

套管径向变形可修复界限研究

翟晓鹏¹, 楼一珊¹, 周建良², 王木乐³, 陈 灿³

(1. 油气钻采工程湖北省重点实验室(长江大学), 湖北荆州 434023; 2. 中海油研究总院, 北京 100027; 3. 中国石化中原油田分公司采油工程技术研究院, 河南濮阳 457001)

摘 要: 由于缩径变形套管的最小可修复内径没有明确值, 导致采用胀管器整形时容易造成套管二次伤害。在分析胀管器冲击整形作用机理的基础上, 根据缩径变形套管的整形工艺, 利用 ANSYS/LS-DYNA 动力有限元程序编制了确定缩径变形套管可修复最小内径的计算程序。以钢级 P110、 $\phi 139.7$ mm 不同壁厚套管为例, 计算了不同缩径量下的最小修复内径, 并根据计算结果绘制了缩径套管内径与胀管器规格对应图版。对计算结果进行了评价分析, 结果表明, 采用高效胀管器修复缩径套管时, 最小修复内径取决于套管的屈服强度和需要达到的最小通径, 为了达到所需的最小通径, 需要在最小修复内径基础上换 3~4 种规格的胀管器。在中原油田文 95-86 井的应用表明, 根据计算出的最小修复内径修复缩径套管, 可以在保证不伤害套管的前提下提高修复缩径套管的成功率。

关键词: 套管变形 套管修理 最小修复内径 文 95-86 井

中图分类号: TE28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2012)01-0028-04

Study of Minimum Repair Limit for Reduced Casing Deformation

Zhai Xiaopeng¹, Lou Yishan¹, Zhou Jianliang², Wang Mule³, Chen Can³

(1. Key Laboratory of Drilling and Production Engineering for Oil and Gas(Yangtze University), Jingzhou, Hubei, 434023, China; 2. CNOOC Research Institute, Beijing, 100027, China; 3. Oil Production Research Institute, Zhongyuan Oilfield Company, Puyang, Henan, 457001, China)

Abstract: Secondary damage to a casing often happen in casing repairing when using the expander because minimum repairable inner diameter for reduced casing is not specified. A program for determining the minimum inner diameters of a diameter reduced casing was made by explicit dynamic ANSYS/LS-DYNA finite element program based on the expander repair mechanism and casing repair technology. As an example for 139.7 mm casing of steel grade P110, the minimum repairable inner diameter was caculated and a chart of expander sizes versus reduced casing inner diameters was provided. The research showed during the remedial operation, the minimum casing repairable diameter depends on the yield strength of the casing and its required minimum run-through size. In order to obtain the required minimum run-through size, it is necessary to change the expander size for 3 to 4 times. Its application in Wen 95-86 Well of Zhongyuan Oilfield showed the calculated minimum repairable inner diameter could improve the success rate of reduced casing repairment.

Key words: casing deformation, casing repairment, minimum repairable inner diameter, Wen 95-86 Well

随着油田开发时间的延长, 发生套管变形的井越来越多。对于一定范围内的变形和缩径, 可以用套管整形工具来修复, 胀管器是目前最常用的一种工具。用普通胀管器整形时, 如果冲击力过大, 胀管器可强行通过套管变形位置, 但当套管发生的弹性变形恢复后, 容易引起卡钻事故。与之相比, 高效胀管器的结构得到了优化, 并可与其配套的震击器配合, 解决由于整形套管回缩造成胀管器起不出来的

难题。但在对缩径变形套管进行冲击整形时, 由于

收稿日期: 2011-07-05; **改回日期:** 2011-12-20。

作者简介: 翟晓鹏(1980—), 男, 河南许昌人, 2003年毕业于焦作工学院土木工程专业, 2007年获长江大学固体力学专业硕士学位, 在读博士研究生, 主要从事井壁稳定和套管损伤方面的研究。

联系方式: (0716)8060736, zhaixiaopeng2006@163.com。

基金项目: 国家科技重大专项“多枝导流适度出砂技术”(编号: 2011ZX05024-003-04)部分研究内容。

可修复套管的最小内径没有明确值,在修复缩径大的套管时,会对套管强度造成更大的损伤,加剧套管变形。

目前国内主要集中于胀管器结构优化^[1-4]和修复力的力学机理^[5-7]研究,对于缩径变形套管最小修复内径方面的研究尚未见相关报道。因此,笔者借助动力有限元程序 ANSYS/LS-DYNA 建立了胀管器和缩径变形套管-水泥环-地层整体系统,分析了整形过程中缩径变形套管的等效应力变化规律,确定了缩径变形套管最小修复内径。

