

文章编号:1000-582X(2004)09-0109-03

# 基于分形理论的石墨泡沫新材料导热系数\*

张新铭, 彭鹏, 王金灿

(重庆大学动力工程学院, 重庆 400030)

**摘要:**新型导热材料石墨泡沫具有很好的热物理性质。文中应用分形理论讨论了这种新型多孔材料的分形特性,并在此基础上建立了石墨泡沫材料的导热模型。采用热阻法给出了石墨泡沫材料的等效导热系数的关系式。在空腔边长为200~500 μm,对应的体孔隙率为82%~73%条件下,计算了石墨泡沫的体积分形维数和等效导热系数。这种新的研究方法对多孔材料热物性研究有一定指导意义。

**关键词:**石墨泡沫;导热系数;分形

**中图分类号:**TK 124

**文献标识码:**A

国外最新研究表明:通过沥青衍生得到的中间相石墨泡沫材料,是一种具有优良热物理性能的导热材料<sup>[1]</sup>。材料由三维石墨固体骨架和许多相互连通的空腔组成。在石墨泡沫导热系数的理论研究中,由于其内部几何结构的不规律性,因此采用传统的研究方法很难对其热特性参数进行准确的计算。笔者应用分形理论,计算了石墨泡沫材料的体积分形维数。在此基础上,采用一种简化的模型并利用等效热阻法求出其有效导热系数。计算结果表明,该方法与文献报道的实测数据有一定误差,但作为一种基本的多孔材料热物性研究方法,仍有一定意义。

息产业等领域,对于各种关键设备及部件的热管理(Thermal Management)要求越来越高,需要在技术上有重大突破。石墨泡沫材料正是为适应这一要求而出现的,因此具有广阔的应用前景。

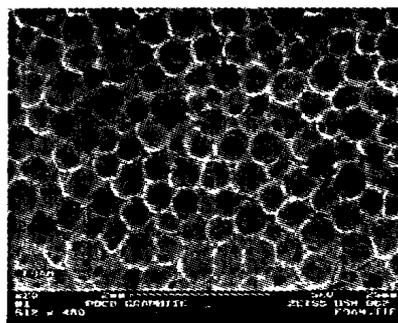


图1 石墨泡沫材料的显微结构

## 1 石墨泡沫新型高导热材料

石墨泡沫具有开口的微蜂窝结构,蜂窝壁面即为石墨晶面,沿蜂窝壁面的导热系数可达 $1\ 700\ \text{W/m}\cdot\text{K}$ <sup>[2]</sup>,而材料的平均导热系数也可达到 $180\ \text{W/m}\cdot\text{K}$ 。

图1是美国国家实验室开发的一种石墨泡沫材料的显微结构<sup>[3]</sup>。材料的多孔结构使得材料密度大幅度降低( $<0.55\ \text{g/cm}^3$ ),从而导致石墨泡沫的比导热系数远高于一般金属材料。

目前,在航空航天、军事工业、汽车工业、通讯及信

## 2 石墨泡沫蜂窝单元分布的分形特征

分形是具有自相似对称性的几何对象,它指的是:对一类具有无穷嵌套的几何对象,适当取出其中一部分,并加以放大,观察者看到的结果与整体对象完全相同<sup>[4]</sup>。为了描述分形自相似对称性的基本特征,引入了分形维数这个基本参数。分形维数不会因为空间尺度的变化而改变,分形维数的值也可以不是整数。

\* 收稿日期:2004-04-11

基金项目:重庆市科技攻关项目

作者简介:张新铭(1953-),男,上海人,重庆大学副教授,主要从事工程热力学及计算机应用。

图2是石墨泡沫材料的剖面图<sup>[5]</sup>。从图中可以看到,不同蜂窝单元的结构是不同的,但是从较大范围来看,蜂窝单元具有相似特性。根据分形的自相似性质,通过研究一个特征的蜂窝单元的传热性质就可以了解整个材料的传热性质。

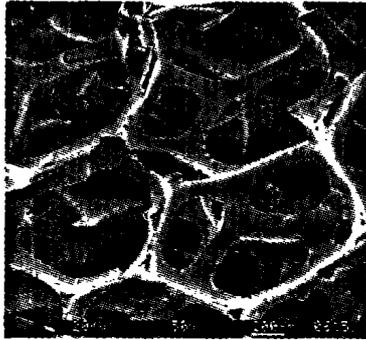


图2 石墨泡沫材料的显微结构放大

根据分形理论,蜂窝单元空腔体积的平均值  $v$  满足如下关系:

$$v(V) \sim V^d$$

式中,  $V$  为石墨泡沫蜂窝单元的体积,作为体积度量尺度;  $d$  为石墨泡沫的体积分形维数。

对  $v$  和  $V$  分别取对数,简化上式得

$$\ln V = \ln k + d \ln v \quad (1)$$

式中,  $k$  为比例常数。

由于该材料在国内尚未生产,因此笔者搜集国外文献报道的一些零散数据作为估算依据,目的在于讨论采用分形理论研究其导热性能的方法。

### 3 石墨泡沫导热系数的分形模型

石墨泡沫的固体骨架图如图3所示,为了简化计算,采用图4的简化模型:蜂窝单元为立方体,中间为气体介质流经的立方空腔,周围为固体骨架。图5为该模型的热阻图。

取空腔边长为  $200 \sim 500 \mu\text{m}$ ,对应的体孔隙率为  $82\% \sim 73\%$ <sup>[6]</sup>,可求得  $k = 1.5705$ ,体分形维数  $d = 0.960$ 。

