

封隔器式膨胀管护壁技术研发与应用

冯建月, 叶成明, 王营超, 李小杰, 解伟

(中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北保定 071051)

摘要:基岩复杂地层因其地层稳定性差,易出现塌孔、掉块、缩径和漏失等问题,严重影响着水井钻探工程质量和钻探效率。膨胀管技术是解决复杂地层护壁技术难题的有效措施,但常规的膨胀管技术成本高、工艺复杂,不适用于水井钻探成井工作,基于此开展了封隔器式膨胀管技术研究工作。该技术使用封隔器作为膨胀机构,使薄壁金属管在目标层段张开并紧贴井壁,达到护壁、堵漏和套管补贴的目的。本文介绍了膨胀管系统研发与施工工艺,并实施了膨胀管护壁与套管补贴修复现场试验,实现了膨胀管技术在水井钻探成井领域中的首次应用。

关键词:膨胀管;封隔器;护壁;套管补贴

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2022)03-0123-07

Development and application of the packer-activated expandable tubular technology for well wall protection

FENG Jianyue, YE Chengming, WANG Yingchao, LI Xiaojie, XIE Wei

(Center for Hydrogeology and Environmental Geology, CGS, Baoding Hebei 071051, China)

Abstract: In water well drilling, the problems of hole collapse, falling stones, wellbore shrinkage and leakage are prone to happen due to poor stability of bedrock complexity, which seriously affect the quality and efficiency of well drilling. The expandable tubular is an effective measure to solve the wall protection problems in complex formation, but the conventional one is not suitable for water well drilling for its high cost and complex process. In view of this, research was carried out on packer-activated expandable tubulars. The packer is used as the expansion mechanism to make the thin-walled metal pipe expand in the target layer and stick to the well wall, so as to achieve the purposes of wall protection, plugging and casing repair. This paper introduces the development and operation of the expandable tubular system, and the field test of the technology for wall protection and casing repair, which is the first application of the technology in the field of water well drilling and completion.

Key words: expandable tubular; packer; wall protection; casing repair

0 引言

随着水文地质勘探工作的不断深入,深井、复杂井、高温井不断增多。在钻遇掉块、坍塌、漏失、缩径和碳酸盐溶蚀等基岩复杂地层时,常规的处理方法是采用套管封固再下入小一级钻头钻进或使用高性能泥浆护壁,但是增加套管的层次需要增大开孔口径,同时也会使完井井眼过小。在终孔裸孔

段需要护壁,不能下入套管,泥浆护壁也失败的情况下,会导致井孔报废。因此,需要探索一种钻遇问题孔段下入套管护壁,护壁后孔径不减小的等径钻井技术^[1-3]。

膨胀管技术是油气开发领域的一种前沿技术,原理是将下到井眼中的套管柱,通过液压或机械方法驱动膨胀锥在套管或筛管内运动,使管柱发生永

收稿日期:2021-06-09; 修回日期:2021-08-02 DOI:10.12143/j.ztgc.2022.03.016

基金项目:国家重点研发计划项目“地下饮用水源快速探测与开采技术”(编号:2018YFC1508703)

第一作者:冯建月,男,汉族,1987年生,工程师,地质工程专业,硕士,主要从事水文地质钻探研究工作,河北省保定市七一中路1305号,3136718529@qq.com。

引用格式:冯建月,叶成明,王营超,等.封隔器式膨胀管护壁技术研发与应用[J].钻探工程,2022,49(3):123-129.

FENG Jianyue, YE Chengming, WANG Yingchao, et al. Development and application of the packer-activated expandable tubular technology for well wall protection[J]. Drilling Engineering, 2022,49(3):123-129.

久塑性变形,从而在不改变孔径的条件下,通过复杂地层的一种钻井新技术。主要应用于处理井壁失稳、堵漏作业和套管补贴等领域^[4-5]。国外膨胀管技术发展迅速且已进入商业化应用阶段。国内科研院所相继进行了大量的专项研究,在膨胀套管基础理论、产品和作业工具开发及应用研究方面取得了长足的进步^[6-7]。

在地质钻探领域,国内也开展了小口径膨胀波纹管护壁技术研究与应用。膨胀波纹管是将圆形管材加工成波纹管材,再通过液压或者机械压二次塑形还原成近圆形管材,在不改变整体孔径的条件下封隔复杂地层。该技术的应用能够封堵钻井过程中的漏失、坍塌等复杂问题,为复杂地层安全钻井提供了新的解决方案^[8-10]。

