

# E型同轴热电偶热响应特性数值模拟研究

齐力

高温气体动力学国家重点实验室/中国科学院力学研究所 工程科学学院/中国科学院大学

## 介绍/亮点 Introduction/Highlight

飞行器在高速飞行时会面临高温气体效应，准确测量表面热流具有重要意义。对于短时气动加热过程，常用的测量热流的设备有同轴热电偶和薄膜电阻计。表面结点同轴热电偶具有结构简单，抗冲刷能力强，测量精度高等特点，因此被广泛应用于瞬态热流测量。根据国内外学者的研究结果，利用镍铬和康铜作为两极材料的E型同轴热电偶的测量精准度和响应时间比其它材料构成的同轴热电偶要好。本文通过数值模拟，研究了在均匀热流加载下，E型同轴热电偶在100毫秒内的热响应特性，首先说明了同轴热电偶的温度响应与一维半无限体热传导理论存在的差异，阐述了同轴热电偶内部以及与壁面材料的横向传热的规律，其次研究了不同正极尺寸，不同壁面材料对热流测量的影响规律，提出E型同轴热电偶结构设计方面的建议。

## 研究方法 Methods

E型同轴热电偶装载在壁面材料中作为基本模型，E型同轴热电偶及模型结构如图1所示，采用Improved Richardson差分格式求解二维轴对称热传导方程，对带有壁面材料的E型同轴热电偶进行了数值模拟，计算域划分如图2所示，同轴热电偶的负极宽度为0.9 mm，正极宽度为1.42 mm，绝缘层厚度(结点的宽度)为10 μm，长度选取为4.0 mm，壁面材料的厚度和宽度都选取为3.0 mm，材料为不锈钢。采用控制变量的方法，研究绝缘层厚度和壁面材料对热响应特性的影响。计算域内采用矩形正交网格并在加热面进行了加密，在结点矩形区域至少有200个网格点。在边界条件设置方面，不同材料的交界面上满足热流和温度连续的内边界条件，加热面上采用热流边界条件，热流大小为 $q_0 = 0.1 \text{ W/m}^2$ ，其余外边界条件为绝热条件。计算时间步长为1.0 μs，模拟加热时长为100 ms。初始温度选取为300K。

