

箭上复合材料气瓶绝热性能数值分析和试验研究

王道连¹ 叶超² 许光² 方红荣² 李玉龙¹

(1 西北工业大学航空学院,西安 710072)

(2 北京宇航系统工程研究所,北京 100076)

文 摘 为满足复合材料层使用温度不超过 80℃的安全要求,安装在运载火箭发动机舱段的复合材料气瓶需包覆一定厚度的绝热层。本文结合 40 L 复合材料气瓶及绝热层的结构参数和材料物性参数,基于集总参数方法建立了考虑辐射、导热、自然对流的传热模型,分析了包覆绝热层后的瓶体绝热性能及绝热层厚度的影响,并开展了包覆 5 和 10 mm 厚度绝热层的复合材料气瓶绝热试验,数值模拟结果与绝热试验测量数据吻合良好。

关键词 复合材料气瓶,绝热层,数值模拟,红外辐射

中图分类号:V46;TB33;TK1

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.02.005

Numerical and Experimental Study on the Insulation Performance of A Rocket-Borne COPV

WANG Daolian¹ YE Chao² XU Guang² FANG Hongrong² LI Yulong¹

(1 School of Aeronautics, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072)

(2 Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076)

Abstract In order to meet the demand that working temperature of the composite layer should be below 80℃, an insulation layer is wrapped around the composite overwrapped pressure vessel (COPV) mounted in the engine compartment of launch vehicles. Based on lumped parameter method, structural parameters and physical property data of a 40 L COPV, a numerical model in consideration of the radiation, conduction and convection process was established. It analyzed the insulation performance and discussed the influence of the insulation layer thickness. Moreover, insulation tests of the COPV wrapped by an insulation layer with the thickness of 5 mm or 10 mm were carried out. The numerical results agree well with the experiment measurements.

Key words COPV, Insulation layer, Numerical simulation, Infrared radiation

0 引言

由于航天运载器的发展需求,复合材料压力容器逐步得到应用和发展^[1,2]。复合材料气瓶因为具有泄漏先于爆破(LBB)的失效模式、质量轻、结构效率高、疲劳寿命长等优点,正在逐渐取代金属高压气瓶,在现代航天运载工具中承担为贮箱增压、为动力或控制系统气动阀门提供气源、为姿控系统惯性器件提供气态环境、气封、吹除等功能。复合材料气瓶的结构一般由金属内衬层和外侧缠绕的复合材料层构成。为满足复合材料层工作温度不高于 80℃的安全要求,安装在箭上发动机舱段的复合材料气瓶必须在

表面包覆绝热层,以避免发动机工作时产生的高温辐射造成瓶体复合材料过度升温。

本文对一种应用于液体运载火箭发动机舱的 40 L 复合材料气瓶的绝热层性能开展了数值分析和试验研究,并比较了绝热层厚度对绝热性能的影响。

1 研究对象

研究对象为一种安装在发动机舱段的 40 L 复合材料气瓶,金属内衬材料为铝合金 6061,复合层材料为玻璃纤维、碳纤维和环氧树脂。当发动机工作时,瓶体单面承受来自发动机的辐射热流。为避免复合材料层过度升温,瓶体表面包覆一定厚度的柔性隔热

收稿日期:2014-10-28

作者简介:王道连,1979 年出生,博士研究生,研究方向为飞行器设计。E-mail:ath3ee@foxmail.com

毡作为绝热层,绝热层材料为陶瓷纤维材料。该复合材料气瓶瓶体结构、材料物性参数见表1~表2。

表1 40 L 复合材料气瓶结构参数

Tab.1 Structure parameters of the 40 L COPV

内表面 积/m ²	外表面 积/m ²	内衬质 量/kg	复合层 质量/kg	内衬壁厚 /mm	复合层 壁厚/mm
0.617	0.652	3.5	4.8	1.2	4

表2 材料物性参数

Tab.2 Material property

材料	密度 /kg·m ⁻³	比热容 /J·(kg·K) ⁻¹	热导率 /W·(m·K) ⁻¹
复合材料	1575	1100	0.95
金属内衬	2700	900	200
绝热层	200	1030(常温~900℃)	0.03

2 模型建立

基于集总参数方法分析复合材料气瓶包覆绝热层的绝热性能,不考虑瓶体及气体的温度场分布。根据气体状态方程、能量守恒方程、传热方程求解气体的平均温度和压力、瓶体各材料层及壁面的平均温度。将瓶体简化为相同长度的圆柱筒段结构,基于集总参数法,对于金属内衬、复合材料和绝热层材料沿径向分别划分3个热容单元,基于导热方程、能量守恒方程求解对应单元的温度和热流;为减小由于单元数量造成的计算误差,模型中对各材料层均建立了内、外壁面单元,保证了计算精度^[3];同时,由于瓶体单面承受辐射加热,所以瓶体沿环向划分为2个热容单元,分别模拟辐射面和背面。

