

封隔器胶筒非线性仿真及性能评价

王智勇¹,刘军严²,朱帅¹,窦益华³

- (1. 陕西铁路工程职业技术学院 铁道装备制造学院,陕西 渭南 714025;
- 2. 中国石油塔里木油田分公司 工程技术研究院,新疆 库尔勒 841003;
- 3. 西安石油大学 机械工程学院,陕西 西安 710061)

摘要:以高温、高压深井试油作业中常用的 RTTS 封隔器为研究对象,考虑封隔器的材料、几何、接触非线性特征,应用非线性有限元理论,以 Mooney-Rivlin 应变能函数建立非线性材料模型,综合运用杂交网格、非线性自适应区域、罚刚度算法等处理几何、接触非线性导致的难收敛问题。建立 RTTS 封隔器三维有限元模型,应用控制变量法研究封隔器密封性能的影响因素。研究发现:胶筒的等效应力及接触压力随坐封载荷的线性增大而非线性增大;随着胶筒个数的增加,胶筒接触压力沿远离压缩端方向依次降低;胶筒的接触压力随摩擦因数、材料硬度的增加而非线性降低。该研究结果可以为封隔器胶筒的改进设计提供参考。

关键词:封隔器;胶筒;非线性仿真;性能评价

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)03-0112-05

Nonlinear Simulation and Performance Evaluation of Packer Rubber

WANG Zhiyong¹, LIU Junyan², ZHU Shuai¹, DOU Yihua³

- (1. School of Railway Equipment Manufacturing, Shaanxi Railway Institute, Weinan 714025, China;
- 2. Engineering Technology Research Institute, PetroChina Tarim Oilfield Company, Kuerle 841003, China;
- 3. School of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710061, China)

Abstract: With HTHP RTTS packer commonly applied in testing as the research object and in consideration of the material, geometry and contact nonlinear features of packer system, the nonlinear material model is established with Mooney-Rivlin strain energy function based on nonlinear finite element theory, and the difficult convergence problems caused by geometry and contact nonlinearity are comprehensively tackled by hybrid grid, non-linear adaptive region and penalty stiffness algorithm. The three-dimensional finite element model of RTTS packer is established, and the influence factors of packer sealing performance are studied by control variable method. It is found that the equivalent stress and contact pressure of the rubber increase nonlinearly with the linear increase of the setting load; the contact pressure of the rubber decreases in turn along the direction away from the compression end with the increase of the number of the rubber; the contact pressure of the rubber increases with the increase of the friction coefficient and the hardness of the material instead of linear reduction. The research results can provide a reference for the design improvement of packer rubber.

Keywords: packer; rubber; nonlinear simulation; performance evaluation

0 引言

油气井封隔器的胶筒由橡胶制成,是超弹性、体积不可压缩材料,其应力-应变曲线呈现出非线性的特点^[1-2],如图 1 所示。胶筒在压缩过程中存在大变形、大应变、大转动的几何非线性特点,在坐封过程中胶筒的内、外表面与中心管、套管的接触条件一直在发生变化,即出现了接触非线性。对于非线性的分析,从实验、理论和仿真角度分析,都存在一定的难度^[3-4]。

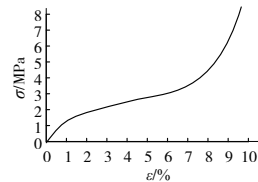


图 1 典型橡胶材料应力-应变曲线

文献[5]基于计算机仿真技术与有限元理论,考虑摩擦接触问题的求解方法建立封隔器有限元力学模型,采用 Lagrange (UL) 方法求解所建立的有限元模型。文献[6]

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05051-19);陕西铁路工程职业技术学院科研基金资助项目(KY2021-24);横向资助项目(STYKJ2021-055)

