

# 连续油管作业中油管变形的判断方法

刘磊

中国石油集团长城钻探工程有限公司测试分公司 北京 100101

通讯作者: Email: ll88.gwde@cnpc.com.cn

引用: 刘磊. 连续油管作业中油管变形的判断方法[J]. 油气井测试, 2024, 33(2): 38-43.

Cite: LIU Lei. Method for judging oil pipe deformation during coiled tubing operations[J]. Well Testing, 2024, 33(2): 38-43.

**摘要** 连续油管作业中遇到的软阻、软卡现象会增大作业风险,而油管弯曲变形导致的连续油管软阻、软卡,其判断方式较难,传统的陀螺仪测井斜等方法也难以明确。采用排除法,通过循环冲洗、钢丝探查、连续油管钻磨等工艺依次排除井筒结蜡、沥青及结垢的可能性,判定油管弯曲,并用钢丝短工具串进一步验证,建立了连续油管作业中软阻、软卡的分析步骤和对应的处理方法。通过XX井的现场实践,应用连续油管作业中油管弯曲变形的判断方法,最终判定油管弯曲是导致连续油管遇卡的原因,并用相应的处理方法成功解卡。该方法可为同类型连续油管遇阻遇卡问题的处置提供借鉴。

**关键词** 油管弯曲;连续油管;软阻;软卡;钢丝作业;铅印;循环洗井;钻磨

中图分类号: TE273

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2024.02.007

## Method for judging oil pipe deformation during coiled tubing operations

LIU Lei

Well Testing Company, CNPC Greatwall Drilling Company, Beijing 100101, China

**Abstract:** The occurrence of soft obstruction and soft sticking in coiled tubing operations increases operational risks. However, determining the presence of soft obstruction and soft sticking caused by bending deformation of the tubing poses great challenges, and traditional methods such as well deviation measurement with gyroscope are often inconclusive. In this study, a method based on exclusion was proposed. By sequentially eliminating the possibilities of wax deposition, asphaltene deposition, and scaling through techniques such as circulating washing, wireline probing, and coiled tubing milling, the tubing bending deformation was determined, and further verification was conducted using short wireline tools. Analytical steps and corresponding treatment methods for dealing with soft obstruction and soft sticking in coiled tubing operations were established. Through field practices in Well XX, through applying the method for judging tubing bending deformation in coiled tubing operations, the tubing bending was determined as the cause of coiled tubing sticking, which was successfully solved using appropriate treatment methods. This method can serve as a reference for addressing similar issues of obstruction and sticking encountered in coiled tubing operations.

**Keywords:** tubing bending; coiled tubing; soft obstruction; soft sticking; wireline operation; letterpress printing; circulating well washing; tubing milling

连续油管技术已广泛用于钻井、完井<sup>[1-2]</sup>、试油、采油采气<sup>[3-4]</sup>、修井、测井和油气集输等油气田作业领域,被誉为“万能作业机”<sup>[5-6]</sup>,随着其应用的普及,连续油管遇阻、遇卡事故的发生频率也大幅增加,史海涛<sup>[7]</sup>概述性的介绍了连续油管作业过程中五种典型的遇卡类型,包括砂屑卡、落物卡、套变卡、水泥卡和封隔器卡,提出了针对性的解卡方法;郭彪等<sup>[8]</sup>通过分析页岩气A井钻磨解卡实例,提出了一套可行的连续油管钻磨遇卡解决方案;刘研言等<sup>[9]</sup>通过对超长水平井连续油管下入影响因素的分析和筛选,利用经典管柱力学进行影响因素定量

计算分析,确定了连续油管尺寸、壁厚对连续油管下入深度的影响,明确提出通过加入水力振荡器和添加金属减阻剂来降低摩擦系数的方法,可以有效提高连续油管的下放深度;王方祥等<sup>[10]</sup>针对连续油管在长水平段的螺旋自锁问题,设计了频率可调、振动稳定、适用性强的机械振荡器,研发了新型金属降阻剂配方,总结了矿化度、pH值、温度等对摩擦系数的影响规律,形成连续油管在长水平井段推进的防自锁技术,增加了连续油管在水平段的推进深度;刘健等<sup>[11]</sup>通过假设连续油管初始形态为正弦形态,受外载发生屈曲后由正弦形态变成螺旋屈曲形

