

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.03.022

清管器聚氨酯皮碗接触性能分析与结构优选

何畏¹,孙磊¹,黄飞杨¹,郑家伟²,张瑞坤¹

(1. 西南石油大学机电工程学院, 成都 610500; 2. 宝石机械成都装备制造分公司, 成都 610500)

摘要:为提高清管器的工作效率和工作性能,对清管器聚氨酯皮碗的类型及结构参数进行优选,通过分析清管器运行过程中碟形皮碗相较于直板皮碗的优势,优选碟形皮碗作为清管器的皮碗类型;对碟形皮碗进行力学分析并采用有限元软件 Abaqus 分析得出,过盈量和皮碗唇部厚度与接触长度呈正相关,皮碗唇部长度与接触长度呈负相关;接触应力随着过盈量和唇部厚度增加而逐渐增大,随着唇部长度增加而逐渐减小;根据 Abaqus 得出的数据,并基于熵权法,对皮碗结构参数进行优选,得出最佳皮碗结构参数为过盈量 5%、唇部长度 42 mm、唇部厚度 22 mm。

关键词: 清管器; 聚氨酯; 碟形皮碗; 接触应力; 结构优选; 熵权法

中图分类号: TG156 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)03-0118-06

Contact Performance Analysis and Structure Optimization of Polyurethane Cup of PIG

He Wei¹, Sun Lei¹, Huang Feiyang¹, Zheng Jiawei², Zhang Ruikun¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. BOMCO Chengdu Equipment Manufacturing Company, Chengdu 610500, China)

Abstract: In order to improve the working efficiency and performance of the PIG, the type and structural parameters of the polyurethane cup of the PIG were optimized. By analyzing the advantages of the saucer-shaped cup compared to the straight cup during the operation of the PIG, the structure of the saucer-shaped cup was used as the cup type of the PIG. The mechanical analysis of the saucer-shaped cup was carried out and the finite element software Abaqus was used to analyze. The results show that the magnitude of interference and the lip thickness of the cup are positively correlated with the contact length, and the lip length of the cup is negatively correlated with the contact length. The contact stress gradually increases with the increase of magnitude of interference and lip thickness, and gradually decreases with the increase of lip length. According to the data obtained by Abaqus and based on the entropy weight method, the structural parameters of the cup are optimized, and the optimal structural parameters of the cup are obtained as magnitude of interference 5%, lip length 42 mm, and lip thickness 22 mm.

Keywords: PIG; polyurethane; saucer-shaped cup; contact stress; structure optimization; entropy weight method

管道运输具有经济效率高、运输损耗低、输送距离较长等优点,使其在油气运输方面得到广泛应用。但是管道在使用过程中产生的污物会堵塞或腐蚀管道内壁,从而导致管道运输效率降低。因此必须对油气管道实施清理^[1]。清管器是清理管道最常用的工具,其模型如图 1 所示。

清管器中的聚氨酯皮碗与油气管道之间为过盈配合,密封隔绝前后流体,形成压差,从而驱动清管器运行、刮削管壁的污垢^[2]。清管器刮削管壁污

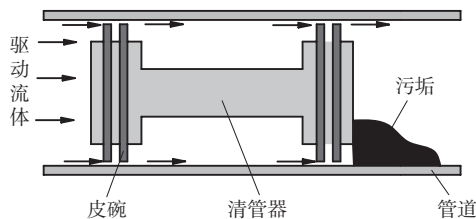


图1 清管器模型

垢的能力主要依靠皮碗与管道之间的摩擦力,因此清管器皮碗在清管过程中存在较大的磨损,其直接影响着清管器的工作性能和寿命。

基金项目: 四川省科技支撑计划项目 (2015GZ0159)

通信作者: 何畏,副教授,高级工程师,硕士生导师,主要研究方向为石油矿场机械、清洁能源汽车 E-mail: 188039518@qq.com

收稿日期: 2020-11-30

引用格式: 何畏,孙磊,黄飞杨,等. 清管器聚氨酯皮碗接触性能分析与结构优选 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(3): 118-123, 129.

He Wei, Sun Lei, Huang Feiyang, et al. Contact performance analysis and structure optimization of polyurethane cup of PIG[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(3): 118-123, 129.

