

管状电加热器升温特性的数值计算

张敏¹, 商立英^{1,2}, 张钧波¹, 卢学山¹

(1. 南京理工大学动力工程学院, 南京 210094; 2. 中国一航第一飞机设计研究院, 西安 710089)

摘要: 在非结构化网格中, 采用基元有限容积方法和全隐时间格式, 数值模拟了一种管状电加热元件的热力特性。通过分析非稳态温度场的变化, 研究了电绝缘材料不同填充率过程中的升温特性。从计算结果中得出绝缘材料压紧度增大时, 其导热系数非线性地增大, 使得电加热器升温特性非线性变化。这些结果同时与结构化网格中的结果进行比较, 证明了结论的正确性和可靠性。

关键词: 数值传热; 非结构化网格; 非稳态热传导; 电加热器

中图分类号: TK124 文献标识码: A 文章编号: 1673-7180(2008)08-0566-4

Numerical calculation for thermal characters of a tubular electrical heater

ZHANG Min¹, SHANG Liying^{1,2}, ZHANG Junbo¹, LU Xueshan¹

(1. School of Power Engineering, Nanjing University of Science & Tech., Nanjing 210094;

2. AVIC One, the First Aircraft Institute, Xi'an 710089)

Abstract: The cell-based finite volume method (FVM) was used in unstructured grids to simulate a kind of tubular electrical heating equipment. By analyzing and calculating the change of unsteady-state temperature distributions, the thermal characters in the course of packing electrical insulation materials were studied. Results show that the conductivity is augmented and the temperature is increased quickly when the insulation materials are compressed strongly. The agreement between results of the presented method and those from structured meshes verifies the reasonability of the solutions.

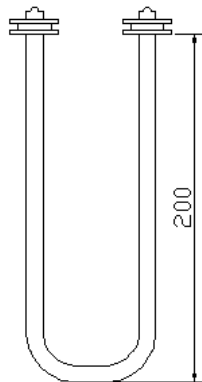
Key words: numerical heat transfer; unstructured grids/meshes; unsteady state heat conduction; electrical heater

管状电加热器因具有结构简单、使用寿命长、热效率高和使用安全等特点, 在日常生活和工业界中被广泛地使用^[1-2]。本研究运用非结构化网格和有限容积方法, 数值计算管状电加热元件, 在绝缘材料不同填充率中的非稳态传热过程。从计算结果中得出绝缘材料压紧度增大时, 其导热系数非线性地增大, 使得电加热器升温特性非线性变化。同时与发展比较成熟的结构化网格计算结果进行比较, 以此验证本结果的正确性和可靠性。

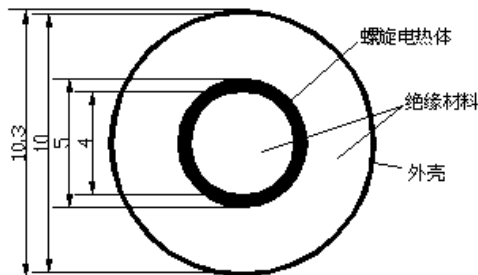
1 物理性质和网格生成

JGS 型管状电加热器由铁铬铝或镍铬电热合金材料绕成, 其几何形状如图 1 所示。其中的螺旋型元件作为发热体, 外面套以金属护套管, 中间空隙部分填满具有良好导热性和电绝缘性的结晶氧化镁粉末, 两端封口密封而成。对于铁铬铝或镍铬加热材料的热物理性质选取为: 比热 $c_p=1\ 300\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; 密度 $\rho=(3\ 050\sim 3\ 150)\text{ kg}/\text{m}^3$ 。由于日常生活使用, 电

加热器升温时间不宜太长，导热系数很大程度上受粉末压实程度的影响，其热功率数值在(1.8~7.0)W/(m·K)之间变化。



(a) 管状电加热器



(b) 加热元件圆形横截面

图 1 管状电加热器示意图

Fig. 1 Geometry of tubular electrical heater

从图 1 中可以看出，加热器的长度比其直径大得多，因此沿加热元件长度方向的温度变化可以忽略不计。所以，此问题可以简化为具有内热源的对称非稳态传热问题。外壳材料具有两个特点：其一是热扩散系数大约是电绝缘材料的 15 倍；其二是与加热元件的其它尺寸相比，外壳是很薄的。

鉴于以上两个的原因，可以认为外壳的热惰性对元件的瞬时性影响很小，数值计算时可不包括外壳材料。对于对流换热的情况，假设服从沸腾特性曲线，在边界上的对流换热系数取如下数值：

