

NR/中空微球复合材料传热的有限元分析

梁基照, 李锋华

(华南理工大学 工业装备与控制工程学院, 广东 广州 510640)

摘要:应用 ANSYS 软件对聚合物/中空微球复合材料单元中的热传递进行了有限元分析, 并计算出中空微球填充 NR 复合材料的等效导热系数 k_e 值。结果表明, k_e 随着中空微球体积分数 ϕ_f 的增大呈线性减小, 且随着微球粒径的增大有所减小。此外, 三维有限元模拟的 k_e 值高于二维, 两者的差异随着 ϕ_f 的增大而增大。

关键词:NR; 中空微球; 导热系数; 数值模拟

中图分类号:TQ330.38⁺3; O241.82 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-890X(2004)10-0586-04

轮胎等一些橡胶制品根据工作条件除要求胶料须具有良好的耐磨性、耐候性和力学性能外, 还应具有良好的隔热和阻燃性能。刚性中空微球(如空心玻璃微珠、空心陶瓷微珠和硬质空心塑料微珠等)内含惰性气体, 具有导热系数小、轻质等优点, 是近年来发展起来的一种新型填料^[1]。此外, 由于其球形表面光滑, 不会造成界面及基体内部应力集中, 用来填充改性橡胶可制备具有隔热、轻质和良好力学强度等性能的轮胎或其它橡胶制品。

有限元法的基本思想是将求解区域离散为有限个且按一定规则相互连接的单元, 然后组合为系统方程组并求解。计算机的使用大大提高了分析效率和质量^[2]。Ramani K 等^[3]应用有限元法研究了影响复合材料导热系数的因素。NR 是轮胎及其它橡胶制品的主要原材料之一。中空微球填充 NR 复合材料属于三元复合体系, 其传热过程较为复杂。本研究拟应用有限元法对其进行数值模拟。

1 温度场的基本方程

对于一般三维温度场, 如果微元体升温所需的热量与传入微元体的热量以及微元体内热源产生的热量相平衡, 则在直角坐标系中, 场变量 $\theta(x, y, z, t)$ 满足如下热平衡方程和三类传热边界

条件及初始条件^[4]。

热平衡方程:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \frac{q}{\lambda} = \frac{\partial \theta}{a \partial t} \quad (1)$$

式中 q ——热流密度;

λ ——导热系数;

a ——对流换热系数。

第 1 类边界条件:

$$\begin{cases} \theta|_r = \theta_w \\ \theta|_r = F(x, y, t) \end{cases}$$

式中 Γ ——物体边界(逆时针方向);

θ_w ——已知壁面温度(常数), $^{\circ}\text{C}$;

$F(x, y, t)$ ——已知温度函数。

第 2 类边界条件:

$$\begin{cases} -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n}|_r = q_2 \\ -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n}|_r = g(x, y, t) \end{cases}$$

式中 n ——法线方向;

q_2 ——已知热流密度(常数), $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$;

$g(x, y, t)$ ——已知热流密度函数。

第 3 类边界条件:

$$-\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n}|_r = a(\theta - \theta_f)|_r$$

式中, a 与 θ_f 可以是常数, 也可以是某种随时间和位置而变化的函数。如果 a 与 θ_f 不是常数, 则在数值计算中经常分段取其平均值作为常数。

初始条件:

$$\begin{cases} \theta|_{t=0} = \theta_0 \\ \theta|_{t=0} = \varphi(x,y) \end{cases}$$