皮碗主要有两个作用:一是实现清管器与管壁之间的密封,隔绝清管器两端流体,形成压差来驱动清管器前进;二是可以清理管壁污垢以及冲散前端堆积的污垢^[3-5]。

国内外学者对清管器皮碗也做了许多研究,主要是从材料,摩擦磨损和振动方面进行研究。笔者结合清管器受力情况,通过 Abaqus 建立清管器皮碗的计算模型,分析皮碗唇部长度、唇部厚度与过盈量(皮碗外径超过管道内径的尺寸与管道内径比值的百分数,代表着皮碗与管道结合的松紧程度)对皮碗接触性能的影响。然后以最大接触应力和接触长度为优选目标,使用熵权法综合评价不同皮碗结构参数,对皮碗结构参数进行优选。

1 清管器工作原理与皮碗选择

1.1 清管器结构

清管器结构如图 2 所示,当清管器遇卡堵时,清管器后端压力不断增高,压力超过单向阀预设压力时,单向阀打开,高压介质就会通过主轴和副轴内腔,推动滑块向前运动并带动涡轮组转子和喷嘴机构旋转,此时旋转刮刷臂张开并在喷嘴机构的带动下不停旋转,旋转的刮刷和高压旋转介质可以对污垢进行冲刷,将清管器前端污物冲走,从而解除管道卡堵^[6-7]。

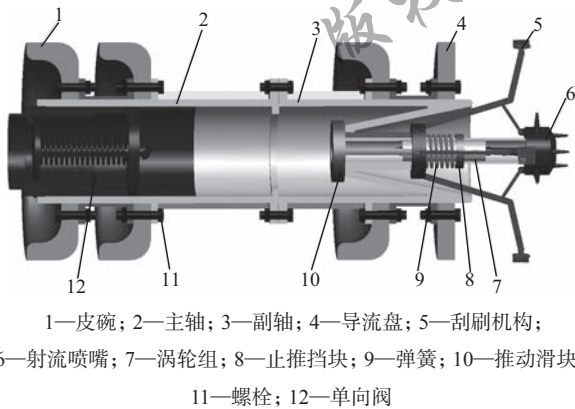


图2 清管器结构

1.2 皮碗选择

根据中石油标准 Q/SY 1262-2010《机械清管器技术条件》,清管器皮碗类型一般为直板皮碗和碟形皮碗^[8],如图 3 所示,图 3 中, b 为直板皮碗宽度, L_0 和 l 分别为碟形皮碗唇部的长度和厚度, L 为接触长度, δ_i 为皮碗外径(半径)与管道内径(半径)的差值,也可称为过盈尺寸。由图 3 可知,直板皮碗与碟形皮碗具有相同过盈尺寸 δ_i 时,碟形皮碗变形量更小,因此其接触应力一般更小,根据一般磨损理

论可以得出碟形皮碗更不容易磨损,寿命更长;同时碟形皮碗与管道之间的摩擦阻力较小,使得驱动清管器前进所需的压差更小,更节约能源;碟形皮碗与管道接触面积更大也会使得其密封性能更加优越。因此综合考虑选择清管器皮碗类型为碟形皮碗。

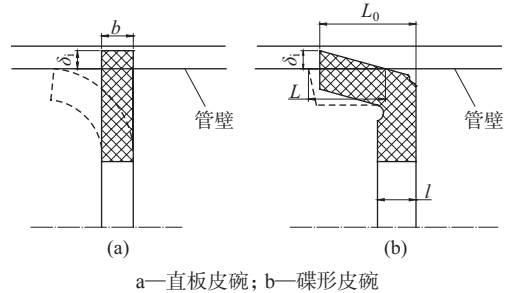


图3 直板皮碗与碟形皮碗的结构

2 皮碗本构模型及力学模型

2.1 皮碗本构模型

皮碗的材质一般为聚氨酯,因为聚氨酯综合性能优异,具有高弹性、高强度等特点^[9-11]。采用 Mooney-Rivlin 模型^[12]为弹性材料本构模型,其应变能密度函数为:

$$U = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{D_1}(J - 1)^2 \quad (1)$$

式中: U ——应变势能, MPa;

J ——弹性体积比;

$\bar{I}_1, \bar{I}_2$ ——材料扭曲变量;

C_{10}, C_{01} ——材料剪切特性, MPa;

D_1 ——材料可压缩性, MPa^{-1} 。

2.2 皮碗力学模型

由于皮碗外径相对管壁有一定的过盈量,在清管器前后端压强差 Δp (单位 MPa) 作用下管壁对其侧面有挤压力 p_j 、摩擦力 F_w 、剪切力 F_j ,受力分析如图 4 所示。

