基于 COMSOL 仿真外科能量类医疗器械组织毁损研究

外科能量器械可实现快速切割与止血，且可用于组织消融，组织热损伤较小，便于医师操作，手术效率高。本研究基于 COMSOL，对不同移动速度下的电场和热场开展仿真分析，探究该能量器械作用下的组织毁损规律。

陈永刚[1,2]，王智威[1,2]，徐凯旋[1,2]
1. 杭州睿笛生物科技有限公司，杭州，浙江，中国
2. 浙江省脉冲电场技术医学转化实验室，杭州，浙江，中国

摘要

外科能量器械是外科手术重要工具，依靠电极 - 生物组织局部回路完成组织切割、凝血，且可用于组织消融技术，热损伤控制是其临床应用关键。为研究能量器械动态毁损生物组织的电热作用机制，基于 COMSOL Multiphysics 构建电热多物理场耦合有限元模型，结合电流守恒方程与 Pennes 生物传热方程实现电场 - 传热双向耦合，引入移动网格技术复现器械动态过程，求解组织内部电场与温度场的演化特征。结果显示，电场高度集中于电极附近，高温区域随电极运动沿毁损轨迹同步迁移；毁损移动速率显著影响组织峰值温度与侧向热扩散范围，低速移动易引发更大侧向热损伤，高速移动可获得较窄切口，但存在毁损不充分的风险。通过对比不同移动速率下组织的电流密度与温度场分布规律，可为能量器械临床操作及工作参数优化提供仿真依据与理论支撑。

温度分布

电流密度

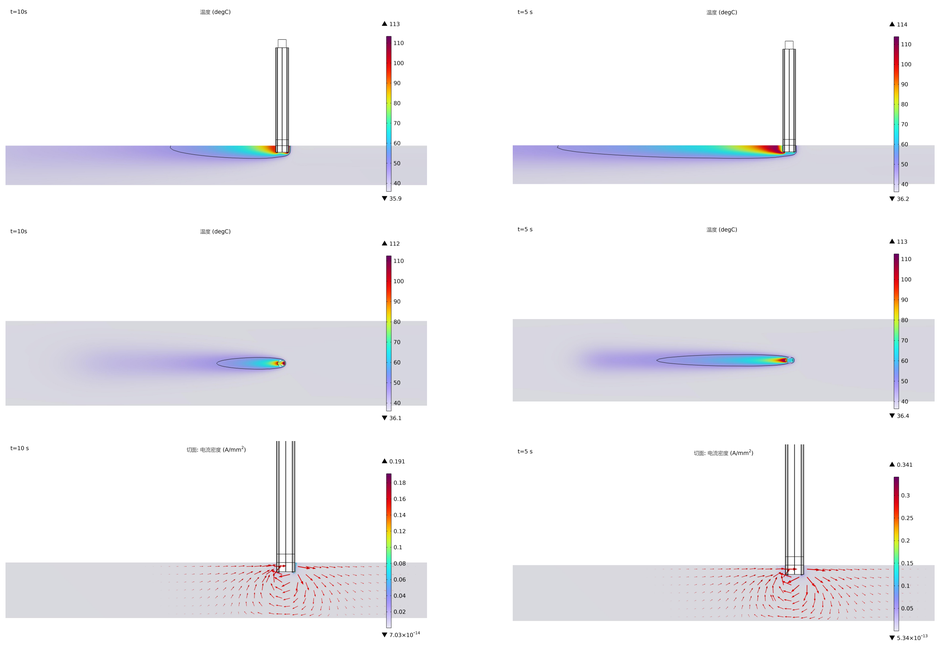


图1. 速度2.5mm/s时温度和电流密度分布

图2. 速度5mm/s时温度和电流密度分布

方法

外科能量器械通过电能转化为热能将组织消融分离，首先要建立电场和热场关系。

准静态电场：

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0 \tag{1}$$

其中，V为电压，V；σ为电导率，S/m。

本次研究暂不考虑血液流动及新陈代谢对传热影响，故热传导公式：

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \mathrm{t}} = \nabla \cdot k \nabla T + Q \tag{2}$$

$$Q = J \cdot E \tag{3}$$

其中，ρ为组织密度，$\mathrm{kg/m^3}$；c为比热，$\mathrm{J/(kg \cdot K)}$；T为组织温度，K；k为热导率，$\mathrm{W/(m \cdot K)}$；Q为外部热源，$\mathrm{W/m^3}$；J为电流 密度，$\mathrm{A/m^2}$；E为电场强度，V/m。

