞及其内部充填物的电成像测井响应模式。

研究材料和方法

下奥陶统碳酸盐岩是塔里木盆地塔北隆起区最重要的储集层和产层之一, 其岩性由亮晶或微晶颗粒灰岩、颗粒微晶灰岩、(含颗粒)微晶灰岩、藻粘结灰岩、海绵或层孔虫礁灰岩、(含)白云化灰岩及含灰或灰质白云岩等组成, 总体形成于开阔碳酸盐台地环境。多数碳酸盐岩基块孔隙度小于1%, 渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 其储集意义不大。储集性能主要受多期构造运动和岩溶作用所形成的裂缝、溶蚀孔洞控制^[1~4]。

研究材料取自塔河、轮南两油田, 以塔河油田为

主。研究过程中, 累计观察岩心 600 余米, 解释 FMI 电成像测井资料 4200 多米。

电成像测井资料解释遵循直接解释→常规测井约束解释→岩心标定解释→综合解释等几个步骤。通过电成像测井资料的直接解释, 可以大致了解测量井段内地层的沉积、构造特征概貌, 如地层的产状、裂缝和断层的发育程度、层理类型等。为减少多解性, 岩心标定和常规测井资料的约束对电成像测井解释必不可少。常规测井为电成像测井解释提供了岩性框架, 在此岩性框架约束下, 利用电成像测井图像可以精细地划分岩性单元, 并对一些直接利用电成像测井图像难以定性的地质现象做出合理的解释, 或缩小其解释范围。通过岩心标定, 可以明了各种地质现象在电成像测井图像上的响应特征, 从而建立起岩心地层特征与电成像测井响应之间的关系模式, 并对一些用电成像及常规测井资料均难以定性的问题给出明确解释。

未充填溶洞的识别

未充填溶洞是由古岩溶作用形成的未被充填的洞穴或洞穴未被充填的部分, 是碳酸盐古岩溶储层中最重要的储集空间类型之一。由于未充填溶洞在

* 本文得到中国石化西北石油局和中国石油塔里木油田分公司科研项目资助。

作者简介: 钟广法, 博士, 副教授; 主要从事地震、测井解释和层序地层学方面的科研、教学工作。地址: (200092) 上海市四平路 1239 号。电话: (021) 65982784。E-mail: gfz@mail.tongji.edu.cn

钻揭后为泥浆占据,其电阻率低,故静态电成像测井图像一般表现为黑色高电导特征(图1),与邻近的碳酸盐围岩之间存在鲜明的反差。后者因电阻率高,电成像测井图像颜色较浅,多呈浅棕—亮黄色。中、小型溶洞一般呈不规则斑块状或斑点状顺层分布,或沿裂缝和方解石脉呈串珠状产出。大型溶洞(厚度大于井筒直径)则表现为层状,但其顶、底界面不规则,并切割围岩层理。塔北隆起未充填溶洞中,以厘米级中、小型溶洞较常见。

在电成像测井图像上,中、小型未充填溶洞易与泥质团块、泥砾、黄铁矿团块等混淆,而大型未充填溶洞则与大段的井眼跨塌及块状泥岩段不易区别,因为这些物质在电成像测井图像上亦呈暗色高导特征。因此,要准确地区分图像上暗色高导斑点、斑块或层段是否代表未充填洞穴,还需要结合钻井、常规测井或岩心等资料综合分析。一般,在钻遇溶洞发育带时,会出现钻时加快、钻具放空、井漏、井径扩大、侧向电阻率降低、中子孔隙度急剧增大、岩石密度显著降低等特征(图1)。



图1 未充填溶洞的电成像测井响应

溶洞充填物的识别

塔北隆起下奥陶统碳酸盐岩地层中的溶洞(尤其是大型溶洞)多为充填洞。溶洞充填物按岩性特

征划分为角砾岩、砂泥岩、结晶碳酸盐岩等类型,其成因分属于重力坍塌堆积、洞穴流水机械沉积、洞穴水化学沉淀等。

1. 角砾岩

主要由角砾组成,角砾成分一般为碳酸盐岩,与围岩一致。角砾大小混杂,形状不规则,无分选和磨圆特征,其粒径一般在数厘米—数十厘米之间。角砾间的填隙物质由细小的碳酸盐岩碎屑物质或陆源砂、泥质组成,前者与角砾同源且同时形成,后者一般在角砾堆积之后,由流水作用从洞外带人或沿裂隙带渗入到角砾间的空隙中堆积而成。这种角砾岩被解释为从洞顶或洞壁围岩跨塌下来的物质就地堆积产物。还有一类特殊的角砾岩——裂隙状角砾岩,其角砾含量高达80%~90%,角砾之间仅有细小缝隙分隔,多被钙质或砂、泥质充填,其成因与岩溶风化带网状裂隙的发育导致碳酸盐原岩角砾化有关。

