

高寒地区低温管道密封泄露原因分析

刘硕¹, 刘小川², 邵伟光³, 刘天民³, 张健¹, 许晶禹^{1*}

(1 中国科学院力学研究所, 100190, 北京; 2 中国航空油料有限责任公司, 北京
3 总后勤部油料研究所, 北京) *通讯作者, E-mail: xujingyu@imech.ac.cn

摘要: 机坪输油管道埋设在停机坪下方, 是飞机航油的主要供给渠道, 安全要求极高。高寒地区, 部分机坪管道会出现泄漏状况, 严重影响机场人员的生命和财产安全, 受到了广泛关注。本文针对低温管道泄露的原因进行了探索研究。借助有限元软件 ANSYS, 对含内流体的管段进行了流固耦合分析; 建立了管道连接构件法兰的有限元模型, 通过热—结构耦合分析, 探讨了法兰的力学性能; 在某高寒地区机场管路进行了管网系统变形测试现场实验, 得到了不同温度和管内燃油流态下法兰的相对变形情况。最终, 综合分析数值模拟结果和现场测试结果, 确定了高寒地区低温管道燃油泄露的原因。

关键词: 机坪输油管道, 泄漏, 法兰, 预紧力

1 引言

机坪输油管道埋设于停机坪以下, 是飞机航油供给主要渠道, 对安全性和可靠性要求较高。实际现场中, 机坪管道受力情况较为复杂, 与填土、上方结构受力、管内流体等多种因素有关; 机坪输油管道结构本身也较为复杂, 由管道、法兰连接副等多种构件组成, 轴向尺度大, 制造和施工误差容易积累。实际工程中发现高寒地区的机坪输油管道会出现燃油泄漏状况, 威胁到了机场的人员生命财产安全, 引起了各方的广泛关注。与其他地区机场环境条件不同, 高寒地区低温环境致使管路内部流体和周围土体出现较大温差, 内部航空燃油温度远低于周围土体。因此需要探究高寒地区低温管道燃油泄露的原因。本文将针对某具体高寒地区出现燃油泄漏的管道结合数值模拟和现场实验分析其泄漏原因。

针对航空燃油输油管道泄漏原因, 国内外的研究不多。在输油管路泄漏整体研究方面, 研究工作大多集中在出现泄漏后的检测^[1-3], 魏秋林等^[4]指出了三种天然气管道泄漏现象的具体形式, 包括连接部位泄漏、冲刷泄漏和填料部位泄漏。在输油管路泄漏局部研究方面, 刘迎来^[5]通过宏观观察、端口微观分析、金相检验等, 对三通泄漏失效分析进行了详细研

究；张良^[6]等通过类似的工作对三通失效进行了研究。总结上述研究进展，发现尚未有针对高寒地区管路泄漏原因进行详细分析的先例。

2 内流体作用下管道受力分析

以某段弯头半径 525mm，外径 181mm，内径 175mm，弯头一端长 0.5m，另一端长 10m 的管段为例，入口流量 234m³/h。通过流固耦合数值模拟，分析得到在管内流体作用下，管段最大应力 0.134MPa（图 1），远低于管材屈服极限，最大位移 84.5μm，内流体作用不会造成管道泄漏。但需要注意的是，流体冲刷作用下造成管段轴向出现位移，机场管道较长，位移容易在长度方向积累，造成管道错位，对法兰产生较大影响。

同样以该段弯头为例，考虑内部流体温度，进行热—固耦合分析，当土体温度和管内流体温差为 10℃时，应力分布结果如图 2 所示，可以看出，最大应力为 12.4MPa，虽然较考虑流体冲刷作用产生的应力量级大很多，但还是远小于管材的屈服强度。

综合流固耦合和热固耦合的分析结果，发现考虑管道内部流体的冲刷作用和温度效应，管材主体不会造成泄露破坏，但是变形会在管材的连接位置——法兰处形成不连续，有可能倒置法兰处出现泄露，因此需要对法兰处进行详细分析。

