

富含有害气体地层长距离大埋深盾构穿越隧道接缝防气性能试验研究

侯宇¹, 薛飞², 王成林¹, 洪叶³, 王岳¹, 张磊²

¹国家管网集团建设项目管理分公司, 河北 廊坊

²中国石油天然气管道工程有限公司, 河北 廊坊

³同济大学土木工程学院, 上海

收稿日期: 2022年5月9日; 录用日期: 2022年8月4日; 发布日期: 2022年8月12日

摘要

中俄东线天然气管道工程为长距离(10.23 km)、大埋深(40 m)长江盾构隧道穿越工程, 经勘察其地层富含沼气等有害气体, 有害气体的存在给项目施工和运营带来了巨大的安全隐患, 对隧道接缝防气也提出了较高要求。本文设计与实际隧道沟槽和密封垫高度和宽度等尺寸相同的内外两圈回型密封垫圈、带沟槽混凝土构件及预埋管道构成的模型试验装置, 对不同工况下本穿越工程设计弹性密封垫的防气性能进行了直接测试和研究。试验结果表明, 盾构外道密封垫在张开量5.6 mm、错缝量15 mm时, 短期防气能力为2.03 MPa; 在0.125 MPa较低气压的作用下, 能测到微弱的气体泄漏。结合国内类似地层和工程的有害气体最高气压测量值等调研分析, 可以判断在满足设计的张开、错缝验收标准情形下, 本工程盾构隧道接缝具有足够的抵抗高压有害气体快速逸出或爆发式逸出的能力; 但是, 低气压下隧道接缝微弱泄漏的试验结果表明, 需要警惕长期微泄漏情况下隧道内气体浓度累积带来的风险和危害, 提前制定针对性的、切实可行的管控措施以保障施工与运营安全。

关键词

盾构隧道, 管片接缝, 密封垫, 模型试验, 防气性能, 含气地层

Experimental Study on Gas-Proof Performance of Shield Crossing Tunnel Joints with Long Distance and Large Embedded Depth in Stratum Rich in Harmful Gases

Yu Hou¹, Fei Xue², Chenglin Wang¹, Ye Hong³, Yue Wang¹, Lei Zhang²

文章引用: 侯宇, 薛飞, 王成林, 洪叶, 王岳, 张磊. 富含有害气体地层长距离大埋深盾构穿越隧道接缝防气性能试验研究[J]. 地球科学前沿, 2022, 12(8): 1048-1057. DOI: 10.12677/ag.2022.128101

¹National Pipeline Group Construction Project Management Branch, Langfang Hebei

²China National Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd., Langfang Hebei

³College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

Received: May 9th, 2022; accepted: Aug. 4th, 2022; published: Aug. 12th, 2022

Abstract

The China-Russia eastern gas pipeline project is a long-distance (10.23 km), deeply buried (40 m) Yangtze River shield tunnel crossing project. It has been surveyed that its stratum is rich in harmful gases such as biogas. The existence of harmful gases has brought huge safety hazards to the construction and operation of the project, and higher requirements have been put forward for the gas-proof performance of tunnel joints. In this paper, a model test device consisting of two loops of inner and outer gaskets with the same dimensions as the actual tunnel groove and gasket height and width, concrete members with grooves, and embedded pipelines is designed. We conducted direct testing and research on the gas-proof performance of the elastic gasket designed for the project under different working conditions. The test results show that the short-term gas-proof capacity of the shield tunnel outer gasket is 2.03 MPa when the opening amount is 5.6 mm and the staggered seam amount is 15 mm; under the action of the lower pressure of 0.125 MPa, weak gas leakage can be detected. Combined with the investigation and analysis of the highest pressure measurement value of harmful gases in similar strata and projects in China, it can be judged that under the condition of meeting the design acceptance criteria for opening and staggered seams, the joints of the shield tunnels project have sufficient resistance to the rapid or explosive escape of high-pressure harmful gases; however, the test results of the weak leakage of tunnel joints under low air pressure show that it is necessary to be alert to the risks and hazards caused by the accumulation of gas concentration in the tunnel under the condition of long-term micro leakage, and to formulate targeted and feasible control measures in advance to ensure construction and operation safety.