在电成像测井图像上,角砾岩的颜色或灰度不均一,大致由深、浅两部分组成。其中,浅色部分呈斑块状分布,其颜色与上、下碳酸盐围岩一致,一般呈黄色—白色,为碳酸盐角砾。深色部分呈黑色、棕色或深黄色,解释为角砾之间的填隙物。其中,主要由钙屑物质组成者颜色偏浅,呈棕色—黄色;主要由陆源砂、泥质组成者颜色较深,一般为黑色—深棕色(图2)。在电成像测井图像上,大角砾(尺寸大于井筒直径)的存在可以根据其下伏沉积层中常见变形层理及角砾中层理产状与上、下围岩不一致等特征予以识别(图版4)。

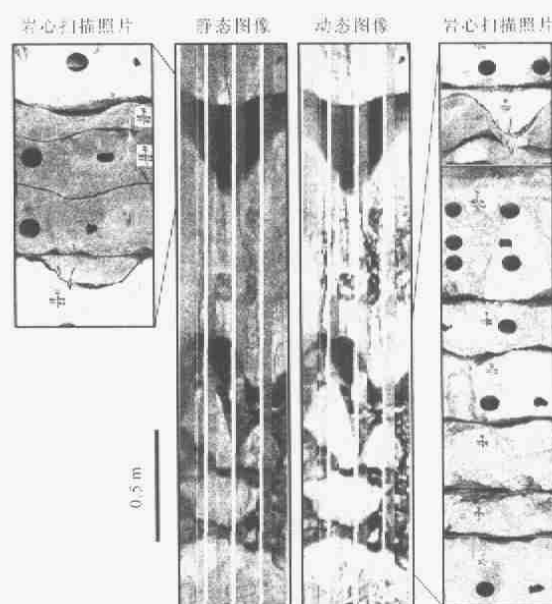


图2 洞穴角砾岩和砂岩的电成像测井响应

2. 砂、泥岩

塔北隆起下奥陶统中,充填洞穴的砂、泥岩以灰色—褐灰色细、粉砂岩及绿灰色泥质细、粉砂岩为主,夹少量灰绿色粉砂质泥岩或泥岩薄层。砂岩碎屑物质的组成以石英为主,其次为岩屑,长石含量很少,岩性为石英砂岩或岩屑石英砂岩。多数砂岩胶结疏松,填隙物以泥质基质为主,其含量从2%~25%不等,含少量钙质胶结物,普遍见星散状或以集合体形式产出的自生黄铁矿。砂粒一般分选良好,次棱角状—次圆状。根据洞穴砂岩成分和结构成熟度较高,且在上述洞穴砂、泥质沉积层内已检测到泥盆纪孢粉化石^[5],推测洞穴砂质沉积物可能来源于泥盆纪东河期的海岸砂,由流经溶洞的地下水流携入。

在电成像测井图像上,洞穴砂、泥岩呈黑色—深棕色,可能与其胶结疏松并普遍含黄铁矿,因而电阻率较低有关。少数砂质纹层呈黄色—白色高阻特征,与其胶结致密且胶结物成分为钙质有关。

