

# RLV 燃料贮箱低温泡沫隔热材料导热分析

陈战辉 万小鹏 赵美英 高磊

(西北工业大学,西安 710072)

**文 摘** 针对 RLV 燃料贮箱使用的泡沫塑料,建立了闭孔匀质泡沫材料的传热模型,给出了利用泡沫材料结构参数计算热导率的方法。算例计算结果与实测值吻合较好,证明了模型的可信性和方法的可行性。最后利用对该模型的分析讨论了泡沫不均匀性的影响。

**关键词** 可重复使用运载器,低温贮箱,泡沫材料,导热分析

## Analysis of Thermal Conductivity for Cryogenic Foams on RLV Fuel Tank

Chen Zhanhui Wan Xiaopeng Zhao Meiyong Gao Lei

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

**Abstract** For foams on the RLV fuel tank, a thermal model of closed-celled uniform foam was set up. A method to calculate thermal conductivity by configurable parameters was afforded. The correctness of the method was proved by the test result of the example. Then, the effect of the non-uniform cells in the foams by using analytical method is discussed.

**Key words** RLV, Cryogenic tank, Polyimide foam, Analysis of thermal conductivity

### 1 引言

泡沫塑料可用于可重复使用运载器 (RLV) 的低温燃料贮箱的隔热系统。当燃料贮箱注入超低温的液氢和液氧 (温度分别低于  $-183$  和  $-253$ ) 时,如何防止燃料过快蒸发甚至沸腾,以及外壁面结冰和外层隔热泡沫材料在急剧的温度变化下产生裂纹,导致航天飞机升空时脱落,从而影响航天飞机安全是值得关注的一个重要问题<sup>[1-2]</sup>。美国提出的下一代 RLV 的金属热防护系统采用了如图 1 所示的低温贮箱热防护结构。贮箱外的低温泡沫材料在发射时内外侧温度分别为  $-253$  和  $-157$ ,再入时的内外侧的温度分别为  $232$  和  $316$ <sup>[3]</sup>。泡沫材料的热膨胀性能与泡沫的结构形式有关,在较大的温差下必然引起热变形的不协调和热应力的产生,设计不当将导致泡沫材料产生裂纹甚至脱落。该特定的使用环境要求泡沫材料不仅具有轻质、隔热性能好、耐低温和耐高温性能,且必须具有一定的力学性能。

泡沫材料的隔热性能是确定图 1 所示的结构低温泡沫层厚度和外层的 ARMOR TPS 面板设计以及

支撑结构设计的基础。泡沫材料的热传递机理非常复杂,其热导率与泡沫材料的结构参数 (泡孔的多少、形状、尺寸、分布情况等)、封闭与否、孔隙内气体的状况等因素都有关系。而泡沫的力学性能与孔隙率、泡孔大小、分散程度等也有很大的关系。泡沫材料的非匀质性导致在某些部位的实际温度与按标称导热率分析所得的温度有一定差距<sup>[4]</sup>。

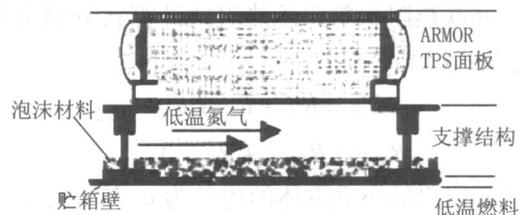


图 1 RLV 低温贮箱防热结构示意图

Fig 1 TPS structure of cryogenic tank on RLV

本文建立了闭孔泡沫材料的传热模型,将热导率与泡沫的结构参数联系起来,算例利用结构参数求得的热导率与实测值吻合较好。文中给出了在试验基

收稿日期:2007-12-17

作者简介:陈战辉,1977年出生,硕士,主要从事运载器结构热防护系统设计与隔热性能的研究。E-mail: sanlang867@sohu.com

宇航材料工艺 2008年 第3期

— 31 —

础上利用该模型分析闭孔泡沫材料温度场不均匀性的研究方法,指出在校核最大使用温度时应考虑其泡沫不均匀性导致的温度分布不均匀性。

## 2 闭孔均匀泡沫材料热分析

### 2.1 泡沫材料的结构特征和传热特性

泡沫材料的热导率比基体材料的热导率低得多,热导率主要构成因素有:基体的导热、气体的导热、对流及辐射。通常情况下,孔隙率高、孔隙分布均匀且形成封闭孔隙时,孔隙中气体的对流换热较小,泡沫材料的热导率较低<sup>[5-7]</sup>,为此本文主要对闭孔均匀泡沫材料的传热进行分析。

