

纯氢管道小孔泄漏规律研究

鲁 凡

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年1月15日; 录用日期: 2025年2月25日; 发布日期: 2025年3月10日

摘 要

本文聚焦埋地纯氢管道泄漏问题展开研究。氢能作为实现“3060双碳目标”的重要途径, 其长距离运输中管道运输优势显著。目前对埋地纯氢管道泄漏研究稀缺, 实验成本高且风险大, 因此采用Simdroid5.0软件建立泄漏仿真模型。通过以拟建纯氢管道为原型, 设置不同泄漏孔径、位置及多种土壤条件参数, 结合流体力学控制方程和湍流模型, 进行数值模拟。结果表明: 随着泄漏孔径增大, 泄漏孔周围温度减小; 泄漏孔位置不同, 氢气扩散速度有差异, 朝上时最快, 朝下时先在土壤聚集再向上扩散; 土壤种类对氢气泄漏扩散影响关键, 扩散速度从高到低依次为砂土、壤土、黏土, 且粘度阻力系数越小、孔隙率越小, 氢气泄漏越快。研究为未来纯氢管道安全输送提供基础支持, 但研究存在局限性, 如缺乏现场试验与实际测量数据支撑, 对土壤条件进行了简化。后续应开展实际试验检测, 对比模拟与实际数据, 并考虑更多土壤复杂因素, 建立更完善的泄漏模型, 以促进纯氢管道输氢技术的发展。

关键词

纯氢管道, 泄漏, 仿真模拟

Research on the Leakage Law of Small Holes in Pure Hydrogen Pipelines

Fan Lu

School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Jan. 15th, 2025; accepted: Feb. 25th, 2025; published: Mar. 10th, 2025

Abstract

This article focuses on the study of leakage problems in buried pure hydrogen pipelines. Hydrogen energy, as an important way to achieve the “3060 dual carbon target”, has significant advantages in pipeline transportation for long-distance transportation. At present, research on the leakage of buried pure hydrogen pipelines is scarce, with high experimental costs and risks. Therefore, Simdroid5.0

software is used to establish a leakage simulation model. By taking the proposed pure hydrogen pipeline as a prototype, setting different leakage aperture, location, and various soil condition parameters, combined with fluid dynamics control equations and turbulence models, numerical simulations were conducted. The results indicate that as the leakage aperture increases, the temperature around the leakage aperture decreases; the diffusion speed of hydrogen varies depending on the location of the leakage hole. It is fastest when facing upwards and first accumulates in the soil before diffusing upwards when facing downwards; the soil type has a crucial impact on the diffusion of hydrogen gas leakage, with the diffusion rate being in the order of sandy soil, loam soil, and clay. Moreover, the smaller the viscosity resistance coefficient and porosity, the faster the hydrogen gas leakage. The research provides basic support for the safe transportation of pure hydrogen pipelines in the future, but there are limitations to the research, such as the lack of on-site testing and actual measurement data support, and simplification of soil conditions. Subsequently, actual experimental testing should be carried out to compare simulated and actual data, and more complex soil factors should be considered to establish a more comprehensive leakage model, in order to promote the development of pure hydrogen pipeline hydrogen transportation technology.

Keywords

Pure Hydrogen Pipeline, Leak, Analogue Simulation

Copyright © 2025 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

氢能是一种高效、清洁的可再生能源，被视为中国实现“3060 双碳目标”的重要途径[1]。在全球范围内，美国、日本、欧盟等国家和地区愈发重视氢能的发展，纷纷出台相关规划。2023 年，中国也积极行动，推出一系列政策大力扶持氢能领域。在氢气的长距离运输方式中，管道运输凭借其经济高效的特性脱颖而出。若能充分利用现有的管道网络来输送氢气，新建管道的高昂费用将大幅降低。正因如此，纯氢管道输送极有可能在未来成为氢气运输的主要方式。实际上，目前已有多条相关的纯氢管道投入运营，开启了氢气运输的新局面[2]-[4]。

国内外众多学者对埋地纯氢管道进行了研究。曹权[5]等人对纯氢管道输氢技术进行了深入研究，给出了管道输氢评价指标，这些指标涵盖了技术、经济、安全等多个方面，有助于全面了解纯氢管道输氢的优势和不足。文章对国内外纯氢管道的建设情况、技术水平、运营模式等进行了系统总结，并提出了推动管道输氢产业化发展的建议。何太碧[6]在讨论了砂土、壤土与黏土对氢气泄漏扩散的影响，发现黏土对氢气扩散的阻碍效果最大壤土其次，砂土最小。土壤的阻力系数与管道的泄漏量呈反比关系。罗宗林[7]将气体的泄漏等效为在大气中管道漏出的小孔。朱红钧[8]认为混氢体积分数越高，气体泄漏扩散的速度越快，发生自燃的高度和所重的时间、温度均有减小。混氢气体的自燃是由前导激波面加热氢-空气混合层和氢气本身膨胀过程中的逆焦-汤效应共同作用引起的。常欢[9]及其研究团队构建起一套应用于城市埋地天然气管道泄漏场景的三维数值计算模型。剖析了天然气在砂质土、黏质土、壤土等不同类型土壤环境中的扩散特性，为理解泄漏天然气的传播规律提供依据。Bu 等[10]采用数值模拟方法研究了埋地天然气管道的泄漏扩散特性，提出了通过第一危险时间、最大危险范围及地面危险范围等参数对气体泄漏扩散的有害边界进行评估的方法。Mahesh Kodoth 等[11]提出了利用 HRS 历史事故信息基于时间的氢气泄漏率的评估方法。顾蒙等[12]分析了不同罩棚形状、环境风速和风向对氢气泄漏事故的影响规律。

目前,关于埋地纯氢管道泄漏的研究较为稀缺,且实验成本高、风险大。为此我们采用 Simdroid5.0 软件建立泄漏仿真模型,分析不同泄漏孔径对管道泄漏特性的影响,为未来的安全输送提供基础支持。

2. 纯氢管道的数值模拟

2.1. 泄露模型的建立和网格的划分

以项目拟建的纯氢管道为例进行建模,输送管道的直径为 100 mm、管道长度 4 m、压力为 4 MPa,壁厚取 3 mm。设置不同直径的泄漏孔:1 mm、2 mm、4 mm。分别对管道上方、下方和侧方位置的泄漏进行模拟。由于泄漏孔直径远小于管道直径,因此适用于小孔泄漏模型。为使氢气池泄漏后拥有足够的扩散空间,在泄漏孔出口位置建立一个长方体形状的扩散区域,长、宽、高分别为 4 m、3 m、3 m 见图 1。泄漏孔在管道的中心位置见图 2。

