

ICS 75.060

CCS E 10



T

团 体 标 准

T/CI 588—2024

中低压纯氢/掺氢燃气多源多用户管输数值 模拟技术指南

Numerical simulation technical guide for multi-source and multi-user pipeline transportation of pure hydrogen/hydrogen-blended natural gas under low and medium pressures

2024 - 11 - 15 发布

2024 - 11 - 15 实施

中国国际科技促进会

发布

目 次

| | |
|------------------------------------|-----|
| 前言 | II |
| 引言 | III |
| 1 范围 | 1 |
| 2 规范性引用文件 | 1 |
| 3 术语和定义 | 1 |
| 4 总则 | 1 |
| 5 纯氢/掺氢燃气管输数值模拟过程 | 2 |
| 5.1 纯氢/掺氢燃气管输物理模型的建立与计算初值的确定 | 2 |
| 5.2 构建纯氢/掺氢燃气管输的数学模型 | 2 |
| 5.3 求解纯氢/掺氢燃气管输的数学模型 | 2 |
| 5.4 形成模拟结果报告 | 2 |
| 6 纯氢/掺氢燃气管输问题的简化和计算区域确定 | 2 |
| 6.1 纯氢/掺氢燃气管输问题的简化 | 2 |
| 6.2 纯氢/掺氢燃气管输问题计算区域确定 | 2 |
| 7 纯氢/掺氢燃气管输数学模型构建 | 2 |
| 7.1 变量与参数定义 | 2 |
| 7.2 数学方程 | 3 |
| 7.3 边界条件 | 4 |
| 7.4 初始条件 | 5 |
| 7.5 数学方程参数计算公式 | 6 |
| 8 纯氢/掺氢燃气管输数学模型求解 | 6 |
| 9 纯氢/掺氢燃气管输模拟结果报告 | 7 |
| 9.1 结果报告要求 | 7 |
| 9.2 文字说明 | 7 |
| 9.3 列表图形 | 7 |
| 附录 A（资料性） 报告的参考格式 | 8 |
| 参考文献 | 9 |

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国国际科技促进会提出并归口。

本文件起草单位：北京石油化工学院、中国石油大学（华东）、中国科学院金属研究所、深圳市燃气集团股份有限公司、长江大学、北京市燃气集团研究院、国家石油天然气管网集团有限公司科学技术研究总院分公司新能源储运研究中心、中国石油天然气股份有限公司规划总院、昆仑数智科技有限责任公司、福建技术师范学院、宁夏特种设备检验检测院、上海市特种设备监督检验技术研究院、北京青态科技有限公司、深港天然气管道有限公司。

本文件主要起草人：宇波、李敬法、李玉星、王俭秋、徐彬、郑度奎、彭世垚、刘翠伟、明洪亮、李璐伶、刘宗奇、王玉生、张伟、李敏、石国赟、徐维普、闫东雷、段鹏飞、王财林、柴冲、张一帆、王念榕、王晓峰、谭海川、杨涛、方益涛、赵杰、李建立。

引 言

我国天然气消费量呈逐年增长的态势，输送天然气的管网规模也在逐年增加。2020年，我国明确提出2030年“碳达峰”与2060年“碳中和”目标。向天然气中掺混一定比例的氢气可以有效地减少天然气的使用，有助于双碳目标的实现。氢气的性质与常规天然气组分性质差异较大，掺氢会对管道输运过程中的水热力特性产生影响，而且为了管道输送安全以及掺氢天然气的使用安全，需要对氢组分进行追踪。因此，有必要对纯氢/掺氢燃气在管道中的输运情况进行细致的仿真。

本文件从中低压纯氢/掺氢燃气多源多用户管输过程中流量、压力、温度及组分参数的数学方程、方程参数和边界条件等方面，给出中低压纯氢/掺氢燃气多源多用户管输过程的连续性方程、动量方程、能量方程、组分输运方程、相应的边界条件公式，以及相应的数值求解方法和流程，以引导、规范中低压纯氢/掺氢燃气多源多用户管输过程的流量、压力、温度及组分等参数的计算机计算及报告编制。

中低压纯氢/掺氢燃气多源多用户管输数值模拟技术指南

1 范围

本文件提供了中低压纯氢/掺氢燃气多源多用户管输的总则、数值模拟过程、问题的简化和计算区域的确定、数学模型构建、数学模型求解以及模拟结果报告的编制等方面的指导。

本文件适用于输送压力不超过4MPa的中低压纯氢/掺氢管道,包括纯氢/掺氢燃气多源多用户管输的数值模拟、现有天然气管道掺氢后管输特性的研究,以及纯氢/掺氢管道运输的设计。其他组分掺入天然气管道的数值模拟参考使用。

