

文章编号: 1001-1986(2006) 06-0073-04

# 连续管疲劳寿命预测

宋生印<sup>1,2</sup>, 王英杰<sup>3</sup>, 林元华<sup>4</sup>, 张德平<sup>4</sup>

- (1. 中国石油大学, 北京 102249; 2. 中国石油天然气集团公司管材研究所, 陕西 西安 710065;  
3. 西安通信学院光纤教研室, 陕西 西安 710106; 4. 西南石油大学, 四川 成都 610500)

**摘要:**连续管在拉伸力作用下易疲劳, 影响使用寿命。在对其弯曲拉应力、径向应力、周向应力以及等效应力分析的基础上, 建立了连续管疲劳寿命预测模型, 并在预测计算的基础上, 通过分析对比连续管内部液体压力、连续管外径、连续管壁厚、卷筒直径以及连续管抗拉强度等因素对连续管疲劳寿命的影响, 提出了提高连续管使用寿命的实用方法。

**关键词:**连续管; 疲劳; 寿命预测; 煤层气分支井

**中图分类号:** P634.4 **文献标识码:** A

## Fatigue life estimate for coiled tubing

SONG Sheng-yin<sup>1,2</sup>, WANG Ying-jie<sup>3</sup>, LIN Yuan-hua<sup>4</sup>, ZHANG De-ping<sup>4</sup>

(1. China Petroleum University, Beijing 102249, China;

2. Tubular Goods Research Center, CNPC, Xi'an 710065, China;

3. Fiber Teaching & Research Group, Xi'an Communication College, Xi'an 710106, China;

4. South-Western Petroleum University, Chengdu 610500, China)

**Abstract** On the basis of analyzing the bending tensile stress, radial stress, circumferential stress and equivalent stress of coiled tubing (CT), the predicting model for fatigue life of coiled tubing was established; Then based on the predicted calculation, through analyzing the influence of many factors, such as internal liquid stress of CT, outer diameter, wall thickness, diameter of rolled canister and tensile strength on the fatigue life of CT, this paper put forward the practical methods improving the service life of CT.

**Key words:** coiled tubing (CT); fatigue; CT fatigue life estimate; CBM branch well

## 1 前言

连续管(Coiled Tubing), 又称为挠性管。因其具有良好的柔性, 能够满足套管开窗、水平井和丛式井等定向井钻井技术对钻柱柔软性能的苛刻要求, 在油气田勘探与开发中, 特别是在煤层气多分支井开发中, 发挥了越来越重要的作用。

但是, 由于连续管是缠绕在一定直径的钢制或木制轮子上, 下井时还要经过一定直径的导向拱, 并要承受一定的拉伸力, 因此, 对连续管来说, 每次起下井作业都要承受6次弯曲和相应的拉伸、内压等作用。在这种周期性的疲劳载荷作用下, 很容易因疲劳损伤而造成连续管失效, 导致连续管使用寿命大大缩短。

收稿日期: 2006-05-19

作者简介: 宋生印(1962—), 男, 河南南阳人, 研究员, 从事钻井、油井管的科研工作。

看出, 未经静校正的初叠剖面(图4a)难以判定有效波的位置, 没有连续的同相轴; 经初至折射静校正的叠加剖面(图4b), 可以看到较为连续的同相轴, 并可大致判断反射界面的单斜形态; 而经时空校正的叠加剖面(图4c), 反射波同相轴的连续性明显提高, 且有较高的分辨率。可见, 时空校正方法对于消除地表高差起伏引起的共中心点与反射点的偏差, 提高山区资料的叠加精度有较好的效果。

## 5 结束语

时空校正方法虽然针对目标层处理, 但由于该方法对深度估算误差有较好的稳定性, 因此对于多

个目标层的情况, 只要相邻地层的产状变化不大, 在针对某一层进行时空校正后, 上下相邻地层也可以得到较好地校正。

研究表明, 该方法特别适合山区地震勘探, 如晋城、潞安、阳泉、大同等矿区。这些地区虽然地表起伏较大, 但煤系平缓, 构造简单, 在采区范围内多为一些单斜构造, 应用时空校正方法将有较好的效果。

## 参考文献

- [4] 武喜尊. 水平叠加技术在山区地震勘探中存在的问题[J]. 中国煤田地质, 1999, 11(3): 48-50.  
[5] 王辉. 球面波前完全时空校正[D]. 江苏: 中国矿业大学, 2001.

