

文章编号:1004-7220(2019)02-0179-07

# 不同尺寸参数对双极高频电刀热应力场的影响

崔海坡, 黄嘉平, 宋成利, 周宇

(上海理工大学 现代微创医疗器械及技术教育部工程研究中心, 上海 200093)

**摘要:**目的 分析不同尺寸参数对双极高频电刀热应力场的影响规律。**方法** 基于有限元分析软件 ANSYS,对双极高频电刀工作过程中的热应力场进行系统的电热耦合仿真分析,研究3种不同绝缘层厚度(0.5、1.0、1.5 mm)、电极厚度(0.5、1.0、1.5 mm)以及涂层厚度(3、6、9  $\mu\text{m}$ )对高频电刀各部分热应力场的影响。**结果** 绝缘层厚度越大,心肌组织由于热应力产生的变形量越小,即高频电刀工作过程中绝缘层厚度与心肌组织的热变形量成反比;对于3种电极厚度而言,选取1.0 mm更为合适;对于3种涂层厚度而言,选取6  $\mu\text{m}$ 更为合适。**结论** 高频电刀各组成部件的尺寸参数对其工作过程中的热应力场有重要的影响,研究结果可为高频电刀的设计开发提供指导。

**关键词:**高频电刀;热应力;热变形;电热耦合

中图分类号: TB 333 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2019.02.011

## Influence of Different Sizes on Thermal Stress Field of Bipolar High-Frequency Electric Knife

CUI Haipo, HUANG Jiaping, SONG Chengli, ZHOU Yu

(Shanghai Institute for Minimally Invasive Therapy, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract: Objective** To analyze the influence regularities of different sizes on thermal stress field of bipolar high-frequency electric knife. **Methods** Based on the ANSYS software, the electric-thermal coupling simulation analysis was performed for thermal stress field of bipolar high-frequency electric knife during working. The effects of 3 different insulation layer thicknesses (0.5, 1.0, 1.5 mm), electrode thicknesses (0.5, 1.0, 1.5 mm) and coating thicknesses (3, 6, 9  $\mu\text{m}$ ) on thermal stress field of bipolar high-frequency electric knife were studied. **Results** If thickness of the insulation layer was larger, deformation of the myocardial tissues would be smaller due to thermal stress, that is, the thickness of the insulation layer was inversely proportional to thermal deformation of the myocardial tissue during working process of the high-frequency electric knife. For the 3 electrode thicknesses, 1.0 mm was a better choice. And for the 3 coating thicknesses, 6  $\mu\text{m}$  was a better choice. **Conclusions** The component sizes for the high-frequency electric knife have an important influence on thermal stress field, and the result can provide guidance for design of the high-frequency electric knife.

**Key words:** high-frequency electric knife; thermal stress; thermal deformation; electric-thermal coupling

收稿日期:2018-04-30; 修回日期:2018-07-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51735003)