### 2.2 模型的建立和参数的获取

由于空隙中的气体的传热机理和性能随温度变化较大,且泡沫材料内部孔隙表面积很大,在高温下

辐射换热也明显变强(辐射换热能力与绝对温度四次方成比例),所以泡沫材料的热导率随温度升高的变化趋势很明显。

用于低温贮箱表面的泡沫材料的环境温度较低,一般都选用高孔隙率、低孔隙尺寸的闭孔泡沫材料,所以本文仅考虑基体材料导热和气体的导热。将泡沫材料简化为许多个空心立方体构成的结构,这种结构在分型理论中被称为 Menger 海绵,取出其中一个单元作为分析模型,其断面形状如图 2 所示<sup>[7]</sup>。取中间的分析单元,中间白色区域表示孔隙内部充满了气体,四周是基体材料。该空心立方体六个面的壁厚相等,空心体的体积与立方体的体积比恰好等于泡沫材料的孔隙率。

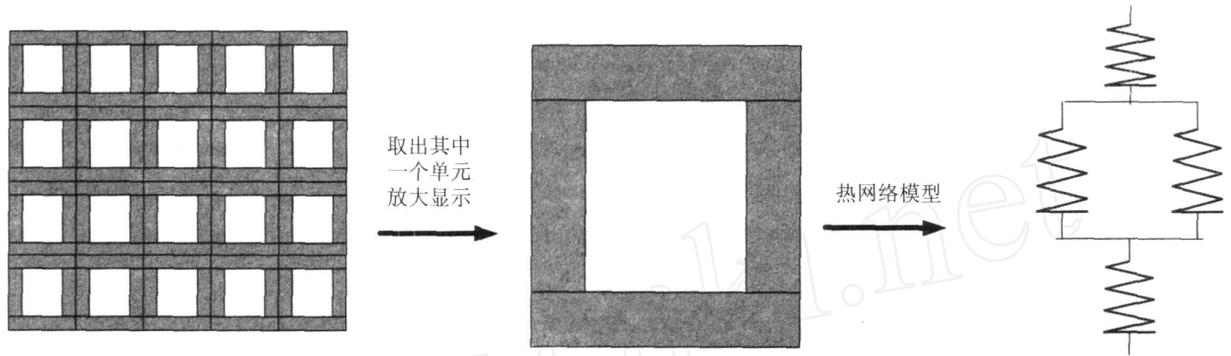


图 2 匀质闭孔泡沫材料的分析模型

Fig 2 Thermal analysis model of closed-celled uniform foam

给该空心立方体上下表面施加温度差,四个侧面根据对称性简化为绝热边界,进行一维传热分析,利用热网络法可以获得图 2 右侧所示的传热网络示意图。整个空心立方体由四个等效热阻构成,四侧面的热阻和气体导热热阻并联后再与上下表面的热阻串联<sup>[8]</sup>。并联热阻和单元总热阻的计算式分别为公式

(1)与公式(2):

$$R_{\text{总}} = R_{\text{上}} + R_{\text{并}} + R_{\text{下}} \quad (1)$$

$$R_{\text{并}} = (R_{\text{侧}}^{-1} + R_{\text{气}}^{-1})^{-1} \quad (2)$$

设所取出的小立方体的边长为  $a$ ,其空心立方体的边长为  $b$ ,则在已知孔隙率和比面值的情况下,对于该单元体忽略孔隙内的气体质量。由于泡沫材料由单元体互相拼接而成,泡沫材料的总外表面积相对较小予以忽略,用公式(3)、(4)联立可以求出  $a$ 、 $b$  值。

$$\frac{\text{孔隙总体积}}{\text{泡沫材料体积}} = \frac{b^3}{a^3} = \frac{\text{容重}}{\text{基体材料密度}} \quad (3)$$

$$\frac{\text{基体材料总表面积}}{\text{泡沫材料容积}} = \frac{6b^2}{a^3} \quad (4)$$

如果孔隙率和比面值数据不易查取,可以按照文献[7]给出的各种方法予以测量。

单元空心立方体六个壁面的热导率按照基体材料热导率  $k_s$  计算,立方体空心中的气体只进行气体导热,由于该气体一般并非空气或单纯的某种气体,所以混合气体的热导率按照下面的公式(5)进行计算。其中  $k_g$  为混合气体的热导率,  $G$  为混合气体的质量,  $G_i$  和  $k_{g_i}$  分别为各组分气体的质量和热导率。