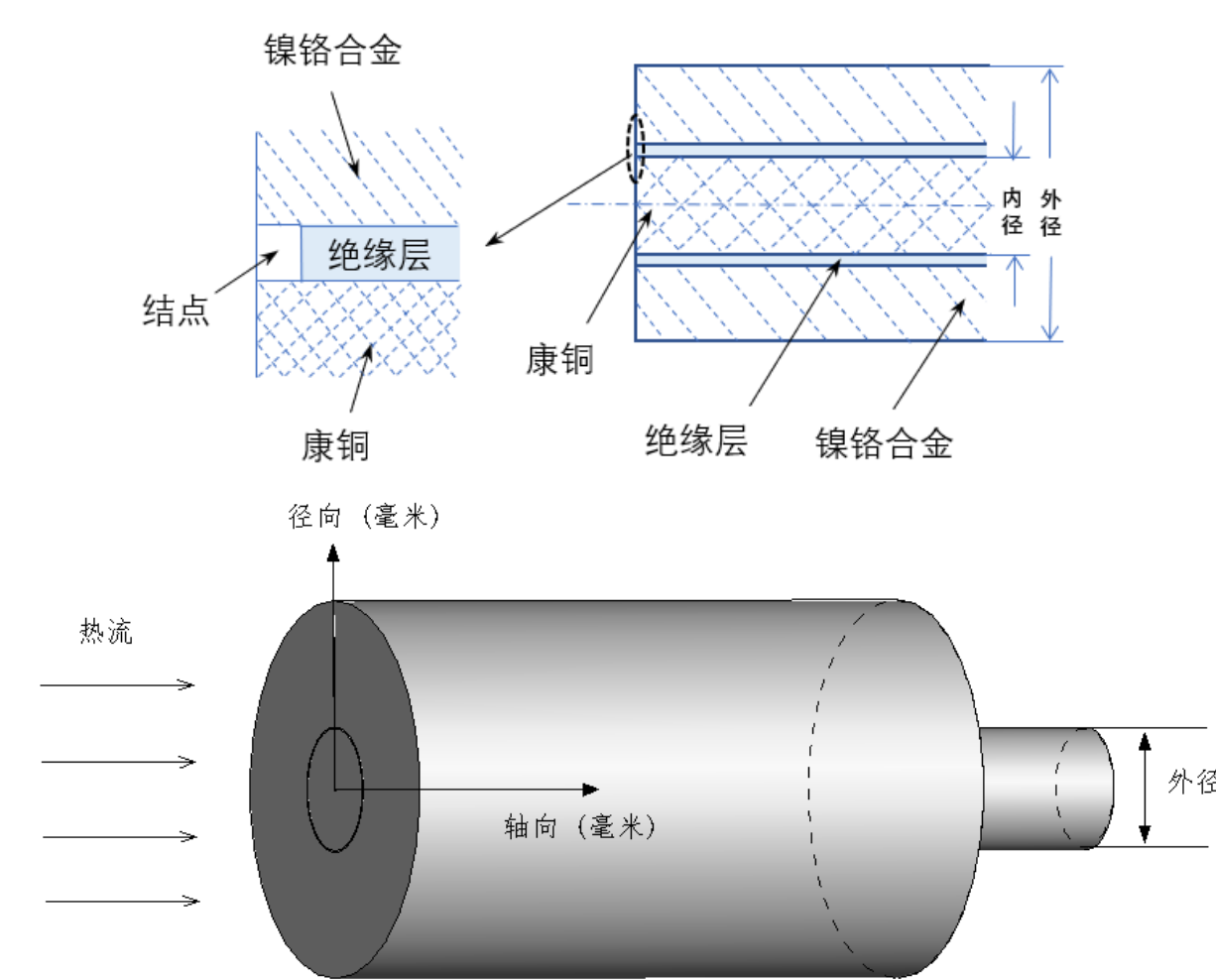


图1 同轴热电偶及模型示意图

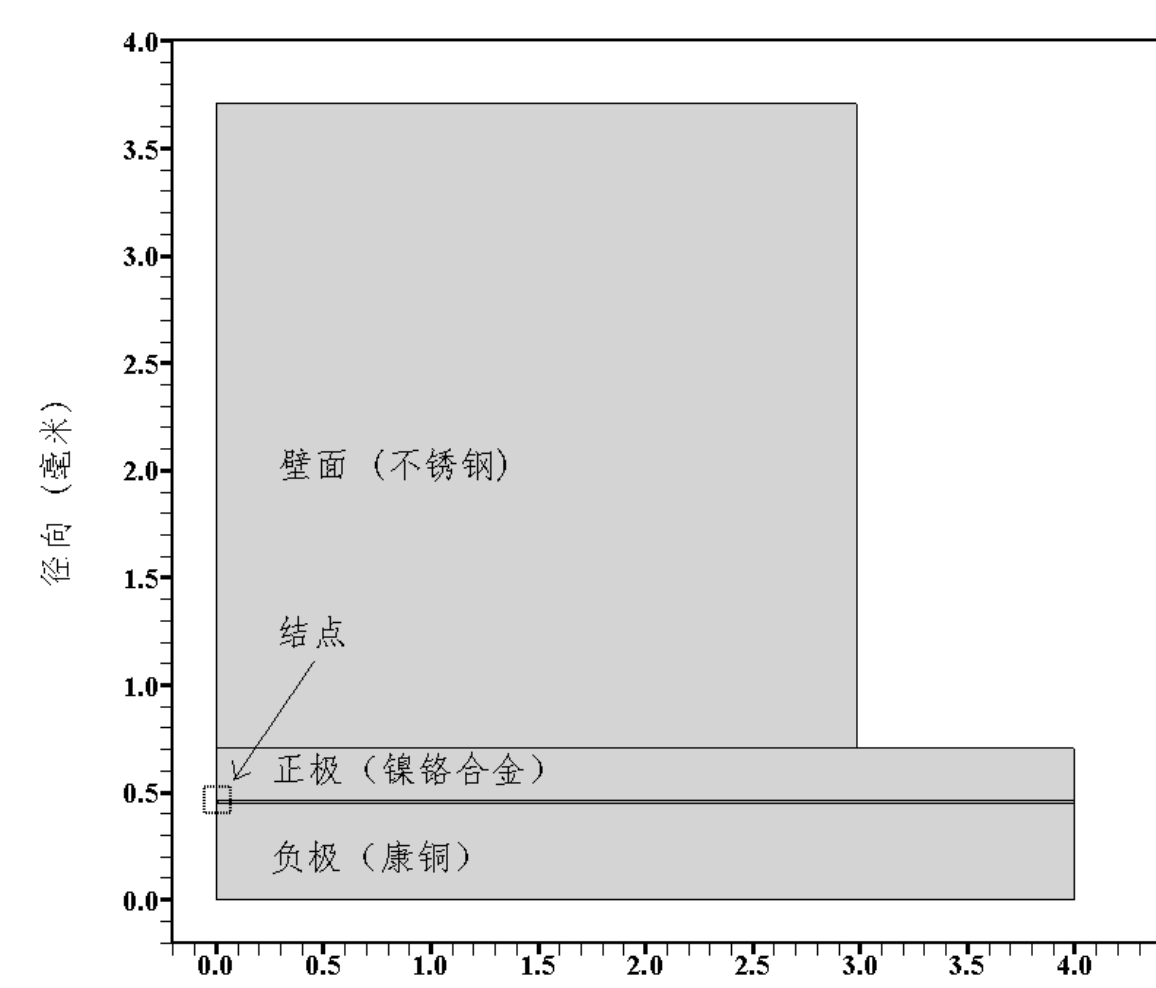


图2 轴对称模型二维计算域

$$T(t) = T_0 + \frac{1}{\sqrt{\rho c k \pi}} \int_0^t \frac{q}{(t-\tau)^{3/2}} d\tau \quad (1)$$

$$\dot{q}_s(t) = \frac{\sqrt{\rho c k}}{2\sqrt{\pi}} \left[ \frac{2 \times T(t)}{\sqrt{t}} + \int_0^t \frac{T(\tau) - T(t)}{(t-\tau)^{3/2}} d\tau \right] \quad (2)$$

$$\dot{q}_s(t_n) = \frac{2 \times \sqrt{\rho c k}}{\sqrt{\pi}} \times \sum_{i=1}^n \frac{T_i - T_{i-1}}{\sqrt{t_n - t_i} + \sqrt{t_n - t_{i-1}}} \quad (3)$$

	铝	不锈钢	镍铬合金	环氧树脂
$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2698	7930	8730	1060
$c/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	900	500.0	447.5	1960
$k/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	210	17.0	19.25	0.2
$\alpha/\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	$8.68 \times 10^{-5}$	$4.29 \times 10^{-5}$	$4.93 \times 10^{-5}$	$9.62 \times 10^{-6}$
$\beta/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{1/2})\cdot\text{K}^{-1}$	22581	8210	8072	644.6