通信作者:崔海坡,副教授,E-mail: h\_b\_cui@163.com

随着医学技术的进步,高频电刀在临床的应用越来越广泛。高频电刀通过电极表面的高频电流与组织接触时产生的热量,对组织进行加热,实现对肌体组织的分离和凝固,达到切割和止血的目的<sup>[1-2]</sup>。高频电刀工作过程中产生的热量被限制在电极作用区域的局部组织上,其凝血效果好,可减少患者失血及输血量,并能在手术过程中对创口进行杀菌,极大提高了手术效率和手术成功系数<sup>[3-5]</sup>。双极高频电刀工作过程中,在电流的持续作用下,电刀刀头中心会产生焦耳热。随着热量的累积,电刀刀头中心的温度会逐渐升高并向电刀外壳方向传递,从而导致刀头各组成部件之间会产生一定的热应力,影响双极高频电刀的使用寿命,同时对手术时组织的分离和凝固效果也会产生较大的影响。基于上述原因,对双极高频电刀工作过程中热应力的研究越来越引起人们的重视。曹慧娜<sup>[6]</sup>通过实验分析不同功率和电切时间对组织的致热效应,结果表明,在16~64 W电切功率和1~6 s电切时间下,刀头黏附质量相对较小。刘霞等<sup>[7]</sup>通过对高频电刀刀头形状进行优化设计,改善了因操作时遮挡视野导致高频电刀刀头对周围组织造成误伤的现象,尤其在操作空间狭小及深部手术操作的情况下改善效果明显。Han等<sup>[8]</sup>研究在不同温度及湿度条件下,高频电刀表面的抗体液及组织的黏附特性。Fahmy<sup>[9]</sup>基于双3次B样条法,对高频电刀刀头部分的圆角结构进行优化设计。陈程等<sup>[10]</sup>通过分析高频电刀在临床医学手术中的应用原理,探讨其对作用范围外组织的损伤及损伤原理,解释了高频电刀在妇科手术后可能引起的并发症。刘亚昕等<sup>[11]</sup>比较不同模式和功率条件下,高频电刀在切割扁桃体组织时产生的热损伤现象。白涛等<sup>[12]</sup>通过对不同实验组进行对比,探讨高频电刀在肝癌(hepatocellular carcinoma, HCC)肝切除术中的应用价值,得出大功率高频电刀用于HCC肝切除术切肝时速度快、止血效果好、使用安全可靠的结论。周一平等<sup>[13]</sup>通过实验对比,探讨经支气管镜高频电刀氩气刀治疗伴呼吸功能不全大气道肿瘤的有效性和安全性。Kawakami等<sup>[14]</sup>研究高频电刀在颞下颌关节手术中的疗效和安全性。从现有研究来看,针对各组成部件的尺寸参数对高频电刀热应力场的影响进行分析的文献尚不多见。

基于上述分析,本文应用有限元分析软件ANSYS,以双极高频电刀为研究对象,对其工作过程中的热应力场进行系统的电热耦合仿真分析,研究3种不同绝缘层厚度、电极厚度以及涂层厚度对双极高频电刀热应力场的影响规律,并分析在双极高频电刀工作过程中,刀头各部分变形量随时间的变化规律,为高频电刀的设计开发提供指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 几何模型

双极高频电刀刀头的结构模型如图1所示,刀头的上下两部分是对称结构,下部分刀头从下至上依次为外壳、绝缘层、电极、限位装置、涂层。其中,涂层材料镀在电极表面。

为比较不同尺寸参数对电刀刀头热应力场的影响规律,基于对目前现有高频电刀尺寸的测量以及相关专利的查询<sup>[15]</sup>,选择3种不同的绝缘层厚度(0.5、1.0、1.5 mm)、电极厚度(0.5、1.0、1.5 mm)、涂层厚度(3、6、9  $\mu\text{m}$ )。在分析不同绝缘层厚度的影响规律时,固定电极厚度为1.0 mm,涂层厚度为6  $\mu\text{m}$ ;在分析不同电极厚度的影响规律时,固定绝缘层厚度为1.0 mm,涂层厚度为6  $\mu\text{m}$ ;在分析不同涂层厚度的影响规律时,固定绝缘层厚度为1.0 mm,电极厚度为1.0 mm。