Keywords

Shield Tunnels, Segment Joint, Gasket, Model Test, Gas-Proof Performance, Gas-Bearing Strata

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在我国长江中下游及东南沿海的广阔平原中，赋存着埋深几十米到百余米的第四系浅层天然气藏。这些浅层有害气体(简称有害气体)实际上是一种生物气，俗称“沼气”，是在密闭环境下，土层中的有机质会被厌氧菌分解经还原作用产生，并经过运移、富集，储集在附近的砂层透镜体或砂层顶部，是一种典型的生物成因气藏[1]。这些有害气体的存在，给许多沿海、沿江的国内外隧道工程带来诸如气体爆炸、人员中毒、地层沉降和结构变形甚至坍塌等施工和运营安全问题[2] [3] [4] [5]。

周殷康等[6]和李萍等[7]分别总结了我国长江下游地区和近海区域浅层气的赋存形式和分布特征，这些在沿海地层中以多种形式存在的气体改变了土体的工程性质[8] [9]，而气体的不当释放会威胁气层中隧

道结构的安全性[10],唐益群等[11]的研究指明,在隧道运营期沼气主要通过管片衬砌接缝进入隧道,而随着隧道内沼气的积聚,发生火灾或爆炸的概率逐渐上升。卢浩等[12]探讨了含气地层中单点气体释放对隧道稳定性的影响,结果表明隧道气密性不严会造成管片下沉,严重的气体释放甚至会导致管片的破坏。孙昕等[13]对管片接缝面气体泄漏过程进行了试验研究和数值模拟,指出影响盾构管片接缝防气性能的因素主要为张开量、错缝量和表面粗糙度。Wheeler等[14]对黏土或淤泥质土中的气囊模型进行了研究和探讨。王晖皓等[15]通过三维固-液-气耦合模型分析了含气地层中单点气体渗漏对隧道结构的影响。Feng等[16]假设气囊形态为球体、球体半径均值为0.9 m、标准差为0.3的正态分布,根据工程勘察资料选取气囊初始气压值为0.9 MPa,建立了苏通GIL综合管廊工程的多气囊随机分布模型,对气囊向隧道长期渗透过程中对隧道结构的影响进行了研究。梁立刚等[17]和唐益群等[18]给出了盾构穿越含气地层时沼气监测、隧道通风、沉降监控、注浆应急预案等多方面的风险控制对策。

综上,现有的研究主要集中在浅层气的分布特征、含气土的工程特性、气体释放后地层变形规律和危害防治等方面,对于穿越含气地层盾构隧道密封垫的防气能力评估和失效机制研究较少,尤其对工程最为关注的隧道密封垫短期和长期防气性能的定量评价。本文依托中俄东线天然气管道(南通-角直段)过江工程,设计对应的接缝模拟装置和室内模型试验,研究管片接缝处气体泄漏的全过程,对不同工况尤其是极限工况下工程所采用的弹性密封垫的防气能力进行直接测试,以评估管片接缝的气密性是否能够有效防止有害气体进入隧道,并进一步探讨气压作用下密封垫的渐进失效机制,以期工程的设计和施工提供科学指导。

2. 依托盾构隧道工程简介

中俄东线天然气管道(南通-角直段)过江工程全长10.23 km,最大埋深达40 m左右,隧道外径7.6 m,隧道内径6.8 m,最大设计水压0.74 MPa,位于江苏省南通市与常熟市之间,盾构穿越线路如图1(a)所示。根据勘察报告,盾构隧道掘进区域主要穿越的地层有:⑤层粉土、⑤-1层粉砂、⑥层粉质黏土及⑦层粉砂,其中有害气体主要赋存在⑥粉质黏土和⑦粉砂中,气体主要成分为甲烷,沿隧道轴线呈气囊状不均匀分布,探测到最大气压为0.12 MPa。