对于温差 $(T_B - T_A) \leq 10^\circ\text{C}$ 时，

$$h = 5000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K});$$

对于温差 $(T_B - T_A) > 10^\circ\text{C}$ 时，

$$h = (1/3) \times [500 \times (T_B - T_A) + 10^4] \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

式中， T_B 为边界温度， T_A 为环境温度。加热元件内部热源项发热量的计算，以单位面积上的热功率来

表示(W/m²)。此问题表面热功率为 $3.27 \times 10^5 \text{ W}/\text{m}^2$ ，直径为 10 mm，长度为 1 m 的电加热器实际放出的热能是：

$$Q = 3.27 \times 10^5 \times (1 \times \pi \times 10 / 1000) \text{ W} \quad (1)$$

能量是从与电加热体相关的体积中放出的，即从 $2 \text{ mm} \leq r \leq 2.5 \text{ mm}$ 控制体积中，其体积等于：

$$V = \pi \times (2.5^2 - 2.0^2) \times 10^{-6} \times 1 = 7.069 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \quad (2)$$

故内热源为：

$$S_c = \frac{Q}{V} = \frac{10.25 \times 10^3}{7.069 \times 10^{-6}} = 1.454 \times 10^9 \text{ W}/\text{m}^3 \quad (3)$$

由于加电流时，有热源存在于 $2 \text{ mm} \leq r \leq 2.5 \text{ mm}$ 的区域内，整个计算区域分成 3 个部分来生成网格，图 2 给出非结构化网格的划分图，网格总数为 3 237 个单元^[3-4]。

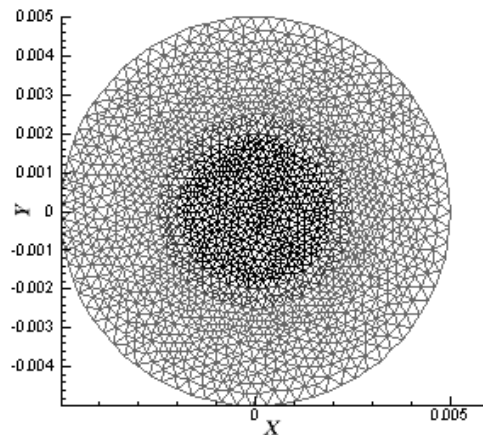


图 2 计算区域网格的划分

Fig. 2 Mesh/Grid in calculating regions

2 数值计算和分析

图 3 给出了热绝缘材料在不同压紧状态下的温度变化曲线。由图中可以看出，当绝缘材料压紧时，导热性能大大提高，加电负荷后温度升高迅速。在图 3 中，符号方块形代表压紧状态，符号三角形为未压紧状态。在压紧状态下，加热元件外表面温度达到 80 °C 时，所需要的时间少于 3s，明显少于未压紧状态下所用的时间。绝缘材料压紧时导热系数高，反之导热系数小^[5-6]。

