

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.08.007

# 基于遗传算法的垃圾转运集装箱密封条优化设计

周志勇<sup>1,2,3</sup>, 沈海红<sup>4</sup>, 黄长缨<sup>4</sup>, 郭玉文<sup>4</sup>, 张欧<sup>4</sup>, 蔡永华<sup>1,2,3</sup>

(1. 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070; 2. 汽车零部件技术湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430070; 3. 武汉理工大学汽车工程学院, 湖北 武汉 430070; 4. 上海环境物流有限公司, 上海 201900)

**摘要:**针对上海市联运式专用集装箱在工作过程中密封不严的状况,文章对集装箱密封条的结构形状参数进行了优化设计。首先应用分析软件对集装箱密封条进行建模和受力分析,然后应用神经网络与遗传算法相结合对密封条形状、高度以及宽度等参数进行设计,最后对比优化前后密封条的各项性能。密封条优化后,应力下降,压缩力减少,接触长度增加,能有效解决箱体的渗漏状况。

**关键词:**密封条;结构参数;优化设计;神经网络;遗传算法

**中图分类号:**U463.83 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)08-1052-06

## Optimization design of seal strip for garbage transfer container based on genetic algorithm

ZHOU Zhiyong<sup>1,2,3</sup>, SHEN Haihong<sup>4</sup>, HUANG Changying<sup>4</sup>,  
GUO Yuwen<sup>4</sup>, ZHANG Ou<sup>4</sup>, CAI Yonghua<sup>1,2,3</sup>

(1. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan 430070, China; 2. Hubei Collaborative Innovation Center for Automotive Components Technology, Wuhan 430070, China; 3. School of Automotive Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 4. Shanghai Environmental Logistics Co., Ltd., Shanghai 201900, China)

**Abstract:** In view of the leakage of special container for multimodal transport in Shanghai City, the structural shape parameters of container seal strip were optimized. Firstly, analysis software was used to carry out the modelling of container seal strip and the force analysis. Then, the shape, height and width of the seal strip were designed by using the neural network and genetic algorithm(GA). Finally, the performance of the seal strip before and after optimization was compared. After optimizing the seal strip, the stress and compression force decreased, but the contact length increased. The optimized seal trip can solve the leakage of the box.

**Key words:** seal strip; structural parameter; optimization design; neural network; genetic algorithm(GA)

## 0 引言

随着中国城市化进程加速,各大城市正面临着垃圾量增加、垃圾中转站收运压力大、垃圾收运处理成本高等问题,合理解决垃圾转运问题已成为城市工作的一个重点<sup>[1-2]</sup>。上海市垃圾转运主要应用联运式专用集装箱进行,由于集装箱密封条自身结

构的限制以及各种复杂工况和反复开关门的影响,密封条使用一段时间后会存在永久变形,集装箱工作时存在渗漏现象。因此,必须首先应用 RT2000 惯导对箱体移动轨迹和运行工况进行追踪记录和分析,以便分析密封条受力情况;然后测量箱体和密封条的尺寸,并进行模拟分析。

国内外已有学者对密封条结构形状优化设计

收稿日期:2021-10-27;修回日期:2022-01-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52175111)

作者简介:周志勇(1995—),男,湖北潜江人,武汉理工大学硕士生;

蔡永华(1979—),男,湖北武汉人,博士,武汉理工大学副教授,博士生导师。

展开研究。文献[3]针对汽车尾门处的漏水问题,应用 ANSYS 分析软件,对尾门密封条展开研究,并对尾门密封条形状进行优化,为解决尾门漏水问题提供可行的方法;文献[4]针对传统密封系统结构简单、局部受力大等问题,通过研究密封过程的性能要求,提出一种变截面密封条优化设计的方法以满足车门密封中各种性能要求;文献[5-6]利用 ANSYS 软件对密封条进行结构分析,通过密封条应力变形分析,对密封条的结构尺寸进行重新设计,使密封条的压缩负荷满足设计目标要求;文献[7]针对传统有限元分析难以对多参数问题同时优化,提出联合多软件的多目标优化方法,通过仿真分析,对密封条进行优化设计,并得到压缩负荷与接触宽度最优的密封条结构;文献[8]研究了密封橡胶薄膜的应力状态,并对薄膜的各参数进行了计算求解。