项目采用“双道密封垫”布置形式,接缝处沿厚度方向设置内外两道多孔型弹性三元乙丙橡胶密封垫,顶面嵌入遇水膨胀橡胶,密封垫断面尺寸如图1(b)和图1(c)所示。

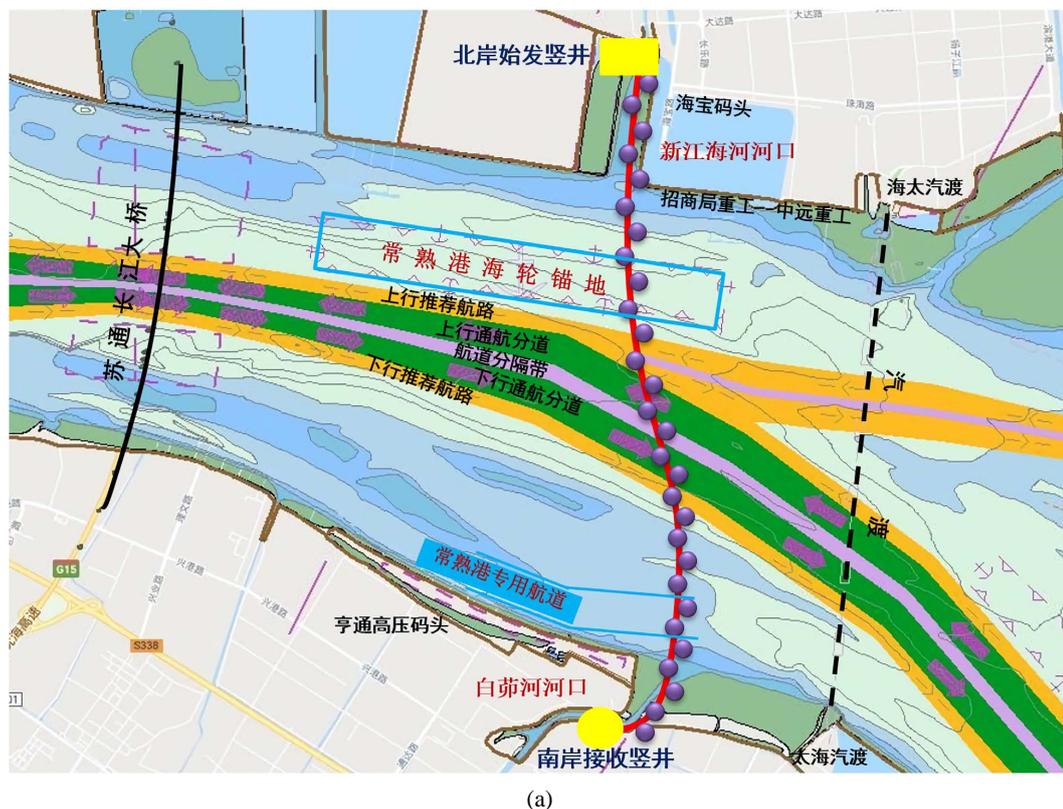
3. 室内防气模型试验

3.1. 试验概况

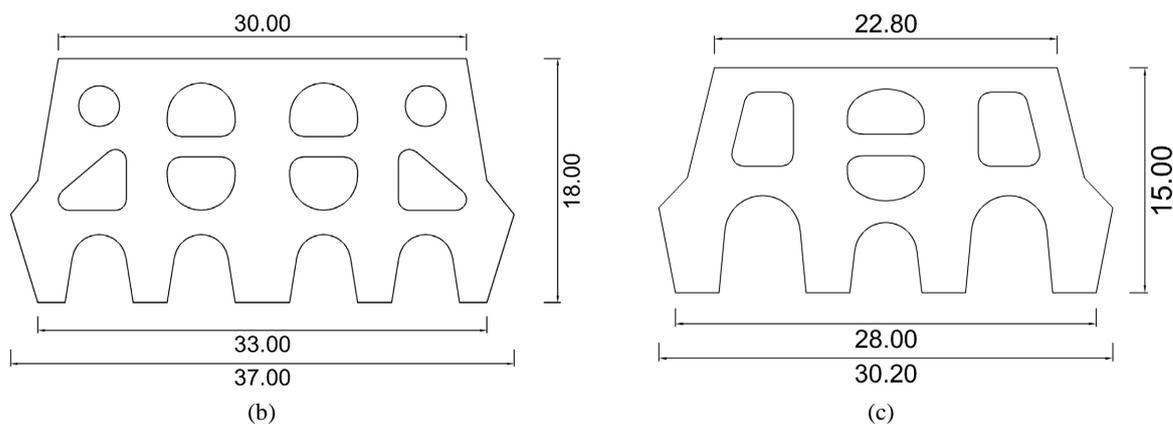
本试验采用两个上下对接的开槽的混凝土块和内、外两圈回形橡胶密封垫组合来模拟盾构管片接缝,进行内道、外道和内外两道联动的不同工况下的抗气压试验。试验时,采用空气代替沼气,通过加压充气泵将高压空气压入装置中间的气腔内并维持气压,内圈密封垫及对应沟槽模拟实际工程中管片接缝外道密封垫-嵌缝构造,外圈密封垫及对应沟槽模拟实际工程中管片接缝内道密封垫-嵌缝构造,并起封闭作用,两道沟槽之间布置流量计测量泄漏率,判定内圈密封垫和两道联动的防气性能;在混凝土块外部设置密封胶圈,判定外圈密封垫的防气性能。具体的试验布置见图2。

考虑到气体微扰动、沼气临界浓度0.25%和长期微弱泄漏会导致地层不均匀变形,本试验临界每延米泄漏率取100 ml/(min·m),其对应气压为泄漏气压,并取该泄漏气压代表此工况下接缝密封垫的防气性能指标。

在本试验中,密封垫间隙远大于气体分子的平均自由程,故可以认为气体处于粘滞状态。在粘滞状态下,气体的泄漏率与气体种类、气体粘度、气体温度和内外压差等相关[19]。本试验采用空气代替甲烷,



(a)



(b)

(c)

Figure 1. (a) Shield crossing line; (b) Outer gasket size; (c) Inner gasket size
图 1. (a) 盾构穿越线路; (b) 外道密封垫尺寸; (c) 内道密封垫尺寸