1 高效胀管器结构

高效胀管器与普通胀管器均由导锥、工具面和工具接头3部分组成,如图1所示。高效胀管器各规格之间相差3.0 mm,最小规格为 $\phi 89.0$ mm;当其规格小于 $\phi 110.0$ mm时,导锥长度为300 mm,工具面长度为152 mm;当其规格大于 $\phi 110.0$ mm时,导锥长度为400 mm,工具面长度为162 mm。普通胀管器各规格之间相差2.0 mm,最小规格为 $\phi 90.0$ mm。

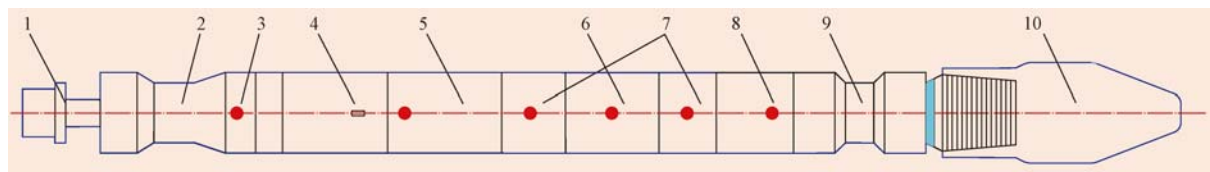


图2 高效胀管器与配套震击器

Fig. 2 High efficiency expander and Hydra-Jar

1. 下接头;2. 下部震击缸;3. 连接器;4. 卸载槽;5. 上部震击缸;6. 液压泵;7. 驱动转换器;8. 传动缸;9. 钻柱;10. 高效胀管器

柱,压缩液压泵的液压油储能;当活塞上行至卸载槽时,压力瞬间卸载,活塞在自由行程内加速上行,撞击上部震击缸,产生震击,震击通过壳体传递到下部被卡落物以达到震击解卡的目的。震击器也能利用液压泵的储能进行下击,达到冲胀作用。普通胀管器在胀管器上端安装的配重器,只能起到增重作用。

2 最小修复内径计算方法

整形过程中,套管损伤通常由较大的变形引起。如果变形较大,微观尺度的破坏将发生、发展和聚集构成损伤区,其判断依据是 VonMises 屈服准则^[8]。油田套变事故井的变形套管多为 $\phi 139.7$ mm 油层套管,该尺寸套管对应下 $\phi 101.6$ mm 油管,修复后内径一般要求达到113.0 mm左右,即修复后需要达到的最小通径。

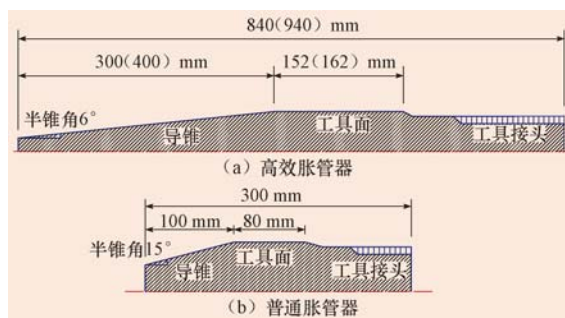


图1 高效胀管器与普通胀管器结构截面

Fig. 1 Structural section view of high efficiency expander and common expander

高效胀管器与普通胀管器的不同点主要表现在:导锥的圆锥角度由普通胀管器的 30° 减小为 12° ,导锥的长度由普通胀管器的100 mm增加到300(400) mm,工具面长度由普通胀管器的80 mm增加到152(162) mm。这样可以使胀管器更容易楔入套管缩径部位,并增大胀管器锥面与套管缩径处的接触面。