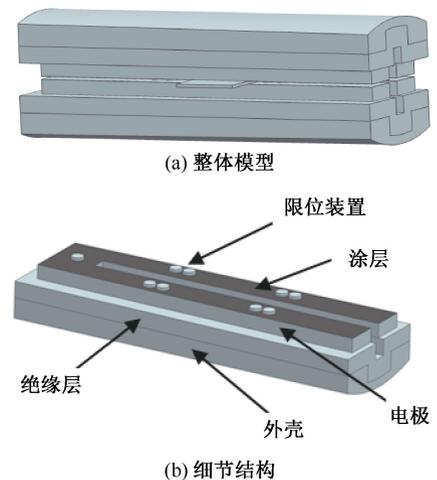


图1 结构模型

Fig.1 Structural model (a) Whole model, (b) Structural details

### 1.2 材料参数

根据已有文献<sup>[15]</sup>,绝缘层选取聚丙烯(poly-

propylene, pp)材料,电极选取 316 不锈钢材料,涂层材料选取不黏性较好且抗腐蚀性较高的 GrN 材料,外壳材料选取 304 J 医用不锈钢,限位装置选用氧化铝陶瓷材料。高频电刀要实现组织进行切割和凝血的目的,必须在电压源和人体组织之间形成回路<sup>[2,4]</sup>。由于重点研究不同尺寸参数对高频电刀热应力场的影响规律,而对所选的组织材料并无特殊要求,同时考虑到高频电刀在临床上主要用于闭

合心肌组织,故人体组织材料选取心肌组织。电热耦合分析时需要的材料参数包括密度、比热容、弹性模量、泊松比、热膨胀系数、导热系数和电阻率,其中,前 4 个参数是固定值,而热膨胀系数、导热系数和电阻率会随温度的变化而变化。已有研究表明,高频电刀工作过程中的最高温度约为 100 ℃<sup>[16]</sup>,故选取的材料参数均为 100 ℃条件下数据。上述各类材料性能参数如表 1 所示<sup>[2-5, 17]</sup>。

表 1 材料性能参数

Tab.1 Material properties

材料	导热系数/ (m·K)	电阻率/ (Ω·m)	比热容/ [J·(kg·K) <sup>-1</sup> ]	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/ MPa	泊松比	热膨胀系数/ (K <sup>-1</sup> )
PP	0.23	1×10 <sup>14</sup>	1 926	900	896	0.41	1.6×10 <sup>-4</sup>
316 不锈钢	15.1	7.3×10 <sup>-7</sup>	502	7 930	2.06×10 <sup>5</sup>	0.3	1.6×10 <sup>-5</sup>
304 J	16.3	7.3×10 <sup>-7</sup>	500	7 930	1.95×10 <sup>5</sup>	0.25	1.7×10 <sup>-5</sup>
CrN	11.7	6.4	450	6 140	4.1×10 <sup>5</sup>	0.12	9.0×10 <sup>-6</sup>
心肌组织	0.7	1.63	3 200	1 200	65.66	0.4	9.2×10 <sup>-4</sup>

### 1.3 载荷与边界条件

**1.3.1 电热耦合分析** 双极高频电刀工作过程属于升温过程,涉及电场与温度场的分析,其中电场和温度场耦合过程可通过直接耦合的计算方法,进行一次求解分析,计算电极处由于电流产生的焦耳热所形成的温度分布情况。首先将需要施加电流载荷端面上的节点进行电压自由度耦合,选取功率稳定时交流电的有效值作为热电耦合分析的电载荷。在双极高频电刀工作过程中,交流电的有效值设定为 1 A,将其施加在刀头上端电极的上表面。选择刀头下端电极的下表面,定义其电势为 0 作为电场边界条件。进行 2 s 的短时瞬态分析。为了模拟真实的双极高频电刀工作过程,有限元分析设定的环境温度为室温 20 ℃。

**1.3.2 热应力分析** 电热耦合分析结束后,将电热耦合分析单元转换为对应的热应力分析单元,并将温度梯度最大时的电热耦合分析结果,作为热应力分析的温度载荷。分别选取外壳、绝缘层及电极端部的一侧横截面,施加法向位移约束,作为位移边界条件。

## 2 有限元分析结果

### 2.1 不同绝缘层厚度对热应力分布影响规律

**2.1.1 不同绝缘层厚度对温度分布影响规律** 经计算分析表明,对于 3 种不同绝缘层厚度,刀头各

部分的温度分布具有类似的规律。为节省篇幅,以绝缘层厚度为 1.0 mm 为例,对各部分温度分布进行分析。图 2 所示为连续通电 2 s 条件下,心肌组织、电极、涂层以及绝缘层的温度分布情况。心肌组织温度最高,可达约 145 ℃;其次为电极和涂层,最高温约为 92 ℃;而绝缘层的最高温约为 71 ℃。上述分析结果与文献[16, 18]中针对高频电刀工作过程中的实测温度场分布具有一致的规律,表明本文分析模型的有效性。