$$k_g = \frac{\sum_{i=1}^n G_i k_{g_i}}{G} \quad (5)$$

上下面板及侧面的热阻可依据公式(6)、(7)分别计算得到,气体的等效热阻依据公式(8)计算。

$$R_{\text{上}} = R_{\text{下}} = \frac{1}{2} \frac{(a-b)}{k_s a^2} \quad (6)$$

$$R_{\text{侧}} = \frac{b}{k_s (a^2 - b^2)} \quad (7)$$

$$R_{\text{气}} = \frac{b}{k_g b^2} = \frac{1}{k_g b} \quad (8)$$

把整个空心立方体视为具有等效热阻的均匀材

料实心立方体,则其等效热导率  $k = R_{\text{总}} / a_0$

### 3 算例与分析

为验证上述模型的可信性,将使用偶氮二酰胺(ADC)作发泡剂经自由发泡的硬质聚氯乙烯泡沫PVC作为算例进行分析。在20℃其自由发泡型材的容重和热导率分别为  $600 \text{ kg/m}^3$ 和  $0.062 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ,而实心制品的密度为  $1400 \text{ kg/m}^3$ ,热导率为  $0.16 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。孔隙中的气体成分为  $\text{N}_2$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 和 $\text{NH}_3$ ,其中 $\text{N}_2$ 的质量分数为60%, $\text{CO}_2$ 约占34%左右。比面为  $0.25/\text{m}^{[9]}$ 。经查表计算可得20℃孔隙中气体的热导率为  $0.0213 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ <sup>[10]</sup>。将以上各数据带入前面公式计算可以得到  $a = 13.64$ ,  $b = 10.28$ ,  $R_{\text{总}} = 0.795$ ,  $k = 0.0583 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。而实际标称值  $k = 0.062 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 其误差率约等于5.96%。考虑到在计算比面时忽略了泡沫材料的外表面积等因素,模型计算的数值误差允许的。说明用该模型来分析泡沫材料的传热性能在方法上是可行的,结果是可信的。

### 4 泡沫不均匀的处理方法

泡沫材料在生产过程中,发泡剂的量和加工温度控制不当等因素都会造成并泡和泡孔塌陷,这些都将导致泡沫的不均匀。图3所示为一种闭孔泡沫材料的微观显示图片,明显可见在右侧边缘部位材料孔隙不均匀。因为基体材料的热导率明显高于孔隙内气体的热导率和泡沫材料的表观热导率,这将导致在孔隙不均匀处的温度场分布明显不均匀。在整体满足使用温度的条件下,局部区域的温度可能会超出材料允许使用的温度,从而造成热膨胀的不均匀甚至材料的裂纹损坏。而RLV运输成本高的特点决定其不能通过增加隔热材料厚度的方法保证材料使用温度范围的安全。在最低质量条件下使用的泡沫材料应该对其泡沫均匀性予以检验。

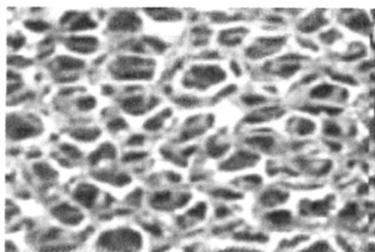


图3 闭孔泡沫材料的微观形貌

Fig 3 Microgram of closed-celled foam

用实验方法只能测得较大范围的泡沫材料热导

率的平均值,而很难对泡沫材料局部不均匀位置的热导进行测量和分析。可将泡沫材料的微观相片进行数字化处理,得到切面上的孔隙和基体材料的剖面积比值 $f$ 。然后对各微小区域再利用本文的模型进行计算。对于前面的空心立方体模型其剖面积比值 $f$ 的计算公式为:

$$f = \frac{b^2}{a^2 - b^2} \quad (9)$$

该公式与公式(3)并不独立。可以将公式(4)和公式(9)联立求得各微小区域的 $a$ 、 $b$ 值,并进一步得到微小区域的局部热导率并求解其温度场分布,以验证其使用温度的安全性。

### 5 结论

(1)对闭孔泡沫材料使用空心立方体模型分析其传热性能是可行的,可依此利用泡沫材料的结构参数求得泡沫材料的热导率。

(2)实际泡沫材料中的泡沫分布具有不均匀性,将导致温度分布与热流分布的不均匀,和热膨胀的不均匀,从而影响泡沫结构的可靠性。所以当按照最低质量要求设计隔热层厚度时,应该对其泡沫的均匀性进行试验测量和检验。

### 参考文献

- 1 孟晖娟等. 聚酰亚胺泡沫材料在航空航天飞行器中应用进展. 宇航材料工艺, 2006; 36(3): 1~3
- 2 新华社. 美确认泡沫材料安装缺陷造成“哥伦比亚号”事故. 世界科技研究与发展, 2004; 26(5): 102
- 3 Blosser M L et al. Advanced metallic thermal protection system development. AIAA, 2002 - 0504: 7~8
- 4 李小川等. 非均匀多孔介质有效导热率分析. 工程热物理学报, 2006; 27(4): 643~646
- 5 周成飞. 聚酰亚胺泡沫塑料开发研究概述. 橡塑技术与装备, 2005; 31(6): 22~25
- 6 赵飞明, 徐永祥. 聚酰亚胺泡沫材料研究进展. 宇航材料工艺, 2002; 32(3): 6~9
- 7 刘伟, 范爱民, 黄晓明. 多孔介质传热传质理论及应用. 北京: 科学出版社, 2006; 7~10, 331~344
- 8 范绪箕. 气动加热与热防护系统. 北京: 科学技术出版社, 2004: 105~106
- 9 (英)大卫. 伊夫斯主编. 泡沫塑料手册. 北京: 化学工业出版社, 2006: 140~142
- 10 (美)威尔蒂 J R 著, 任泽霖, 罗棣庵等译. 工程传热学. 北京: 人民教育出版社, 1982: 412~414

(编辑 任涛)