第一作者简介:王智勇(1994—),男,陕西渭南人,助教,研究方向为机械系统设计及安全性评价,承担机械基础类课程的教学。

建立井下封隔器几何、材料非线性接触的有限元模型,在处理封隔器有限元模型时将胶筒与套管内壁的接触简化为刚体与柔性体的接触,中心管与胶筒间的接触简化为柔性体与柔性体的接触,该接触问题的假设应根据实际情况进一步精确化。文献[7]认为封隔器胶筒在坐封过程中与套管、中心管之间存在双向接触摩擦,基于橡胶大变形理论、弹性力学理论,结合封隔器密封元件在压缩过程中材料、状态、几何的非线性特点,推导出接触压力计算公式。

封隔器在井下工作时,频繁地受到温度载荷的作用^[8-9]。温度对于封隔器胶筒的影响较大,导致与套管的接触压力突变,甚至丧失密封完整性^[10-11]。温度也是决定封隔器密封完整性的重要因素。

综上,封隔器胶筒在坐封过程中存在材料、几何、接触非线性,导致仿真分析难以收敛,不易获得与真实情况吻合度较高的数据,这使得探究温度等因素对于封隔器密封完整性的影响更加困难。因此,必须应用非线性有限元理论^[12],基于有限元软件,从材料模型、几何非线性、接触非线性入手,合理地分析,提高仿真分析的收敛能力和准确度,在此基础上进行封隔器密封完整性的探究,为封隔器安全密封提供参考依据。

1 RTTS 封隔器胶筒力学性能非线性仿真

RTTS 封隔器是一种具有代表性的高温、高压深井试油封隔器。在其仿真过程中存在材料非线性、几何非线性、接触非线性。通过准确地建立几何模型,选取合适的材料模型,设置正确的接触关系并选择恰当的接触算法,可以解决 RTTS 封隔器密封系统三重非线性带来的收敛困难问题。

1.1 RTTS 封隔器胶筒仿真模型的建立

建立 RTTS 封隔器胶筒模型如图 2 所示,最大外径为 115.6 mm,通径为 58 mm,胶筒(单个)高度为 76 mm,套管外径为 139.7 mm,壁厚为 9.17 mm,胶筒硬度为 IRHD90。在 RTTS 封隔器仿真分析中,选用硬度 IRHD90 的橡胶,所对应的 Mooney-Rivlin 双参数模型^[13]中的系数分别为 $C_{10}=0.962\ 78$, $C_{01}=1.925\ 56$,弹性模量为 $E=17.33\ \text{MPa}$,不可压缩系数为 1×10^{-6} 。

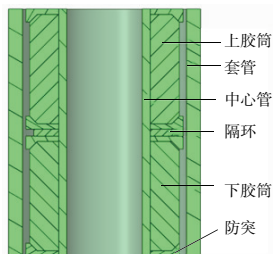


图 2 RTTS 封隔器胶筒仿真模型

1.2 RTTS 封隔器胶筒仿真模型网格划分及求解

采用自适应网格算法划分网格,自适应网格限制网格

类型为四面体网格。因此,将上、下胶筒划分为四面体网格,并采用一致网格划分方法,同时采用“杂交单元”算法^[14]避免仿真中出现“体积自锁”现象。防突部件的几何形状为不规则多面体,划分为四面体网格。RTTS 封隔器密封系统网格划分如图 3 所示。设置载荷步数为 1,打开子步定义自时间步,设置初始子步步数为 1 000,最小子步步数为 10,最大子步步数为 10 000。设置求解器类型为直接求解器,并开启大变形开关。设置非线性自适应区域,作用范围为上胶筒和下胶筒。

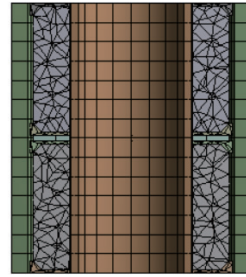


图 3 RTTS 封隔器密封部件仿真网格划分

1.3 不同坐封载荷下胶筒的力学性能仿真

图 4(a)—图 4(d)依次为 10 kN、30 kN、50 kN、70 kN 坐封载荷作用下胶筒的变形云图。由胶筒在不同坐封载荷下的最大变形量可判断其所处的变形阶段,如表 1 所示。图 4 表明,沿着从上胶筒至下胶筒的方向,胶筒的变形量依次减小。

