

基于负压法炮弹气密性检测方法研究

胡延臣¹, 王新颖², 宋佳祺³

(1.陆军驻牡丹江地区军事代表室, 黑龙江 牡丹江 157000;
2.沈阳理工大学, 沈阳 110159; 3.陆装沈阳军代局, 沈阳 110015)

摘要: **目的** 实现炮弹气密性检测及其自动化、智能化设备的开发。**方法** 提出了一种基于负压法的炮弹气密性检测方法。首先, 阐述了负压法气密性检测工作原理和实施流程, 并对炮弹检测设备的用例模型和检测设备功能框架进行了讨论。其次, 针对工程实际, 详细给出了测量腔安装密封性计算、测量腔泄漏的压差泄漏率计算、测量腔的初始测量压力值计算、炮弹气体泄漏量计算等检测算法和判定方法。**结果** 基于负压法的炮弹气密性检测方法的灵敏度比正压法高。**结论** 本方法可为实现对全弹的气密性检验提供参考, 同时也可促进和指导炮弹气密性检验设备的研制, 将有效保障炮弹气密性检验自动化设备开发效率和有效性。

关键词: 炮弹验收; 储存可靠性; 气密性; 负压法; 检测计算; 检验设备

中图分类号: TJ30 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2021)12-0013-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.12.003

Research on Air Tightness Test Detection Method of Finished Ammunition Based on Negative Pressure

HU Yan-chen¹, WANG Xin-ying², SONG Jia-qi³

(1. Military Representative Office of the Army in Mudanjiang, Mudanjiang 157000, China; 2. Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China; 3. Shenyang Military Representative Bureau, Shenyang 110015, China)

ABSTRACT: Air tightness test is an important guarantee for long-term storage reliability of projectile. In view of the limitations and constraints of the finished ammunition air tightness detection methods. On the basis of analyzing the air-tightness test of projectile, a method of the finished ammunition air tightness based on negative pressure is proposed in this paper. Firstly, the working principle and implementation process of negative pressure air tightness detection were described, and the use case model and function framework of detection equipment were discussed. Secondly, according to the engineering practice, the detection algorithms and judgment methods were given in detail, such as the calculation of the installation tightness of the measuring cavity, the calculation of the differential pressure leakage rate of the measuring cavity, the calculation of the initial measured pressure value of the measuring cavity, and the calculation of the finished ammunition gas leakage. Based on the negative pressure method, the air tightness detection method of the finished ammunition can provide a reference for the realization of the whole finished ammunition air tightness

收稿日期: 2021-04-11; 修订日期: 2021-06-10

Received: 2021-04-11; Revised: 2021-06-10

作者简介: 胡延臣(1979—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为弹药装备质量控制研究与实践。

Biography: HU Yan-chen (1979—), Male, Master, Engineer, Research focus: research and practice of quality control of ammunition equipment.

引文格式: 胡延臣, 王新颖, 宋佳祺. 基于负压法炮弹气密性检测方法研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(12): 013-018.

HU Yan-chen, WANG Xin-ying, SONG Jia-qi. Research on air tightness test detection method of finished ammunition based on negative pressure[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(12): 013-018.

inspection, and also can promote and guide the development of air tightness inspection equipment of the finished ammunition, which will effectively guarantee the efficiency and effectiveness of the development of air tightness inspection automation equipment, and provide a realization mode for the realization of air tightness detection and the development of automation and intelligent equipment.

KEY WORDS: acceptance of ammunition; storage reliability; air tightness; negative pressure method; detection calculation; inspection equipment

炮弹成品长期储存在部队库房中, 炮弹的气密性直接决定了其长期储存的可靠性。为防止炮弹因漏气而失效, 炮弹气密性检测在生产中得到了广泛的应用^[1]。在传统炮弹检测中, 常通过底火孔向炮弹内充高压气体来检测炮弹的气密性, 但底火安装之后, 底火处的气密性无法验证。因此, 当前工艺只对炮弹半成品和发射装药半成品进行气密性检测, 还无法便捷、批量地实现全弹成品的检测。由于检测手段的缺乏, 在炮弹生产工艺和仓储过程中, 往往会遗漏部分的检测内容, 这必然会引入一定的质量风险, 影响炮弹长期储存的可靠性。因此, 炮弹全弹的气密性检验对进一步保障炮弹长期储存的可靠性具有重要意义。

