

# 膨胀式尾管悬挂器的研究

崔淑英, 邵玉涛, 王跃伟, 宋 刚

(中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

**摘要:**为了解决常规尾管悬挂器过流面积小、密封性能差的缺点,研究了膨胀式尾管悬挂器。主要对膨胀式尾管悬挂器的工作原理,结构原理,关键技术包括替浆技术、固井技术、膨胀悬挂技术、丢手技术进行了研究;解决了膨胀管悬挂的一系列技术难题;对膨胀管受力进行了有限元分析,并将结果与室内试验进行了对比,两者结果基本一致。通过野外试验进一步证明了膨胀式尾管悬挂器能够提供足够的悬挂力,满足悬挂要求。

**关键词:**膨胀管;尾管悬挂器;膨胀锥头;有限元分析

**中图分类号:**P634.8 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)02-0065-06

## Research on expandable liner hanger

CUI Shuying, SHAO Yutao, WANG Yuewei, SONG Gang

(The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

**Abstract:** In order to solve the drawbacks of the conventional liner hanger, such as the small flow area, poor sealing performance, the expandable liner hanger is investigated in this paper, with focus on the working and structural principle, as well as the key technology which covers slurry displacement, cementation, expansion suspension and the junk sub. A series of technical problems with expandable tube suspension have been solved. The finite element analysis for the force of the expandable tube is carried out, and the results are compared with those from the laboratory tests and they are basically in agreement. The field experiments proved that the expandable liner hanger can provide enough suspension force, satisfying the requirement of the suspension.

**Key words:** expandable tube; liner hanger; expansion cone head; finite element analysis

## 0 引言

膨胀式尾管悬挂器是将膨胀套管技术应用于尾管固井方面的一个器具,与实体膨胀管相似,它也是通过液压或机械力将具有一定塑性的膨胀尾管本体进行径向膨胀,使其与上一级套管紧紧锚固在一起,从而实现膨胀尾管悬挂。

随着近年来深井、超深井、大斜度井、水平井、分支井、小井眼小间隙井等钻井技术的不断兴起,尾管固井已成为一种必备的工艺技术<sup>[1]</sup>。尾管悬挂器是尾管固井的专用器具,其性能的优劣直接影响固井施工的成败。

传统卡瓦式尾管悬挂器的不足:

(1) 外露零件多,入井过程易出现悬挂器碰撞,

且在尾管下入遇阻时,由于尾管悬挂器自身结构的原因对开泵循环或活动尾管等措施都有限制,降低了井下解阻的能力<sup>[2]</sup>。

(2) 过流面积小。尾管悬挂器必须具有足够的过流面积方能保证施工安全,否则,会引起漏失、水泥返高不够、环空气侵等复杂情况的发生<sup>[3]</sup>。传统卡瓦式尾管悬挂器与膨胀式尾管悬挂器悬挂效果对比见图 1。

(3) 固井后套管环空水泥密封性能差。常规卡瓦式尾管悬挂器无论是机械式或液压式坐挂后均不具备密封功能,为提高尾管顶部封固质量一般在常规悬挂器的顶部增加一套封隔器,但是封隔器在施工中存在提前坐封的潜在风险<sup>[2]</sup>。据统计数据表明,多达

收稿日期:2018-12-10; 修回日期:2019-01-08 DOI:10.12143/j.tkgc.2019.02.012

基金项目:地质调查工作项目“膨胀式尾管悬挂技术及固井工艺研究”(编号:1212011120240)

作者简介:崔淑英,女,汉族,1983年生,工程师,机械制造及其自动化专业,硕士,主要从事工程机械设计、地质钻探工艺及器具研究工作,河北省廊坊市金光道77号,306011322@qq.com。

引用格式:崔淑英,邵玉涛,王跃伟,等.膨胀式尾管悬挂器的研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(2):65-70.

CUI Shuying, SHAO Yutao, WANG Yuewei, et al. Research on expandable liner hanger[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(2):65-70.