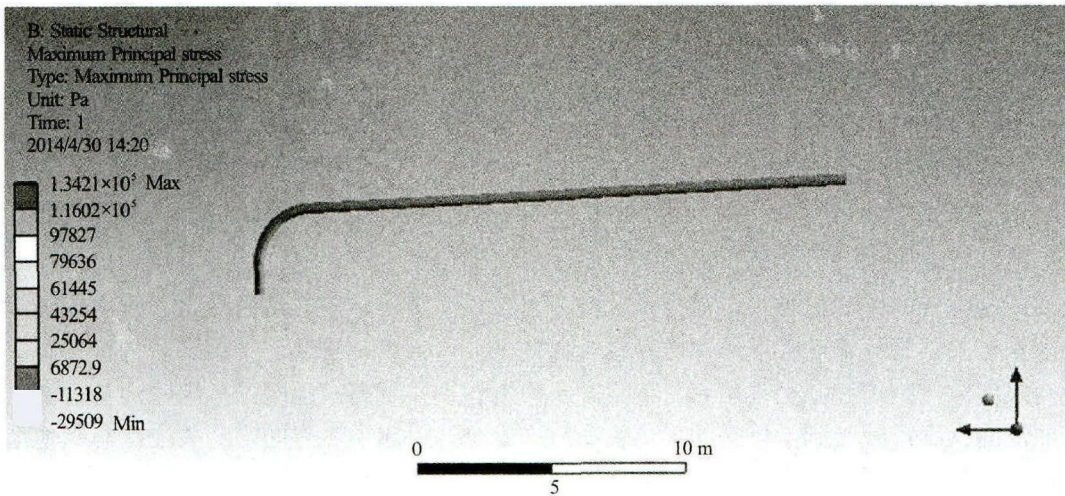


图 1 内流体作用下管段的应力分布

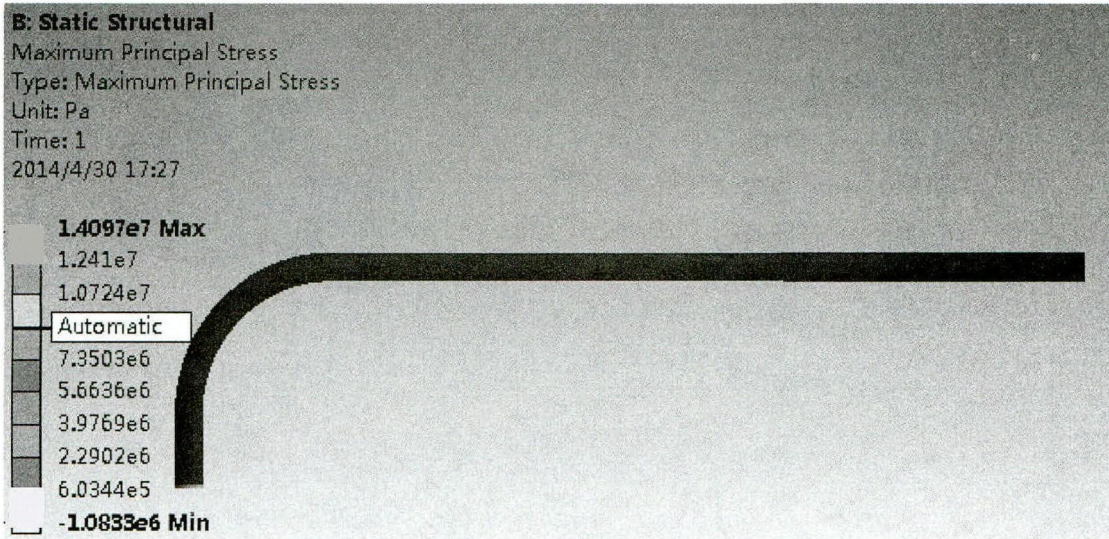


图2 考虑温度作用下管段的应力分布

3 法兰局部数值模拟

3.1 拉弯组合下法兰受力分析

以某高寒地区机场管路为例，三通规格是 PN=1.6Mpa 的 DN350 平焊法兰，通过有限元软件 ANSYS 建立模型，模型如图 3 和图 4 所示。根据整体管路分析，出现泄漏的法兰附近管断面受拉应力和弯曲应力组合作用，三种工况如下：1、50MPa 拉应力+20MPa 弯曲应力；2、35MPa 拉应力+35MPa 弯曲应力；3、20MPa 拉应力+50MPa 弯曲应力。现分别分析三种工况分别在螺栓紧固力矩 200N.m、314N.m、471N.m、686N.m 的受力和变形状况。法兰外部温度和环境土体温度相同，是 0℃，法兰内表面温度和内部流体相同，是-10℃。

