

# 某试验台 $\text{LH}_2$ 贮箱气体置换过程数值模拟

朱子勇, 孙万民, 王占林  
(北京航天试验技术研究所, 北京 100074)

**摘 要:** 首先应用 C# 软件编制贮箱气体置换计算程序, 用该程序对不同  $\text{N}_2$ 、 $\text{H}_2$  充气压力和放气终压对贮箱置换的影响进行分析, 通过对比分析得出最优置换方案; 其次利用 FLUENT 软件对某运载火箭发动机动力系统试验  $\text{LH}_2$  贮箱气体置换过程进行数值计算, 包括  $\text{N}_2$  充气置换、 $\text{H}_2$  充气置换和  $\text{LH}_2$  贮箱缩比尺寸和全尺寸数值计算。对  $\text{H}_2$  置换过程中不同的放气终压也进行了数值计算, 并将缩比尺寸数值计算结果同现有试验台  $\text{LH}_2$  贮箱置换进行比较; 最后数值计算了  $\text{LH}_2$  贮箱  $\text{H}_2$  充气完成后混合均匀需要的时间。

**关键词:**  $\text{LH}_2$  贮箱; 置换; 数值模拟

**中图分类号:** V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2011) 06-0052-10

## Numerical simulation of gas replacement process in $\text{LH}_2$ tank of test-bed

ZHU Zi-yong, SUN Wan-min, WANG Zhan-lin

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

**Abstract:** The program of gas replacement in the tank is drawn up with C# NET software. The influence of different filling pressure and final pressure after deflation of nitrogen and hydrogen on gas replacement in the tank is analyzed with the program. An optimum scheme of gas replacement is determined by comprehensive comparison. The numerical calculation of gas replacement process in the liquid hydrogen testing tank of a rocket engine power system is carried out with FLUENT software. The numerical calculation includes the nitrogen filling replacement, hydrogen filling replacement, downsizing scaling and full-size liquid hydrogen tank. The results of numerical calculation are compared with the replacement of existing liquid hydrogen tank on the test-bed. The duration time of the gas mixing uniformity after completion of the hydrogen filling is calculated.

**Keywords:**  $\text{LH}_2$  tank; replacement; numerical calculation

收稿日期: 2011-08-11; 修回日期: 2011-09-27

基金项目: 中国航天科技集团公司支撑项目(2002JY05)

作者简介: 朱子勇 (1979—), 男, 硕士, 研究领域为液体火箭发动机试验及仿真技术

## 0 引言

推进剂贮箱使用前为空气状态,因此未经某种处理是不能直接用来加注LH<sub>2</sub>推进剂的。因为空气的主要成分是N<sub>2</sub>和O<sub>2</sub>,其中N<sub>2</sub>约占78%、O<sub>2</sub>约占20%。空气中含有一定量的水分,其含量与当时的温度、湿度有关。

在标准大气压下,H<sub>2</sub>O在0℃时结冰,O<sub>2</sub>在-182.8℃时液化、在-218.6℃时固化。N<sub>2</sub>在-195.6℃时液化、在-209.8℃时固化。因此如果在加注LH<sub>2</sub>以前不先用He或H<sub>2</sub>把贮箱内的空气置换掉就进行加注,那么在加注时由于LH<sub>2</sub>温度极低(-252.6℃),贮箱中的H<sub>2</sub>O、O<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>就会先后被固化。这些固化物在系统中可能会造成管路过滤器堵塞和活门卡死之类的故障。所以LH<sub>2</sub>系统在加注以前一定要先进行He或H<sub>2</sub>置换。

## 1 贮箱置换顺序和方法

对于加注低温燃料为LH<sub>2</sub>的贮箱,需要先用干燥N<sub>2</sub>置换空气,再用He或H<sub>2</sub>置换N<sub>2</sub>。先用N<sub>2</sub>置换空气是为了节省He或H<sub>2</sub>,并且增加H<sub>2</sub>置换时的安全性。这是因为在同一含O<sub>2</sub>量指标下用He或H<sub>2</sub>置换N<sub>2</sub>所需的次数比直接置换空气所需的次数少。而且用H<sub>2</sub>直接置换空气时由于H<sub>2</sub>在空气中的含量在很大的浓度范围内(4%~75%)还有爆轰的危险性。用He或H<sub>2</sub>置换N<sub>2</sub>是为了最终在加注LH<sub>2</sub>时在LH<sub>2</sub>的表面只有不会冷凝的He或H<sub>2</sub>。

贮箱置换方法有三种,即连续置换、非连续(间歇)置换和抽空置换。连续置换是从被置换系统的一端送入置换气体,再从被置换系统的另一端排出被置换的气体。这种办法的优点是快、省时间,缺点是置换气体消耗量大、不经济;非连续置换是从被置换系统的一端送入置换气体,当充气压力达到某一数值时停止充气,停放一段时间后从被置换系统的另一端放气,但不能放到零表压。然后再充气再放气,反复进行多次。这样把被置换气体稀释到允许值为止。究竟需要置

