

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2020.05.07

光面式高压氢气泄漏快速可视化检测方法 方法及数值仿真研究

苗扬^{1,2}, 陈彦京³, 王凯¹, 齐巍⁴, 卢强⁴, 张蒙¹

(1. 北京工业大学 材料与制造学部, 北京 100124; 2. 北京工业大学 先进制造北京市重点实验室, 北京 100124;
3. 中国航天科工集团第三研究院, 北京 100074; 4. 北京卡达克科技中心有限公司, 北京 100070)

摘要: 针对高压氢泄漏扩散的检测问题, 国内外学者利用实验和数值模拟等方法进行了相关研究, 提出了一些检测方法, 这些检测方法结果可靠, 但是普遍的不足之处是检测反应速度慢。本文提出了一种光面式高压氢气泄漏快速可视化检测方法, 利用半导体激光器发射激光, 通过柱面透镜组及反射镜后形成光面(laser sheet)照射储氢罐, 利用安装在储氢罐上方特定位置的 CCD 相机拍照采集图像并传输至计算机, 经数字图像处理对高压氢气泄漏情况进行鉴别。基于该方法开展仿真实验, 建立高压氢气射流的分层流动模型, 实验结果与前人研究的实验公式吻合, 证明了该方法的可行性; 开展了泄漏口直径为 1 mm 时, 3, 5, 7 MPa 压强的仿真实验, 以及压强为 5 MPa 时泄漏口直径为 0.5, 1, 1.5 mm 的仿真实验, 获得了高压氢气泄漏口直径与特定高度、气射流边界层直径的解析关系, 以及高压氢气压力与射流边界层直径的解析关系, 为实现高压氢气泄漏快速准确检测提供了有力支撑。

关键词: 氢气泄漏; 传感器; 仿真; 光面

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2020)05-0037-06

A Laser Sheet Method and Simulation for Rapid Visual Detection of High Pressure Hydrogen Leakage

MIAO Yang^{1,2}, CHEN Yanjing³, WANG Kai¹, QI Wei⁴, LU Qiang⁴, ZHANG Meng¹

(1. Beijing University of Technology, Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing 100124, China;

2. Beijing University of Technology, Beijing Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Beijing 100124, China;

3. China Aerospace Science and Industry Corporation Limited, Beijing 100074, China;

4. Beijing CATARC Technology Center Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: For the detection of high pressure hydrogen leakage and diffusion, domestic and foreign scholars have carried out relevant research by using experiment and numerical simulation, and put forward some detection methods. These detection methods have reliable results, but generally have the shortcomings of slow response. In this paper, a fast visual detection method of high pressure hydrogen leakage based on laser sheet is proposed. The laser is emitted by a semiconductor laser, and a laser sheet is formed after passing through a cylindrical lens group and a mirror to illuminate the hydrogen storage tank. A CCD camera installed at a specific location above the hydrogen storage tank takes pictures and transmits them to a computer. The high-pressure hydrogen leakage was identified after digital image processing. Based on this method, the layered flow model of high-pressure hydrogen jet is established. The experimental results are consistent with the previous experimental formula, which proves the feasibility of the method; the simulation experiments of 3, 5, 7 MPa pressure when the leakage diameter is 1 mm, and 0.5, 1, 1.5 mm leakage diameter when the pressure is 5 MPa are carried out. The analytical relationship between the diameter of high pressure hydrogen leak and the specific height, the diameter of gas jet boundary layer, and the analytical relationship between the pressure of high pressure hydrogen and the diameter of jet boundary layer are obtained by the simulation experiment, which provides a strong support for the rapid and accurate detection of high-pressure hydrogen leakage.