目前用气体流量公式进行气密性检测的应用较多^[2]。首先测量与泄漏量相关的一些参数, 例如压力、压差、超声波等^[3], 然后将这些相关量通过一定的关系式转化为相应的泄漏量。为提高泄漏检测的精度与效率, 国内外一些研究机构提出了一些理论和方法^[4-5], 如快速充气法、温度补偿法、基准曲线法、加装填充物减少被测工件内容积等方法。国内外学者对气密性检测理论做了大量的研究, GUNTUR H L等^[6]研究了压差检测方法; JOHNSON C H等^[7]提出了基于声学原理的无损检测方法; CHEN P等^[8]通过对声泄漏信号的研究评估出液压缸泄漏的情况; GIL PITA R等^[9]提出了使用颈项基函数网络(RBFN)的超声波探伤方案; 合肥智能机械研究所提出了模糊评判标准^[10]; 南京理工大学研究了器件的极限泄漏率并将其作为产品气密性检测的报废标准^[11], 南京航空航天大学对复杂零件腔体的气密性检测技术展开研究, 建立了零件腔体泄漏率模型和等效内容积的计算模型^[12]; 张伟等^[13]描述了一种密封箱室气密性验收检测方案; 上海交通大学在无损伤检测领域展开了超声波技术检测^[14]; 迟晓铭等利用红外成像检测技术实现了对泄露源的远距离、大范围检测及快速定位^[15]。此外, 国内外研究机构一直在寻求一种有效的干式泄漏检测与定位的方法, 主要产品集中在两类, 一类是利用质谱检测的原理^[16], 采用稀有气体作为示踪介质, 探头在被测对象外逐点检测, 当探头靠近泄漏点时, 仪器进行声光报警; 另一类是利用超声波定向原理^[17-18], 向被测对象充入一定压力的纯净空气, 当被测对象存在较大漏孔时, 气体就会穿过漏孔形成湍流, 此时利用检漏仪的超声波定向探头进行扫

描, 即可完成漏点定位。

综合比较目前的检测方法, 传统的示踪气体法受检测原理的限制, 存在效率低、无法在线诊断等缺点^[19]。超声波法也只能在泄漏孔较大并且泄漏气体为湍流时才可以采用^[20]。对具有一定体积、外观完整的炮弹进行现场、局部、非破坏性的气密性检测, 同时实现最佳的检测成本控制、效率、性能等, 目前尚未实现。本文提出一种基于负压法的炮弹局部气密性检验方法, 详细说明了该方法的基本原理和检测算法。该方法可实现整装式炮弹的全弹检测, 以及分装式炮弹弹丸和发射装药药筒的密封性单独检测。该方法主要应用于炮弹生产环节、储存过保质期技术检测环节的炮弹气密性检验, 同时也可促进和指导炮弹气密性检验设备的研制。

1 炮弹气密性检测方法原理

1.1 炮弹气密性检测方法的约束

炮弹类生产及存储在各阶段、各个部位都安排有气密性检测环节, 但相应的检验方法都存在一定的局限性, 对于炮弹的成品或长储的气密性检测则较为困难, 这主要是由炮弹自身特征所涉及的成本、方法实现难度、检验的批量等方面因素决定的。因此, 常规炮弹成品的气密性检测方法有一定约束性, 需要适应炮弹自身的特征, 总结起来大体如下:

- 1) 炮弹内腔具有一定量的体积, 火药装填具有一定的空隙, 空隙间不可避免地保有一定数量的气体, 气体压强应与装配时环境温度下的压强相同;
- 2) 适应炮弹整体检测或局部检测, 检测部位和待检测部位的形状根据炮弹型号不同而存在差异;
- 3) 炮弹气密性检测不能破坏原有炮弹的完整性, 检测手段可重复进行;
- 4) 炮弹拆装后, 重新装配仍可执行同样的气密性检测;
- 5) 炮弹成品在常规环境下即可进行气密性检测;
- 6) 针对炮弹批量生产工艺, 气密性检测需要快捷、便捷、安全、可靠、成本低廉。