态的基础上,推导出在斜直井中考虑残余应变的连续油管螺旋屈曲载荷计算新公式;马卫国等<sup>[12]</sup>着重考虑连续油管过弯曲井段的实际作业条件,将连续油管分成若干微段单元体,计算了连续油管在弯曲井段的接触应力和轴向力,并最终导出连续油管弯曲井段的变形规律。肖兵等<sup>[13]</sup>采用间隙元理论,考虑了连续油管与套管的接触摩阻力、管内外液体阻力、环空间隙以及下放速度等因素,建立了水平井连续油管下放过程的力学模型,分析了油管下放速度及环空间隙对管柱的受力变形影响,得出常规连续油管可下放的水平段极限深度。刘亚明等<sup>[14]</sup>通过校核连续油管下入过程中的最大抗拉强度条件、摩擦阻力条件和屈曲变形条件等,探究了连续油管冲砂作业时最大下入深度。大量的连续油管研究多集中在大斜度井、水平井因连续油管自身屈曲导致的自锁分析上,通过对井内连续油管屈曲状态的理论研究,提出了各种防自锁技术,以达最大下入深度。然而,前人对连续油管下入软阻、上提软卡现象却少有研究。现结合一口侧钻井的作业实例,分析可能导致软阻、软卡的原因及通常处理过程,最终运用排除法判定井内油管弯曲是导致连续油管软阻软卡的原因,最后用钢丝短工具串进行验证,为同类型连续油管遇阻问题的处理提供了借鉴经验。

1 弯曲变形的判断分析的原理和步骤

连续油管在井内起下过程中主要受到自身重力、井内液体的浮力,井口压力的上推力、流体的摩擦阻和井壁的支撑力和摩擦力。在无法自喷的井筒内,流体摩擦阻和井口压力上推力可忽略不计。因此单位长度上的连续油管受力分析可简化如下:

$$F_{\text{拉力}} = \pm Weight \times g \times \sin\alpha \times \mu + Weight \times g \times \cos\alpha - F_{\text{浮力}}$$

式中: $F_{\text{拉力}}$ 为连续油管所受轴向拉力,N; $Weight$ 为连续油管自重,kg; $g$ 为重力加速度, $m/s^2$ ; $\alpha$ 为井斜角; $\mu$ 为摩擦系数; $F_{\text{浮力}}$ 为井内液体对连续油管的浮力,N;上提连续油管时摩擦力为正值,下放连续油管时摩擦力为负值。

但是当油管弯曲变形时,连续油管的皮带效应(belt Effect)会导致与连续油管起下方向相反的附加摩擦力增加<sup>[15]</sup>。下放连续油管,连续油管因其自身挠性,会顺从于油管变形状态而持续下入(见图 1a),下放悬重会有轻微变化,但变化不

大;上提连续油管时,连续油管的上提力克服连续油管自重和摩擦力,使得连续油管处于拉直状态(见图 1b),导致连续油管在两个弯曲变形处受到垂直于井壁方向的相互挤压力,而且油管变形越严重、上提力越大,径向挤压力越大,此力使得连续油管的摩擦力大幅增加。在地面表现为:随着连续油管的不断下入悬重增加趋势不断减缓至遇阻显示,上提连续油管时会出现一段距离的持续过提现象,行业内通常称为连续油管的软阻、软卡现象。

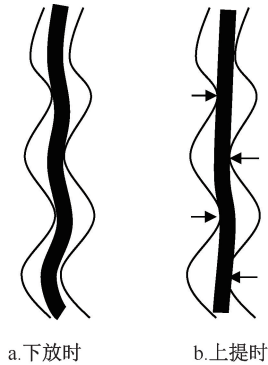


图 1 下放、上提连续油管时状态图  
Fig. 1 CT condition during RIH or POOH

连续油管作业中的软阻、软卡现象多由井筒内的稠油、原油中析出的沥青或蜡质、井筒结垢或井底聚集的污泥等粘稠物质引起的,通常可通过大排量冲洗、热油或者化学药剂溶解、机械钻磨的方式进行处理。油管弯曲变形导致的连续油管软阻、软卡现象较为少见,判断方式也较难,传统的陀螺仪测井斜等方法也难以明确,可按如下步骤使用排除法进行判断(见图 2)。