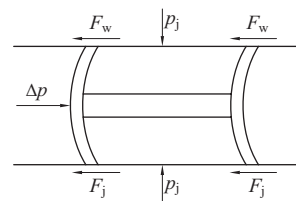


图4 力学模型

根据流体力学动量定理可得:

$$(\Delta p A_1 - F_w - F_j) dt = m dv_s \quad (2)$$

式中: A_1 ——清管器截面面积, m^2 ;

m ——清管器质量, kg;

v_s ——清管器瞬时速度, m/s 。

由流体连续性定理可得:

$$Q = \frac{v_s}{2}(A + A_1) + \frac{\Delta p e^2}{12 u l_1}(A - A_1) \quad (3)$$

式中: Q ——管道入口处体积流量, m^3/s ;

A ——管道截面积, m^2 ;

e ——液膜厚度, m ;

u ——流体介质黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

l_1 ——清管器长度, m 。

由式(2)、式(3)可以得出:

$$\Delta p = \frac{12 u l_1 Q}{(A - A_1) e^2} - \frac{6(A + A_1) u l_1 v_s}{(A - A_1) e^2} \quad (4)$$

由于清管器皮碗截面形状不规则,直接对皮碗进行应力分析较为复杂,因此将皮碗简化为等壁厚、无底的圆筒,图5a为皮碗简化前的情况,图5b为皮碗简化后的等效图。当清管器运行过程中,皮碗与管道过盈配合而产生挤压力 p_j ,此时皮碗在管道内的变形情况如图5c所示。对于皮碗,其受到管道的挤压力 p_j 为:

$$p_j = \frac{D - d}{2 \cdot \frac{d}{E} \left(\frac{d^2 + d_e^2}{d^2 - d_e^2} - \nu \right)} \quad (5)$$

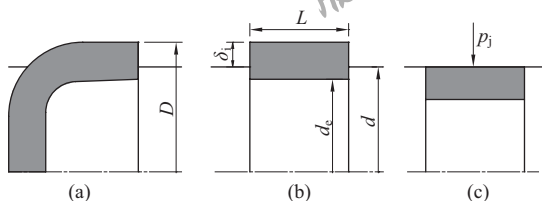
式中: D ——皮碗外径, m ;

d ——管道内径, m ;

E ——弹性模量, MPa ;

d_e ——皮碗等效内径, mm ;

ν ——皮碗材料的泊松比。



a—简化前的皮碗; b—简化后的皮碗; c—受到挤压力的皮碗

图5 皮碗简化与挤压力分析

清管器在清理管道时,输送介质还会对皮碗产生径向压力 $\Delta p A_1$ 。则皮碗与管壁的总压力 F 的计算如下式:

$$F = \pi L (d p_j + d_e \Delta p A_1) \quad (6)$$

式中: L ——皮碗外沿与管壁的接触长度, m 。

3 不同结构参数皮碗的接触性能分析

3.1 皮碗有限元模型及边界条件设置

皮碗截面示意图如图6所示(D_0 为皮碗内径)。在这些结构参数中,皮碗唇部长度、唇部厚度与过盈量对清管器皮碗与管壁间的接触特性影响较大,因此主要讨论这三个参数对清管器皮碗接触应力与接触长度的影响。

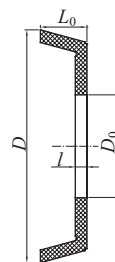


图6 碟形皮碗截面图

选择 10" ($\text{Ø}273.1 \text{ mm} \times 9.3 \text{ mm}$) 输油管道的清管器作为研究对象。在计算模型中,各个参数的选取情况如下:唇部长度选取 42, 48, 54, 60, 66 mm ;唇部厚度选取 14, 16, 18, 20, 22 mm ;过盈量选取 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 对应的皮碗外径为 259.59, 262.14, 264.68, 267.22, 269.77 mm 。