Key words: hydrogen leakage; sensor; simulation; laser sheet

0 引言

氢能因其环保、高热值、可存储、可再生等优点,

备受世界各国青睐, 是人类战略能源发展目标之一, 但是氢气具有高可燃性、高燃烧热、高爆炸能等潜在危险^[2], 加之液氢存储系统具有复杂的结构, 一旦发

生泄漏,将迅速蒸发汽化为氢气,遇到静电或者微弱的火星均有可能发生爆燃爆轰,极易引发安全事故^[3]。因此,对氢气泄漏情况进行实时监测具有重要意义。

针对储氢罐液氢泄漏扩散后快速检测的规律,国内外学者利用实验和数值模拟等方法进行了相关研究。2017 年,浙江大学吴梦茜^[4]建立了大规模液氢泄漏扩散过程的数值模型,并对影响因素进行了对比分析,提出了大规模液氢泄漏扩散的后续补救和防护措施的指导性建议。2019 年,赵康等人^[5]利用 CFD 软件模拟受限空间内的液氢泄漏扩散,通过编译自定义函数(UDF),描述液氢相变过程中传热、传质及相应计算模型所需的边界条件,得到了不同条件下液氢泄漏过程中温度和浓度的分布情况,分析了风速、泄漏速率、地面温度等对液氢泄漏扩散的影响。谢永春^[6]采用质谱分析仪的方法对氦气、氮气的泄漏扩散进行了检测。上述研究都是利用数值仿真,采用化学反应的方式对氢气泄漏扩散进行检验,结果可靠,但是反映泄漏情况的速度较慢。本文提出一种基于光面式高压氢泄漏检测的物理方法,能够达到可视化快速检测的目的,对于预防氢气泄漏造成危害,增强液氢存储系统的本质安全具有重要意义。

1 氢泄漏检测原理及方法

1.1 检测原理

光面式高压氢气泄漏快速可视化检测方法的装置,包括激光发射器、透镜、反射镜、CCD 相机、控制电路和计算机等部分,如图 1 所示。当高压储氢罐发生氢气泄漏时,会产生高压氢气射流,高压氢气从泄漏口处向外射出^[7-8]。由于高压氢气密度较大,所以折射率远大于周围的空气,故可直接将其作为示踪粒子^[9-10]。利用控制电路发出信号,使激光发射器发出激光,通过柱面透镜组(长焦柱面透镜和短焦柱面透镜共焦安置)及反射镜后形成光面,照亮储氢罐表面,安装在储氢罐上方特定位置的 CCD 相机对储氢罐表面进行拍照,并将采集到的图像信息经控制电路传输至计算机,运用数字图像处理技术,即可得到发生泄漏时泄漏口位置、大小以及高压氢气射流方向等信息。

1.2 激光源的选择

当发生氢气泄漏时,高压氢气射流形成流场,作为示踪粒子的高压氢气需要被照亮后才能被 CCD 相机记录下来。恰好,激光是一种拥有高能量密度的光源,可以非常容易地聚集成品质较好的平行光照明流场并且不会产生色差,是一种品质非常好的光源。

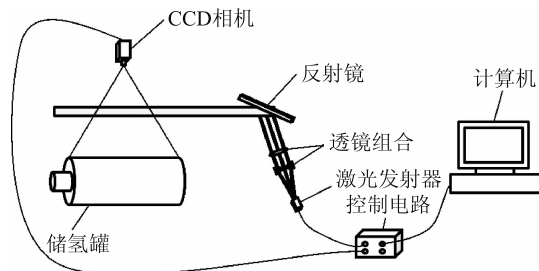


图 1 光面式高压氢气泄漏快速可视化检测方法装置组成

流场照明对检测结果的影响是显著的,选择设备照明光线的强度等性能应与高压氢气的光散射特性相匹配,并且应与所选用的 CCD 相机的感光范围相适应。除了对检测结果的影响,安全问题也十分重要。氢气的点火能为 0.0179 mJ,为防止激光照射使高压氢气发生燃烧、爆炸,所选择的激光发射器的光强应远小于氢气点火能。