### 2.1.2 不同绝缘层厚度对热应力分布影响规律

在双极高频电刀工作过程中,温度主要分布于绝缘层、电极、涂层和心肌组织上,故主要针对上述 4 个部分进行热应力分析。图 3 所示为绝缘层厚度为 1.0 mm 时刀头各部分的热应力分布。在高频电刀工作过程中,当绝缘层厚度为 1.0 mm 时,涂层部分产生的最大热应力约为 808 MPa,远小于其许用值 18 GPa;绝缘层最大热应力为 10.9 MPa,小于绝缘层材料的许用强度 37 MPa;电极处最大热应力约为 97 MPa,低于电极材料的许用应力值 170 MPa。因此,在双极高频电刀工作过程中,刀头各部分产生的热应力均不会对其使用性能造成较大的影响。此外,由于刀头各部分的制作材料不同,故各部分由热应力所引起的热变形量也不尽相同,而热变形量也是影响高频电刀使用性能的一项重要参数,因此需对其进行分析。

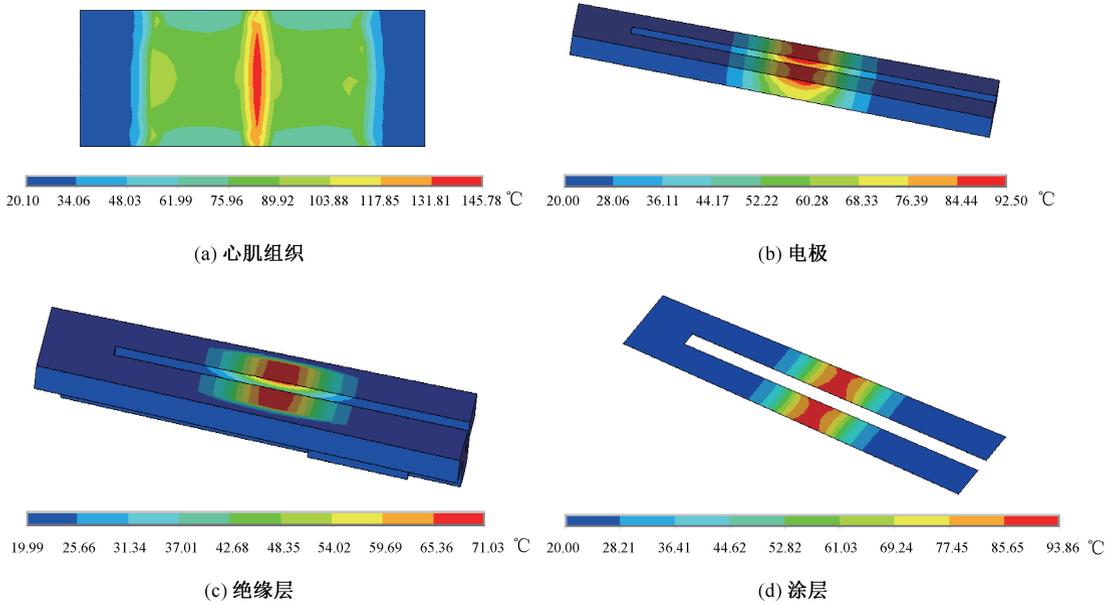


图2 绝缘层厚度为 1.0 mm 时刀头各部分温度分布

Fig.2 Temperature distributions on different part of knife with insulation layer thickness being 1.0 mm