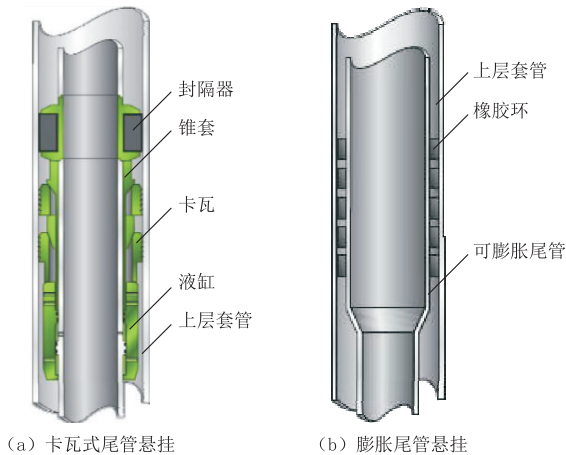


图1 卡瓦式尾管悬挂与膨胀尾管悬挂效果示意图  
Fig.1 Diagram of slip type liner suspension and expandable liner suspension

45%~60%的常器坐挂后均会出现水力泄漏<sup>[1]</sup>。

针对传统卡瓦式尾管悬挂器的不足,以及随着膨胀套管技术的不断进步,国外许多公司积极探索将膨胀套管技术应用于尾管悬挂器上。膨胀式尾管悬挂器与传统卡瓦式尾管悬挂器相比具有如下优点:(1)过流面积大,尾管与上层套管之间的环间隙仅为固定到尾管外侧的橡胶环被压缩后的厚度;(2)密封性好,通过膨胀锥头的移动,将尾管进行膨胀,固定到尾管外侧的橡胶环被挤压到上层套管的内壁上,被压缩后的橡胶环同时起到密封和提供尾管悬挂力的两个作用。膨胀式尾管悬挂器国外比较代表性的有里德公司的 HETS-LH 悬挂器、TIW 公司的 XPAK 悬挂器、哈利伯顿公司的 VersaFlex 悬挂器和威德福公司的 EXR 悬挂器等<sup>[4]</sup>。国内在这方面的研究还处于起步阶段,石油领域大直径规格的膨胀式尾管悬挂器有应用成功的案例,

但是地质钻探领域却未引进相关技术和服 务,原因大致如下:(1)石油领域钻井规格与地质钻探领域钻孔规格相差较大,没有可以直接用于地质方面的膨胀尾管;(2)地质钻探与石油钻井相比经费较少,直接引进相关技术进行钻探服务的费用高昂,不适用于地质钻探领域。由于以上原因,若想在地质钻探领域应用膨胀管技术,则需该领域的技术人员从基础开始进行研究。

勘探技术研究所自 2008 年开始着手研究小口径膨胀套管护壁技术,现已研制成功多种规格的膨胀套管,分别可在  $\varnothing 76$ 、96、122 mm 规格的裸孔内进行护壁,其中  $\varnothing 76$ 、96 mm 两种规格的膨胀套管已经在四川、广西、福建、山东、甘肃等多个工地进行了成功的应用,挽救了多个即将面临报废的钻孔,为施工方挽回了巨大的经济损失。膨胀式尾管悬挂技术作为膨胀套管技术的一个延伸,勘探技术研究所也进行了较为深入的研究,并取得了一定的成果<sup>[5-6]</sup>。

## 1 结构原理

膨胀式尾管悬挂器自上而下主要由外套管、送入工具、橡胶环(已硫化至膨胀管外壁)、膨胀管、膨胀锥头、尾管、注浆塞组成。膨胀锥头内置于膨胀管内,液压力推动膨胀锥头自下而上移动,膨胀后的膨胀管压缩橡胶环,压缩橡胶产生悬挂力将膨胀管悬挂到外套管内壁上,而尾管与膨胀管通过丝扣连接,进而将尾管悬挂。膨胀管悬挂后通径仅减小橡胶压缩后的厚度及膨胀管壁厚,橡胶环压缩后能够完全将环间隙密封,防止发生水力泄漏。膨胀尾管悬挂器结构原理见图 2。