换多少次要根据具体要求由计算或试验来确定;抽空置换方法就是先用抽空的手段抽除系统内的气体,再用纯净气体来填充,反复进行,抽空方法仅适合能承受负压的贮箱。

有些国家在氮气置换时采用加热的N<sub>2</sub>,目的是为了更有效地置换掉箱内原有的水分。这就需要设计一套热N<sub>2</sub>气体设备。采用常温干燥N<sub>2</sub>,但用快速充气、放气的办法也可取得同样效果。因为快速充气时箱内气体受压缩,温度上升使箱壁受热,而快速放气时箱内气体膨胀温度下降,但箱壁来不及被冷却,气体中的水分照样被排气带出。所以用常温干燥N<sub>2</sub>进行置换是切实可行的。

由于连续置换用气量大以及贮箱不能承受负压等情况,本文仅对贮箱非连续置换进行软件编制和数值计算。

## 2 LH<sub>2</sub>贮箱气体置换软件的编制

在置换相关计算时,有以下4点假设:充放气时,容器内气体温度相等;容器内气体完全均匀;没有吸附或化学反应;气体压缩性系数不变。

设 $p_0$ 为容器内初始气体压力(绝对压力); $p_1$ 为置换充气终止时容器内气体压力(绝对压力),设每次置换充气终止压力相同; $p_2$ 为置换放气终止时容器内气体压力(绝对压力),设每次置换放气终止压力相同。

根据文献[1]的计算公式,应用c#软件作为平台开发了置换计算软件,借助此软件可以很方便地进行贮箱气体置换的理论计算研究。

### 2.1 非连续气体置换计算程序

某运载火箭地面试验LH<sub>2</sub>贮箱容积约为382 m<sup>3</sup>,首先用N<sub>2</sub>进行置换,然后用H<sub>2</sub>进行置换。

分别分析了不同 $p_0$ 、 $p_1$ 、 $p_2$ 值对系统置换次数和置换用气的影响,结果见表1~表4。

1) N<sub>2</sub>置换的初始条件为:H<sub>2</sub>O=4320×10<sup>-6</sup>; N<sub>2</sub>=78.1%; O<sub>2</sub>=21%;

置换用N<sub>2</sub>指标:H<sub>2</sub>O=26.3×10<sup>-6</sup>; N<sub>2</sub>≥99%; O<sub>2</sub>≤1%

置换合格标准： $N_2 \geq 96\%$ ； $H_2O \leq 1\ 000 \times 10^{-6}$ ； $O_2 \leq 3.9\%$

2)  $H_2$  置换的初始条件为： $N_2 \geq 96\%$ ； $H_2O = 1\ 000 \times 10^{-6}$ ； $O_2 = 3.9\%$

置换用  $H_2$  指标为： $H_2 \geq 99.995\%$ ； $O_2 \leq 1 \times 10^{-6}$ ； $H_2O \leq 2 \times 10^{-6}$ ； $N_2 \leq 5 \times 10^{-6}$

置换合格标准： $H_2 \geq 99.99\%$ ； $O_2 \leq 10 \times 10^{-6}$ ； $H_2O \leq 25 \times 10^{-6}$ ； $N_2 \leq 60 \times 10^{-6}$

从表 1 可以看出，用  $N_2$  置换初始状态的  $LH_2$  贮箱时，各指标满足要求需要 2~4 次置换，在压力  $p_0$ 、 $p_2$  值相同和不同的  $p_1$  值情况下，置换充气终止时，容器内气体压力（绝对压力） $p_1$  值为 270 000 Pa 时所需要的置换  $N_2$  量较少，需要的  $N_2$  量为 1222  $m^3$ 。

从表 2 可以看出，各指标满足要求需要 2~4 次置换，在  $N_2$  置换压力  $p_0$ 、 $p_1$  相同，不同压力  $p_2$

情况下，置换充气终止时，放气压力在 120 325 Pa（绝压）时用的  $N_2$  量较少，需要的  $N_2$  量为 1 147  $m^3$ 。

从表 3 可以看出，在  $H_2$  置换压力  $p_0$ 、 $p_2$  值相同，不同  $p_1$  值情况下，使得  $H_2$ 、 $H_2O$ 、 $O_2$  和  $N_2$  同时满足要求，用  $H_2$  置换  $LH_2$  贮箱时，置换充气终止时，容器内气体压力（绝对压力） $p_1$  值为 280 000 Pa 时所需要的  $H_2$  置换气量较少，需要的  $H_2$  量为 7 143  $m^3$ 。

从表 4 可以看出，在  $H_2$  置换压力  $p_0$ 、 $p_1$  值相同，不同  $p_2$  值情况，在需要  $H_2$  量相同的情况下，需要用  $H_2$  置换 11 次，同时也缩短置换时间，较高的放气压力使置换时间缩短，放气压力在 114 325 Pa（绝压）时用  $H_2$  量较少，需要的  $H_2$  量为 5 695  $m^3$ 。

表 1  $N_2$  置换压力  $p_0$ 、 $p_2$  值相同，不同  $p_1$  值  
Tab. 1 Same nitrogen pressure of  $p_0$  and  $p_2$ , different pressure of  $p_1$