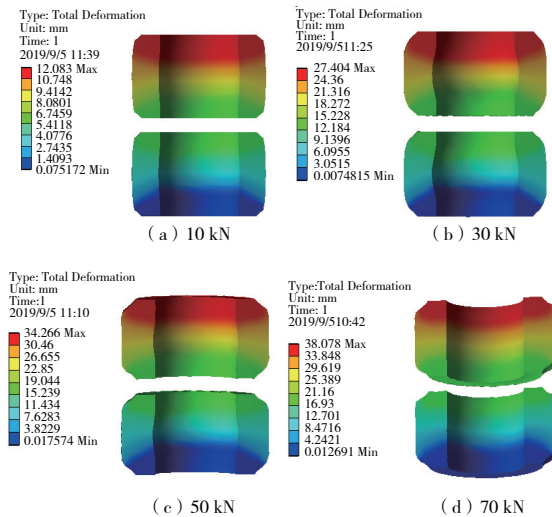


图 4 不同坐封载荷下胶筒(IRHD90)变形云图

表 1 不同坐封载荷下胶筒的变形状态

| 序号 | 坐封载荷/kN | 最大变形量/mm | 胶筒的变形状态 |
|----|---------|----------|---------|
| 1 | 10 | 12 | 自由变形阶段 |
| 2 | 30 | 27 | 单向变形阶段 |
| 3 | 50 | 34 | 双向变形阶段 |
| 4 | 70 | 38 | 坐封阶段 |

图5表明在封隔器坐封过程中,上胶筒(靠近压缩端)的接触压力始终大于下胶筒(远离压缩端)的接触压力。随着坐封载荷的不断增大,胶筒与套管之间的接触面积也逐渐增大。坐封载荷由30 kN增大至50 kN的过程中,胶筒的接触压力和接触面积增加速率最快。图6表明,不同坐封载荷下,胶筒内表面中心部位等效应力大于胶筒其他部位的等效应力,说明胶筒内表面中心处易失效。因此,在优化设计中应改进结构设计以降低胶筒内表面中心部位的等效应力,从而改善胶筒的力学性能。