而由于气体粘度对流动性影响较大,需要试验所得数据进行相应的修正。参考相关文献[13] [20] [21] [22]的方法和公式,基于气体体积泄漏率与气体动力粘度、气体温度和气体摩尔质量之间的关系,将流量计测得的气体泄漏率转换为统一温度下每延米气体泄漏率:

$$q = \varphi q_i \frac{\mu T}{\mu_i T_i B} \quad (1)$$

式中 q 、 q_i 分别为修正后的每延米气体泄露率和试验测量得到的气体泄漏率; T 、 T_i 分别为统一温度和试验温度; μ 、 μ_i 分别表示统一温度对应的气体动力粘度和试验温度对应的气体动力粘度; B —密封垫轴线周长; φ 表示摩尔质量修正系数,不修正时取 1。

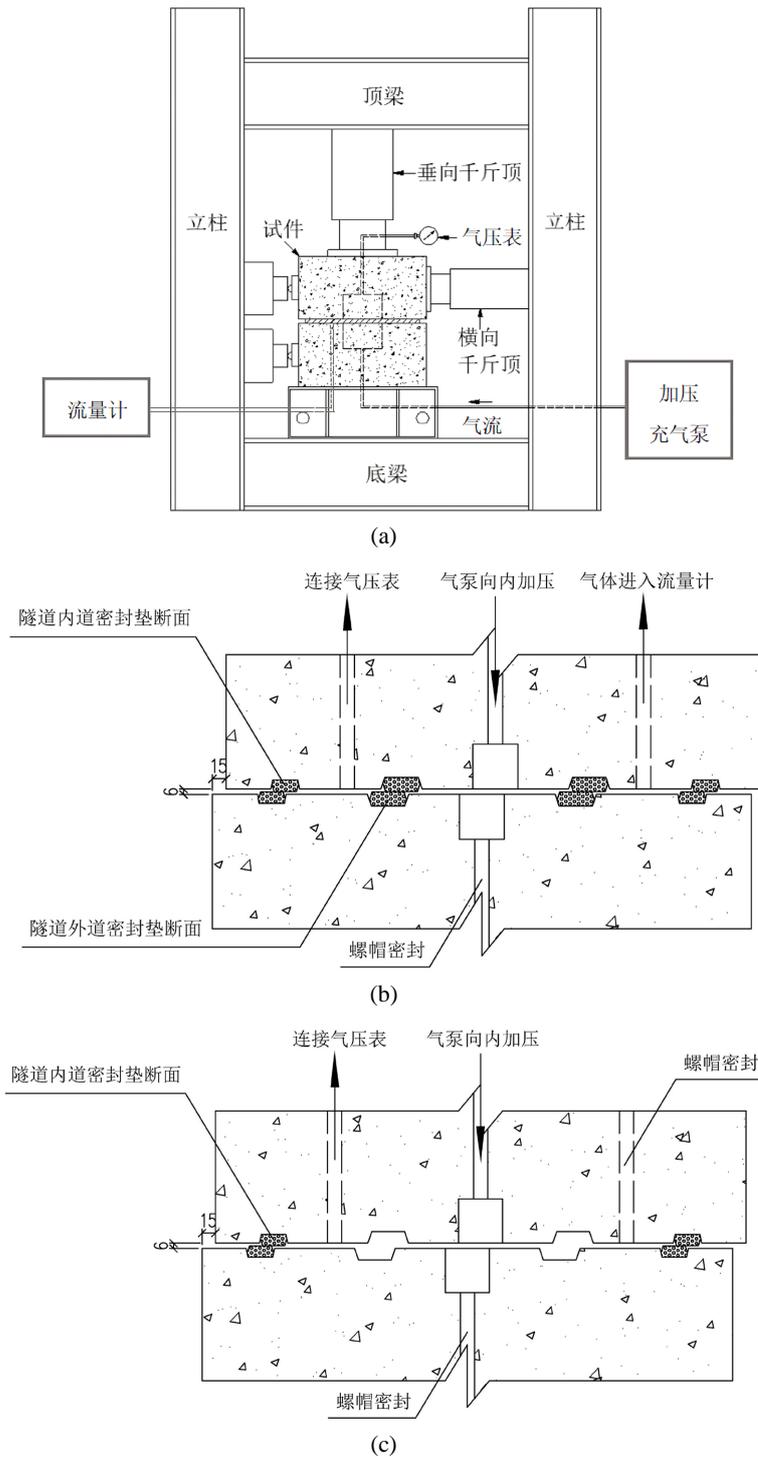


Figure 2. (a) Test apparatus; (b) Double joint simulation apparatus; (c) Single joint simulation apparatus
图 2. (a) 试验装置; (b) 双道接缝模拟装置示意图; (c) 单道接缝模拟装置示意图

