

# 低温氢气排放过程数值模拟

李 茂, 孙万民, 刘瑞敏

(北京航天试验技术研究所, 北京 100074)

**摘 要:** 以低温氢气安全排放为目的, 采用数值模拟方法对低温氢气直接排放和燃烧排放的流场进行分析。流场仿真计算采用了标准双方程  $k-\varepsilon$  湍流模型和氢氧单步燃烧模型。研究参数包括氢排放压力、流量、温度和环境风速, 评价指标为氢扩散范围和燃烧范围。计算结果表明: 燃烧排放燃烧范围小于直接排放氢扩散范围; 排放压力增加、流量增大和温度降低均会使氢扩散范围和燃烧范围变大。

**关键词:** 低温氢气; 扩散范围; 燃烧模型; 数值模拟

**中图分类号:** V434-34    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-9374 (2013) 04-0074-06

## Numerical simulation of cryogenic gaseous hydrogen emission

LI Mao, SUN Wan-min, LIU Rui-min

(Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China)

**Abstract:** The cryogenic emission and burning emission of cryogenic gaseous hydrogen were investigated numerically for safe emission. The standard  $k-\varepsilon$  turbulence model and the uni-step H-O reaction model was used in the simulation calculation to get the gaseous hydrogen emission pressure, mass flow rate, temperature, environment wind speed, as well as hydrogen diffuse area and burning area as the evaluation index. The calculated results show that the burning area by burning emission is smaller than the diffuse area by cryogenic emission, and increase of emission pressure, amplification of mass flow rate and reduction of temperature can lead to the wide diffuse area and burning area of gaseous hydrogen.

**Keywords:** cryogenic gaseous hydrogen; diffuse area; combustion model; numerical simulation

## 0 引言

氢氧火箭发动机试验中的加注、预冷、紧急

关机以及试验后贮箱放气泄压阶段, 液氢贮箱将排放出大量低温氢气。低温氢气直接排入大气后迅速扩散, 同时冷凝空气中水蒸气形成氢气云团, 遇到碰撞、静电或者微弱的火星均有可能引起爆

收稿日期: 2012-02-05; 修回日期: 2013-04-11

基金项目: 中国航天科技集团公司支撑项目 (2011JY03)

作者简介: 李茂 (1983—), 男, 博士, 研究领域为液体火箭发动机试验技术

燃爆轰，对周边人员、试验设备和建筑设施的安全构成严重威胁<sup>[1-3]</sup>。在氢氧发动机及相关设备试验时，曾发生多起氢气排放引起的安全事故<sup>[4-5]</sup>，因此，氢排放研究对氢的安全使用意义重大。

在航天技术发展推动下，氢氧火箭发动机推力级别逐步提高，试验中氢排放量随之增加，试验台氢安全排放问题尤为突出。目前，研究者对氢气泄漏与扩散研究较多，数值模拟分析应用也较广<sup>[6-10]</sup>，在大流量氢排放方面研究则较少，国内张起源、吴光中等对氢氧火箭发动机大流量氢气排放进行了相关的研究，取得了一些研究成果<sup>[3,11]</sup>。

本文采用数值模拟方法对低温氢气直接排放和燃烧排放进行对比研究，研究参数包括排放压力、流量、氢气温度和风速，评价指标为直接排放氢扩散范围和燃烧排放燃烧范围，揭示直接排放和燃烧排放的联系和区别，为大推力氢氧发动机试验台大流量氢安全排放和试验台安全性设计提供参考。

1 数值仿真模型及方法

本文研究中，假设低温氢气通过直管排入大气，无喷注装置，无氮气掺混，不考虑空气中水汽冷凝。排放模式分为直接排放和燃烧排放。

1.1 控制方程

1.1.1 控制方程

直接排放和燃烧排放的计算控制方程都采用 Navier-Stocks 方程，质量、动量和能量基本控制方程的统一形式为：

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \Phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \Phi) + S$$