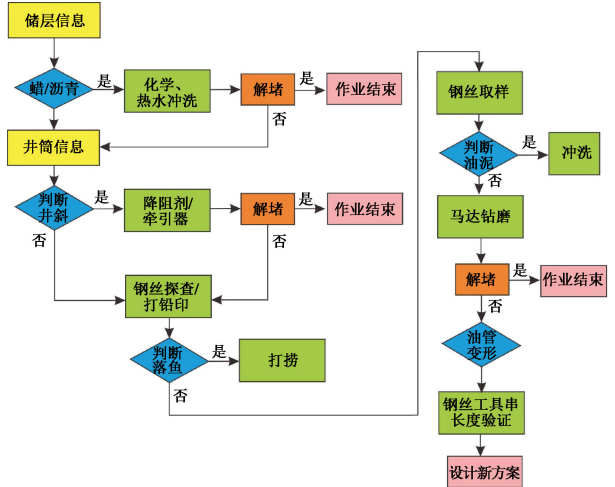


图 2 连续油管作业中油管变形判断方法流程图  
Fig. 2 The flowchart of deformation judgement method during CT Operating

### 1.1 收集储层流体信息,分析储层原因

连续油管作业中 80% 的软阻、软卡是由沥青、蜡质等的析出引起的,因此储层信息是判断连续油管软阻、软卡原因的重要依据。沥青或蜡等杂质析出后会在井筒内壁附着,连续油管下入时会黏附在连续油管与油管中间,并在工具下部不断堆积,随着下入的深度的增加,黏附距离越长,堆积物越多,连续油管逐渐遇阻并不断加重,表现为典型的软阻、软卡现象。不同的区块,不同的层位,油质不同,随着长时间的开采开发,油田管理者基本都已掌握本区块的油品特性,如沥青或蜡质含量、沥青质的析出压力、温度以及在井筒中的析出深度等,通过此类信息的收集可以提前预判连续油管的软阻、软卡现象,在编制作业设计时制定合理的解卡措施。针对沥青析出严重的油井,使用专用溶解剂配合强力喷射头进行大排量冲洗,效果较好;对蜡质析出严重的井,通常采用热水或热油循环冲洗,连续油管洗井清堵作业在各大油田得到了广泛的应用。

### 1.2 了解井况、井史资料,判断井筒情况

井史资料可以有效辅助判断因井斜或井内落物导致的遇阻现象,特别是在大斜度或水平井中,井身轨迹和井筒状态对悬重的影响尤为明显。通过模拟软件,可以计算出不同井斜状态下的悬重随深度变化曲线(见图 3)。

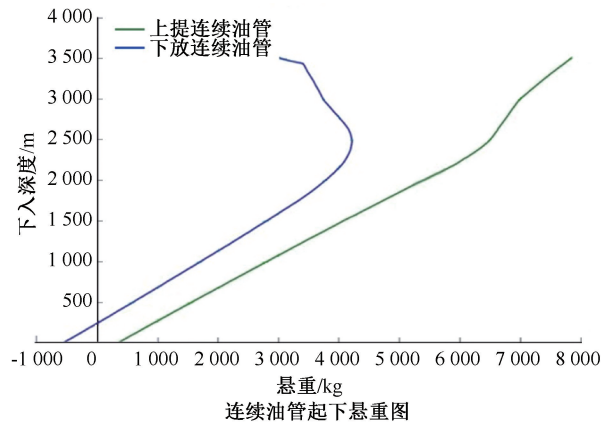


图 3 连续油管在水平井中的悬重深度变化曲线  
Fig. 3 CT weight vs depth during tripping in horizontal well

可以看出在直井段中悬重深度变化曲线为一条斜直线,随着连续油管不断下入,进入斜井段,井斜增加,单位深度的悬重增加量减小,当连续油管在垂直方向的重力分力不足以克服连续油管与井壁的摩擦力时,悬重不再增加而转为减小直至自锁,在地面表现为连续油管的软阻现象。当井筒内

存在较多杂质或进入裸眼井段时,连续油管与井壁的摩擦力会显著增加,同样出现软阻现象。同时根据近期作业情况,可以快速的了解目前井筒状态,如钢丝作业通井是否顺利、作业过程中是否带出井筒杂质等,为本次作业遇到的特殊情况提供判断依据。对于井筒信息难以明确的井,采用大排量循环冲洗是通常的做法,如现场可以协调热水、高效溶剂或高粘液,往往会有较好的效果。

