



考虑环境因素的肿瘤射频消融对生物组织传热影响研究

吴浪, 程家幸

南昌大学抚州医学院, 抚州344100

东南大学, 南京210000

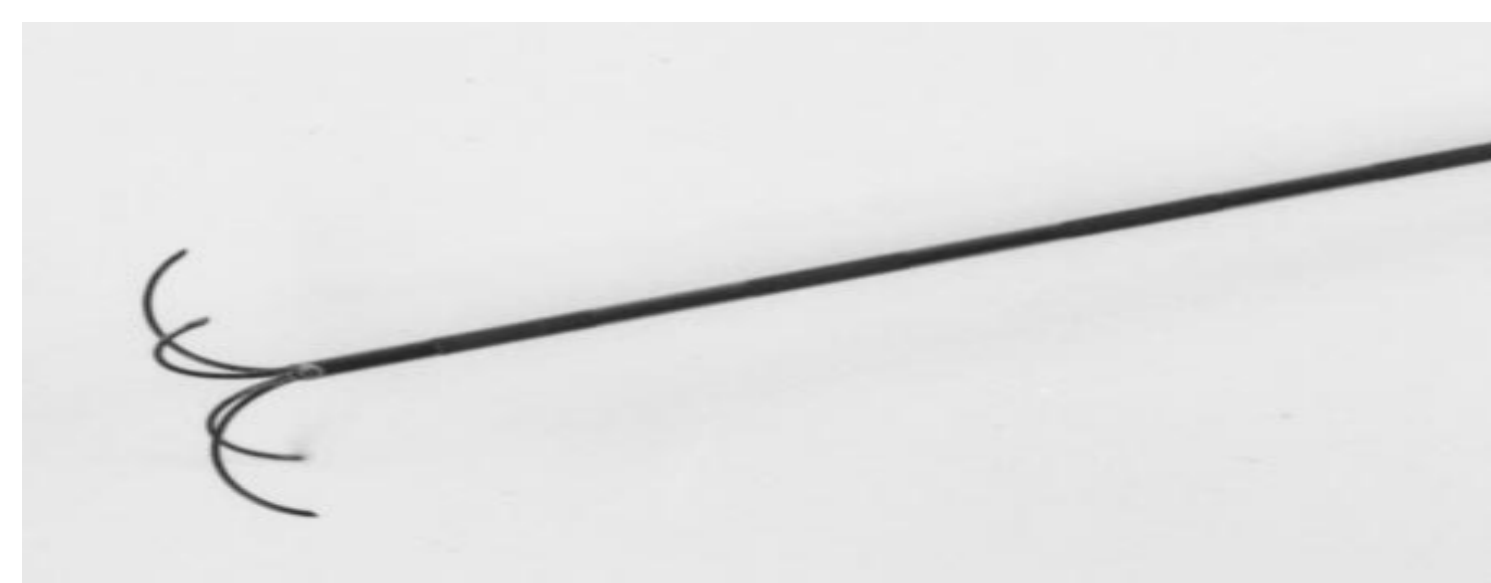
jxwulang@163.com, Jiaxing_cheng@yeah.net

引言:

在临床医学中, 肿瘤的治疗方法不仅有传统的手术治疗, 如今发展的消融术也是一种对早期乳头状肿瘤, 以及某些原发性不可切除的肿瘤早期阶段较好的医疗手段[1]。在本案例中, 利用COMSOL Multiphysics软件平台构建了一个具有20个“钩子”的电极, 通过传热接口仿真电极加热使温度传导到周围组织以杀死细胞。其中, 比较已存在的射频消融设计方法 [2], 本文通过利用Matlab外部函数接口建立了考虑组织环境的湿度以及温度升高影响的热传导率函数, 同时基于Penne's bioheat方程定量分析了电极焦耳热及传热对组织的影响。数值仿真的结果可与相应的实验进行比较[3], 对比验证发现考虑了湿度及温度影响的热导率会更接近真实情况。此案例的结果对射频消融医疗技术及射频消融器械设计提供了可靠的理论依据。

方法:

射频电极在插入生物体组织中加热的同时, 由于组织的生物特性, 其湿度和温度会有一些的改变, 这将会影响生物组织的一些固有属性。本文就建立考虑周围环境因素的热传导方程, 再通过Matlab外部函数接口, 对方程进行参数化扫描, 得出相应温度场, 最后将本模型的计算结果和现有的文献实验结果进行比较。

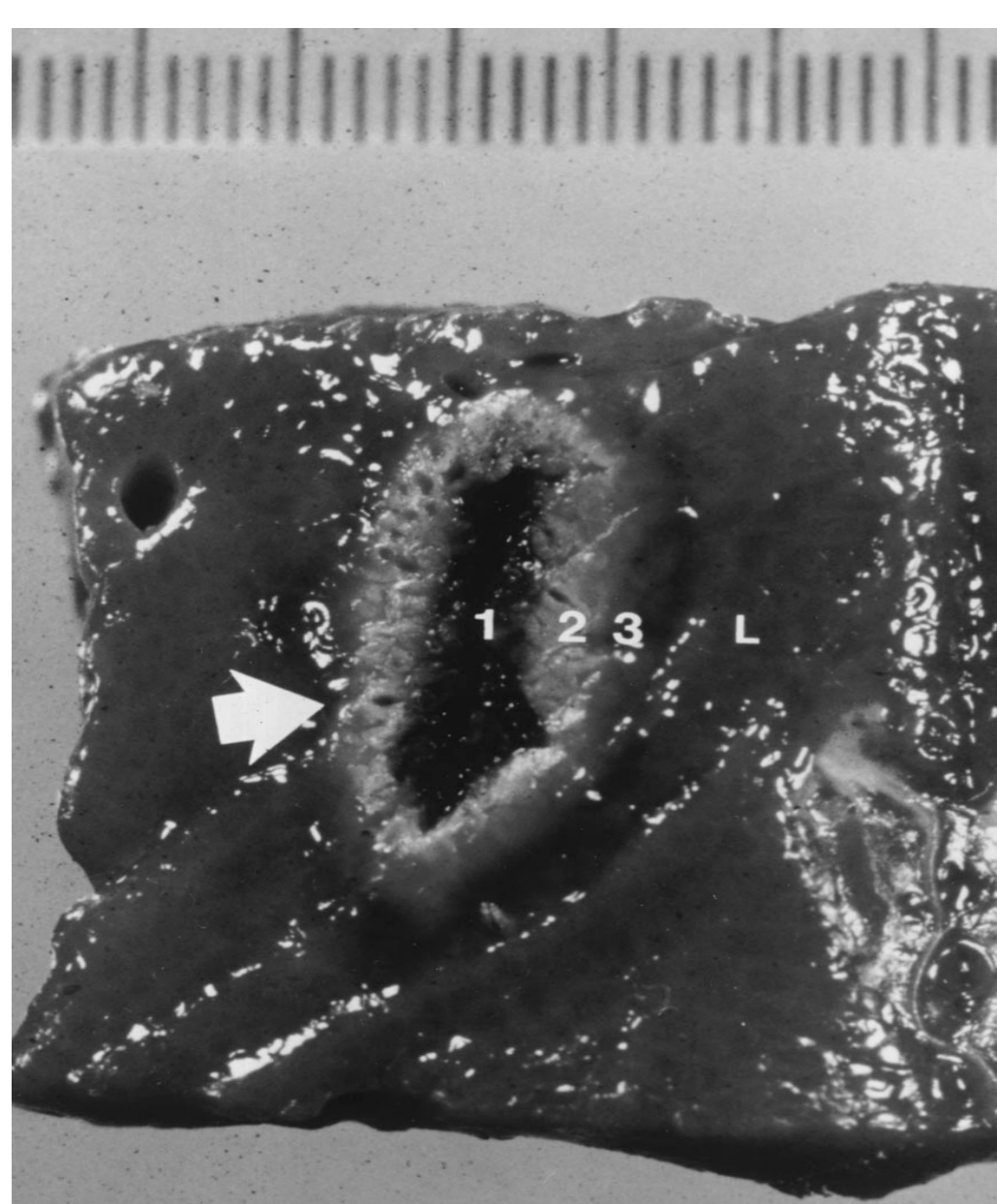


图一

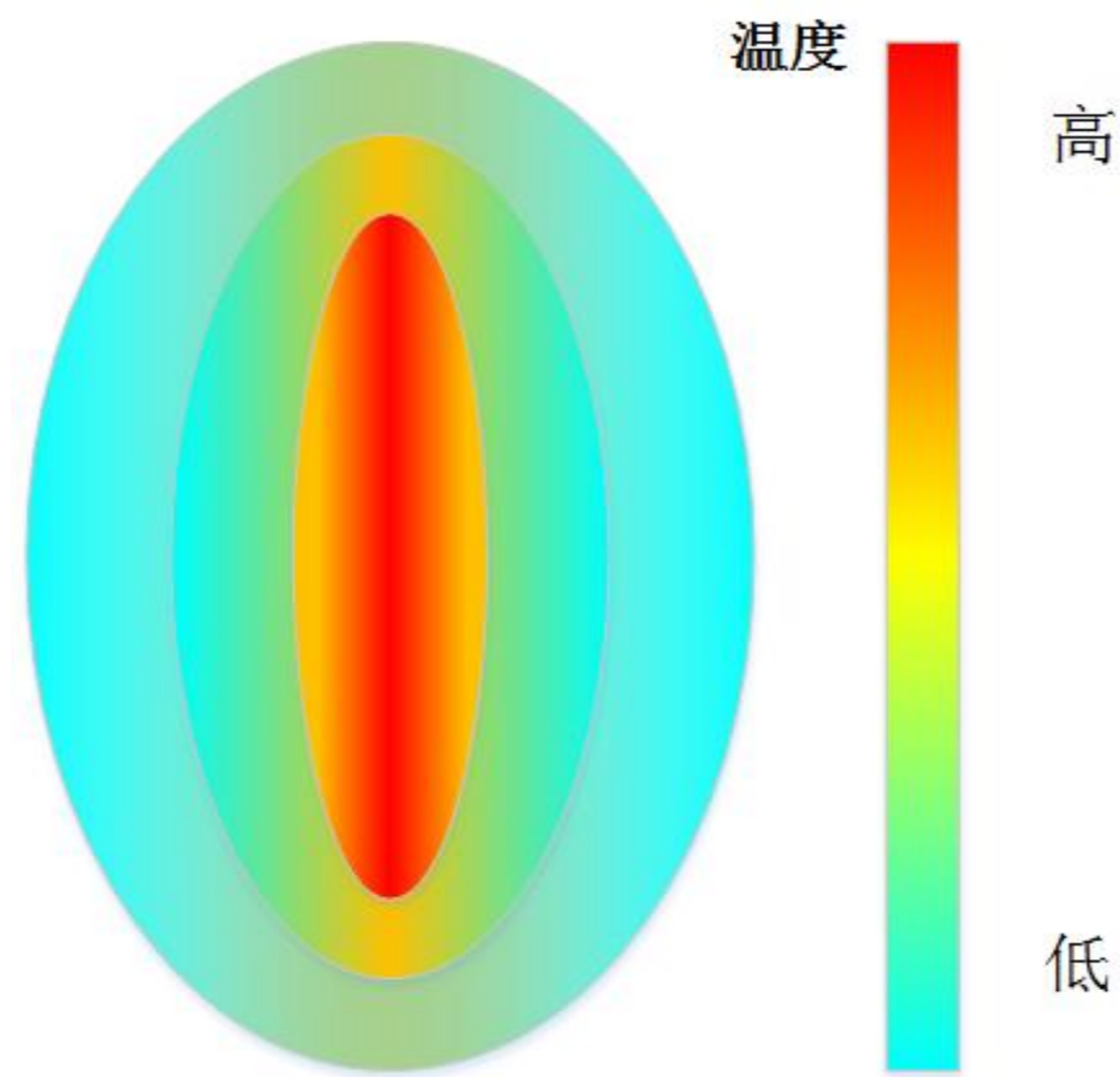


图二

