

文章编号: 1000-8241(2021)02-0233-08

基于接触摩擦特性的清管器清洁能力评价方法

刘畅 魏云港 田宏军 曹宇光

中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院·山东省油气储运安全重点实验室

摘要: 基于三维有限元数值模拟方法,从密封元件的接触摩擦特性出发,创新性地提出一种清管器清洁能力评价方法。利用 ANSYS 软件建立两种常见形式的清管器在水平直管内运行的三维有限元模型,并通过现场试验对其准确性进行验证。通过分析计算结果,分别对不同摩擦工况下的两种清管器的清洁能力进行对比。研究表明:接触摩擦因数对清管器在运行过程中的密封紧密度、切向刮擦力、有效清洁面积均存在影响,随着摩擦因数的增加,清管器密封元件的切向刮擦力增大,而接触紧密度和接触面积减小。在相同摩擦工况下,当密封元件材料和过盈量相同时,直板型清管器的密封紧密度和刮擦力均优于皮碗型清管器;然而在运行相同距离的情况下,皮碗型清管器所能产生的有效清洁面积大于直板型清管器。根据待清洁管道内的杂质类型来合理选择清管器种类可以有效发挥其清洁能力,提高清洁效率。(图 13,表 2,参 27)

关键词: 皮碗型清管器;直板型清管器;接触摩擦特性;清洁能力;刮擦力

中图分类号: TE832

文献标识码: A

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.02.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



An evaluation method of pig cleaning capacity based on contact friction characteristics

LIU Chang, WEI Yungang, TIAN Hongjun, CAO Yuguang

College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China)//Shandong Key Laboratory of Oil & Gas Storage and Transportation Safety

Abstract: Based on the three-dimensional finite element numerical simulation, an evaluation method of pig cleaning capacity was innovatively proposed from the perspective of the contact friction characteristics of the sealing component. Three-dimensional finite element models were established for two kinds of typical pigs running in horizontal straight pipeline with ANSYS, and the accuracy of the models was verified by field tests. Further, the cleaning capacity of the two kinds of pigs under different friction conditions were compared respectively through analysis on the calculation results. The research results show that the contact friction coefficient can affect the sealing tightness, tangent scraping force and effective cleaning area of running pigs. The scraping force increases with the increasing of friction coefficient while the sealing tightness and the contact area decrease. If the material and interference of the sealing components are identical under the same friction condition, the sealing tightness and the scraping force of the straight plate pig are superior to those of cup pig. However, the effective cleaning area of the cup pig is larger than that of the straight plate pig with same running distance. Appropriate pig should be selected according to the type of impurity in the pipeline to be cleaned, so that the cleaning capacity and efficiency can be improved effectively. (13 Figures, 2 Tables, 27 References)

Key words: cup pig, straight plate pig, contact friction characteristics, cleaning capacity, scraping force

目前,中国关于管道清管尚未形成统一的标准规范,清管器种类繁多且功能各异。因此,合理地选择清管器有助于提高工作效率,降低施工风险^[1]。刘刚等^[2-3]对国内外常用清管器进行了调研和分类,并分析

了各种清管器的适用条件。芯轴式清管器是最常见的清扫型清管器,其依靠橡胶密封件与管道内壁间的接触摩擦作用使附着于管壁上的垢层脱离并随管输介质一同排出^[4]。根据橡胶密封件的不同形状,可以将芯

轴式清管器分为皮碗型和直板型两种,其中皮碗型清管器具有清洁效果好、通过性强的优势,但存在发生卡堵事故时难以解卡的困难;直板型清管器具有可双向行驶的技术特点,因此在发生卡堵时易于解卡。在工程实际中,仅依靠工作人员的经验进行清管器选型缺乏科学依据^[5-7]。然而,关于清管器清洁能力评价的研究并不多见。目前,国内外学者关于清管器密封元件与管壁之间接触摩擦特性的研究已经取得一定成果,刘小明^[8]通过建立力学模型结合 Abaqus 有限元软件,从皮碗自身结构和工况条件两个方面对皮碗型密封元件的接触性能进行了分析。刘保余^[9]和李娜^[10]建立了底部为刚性体的皮碗型清管器摩擦阻力计算模型,并对该类型清管器进行了室内试验,通过理论求解和实验数据对比验证计算结果的准确性。Zhu 等^[11-14]通过建立二维非线性有限元模型,研究了直板型清管器密封元件的过盈量、夹持率、厚度对直板接触应力和弯曲角度的影响。在前人的研究中,通常不考虑清管器密封元件与管壁间摩擦因数的变化对于接触特性的影响。然而,在工程实际中,由于管输介质以及管道内壁的状况不同,其与清管器之间的接触摩擦因数存在很大差别^[15]。因此,研究摩擦因数对于清管器接触摩擦特性的影响具有重要意义。借助 ANSYS 软件,基于三维有限元数值模拟方法,以两种典型的清管器为例,提出了以清管器密封元件的接触摩擦特性为判据的清管器清洁能力评价方法。通过分析多种摩擦工况下清管器密封元件与管道间的接触摩擦行为,从密封紧密度、切向刮擦力、有效清洁面积 3 个角度对两种清管器的清洁能力进行了定性分析。结论为芯轴式清管器的选型提供了一定的科学依据和数据基础。