使用 Abaqus 软件进行有限元分析,皮碗与管道具有轴对称性,所以使用二维有限元模型,如图7所示。管道弹性模量较大,其变形量远远小于皮碗,因此将管道设置为解析刚体,皮碗材料聚氨酯为超弹性材料,本构模型采用 Mooney-Rivlin 模型,模型中 $C_{10}=0.229 \text{ MPa}$, $C_{01}=2.49 \text{ MPa}$, $D_1=0$ 。皮碗与管道之间的摩擦为库仑摩擦,摩擦系数 $\mu=0.12^{[13-14]}$,切向接触行为由罚函数接触算法进行控制。过盈配合采用自动收缩配合来实现。采用 Abaqus/standard 静力学分析,设置较小分析步增量使皮碗与管道逐渐接触,约束管道的位移与转动,对皮碗施加水平位移载荷,约束皮碗轴向位移。为了获得接触表面的接触压力和相滑移的精确结果,需保证接触区域中的网格尺寸非常精细,从而保持计算精度。

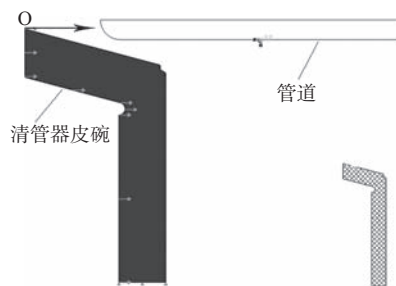
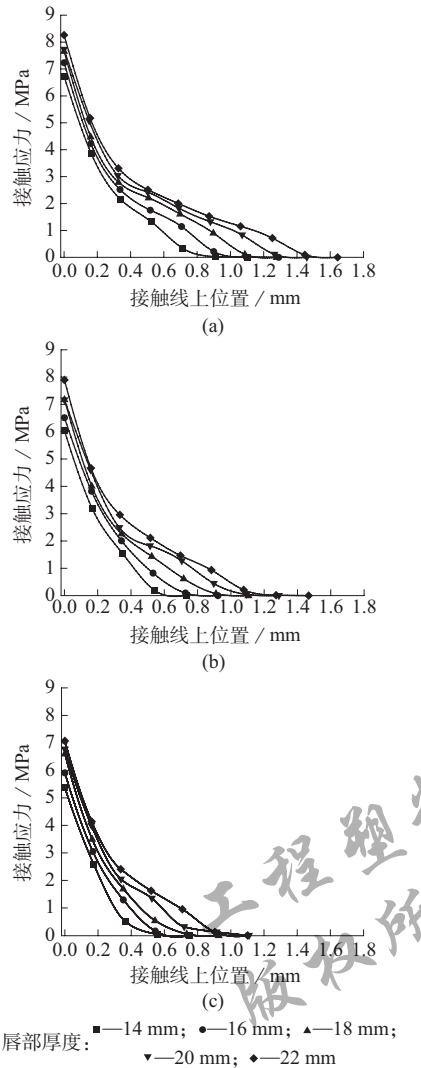


图7 皮碗有限元模型

3.2 不同结构参数皮碗的接触应力分析

皮碗接触应力的大小将决定着启动压差的大小,皮碗不同的结构参数将影响着接触应力的分布,因此从 Abaqus 分析结果中提取出接触长度内的接触应力分布数据,然后将数据带入 Origin 中绘制出接触应力分布图,图8,图9为其中一部分结果,图中的接触线上位置即为皮碗和管道实际接触的某一点与图7中皮碗 O 点之间的距离(O点为零点),其



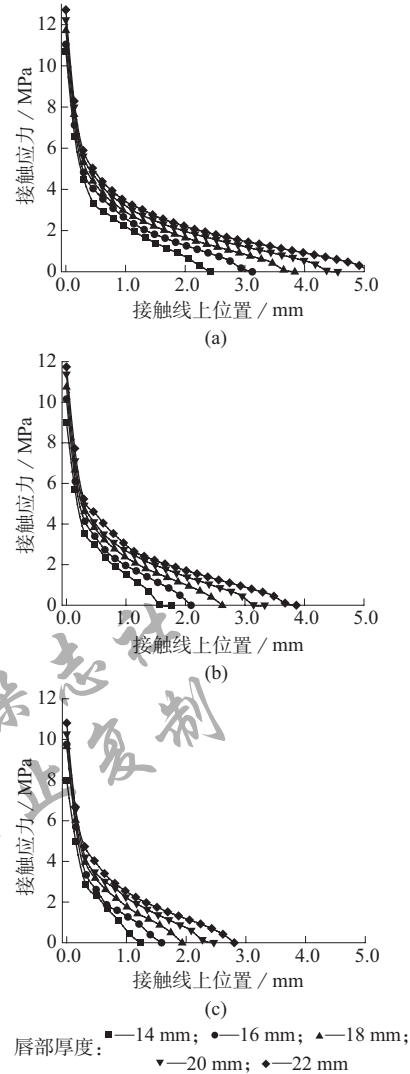
唇部长度: a—42 mm; b—54 mm; c—66 mm

图8 过盈量为2%时皮碗接触应力分布情况
最大值为皮碗与管道实际接触长度。

由图8、图9可知,对于不同过盈量、不同唇部长度和不同唇部厚度,接触应力均在接触范围内逐渐减小,最后端位置(O点)的接触应力远远大于其它接触位置,在这个范围外,接触应力迅速下降。