激光发射器输出的能量与波长有关,其计算公式为

$$E = h \times H \quad (1)$$

式中: E 为能量, J; h 为普朗克常数, 即 6.63×10^{-34} J · s; H 为频率, Hz。

而

$$H = \frac{C}{\lambda} \quad (2)$$

式中: C 为光速, 即 3×10^{17} nm/s; λ 为波长, nm。

根据式(3)计算出使氢气达到点火能的临界波长

$$\lambda = h \times \frac{C}{E} \quad (3)$$

由计算可知,激光波长为 1.1×10^{-21} nm 时,会使氢气达到点火能,波长越长,激光发射器的输出能量越小。常用的激光发射器如氦氖激光发射器、CO₂激光发射器的输出能量均远小于与氢气的点火能(常用的氦氖激光发射器波长约为 632.8 nm, CO₂激光发射器波长约为 10.6 μm),证明了实验方案的安全性。

2 数值仿真实验分析

2.1 仿真模型

根据高压氢气射流的分层流动模型,对储存压力为 5 MPa 的氢气在直径 1 mm 的泄漏口处泄漏形成的高压氢气射流进行数值仿真分析^[11]。

仿真采用的几何模型根据李雪芳等人研究的高压氢气射流分层流动实验建立。实验中采用的喷嘴为标准的圆形出口喷嘴,并且设置高压氢气射流方向与重力方向相反,所以仿真采用二维轴对称几何模型,如图 2 所示。

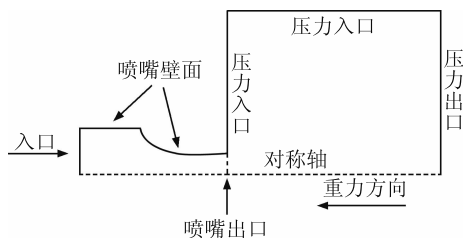


图2 高压氢气射流几何模型示意图

仿真所用软件为 Gambit 和 Fluent2020R1。首先使用 Gambit 软件对仿真模型进行四边形网格划分，再使用 Fluent2020R1 进行网格细化，并开启动态自适应。仿真采用四方程模型进行，并且采用基于压力的求解器进行计算，动量和能量方程的对流项采用二阶迎风差分格式，混合气体采用多相流模型计算。设置环境压力温度为 300 K，压力为 1 个标准大气压，设置重力方向与射流方向反向，边界条件如图 2 所示，左侧入口设置为压力入口条件，上方和右侧边界设置为压力边界。为了防止计算过程中出现仿真错误，如产生氢气射流沿左侧边界向上布满整个计算区域的非物理现象，故左侧采用质量和流量均很小的空气入口。

2.2 仿真结果对比

2.2.1 高压氢气射流激波结构

仿真结果使用 MATLAB 处理后如图 3 所示，能够明显看到高压氢气的射流核心区（图 3 中间红、黄颜色所在区域）、边界层区（图 3 绿色区域）和马赫盘以及马赫盘下游反射波。图 3 中蓝绿黄红的颜色表示数值从低到高的马赫数，在射流核心区靠近马赫盘处，马赫数达到最高为 5.85，在边界层区，马赫数最低，约为 1.5。核心区从泄漏口到马赫盘，马赫数不断增大，直到马赫盘马赫数达到最大，当高压氢气射流经过马赫盘后，射流的压力和温度会逐渐降低到与周围空气的压力、温度相同，同时马赫数也骤降。

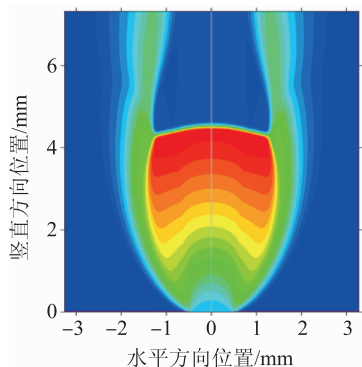


图3 5 MPa-1 mm 高压氢气射流激波结构马赫数云图

CCD 相机拍摄的图片经数字图像处理后的灰度图像如图 4 所示，可以明显看到高压氢气射流与周围空气的亮暗有明显的差别。比较图 3 仿真结果与图 4 灰度图像，二者所示高压氢气射流的激波结构一致，证明了仿真实验的可行性。

