

下扬子页岩气地质调查井的溶洞识别与处理

赵志涛¹, 蒋睿^{1,3}, 卢彤¹, 朱迪斯², 徐军军¹, 欧阳志勇¹, 朱文鉴^{*1}

(1.北京探矿工程研究所,北京 100083; 2.中国地质调查局油气资源调查中心,北京 100083;

3.中国地质大学(北京),北京 100083)

摘要:下扬子地区页岩气地质调查井皖南地1井在奥陶系宝塔组灰岩地层1223.54~1226.34 m井段钻遇了溶洞,根据地质、地震、钻井、录井、岩心、测井曲线等资料中的溶洞识别特征和规律,通过分析钻具放空、泥浆失返、钻时为0或极低,岩心缺失,电阻率明显降低,密度明显减小,声波、中子数值明显增大等溶洞特征,判定钻遇了半充填、沿井眼轴向长2.8 m的溶洞。基于以上判断,并结合实际工况,通过对比分析桥接堵漏、水泥堵漏、顶漏钻进与套管封隔、波纹管堵漏、凝胶堵漏和移井位等常见溶洞处理方法的特点和使用范围,优选了清水强钻至完整地层后下套管封隔的处理措施,保证了皖南地1井顺利完钻并实现钻探目的。

关键词:页岩气地质调查;页岩气井;溶洞识别;顶漏钻进;套管封隔;皖南地1井;下扬子地区

中图分类号:P634.8;TE28 **文献标识码:**B **文章编号:**2096-9686(2022)05-0022-08

Karst cave identification and treatment for a Lower Yangtze shale gas geological survey well

ZHAO Zhitao¹, JIANG Rui^{1,3}, LU Tong¹, ZHU Disi², XU Junjun¹, OUYANG Zhiyong¹, ZHU Wenjian^{*1}

(1.Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China;

2.Oil & Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China;

3.China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Well WND1, a Lower Yangtze shale gas geological survey well, was drilled into a karst cave in Ordovician Baota Formation limestone strata. It can be diagnosed that a semi-filled cave with axial length of 2.8m along the borehole has been encountered by analyzing the cave identification features and law, such as drilling string fall-down, lost return of mud, drilling-time as low as 0 or extremely low, core missing, significant decrease in resistivity, obvious decrease in density, increase in acoustic and neutron values. Based on the above diagnosis and in view of with the actual working conditions, comparison of the characteristics and application range of common treatment methods for karst cave, such as bridge plugging, cement plugging, drilling with lost circulation and sealing off with casing, bellow pipe plugging, gel plugging, well location relocation, was conducted with forced drilling with fresh water and sealing off with casing selected to drill to the intact formation and then casing set for sealing, which ensured the smooth completion of Well WND1 and the realization of drilling objectives.

Key words: shale gas geological survey; shale gas well; karst cave identification; drilling with lost circulation; casing-off; Well WND1; Lower Yangtze region

收稿日期:2022-03-03; 修回日期:2022-07-14 DOI:10.12143/j.ztgc.2022.05.004

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“合肥盆地及周缘油气资源战略调查(北京探矿工程研究所)”(编号:DD20201111)、“下扬子地区古生界页岩气基础地质调查(北京探矿工程研究所)”(编号:DD20179082)、“地质矿产勘查钻探技术升级与应用示范”(编号:DD20211345)

第一作者:赵志涛,男,汉族,1984年生,高级工程师,探矿工程专业,硕士,研究方向为钻探技术和工程管理,北京市海淀区学院路31号探工楼,zzhitao@mail.cgs.gov.cn。

通信作者:朱文鉴,男,汉族,1967年生,教授级高级工程师,探矿工程专业,博士,研究方向为大陆科学钻探、地质岩心钻探、油气钻井、地热钻井和非开挖等,北京市海淀区学院路31号探工楼,786379656@qq.com。

引用格式:赵志涛,蒋睿,卢彤,等.下扬子页岩气地质调查井的溶洞识别与处理[J].钻探工程,2022,49(5):22-29.

ZHAO Zhitao, JIANG Rui, LU Tong, et al. Karst cave identification and treatment for a Lower Yangtze shale gas geological survey well[J]. Drilling Engineering, 2022,49(5):22-29.