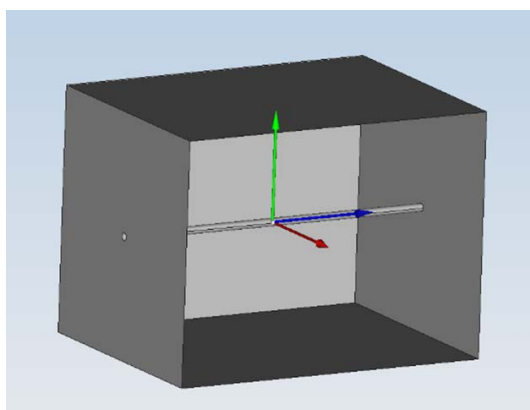


Figure 1. Leakage diagram of small holes in pipelines
图 1. 管道小孔泄漏图

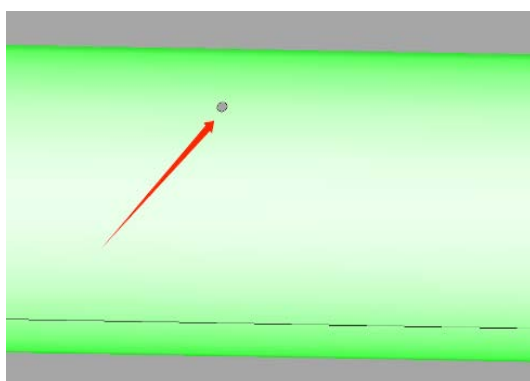


Figure 2. Leakage diagram of small holes in pipelines
图 2. 管道小孔泄漏图

对三维的流体进行网格剖分。对几何边界进行边界命名:泄漏孔命名为孔,管道命名为管壁,长方体的四个侧面和底部命名为周围,长方体的顶部命名为出口。对几何模型设置笛卡尔网格单元尺寸:0.05 m 见图 3。为了保证网格的平滑过渡,在泄漏口处使用结构与非结构的混合网格,并对泄漏口附近的网格局部加密,泄漏孔周围加密类型为体类型为球,单元尺寸为 0.01 m,半径为 0.15 m 见图 4。泄漏孔在模型中表现为面,对孔设置面控制,面单元尺寸 0.001 m。生成网格见图 5。

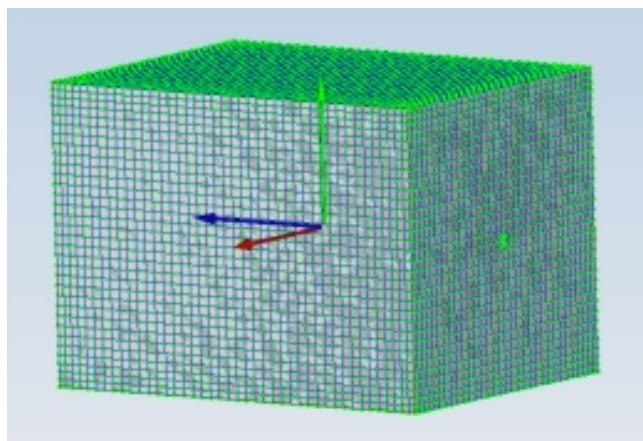


Figure 3. Model generates Cartesian grid
图 3. 模型生成笛卡尔网格

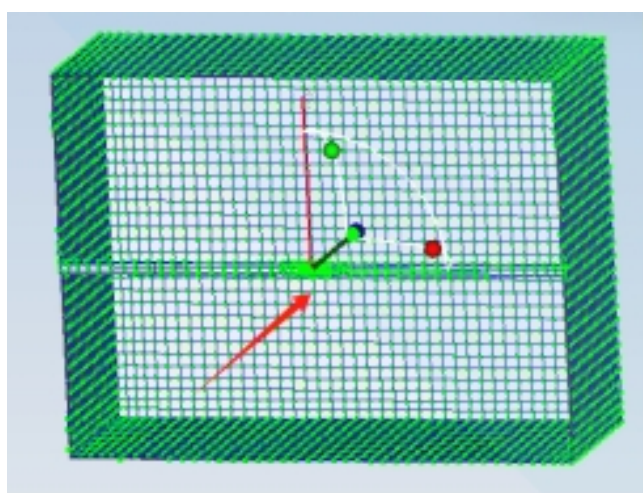


Figure 4. Generate grid profile
图 4. 生成网格剖面图

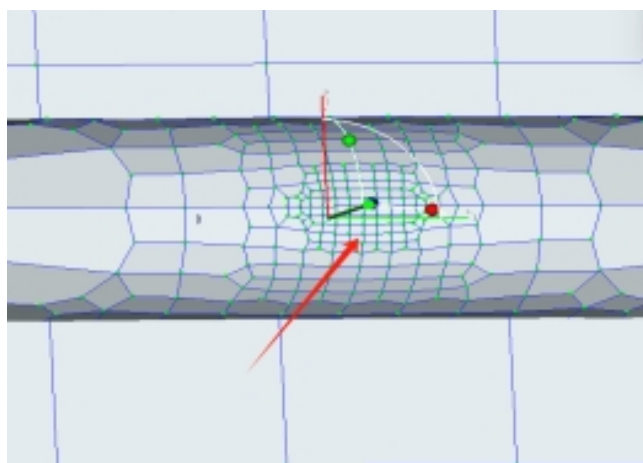


Figure 5. Grid diagram of encrypted leakage holes
图 5. 泄漏孔加密网格图

2.2. 初始条件设置

分析设置。选择压力基求解器，使用瞬态分析。氢气泄漏过程需要考虑传热，开启能量方程。氢气泄漏速度较大为湍流流动，原因是当氢气泄漏速度较大时，流体流动呈现出强烈的不规则性和随机性。根据流体动力学理论，高流速会导致流体微团的脉动加剧，形成复杂的流动结构。类型中选择雷诺平均，原因是相比于直接求解完整的瞬态湍流方程，雷诺平均后的方程求解量相对较少，大大减少了计算量，提高了计算效率。子模型选择标准 k-epsilon(2qn)，原因是可以用于各种类型的流动，如分离流、混合流、射流等，在埋地管道氢气泄漏的场景中，可能会出现这些不同类型的流动，因此该模型具有较好的适用性。勾选组分，混合物材料为 mix，设置组分为氢气和空气(理想气体)。