利用电成像测井图像可以识别出发育于洞穴砂、泥岩沉积物中的层理等沉积构造,进而推断洞穴砂、泥岩形成时的水动力条件和沉积环境。在电成像测井图像上,组成层理的纹层面一般表现为线形特征,利用交互式解释工作站可以拾取纹层面倾向、倾角参数,依据纹层或纹层组产状特征变化,可大致确定层理的类型^[6,7]:①若相邻纹层面的产状(倾向、倾角)一致,即表现为绿模式,且纹层面的产状与纹层组或地层的顶、底界面一致,为水平或平行层理(图版4);②若纹层面的产状与纹层组或地层顶、底界面的产状不一致,为交错层理,其中若同一交错纹层组内纹层面的倾向和倾角一致,即表现为绿模式,为板状交错层理;若同一交错纹层组内纹层倾向相同,倾角向上增大,即表现为蓝模式,则为槽状交错层理(图版4);③若层内不显纹层构造或粒级递变特征,图像颜色较均一,为块状或无层理;④如果纹层倾角呈连续变化,构成倾斜、卷曲、倒转、微褶皱等特征,为变形层理(图版4)。塔北隆起洞穴砂、泥岩中,常见有平行层理、小型交错层理、块状层理、变形层理,及冲刷—充填构造(图版4)。这些沉积构造表明,溶洞充填过程中,存在明显的水动力作用,推测与流经溶洞的地下暗河有关。变形层理多发育在紧邻洞穴角砾层之下的地层中,其成因可能与洞穴坍塌作用有关。

尽管洞穴砂、泥岩的电成像测井响应与未充填溶洞类似,以黑色—棕色为主,但洞穴砂、泥岩中可

以发育各种沉积构造,其电成像测井图像具有明显的纹理特征,据此不难将其与未充填溶洞区分。此外,还可以结合常规测井资料予以识别,相对于碳酸盐围岩而言,洞穴砂、泥岩一般表现为高自然伽马特征,未充填洞穴则具有明显的扩径特点。

3. 洞穴碳酸盐岩

洞穴碳酸盐沉积是洞穴水以化学沉淀方式沿洞穴壁向洞穴中心生长而形成的各种洞穴充填物质的总称,其成分主要为方解石。它们可以从洞底往上生长(石笋),也可从洞顶向下生长(石钟乳),直至洞穴被完全充填,解释为渗流带重力水化学沉淀作用产物。

洞穴碳酸盐岩与方解石脉、碳酸盐结核一样,其质地纯正而致密,电阻率高,在电成像测井图像上呈特征的白色,极易识别^[7,8]。在钻井剖面中,洞穴碳酸盐岩一般呈层状,并可见清晰的相互平行的类似树木年轮的生长纹层构造,纹层面平行于洞穴壁,且一般与围岩层理斜交。图3所示为一充填溶洞,其

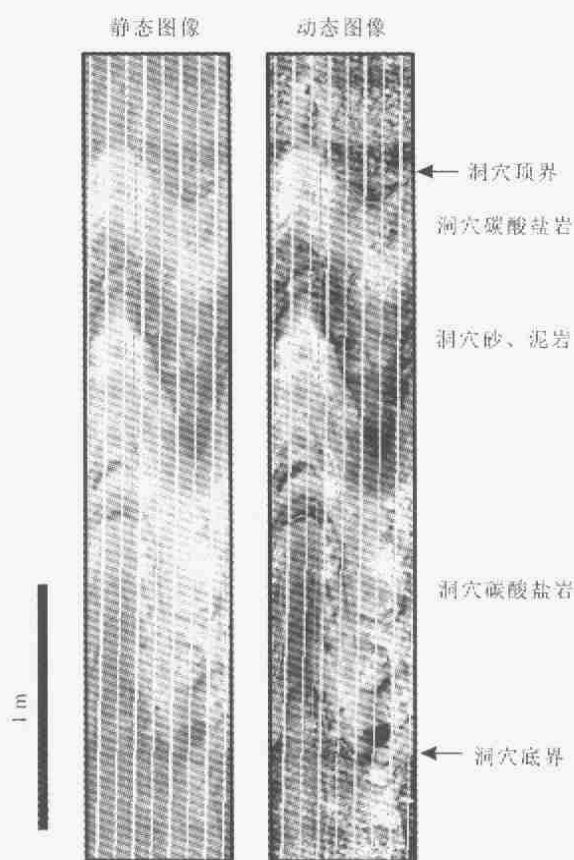


图3 洞穴碳酸盐岩的电成像测井响应

顶、底界面不规则,并明显截切围岩。该溶洞充填物由三部分组成,上部和下部电成像测井图像呈白色,上部充填物中还发育清晰的生长纹层构造,解释为

洞穴碳酸盐沉积;中部电成像测井图像颜色较深,并含浅色斑块,解释为洞穴角砾岩。

结 论

井壁高分辨率电成像测井图像为地下古岩溶研究提供了新的手段。利用电成像测井图像,结合岩心标定和常规测井资料,能够有效地识别碳酸盐岩地层中的古洞穴,并判断其充填与否及充填物的性质。塔北隆起下奥陶统碳酸盐岩地层内溶洞多数已被充填,尤其是中、大型溶洞。溶洞充填物以角砾岩和陆源砂、泥岩为主,偶见渗流带重力水成因的结晶碳酸盐岩。在电成像测井图像上,充填洞穴的结晶碳酸盐岩呈白色,特征明显;其余洞穴充填沉积及未充填溶洞一般呈黑色—棕色高导显示,它们与浅棕—亮黄色碳酸盐围岩易于识别。

