

氧/甲烷安全排空装置设计及应用

杜永清, 刘 飞, 巨 乐, 吴 亮
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要:针对液氧/甲烷、液氧/煤油等火箭发动机地面试验中氧/甲烷排放易出现重气云、易燃易爆危险性高等问题,设计一种安全排空装置,总体结构为下部是收集箱,上部是排空筒。采用功能驱动设计、应力校核尺寸的方法,对排空装置的收集箱、排空筒、固定支架几个关键部件进行了结构设计。设计结果为:收集箱是内部焊接有角钢骨架的钢板结构,钢板截面应力为 0.4 MPa,远低于允许应力,人孔通过低温橡胶密封;排空筒下部是花管结构,插入收集箱与其联通,中部焊接排放接嘴,所受平均风力为 111.2 N/m,引起的最大弯曲正应力为 1.45 MPa,切应力为 0.01 MPa,安全系数均很高;固定支架螺栓所受应力幅为 2.1 MPa,低于许用值 9.7 MPa。利用数值分析工具,仿真了排空装置工作过程,分析结果为:收集箱内最大压力为 0.107 MPa,排放接口处最大冲击载荷为 0.72 MPa、出口平均流速为 45 m/s,均符合强度要求和安全排放要求。加工的排空装置多次成功应用于相关试验,结果表明:该排空装置设计方法可行,结构可靠,实现了预期功能,保证了氧/甲烷等易燃易爆介质的安全排放。

关键词:氧/甲烷;排空装置;结构设计;仿真分析;地面试验

中图分类号:V433 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2019)05-0074-09

Design and application of safe emission device for oxygen/methane

DU Yongqing, LIU Fei, JU Le, WU Liang
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: In view of the problems of heavy gas cloud and high risk of inflammability and explosion in oxygen/methane emission in the ground test of liquid oxygen/methane, liquid oxygen/kerosene and other rocket engines, a safe emission device was designed. The lower part of the general structure is collection box, and the upper part is evacuation tube. Using the method of function driven design and stress checking size, the structure design of several key parts of the emission device, such as collecting box, emptying tube and fixing bracket, were carried out. The design results were as follows: the collection box was a steel plate structure with angle steel frame welded inside. The section stress of the steel plate was 0.4 MPa, much lower than the allowable stress. The manhole was sealed by low-temperature rubber. The lower part of the evacuation tube was a flowered tube structure, which was inserted into the collection box and connected with it, and the middle part was welded to discharge nozzle. The average wind force in the suburbs of Xi'an was 111.2 N/m, and the maximum bending normal stress caused by it was 1.45 MPa, and

收稿日期:2019-07-08;修回日期:2019-08-10

作者简介:杜永清(1975—),男,高级工程师,研究领域为液体火箭发动机试验

the shear stress was 0.01 MPa, both of which had high safety factors. The stress amplitude of the bolt with fixed support was 2.1 MPa, lower than the allowable value of 9.7 MPa. The working process of the emission device was simulated by the numerical analysis tool. The analysis results were as follows: the maximum pressure in the collection box was 0.107 MPa, the maximum impact load at the discharge interface was 0.72 MPa, and the average outlet flow rate was 45 m/s, all of which met the requirements of strength and safe discharge. The emission device had been made and applied in relevant tests successfully for many times. The test results showed that the design method was feasible and the structure was reliable, realizing the expected function, which ensured the safe discharge of flammable and explosive media, such as oxygen and methane.

Keywords: oxygen/methane; emission device; structural design; simulation analysis; ground test

0 引言

液氧/甲烷发动机是一种新型火箭发动机,凭借不易结焦积碳、冷却性能好、成本低、无毒环保等优势,成为可重复使用运载器较为理想的动力选择之一^[1-3]。液氧/煤油新型号发动机也进入试验考核阶段。在发动机研制过程中,各个零部件、整机需要在地面试验台上进行大量的考核试验。

地面试验台工作过程中,管路预冷排放、容器排放、试后介质排放等各个排放口会排出液氧/液甲烷或其气态。甲烷是一种燃料,常压下沸点为 -161°C ,气态甲烷的爆炸体积百分数为 $5\% \sim 15\%$,窒息浓度范围为 $25\% \sim 30\%$,自动点火温度为 540°C ,易燃易爆性强^[4]。甲烷分子量为 16 g/mol ,常温气态甲烷密度是空气的 0.57 倍,但液氧/甲烷试验台排放的为低温甲烷,温度低于 -110°C 时密度便比空气大,若不采取合适的排放方式,则容易在地面沉降集聚形成“重气云”,遇火源将产生严重的重气云火灾^[5]。氧是一种强氧化剂,能强烈地助燃,常温氧气比空气重,容易在地面集聚或吸附到衣物上,极易发生火灾。同时,液氧/液甲烷还会发生低温冻伤、低温麻醉、窒息等人员安全事故。为此,必须设计一种安全排空装置,组织氧/甲烷等易燃易爆介质的安全排放。