式中：从左到右依次代表瞬态项、对流项、扩散项和源项。其中， $\Phi$  表示物理量； $\Gamma$  表示对应于  $\Phi$  扩散系统； $S$  为相应的源项。在直接排放中，源项不出现；在燃烧排放时，源项由氢氧燃烧反应模型引入。本文中，采用氢氧单步燃烧反应考虑氢气与空气中氧气的反应。

1.1.2 湍流模型

采用标准  $k-\varepsilon$  模型封闭控制方程：

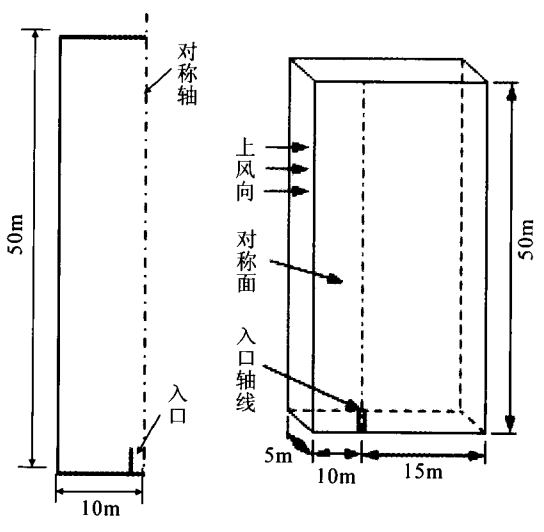
$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M$$

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

式中： $G_k$  为平均速度梯度所引起的湍动能生成项； $G_b$  为浮力所引起的湍动能生成项； $Y_M$  为可压缩流动中脉动扩散所引起的耗散率； $C_{1\varepsilon}$ ， $C_{2\varepsilon}$ ， $C_{3\varepsilon}$  为经验常数； $\sigma_k$  和  $\sigma_\varepsilon$  分别是与湍动能  $k$  和耗散率  $\varepsilon$  对应的 Prandtl 数； $\mu_t$  为湍流黏性系数。

1.2 几何模型

根据环境情况，分为无风和有风两种情况，并选择不同几何模型进行模拟：无风时，使用二维轴对称模型，以排放管中心轴线为对称轴，区域半径 10 m，延伸长度 50 m，，网格数约 12.6 万，模拟区域见图 1(a)。有风时，使用三维对称模型，上风向边界距离排放口轴线 5 m，下风向边界距离排放口轴线 15 m，侧面边界距离排放口轴线 5 m，对称面通过排放口中心，延伸长度 50 m，网格数约 64.2 万，模拟区域见图 1 (b)。



(a) 二维模型 (b) 三维模型  
图 1 计算区域几何模型

Fig. 1 Geometry model of calculation region

1.3 边界条件

低温氢气入口采用压力入口边界条件，给定入口压力、水力直径、温度等。二维轴对称模型中，排放入口端大气边界采用压力入口边界，其

余外围边界均采用压力出口边界，压力取值均为 1 个大气压；轴线给定轴对称边界条件。三维对称模型中，氢气入口端大气边界和上风向边界采用压力入口边界条件，对称面为对称面边界条件，其余外边界为压力出口边界。本文选择 4 组参数研究低温氢气排放，分别为排放压力  $p$ ，氢气流 量  $\dot{m}$ ，氢气温度  $T$  和环境风速  $V_w$ ，参数取值见表 1，基准参数为  $p=0.25\text{ MPa}$ ， $\dot{m}=1.2\text{ kg/s}$ ， $T=120\text{ K}$ ， $V_w=0\text{ m/s}$ 。

表 1 研究参数

Tab. 1 Research parameters				
组号	$p/\text{MPa}$	$\dot{m}/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	$T/\text{K}$	$V_w/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
1	0.20, 0.25, 0.30	1.2	120	—
2	0.25	0.7, 1.2, 1.7	120	—
3	0.25	1.2	100, 120, 140	—
4	0.25	1.2	120	0, 5, 10