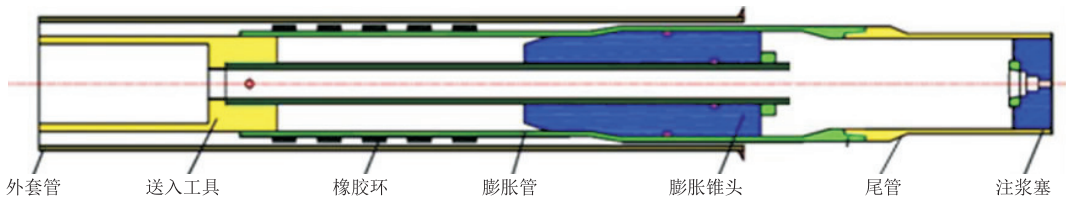


图2 结构原理图  
Fig.2 Structural diagram

## 2 工作原理

膨胀式尾管悬挂器的基本工作原理:

(1)利用钻杆连接送入工具将膨胀式尾管悬挂器送入到位。

(2)向尾管悬挂器内注入水泥,水泥通过注浆塞进入尾管与孔壁的环间隙,进行固井。

(3)投入胶塞,注入清水或泥浆,液压力推动胶塞下行,胶塞下行过程中刮除尾管内壁水泥,完成替浆。

(4)替浆完毕,继续加大泵压,膨胀头在液压力的作用下由下而上运动,运动过程中膨胀管向外膨胀,将橡胶环压缩到外套管上,实现尾管悬挂。

(5)膨胀过程完毕后,将膨胀头、中心管和送入工具一起提出井外,实现丢手。

(6)最后,下入钻头,将注浆塞打通,完成整个固井过程。

### 3 关键技术

根据工作原理,膨胀式尾管悬挂器固井工艺过具有如下 4 项关键技术。

#### 3.1 双级复合胶塞替浆技术

水泥通过钻杆、中心管、尾管,最后进入孔内,因此,注完水泥后在钻杆、中心管和尾管内壁不可避免地会有水泥残留,如果不将这些残留在内壁的水泥清除,必然会影响尾管悬挂器的后续使用,同时影响尾管内径大小。如何有效地替除残留水泥是膨胀式尾管悬挂器需要解决的关键问题之一。

依据钻杆、中心管和尾管的不同内径,设计大、中、小三种胶塞。大胶塞外径略大于尾管内径,中胶塞外径略大于钻杆内径,同理,小胶塞外径略大于中心管内径。替浆时,先将中胶塞与小胶塞组成的一级复合胶塞投入钻杆,一级复合胶塞下行过程中刮除钻杆内壁残留水泥,行至钻杆下接头时,中胶塞落到钻杆接头上无法继续下行,继续加大泵压,连接中胶塞和小胶塞的销钉剪断,小胶塞通过中心管,刮除中心管内壁水泥,然后小胶塞与大胶塞复合组成二级复合胶塞。增大泵压,将大胶塞上的悬挂销钉剪断,二级复合胶塞下行过程中刮除残留在尾管内部的水泥,行至注浆塞端面时停止,替浆过程完毕。双级复合胶塞示意图见图 3。

#### 3.2 防返浆精准固井技术

水泥通过尾管进入尾管与孔壁环空间隙后,需要防止过量水泥进入到橡胶环之间,从而影响膨胀管的悬挂,因此,需要提前计算固井所需的水泥剂量。将水泥泵入孔内后,进行替浆,替浆过程中孔口泥浆泵始终对膨胀尾管内的液体进行加压,以推动橡胶塞向下运行,从而将尾管内泥浆全部替入孔内的环空间隙。替浆完毕后尾管内压力下降,孔内壁与尾管间的压力大于尾管内的压力,在压力差的作用下,水泥会部分返回尾管内部,直至内外压力平衡。为防止返浆现象的发生,我们将注浆塞设计成