1 清管器有限元模型建立

1.1 管道及清管器模型的建立

利用有限元软件 ANSYS 分别建立皮碗和直板清管器在水平直管道内运行的三维有限元模型(图 1、表 1)。选择 3D 实体单元 Solid185 对模型进行网格划分,为保证计算精度,将密封元件(皮碗和直板)的环向与管道环向设置为相同的网格份数。清管器主要由密封元件、芯轴、夹板 3 部分构成。其中芯轴和夹板的材料为结构钢,其弹性模量 $E=203 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu=0.3$ 。用于制作密封元件的聚氨酯橡胶属于非线性材料,其与金属管

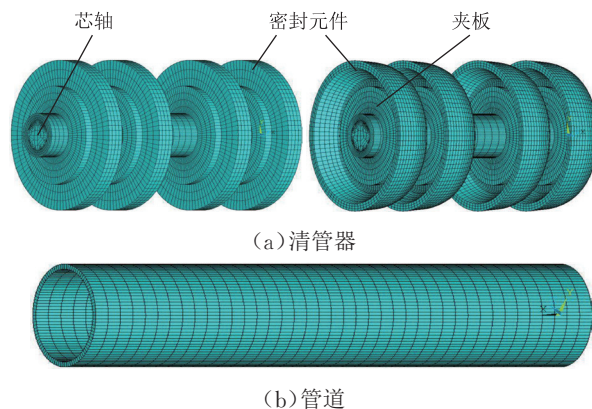


图 1 清管器与管道有限元模型

表 1 管道及清管器模型尺寸参数 mm

管道长度	管道外径	管道壁厚	圆盘/皮碗外径	芯轴长度	夹板外径
1 000	220	11	206	270	67.5

道内壁的接触问题属于高度非线性问题。此处采用两参数的 Mooney-Rivlin 模型对该材料进行定义,模型参数由式(1)~(3)计算得出^[16-17]:

$$E = \frac{15.75 + 2.15 H}{100 - H} \quad (1)$$

$$C_{10} = \frac{E}{6 \times 1.25} \quad (2)$$

$$C_{01} = 0.25 C_{10} \quad (3)$$

式中: H 为橡胶硬度,取 75 HA,由 A 型邵氏硬度计测量得到; C_{10} 、 C_{01} 为 Rivlin 系数。

1.2 接触对模型的建立

结合实际工况,建立接触对模型(图 2)。在皮碗元件和直板元件表面采用 CONTA173 定义接触单元,在管道内壁面和入口端面使用 TARGE170 定义目标单元。根据橡胶密封元件与管壁的实际接触情况,选择接触类型为面-面接触,接触方式为刚体-柔体接触,接触算法为罚函数法^[18]。为兼顾计算结果的准确性和计算过程的易收敛性,通过试算确定接触刚度为 1.0,穿透容差为 0.2。根据文献资料^[19-24],考虑不同工况,接触摩擦因数取 0.1~0.5。

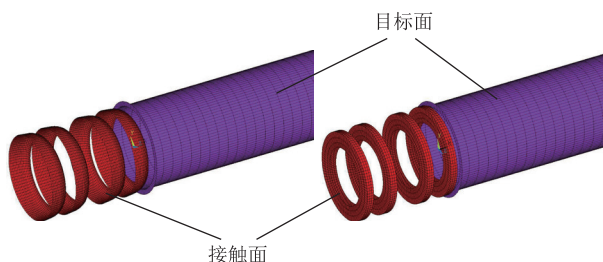


图 2 接触对模型示意图

1.3 边界条件

根据现场实际工况,将管道左、右端面的单元节点进行位移全约束,对于清管器则仅允许其拥有沿管道轴向的自由度。在清管器芯轴中部建立位移控制节点,通过对该点施加沿管道轴向的位移来模拟清管器在管道中的运动,将位移载荷分为多个载荷步进行加载,以降低计算收敛的难度。

2 清管器有限元模型验证

基于所建立的有限元模型,设计并搭建同尺寸的室内牵拉试验平台(图3),通过测试清管器在牵拉试验中稳定运行时所需的牵引力,并与数值模拟结果进行对比,对有限元模型进行修正,以确保其准确性和可靠性。清管器自身重力对其运行摩擦阻力的影响很小^[25],因此可以忽略,认为清管器稳定运行时所需的牵拉力等于其所受的摩擦阻力。

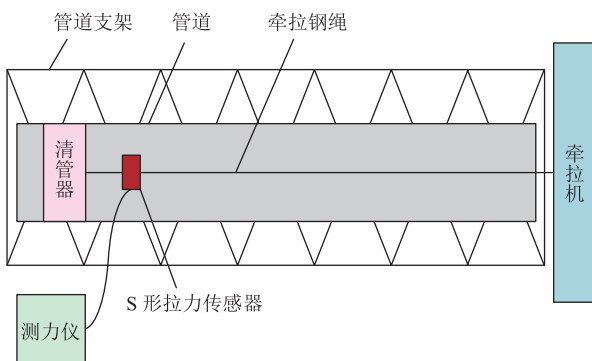


图3 牵拉试验设备示意图

将试验管道固定在管道支架上,在其两端焊接收发球筒以保证清管器可以顺利进入管道。将牵拉机安装在管道支架的一端,为清管器的运行提供动力,另一端安装定滑轮组以节省操作空间。试验开始前,在牵拉钢绳和清管器之间连接S形拉力传感器,并将传感器与测力仪连接,安装完毕后,设定牵拉机的转动频率为恒定值进行试验。从测力仪中实时读取并记录清管器运行过程中所受的牵拉力大小,将运行稳定时牵拉力随运行距离的变化曲线与同工况下的皮碗清管器有限元模型计算结果进行对比(图4)。