图一 为多电极臂射频加热探头, 图二 为单电极臂射频加热探头

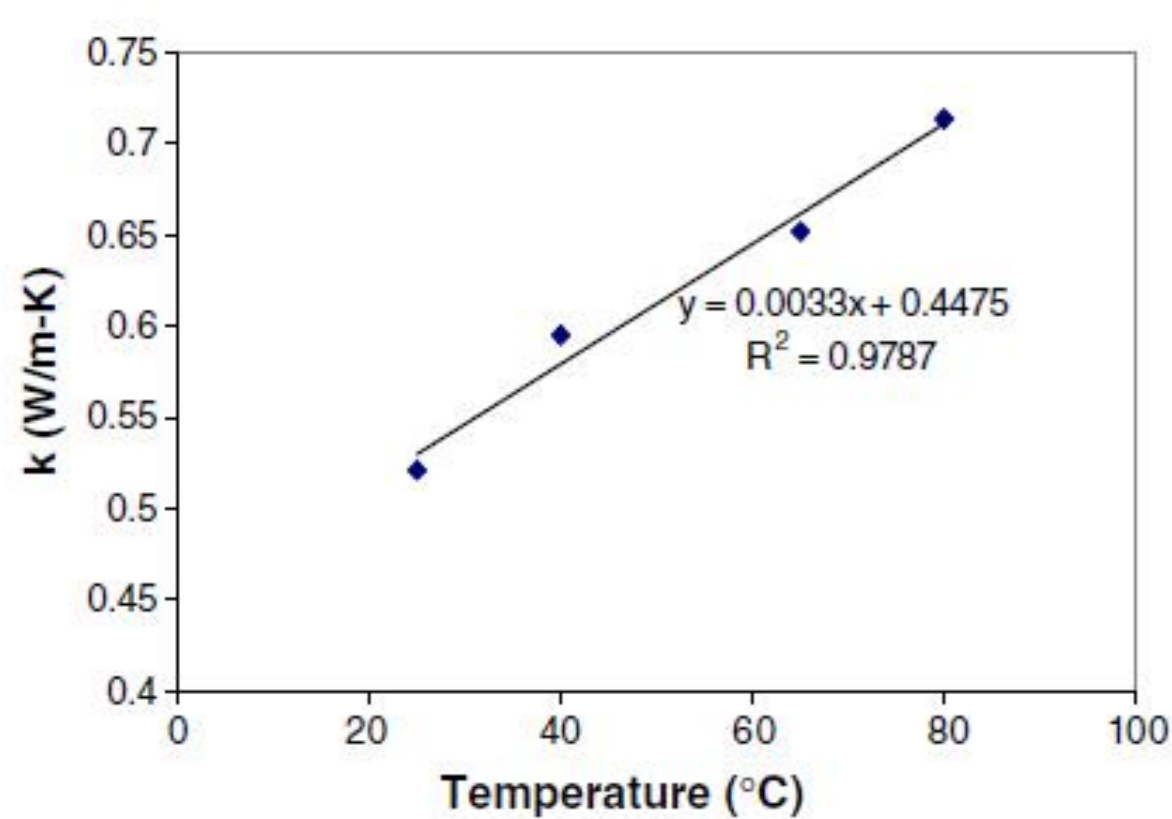


左图为活体肝脏照片显示中心区域有烧焦的组织(箭头, 1)周围有凝固性坏死(箭头, 2)充血边缘(箭头, 3)



