

抗事故容器设计与验证专题

抗事故包装箱密封结构性能研究

李娜, 张思才, 徐伟芳, 薛江

(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 绵阳 621999)

摘要: **目的** 为抗事故包装箱密封结构设计提供依据。**方法** 介绍 2 种抗事故包装箱密封结构的设计, 分析经历事故场景后 2 种密封结构的密封面变形和 O 形密封圈压缩率变化情况, 开展密封性能试验。**结果** 端面密封结构经历事故场景后, O 形密封圈压缩率不小于 15% 时, 密封结构检测漏率为环境本底漏率, 压缩率降至 10% 时, 漏率明显增加, 但仍能达到 $1 \mu\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 量级, 压缩率降至 5% 时, 密封结构彻底失效。柱面密封结构的联接螺栓即使经历事故场景后全部失效, 密封结构的密封性能也基本保持不变, 检测漏率为环境本底漏率。**结论** 柱面密封结构抵御事故风险的能力更强。

关键词: 抗事故包装箱; 端面密封; 柱面密封; 密封性能; 漏率

中图分类号: TB485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)21-0001-05

Seal Structure Performance of Accident-resistant Packaging Container

LI Na, ZHANG Si-cai, XU Wei-fang, XUE Jiang

(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

ABSTRACT: The work aims to provide a basis for the design of seal structure of accident-resistant packaging container. The design of two kinds of seal structures for accident-resistant packaging container was introduced. The deformation of sealing face and the change of compression rate of the O-ring after accident scenario were analyzed, and then the sealing performance tests were conducted. When end face seal structure was subject to accident scenario, if the compression rate of O-ring was no less than 15%, the leak rate of seal structure detected was the environment background leak rate. When the compression rate dropped to 10%, the leak rate increased considerably, but it could still reach an order of magnitude of $1 \mu\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$. When the compression rate dropped to 5%, the seal structure failed completely. For the cylindrical face seal structure, even though all its connecting bolts failed after the accident scenario, the sealing performance of seal structure basically remained unchanged, and the leak rate detected was the environment background leak rate. The ability of the cylindrical face seal structure to resist accident risk is stronger.

KEY WORDS: accident-resistant packaging container; end face sealing; cylindrical face sealing; sealing performance; leak rate

国际原子能机构和世界各国一向高度重视放射性物质的安全运输, 该机构早在 1961 年就发表了《放射性物质安全运输规程》, 后面经过多次修订完善, 并被许多成员国采纳作为制定本国标准的基础。我国 GB 11806—2004《放射性物质安全运输规程》也等同采用了该标准的 2003 年修改版本^[1]。《放射性物质安全运输规程》强调: 运输安全应放在货包的设计与试验上, 因为运输货包的可靠性是安全运输的重要前提。《放射性物质安全运输规程》中将用于运输的包

装及其放射性内容物统称为货包, 根据放射性物质的活度限值 and 材料限制将货包分为例外货包、工业货包 (1 型、2 型、3 型)、A 型货包、B 型货包 (B(U)型和 B(M)型) 及 C 型货包, 除例外货包及 1 型工业货包外, 其他货包均需在经历相应的货包试验后, 保证放射性物质的漏失或弥散在规定的范围内, 才能正式投入使用。《放射性物质安全运输规程》中规定: B 型货包与 C 型货包经历运输事故环境 (主要为跌落冲击试验、耐热试验, 其中 C 型货包需要经历 90 m/s 撞击

收稿日期: 2017-08-22

作者简介: 李娜 (1985—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为抗事故包装箱结构设计及分析。

刚性靶的冲击试验)后,1周内放射性内容物的累积漏失中,氦-85不大于 $10A_2$,其他放射性核素不大于 A_2 。对运输放射性物质的抗事故包装箱^[2-4]而言,其经历事故环境后保持密封可靠性是其关键性能指标。

跌落冲击试验是抗事故包装箱满足《放射性物质安全运输规程》中货包试验要求中最重要的试验项目之一^[5]。抗事故包装箱通常采用金属垫片结合O形橡胶密封圈^[6-7]的组合密封形式,金属垫片能使包装箱长期保持极高的密封指标,但在经历跌落事故场景时,冲击一旦造成箱体结构变形,即使是轻微变形也会使金属垫片的密封性能大幅降低,此时包装箱的密封能力主要通过O形密封圈实现,利用其压缩回弹性补偿密封面的变形量^[8-9],确保包装箱在经历事故场景后仍具有良好的密封性能以防止危险物品泄漏。