1.4 计算方法

本文采用有限体积法离散控制方程，在空间上采用二阶迎风格式对连续方程、动量方程和能量方程进行耦合求解。

1.5 评价指标

氢和空气混合物的爆炸限为：空气 中含氢的体积分数 4%~75%。在低温氢气直接排放中，选择氢气体积分数大于 4% 的范围作为氢气扩散区域。在燃烧排放中，根据国家标准氢气系统动火区域浓度的限定，选择以氢气体积分数大于 0.4% 的范围为燃烧区域。

2 计算结果与分析

2.1 直接排放与燃烧排放对比分析

图 2 为直接排放氢气扩散区域和燃烧排放燃烧区域，算例基本参数设置为： $p=0.25\text{ MPa}$ ， $\dot{m}=1.2\text{ kg/s}$ ， $T=120\text{ K}$ 。图 2 (a)为氢气直接排放的扩散区域，图示结果表明，直接排放氢气扩散区域较大，距离排放出口 36.0 m 处，氢气扩散半径最

大，为 4.2 m，并且在距离排放出口 50 m 处 (计算区域外边界) 氢气体积浓度仍大于 4%，由此可见，氢气直接排放的危险区域较大。图 2 (b) 中，燃烧区域的最大燃烧长度 (轴线氢浓度为 0.4% 之处) 为 19.9 m，最大半径为 1.8 m，最大半径处距离排放出口 12.7 m。对比两者可以看出，燃烧排放扩散半径和扩散距离均不到直接排放的一半，燃烧排放燃烧区域范围显著小于直接排放氢扩散范围，并且，燃烧排放可以避免外界能量引发的氢气云团爆燃爆轰。

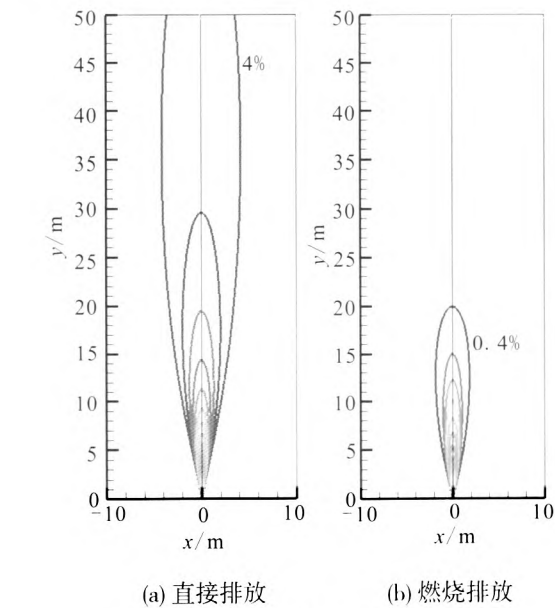


图 2 氢浓度分布

Fig. 2 Distributions of hydrogen concentration

2.2 排放参数对氢气排放的影响

2.2.1 排放压力

图 3 为排放压力对直接排放和燃烧排放氢气浓度分布的影响。从图示结果可以看出，本文选择参数条件下，直接排放时，50 m 范围内轴向方向氢气浓度均大于 4%，而燃烧排放则可使氢气体积分数在 20 m 左右处下降至 0.4% 以下；随排放压力增加，直接排放氢气扩散半径变大，燃烧区域范围增加。

表 2 为不同排放压力条件下的氢扩散范围，表中  $R_{\max}$  为最大扩散半径， $L$  为达到最大半径时的轴向位置， $L_{\max}$  为燃烧长度，其中直接排放氢浓度取 4%，燃烧排放取 0.4%。从表中结果可以