表1 壁面材料物性参数表

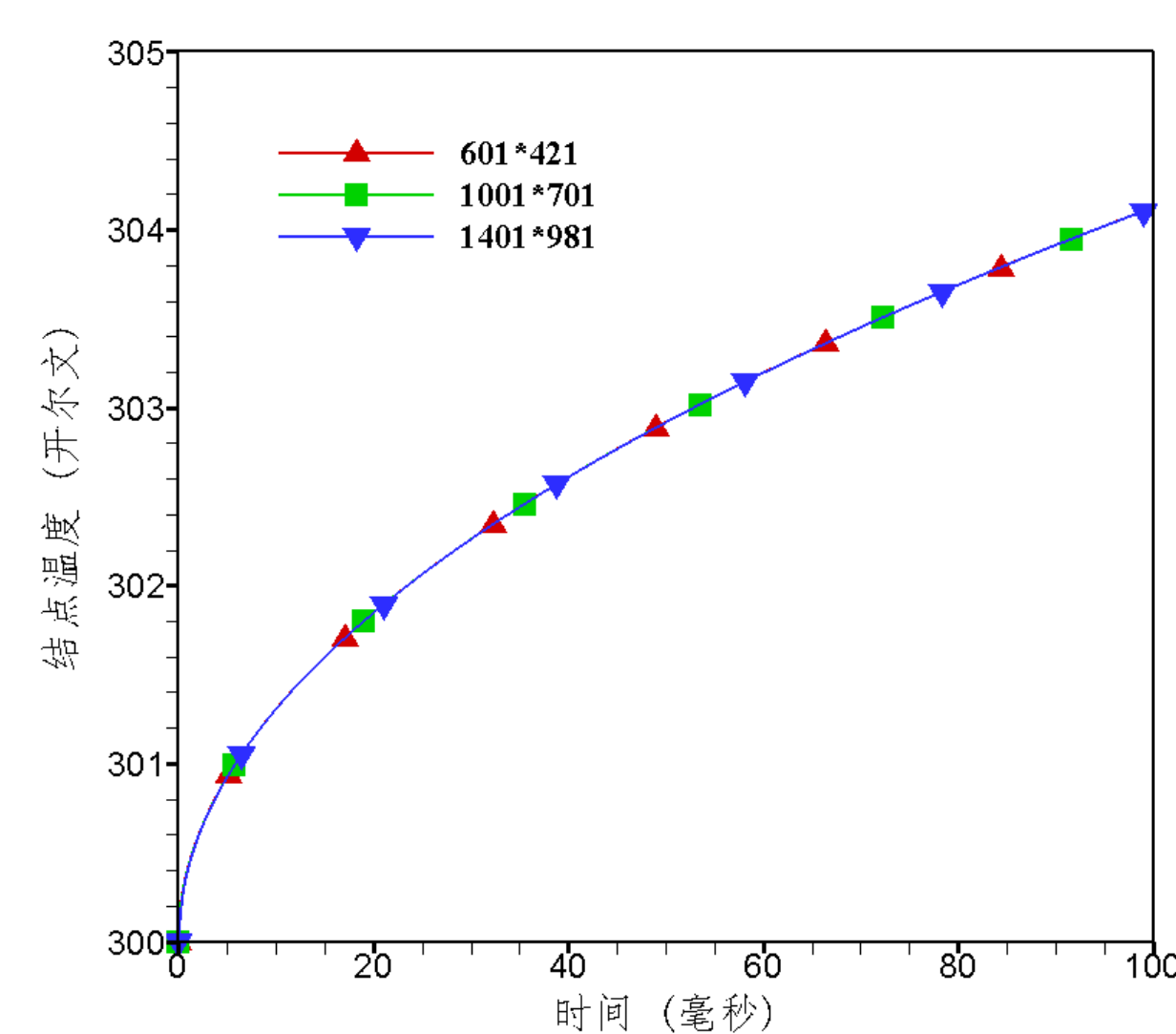


图3 网格无关性验证

网格无关性验证方面，分别采用三套不同的网格进行数值模拟，在同轴热电偶计算域对应网格量分别为 $601 \times 421$ ， $1001 \times 701$ ， $1401 \times 981$ 。三套网格的结点的温升比对如图3所示，温升曲线吻合得比较好。综上所述，我们选取对应同轴热电偶区域网格量为 $1001 \times 701$ 的网格进行数值模拟计算。

数据分析方面，将数值结果与一维半无限体热传导理论进行对比，在该理论中，表面温度和表面热流如公式(1)(2)所示。首先用结点的温升曲线与理论温升进行对比，然后用直接法处理离散的温度数据得到热流，并与加载的热流进行对比，研究横向传热带来的温度和热流测量误差，同时分析同轴热电偶内部的传热规律。直接法处理温度数据如公式(3)所示。

控制变量方面，分别研究了绝缘层厚度和壁面材料对温度热流的测量影响。绝缘层厚度选取为6、8、10、12、14 μm。壁面材料选取为铝，不锈钢，镍铬合金和环氧树脂，壁面材料的热物性参数表如表1所示。

## 结论

通过数值模拟，研究了在均匀热流加载下，E型同轴热电偶在100 ms内的热响应特性，有如下结论：

- (1) 在E型同轴热电偶内部存在结点过热现象，与一维半无限体热传导理论存在差异，即在热流加热过程中，结点区域会出现高温区，结点内的热传导主要以横向传热的形式进行，热量从结点向正负极传递。
- (2) 越大的绝缘层厚度会造成越大的测量误差，所以在制作工艺允许的范围内，应该尽量降低绝缘层的厚度，可以减轻结点过热现象，有效降低热流测量误差。
- (3) 在壁面材料选取方面，选取与正极材料(镍铬合金)物性参数较大的材料作为壁面材料时，会造成壁面与传感器之间较大的横向传热，带来更多的测量误差，所以应选择热乘积系数与正极相近的材料作为壁面材料。

## 结果/讨论 Results/Discussion

在100 ms时刻，结点区域模型温度云图及温度云图如图4所示。从结果可以看出，由于横向传热的存在，E型同轴热电偶的温度响应与一维半无限体热传导理论存在明显差异，产生横向的原因有绝缘层和同轴热电偶各部分之间以及与壁面材料的材质差异。绝缘层阻碍了结点区域的热量向纵向传递，出现了结点过热现象。