3.2. 接缝防气试验装置

接缝防气模拟装置由内外两圈回型密封垫圈、带沟槽混凝土构件(60 cm * 60 cm * 30 cm)及 4 个预埋管道装置组成, 该接缝模拟装置能够模拟工程中的一字缝构造(环缝和纵缝)。试验内、外两圈回型密封

垫圈分别模拟实际隧道外道和内道防气密封垫，混凝土构件模拟管片结构，预埋管道装置用于加气和连接测量仪器。

加载装置包括自主研发的三向加载设备 GPJ-3900 和向接缝模拟装置内部施压气压的加压充气泵。测量装置包括用于测量泄露率的高精度流量传感器、数显气压表和室内温度计等。

3.3. 试验工况

对于内圈和内外圈联动试验，拟选择 2 个错缝量和 4 个张开量；对于仅外圈试验，拟选择 3 个错缝量和 4 个张开量，共计 28 个工况对内、外道密封垫的一字缝气密性能进行测试，具体工况组合如表 1。

Table 1. Test plan conditions

表 1. 试验计划工况

工况	试验组别	错缝量/mm	张开量/mm
1	仅内圈	0、15	6、8、10、12
2	仅外圈	0、10、15	6、8、10、12
3	内外圈联动	0、15	6、8、10、12

3.4. 结果与分析

1) 管片外道密封垫防气能力

将试验结果修正后，得到图 3 所示的管片外道密封垫在不同工况下的气压 - 每延米泄漏率曲线[注：图中记录的张开量为加载气压作用张开修正后的实际测量接缝张开量]，图 4 为样条曲线拟合得到的外道密封垫对应工况的泄漏气压。在张开量 5.6 mm，错缝量 15 mm 的工况下，管片外道密封垫的泄漏气压为 2.03 MPa。