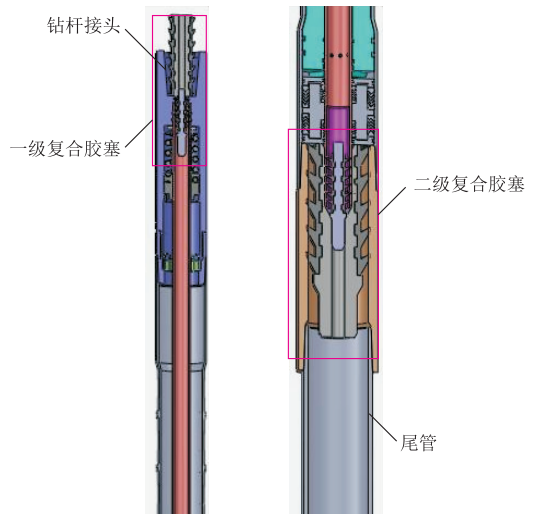


图 3 双级复合胶塞

Fig.3 Double stage compound rubber plug

单向阀的形式,尾管内部压力大于外部压力时单向阀打开,水泥进入孔壁间隙,而尾管外部压力大于内部压力时单向阀闭合,从而防止外部水泥返回尾管内部,因此理论计算的水泥剂量与实际需求剂量基本吻合,既可使尾管与孔壁环空间隙充满水泥,又可防止过量水泥进入橡胶环。

#### 3.3 高压反向膨胀悬挂技术

膨胀管依靠膨胀锥头在管内的移动而膨胀,而膨胀锥头需要在高压液体的推动下移动,如何建立起高压环境推动膨胀锥头是实现膨胀管膨胀的关键技术。专门设计的高压组合密封(见图 4)置于膨胀锥头下方,膨胀前向中心管内投球,投球将中心管下端封闭,继续增大泵压,中心管上的爆破孔爆破,泥浆通过爆破孔进入膨胀头下方与高压密封之间的空间,高压密封能够承受高达 30 MPa 的液压力,在高压的作用下膨胀锥头自下而上移动,其锥头的大端在移动过程中将膨胀管膨胀。膨胀后的膨胀管不能直接悬挂到上层套管,膨胀管悬挂的关键技术是在膨胀管外侧硫化厚度、长度适中的橡胶环,橡胶具有可压缩性,适当的压缩量可以提供膨胀管足够的悬挂力,从而将膨胀后的尾管悬挂到上层套管上。

#### 3.4 拦簧悬挂倒扣丢手技术

为能顺利将膨胀锥头提出孔外,完成膨胀后的丢手,需满足以下 3 个条件:(1)需在膨胀锥头上设计悬挂部位。(2)需要确保丢手前膨胀管膨胀完毕,且膨胀锥头已悬挂。(3)丢手过程不能对其他零部件的连接牢固性造成影响。

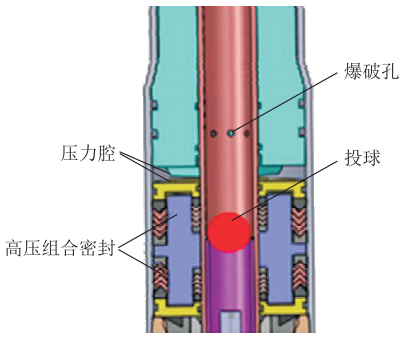


图4 高压组合密封

Fig.4 High pressure combined seal

基于以上3点,为实现顺利丢手,进行了下列设计:

(1)设计了可悬挂阶梯变径膨胀锥头(见图5),其上端的悬挂端可顺利进入拦簧,拦簧固定在送入工具下接头内部,送入工具下接头丝扣为倒扣,膨胀完毕后正转钻杆,下接头的丝扣松开,上提钻杆可将膨胀锥头提出,除此外丝扣设计为倒扣外,其余丝扣

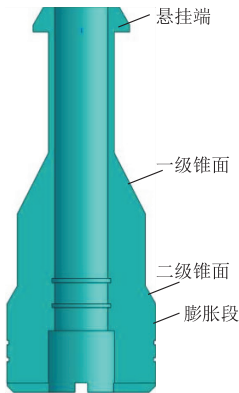


图5 可悬挂阶梯变径膨胀锥头

Fig.5 Hanging type stepped variable diameter expansion cone head

均为正扣连接,因此可保证丢手过程不对其他零部件的连接造成影响。

(2)根据膨胀锥头悬挂端与一级锥面之间的长度,确定回收腔的长度,以保证膨胀锥头进入回收腔前悬挂端已进入拦簧。若设计不合理,膨胀完毕后悬挂端未进入拦簧,由于缺乏锥面的密封,膨胀锥头与膨胀套管之间仅通过O形圈密封,膨胀过程O形圈易发生磨损,因此膨胀完毕后压力下降,膨胀锥头有可能掉入尾管下端,无法实现膨胀锥头的回收,造成丢手失败。拦簧悬挂示意图见图6。