模式图预测生物组织改变分层与温度有关

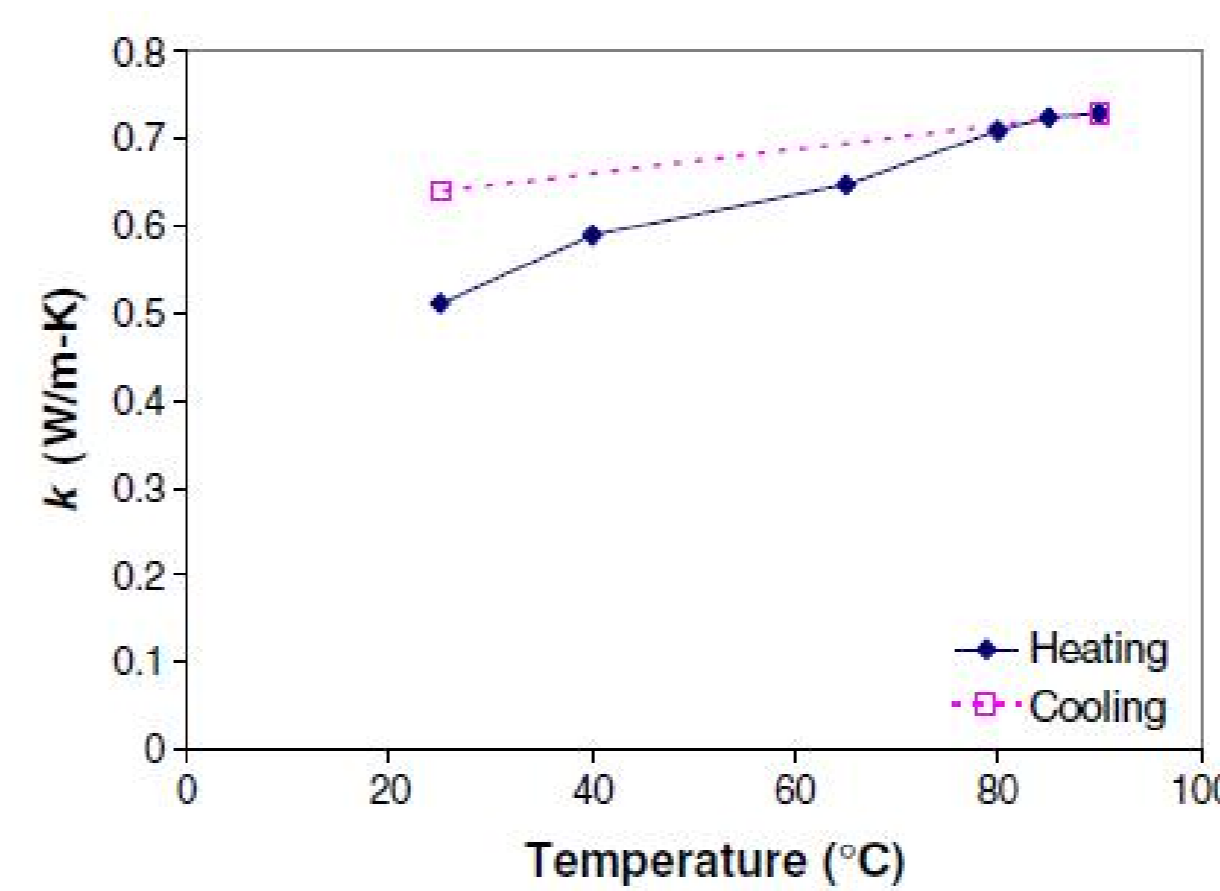
引用实验数据, 调用matlab外部函数接口, 首先将热导系数与温度进行拟合, 得出导热系数与温度的关系函数。



通过多项式拟合可以得出热传导率 k 和温度 T 的关系函数

$$k(T) = 0.4475 + 0.0033T$$

| Temperature (°C) | Thermal conductivity (W m ⁻¹ K ⁻¹) | |
|------------------|---|-------|
| | Run 1 | Run 2 |
| 25 | 0.53 | 0.512 |
| 40 | 0.6 | 0.59 |
| 65 | 0.656 | 0.648 |
| 80 | 0.72 | 0.71 |
| 85 | | 0.725 |
| 90 | | 0.73 |
| 25 (cooled) | 0.541 | 0.64 |