2 规范性引用文件

本文件没有规范性引用文件。

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

数值模拟 numerical simulation

采用有限差分法、有限体积法、有限单元法等数值求解方法,对特定的数学模型进行计算得到近似的结果,以模拟实际的物理过程。

注:本文件指一种计算机研究方法,在计算机上运用自编程序、开源软件、商业软件实施。

3.2

计算区域 computational domain

数值模拟中纯氢/掺氢燃气管道/管网空间区域。

3.3

计算变量 calculation parameters

纯氢/掺氢燃气多源多用户管输数值模拟中待求解的独立的物理量。

3.4

掺氢燃气 hydrogen-blended natural gas

将一定比例的氢气掺入天然气得到的气体燃料。

3.5

管网 pipe network

进行纯氢/掺氢燃气管输数值模拟时,由管道元件、压缩机和阀门等非管道元件、气源以及各元件之间的连接节点所组成的管道结构。

4 总则

纯氢/掺氢燃气管输过程数值模拟宜按照下列步骤进行:

- 根据纯氢/掺氢燃气管输的具体问题建立纯氢/掺氢燃气管输物理模型;
- 针对物理模型建立描述纯氢/掺氢燃气管输过程的包括动量、能量、质量和组分守恒数学模型及描述摩阻随流量变化等的数学模型;
- 根据计算区域进行网格划分并离散所构建的数学模型,获得离散方程组;
- 对所获得的离散方程组进行数值求解,预测纯氢/掺氢燃气管输过程中流量、压力、温度、组分等物理量的变化;
- 将模拟结果通过报告呈现,对所研究的纯氢/掺氢燃气管输过程进行解释或说明,并对纯氢/掺氢燃气管输工艺或控制过程进行指导等。

5 纯氢/掺氢燃气管输数值模拟过程

5.1 纯氢/掺氢燃气管输物理模型的建立与计算初值的确定

根据纯氢/掺氢燃气管输的具体问题，在仔细分析其物理过程的基础上，舍弃次要因素，抓住主要因素，通过合理的简化，确定物理模型及计算区域，并收集纯氢/掺氢燃气管输过程所需的操作参数及计算区域的几何参数。

5.2 构建纯氢/掺氢燃气管输的数学模型

在纯氢/掺氢燃气管输物理模型的基础上，宜根据质量、动量、能量、组分守恒原理，采用一组数学方程来刻画纯氢/掺氢燃气管输过程中流量（ m ）、压力（ p ）、温度（ T ）和氢气浓度（ c_1 ）等参数在空间上的分布和随时间的变化。这组数学方程包括以下四个部分：

- 数学方程：物理模型上质量、动量、能量以及氢气浓度在空间上的分布和随时间的变化的偏微分方程组；
- 边界条件：物理模型边界上的气源流量（ m ）、压力（ p ）、氢气掺入流量（ m_{H_2} ）等参数随时间变化关系式；
- 初始条件：输送起始时刻物理模型上压力（ p_0 ）和温度（ T_0 ）等参数的分布数据；
- 数学方程参数：基于与纯氢/掺氢燃气管输相关试验或已公开的文献，确定数学模型方程中的参数计算公式，如掺氢天然气的摩阻（ λ ）、比定压热容（ c_p ）等。

5.3 求解纯氢/掺氢燃气管输的数学模型

宜根据计算区域的几何形状，选择合适的网格划分方法，对计算区域进行网格划分。宜采用有限差分法、有限体积法、有限单元法等数值方法离散纯氢/掺氢燃气管输的数学模型，得到离散方程组。可在计算机上运用自编程序，求解纯氢/掺氢燃气管输数学模型的离散方程组，获得压力、流量等物理量的数值计算结果。

5.4 形成模拟结果报告

对数值计算结果进行一系列加、减、乘、除、平均、积分等数学运算，得到研究或工程需要的数据，可采用列表、作图和文字等形式呈现，形成模拟结果报告。

6 纯氢/掺氢燃气管输问题的简化和计算区域确定

6.1 纯氢/掺氢燃气管输问题的简化

根据纯氢/掺氢燃气管输的具体问题，抓住主要因素，舍弃次要因素，进行以下假设和简化：

- 将纯氢/掺氢燃气管输过程简化为气体仅沿着管道轴线方向的一维流动问题；
- 掺入氢气后，氢气立刻与天然气均匀混合；
- 能量交换主要包括管道内部的对流换热以及气体与外界的换热，忽略管道内部气体的导热过程；
- 天然气组分已知，可通过状态方程求解得到气体物理性质。