本文在对连续管弯曲拉应力、径向应力、周向应力以及等效应力分析的基础上,建立了连续管疲劳寿命预测模型。并在预测计算的基础上,通过分析对比连续管内部液体压力、连续管外径、壁厚、卷筒直径以及连续管抗拉强度等因素对连续管疲劳寿命的影响,提出了提高连续管使用寿命的实用方法。

## 2 连续管工作时危险点应力分析

### 2.1 弯曲拉应力

连续管在工作时,由于循环弯曲和内部液体压力的作用,将产生弯曲应力和膨胀应力。连续管内部液体压力产生的应力,沿连续管圆周方向是基本相同的,而弯曲应力则随离中性轴距离的大小而变化。因此,连续管的最危险点,必处在远离中性轴的连续管内外表面上。力学分析可以证明,离弯曲支撑点最远的连续管的外表面点为最危险点。在该点上,因在卷筒和导向拱上弯曲引起的连续管的弯曲拉应力分别为:

$$\sigma_{\sigma} = \frac{d_o E}{D_r + d_o} \quad (1)$$

$$\sigma_{\sigma g} = \frac{d_o E}{2R_g + d_o} \quad (2)$$

式中  $\sigma_{\sigma}$ ——连续管在卷筒上弯曲引起的弯曲拉应力,MPa;

$\sigma_{\sigma g}$ ——连续管在导向拱上弯曲引起的弯曲拉应力,MPa;

$d_o$ ——连续管的外径,mm;

$E$ ——弹性模量,MPa;

$D_r$ ——卷筒直径,mm;

$R_g$ ——导向拱半径,mm。

### 2.2 径向应力与周向应力

由内部压力引起的径向应力为 0,周向应力为:

$$\sigma_{\theta} = \frac{2d_i^2 p_i}{d_o^2 - d_i^2} \quad (3)$$

式中  $\sigma_{\theta}$ ——周向应力,MPa;

$d_i$ ——连续管的内径,mm;

$p_i$ ——连续管的内压,MPa。

### 2.3 等效应力

对给定连续管来说,其卷筒直径和导向拱弯曲半径是固定不变的。即该连续管在工作过程中所承受的弯曲应力可看作是一常量。(虽然在压力变化时连续管的应力状态会发生变化,但在等效应力公式中可以将弯曲应力作为一常数项来处理)鉴于危险点的应力仅与弯曲应力和由内部压力引起的周向应力有关 又由于连续管工作过程中的弯曲一般为

塑性弯曲,因此,连续管的等效应力公式可定义为:

a. 卷筒上弯曲的连续管的等效应力:

$$\sigma_r = \sigma_{\sigma} + \alpha \sigma_{\theta}^{\beta} \quad (4)$$

式中  $\sigma_r$ ——卷筒上弯曲的连续管等效应力,MPa;

$\alpha, \beta$ ——由实验确定的权系数和指数,一般取

$\alpha = 2.46, \beta = 1.61$ 。

b. 导向拱上弯曲的连续管等效应力:

$$\sigma_g = \sigma_{\sigma g} + \alpha \sigma_{\theta}^{\beta} \quad (5)$$

式中  $\sigma_g$ ——导向拱上弯曲的连续管等效应力,MPa。

## 3 连续管疲劳寿命预测模型

设连续管在卷筒上受等效应力水平  $\sigma_r$  单独作用下的总循环寿命为  $N_1$ ;在导向拱上受等效应力水平  $\sigma_g$  单独作用下的总循环寿命为  $N_2$ ,根据疲劳强度理论有:

$$N_1 \cdot \sigma_r^2 = N_2 \cdot \sigma_g^2 = N_M \cdot \sigma_M^2 \quad (6)$$

式中  $N_M$ ——连续管的中位寿命,由试验得到;

