

文章编号: 0253-2239(2009)11-3173-06

正常和嵌合肿瘤乳腺温度分布特征的有限元分析

杨洪钦¹ 许啊清¹ 王瑜华¹ 谢树森¹ 叶 真² 苏毅明²

(¹ 福建师范大学激光与光电子技术研究所, 福建省光子技术重点实验室, 医学光电科学与技术教育部重点实验室, 福建 福州 350007; ² 福建医科大学附属第一医院, 福建 福州 350005)

摘要 基于乳腺解剖学结构和生理学特征, 建立了适合应用于正常和嵌合肿瘤乳腺三维热传递的分析模型。该模型综合考虑了乳腺代谢产热、血液灌注和动静脉血管与乳腺组织之间的热交换等因素对温度场的影响。数值研究了正常和嵌合肿瘤乳腺的温度分布特征, 着重分析代谢产热、血液灌注率、乳腺肿瘤的大小、位置与数目以及空气对流系数、环境温度等因素对乳腺温度分布的影响。结果表明: 血液灌注率、代谢产热、乳腺肿瘤的大小、位置与数目对乳腺温度分布特征的影响明显; 环境条件对嵌合肿瘤乳腺的体表温度分布影响较大。研究结果将有助于指导乳腺红外热图像的实验并为其定性分析提供重要的参考。

关键词 医用光学; 三维温度分布特征; 有限元法; 乳腺; 肿瘤

中图分类号 TK124; R445.7 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092911.3173

Finite Element Analysis for Temperature Characteristics of Normal and Embedded Tumor Female Breast

Yang Hongqin¹ Xu Aqing¹ Wang Yuhua¹ Xie Shusen¹ Ye Zhen² Su Yiming²

(¹ Key Laboratory of OptoElectronic Science and Technology for Medicine, Ministry of Education, Fujian Provincial Key Laboratory for Photonics Technology, Institute of Laser and Optoelectronics Technology, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China
² Affiliated Hospital of Fujian Medical University, Fuzhou, Fujian 350005, China)

Abstract Based on the breast anatomical structure and physiological characteristics, a three-dimensional thermal model for normal and embedded tumor breast which considered the metabolic heat generation, blood perfusion and heat exchange between vascular and breast was established. Finite element method was used to solve this model for numerically simulating the temperature distribution of breast, and then the effects of various factors, such as blood perfusion, metabolic heat generation, the size, location and numbers of breast tumor, air convection coefficient and environmental temperature on the temperature distribution of breast were discussed. The results show that the temperature profiles of breast could be significantly affected by the metabolic heat generation, blood perfusion, tumor size, tumor position and numbers, while the surface thermal expression of embedded tumor breast could be influenced by the air flow and environmental temperature. This study results may guide the experiment of breast thermograms and provide important reference for its qualitative analysis.

Key words medical optics; three-dimensional temperature characteristics; finite element method; breast; tumor

1 引 言

乳腺癌是危害女性健康的主要疾病之一, 20 世纪后期以来, 乳腺疾病发病率一直呈上升的趋势。研究表明, 早期诊断和早期治疗是降低乳腺癌死亡率的关键^[1~4]。目前, 乳腺疾病常规的检查方法主要有 X 射线、超声、核磁共振成像等影像技术, 但这些技术只

能显示机体组织的形态学结构而无法反映或提示机体组织的功能状态, 只有当肿瘤发展到一定的形态大小才有可能被探测到^[5~8]。红外热成像技术作为一种非侵入的功能影像新技术, 它利用红外探测器记录机体体表的温度分布, 通过机体体表的热分布特征正常与否进而反映机体内在的生理功能信息, 具有非接

收稿日期: 2008-10-12; 收到修改稿日期: 2008-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(60578056)、福建省自然科学基金(2006J0091)、福建省青年科技人才创新基金(2007F3026)和福建师范大学优秀青年骨干教师培养基金(2008100218)资助课题。