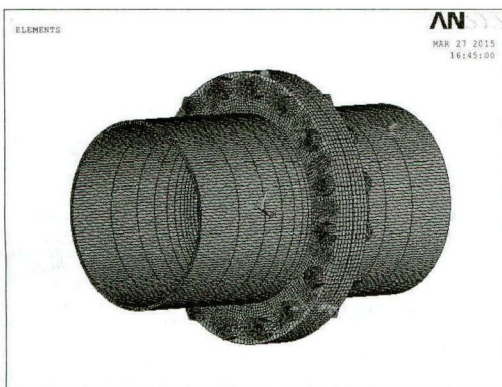


图3 法兰有限元模型

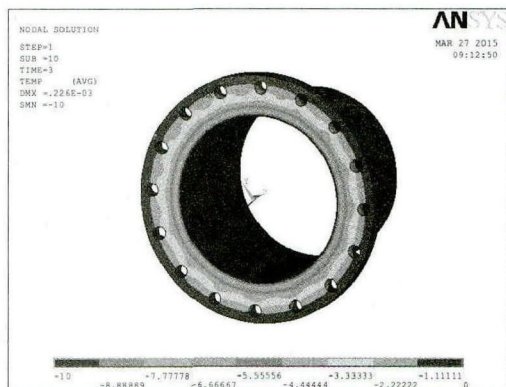


图5 法兰温度分布云图

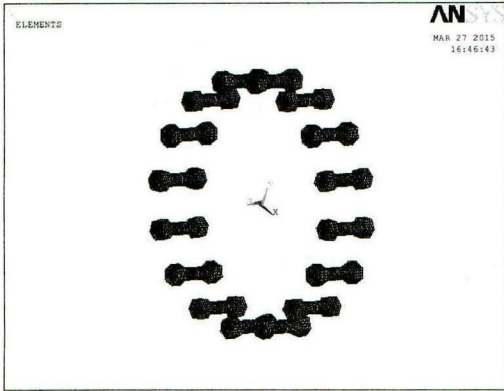


图 4 螺栓有限元模型

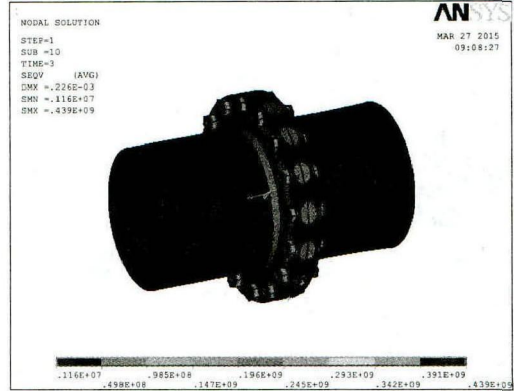


图 6 法兰折算应力分布云图

图 5 给出了法兰热-固耦合分析的温度场分布结果，图 6 给出了螺栓预紧力 471N.m 下工况 1（50Mpa 拉应力+20Mpa 弯曲应力）下螺栓、法兰和垫片构成的法兰密封副的整体折算应力分布状况。进一步分析计算结果可以看出，最大应力出现在螺栓中螺母和螺杆连接的位置上。