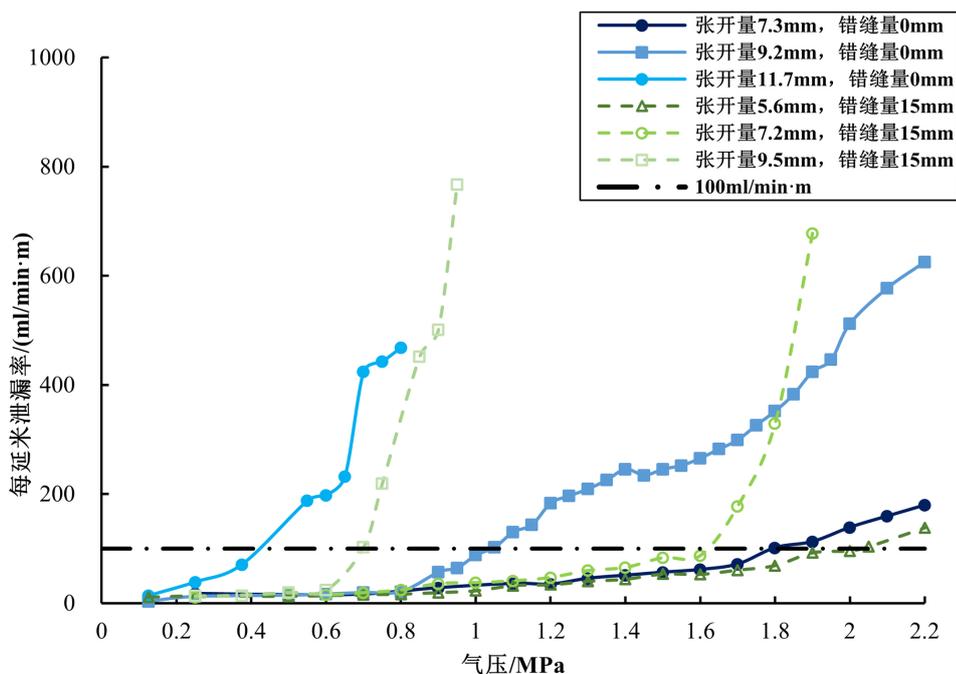


Figure 3. Air pressure-leak rate per meter curve of the segment outer gasket

图 3. 管片外道密封垫气压 - 每延米泄漏率曲线

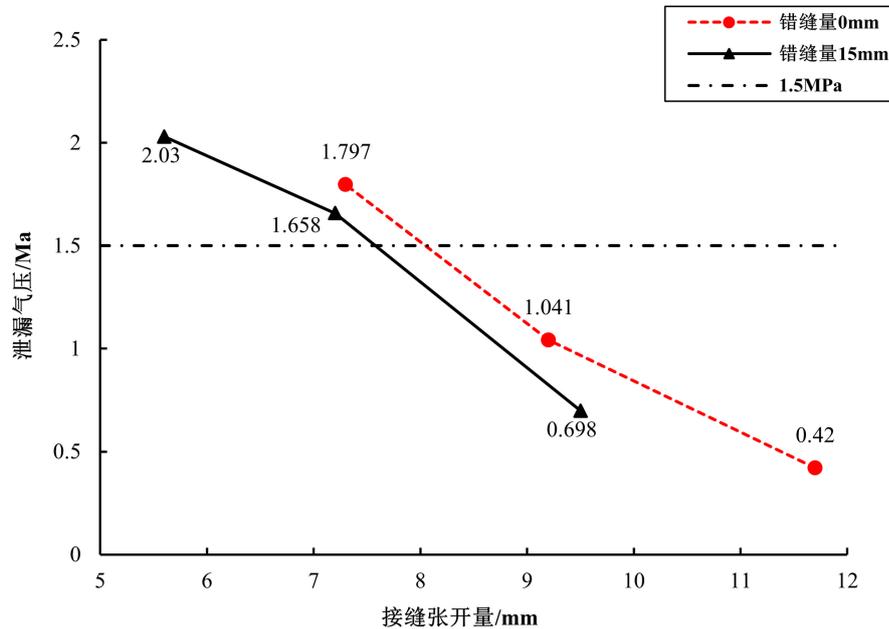


Figure 4. Opening-leakage air pressure curve of the segment outer gasket
图 4. 管片外道密封垫张开量 - 泄漏气压曲线

由图 3 和图 4 可知，密封垫的每延米泄漏率明显分为两个阶段，微弱泄漏阶段和大规模泄漏阶段。在前期气压较小情况下，仅发生微弱泄漏，由于混凝土与密封垫或密封垫与密封垫之间存在的微小气道，即使在较小的气压和接缝变形情况下，密封垫也不能达到完全防气性能。当气压增大到一定程度后，气体的每延米泄漏率开始逐渐升高，进入大规模泄漏阶段，泄漏率快速上升达到流量计最大量程，前期在密封垫局部出现的通道被气压逐渐冲开。

接缝的变形越小，其微弱泄漏阶段越长，接缝的气密性越高，接缝的张开量和错缝量都对接缝的气密性能起重要作用。在同一错缝量下，随着接缝张开量的增大，密封垫泄漏气压明显降低，在相近张开量下，错缝量的增大，也会导致泄漏气压的降低。

2) 管片内道密封垫防气能力

记录管片内道密封垫出现微弱漏气和剧烈漏气的气压，并取微弱漏气气压为管片内道密封垫的泄漏气压。表 2 和图 5 分别是试验结果和管片内道密封垫在不同工况下的气压 - 每延米泄漏率曲线[注：图中记录的张开量为加载气压作用张开修正后的实际测量接缝张开量]。

Table 2. Test results of the segment inner gasket
表 2. 管片内道密封垫试验结果

错缝量 0 mm			错缝量 10 mm			错缝量 15 mm		
张开量	微弱漏气气压	剧烈漏气气压	张开量	微弱漏气气压	剧烈漏气气压	张开量	微弱漏气气压	剧烈漏气气压
mm	MPa	MPa	mm	MPa	MPa	mm	MPa	MPa
7.3	2.1	2.2	6.7	1.45	1.5	6.0	0.65	0.8
9.4	0.9	0.95	8.0	0.6	0.7	8.1	0.375	0.44
10.4	0.5	0.6	10.0	0.19	0.31	10.5	0.06	0.22
12.4	0.31	0.375	12.2	0.06	0.19	12.0	0.05	0.06