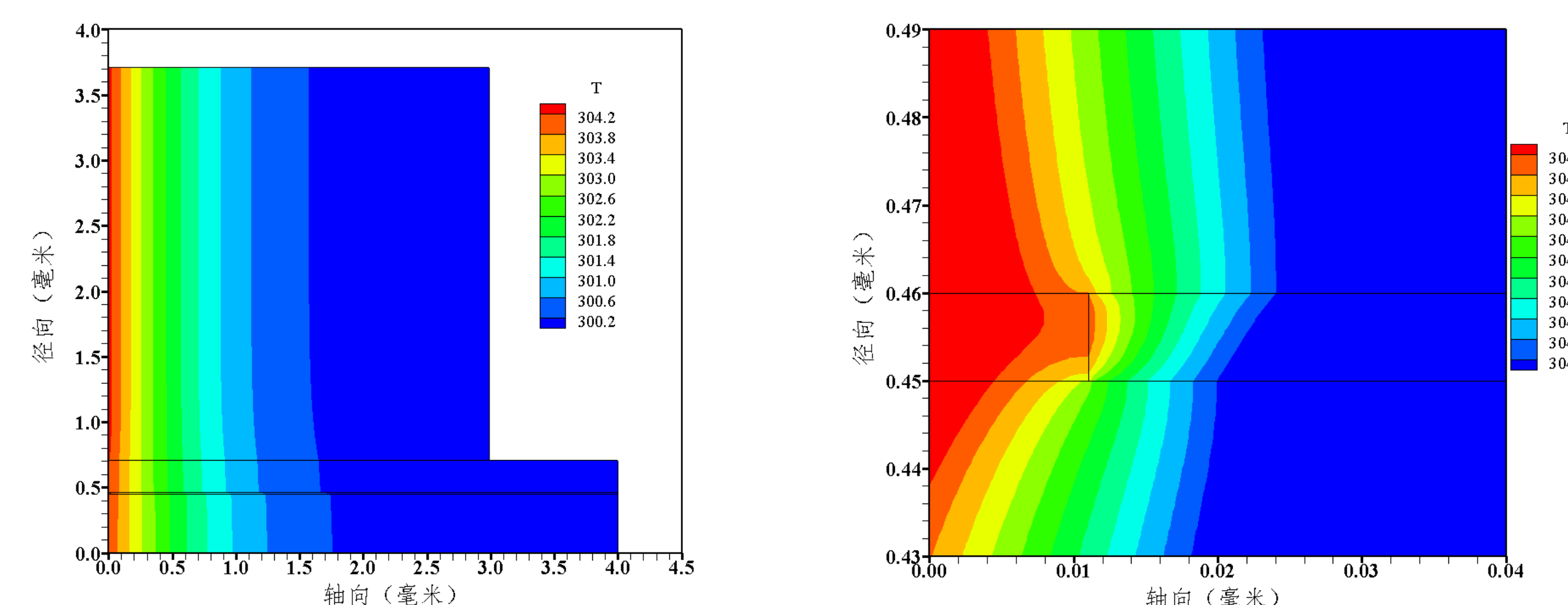


图4 100 ms时刻模型及结点区域温度云图

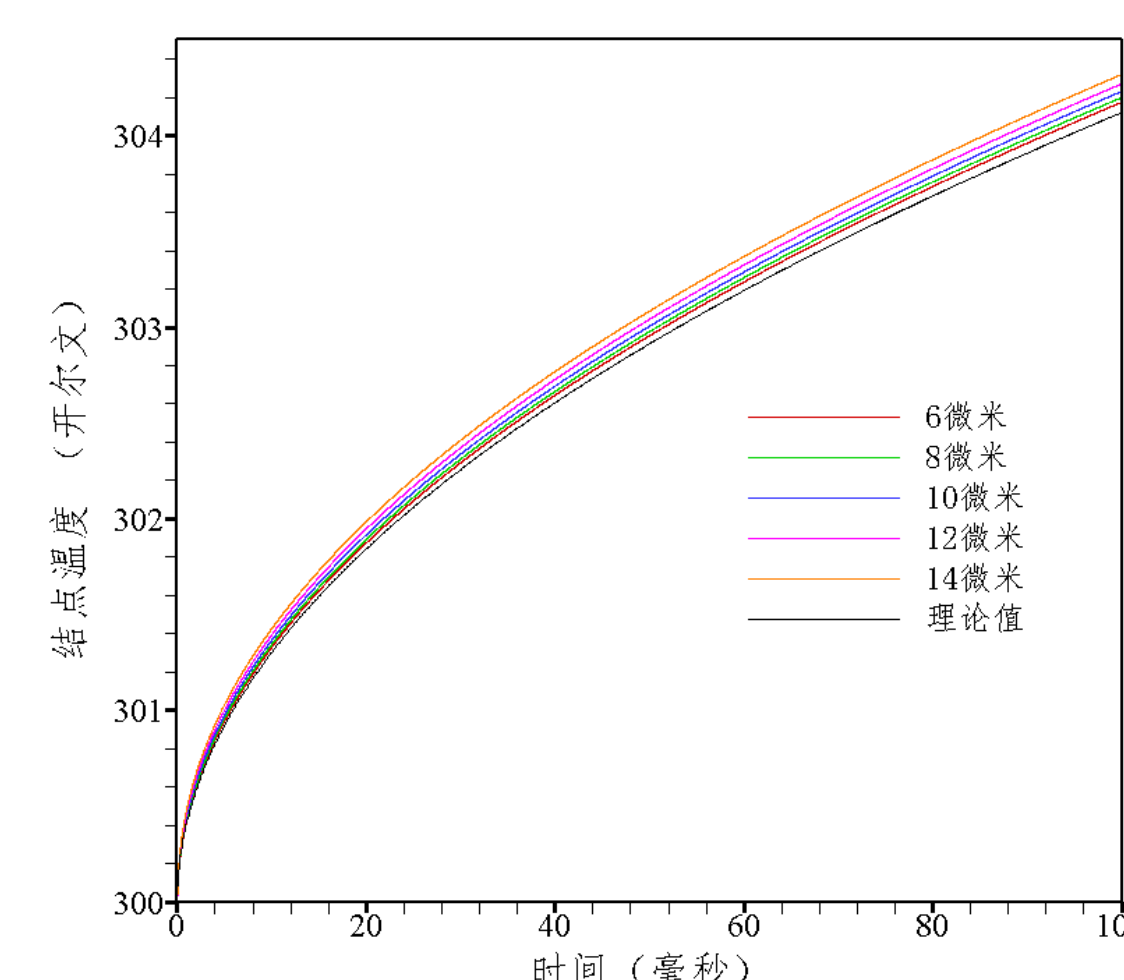


图5 不同绝缘层厚度的结点温升曲线