高效胀管器的上端可安装与之配套的震击器,如图2所示。当胀管器被卡时,以一定速度上提钻

冲击整形主要是对套管最小缩径处进行冲胀,为此建立了胀管器和套管-水泥环-地层系统有限元模型(见图3)。由于该模型是对称的,因此,取1/2

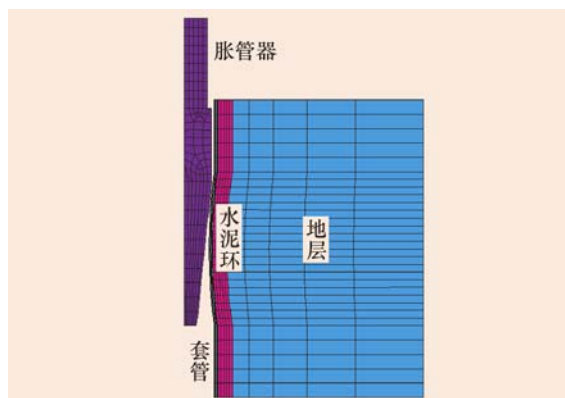


图3 胀管器和套管-水泥环-地层有限元模型

Fig. 3 The finite element model of expander and casing-cement-formation system

模型进行分析。胀管器与套管壁之间的动摩擦系数取 0.15, 并按照整形工艺原理^[1]使胀管器以 8.9 m/s 的速度垂直向下运动, 采用 SHELL163 分析单元。

最小修复内径求解程序如下:

冲击整形时, 在 LS-DYAN 程序中, 按时步 $t = 0, \Delta t_1, \Delta t_1 + \Delta t_2, \dots, t, t + \Delta t$ 求解运动方程:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{P}(\mathbf{x}, t) - \mathbf{F}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) \quad (1)$$

式中: \mathbf{M} 为总体质量矩阵; \mathbf{P} 为总体载荷矢量; \mathbf{F} 为单元应力场的等效节点力矢量; $\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \ddot{\mathbf{x}}$ 分别是 t 时刻的节点坐标矢量, 节点速度矢量和节点加速度矢量。

单元应力场等效节点力矢量 \mathbf{F} 与应力矢量 $\boldsymbol{\sigma}$ 的关系为:

$$\mathbf{F} = \sum_{m=1}^n \int_{V_m} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} dV \quad (2)$$

式中, \mathbf{B} 为应变矩阵。

在有限元模型中采用 Belytschko-Tsay 壳单元算法, 用显示中心差分法计算单元应力, 时间积分采用变时步长增量解法, 已知 t_n 时刻的构形 $\mathbf{x}(t_n)$, $\dot{\mathbf{x}}(t_n)$ 和应力矢量 $\boldsymbol{\sigma}(t_n)$, t_{n+1} 时刻的构形 $\mathbf{x}(t_{n+1})$, $\dot{\mathbf{x}}(t_{n+1})$, 则 t_{n+1} 时刻的应力矢量 $\boldsymbol{\sigma}(t_{n+1})$ 为:

$$\boldsymbol{\sigma}_{ij}(t_{n+1}) = \boldsymbol{\sigma}_{ij}(t_n) + \dot{\boldsymbol{\sigma}}(t_{n+1/2}) \Delta t_n \quad (3)$$

式中: $t_{n+1/2} = 1/2(t_n + t_{n+1})$; $\Delta t_n = t_{n+1} - t_n$; $\boldsymbol{\sigma}_{ij}$ 为 $t_{n+1/2}$ 时的应变率。

以此求得每一时间步的套管应力, 在胀管器通过整个套管长度行程时, 计算终止。

计算时, 利用有限元程序建立比缩径套管最小内径大一级的胀管器模型进行冲胀, 冲胀完成后, 通过有限元后处理器记录套管最大等效应力, 若套管最大等效应力未达到屈服强度, 则在有限元模型中调用大一级的胀管器再次整形; 若套管等效应力大于或等于套管材料的屈服强度, 继续修复会加剧套损; 若此时未达到最小通畅, 则说明缩径过大, 通过程序减小缩径量, 建立新的套管-水泥环-地层模型, 再次重复整形过程; 当缩径量能够修复到最小通畅且套管等效应力刚好小于或接近于套管屈服强度, 与缩径量对应的套管最小内径就是最小修复内径。

边界条件为: 约束套管-水泥环-地层顶部和底部; 在胀管器左侧施加水平方向约束, 使其只沿着垂直方向移动。基本数据: 套管外径 139.7 mm, 弹性模量为 210 GPa, 泊松比为 0.3, 屈服应力 758 MPa, 切线模量 105 MPa; 水泥环厚 30 mm, 弹性模量为 10.15 GPa, 泊松比为 0.22; 地层厚 1 000 mm, 地层弹性模量为 10.14 GPa, 泊松比为 0.33。