0 引言

在奥陶系的灰岩、白云岩等碳酸盐地层中发育着大量的岩溶洞穴,易发生恶性井漏,引发卡钻、井塌埋钻等钻井事故,甚至造成井眼报废,对钻探成本和工期都带来极大影响,因此,在该类地层钻进中溶洞的识别与处理具有重要意义。目前,很多学者从地震、测井、钻进参数等单角度出发研究过溶洞识别,但未将地质、地震、钻进、录井和测井等地质工程资料进行综合研究判断溶洞发育情况^[1-8]。例如,2006年胡中平等学者发表了以地震资料识别溶洞的研究成果,溶洞在地震剖面中有弯月状强反射等特征;2012年马晖研究了利用测井资料识别塔河油田岩溶溶洞。钻遇溶洞后,常规采用桥接堵漏、水泥堵漏等处理方法^[9-12],近几年也出现了波纹管堵漏、智慧凝胶堵漏等新技术^[13-15],取得了良好的溶洞堵漏效果。溶洞堵漏方法繁多,适用性不尽相同,须根据溶洞发育情况采取合理的堵漏措施。本文结合下扬子页岩气地质调查皖南地1井的溶洞识别和处理,综合研究地震、钻井、录井和测井等资料的溶洞识别特征,并对比分析不同溶洞处理方法的特点,旨在更加准确判断溶洞发育情况,采取恰当的处理措施,缩短处理周期,降低成本。

1 工程概况

皖南地1井是一口部署于下扬子地区南陵盆地南缘的小口径页岩气地质调查井,直井,设计深度1500 m,终孔直径 ϕ 75 mm,全井取心,主探五峰—高家边组,兼探牯牛潭组—仑山组。该井采用绳索取心钻进工艺,开展了录井和测井,完钻深度1506.91 m,完钻层位奥陶系红花园组。该工程实现了钻探目的,梳理了安徽皖南地区地层层序,特别摸清了五峰—高家边组发育情况;在高家边组发现2层气测异常井段(886.60~900.00 m和965.40~971.00 m),为二级项目对页岩气优质储层的理论推测提供了有力的实物数据支撑和验证^[16]。

1.1 地质条件

本井钻遇地层自上而下依次为:第四系芜湖组、下蜀组、戚家吼组,志留系高家边组,奥陶系五峰组、汤头组、宝塔组、牯牛潭组、紫台组、红花园组(未穿),详见表1。

1.2 井身结构

皖南地1井采用三开井身结构,如图1所示。一

开采用 ϕ 165 mm钻头钻至233.49 m,下入 ϕ 146 mm套管,固井,水泥返至井口,坐防喷器;为了减小环空,保证上返速度,一开井段又下入 ϕ 127 mm绳索取心钻杆作为活动套管。二开采用 ϕ 98 mm钻头钻至1230.84 m,下入 ϕ 89 mm活动套管,不固井。三开采用 ϕ 77 mm钻头钻至1506.91 m,裸眼完钻。

1.3 施工工艺

该井采用绳索取心钻进工艺,以便于全井取心。选用了XY-8型岩心钻机,SG24型钻塔,NBB-390/15型泥浆泵,并配备了2SFZ18-35型防喷器。采用中等硬度细颗粒孕镶金刚石钻头,胎体硬度HRC30~40,水口适当加宽以便排渣,直径适当加大以减小泥页岩地层卡钻风险。其中二开和三开钻头分别加大至 ϕ 98 mm和 ϕ 77 mm,钻头内径加大金刚石浓度,防止钻头内径磨损过快。钻进规程参数详见表2。针对各开次地层选用了合理的钻井液体系,其中二开针对水敏性的泥页岩、泥质含量高的砂岩且大倾角地层,改用防塌性好、排粉能力强、流变性好、抑制性强的低固相防塌聚合物钻井液体系,详见表3。

1.4 钻遇溶洞情况

二开钻进过程中,钻至1223.54 m遇2.8 m溶洞,钻井液失返,鉴于上部井壁较为稳定以及表层套管固井质量好且安装防喷器,因此先顶漏钻穿溶洞进入完整地层3.5 m,尝试多次桥接堵漏无效,采用套管封隔,变径钻进至完钻。

2 溶洞识别技术

溶洞在地质、地震、钻井、录井、岩心、测井曲线等资料中具有不同的表现特征^[1-12],据此可以识别溶洞的发育情况,为溶洞的堵漏处理提供依据。常规的溶洞识别一般通过钻井工程参数变化来识别,难以准确的判断溶洞发育情况,综合分析地质资料、物探资料、钻井、录井以及测井资料可较准确判断溶洞的发育情况。

2.1 钻前识别特征

溶洞的形成具有一些地质构造特点,并在地震中有响应特征。如果在进行钻井工程设计阶段发现地质构造和地震资料有溶洞特征,须做好溶洞处理预案,准备充分的技术措施。溶洞的主要地质和地震特征有^[1-5]:

(1)溶洞主要受到溶蚀作用而产生,古侵蚀面是

表1 皖南地1井钻遇地层

Table 1 Formation encountered in Well WND1

系	组	代号	岩性	底深/m	视厚度/m	倾角/(°)
第四系	芜湖组	Q _{4w}	主要由棕黄色、棕红色粉砂质粘土组成	4.00	4.00	5
	下蜀组	Q _{3x}	主要由棕色粉砂质泥岩、棕红色粉砂质泥岩组成	7.26	3.26	5
	戚家吼组	Q _{2q}	主要为灰色粉砂质泥岩,与下伏宣南组为不整合接触	9.87	2.61	35
志留系	高家边组	S _{1g}	上段为灰绿色砂岩、粉砂岩和泥质粉砂岩;下段为浅灰色中厚至厚层泥岩、粉砂质泥岩与泥质粉砂岩互层,中部夹有青灰色硅质泥岩段,局部微见量笔石,同下伏五峰组为假整合接触	1179.44	1168.57	10~88
	五峰组	O _{3w}	本层段上下部以深灰色碳质泥岩为主,中部以泥质粉砂岩、粉砂质泥岩为主。整体为泥质结构,中厚层构造,同下伏汤头组为整合接触	1196.93	17.49	17~40
	汤头组	O _{3t}	本层段以泥质灰岩为顶,中部为灰黑色碳质泥岩与灰色泥质粉砂岩、粉砂质泥岩,底部为灰黑色泥岩。整体为泥质结构,中厚层构造,同下伏宝塔组为整合接触	1212.54	15.61	13~45
奥陶系	宝塔组	O _{2b}	浅灰色中龟裂纹泥晶灰岩,和下伏牯牛潭组为整合接触	1231.34	18.80	5~35
	牯牛潭组	O _{1-2g}	本层段整体以灰岩为主,从黄灰色到灰色依次出现,见多处裂隙以棕色泥质充填,整体为中厚层构造,和下伏紫台组为整合接触	1282.96	51.62	5~10 (夹有70)
	紫台组	O _{1z}	本段以灰色泥质灰岩为主,岩性单一;夹泥质薄层;泥质结构;整体为中厚层构造,和下伏红花园组为整合接触	1288.36	5.40	5
	红花园组	O _{1h}	上段以浅灰色泥质云岩为主,灰色、棕灰色泥云岩,整体为中厚层构造,泥质分布不匀,由上部较多至底部较富集,依次增多;中段以浅灰色、灰色泥云岩为主,有厚层灰色硅质泥岩出现;下段以灰色白云质泥岩与灰色泥质白云岩呈不等厚互层	1506.91 (未穿)	218.55	2~15 (最大80)

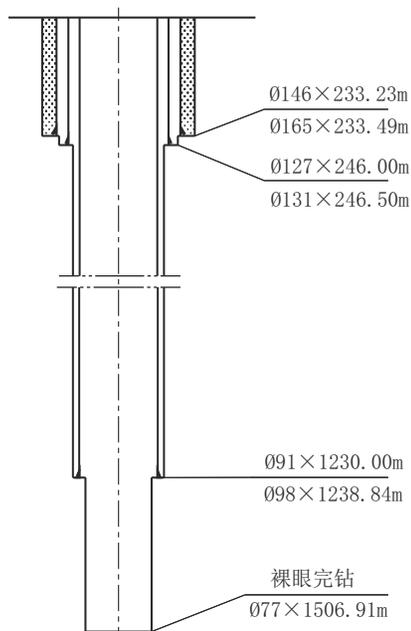


图1 皖南地1井井身结构示意图

Fig.1 Well structure of WND1

表2 钻进规程参数

Table 2 Drilling parameters

开次	钻头直径/ mm	钻压/ kN	转速/ (r·min ⁻¹)	泵量/ (L·min ⁻¹)
一开	124	180~200	200~300	160
	165(扩孔)	200~350	70~150	250
二开	98	120~180	200~300	90~160
三开	77	150	200~300	85~90

表3 各开次钻井液体系

Table 3 Drilling fluid system for each well section

开次	钻井液类型	密度/ (g·cm ⁻³)	粘度/ s	失水量/ mL
一开	低固相化学钻井液	1.01~1.03	22~24	8~12
二开	低固相防塌聚合物 钻井液	1.03~1.07	20~25	9~12
三开	普通化学钻井液	1.02~1.07	20~25	

溶洞理想的发育平台,存在长期的沉积间断,在古侵蚀面都普遍发育着铝土矿、铝土质泥质岩、褐铁矿层

或黄铁矿等风化残积物;

(2)存在与侵蚀面伴生的崩塌的角砾岩、覆盖角砾灰、填隙角砾岩、泥质粉砂岩、灰质粉砂岩等;

(3)地震剖面中表现出弯月状强反射特征,与溶道的河道状特征对应,强振幅变化率呈带状或点状分布,地震测井约束反演中低波阻抗呈带状分布^[4]。

皖南地1井无地震详实资料,因此钻前没能准确预测,但有防漏提示,因此设计阶段做了技术准备。

2.2 钻进识别特征

钻遇溶洞时,钻压、钻井液漏失、钻时、岩心等钻井和录井方面会有异常表现,主要有:

(1)泵压骤降,钻井液漏失且漏速较快,甚至失返,一般无井涌现象;