$\sigma_M$ ——连续管中位寿命对应的应力,由试验

得到。

连续管在每经过卷筒和导向拱一次后,将经受一次  $\sigma_r$  作用和 2 次  $\sigma_g$  作用,由此造成的损伤,根据 Miner 线性累积损伤理论为:

$$1/N_1 + 2/N_2 \quad (7)$$

设连续管在  $\sigma_r$  和  $\sigma_g$  的共同作用下经过  $N$  次行程而疲劳失效,根据线性累积损伤理论,失效时的总损伤为 1,则有:

$$N(1/N_1 + 2/N_2) = 1 \quad (8)$$

$$\text{即: } 1/N_1 + 2/N_2 = 1/N \quad (9)$$

从式(6)分别解得  $N_1$  和  $N_2$  后代入上式,得到连续管的寿命为:

$$N = \frac{N_M \cdot \sigma_M^2}{\sigma_r^2 + 2\sigma_g^2} \quad (10)$$

材料转换后的预测寿命为:

$$N^* = \frac{N_M \cdot \sigma_M^2}{\sigma_r^2 + 2\sigma_g^2} \left[ \frac{\sigma_{ui}}{\sigma_{utb}} \right]^2 \quad (11)$$

式中  $\sigma_{ui}$ ——基准材料最终拉伸强度;

$\sigma_{utb}$ ——实际材料最终拉伸强度。

## 4 影响连续管疲劳寿命因素分析

影响连续管疲劳寿命的因素主要有:连续管直径、材质、壁厚;连续管弯曲时所受压力;连续管焊缝;连续管在滚筒上的弯曲半径;连续管弯曲时的张力;连续管弯曲点间的转动;连续管内、外表面的光

洁度;连续管以前疲劳损坏的历史记录等。但除去人为因素和环境因素的影响,主要体现在以下几个方面:

#### a. 连续管内部液体压力对疲劳寿命的影响

根据预测模型,在其他条件不变的情况下,改变连续管内部的液体压力,对连续管寿命进行计算的结果如图1所示。从图中可见,当连续管的内部压力在17.24 MPa附近时,曲线有一拐点,而此压力值与目前许多文献将连续管的疲劳寿命区分为高内压下的疲劳和低内压下的疲劳的压力区分值是相同的,这进一步表明了预测模型的准确性。另外,连续管的疲劳寿命随内部压力的增加而急剧降低,说明连续管的疲劳寿命受内部压力的影响较显著。因此,实际使用过程中应尽量减少连续管在带内压下工作。

#### b. 连续管外径对疲劳寿命的影响

同理,在保持其他参数不变的情况下,改变连续管的外径尺寸,对连续管的寿命预测值进行计算的结果如图2所示。从图中可见,外径尺寸越大的连续管,疲劳寿命越短,而小外径的连续管,疲劳寿命较长。