6.2 纯氢/掺氢燃气管输问题计算区域确定

根据纯氢/掺氢燃气管输的具体问题，确定管道轴线为计算区域的尺寸，主要包括：

- 确定管道的长度（ L ）、直径（ d ）、倾角（ θ ）几何参数；
- 确定管道的连接关系等拓扑结构参数。

7 纯氢/掺氢燃气管输数学模型构建

7.1 变量与参数定义

7.1.1 计算变量

计算变量为纯氢/掺氢燃气管输数值模拟过程中求解的物理量（见表1）。

表1 计算变量表

| 符号 | 名称 | 单位 | 说明 |
|-------|------|------|--|
| m | 质量流量 | kg/s | 气体流量 |
| p | 压力 | Pa | 气体压力 |
| T | 温度 | K | 开尔文温度和摄氏度的关系： $K = ^\circ\text{C} + 273.15$ |
| c_i | 摩尔分数 | % | 组分 <i>i</i> 的含量与气体总量的比值 |

7.1.2 模型参数

模型参数为纯氢/掺氢燃气管输数值模拟过程中需要输入的参数，包括管道几何参数（见表2）、基本参数（见表3）。

表2 管道几何参数

| 符号 | 名称 | 单位 | 说明 |
|----------|------|-----|--------|
| l | 管道长度 | m | 管道几何参数 |
| d | 管道内径 | m | |
| θ | 管道倾角 | rad | |

表3 基本参数

| 符号 | 名称 | 单位 | 说明 |
|----------|------|----|--------------|
| p_0 | 初始压力 | Pa | 取管道实际压力或人为给出 |
| T_0 | 初始温度 | K | 取管道实际温度或人为给出 |
| c_{i0} | 初始浓度 | % | 取管道实际浓度或人为给出 |

7.2 数学方程

7.2.1 概述

管道是管网中最为重要的元件，纯氢/掺氢燃气管输数值模拟即通过数值计算方法再现管道内纯氢/掺氢燃气的流动状态。用来描述纯氢/掺氢燃气在管道内流动状态的控制方程称为管道的数学模型，主要包含连续性方程、动量方程和能量方程，其中前两者又可称为水力方程，后者称为热力方程。同时给出管道内部组分对流扩散方程以及水力摩阻系数的计算公式。根据气体组分的流动特征，给出气体组分追踪的数学模型。

7.2.2 连续性方程

由质量守恒定律，可得到纯氢/掺氢燃气在管道内流动的连续性方程式（1）。

$$\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w A)}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：

ρ —— 气体密度，单位为千克每立方米（kg/m³）；

A —— 管道横截面面积，单位为平方米（m²）；

w —— 气体流速，单位为米每秒（m/s）；

t —— 时间，单位为秒（s）；

x —— 空间，单位为米（m）。

7.2.3 动量方程

由动量守恒定律，可得到纯氢/掺氢燃气在管道内流动的动量方程式（2）。

$$\frac{\partial(\rho Aw)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w^2 A)}{\partial x} + \frac{\partial(Ap)}{\partial x} = -\frac{\lambda}{2} \frac{\rho Aw|w|}{d} - g\rho A \sin\theta \quad (1)$$

式中:

- ρ ——气体密度, 单位为千克每立方米 (kg/m^3);
- A ——管道横截面面积, 单位为平方米 (m^2);
- w ——气体流速, 单位为米每秒 (m/s);
- t ——时间, 单位为秒 (s);
- x ——空间, 单位为米 (m);
- p ——压力, 单位为帕斯卡 (Pa);
- λ ——水力摩阻系数, 无量纲;
- g ——重力加速度, 单位为米每二次方秒 (m/s^2);
- d ——管道内径, 单位为米 (m);
- θ ——管道倾角, 单位为弧度 (rad)。

7.2.4 能量方程

由能量守恒定律, 可得到纯氢/掺氢燃气在管道内流动的能量方程式 (3)。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\left(e + \frac{w^2}{2} + gs \right) \rho A \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(h + \frac{w^2}{2} + gs \right) \rho w A \right] = -\frac{\partial Q_q}{\partial x} \rho w A \quad (1)$$