网格单元条件设置。已生成的网格区域设置流体类型，材料选择 mix。

添加分析中的 Porous Media Model，勾选 Laminar Zone。不同土壤条件会对埋地输氢管道泄漏后氢气在土壤中的扩散特性产生影响。土壤的孔隙率、土壤粒径直接影响土壤的惯性阻力系数、黏性阻力系数，进而对气体在土壤中的扩散特性造成影响。选择三种常见的土壤类型：砂土，壤土，黏土。参考以往使用 FLUENT 进行埋地管道泄漏模拟的研究，了解其他研究者在类似场景下对土壤孔隙率的设定。砂土，孔隙率 0.3，黏性阻力系数 $2.16 \times 10^9 \text{ 1/m}^2$ ；壤土，孔隙率 0.43，黏性阻力系数 $2.16 \times 10^{10} \text{ 1/m}^2$ ；黏土，孔隙率 0.5，黏性阻力系数 $2.16 \times 10^{11} \text{ 1/m}^2$ ，惯性阻力系数为 $336,000 \text{ 1/m}$ [13]。

边界条件设置。根据现场实际埋地管道的运行状况情况可得，泄露孔设为压力入口，表压 4 MPa，总压 4.101325 MPa，氢气质量分数为 1，空气(理想气体)质量分数为 0。地面设为自由出流边界。周围土壤设为对称。管壁设为壁面[14]。在氢气泄漏前，土壤区域的流体全部为空气。因此，氢气的质量分数初始化为 0，空气(理想气体)的质量分数初始化为 1。

2.3. 模型理论公式

1) 控制方程

假设管内氢气为理想气体，管内流体流动过程满足流体力学三大方程，包括连续型方程、动量守恒方程、能量守恒方程。质量、动量以及能量是管道内流体介质运动的平均物理量，质量物理量是扩散的标志，动量物理量是粘滞的标志，能量物理量是热传导的标志。

a) 连续性方程，是质量守恒定律在流体力学中的具体表述形式，对流体采用连续介质模型，速度和密度都是空间坐标及时间的连续、可微函数。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2-1)$$

b) 动量守恒方程，是动量守恒定律(牛顿第二定律)在流体力学中的具体应用。

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \vec{u}) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \vec{u}) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \vec{u}) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \end{aligned} \quad (2-2)$$

c) 能量守恒方程，是分析计算热量传递过程的基本方程之一，通常表述为：流体微元的内能增量等于通过热传导进入微元体的热量、微元体中产生的热量及周围流体对微元体所作功之和。

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{C_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{C_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_T \quad (2-3)$$

其中, u 、 v 、 w 表示 x 、 y 、 z 方向的速度; ρ 为流体密度; t 为时间; 为作用在流体单元上的粘性应力 τ 的分力; p 为作用在流体单元上的压力; 为动量守恒方程的广义源项; 为流体的内热源及由于粘性作用流体机械能转换为热能的部分; 为比热容; T 为温度; k 为流体的传热系数。

2) 湍流模型

湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 模型, 该模型满足对雷诺应力的约束条件, 因此可以在雷诺应力上保持与真实湍流的一致性, 可用于各种类型的流动, 如射流、混合流、分离流、边界层流动等。标准的模型为湍流动能 k 和湍流动能的耗散率建立了各自相应的输运方程。其中 k 的输运方程是基于湍流数学理论推导得出, 而输运方程是靠物理推演得出。

湍动能的耗散率和湍流动能 k 的输运方程分别是

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \epsilon) &= \rho D_{\epsilon}^{eff} \nabla^2 \epsilon - \left(\frac{2}{3} C_{1\epsilon} + C_{3\epsilon} \right) \rho (\nabla \cdot U) \epsilon + C_{1\epsilon} \rho \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \\ \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) &= \rho D_k^{eff} \nabla^2 k - \frac{2}{3} \rho (\nabla \cdot U) k + \rho G_k - \rho \epsilon \end{aligned} \quad (2-4)$$

其中, ϵ 和 k 的有效扩散系数分别是:

$$D_{\epsilon}^{eff} = \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_{\epsilon}} \quad (2-5)$$

$$D_k^{eff} = \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \quad (2-6)$$

其中的系数, 湍流动能 k 的生成率是速度梯度的函数。

$$G_k = \min \left[\nu_t \left(\nabla U + \nabla U^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot U) I \right) : \nabla U, 10\epsilon \right] \quad (2-7)$$

最终当湍动能及其耗散率都被计算出来之后, 新的流粘性系数按如下计算

$$\nu_t = C_{\mu} \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2-8)$$

其中 $C_{\mu} = 0.09$ 。

3. 模拟结果和分析

3.1. 分析在该工况下纯氢管道不同孔径泄漏点的温度变化情况

在氢气管道泄漏的情况下, 如果所有其他条件(如管道内氢气的初始压力、温度、环境温度、风速等)都保持不变, 仅改变泄漏孔的大小, 那么我们可以根据物理原理来推断泄漏孔温度的变化。氢气从高压管道中泄漏时, 会经历绝热膨胀的过程。在这个过程中, 氢气对外做功, 导致内能减少, 因此温度会下降。

当泄漏孔径为 1 mm 时, 泄漏 100 s 后的温度。见图 6~8。

当泄漏孔为 1 mm 时, 泄漏 0~100 s 内距离泄露孔上方 5 mm、10 mm、100 mm、200 mm、500 mm 温度场变化曲线图。见图 9~11。

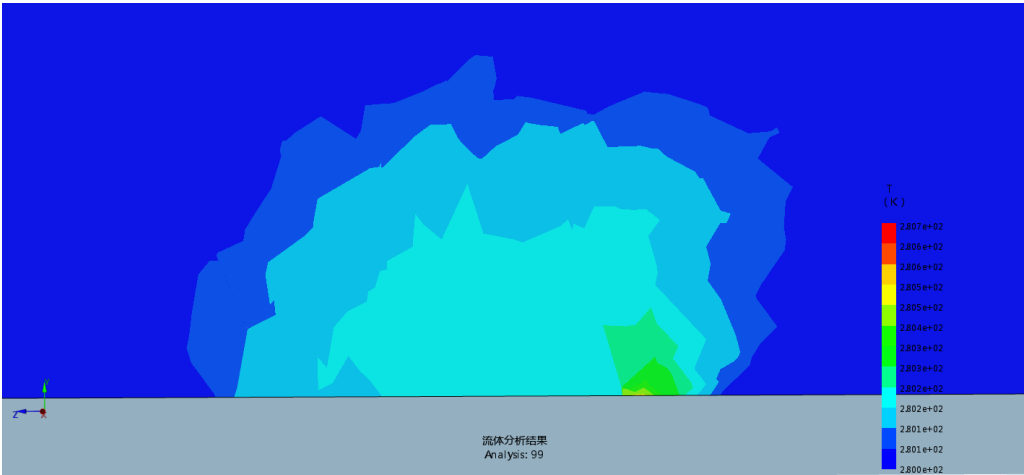


Figure 6. Temperature at leakage of 1 mm aperture for 100 s
图 6. 孔径为 1 mm 泄漏 100 s 时温度