序号	$p_1/\text{Pa}$	$p_2/\text{Pa}$	$p_0/\text{Pa}$	置换次数( $H_2O$ 含量满足要求)	需要的气量/ $m^3$	置换次数( $N_2$ 含量满足要求)	需要的气量/ $m^3$
1	200 000	111 325	101 325	3	1 147	4	1 529
2	220 000	111 325	101 325	3	1 260	3	1 260
3	230 000	111 325	101 325	2	994	3	1 376
4	270 000	111 325	101 325	2	1 222	2	1 222
5	280 000	111 325	101 325	2	1 300	2	1 300

表 2  $N_2$  置换压力  $p_0$ 、 $p_1$  值相同，不同  $p_2$  值  
Tab. 2 Same nitrogen pressure of  $p_0$  and  $p_1$ , different pressure of  $p_2$

序号	$p_1/\text{Pa}$	$p_2/\text{Pa}$	$p_0/\text{Pa}$	置换次数( $H_2O$ 含量满足要求)	需要的气量/ $m^3$	置换次数( $N_2$ 含量满足要求)	需要的气量/ $m^3$
1	220 000	102 325	101 325	2	902	3	1 353
2	220 000	105 325	101 325	2	879	3	1 319
3	220 000	110 325	101 325	3	1 261	3	1 261
4	220 000	115 325	101 325	3	1 204	3	1 204
5	220 000	120 325	101 325	3	1 147	3	1 147
6	220 000	130 325	101 325	3	1 032	4	1 376

表 3 H<sub>2</sub> 置换压力  $p_0$ 、 $p_2$  值相同, 不同  $p_1$  值  
Tab. 3 Same hydrogen pressure of  $p_0$  and  $p_2$ , different pressure of  $p_1$

序号	$p_1/\text{Pa}$	$p_2/\text{Pa}$	$p_0/\text{Pa}$	置换次数 (H <sub>2</sub> O 含量满足要求)	需要的气 量/ $\text{m}^3$	置换次数 (N <sub>2</sub> 含量满足要求)	需要的气 量/ $\text{m}^3$	置换次数(O <sub>2</sub> 含量满足要求)	需要的气 量/ $\text{m}^3$
1	250 000	110 325	120 325	5	2 674	14	7 487	11	5 883
2	260 000	110 325	120 325	5	2 865	13	7 449	10	5 348
3	270 000	110 325	120 325	5	3 056	12	7 334	10	6 112
4	280 000	110 325	120 325	5	3 247	11	7 143	10	6 494
5	290 000	110 325	120 325	5	3 438	11	7 564	9	6 188
6	300 000	110 325	120 325	4	2 903	10	7 258	9	6 532

表 4 H<sub>2</sub> 置换压力  $p_0$ 、 $p_1$  值相同, 不同  $p_2$  值  
Tab. 4 Same hydrogen pressure of  $p_0$  and  $p_1$ , different pressure of  $p_2$

序号	$p_1/\text{Pa}$	$p_2/\text{Pa}$	$p_0/\text{Pa}$	置换次数 (H <sub>2</sub> O 含量满足要求)	需要的气 量/ $\text{m}^3$	置换次数 (N <sub>2</sub> 含量满足要求)	需要的气 量/ $\text{m}^3$	置换次数(O <sub>2</sub> 含量满足要求)	需要的气 量/ $\text{m}^3$
1	280 000	104 325	120 325	6	4 026	11	7 381	9	6 039
2	280 000	105 325	120 325	6	4 003	11	7 339	9	6 005
3	280 000	106 325	120 325	6	3 982	11	7 300	9	5 973
4	280 000	107 325	120 325	6	3 958	11	7 256	9	5 937
5	280 000	113 325	120 325	6	3 821	11	7 006	9	5 732
6	280 000	114 325	120 325	6	3 797	11	6 961	9	5 695

2.2 小结

根据编制软件进行贮箱 N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub> 非连续气体置换可以得出以下结论:

- 1) 用 N<sub>2</sub> 进行非连续置换, 各项指标满足要求需要置换 2~4 次;
- 2) 用 H<sub>2</sub> 进行非连续置换, 在一定压力下, 各指标满足要求需要置换 10 次以上;
- 3) 用 N<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub> 置换时存在一个用气量最少的充气压力和放气终点。

3 LH<sub>2</sub> 贮箱置换数值模拟

3.1 物理模型的建立

3.1.1 N<sub>2</sub> 置换技术条件

初始条件: H<sub>2</sub>O=4 320 ppm; N<sub>2</sub>=78.1%; O<sub>2</sub>=21%;

置换合格标准: N<sub>2</sub>≥96%; H<sub>2</sub>O≤1 000×10<sup>-6</sup>; O<sub>2</sub>≤4%;

3.1.2 H<sub>2</sub> 置换技术条件

初始条件: N<sub>2</sub>≥96%; H<sub>2</sub>O=1 000×10<sup>-6</sup>; O<sub>2</sub>≤4%;

置换合格标准: H<sub>2</sub>≥99.99%; N<sub>2</sub>≤60×10<sup>-6</sup>; O<sub>2</sub>≤10×10<sup>-6</sup>; H<sub>2</sub>O≤25×10<sup>-6</sup>;