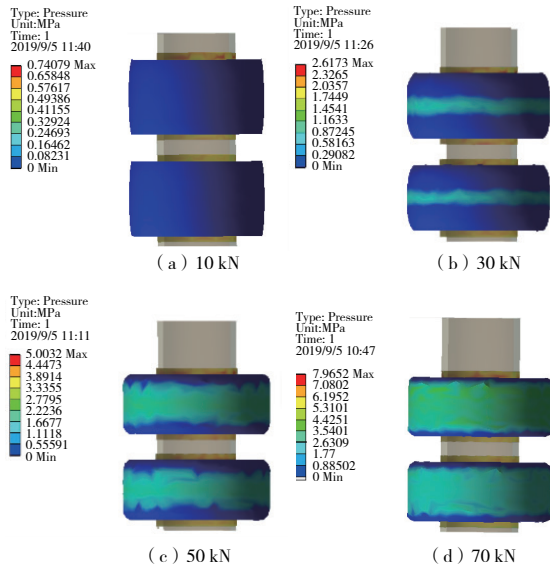


图5 不同坐封载荷作用下胶筒接触压力分布云图

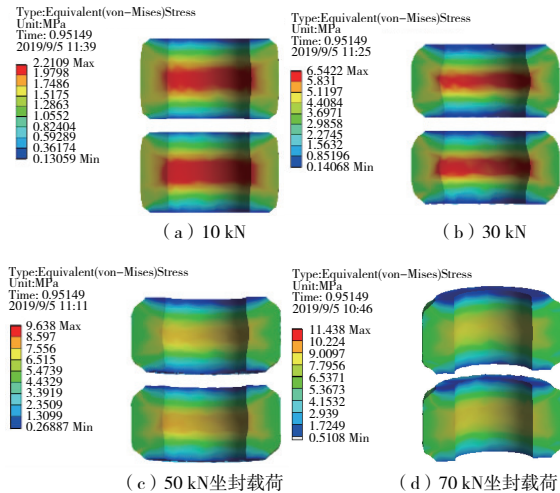


图6 不同坐封载荷下胶筒等效应力分布云图

2 胶筒密封性能的影响因素研究

胶筒接触压力的改善有利于提高封隔器的密封性能。因此,需研究不同因素对封隔器胶筒接触压力的影响。

2.1 胶筒个数对封隔器密封性能的影响

研究单胶筒、双胶筒、三胶筒在70 kN坐封载荷下接触压力的分布特点,以探明胶筒数量对封隔器密封性能的影响。

响。研究中所选用的胶筒外径均为115.6 mm,内径为80 mm,高度为78 mm,硬度为IRHD90,材料参数见表2^[15]。

表2 不同接触类型比较

| 序号 | 硬度/IRHD | 弹性模量/MPa | 材料常数 | |
|----|---------|----------|----------|----------|
| | | | C_{10} | C_{01} |
| 1 | 76 | 9.14 | 0.507 78 | 1.015 55 |
| 2 | 82 | 12.03 | 0.668 33 | 1.336 67 |
| 3 | 90 | 17.33 | 0.962 78 | 1.925 56 |

图7为70 kN坐封载荷下,单胶筒、双胶筒、三胶筒沿轴向坐标接触压力分布曲线。图7表明,单胶筒、双胶筒、三胶筒中的上胶筒(靠近压缩端的胶筒)接触压力相差不大,密封效果相差不大。观察双胶筒、三胶筒的各胶筒接触压力,上胶筒接触压力最大,下胶筒接触压力最小,即随着胶筒个数增加,沿着远离压缩端的方向,胶筒的接触压力依次减小,胶筒的密封能力依次减弱。

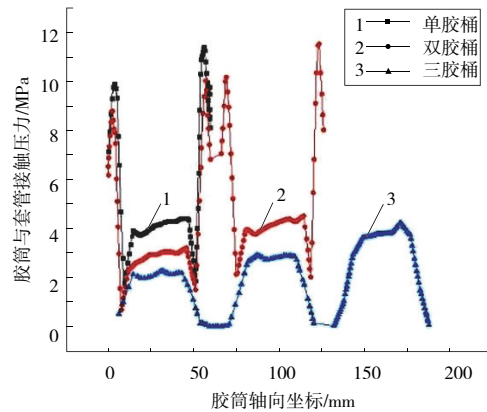


图7 不同数量胶筒沿轴向坐标接触压力分布

2.2 摩擦因数对封隔器密封性能的影响

研究不同摩擦因数对胶筒接触压力的影响规律,对于封隔器的合理设计和选用具有指导意义。

图8为不同摩擦因数的胶筒接触压力分布云图。当摩擦因数 $f=0.1$ 、 $f=0.3$ 、 $f=0.5$ 时,胶筒与套管接触面上的接触压力分布较为均匀;当摩擦因数 $f=0.7$ 时,胶筒与套管接触面上的接触压力分布有明显的“分层”,即接触压力的分布数值变化极大,此时胶筒的密封性能最差。图8中,靠近封隔器胶筒下端(固定约束)均存在“深蓝色”接触压力分布带(接触压力介于0 MPa与1 MPa之间,胶筒密封性能较差),且该接触压力分布带随着摩擦因数的增大逐渐扩大;另外,当摩擦因数由 $f=0.5$ 增加到 $f=0.7$ 时,该接触压力分布带宽度骤增,即当摩擦因数 >0.5 时,胶筒表面接触压力骤减,胶筒密封性能变差。

图9为不同摩擦因数的胶筒沿胶筒轴向坐标接触压力分布曲线,曲线形状类似于“哑铃”,胶筒与防突件接触表面的接触压力较大,胶筒与套管表面的接触压力较小。图9表明,随着摩擦因数的增加,胶筒表面接触压力降低。观察不同曲线的中间部位,可以发现,随着摩擦因数的增加,曲线由“平缓”逐渐变得逐渐“陡峭”。曲线越“平缓”,