由式(1)可得  $v = kV^d$ ,因此体孔隙率的分形表达为  $\varphi = v/V = kV^{d-1}$ 。

取  $\lambda_g = 0.03 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ,为简化起见取  $\lambda_t = \lambda_l = 1700 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 。经推导,材料的有效导热系数可表为

$$\lambda = \lambda_g \varphi^{\frac{2}{3}} + \lambda_t (1 - \varphi^{\frac{1}{3}})^2 + \frac{2\lambda_g \lambda_t (1 - \varphi^{\frac{1}{3}}) \varphi^{\frac{1}{3}}}{\lambda_g (1 - \varphi^{\frac{1}{3}}) + \lambda_t \varphi^{\frac{1}{3}}} \quad (2)$$

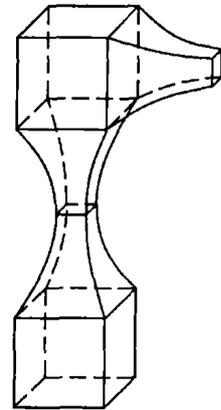


图3 石墨泡沫蜂窝单元固体骨架图

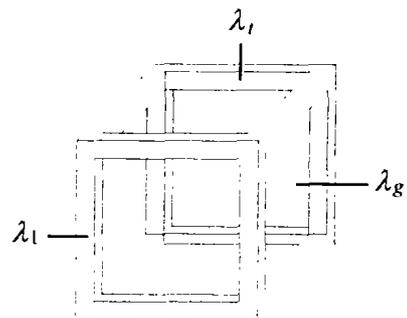


图4 石墨泡沫蜂窝单元简化模型

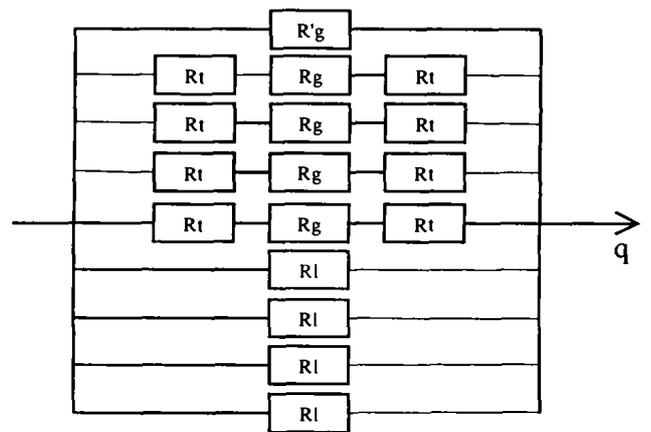


图5 石墨泡沫蜂窝单元热阻示意图

式中,  $\lambda_t, \lambda_l$  分别为石墨泡沫固体骨架横轴和纵轴的导热系数,  $\lambda_g$  为流体介质的导热系数。

经计算,  $\lambda$  值在  $7 \sim 17 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  范围内。计算结果与文献报道值存在一定误差,经分析,这主要是因为如图4所示的模型中,石墨泡沫的孔隙率很大,即其空腔内的气体介质传热占很大比重,而气体导热系数很小,故导致整体导热系数计算值偏小,因此分形模型需作改进。另外由于石墨泡沫蜂窝单元的孔径很小,因此可能涉及微尺度传热问题,而文中的简化模型未作考虑,也使计算结果有一定的误差。这些方面将会在今后的研究中加以考虑和改进。

## 4 结 论

石墨泡沫新型导热材料具有很好的应用前景。笔者就分形理论在石墨泡沫有效导热系数计算中的应用作了初步分析,建立了简化的石墨泡沫导热模型,并在此基础上求出了该材料的体分形维数,计算了材料的等效导热系数。虽然由于模型尚不成熟而导致计算值与国外文献报道值存在一定偏差,但作为此种新材料热性能研究的方法探索,仍然应该是有一定意义的。在以后的研究中,将考虑更复杂的模型,加以改进。

### 参考文献:

- [1] KLETT JW, BURCHELL TD. High Thermal Conductivity Mesophase Pitch - Derived Carbon Foam[A]. The 43<sup>rd</sup> International SAMPE Symposium[C]. Anaheim, CA, May31 - June 4, 1998.
- [2] JAMES KLETT, PATRICK LLOYD. Development of High Thermal Conductivity, Low Density Graphite Foam [EB/OL]. <http://www.aquafoam.com/papers/pocofoam.pdf>. January 2001.
- [3] JAMES KLETT, RON OTT, APRIL MCMILLAN. Heat Exchangers for Heavy Vehicles Utilizing High Thermal Conductivity Graphite Foams[A]. Sae Technical Paper Series [C]. 2000 - 01 - 2207.
- [4] 杨展如. 分形物理学[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1996.
- [5] JAMES KLETT. High Thermal Conductivity Graphite Foams [EB/OL]. [http://www.ms.ornl.gov/research-chgroups/cmt/foam/foams.htm](http://www.ms.ornl.gov/research/chgroups/cmt/foam/foams.htm). July 2002.
- [6] JAMES KLETT. Graphite Foam with High Thermal Conductivity and Diffusivity Conducts Heat in All Directions [EB/OL]. <http://www.mrs.org/publications/bulletin>. December 2000.

## Effective Thermal Conductivity of a New Material of Graphite Foam Based on Fractal Theory

ZHANG Xin-ming, PENG Peng, WANG Jin-can

(College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** The new material of graphite foam is a good thermal - conductivity material. With fractal theory, the fractal character of this novel porous material is discussed. Then a thermal - conductivity model of graphite foam is proposed. The relationship formula of effective thermal conductivity is presented by using thermal resistance method. The volume fractal dimension and effective thermal conductivity of this material are calculated. This new method for calculation is significant for porous material.

**Key words:** graphite foam; thermal conductivity; fractal

(编辑 陈移峰)