### 1.3 钢丝辅助探查

钢丝设备小巧玲珑,动复原方便,作业快捷,被广泛应用于地层测压、井筒堵塞器投捞、阀门开关等作业中。相对连续油管设备钢丝起下速度更快,不受挠性的影响在井筒内更容易下入,发生卡阻事故时造成的不利影响相对较小,后续解决处理的可操作空间大,损失较小,因此也常用于异常井筒的探查。钢丝探查常用的作业方式有通井规通井、打铅印和井筒内取样等,需根据井况进行选择。其中钢丝通井作业是最基础的探查方式,一般老井在作业时首先要进行通井,探明井筒情况,防止后续下入复杂工具时出现遇阻或遇卡的情况;打铅印作业通常用于井内落鱼鱼顶情况的探查,平底铅模撞击在硬质鱼顶上产生压痕,可以清晰的判断出鱼顶形状、所处位置等信息,为后续打捞方案的制定提供依据,但对于油污、泥沙等软质异物,铅印撞击时产生缓冲,无法产生压痕,难以清晰的判断井底情况;取样作业适用于获取井底油污、泥沙、碎屑等,明确井筒或井底杂质,为井筒清理方案以及溶解剂的选择提供依据。

钢丝设备也有配套的井筒刮削工具,能够对井壁进行简单的清理,但钢丝和井下工具的自然悬重有限,不能产生下推力,只靠震击器的锤击作用向下刮削,挂掉的杂质会不断堆积或落入井内,清理能力和清理效果有限。

### 1.4 马达钻磨,清理井壁结垢

井壁结垢严重也会造成连续油管下入困难,出现软阻、软卡现场。对于注水井或含水量高的井,经过长时间的开发,水中钙镁离子在井壁聚集析出结成水垢,导致井壁粗糙,井筒内径缩小,井壁对连续油管的束缚度增加,侧向支撑力更大,进而导致与井壁的摩擦力大幅增加,严重时出现软阻现场。通常使用高压旋转喷头对井壁进行全方位喷射冲洗,大排量循环将水垢带出井筒,对结垢严重的井可配合少量低浓度酸液或直接采用马达钻磨的机



械清理方式,效果更佳。

### 1.5 排除法确定为油管变形,并用钢丝工具验证

连续油管软阻、软卡后通常会按以上步骤逐步进行分析,根据现场资源,采用相对应的措施进行解阻,排除油管沥青、蜡堵以及结垢的原因后,可考虑油管弯曲变形的影响。对于油管变形的诊断,尚无直观可靠的验证方法,但钢丝不受皮带效应的影响,刚性的井下工具串越短,在弯曲变形油管内的可通过能力就越强,下入越深,因此可以通过改变钢丝工具串的长度来进行验证。

本文结合一口典型井的软阻、软卡实例,通过大排量冲洗、钢丝取样、机械钻磨等步骤逐一排除油管内部结蜡、结垢的因素,最终通过钢丝短工具串下入验证为油管弯曲变形。

## 2 现场应用

XX井是T国一口侧钻井,井深3 118 m,垂深3 072 m,最大井斜26.68°位于2 396 m处,套管气举完井,244.5 mm套管下至1 789 m,177.8 mm尾管深度1 683~3 213 m,封隔器位置2 988 m,73 mm油管管内径62 mm,全井通径59 mm。完井生产一段时间后过油管电缆补射孔,射孔工具串如下:外径30 mm马笼头+加重杆+磁定位仪器+转换接头+磁性偏靠器+上点火头+下点火头+长3 m外径54 mm STP-2125-232HS无枪身射孔枪。但在回收枪管时射孔枪在2 959 m遇卡,无法解卡,最终拉断弱点,点火头及枪管落入井底,射孔枪落井后用55 mm的通井规通井至井底3 111 m,打捞时因鱼头在套管内倾斜无法抓住落鱼,因此放弃打捞。初步分析射孔枪遇卡原因为井筒内结垢导致井壁不光滑,射孔后枪眼外凸,外径变大,在结垢处遇卡。此井投产后,产量无法满足预期,需通过连续油管下至目的层位,泵注酸液,解除近井段污染,增加产量。但在连续油管下入过程中,连续油管出现软阻和软卡现象,通过循环冲洗、钻磨等传统方式均未见效,最终通过钢丝通井及连续油管悬重综合表现判定为油管弯曲变形。

### 2.1 酸化作业下连续油管遇阻

此井在作业前,用CTES模拟软件进行模拟分析,下入及上提过程中悬重(见图4),井斜对悬重影响较小。连续油管在下入时每500 m进行悬重检查,2 600 m检查悬重时发现过提现象,过提4 t,继续下入检查,过提现象依旧存在,开泵循环冲洗,上