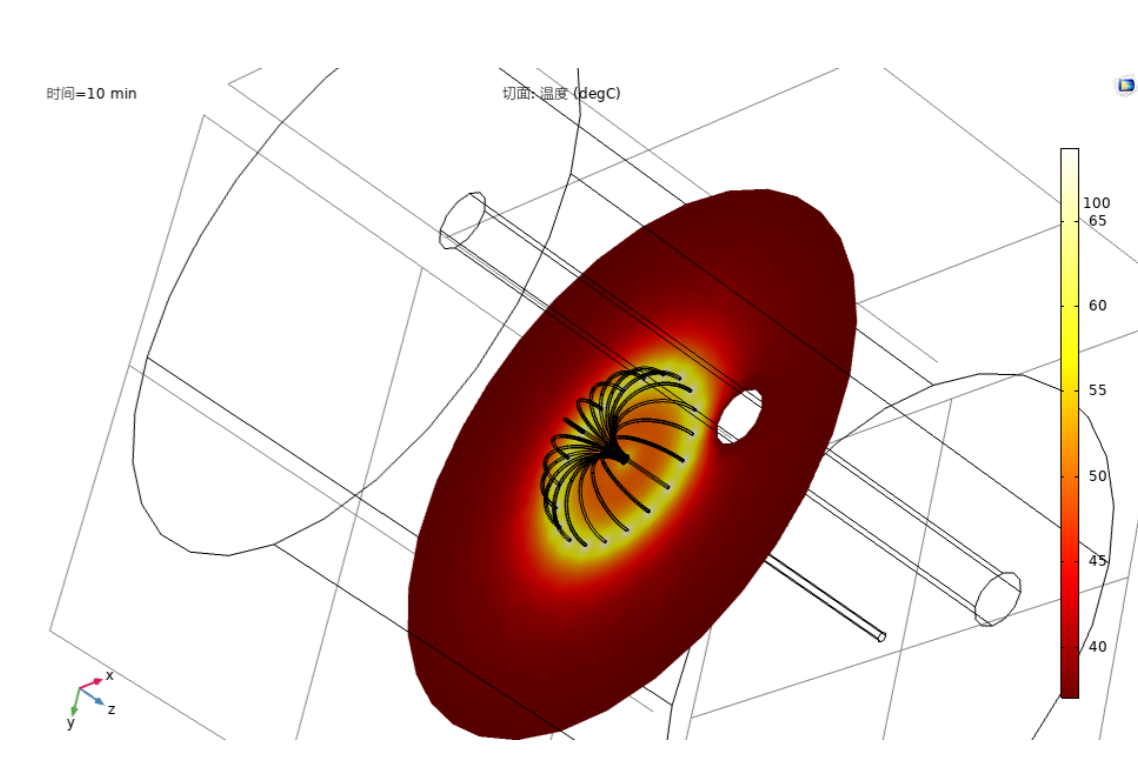
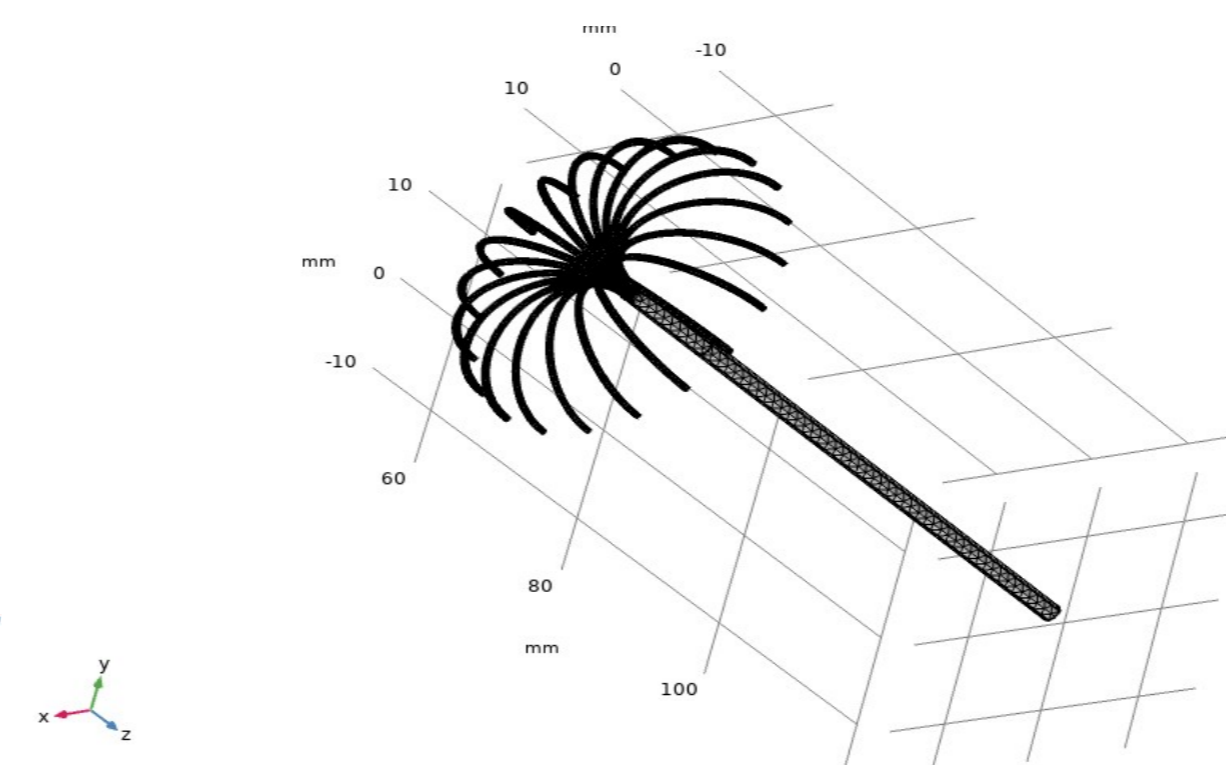