由图4可以看出,清管器稳定运行时的牵拉力平均值为2 150 N,有限元模拟得到的稳定运行时的摩擦阻力为1 790 N,两者相对误差为12.6%,符合工程上对计算精度的要求。说明使用三维有限元数值模拟方法对清管器在管道内的运行过程进行分析是可靠的。

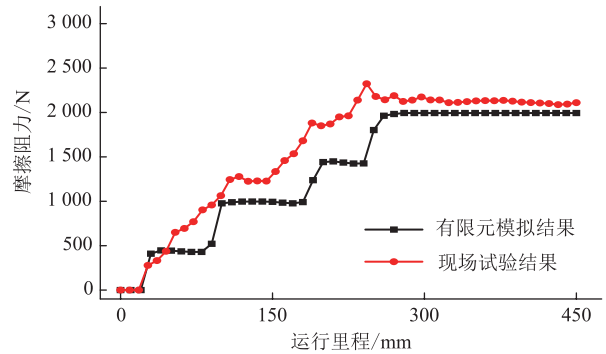


图4 沿程牵拉力和摩擦阻力随运行里程的变化曲线

3 清管器清洁能力分析与评价

清管器的清洁能力是指清管器在运行过程中,密封元件与管壁发生过盈接触时对管内污垢形成剪切效果的能力,也是决定其清洁效果的重要因素。经研究发现,清管器与管壁间的接触摩擦特性直接影响到清管器的清洁能力,以下通过分析清管器密封元件与管壁间的接触紧密程度、切向刮擦力及有效清洁面积对两种清管器的清洁能力进行评价。

3.1 密封紧密度

清管器在管道内运行时,密封元件与管道内壁形成过盈配合,因而受到径向的接触压力。接触压力的大小反映了清管器密封元件与管壁贴合的紧密程度,在材料和过盈量相同的情况下,密封元件的环向应力状态会直接影响清管器与管壁的密封紧密度。分别提取皮碗型清管器和直板型清管器在不同摩擦因数下运行时所受的径向接触压力(图5),可以看出在过盈量相同的情况下,直板型清管器的径向接触压力明显高于皮碗型清管器,说明两者在进行清管操作时,直板型清管器与管壁贴合得更紧密。由于两种密封元件的几何形状存在明显差别,进入管道后,密封元件在径向接触压力的作用下会发生压缩变形,对于密封圆盘和密

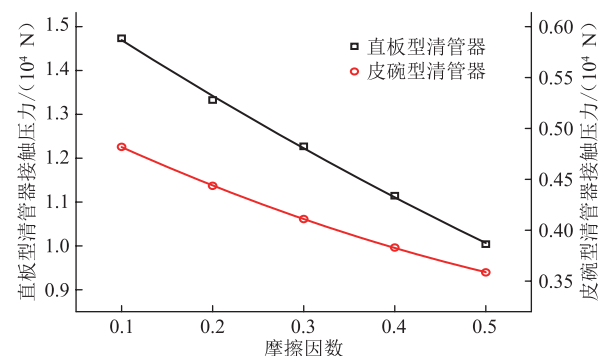


图5 两种清管器的接触压力对比曲线

封皮碗而言,其边缘沿圆周方向受压的单元可分别简化为内侧带有支撑圆柱的圆环和空心圆环(图6)。

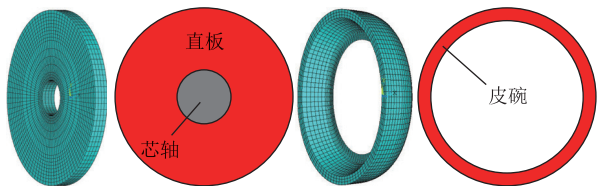


图6 直板和皮碗边缘受力单元的简化模型

根据邹雨等^[26]关于超弹性材料过盈配合问题的研究结果,并按照实际情况对理论模型进行分析,可以得出密封元件边缘受压橡胶体在过盈配合情况下所受径向压应力 $-p_r$ 的解析解表达式:

$$-p_r = -p_s + \int_{R_s}^{R_r} 2 \left[\left(\frac{\partial U}{\partial I_1} + \bar{I}_1 \frac{\partial U}{\partial I_2} \right) \left(\frac{r^2}{R^2} - \frac{R^2}{r^2} \right) - \frac{\partial U}{\partial I_2} \left(\frac{r^4}{R^4} - \frac{R^4}{r^4} \right) \right] \frac{1}{r} dr \quad (4)$$