1.2 炮弹气密性检测方法的基本原理

炮弹成品为含内腔的完整封闭体, 在实际工况下, 正压法检测无法用于炮弹成品及仓储过程。根据

炮弹气密性检测的实际需求，文中提出了差压式负压检测方法。负压法可以方便检测仪器与被测物的接触，无需外加力即可连接，而且灵敏度比正压法高。采用负压法检测炮弹气密性时，需要保证负压腔抽真空不受炮弹内腔原有气体外泄的影响；需要考虑实现该方法的仪器的侧漏率问题，即需要考虑外界空气进入仪器对检测结果的影响。同时，该方法需要针对具有一定空气容量的炮弹密封检测，否则会因为容器内泄漏气体少、测量敏感度低而导致检测不准。

炮弹气密性检测方法的基本原理如图 1 所示。测试装置由联接腔、测量腔、基础腔三个真空腔组成，其体积分别为 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 。联接腔覆盖被测对象，

内装有真空检测传感器 1，通过阀门 1 与测量腔相通，不与大气环境相邻。测量腔包裹联接腔并覆盖被测对象，其形状和腔体空间根据炮弹被测部位形状不同而不同。测量腔与大气环境、联接腔都密封隔离，腔内装有真空检测传感器 2，通过阀门 2 与基础腔相通。基础腔为一个大的真空腔，腔内装有真空检测传感器 3，负责真空状态的保持，提供工作状态所需的真空环境。传感器 4 用于测量工作时的大气压力。真空泵和阀门 3 配合使用，保证基础腔一直处于一个稳定的真空状态。阀门 3 只有在阀门 2 关闭状态时才准许工作。三个腔的体积关系如下所示：

$$Q_3 \gg Q_2 > Q_1 \quad (1)$$

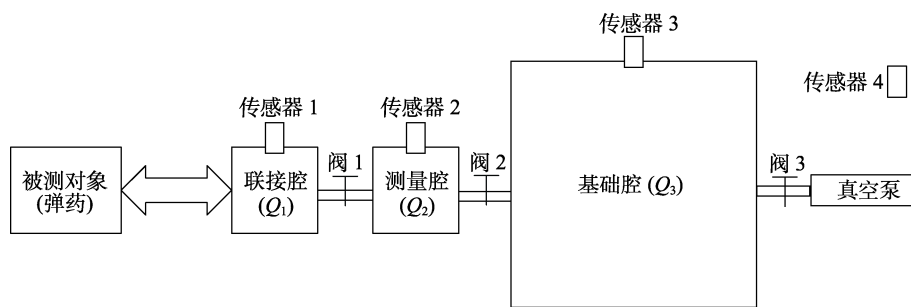


图 1 炮弹气密性检测装置原理

Fig.1 Schematic diagram of shell air tightness detection device

检测方法实施流程如图 2 所示。将被测弹药与测试装置的联接腔连接固定好，打开阀门 3，此时测试装置的联接腔和测量内的压力与大气压相等。将基础腔抽至真空状态，关闭阀门 3、打开阀门 2，此时测量腔与基础腔真空度相同，通过测量真空度的变化计算测量腔与联接腔之间、测量腔与大气之间的压差泄漏率。关闭阀门 2、打开阀门 1，根据测量腔内真空度的变化情况，判断检测部位的气密性。