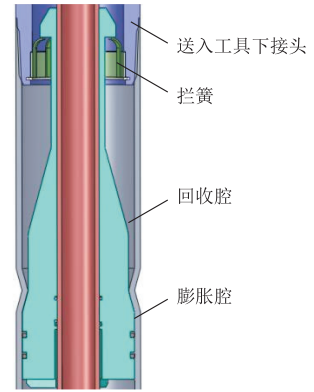


图6 拦簧悬挂示意图

Fig.6 Reed suspension diagram

## 4 技术参数

### 4.1 膨胀试验

目前研制出了 $\text{O}168/127\text{ mm}$ 规格的膨胀式尾管悬挂器,室内试验参数见表1。

试验数据表明:尾管悬挂器膨胀管的膨胀力随着壁厚的增加而增加。膨胀后轴向长度有一定的

表1  $\text{O}168/127\text{ mm}$  膨胀式尾管悬挂器技术参数Table 1 Technical parameters of  $\text{O}168/127\text{ mm}$  expandable liner hanger

壁厚/ mm	膨胀前外 径/mm	膨胀前内 径/mm	膨胀后外 径/mm	膨胀后内 径/mm	膨胀前长 度/mm	膨胀后长 度/mm	膨胀率/% (内径)	轴向伸缩 量/mm	膨胀压力/ MPa	膨胀力/ kN
6.0	133	121	143.7	132.5	240	233	9.5	-8	26	353
4.5	133	124	144.1	135.6	190	185	9.3	-15	18	261
3.0	130	124	141.7	136.0	270	262	9.5	-21	15	218

收缩量,且壁厚越小,轴向收缩量越大。

建立了3种不同管壁厚的有限元分析模型(见图7),分析壁厚不同受力后壁厚变化与管轴向位移变化的关系。有限元分析结果显示壁厚越小膨胀后轴向收缩量越大,分析结果见图8。

从有限元分析结果可以看出,其膨胀过程中壁

厚与轴向收缩量的关系与室内试验数据相吻合,壁厚越小,轴向位移越大,即轴向收缩量越大。考虑到膨胀管的连接,在膨胀力可以接受的范围内,壁厚越大越好。

### 4.2 悬挂试验

膨胀头向上或向下运动,将膨胀管向外膨胀,

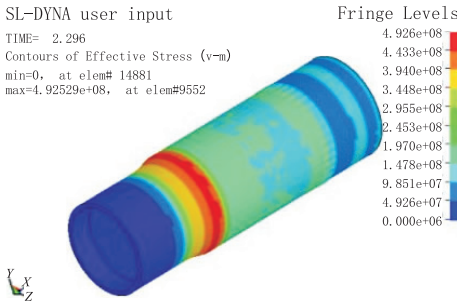


图 7 膨胀过程应力云图

Fig.7 Stress cloud map of expansion process

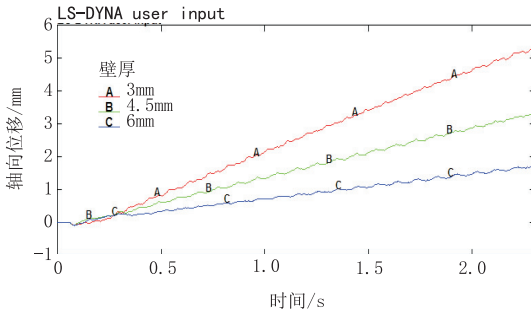


图 8 轴向位移与壁厚关系图

Fig.8 Relationship between axial displacement and wall thickness

硫化到膨胀管外壁上的橡胶环被压缩到膨胀管与外管之间,从而实现悬挂。因此,悬挂力的大小与橡胶环的参数密切相关,不同规格橡胶环产生悬挂力的试验结果见表 2 和表 3,橡胶参数示意图 9。