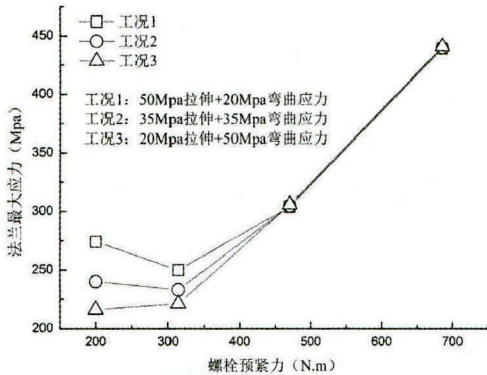


图 7 法兰最大应力随螺栓紧固力矩化

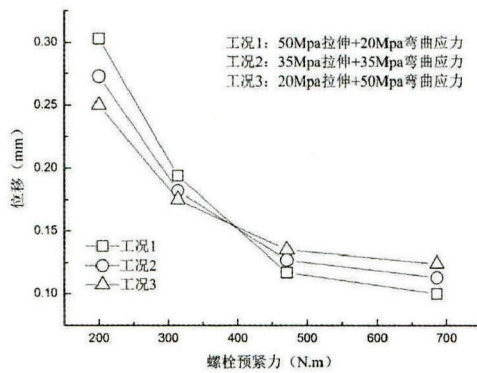


图 8 变形随螺栓紧固力矩变化

将三种工况分别在 4 种螺栓预紧力下的有限元模拟结果进行处理得到了图 7 和图 8。图 7 是法兰整体最大折算应力随螺栓紧固力矩的变化，图 8 是垫片变形随螺栓紧固力矩变化的变化状况。从图 7 中可以看出，外载荷不变条件下，随着螺栓预紧力增加，法兰密封副整体的折算应力大体逐渐增加，最大应力出现在螺栓上。螺栓折算应力增大，变形增加，螺栓的变形是压缩变形，根据变形协调原理，螺栓变形增加，法兰盘受螺栓挤压产生的变形增加，垫片、法兰应力水平提高，法兰密封副变的更紧密，有助于提高法兰副的密封性能。结合图 8 可以发现，随螺栓预紧力增加，垫片的最大位移逐渐降低，表明螺栓预紧力

增加, 法兰结构连续性能提高, 密封性能增强。实际工程中, 各种因素造成的预紧力缺失会对法兰密封性能产生不利影响。预紧力缺失降低了法兰的约束效果, 在外界载荷和管内流体共同作用下, 容易造成泄漏状况。

图 7 给出了法兰外侧相对变形量(压缩量)随螺栓紧固力矩的变化, 从图中可以看出, 相对变形在 11-16 μm 之间, 拉伸应力比重越大, 相对变形越大。

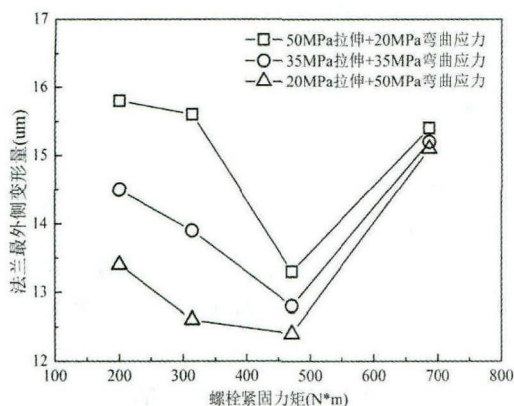


图 9 法兰外侧相对变形量

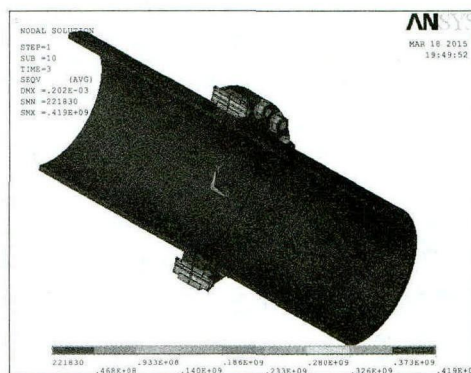


图 10 受剪切法兰应力分布

3.2 剪力作用下法兰受力分析

剪力作用下的法兰的模型参数和规格和加载状况与 4.1 中相同, 区别是两端管道长度各位 0.5m, 一端管道受 45MPa 水平剪力, 同样考虑外部环境和内部流体温差。计算结果的折算应力云图如图 9 所示。模型最大折算应力 1720MPa, 远高于 8.8 级螺栓屈服强度 (640MPa), 螺纹部分已经破坏, 垫片与法兰张开量是 0.994mm, 法兰产生泄漏。