当前,关于易燃易爆介质排放的文献资料较少,文献[6-7]对低温甲烷排放的重气云团浓度范围进行了数值仿真;文献[8-9]对低温氢气的安全排放进行了相关研究。虽然都介绍了排放结构,但是对结构设计流程未作详尽描述,且排放结构大都为各个排放管路接入竖直安装的大直径排放管,而

后进行高空排放。这种排放方式底部没有收集容器,低温介质直接从排放管排出,结构不太合理。

本文设计了一种带收集箱和氮气掺混功能的排空装置,允许密度较大的低温甲烷或氧气先沉落在收集箱中,而后与环境自然换热后慢慢升温上升,与氮气掺混后从排空筒排出。这种结构能避免大量低温介质直接排出,提高排放安全性。

1 功能原理及结构组成

本文设计的安全排空装置,结构如图1所示,具有低温甲烷或氧气收集功能和排放过程掺混氮气功能。

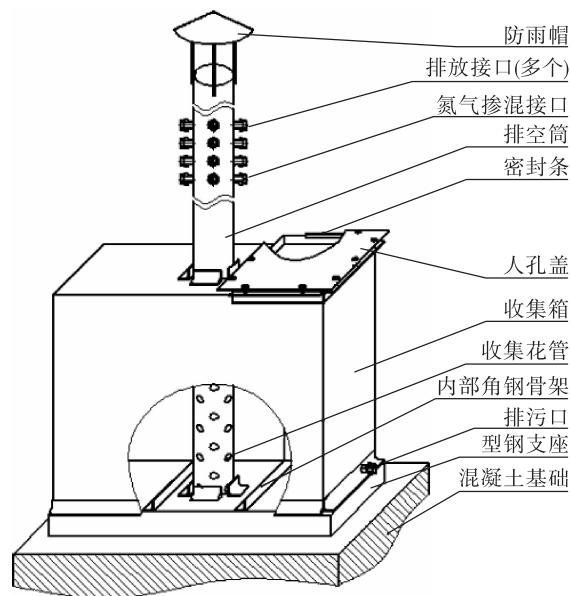


图1 排空装置结构示意图

Fig.1 Structure diagram of the emission device

工作原理是将试验台各个排放接口的低温甲烷或氧气先收集汇入排空筒,密度较大的甲烷或氧气先落入底部的收集箱,密度较小的甲烷掺混氮气后从排空筒排出。大直径的排空筒降低了排放流速。收集箱内的低温甲烷或氧气与环境换热升温,自然蒸发密度变小后,再从排空筒排出。

排空装置主要包含以下几部分:

1) 收集箱:用于收集排放的介质。

2) 排空筒:插入到收集箱,底端承重于收集箱底板,插入的部分是花管结构。收集箱与排空筒的这种连接形式相比较传统的形式(将排空筒连接于收集箱顶部),有以下好处:收集箱箱体结构不承重排空筒,降低了对其强度、刚度的设计要求;十几米高的排空筒承重固定于收集箱底部,并与地面连接,提高了装置整体稳定性。