式中: $-p_s$ 为过盈面内侧所受的径向压力,对于皮碗清管器,由于其简化为空心圆环,因此 $-p_s$ 为0; U 为橡胶材料的应变能密度方程; \bar{I}_1 、 \bar{I}_2 分别为第一和第二 Green 应变不变量; R 、 r 分别为橡胶体内任意一点在变形前、后的半径,mm; R_r 、 R_s 分别为橡胶密封元件的内径、外径,mm。

对于直板清管器,由于其内部为实心钢轴,因此:

$$-p_s = \frac{u_s E_s}{(1-\nu_s) R_s} \quad (5)$$

式中: u_s 为过盈配合时橡胶体产生的径向压缩量,mm; E_s 为钢轴材料的弹性模量,MPa; ν_s 为钢轴材料的泊松比。

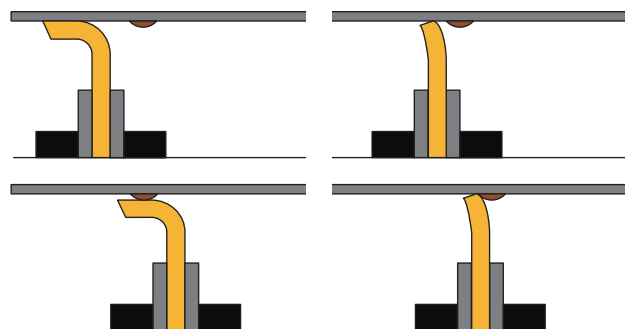
经整理后,两种密封元件所受径向压应力的表达式可以分别表示为:

$$-p_{rc} = \int_{R_{sc}}^{R_{rc}} 2 \left[\left(\frac{\partial U}{\partial I_1} + \bar{I}_1 \frac{\partial U}{\partial I_2} \right) \left(\frac{r^2}{R^2} - \frac{R^2}{r^2} \right) - \frac{\partial U}{\partial I_2} \left(\frac{r^4}{R^4} - \frac{R^4}{r^4} \right) \right] \frac{R}{R^2 - R_{sc}^2 + R_{sc}'^2 (1 + z_c)} dR \quad (6)$$

$$-p_{rd} = \frac{u_s E_s}{(1-\nu_s) R_{sd} R_{rd}} \int_{R_{sd}}^{R_{rd}} 2 \left[\left(\frac{\partial U}{\partial I_1} + \bar{I}_1 \frac{\partial U}{\partial I_2} \right) \left(\frac{r^2}{R^2} - \frac{R^2}{r^2} \right) - \frac{\partial U}{\partial I_2} \left(\frac{r^4}{R^4} - \frac{R^4}{r^4} \right) \right] \frac{R}{R^2 + R_{sd}^2 z_d} dR \quad (7)$$

式中: R_{sc}' 为皮碗变形后空心圆环的内径,mm; R_{rc} 、 R_{sc} 分别为皮碗密封元件的内径、外径,mm; R_{rd} 、 R_{sd} 分别为直板密封元件的内径、外径,mm; z_c 、 z_d 分别为皮碗、直板的轴向伸长量,mm。

对于材料相同,外径相等的皮碗密封元件和圆盘密封元件, $R_{rc} = R_{rd}$, 而 $R_{sc} > R_{sd}$ 。受到径向压力后,圆环受到压缩,因此 $R_{sc}' < R_{sc}$, 若取 $R_{sc}' = R_{sc}$, 则 $RdR/[R^2 - R_{sc}^2 + R_{sc}'^2 (1 + z_c)]$ 可以简化成为 $RdR/(R^2 + R_{sc}^2 z_c)$, 并取极小值。对上述二式做定性分析可知, $-p_{rd} \gg -p_{rc}$ 。结合实际情况分析,当 $R_{sc}' < R_{sc}$ 时, $-p_{rc}$ 的值增加,但其增大后仍远小于 $-p_{rd}$ 。说明在相同过盈量条件下,直板密封元件外侧所受的径向压应力远大于皮碗密封元件。根据 Cao 等^[27]对于超弹性材料过盈配合时橡胶圆环的轴向伸长量计算结果可知,轴向伸长量 z 远小于圆环的内径、外径,因此可以忽略其对分析结果的影响。由上述分析可知,当密封元件的过盈量和材料相同时,直板清管器与管道间的接触比皮碗清管器更紧密,当管内杂质与管壁间的黏附力较大时,不会因为接触压力不足而导致清洁不彻底(图7)。



(a) 皮碗型密封不紧密 (b) 直板型密封紧密

图7 两种清管器的密封紧密度对比示意图

3.2 切向刮擦力

在密封元件与管道内壁紧密接触的前提下,清管器受到流体压差的作用沿管道轴向运行,此时密封元件与管壁间的切向摩擦力可以对管道内的杂质和污垢产生刮擦力,只有当刮擦力足够大时,清管器才能够克服管垢与管壁之间的黏附力,达到理想的清洁效果,否则可能会造成清管失败甚至引起卡堵事故。因此,密封元件与管壁之间的摩擦力是决定清管器清洁能力的重要因素。在现场操作过程中,待施工管道情况多样,管道内壁的腐蚀情况以及管垢类型会直接影响清管器与管壁间的摩擦状态。通过在接触模型中设定不同的摩擦因数来模拟不同的摩擦工况,并对有限元模型进行解算,从 ANSYS 后处理器中分别提取不同摩擦工况下两种清管器在运行过程与管道内壁之间的摩擦力(图8)。