式中, θ_0 为已知常数, 表示物体初温是均匀的; $\varphi(x,y)$ 为已知函数, 表示物体初温是不均匀的。

2 传热模型分析

2.1 物理模型

考察中空微球填充聚合物的传热过程。假定微球在聚合物基体中呈空间均匀分布, 则可建立复合材料中一个单元传热的几何物理模型, 如图 1 所示。考虑到中空微球的对称性, 可将三维温度场简化为二维传热过程。由图 1 可以看出, 聚合物/中空微球复合材料属于三元复合体系, 即聚合物相、微球壁相和气相。热量自外传入聚合物, 当遇到中空微球时, 由于其导热系数小, 小部分热量通过微球传导, 而大部分热量则绕过微球传递。由于微球的导热系数小(微球内含气体), 且在复合材料中传热的路径变长并复杂化, 导致复合材料的传热性能下降。因此, 聚合物/中空微球复合材料的热量传递过程主要以下述 3 种方式进行: (1) 通过固体和气体的热传导; (2) 在微球表面之间的热辐射; (3) 微球内的气体自然对流。Skochdopole R E^[5] 经试验研究后指出, 泡孔直径小于 4 mm 时, 孔内的气体不会发生自然对流。由于中空微球的直径在数微米到几百微米之间, 因此可以不考虑空气的自然对流。由于在非高温下辐射占总热量的比例很小, 故不考虑热辐射。

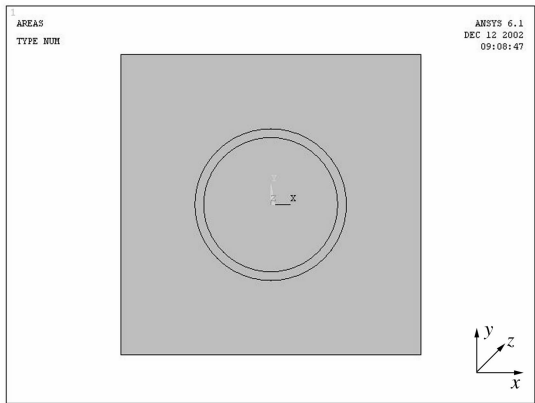


图 1 聚合物/中空微球复合材料传热单元模型

2.2 有限元模型

使用 ANSYS 软件进行传热数值模拟。微球

为 MOLÜS 公司产品, TK35 型, 平均粒径为 35 μm , 有效密度为 0.68 $\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 球壁为硼硅酸盐物质, 密度为 2.21 $\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 微球内为惰性气体, 密度为 $8.89 \times 10^{-5} \text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。填充体积分数为 0.2。

设定热分析环境参数, 热分析中的单元类型为二维实体 PLANE 35, 6 节点三角形单元。对于稳态传热, 一般只需定义导热系数。输入相关物理参数: 材料 1 为基体 NR, 导热系数为 0.146 5 $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$; 材料 2 为微珠壳体, 导热系数为 0.179 34 $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$; 材料 3 为微珠内的气体, 导热系数为 0.022 8 $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 。

2.3 单元划分

根据填充体积分数推算出单元的边长, 输入数据到软件中创建几何模型。热量自下而上传递。底面施加第 1 类边界条件, 施加温度载荷 30 $^\circ\text{C}$; 顶面施加第 2 类边界条件, 施加对流载荷, 环境温度为 25 $^\circ\text{C}$, 对流换热系数为 25 $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 。左右两边界设为绝热边界条件。采用智能自动划分网格, 设定参数为 3, 单元类型为三角形, 自由划分。划分结果如图 2 所示。

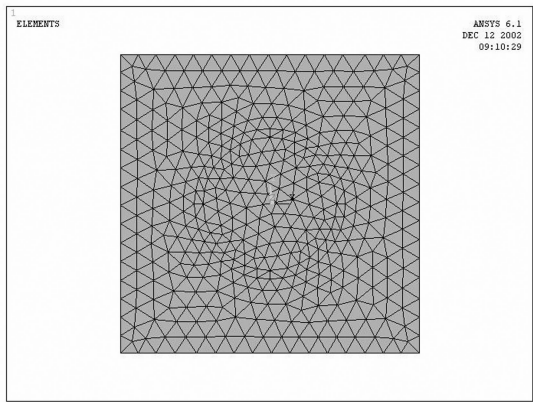


图 2 网格划分

3 结果与讨论

3.1 温度场

使用求解器进行求解, 然后进入后处理器, 绘制单元的温度云图, 如图 3 所示。温度云图形象地说明了单元中温度场的分布。从图 3 可以看出, 中空微球内的温度变化比微球外快。