(2)钻速增快,甚至钻具放空,钻时大幅下降,甚至降至0,钻穿溶洞后恢复到正常钻时。

(3)岩心破碎或无心,溶洞下部能发现角砾岩富含带,溶洞周边岩心溶孔、裂隙发育等。绳索取心钻进中,可根据岩心缺失长度确定溶洞在井身方向的尺寸。

皖南地1井在井深1223.54~1224.14 m钻具放空,失钻压,钻时为0;1224.14~1226.34 m处钻速陡升,钻时由同类地层平均约39 min/m降为5~20 min/m;钻井液严重漏失,失返,无井涌现象。据此判断钻遇了溶洞,溶洞沿井身方向2.8 m,半充填,溶洞上部0.6 m无充填,下部2.2 m有充填。岩心特征:该井采用绳索取心钻进工艺,在1223.54 m上部岩心多裂隙,有泥质充填,1223.54~1226.34 m岩心缺失,下部为2.50 m的角砾岩富含带,如图2所示。据此判断溶洞沿井身方向2.8 m,因岩心缺失结合钻录井特征推测泥质充填,溶洞周边裂隙和溶孔发育。

2.3 钻后识别特征

溶洞或未压实的充填物的各项物理特性与正常沉积地层会有一定的差异,因此未经处理的溶洞在测井曲线中具有明显的响应特征^[8],主要有以下3个方面:

(1)井径出现跨径;

(2)三孔隙度表现出异常大孔隙特征,声波时差和中子曲线增大,密度变化与填充物有关,无填充密度值减小;

(3)电阻率降低明显,深浅侧向幅值差增大;溶



图2 钻穿溶洞后获取的岩心

Fig.2 Cores after drilling through the cave

洞较大时,浅侧向测量到的是泥浆电阻率,近似常数。

另外,工程条件允许,也可利用成像测井直观准确地判断出溶洞情况^[9]。皖南地1井的测井曲线中的溶洞特征明显,如图3所示。自然伽马数平均值为9 API,电阻率曲线明显降低呈漏斗状,平均值为910.4 $\Omega \cdot \text{m}$,三孔隙度曲线显示密度明显减小,声波、中子数值明显增大,井径异常增大,测井计算平均孔隙度为6.2%,渗透率为 $6.891 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

3 溶洞处理技术

3.1 溶洞处理方法

3.1.1 常见方法对比分析

钻遇溶洞后,首先应采用无固相钻井液或清水顶漏强行钻穿溶洞进入完整地层,根据识别特征判断出溶洞发育情况,再结合实际工况,制定合理适宜的处理技术措施。常见的溶洞处理方法有桥接堵漏、水泥堵漏、顶漏钻进与套管封隔、波纹管堵漏、凝胶堵漏和移井位等。对于浅层大型溶洞或者难以处理的深层溶洞且不具备顶漏钻进条件的井,可考虑直接终孔或移井位。

3.1.1.1 桥接堵漏

常用桥接堵漏材料有3种:核桃壳等颗粒状材料,云母、塑料片等薄片材料,锯末、草绳等纤维状材料^[10-15]。桥接堵漏是机械堵塞漏失通道,关键是根据不同的漏层性质选择材料的级配和浓度。该方法价格低廉,施工简单,安全,但是堵漏地层的承压能力较弱。桥接材料堵漏对于裂隙性和溶孔等小尺寸