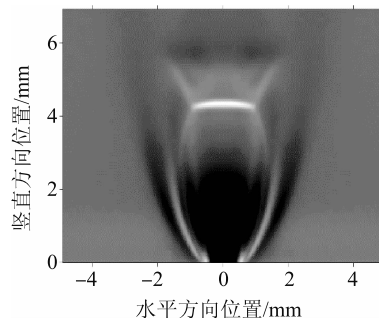


图4 氢气射流灰度图像

2.2.2 靠近泄漏口的射流核心区域

当激光照射区域为靠近泄漏口的射流核心区时高压氢气射流 2 mm 处激波结构截面图像如图 5 所示。可以明显看到不同马赫数的圆环结构，马赫数先从低逐渐升高，再从高降低。CCD 相机拍摄的图片经数字图像处理后的灰度图像如图 6 所示，可以明显看到一层一层灰度值不同的圆环，根据圆环的位置与大小即可判断泄漏口的位置与大小。

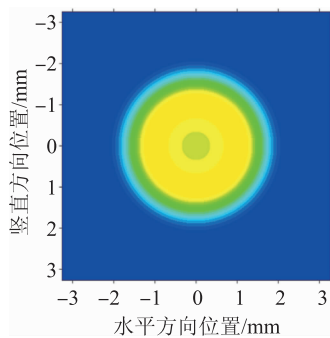


图5 射流核心区靠近泄漏口

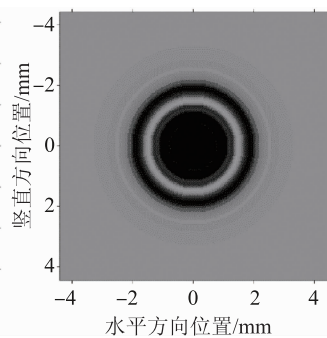


图6 射流核心区靠近泄漏口灰度图像

2.2.3 靠近马赫盘的射流核心区域

当激光照射区域为靠近马赫盘的射流核心区时，高压氢气射流 4 mm 处激波结构截面，图像如图 7 所示，能够清晰看到边界层和射流核心区。从外圈的边界层到中心的射流核心区，颜色由蓝变绿再变黄最后变红，马赫数逐渐增大。此时高压氢气射流的速度逐渐达到最大，压力和温度也达到最大。用 CCD 相机拍摄的图片经数字图像处理后的图像如图 8 所示，相比图 6 射

流核心区靠近泄漏口的灰度图像, 层次略显模糊, 但还是可以看出来一层一层的不同灰度的圆环。

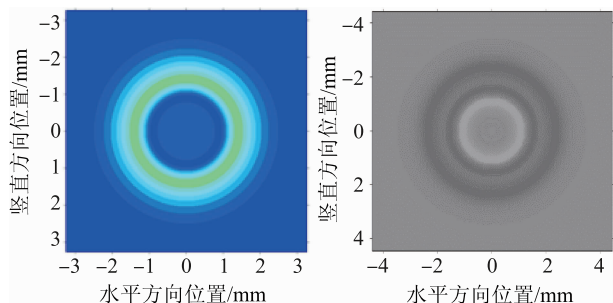


图 7 射流核心区靠近马赫盘 图 8 射流核心区靠近马赫盘灰度图像

2.2.4 马赫盘以外区域

当激光照射在马赫盘外时, 高压氢气射流 6 mm 处激波结构截面如图 9 所示。可以看出此时高压氢气的马赫数明显小于图 5、图 7, 已经接近环境情况。这是由于高压氢气射流经过马赫盘后, 压力与温度逐渐恢复到环境温度。虽然不如激光照射在马赫盘以内的图像清晰, 但依旧可以看出高压氢气射流的位置。用 CCD 相机拍摄的图像经数字图像处理后的灰度图像如图 10 所示。相比马赫盘以内的两张灰度图像图 6 与图 8, 图 10 所示的马赫盘以外灰度图像非常模糊。这是由于高压氢气射流经过马赫盘后, 压力和温度逐渐降低到与周围空气相同, 因此根据该图像很难判断出高压氢气泄漏口的位置。

