

机坪埋地管道穿越阀门井防水密封结构设计

王成杰¹ 刘 硕² 张 健²

(1. 中国航空油料有限责任公司, 北京 100088; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 文中提出了一种基于双层波纹板的新型机坪埋地管道穿越阀门井的防水密封结构。制造原尺度样机开展了力学性能和防水密封性能测试。分别对样机施加轴向和垂向变形模拟机坪埋地管道相对阀门井轴向伸缩和沉降运动, 监测管道承受载荷和波纹板局部应变。通过对加载后样机注水静置 24 h 测试其水密特性。研究表明: 该种新型防水密封结构可有效吸收轴向和垂向变形不致破坏, 同时保证防水密封性能要求, 可应用于民航机场供油系统的改造建设中。

关键词: 机坪埋地管道; 波纹板; 模型测试; 力学测试; 防水密封性能测试

中图分类号: U173 文献标识码: A 文章编号: 1004-9614(2021)06-0001-04

Waterproof Seal Structure Design of Apron Buried Pipeline Passing Through Valve Well

WANG Cheng-jie¹, LIU Shuo², ZHANG Jian²

(1. China National Aviation Fuel Supply Co Ltd, Beijing 100088, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: This paper proposed a novel apron buried pipeline passing through valve chamber structure based on double layer corrugated board. Mechanical property test and waterproof test were conducted on the original scale prototype. Axial and vertical deformation were exerted on the model respectively to simulate pipeline stretch-and-draw-back and settlement relative to the valve chamber wall. Bearing load and local strain on the corrugated board were monitored. In addition, waterproof property was tested by injecting water in the prototype and kept for 24 h. Results show that this novel sealing structure is able to absorb axial and vertical displacement without structural damage and keep waterproof at the same time, which can be applied in the renovation and construction of airport aviation fuel supply system.

Keywords: apron buried pipeline; corrugated board; prototype test; mechanical test; waterproof sealing performance test

0 引言

航空煤油供给系统中, 机坪管网输油管线埋设在机坪下方, 主管路沿线布置竖向支管, 通过加油栓井向移动加油车或航空飞机输送航空煤油。为确保埋地管网运行中各个分支管线的流量匹配、局部出现航油泄漏时紧急关断以及管网检修等, 埋地管线常在关键部位设置安装阀门和阀门井。阀门井设计施工中, 埋地主管线穿透井体, 阀门及周围管段布置于井内, 其他管段布置于井外。在机坪现场, 常发现沙土中的水进入阀门井, 影响井内阀门操作。如将穿过阀门井

壁的管道完全浇筑, 沉降和主管道相对机坪地面伸缩等因素可能会造成其破坏。因此, 在保证阀门井防水密封性能的同时为主管道提供运动补偿, 是机坪管网结构设计中的主要难点。

经过多年的实践, 出现了方形补偿器、套管补偿器、波纹补偿器、球形补偿器和旋转补偿器等多种管道补偿结构^[1-6]。然而这些结构并非全部具备防水密封性能。针对大型水泥套管穿越建筑外围护墙的情况, 出现了柔性动密封防水套管技术, 通过柔性材料密封管道和护墙间的间隙^[7]。该种技术兼具运动补偿和防水密封性能, 但柔性材料可能会因航空煤油等腐蚀老化, 且是否适用于输送航空煤油的钢制管道,

基金项目: 中科院战略先导专项(B类)子课题(XDB22030101)

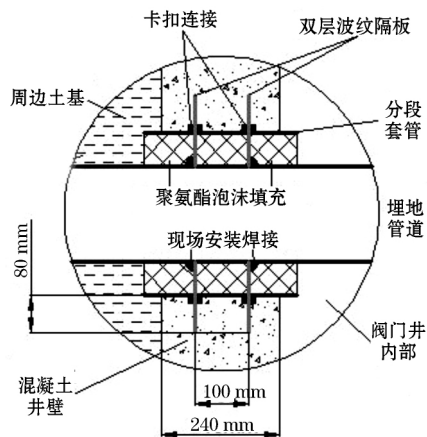
收稿日期: 2021-04-27

有待进一步研究。近年来, BP 公司提出了一种铰链式的阀门井密封方案, 通过双链条式密封封堵和 Z 型橡胶套共同实现阀门井密封和防水作用。该种技术成本较高且是否适合于国内航空煤油供给系统的土质条件尚未得到验证。基于以上行业现状, 急需一种适合于国内航空煤油供给系统的机坪管道穿越阀门井防水密封结构。基于波纹板的力学性能^[8-9], 本文提出一种新型机坪埋地管道穿越阀门井的防水密封结构方案, 并通过原尺度模型实验研究这种结构的力学特性和防水密封性能。

