

基于 Fluent 的复合材料包装箱温度场仿真研究

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2024.04.006

马晋涛 周 洋
田 宇

沈阳航天新光集团有限公司
辽宁 沈阳 110041

摘 要: 为研究某复合材料包装箱在运输过程中遇到低温环境时箱内温度的变化,在包装箱内部产品材料参数不明确时,采用等效分析的方法,对包装整体进行简化建模,利用 Fluent 软件对二维模型进行温度场仿真分析。结果表明:在设定条件下,5 h 后包装箱内部产品温度降低了 9.9 °C(不超过 10 °C)。说明包装箱的被动保温性能满足要求,能够在运输过程中对内部产品进行有效防护。

关键词: 复合材料; 包装箱; 二维模型; 被动保温; Fluent

中图分类号: TB482.2; TB484

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2024)04-0039-04

引文格式: 马晋涛,周 洋,田 宇. 基于 Fluent 的复合材料包装箱温度场仿真研究 [J]. 包装学报, 2024, 16(4): 39-42.

复合材料包装箱的性能是保障航天运输安全的重要因素。温度是运输过程的一个重要参数,温度过高或过低均会造成包装箱内航天器材的故障,从而产生多方面的损失。国内外对于复合材料包装箱的研究较多^[1-5],例如:G. Cesini 等^[1]通过数值模拟和试验测试的方法,对一个封闭包装箱体的温度和换热条件进行了研究;赵志颖等^[2]研究了一种复合材料包装箱保温功能的设计;苏新明等^[3]分析了航天器包装箱在两种极端天气条件下的被动保温性能。

本文以某型号复合材料包装箱为研究对象,对包装箱及其包装的内部产品进行简化建模,仿真分析包装箱在低温工况下的保温性能,以期为包装箱的设计提供理论参考。

1 复合材料包装箱及内部产品保温技术要求

复合材料包装箱及内部产品保温技术要求如下:无包装箱的状态下,内部产品保温技术要求为初始

温度 20 °C、外界环境 -50 °C、2 h 后温度变化不超过 10 °C。有包装箱的状态下,内部产品保温技术要求为初始温度 20 °C、外界环境 -50 °C、5 h 后温度变化不超过 10 °C。整理得出 Fluent 热分析计算的极端工况条件:将包装箱在 20 °C 初始条件时,迅速转移至外界温度 -50 °C 工况下,检测 5 h 后包装箱内部气体和内部产品的温度变化是否不超过 10 °C。

2 包装箱结构及其模型简化

2.1 包装材料与结构设计

包装箱箱体结构分为 3 层,外蒙皮为 2.5 mm 厚的玻璃纤维板,内蒙皮为 2 mm 厚的碳纤维板,内外蒙皮间的夹心层填充 30 mm 厚的 PVC 泡沫。玻璃纤维和 PVC 泡沫的导热系数低,具有一定的热防护作用。内部产品外表面包覆的热防护层,采用 8.5 mm 某型隔热复合材料+3 mm ZG32CrMo+11.4 mm 某气凝胶。该包装箱及内部产品热防护层材料的热物性参数如表 1 所示。

收稿日期: 2024-01-16

作者简介: 马晋涛(1992-),男,辽宁调兵山人,沈阳航天新光集团有限公司工程师,硕士,主要研究方向为机械结构设计与仿真, E-mail: 13940280569@163.com

表1 包装材料的热物性参数

Table 1 Thermophysical property parameters of packaging materials

材 料	密度 / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比热容 / ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)	导热系数 / ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)
空气	与温度相关	1006.43	0.024
玻璃纤维	2400	750	0.030
PVC 泡沫	80	900	0.033
碳纤维	1500	1260	5.000
某型隔热复合材料	620	1100	0.047
ZG32CrMo	7870	561	47.700
某气凝胶	250	1000	0.020

2.2 包装箱和内部产品模型简化

将包装箱和内部产品进行模型简化,以节省建模及计算时间。忽略包装箱表面的凸起结构,从包装箱中间薄弱位置进行剖切,得到简化包装箱切面尺寸:1010 mm(宽)×961 mm(高)。由于包装箱内部产品的形状、结构和材料组成比较复杂,难以按实际情况进行仿真研究,故此将内部产品等效为圆形,内部产品外表面包覆热防护层。模型简化如图1所示。

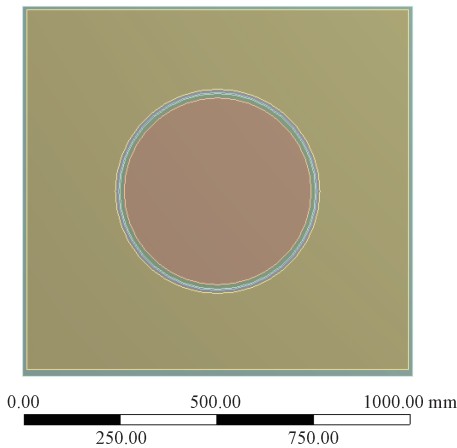


图1 包装箱和内部产品二维模型简化图

Fig. 1 Simplified 2D model diagram of packaging box and internal products

3 温度场仿真

3.1 温度场仿真实验

复合材料包装箱的传热是一个复杂的过程,本文利用 Fluent 软件对其进行仿真研究。在模型求解过程中,认为气体不可压缩,其状态方程为理想气体状态方程。仿真研究中,采用 Laminar 层流模型求解自