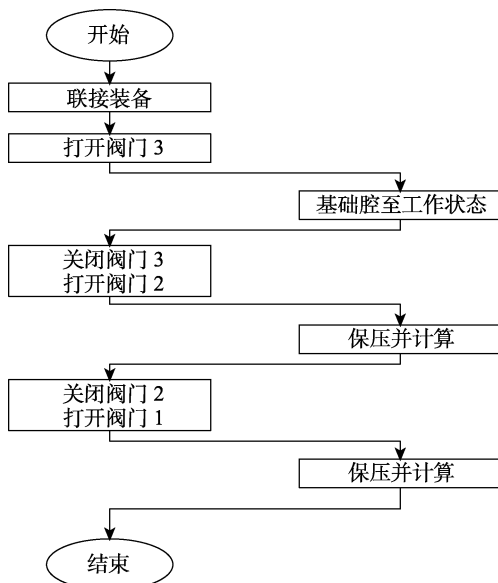


图 2 检测方法实施流程

Fig.2 Implementation flow chart of detection method

2 炮弹气密性检测计算

如果炮弹的气密性很差或是测量装置的密封性严重不足，漏气会极为明显，真空检测传感器测量值的变化也会非常明显，很容易判别，无需计算。由于泄漏是通过压差发生的，测量腔中的真空度变化要通过一段时间的气体泄漏量来反映，因此文中的检测计算针对常规情况，即炮弹的气密性问题或测量装置的密封性问题。

设定炮弹密封部位的气密性检测标准为，在一定的炮弹内外压力差环境下，在一定时间内，标准大气压下由炮弹内向外泄漏气体的体积小于规定值。记为：

$$Q_{p,t} < Q_E \quad (2)$$

式中： $Q_{p,t}$ 为由炮弹向外泄漏的气体体积； p 为标准规定的炮弹内外压力差； t 为规定的泄漏检测时间； Q_E 为标准中规定的合格标准气体体积。

因工程状况的复杂性及测量装置的差异性，为了方便操作和经济性等因素，执行时通常选择大于炮弹内外标准压力差且时间长于规定时间的参数，计算出炮弹向外泄漏的气体体积仍小于标准规定值，则判定合格。其中，具体的大于炮弹内外压力差值和时间长于规定时间值要根据不同测量装置的工艺状况给定，需要满足国标和国军标的要求。由于测试装置的安装条件不同，为了检验炮弹气密性标准是否满足要求，需要根据现场的炮弹状况来计算确定相关参数。炮弹

密封箱检测计算的过程如图3所示, 炮弹泄漏气体量的计算公式在下文中会逐一给出。

2.1 测量腔安装密封效果的检验

仪器在正常工作条件下, 由基础腔维持稳定的真空度条件; 当基础腔达不到条件时, 由真空泵工作来维持基础腔中的真空度。在真空泵停止运行的状态下进行检测, 打开阀门2, 保证测量腔与基础腔联通, 其它各阀门均关闭, 测量腔和基础腔的气压值瞬间保

持一致, 其计算公式如下:

$$P_{准备} = (P_{基础} \times Q_3 + P_0 \times Q_2) / (Q_2 + Q_3) \quad (3)$$

式中: $P_{准备}$ 为打开阀门2时两腔的压力; $P_{基础}$ 为基础腔中维持的压力; P_0 为标准大气压, 可以理解为外界大气压力值; Q_2 、 Q_3 分别为测量腔、基础腔的体积。当该计算值与此时测量腔中真空传感器测得的气体压力值差别大时, 表明仪器装置未准备好, 密封性差, 不能进行测试工作。