为了反映在单元中热流流动的方向及大小,

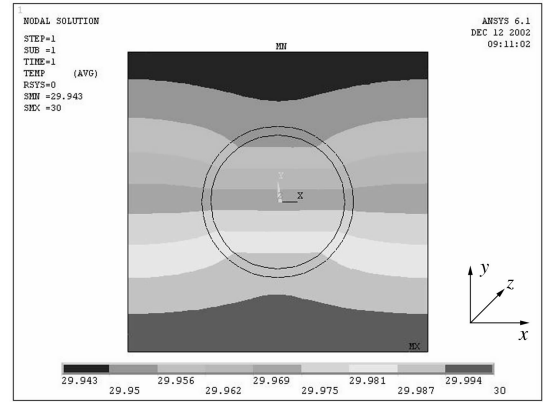


图 3 温度云图(NR/TK35)

绘制出单元内的热流矢量图,如图 4 所示。箭头的方向代表热流的方向,箭头的长短代表热流的强弱。从图 4 可以看出,热量遇到微球后进行了分流,小部分流入微球,其它则沿着微球壁流动。

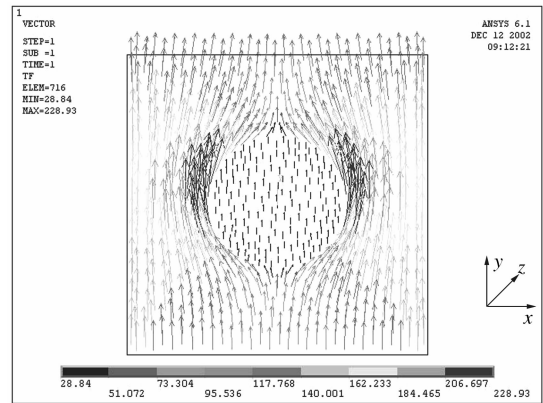


图 4 单元内的热流矢量图(NR/TK35)

3.2 温度的径向分布

图 5 示出了 NR/TK35 复合体系的温度沿径向及两侧分布的情况。从图 5 可以看出,在中空微球的两侧,温度缓慢下降,近乎呈线性分布;在中空微球内部,温度急骤下降。这表明中空微球内的热阻相当大,即具有良好的隔热保温性能。

3.3 等效导热系数

等效导热系数是表征材料热性能的重要参数。使用命令 List Results>Reaction Solu,求出通过界面的总热量,再由温度云图中读出温差;然后根据傅立叶定律,可算出复合材料单元的等效导热系数 k_e 。

TK35 和 TK70 两种中空微球的体积分数分

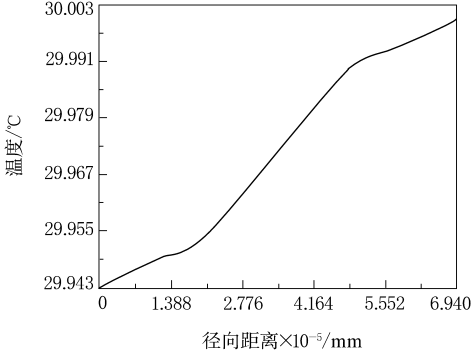


图 5 温度的径向分布(NR/TK35)

别为 0.05, 0.10, 0.15 和 0.20 时,运用同样的方法分别作出几何模型,设定物理参数和边界条件等,划分网格并求解,计算出相应的等效导热系数,结果如图 6 所示。从图 6 可以看出, k_e 随着 ϕ_f 的增大而呈线性减小;在相同的 ϕ_f 值时, NR/TK35 体系的 k_e 值高于 NR/TK70 体系。

为了更好地模拟中空单元的传热现象,在软件中建立三维模型,运用类似方法,算出相应的等效导热系数值,结果如图 7 所示。从图 7 可以看出,三维有限元模拟的 k_e 值高于二维,两者的差异随着 ϕ_f 的增大而增大,这是因为前者更接近于实际聚合物/中空微球复合材料的传热过程。

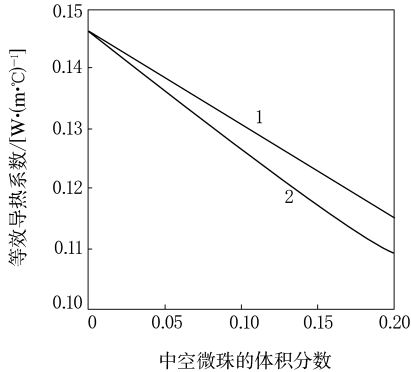


图 6 k_e 与 ϕ_f 的关系曲线(二维)