然对流换热并对包装箱及箱内空气温度场进行数值模拟,具体控制方程^[6]如下:

1) 质量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0; \quad (1)$$

2) 动量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U) + \nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla p + \nabla \cdot (\tau) + \rho g + F; \quad (2)$$

3) 能量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (U(\rho E + p)) = G. \quad (3)$$

式(1)~(3)中: ρ 为空气密度;

t 为时间;

$\nabla \cdot$ 表示某物理量的散度运算;

∇ 表示某物理量的梯度运算;

U 为空气流速;

UU 表示空气流速的梯度运算

p 为静压力;

τ 为应力张量;

ρg 为重力质量力;

F 为外部质量力;

E 为流体内能;

G 为黏性耗散项,指由于黏性作用流体的内热源由机械能转化为热能的部分。

3.2 计算条件

包装箱内外蒙皮经过表面处理,其红外发射率很低,与对流换热相比,辐射换热量较小。因此,在仿真过程中忽略内外蒙皮的辐射换热。

采用 Mesh CFD 模块对包装材料进行网格划分。由于不同包装材料所占区域大小差别较大,故使用 Face Sizing 分别对不同材料所占区域划分为不同大小网格。包装箱 PVC 泡沫区域网格大小为 6 mm,某型隔热复合材料区域网格大小为 2 mm, ZG32CrMo 区域网格大小为 1 mm,某气凝胶区域网格大小为 3 mm,空气区域网格大小为 15 mm,网格总数为 48 000 个。

仿真分析时,需考虑重力引起的自然对流;边界条件设置为包装箱外侧 4 条边 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$,初始温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$;包装箱的外蒙皮和内蒙皮使用薄壳传热模型,以模拟 2.5 mm 厚玻璃纤维与 2 mm 厚碳纤维的影响;求解过程采用瞬态计算,设置时间步长为 2 s,内迭代 10 步,共迭代 9000 步,总计 18 000 s。

4 包装箱及内部产品的温度场分析

4.1 无包装箱状态下的温度场分析

等效为圆形的内部产品没有材料参数,但由于已知内部产品需满足自身的保温技术要求,因此对内部产品及热防护层单独进行温度场分析。通过多次调整内部产品等效材料仿真参数,得到内部产品满足 2 h 保温指标时的仿真分析结果,如图 2 所示。此时热防护层内部产品等效材料仿真参数如下:密度为 310 kg/m^3 ,比热容为 $1360 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$,导热系数为 $10 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。提取热防护层内表面最低温度,得到温度随时间变化的曲线,如图 3 所示。

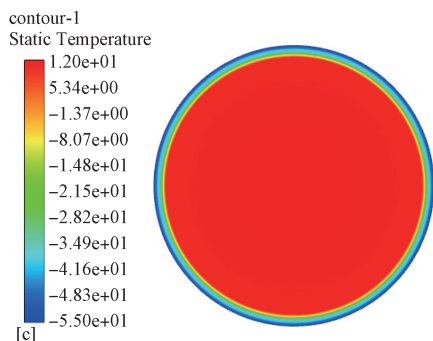


图 2 无包装箱时内部产品及热防护层温度场仿真分析结果

Fig. 2 Simulation analysis results of internal products and thermal protection layer without packaging box

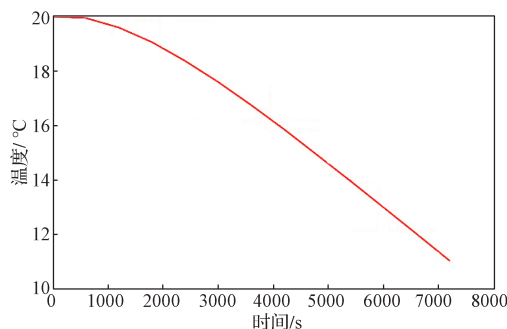


图 3 无包装箱时热防护层内表面最低温度随时间变化曲线

Fig. 3 Time variation curve of the minimum temperature on the inner surface of the thermal protection layer without packaging box

由图 3 可知,无包装箱状态下 2 h 后,热防护层内表面最低温度从 20°C 降到了 11.03°C ,满足内部产品 2 h 温度变化不超过 10°C 的保温指标。

4.2 有包装箱状态下的温度场分析

有包装箱状态下,对包装箱、内部产品及热防护

层整体温度场进行仿真分析,结果如图 4 所示。提取热防护层内表面最低温度,得到温度随时间变化的曲线,如图 5 所示。

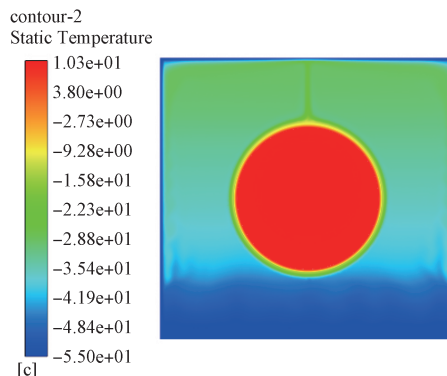


图 4 有包装箱时包装整体温度场仿真分析结果

Fig. 4 Simulation analysis results of the overall temperature field of packaging with packaging box