计算过程中假定: 不考虑变形套管、水泥环的强

度损伤和残余应力; 整形过程胀管器与套管在最大缩径处均匀接触; 忽略冲击产生的热量对材料特性的影响, 不考虑钻井液的浮力作用。

3 计算结果分析

从最小修复内径计算理论可以看出, 每一种钢级、外径、壁厚套管的最小修复内径的确定都要通过多次的有限元计算。笔者以钢级 P110、外径 139.7 mm、壁厚 7.72 mm 的套管为例, 通过 APDL 有限元程序计算了不同缩径量套管整形过程中等效应力的变化, 结果如图 4 所示。

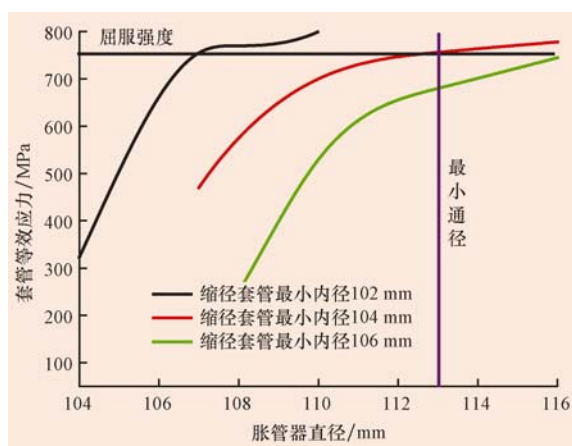


图 4 $\phi 139.7$ mm、壁厚 7.72 mm 不同最小内径整形过程套管等效应力

Fig. 4 Equivalent stresses under different expander inner diameters ($\phi 139.7$ mm and 7.72 mm wall thickness)

从图 4 可以看出: 套管的等效应力随着胀管器规格的增大而增大, 随着整形量扩大, 套管的等效应力变化趋缓; 对于钢级 P110、外径 139.7 mm、壁厚 7.72 mm 套管, 缩径套管最小内径为 102.0 mm 时, 未修复到最小通畅, 套管的等效应力已大于其屈服强度; 缩径套管最小内径为 104.0 mm 时, 修复内径达到最小通畅 113.0 mm 时, 套管的等效应力等于其屈服强度; 缩径套管最小内径为 106.0 mm 时, 在等效应力小于屈服强度情况下就能修复到最小通畅, 因此 $\phi 139.7$ mm、壁厚 7.72 mm 套管最小修复内径为 104.0 mm。由此可知, 对于小于修复内径的缩径套管, 套管通常没有达到最小通畅, 套管的等效应力就已经大于屈服强度, 而对于大于修复内径的缩径套管, 套管可以修复到最小通畅而仍有剩余强度。

笔者通过对 $\phi 139.7$ mm 常规壁厚套管进行计

算,绘制了钢级 P110、 $\phi 139.7$ mm 常规壁厚缩径套管内径与胀管器规格对应图版(见图 5)。从图 5 可以看出,缩径套管内径范围为 98.0~106.0 mm 时,修复时所用胀管器规格范围为 $\phi 101.0 \sim \phi 116.0$ mm。从图 5 可以清楚查出不同缩径套管内径对应的能够修复到的最大内径(等同胀管器直径)以及修复需要的各个胀管器规格,便于现场查询应用。

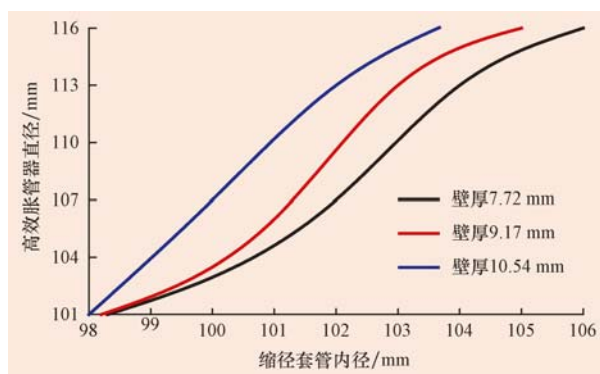


图 5 钢级 P110、 $\phi 139.7$ mm 不同壁厚缩径套管内径与胀管器规格对应图版

Fig. 5 Corresponding expander sizes to reduced casing with different wall thicknesses (P110 steel grade and $\phi 139.7$ mm)