3.1.3 计算区域

计算区域为贮箱入口管路-贮箱-贮箱出口管路。计算区域见图 1。

3.1.4 计算策略

- 1) 几何模型的建立

不考虑环境温度对贮箱气体传热的影响，忽略贮箱内部所有附属机构，如贮箱底部的旋涡装置在几何建模中将忽略。由于研究的 LH<sub>2</sub> 贮箱的几何构形和流场结构是轴对称的，因此采用二维轴对称结构作为计算域。

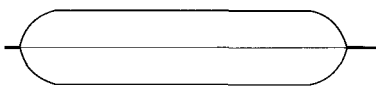


图 1 LH<sub>2</sub> 贮箱计算区域  
Fig. 1 Computational domain of liquid hydrogen tank

2) 网格划分

计算模型的建立以及网格的划分均采用 FLUENT 自带的前处理软件 Gambit2.2.30 进行处理。LH<sub>2</sub> 贮箱的计算网格如图 2 所示，网格单元

总数为 94780。



图 2 LH<sub>2</sub> 贮箱计算网格  
Fig. 2 Computational grid of liquid hydrogen tank

3.1.5 计算参数

计算区域的入口采用压力入口条件，即在入口给定总压、总温、速度的方向以及入口流入的物质组分。固壁采用无滑移固壁条件。选择基于压力耦合求解器，隐式求解，时间选择为瞬态，根据方程组进行迭代计算，检查各参数残差满足收敛条件，收敛有解，LH<sub>2</sub> 贮箱数值模拟计算参数见表 5。

表 5 LH<sub>2</sub> 贮箱数值模拟计算参数

Tab. 5 Calculation parameters for numerical simulation of LH <sub>2</sub> tank			
参 数		数 值	
固壁		绝热壁假设	绝热壁假设
置换模式		N <sub>2</sub> 置换	H <sub>2</sub> 置换
压力入口/Pa		270 000	280 000
入口气体质量分数	H <sub>2</sub> O	0.000 016 859 2	0.000 089 998 79
	O <sub>2</sub>	0.022 762 35	0.000 015 999 79
	N <sub>2</sub>	0.977 220 790 8	0.000 041 999 44
	H <sub>2</sub>	—	0.999 852 002
容器初始质量分数	H <sub>2</sub> O	0.003 374 871	0.000 284 333 2
	O <sub>2</sub>	0.238 408	0.044 359 85
	N <sub>2</sub>	0.758 271 749 45	0.955 359 7
	H <sub>2</sub>	—	0
放气终压/Pa		120 325	112 325/101 425

3.1.6 控制方程

LH<sub>2</sub> 贮箱几何结构和流场结构为轴对称，因此采用控制方程为二维轴对称雷诺平均 *N-S* 方程。其控制方程有连续性方程、动量方程、能量方程和组分质量守恒方程等。紊流模型采用标准 *k-ε* 双方程模式，其中系数都采用默认值；采用非稳态算法，求解器用压力耦合方法。N<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>

置换过程中存在物质组分传输现象，在模拟仿真过程中利用组分运输方程对各组分进行分析<sup>[2]</sup>。

3.2 数值计算结果分析

3.2.1 N<sub>2</sub> 充气置换

N<sub>2</sub> 充气置换结果见图 3。从表 6 可看出 LH<sub>2</sub> 贮箱用 N<sub>2</sub> 置换时，需置换 5 次以上，各组分含量满足要求。

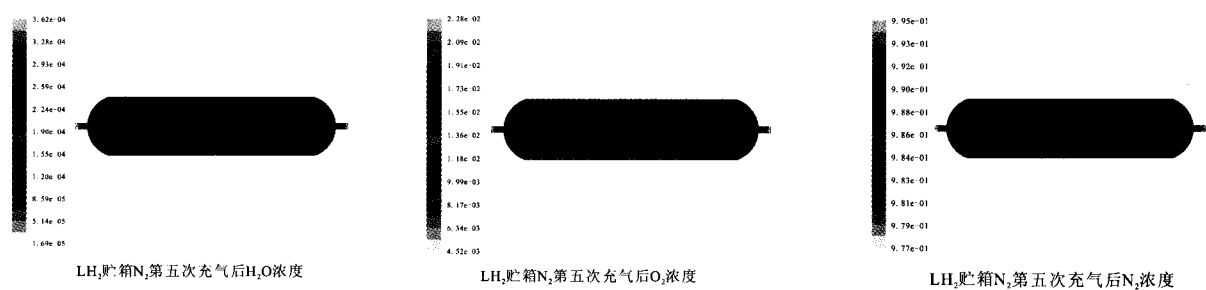


图 3 全尺寸贮箱 N<sub>2</sub> 置换后各组分浓度

Fig. 3 Density of each component after nitrogen replacement of full-size tank

表 6 氮气置换后各组分的体积分数

Tab. 6 Volume fraction of each component after nitrogen replacement

置换次数	H <sub>2</sub> O 体积分数	O <sub>2</sub> 体积分数	N <sub>2</sub> 体积分数	是否满足要求
3	1.144 668 284e-3	0.060 473 435 62	0.938 381 896 1	否
4	5.670 012 962e-4	0.039 590 627 87	0.959 842 370 7	否
5	3.443 140 506e-4	0.010 492 490 09	0.989 163 196 1	是