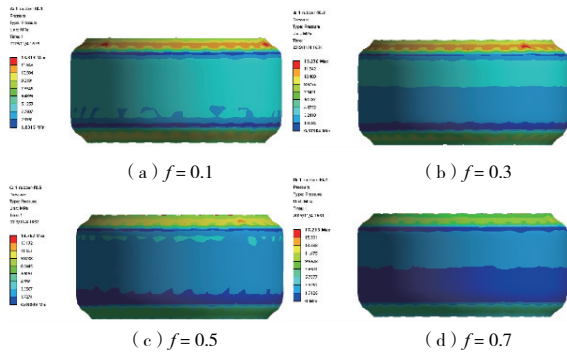


图8 不同摩擦因数的胶筒接触压力分布云图

则接触压力分布越均匀,胶筒的密封性能越好;曲线越“陡峭”,则接触压力分布越不均匀,胶筒密封性能越差。

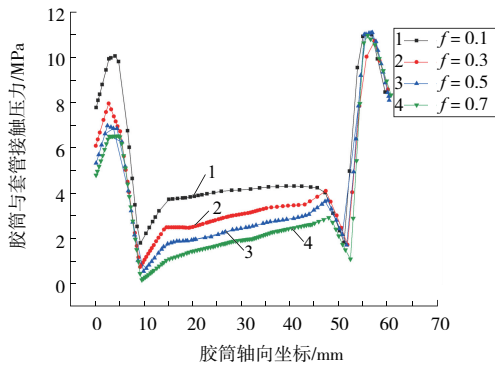


图9 不同摩擦因数的胶筒沿轴向接触压力分布

2.3 胶筒硬度对封隔器密封性能的影响

橡胶材料硬度的变化会极大地影响材料的力学性能。探究胶筒硬度的变化对胶筒变形量、胶筒与套管接触压力的影响规律可以为封隔器设计、封隔器选用提供依据。

对于不同硬度的橡胶,用 Mooney-Rivlin 双参数模型进行表征材料特性(表2)。基于非线性有限元理论,使用单胶筒模型,设置摩擦系数为0.3,施加70kN坐封载荷,分别求解 IRHD76、IRHD82、IRHD90 的3种硬度的胶筒压缩仿真,研究材料硬度对胶筒密封性能的影响。

图10为不同硬度的胶筒的变形云图。当硬度为IRHD76、IRHD82、IRHD90时,胶筒的最大变形量分别为14.0mm、13.0mm、12.5mm,表明随着材料硬度增大,胶筒的变形量呈减小趋势。

图11为不同硬度的胶筒与套管接触压力云图,当硬度为IRHD76时,胶筒的接触应力最大,且胶筒表面应力分布较为均匀,即应力变化速率较小。当IRHD82时,胶筒表面的应力分布出现明显分层现象,即胶筒表面接触应力分布并不均匀,胶筒密封性能较IRHD76时有所降低。当IRHD90时,胶筒表面接触应力最小,且胶筒表面应力分布的分层现象更为显著,此时胶筒密封性能最差。

图12为不同硬度的胶筒与套管接触压力沿轴向坐标分布,表明随着材料硬度的增加,胶筒与套管表面的接触压力非线性降低;接触压力呈“哑铃”型,两端接触应力较大,该部位为胶筒与防突件的接触部位,由于胶筒两端易