对于相同过盈量、唇部长度的皮碗,唇部厚度越大,最大接触应力越大,例如过盈量为2%、唇部长度为54 mm时,唇部厚度为14 mm的皮碗最大接触应力为6.04 MPa,唇部厚度为22 mm的皮碗最大接触应力为7.89 MPa。

对于相同过盈量、唇部厚度的皮碗,唇部长度越短,最大接触应力越大,例如过盈量为2%、唇部厚度为18 mm时,唇部长度为42 mm的皮碗最大接触应力为7.66 MPa,唇部长度为66 mm的皮碗最大接触应力为6.60 MPa。



唇部长度: a—42 mm; b—54 mm; c—66 mm

图9 过盈量为6%时皮碗接触应力分布情况

对于相同唇部长度、厚度的皮碗,最大接触应力随着过盈量增加而增加,例如唇部厚度为18 mm、唇部长度为54 mm时,过盈量为2%的皮碗最大接触应力为7.18 MPa,过盈量为6%的皮碗最大接触应力为10.76 MPa。

皮碗与管道之间的接触应力越大其磨损越快,也会使驱动压差增加,造成能源耗费。因此从接触应力的角度来说,选择的皮碗结构参数应使皮碗接触应力较小,通过以上分析可知,应选择过盈量较小、唇部长度较长、唇部厚度较小的皮碗。

3.3 不同结构参数皮碗的接触长度分析

不同的皮碗结构参数还会影响接触长度,而接触线长度的大小将直接影响皮碗的密封性能。因此从仿真结果中提取出皮碗与管壁间的接触长度数据进行分析,如图10所示。

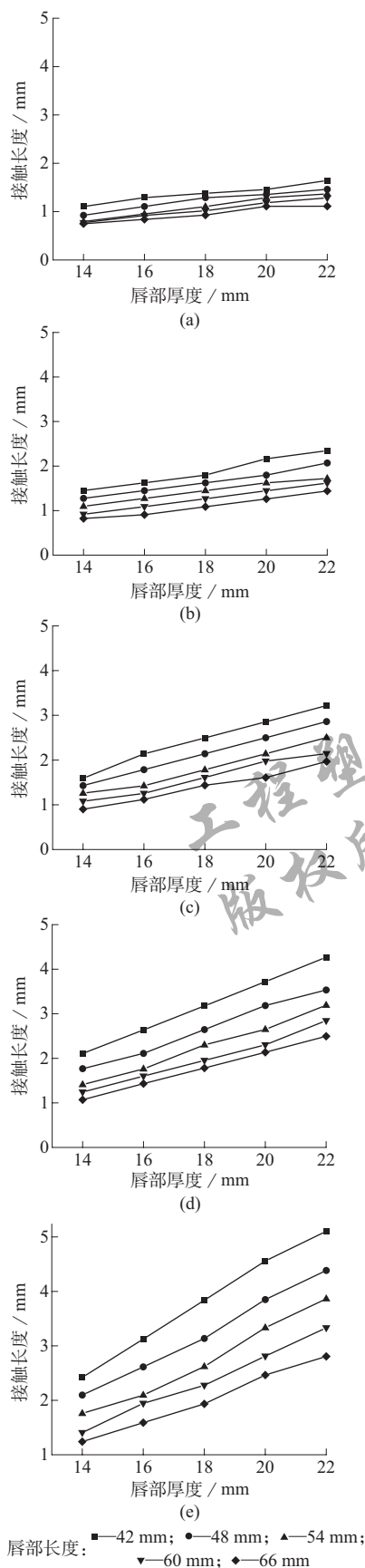


图10 不同过盈量、唇部长度和唇部厚度的皮碗接触长度

由图10可得出,对于具有相同过盈量、唇部长度的皮碗,其接触长度均随唇部厚度增加而增加;对于相同过盈量、唇部厚度的皮碗,接触长度随唇部长度增加而减少;对于相同唇部厚度、唇部长度的皮碗,接触长度随过盈量增加而增加。