看出, 随压力升高, 氢扩散区域变大。管径、温度相同的情况下, 排放压力增加, 流量增加, 出口附近速度也将增加, 膨胀能力加强, 扩散范围随之增加。出口压力从 0.20 MPa 变成 0.30 MPa, 直接排放最大扩散半径从 3.9 m 增加至 5.1 m, 增量 0.5 m, 扩散半径最大处距离喷管出口从 33.5 m 增加至 40.1 m, 增量 6.6 m, 相对增量分别为 12.8% 和 19.7%; 而燃烧排放时, 同等压力变化下, 最大扩散半径增加 0.1 m, 扩散半径最大处距离喷管出口增加 2.5 m, 燃烧长度增加 2.3 m, 相对增量分别为 11.8%, 12.6% 和 12.2%。上述结果说明, 排放压力对直接排放氢扩散范围影响更大, 绝对增量和相对增量均大于燃烧排放。

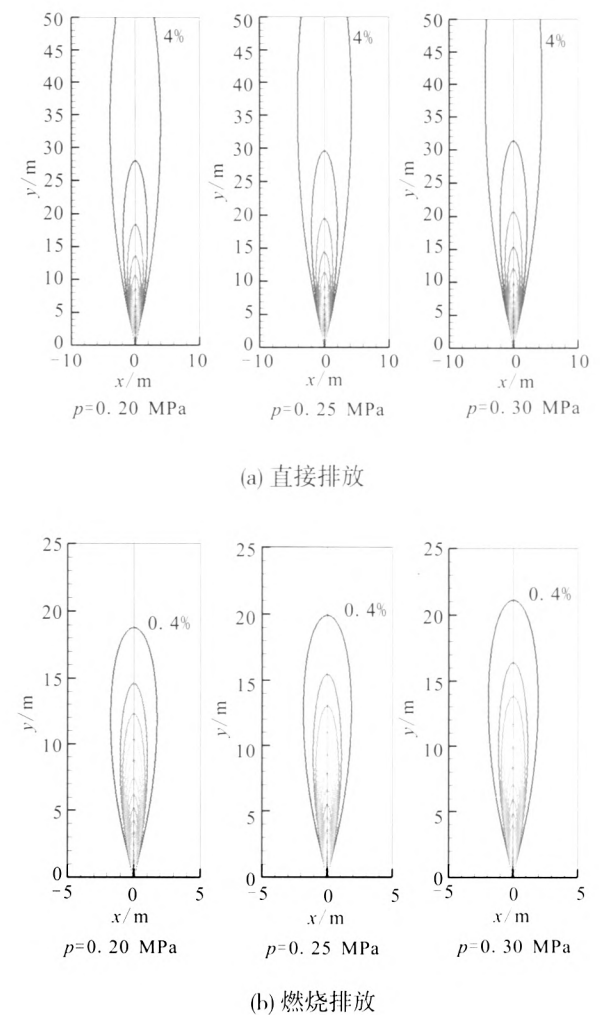


图 3 排放压力对氢浓度分布影响  
Fig. 3 Effects of emission pressure on distribution of hydrogen concentration

表 2 不同出口压力下的氢扩散范围

Tab. 2 Hydrogen diffuse range in different emission pressure

$p/\text{MPa}$	直接排放		燃烧排放		
	$R_{\text{max}}/\text{m}$	$L/\text{m}$	$R_{\text{max}}/\text{m}$	$L/\text{m}$	$L_{\text{max}}/\text{m}$
0.20	3.9	33.5	1.7	11.9	18.8
0.25	4.2	36.0	1.8	12.7	19.9
0.30	4.4	40.1	1.9	13.4	21.1