文中拟分析抗事故包装箱端面密封结构和柱面密封结构的密封面在跌落事故场景下的变形以及O形密封圈压缩率的变化边界,以此为基础开展密封性能试验获取密封圈不同压缩率下两类密封结构的漏率,得到抗事故包装箱2种密封结构在经历跌落事故场景后O形密封圈失效的压缩率临界值和设计裕量,为类似抗事故包装箱的密封结构设计提供参考和依据。

1 密封结构设计与分析

1.1 密封结构形式

按密封圈在抗事故包装箱内安装位置的不同,密封结构可分为端面密封和柱面密封2种形式,见图1。

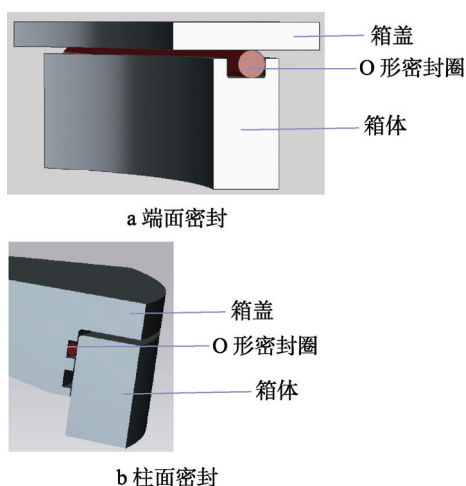


图1 抗事故包装箱密封结构

Fig.1 Seal structure of accident-resistant packaging container

1.2 端面密封结构

O形密封圈上、下圆周边面组成了端面密封结构的密封面,密封圈通常安装在箱体上表面的密封沟槽内,箱体与箱盖之间采取螺栓法兰联接方式,施加联接螺栓拧紧力矩使上、下法兰面逐渐贴合,O形密封圈受挤压发生弹性变形,进而填满密封面上的微观凹凸部位以实现密封。假设联接螺栓拧紧力矩为0时,密封圈压缩率 $K_d \approx 0$,一定范围内增加联接螺栓的拧紧力矩,密封圈压缩率 K_d 也随之增大,当拧紧力矩足够大时,可促使箱体端面与箱盖端面贴合,密封圈达到最大压缩率 K_{dmax} (也称压缩率设计值 K_{ds}):

$$K_{dmax} = K_{ds} = (d - d_0) / d \quad (1)$$

式中: d 为密封圈直径; d_0 为密封沟槽深度。

继续增加联接螺栓的拧紧力矩,密封圈压缩率保持不变。当包装箱经历事故场景后,由于联接螺栓的变形或断裂,密封面会产生一定的分离量 δ_y ,见图2,密封圈实际压缩率 K_d 会下降($0 < K_d < K_{dmax}$):

$$K_d = (d - d_0) / d - \delta_y / d \quad (2)$$

在该情况下,密封圈压缩率仍需确保危险物质的可靠密封。

1.3 柱面密封结构

O形密封圈内、外圆周边面组成了柱面密封结构的密封面,密封圈通常安装在箱盖侧面的密封沟槽内,内、外密封面之间设计一定的径向间隙 x 。箱盖安装过程中,通过联接螺栓拧紧力矩克服密封圈与密封面之间的摩擦阻力,密封圈受侧向挤压发生弹性变形^[10-11],进而填补密封面之间的微观间隙以实现密封。安装过程中,柱面密封结构密封圈压缩率设计值 K_{zs} 不随联接螺栓拧紧力矩变化而变化(见图3):

$$K_{zs} = (d - d_0) / d - x / d \quad (3)$$

由于箱体口部刚度远小于箱盖,假设箱盖经历事故场景后不变形,仅箱体口部产生塑性变形,截面形状由圆形变为椭圆,见图4,密封面间隙产生变化量 δ_x 。事故环境后密封圈的压缩率 K_z 为:

$$K_z = (d - d_0) / d - (x + \delta_x) / d \quad (4)$$

假设箱体口部截面面积变形前后保持不变,则:

$$\pi(r + x)^2 = \pi ab \quad (5)$$

式中: r 为箱盖的半径; a 和 b 为箱体口部变形后椭圆截面的长、短半轴,分别对应密封圈压缩率变化最小、最大处。由式(5)可知,在密封结构设计

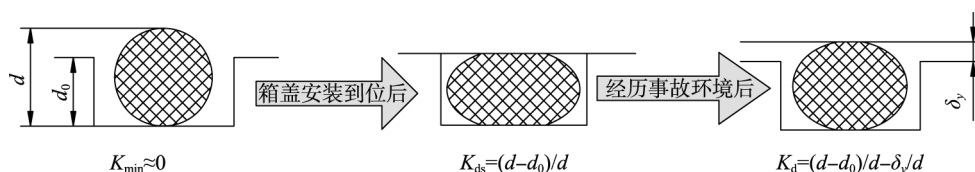


图2 端面密封结构密封圈压缩不同状态

Fig.2 O-ring's different compression states of end face seal structure

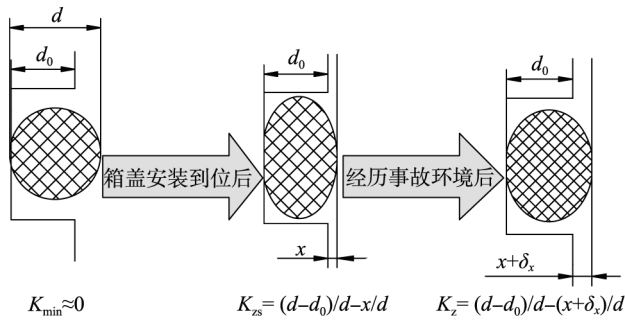


图 3 柱面密封结构密封圈压缩不同状态

Fig.3 O-ring's different compression states of cylindrical face seal structure

确定后, a 和 b 的乘积是定值, 当 b 最小, 即箱体密封面与箱盖密封面贴合时, 在椭圆短半轴处密封圈压缩率达到最大值 K_{zmax} :

$$b_{min} = r \quad (6)$$

$$\delta_x = -x \quad (7)$$

$$K_{zmax} = (d - d_0) / d \quad (8)$$

当 a 最大, 在椭圆长半轴处密封圈压缩率达到最小值 K_{zmin} :

$$a_{max} = r + 2x + x^2 / r \quad (9)$$

$$\delta_x = x + x^2 / r \quad (10)$$

$$K_{zmin} = (d - d_0) / d - (2x + x^2 / r) / d \quad (11)$$

在该情况下, 密封圈最小压缩率仍需确保危险物质的可靠密封。

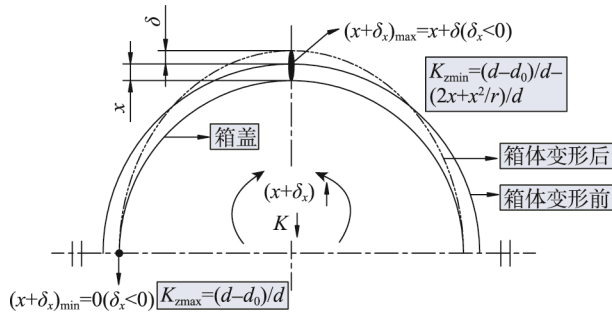


图 4 柱面密封结构密封面间隙变化情况

Fig.4 Change in clearance of sealing face of cylindrical face seal structure

1.4 密封圈材料及成型要求

抗事故包装箱 O 形密封圈 (见图 3) 以具有优良的耐老化性能的三元乙丙橡胶为基材, 纳米层状无机物如蒙脱土 (OMMT)、石墨等为补强材料, 功能填料, 采用熔融插层法制备, 具有优良的耐高温性能、气体阻隔性能 (达到 $1 \times 10^{-17} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$) 及辐照环境下的耐老化性能^[12]。端面密封结构的密封面在密封圈上、下圆周面, 柱面密封结构密封面在密封圈内、外圆周面, 考虑到密封圈分型面表面质量较差, 使用时应避免密封圈分型面与密封结构密封面重合。

O 形密封圈通常有 180° 和 45° 两种分型方式。 180°

分型 O 形密封圈可以用于端面密封结构, 但不适用于柱面密封结构; 45° 分型 O 形密封圈既适用于端面密封结构, 又适用于柱面密封结构, 但考虑到 45° 分型密封圈制造工艺复杂, 一般仅应用于柱面密封结构。