在基岩复杂地层条件下水井钻进也会遇到与油气井、地质孔类似的护壁技术难题,需要用到膨胀管技术。但因费用的限制,又不能使用成本高、工艺与材料复杂的膨胀管技术。因此,开展了低成本、工艺简便的封隔器式膨胀管护壁技术研发工作。本文就该技术的研发思路、工艺与应用做简要介绍,以期为该技术的研发思路、工艺与应用提供新的解决思路与手段。

1 膨胀管系统研发

封隔器式膨胀管护壁技术是利用金属的塑性变形原理,创新性地使用封隔器作为膨胀机构,将具有一定塑性变形能力的薄壁金属管悬挂下入预定目标层段并打压胀开,膨胀管外壁附着一定厚度的硫化橡胶层,膨胀管在封隔器胶筒的机械扩张力作用下,克服自身强度屈服极限发生形变并紧贴井(孔)壁,达到护壁、封堵及管井补贴修复的技术目的,技术原理见图1,系统关键组件见图2。

膨胀管系统主要包括膨胀机构和膨胀管,其中膨胀机构主要由胀管封隔器和打压系统组成,膨胀管主要由金属管和管外橡胶层组成。

1.1 膨胀机构

膨胀机构设计是膨胀管技术的关键点,本次使用高压泵作为打压装置,以水作为压力传输介质,高压水流通过管路使封隔器胀开,膨胀管在封隔器膨胀机械作用下发生变形。

1.1.1 封隔器

封隔器是油田钻采工艺中重要的井下工具之一,系统选用水力扩张式,该类封隔器胶筒是以内外

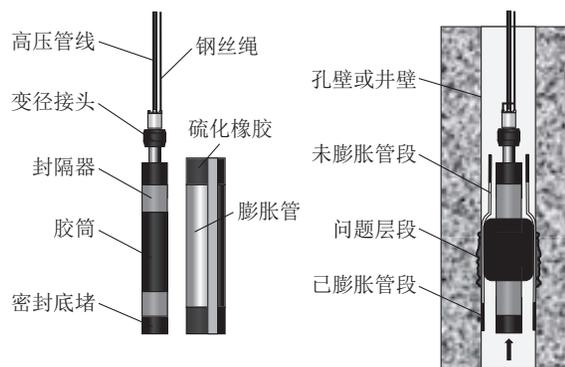


图1 封隔器式膨胀管技术原理

Fig.1 Principle of the packer-activated expandable tubular technology

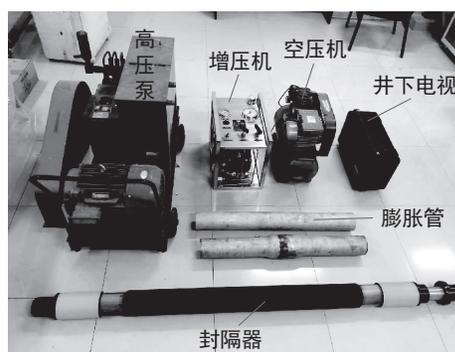


图2 膨胀管技术系统关键组件

Fig.2 Key components of the expandable tubular system

高弹性橡胶层与中间高强度不锈钢带作骨架层的三层结构,确保了封隔器作为膨胀工具的膨胀性能。封隔器通过液压方式膨胀,膨胀完成后在胶筒自身弹性和水压作用下收缩至原始状态,坐封、解封无须机械运动。扩张式封隔器工作压力上限一般为60 MPa,可满足系统工作压力需求。该工具在规定膨胀系数工作情况下,可以反复膨胀50~80次,具有操作简便、压力高和耐用等优点^[11]。

扩张式封隔器作为膨胀工具需要做相应改进。普通封隔器胶筒长度过短,如 $\varnothing 158$ 型封隔器胶筒去掉两端膨胀斜面,实际有效膨胀长度仅为0.90 m左右。本次改进的封隔器均采用1.88 m长度的橡胶筒,有效膨胀长度约为1.60 m,有效作业面长度增加约84.5%,既减少作业次数,缩短施工时间,又相应减少了封隔器起胀次数,增加了使用寿命,降低了使用成本。