(a) Myocardial tissue, (b) Electrode, (c) Insulation layer, (d) Coating

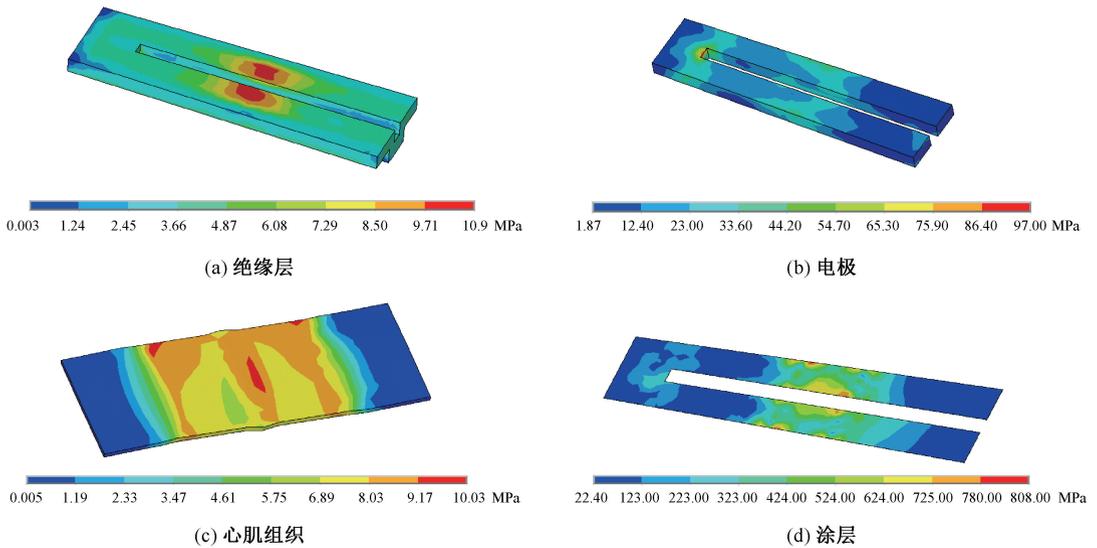


图3 绝缘层厚度为 1.0 mm 时刀头各部分热应力分布

Fig.3 Thermal stress distribution on different parts of knife with thickness of insulation layer being 1.0 mm

(a) Insulation layer, (b) Electrode, (c) Myocardial tissue, (d) Coating

图4 为绝缘层厚度为 1.0 mm 时刀头各部分的热变形量分布。刀头各部分由于热应力引起的变形量都很小,其中绝缘层最大变形量约为 42  $\mu\text{m}$ ,电极最大变形量约为 35  $\mu\text{m}$ ,涂层镀在电极表面,其最大变形量和电极最大变形量保持一致,约为 35  $\mu\text{m}$ ,

心肌组织最大变形量约为 169  $\mu\text{m}$ 。

为更直观地分析不同绝缘层厚度对刀头各部分热变形量的影响,绘制刀头各部分最大热变形量随绝缘层厚度的变化曲线(见图5)。随着绝缘层厚度的增加,心肌组织由于热应力所产生的变形量越

