

基于二级的双头短幅内外摆线型螺杆泵 举升性能对比

杜秀华, 贾斯涵, 韩道权, 贾 策

(东北石油大学 机械科学与工程学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘要:以基于二级的双头短幅外摆线型螺杆泵为研究对象,对腔室内压力形成以及举升压力和排量等举升性能进行分析。结果表明:与双头短幅内摆线型螺杆泵相比,双头短幅外摆线型螺杆泵的举升压力和排量均降低30%左右;油田用双头短幅内摆线型螺杆泵可以有效提高工作效率,节省时间,而双头短幅外摆线型螺杆泵生产和检修成本低,适用于产量低的浅井。

关键词:短幅外摆线;短幅内摆线;螺杆泵;举升性能;临界接触应力

中图分类号:TH327

文献标志码:A

文章编号:1000-890X(2019)09-0699-05

DOI:10.12136/j.issn.1000-890X.2019.09.0699

单螺杆泵线型的摆线主要有普通摆线、短幅内摆线、短幅外摆线和内外摆线^[1],目前油田上采油用螺杆泵主要是普通摆线型和短幅内摆线型。这两种螺杆泵工作时转子与定子的啮合运动在线型上是转子型线的齿凸始终与定子型线接触(即固定接触点在转子骨线上)^[2],因此为了保证螺杆泵的举升性能,降低转子的磨损,转子基体采用金属材料,外表面镀铬,定子金属管的基础上内衬橡胶制成。由此可见,这种螺杆泵的易损件是定子,一旦定子失效,检修时不仅要取出转子和杆柱,还要将定子和管柱全部取出更换,检修时间长,劳动强度大,且成本较高。

如果螺杆泵的线型采用短幅(或普通)外摆线,经运动分析表明,定子型线的向内齿凸始终与转子型线接触(即固定接触点在定子骨线上),这样定子可采用金属加工,转子在金属基体的基础上外衬一层橡胶,易损件变成了转子,作业时只需取出转子和杆柱即可,大大降低了作业成本^[3-4]。但这种螺杆泵的举升性能与相应的内摆线型螺杆泵相比是否有优势,目前尚未见到相关报道。

本工作以基于二级的双头短幅外摆线型螺杆

泵为研究对象,对腔室内压力形成以及举升压力和排量等举升性能进行分析,通过与双头短幅内摆线型螺杆泵进行对比,明确双头短幅外摆线型螺杆泵的适用性。

1 双头短幅外摆线型螺杆泵计算模型的建立

1.1 几何模型

短幅外摆线转子骨线方程为^[5]

$$R^0(\theta) = Rne^{j\theta} - RKe^{jn\theta} \quad (1)$$

式中, $R^0(\theta)$ 为单位外摆线复矢量; θ 为导圆滚角, rad; $n = N + 1$, N 为转子头数; R 为滚圆半径, mm; K 为变幅系数。

短幅外摆线定子骨线方程为^[5]

$$\rho_1^0(\theta, \phi) = Rne^{j\frac{2\pi T}{n}} \quad (2)$$

$$\rho_2^0(\theta, \phi) = Re^{-j\frac{2\pi T}{n}} \{ ne^{j\frac{2\pi T}{n}(N\theta - \beta)} + 2K \sin(N\theta - \beta e^{j\frac{\pi}{2} + \frac{2N\theta + (N-1)\beta}{n}}) \} \quad (3)$$

$$\beta = \arctan \frac{1 - K \cos(N\theta)}{K \sin(N\theta)} \quad (4)$$

$$\frac{2\pi T}{N} + \frac{\arccos K}{N} \leq \theta \leq \frac{2\pi(T+1)}{N} - \frac{\arccos K}{N} \quad (5)$$

$$T=0, 1, 2, \dots, N$$

式中, T 为三角函数的周期; β 为中间变量; $\rho_1^0(\theta, \phi)$ 为定子骨线的 n 个尖点; $\rho_2^0(\theta, \phi)$ 为定子骨线复矢量; ϕ 为行星运动的滚圆滚角, rad。

短幅外摆线型螺杆泵的建模参数如下(长度

基金项目:黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12541098)