瓶体径向方向导热热流密度按下式计算:

$$q = \frac{2\lambda_M |_{T_{\text{mean}}}}{d} \times \frac{T_i - T_o}{\ln(d_o/d_i)} \quad (1)$$

式中, λ_M 为瓶体相应材料热导率; d 为单元中径; T 为单元温度;下标 mean、i、o 分别代表均值、内壁面、外壁面。

瓶体环向方向导热热流密度按下式计算:

$$q = \frac{2\lambda_M |_{T_{\text{mean}}}}{\pi d} \times (T_1 - T_2) \quad (2)$$

式中,下标 1、2 分别代表辐射面和背面单元。

瓶体单面承受 15 kW/m² 热流密度的辐射加热。同时,地面绝热试验工况下瓶体外壁面与外界存在对流换热和辐射换热,由于辐射热流密度较大,气瓶外壁面温度较高,此时气瓶外壁面向环境的辐射散热量很大,不能忽略其影响,瓶体外壁面向环境的辐射热流密度按照下式计算:

$$q = \xi \times \sigma \times (T_o^4 - T_f^4) \quad (3)$$

式中, ξ 为瓶体外壁面等效发射率; σ 为 Stefan-Boltz-宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2015年 第2期

mann 常量; T_f 为环境温度。

气瓶外壁面与空气之间的对流换热视为大空间自然对流,换热系数按下式计算:

$$h_o = 0.48 (Gr \cdot Pr)^{0.25} \cdot \frac{\lambda_f}{L_o} \quad (4)$$

式中, L_o 为瓶体外径。

地面绝热试验工况下,气瓶两端的接管嘴均为敞开状态,因此气瓶内气体温度、压力按下式计算:

$$\begin{bmatrix} V \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial p}\right)_T & V \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_p \\ M \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T - V & M \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{dp}{dt} \\ \frac{dT}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{dM_i}{dt} - \rho \cdot \frac{dV}{dt} \\ \frac{dM_i}{dt} \cdot h_i - \frac{dM_i}{dt} \cdot h + Q \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, V 为气瓶容积; ρ 为气体密度; p 为气体压力; T 为气体温度; t 为时间; M 为气瓶内气体质量; h 为比焓; M_i 为进入气瓶的气体质量; Q 为瓶体内壁与瓶内气体之间的换热热流。

气瓶内气体被壁面加热后会产生局部流动,模型中将瓶内气体局部流动视为温升导致的自然对流处理,换热系数按下式计算:

$$h_i = 0.11 (Gr \cdot Pr)^{0.33} \cdot \frac{\lambda_f}{L_i} \quad (6)$$

式中, λ_f 为空气热导率; L_i 为瓶体内径。

基于上面的数学模型和物性参数,应用 AMESim 软件建立数值分析模型见图1。

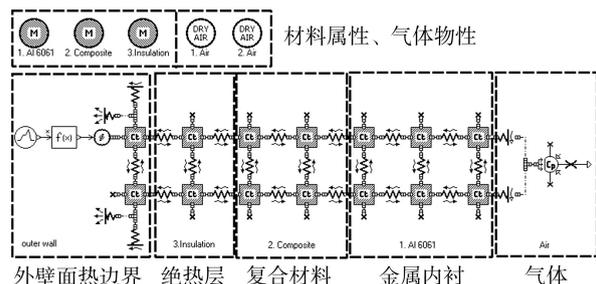
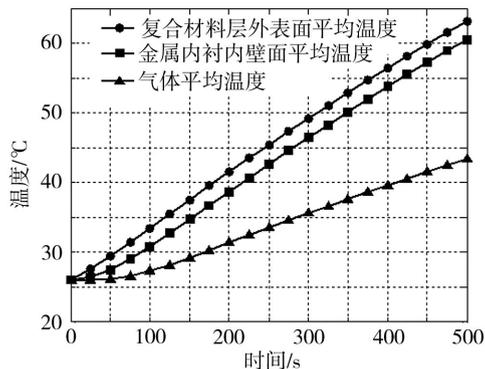