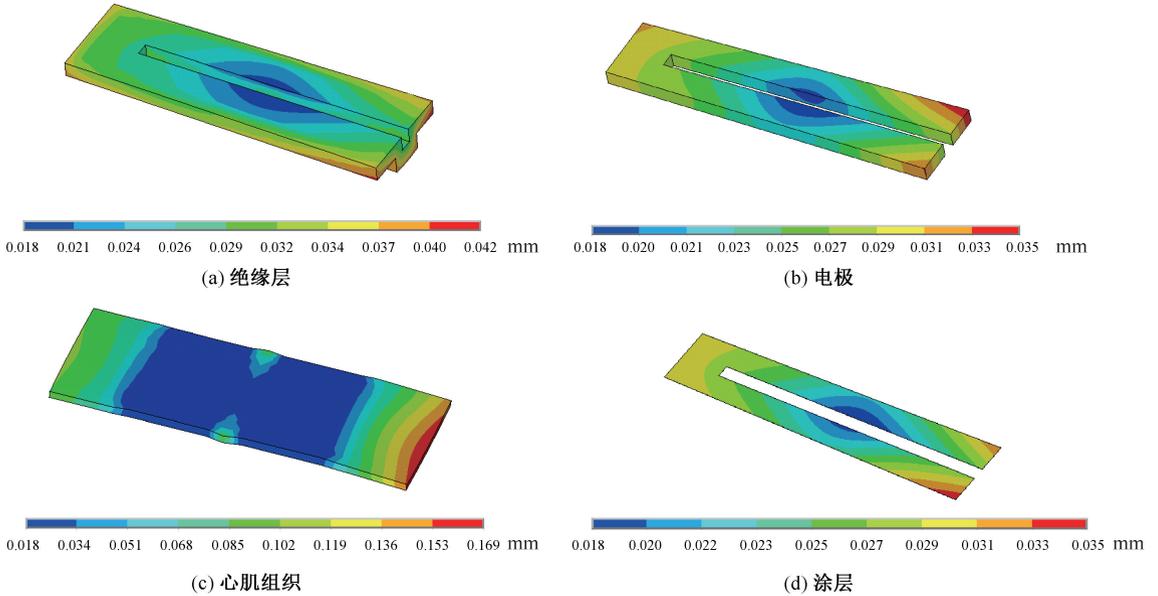


图 4 绝缘层厚度为 1.0 mm 时各部分热变形量云图

Fig.4 Thermal deformation distributions on different parts of knife with thickness of insulation layer being 1.0 mm

(a) Insulation layer, (b) Electrode, (c) Myocardial tissue, (d) Coating

小。当绝缘层厚度为 0.5 mm 时,心肌组织的热变形量最大为 235  $\mu\text{m}$ 。而随着绝缘层厚度的增加,绝缘层和电极的热变形量变化较为平缓,表明不同绝缘层厚度对绝缘层和电极的热变形量影响不大。

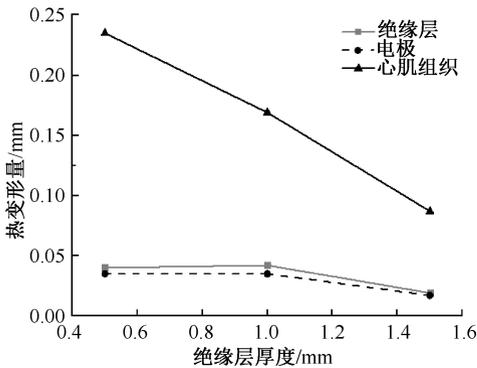


图 5 最大热变形量随绝缘层厚度的变化曲线

Fig. 5 Variation of maximum thermal deformation with thickness of insulation layer

## 2.2 不同电极厚度对热应力分布影响规律

首先进行温度场分析,然后开展热应力场分析。经计算分析表明,对于 3 种不同电极厚度,刀头各部分的热应力分布情况与图 3 中的热应力分布具有类似的规律。为进一步研究不同电极厚度

对刀头各部分热变形量的影响规律,绘制刀头各部分最大热变形量随电极厚度的变化曲线(见图 6)。电极厚度为 1.0 mm 时心肌组织的热变形量最小,从而在双极高频电刀切割心肌组织的过程中,能更好地保证组织的完整性。同时,对于 3 种不同的电极厚度,绝缘层和电极的变形量最大差值均为 19  $\mu\text{m}$ ,可知电极厚度对绝缘层和电极的热变形量影响不大。综合上述分析,电极厚度选取 1.0 mm 较为合适。