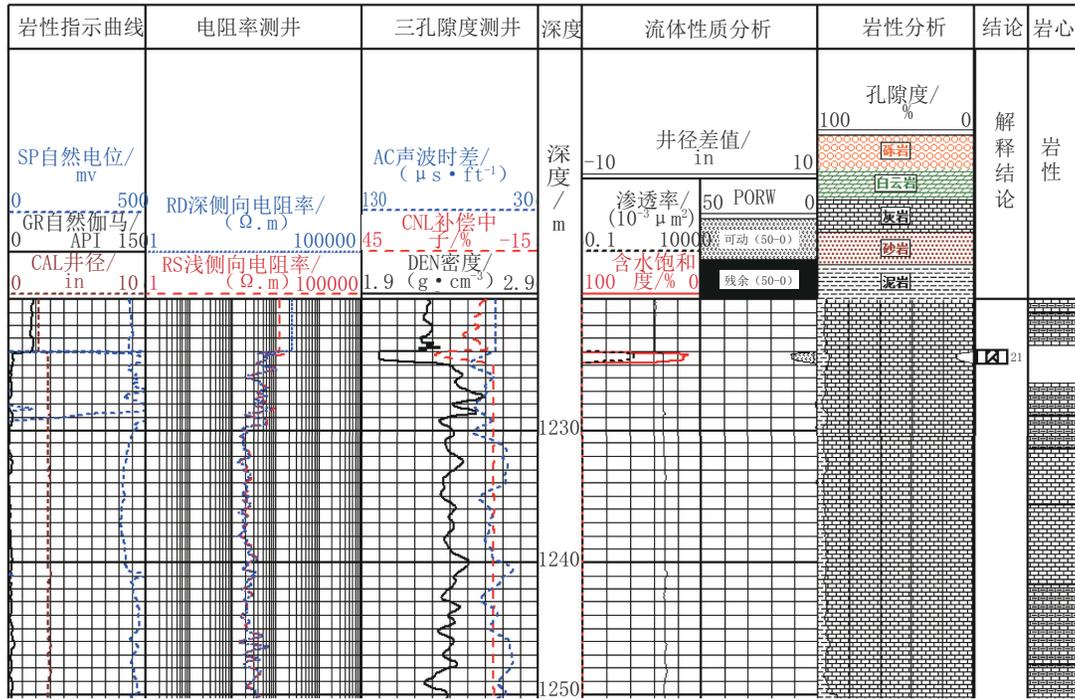


图3 皖南地1井溶洞局部测井曲线

Fig.3 Local logging curves of the cave in Well WND1

漏失效果较好^[16-20],但不适用大尺寸的溶洞性,难以在大尺寸漏失通道中堆积架桥形成有效堵塞。

3.1.1.2 水泥堵漏

水泥堵漏关键是初凝时间控制和能否在初凝时间内将水泥浆压入漏失层^[11]。常规水泥封堵溶洞的机理是通过堵漏管串将水泥浆多次推注一定量即将达到初凝的高稠度水泥浆进入溶洞,并快速凝固,实现逐步堆积,逐步减小漏失通道,从而堵漏。水泥封堵漏层后,地层具很高的承压能力和抗压强度,但是施工风险较大,对施工组织者要求高。针对溶洞水泥堵漏,中石化中原石油工程有限公司固井公司研制了拦截袋式堵漏工具,可实现一次堵漏,不用多次推注逐步封堵。其工作原理如图4所示。

3.1.1.3 顶漏钻进和下套管堵漏

钻遇中大尺寸的溶洞,堵漏无果,且上部井壁较稳定时,可选择清水强钻,下套管封隔。这种方法快捷,有效,但投入较大且须变径钻进^[21-26]。

3.1.1.4 波纹管堵漏

波纹管堵漏是在漏层下入一定壁厚的波纹管,通过液压或机械方式胀管使波纹管直径变大胀圆,贴合在井壁上,以达到封堵漏层的目的。该技术对处理溶洞等恶性井漏效果显著,不会出现二次复漏,

且无须变径钻进,但是该技术成本较高,如果恶性漏失地层溶洞较多时处理起来十分复杂^[13]。

3.1.1.5 凝胶堵漏

目前,凝胶已发展有化学凝胶和智能凝胶。

化学凝胶是通过有机物和无机物合成交联剂和成胶剂,交联剂和成胶剂反应后形成网状结构,通过堵漏剂进行填充网状结构中的空隙,形成一种高强度的化学凝胶堵漏剂。其成胶时间可控,强度可调^[27-30]。

智能凝胶以天然大分子纤维素为骨架,接枝共聚水溶性丙烯酸酰胺单体的凝胶,通过加入交联剂、催化剂控制合理的成胶时间,以达到便于施工注入的目的。凝胶在施工结束后破胶为流体,可通过泥浆循环出井筒。它具有流变性好、成胶时间可控、成胶强度可调、抗原油和复合盐水的污染、抗温可达150℃等特点^[30]。

3.1.2 溶洞处理方案选择

根据以上对比分析,考虑溶洞大小、填充情况、工期、经费和实际工程条件等因素,特别是工程设计预留了 $\varnothing 75$ mm口径的井身结构,经优选论证,首先采用清水强钻穿过溶洞进入完整地层,然后试用桥接堵漏方式进行处理,处理无效后采用下套管封隔