作者简介:杜秀华(1964—),女,黑龙江大庆人,东北石油大学教授,博士,主要从事采油机械的性能及失效分析研究。

E-mail: cxdxh@126.com

单位为mm): $N=2$, $K=0.5$, 偏心距(E) $=6$, 转子等距半径 9.6 , 定子等距半径 10 , 从而保证过盈量 0.4 , 定子导程(T_b) 270 , 转子橡胶厚度 7 , 定子外廓直径(D) 50 。利用Matlab软件分别将转子和定子的骨线方程生成骨线, 再分别向内等距出型线, 如图1(a)所示, 将转子型线和内廓沿螺旋线扫描形成转子橡胶(转子只建橡胶部分, 为空心螺旋体), 将定子型线在金属圆柱体上扫描, 并进行切除, 形成金属定子。将转子和定子进行偏心装配, 形成螺杆泵几何模型, 如图1(b)所示。

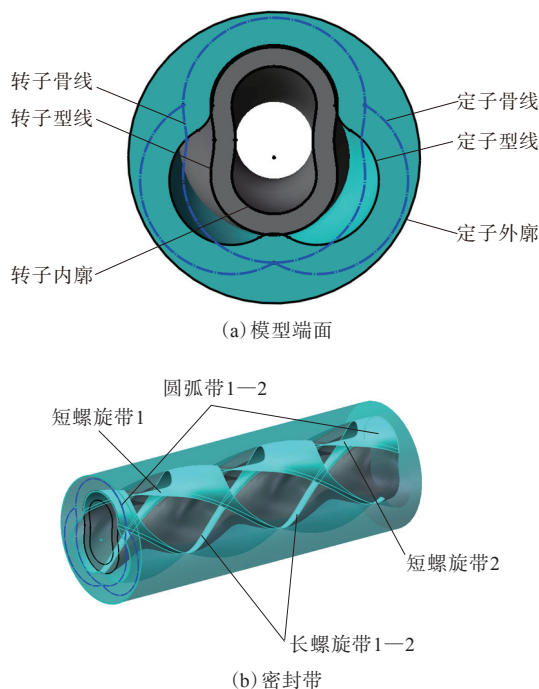


图1 双头短幅外摆线型螺杆泵实体模型

1.2 有限元模型

取1/3导程的双头短幅外摆线型螺杆泵模型作为计算模型, 转子橡胶采用SOLID185单元, 金属定子采用SOLID45单元。对定子/转子的啮合面建立接触对, 将定子内表面设置为目标单元, 采用TARGE170单元, 转子外表面设置为接触单元, 采用CONTA174单元。对转子橡胶内表面施加固定约束来模拟转子的金属部分, 转子的两个端面施加对称约束, 定子的两个端面施加固定约束。对不同腔室内转子橡胶外表面分别施加大小不同的法向压力来模拟螺杆泵各腔室内压。

1/3导程双头短幅外摆线型螺杆泵有限元模型如图2所示。

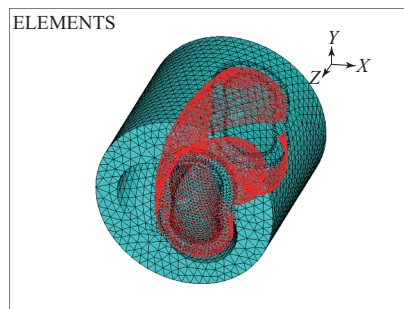


图2 1/3导程双头短幅外摆线型螺杆泵有限元计算模型

2 举升性能的有限元分析

2.1 泄露危险位置的确定

一个导程的双头短幅外摆线型螺杆泵模型包括一个完整的密闭腔室, 围成该腔室的密封带包括两段圆弧带、两段短螺旋带和两段长螺旋带, 如图1(b)所示。密封带上各处的接触应力不同, 接触应力最小处是发生泄漏的危险位置。利用上述有限元模型, 对低压腔室施加0 MPa, 高压腔室施加3.2 MPa压力, 运用ANSYS软件进行有限元计算, 密封带接触应力云图如图3所示。

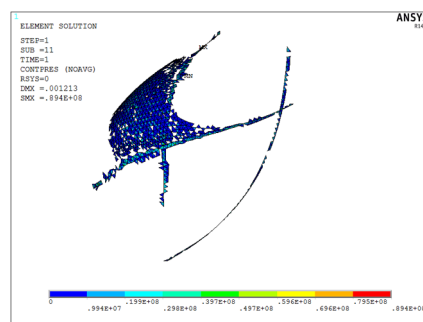


图3 密封带接触应力云图

从图3可知, 最小接触应力发生在长螺旋带的中间区域(节点号为4 959, 4 960, 4 961和4 962组成的区域), 该处是发生泄漏的危险位置。对密封与泄露的分析和临界接触应力的计算都是针对这个位置的。