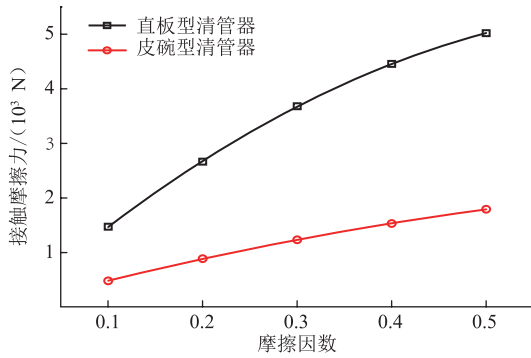


图 8 两种清管器的接触摩擦力对比曲线

从图 8 可以看出,两种清管器与管壁间的摩擦力均随着摩擦因数的增大而增大,且在同一种摩擦工况下,直板型清管器与管壁间的摩擦力明显高于皮碗型。其原因是,清管器进入管道后,密封元件由于存在尺寸过盈会发生压缩变形和弯曲变形(图 9、图 10)。由前文分析可知,压缩变形主要在径向接触压应力的作用下产生,而切向接触摩擦应力则会使密封元件产生弯曲变形。当橡胶密封元件发生弯曲变形时,切向接触应力对其做功并储存为弹性应变能。因此,当密封元件储存的弹性应变能较大,即密封元件的变形量较大时,管壁与密封元件间的切向接触力较大。分别提取两种密封元件上的边缘节点在变形前、后沿轴向的偏移距离,并以此来表征密封元件在切向摩擦力作用下的变形程度。相对于皮碗而言,相同外径尺寸的直板

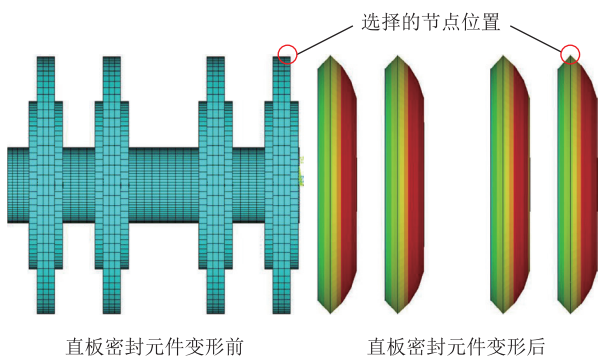


图 9 直板型清管器变形示意图

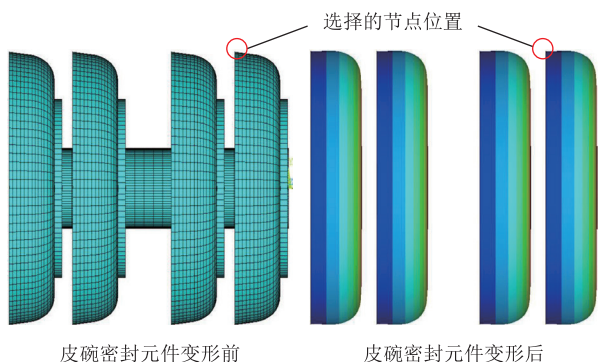


图 10 皮碗型清管器变形示意图

型密封元件其变形程度明显较大(图 11)。对于同一种清管器,密封元件的轴向伸长量随着摩擦因数的增大而增加,这一现象同样解释了切向摩擦应力在不同摩擦工况下的变化规律。

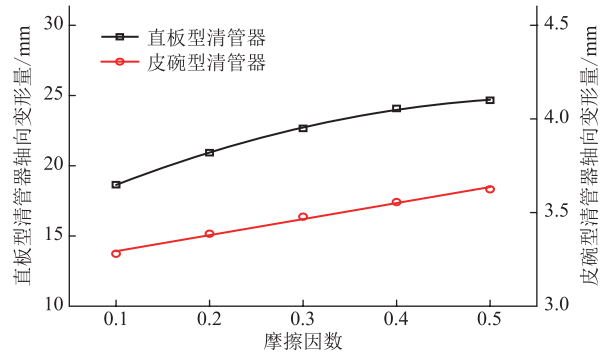


图 11 两种清管器的变形程度对比曲线

综上所述,在密封元件材料和过盈量相同的情况下,直板型清管器在运行过程中可以对管垢产生更大的切向刮擦力,其清洁效果优于皮碗型清管器且不易发生卡堵。从密封紧密度和切向刮擦力的角度,对于局部黏附力较大的杂质,直板型清管器能发挥更好的清洁能力。

3.3 清管器的有效清洁面积

管垢是在管道长期输送过程中由于管壁腐蚀和输送介质自身品控等问题综合作用产生的,很难一次性清理干净,为达到理想的清洁效果,通常需要重复清管。因此,清管器的有效清洁面积在一定程度上影响着清管器的清洁效率。从 ANSYS 后处理器中提取了不同摩擦因数条件下,两种清管器稳定运行期间内任意时刻的接触面积 S' (图 12),可见,对于材质和过盈量相同的两种清管器,在运行过程中皮碗型清管器与管道之间的接触面积远大于直板型。随着摩擦因数的增大,直板型清管器与管道间的接触面积明显减小,而皮碗型清管器的接触面积几乎不发生变化。分别提取摩擦因数为 0.1 和摩擦因数为 0.5 时的直板型清管器