图1 40 L 复合材料气瓶绝热性能 AMESim 模型

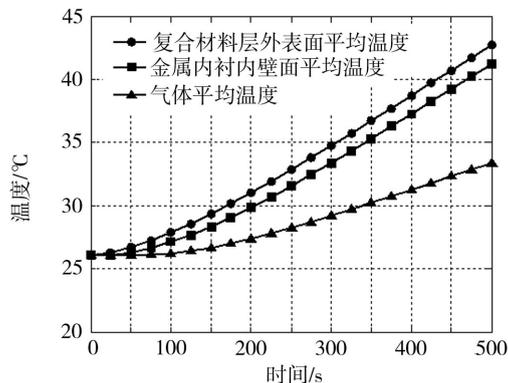
Fig.1 AMESim model on insulation performance of the COPV

3 数值模拟结果分析

应用上面的模型,分别计算包覆5和10 mm 厚度绝热层的40 L 复合材料气瓶绝热性能,计算结果见图2。



(a) 5 mm 厚度绝热层



(b) 10 mm 厚度绝热层

图2 瓶体辐射面的壁面平均温度计算值

Fig. 2 Simulation results of average temperature on radiation wall

计算结果显示, 包覆 5 mm 厚度绝热层, 外壁面单侧辐射热流密度 15 kW/m^2 工况下, 加热 500 s 后, 复合材料层外壁面(辐射面)平均温度 63.1°C , 金属内衬层内壁面(辐射面)平均温度 60.5°C , 瓶内气体平均温度 43.3°C ; 包覆 10 mm 厚度绝热层, 相同热环境下, 加热 500 s 后, 复合材料层外壁面(辐射面)平均温度 42.7°C , 金属内衬层内壁面(辐射面)平均温度 41.2°C , 瓶内气体平均温度 33.4°C 。

4 复合材料气瓶绝热试验结果

40 L 复合材料气瓶的绝热试验系统应用石英灯阵红外辐射式加热装置模拟箭上发动机舱热环境^[4], 试验系统照片见图 3, 试验条件: 辐射热流密度

15 kW/m^2 , 持续时间 500 s。瓶体复合材料层外表面温度测点布置见图 4, 其中, $1^\# \sim 10^\#$ 测点布置在气瓶复合材料层外壁面辐射面中轴线位置; $11^\#$ 、 $12^\#$ 测点布置在气瓶内部中央位置, 测量气体温度。应用该系统分别对瓶体外表面包覆 5 和 10 mm 厚度绝热层的两种工况进行绝热性能测试, 测量数据见图 5。对比试验测量数据和数值分析结果: $3^\# \sim 6^\#$ 测点分别处于瓶体圆柱筒段的辐射面中轴线位置, 四个测点数据的算术平均值可近似认为瓶体圆柱筒段辐射面的平均温度; $2^\#$ 、 $7^\#$ 测点处于瓶体两端椭球封头的辐射面中轴线位置, 其算术平均值可近似认为瓶体椭球封头辐射面的平均温度。因此, 根据圆柱筒段和椭球封头表面积比例, 对测点 $2^\# \sim 7^\#$ 的数据做加权平均得到瓶体复合材料层外表面平均温度(辐射面) T_a , 计算公式如下:

$$T_a = \frac{T_3 + T_4 + T_5 + T_6}{4} \times 58\% + \frac{T_2 + T_7}{2} \times 42\% \quad (7)$$

经对比, 5 mm 绝热层工况下, 500 s 时复合材料层外表面(辐射面)平均温度模型计算值为 63.1°C , 试验数据加权平均值为 65.1°C , 相对误差 3.0%; 10 mm 绝热层工况下, 500 s 时复合材料层外表面(辐射面)平均温度模型计算值为 42.7°C , 试验数据加权平均值为 45.5°C , 相对误差 6.2%。

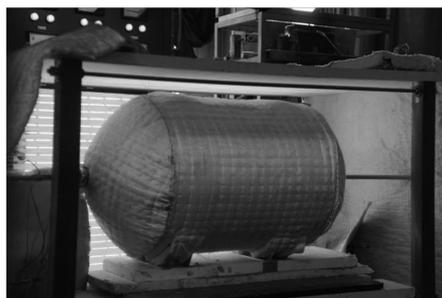
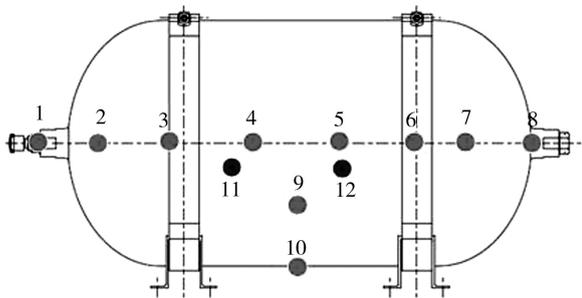
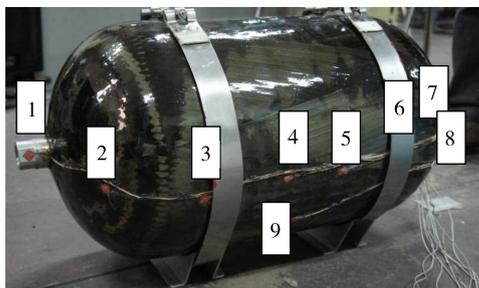