4 工程应用

中原油田文 95-86 井油层套管外径 139.7 mm, 钢级 P110, 壁厚 7.72 mm, 下入深度 2 013.0 m, 下入 $\phi 110.0$ mm 铅模 $\times 0.2$ m + $\phi 108.0$ mm 安全接头 $\times 1.70$ m 的钻具组合, 在井深 1 725.60 m 处打印。起出钻具, 带出铅印, 铅印长轴 113.0 mm, 短轴 104.0 mm, 印痕分析为套管缩径。从图 5 可查出, 外径 139.7 mm、钢级 P110、壁厚 7.72 mm 套管最小修复内径为 104.0 mm, 这与铅模打印最小直径相等, 说明缩径变形套管可以修复到需要的通路。修复套管时依次下 $\phi 107.0$ mm、 $\phi 110.0$ mm 和 $\phi 113.0$ mm 胀管器, 将 1 724.00~1 760.00 m 井段 36 m 长的缩径套管成功修复到 $\phi 113.0$ mm。

5 结论

1) 高效胀管器通过减小导锥角度、增加导锥和工具面长度, 扩大了胀管器与套管缩径处的接触面, 同时与配套的震击器配合既可冲胀又可解卡, 提高了缩径套管的修复成功率。

2) 分析表明, 影响套管径向变形可修复界限的

因素主要是套管的屈服强度和需要达到的最小通路, 为了达到最小通路, 需要在最小修复内径基础上换 3~4 种规格胀管器。

3) 由于胀管器最大工作面积受环空间隙和一次最大整形量所限, 因此建议整形时弄清井下情况, 并根据具体情况优化修复钻具组合以提高套管整形的成功率。

参考文献

References

- [1] 姜道民. 套损井变形受力及整形工具结构的优化研究[D]. 大庆: 大庆石油学院机械科学与工程学院, 2004.
Jiang Daomin. The optimized research of the structure of plastic tool for repairing the destroyed casing well[D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, College of Mechanical Science and Engineering, 2004.
- [2] 吴奇, 刘合. 套损井冲击整形施工工艺的优化设计[J]. 石油机械, 2005, 33(2): 11-14.
Wu Qi, Liu He. Optimum design of impact construction technology for casing damaged wells[J]. China Petroleum Machinery, 2005, 33(2): 11-14.
- [3] 黄满良, 刘世强, 张晓辉, 等. 套损套变井机械整形工艺[J]. 石油钻采工艺, 2005, 27(增刊 1): 74-76.
Huang Manliang, Liu Shiqiang, Zhang Xiaohui, et al. Mechanical plastic technology on damage and deformation casing[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2005, 27(supplement 1): 74-76.
- [4] 刘合, 王维刚, 王素玲. 套损井碾压整形扩径工艺对水泥环的损伤分析[J]. 大庆石油学院学报, 2005, 29(5): 37-39.
Liu He, Wang Weigang, Wang Suling. Damage analysis of cement loop by means of ream-diameter technology of roll performing to bushing fail well[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2005, 29(5): 37-39.
- [5] 张玉荣. 油水井套管损坏机理及修复力学问题研究[D]. 大庆: 大庆石油学院石油工程学院, 2006.
Zhang Yurong. Research on damage mechanism of casing damage and mechanical analysis of downhole tools for workover[D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, College of Petroleum Engineering, 2006.
- [6] 刘合, 王秀喜. 套损井整形冲击应力波的传播机理研究[J]. 工程力学, 2005, 22(4): 206-210.
Liu He, Wang Xiuxi. Mechanism of impact stress wave spread in reshaping of destroyed casing well[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(4): 206-210.
- [7] 姜民政. 套损井修复过程中修复力的确定及水泥环损伤机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学建筑工程学院, 2003.
Jiang Minzheng. Study the repairing force and damage mechanism for the cement loop during repairing destroyed casing[D]. Harbin: Harbin Engineering University, College of Architecture and Civil Engineering, 2003.
- [8] 沈为. 损伤力学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1995: 142-148.
Shen Wei. Damage mechanics[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1995: 142-148.