参 考 文 献

(收稿日期 2004-03-26 编辑 韩晓渝)

- 1 张抗.塔河油田的发现及其地质意义.石油与天然气地

质,1999;20(2):120~124

- 2 张抗.塔河油田性质和塔里木碳酸盐岩油气勘探方向.石油学报,2001;22(4):1~6
- 3 康玉柱.塔里木盆地海相古生界油气勘探的进展.新疆石油地质,2002;23(1):76~78
- 4 张希明.新疆塔河油田下奥陶统碳酸盐岩缝洞型油气藏特征.石油勘探与开发,2001;28(5):17~22
- 5 阎相宾.塔河油田下奥陶统古岩溶作用及储层特征.江汉石油学院学报,2002;24(4):23~25
- 6 钟广法,马在田.利用高分辨率成像测井技术识别沉积构造.同济大学学报,2001;29(5):576~580
- 7 Serra O. Schlumberger formation microscanner image interpretation. Schlumberger Educational Services, 1989: 15—96
- 8 钟广法,马在田.砂岩早期核心式碳酸盐胶结作用的成像测井证据.沉积学报,2001;19(2):239~244

《石油勘探与开发》创刊三十周年 暨第六届编辑委员会成立大会召开

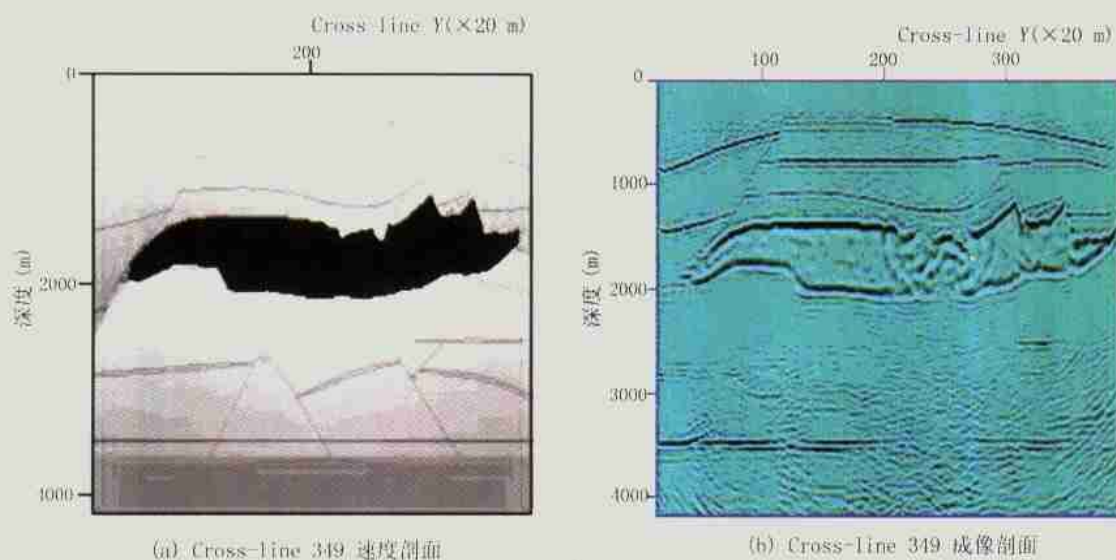
《石油勘探与开发》创刊三十周年暨第六届编辑委员会成立大会于2004年6月10日在主办单位中国石油勘探开发研究院召开。出席会议的有《石油勘探与开发》第六届编辑委员、特邀嘉宾等76人,中国科学院、中国工程院邱中建、孙枢等8位院士及领导、专家学者出席。