针对密封条结构优化设计,很多学者开展了有限元仿真分析研究,但是,联合神经网络遗传算法对其进行优化研究相对较少。文献[9]针对液膜密封直接测试较难实现的问题,提出基于 BP 神经网络的性能监测方法,利用实验数据训练 BP 神经网络得到最优 BP 神经网络模型;文献[10]针对传统测试方法对密封端面识别准确率较低、识别速度慢的问题,提出了一种基于遗传算法改进的密封状态进行识别的方法。

本文基于上海市虎林路码头湿垃圾联运式专用集装箱用密封条进行研究。首先应用分析软件对原密封条应力状况展开研究,然后应用神经网络遗传算法对密封条展开优化设计,最后分析对比优化密封条的各项性能,拟有效解决集装箱渗漏水问题。

## 1 优化算法及结构仿真

### 1.1 原密封条结构分析

原集装箱密封条其截面为上部呈山峰状,中间开有一个  $24\text{ mm} \times 16\text{ mm}$ (长 $\times$ 宽)矩形槽,两侧有倒刺形状的凸起,倒刺为边长  $4\text{ mm}$  的正三角形,共 10 个倒刺,原密封条分析图如图 1 所示。该密封条的总宽度为  $40\text{ mm}$ ,总高度为  $54\text{ mm}$ ,上层部分的最低端距离矩形槽的顶端为  $10\text{ mm}$ 。

所研究转运集装箱的腔内高度为  $2\text{ m}$ ,转运垃圾量约为  $17\text{ t}$ ,转运垃圾装载高度为  $1.7\sim 1.8\text{ m}$ ,湿垃圾比重约为  $0.8$ 。垃圾转运集装箱为水平式横关门,考虑到垃圾转运集装箱在转运过程中存在倾斜、惯性力等作用,取  $1.5$  的安全系数,此时箱门

受力约为  $38.10\text{ kN}$ 。根据 CJ/T 496—2016《垃圾专用集装箱》中 7.6.3 多式联运垃圾专用集装箱的密封性要求,箱门所受平均压强为箱门受力上下端压强的平均值,此时箱门受力约为  $38.22\text{ kN}$ ,平均压强约为  $0.105\text{ MPa}$ 。故取受力较大值  $38.22\text{ kN}$  为箱门密封合紧力设计标准。

应用 ANSYS 分析软件,对原密封条进行仿真模拟实验。选择原密封条为三元乙丙材料,并设置 4 对接触对,选择位移压缩,压缩量为  $8\text{ mm}$ ,门与箱体间隙为  $11\text{ mm}$ ,对密封条进行关门测试仿真,并得到仿真结果。由图 1 可知,压缩力为  $22\,240\text{ N}$  时,最大应力为  $5.83\text{ MPa}$ ;接触力为  $22\,240\text{ N}$  时,接触应力为  $1.00\text{ MPa}$ ,接触长度为  $29.1\text{ mm}$ 。

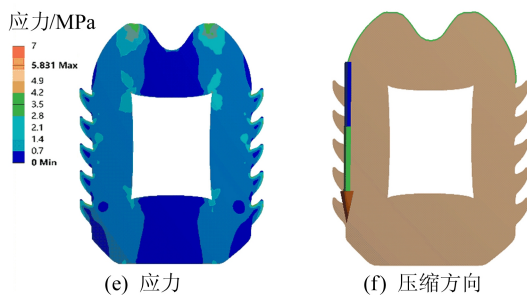
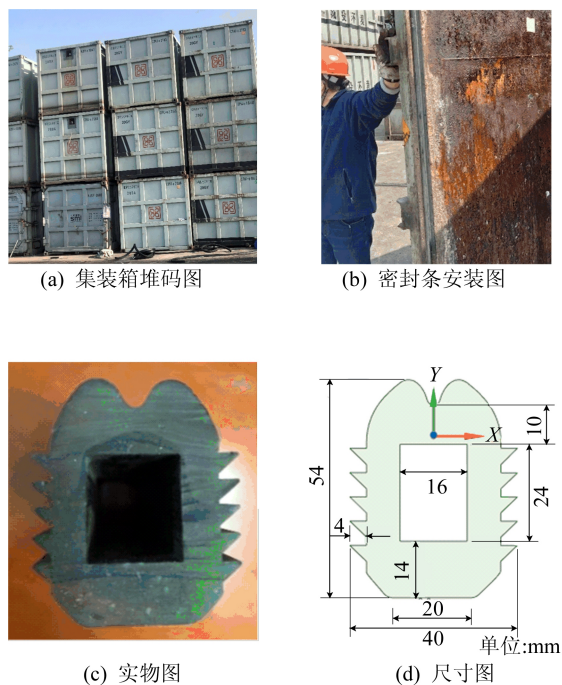