表 2 压缩量为 2 mm 时橡胶环与悬挂力的关系

Table 2 Relationship between rubber ring and suspension force with compression 2mm

橡胶环数	橡胶与外管交接长度/mm	膨胀液压力/MPa	膨胀力/kN	悬挂液压力/MPa	悬挂力/kN
3	65	26	360	4	102
5	115	26	360	6	153
7	165	26	360	9	229
9	215	26	360	14	356

表 3 压缩量为 3 mm 时橡胶环与悬挂力的关系

Table 3 Relationship between rubber ring and suspension force with 3mm compression

橡胶环数	橡胶与外管交接长度/mm	膨胀液压力/MPa	膨胀力/kN	悬挂液压力/MPa	悬挂力/kN
3	65	29	420	6	153
5	115	29	420	10	254
7	165	29	420	13	331
9	215	29	420	16	407

从表 2 和表 3 可看出,橡胶宽度和间隔相同的情况下,橡胶环数越多所产生的悬挂力越大。在橡胶宽度和间隔相同的情况下橡胶与外管的交接长度

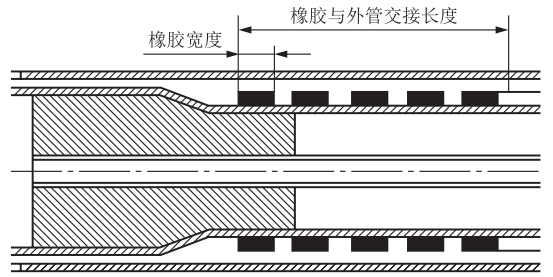


图 9 橡胶参数示意图

Fig.9 Rubber parameter diagram

越长产生的悬挂力越大。

### 5 野外试验

使用 1500 m 水井钻打孔对膨胀尾管悬挂工艺进行野外试验。根据试验样品的长度在空地上打出深度为 6 m、直径为 194 mm 的孔,将  $\varnothing 168$  mm 的套管下入  $\varnothing 194$  mm 的孔内,在套管与孔壁的间隙注入水泥,水泥将外套管固定好以后,下入直径为 151 mm 的钻头继续向下打进 3 m 深。钻孔完毕后下入膨胀尾管系统,然后按照固井工艺流程进行固井作业。丢手完毕后,进行悬挂力测试,缓慢对膨胀管加压,压力达到 15 MPa 后,受钻机限制压力无法继续上升,保持该压力 30 min,膨胀管未出现松动。悬挂力达到 400 kN,已经满足预期设计要求。图 10 和图 11 分别是野外试验中悬挂器下入和测试悬挂力过程图。