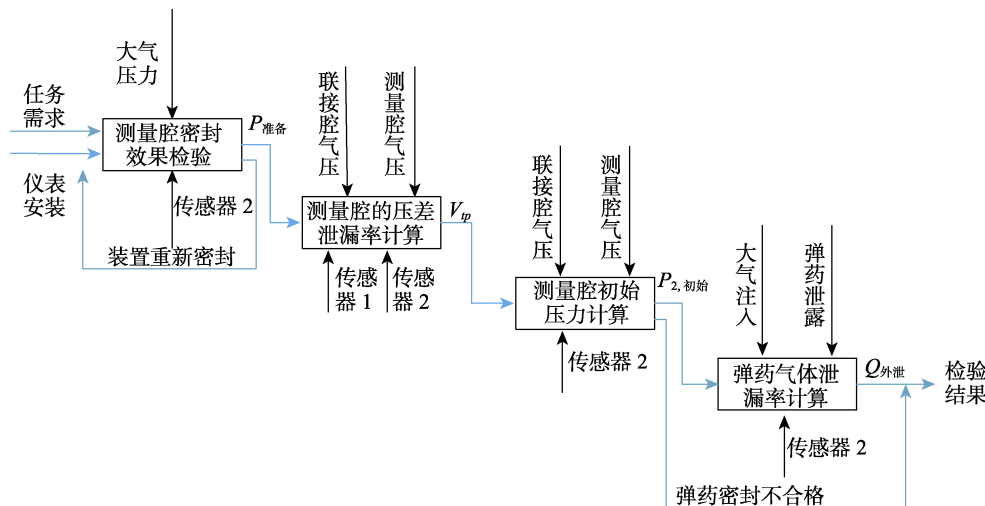


图3 炮弹气密性检测计算的过程

Fig.3 Calculation process of shell air tightness detection calculation

2.2 测量腔泄漏的压差泄漏率计算

2.2.1 联接腔向测量腔泄漏的气体量

如果 $P_{准备}$ 与此时测量腔中测得的气体压力值一致, 当 $P_{准备} \ll P_0$ 时, 若装置密封有偏差, 则向测量腔的气体泄漏分为大气向测量腔的气体泄漏和联接腔向测量腔的泄漏两种情况。此时, 联接腔安装后, 其腔内压力与炮弹内的压力都与环境大气压力相同, 可认为炮弹内外无压差, 即无气体泄漏。为计算测量腔与大气环境间的压差泄漏率, 需先计算联接腔向测量腔泄漏的气体量。

当测量腔与基础腔连通并保持统一真空度时, 为减少基础腔的干扰, 关闭阀门2, 切断测量腔与基础腔的连接。保持一段时间 $T_{校准}$, 如果存在装置侧漏问题, 测量腔和联接腔内的压力传感器将测得气压的相应变化, 公式为:

$$Q_{联} = (P_0 - P_{1,T_{校准}}) \times Q_1 / P_0 \quad (4)$$

式中: $Q_{联}$ 为由联接腔向测量腔泄漏的气体在标准大气压下的气体量; $P_{1,T_{校准}}$ 为联接腔最终的气压值; Q_1 为联接腔的体积。

2.2.2 测量腔与环境间的压差泄漏率

在已知联接腔向测量腔泄漏的气体量的情况下, 可

以计算得到大气环境向测量腔注入的气体量, 如下式:

$$Q_{环境} = (P_{2,T_{校准}} - P_{准备}) \times Q_2 / P_0 - Q_{联} \quad (5)$$

式中: $Q_{环境}$ 为环境向测量腔注入的气体量; $P_{2,T_{校准}}$ 为经过 $T_{校准}$ 时间时, 测量腔内的气体压力值。此时由环境向测量腔泄漏气体的泄漏率 V_t 为:

$$V_t = Q_{环境} / T_{校准} \quad (6)$$

此时, 由外界环境大气与测量腔的压差造成的环境向测量腔气体泄漏的压差泄漏率 V_{tp} 为:

$$V_{tp} = V_t / (P_0 - P_{准备}) = Q_{环境} / (T_{校准} \times (P_0 - P_{准备})) \quad (7)$$

2.3 测量腔的初始测量压力值

当计算得到环境向测量腔气体泄漏的压差泄漏率后, 打开阀门1并连通联接腔和测量腔, 当两腔真空度一致时, 可计算得到此时测量腔中的气体压力值 $P_{2,初始}$:

$$P_{2,初始} = (P_{2,T_{校准}} \times Q_2 + P_{1,T_{校准}} \times Q_1) / (Q_1 + Q_2) \quad (8)$$

如果该计算值与此时测量腔测得的气体压力值不一致, 表明炮弹泄漏非常严重, 炮弹气密性不好。

2.4 炮弹气体泄漏量计算

如果 $P_{2,初始}$ 计算值与此时测量腔测得的气体压力

值一致, 且 $P_{2, \text{初始}} \ll P_0$ 时, 保持此种状态一段时间的 $T_{\text{测量}}$, $T_{\text{测量}}$ 要大于标准规定的测量保压时限。此时, 测量腔内如果气体压力上升, 则存在大气气体的注入和炮弹内腔气体的外泄。此时, 测量腔内气体的增加值为:

$$Q_{\text{测}} = (P_{2, T_{\text{测量}}} - P_{2, \text{初始}}) \times (Q_1 + Q_2) / P_0 \quad (9)$$