皮碗与管道之间较大的接触长度有利于皮碗与管道之间的密封,因此从接触长度的角度来说,选择的皮碗结构参数应使皮碗接触长度较大,通过以上分析可知,应选择过盈量较大、唇部长度较短、唇部厚度较大的皮碗。

4 皮碗结构优选

通过分析不同皮碗结构参数对皮碗与管道之间的接触应力与接触长度的影响,以皮碗与管道之间的接触应力较小、接触长度较大为优选目标。基于仿真数据和熵权法^[15-16]对皮碗结构进行综合评价,选择结构最优的皮碗。

4.1 计算步骤

(1) 给定 n 个样本, m 个指标,记 x_{ij} 为第 i 个样本的第 j 个指标的值得 ($i=1, \dots, n; j=1, \dots, m$);

(2) 指标归一化处理。指标的归一化处理就是把指标的绝对值转化为相对值^[17],从而解决各指标值计量单位不统一的问题。

正向指标归一化方程如式(7)所示:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}} \quad (7)$$

负向指标归一化方程如式(8)所示:

$$x'_{ij} = \frac{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - x_{ij}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}} \quad (8)$$

式(7)、式(8)中, x'_{ij} 为归一化后的数据。

(3) 确定各项指标的权重 w_j :

$$w_j = \frac{e_j}{\sum_{j=1}^m (1 - e_j)} \quad (9)$$

式中: e_j ——各指标熵值^[14]。

(4) 得出各样本的综合得分 s_j :

$$s_j = \sum_{j=1}^m w_j x'_{ij} \quad (10)$$

4.2 参数优选结果

以最大接触应力与接触长度为优选目标,并且根据优选原则要求最大接触应力越小越好,接触长度越大越好。表1为部分仿真结果数据。根据计算步骤,将仿真数据代入式(7)~式(9),可以得出最大接触应力与接触长度的权重分别为0.495 934

和 0.504 066。将数据与权重代入式 (10), 得出最高综合评分为 0.508 514, 综合评分最高的皮碗结构参数组合为过盈量 5%, 唇部厚度 22 mm, 唇部长度 42 mm, 该皮碗的最大接触应力为 9.2876 MPa, 接触长度为 4.2679 mm。

表 1 部分仿真结果数据

过盈量 / %	唇部厚度 / mm	唇部长度 / mm	最大接触应力 / MPa	接触长度 / mm
2	14	42	6.726 44	1.109 900
2	14	48	6.376 45	0.989 724
2	14	54	6.036 84	0.880 828
2	14	60	5.748 50	0.807 068
2	14	66	5.467 22	0.706 143

5 结论

(1) 分析直板皮碗与碟形皮碗的优缺点, 最终选择碟形皮碗作为清管器的皮碗类型, 并且选择聚氨酯作为皮碗材料。

(2) 通过 Abaqus 分析得出, 在结构参数一定的情况下, 接触压力随着接触线上位置的增大而逐渐减小; 减小过盈量和唇部厚度、增加唇部长度, 可以获得较低的接触应力; 增加过盈量和唇部厚度、减小唇部长度可获得较大的接触长度。

(3) 导出仿真数据, 以最大接触应力较小与接触长度较大为优选目标, 通过熵权法综合评价各皮碗结构参数, 得出最佳皮碗结构参数为过盈量 5%、唇部长度 42 mm、唇部厚度 22 mm。