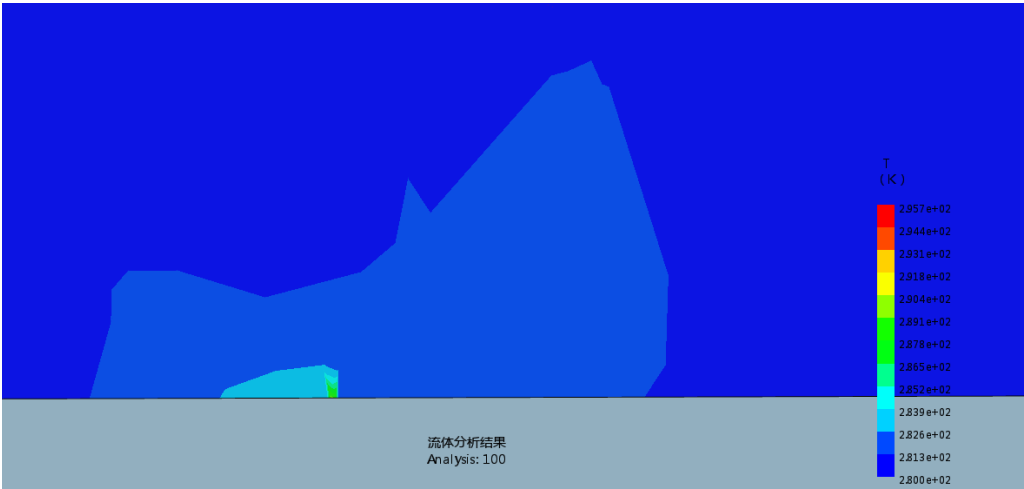


Figure 7. Temperature at leakage of 2 mm aperture for 100 s
图 7. 孔径为 2 mm 泄漏 100 s 时温度

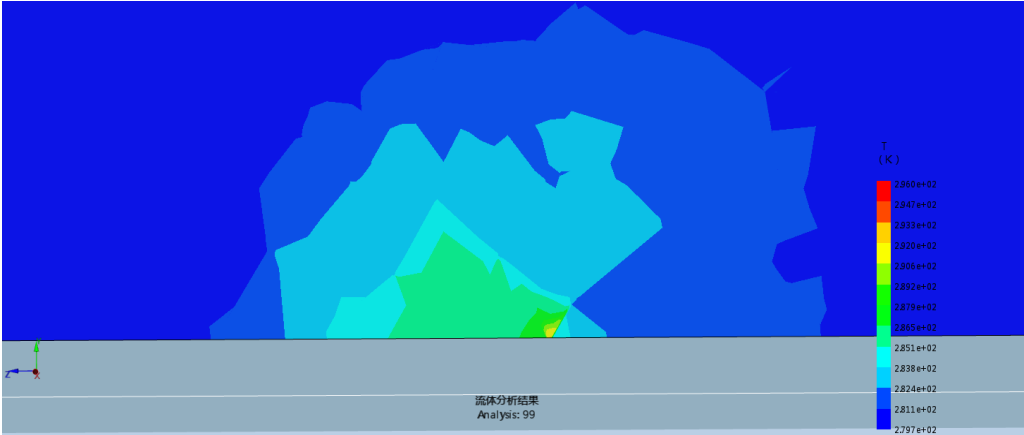


Figure 8. Temperature at leakage of 3 mm aperture for 100 s
图 8. 孔径为 3 mm 泄漏 100 s 时温度

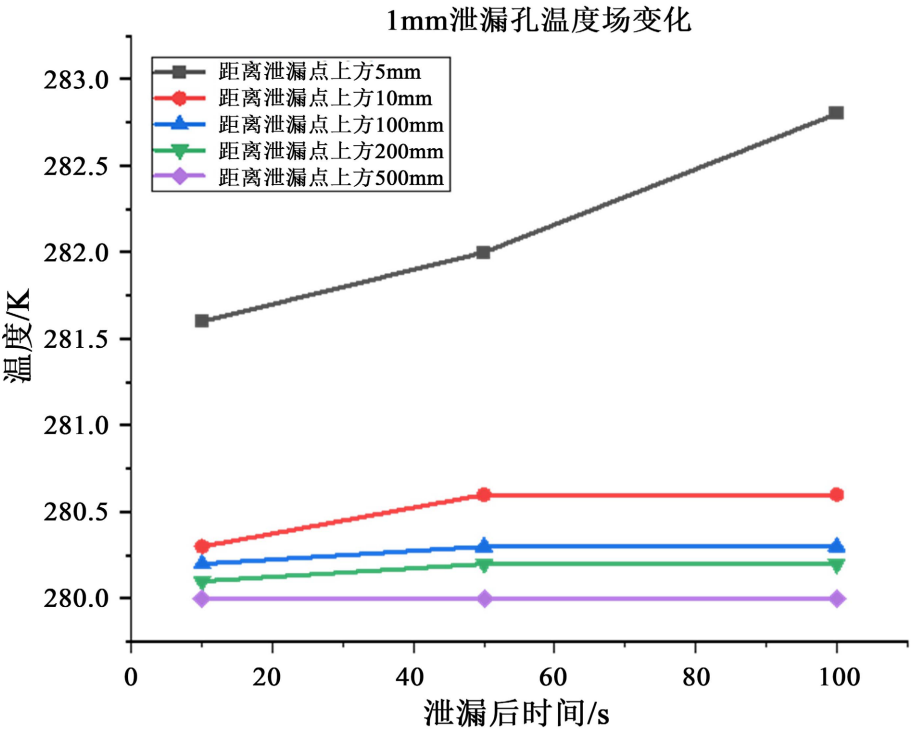


Figure 9. Temperature after 100 seconds of leakage when the leakage aperture is 1 mm
图 9. 当泄漏孔径为 1 mm 时，泄漏 100 s 后的温度