图1 原密封条分析图

考虑到密封条的使用寿命,密封条压缩后内部最大应力应当尽可能小;为应对门框上可能存在的异物,密封条与门框的接触长度应当尽可能长,以便包裹住异物。

## 1.2 BP 神经网络算法

BP 神经网络包含输入层、隐含层、输出层 3 层,是一种误差反向传播、信号向前传递的多层前馈神经网络。前向传递信号时,由输入层经隐含层处理,最后至输出层,得出神经网络<sup>[11-13]</sup>。训练步骤如下:① 初始化;② 隐含层输出;③ 输出层计算;④ 误差分析;⑤ 权值更新;⑥ 判断算法是否结束,否则返回步骤②。

## 1.3 遗传算法

遗传算法(genetic algorithm, GA)是通过自动获取和积累有关信息,自适应控制搜索过程并求得最佳解,是一种高效的方法,起源于对生物模拟研究<sup>[14-16]</sup>。主要步骤如下:① 初始化;② 计算个体的适应度;③ 按适应度值所决定的规则选择下一代个体;④ 交叉操作;⑤ 变异操作;⑥ 满足停止条件,输出结果,否则转入步骤②。

## 1.4 材料模型

为计算求解方便,在对超弹性材料的应力应变分析中,采用 Mooney-Rivlin 模型描述超弹性材料的特性。本文采用应变能密度函数  $W$  表征超弹性材料的特性,对其求应变分量的一阶导数<sup>[17]</sup>,即

$$\mathbf{S} = \frac{\partial W}{\partial \mathbf{E}} \quad (1)$$

其中: $\mathbf{S}$  为第二类 Piola-Koshy Hoff 应力张量; $W$  为应变能函数; $\mathbf{E}$  为 Lagrange 应变张量。应变能函数  $W$  表示为:

$$W = (I_1, I_2, I_3) \quad (2)$$

其中, $I_1, I_2, I_3$  为应变不变分量。

$$W = \sum_{i=0, j=0}^{\infty} C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (3)$$

其中, $C_{ij}$  为常数,且满足  $C_{00} = 0$ 。应变不变量  $I_1, I_2, I_3$  为:

$$\begin{cases} I_1 = J^{-\frac{2}{3}} (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2), \\ I_2 = J^{-\frac{2}{3}} (\lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2), \\ I_3 = J^{-\frac{2}{3}} (\lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2) \end{cases} \quad (4)$$

其中: $J$  为体积比; $\lambda_i$  为主拉伸率,与应变  $\epsilon_i$  的关系为:

$$\lambda_i = 1 + \epsilon_i \quad (5)$$

聚脂橡胶 TPEE 具有不可压缩性,当其在受到外载荷时体积不变,受力前后的体积比为 1 : 1,即  $J=1$ 。式(4)可以简化为:

$$\begin{cases} I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2, \\ I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2, \\ I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{cases} \quad (6)$$

应变能函数  $W$  可以表示为:

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) \quad (7)$$

其中: $I_1, I_2$  为应变张量的主不变量; $C_{10}, C_{01}$  为 Mooney-Rivlin 材料常数。式(7)是在工程中广泛应用的 Mooney-Rivlin 材料模型,可以用来描述绝大多数超弹性材料的力学特性。根据式(5)、式(6),可推导出 TPEE 材料的主应力  $\sigma_i$  和主伸长率  $\lambda_i$  之间的关系为:

$$\begin{cases} \sigma_1 = 2\lambda_1 \left[ \frac{\partial W}{\partial I_1} + (\lambda_2^2 + \lambda_3^2) \frac{\partial W}{\partial I_2} + \lambda_2^2 \lambda_3^2 \frac{\partial W}{\partial I_3} \right], \\ \sigma_2 = 2\lambda_2 \left[ \frac{\partial W}{\partial I_1} + (\lambda_3^2 + \lambda_1^2) \frac{\partial W}{\partial I_2} + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \frac{\partial W}{\partial I_3} \right], \\ \sigma_3 = 2\lambda_3 \left[ \frac{\partial W}{\partial I_1} + (\lambda_1^2 + \lambda_2^2) \frac{\partial W}{\partial I_2} + \lambda_1^2 \lambda_2^2 \frac{\partial W}{\partial I_3} \right] \end{cases} \quad (8)$$