3) 排空筒上焊接排放接口、氮气掺混接口和防雨帽。

4) 型钢支座:将收集箱与地面混凝土基础连接固定,同时避免混凝土基础直接接触低温介质而被冻裂。

2 排空装置设计

以下介绍排空装置几个关键部件的设计过程。

2.1 收集箱设计

2.1.1 设计流程

图2给出收集箱的设计流程,根据功能要求进行结构设计,然后计算尺寸、强度和刚度校核,最后结构定型,设计完成。

2.1.2 结构设计

收集箱应具有容纳排放介质容量、自重轻刚度

好、日常清理维护方便、外形美观、密封性好,与排空筒对接等功能。

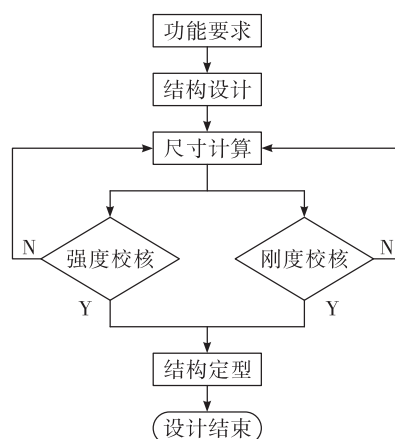


图2 收集箱设计流程

Fig. 2 Collection box design process

依据收集箱功能要求进行功能设计,流程如图3所示,横向是结构完整性设计,纵向是功能实现过程设计,设计的具体结构如图1所示。

收集箱外表为不锈钢钢板,内部焊接角钢骨架,既减轻了重量,又增加了结构刚度和稳定性。上板留有人孔结构,便于日常清理维护,人孔盖板与箱体之间用低温橡胶密封条密封,螺栓紧固;上板中心留有带肋板的圆孔,用于排空筒穿越并与其焊接;侧板下部留有排污口;底板中心带肋板,与排空筒底端焊接固定。收集箱下部焊接一圈带螺栓孔的角钢,用于与型钢支座连接固定。

2.1.3 尺寸计算

1) 原材料:5 mm 厚的 304 不锈钢板、宽度 60 mm 的 304 不锈钢热轧等边角钢。

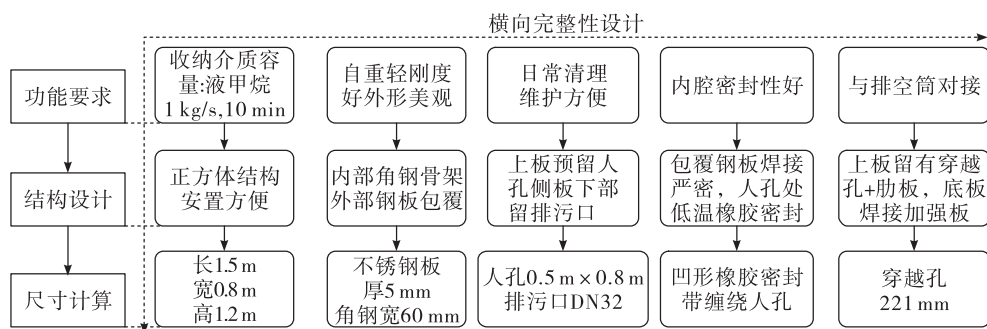


图3 收集箱功能设计流程

Fig. 3 Collection box function design process

2)外形尺寸:按液甲烷流量 1 kg/s 、排放总时长 10 min 计算,总排放体积为 1.4 m^3 ,并考虑到现场安装空间,确定收集箱外形尺寸为 $1.5 \text{ m} \times 0.8 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$ (长宽高)。

3)人孔尺寸:尺寸为 $0.5 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$,一般人可自由进出。

4)上板圆孔:因排空筒尺寸为 $219 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$,圆孔尺寸定为 221 mm 。

5)排污口:在侧板底端开孔 30 mm ,焊接 DN32 37° 标准接头。

6)箱体底端固定螺栓:采用四边共 14 个 M20 螺栓与型钢支座连接。

2.1.4 强度校核

主要对箱体承压强度校核。收集箱内最大压力为 5.7 kPa (表压),内部最大承压面积 $1.2 \times \sqrt{1.5^2 + 0.8^2} = 2.04 \text{ m}^2$,钢板承压截面积为 $(\sqrt{1.5^2 + 0.8^2} + 1.2) \times 2 \times 0.005 = 0.029 \text{ m}^2$,因此钢板所受拉应力为(未考虑内部角钢的补强)

$$5.7 \text{ kPa} \times 2.04 / 0.029 = 0.4 \text{ MPa} \quad (1)$$

考虑到焊缝强度,设箱体钢板许用拉应力为不锈钢板的 80%,取 110 MPa 。收集箱钢板拉应力 0.4 MPa 远小于许用应力值,安全系数较高。

2.1.5 刚度考核

用满水试验考核收集箱刚度。满水保持 30 min ,箱体无渗漏无变形,刚度符合要求。

2.2 排空筒设计

2.2.1 设计流程

排空筒设计流程如图 4 所示。根据功能要求进行结构设计、尺寸计算,基于尺寸和常年平均气候条件进行风力计算,利用风力求解排空筒固定点的

约束力,再进行应力校核。若应力校核不通过,则修改尺寸。最后结构定型,设计结束。

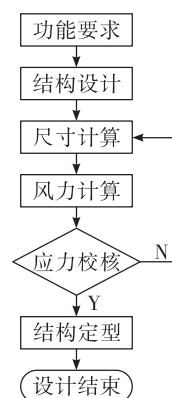


图 4 排空筒设计流程

Fig. 4 Discharge tube design process

2.2.2 结构设计

排空筒应具有与试验台各排气口对接、与氮气掺混口对接、降低排气流速、排气点符合安全要求、刚度稳定性好、与收集箱有效连通、防雷防雨雪等功能。

依据排空筒功能要求进行功能设计,流程如图 5 所示,设计的具体结构如图 1 所示。

排空筒中部焊接有与试验台各排气口和氮气掺混口对接的接口,为减少排气冲击力,接口在周向对称布置;下部插入收集箱的部分是花管结构,与收集箱上下板焊接固定;顶端焊接有防雨帽。排空筒所在位置和高度处于现场防雷区域内。