式中: $P_{2, T_{\text{测量}}}$ 为保压 $T_{\text{测量}}$ 后测得的腔内压力值。计算可知, 环境气体的注入量为:

$$Q_{\text{注入}} = (P_0 - P_{2, T_{\text{测量}}}) \times V_{\text{腔}} \times T_{\text{测量}} \quad (10)$$

因此, 炮弹内腔气体的外泄量:

$$Q_{\text{外泄}} = Q_{\text{测}} - Q_{\text{注入}} \quad (11)$$

因为测量时的气压值与保压时间都要严于标准规定, 所以同等条件下有:

$$Q_{p, t} < Q_{\text{外泄}} \quad (12)$$

式中: $Q_{p, t}$ 为标准条件下炮弹的气体泄漏量。如果 $Q_{\text{外泄}} < Q_{\text{允}}$, 表明炮弹测量部位的气密性达到标准, 否则可以判定不合格。

3 总结

1) 提出了基于负压法的炮弹气密性检测方法, 测试装置为由小到大的联接腔、测量腔、基础腔三个真空腔组成, 通过测量腔内真空度的变化情况, 判断检测部位的气密性。此方法的灵敏度比正压法高。

2) 针对工程实际, 给出了检测方法的具体算法, 包括测量腔安装密封性计算、测量腔泄漏的压差泄漏率计算、测量腔的初始测量压力值计算、炮弹气体泄漏量计算等, 并给出了气密性的判定方法。

3) 文中的研究是建立在多年实践经验的基础上, 该方法的实施将有效保障炮弹气密性检验自动化设备开发的效率和有效性, 在该方法实施的过程中, 尚需对真空度、保压时长、环境气压等技术参数根据工程需要进行规范和换算, 需要满足国标和国军标的要求。

参考文献:

- [1] 马宏亮. 全弹密封检测装置及技术方案[J]. 兵工自动化, 2013, 32(8): 14-15.
MA Hong-liang. Whole missile sealing detection device and technology solutions[J]. Ordnance industry automation, 2013, 32(8): 14-15.
- [2] 李党育, 胡延毅, 党晓军. 差压法气密性检测工艺参数的确定[J]. 液压气动与密封, 2014, 34(7): 64-66, 69.
LI Dang-yu, HU Yan-yi, DANG Xiao-jun. Determination of process parameters for air tightness detection with differential pressure method[J]. Hydraulics pneumatics & seals, 2014, 34(7): 64-66, 69.
- [3] 吴春龙. 基于机器视觉的气密性检测装置研究与设计[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2013.
WU Chun-long. Research and desien of gas tightness detection system based on machine vision[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2013.
- [4] 安云凤. 基于机器视觉的压力容器气密性检测系统设计[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2016.
AN Yun-feng. Design of air tightness detection system of pressure vessels based on machine vision[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2016.
- [5] 刘军水, 赵奎, 林兰修, 等. 手持式电子设备气密性检测方法[J]. 中国新技术新产品, 2020(19): 46-47.
LIU Jun-shui, ZHAO Kui, LIN Lan-xiu, et al. Air tightness test method of handheld electronic equipment[J]. New technology & new products of China, 2020(19): 46-47.
- [6] GUNTUR H L, CAI M, KAWASHIMA K, et al. Analysis of temperature effect on differential pressure method for air leak detection[C]//SICE 2004 Annual Conference. Japan: IEEE, 2004: 159-162.
- [7] JOHNSON C H, DRUSCHITZ E A, DRUSCHITZ A P. Ultrasonic leak test for automotive brake caliper[J]. Materials science forum, 2007, 539-543: 429-432.
- [8] CHEN P, CHUA P S K, LIM G H. A study of hydraulic seal integrity[J]. Mechanical systems and signal processing, 2007, 21(2): 1115-1126.
- [9] GIL PITA R, VICEN R, ROSA M, et al. Ultrasonic flaw detection using radial basis function networks (RBFNs)[J]. Ultrasonics, 2004, 42(1-9): 361-365.
- [10] 李锋, 万莅新, 邢武, 等. 高精度中压型智能测漏仪的研制[J]. 仪表技术与传感器, 2001(2): 21-23, 19.
LI Feng, WAN Li-xin, XING Wu, et al. Development of high precision mid-pressure intelligent air leakage tester[J]. Instrument technique and sensor, 2001(2): 21-23, 19.
- [11] 苏小平, 徐诚, 王良模. 汽车液压零部件定量气密性检测的研究[J]. 汽车技术, 2001(6): 12-14.
SU Xiao-ping, XU Cheng, WANG Liang-mo. Research on quantitative air tightness test of automobile hydraulic parts[J]. Automobile technology, 2001(6): 12-14.
- [12] 张万雷. 复杂零件腔体气密性检测关键技术研究及系统开发[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
ZHANG Wan-lei. Key technology research and system development of cavity seal detection for complex parts[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [13] 张伟, 杨文辉. 密封箱室气密性验收检测的基本介绍[J]. 科技视界, 2020(17): 244-246.
ZHANG Wei, YANG Wen-hui. Basic introduction of air tightness acceptance test of sealed box[J]. Science & technology vision, 2020(17): 244-246.
- [14] 龚其春, 叶骞, 刘成良, 等. 新型气体泄漏超声检测系统的研究与设计[J]. 电子技术应用, 2005, 31(3): 36-39.
GONG Qi-chun, YE (J /Q), LIU Cheng-liang, et al. Study and design of a new leak-detect system based on ultra-