对 TPEE 材料试片进行单轴拉伸实验,由于是单向拉伸,另外 2 个方向的主应力均为 0,即

$$\sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (9)$$

TPEE 材料具有不可压缩性,因此有:

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = 1 \quad (10)$$

则式(8)可变形为:

$$\sigma_1 = 2 \left( \lambda_1^2 - \frac{1}{\lambda_1} \right) \left( \frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \quad (11)$$

根据式(7),可得:

$$\frac{\partial W}{\partial I_1} = C_{10} \frac{\partial W}{\partial I_2} = C_{01} \quad (12)$$

由式(11)、式(12)可得:

$$\frac{\sigma_1}{2 \left( \lambda_1^2 - \frac{1}{\lambda_1} \right)} = C_{10} + \frac{1}{\lambda_1} C_{01} \quad (13)$$

取

$$X = \frac{1}{\lambda_1}, \quad Y = \frac{\sigma_1}{2 \left( \lambda_1^2 - \frac{1}{\lambda_1} \right)} \quad (14)$$

则式(13)可以简化为:

$$Y = C_{10} + C_{01} X \quad (15)$$

根据单轴拉伸实验,可得出 TPEE 材料试片变形和所受载荷的变化关系,由该变化关系计算出一系列拉伸率  $\lambda_1$  和与其对应的应力  $\sigma_1$  的值,再根据拉伸率和对应的应力值计算出式(15)中的  $X$  和  $Y$ ,将所有  $X$  和  $Y$  通过 MATLAB 软件拟合成一条直线,则  $C_{10}$  为该直线的截距, $C_{01}$  为该直线的斜率,因此可对密封条的材料属性进行设置。

## 2 密封截面结构参数优化

### 2.1 密封条截面优化

本文目标是在保证接触力足够的情况下,通

通过对密封条的结构形状进行优化来降低密封条的接触应力,增加密封条的接触长度,密封条的结构形状优化可通过优化密封条的形状、高度、宽度等参数来进行实现,经过优化分析,确定最合理的设计方案<sup>[18]</sup>。密封条结构优化问题可描述为:

$$\min F(X) \quad (16)$$

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (17)$$

$$\text{s. t. } R_i(X) \leq 0, i = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

$$a_j \leq x_j \leq b_j, j = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

其中: $F(X)$ 为目标函数; $R_i(X)$ 为约束函数; $a_i$ 、 $b_j$ 分别为设计变量的上、下限。

根据对密封条仿真受力变形的分析,并结合工程实际经验,选取密封截面结构形状编号  $m$ 、宽度  $t$ 、高度  $T$  3 个变量为优化参数。对于相同材料制成的密封条,在压缩量相同的情况下,压缩负荷  $F$  和应力  $\sigma$  是截面形状编号  $m$ 、厚度  $t$ 、高度  $T$  的函数,即  $F=f_1(m, t, T)$ ,  $\sigma=f_2(m, t, T)$ 。利用加权求和的办法,可将此多目标问题转化为一个单目标优化问题,构造如下目标函数:

$$g = \lambda_1 F + \lambda_2 \sigma \quad (20)$$

其中, $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  为权值。根据密封条实际运行工况进行分析,考虑到  $F$  与  $\sigma$  的相对大小及相互重要性,分别取  $\lambda_1=0.3$ 、 $\lambda_2=0.7$ ,此比例最能反映密封条性能<sup>[19]</sup>。因此,密封条的结构优化问题转化为对参数  $k$ 、 $t$ 、 $T$  进行优化,得出目标函数  $g$  的最小值。