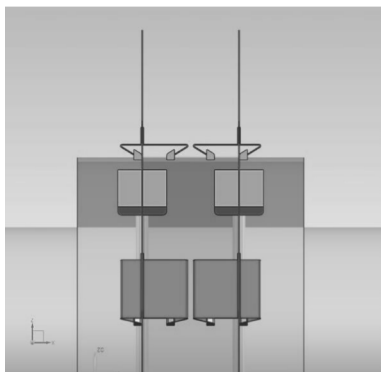
1 新型防水密封结构测试方案

1.1 新型防水密封结构介绍

新型防水密封结构的主体由套管和双层环形波纹板组成。如图 1 所示, 套管与埋地管道间的密封和支撑由环形波纹隔板(简称波纹板)完成。



(a) 设计图纸



(b) 三维效果图

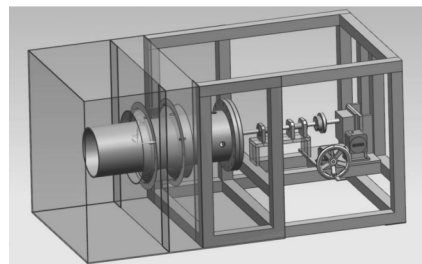
图 1 双层波纹板阀门井防水密封结构

埋地管道与分段套管形成的空间采用聚氨酯泡沫填充, 且保证波纹板的自由度。波纹板与埋地管道间的连接采用焊接方式, 与分段套管的连接采用卡扣

的方式, 分段套管结构分 3 段安装。同时, 将波纹板的外径增大埋入混凝土内, 保证防水特性的同时固定波纹板。本文测试中采用的原尺度防水密封结构方案针对 DN350 管道设计加工。测试结构的管道长度为 1 000 mm, 管径 350 mm, 壁厚 12 mm; 外部套管直径 508 mm, 壁厚 4.5 mm, 长度 360 mm; 波纹板长度 128 mm, 厚度 1.5 mm, 波纹高度 10 mm, 波纹板间距 100 mm, 波形的波长为 22 mm, 波高为 10 mm。

1.2 防水密封结构性能测试方案

将设计加工的阀门井防水密封结构放置于加载测试平台上(图 2)开展测试, 重点记录结构的防水特性和外载下的力学响应特性。平台中埋地管道通过防水密封结构穿越浇筑的混凝土墙, 在井外带有法兰的一侧, 采用螺栓与轴向载荷施加装置连接, 实现沿轴向 2 个相反方向的位移, 模拟穿越管道的轴向伸长和收缩运动, 运动幅度通过轮盘和手柄精确控制。垂向的不均匀沉降则通过在管道两端的千斤顶施加(图 3)。防水密封性能测试中, 对加载过的试件在井内注满水, 静置 24 h 后观察防水密封结构渗漏状况。



(a) 三维效果图



(b) 实物图

图 2 原尺度阀门井防水密封结构及加载测试平台

测试中采用刻度尺记录穿越阀门井管道的轴向和垂向变形。通过测力计记录作用于埋地管道的外载荷。波纹板上设置应变监测点以通过传感器监测各个采集点应变变化^[10]。应变监测点布置如图 4 所