3.2.2 LH<sub>2</sub> 贮箱缩比数值计算

为验证贮箱容积是否对 H<sub>2</sub> 贮箱置换次数造成影响, 将 LH<sub>2</sub> 贮箱进行了缩小比例数值计算,

结果见图 4。数值计算时的边界条件、计算网格数量、控制方程、计算策略与全尺寸 H<sub>2</sub> 箱充放气置换相同, 缩比后的 LH<sub>2</sub> 贮箱容积为 10 m<sup>3</sup>。

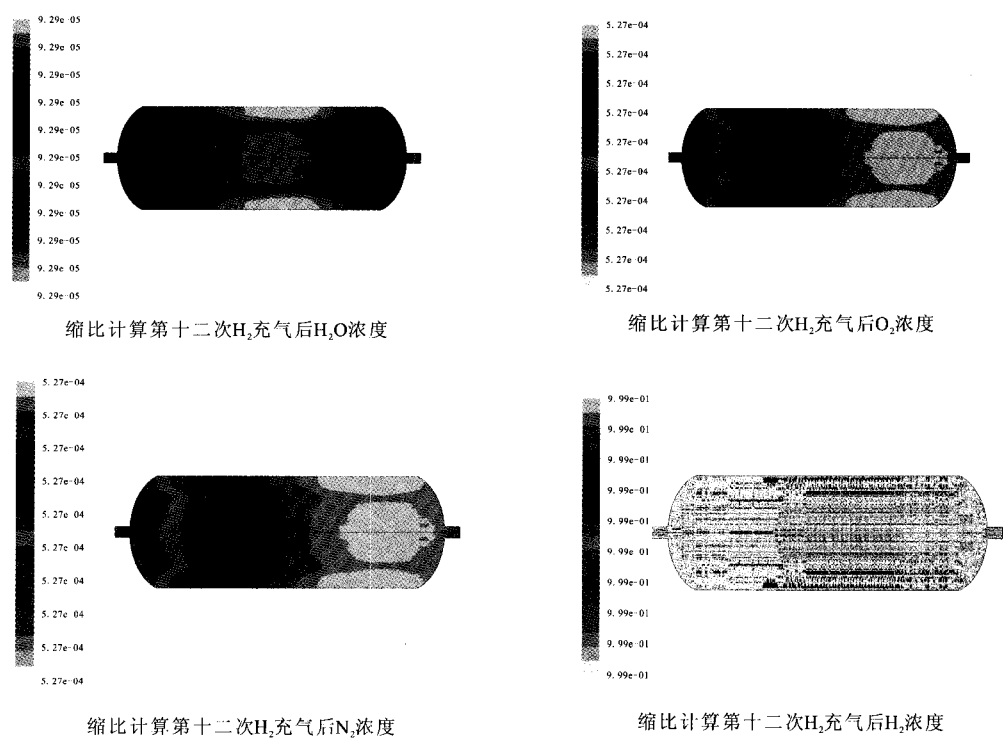


图 4 缩比贮箱 12 次 H<sub>2</sub> 置换后各组分浓度

Fig. 4 Density of each component after hydrogen replacement of scaling tank for 12 times

根据以上计算结果得出的缩比 LH<sub>2</sub> 贮箱 H<sub>2</sub> 充气后各组分的体积分数见表 7, 可看出 LH<sub>2</sub> 缩比贮箱 H<sub>2</sub> 置换时, 需置换 12 次以上, 各组分含量满足要求。

3.2.3 10 m<sup>3</sup> LH<sub>2</sub> 贮箱试验情况

为了验证数值计算结果的可行性, 将计算结果同某型号发动机试验 LH<sub>2</sub> 贮箱 (10 m<sup>3</sup>) 置换数 据进行了比较。

表 7 缩比贮箱 H<sub>2</sub> 置换后各组分的体积分数

Tab. 7 Volume fraction of each component after hydrogen replacement of scaling tank					
置换次数	H <sub>2</sub> O 体积分数	O <sub>2</sub> 体积分数	N <sub>2</sub> 体积分数	H <sub>2</sub> 体积分数	是否满足要求
10	1.064 946 409e-5	7.885 776 64e-06	1.712 493 729e-05	0.999 810 215 4	否
11	1.044 373 9e-5	4.166 776 1e-06	8.006 112 9e-05	0.999 905 322 62	否
12	1.033 072e-5	2.438 622 292e-6	3.769 659 5e-5	0.999 949 534 3	是

表 8 某型号发动机试验 LH<sub>2</sub> 贮箱置换 12 次后各组分含量数据

Tab. 8 Content data of each component after replacement of liquid hydrogen tank of a certain engine test for 12 times

置换次数	H <sub>2</sub> O 体积分数	O <sub>2</sub> 体积分数	N <sub>2</sub> 体积分数	H <sub>2</sub> 体积分数	是否满足要求
1	8.2	2.7	30	999 959.1	是
2	10.7	4	27	999 958.3	是
3	7	6	25.4	999 961.6	是
4	10	3.8	26	999 960.2	是

从表 8 试验结果可以看出, LH<sub>2</sub> 贮箱置换 12 次后各组分满足要求, 试验中的各组分含量同数值计算的组分含量相差不大, 说明数值计算结果与试验结果比较吻合。