结果

外科能量器械产生的焦耳热主要集中在电极放电位置。移动速度低时，电极在局部组织停留时间更长，热量有充分时间向周边扩散，高温区范围更大，但局部峰值温度相对更低；当移动速度提升，电极快速扫过组织，热量来不及向侧向扩散，能量集中在针尖前沿，造成针尖局部峰值温度显著升高，同时电流密度峰值增大。该现象提示：能量器械存在速度-温度的权衡，提升速度会显著增加针尖局部热沉积，而低速模式下热扩散范围更大，更易造成靶区外正常组织的热损伤。

本案例通过 COMSOL 多物理场仿真软件，建立了电热耦合有限元模型，对比两种移动毁损速度下组织内温度场、电流密度分布特征，以及特征点、毁损路径上的温度演化规律，可为临床外科能量器械操作及工作参数优化提供仿真依据与理论支撑。

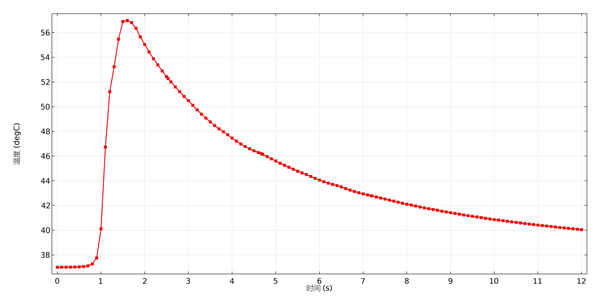


图3. 速度2.5mm/s时特征点温度随时间变化

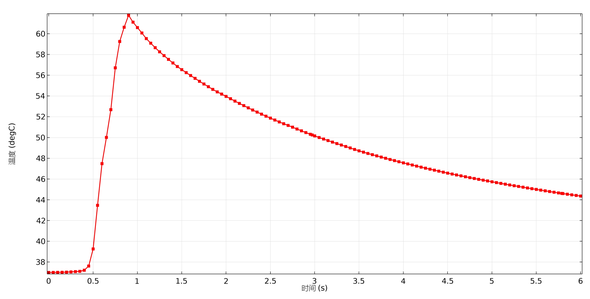


图4. 速度5mm/s时特征点温度随时间变化

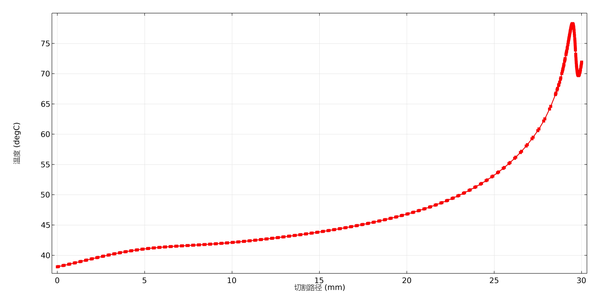


图5. 速度2.5mm/s时毁损路径温度变化

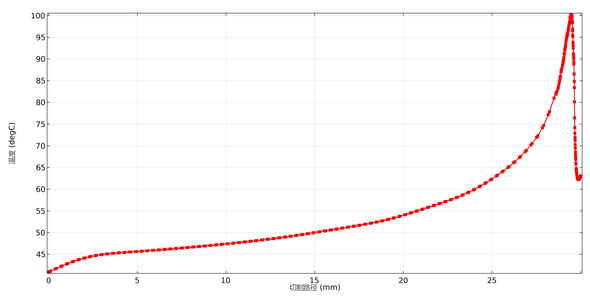


图6. 速度5mm/s时毁损路径温度变化

参考文献

[1]李名高,姜兴刚,武文帅,等.医疗高频电刀切割快速止血仿真研究[J].计算机仿真, 2018, 35(12):6.

[2] Dodde R E , Miller S F , Geiger J D ,et al.Thermal-Electric Finite Element Analysis and Experimental Validation of Bipolar Electrosurgical Cautery[J].Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2008, 130(2):241-248.

[3] Jawaid S, Ramchandani M, Inavolu P, et al. Randomized Controlled Trial Comparing the Clinical Efficacy of a Bipolar Current Knife versus Monopolar Current Knife During Esophageal PerOral Endoscopic Myotomy: A Multicenter Non-inferiority Study[J]. Gastrointestinal Endoscopy, 2025.

睿笛 Nanoablation®