2.2.3 尺寸计算

1)排空筒直径:以排气速度低于马赫数 0.2 为原则,考虑高空稳定性以及标准化系列,选用不锈

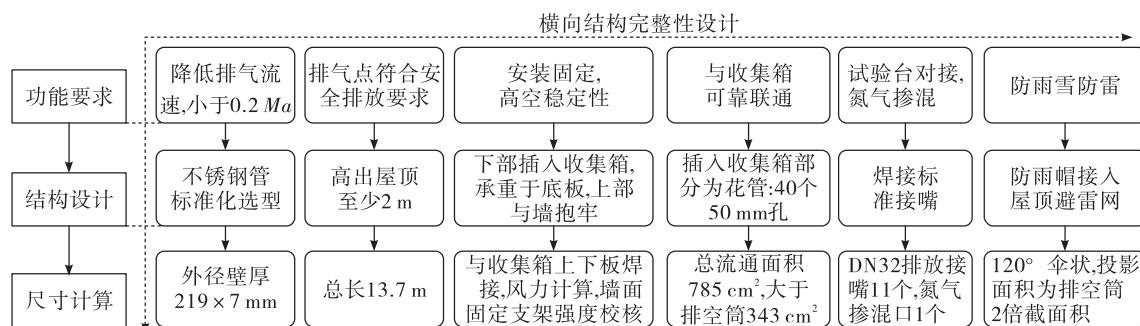


图 5 排空筒功能设计流程

Fig. 5 Discharge tube function design process

钢管 $\Phi 219 \times 7$ mm 制作。

2) 花管尺寸: 在排空筒壁面上打孔 50 mm, 圆周方向均布 4 个, 轴向共 10 排, 相邻两排间距 100 mm, 并错位布置。收集孔总流通面积为 785 cm^2 , 远大于排空筒直径流通面积 343 cm^2 , 能有效连通收集箱与排空筒, 顺利排气。

3) 防雨帽尺寸: 120° 伞形结构, 帽沿直径为排空筒直径 2 倍左右, 钢板卷制, 内有钢筋骨架, 与排空筒顶端焊接, 帽沿与排空筒顶端间距 300 mm 左右。

4) 排放接口: DN32, 氮气掺混口 1 个, 排气口多个, 个数和高度由试验台建设要求确定。

5) 排空筒高度: 高出附近屋顶 2 m 以上, 符合安全排放要求^[10-11], 与屋顶避雷网连接, 总长度为 12.5 m (不含花管部分)。

2.2.4 风力计算

排空筒风力计算公式^[12]

$$q = K_1 K_2 q_0 f D \quad (2)$$

式中: q 为管道单位长度所受水平风力, N/m ; K_1 为空气动力系数, 查表取值 0.63; K_2 为风振系数; q_0 为基本风压值, N/m^2 , 查表取值 350; f 为风压高度变化系数, 查表取值 1.14; D 为管道外径, 为 0.219 m。详细计算流程如图 6 所示。

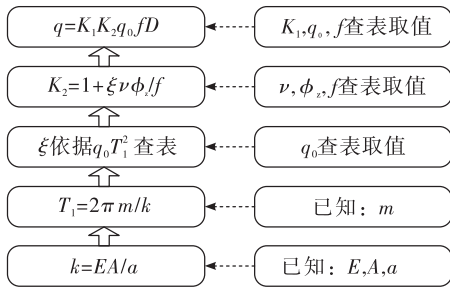


图 6 风力计算流程

Fig. 6 Wind force calculation process

图 6 中: v 为脉动影响系数, 查表取值 0.79; ϕ_z 为振型系数, 取为 1; ξ 为脉动增大系数, 与 $q_0 T_1$ 有关; T_1 为管系的基本自振周期, s; m 为排空筒两固定端的钢管质量, kg; k 为管系刚度系数; E 为 304 不锈钢弹性模量, 200 GPa; A 为管道横截面积, 计算得 $4\,662 \text{ mm}^2$; a 为排空筒两固定端距离, 为 5 m。由下至上依次计算得:

$k = 0.186\,48 \text{ GPa} \cdot \text{m}$; $T_1 = 0.006\,22 \text{ s}$, $q_0 T_1^2 = 0.013\,56$, 查表得 $\xi = 1.47$; $K_2 = 2.02$, $q = 111.2 \text{ N/m}$ 。

2.2.5 弯曲应力校核

排空筒所受弯曲应力校核流程为: 物理模型建立 → 约束力求解 → 应力图绘制 (剪力和弯矩) → 应力校核 (剪力和弯矩)。

2.2.5.1 物理模型建立

以排空筒为研究对象, 建立受力模型, 如图 7 所示。为分析方便, 将排空筒水平布置, 与收集箱连接的 O 点为固定端, 承受支反力 F_0 , 支反力偶矩 M_0 , 忽略自重; 支架位置 A 和 B 简化为活动铰支座, 分别承受支反力 F_A 和 F_B 。

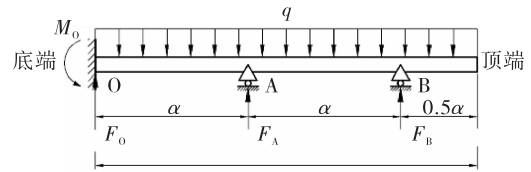


图 7 排空筒受力模型

Fig. 7 Discharge tube stress model

2.2.5.2 约束力求解

显然, 其属于二度超静定问题。选择 F_A 和 F_B 为多余支反力, 变形协调条件为: 悬臂梁分别承受 q, F_A, F_B 时在 A 和 B 处的合成挠度^[13] 为 0, 即

$$\omega_A = \frac{qa^2}{24EI}(4la - 6l^2 - a^2) + \frac{F_A a^3}{3EI} + \frac{5F_B a^3}{6EI} = 0 \quad (3)$$

$$\omega_B = \frac{qa^2}{3EI}(4la - 3l^2 - 2a^2) + \frac{5F_A a^3}{6EI} + \frac{8F_B a^3}{3EI} = 0 \quad (4)$$

式中: ω_A 为 A 处的合成挠度, m; ω_B 为 B 处的合成挠度, m; I 为排空筒截面惯性矩, m^4 ; l 为排空筒总长度, m。

联立式(3)和式(4)解得

$$F_A = 0.94qa, F_B = 1.05qa$$

由平衡方程

$$\Sigma F = F_A + F_B + F_0 - 2.5qa = 0 \quad (5)$$

$$\Sigma M(O) = M_0 + F_A \cdot a + F_B \cdot 2a - 2.5qa \cdot 1.25a = 0 \quad (6)$$

解得

$$F_0 = 0.51qa, M_0 = 0.085qa^2$$

2.2.5.3 应力图绘制

利用截面法求解剪力与弯矩。

OA段:剪力 $F_{s1} = -qx_1 + 0.51qa$, 弯矩 $M_1 = -0.5qx_1^2 + 0.51qax_1 - 0.085qa^2$, $x_1 = 0 \sim a$, 以O为原点, 向右为正;

AB段:剪力 $F_{s2} = qx_2 - 0.55qa$, 弯矩 $M_2 = -0.5qx_2^2 + 0.55qax_2 - 0.125qa^2$, $x_2 = 0 \sim a$, 以B为原点, 向左为正;

BC段:剪力 $F_{s3} = qx_3$, 弯矩 $M_3 = -0.5qx_3^2$, $x_3 = 0 \sim 0.5a$, 以C为原点, 向左为正;

据此绘制剪力图和弯矩图, 如图8和图9所示。

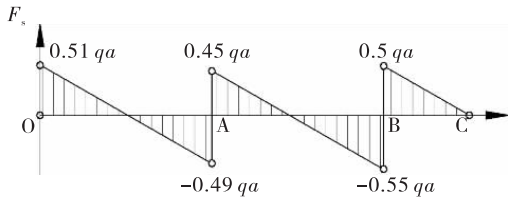


图8 剪力图

Fig. 8 Shear force diagram

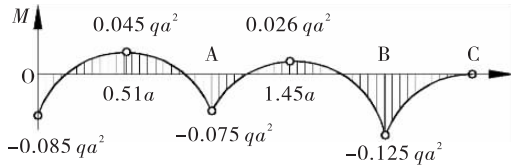


图9 弯矩图

Fig. 9 Bending moment diagram

2.2.5.4 应力校核

由弯矩图知, 排空筒在B截面承受最大弯矩 $0.125qa^2$, 故最大弯曲正应力 σ_{\max} 为(截面外径处)^[13]

$$\sigma_{\max} = \frac{0.125qa^2}{W_z} = 1.45 \text{ MPa} < [\sigma] \quad (7)$$

$$W_z = \frac{\pi D^3}{32} \left(1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4\right) \quad (8)$$