提至2 300 m,过提现象消失。大排量循环冲洗,继续尝试下入,过提现象依然存在,并且随着深度增加,过提愈加严重,最大下入深度2 700 m,过提5 t,检查下入悬重2 300 m至2 600 m期间,下入悬重无明显增加。鉴于此油田此前作业有油管结蜡现象,初步分析此井油管内可能结蜡导致连续油管软卡,但根据下入深度,推算地层温度,此深度地层温度已经超过蜡质析出的临界温度,而且根据油藏信息此井射孔层位并无蜡质,而且起出连续油管后检查连续油管表面及井下工具表面并无蜡质附着也无机械损伤。综合考虑作业风险、作业速度,决定使用钢丝通井探查井下情况。

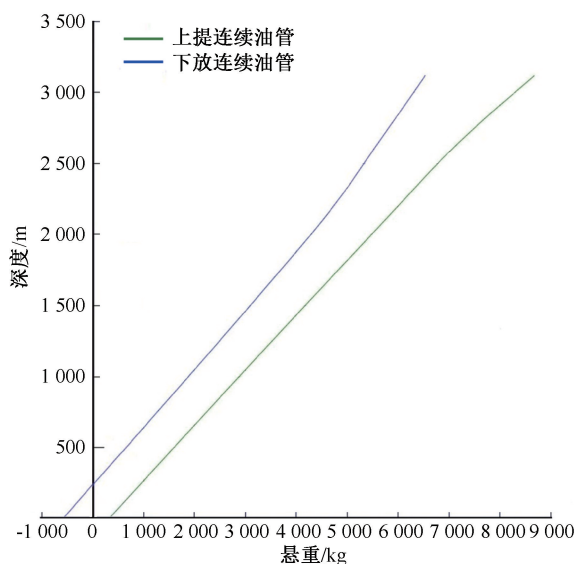


图4 软件模拟连续油管悬重随深度变化结果

Fig.4 Simulation results of CT weight vs depth

### 2.2 钢丝通井、打铅印及取样

钢丝依次下入57 mm,55 mm和48 mm通井规均在2 950 m处遇阻,反复震击均无法通过,怀疑井内结垢严重,下入铅印探查,只在铅印侧面有轻微划痕,分析是由于井斜较大,铅印摩擦到井壁导致。继续下入钢丝取样器,在2 950 m遇阻,也未取到任何杂质。最后下入钢丝58 mm刮管器,刮管至2 850 m遇阻,强力震击也无效果。怀疑在井底油管结垢严重,钢丝刮管器无法提供足够的下推力进行刮管,因此使用连续油管进行钻磨。

### 2.3 连续油管钻磨

下入45 mm马达带47 mm锥形磨鞋,工具串总长3.55 m,下至2 200 m后,上提检查悬重时发现工具轻微软遇卡,起泵钻磨,根据循环压力判断马达运转正常,继续下入,每50 m检查悬重,软卡现象不断严重,最大下深2 600 m,过提6 t,考虑连续油管

上提极限,停止下入,2 200 m至2 600 m下入悬重无明显增加。起出连续油管后检查连续油管及磨鞋,无明显损伤。综合钢丝刮管及连续油管作业结果,已基本排除油管结垢的可能性,油管弯曲变形的可能性较大。因此决定使用钢丝短工具串进行尝试。

#### 2.4 钢丝短工具串下入验证

缩短钢丝工具串长度由7.3 m至4.2 m,使用55 mm通井规,通井至2 980 m,通井深度增加,但尚未过封隔器,怀疑为越靠近封隔器部分油管变形越严重,钢丝工具串无法下入。

#### 2.5 油管弯曲原因分析

管柱变形的主要因素有四个方面,分别是温度、压力、管柱自重以及完井管柱配长引起的管柱过度压缩等(见图5),其中温度影响最大<sup>[16]</sup>。而根据管柱弯曲临界力理论,油管较长时,弯曲临界力较小至可以忽略,即较小的下压力就会造成管柱弯曲<sup>[17]</sup>。