3.2.4 H<sub>2</sub> 充气置换

1) 全尺寸置换, LH<sub>2</sub> 贮箱每次充气完成后放气终压 11000 Pa 时的数值计算结果见图 5。

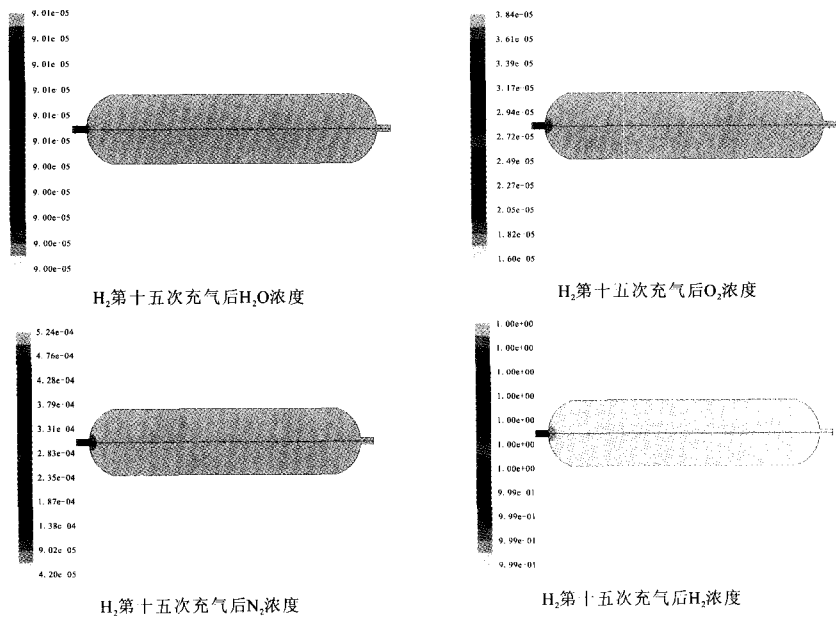


图 5 全尺寸 LH 贮箱 15 次 H<sub>2</sub> 置换后各组分浓度

Fig. 5 Density of each component after hydrogen replacement of full-size tank for 15 times

根据以上数值计算结果得出的全尺寸 LH<sub>2</sub> 贮箱充气后各组分的体积分数见表 9。可以看出 LH<sub>2</sub> 贮箱全尺寸 H<sub>2</sub> 置换时, 放气终止压力为 121 325 Pa, 需要置换 15 次以上, 各组分含量满

足要求。  
2) LH<sub>2</sub> 贮箱全尺寸置换, 每次充气完成后, 放气终压为 100 Pa, 数值模拟结果见图 6。

表 9 全尺寸计算 H<sub>2</sub> 置换后各组分的体积分数  
Tab. 9 Volume fraction of each component after hydrogen replacement of full-size tank

置换次数	H <sub>2</sub> O 体积分数	O <sub>2</sub> 体积分数	N <sub>2</sub> 体积分数	H <sub>2</sub> 体积分数	是否满足要求
13	1.006 152 709e-05	6.294 584 161e-06	1.333 517 33e-04	0.999 850 292 2	否
14	1.003 260 116e-5	3.665 991 439e-06	6.863 881 813e-05	0.999 917 662 7	否
15	1.001 840 298e-5	2.343 438 936e-06	3.607 677 199e-05	0.999 951 561 3	是

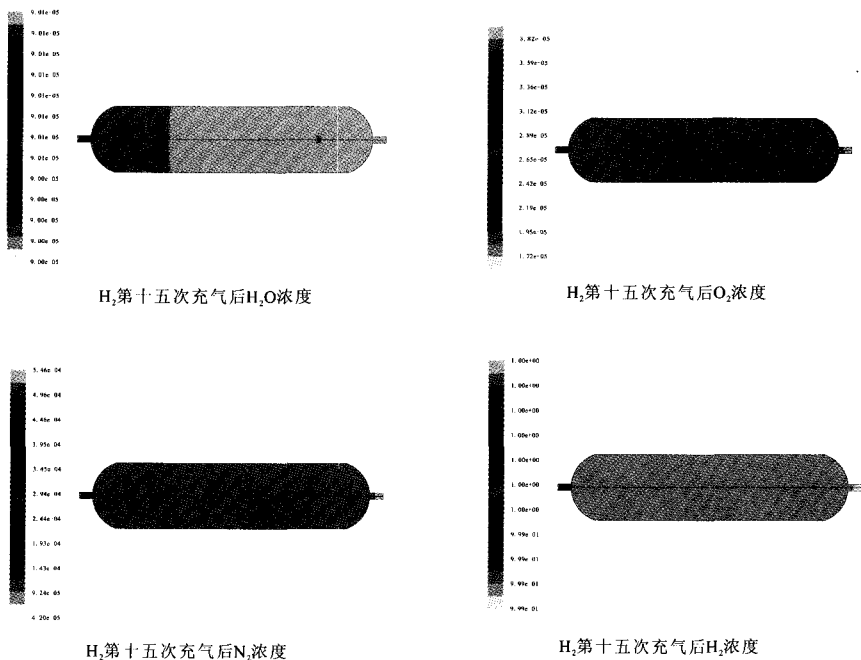


图 6 全尺寸贮箱 15 次 H<sub>2</sub> 置换后各组分浓度

Fig. 6 Density of each component after hydrogen replacement of full-size tank for 15 times