参考文献

- [1] 范华军, 王中红. 亚洲油气管道建设的特点及发展趋势 [J]. 石油工程建设, 2010, 36(5): 6-9, 83.
Fan Huajun, Wang Zhonghong. Characteristics and development trends of asian oil and gas pipeline construction [J]. Petroleum Engineering Construction, 2010, 36(5): 6-9, 83.
- [2] 明贤军. 天然气长输管道可控速清管器设计与研究 [D]. 成都: 西华大学, 2017.
Ming Xianjun. Design and research of controlled velocity pig for long-term natural gas pipeline [D]. Chengdu: Xihua University, 2017.
- [3] 张行, 李庆, 刘书海, 等. 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 Hang, Li Qing, Liu Shuhai, et al. 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.
- [4] 陈浩, 刘小明. 清管器皮碗在不同过盈量下的接触应力分析 [J]. 管道技术与设备, 2015(6): 43-46.
Chen Hao, Liu Xiaoming. Analysis on contact stress of PIG's cup under different interference [J]. Pipeline Technology and Equipment, 2015(6): 43-46.
- [5] 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.
Liu Xiaoming. Study on contact performance of leather bowl of mandrel PIG [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [6] 刘海潇, 何利民, 陈建恒, 等. 管道清管器运行速度控制技术研究进展 [J]. 化工进展, 2020, 39(6): 2 327-2 335.
Liu Haixiao, He Limin, Chen Jianheng, et al. Research progress of pipeline pigs speed control technology [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(6): 2 327-2 335.
- [7] 何畏, 徐杨, 汤海平, 等. 一种旋转解堵清管器: CN109047212A [P]. 2018-12-21.
He Wei, Xu Yang, Tang Haiping, et al. The utility model relates to a rotary blocking PIG: CN109047212A [P]. 2018-12-21.
- [8] 吴旭, 王龙庭, 徐兴平, 等. 碟形皮碗唇部弯曲角度对接触应力的影响 [J]. 石油机械, 2019, 47(10): 120-124.
Wu Xu, Wang Longting, Xu Xingping, et al. The Influence of the bending angle of the lip of the dish-shaped cup on the contact stress [J]. China Petroleum Machinery, 2019, 47(10): 120-124.
- [9] 杨舒逸, 金怀洋, 高山俊, 等. 热塑性聚氨酯弹性体改性研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2018, 46(6): 138-142.
Yang Shuyi, Jin Huaiyang, Gao Shanjun, et al. Research progress on modification of thermoplastic polyurethane elastomer [J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(6): 138-142.
- [10] 路永明. 聚氨酯橡胶的固定磨粒湿磨机理的试验研究 [J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1990, 14(1): 31-35.
Lu Yongming. A study on the mechanism of wet abrasion for polyurethane rubber-consolidated abrasive [J]. Journal of the University of Petroleum: Edition of Natural Science, 1990, 14(1): 31-35.
- [11] 沈文阳. 清管器皮碗聚氨酯材料摩擦振动研究 [D]. 北京: 中国石油大学, 2019.
Shen Wenyang. Research on friction-induced vibration of polyurethane sealing cup material for PIG [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2019.
- [12] 黄飞杨, 何畏, 徐杨, 等. 基于修正 Archard 模型的清管器聚氨酯皮碗磨损研究 [J]. 塑料工业, 2020, 48(3): 126-131.
Huang Feiyang, He Wei, Xu Yang, et al. Study on wear of polyurethane cup of PIG based on modified Archard model [J]. China Plastics Industry, 2020, 48(3): 126-131.
- [13] Mattei L, Di Puccio F. Influence of the wear partition factor on wear evolution modelling of sliding surfaces [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2015, 99: 72-88.
- [14] Zhang Hang, Sanchez C, Liu Shuhai, et al. Wear of a polyurethane rubber used in dry gas pipeline as inspection gauges [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017, 41(1): 40-48.
- [15] 章清. 基于熵权法和可拓理论的西北油气管道坡面水毁危险性评价研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2018.