扩张式封隔器胶筒安装方式一般为两端固定式,此形式在坐封后会使得胶筒内部产生很大的拉伸

应力,易造成胶筒破裂,尤其在高压和井孔直径不规则情况下更为严重。为此,对胶筒安装方式进行改进,采用一端固定,另一端浮动密封,降低了启动坐封压力,减小了胶筒扩张后的应力,提高了工具整体耐用性能^[12]。

1.1.2 打压系统

打压系统主要包括水箱、高压泵、高压管等,主要作用是为井下封隔器提供所需的膨胀压力。

水箱的作用是为整个系统提供水,以水作为介质传递压力,需水量为水充满高压管路及封隔器内腔的体积之和,水量与作业施工深度成正比。

高压泵使封隔器压力上升膨胀,完成膨胀作业后,打开试压泵上的泄压阀,胶筒在自身弹性和水压作用下收缩至原始状态。高压泵具有结构紧凑、操作省力、整机质量轻、维修方便和效率高等特点,缺点是需要使用高压电源作为动力,在某些情况下使用条件受限。此时可采用增压机和小空压机结合方式,在现场具有220 V电源情况下两者也可作为动力源。

高压管一般为钢丝高压胶管,当施工位置较深时,需要配相应长度的绞车作为盘线装置,方便施工和运输。

1.2 膨胀管

1.2.1 金属管

膨胀管材宜选择延展性好、厚度薄、成本低且具有一定强度的无缝钢管。使用薄壁管会大幅度降低封隔器工作压力,不仅降低了作业难度,而且可减少膨胀后的井径损失。油气井常用的膨胀管材厚度较大、价格较高且难以小批量采购,因此选用的管材应是市场上常用的钢材品类,才可使该技术得到进一步的推广应用。

碳元素是影响钢的综合力学性能和铸造性能的主要元素^[13],因此选择低碳钢无缝管作为膨胀管材。选择了目前市场上常用的3种低碳钢无缝管作为备选材料:普通碳素钢管A、优质碳素钢管B和低碳合金钢管C。所选3种管材的含碳量均小于0.25%,均具有优良的塑性变形能力且强度较好。

通过开展膨胀性能试验优选管材,试验原理参见图1。三种管材尺寸均选择 $\Phi 114\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 无缝管,长度1 m,外套管选择 $\Phi 168\text{ mm}\times 14\text{ mm}$ 高强度无缝管作为保护管,使用外径95 mm封隔器,2D-SY型电动试压泵,通过开展膨胀试验测试3种管材

的机械膨胀性能。

通过试验发现管材的膨胀过程极为迅速,其变形行为几乎随封隔器压力变化同时进行,观测到的膨胀过程主要分为3个阶段:

(1)初步变形:封隔器在逐步加压过程中,其胶筒部位迅速膨胀并贴服到膨胀管内壁上,当压力超过管材自身的屈服压力值时,管材表面会发生微变形。

(2)变形增大:随着膨胀压力逐步增大,加压过程中金属管剧烈变形会伴随多次响声,管材发生较大程度的变形,管材中间位置与保护管内壁部分贴合。

(3)完全贴合:加压到一定压力,膨胀管外径不再变化,管材完全贴合到保护管外管内壁并产生较强的附着力(见图3)。

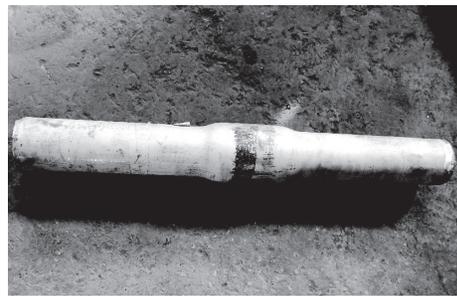


图3 膨胀后的金属管C

Fig.3 Expanded metal tube C

具体试验结果见表1。通过试验发现3种管材均可完全膨胀至保护管内径尺寸。管材A、B虽然具有一定延展性且价格便宜,但起胀压力与贴合压力过大,对封隔器工作压力要求较高。管材A胀后表面变粗糙,有微小裂痕,管材B、C膨胀后表面均匀光滑。胀后3种管材壁厚均变薄,其中管材A、C壁厚平均缩小1 mm,管材C平均壁厚缩小0.5 mm,说明管材A、C延展性能较好。管材C材质为低碳合金钢,具有良好的耐腐蚀、耐热性和机械性能,在水下不污染水质,因此综合考虑各性能后选择管材C作为膨胀管材。