将拟合所得到的热传导系数与温度的函数带到经典的Penne's bioheat方程当中, 得到一个考虑热导系数因素的新方程。

$$\rho C(\partial T / \partial t) = \nabla \cdot (K \nabla T) + q_b + q_m$$

$$q_b = \rho_b W_b C_b (T_a - T)$$

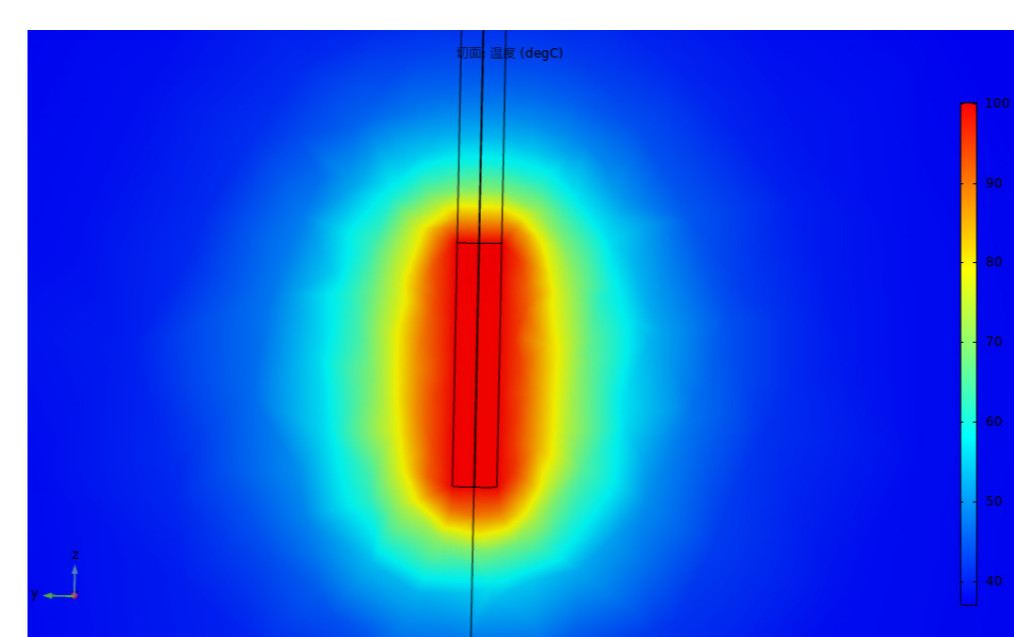
$$\rho C(\partial T / \partial t) = \nabla \cdot [(0.4475 + 0.0033T) \nabla T] + \rho_b W_b C_b (T_a - T) + q_m$$