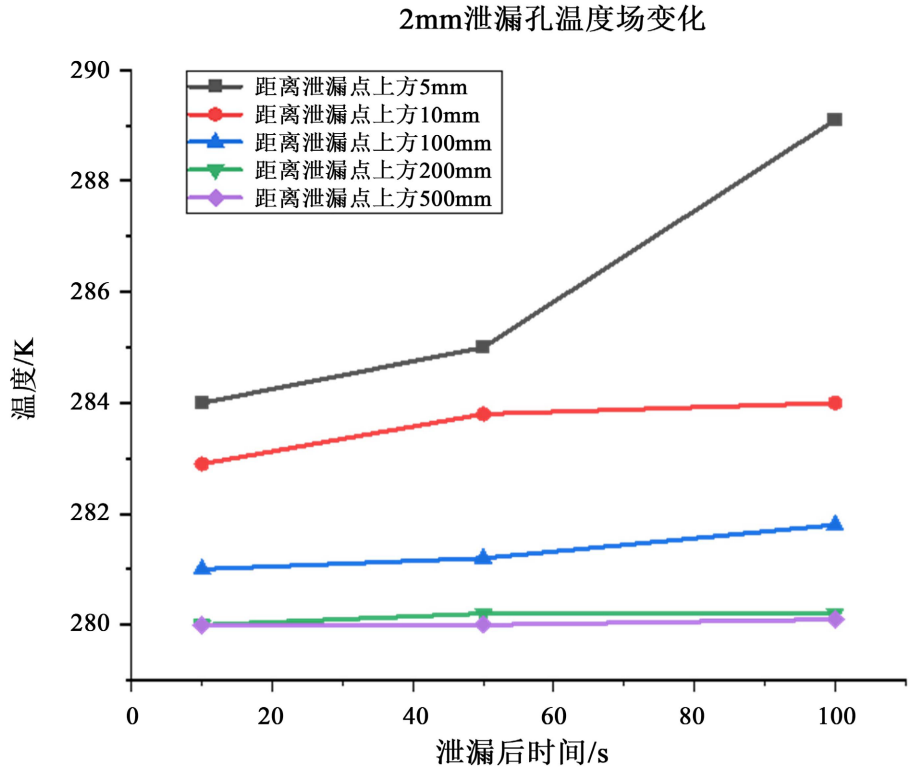


Figure 10. Temperature after 100 seconds of leakage when the leakage aperture is 2 mm
图 10. 当泄漏孔径为 2 mm 时，泄漏 100 s 后的温度

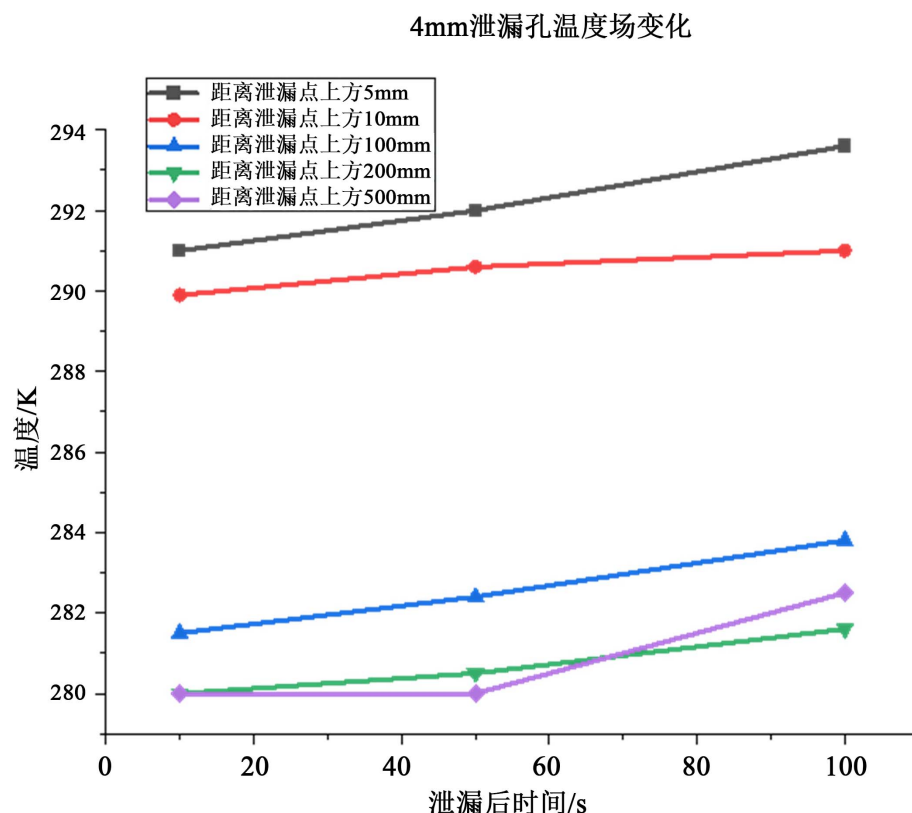


Figure 11. Temperature after 100 seconds of leakage when the leakage aperture is 4 mm

图 11. 当泄漏孔径为 4 mm 时，泄漏 100 s 后的温度

当泄漏孔径较小时，氢气的流出速度相对较慢，膨胀过程可能更加平缓。由于泄漏孔径小，氢气与周围环境的热交换面积也相对较小，这导致温度下降的速度和幅度受到一定限制。当泄漏孔径增大时，更多的氢气更快地流出，形成更强烈的膨胀效应。虽然膨胀速度增快会导致更多的内能转化为动能，但同时由于氢气与周围环境的接触面积也增大，热交换也变得更加频繁和有效。

背后的原因是当高压气体通过泄漏孔突然膨胀到低压环境时，会发生焦耳-汤姆逊效应。高压埋地管道泄漏时，气体从管道泄漏出来，由于焦耳-汤姆逊效应，会导致温度下降。泄漏孔径增大，意味着有更多的高压气体在短时间内泄漏出来，从而使温度下降更加明显[15]。同时由于能量守恒定律，在泄漏过程中，气体的内能会发生变化。当气体从高压状态泄漏到低压环境时，其内能会转化为动能和热能。随着泄漏孔径的增大，更多的气体在单位时间内泄漏出来，这意味着更多的内能被转化为动能和热能。然而，由于周围环境的热容量相对较大，且热量会迅速扩散到周围的土壤中，所以泄漏孔周围的温度会下降[16]。从流体力学角度来看，当管道发生泄漏时，泄漏孔附近会出现明显的湍流扰动现象。当泄漏孔内外压差越大、泄漏孔径越大时，泄漏孔内的流场变化越剧烈，湍流扰动现象越明显。这种湍流扰动会导致气体与周围环境的混合更加充分，从而加速了热量的传递和扩散。因此，泄漏孔径增大时，泄漏孔周围的温度下降得更快[17]。