由以上三组图像对比可知, 激光照射在马赫盘以内射流核心区时, 安装在上方特定位置的 CCD 相机能

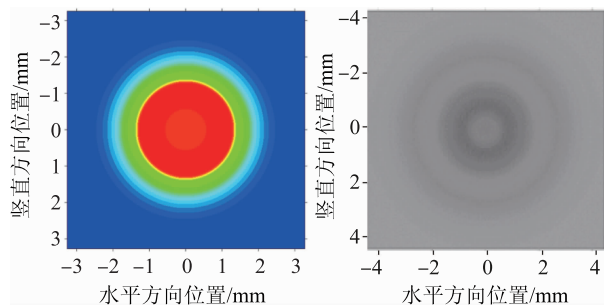


图 9 马赫盘以外 图 10 马赫盘以外灰度图像

够清晰拍摄高压氢气射流图像, 利用数字图像处理技术即可判断氢气是否泄漏以及泄漏的位置。当激光平行照射在马赫盘以外的射流核心区外时, CCD 相机拍摄的高压氢气射流图像比较模糊, 难以判断高压氢气泄漏的情况。

3 压强及泄漏口直径仿真实验

根据上述得到的高压氢气射流图像, 应用数字图像处理技术对图像进行反推, 可判断高压储氢罐泄漏口的大小与泄漏位置。泄漏口位置为各高压氢气射流图像圆环重合中心处。由仿真结果可知, 高压氢气射流的图像与高压氢气的压强和泄漏口的大小有关, 下面具体研究它们之间的关系。

3.1 压强组模拟结果

对直径 1 mm 的泄漏口分别在 3, 5, 7 MPa 三个不同压强条件进行仿真, 使用 MATLAB 处理后, 结果如图 11 所示。

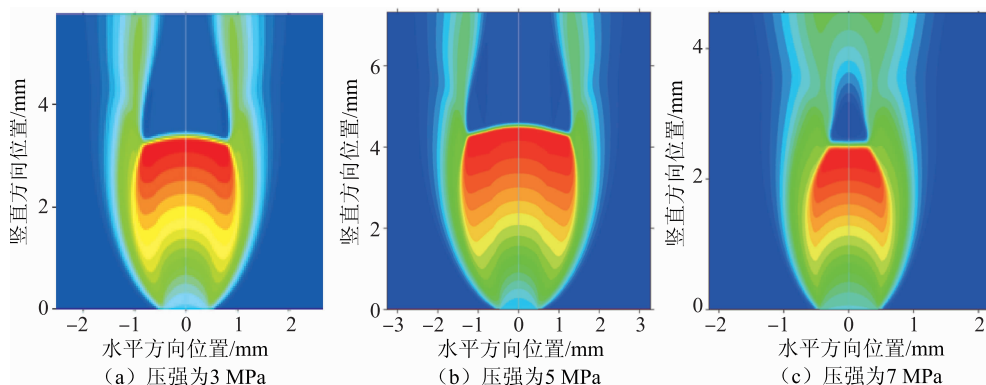


图 11 泄漏口直径为 1 mm 时, 不同压强条件下高压氢气射流激波结构马赫数云图

由图 11 可以看出, 压强为 3, 5, 7 MPa 时, 2 mm 高处截面仍在高压氢气射流核心区, 但压强为 5 MPa 与 7 MPa 时, 4 mm 高处截面在马赫盘以外, 不在核心区, 所以用 MATLAB 分别仿真其在 2 mm 截面处情况,