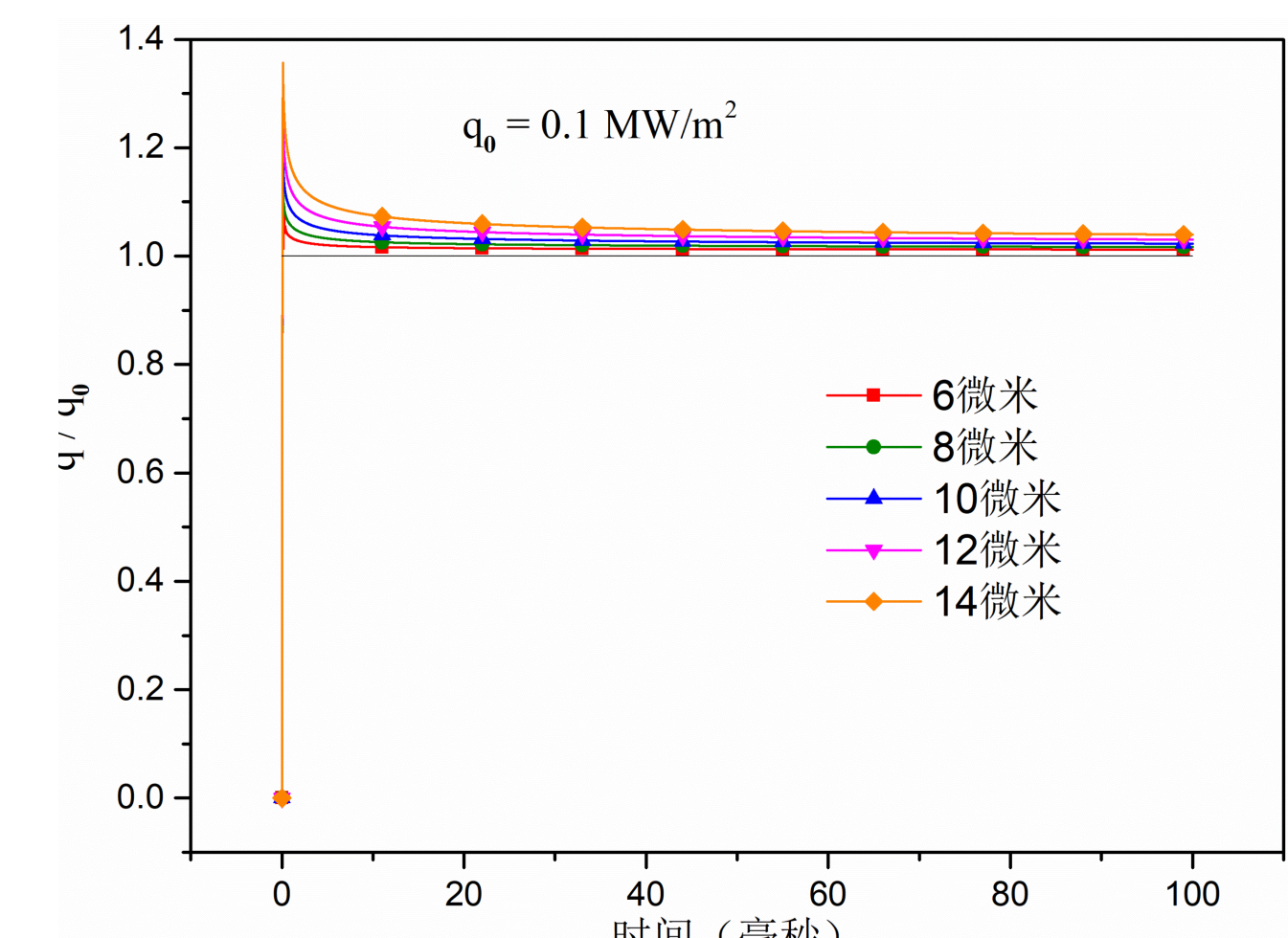


图6 不同绝缘层厚度的无量纲热流曲线

如图5所示，保持壁厚模型为不锈钢材料不变，随着绝缘层厚度的增加，温度和热流的偏差会逐渐变大，横向传热会加重传感器测量的误差，当绝缘层厚度为14 μm时，100 ms时刻温度和热流的测量误差为4.8%和3.9%。