2.2.2 氢气流量

图 4 为不同氢气流量条件下直接排放和燃烧排放的氢气浓度空间分布情况。

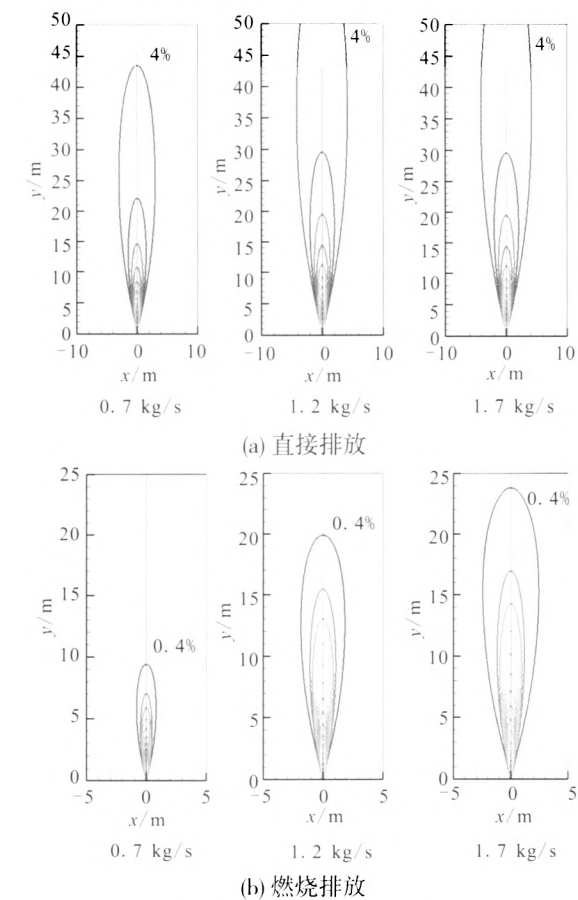


图 4 氢气流量对氢浓度分布的影响  
Fig. 4 Effects of hydrogen mass flow rate on distribution of hydrogen concentration

显然, 对于直接排放, 排放的氢气的流量越大, 所需的扩散空间就越大。不同流量条件下扩散范围见表 3, 0.7 kg/s 时, 氢气最大扩散半径为 3.0 m, 对应的轴向位置 25.1 m, 大约在 44 m 处氢气浓度低于 4%, 而 1.7 kg/s 时, 最大扩散半径

4.8 m, 对应轴向位置 46.5 m。在燃烧排放时, 仿真结果显示同样趋势, 流量越大, 燃烧范围也越大, 但燃烧范围小, 0.7 kg/s 时, 燃烧长度为 9.5 m, 最大半径 0.8 m; 1.7 kg 时, 燃烧长度 23.8 m, 最大半径 2.5 m。根据分析结果可知, 氢气流量对氢扩散范围影响明显, 是氢排放安全距离的关键设计参数之一。

表 3 氢气流量对扩散范围的影响

Tab. 3 Effects of hydrogen mass flow rate on diffuse range

流量/ (kg·s <sup>-1</sup> )	直接排放		燃烧排放		
	$D_{\max}/\text{m}$	$L_i/\text{m}$	$D_{\max}/\text{m}$	$L_i/\text{m}$	$L_{\max}/\text{m}$
0.7	3.0	25.1	0.8	5.8	9.5
1.2	4.2	36.0	1.8	12.7	19.9
1.7	4.8	46.5	2.5	15.2	23.8