式中:

- t ——时间, 单位为秒 (s);
- e ——气体单位内能, 单位为焦耳每千克 (J/kg);
- w ——气体流速, 单位为米每秒 (m/s);
- g ——重力加速度, 单位为米每二次方秒 (m/s^2);
- x ——空间, 单位为米 (m);
- s ——管道高程, 单位为米 (m);
- ρ ——气体密度, 单位为千克每立方米 (kg/m^3);
- A ——管道横截面面积, 单位为平方米 (m^2);
- h ——气体单位焓, 单位为焦耳每千克 (J/kg);
- Q_q ——单位质量的气体的热损失, 单位为焦耳每千克 (J/kg)。

7.2.5 组分输运方程

由组分守恒定律, 可得到纯氢/掺氢燃气在管道内流动的组分输运方程式 (4)。

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + u_m \frac{\partial c_i}{\partial x} = K \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中:

- c_i ——管道横截面气体平均浓度, %;
- t ——时间, 单位为秒 (s);
- u_m ——气体平均流速, 单位为米每秒 (m/s);
- x ——空间, 单位为米 (m);
- K ——有效扩散系数, 单位为平方米每秒 (m^2/s)。

7.3 边界条件

7.3.1 流动方程边界条件

流动方程的边界条件分为两种，一种为外部边界条件，一般为气源处节点的流量或压力；另外一种为内部边界条件，表达为内部连接节点上的流量平衡和压力平衡。据此，可得到流动方程的边界条件公式（5）～公式（8）。

$$m = m_s(t) \dots\dots\dots (1)$$

$$p = p_s \dots\dots\dots (2)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{in}} m_{in,i} = \sum_{j=1}^{N_{out}} m_{out,j} \dots\dots\dots (3)$$

$$p_{in,1} = \dots = p_{in,N_{in}} = p_{out,1} = \dots = p_{out,N_{out}} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

m —— 气体质量流量，单位为千克每秒（kg/s）；

m_s —— 气源节点处质量流量，单位为千克每秒（kg/s）；

$m_{in,i}$ —— 第 i 个与节点相连接且气体流进节点的元件气体质量流量，单位为千克每秒（kg/s）；

$m_{out,j}$ —— 第 j 个与节点相连接且气体流出节点的元件气体质量流量，单位为千克每秒（kg/s）；

N_{in} —— 与节点相连接且气体流入节点的元件个数；

N_{out} —— 与节点相连接且气体流出节点的元件个数；

$p_{in,1}$ —— 与节点相连接的第1个元件进口压力，单位为帕斯卡（Pa）；

$p_{in,N_{in}}$ —— 与节点相连接的第 N_{in} 个元件进口压力，单位为帕斯卡（Pa）；

$p_{out,1}$ —— 与节点相连接的第1个元件出口压力，单位为帕斯卡（Pa）；

$p_{out,N_{out}}$ —— 与节点相连接的第 N_{out} 个元件出口压力，单位为帕斯卡（Pa）。

7.3.2 能量方程边界条件

能量方程的边界条件分为两种，一种为外部边界条件，一般为气源处节点的温度；另外一种为内部边界条件，表达为内部连接节点上的能量平衡，即元件出口处的温度处处相等。据此，可得到能量方程的边界条件公式（9）。

$$T_{out,1} = \dots = T_{out,N_{out}} = \sum_{i=1}^{N_{in}} |c_p m T|_{in,i} / \sum_{j=1}^{N_{out}} |c_p m|_{out,j} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$T_{out,1}$ —— 与节点相连接的第1个元件的出口气体温度，单位为卡尔文（K）；

$T_{out,N_{out}}$ —— 与节点相连接的第 N_{out} 个元件的出口气体温度，单位为卡尔文（K）；

c_p —— 气体比定压热容，单位为焦耳每千克开尔文 [J/(kg·K)]；

m —— 气体质量流量，单位为千克每秒（kg/s）；

N_{in} —— 与节点相连接且气体流入节点的元件个数；

N_{out} —— 与节点相连接且气体流出节点的元件个数。

7.3.3 组分输运方程边界条件

组分输运方程的边界条件分为两种，一种为外部边界条件，一般为气源处某种组分的浓度；另外一种为内部边界条件，表达为内部连接节点上的组分平衡。据此，可得到组分输运方程边界条件公式（10）。

$$\sum_{i=1}^{N_{in}} c(k)_{in,i} = \sum_{j=1}^{N_{out}} c(k)_{out,j} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