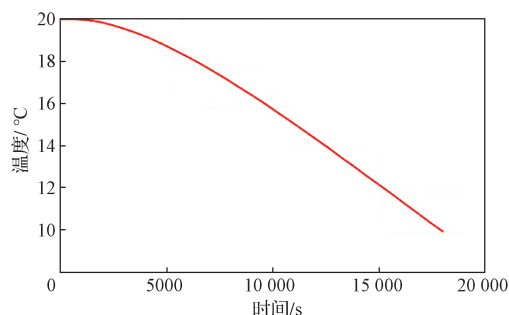


图 5 有包装箱时热防护层内表面最低温度随时间变化曲线

Fig. 5 Time varying curve of the minimum temperature on the inner surface of the thermal protection layer with packaging box

由图 5 可知,有包装箱状态下 5 h 后,热防护层内表面最低温度从 20°C 降到了 10.1°C ,满足内部产品 5 小时温度变化不超过 10°C 的保温指标。此状态下 2 h 后,热防护层内表面的最低温度为 17.5°C ,与无包装箱时的 11.03°C 相比,温度改变明显减少,因此包装箱能显著增强对内部产品的热防护能力。

受模型简化和内部产品材料差异等因素的影响,温度场仿真分析的结果与实际情况可能会存在一定误差,但仿真结果表明,所研究的复合材料包装箱基本能满足保温功能的要求。

5 结语

对包装箱内部产品材料参数不明确的情况下采

用等效简化方式, 利用 Fluent 软件对复合材料包装箱在低温工况下的保温性能进行了仿真分析, 结果表明: 在外界环境温度为 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 包装箱内初始温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 包装箱被动保温 5 h 后, 箱内产品的温度最低降低到了 $10.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。考虑模型简化等因素对仿真结果的影响, 本文所研究的复合材料包装箱基本能满足保温功能的要求。

参考文献:

- [1] CESINI G, PAROCINI M, Cortella G. Natural Convection from a Horizontal Cylinder in a Rectangular Cavity[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1999, 42(10): 1801-1811.
- [2] 赵志颖, 陈平, 彭飞, 等. 复合材料包装箱保温功能设计及验证[J]. *包装工程*, 2021, 42(3): 159-163.
ZHAO Zhiying, CHEN Ping, PENG Fei, et al. Design and Verification of Composite Thermal Insulation Storage Containers[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(3): 159-163.
- [3] 苏新明, 付仕明, 裴一飞. 航天器运输用包装箱被动保温性能分析[J]. *宇航学报*, 2012, 33(9): 1334-1340.
SU Xinming, FU Shiming, PEI Yifei. Passive Heat Preservation Analysis on Spacecraft Transportation Package[J]. *Journal of Astronautics*, 2012, 33(9): 1334-1340.
- [4] 康宝臣, 郭志军, 薛贵林. 大型密封包装箱复合结构设计及优化分析[J]. *数字海洋与水下攻防*, 2018, 1(2): 63-68.
KANG Baochen, GUO Zhijun, XUE Guilin. Composite Structural Design and Optimization Analysis of Large Sealed Packing Box[J]. *Digital Ocean & Underwater Warfare*, 2018, 1(2): 63-68.
- [5] 董晓锋. 玻璃纤维增强复合材料包装箱优化设计研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2017.
DONG Xiaofeng. Optimization Design of Glass Fiber Reinforced Composite Packaging-Box[D]. Ningbo: Ningbo University, 2017.
- [6] 赵承庆, 姜毅. 气体射流动力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998: 77-96.
ZHAO Chengqing, JIANG Yi. Gas Jet Dynamics[M]. Beijing: Beijing Insititute of Technology Press, 1998: 77-96.
- [7] 罗大伟. 基于温度场模拟的可控温包装箱优化设计研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2020.
LUO Dawei. Research on Optimal Design of Temperature-Controllable Packing Box Based on Temperature Field Simulation[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2020.

(责任编辑: 邓光辉)

Simulation Study of Composite Packaging Box Based on Fluent

MA Jintao, ZHOU Yang, TIAN Yu

(Shenyang Aerospace Xinguang Group Co., Ltd., Shenyang 110041, China)

Abstract: In order to study the temperature change of a composite packaging box in the process of low temperature environment, the method of equivalent analysis was used to simplify the modeling of the whole packaging box, and Fluent software was used for two-dimensional model simulation of the heat transfer when the product material parameters inside the packaging box were unclear. The results show that the temperature of the product inside the packaging box decreased by $9.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (no more than $10\text{ }^{\circ}\text{C}$) after 5 h under the set conditions. The passive thermal insulation performance of the package could meet the requirements and effectively protect the products during transportation.

Keywords: composite material; packaging box; two-dimensional model; passive heat preservation; Fluent