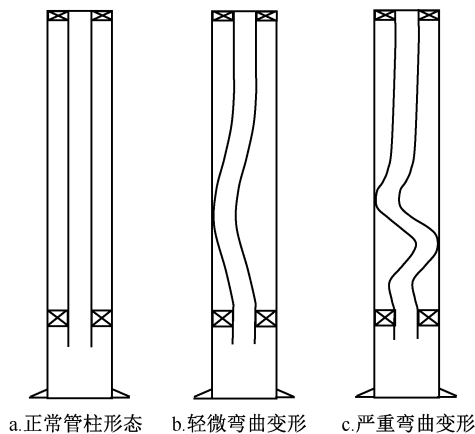


图5 三种状态下的管柱形态

Fig. 5 String shapes in three conditions

此井为气举完井,投产后油套环空会替为气体,环空静液柱压力明显降低,为防止因压差导致的封隔器解封,坐封时对封隔器加压6 t此压力足以使油管产生轻微弯曲变形,但此变形量不会影响射孔枪的正常下入。补射孔作业时,射孔枪爆炸会产生强大的冲击力,可能会引起封隔器的轻微上移,加剧油管的弯曲变形,导致第二次射孔后射孔枪遇卡落井。射孔后,地层产量增加,地层流体对管柱的加热效应增强,井筒内平均温度升高,管柱伸长,加剧了管柱的变形,导致钢丝、连续油管遇阻现象的发生。由于此井内油管弯曲变形严重,影响后续的钢丝测压、取样及连续油管酸化作业,只能依靠

修井机解封封隔器,起出完井管柱进行更换,重新完井后钢丝通井顺畅,连续油管酸化作业得以顺利进行。

### 3 结论

(1)建立了连续油管作业中遭遇油管变形的判断方法和流程,在连续油管下入过程中应及时上提检查悬重,发现软阻、软卡等现象应及时上提,开泵循环,冲洗井筒尝试解阻、解卡。

(2)连续油管软遇阻通常是由油管结蜡或沥青导致,但油管弯曲也是软遇阻的原因之一,如通过各种方式排除井内沥青、结垢等情况后,可以通过改变钢丝工具串的长度或增加万向节的方法验证油管弯曲的可能性。

(3)作业前应充分了解井况、储层信息,以便在作业出现问题时提供参考,正确的分析问题,得出解决方法,钢丝因其快速便捷、风险低的特性可以作为辅助判断井况的一种手段。

致谢:感谢中国石油集团长城钻探工程有限公司测试分公司同意本文公开发表。

#### 参考文献

- [1] 胡忠太. 连续油管开关滑套技术在海上某气井中的应用[J]. 油气井测试, 2016, 25(3): 46-48.  
HU Zhongtai. Application of technology of switching sleeve with coiled tubing in a gas well on offshore[J]. Well Testing, 2016, 25(3): 46-48.
- [2] 卢秀德, 刘刚, 杨光炼. 50.8 mm连续油管作速度管串在天然气井的应用[J]. 油气井测试, 2010, 19(3): 44-45.  
LU Xiude, LIU Gang, YANG Guanglian. Applying 50.8 mm coiled tubing to be speeding string in gas well[J]. Well Testing, 2010, 19(3): 44-45.
- [3] 孙海林, 王风锐, 白田增, 等. 连续油管液氮气举排液技术在文古3井的应用[J]. 油气井测试, 2009, 18(5): 64-65.  
SUN Hailin, WANG Fengrui, BAI Tianzeng, et al. Application of technique of gas-lift by liquid nitrogen and unloading with coiled tubing in Well Wengu 3[J]. Well Testing, 2009, 18(5): 64-65.
- [4] 邹洪岚, 朱洪刚, 唐晓兵. 水平井连续油管拖动转向酸化技术在艾哈代布油田的应用[J]. 石油钻采工艺, 2014, 36(2): 88-91.  
ZOU Honglan, ZHU Honggang, TANG Xiaobing. Application of coiled tubing with diverting acidizing with diverting acid system in Ahdeb oil field, Iraq[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2014, 36(2): 88-91.
- [5] 赵明, 石林, 刘广华, 等. 连续管作业技术专项推广回顾与展望[J]. 石油科技论坛, 2017, 36(5): 2-6.