中国科学院院士、中国石油勘探开发研究院院长、第六届编辑委员会主任贾承造讲话,他希望新一届编委会及编辑部的同志们继续努力,从各个方面精益求精,力求把《石油勘探与开发》办成中国石油勘探开发研究院的“镇院之宝”,成为国内石油界的精品期刊,与中国石油一同走向世界。中国石油集团公司科技发展部刘振武主任发表讲话,对石油科技期刊的任务与前景做了重要指示。《新疆石油地质》副主编陈淦代表兄弟期刊编辑部发言。

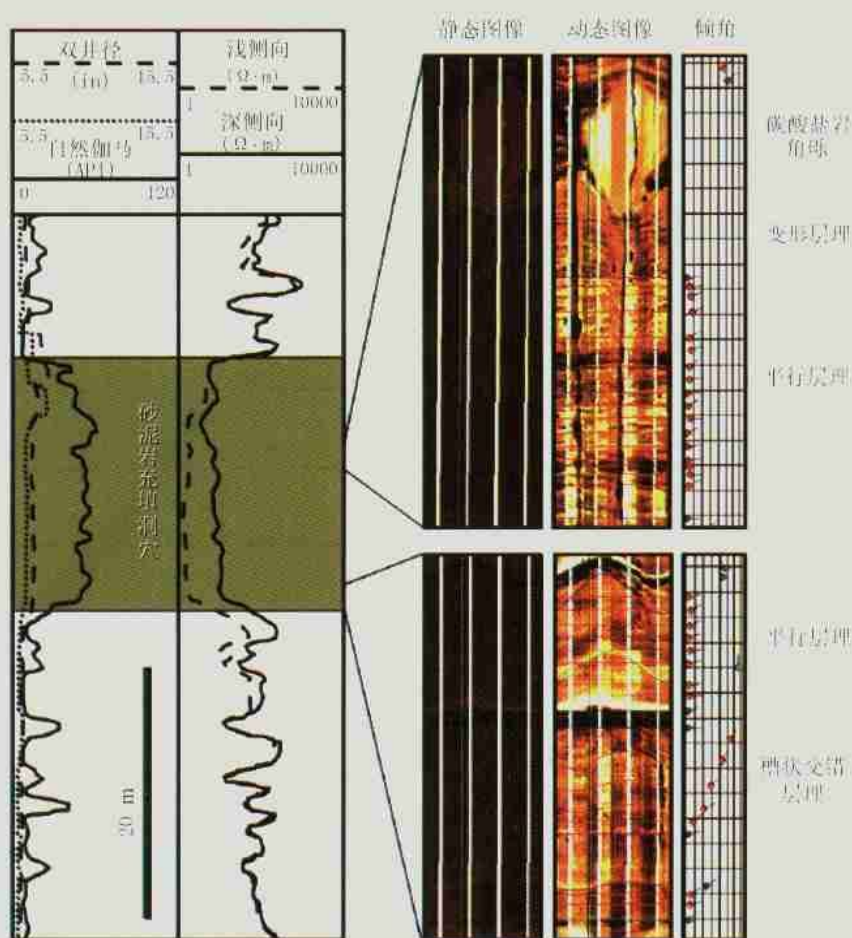
会上宣读并展示了第六届编委会委员邱中建、孙枢等12位中国科学院、中国工程院院士为《石油勘探与开发》创刊三十周年的祝贺题词。《天然气工业》等11个兄弟编辑部、外籍编委、加拿大西安大略大学地球科学系靳吉锁教授等发来了贺信。《石油勘探与开发》常务副主编王孝陵代表编辑部向与会代表汇报了2000年以来的办刊工作。贾承造院士向与会的部分第六届编委会委员颁发了聘书。

代表第六届编委会发言的有:《石油勘探与开发》新任主编戴金星院士,外籍编委、英国纽卡斯尔大学理学院副院长、国际知名油气地球化学家S. R. 拉特(Larter)教授;老专家、中国石油勘探开发研究院原副总地质师李晋超教授;中青年专家、南京大学地球科学系主任胡凯教授。邱中建院士在会上作了热情洋溢的发言。

(王大锐 供稿)



图版3 SEG/EAGE 盐丘模型偏移结果(程玖兵,p.51)



图版4 洞穴砂、泥岩及其内部沉积构造的电成像测井响应(钟广法,p.59)

(倾角栏内蝌蚪图颜色说明:红色,纹层面;紫色,纹层组界面;绿色,层面)