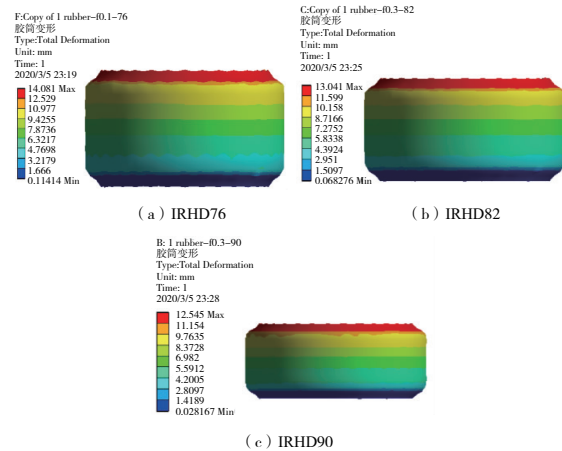


图10 不同硬度的胶筒变形云图

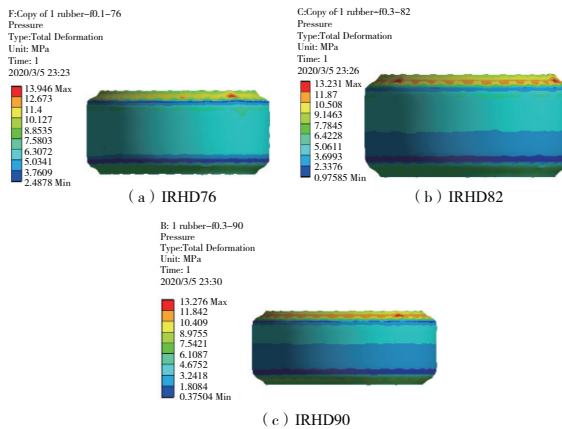


图11 不同硬度的胶筒与套管接触压力云图

被挤出,故接触压力分布较中间部位较大。

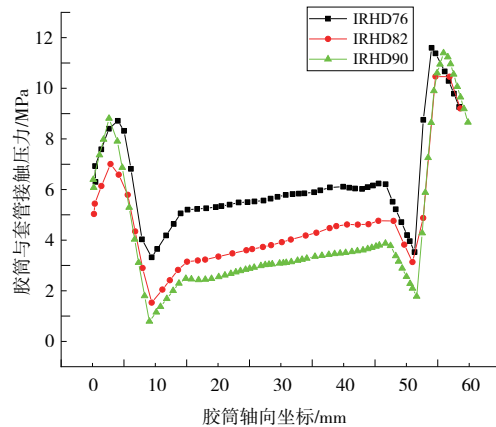


图12 不同硬度的胶筒与套管接触压力轴向分布

综上,由于胶筒硬度越小,胶筒的变形量越大,与接触面的接触压力分布越大且更为均匀,因此在设计中,在满足胶筒强度的条件下,应选用硬度较小的橡胶材料作为密封胶筒。由于胶筒硬度越大,其变形量越小,与接触面的压力分布越小,因此,在兼顾密封条件时应选用硬度较大的胶筒作为起保护作用的胶筒。

3 结语

封隔器胶筒在坐封过程中存在材料、几何以及接触非线性,导致有限元求解难以收敛且不准确。本文基于非线性有限元理论,提高了非线性仿真的收敛能力与准确度。仿真结果如下所述。

1)随着坐封载荷的线性增加,胶筒变形量、等效应力、接触压力非线性增加。

2)在相同的坐封载荷下,单胶筒、双胶筒、三胶筒中的上胶筒接触压力变化相近,密封效果差异较小。但是,随着胶筒个数增加,沿着远离压缩端的方向,胶筒的接触压力依次减小,胶筒密封能力依次减弱。

3)随着摩擦因数的增加,胶筒表面接触压力降低。通过“低应力分布带”和“接触压力分布曲线斜率”可评价胶筒密封性能。

4)胶筒硬度越小,则胶筒的变形量越大,与接触面的接触压力分布越大且更为均匀。在设计中,可选用硬度较小的橡胶材料作为密封胶筒,选用硬度较大的胶筒作为起保护作用的胶筒。

参考文献:

- [1] 王早祥,张砚雯,车家琪,等. 锦纶帘线封隔器胶筒工作性能及其影响因素[J]. 天然气工业,2020,40(1):97-103.
- [2] TAYLOR D M. Packer & safety valve development for ultra high pressure high temperature test & production wells[C]//All Days. Houston, Texas, USA: OTC,2012:1-13.
- [3] LEKONTSEV Y, TEMIRYAEVA O A, SAZHIN P V. Laboratory tests of the packer sealing elements[J]. IOP Conference Series:

Earth and Environmental Science,2019,262:012040.