2.2 定子/转子的接触分析

采油用双头短幅外摆线型螺杆泵竖直安装于井下, 其下部具有一定的沉没度, 上部定子与油管柱相连, 转子与抽油杆柱连接。螺杆泵开始工作, 抽油杆带动转子旋转, 由于井下具有一定的沉没度, 产生吸油过程, 从下向上依次充满各腔室, 腔

室压力均为沉没度压力。螺杆泵继续工作, 产出液进入油管, 液面逐渐升高, 此时螺杆泵排出腔压力逐渐增大, 与相邻腔室间的压差增大, 当压差大于密封带最小接触应力时, 此处发生泄漏, 下一级腔室压力升高, 压差减小, 直到压差等于最小接触应力时密封重建。该最小接触应力称为临界接触应力。随着油管液柱高度的增大, 腔室间的泄漏和密封过程逐级向下传递, 直到油管内的产出油液被举升至地面。可见螺杆泵工作始终是油液举升与油液在腔室间泄漏窜流的动态平衡过程。由此可见, 高压腔的压力等于与之相邻的低压腔压力与两腔之间的临界接触应力之和, 如果螺杆泵的级数选择合适, 即螺杆泵在举升原油过程中, 所有腔室都参与了工作, 则有

$$P_a = P_0 + \sum_{i=1}^a \Delta P_{i(i-1)} \tag{6}$$

式中, P_a 为排出腔压力, 即举升压力, MPa; P_0 为入口压力, 即油井沉没度压力, MPa; $\sum_{i=1}^a \Delta P_{i(i-1)}$ 为各相邻腔室间的临界接触应力之和, MPa, 共 a 个腔室。

2.3 临界接触应力和举升压力分析

对于双头短幅外摆线型螺杆泵有限元模型, 保证施加于低压腔室内的压力不变, 逐渐提高施加于高压腔室内的压力, 即增大其压差, 密封带上的接触应力减小, 直到与压差相等, 则处于密封与泄漏的临界状态, 此时的接触应力为临界接触应力, 载荷施加方案如表1所示。

表1 腔室施加压力和临界接触应力					MPa
项 目	序号				
	1	2	3	4	5
低压腔室内压力	0	1.0	3.0	4.0	5.0
高压腔室内压力					
I	0	3.5	4.5	5.5	6.0
II	2.8	3.7	4.8	5.8	6.2
III	3.0	4.0	5.0	6.0	6.5
IV	3.2	4.2	5.3	6.2	6.6
V	3.5	4.3	5.5	6.3	6.8
临界接触应力	3.22	3.09	2.44	2.10	1.64

利用ANSYS软件对表1中第1列数据进行计算, 得到接触应力随压差变化曲线, 如图4所示。

从图4可以看出, 临界接触应力为3.22 MPa, 利用相同方法可得到其他4列数据的临界接触应力, 并绘制成曲线, 如图5所示。

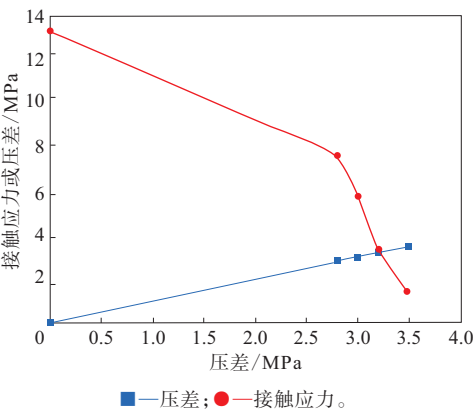


图4 低压腔(0 MPa)接触应力随压差变化曲线

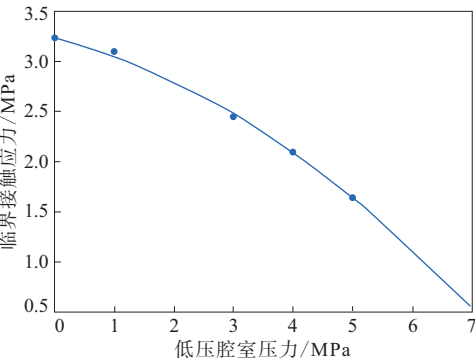


图5 临界接触应力随低压腔室压力变化曲线

由式(4)可知, 螺杆泵的举升压力为入口压力与各腔室间的临界接触应力之和。已知螺杆泵的入口压力(低压腔压力), 由图5找到对应的临界接触应力, 求和即得到相邻高压腔压力; 以此作为低压腔压力, 由图5找到对应的临界接触应力, 再求和, 又得到与之相邻的高压腔压力, 以此类推, 即可得到二级(两个导程)螺杆泵的举升压力为7.8 MPa。