#### c. 连续管壁厚对疲劳寿命的影响

根据预测模型,分别计算了外径为50.80 mm,壁厚为4.775 mm和3.175 mm;外径为38.10 mm,壁厚

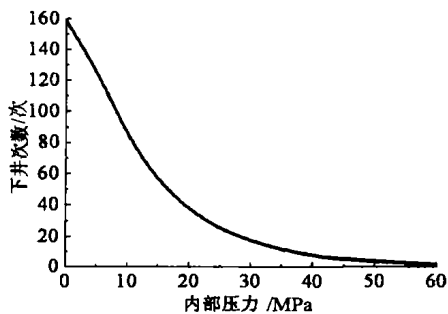


图1 内部压力对疲劳寿命的影响

Fig. 1 Influence of internal pressure on fatigue life

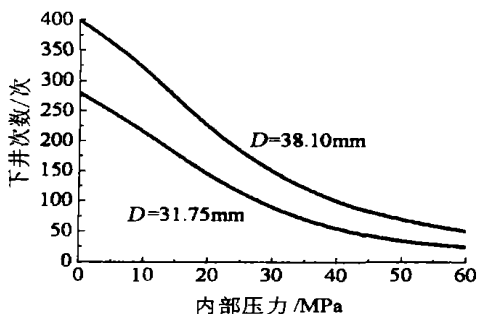


图2 外径对疲劳寿命的影响

Fig. 2 Influence of OD on fatigue life

厚为3.175 mm和2.769 mm的连续管的疲劳寿命,其寿命随压力的变化曲线如图3a和3b所示。从图中可见,在连续管外径较大时,壁厚对疲劳寿命的影响较显著;而在外径较小时,由于相应的壁厚变化也不大,对连续管疲劳寿命的影响并不很显著。

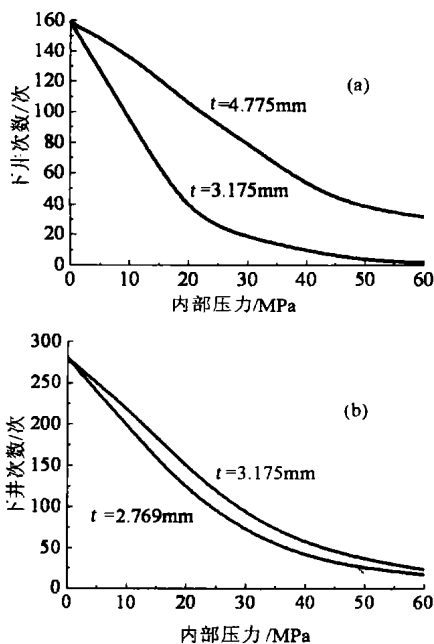


图3 壁厚对疲劳寿命的影响

Fig. 3 Influence of wall thickness on fatigue life

a——外径为50.80 mm; b——外径为38.10 mm

#### d. 卷筒直径对疲劳寿命的影响

改变连续管卷绕的卷筒直径,计算连续管的疲劳寿命,结果见图4。从图中可见,连续管的疲劳寿命随卷筒直径的增大而增大,即随弯曲半径的增大而增大。导向拱弯曲半径对连续管疲劳寿命的影响也有类似的情况。

#### e. 抗拉强度对疲劳寿命的影响

通过改变寿命预测模型中连续管的最终拉伸强度,对连续管的疲劳寿命进行预测,结果如图5所示。从图中明显看出,随着连续管抗拉强度的提高,疲劳寿命明显增加。

由此可知,要从根本上提高连续管的使用寿命,在加工制造和使用过程中应尽量做到:

- 在成本允许的前提下,优先选用抗拉强度高的连续管材料;
- 在连续管作业车的设计中,应尽量增大卷筒直径和导向拱的弯曲半径;
- 对大直径的连续管,应尽量增加连续管的壁厚;
- 在满足使用要求的前提下,应优先选用小直径的连续管。