- sonic[J]. Application of electronic technique, 2005, 31(3): 36-39.
- [15] 龚其春, 刘成良, 王永红, 等. 新型气体泄漏超声检测系统的研究与设计[J]. 液压与气动, 2005(3):75-77.
GONG Qi-chun, LIU Cheng-liang, WANG Yong-hong, et al. Study and design of a new leak-detect system based on ultrasonic[J]. Chinese hydraulics & pneumatics, 2005(3):75-77.
- [16] 迟晓铭, 肖安山, 朱亮, 等. 石化企业气体泄漏红外成像检测技术研究进展[J]. 安全、健康和环境, 2021, 21(2): 1-5.
CHI Xiao-ming, XIAO An-shan, ZHU Liang, et al. Research progress of infrared imaging detection technology for gas leakage in petrochemical enterprises[J]. Safety health & environment, 2021, 21(2): 1-5.
- [17] 冯知位, 张海燕. 氦质谱检漏工艺参数探讨[J]. 现代国企研究, 2015(4): 157.
FENG Zhi-wei, ZHANG Hai-yan. Discussion on process parameters of helium mass spectrometry leak detection[J]. Modern SOE research, 2015(4): 157.
- [18] 朱一鸣, 刘云秀. 用超声多普勒频谱法检测血液中的动态气泡[J]. 生物医学工程学杂志, 1994, 11(2): 156-159.
ZHU Yi-ming, LIU Yun-xiu. Doppler audio spectrum assessment of dynamic bubbles in blood[J]. Journal of biomedical engineering, 1994, 11(2): 156-159.
- [19] 杜思民, 丁丽娜, 姜琨. 气体泄漏检测系统[J]. 电子世界, 2021(1): 152-153.
DU Si-min, DING Li-na, JIANG Kun. Gas leakage detection system[J]. Electronics world, 2021(1): 152-153.
- [20] 李建龙, 谭玲龙, 陈文涛, 等. 压力容器气腔内放射性惰性气体含量估算[J]. 辐射防护通讯, 2015, 35(1): 19-23.
LI Jian-long, TAN Ling-long, CHEN Wen-tao, et al. Calculation of radioactive noble gas content inside RPV in PWRs[J]. Radiation protection bulletin, 2015, 35(1): 19-23.
- [21] 毕琨. 高压管道泄漏的 CFD 仿真分析与试验研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017.
BI Kun. CFD simulation analysis and experimental study of high pressure pipeline leakage[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.