如图 12 所示。

根据图像, 使用 MATLAB 计算出高压氢气射流的马赫盘以下边界层直径, 即绿色圆环外圈的直径, 如表 1 所示。

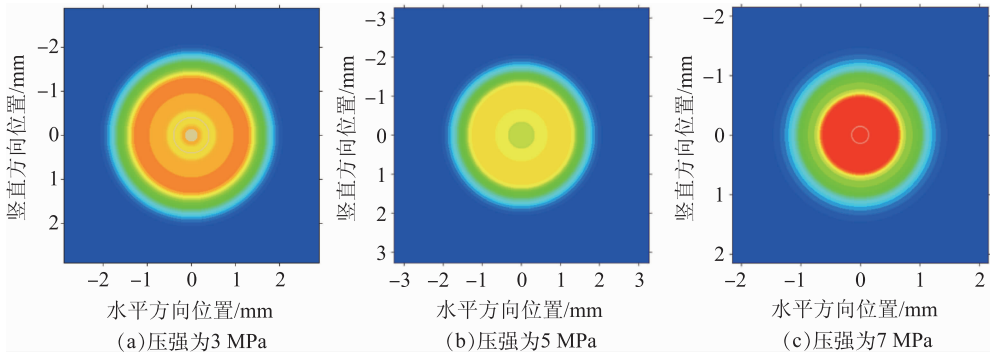


图 12 泄漏口直径为 1 mm 时不同压强条件下高压氢气射流激波结构 2 mm 截面马赫数云图

表 1 不同压强条件下 1 mm 泄漏口直径高压氢气射流激波结构在 2 mm 高处边界层直径

压强/MPa	核心区直径/mm
3	3.48
5	3.34
7	2.18

由表 1 可知，随着压强的增大，1 mm 泄漏口直径高压氢气射流激波结构在 2 mm 高处边界层的直径不断减小，且减小速度不断增加。

对表 1 中的数据用二阶多项式算法进行拟合，可得 1 mm 泄漏口直径条件下高压氢气射流激波结构在 2 mm 高边界层直径与高压氢气压强的关系如式(4)。

$$D = -0.1275 p^2 + 0.95p + 1.777 \tag{4}$$

式中：D 为核心区直径，mm；p 为高压氢气的压强，MPa。

3.2 泄漏口直径组模拟结果

对压强为 5 MPa 的泄漏口进行 3 个不同泄漏口直径条件的仿真，泄漏口直径条件分别为 0.5，1，1.5 mm，经 MATLAB 处理后结果如图 13 所示。

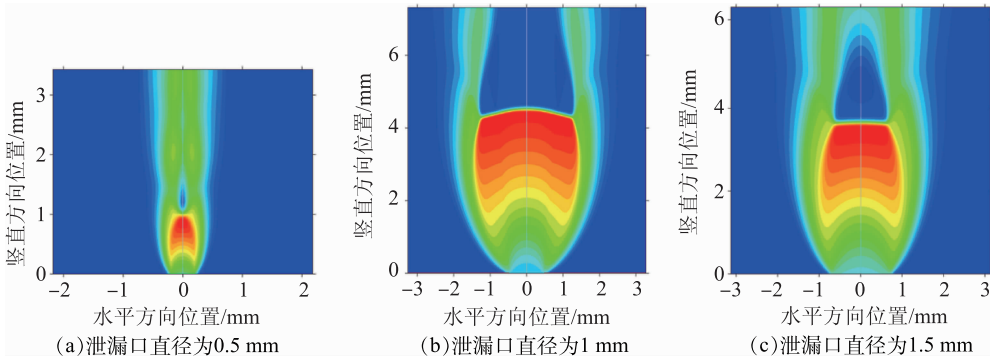


图 13 压强为 5 MPa 时不同泄漏口直径条件下高压氢气射流激波结构马赫数云图

由图 13 可以看出，1 mm 高处截面仍在高压氢气射流核心区，压强为 3 MPa 时，2 mm 高处截面在马赫盘以外，不在核心区。分别用 MATLAB 仿真其 1 mm 截