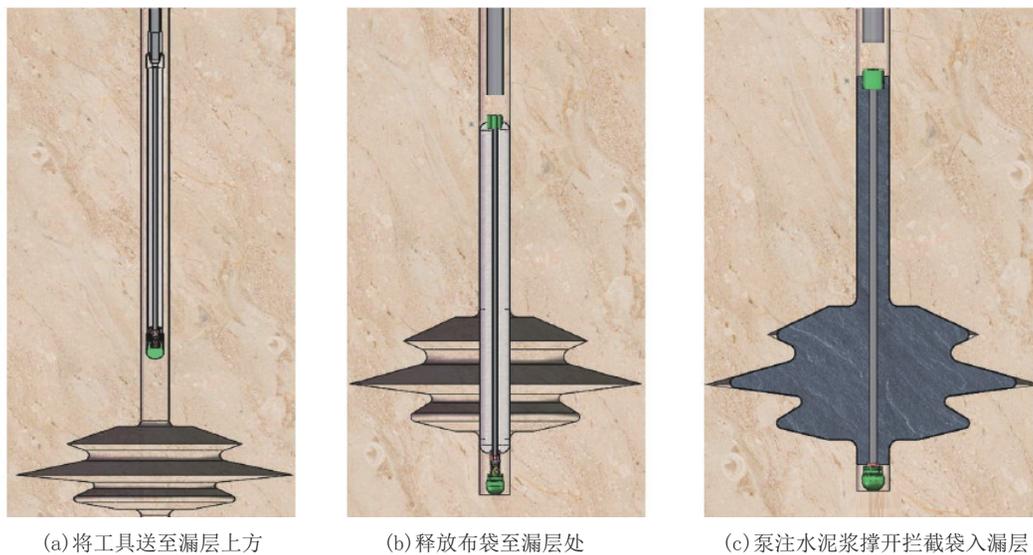


图4 拦截袋式堵漏工具工作原理

Fig.4 Working principle of the intercepting bag plugging tool

方案进行处理。经多次验证桥接堵漏无效,因此采用下套管封隔堵漏。

3.2 溶洞处理过程

3.2.1 顶漏钻进

钻遇溶洞,堵漏无果,且无重大影响时,在一定条件下可选择清水强钻。当严重井漏但有返浆时,强行钻进作业易发沉渣卡钻和井壁失稳,应维持足够的泵排量以净化井眼^[24,26,31]。在接单根和起钻前注入高粘洗井液清洁井底沉砂,也须防止裸眼井壁易因钻井液液柱压力降低而出现垮塌,并且减少无固相钻井液浸泡时间,防止造成泥页岩、煤层等易塌层和易水化层出现缩径和垮塌;发生恶性井漏且钻井液失返时,强行钻进有3个前提条件^[28]:(1)裸眼段井壁稳定;(2)岩屑能随清水流入地层中;(3)已钻地层和待钻地层段无油气水进入井内。

皖南地1井钻遇溶洞后失返,经判断满足以上3个条件,因此清水强钻至1230.84 m,进入完整地层3.5 m。钻进时,要特别注意防止断钻脱扣、卡钻、烧钻、坍塌和岔孔等。清水强钻穿过漏层进入完整岩层一定深度后,可下套管固井封堵溶洞。下套管前应反复划眼,有意识地在溶洞与下部地层交接处形成一个人工漏斗,以便使套管顺利通过。

3.2.2 下套管

利用绳索取心钻杆的级配优势,将二开钻进正在使用的 $\varnothing 89$ mm绳索取心钻杆作为活动套管封隔,不固井,钻杆接头避开溶洞的位置。钻杆底部带

$\varnothing 98$ mm取心钻头,一是有利于居中,二是下套管过程中遇阻或不能下到底时便于处理,三是若下部仍有溶洞,可以继续 $\varnothing 98$ mm口径扩孔钻进。

3.2.3 后续处理

下套管后,采用 $\varnothing 77$ mm钻头三开钻进,三开钻进前利用 $\varnothing 77$ mm钻头将 $\varnothing 98$ mm取心钻头内侧扩眼通过后,利用堵漏材料将套管环空封堵,至此溶洞处理完成。

如果后续再钻遇溶洞,该处理方式可继续使用作为套管的 $\varnothing 89$ mm钻杆直接扩孔钻进和封隔。

3.3 溶洞处理效果

后期变径钻进过程中,有短暂堵漏效果,后再次井漏,失返。分析原因是采用活动套管未固井的方式封隔,且下部奥陶系灰岩地层裂隙发育,小溶孔发育。鉴于有活动套管护壁,且岩心钻探岩粉较细可以随钻井液流入地层,采用顶漏钻进至1506.91 m,顺利完钻,且全孔取心,实现了钻探目的。

4 结论

(1)皖南地1井施工过程中,利用岩心出现缺失和角砾岩富集带、钻具放空、严重漏失、跨径、异常大孔隙等地质、钻井、录井、测井资料特征判断在1223.54~1226.34 m井段钻遇了溶洞,溶洞沿井身方向尺寸2.8 m,半充填,溶洞上部0.6 m无充填,下部2.2 m有充填。

(2)皖南地1井多次桥接堵漏无效后,清水强钻

穿溶洞至完整岩层,利用绳索取心钻杆级配优势将二开使用的 $\varnothing 89$ mm绳索取心钻杆作为套管进行护壁封堵溶洞,保证了处于复杂地层中的二开900多米井壁安全,顺利实现钻探目的,并大幅缩短工期,降低成本,可为类似钻探工程提供借鉴。

参考文献(References):