式中: $[\sigma]$ 为许用拉应力, 304 不锈钢为 137 MPa; W_z 为排空筒截面的抗弯截面系数; 内径 $d = 205 \text{ mm}$, 外径 $D = 219 \text{ mm}$; $a = 5 \text{ m}$ 。可见, 弯曲正应力安全系数较高。

由图8可知, 排空筒在B截面承受最大剪力 $0.55qa$, 故最大切应力(截面内径处)^[13]

$$\tau_{\max} = \frac{0.55qa \cdot S_{z,\max}}{I_z \cdot D} = 0.01 \text{ MPa} < [\tau] \quad (9)$$

$$S_{z,\max} = \frac{D^3 - d^3}{12} \quad (10)$$

$$I_z = \frac{\pi D^4}{64} \left(1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4\right) \quad (11)$$

式中: $[\tau]$ 为许用切应力, 304 不锈钢为 41 MPa; $S_{z,\max}$ 为一半截面对中性轴的静矩; I_z 为截面对中性轴的惯性矩。可见, 弯曲切应力安全系数也较高。

2.2.6 底端花管强度校核

排空筒由于自重, 在底端花管结构承受轴向力最大, 截面积最小, 故对该薄弱结构进行应力分析。排空筒及与其连接的附件总重量约为 0.8 t, 计算得底端花管位置承受最大压应力为 2.6 MPa, 远低于材料抗压强度, 安全系数较高。

2.3 固定支架设计

2.3.1 结构设计

为保证排空筒树立稳定性, 在图7所示A、B处用支架固定排空筒, 支架采取环抱排空筒、膨胀螺栓连接于墙面的结构形式, 用型钢制作。结构示意图如图10所示。

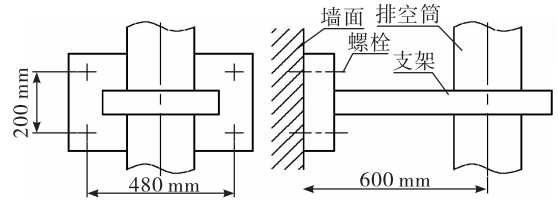


图10 支架示意图

Fig. 10 Stent schematic diagram

2.3.2 螺栓连接强度校核

支架与墙面的连接螺栓是薄弱环节, 故对连接螺栓进行强度校核。

2.3.1节所求约束力中, F_B 大于 F_A , 故校核B处连接强度。当风力与墙面平行时, 支架所受弯矩最大, 为 $F_B \times 0.6 \text{ m} = 350.4 \text{ N} \cdot \text{m}$, 螺栓最大工作拉力^[8] $F = 350.4 \times 0.24 / (0.24^2 \times 4) = 365 \text{ N}$ 。因风载为动载, 取螺栓残余预紧力 $F' = F$ ^[14], 则应力幅^[15]

$$\sigma_a = \frac{2\lambda F}{\pi d_c^2} = 2.1 \text{ MPa} \quad (12)$$

式中: λ 为相对刚度系数, 考虑到使用的是膨胀螺

栓,取值 0.6; d_c 为螺栓 M10 的计算直径,取值 8.16 mm。

许用应力幅^[15]

$$[\sigma_a] = \frac{\varepsilon k_m k_u}{k_\sigma S_a} \sigma^{-1} = 9.7 \text{ MPa} \quad (13)$$

式中: ε 为尺寸系数,取 1; k_m 为螺纹制造工艺系数,取 1; k_u 为螺纹受力不均系数,取 1; k_σ 为螺纹应力集中系数,取 3.9; S_a 为安全系数,取 5; σ^{-1} 为疲劳极限,取 190 MPa。

$\sigma_a < [\sigma_a]$, 螺栓强度满足要求。

3 排放压力和速度仿真计算

由于实际过程是复杂多变的,将模拟计算进行适当简化,假定低温液体进入收集箱全部汽化为气态并接近常温状态(最苛刻条件),排空筒出口为压力边界条件 101 325 Pa。排放接口处为流量边界条件:液甲烷流量为 1 kg/s,液氧流量为 2 kg/s。

基于 FIUENT14.0 软件,采用 ICEM 软件进行了三维建模,网格划分量约 6 万,对收集箱和排空筒连接处、壁面附近等复杂流动区域进行加密处理。计算采用有限体积法、基于密度的隐式求解法、绝热无滑移和固体边界条件、RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型。文献[16-17]对上述计算方法进行了试验验证,可以比较准确地模拟复杂流动。