通过仿真模拟计算和分析,取 5 种性能相对较好的截面形状密封条进行研究优化,截面图如图 2 所示。

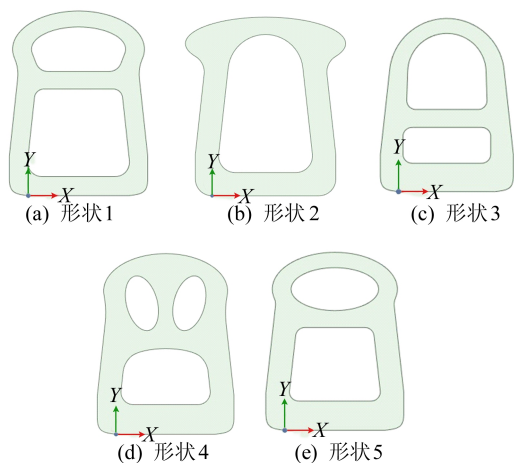


图 2 密封条截面形状

由于密封条截面薄厚不均,且相对复杂,各变量取值范围的界定变得困难。结合工程设计经验归纳总结出各变量取值范围,具体的变量类型与

取值范围见表 1 所列。

表 1 截面优化变量

变量	取值范围	水平				
$m$	1~5	1	2	3	4	5
$t/\text{mm}$	4.5~6.5	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5
$T/\text{mm}$	52~60	52	54	56	58	60

为避免全排列数据量大,计算复杂,消耗时间长,因此采用正交设计法进行设计。 $m$ 、 $t$ 、 $T$  取 5 组数据,可采用  $L_{25}(5^3)$  水平法来进行计算分析,然后通过有限元分析法计算数据  $F$  和  $\sigma$ ,结果见表 2 所列。

表 2 正交试验设计有限元分析结果

序号	$m$	$t/\text{mm}$	$T/\text{mm}$	$F/\text{N}$	$\sigma/\text{MPa}$
1	1	4.5	52	248	0.057
2	1	5.0	54	1 582	0.075
3	1	5.5	56	3 151	0.085
4	1	6.0	58	5 858	0.110
5	1	6.5	60	7 771	0.140
6	2	4.5	54	28 763	0.600
7	2	5.0	56	21 304	0.510
8	2	5.5	58	36 149	0.750
9	2	6.0	60	19 405	0.590
10	2	6.5	52	13 869	0.470
11	3	4.5	56	4 146	0.510
12	3	5.0	58	5 432	0.570
13	3	5.5	60	8 548	0.690
14	3	6.0	52	1 800	0.500
15	3	6.5	54	5 100	0.580
16	4	4.5	58	18 210	0.830
17	4	5.0	60	10 653	0.610
18	4	5.5	52	943	0.380
19	4	6.0	54	1 864	0.250
20	4	6.5	56	3 867	0.440
21	5	4.5	60	1 675	0.150
22	5	5.0	52	49	0.100
23	5	5.5	54	1 512	0.030
24	5	6.0	56	4 534	0.200
25	5	6.5	58	7 180	0.290

## 2.2 神经网络训练、基于遗传算法截面优化结果

本研究利用 3 层 BP 神经网络进行计算和分析,其中输入神经元数取 3,分别对应  $m$ 、 $t$ 、 $T$ 。根据神经网络的结构近似分析方法原理<sup>[20]</sup>,取隐层神经元数为 5,输出神经元数为 2,结构如图 3a 所示。神经网络输出结果如图 3b 可知,由图 3b 可知,此神经网络基本实现了所要逼近的非线性函数的功能。

通过遗传算法进行优胜劣汰的结构参数优化筛选运算。本文取群体大小为 30、交叉率  $P_c$  为 0.4、变异率  $P_m$  为 0.2。经过多代进化,得到优化结果  $m=3$ 、 $t=4.4$  mm、 $T=64$  mm,此时,  $F=8\ 125$  N、 $\sigma=0.28$  MPa,采用有限元软件对优化结果进行对应设计参数的计算,计算结果为  $F=7\ 712$  N、 $\sigma=0.32$  MPa,相对误差分别为 5.1%、14.0%。进化迭代曲线如图 3c 所示。