- ZHAO Ming, SHI Lin, LIU Guanghua, et al. Review and outlook of promotion project for coiled tubing service technology[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2017,36(5):2-6.
- [6] 吕占春. 井下作业中连续油管技术的应用[J]. 石化技术, 2019,26(2):42+64.
- LYU Zhanchun. Application of coiled tubing technology in downhole operation[J]. Petrochemical Industry Technology, 2019,26(2):42+64.
- [7] 史海涛. 连续油管作业遇卡原因分析与解卡方法[J]. 化学工程与装备, 2021(9):94-95.
- SHI Haitao. Cause analysis and freeing method of being stuck in coiled tubing operation[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2021(9):94-95.
- [8] 郭彪, 卢秀德, 雍和毅, 等. 连续油管在某页岩气 A 井钻磨解卡与认识[J]. 钻采工艺, 2015,38(4):107+117.
- GUO Biao, LU XiuDe, YONG Heyi, et al. Coiled tubing stuck in a shale gas well A and its understanding[J]. Drilling & Production Technology, 2015, 38(4): 107+117.
- [9] 刘研言, 尹俊禄, 慕鑫, 等. 超长水平井连续管下入深度优化及验证[J]. 天然气勘探与开发, 2022, 45(1): 80-86.
- LIU Yanyan, YIN Junlu, MU Xin, et al. Optimizing and validating the running depth of coiled tubing in extremely long horizontal wells[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2022,45(1):80-86.
- [10] 王方祥, 张乾, 姜有才, 等. 连续油管长水平段防自锁技术[J]. 油气井测试, 2021,30(2):25-29.
- WANG Fangxiang, ZHANG Qian, JIANG Youcai, et al. Anti-self-locking technology for long horizontal section of coiled tubing[J]. Well Testing, 2021,30(2):25-29.
- [11] 刘健, 林铁军, 练章华, 等. 考虑残余应变的连续油管螺旋屈曲载荷新公式[J]. 石油机械, 2008, 36(1): 25-28.
- LIU Jian, LIN Tiejun, LIAN Zhanghua, et al. A new calculating formula for helical buckling load of coiled tubing with residual strain[J]. China Petroleum Machinery, 2008, 36(1): 25-28.
- [12] 马卫国, 徐铁钢, 刘湘瑜, 等. 弯曲井段连续油管屈曲分析[J]. 长江大学学报(自然科学版)理工卷, 2010, 7(3):51-55.
- MA Weiguo, XU Tiegang, LIU Xiangyu, et al. The analysis of coiled tubing's buckling in curve Well[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2010, 7(3):51-55.
- [13] 肖兵, 兰乘宇, 包文涛, 等. 水平井连续油管下放速度对下入深度影响规律分析[J]. 石油矿场机械, 2016, 45(6):20-25.
- XIAO Bing, LAN Chengyu, BAO Wentao, et al. Influence of velocity on the limit depth of the input in coiled tubing horizontal wells[J]. Oil Field Equipment, 2016,45(6):20-25.
- [14] 刘亚明, 于永南, 仇伟德. 连续油管最大下入深度问题初探[J]. 石油机械, 2000,28(1):13-16.
- LIU Yaming, YU Yongnan, QIU Weide. Investigation in maximum running depth of Coiled Tubing[J]. China Petroleum Machinery, 2000,28(1):13-16.
- [15] 周崇志, 王玲, 陈澈. 连续油管受力分析方法在水平井作业中的应用[J]. 天然气工业, 2002(4):59-60.
- ZHOU Chongzhi, WANG Ling, CHEN Che. The coiled tubing force analyzing method for horizontal well operations[J]. Natural Gas Industry, 2002(4):59-60.
- [16] 钟宝库, 胡忠太, 简家斌, 等. 连续油管技术在管柱变形井中测试应用[J]. 油气井测试, 2018,27(3):40-45.
- ZHONG Baoku, HU Zhongtai, JIAN Jiabin, et al. Testing application of coiled tubing technology in well with string deformed[J]. Well Testing, 2018,27(3):40-45.
- [17] 李钦道, 谢光平, 张娟. 井内有流体时管柱弯曲临界力分析——封隔器管柱受力分析系统讨论之一[J]. 钻采工艺, 2001,24(4):53-55.
- LI Qindao, XIE Guangping, ZHANG Juan. Analysis of bending critical force of test string while having fluid in well—the first discussion of analytical system of packer string endured force[J]. Drilling & Production Technology, 2001,24(4):53-55.

编辑 吴志力

**第一作者简介:**刘磊,男,1988年出生,工程师,学士学位,2011年毕业于中国石油大学(北京)石油工程专业,现主要从事连续油管现场技术服务相关工作。电话:18210462360, Email:ll88.gwdc@cnpc.com.cn。通信地址:北京市朝阳区安立路101号名人大厦长城钻探工程有限公司测试分公司, 邮政编码:100101。