排空装置分别排放液甲烷和液氧时,收集箱压力、排放接口压力、排空筒出口速度仿真计算结果分别如图 11~图 16 所示。

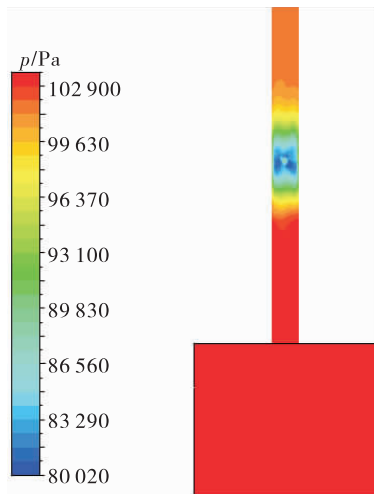


图 11 收集箱压力分布(排放液甲烷)

Fig. 11 Box pressure distribution(discharging methane)

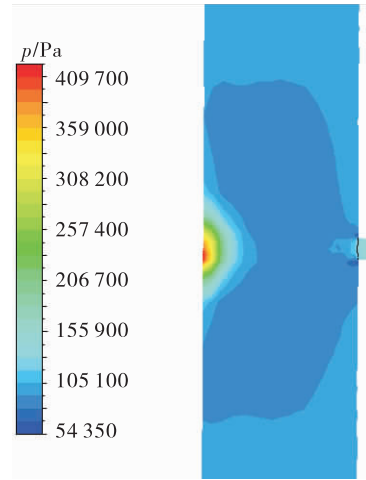


图 12 排放接口处压力分布(排放液甲烷)

Fig. 12 Discharge outlet pressure distribution (discharging methane)

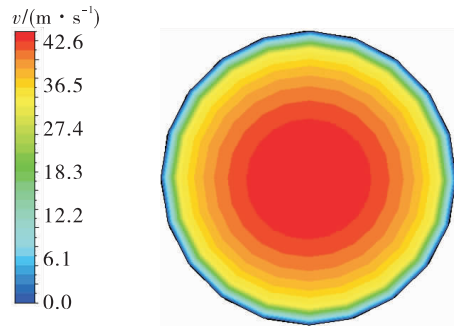


图 13 排空筒出口速度分布(排放液甲烷)

Fig. 13 Discharge tube exit velocity distribution (discharging methane)

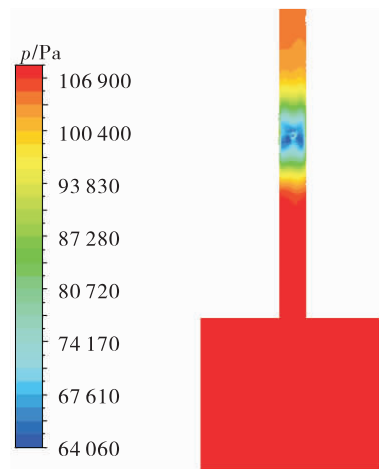


图 14 收集箱压力分布(排放液氧)

Fig. 14 Box pressure distribution(discharging oxygen)

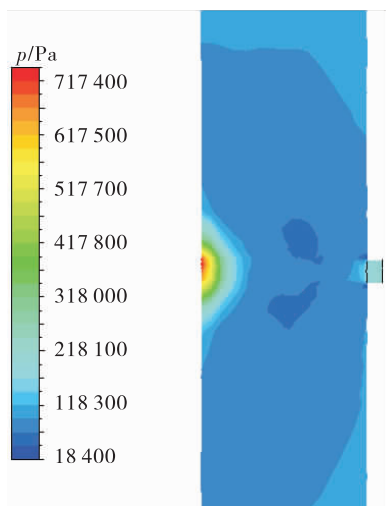


图15 排放接口处压力分布(排放液氧)

Fig. 15 Discharge outlet pressure distribution (discharging oxygen)

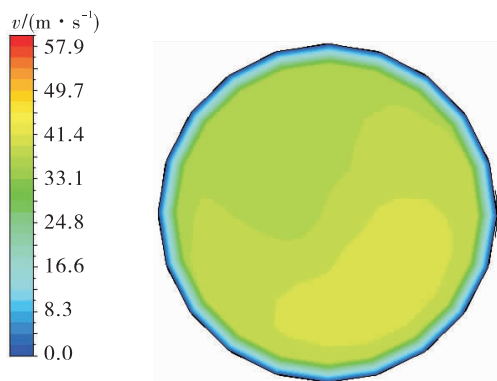


图16 排空筒出口速度分布(排放液氧)

Fig. 16 Discharge tube exit velocity distribution (discharging oxygen)