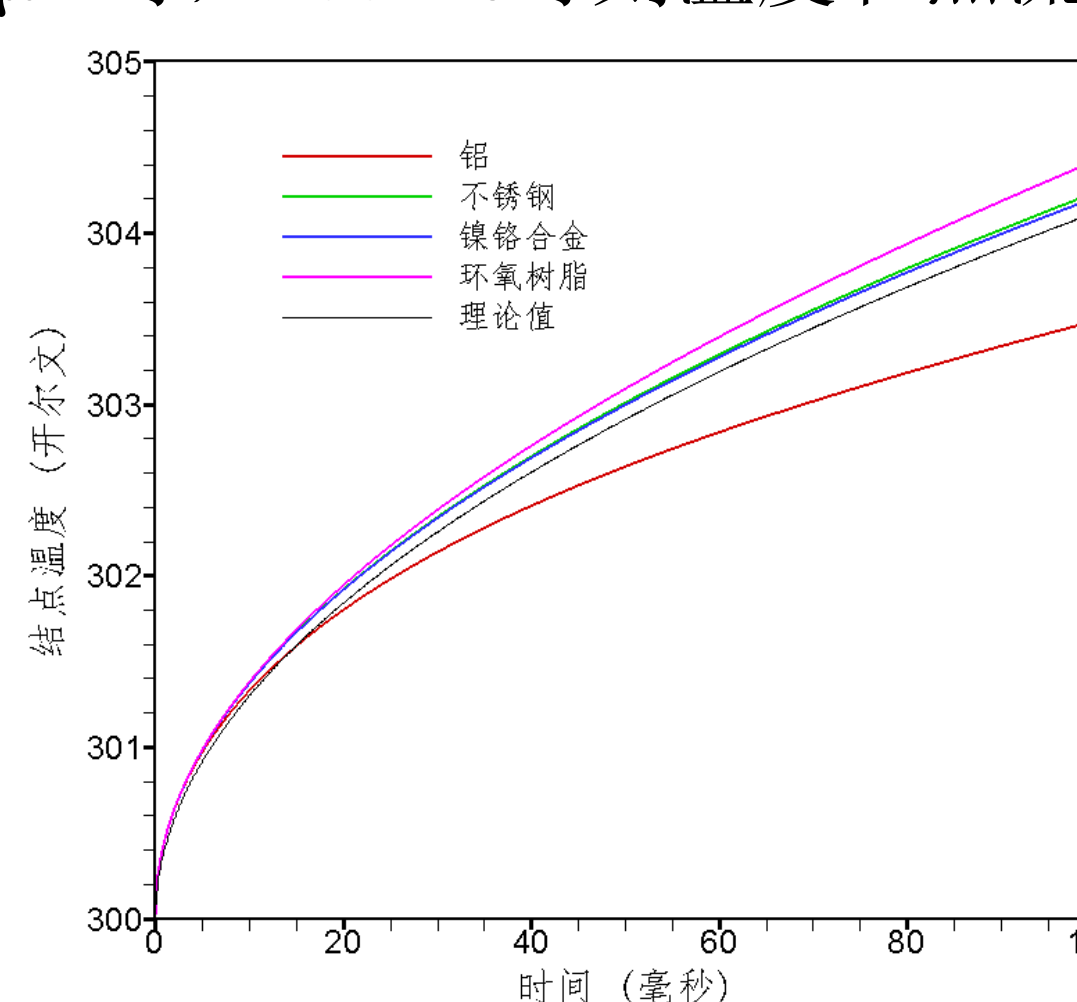


图7 不同壁面材料的结点温升曲线

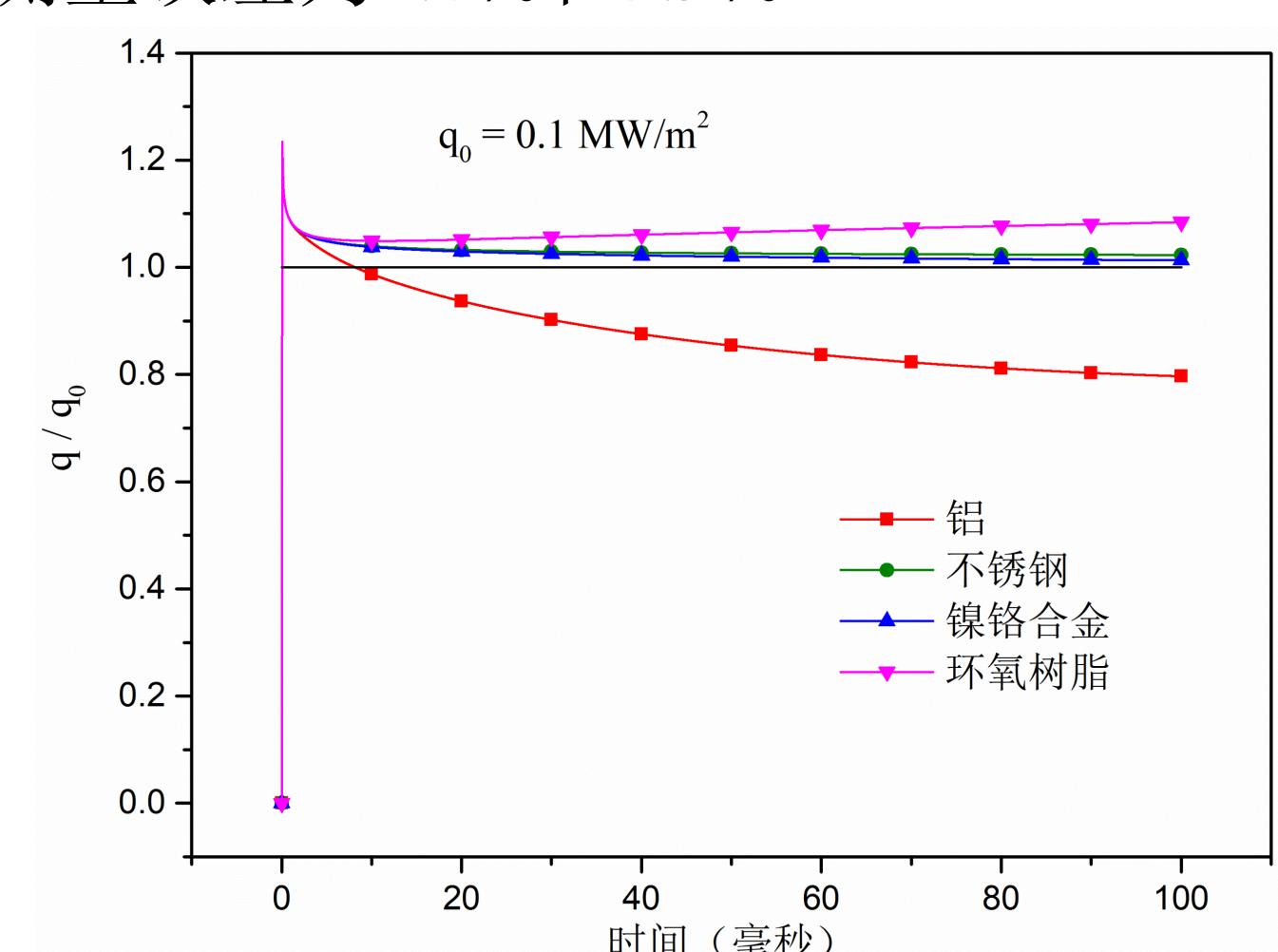


图8 不同壁面材料的无量纲热流曲线

如图6所示，保持绝缘层厚度为14 μm不变，选取不同的材料作为壁面材料，结果发现，在100ms时刻，选取铝和环氧树脂作为壁面材料得到的热流测量结果分别为。选取与传感器正极材料(镍铬合金)物性参数相近的材料，如不锈钢，可以得到较小的热流测量误差2.3%。材质对横向传热的影响可以用公式(1)中的热乘积系数 $\beta = \sqrt{\rho c k}$ 来表征，越大的 $\beta$ 值，会在相同的加热时间内产生越小的温升，所以当选取铝作为壁面材料时，横向传热的形式为从传感器向壁面传递，使结点的温度降低，造成偏小的热流测量误差。