1.2.2 管外橡胶层

为保证膨胀管较稳定地悬挂于孔(井)壁上,增大管与孔(井)壁摩擦力,同时也为防止地层中水、杂物等通过二者间隙进入到孔内,需要在膨胀管外表面粘贴一层具有耐压、耐温、耐腐蚀等功能的橡胶材

表1 膨胀管优选试验

Table 1 Optimization test of expandable tubulars

试样	起胀压力/ MPa	变形压力/ MPa	贴合压力/ MPa	胀前尺寸/ mm	胀后尺寸/ mm	膨胀系数/ %	膨胀情况
管材 A	37	37~47	>47	Ø114×4	Ø140×3.8	22.80	表面不均匀,有微小裂痕
管材 B	40	40~60	>60	Ø114×4	Ø140×3.9	22.80	表面均匀、光滑
管材 C	22	22~34	>34	Ø114×4	Ø140×3.8	22.80	表面均匀、光滑

料作为保护层,增强悬挂能力,并达到封堵目的层的效果。

丁腈橡胶是常用的橡胶品,在一定的压力和温度下硫化后的熟胶具有易加工成形、不变粘、不易折断等特质。橡胶通过粘结剂与金属两界面之间的吸附、扩散、交联反应以及橡胶内部和粘结剂内部的硫化反应,使橡胶套牢固地粘接到金属管表面。橡胶通过硫化还增强了材料自身的弹性、耐温性、耐水性、耐油性等综合性能,增强了膨胀管的密封、悬挂与耐腐蚀性能^[14]。

膨胀管外橡胶层需根据实际施工井况来确定,一般对称设置,上下长度需一致,单个橡胶层长度约为外管长度的15%~25%,加工厚度一般为1.5~3 mm即可。

2 施工工艺研究

2.1 施工技术参数

膨胀管在施工作业前,需要提前确定出所选管材完全贴合井壁的压力与安全膨胀外径,这样在施

工时只需对照表格,在地表设置预定压力,就可确保井下管材膨胀完全。因管外橡胶层对膨胀压力与膨胀系数影响作用较小,可近似将金属管膨胀压力值与膨胀系数作为膨胀管最终技术参数。通过膨胀试验发现,当封隔器膨胀比控制在1.40以内,封隔器整体性能较为稳定,不易出现胶筒破裂问题。通过开展常用口径金属管室内试验(见图4),可获取不同直径封隔器、不同直径金属管膨胀技术参数(见表2)。

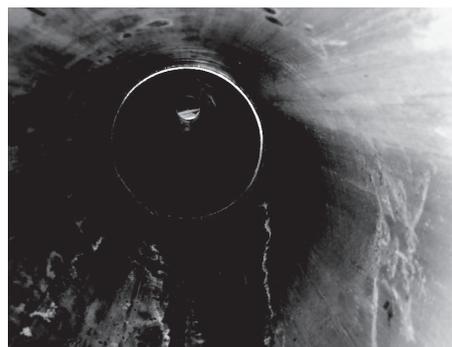


图4 Ø219 mm金属管膨胀试验

Fig.4 Expansion test of Ø219mm metal tube

表2 膨胀管技术参数

Table 2 Technical parameters of expandable tubulars

序号	尺寸/mm	材质	封隔器外径/mm	安全膨胀外径/mm	膨胀系数/%	贴合压力/MPa
1	Ø114×4.0	低碳合金钢	95	140	22.8	34
2	Ø146×4.0	低碳合金钢	128	188	28.7	31
3	Ø168×4.0	低碳合金钢	138	200	19.0	26
4	Ø219×4.0	低碳合金钢	195	273	24.6	21

2.2 井管悬挂力计算

在油气领域下入膨胀管一般有单独悬挂系统或使用机械式销钉剪短方式。由于膨胀管自身重力较小,该技术可使用封隔器低压膨胀,依靠胶筒与金属管内壁间摩擦力,提供一定的悬挂力来完成下管工作。原则上首先给出的膨胀压力要低于管材金属微

变形压力值,其次管材与橡胶筒间最大静摩擦力要大于管材自身重力的3~5倍,以保证一定的安全系数。参考相关文献数据^[15],注水型封隔器加压压力与金属管摩擦力数值对应关系见表3。