图 10 下入悬挂器

Fig.10 Running in the hanger



图 11 测试悬挂力

Fig.11 Suspension force testing

### 6 结论

(1)从悬挂效果看,膨胀式尾管悬挂器与常规卡瓦式悬挂器相比过流面积大、密封效果好、能够适应更小的环空间隙。从经济效益看,可以节省大量泥

浆用量、水泥用量和套管用量。

(2)在研究过程中发现,膨胀管材是限制该项研究和应用的一大重要因素,我国必须研究出更加适用于膨胀的材质,才能使该项研究有更广阔的发展空间。

(3)深井和超深井的高温是考验尾管悬挂器的一个重要因素。尾管悬挂器的密封元件为橡胶,研究更耐高温的密封元件,是促进膨胀式尾管悬挂器更快发展的又一重要因素。

### 参考文献(References):

- [1] 唐明,滕照正,宁学涛,等.膨胀尾管悬挂器研究及应用[J].石油钻采工艺,2009,31(6):115-116.  
TANG Ming, TENG Zhaozheng, NING Xuetao, et al. Research and application of expandable liner hanger[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009,31(6):115-116.
- [2] 郭朝辉,马兰荣,姚辉前,等.膨胀式尾管悬挂器在国外油田的使用[J].石油机械,2009,37(9):162-165.  
GUO Zhaohui, MA Lanrong, YAO Huiqian, et al. Application of expandable liner hangers in foreign oil fields[J]. China Petroleum Machinery, 2009,37(9):162-165.
- [3] 马开华.关于国内尾管悬挂器技术发展问题的思考[J].石油钻采工艺,2008,30(6):108-112.  
MA Kaihua. A consideration on the development of liner hanger technologies in China[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008,30(6):108-112.
- [4] 郭朝辉,马兰荣,朱和明,等.国内外可膨胀尾管悬挂器的新进展[J].石油钻探技术,2008,36(5):66-69.  
GUO Zhaohui, MA Lanrong, ZHU Heming, et al. New development of overseas expandable liner hanger[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008,36(5):66-69.
- [5] 张化民,于好善,宋刚,地质勘探用膨胀波纹管截面设计与选择[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(8):55-59.  
ZHANG Huamin, YU Haoshan, SONG Gang. Design and selection of cross section of expandable convoluted tube for geological exploration[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015,42(8):55-59.
- [6] 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):37-40,45.  
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):37-40,45.
- [7] 陈功剑,李春福,王朋飞,等.可膨胀管技术及其在石油工业中的应用[J].石油仪器,2009,23(2):65-67.  
CHEN Gongjian, LI Chunfu, WANG Pengfei, et al. Technology of the expandable tube and its application in petroleum industry[J]. Petroleum Instruments, 2009,23(2):65-67.
- [8] 李日宁,贺新敬,刘今朝,等.可膨胀管技术及其在石油钻采行业中的应用[J].石油机械,2002,30(7):66-68.  
LI Rining, HE Xinjing, LIU Jinzhao, et al. Expandable tube technology and its application in oil drilling industry[J]. China Petroleum Machinery, 2002,30(7):66-68.
- [9] 姚辉前,任凌云,郭朝辉,等.可膨胀尾管悬挂器膨胀材料及膨胀方式[J].石油钻探技术,2010,38(1):72-75.  
YAO Huiqian, REN Lingyun, GUO Zhaohui, et al. Expansion material and expansion approach of expandable liner hanger[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010,38(1):72-75.
- [10] 练章华,乐彬,杨斌,等.膨胀套管中的橡胶筒尺寸设计分析[J].石油机械,2006,34(6):24-26.  
LIAN Zhanghua, LE Bin, YANG Bin, et al. Analysis on the design of rubber sleeve size of expansion casings[J]. China Petroleum Machinery, 2006,34(6):24-26.
- [11] 张煜,安克,张延明,等.完井修井膨胀悬挂器的研制与应用[J].石油学报,2011,32(2):364-367.  
ZHANG Yu, AN Ke, ZHANG Yanming, et al. Technology and application of expandable hanger on completion and workover engineering[J]. Acta Petrol Sinica, 2011,32(2):364-367.
- [12] 吴柳根,滕照正,侯婷,等.国内尾管固井完井技术现状[J].石油矿场机械,2013,42(10):52-56.  
WU Liugen, TENG Zhaozheng, HOU Ting, et al. Development status of liner cementing and liner completion technology in China[J]. Oil Field Equipment, 2013,42(10):52-56.
- [13] 郭建国,深井、大斜度井尾管悬挂固井工艺[J].石油钻采工艺,2005,27(2):9-11.  
GUO Jianguo. Drilling liner cementing technology in deep and high angle well[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2005,27(2):9-11.
- [14] 唐志军.膨胀管技术及应用[J].河南石油,2004,18(5):48-50.  
TANG Zhijun. Bulged tube technology and its application[J]. Henan Petroleum, 2004,18(5):48-50.
- [15] 张金龙,阮臣良,郭朝辉,等.旋转尾管固井关键技术分析[J].石油机械,2011,39(5):88-91.  
ZHANG Jinlong, RUAN Chenliang, GUO Zhaohui, et al. Analysis on key technology of rotary liner cementing[J]. China Petroleum Machinery, 2011,39(5):88-91.

(编辑 王建华)