N_{in} —— 与节点相连接且气流流入节点的元件个数；

$c(k)_{in,i}$ —— 与节点相连接气体流入节点的第 i 个元件的组分 k 的浓度；

N_{out} —— 与节点相连接且气流流出节点的元件个数；

$c(k)_{out,j}$ —— 与节点相连接气体流出节点的第 j 个元件的组分 k 的浓度。

7.4 初始条件

7.4.1 流动方程初始条件

根据待模拟的实际问题而定。

7.4.2 能量方程初始条件

根据待模拟的实际问题而定。

7.4.3 组分输运方程初始条件

根据待模拟的实际问题而定。

7.5 数学方程参数计算公式

7.5.1 水力摩阻计算公式

雷诺数计算见公式(11)，层流区 ($Re < 2000$) 计算见公式(12)，临界区或临界过渡区 ($2000 < Re < 4000$) 计算见公式(13)，紊流区 ($Re > 4000$) 计算见公式(14)。

$$Re = \frac{\rho w d}{\mu} \dots\dots\dots (1)$$

$$\lambda = \frac{64}{Re} \dots\dots\dots (2)$$

$$\lambda = 0.0025 \sqrt[3]{Re} \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{K_e}{3.7d} + \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \dots\dots\dots (4)$$

式中：

Re ——雷诺数；

ρ ——气体密度，单位为千克每立方米 (kg/m^3)；

w ——气体流速，单位为米每秒 (m/s)；

d ——管道内径，单位为米 (m)；

μ ——气体动力粘度，单位为帕秒 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)；

λ ——水力摩阻系数，无量纲；

K_e ——管道内部的当量粗糙度，单位为米 (m)。

7.5.2 有效扩散系数计算公式

K 宜根据流动所处的流态进行具体计算。

7.5.3 气体状态方程的选取

在计算纯氢/掺氢燃气物性参数时，宜根据掺氢比的范围选用合适的气体状态方程，包括RK (Redlich-Kwong) 方程、PR(Peng-Robinson) 方程、BWRS(Benedict-Webb-Rubin-Starling) 方程、AGA8-92DC方程、GERG-2008方程、NIST(National Institute of Standards and Technology)的经验公式等。

8 纯氢/掺氢燃气管输数学模型求解

8.1 建立数学模型后，在计算机上可运用自编程序，采用有限差分法、有限体积法、有限单元法等数值求解方法，进行求解计算。

8.2 关键求解步骤宜包括：

- a) 计算区域的离散；
- b) 控制方程和边界条件的离散；
- c) 离散方程的求解。

8.3 数值模拟结果宜不受计算区域离散方式、网格大小和所采用的代数方程组求解方法的影响，不同计算区域离散方式、网格大小和所采用代数方程组求解方法组合所计算出的结果，相对偏差宜小于某一值（一般取 3%）。还可采用实际管网采集的数据对计算结果进行对比。

9 纯氢/掺氢燃气管输模拟结果报告

9.1 结果报告编制规则

对纯氢/掺氢燃气管输问题的数值计算结果进行相应数学运算或处理，得到研究或工程需要的数据，可采用列表、作图等形式呈现，形成结果报告。结果报告中还宜有对所研究的纯氢/掺氢燃气管输过程的解释或说明，以及对纯氢/掺氢燃气管输工艺或控制过程的评价或指导等内容，这些内容具有重要的工程意义及未来前瞻性指导价值。结果报告格式包括但不限于附录A所提供参考格式。

9.2 文字说明

文字报告宜包括：对所研究纯氢/掺氢燃气管输工程问题的说明、物理模型建立的说明、数学模型的说明、求解方法的说明，对研究或工程需要的数据、列表或图形的解释，对纯氢/掺氢燃气管输工艺和控制过程的评价及指导作用的说明。

9.3 列表图形

报告中宜包含管道沿线气体流量(m)、压力(p)、温度(T)与组分(c_i)随空间分布的列表和图形；管道某点气体流量(m)、压力(p)、温度(T)与组分(c_i)随时间发展的列表和图形等；管道沿线流量(m)、压力(p)、温度(T)与组分(c_i)的时空云图或等值线图；气源不同流量、压力、温度和组分条件下管道某点气体流量(m)、压力(p)、温度(T)与组分(c_i)随时间发展的列表和图形等。相关图表可增加文字说明。