1.5 密封圈压缩率设计计算

当橡胶材料压缩率 $K > 40\%$ 时, 在高温下容易产生较大的残余变形, 影响密封性能; 压缩率过小, 密封结构同轴度相差较大时, 可能导致局部范围内没有压缩量, 出现泄漏通道^[11-12]。综合分析决定, O 形密封圈用于柱面密封时, 压缩量取 $8\% \sim 23\%$; O 形密封圈用于端面密封时, 压缩率应为柱面密封的 1.5 倍。

端面密封结构中密封面完全贴合时, O 形密封圈压缩率为 30% , 即:

$$K = (d - d_0) / d = 30\% \Leftrightarrow d_0 = 0.7d \quad (12)$$

在柱面密封结构中保持 d_0 与 d 之间的关系不变, 则包装箱最大压缩率为 30% , 最小压缩率为 20% , 则:

$$K_{min} = (d - d_0) / d - (2x + x^2 / r) / d = 20\% \quad (13)$$

文中 x 相对于 r 为极小值, 即 $x/r \approx 0$, 由式 (12—13) 可以得到:

$$x = 5\%d \quad (14)$$

由式 (3)、式 (12)、式 (14) 可以得出, 柱面密封结构的压缩率设计值:

$$K_{zs} = 25\% \quad (15)$$

说明在柱面密封结构中, 压缩率设计值为 25% , 在事故场景后, 密封圈压缩率最大值为 30% , 最小值为 20% 。

2 密封性能试验

2.1 方法

试验采用氦质谱检漏法^[13-15], 试验原理见图 5。检漏前通过调节联接螺栓拧紧力矩实现 O 形密封圈的不同压缩率, 然后用真空泵将抗事故包装箱抽至低压, 再向其内通入氦气, 最后用吸枪检测密封结构的漏率。检漏过程中环境本底漏率为 $1.1 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

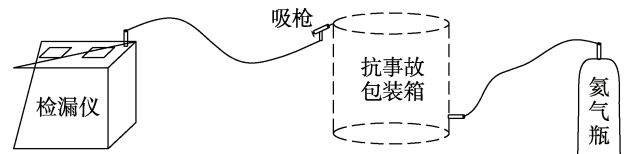


图 5 氦质谱检漏

Fig.5 Helium mass spectrometer leak detection

2.2 结果

2.2.1 端面密封结构试验

以 O 形密封圈压缩率分别为 30% , 25% , 20% , 15% , 10% , 5% 这 6 种状态下, 进行密封性能试验。结果表明, O 形密封圈压缩率为 30% , 25% , 20% 及

15%时,检测漏率为环境本底漏率;压缩率为10%时,检测漏率为 $2.1 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$;压缩率为5%时,包装箱内充注完示漏气体后无法保压。

由此可知,密封面贴合时,密封圈压缩率为30%,法兰面处漏率为环境本底漏率。随着密封面间隙增大,密封圈压缩率下降。在压缩率不小于15%时,检测漏率仍为环境本底漏率,当压缩率下降到10%时,检测漏率明显增大,当压缩率降至5%时,密封结构失效。

2.2.2 柱面密封结构试验

以O形密封圈压缩率分别为20%和25%等2种状态进行密封性能试验。密封圈压缩率为20%和25%时,当法兰端面完全贴合,检测漏率均为环境本底漏率。当联接螺栓的拧紧力矩降低为0时,2种密封圈

压缩率下,密封结构的检测漏率仍为环境本底漏率值,表明柱面密封结构的密封性能不受联接螺栓的拧紧力矩影响,只要箱体与箱盖之间不脱离,就可保证包装箱密封性能的可靠性。

3 包装箱跌落数值计算

考虑到包装箱冲击姿态的随机性,这里进行5种姿态的跌落数值模拟(冲击速度为90 m/s):箱体侧碰(侧碰时包装箱与靶面碰撞时其轴线平行于靶面)、箱体顶端角碰、箱体底端角碰(角碰时箱体重心与碰撞点之间的连线与靶面垂直)、箱体顶端正碰、箱体底端正碰(包装箱与靶面碰撞时其轴线与靶面垂直)。包装箱经历跌落环境后联接螺栓的力学响应见图6。