示。防水密封测试中,拍照记录观测阀门井防水密封结构的防水密封性能。



(a) 井外 (b) 井内

图 3 模拟沉降加载示意图

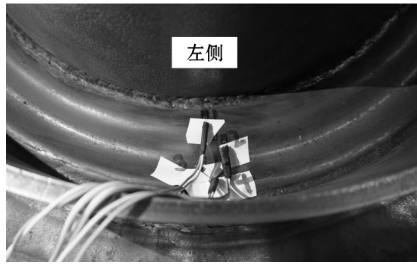


图 4 波纹板应变监测点布置

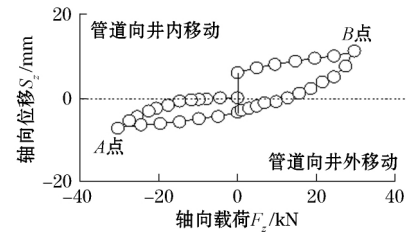
2 测试结果分析

2.1 轴向小变形加载下阀门井防水密封结构力学性能

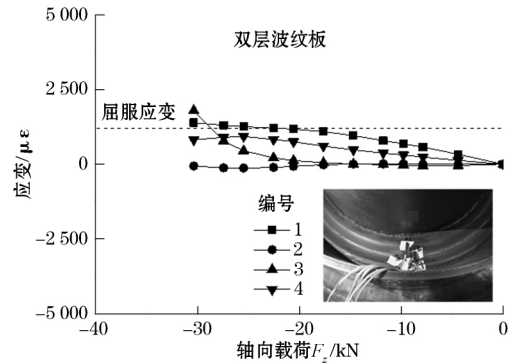
首先分析轴向加载下防水密封结构的力学性能。图 5(a) 给出了密封结构轴向在小变形加载下管道承受的载荷随轴向位移的变化情况。当载荷或位移为负值时,表示埋地管道沿轴向向井内收缩;当载荷或位移为正值时,表示埋地管道沿轴向向井外拉伸。测试中,管道收缩量为 8 mm 时,对应的载荷约为 30 kN (A 点)。加载初始阶段,轴向位移变化较小,但轴向载荷增加较多;随后轴向载荷增量略有减小。后逐步卸载并进行反向加载,即埋地管道向外拉伸。当位移增加至约 10 mm 时停止加载,此时对应的轴向载荷约为 30 kN (B 点)。后逐步卸载至测力计示数为 0,此时存在 6 mm 左右残余变形,表明密封结构中部分位置屈服,进入弹塑性区。

为进一步研究屈服后波纹板的力学特性,图 5(b) 汇总了波纹板 4 个监测点局部应变的变化。可见 1 号、2 号和 4 号监测点的应变与施加的轴向载荷近似线性,3 号监测点应变在轴向载荷约为 -20 kN 后急剧

增大。另外,通过各个应变监测点的数值对比,载荷为 -30 kN 时,靠近管道外壁的 1 号监测点应变最大,表明此出应力水平较高。位于环形波纹板靠近波谷的区域的 2 号监测点应变数值最小,接近为 0,表明此处的应力水平较低。在加载范围内,基本不产生结构的局部变形。同时,结合图中的材料屈服时对应的应变还可以发现波纹板中 1 号和 3 号监测点在测试中屈服进入了弹塑性阶段,进一步证实了图 5(a) 中卸载后存在塑性变形。



(a) 轴向受力



(b) 波纹板局部应变

图 5 阀门井防水密封结构在轴向小变形加载时的测试结果

2.2 轴向大变形加载下阀门井防水密封结构力学特性

机坪埋地管网中主管道伸缩量可能达到 25 mm 量级,为此轴向力学性能测试的变形加载量需进一步增加^[10]。图 6 给出了轴向大变形加载下防水密封结构整体加载和局部应变的测试结果。如图 6(a) 所示,埋地管道首先向井内部移动,位移加载量逐渐增加至 30 mm,后卸载并反向加载至 30 mm,最终卸载。加载初始阶段,轴向位移变化较小,但轴向载荷增加较多;随着位移加载量增加,逐渐转变为轴向载荷增加较少,但位移加载量显著增加。这是由于防水密封结构中屈服进入弹塑性的部分越来越多,引发应力重新分布和近似塑性现象。反向加载时也出现了类似现象。同时还可以发现,卸载后轴向变形残余量相对小