1—NR/TK35; 2—NR/TK70。

4 结论

应用无机中空微球填充 NR 可制备具有轻质、隔热及良好力学性能的轮胎制品。

聚合物/中空微球复合材料属于三元体系,其热量传递主要有下述 3 种方式:通过固体和气体的热传导;微球表面之间的热辐射;微球内的气体

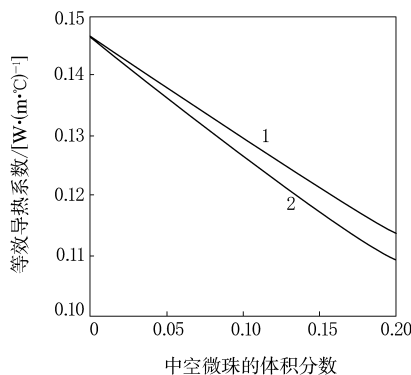


图 7 k_e 与 ϕ_f 的关系曲线(NR/TK70)

1—三维;2—二维。

自然对流,其中以第 1 种方式为主。

热量遇到中空微球后进行了分流,小部分流入微球,其它则沿着微球壁流动;微球内温度变化比微球外快。

随着中空微球的体积分数的增大,NR/中空微球复合材料的等效导热系数呈线性减小。在相

同填充量下,等效导热系数随着微球粒径的增大有所减小。

三维有限元模拟的等效导热系数值高于二维,两者的差异随着 ϕ_f 的增大而增大。

参考文献:

- [1] Liang J Z. Tensile and impact properties of hollow glass bead-filled PVC composites[J]. Macrom. Mater. Eng. , 2002, 287: 588-591.
- [2] 谭建国. 使用 ANSYS6.0 进行有限元分析[M]. 北京:北京大学出版社,2002.
- [3] Ramani K,Vaidyanathan A. Finite element analysis of effective thermal conductivity of filled polymeric composites[J]. J. Compos. Mater. ,1995,29:1 725-1 740.
- [4] 孔祥谦. 有限单元法在传热学中的应用[M]. 北京:北京大学出版社,1998.
- [5] Skochdopole R E. The thermal conductivity of foam plastics [J]. Engineering Progress,1961,57:55-58.

收稿日期:2004-04-16

FEA of heat transfer in NR/hollow bead composite

LIANG Ji-zhao, LI Feng-hua

(South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A finite element analysis (FEA) of the heat transfer in NR/hollow bead composite was made and the equivalent thermal conductivity (k_e) was calculated. The results showed that k_e decreased linearly with the increase of the bead volume fraction ϕ_f and decreased somewhat with the increase of the bead particle size. Furthermore, k_e from the 3D FE simulation was higher than that from 2D FE simulation, and the difference between them increased with the increase of ϕ_f .

Keywords: NR; hollow bead; thermal conductivity; digital simulation

齐鲁橡胶厂研制新型 SBR

中图分类号: TQ333.1 文献标识码: D

一种新型高结合苯乙烯非污染型 SBR1516 在齐鲁石化橡胶厂研制成功。该产品目前已工业化试产,样品已通过用户的初步检验。

多年来,该厂始终坚持“生产一代、储存一代、开发一代”的产品研发思路,把不断开发市场需求的橡胶产品作为提升企业竞争力的致胜法宝,现已形成不同结合苯乙烯含量和不同充油量、充油

品种两大系列产品。SBR1516 结合苯乙烯质量分数为 0.40 ± 0.006 ,其突出特点是具有自补强作用,主要用于提高胶料硬度,降低密度,改进橡胶的耐老化、耐磨耗、电性能和挤出性能。SBR1516 特别适用于高硬度橡胶制品、模压挤出制品等,在轮胎三角胶、硬质大底、鞋跟、胶管、胶辊、地板材料、粘结胶带基材、各种机械制品等领域有广阔的应用前景。

(摘自《中国化工报》,2004-08-09)