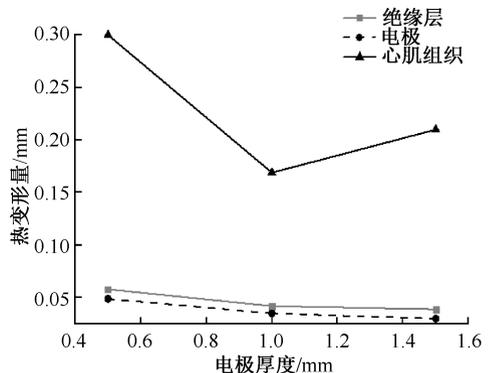


图 6 最大热变形量随电极厚度的变化曲线

Fig. 6 Variation of maximum thermal deformation with electrode thickness

### 2.3 不同涂层厚度对热应力分布影响规律

经计算分析表明,对于3种不同的涂层厚度,刀头各部分的热应力分布情况与图3中的热应力分布具有类似规律。为进一步研究不同涂层厚度对刀头各部分热变形量的影响规律,绘制刀头各部分最大热变形量随涂层厚度的变化曲线(见图7)。当涂层厚度选取6  $\mu\text{m}$ 时,心肌组织由于热应力产生的变形量最小,从而当用高频电刀切割心肌组织时,能更好地保持组织的完整性。对于3种不同的涂层厚度,绝缘层和电极由热应力引起的变形量最大差值分别为10、1  $\mu\text{m}$ ,可知在双极高频电刀工作过程中,涂层厚度的变化对绝缘层和电极的变形量几乎没有影响。综合上述分析,涂层厚度选取6  $\mu\text{m}$ 较为合适。

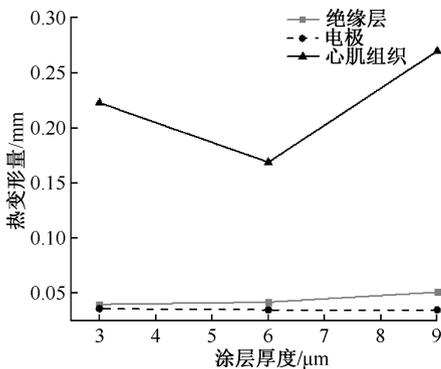


图7 最大热变形量随涂层厚度的变化曲线

Fig.7 Variation of maximum thermal deformation with coating thickness

### 3 讨论与结论

随着医疗技术水平不断进步,以及对手术安全和术后康复要求的不断提高,高频电刀已经逐步取代了手术刀、止血钳等传统医疗器械,成为大中型医院手术过程中不可或缺的一种医疗设备。在高频电刀工作过程中,其利用射频(radio frequency, RF)原理,将高频和高压的电流,通过电刀刀头的电极表面作用到病患部位,对局部生物组织的集中热效应使组织成分汽化或爆裂,从而达到凝固或分离,进而达到灼烧、切割和止血等手术目的。高频电刀工作过程是一个升温过程,在工作过程中,在电流的持续作用下,电刀刀头中心会产生焦耳热。随着热量的累积,电刀刀头中心的温度会逐渐升高

并向电刀外壳方向传递。电刀刀头各组成部分由于受热不均匀而存在着温度差异,导致各组件内部发生膨胀变形或收缩变形不一致,相互约束从而在刀头内部产生热应力。此外,在热量传递过程中,同种材料的情况下,传热方向的尺寸越大,传热温差越大,其热应力也越大。由本文分析结果可知:

(1) 绝缘层厚度越大,心肌组织由于热应力产生的变形量越小,即高频电刀工作过程中绝缘层厚度与心肌组织的热变形量成反比。

(2) 对于0.5、1.0、1.5 mm这3种电极厚度而言,选取1.0 mm更为合适。

(3) 对于3、6、9  $\mu\text{m}$ 这3种涂层厚度而言,选取6  $\mu\text{m}$ 更为合适。

由上述规律性分析结果可知,高频电刀刀头各部分热应力并不是随电极厚度和涂层厚度单调递增或递减,从本研究中可以得出电极厚度取1.0 mm、涂层厚度取6  $\mu\text{m}$ 时较为合适。后期将基于本文分析结果,加工制作高频电刀的刀头部分,并开展相关的实验工作,对本文的模拟分析结果进行验证,最终结合理论与实验结果,为高频电刀的结构设计提供指导。