根据以上数值计算结果, 得出全尺寸 LH<sub>2</sub> 贮箱放气终止压力为 101 425 Pa 时, H<sub>2</sub> 充气后各组分的体积分数见表 10。可以看出 LH<sub>2</sub> 贮箱全尺

寸 H<sub>2</sub> 置换时, 放气终止压力为 101 425 Pa, 需要置换 15 次以上, 各组分含量满足要求。

表 10 全尺寸计算 H<sub>2</sub> 充气后各组分的体积分数  
Tab. 10 Volume fraction of each component after hydrogen replacement of full-size tank

置换次数	H <sub>2</sub> O 体积分数	O <sub>2</sub> 体积分数	N <sub>2</sub> 体积分数	H <sub>2</sub> 体积分数	是否满足要求
13	1.006 116 081e-5	6.277 795 675e-6	1.329 220 647e-04	0.999 850 738 9	否
14	1.003 261 224e-5	3.658 226 394e-6	6.830 861 9e-5	0.999 926 426	否
15	1.001 847 793e-5	2.343 940 324e-6	3.597 127 447 9e-5	0.999 951 666 2	是



### 3.2.5 小结

1) 从数值模拟结果可以看出, 贮箱置换时, 每次充气完成后停放一段时间后进行放气, 放气终压小于 112 325 Pa 时, LH<sub>2</sub> 贮箱置换次数没有明显变化, 也可以说放气终压小于 112 325 Pa 对置换次数影响不大;

2) 全尺寸 LH<sub>2</sub> 贮箱置换各组分要达到要求的浓度值, 在一定压力下, 需置换 15 次以上;

3) 不同容积贮箱置换次数不同, 一般情况

下, 贮箱容积越小置换次数越少;

4) 从缩比氢箱置换数值模拟结果同试验比较结果可以看出, 数值计算结果是可靠的。

### 3.3 数值模拟贮箱充气完成后混合均匀时间

为了数值模拟贮箱充气结束后内部气体混合均匀的时间, 当贮箱充到设定的压力后, 将入口设为封闭状态, 让内部气体自由混合, 从贮箱充气过程中任选一次来进行数值计算, 图 7 是充气结束后停放一分钟贮箱内部各组分的分布情况。

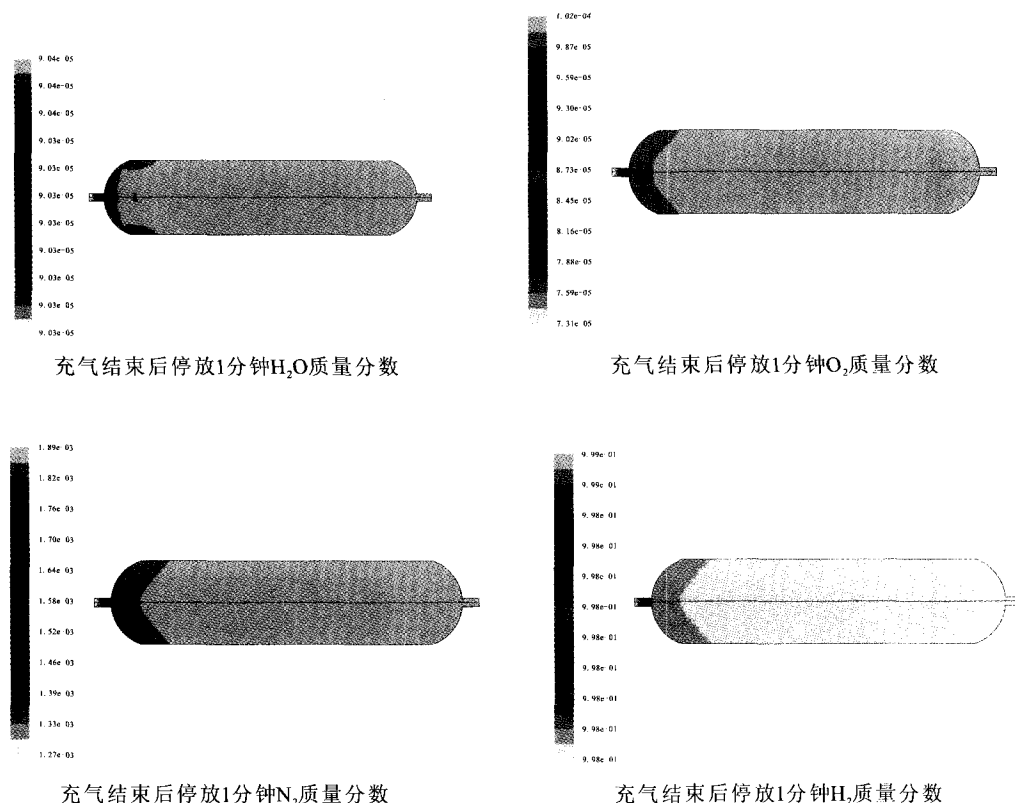


图 7 充气结束后停放 1 分钟后 LH<sub>2</sub> 贮箱中各组分的质量分数

Fig. 7 Mass fraction of each component in LH<sub>2</sub> tank after 1 min when completion of gas filling

