

电烤盘温度场的有限元分析

林晓鹰 颜黄苹 鲍平

(厦门大学机电工程系 361005)

摘要: 本文介绍了运用有限元法,对电烤盘的热传导进行仿真分析。运用 MSC.MARC 非线性有限元软件,模拟了电烤盘加热过程和温度场分布,为产品结构的优化改进提供依据。

关键词: 有限元分析 热传导

一、问题的提出

某公司开发的家用电烤肉盘的 CAD 模型如图 1 所示。希望通过对烤盘进行温度场的分析,得到热在盘面的传导情况,从而获得盘面结构对热传导的影响,为产品结构的优化改进提供依据。

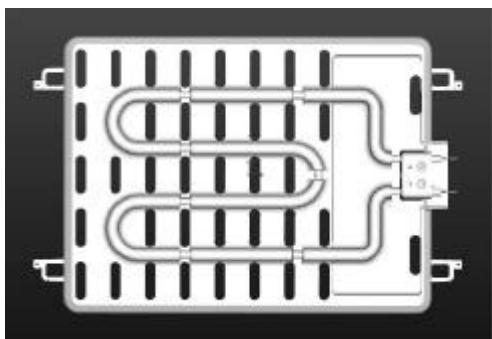


图 1 家用电烤肉盘的 CAD 模型

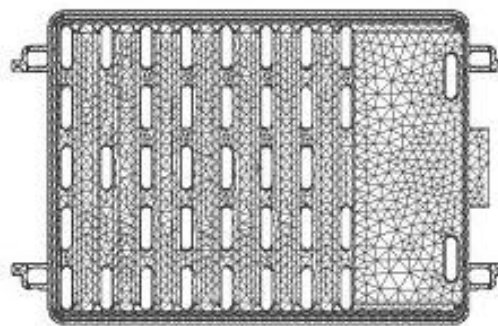


图 2 有限元网格

二、热传导问题的有限元法

对于体积为 V , 表面积为 Γ 的连续介质, 根据能量守恒定律及 *Fourier* 定律, 可得到热传导的抛物线型微分方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mathbf{I}_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + Q - rc \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

其中 T 为温度, Q 为单位体积的热生成率, q_i 是热矢量的分量, r 为单位体积的质量密度, c 为

比热, t 表示时间, \mathbf{I}_{ij} 是材料在指定空间方向上的热传导率张量分量。

通常可建立 4 类不同边界条件:

1. 表面 Γ_T 上的给定温度为:

$$T = T(x_i, t) \quad (2)$$

2. 在 Γ_q 边界上给定热流强度的边界条件为:

$$\bar{q}(x_i, t) = \mathbf{I}_n \frac{\partial T}{\partial n} \quad (3)$$

其中 \underline{n} 表示 Γ_q 的外法线方向。 $\bar{q}(x_i, t)$ 是随空间位置和时间变化的给定热流强度值。

3. 在 Γ 边界上给定对流的边界条件为：

$$\bar{q} = h(T_\Gamma - T_\infty) \quad (4)$$

其中 h 是表面对流发热系数， T_Γ 是表面温度， T_∞ 是外界环境介质温度。

4. 在 Γ 边界上给定热辐射边界为：

$$\bar{q} = \mathbf{se}(T_\Gamma^4 - T_\infty^4) \quad (5)$$

其中 \mathbf{s} 是 *stefan-Boltzmann* 常数， \mathbf{e} 是表面辐射效率。 T_Γ 是辐射表面温度， T_∞ 是与该辐射面进行热量交换的环境介质温度。

用有限单元将连续区域离散后，每个单元内的温度分布可近似表示为：

$$T(x_i, t) = \sum_{i=1}^n N_i(x_i) T_i(t) = \underline{N}^T \underline{T} \quad (6)$$

其中 \underline{N} 是描述温度在单元内变化的插值函数向量， \underline{T} 是依赖于时间的单元节点温度向量。

通过加权残差的 *Galerkin* 方法，既通过使热传导方程和边界条件取加权残差为 0 来近似导出热传导的有限元求解方程：

$$C \cdot \frac{\partial \underline{T}}{\partial t} + (K + F) \underline{T} = \underline{Q} \quad (7)$$