3.2. 分析不同泄漏点位置

为了对比管道不同位置泄漏后的氢气浓度分布，选取不同位置泄漏相同时间后中心截面上的氢气分布云图进行分析。见图 12~14。

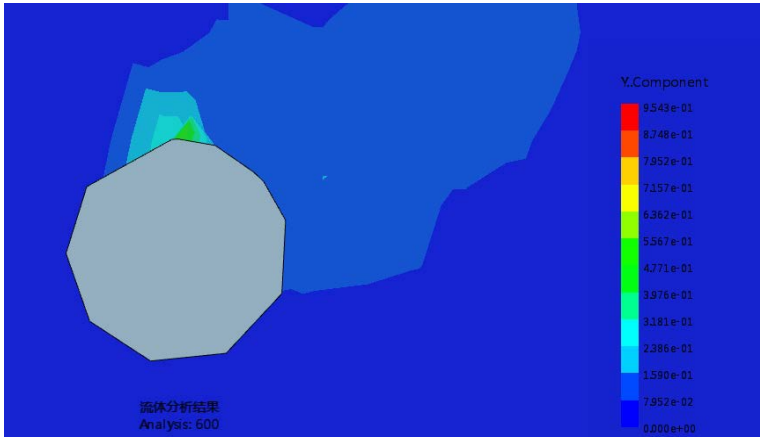


Figure 12. Upper 900 s leakage cloud
图 12. 上方 900 s 泄漏云图

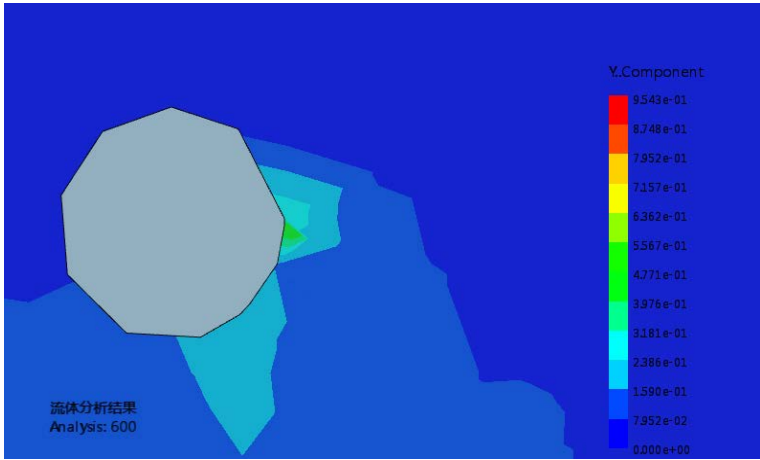


Figure 13. Lower 900 s leakage cloud
图 13. 下方 900 s 泄漏云图

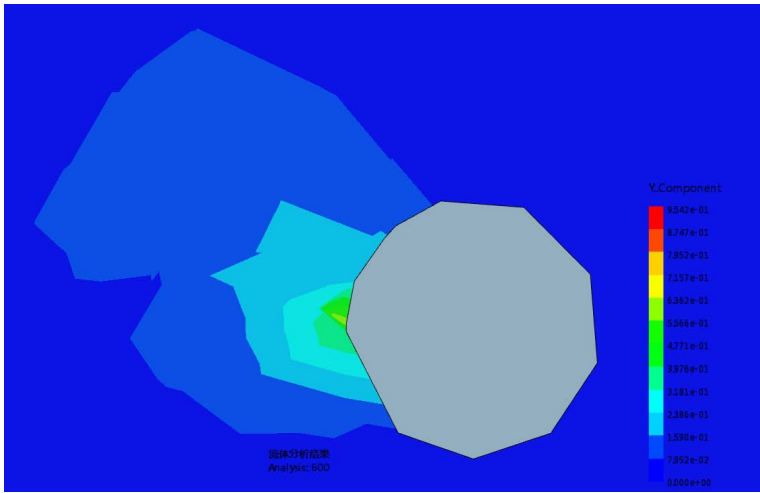


Figure 14. Side 900 s leakage cloud map
图 14. 侧方 900 s 泄漏云图

当泄漏点位于管道上方时, 氢气通常会直接向上方空间释放, 并迅速扩散到大气中。这种情况下, 氢气的扩散路径相对直接, 不易受到土壤等介质的阻碍。泄漏点位于管道下方, 由于土壤介质的阻碍, 氢气在土壤中的扩散速度通常比在空气中慢。这意味着氢气在土壤中的浓度可能会逐渐升高, 并在局部区域形成较高的浓度梯度。泄漏点位于管道左侧, 氢气通常会向左上方空间释放, 并迅速扩散到大气中。这种情况下, 氢气的扩散路径可能受到土壤等介质的阻碍。

泄漏点位于管道上方时, 如果泄漏量较大, 氢气可能迅速积聚并形成爆炸性混合物。此外, 由于氢气比空气轻, 它会在空气中上升并扩散到更远的距离, 增加了爆炸或火灾的影响范围。泄漏点位于管道下方时, 氢气在土壤中的扩散速度较慢, 但这也可能导致氢气在局部区域积聚并达到较高的浓度。如果这种积聚的氢气与空气中的氧气混合并达到爆炸极限, 就可能引发爆炸或火灾。此外, 如果泄漏点靠近地下设施(如地下室、地下管道等), 还可能对这些设施造成损害或引发次生灾害。泄漏点位于管道左侧时, 氢气在土壤环境中扩散速度较慢, 容易在土壤中聚集, 氢气高浓度区域主要分布在泄漏孔附近。

对于埋地纯氢管道, 应注意对管道四周均进行氢气浓度监测, 以防止未监测到高氢气浓度的管道一侧, 从而导致工程人员未及时进行维护进而造成泄漏爆炸事故。尤其是长距离输氢管道, 通常此类氢气管道管径较大, 更需做好管道周围氢气浓度的监测。

3.3. 分析不同土壤渗透特性

不同土壤条件会对埋地输氢管道泄漏后氢气在土壤中的扩散特性产生影响。土壤的孔隙率、土壤粒径直接影响土壤的惯性阻力系数、黏性阻力系数, 进而对气体在土壤中的扩散特性造成影响。改变土壤类型分别为砂土、壤土、黏土。