如下入外径219 mm、壁厚为6 mm的钢管5 m,则通过计算钢管自重为150 kg左右,换算成重力为

表3 不同坐封力下封隔器胶筒与套管间的摩擦力

Table 3 Friction between the packer sleeve and the casing at different setting forces

加压压力/MPa	最大静摩擦力/kN	滑动摩擦力/kN
4	5.87	4.9
5	8.48	7.6
6	12.10	10.1
8	16.30	12.4
10	18.90	15.6

1.47 kN左右,需要摩擦力为4.41~7.35 kN,在管材不发生变形压力下,则选择4~5 MPa坐封压力即可。如下入到水位以下一定深度,悬挂压力为封隔器坐封压力与克服水压之和。

2.3 施工流程

膨胀管技术施工流程主要包括位置判定、施工准备、管串下入、打压膨胀和效果评价等步骤(如图5所示)。

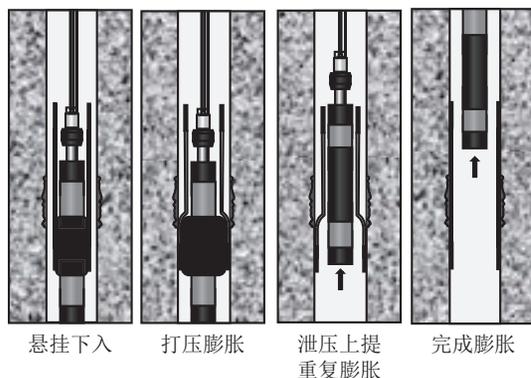


图5 膨胀管技术施工过程

Fig.5 Operation process of the expandable tubular

2.3.1 位置判定

首先要根据钻取获得的岩心资料、物探测井资料、井下摄像和现场施工情况,判断(井)孔内问题地层出现的位置,确定提前计算下护壁的孔段长度或具体补贴位置。

2.3.2 施工准备

根据膨胀后管材的外径以及井孔的内径,确定膨胀管和配套封隔器尺寸。在下入前应做好所有材料及器具的准备工作。对护壁或补贴位置及以上井段进行探孔,确保井/孔径不超最大的膨胀范围,保障施工安全性。

2.3.3 管串下入

系统管串安装顺序为:胀管封隔器(低压力膨胀悬挂膨胀管)+高压接头+钢丝绳及高压管线(绞车)+试压泵+水箱。封隔器在下入前需要在膨胀管内进行膨胀性能测试,然后在低压状态下膨胀悬挂金属管,通过钢丝绳下入预定作业位置。膨胀管长度、封隔器有效膨胀长度和管串提起的高度均需精确测量,以保证系统整体的膨胀质量。

2.3.4 打压膨胀

将膨胀管下放到预定位置后,通过高压泵注水膨胀打压,膨胀压力达到设计要求后停止加压,加压过程中要密切注意压力表指针变化情况,并稳压5~10 min,压力无异常说明井管已经顺利膨胀。第一段膨胀作业完成后,打开泵泄压阀,泄压后上提管串一定高度(小于封隔器的有效作业长度),开启第二段膨胀施工。重复以上步骤,并严格计算好管柱的上提距离,上提高度大于膨胀管长度时即完成整根管的膨胀作业。

2.3.5 效果评价

施工完成后,一般可采用井径测井、电视测井或通径规等手段评价施工效果。最好使用井下电视进行膨胀效果评价,因为其可以直接观测膨胀位置、膨胀后管径等具体图像;若在水下施工且水质浑浊,可采用井径测井、通径规等手段测量井径。

3 现场试验

(1)2020年12月,在贵州省贵阳市白云区沙文镇一工厂正在施工的供水井中开展了膨胀管护壁技术应用试验(见图6)。该处主要为白云岩、灰岩地层,采用气动潜孔锤全面钻进方法,开孔口径245 mm。钻具组合为:Ø245 mm潜孔锤钻头+TH10型冲击器+Ø239 mm扶正器+Ø108 mm钻杆。钻进过程中发现该井在30~32 m位置处,地层较为破碎,钻进下部地层时经常发生掉块卡钻等问题,决定在此位置处开展膨胀管护壁技术应用试验。使用长度为4 m的Ø219 mm×4 mm膨胀管与外径195 mm封隔器作为起胀工具,高压泵型号为2D-SY型,现场使用徐工XSL7/350型钻机。