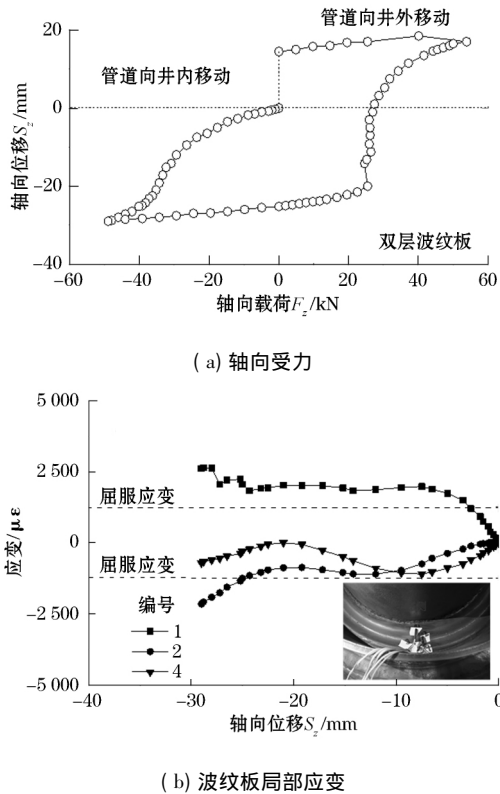


图6 阀门井防水密封结构在轴向大变形加载下整体和局部测试结果
变形量加载的工况出现明显增加,进一步说明出现了明显的塑性变形。

图6(b)给出了监测点应变变化状况,可见应变监测点1在位移加载量为3 mm左右即开始屈服,后续过程中一直在弹塑性阶段。监测点2在10 mm位移加载量以后即保持较高的应变水平,当位移加载量超过25 mm时,屈服进入弹塑性阶段。监测点4在接近屈服应变后逐渐减小。以上现象与波纹板的变形吸收特性和屈服后的应力重分布现象有关。以1号监测点为代表的部分结构屈服后,应力重分布,造成2号和4号监测点应变降低;随位移载荷增加,屈服部分区域所占比重进一步增加,导致2号和4号应变监测点应变水平后提高。

2.3 沉降作用下穿越阀门井防水密封结构力学特性

图7(a)给出了实验加载过程中,外载荷与沉降量间的对应关系。对埋地管道进行连续加载,产生的沉降量最大约为15 mm,此时单个液压装置的载荷数值约为18 kN。卸载后逐渐卸载至测力计示数为0,整体结构存3.5 mm残余沉降量,表明部分结构出现屈服,进入弹塑性阶段。同样监测波纹管应变分布,如图7(b)所示,4号监测点的应变基本为0,即垂向加载引

发的监测点4的应变很小。3号应变监测点应变随施加垂向位移的增加,对应的应变绝对值逐渐增加,当垂向位移约为15 mm时应变约为 $450 \mu\epsilon$,远低于钢材的屈服应变($1189 \mu\epsilon$),但整体的残余沉降量表明监测点外的部分有屈服点进入弹塑性阶段。整体来说,该种阀门井防水密封结构可以有效吸收埋地管道和阀门井井壁产生的相对沉降,同时使波纹结构自身的应力仍处于较低水平。

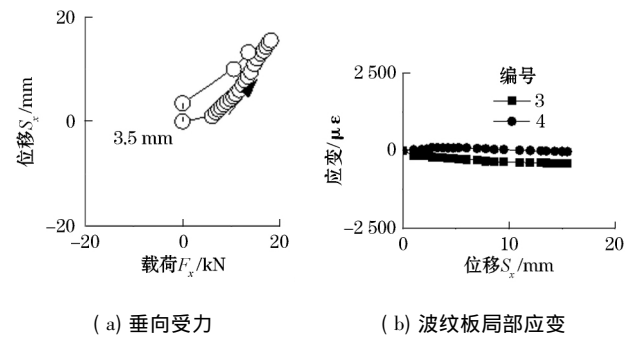
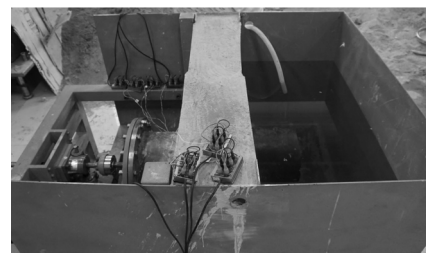


图7 阀门井防水密封结构垂向加载下整体和局部测试结果

2.4 阀门井防水密封结构防水特性

在力学特性测试的基础上测试防水密封结构的防水特性。图8为测试的现场。



(a) 测试模型整体



(b) 井壁外局部

图8 阀门井防水密封结构防水性能测试

测试表明,对经过上文测试后存在残余变形的结构,充满水24 h后,阀门井壁外侧结构并未出现渗水

(下转第37页)

的能量消耗越大,只有较小的碎片初始动能转化为碎片的变形能、储罐的动能和变形能。

参考文献:

- [1] 陈刚.化工储罐爆炸碎片引发多米诺效应的概率模型研究[D].合肥:中国科学技术大学,2011.
- [2] 陈思宇,陈文江,胡兆吉,等.爆炸碎片撞击球罐的数值模拟及影响因素分析[J].南昌大学学报(工科版),2018,40(4):324-328;369.
- [3] 陈国华,祁帅.爆炸碎片撞击立式储罐数值模拟[J].中国安全生产科学技术,2016,12(9):114-119.
- [4] 冯瑞,张早校,段权,等.常压立式油气储罐碎片撞击及防护措施研究[J].压力容器,2018,35(4):59-66.
- [5] LIU M B, LIU G R. Smoothed particle hydrodynamics (SPH): An overview and recent developments[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2010, 17(1): 25-76.
- [6] 强洪夫.光滑粒子流体动力学新方法及应用[M].北京:科学出版社,2017.
- [7] 张志春,强洪夫,高巍然.一种新型 SPH-FEM 耦合算法及其在冲击动力学问题中的应用[J].爆炸与冲击,2011,31(3):243-249.