图3 热流加载试验系统

Fig. 3 Heat flux load test system



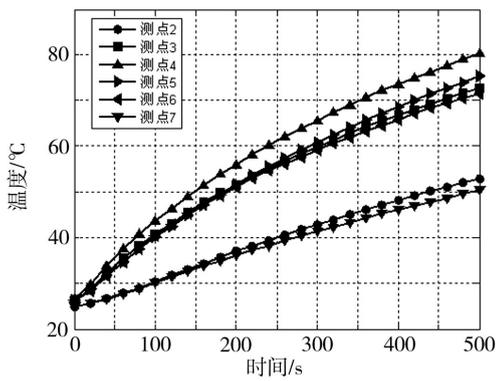
(a) 温度测点布置示意图



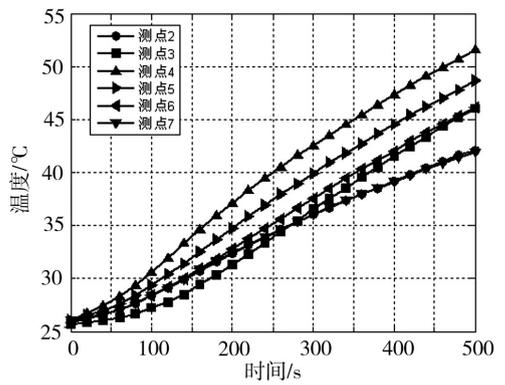
(b) 瓶体复合材料层外表面测点布置

图4 温度测点布置

Fig. 4 Temperature measuring points layout



(a) 5 mm 厚度



(b) 10 mm 厚度

图5 绝热试验温度测量数据

Fig. 5 Measured data of the insulation test

5 绝热层厚度影响分析

应用前面的数值模型分析绝热层厚度对复合材料气瓶温度的影响,图6中计算结果显示,绝热层厚度在5~10 mm,瓶体平均温度随绝热层厚度增加而下降,二者近似呈线性规律。

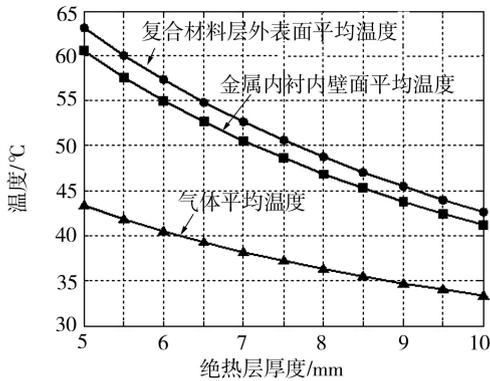


图6 绝热层厚度对复合材料气瓶温度的影响

Fig. 6 Influence of the insulation layer thickness on the COPV temperature

6 结论

(1)数值分析结果与试验实测数据对比显示,基于集总参数方法的传热学模型,能够有效分析瓶体各

材料层的平均温度变化及绝热材料的绝热性能,计算结果与试验数据吻合良好;集总参数方法虽然不能考虑结构细节及温度场的具体分布,但在建立起合理的壁面热容节点和传热模型时,仍是分析工程复杂传热问题的良好选择;

(2)数值分析及试验结果证明,10 mm 厚度绝热层能够保证在单面辐射热流密度 15 kW/m^2 、加热 500 s 的热环境下,复合材料层温度不超过 80°C ;

(3)绝热层厚度在 5~10 mm,瓶体平均温度与绝热层厚度近似呈线性关系。

参考文献

- [1] 宋大君,王容国,刘文博,等. 航天用复合材料压力容器的应用与发展[J]. 宇航材料工艺, 2010,40(6): 24-26
- [2] 于斌,刘志栋,赵为伟,等. 国内外复合材料气瓶发展概况与标准分析(一)[J]. 压力容器, 2011,28(11): 47-52
- [3] 王剑中,王道连,叶超,等. 冷氢换热器数值建模及性能仿真研究[J]. 低温工程, 2014(1): 62-66
- [4] 吴大方,房元鹏,张敏. 高速飞行器瞬态气动热试验模拟系统[J]. 航空计测技术, 2003,23(1): 9-14

(编辑 李洪泉)