将膨胀管下入至29.0~33.0 m位置处进行膨胀补贴作业,井管悬挂压力选择为4 MPa,依据试验参数分下、中、上三段完成膨胀补贴,施工时长7 h。因水质浑浊,不能使用井下电视验证护壁效果,现场加



图6 膨胀管护壁技术应用

Fig.6 Application of the expandable tubular wall protection technology

工一外径为260 mm的通径规,发现可以顺利通过事故段,后续该井段较为稳定,无掉块、卡钻等问题的发生,终孔深度196 m,使得该井顺利交付,实现了国内膨胀管技术在水井钻探领域中的首次应用。

(2)2020年11月,在河北省保定市顺平县一水井中开展了膨胀管井管补贴试验。该井在地面下井管20 m位置处有一处破损,造成地层砂及杂物从破损处进入管内致使其无法使用,破损井管内径为245 mm,材质为螺旋卷焊管。使用长度3 m、 $\text{O}219\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 的膨胀管与外径195 mm的封隔器作为起胀工具,选用的高压泵型号为2D-SY型,现场使用宣化SL-800型全液顶驱水井钻机。

首先下入井下电视验证井管破损处的具体位置,无误后将膨胀管下入至18.5~21.5 m位置处进行膨胀补贴作业,井管悬挂压力选择为3 MPa,依据试验参数分下、上二段完成膨胀补贴。结束后,采用井下电视测检膨胀管施工后井内补贴效果。可以观测到,膨胀管上下端口、井管与外管贴合紧密(如图7所示)。膨胀后该井在破损段的内径为237 mm左右,减小8 mm左右,损失井径为膨胀管壁厚。施工时长仅5 h左右,采用金属管膨胀修复破损井管密封性好,牢固耐用,取得了较好的应用效果。

通过现场试验,封隔器式膨胀管技术与传统膨胀管技术相比在短井段(0~12 m)护壁补贴作业时具有明显优势:

(1)主要设备为小型压力泵和封隔器,便于运输与施工,工艺简便,全部施工一般在1天以内完成,施工效率高。

(2)膨胀管材为普通金属管,采购方便。

(3)主要成本为采购封隔器的费用,且其可重复



图7 井下电视观测膨胀管修复效果

Fig.7 Expandable tubular-repaired well observed by downhole TV

使用,总体实施的技术成本较传统技术可降低50%~80%。

4 结论

(1)封隔器式膨胀管技术可解决基岩地区不稳定地层护壁技术难题,可封堵不良含水层段,实现复杂地层不变径钻进目的,可进一步推广应用。

(2)如遇到存在较大溶洞地层时,可选择外径与孔径相差较小的膨胀管,通过只膨胀上下两端方式,实现悬挂与封堵作用。在只损失较小井径的情况下,就可达到封堵并快速通过该类地层的目的。

(3)研发的封隔器式膨胀管技术高效、安全、经济地解决了基岩复杂孔护壁技术难题及井管修复等难题,拓宽了膨胀管技术应用领域,为复杂地层钻井提供了新的解决思路。

(4)受时间限制未开展管材膨胀有限元分析、注浆及膨胀筛管等内容的研究,通过后续进一步研究与设备、材料、工艺优化,该技术在成本、效率和功能上仍有较大的提升空间。

参考文献(References):

- [1] 于好善,王成彪,杨甘生,等.膨胀套管护壁技术研究现状及其工作原理[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(3):1-4.
YU Haoshan, WANG Chengbiao, YANG Gansheng, et al. Study situation of expandable casing technology and the working principle[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011, 38(3): 1-4.
- [2] 李岩,郭军,王文彬.滇东地区页岩气调查云宣地1井钻探施工难点及对策[J].钻探工程,2021,48(8):12-18.
LI Yan, GUO Jun, WANG Wenbin. Drilling difficulties and solutions for Well Yunxuandi-1 for shale gas survey in eastern