- [8] 潘旭海,徐进,蒋军成,等.爆炸碎片撞击圆柱薄壁储罐的有限元模拟分析[J].南京工业大学学报(自然科学版),2008,30(3):15-20.
- [9] 化工部第六设计院.钢制立式圆筒形固定顶储罐系列:HG21502.1-1992[S].北京:化学部工程建设标准编辑中心,1992:3-4.
- [10] 郭子涛,高斌,郭钊,等.基于 J-C 模型的 Q235 钢的动态本构关系[J].爆炸与冲击,2018,38(4):804-810.
- [11] 于文静,史健勇,赵金城.Q345 钢材动态力学性能研究[J].建筑结构,2011,41(3):28-30;63.
- [12] 陈国华,胡昆,周池楼,等.尖头碎片撞击小尺寸储罐的模拟实验[J].爆炸与冲击,2018,38(6):1295-1302.
- [13] YU H, JEONG D Y. Impact dynamics and puncture failure of pressurized tank cars with fluid-structure interaction: A multiphase modeling approach[J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 90: 12-25.
- [14] 王晓强,朱锡,梅志远,等.低合金船用结构钢抗高速破片能力研究[J].材料工程,2009(8):1-5.

作者简介:刘思祺(1994—),硕士研究生,研究方向为化工过程机械。E-mail: m15037519735@163.com

(上接第 4 页)

或漏水现象,表明该种结构形式可有效实现水密。符合加工规格的双层波纹板结构可有效保证防水密封性能,而管道-套管间填充的发泡胶更进一步保障了焊接波纹板的防水特性。该种结构在各种机坪管网可能存在的负载条件下满足防水密封性能要求。

3 结论

针对机坪管网中埋地管道穿越阀门结构存在的防水密封和运动补偿方面的问题,本文提出了一种双层环状波纹板的防水密封结构。在测试平台上开展了原尺度力学特性测试和防水性能测试,结论如下:

(1) 该种新型防水密封结构可有效抵御埋地管道带来的轴向变形,通过波纹板结构吸收变形能量,保证结构不致破坏;

(2) 该种新型防水密封结构可有效抵御井壁和埋地管道间的相对沉降,通过波纹板的特殊形状吸收变形能量,保证结构完整性;

(3) 在以上加载条件下,该种新型防水密封结构可保证防水密封性能,满足使用需求。

参考文献:

- [1] 王宇红,张鹏.套筒补偿器的选择及故障分析[J].管道技术与设备,2004(4):44-45.

- [2] 朱瑛辉,杨洁,伊伟锴,等.热采水平井新型套管热力补偿器[J].石油机械,2012,40(4):74-75.
- [3] 倪洪启,金驰,冯霏.波纹补偿器故障诊断系统研制[J].工程设计学报,2019,26(3):354-363.
- [4] 孙国成.球形补偿器在稠油热采注蒸汽管道上的应用[J].管道技术与设备,1995(6):19-22.
- [5] 李明兴,张弘一,李茜,等.旋转补偿器应用及检测标准研究[J].管道技术与设备,2016(4):30-32.
- [6] 周威.旋转补偿器在管廊上的应用分析[J].化肥设计,2020,58(6):15-17.
- [7] 张莹.水泥生产线中性面柔性动密封防水套管技术研究[J].工程建设,2020(10):107-111.
- [8] 范佳琪.波纹钢板剪力墙结构抗侧性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [9] WANG M Z, GUO Y L, YANG X, et al. Compressive buckling behavior of steel corrugated-plates in contact with a rigid medium[J]. Composite Structures, 2020, 262: 113356.
- [10] 王成杰,梁斌,刘硕,等.考虑管土耦合的机坪垂直管道应力分析[J].力学与实践,2016,38(6):624-630.

作者简介:王成杰(1990—),工程师,从事油气储运领域工作。E-mail: wang_cj@cnaif.com

通信作者:刘硕(1988—),助理研究员,从事多相流及油气储运领域研究工作。E-mail: liushuo@imech.ac.cn