砂土: 孔隙率 0.3, 黏性阻力系数 $2.16 \times 10^{-9} \text{ 1/m}^2$, 氢气泄漏 200s 时土壤中存在氢气的最大质量分数为 0.00921。壤土: 孔隙率 0.43, 黏性阻力系数 $2.16 \times 10^{-10} \text{ 1/m}^2$, 氢气泄漏 200 s 时土壤中存在氢气的最大质量分数为 0.00921, 存在范围较砂土中氢气存在范围小。黏土: 孔隙率 0.5, 黏性阻力系数 $2.16 \times 10^{-11} \text{ 1/m}^2$, 氢气泄漏 200 s 时土壤中存在氢气的最大质量分数为 0.005185。采用上述模型模拟得到不同的泄漏 200 s 时监测点 I 处沿管长方向氢气质量分数分布曲线。见图 15。

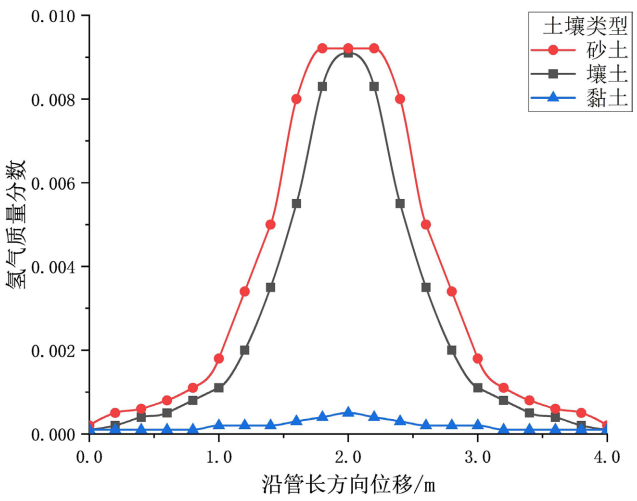


Figure 15. Distribution curve of hydrogen mass fraction along the length of the buried pure hydrogen pipeline at monitoring point I for 200 seconds of leakage under different soil types
图 15. 不同土壤类型下埋地纯氢管道泄漏 200 s 时监测点 I 处沿管长方向氢气质量分数分布曲线

不同的土壤类型具有不同的物理和化学性质，这会显著影响氢气在其中的扩散。氢气在砂土中扩散相对容易，因为砂土的颗粒较大，孔隙较多，透气性较好。相比之下，粘土的颗粒较小，孔隙较少，透气性较差，氢气在其中的扩散速度相对较慢。

不同的土壤类型对氢气泄漏的检测也会带来不同的挑战。在砂土中，由于氢气扩散较快，可能需要更频繁地进行监测，以确保及时发现泄漏。而在粘土中，氢气扩散较慢，泄漏可能在较长时间内不易被察觉，这就需要采用更加灵敏的检测方法。土壤类型还会影响氢气泄漏后的安全风险。在砂土中，氢气扩散较快，可能会在较大范围内形成较低浓度的氢气区域，但局部高浓度区域的形成可能性相对较小。而在粘土中，氢气扩散较慢，容易在泄漏口附近形成高浓度区域，增加了爆炸等危险事件的发生概率。

在保持其他条件不变的情况下，改变土壤孔隙率 0.3、0.43、0.5，可得到氢气泄漏 400 s 时在土壤中扩散的质量分数。当土壤孔隙率为 0.3 时，土壤中存在氢气的最大质量分数为 0.09113。当土壤孔隙率为 0.43 时，土壤中存在氢气的最大质量分数为 0.05829。当土壤孔隙率为 0.5 时，土壤中存在氢气的最大质量分数为 0.04239。见图 16。

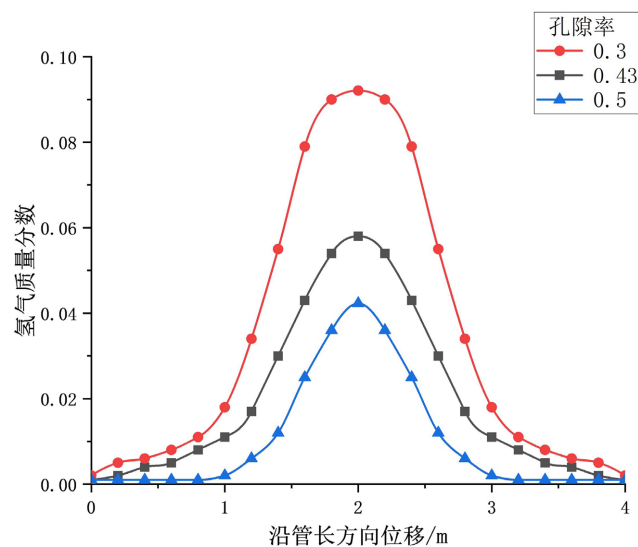


Figure 16. Distribution curve of hydrogen mass fraction along the length of the buried pure hydrogen pipeline at monitoring point I when leakage occurs for 200 seconds under different soil porosities

图 16. 不同土壤孔隙率下埋地纯氢管道泄漏 200 s 时监测点 I 处沿管长方向氢气质量分数分布曲线

孔隙率反映了土壤的疏松程度。较高的孔隙率意味着土壤中有更多的空隙，氢气在这样的土壤中扩散相对容易扩散速度较快。对于纯氢埋地管道，当土壤孔隙率较高时，氢气泄漏后能够更快地在土壤中扩散。孔隙率的变化还会影响氢气泄漏的危险性。一方面，较高的孔隙率可能使氢气更快地扩散到地表，增加了与外界接触的可能性，从而提高了潜在的危险程度。另一方面，氢气在高孔隙率土壤中的扩散可能更加分散，降低了局部浓度过高的风险。

在保持其他条件不变的情况下，改变土壤黏性阻力系数。当土壤黏性阻力系数为 $2.16\text{e}9 \text{ 1/m}^2$ 时，土壤中存在氢气的最大质量分数为 0.05829。当土壤黏性阻力系数为 $2.16\text{e}10 \text{ 1/m}^2$ 时，土壤中存在氢气的最大质量分数为 0.05015。当土壤黏性阻力系数为 $2.16\text{e}11 \text{ 1/m}^2$ 时，土壤中存在氢气的最大质量分数为 0.0423。见图 17。

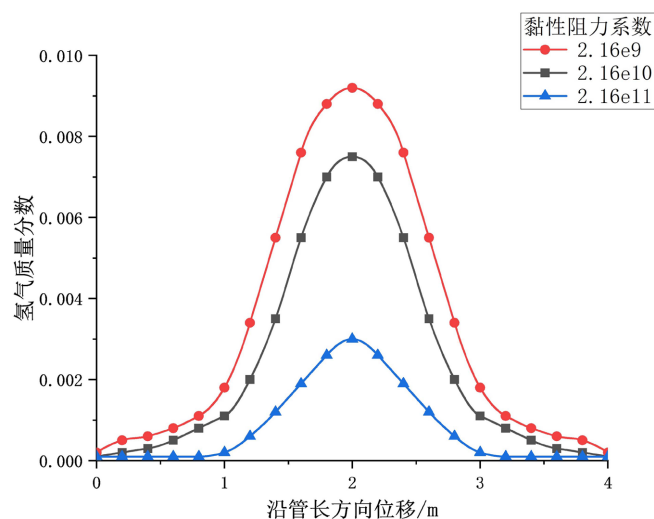


Figure 17. Distribution curve of hydrogen mass fraction along the length of the buried pure hydrogen pipeline at monitoring point I for 200 seconds of leakage under different viscous resistance coefficients