排空装置排放液甲烷和液氧时,收集箱内部压力分别为 0.103 MPa(绝压)、0.107 MPa(绝压),收集箱强度满足要求;在排气接口处最大冲击载荷分别为 0.41 MPa,0.72 MPa,低于排空筒最大承压 7 MPa,强度也满足要求;排空筒出口气流平均速度分别为 40 m/s,45 m/s,参照氢气相关规范,排放流速符合规范要求^[9-11]。

4 排空装置工程应用

依据本文设计方法,加工了两个排空装置,如图 17 所示,分别用于排放甲烷和氧。

该排空装置已广泛应用于多种类型试验中,如某型液氧/甲烷发生器热试、某型液氧/煤油推力室

热试、气氧/煤油点火试验、液氧/煤油超临界燃烧室热试(图 18)、低温运转试验等,工作安全可靠,试验均获得成功。通过现场浓度监测,在地面操作人员活动范围内,氧气/甲烷浓度均在正常范围内。



图17 排空装置实物图

Fig. 17 Photo of emission device



图18 液氧/煤油超临界燃烧室热试

Fig. 18 Hot test of liquid oxygen/kerosene supercritical combustion chamber

5 结论

1)设计了一种新型排空装置,能有效组织较大流量低温氧/甲烷等易燃易爆介质的安全排放,已应用于多个相关试验中,排空装置工作安全、可靠,试验均获得成功。

2)针对排空装置收集箱、排空筒、固定支架等关键部件,给出了设计流程和详细设计过程。

3)数值仿真了排空装置的工作过程,收集箱内最大压力为 0.107 MPa,排空筒上排放接口处最大冲击载荷为 0.72 MPa、排放平均流速为 45 m/s,均符合强度要求和安全排放要求。

参考文献:

- [1] 张小平, 李春红, 马冬英. 液氧/甲烷发动机动力循环方式研究[J]. 火箭推进, 2009, 35(4): 14-20, 43.
ZHANG X P, LI C H, MA D Y. Study on the LOX/methane rocket engine power cycles[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2009, 35(4): 14-20, 43.
- [2] 王少鹏. 21 世纪空间运输系统的液氧/甲烷火箭发动机[J]. 火箭推进, 2002, 28(1): 50-54.
WANG S P. Liquid oxygen/methane rocket engine for space transportation system in the 21st century [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2002, 28(1): 50-54.
- [3] 禹天福, 李亚裕. 液氧/甲烷发动机的应用前景[J]. 航天制造技术, 2007, 4(2): 1-4.
- [4] 孙宏明. 液氧/甲烷发动机评述[J]. 火箭推进, 2006, 32(2): 23-31.
SUN H M. Review of liquid oxygen/methane rocket engine [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2006, 32(2): 23-31.
- [5] 喻闯闯, 罗天培, 刘瑞敏, 等. 火箭发动机试验台中低温甲烷的安全排放研究综述[J]. 宇航学报, 2017, 38(10): 1013-1023.
- [6] 赵耀中, 游良平, 孔凡超, 等. 某火箭试验台低温甲烷排放过程数值模拟[J]. 低温工程, 2017(4): 68-72.
- [7] 冯飞, 王鹄. 甲烷高空排放技术数值模拟[J]. 军民两用技术与产品, 2015(1): 58-60.
- [8] 李茂, 孙万民, 刘瑞敏. 低温氢气排放过程数值模拟[J]. 火箭推进, 2013, 39(4): 74-79.
LI M, SUN W M, LIU R M. Numerical simulation of cryogenic gaseous hydrogen emission [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2013, 39(4): 74-79.
- [9] 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(5): 51-55.
- [10] 张福才, 范邦强, 于广经, 等. 用氢安全技术规范: QJ2298-92[S]. 北京: 中华人民共和国航空航天工业部, 1992.
- [11] 薛君玉, 罗让, 谭易, 等. 氧气站设计规范: GB 50030-91[S]. 北京: 中华人民共和国建设部, 1992.
- [12] 秦叔经, 蔡暖姝, 丁伯民, 等. 压力管道规范·工业管道第 3 部分设计和计算: GB/T 20801.3-2006[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2006.
- [13] 单辉祖. 材料力学-I [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [14] 机械设计手册编委会. 机械设计手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [15] 邱宣怀, 郭可谦, 吴宗泽, 等. 机械设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997.
- [16] 李永洲, 张堃元, 孙迪. 马赫数可控的方转圆高超声速内收缩进气道试验研究[J]. 航空学报, 2016, 37(10): 2970-2979.
- [17] 王翼. 高超声速进气道启动问题研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.

(编辑: 马 杰)