从图 7 可以看出充气结束后停放 1 分钟时各组分的质量分数混合不均匀, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub> 质量分数入口浓度低, 靠近贮箱出口质量分数高, H<sub>2</sub> 质量分数与 3 者相反。

停放 6 min 时的 H<sub>2</sub>O 质量分数  $9.038\ 018 \times 10^{-5}$  ~  $9.038\ 409 \times 10^{-5}$ ; O<sub>2</sub> 质量分数  $10.013\ 5 \times 10^{-5}$  ~  $10.070\ 14 \times 10^{-5}$ ; N<sub>2</sub> 质量分数  $185.503\ 2 \times 10^{-5}$  ~  $186.728\ 4 \times 10^{-5}$ ; H<sub>2</sub> 质量分数  $0.997\ 941\ 5$  ~  $0.997\ 954\ 5$ ; H<sub>2</sub>O、O<sub>2</sub>、N<sub>2</sub> 质量分数入口略低, 靠

近贮箱出口质量分数略高, H<sub>2</sub> 质量分数与 3 者相反。

停放 12 min 后 H<sub>2</sub>O 质量分数范围为  $9.038\ 021 \times 10^{-5}$  ~  $9.038\ 2 \times 10^{-5}$ ; O<sub>2</sub> 质量分数范围为  $10.043\ 89 \times 10^{-5}$  ~  $10.059\ 99 \times 10^{-5}$ ; N<sub>2</sub> 质量分数范围为  $186.160\ 9 \times 10^{-5}$  ~  $186.5071 \times 10^{-5}$ ; H<sub>2</sub> 质量分数范围为  $0.997\ 943\ 8$  ~  $0.997\ 947\ 7$ , 各组分基本混合均匀。

可以看出停放时间越长, 贮箱各组分混合得越均匀。

(下转第 66 页)

```
StartTime=CurrentTime;}
```

#### 参考文献:

## 4 结束语

减压阀性能测试系统研制成功后,已交付用户方使用。实际应用表明,系统工作可靠、性能稳定、抗恶劣环境能力强,具有友好的人机操作界面,操作简单,测试精度优于 0.2%,控制定时精度优于 1 ms,满足减压阀性能测试要求。该系统的成功研制为姿控动力系统减压阀的性能测试工作带来了极大方便,具有较好的推广应用前景。

- [1] 王浩,许化龙. 基于 PC104 的测试系统抗干扰设计[J]. 弹射与制导学报, 2009 (2): 293-302.
- [2] 陈本峰,苏琦. 利用 DL 进行 VC 与 Delphi 配合开发[J]. 计算机应用研究, 2002 (12): 158-160.
- [3] 郝文化. 多线程编程技术及实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [4] 武安河. Windows 设备驱动程序开发实务[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.
- [5] 余凯. Windows 98 环境下实时控制系统的开发[J]. 计算机应用研究, 2001 (6): 116-119.
- [6] 王忠. DELPHI5 开发指南[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.

(编辑: 王建喜)

(上接第 60 页)

## 4 结论

在对贮箱置换方法进行探讨的基础上,运用 C# 软件进行了理论计算程序编制。用计算流体力学 (CFD) FLUENT 软件对 LH<sub>2</sub> 贮箱 (缩比和全尺寸) 置换 (N<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>) 进行了数值计算,并将缩比贮箱数值计算结果同试验情况进行比较,结果表明数值计算具有较高的置信度,可以为贮箱置换提供理论指导。

#### 参考文献:

- [1] 王红雨. LH<sub>2</sub> 加注系统的气体置换方法探讨[J]. 低温与特气, 2007, 6(3): 23-25.
- [2] 余照,袁杰红. 储氢罐泄漏扩散规律的数值仿真分析[J]. 广西轻工业, 2008, 8(8): 24-26.
- [3] 郭霄峰,李耀华,陈鸿彦,等. 液体火箭发动机试验[M]. 北京: 宇航出版社, 1990.
- [4] 尼瓦费林[俄]. 液体的低温系统[M]. 低温工程编辑部译. 北京, 1993.
- [5] 马存栋. 高压天然气管道破裂气体扩散规律模拟结果分析[J]. 油气田地面工程, 2005, 24(3): 12-14.
- [6] 赵承庆,姜毅. 气体射流流体力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998.
- [7] 李义绿,姚安林,李永杰. 天然气管道泄漏扩散模型研究[J]. 天然气工业, 2004 (8): 123+17+143
- [8] 段卓平,吕武轩. 易燃、易爆(有毒) 重大危险源(罐区) 泄漏物扩散模型及数值模拟[J]. 中国安全科学学报, 1999, 9(4): 68-72 .
- [9] 张启平,吕武轩,麻德贤. 突发性危险气体泄放过程智能仿真[J]. 中国安全科学学报, 1998, 8(6): 38-42.
- [10] 丁信伟,王淑兰,徐国庆. 可燃及有毒气体泄漏扩散研究综述[J]. 化学工业与工程, 1999, 16(2): 58-62.

(编辑: 王建喜)