2.2.3 氢气温度

图 5 为不同氢气温度下直接排放氢扩散范围和燃烧排放燃烧范围。

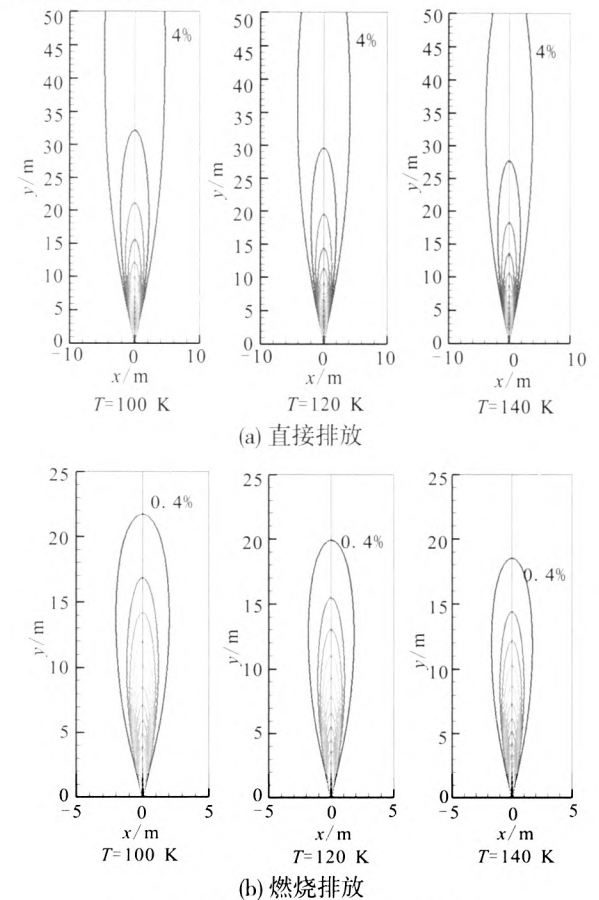


图 5 氢气温度对氢浓度分布的影响

Fig. 5 Effects of hydrogen temperature on distribution of hydrogen concentration

图 5 所示结果表明, 氢气温度低, 氢气扩散范围大。在排放口直径和出口压力一定情况下, 氢气温度越低, 氢密度越大, 排放流量越大, 因此, 对于直接排放, 需要的扩散范围增加, 对于燃烧排放, 燃烧区域将增加。表 4 为不同温度条件下的氢扩散范围。本文参数设置条件下, 温度从 140 K 降至 100 K, 直接排放氢最大扩散半径及相应轴向位置绝对增加量为 0.8 m 和 12.3 m, 相对增加量为 21.0%和 37.3%, 燃烧排放燃烧区域最大半径、相应的轴向位置、燃烧的绝对增加量分别为 0.3 m, 2 m 和 3.2 m, 相对增加量分别为 15.0%, 17.1%和 17.3%。上述结果表明, 氢气温度对直接排放氢扩散范围的影响大于燃烧排放。

表 4 氢气温度对扩散范围的影响

Tab. 4 Hydrogen emission range in different temperature

温度/K	直接排放		燃烧排放		
	$D_{\max}/\text{m}$	$L_i/\text{m}$	$D_{\max}/\text{m}$	$L_i/\text{m}$	$L_{\max}/\text{m}$
100	4.6	45.3	2.0	13.7	21.7
120	4.2	36.0	1.8	12.7	19.9
140	3.8	33.0	1.7	11.7	18.5

2.2.4 环境风速

图 6 为环境风速对直接排放氢气扩散范围的影响, 图示截面为模型中的对称面, 风从  $x$  正方向吹向负方向。

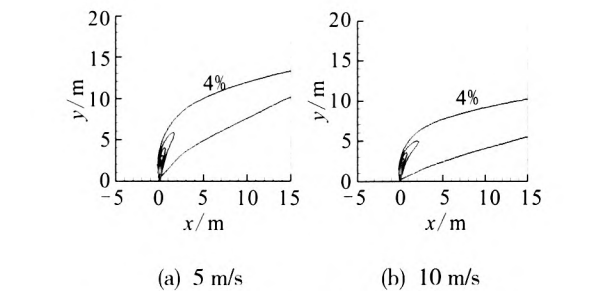


图 6 风速对直接排放氢气浓度分布的影响

Fig. 6 Effects of wind speed on concentration distribution of directly-emitted hydrogen

图 6 所示结果中, 氢气向下风向扩散明显。在排放管出口处, 由于氢气流速较高, 氢气偏转

小,当氢气扩散流速降低后,氢气开始显著向下风向扩散,风速越大,偏转角度越大。在风速为5 m/s时,在计算区域下风向边界处,氢浓度大于4%区域距离出口垂直距离约10~13 m处,风速为10 m/s时,该距离变为5.5~10 m处。根据仿真结果,氢气排放设计中,需要对环境风速进行全面考虑,在下风向加强防范。