附录 A
(资料性)
报告的参考格式

报告的参考格式见图A.1。

| |
|--|
| <p>中低压纯氢/掺氢燃气管输数值模拟研究报告</p> <p>作者： 单位：</p> <p>报告简介：（此处对中低压纯氢/掺氢燃气管输数值模拟研究报告进行简介）</p> <p>一、工程背景 （此处对所研究的中低压纯氢/掺氢燃气管输工程问题进行详细介绍）</p> <p>二、物理模型 （此处对中低压纯氢/掺氢燃气管输数值模拟的物理模型进行详细介绍，包括但不限于物理过程简化及计算区域确定、操作参数及几何参数收集）</p> <p>三、数学模型 （此处对中低压纯氢/掺氢燃气管输数值模拟的数学模型进行详细介绍，包括但不限于变量与参数定义、流动方程、能量方程、组分方程、边界条件和初始条件等）</p> <p>四、模型求解 （此处对中低压纯氢/掺氢燃气管输数值模拟的模型求解方法进行详细介绍，包括但不限于计算区域、控制方程、边界条件的离散过程以及离散方程的求解方法等）</p> <p>五、管输工艺分析 （此处详细分析管输过程中气体流量、压力、温度和氢气浓度等参数随空间、时间的变化过程，以及对于天然气管道掺入氢气后对上述过程的影响规律，提出合适的掺氢比例、合理的运行方案等，以及根据以上结果来优化管道输送方案等）</p> |
|--|

图 A.1 中低压纯氢/掺氢燃气管输数值模拟研究报告参考格式

参 考 文 献

- [1] 李敬法, 宇波, 李玉星, 万忠民, 杨光. 纯氢及掺氢天然气输送技术与管理[M]. 北京: 中国石化出版社, 2024.
- [2] 李玉星, 姚光镇. 输气管道设计与管理[M]. 北京: 中国石油大学出版社, 2009.
- [3] 李长俊, 黄泽俊, 贾文龙. 天然气管道输送(第四版)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2024.
- [4] 宇波, 李敬法, 孙东亮, 邓雅军. 《数值传热学实训——NHT/CFD原理与应用》[M]. 北京: 科学出版社, 2024.
- [5] 李敬法, 苏越, 张衡, 宇波. 掺氢天然气管道输送研究进展[J]. 天然气工业, 2021, 41(04): 137-152.
- [6] 李敬法, 李建立, 王玉生, 赵杰, 李汉勇, 宇波. 氢能储运关键技术研究进展及发展趋势探讨[J]. 油气储运, 2023, 42(08): 856-871.
- [7] 李敬法, 宇波, 苏越, 刘翠伟, 李玉星. 静置工况下掺氢天然气浓度分布规律[J]. 天然气工业, 2024, 44(2): 145-155.
- [8] 李玉星, 刘翠伟, 彭浩平, 韩辉, 朱建鲁, 宋光春, 王财林. 氢能运输方式与技术发展现状及挑战[J]. 前瞻科技, 2024, 3(2): 81-93.
- [9] 李长俊, 宇波, 张对红, 杨毅, 苏怀, 虞维超, 韩东旭, 贾文龙. 油气综合立体调运关键技术现状与趋势[J]. 前瞻科技, 2024, 3(2): 39-49.
- [10] Zhang Heng, Li Jingfa, Su Yue, Wang Peng, Yu Bo. Effects of hydrogen blending on hydraulic and thermal characteristics of natural gas pipeline and pipe network[J]. Oil & Gas Science and Technology-Rev. IFP Energies nouvelles, 2021, 76, 70.
- [11] Su Yue, Li Jingfa, Guo Wangyi, Zhao Yanlin, Li Jianli, Zhao Jie, Wang Yusheng. Prediction of mixing uniformity of hydrogen injection in natural gas pipeline based on a deep learning model[J]. Energies, 2022, 15, 8694.
- [12] Su Yue, Li Jingfa, Yu Bo, Zhao Yanlin, Yuan Qing. Comparative study of mathematical models for describing the distribution of hydrogen-enriched natural gas in enclosed spaces. Energy & Fuels, 2024, 38, 2929-2940.
- [13] Huang Huijie, Li Jingfa, Sun Xu, Yu Bo, Zhang Wei, Ma Lixin. Influence analysis on the storage capacity of hydrogen-blended natural gas pipeline [J]. Computational Energy Science, 2024, 1(1): 3-16.
-