3 双头短幅内外摆线型螺杆泵举升性能对比

3.1 举升压力

通过上述有限元计算, 得到双头短幅外摆线型螺杆泵模型的举升压力为7.8 MPa。建立与此模型等价的双头短幅内摆线型螺杆泵模型参数如下(长度单位为mm): $N=2, K=0.5, E=6$, 转子向外等距 10, 定子向外等距 9.6, 过盈量 0.4, $T_h=270$ 。为了更好地与双头短幅外摆线型螺杆泵对比, 在此建立等壁厚螺杆泵模型, 定子橡胶厚度为7 mm, 利用上述有限元计算方法, 得到其举升

压力为11 MPa。由此可见,双头短幅外摆线型螺杆泵的举升压力比双头短幅内摆线型螺杆泵降低30%左右。

3.2 排量

螺杆泵的排量表达式为

$$q=A_G N T_h \quad (7)$$

式中, q 为排量, $L \cdot \min^{-1}$; A_G 为过流面积, mm^2 。

对于短幅外摆线型螺杆泵,过流面积表达式为^[6]

$$A_G = 2(N+1)[A_{\frac{1}{2}g}^w - L_{\frac{1}{2}g}^w r] - (N+1)(N+1 + K^2)\pi R^2 + 4r(N+1)(1+K)RE_r(\frac{\pi}{2}, u) \quad (8)$$

式中, $A_{\frac{1}{2}g}^w$ 为定子半个周期骨线包围面积, mm^2 ; $L_{\frac{1}{2}g}^w$ 为定子半个周期骨线弧长, mm ; r 为等距半径, mm 。

参量 $A_{\frac{1}{2}g}^w$, $L_{\frac{1}{2}g}^w$ 和 $E_r(\frac{\pi}{2}, u)$ 的计算公式见参考文献[5],利用Matlab软件编程,将双头短幅外摆线型螺杆泵的模型参数代入,计算出排量为 $6.13 L \cdot \min^{-1}$ 。

对于双头短幅内摆线型螺杆泵,过流面积表达式为^[7]

$$A_G = [N(N-K^2)\pi R^2 + L^n r] - [2NA_{\frac{1}{2}g}^n + 2NrL_{\frac{1}{2}g}^n] \quad (9)$$

式中, L^n 为定子骨线周长, mm ; $A_{\frac{1}{2}g}^n$ 为转子半周期骨线包围的面积, mm^2 ; $L_{\frac{1}{2}g}^n$ 为转子半周期骨线弧长, mm 。

参量 L^n , $A_{\frac{1}{2}g}^n$ 和 $L_{\frac{1}{2}g}^n$ 的计算公式参考文献[7],利用Matlab软件编程,将双头短幅内摆线型螺杆泵的

模型参数代入,计算出排量为 $9.28 L \cdot \min^{-1}$ 。由此可见,外摆线型螺杆泵的排量比内摆线型螺杆泵降低30%左右。

综上所述,与双头短幅内摆线型螺杆泵相比,双头短幅外摆线型螺杆泵的举升压力和排量都降低了30%,但鉴于双头外摆线型螺杆泵的检泵成本低、加工容易等优势,短幅外摆线型螺杆泵适用于产量低的浅井。

4 试验验证

目前,由于该课题的理论研究难度较大,因此将有限元模型计算结果在螺杆泵性能检测试验台(见图6)上进行试验。以试验数据为基础,验证有限元模型计算结果的可靠性。



图6 螺杆泵性能检测试验台

以油田现场普遍采用GLB120-27型双头短幅内摆线型螺杆泵为研究对象,将其转速控制在 $100 r \cdot \min^{-1}$ 以下,试验结果如表2所示。

从表2可以看出,随着双头短幅内摆线型螺杆

表2 双头短幅内摆线型螺杆泵性能试验结果

项 目	序号					
	1	2	3	4	5	6
泵压/MPa	2.40	4.62	6.58	8.37	10.30	12.40
排量/($L \cdot \min^{-1}$)	16.94	16.91	16.71	14.91	11.31	4.73
容积效率/%	98.06	97.90	96.74	94.57	86.37	65.50
转矩/($N \cdot m$)	78.23	127.25	165.93	205.03	246.40	288.89
转速/($r \cdot \min^{-1}$)	98.13	98.06	98.23	98.17	97.92	98.14
总效率/%	58.46	69.26	74.56	75.10	70.42	54.54