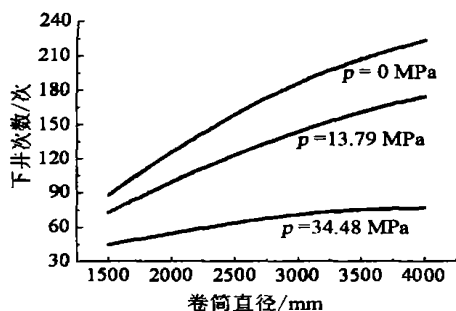


图 4 卷筒直径对疲劳寿命的影响

Fig. 4 Influence of OD on fatigue life

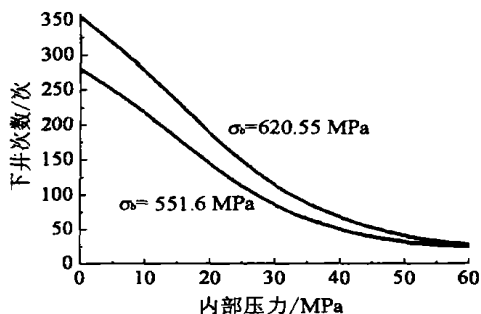


图 5 抗拉强度对疲劳寿命的影响

Fig. 5 Influence of tensile strength on fatigue life

## 5 提高连续管使用寿命方法

连续管的失效主要是内压作用下的弯曲疲劳所致。连续管每起下一次总共包含 6 个弯曲动作, 下入井内时, 连续管由注入头牵引拉离滚筒, 滚筒液压马达施加一定的反向拉力将连续管拉直; 当进入导向架时, 连续管沿导向架的弯曲半径发生弯曲; 通过导向架后进入牵引链条总成, 连续管重新被拉直; 起出井口时, 产生上述 3 个反向弯曲动作。针对上述形变所产生的屈服, 井口段管串负载最大, 以及局部高压等情况, 采取合理、有效的控制措施, 对提高连续管使用寿命, 削减连续管作业风险具有重要意义。

### a. 软件跟踪疲劳寿命

软件跟踪可实时监测下入深度、下入速度、运行方向、质量、井口压力和泵压、管柱内压等参数, 并通过一系列数据处理, 确定管段上产生的疲劳极限值, 预防在管串疲劳段进行不必要的往复运行。

### b. 截断法

在进行大量井深基本相同井作业时, 常用截断法来控制连续管的疲劳。尤其是连续管初次在大多数井深相同的油田作业时, 这种方法有助于将连续管的疲劳分布在较宽区域, 从而避免疲劳峰值出现在重复作业段。

### c. 使用变径连续管

连续管悬挂在井内时, 井口段有效力最大, 累积疲劳相应也最大。一盘连续管采用从内层到外层管壁由厚变薄的变径连续管, 将克服连续管区别于常规油管、钻杆的连续性引起的弱点。

通过连续管泵注工作液时, 由于滚筒上内层连续管盘绕直径小, 承受泵压高, 管内压力对内层管串的影响更严重。试验证明, 采用变径连续管, 当管内压力一定时, 壁厚的增加可降低管壁周向应力。

### d. 反转使用连续管

由于滚筒上连续管距滚筒内层越近, 盘绕直径越小, 承受内压越高, 下入井内负载也越大, 因此, 内层连续管比外层连续管疲劳累积更快。使用一段时间后, 将管串反转, 使内层最疲劳端反转到外层, 盘绕直径增大, 屈服得到释放, 承受内压减小, 入井深度增加, 有效力减小, 因此, 可降低整盘连续管的疲劳累积速度。实验用直径 60.3 mm 的两盘连续管在同一深度范围内进行模拟作业, 结果表明, 第一盘连续管进行 11 次作业后达到了累计疲劳; 第二盘连续管先进行 10 次作业后, 反转使用又进行了 5 次作业才达到累计疲劳, 反转使用后的总累计运行距离增长了 32.7%。

### e. 防止连续管损伤

产生疲劳裂缝的主要原因是连续管外壁的机械损伤。连续管在自封铜衬套、导向器滑动轴承、井口设备和匀绕器上造成的挤压、磨损, 以及由于冰堵或在寒冷地区的连续管在上述位置冻结、不合理的焊接方式、部件及连续管外壁不干净、施加的内张压力过大都会造成连续管的机械损伤。另外, 轴向载荷增加会引起连续管抗挤毁能力下降, 一旦达到管材疲劳极限载荷, 管串会超过弹性形变持续伸长, 直到在最大应力点发生“缩颈”现象和断裂。管串发生“缩颈”, 就会失去原有的强度, 即使达不到理论计算的载荷极限也会引起油管损坏。

### f. 合理配置设备

在成本允许的前提下, 应优先选用抗拉强度高的连续管材料; 在满足使用要求的前提下, 应优先选用小直径的连续管; 在地理环境允许的情况下, 应配置直径最大的导向器和滚筒。导向器和滚筒直径越大, 连续管的弯曲程度越小, 屈服变形也越小。根据文献报道, 采用直径 3.05 m 的导向器和中心直径 3.3 m 的滚筒比采用 2.45 m 的导向器和中心直径 2.85 m 的滚筒, 能使 60.3 mm 的连续管的疲劳寿命延长约 28%。