- [1] 伍家和,李宗宇. 缝洞型碳酸盐岩油藏溶洞描述技术研究[J]. 石油地质与工程, 2010, 24(4): 34-39.
WU Jiahe, LI Zongyu. Technical research of karst cave description in fracture-cavity carbonate reservoir[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2010, 24(4): 34-39.
- [2] 胡中平. 溶洞地震波“串珠状”形成机理及识别方法[J]. 中国西部油气地质, 2006, 2(4): 423-426, 453.
HU Zhongping. Mechanism and distinction method for the seismic “string beads” characteristic[J]. West China Petroleum Geosciences, 2006, 2(4): 423-426, 453.
- [3] 朱博华, 杨江峰, 吕秋玲, 等. 基于分频成像的小尺度溶洞检测[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(3): 538-544.
ZHU Bohua, YANG Jiangfeng, LÜ Qiuling, et al. Small-scale cave detection based on frequency-segmented imaging[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(3): 538-544.
- [4] 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.
- [5] 李国军, 张国华, 张伟. 利用多学科资料预测碳酸盐岩洞穴型储集层[J]. 断块油气田, 2009, 16(1): 28-30.
LI Guojun, ZHANG Guohua, ZHANG Wei. Using multi-subject information to predict carbonate cavernous reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2009, 16(1): 28-30.
- [6] 饶丹, 马绪杰, 贾存善, 等. 塔河油田主体区奥陶系缝洞系统与油气分布[J]. 石油实验地质, 2007, 29(6): 589-592.
RAO Dan, MA Xujie, JIA Cunshan, et al. Fracture-cave system and petroleum distribution in Ordovician in main region of Tahe Oilfield[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(6): 589-592.
- [7] 罗鑫林, 崔海花, 李小刚, 等. 裂缝-孔洞型油藏储层敏感性评价[J]. 断块油气田, 2009, 16(3): 73-75.
LUO Xinlin, CUI Haihua, LI Xiaogang, et al. Evaluation on reservoir sensitivity of fractured and vuggy type reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2009, 16(3): 73-75.
- [8] 马晖. 利用测井方法识别和评价塔河油田岩溶溶洞[J]. 断块油气田, 2012, 19(2): 266-269.
MA Hui. Identification and evaluation of karst caves with well logging method in Tahe Oilfield[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2012, 19(2): 266-269.
- [9] 马光长, 林安村, 申威. 川东大天8井溶洞恶性井漏的处理[J]. 钻采工艺, 2002, 4(1): 14-15.
MA Guangchang, LIN Ancun, SHEN Wei. Treatment of caverned serious lost circulation in Well Datian 8[J]. Drilling & Production Technology, 2002, 4(1): 14-15.
- [10] 易旺, 李凯, 赵凌云, 等. 黔西地区钻遇地层漏失分析及堵漏措施探讨[J]. 石油化工应用, 2019, 38(6): 13-16, 35.
YI Wang, LI Kai, ZHAO Lingyun, et al. Leakage analysis and exploration of leakage stoppage measures for drilling strata in western Guizhou[J]. Petrochemical Industry Application, 2019, 38(6): 13-16, 35.
- [11] 尹江. 钻进严重漏失层的封堵处理方法[J]. 西部探矿工程, 2015, 20(2): 4-15.
YIN Jiang. Plugging treatment method for drilling serious leakage layer[J]. West-China Exploration Engineering, 2015, 20(2): 4-15.
- [12] 黄勇, 凌飞. 峡江水利枢纽库区同赣堤多层溶洞处理技术[J]. 水利水电技术, 2017(S1): 56-60.
HUANG Yong, LING Fei. Technologies for treatment on multi-layered karst cave of Tonggandi embankment within reservoir area of Xiajiang Water Control Project[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017(S1): 56-60.
- [13] 李成岗. 波纹管堵漏现场试验获得成功[J]. 石油学报, 1999, 2(4): 73-74.
LI Chenggang. Field trial of profile liners for sealing circulation loss has been successful[J]. Acta Petrolei Sinica, 1999, 2(4): 73-74.
- [14] 钱志伟, 王平全, 白杨. 钻井堵漏用特种凝胶的适用性[J]. 钻井液与完井液, 2012, 29(2): 51-54.
QIAN Zhiwei, WANG Pingquan, BAI Yang. Research on special gel used for mud loss control[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2012, 29(2): 51-54.
- [15] 鲁红升, 张太亮, 黄志宇. 一种新型堵漏凝胶DNG的研究[J]. 钻井液与完井液, 2010, 27(3): 33-35.
LU Hongsheng, ZHANG Tailiang, HUANG Zhiyu. Study on a new loss controller of polymer gel[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2010, 27(3): 33-35.
- [16] 刘文武, 赵志涛, 翁炜, 等. 页岩气基础地质调查皖南地1井钻探施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(10): 66-70.
LIU Wenwu, ZHAO Zhitao, WENG Wei, et al. Drilling of Wannandi Well-1 for basic shale gas geological survey[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(10): 66-70.
- [17] 刘同江, 唐钢, 王军, 等. 黔张常铁路高山隧道巨型溶洞处理技术研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(6): 972-982.
LIU Tongjiang, TANG Gang, WANG Jun, et al. Treatment