图 17. 不同粘性阻力系数下埋地纯氢管道泄漏 200 s 时监测点 I 处沿管长方向氢气质量分数分布曲线

土壤的渗透特性对氢气在土壤中的扩散速度和分布有重要影响。粘性阻力系数还会影响泄漏后的氢气在土壤中的扩散。较低的粘性阻力系数使得氢气在管道内流动较为顺畅,一旦发生泄漏,氢气能够更快地扩散到周围土壤中。然而,扩散速度过快可能导致氢气在短时间内扩散到较大范围,增加了潜在的危险区域。相反,较高的粘性阻力系数虽然会降低泄漏速度和扩散速度,但可能使氢气在泄漏口附近聚集,形成局部高浓度区域,也存在一定的安全风险。

4. 总结

本文利用 Simdroid5.0 软件对埋地纯氢管道氢气泄漏扩散蔓延到地面进行模拟,通过对不同泄漏孔径、不同埋深下温度场变化,不同土壤条件氢气质量分数分布进行详细分析,结合 ORIGIN 软件绘制一系列数据分析图,得出以下结论:

随着泄漏孔径增大,泄漏孔周围温度减小。

泄漏孔位置朝上时,氢气扩散速度最快,朝左或朝右时,氢气扩散速度较快,朝下时氢气先在土壤中聚集再向上扩散。

土壤种类对氢气泄漏扩散过程起着关键作用,氢气在不同类型的土壤中扩散速度由高到低为砂土、壤土、黏土。粘度阻力系数越小氢气泄漏越快,孔隙率越小氢气泄漏越快。

随着氢能产业的飞速发展,我国氢气需求量不断增大,氢气的规模化储运需求将会大幅增加,纯氢管道输氢将成为最高效、最经济的氢气输送方式。此次只是采用数值模拟方法进行了简化研究,缺乏现场试验采样和实际测量的数据支撑,今后在允许的情况下,应有实际的试验和检测,将采集的数据保存下来与数值模拟数据进行对比研究。同时研究过程中对土壤条件进行了简化,但现实问题中的土壤环境更为复杂,应考虑更多影响因素,建立更为复杂的埋地纯氢管道泄漏模型,如土壤中水分也会对掺氢天然气泄漏扩散产生影响。

参考文献

- [1] 张智,赵苑瑾,蔡楠. 中国氢能产业技术发展现状及未来展望[J]. 天然气工业, 2022, 42(5): 156-165.

-
- [2] 陈秋阳, 陈云伟. 国际氢能发展战略比较分析[J]. 科学观察, 2022, 17(2): 1-12.
- [3] 朱建禄, 潘军, 张义祥, 等. 氢混合天然气埋地管道的泄漏与扩散行为[J]. 国际氢能杂志, 2023, 48(8): 4862-4873.
- [4] 刘翠伟, 裴业斌, 韩辉, 等. 氢能产业链及储运技术研究现状与发展趋势[J]. 油气储运, 2022, 41(5): 498-514.
- [5] 曹权, 王洪建, 秦业美, 等. 纯氢管道输氢技术发展现状与分析[J]. 力学与实践, 2024, 46(1): 18-27.
- [6] 何太碧, 何风成, 杜文, 等. 埋地输氢管道泄漏扩散规律研究[J]. 中国测试, 2024, 50(8): 171-179.
- [7] 罗宗林, 张甜甜, 谭羽非, 等. 土壤-大气耦合下直埋燃气管道泄漏扩散模拟[J]. 煤气与热力, 2021, 41(9): 36-42+44.
- [8] 朱红钧, 陈泉宇, 陈俊文, 等. 混氢管道小孔泄漏气体的扩散与自燃过程分析[J]. 燃烧科学与技术, 2024, 30(3): 265-276.
- [9] 常欢, 谭羽非, 王雪梅, 肖榕, 张兴梅. 城市直埋燃气管道泄漏沿土壤扩散模拟研究山[J]. 煤气与热力, 2020, 40(11): 28-34, 42-43.
- [10] Bu, F., Liu, Y., Liu, Y., Xu, Z., Chen, S., Jiang, M., et al. (2021) Leakage Diffusion Characteristics and Harmful Boundary Analysis of Buried Natural Gas Pipeline under Multiple Working Conditions. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **94**, Article ID: 104047. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.104047>
- [11] Kodoth, M., Aoyama, S., Sakamoto, J., Kasai, N., Khalil, Y., Shibutani, T., et al. (2020) Leak Frequency Analysis for Hydrogen-Based Technology Using Bayesian and Frequentist Methods. *Process Safety and Environmental Protection*, **136**, 148-156. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.01.025>
- [12] 顾蒙, 王全国, 王溪舸, 等. 油氢合建站氢气泄漏扩散模拟及影响因素分析[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(1): 123-126.
- [13] 胡玮鹏, 陈光, 齐宝金, 等. 埋地纯氢/掺氢天然气管道泄漏扩散数值模拟[J]. 油气储运, 2023, 42(10): 1118-1127, 1136.
- [14] 刘自亮, 熊思江, 花争立, 等. 埋地输氢管道泄漏爆炸事故后果模拟分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(12): 94-100.
- [15] Zhou, Z., Tan, J., Zhang, J., Huang, X. and Wu, D. (2020) High Pressure Buried Gas Pipeline Leakage Temperature Drop Testing and Theory Analysis. *Numerical Heat Transfer, Part A. Application*, **78**, 18-28. <https://doi.org/10.1080/10407782.2020.1769437>
- [16] Liu, Z., Xiu, Z., Zhao, Y., Li, M., Li, P., Cai, P., et al. (2023) Experimental Study on the Leakage Temperature Field of Buried CO₂ Pipelines. *Environmental Science and Pollution Research*, **30**, 70288-70302. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27289-3>
- [17] 喻健良, 于帅, 闫兴清, 等. 超临界 CO₂ 埋地管道泄漏土壤形貌及温度研究[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(5): 1963-1970.