- [4] 张智,祝效华,许建波. 基于正交试验的压缩式封隔器胶筒的结构参数优化[J]. 天然气工业,2019,39(3):80-84.
- [5] 刘清友,黄云,湛精华,等. 井下封隔器及其零件工作行为仿真研究[J]. 石油机械,2005,33(6):23-26.
- [6] 刘清友,黄云,湛精华,等. 井下封隔器接触有限元模型研究[J]. 钻采工艺,2005,28(2):58-60,67.
- [7] 刘巨保,党黎明,付茂青,等. 封隔器胶筒轴向压缩大变形与双重接触力学分析[J]. 石油机械,2014,42(7):49-54.
- [8] 水浩澈,张付英,杨俊梅. 温度变化对压裂封隔器胶筒密封性能和疲劳寿命的影响研究[J]. 机械设计,2020,37(6):43-48.
- [9] 章娅菲,窦益华,罗睿. 基于 ZSM-5 型沸石-水系统的封隔器胶筒材料密封性能研究[J]. 润滑与密封,2018,43(10):12-17,22.
- [10] 张付英,水浩澈,张玉飞,等. 压裂用封隔器双胶筒组合结构的密封性能研究[J]. 机械设计,2019,36(11):14-19.
- [11] 李早元,胡光辉,刘健,等. 碳酸盐岩选择性固井管外封隔器失效原因探讨[J]. 石油钻采工艺,2014,36(1):100-103.
- [12] 刘奇,赵彬,高文磊. 基于 ABAQUS 的舌形密封圈结构参数分析[J]. 机械设计与自动化,2021,50(5):73-75.
- [13] 周梦雨,李凡珠,杨海波,等. 橡胶材料的非线性黏弹性本构方程[J]. 高分子材料科学与工程,2020,36(3):79-84.
- [14] 杨锋,郭然. 多边形应力杂交单元的接触算法研究[J]. 应用数学和力学,2019,40(10):1059-1070.
- [15] 张康,张仕民,丁庆新. 管内封堵器胶筒硬度对其自密封特性影响研究[J]. 石油矿场机械,2018,47(2):8-12.

收稿日期:2021-12-03

(上接第 86 页)

子公司的 Plant simulation 15.0 作为开发工具,开发了包裹智能分拣系统仿真平台,对本文所设计分拣路径动态规划方法的效果进行分析。仿真结果表明所设计包裹定向分拣路径动态规划方法,能够显著降低包裹平均分拣时间,从而提升包裹智能分拣系统的分拣效率。

参考文献:

- [1] 张阳,马如意,刘聪雨,等. 快递集散中心分拣作业优化研究[J]. 工业工程与管理,2018,23(6):95-100,124.
- [2] 翟龙真. 基于人因工程学的快递分拣作业优化研究[D]. 衡阳:南华大学,2016.
- [3] 贺学成,吕淑静,吕岳. 高密度度 AGV 快递包裹分拣系统的路径规划[J]. 计算机系统应用,2019,28(4):39-44.
- [4] 黄梦涛,黎译繁. 面向快递分拣的二维码定位与校正方

法[J]. 科学技术与工程,2019,19(3):153-157.

- [5] 王立平. 基于柔性分拣单元的高效智能分拣系统研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2018.
- [6] 杨伟国. 基于全向轮的可编程输送平台的设计与研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2020.
- [7] PALACÍN J, MARTÍNEZ D, RUBIES E, et al. Suboptimal omnidirectional wheel design and implementation[J]. Sensors, 2021,21(3):865.
- [8] 叶颖诗,魏福义,蔡贤资. 基于并行计算的快速 Dijkstra 算法研究[J]. 计算机工程与应用,2020,56(6):58-65.
- [9] 杨振泰,黎向锋,张立果,等. 基于 Plant Simulation 的柔性作业车间仿真研究[J]. 机械设计与自动化,2020,49(3):87-89,122.

收稿日期:2021-10-29