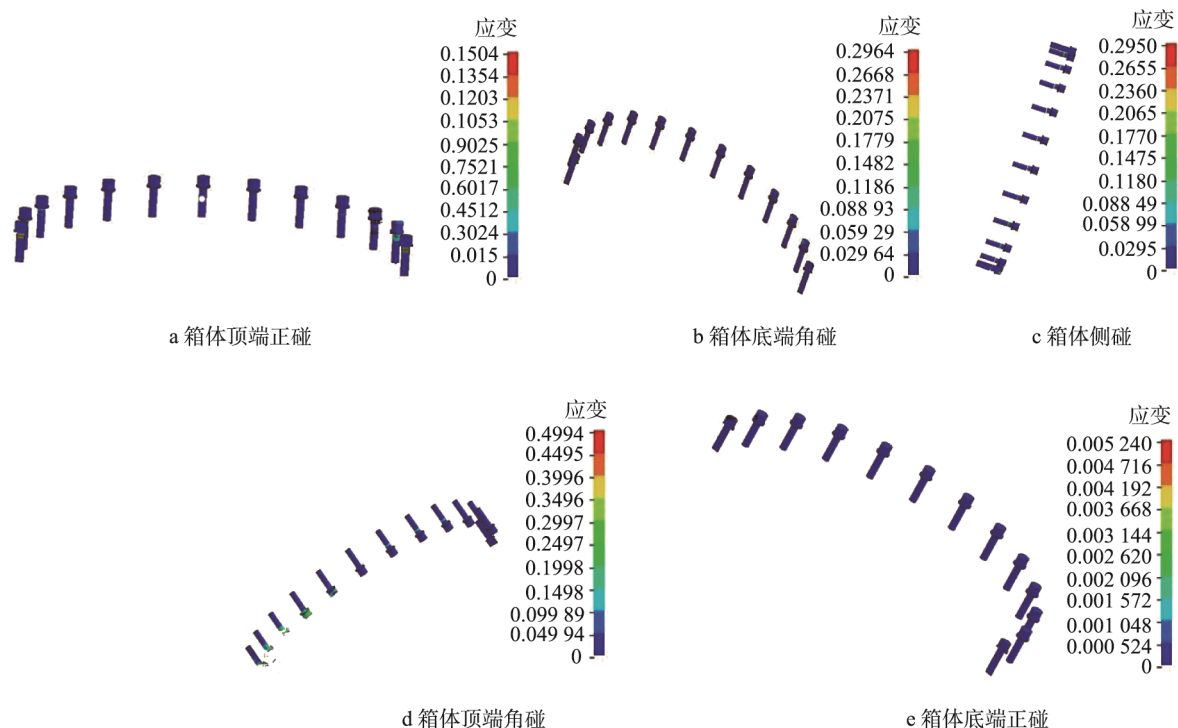


图6 不同姿态跌落后的螺栓应变

Fig.6 Bolts' strain after dropping in different postures

包装箱经历箱体底端角碰及箱体底端正碰后,联接螺栓未出现结构破坏;包装箱经历箱体顶端正碰后,联接螺栓出现局部应力集中,但未产生结构破坏;包装箱经历箱体顶端角碰后,部分联接螺栓头部出现结构破坏;包装箱经历侧碰后,超过半数联接螺栓被剪断,其余联接螺栓也出现局部应力集中。包装箱经历5种姿态的跌落环境后,箱盖与箱体之间的联接螺栓均未完全被剪断,预计箱体与箱盖之间不会产生脱离。

若包装箱采用端面密封结构,联接螺栓的断裂及应力集中,会导致橡胶密封圈压缩率降低,密封面局部比压力(密封圈单位面积上的密封力)下降,依据密封性能试验结果,箱体的密封性能可能会降低,甚至失效。若包装箱采用柱面密封结构,5种跌落姿态

下联接螺栓均未全部出现结构破坏,预计箱体与箱盖之间不会脱离,依据密封性能试验结果,箱体密封性能基本不会产生变化。为保证箱体密封结构的有效性,建议采用柱面密封结构。

4 结语

1) 抗事故包装箱经历事故场景后,端面密封结构密封面的间隙变化导致O形密封圈压缩率变化,只要压缩率不小于15%,密封结构的密封性能与未遭遇事故前相比变化不大;压缩率减小到10%时,密封结构检测漏率仍能达到 $10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 量级,仍然具有良好的密封能力;压缩率降至5%时,密封结构彻底失效。

2) 抗事故包装箱经历事故场景后, 柱面密封结构密封面的变形会导致 O 形密封圈压缩率在不同位置发生变化, 以变化后的最小压缩率进行密封性能试验, 柱面密封结构的检测漏率与未遭遇事故前相比基本保持不变。