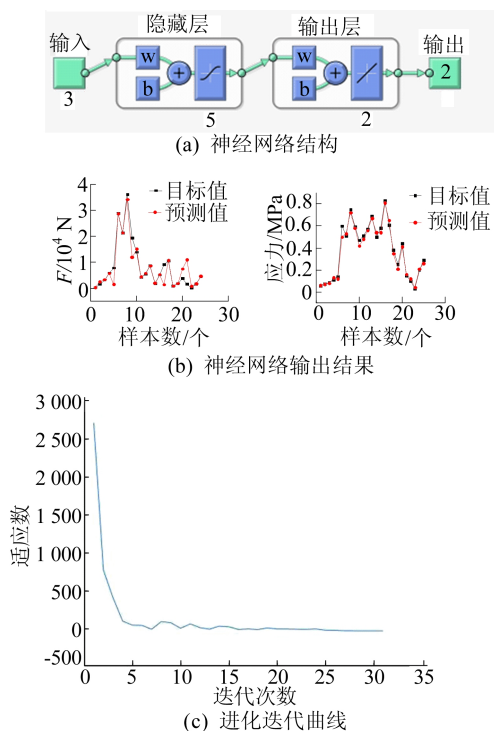


图 3 神经网络与遗传算法

### 2.3 性能对比

优化前后密封条各参数对比如图 4 所示。原密封条最大应力为 5.83 MPa,等压缩量时的压缩力为 22 240 N。

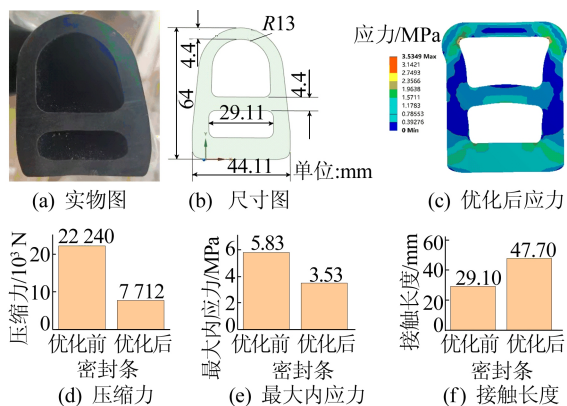


图 4 优化前后密封条各参数对比

由图 4 可知,优化后密封条最大内应力为

3.53 MPa,相比优化前降低 39.4%,等压缩量时的压缩力为 7 712 N,相比优化前降低 65.3%,且接触长度增加 18.6 mm,密封压力 0.18 MPa。

### 3 装车实验

#### 3.1 压力验证

为了验证有限元分析的准确性和有效性,对密封条实际装车关门后的密封压力进行测量,采用型号为 LLW 与 LW 的富士压敏纸进行测试。将密封条划分为 18 段区域采集。压敏纸安装及测量结果示意图如图 5 所示。

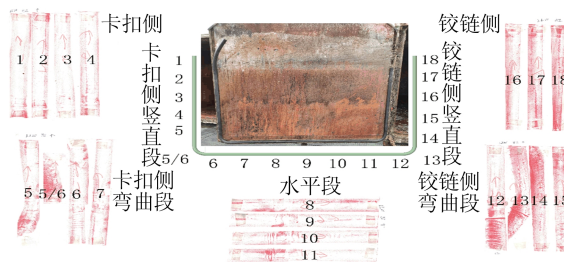


图 5 压敏试纸安装及测量结果示意图

通过色卡对比,密封条水平段的实测压力为 0.188 MPa,与上述有限元分析的密封压力 0.180 MPa 基本一致,也高于设计安全压力 0.105 MPa。

#### 3.2 密封性实验

研究组首先进行了密封条的水密性实验。对集装箱进行了注水实验,将水注入集装箱内并达到集装箱的 2/3 高度,此时实验装载质量约为 23.22 t(正常运行装载质量约为 18 t),静置 72 h 后无渗漏,且密封条无明显的挤压变形,水密性实验如图 6a 所示。随后进行垃圾装车实验,装载 4 车湿垃圾加 1 车餐厨垃圾,放置 24 h 后无渗滤液出现。优化后的密封条装车实验表现较好,装车实验如图 6b 所示。



图 6 密封性实验

(下转第 1114 页)