### 参考文献:

- [1] PEREZ JJ, DAVILAA, ARYANA A, *et al.* Electrical and thermal effects of esophageal temperature probes on radio-frequency catheter ablation of atrial fibrillation: Results from a computational modeling study [J]. *Mat Sci Semicon Proc*, 2015, 40(5): 708-712.
- [2] 侍才洪, 张坤亮, 柴虎, 等. 基于医用水刀的肝脏切割及力学性能[J]. *医用生物力学*, 2013, 28(1): 85-90.  
SHI CH, ZHANG KL, CAI H, *et al.* Liver tissue separation by medical water-jet scalpel and its mechanical property study [J]. *J Med Biomech*, 2013, 28(1): 85-90.
- [3] MASSARWEH NN, COSGRIFF N, SLAKEY DP. Electrosurgery: History, principles, and current and future uses [J]. *J Am Coll Surgeons*, 2006, 202(3): 520-530.
- [4] 段亚辉. 智能高频手术刀电刀研制[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.
- [5] BOYD DE, PALMER JHM. Surgical diathermy [J]. *Anaesth Intens Care Med*, 2010, 11(11): 461-463.
- [6] 曹会娜. 微创手术器械高频电刀表面仿生脱附研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [7] 刘霞, 王亚丽, 端木玉明, 等. 介绍一种高频电刀头的改进方法[J]. *中华现代护理杂志*, 2012, 18(35): 4256-4256.

- [ 8 ] HAN Z, FU J, FANG Y, *et al.* Anti-adhesive property of maize leaf surface related with temperature and humidity [J]. *J Bionic Eng*, 2017, 3(14): 540-548.
- [ 9 ] FAHMY M. Shape design sensitivity and optimization of anisotropic functionally graded smart structures using bicubic B-splines DRBEM [J]. *Eng Anal Bound Elem*, 2018, 87: 27-35.
- [10] 陈程, 施晓波. 妇科手术中高频电刀的作用原理及其对外围组织的影响[J]. *生殖医学杂志*, 2015, 24(5): 424-428.
- [11] 刘亚昕, 张幸. 高频电刀对扁桃体组织热损伤的特点分析[J]. *中国社区医师*, 2014, 30(20): 66-67.
- [12] 白涛, 李自慧, 叶甲舟, 等. 大功率高频电刀在肝细胞癌肝切除术中的应用[J]. *中国普通外科杂志*, 2017, 26(1): 31-36.
- [13] 周一平, 陈小可, 刘慧, 等. 高频电刀氩气刀治疗伴呼吸功能不全的大气道肿瘤效果和安全性[J]. *中国医药导报*, 2015, 12(23): 117-120.
- [14] KAWAKAMI T. Clinical application of a high frequency electric knife with coblation technology for temporomandibular joint arthroscopic surgery [J]. *J Oral Maxil Surg*, 2007, 65(9): 1371-1371.
- [15] KRISTIN D, GARY M, JEFFREY R, *et al.* Vessel sealing instrument with electrical cutting mechanism; USA, 8,333,765 B2[P]. 2012-12-18.
- [16] CAMPBELL PA, CRESSWELL AB, SONG C, *et al.* Real-time thermography during energized vessel sealing and dissection [J]. *Surg Endosc*, 2003, 17(10): 1640-1645.
- [17] 黄跃, 黄思源, 瞿杨, 等. 不同槽沟方向舌侧托槽转矩控制性能三维有限元分析[J]. *医用生物力学*, 2017, 32(1): 54-59.
- HUANG Y, HUANG SY, QU Y, *et al.* Three-dimensional finite element analysis on torque performance of lingual brackets with slot in different directions [J]. *J Med Biomech*, 2017, 32(1): 54-59.
- [18] SONG C, TANG B, CAMPBELL PA, *et al.* Thermal spread and heat absorbance differences between open and laparoscopic surgeries during energized dissections by electrosurgical instruments [J]. *Surg Endosc*, 2009, 23(11): 2480-2487.