3) 柱面密封结构密封性能不受联接螺栓拧紧力矩的影响, 更适用于抗事故包装箱设计。

参考文献:

- [1] IAEA. Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material[M]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2003.
- [2] 李娜, 刘剑钊, 张思才, 等. 抗事故包装箱碰撞过程靶体等效方法研究[J]. 包装工程, 2016, 37(1): 25—38.
LI Na, LIU Jian-zhao, ZHANG Si-cai, et al. Equivalent Method for the Targets in Impact Process of Accident-resistant Packaging Container[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(1): 25—38.
- [3] 葛任伟, 欧阳勇, 张怀宇, 等. 抗事故包装箱缓冲结构厚度计算方法研究[J]. 机械设计与制造, 2011(12): 38—40.
GE Ren-wei, OUYANG Yong, ZHANG Huai-yu, et al. Research of Computing Methods for Thickness of Buffering Structure of Accident Resistant Packing Cases[J]. Machinery Design & Manufacture, 2011(12): 38—40.
- [4] 李国强, 赵兵, 张建岗, 等. 放射性物质运输货包安全试验[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(1): 668—670.
LI Guo-qiang, ZHAO Bing, ZHANG Jian-gang, et al. Test for Radioactive Material Transport Package Safety[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(1): 668—670.
- [5] 李海龙, 孙造占, 孙树海, 等. 放射性物质运输容器的跌落冲击分析方法[J]. 核技术, 2013, 36(4): 1—4.
LI Hai-long, SUN Zao-zhan, SUN Shu-hai, et al. Drop Impact Analysis Method of Radioactive Material Container[J]. Nuclear Techniques, 2013, 36(4): 1—4.
- [6] SATOSHI K, SHINSAKU M. Reconsideration of the Seal Mechanism in the Con Flat System[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A Vacuum Surfaces & Films, 2001, 19(6): 693—696.
- [7] 李俊承, 张思才, 张方晓. 基于响应面法的刀口金属密封结构优化设计[J]. 包装工程, 2012, 33(5): 32—35.
LI Jun-cheng, ZHANG Si-cai, ZHANG Fang-xiao. Optimization Design of Knife-edge Metal Sealing Structure Based on Response Surface Method[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(5): 32—35.
- [8] 宋鹏云. 软填料密封机理分析[J]. 润滑与密封, 2000(6): 64—66.
SONG Peng-yun. An Analysis of the Sealing Mechanism of a Soft-Packed Stuffing-Box Seal[J]. Lubrication Engineering, 2000(6): 64—66.
- [9] 韩琰, 刘兴悦, 闫荣鑫, 等. 典型双密封结构泄漏机理研究[J]. 真空, 2015, 25(6): 27—33.
HAN Yan, LIU Xing-yue, YAN Rong-xin, et al. Research on Leakage Mechanism of Double Sealed Structure[J]. Vacuum, 2015, 25(6): 27—33.
- [10] WARING R H. Seals and Sealing Handbook[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990.
- [11] 李昊. 改良型圆柱面接触静密封结构[J]. 石油化工设备, 2014, 43(6): 80—84.
LI Hao. Improved Cylindrical Surface Contact Static Sealing Structure[J]. Petro-Chemical Equipment, 2014, 43(6): 80—84.
- [12] ROTH A. Vacuum Technology[M]. Beijing: China Machine Press, 1976.
- [13] 随亚光, 唐仕英, 马艳军, 等. 用于爆炸容器的 O 形密封圈漏率的试验研究[J]. 润滑与密封, 2012, 37(10): 66—69.
SUI Ya-guang, TANG Shi-ying, MA Yan-jun, et al. Experimental Study on Leakage Rate of O-ring Used for Explosion Container[J]. Lubrication Engineering, 2012, 37(10): 66—69.
- [14] 陈叔平, 昌锬, 刘振全, 等. 贮箱漏率正压检测方法[J]. 低温与超导, 2005, 33(3): 43—64.
CHEN Shu-ping, CHANG Kun, LIU Zhen-quan, et al. Pressurized Leak Detection Method for Storage Tank[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2005, 33(3): 43—64.
- [15] 孙开磊, 孙新利. 真空氦质谱检漏原理与方法综述[J]. 真空电子技术, 2007(6): 62—65.
SUN Kai-lei, SUN Xin-li. Summary of the Theory and Method of Vacuum Helium-Mass-Spectroscopy Leak Detection[J]. Vacuum Electronics, 2007(6): 62—65.