### 3 结论

采用数值模拟方法研究了氢气排放过程,结论如下:

1) 燃烧排放中氢气与空气燃烧,扩散范围、排放距离和半径均比直接排放小。

2) 在排放管直径一定的情况下,氢气排放压力增加、温度降低,均会使氢气扩散范围增加;排放流量增加,氢气扩散范围扩大。

3) 环境风速对氢气扩散范围影响显著,风速增加,轴向扩散距离减小,下风向扩散范围增加。

#### 参考文献:

- [1] LAPIN A. Hydrogen vent flare stack performance [J]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1967 (12): 198-206.
- [2] THOMPSON W R, BONCORE C S. Design and development of a test facility for the disposal of hydrogen at high flow rates[J]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1967 (12): 207-217.
- [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] 朱森元. 氢氧火箭发动机及其低温技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [5] 郑治仁. 氢爆炸事故十四例[J]. *中国航天*, 1999 (12): 12-14.
- [6] 秦国军, 袁杰红, 胡芑庆, 等. 氢泄漏稳定扩散场数值模拟与回归建模研究[J]. *高技术通讯*, 2010, 20(11): 1206-1210.
- [7] 肖建军, 周志伟, 经荣清. 严重事故下安全壳内氢气浓度场分布影响因素的初步研究[J]. *核动力工程*, 2007, 28(1): 99-103.
- [8] 杨灿剑, 付晋. 加氢站氢气泄漏事故模拟及后果分析[J]. *消防科学与技术*, 2011, 30(4): 358-361.
- [9] 卢明, 徐晔, 肖学章. 室内氢气泄漏扩散的数值模拟[J]. *中国安全生产科学技术*, 2011, 7(8): 29-33.
- [10] 张分电, 王正, 洪祥, 等. 高酸气田井站火炬冷放空过程模拟分析[J]. *安全、健康和环境*, 2012, 12(6): 11-13.
- [11] 吴光中, 李久龙, 高婉丽, 等. 大流量氢气的排放与扩散研究[J]. *导弹与航天运载技术*, 2010 (1): 51-55.
- [12] 庄逢辰. 液体火箭发动机喷雾燃烧的理论、模型及应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1995.
- [13] 李宁, 宋文艳, 罗飞腾, 等. 基于先锋氢点火和双凹腔火焰稳定的煤油超声速燃烧特性[J]. *推进技术*, 2012 (2): 205-210.
- [14] 张蒙正, 邹宇. 美国典型高超飞行器项目研发及启示[J]. *火箭推进*, 2012, 38(2): 1-8, 37.
- [15] 刘亦夫, 刘兵, 曾科, 等. 缸内直喷天然气/氢气混合燃料配合废气再循环的性能与排放 [J]. *西安交通大学学报*, 2011, 45(7): 5-8, 69.
- [16] 李文龙, 李平, 郭海波. 空气涡轮火箭发动机掺混燃烧研究进展[J]. *火箭推进*, 2011, 37(6): 16-21.
- [17] 将德明. 内燃机燃烧与排放学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [18] 宋云超, 宁智, 刘耀东, 等. 氢气/柴油发动机 NO<sub>x</sub> 和微粒排放特性的数值模拟[J]. *内燃机学报*, 2011, 29(6): 495-503.
- [19] 纪常伟, 张肇, 汪硕峰, 等. 混氢汽油机排放特性的试验[J]. *北京工业大学学报*, 2012 (1): 151-155.
- [20] 朱伟, 王昕. 液体火箭发动机液流试验系统测量过程控制研究[J]. *火箭推进*, 2011, 37(4): 73-77.

(编辑: 陈红霞)