泵泵压的增大,排量逐渐减小,容积效率也减小,转矩呈线性增大,总效率先增大后减小。同理,双头短幅外摆线型螺杆泵也采用同样方法进行试验。

将双头短幅内外摆线型螺杆泵的举升压力和排量的有限元模型计算结果与试验结果进行对

比,误差为4%,表明计算结果可靠,可以参考。

5 结论

(1)利用螺杆泵三维有限元模型,定义和模拟计算临界接触应力,再结合腔室间压力的传递规

律,计算出双头短幅内外摆线型螺杆泵的排量和举升压力。探索出一种利用有限元法模拟计算短幅内外摆线型螺杆泵举升压力的方法。

(2)与双头短幅内摆线型螺杆泵相比,双头短幅外摆线型螺杆泵的举升压力和排量均降低了30%左右。油田用双头短幅内摆线型螺杆泵可以有效提高工作效率,节省时间;双头短幅外摆线型螺杆泵生产和检修成本低,适用于产量低的浅井。

(3)通过有限元分析与试验分析相结合的方法对双头短幅内外摆线型螺杆泵的举升压力和排量进行对比,其误差为4%。结果表明本研究有限元模型建立正确,计算结果可靠。

参考文献:

- [1] 任斌,张树有. 双头单螺杆泵短幅内摆线型仿真优化技术[J]. 机械工程学报,2009,45(9):144-151.
- [2] 杜秀华,刘双新,宋玉杰,等. 短幅内摆线型螺杆-衬套副滑动速度分析[J]. 化工机械,2015,4(42):522-526.
- [3] 杜秀华,刘双新,田密,等. 外摆线型单螺杆泵螺杆-衬套副的运动特性分析[J]. 中国机械工程,2016,11(27):1450-1454.
- [4] 韩国有,董阳阳,韩道权,等. 螺杆泵定子橡胶力学试验及本构模型研究[J]. 橡胶工业,2017,64(5):295-297.
- [5] 苏义脑. 螺杆钻具研究及应用[M]. 北京:石油工业出版社,1993.
- [6] 刘双新. 外摆线型单螺杆泵运动仿真及结构参数优化[D]. 大庆:东北石油大学,2016.
- [7] 宋玉杰. 单螺杆泵螺杆衬套线型分析[D]. 大庆:大庆石油学院,2008.

收稿日期:2019-04-09

Comparison of Lifting Performance of Two-stage Double-thread Short-amplitude Internal and External Cycloidal Screw Pumps

DU Xiuhua, JIA Sihan, HAN Daoquan, GUAN Ce

(Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

Abstract: Taking two-stage double-thread short-amplitude internal cycloidal screw pump as the research object, the chamber pressure formation and lifting performance such as lifting pressure and displacement were analyzed. The results showed that, compared with the double-thread short-amplitude internal cycloidal screw pump, the lifting pressure and displacement of external cycloidal pump were reduced by about 30%. Therefore, the external cycloidal screw pump was more suitable for applications in the shallow wells with low production due to its low production and maintenance cost, while use of the internal cycloidal screw pump in oil field could improve work efficiency and save time effectively.

Key words: short-amplitude external cycloid; short-amplitude internal cycloid; screw pump; lifting performance; critical contact stress

一种电缆用丁腈橡胶改性材料及其制备方法 由四川力智久创知识产权运营有限公司申请的专利(公开号 CN 107674262A, 公开日期 2018-02-09)“一种电缆用丁腈橡胶改性材料及其制备方法”,涉及的材料配方为:丁腈橡胶 50~60,聚乙烯 15~25,酚醛树脂 20~30,陶瓷纤维 12~15,偶联剂 1~5,纳米氧化铝 0.3~0.8,分散剂 1~3,交联剂 0.3~0.5。该材料具有优异的强度性能和绝缘性能,可用于海洋电缆。

(本刊编辑部 赵 敏)

一种废旧橡胶粉表面改性方法 由山西省交通科学研究院申请的专利(公开号 CN 107674238A, 公开日期 2018-02-09)“一种废旧橡胶粉表面改性方法”,提供了一种废旧胶粉表面改性方法,即将废旧胶粉表面依次经过清水处理、碱性溶液处理、偶联剂处理和纳米二氧化硅包覆处理,制得改性废旧胶粉团聚体,然后对团聚体进行破碎处理制得产品。与现有技术相比,该方法可以显著提高废旧胶粉的综合物理性能以及与环境树脂、水泥浆体等胶结料的界面相容性和界面粘接强度。

(本刊编辑部 赵 敏)