面处情况，如图 14 所示。利用 MATLAB 计算高压氢气射流的马赫盘以下边界层直径，即绿色圆环外圈的直径，如表 2 所示。

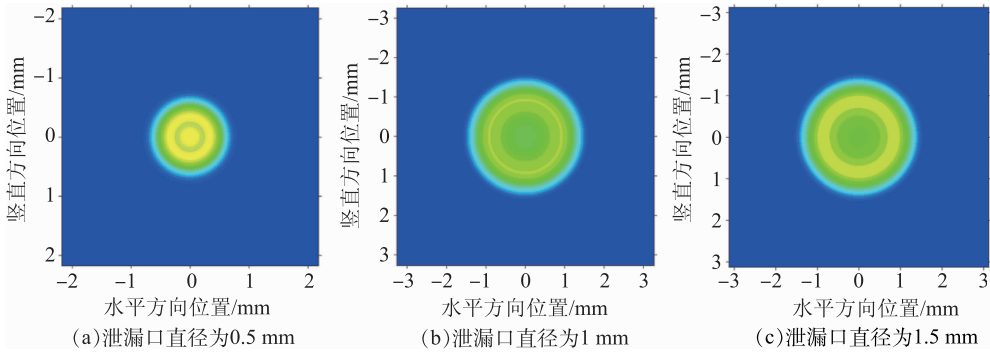


图 14 压强为 5 MPa 时不同泄漏口直径条件下高压氢气射流激波结构 1 mm 截面马赫数云图

表 2 5 MPa 氢气射流激波结构在 1 mm 高处
边界层泄露口直径

泄漏口直径/mm	核心区直径/mm
0.5	1.19
1.0	2.50
1.5	2.58

由表 2 可知,随着泄漏口的增大,5 MPa 压强高压氢气射流激波结构 1 mm 高处边界层直径不断增大,且增大速度逐渐减小。

对表 2 所示数据用二阶多项式算法进行拟合,可得 5 MPa 压强条件下高压氢气射流激波结构在 1 mm 高边界层直径与高压氢气泄漏口直径的关系。

$$D = -2.46p^2 + 6.31p - 1.35 \quad (5)$$

式中: D 为核心区直径, mm; p 为高压氢气的压强, MPa。

4 结论

提出了光面式高压氢气泄漏快速可视化检测方法,通过控制电路发出信号,使激光发射器发出激光,经柱面透镜组及反射镜后形成光面照射储氢罐表面,利用安装在储氢罐上方特定位置的 CCD 相机拍照采集图像并传输至计算机,运用数字图像处理技术检测氢气泄漏情况。对高压氢气泄漏进行数值仿真模拟,结果验证了高压氢气射流的分层流动模型;对压强和泄漏口直径条件进行分组仿真,根据仿真结果总结出高压氢气泄漏口直径与特定高度高压氢气射流边界层直径的关系以及高压氢气压强与特定高度高压氢气射流边界层直径的关系,为实现高压氢气泄漏快速准确检测提供了技术支撑,对氢能的安全化推广应用起到了促进作用。

参 考 文 献

- [1] 余照. 氢泄漏与扩散数值仿真研究[D]. 湖南: 国防科学技术大学, 2008.
- [2] 郑津洋, 张俊峰, 陈霖新, 等. 氢安全研究现状[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(6): 144-152.
- [3] 张起源. 液氢的危险性综合分析[J]. 国外导弹技术, 1983(7): 50-67.
- [4] 吴梦茜. 大规模液氢泄漏扩散的数值模拟与影响因素分析[D]. 浙江: 浙江大学, 2017.
- [5] 赵康, 丁京, 凡双玉, 等. 受限空间内液氢泄漏扩散规律研究[J]. 低温工程, 2019(5): 53-58.
- [6] 谢永春, 张宏彬, 黄德家, 等. 氢氮泄漏检测技术原理及应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018, 38(9): 34-35, 38.
- [7] 李雪芳, 何倩, 柯道友, 等. 高压氢气小孔泄漏射流分层流动模型与验证[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2018, 58(12): 1095-1100.
- [8] 李雪芳, 毕景良, 林曦鹏, 等. 高压氢气泄漏扩散数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(12): 2482-2485.
- [9] 刘玥, 梁忠生, 鲍锋. 粒子成像测速——非介入式全场技术[J]. 中国科技信息, 2010(13): 37-40, 31.
- [10] 陈根华, 詹斌, 王海龙, 等. 粒子图像测速发展综述[J]. 南昌工程学院学报, 2019, 38(3): 90-96.
- [11] 李雪芳, 王俞杰, 罗峰, 等. 欠膨胀氢气射流激波结构数值模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(4): 880-886.

收稿日期: 2020-06-26; 修回日期: 2020-09-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51975011); 国家重点研发计划(2018YFE0105300)

作者简介

苗扬(1985-), 男, 博士, 主要从事智能感知与健康管理研究。