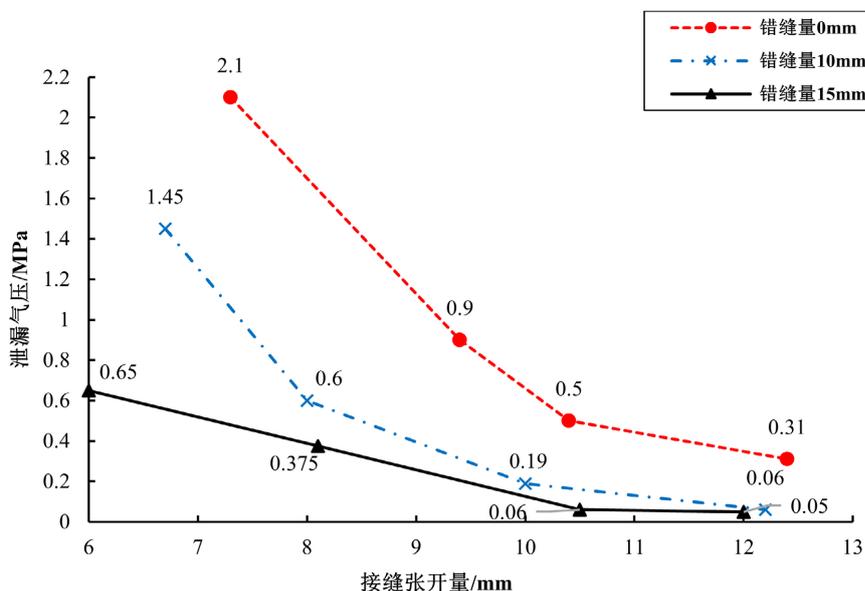


Figure 5. Opening-leakage air pressure curve of the segment inner gasket

图 5. 管片内道密封垫张开量 - 泄漏气压曲线

由表 2 和图 5 可知, 在张开量 6.0 mm, 错缝量 15 mm 的工况下, 管片内道密封垫的泄漏气压为 0.65 MPa。在密封垫出现微弱漏气后, 气压稍微增大 0.05~0.15 MPa, 就会出现剧烈漏气, 气体剧烈喷出或冲出, 说明一旦气体通道形成, 密封垫防气效果对气压的变化十分敏感。并注意: 错缝量 0 mm 时、张开量 7.3 mm 的泄露气压为 2.1 MPa, 远大于错缝量 0 mm 时、张开量 9.4 mm 的泄露气压 0.9 MPa; 错缝量 10 mm 时、张开量 6.7 mm 的泄露气压 1.45 MPa, 远大于错缝量 10 mm 时、张开量 8 mm 的泄露气压超过 0.6 MPa, 该试验结果说明保证设计控制张开量对保障盾构内道密封垫的防气能力十分重要。

3) 双道联动密封垫防气能力

针对两道联动密封垫的防气能力评价, 记录管片外道密封垫(气压超过 2.2 MPa 或泄漏率超过流量计量程 1000 ml/min)和管片内道密封垫出现漏气的气压, 得到表 3。

Table 3. Linkage test results of two gaskets

表 3. 两道联动试验结果

张开量 mm	错缝 0 mm		张开量 mm	错缝 15 mm	
	管片外道气压 MPa	管片内道漏气气压 MPa		管片外道气压 MPa	管片内道漏气气压 MPa
5.8	2.2 (泄漏率 13 ml/min)	未漏气	5.8	2.2 (泄漏率 18 ml/min)	未漏气
7.2	2.2 (泄漏率 788 ml/min)	未漏气	7.4	1.7 (流量计超量程)	1.7
9.1	1.75 (流量计超量程)	1.75	8.7	0.75 (流量计超量程)	0.75

由表 3 可知, 在张开量较小的工况下, 即使加载气压达到 2.2 MPa, 管片外道密封垫依旧能保持良好的防气性能, 此时管片内道密封垫同样不会出现漏气。管片外道密封垫进入大规模泄漏阶段, 进而失去

防气能力后,在不提高加气压或稍微增大气压的情形下,管片内道密封垫也相继失效。在张 9.1 错 0、张 8.7 错 15 和张 7.4 错 15 的工况中,管片外道密封垫超量程气压与管片内道密封垫漏气气压相同。出现该现象的原因与密封垫的设计相关,在相同张开量下,管片内道密封垫的压缩量要小于管片外道,即一旦管片外道密封垫失去防气能力,空腔内的气压极有可能突破管片内道密封垫,进入隧道内部,管片内道密封垫并不能提供额外的安全储备,但实际工程中管片内道密封垫也可能会体现一定的辅助防气作用。

4. 结论

本文依托穿越富含有害气体地层的中俄东线天然气管道(南通-甬直段)过江工程实例,设计了与实际隧道对应的模型试验装置,对不同工况下的弹性密封垫的防气性能进行了直接测试和研究,探讨了密封垫的渐进性失效过程。主要结论如下:

1) 由室内模型试验可知,密封垫防气性能失效分为微弱泄漏阶段和大规模泄漏阶段,盾构外道密封垫在张开量 7.2 mm,错缝量 15 mm 时,短期防气能力为 1.658 MPa;在张开量 5.6 mm、错缝量 15 mm 时,短期防气能力为 2.03 MPa。

2) 盾构外道密封垫在张开量 5.6 mm、错缝量 15 mm 时,在 0.125 MPa 较低气压的作用下,也能测到微弱的气体泄漏。低气压下隧道接缝微弱泄漏的试验结果表明,必须警惕长期微泄漏情况下隧道内气体浓度累积带来的风险和危害,提前制定针对性的、切实可行的管控措施以保障施工与运营安全。