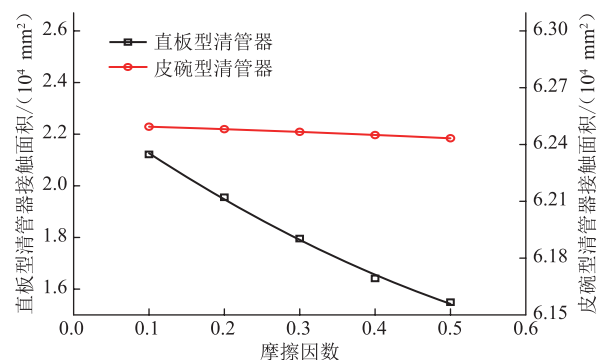


图 12 同一时刻两种清管器与管道接触面积对比曲线

接触面积云图(图 13),可见直板型密封元件有两个面与管道内壁发生接触,分别为直板的周向曲面和右侧面,当摩擦因数较小时,直板的弯曲程度较小,此时主要由直板的周向曲面与管道发生接触,而右侧面的接触面积较小。随着摩擦因数的增加,直板元件由于受到更大的切向摩擦力而导致弯曲程度增大,此时直板的右端面与管壁的接触面积逐渐增大,而直板周向曲面与管壁的接触面积迅速减小,因此清管器整体与管壁的接触面积减小。

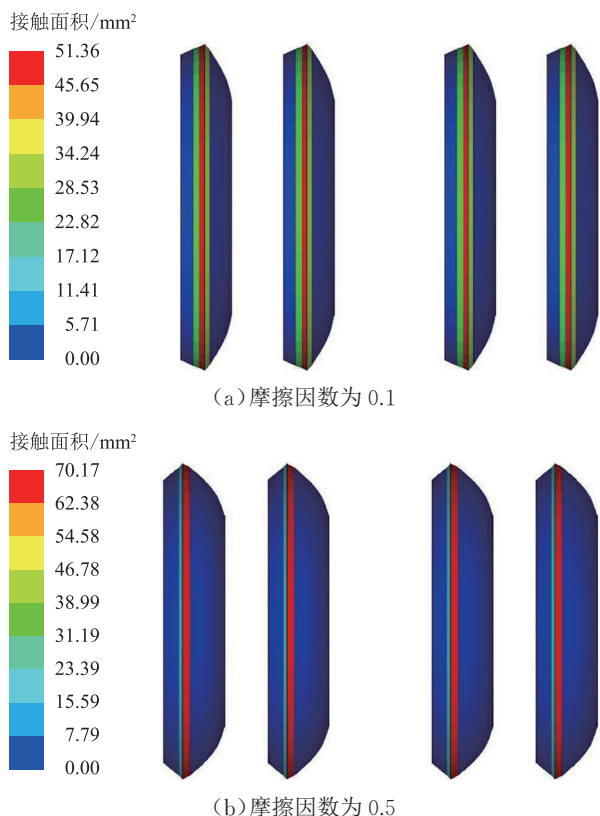


图 13 直板型密封元件与管道内壁接触面积随摩擦因数的变化云图

在清管器尺寸相同的情况下,从两种清管器所能清理的有效面积(表 2)中可以看出,当运行相同的距离时,使用皮碗型清管器能够产生更大的有效清洁面积,提高清洁效率。因此,对于黏附力较小且黏附面积较大的管道杂质,皮碗型清管器的清洁能力优于直板型清管器。

表 2 两种清管器有效清洁面积对比

摩擦因数	有效清洁面积/(10^5 mm^2)	
	皮碗型	直板型
0.1	168.73	57.28
0.2	168.70	52.80
0.3	168.66	48.48
0.4	168.62	44.32
0.5	168.57	41.83

4 结论

(1)基于三维有限元数值模拟方法对清管器在水平直管道内的接触摩擦行为进行分析具有良好的准确度和可靠性。

(2)在相同的摩擦工况下,当密封元件的过盈量和材料相同时,直板型清管器在运行过程中的密封紧密度和切向刮擦力均优于皮碗型清管器。然而,在运行相同距离时,皮碗型清管器所能清洁的有效面积大于直板型清管器,其清管效率较高。

(3)随着摩擦因数的增加,两种清管器的密封紧密度均减小,切向刮擦力均增大。对于单位时间内的有效清洁面积而言,直板型清管器明显减小而皮碗型清管器几乎无变化。说明清管器与管道内壁间的接触摩擦状态对清管器的清洁效果存在一定影响。

(4)基于清管器密封元件的接触摩擦特性,从 3 个方面分别对清管器的清洁能力进行了评价。结果表明:直板型清管器在使用过程中可以产生较大的法向接触力和切向摩擦力,适用于清理局部黏附力较大的杂质,如石蜡和内壁结垢等;而皮碗型清管器在使用过程中可以产生较大的有效清洁面积,适用于清洁黏附力较小且附着面积较大的杂质,如天然气凝析液或微生物等。

参考文献:

[1] 张金伟,陈传胜,尹家文.川气东送支线清管难点分析及对策[J].管道技术与设备,2017(1):51-53.
ZHANG J W, CHEN C S, YIN J W. Difficulty analysis and countermeasures in pigging of Sichuan-East gas transmission branch pipeline[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2017(1): 51-53.