其中 \underline{T} 是节点温度向量， \underline{Q} 是节点热流向量， C 是热容矩阵 ($C = \sum_{element} \int_{V^e} \underline{N}^T \mathbf{rc} \underline{N} dV$)， K 传

$$\text{热矩阵} (K = \sum_{element} \int_{V^e} \left(\frac{\partial \underline{N}}{\partial x_i} \right)^T \mathbf{I}_{ij} \frac{\partial \underline{N}}{\partial x_j} dV)$$

对流或辐射边界对方程 (7) 的影响： $F = \sum_{element} \int_{\Gamma_q^e} \underline{N}^T h \underline{N} d\Gamma$ ，对 \underline{Q} 为 $\underline{Q}_{appl} = \sum_{element} \int_{\Gamma^e} h T_\infty \underline{N} d\Gamma$

给定初始条件和边界条件后，由积分方程式 (7) 就可得到整个时间域上的结构温度分布。

三、建立有限元模型

FEM 建模时，利用 MSC.Patran 前后处理软件读取电烤盘的 CAD 模型。由于原始模型中有很多的倒角、小孔和螺纹等，这些对盘面的温度分布影响不大，但在 Patran 中对模型进行网格划分造成极大的影响，致使网格划分质量不高，计算机对数据处理时间过长。烤盘前端连接电源的螺纹处对划分网格的影响最大，又因为电热丝前部块状部分是绝缘、绝热的，它们对整个盘面的温度分布结果基本不会产生影响，所以将它们简化掉，而原始模型的其他部分均未改动。

为了准确地用单元网格模拟电烤盘的几何结构，我们采用了较密的单元网格建立 FEM 模型，将模型划分为具有 87345 个四面体单元的有限元网格，如图 2 所示。

我们把在 Patran 中建立的 FEM 模型存成 MARC 能读的 .dat 格式文件，在 MARC 中加载边界条件和初始条件，进行温度场分析计算。

定义盘面初始温度为 298.15K (25⁰C)，定义电热丝固定温度为 673.15K (400⁰C)，定义热对流边界条件，环境温度为 298.15K (25⁰C)，热对流系数为 3.65e-8w/mm³*K；

电烤盘的材料参数为：密度 28e-6kg/mm³，热导率 0.109w/(mm*k)，比热 963J/(kg*k)。

四、分析结果

我们分析了 3 分钟内连续加热时烤盘温度的分布情况，分为 140 步进行。图 3 是计算到第 100 步，电烤盘加热到 7.44 秒时的温度分布情况。步数越往后，温度分布变化越大，每步之间的时间间隔也越大。我们也能得到如图 4 所示的烤盘上某点的温度变化情况，由此能了解该点的即时温度。

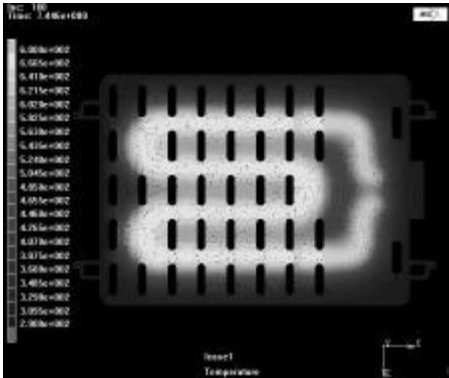


图 3 第 100 步 7.44 秒时

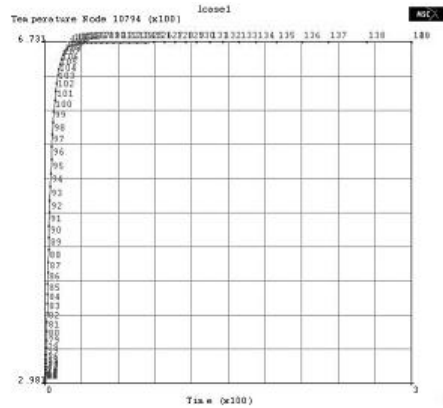


图 4 烤盘上某点温度变化

根据烤盘加热过程的温度分布情况，可以为电热丝的形状、烤盘恒温器的控制点、电热丝通断的控制温度的设计和改进提供参考依据。

参考文献

1. 陈火红 《Marc 有限元实例分析教程》 机械工业出版社
2. MARC 有限元软件帮助文件