3) 盾构内道密封垫在张开量 6.0 mm,错缝量 15 mm 时,短期防气能力为 0.65 MPa,故盾构内道密封垫对于局部破损或渗漏具有一定的辅助防水和防气作用。对试验过程和试验结果分析发现,在错缝较大情形下增加盾构内道密封垫宽度、严格控制或减少错缝量等是提高盾构内道弹性密封垫防气能力的有效措施。

4) 接缝的张开量和错缝量对密封垫的防气性能皆有显著影响。随着张开量和错缝量的增大,密封垫的接触应力减小,密封垫的泄漏气压急剧减小。超过设计控制标准的张开量和错缝量可能会带来大规模的强泄漏,进而给施工和运营带来巨大的安全隐患甚至失稳灾害。因此,在实际工程中,要严格控制管片接缝处的张开量和错缝量,保证密封垫的防气能力。

5) 结合国内类似地层和工程的有害气体最高气压测量值等调研分析,在满足设计的张开、错缝验收标准情形下,本工程盾构隧道接缝具有足够的抵抗高压有害气体快速逸出或爆发式逸出的能力。

参考文献

- [1] 高健,粟玉英,丁淑平. 浅层有害气体对地铁的影响及应对措施[J]. 资源环境与工程, 2014, 28(4): 587-590.
- [2] 冯铭璋,季军. 上海地区浅层气地质灾害评估[J]. 上海地质, 2006, 100(4): 44-47.
- [3] 唐益群,刘冰洋,赵书凯,等. 高压沼气对浅部砂质粉土工程性质的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(10): 1316-1319.
- [4] 孔令伟,郭爱国,陈守义,等. 浅层天然气井喷对地层的损伤影响与桩基工程危害分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, 24(4): 375-381.
- [5] 马积薪. 盾构隧道瓦斯爆炸事故的原因及对策——东京都水道局输水管道工程[J]. 世界隧道, 1995(6): 64-73.
- [6] 周殷康,阎长虹,李学乾,等. 第四系全新统软土地层中浅层气空间分布及其控灾特征[J]. 工程勘察, 2016, 44(5): 17-20+25.
- [7] 李萍,杜军,刘乐军,等. 我国近海海底浅层气分布特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(1): 69-74.
- [8] Rad, N.S., Vianna, A.J.D. and Berre, T. (1994) Gas in Soils. II: Effect of Gas on Undrained Static and Cyclic Strength of Sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, **120**, 716-736.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1994\)120:4\(716\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:4(716))

- [9] 丁智, 郑海洋, 冯丛烈, 等. 含气土工程特性研究现状综述及展望[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(4): 537-553.
- [10] 郭爱国, 沈林冲, 张金荣, 等. 浅层气对杭州地铁施工的影响模式分析[J]. 铁道工程学报, 2010, 27(9): 78-81.
- [11] 唐益群, 叶为民, 张庆贺. 长江口软土层中沼气与隧道安全施工技术研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1996(4): 465-470.
- [12] 卢浩, 王明洋, 戎晓力, 等. 含气地层中气体释放对盾构隧道稳定性影响研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(S1): 301-306.
- [13] 孙昕, 武威, 焦亚基, 等. 盾构隧道管片接缝气密性模拟方法与影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(2): 375-382.
- [14] Wheeler, S.J. (1988) A Conceptual Model for Soils Containing Large Gas Bubbles. *Géotechnique*, **38**, 389-397. <https://doi.org/10.1680/geot.1988.38.3.389>
- [15] 王晖皓, 叶斌, 涂新斌, 等. 含气地层不均匀沉降对盾构隧道结构影响的固-液-气耦合分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(6): 2487-2494.
- [16] Feng, X.Q., Ye, B., Zhang, X.Y., *et al.* (2021) Analysis of the Effects of Shallow Gas on a Shield Tunnel during Leakage: A Case Study from the Sutong River-Crossing GIL Utility Tunnel Project in China. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **25**, 2285-2299. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-1666-5>
- [17] 梁立刚, 林兴贵, 骆汉宾. 盾构隧道穿越沼气地层风险识别与控制[J]. 土木工程与管理学报, 2015, 32(1): 65-71.
- [18] 唐益群, 蒋玉坤. 隧道施工中浅层沼气的危害与防治[J]. 施工技术, 2011, 40(20): 44-45+49.
- [19] 闫治平, 黄淑英. 漏率与压力关系的研究[J]. 中国空间科学技术, 1999(2): 44-48.
- [20] 任晓. 三维粗糙表面的表征及其气体密封性能研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [21] Chapman, S. and Cowling, T.G. (1970) *The Mathematical Theory of Non-Uniform Gases: An Account of the Kinetic Theory of Viscosity, Thermal Conduction and Diffusion in Gases*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [22] Woods, L.C. (1993) *An Introduction to the Kinetic Theory of Gases and Magnetoplasmas*. Oxford University Press, Oxford.