- Materials Science and Engineering, 2011, 27(10):106–110.
- [6] 邓娟,高燕,张波. 废旧 PET 共混改性研究进展[J]. 塑料助剂, 2018(2):6–8,12.
- Deng Juan, Gao Yan, Zhang Bo. Research progress on the blending modification of the waste PET[J]. Plastics Additives, 2018(2):6–8, 12.
- [7] 贾鹏飞,程书文,薛峰,等. 相容剂对 LLDPE/PET 共混材料性能的影响[J]. 塑料, 2017, 46(3):39–42, 46.
- Jia Pengfei, Cheng Shuwen, Xue Feng, et al. Effects of compatibilizers on properties of LLDPE/PET blends[J]. Plastics, 2017, 46(3):39–42, 46.
- [8] Macosko C W, Philippe G, Khandpur A K. Compatibilizers for melt blending: Premade block copolymers[J]. Macromolecules, 1996, 29(17):5 590–5 598.
- [9] 周燕,尹波,李澜鹏,等. EPDM-g-MAH 增韧 PA6[J]. 合成树脂及塑料, 2012, 29(4):1–4, 29.
- Zhou Yan, Yin Bo, Li Lanpeng, et al. Structure and properties of polyamide6 toughened by MAH grafted EPDM[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2012, 29(4):1–4, 29.
- [10] 钟宇涛,陆文文,徐建平. 酸酐化 LLDPE/PS/PET 三元共混物相容化研究[J]. 现代塑料加工应用, 2020, 32(6):5–8.
- Zhong Yutao, Lu Wenwen, Xu Jianping. Compatibilization of linear low-density polyethylene/polystyrene/polyethylene terephthalate ternary blends[J]. Modern Plastics Processing And Applications, 2020, 32(6):5–8.
- [11] 沈帆,董银春,黄昱臻,等. 酸酐化 LLDPE/PS 增容母料对 LLDPE/PS/PA6 三元共混物结构及性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2018, 34(7):72–77.
- Shen Fan, Dong Yinchun, Huang Yuzheng, et al. Effect of maleated LLDPE/PS compatibilized master batch on the structures and properties of LLDPE/PS/PA6 ternary blends[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2018, 34(7):72–77.
- [12] 沈帆,董银春,黄昱臻,等. 酸酐化 LLDPE/PS 增容母料的制备及其应用[J]. 合成树脂及塑料, 2018, 35(3):1–5.
- Shen Fan, Dong Yinchun, Huang Yuzhen, et al. Preparation and application of maleated LLDPE/PS compatibilized master batch[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2018, 35(3):1–5.
- [13] 董银春,沈帆,郭秋月,等. PP-g-(DAP-co-GMA) 的制备及 PP/PET 相容性研究[J]. 现代塑料加工应用, 2017, 29(5):9–12.
- Dong Yinchun, Shen Fan, Guo Qiuyue, et al. Preparation of PP-g-(DAP-co-GMA) and PP/PET compatibilization research[J]. Modern Plastics Processing And Applications, 2017, 29(5):9–12.
- [14] 董银春,沈帆,郭秋月,等. PP-g-(DAP-co-GMA) 和 PP-g-(DAP-co-MAH) 的制备及其增容 PP/PET[J]. 合成树脂及塑料, 2017, 34(2):7–11.
- Dong Yinchun, Shen Fan, Guo Qiuyue, et al. Preparation of PP-g-(DAP-co-GMA) and PP-g-(DAP-co-MAH) and their compatibilized PP/PET blends[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2017, 34(2):7–11.
- [15] 徐建平,刘涛涛. PS/LLDPE 原位增容及合金的热性能与动态流变行为[J]. 高分子材料科学与工程, 2011, 27(2):60–63.
- Xu Jianping, Liu Taotao. In-situ compatibilization, thermal properties and dynamic rheological behavior of PS/LLDPE blends[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2011, 27(2):60–63.
- [16] 葛丽丽,吴集钱,李锦春. EVA 熔体流动速率对 PLA/EVA 共混物性能的影响[J]. 化工进展, 2014, 33(7):1 822–1 825.
- Ge Lili, Wu Jiqian, Li Jinchun. Effect of melt flow rate of EVA on the properties of PLA/EVA blends[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2014, 33(7):1 822–1 825.
- [17] Zhang J H, Ravati S, Virgilio N, et al. Ultralow Percolation Thresholds in Ternary Co-continuous Polymer Blends[J]. Macromolecules, 2007, 40(25):8 817–8 820.

(上接第 123 页)

- Zhang Qin. Study on slope water damage risk evaluation of northwest oil and gas pipeline based on entropy weight method and extension theory[D]. Lanzhou: Lanzhou university, 2018.
- [16] 侯恩科,纪卓辰,车晓阳,等. 基于改进 AHP 和熵权法耦合的风化基岩富水性预测方法[J]. 煤炭学报, 2019, 44(10):3 164–3 173.
- Hou Enke, Ji Zhuochen, Che Xiaoyang, et al. Water abundance prediction method of weathered bedrock based on improved AHP and the entropy weight method[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(10):3 164–3 173.
- [17] 李光明,殷国富,余玲,等. 气辅产品质量的多指标模糊综合评判决策及优选策略研究[J]. 工程塑料应用, 2007, 35(5):29–32.
- Li Guangming, Yin Guofu, Yu Ling, et al. Multi objective fuzzy comprehensive assessment and optimum decision research on the quality of gas-assisted product[J]. Engineering Plastics Application, 2007, 35(5):29–32.