[2] 刘刚,陈雷,张国忠,高国平,卢孟奎.管道清管器技术发展现状[J].油气储运,2011,30(9):646-653.
LIU G, CHEN L, ZHANG G Z, GAO G P, LU M L. Development status of pipe pigging devices[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2011, 30(9): 646-653.

[3] QUARINI J, SHIRE S. A review of fluid-driven pipeline pigs and their applications[J]. Journal of Process Mechanical Engineering, 2007, 221(1): 1-10.

[4] 代晓东,刘江波,党丽,石玉辉.国内外油气管道清管技术现状[J].石油工程建设,2017,43(1):1-5, 17.

- DAI X D, LIU J B, DANG L, SHI Y H. An overview on current status of oil and gas pipeline pigging technology at home and abroad[J]. *Petroleum Engineering Construction*, 2017, 43(1): 1-5, 17.
- [5] 刘文涛,陈晓明,孙金涛,柳宇,高磊,杨盛. 小口径海底管道水力清管工艺[J]. *油气储运*, 2016, 35(3): 339-342.
- LIU W T, CHEN X M, SUN J T, LIU Y, GAO L, YANG S. Hydraulic pigging process for small-diameter submarine pipelines[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2016, 35(3): 339-342.
- [6] 谭桂斌,王德国. 长输管道智能机器人摩擦学系统研究进展[J]. *油气储运*, 2016, 35(6): 583-590.
- TAN G B, WANG D G. Review on the tribological system of intelligent robots for long-distance pipelines[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2016, 35(6): 583-590.
- [7] 李华,王珂,王东,廖柯熹. 天然气管道清管器自激振动模型及影响规律[J]. *油气储运*, 2018, 37(10): 1163-1169.
- LI H, WANG K, WANG D, LIAO K X. Model and influential laws on the self-excited vibration of pigs for natural gas pipelines[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2018, 37(10): 1163-1169.
- [8] 刘小明. 芯轴式清管器皮碗接触性能研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015: 17-25.
- LIU X M. The research of contact characteristics on mandrel pig[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015: 17-25.
- [9] 刘保余. 输气管道内检测器设计及理论研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2010: 22-25.
- LIU B Y. Research on theory and design of gas-pipeline inner inspection PIG[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2010: 22-25.
- [10] 李娜. 输气管道在线内检测器驱动系统力学特性研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2010: 19-23.
- LI N. Mechanical characteristics on movement of on-line detection device drive system in the gas pipeline[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2010: 19-23.
- [11] ZHU X X, ZHANG S M, LI X L, WANG D G, YU D. Numerical simulation of contact force on bi-directional pig in gas pipeline: at the early stage of pigging[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, 23: 127-138.
- [12] 张行,王焱,张仕民,张康. 清管器密封皮碗力学特性的有限元分析[J]. *油气储运*, 2015, 34(11): 1225-1230.
- ZHANG H, WANG Y, ZHANG S M, ZHANG K. Finite-element analysis on mechanical properties of sealing disc for pig[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2015, 34(11): 1225-1230.
- [13] 张行,李庆,刘书海,张仕民. 大型清管器橡胶皮碗厚度对其刚度特性的影响[J]. *石油矿场机械*, 2015, 44(4): 12-18.
- ZHANG H, LI Q, LIU S H, ZHANG S M. Effect on stiffness characteristics of large bi-directional PIG's rubber sealing disc by its thickness[J]. *Oil Field Equipment*, 2015, 44(4): 12-18.
- [14] ZHU X X, WANG D G, YEUNG H, ZHANG S M, LIU S H. Comparison of linear and nonlinear simulations of bidirectional pig contact forces in gas pipelines[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, 27: 151-157.
- [15] DEN H A. Frictional behavior of pigs in motion[D]. Delft: Delft University of Technology, 2016: 19-20.
- [16] DAI H H. Model equations for nonlinear dispersive waves in a compressible Mooney-Rivlin rod[J]. *Acta Mechanica*, 1998, 127(1): 193-207.
- [17] 张仟,彭院中,艾琦,肖勇明. 基于 ABAQUS 软件的橡胶 Mooney-Rivlin 模型材料系数两种确定方法的分析[J]. *特种橡胶制品*, 2017, 38(6): 52-54.
- ZHANG Q, PENG Y Z, AI Q, XIAO Y M. Analysis of two methods for determining the material coefficient of rubber Mooney-Rivlin model based on ABAQUS software[J]. *Special Purpose Rubber Products*, 2017, 38(6): 52-54.
- [18] 李妍. 基于 ANSYS 软件的接触问题分析及在工程中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2004: 35-38.
- LI Y. The contact element analysis and application in engineering based on the ANSYS software[D]. Changchun: Jilin University, 2004: 35-38.
- [19] 林福严,张东胜,马向东. 聚氨酯弹性体摩擦衬垫材料的摩擦特性研究[J]. *润滑与密封*, 2000(2): 33-34, 60.
- LIN F Y, ZHANG D S, MA X D. Study on the friction characteristics of polyurethane for the friction liner of hoisting[J]. *Lubrication Engineering*, 2000(2): 33-34, 60.
- [20] JIN Z M, DOWSON D, FISHER J. Wear and friction of medical grade polyurethane sliding on smooth metal counterfaces[J]. *Wear*, 1993, 162/163/164: 627-630.
- [21] ELLEUCH R, ELLEUCH K, SALAH B, ZAHOUANI H. Tribological behavior of thermoplastic polyurethane elastomers[J]. *Materials & Design*, 2007, 28(3): 824-830.