- Yunnan[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(8):12-18.
- [3] 崔淑英, 邵玉涛, 陈晓君, 等. 小口径膨胀波纹管护壁技术在四川煤炭普查ZK3-1孔的应用[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2017, 44(9):73-76.
- CUI Shuying, SHAO Yutao, CHEN Xiaojun, et al. Application of small diameter expandable convoluted tubing technology in ZK3-1 drilling for sichuan coal survey[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2017, 44(9):73-76.
- [4] 商瀛心. 等井径膨胀管材料优选研究[D]. 东营: 中国石油大学, 2016.
- SHANG Yingxin. Research on materials optimization for mono hole expandable tubular[D]. Dongying: China University of Petroleum, 2016.
- [5] 张艳军. 实体膨胀管的膨胀力理论计算及试验分析[J]. *机床与液压*, 2019, 47(11):108-111.
- ZHANG Yanjun. Theoretical calculation and experimental analysis for expansive force of entity expand-able tube[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2019, 47(11):108-111.
- [6] 曹川, 任荣权, 王宏伟, 等. 国外膨胀管技术应用新进展[J]. *石油机械*, 2013, 41(5):29-32.
- CAO Chuan, REN Rongquan, WANG Hongwei, et al. New development of expandable tubular technology abroad[J]. *China Petroleum Machinery*, 2013, 41(5):29-32.
- [7] 徐丙贵, 张燕萍, 王辉, 等. 数值模拟在膨胀管修复套损井技术中的应用[J]. *石油勘探与开发*, 2009, 36(5):651-657.
- XU Binggui, ZHANG Yanping, WANG Hui, et al. Application of numerical simulation in the SET(Solid Expandable Tubular) repair for casing damage wells[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(5):651-657.
- [8] 李晓晨, 陈晓君, 杨宏胜, 等. 小口径膨胀波纹管技术在若尔盖铀矿区的应用[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2018, 45(12):20-23.
- LI Xiaochen, CHEN Xiaojun, YANG Hongsheng, et al. Application of slim expandable corrugated tubing in Ruogai uranium mines[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2018, 45(12):20-23.
- [9] 陈晓君, 宋刚, 孟庆鸿, 等. 小口径勘探用可膨胀波纹管 ANSYS 模拟与实验分析[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2014, 41(11):37-40.
- CHEN Xiaojun, SONG Gang, MENG Qinghong, et al. ANSYS simulation of expandable convoluted tubing for small diameter bore prospecting and experimental analysis[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2014, 41(11):37-40.
- [10] 张德龙, 翁炜, 黄玉文, 等. 波纹管堵漏技术及其在地质钻探领域的应用研究[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2012, 39(5):28-30, 52.
- ZHANG Delong, WENG wei, HUANG Yuwen, et al. Research on bellows sealing technology and the application in geological drilling field[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2012, 39(5):28-30, 52.
- [11] 唐海雄, 冯定, 张俊斌, 等. 封隔器工作性能室内试验研究[J]. *石油天然气学报(江汉石油学院学报)*, 2009, 31(3):154-156.
- TANG Haixiong, FENG Ding, ZHANG Junbin, et al. Experiment study on operation performance of packers[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2009, 31(3):154-156.
- [12] 王治国, 王在强, 巨亚锋, 等. K344-108型小直径封隔器的改进与应用[J]. *石油机械*, 2010, 38(8):40-42.
- WANG Zhiguo, WANG Zaiqiang, JU Yafeng, et al. Improvement and application of K344-108 small diameter packer[J]. *China Petroleum Machinery*, 2010, 38(8):40-42.
- [13] 蒋克全, 王宝龙, 巢曷轩. 钢材成分碳当量评价系数及应用[J]. *热处理技术与装备*, 2019, 40(3):6-8.
- JIANG Kequan, WANG Baolong, CHAO Bingxuan. Evaluation coefficient and application on carbon equivalent of steel composition[J]. *Heat Treatment Technology and Equipment*, 2019, 40(3):6-8.
- [14] 何丽霞, 瞿金磊, 刘莉, 等. 丁基橡胶的结构对硫化胶疲劳性能的影响[J]. *高分子材料科学与工程*, 2021, 37(1):81-87.
- HE Lixia, QU Jinlei, LIU Li, et al. Influence of raw rubber structure on fatigue properties of butyl rubber vulcanizate[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2021, 37(1):81-87.
- [15] 王尊策, 管翠翠, 温后珍, 等. Y341-114型注水封隔器胶筒与套管摩擦力试验研究[J]. *石油矿场机械*, 2012, 41(7):66-69.
- WANG Zunce, GUAN Cuicui, WEN Houzhen, et al. Experimental research of Y341-114 water injection well packer rubber-casing wall friction force[J]. *Oil Field Equipment*, 2012, 41(7):66-69.

(编辑 荐华)