- 西安:西安科技大学,2012.
- [11] 章李刚,楼佳悦,冯国辉,等.考虑残余顶推力作用时盾构下穿引起既有顶管管廊变形[J].科学技术与工程,2022,22(35):15784-15791.
- [12] 陈志敏,范长海,张常书.地铁盾构下穿建筑群施工地面建筑沉降控制方案及富水砂黏地层沉降预测方法[J].城市轨道交通研究,2023,26(1):39-43.
- [13] 胡秋斌.双线盾构隧道下穿对既有暗挖大断面隧道影响的数值分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2023,44(1):1-9.
- [14] 张治国,陈杰,朱正国,等.基于 Kerr 地基模型的盾构下穿诱发既有非连续隧道纵向变形分析[J].岩土工程学报,2023,45(4):1-10.
- [15] 王金华,徐长节,王玉林,等.盾构近距离侧穿桥梁及下穿公路变形规律与控制技术研究[J].公路,2023,68(1):400-406.
- [16] 陈仁朋,王志腾,吴怀娜,等.基于 FAHP 法和区间数改进 TOPSIS 法的盾构隧道下穿建筑物风险评估[J].上海交通大学学报,2022,56(12):1710-1719.

(责任编辑 张 镗)

(上接第 1056 页)

## 4 结 论

本文针对垃圾转运集装箱存在渗漏的情况,对密封条进行了有限元分析,通过神经网络遗传算法对密封条的结构形状进行优化,并进行装车实验验证,主要结论如下:

- 1) 通过优化设计密封条的几何特征和尺寸,能解决集装箱存在渗漏的情况。
- 2) 形状 3 在壁厚为 4.4 mm、高度为 64 mm 时,压缩负荷和应力都能达到目标函数要求。
- 3) 优化后密封条的最大内应力降低 39.4%。
- 4) 优化后密封条等压缩量的压缩力降低 65.3%。

## [参 考 文 献]

- [1] 杜亚娟,郭强.垃圾中转站最优选址及垃圾最优转运方案研究[J].计算机工程与应用,2015,51(10):252-256.
- [2] 徐东洋,李航,王利娟.城市地下垃圾中转站选址及两级转运联合最优方案研究[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2021,38(1):96-104.
- [3] 刘红波,令峰超.乘用车尾门密封条防漏水设计方法[J].汽车实用技术,2020(12):52-55.
- [4] 陈亨.车门密封系统关闭力仿真及截面优化设计[D].长沙:湖南大学,2019.
- [5] 付治存.有限元技术在汽车密封条结构优化设计中的应用[J].汽车零部件,2015(11):27-32.
- [6] 付治存.ANSYS 有限元技术在汽车密封条设计中的应用[J].汽车工程师,2017(3):24-26,45.
- [7] 胡强,陈宇强,陈梓铭,等.车门框密封条断面结构的多目标优化[J].汽车技术,2019(4):58-62.
- [8] MAMEDOV V T, MAMEDOV G A, ASLANOV J N. Stress-strain state of sealing rubber membranes at large deformations[J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2020, 61(2): 286-291.
- [9] 朱晓琳,李勇凡,李振涛,等.基于 BP 神经网络的液膜密封监测方法[J].石油化工设备技术,2020,41(6):55-61.
- [10] 赵蕾,高宏力,胡龙飞,等.基于遗传算法改进的 OVO TWS-VM 的机械密封状态研究[J].机械与电子,2019,37(4):10-16.
- [11] 陈丽芳,冯力静,刘保相.神经网络规则优化建模与应用[J].计算机工程与科学,2019,41(12):2247-2254.
- [12] 王芳芳.基于 BP 神经网络算法机理及应用探究[J].科技创新导报,2020,17(13):150-151.
- [13] 杨洋,陈家俊.基于群智能算法优化 BP 神经网络的应用研究综述[J].电脑知识与技术,2020,16(35):7-10,14.
- [14] 金天坤,高扬.遗传算法的原理及组成浅析[J].科技视界,2014(4):19,6.
- [15] 由睿鹏.计算机网络优化设计中遗传算法的原理及应用[J].电子技术与软件工程,2020(20):14-15.
- [16] 赵宜鹏,孟磊,彭承靖.遗传算法原理与发展方向综述[J].黑龙江科技信息,2010(13):79-80.
- [17] 曾佑奎.海洋装备 U 形组合密封性能研究[D].西安:西安科技大学,2017.
- [18] 蒋明明.乘用车车门密封条结构的优化研究[D].淮南:安徽理工大学,2017.
- [19] 赵建才,姚振强.密封条结构参数优化设计方法[J].中国机械工程,2006,17(12):42-44.
- [20] 赵宪铎,王惠文,王珊珊.带空间结构的人工神经网络建模方法[J].北京航空航天大学学报,2021,47(1):115-122.

(责任编辑 张 镗)