- [22] ZHANG H, SANCHEZ C, LIU S H, ZHANG S M, LIANG H. Wear of a polyurethane rubber used in dry gas pipeline as inspection gauges[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017, 41: 40-48.
- [23] O'DONOGHUE A F. On the steady state motion of conventional pipeline pigs using incompressible drive media[D]. Cranfield: Cranfield University, 1996: 33-36.
- [24] TAN G B, WANG D G, LIU S H, WANG H, ZHANG S W. Frictional behaviors of rough soft contact on wet and dry pipeline surfaces: With application to deepwater pipelaying[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(12): 3024-3032.
- [25] ZHU X X, WANG W, ZHANG S M, WANG C. The pig gravity impact on its frictional force in oil and gas pipeline[C]. San Francisco: The 27th International Ocean and Polar Engineering Conference, 2017: ISOPE-I-17-313.
- [26] 邹雨, 庄茁, 黄克智. 超弹性材料过盈配合的轴对称平面应力解答[J]. 工程力学, 2004, 21(6): 72-75, 83.
- ZOU Y, ZHUANG Z, HUANG K Z. The solutions of axisymmetric plane stress for a hyperelastic material interference problem[J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(6): 72-75, 83.
- [27] CAO Y G, ZHEN Y, SHI Y J, ZHANG S H, SUN Y T, NIE W J. Stress distribution of the power section cup of pipeline inspection gauges by finite element method[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering & Practice, 2018, 9(2): 04017039.
- (收稿日期: 2018-08-28; 修回日期: 2020-12-08; 编辑: 张腾)
-
- 基金项目:** 国家自然科学基金资助项目“管道检测器卡堵关键力学问题研究”, 11472309.
- 作者简介:** 刘畅, 男, 1991年生, 在读博士生, 2017年硕士毕业于西安石油大学石油与天然气工程专业, 现主要从事管道完整性评价的研究工作。地址: 山东省青岛市黄岛区长江西路66号中国石油大学(华东), 266580。电话: 15621193551。Email: 286806587@qq.com
- 通信作者:** 曹宇光, 男, 1979年生, 教授, 2006年博士毕业于日本富山县立大学机械工程专业, 现主要从事海洋工程技术、管道完整性评价、断裂失效与断口分析等研究工作。地址: 山东省青岛市黄岛区长江西路66号中国石油大学(华东), 266580。电话: 13685420075。Email: caoyuguang@gmail.com

(上接第 232 页)

- Beijing: China Petrochemical Press, 2008: 31.
- [15] 龚中伟, 汪祥林, 史小国. 原油外输计量标准及器具应用问题探讨[J]. 石油工业技术监督, 2012, 28(3): 43-46.
- GONG Z W, WANG X L, SHI X G. Discussions on the problems of measurement standards and equipment application in oil crude transportation[J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2012, 28(3): 43-46.
- [16] 范小平. 容量计量与流量计量[M]. 北京: 中国质检出版社, 2012: 116.
- FAN X P. Capacity measurement and flow measurement[M]. Beijing: China Zhijian Publishing House, 2012: 116.
- [17] 何骁勇, 徐正海, 王浩, 纪超. FPSO 原油外输计量标定系统的选型与设计[J]. 仪器仪表用户, 2013(6): 21-24.
- HE X Y, XU Z H, WANG H, JI C. FPSO crude oil metering and proving system selection and design[J]. Instrumentation Customer, 2013(6): 21-24.
- [18] 高超, 游兵, 何钰. 分析控制原油静态交接误差[J]. 中国计量, 2015(12): 67-68.
- GAO C, YOU B, HE Y. Analysis and control of static transfer error of crude oil[J]. China Metrology, 2015(12): 67-68.
- [19] 肖素琴. 油品计量员读本[M]. 北京: 中国石化出版社, 2001: 38.
- XIAO S Q. Brochure of petroleum product surveyor[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2001: 38.
- [20] 曾强鑫. 油品计量基础[M]. 北京: 中国石化出版社, 2003: 33.
- ZENG Q X. Basic knowledge of petroleum product measurement[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2003: 33.
- (收稿日期: 2018-03-02; 修回日期: 2020-12-01; 编辑: 杜娟)
-
- 作者简介:** 张达智, 男, 1986年生, 助理工程师, 2011年毕业于天津师范大学物流管理专业, 现主要从事石油及石油产品的检验鉴定与研究工作。地址: 天津市滨海新区开发区第五大街41号开泰科技园B座502室, 300457。电话: 15620005922。Email: 283914091@qq.com