我们设计的带有20个加热电极的射频加热探头。COMSOL 软件仿真得到的等温面示意图

结果:

验证:

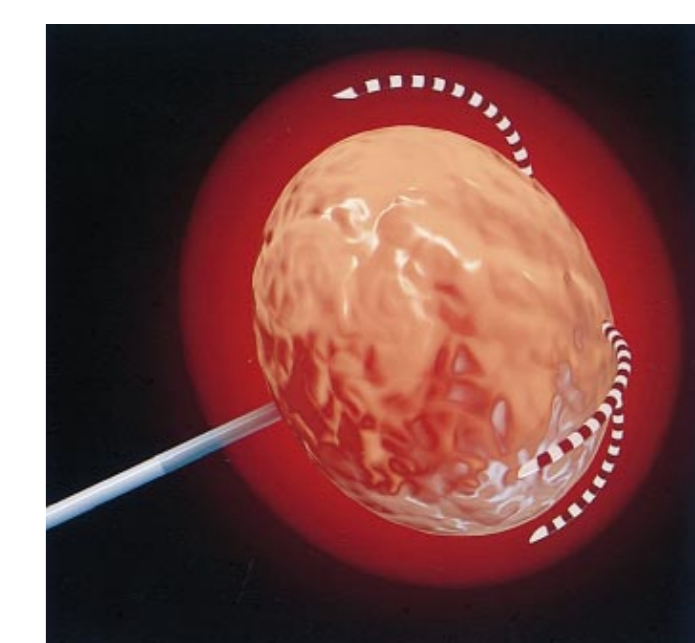


| Tumor d/2 mm | 450 kHz | | 20 kHz | |
|---------------|------------|--------------|------------|--------------|
| | Simulation | Experiment | Simulation | Experiment |
| 450 kHz | 83.7°C | 65.1 ± 1.3°C | 69.2°C | 57.5 ± 1.4°C |
| 20 kHz | 99.0°C | 76.9 ± 5.6°C | 83.7°C | 65.8 ± 2.0°C |
| Normal d/2 mm | 69.2°C | 58.7 ± 2.5°C | 58.4°C | 57.2 ± 5.6°C |
| 450 kHz | 83.8°C | 65.8 ± 3.0°C | 67.2°C | 64.0 ± 7.7°C |

我们的仿真在距离探针4mm的组织处, 12分钟的时候温度为72.7°C, 与文献中实验值65.8°C差值6.9°C。而文献中仿真温度为83.8°C, 与实验值差值18°C。

结果表明: 考虑环境因素的热传导系数的温度场仿真结果更接近实验数据

应用:



结论:

- 1) 考虑了生物组织被加热时湿度和温度的改变影响其热导率的生物热传方程, 温度的分布计算会更加接近真实值。
- 2) 更多电极臂的射频加热探头对于肿瘤组织的消融以及周围生物组织的损伤更为快捷和安全。
- 3) 当组织的生物特性被改变的时候, 其固有属性将会呈不可逆的改变。

参考文献:

[1] S. Nahum Goldberg. Radiofrequency Tumor Ablation: Principles and Techniques [J]. EUR J RADIOL, 2001, 13, 129-147

[2] Supan Tungjitkusolmun, S. Tyler Starlin, Dieter Harmmerich, Jang-Zern Tsai, Hong Cao, John G. Webster, Fred T. Lee, Jr., David M. Mahvi, and Vicken R. Vorperian. Three-Dimensional Finite-Element Analyses for Radio-Frequency Hepatic Tumor Ablation [J]. IEEE T BIO-MED ENG, 2002, 49(1), 3-9

[3] Dieter Harmmerich, Member, IEEE, and David J. Schutt. RF Ablation at Low Frequencies for Targeted Tumor Heating: In Vitro and Computational Modeling Results [J]. IEEE T BIO-MED ENG, 2011, 58(2), 404-410