4 应用与结论

图 11 为针对法兰两侧相对位移随时间变化的测试结果记录。从试验结果中可以看出, 现场测试结果中法兰相对变形量大约在 0-18 μm 之间, 与数值模拟结果较数值相符。

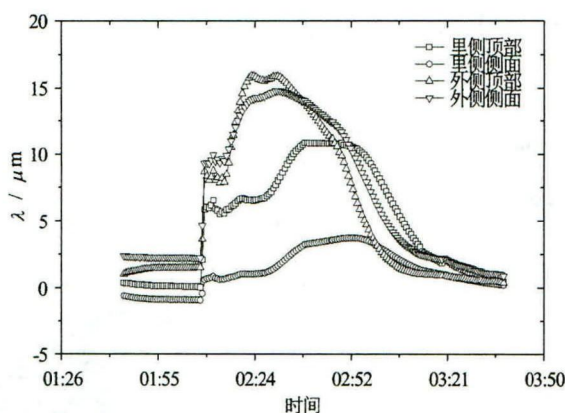


图 11 现场试验法兰两侧相对位移

通过数值模拟分析和现场试验可以得到以下结论：① 高寒地区机坪输油管道在与外界环境温差较大的内流体作用下，管路主体应力水平较小，不会造成泄露破坏，但变形累加会对法兰产生不利影响；② 预紧力对法兰的密封性能有着重要影响。受高应力、疲劳和低温等影响，螺栓螺纹部分出现破损，降低螺栓预紧力，预紧力缺失降低了法兰的约束效果，在外界载荷和管内流体共同作用下，容易造成泄漏状况。

参 考 文 献

- 1 张宇. 输油管道泄漏检测新方法 with 关键技术研究. 天津大学. 2009.
- 2 桑运水. 输油管道泄漏在线检测的研究. 合肥工业大学. 2003.
- 3 吴海霞, 蒋耘晨, 赵显利. 运用虚拟仪器实现输油管道泄漏检测和定位. 2004, 24 (2) : 174-177.
- 4 魏秋林, 李祥; 藏玉霞. 天然气管道泄漏问题分析及处理技术. 化学管理. 2013 (16) : 134.
- 5 刘迎来. 管道工程用三通泄漏失效分析及处理对策. 金属热处理. 2007, 32: 106-110.
- 6 张良, 罗金恒, 李金凤, 等. 法兰泄漏失效原因分析. 金属热处理. 2015: 40 (4) : 201-204.

Causes for leak of pipeline with low temperature inner flow in chilly climates

LIU Shuo, LIU Xiao-chuan, SHAO Wei-guang, LIU Tian-min, ZHANG Jian, XU Jing-yu
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, 100190, Beijing
China Aviation Oil Holding Company, Beijing
Oil Research Institute of the General Logistics Department, Beijing)
Email:xujingyu@imech.ac.cn

Abstract: Pipes used in airports are located beneath aprons. As main fueling method for airplanes, it has significant safety requirements. In area with chilly atmosphere, part of the pipeline systems leak sometimes, which brings tremendous safety threats. High concentration came out as results. In this passage, with the assistance of ANSYS, sectional pipeline is analysed through fluid-solid coupling analysis, through thermal-solid coupled fem method, flange is analysed. Together with field deformation experiment conducted in certain airports in cold climate, causes of pipeline system leak come out.

Key words: pipeline in aprons; leak; flange; pretightening force