由于采用结构化网格，求解非稳态传热问题已经非常成熟。关于结构化网格的内容和程序见文献[4]。在此将用结构化网格计算得出的结果作为

依据，与采用非结构化网格和全隐式时间格式，数值计算非稳态温度场分布的本程序计算得到的结果进行比较，以验证计算结果的可靠性和正确性。当

外皮表面温度达到 90 °C 时，采用两种方法进行数值模拟，得到的结果比较如图 4 所示。

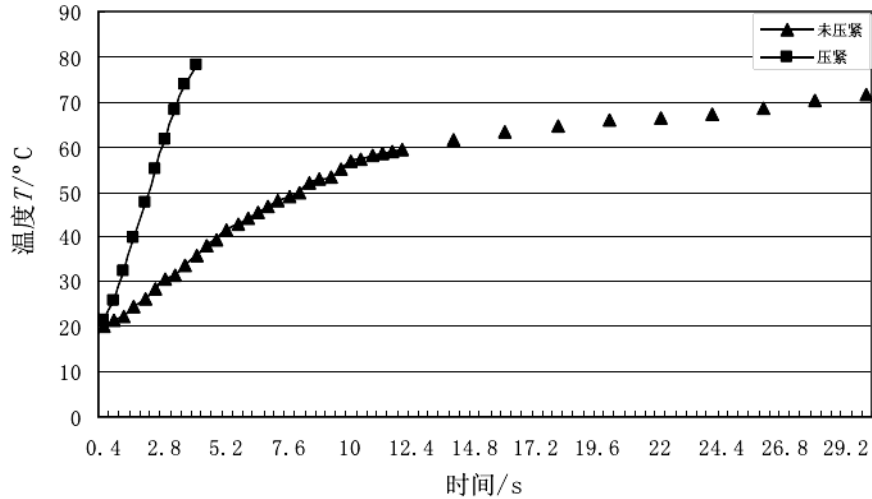


图 3 不同压紧状态下加热后温度变化情况的比较

Fig. 3 Temperature distributions in the two kinds of cases

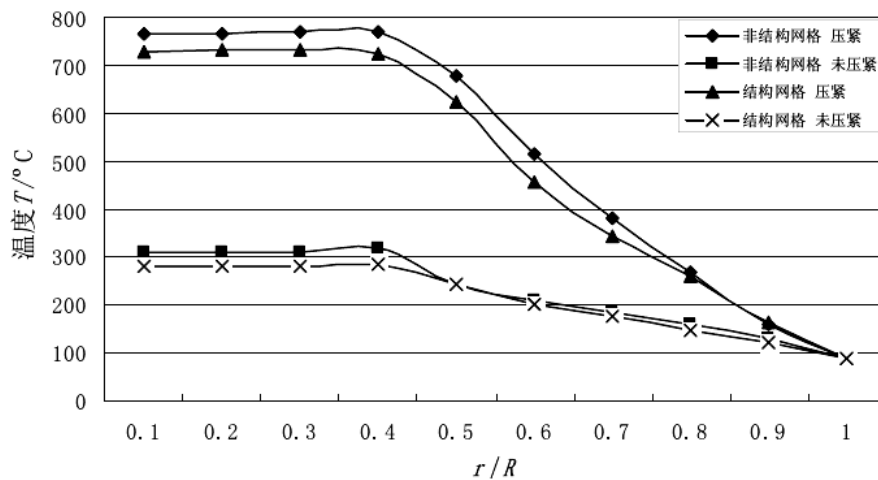


图 4 结构与非结构网格计算结果的比较

Fig. 4 Comparison of the solutions between structured and unstructured meshes

从图 4 计算结果的比较可以看出，采用非结构化网格和结构化网格，计算得到的温度分布变化趋势是一致的。计算结果基本相符，只是非结构化网格计算的温度偏高一些。在未压紧状态时，两者计算得到的最高温度误差为 5.5%，在允许的范围之内；在压紧状态下，计算得到的最高温度相对误差比较大，约为 9.69%。

总体而言，本研究开发的非结构化网格计算程序，用于计算非稳态导热问题得到的结果是可信的。关于非结构化网格中，热传导公式推导离散的内容和计算原程序见文献[3]。

3 结论

在非结构化网格中，用基元有限容积方法和全

隐时间格式,数值模拟一种管状电加热元件的热力特性。通过分析非稳态温度场的变化,研究电绝缘材料在不同填充率过程中的升温特性。从计算结果中得出绝缘材料压紧度增大时,其导热系数非线性地增大,使得电加热器温升特性非线性变化。这些结果同时与结构化网格中的结果进行比较,以此证明了结论的正确性和可靠性。

由本文数值模拟的结果可以得出结论,为了节省加热时间,应该选用内部压紧的绝缘填充材料;从节省能源的角度看,在未压紧时元件内部的温度远远高于压紧状态下的温度,由于未压紧时元件内部温度很高,因此较多的能量积蓄在元件内部,当关闭电源时这些能量就损失掉了,因此在生产过程中应该将绝缘材料压紧压实。

[参考文献](References)

- [1] 陈彦泽,周一卉,丁信伟. 计算传热学在工程传热设备传热研究中的应用[J]. 化学工业与工程技术, 2002, 23(3): 45-49.
CHEN Y Z, ZHOU Y H, DING X W. Application of

numerical heat transfer calculating in industry engineering equipment[J]. Chemical Industry and Engineering Technology, 2002, 23 (3): 45-49.(in Chinese)

- [2] 甄永杰,师晋生,刘振义,等. 管状电加热元件的不稳定态导热数值模拟[J]. 节能, 2004, (7): 29-32.
ZHENG Y J, SHI J S, LIU Z Y, et al. Numerical simulating unsteady state heat transfer for the tubular electrical equipment [J]. Energy Saving, 2004, (7): 29-32. (in Chinese)
- [3] 商立英. 非稳态导热问题在非结构化网格中的计算研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
SHANG L Y. Calculating unsteady state heat conduction in unstructured mesh[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2006. (in Chinese)
- [4] PATANKAR S V. Computation of Conduction and Duct Flow Heat Transfer [M]. New York: Innovative Research, Inc, 1991.
- [5] 章熙民,任泽霏. 传热学 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
ZHANG X M, REN Z P. Heat Conduction [M]. Beijing: Publisher of Chinese Construction Industry, 2001. (in Chinese)
- [6] 陶文铨. 计算传热学的近代进展 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
TAO W Q. Advanced Study Numerical Heat Transfer [M]. Beijing: Science Publisher, 2001. (in Chinese)