- technology of giant karst cave of Gaoshan Tunnel on Qianjiang-Zhangjiakou-Changde Railway[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(6):972-982.
- [18] 程巧建. 隧道岩溶超前探测及溶洞处理技术研究[J]. 公路, 2020, 65(5):357-362.
CHENG Qiaojian. Technical research on advanced detection of tunnel karst and treatment of karst caves[J]. Highway, 2020, 65(5):357-362.
- [19] 林英松, 蒋金宝, 秦涛. 井漏处理技术的研究及发展[J]. 断块油气田, 2005, 12(2):3-7.
LIN Yingsong, JIANG Jinbao, QIN Tao. Research and development of leakage treatment technology[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2005, 12(2):3-7.
- [20] 刘四海, 崔庆东, 李卫国. 川东北地区井漏特点及承压堵漏技术难点与对策[J]. 石油钻探技术, 2008, 3(36):20-23.
LIU Sihai, CUI Qingdong, LI Weiguo. Circulation loss characteristics and challenges and measures to plug under pressure in northeast Sichuan area [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 3(36):20-23.
- [21] 路学忠, 李春生, 蔡记华. 宁夏彭阳草庙地区煤田钻探防漏堵漏技术研究与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(2):1-4.
LU Xuezhong, LI Chunsheng, CAI Jihua. Research and application of leakage prevention and sealing technology in coalfield drilling in Caomiao area, Pengyang, Ningxia [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009, 36(2):1-4.
- [22] 任茂, 苏俊霖, 房舟, 等. 钻井防漏堵漏技术分析和建议[J]. 钻采工艺, 2009, 32(3):29-30.
REN Mao, SU Junlin, FANG Zhou, et al. Analysis of anti-leak and sealing technology[J]. Drilling & Production Technology, 2009, 32(3):29-30.
- [23] 徐同台, 刘玉杰, 申威. 钻井工程防漏堵漏技术[M]. 北京:石油工业出版社, 1997:7-34.
XU Tongtai, LIU Yujie, SHEN Wei. Plugging Technology for Drilling [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997:7-34.
- [24] 余婷婷, 邓建民, 李键, 等. 密度纤维堵漏水泥浆的实验研究[J]. 钻井液与完井液, 2008, 2(17):17-19.
YU Tingting, DENG Jianmin, LI Jian, et al. Research on the high density cement slurry containing fibers[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2008, 2(17):17-19.
- [25] 李锦峰. 恶性漏失地层堵漏技术研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(5):19-27.
LI Jinfeng. The status and development direction of plugging technology for severe circulation loss formation[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(5):19-27.
- [26] 王德承. 用清水强钻法处理恶性井漏[J]. 石油钻采工艺, 1990, 3(9):39-41.
WANG Decheng. Treatment of severe leakage by clear water blind drilling[J]. Petroleum Drilling and Production Technology, 1990, 3(9):39-41.
- [27] 郝惠军, 田野, 贾东民, 等. 承压堵漏技术的研究与应用[J]. 钻井液与完井液, 2011, 28(6):14-16.
HAO Huijun, TIAN Ye, JIA Dongmin, et al. Study and application of pressure bearing circulation loss plugging technique [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2011, 28(6):14-16.
- [28] 徐江, 石秉忠, 王海波, 等. 桥塞封堵裂缝性漏失机理研究[J]. 钻井液与完井液, 2014, 31(1):44-46.
XU Jiang, SHI Bingzhong, WANG Haibo, et al. Mechanism study on bridge technology for fractured formation [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2014, 31(1):44-46.
- [29] 王悦坚. 塔河油田恶性漏失堵漏与大幅度提高地层承压技术[J]. 钻井液与完井液, 2013, 30(4):33-36.
WANG Yuejian. Technology on mud lost control of severe lost circulation and improving formation pressure containment in Tahe Oilfield [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2013, 30(4):33-36.
- [30] 詹俊阳, 刘四海, 刘金华, 等. 高强度耐高温化学固结堵漏剂 HDL-1 的研制及应用[J]. 石油钻探技术, 2014, 24(2):70-71.
ZHAN Junyang, LIU Sihai, LIU Jinhua, et al. Development and application of chemical consolidation plugging agent HDL-1 [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 24(2):70-71.
- [31] 苏舟, 张绍和, 王文彬, 等. 黔水地 1 井钻探施工技术难点及对策[J]. 钻探工程, 2021, 48(5):54-59.
SU Zhou, ZHANG Shaohu, WANG Wenbin, et al. Technical difficulties in drilling of Well Qianshuidi-1 and their solutions [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(5):54-59.

(编辑 李艺)