作者简介: 杨洪钦(1974—), 男, 副教授, 博士, 主要从事生物医学光学方面研究。E-mail: hqyang@fjnu.edu.cn

触、无辐射、安全实用、操作方便等优点,适合运用于腺体丰富致密的年轻女性乳腺健康状态的指示或疾病的早期发现与诊断^[9]。最近,Ng 概述了红外热成像技术在乳腺肿瘤无损探测的应用及其新进展^[10]。然而至今,在医学临床应用上,红外热图像乳腺疾病诊断仍未有统一的诊断标准,红外热图像的解读带有明显的主观性,使得其诊断结果的假阳性率偏高,一定程度上影响了红外热成像技术在临床中的应用。乳腺的热传递是红外热成像分析的物理基础,通过研究乳腺的三维热传递行为以及乳腺体表温度分布特征及其形成机理能有效地指导其红外热图像的解读。近年来,国内外一些研究人员在乳腺理论模型的构建及其数值模拟方面开展了若干研究,如 Chen 等^[11]研究了从乳腺体表温度提取内部信息的可行性和局限性。Osman 和 Afify 数值分析了乳腺体表的温度分布特征,并初步讨论了乳腺体表的温度分布与其内部的肿瘤相互关系,但尚未能获得确定的结果^[12,13]。Sudharsan,Ng 和 He 等数值模拟了正常和肿瘤情况女性乳腺的二维热分布,但他们彼此间的研究结果差异较大^[14,15],简言之,有关乳腺的多维热传递分析和乳腺的体表温度分布特征及其形成机理的相关研究有待深入。

本文根据乳腺的解剖学结构及其生理学特征,建立了适合用于正常和嵌含单个和多个肿瘤乳腺的三维热传递分析模型。综合分析了乳腺的代谢产热、血液灌注率、乳腺肿瘤以及空气对流系数、环境温度等因素对乳腺温度分布特征的影响。

2 理论模型

根据乳腺的局部解剖学结构及其相应的生理学特征,把乳腺分为四层:肌肉层、腺体层、皮下脂肪层和皮肤层,皮肤层的中间是乳晕层。数值研究时,将乳腺组织近似为半球形,其侧面观的有限元网格划分示意图如图 1。

稳态条件下,乳腺的热传递行为可以用以下方程表示^[13,14]

$$K\nabla^2 T + Q_m + W_b C_b (T_a - T) + U_a A_a (T_a - T) + U_v A_v (T_v - T) = 0, \quad (1)$$

式中 K 为组织热导率, T, T_a, T_v 分别为组织、动脉血液和静脉血液的温度, Q_m 为组织的代谢产热, W_b 和 C_b 分别为组织的血液灌注率和血液比热, U_a 和 U_v 分别为动、静脉血管与组织间的热交换系数, A_a, A_v 分别为单位组织体积内动、静脉血管与组织间的热交换面积,式中最后两项实际上代表动静脉血管

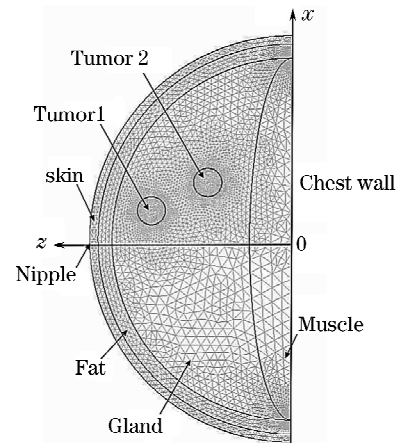


图 1 乳腺剖面的有限元分析网格图

Fig. 1 Longitudinal section view for finite element grids of breast model

和组织间的热交换。

为便于分析,假设 $U_a A_a = U_v A_v = UA$ 。对于浅表组织, UA 的数值约为 $2.6 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,对于深部组织, UA 的数值约为 $7.0 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ^[13]。定义热平衡常数 m ,并令 $m = (T_v - T)/(T_a - T)$,则(1)式简化为:

$$K\nabla^2 T + Q_m + W_b C_b (T_a - T) + UA(1 + m)(T_a - T) = 0 \quad (2)$$

Mitchell 和 Myers^[16]的研究结果表明,浅表组织,热平衡常数 m 约为 0.94;一定深度的组织, m 约为 0.596;深部组织, m 约为 0.697。

假设乳腺的边界条件为^[17]

$$\begin{aligned} K\nabla T &= -h_e(T - T_e) & r = 72\text{mm}; \\ T &= 37^\circ\text{C} & z = 0, 0\text{mm} \leq r \leq 64\text{mm}; \\ K\nabla T &= 0 & z = 0, 64\text{mm} \leq r \leq 72\text{mm}. \end{aligned}$$

式中 h_e 是由于对流、辐射及蒸发等作用引起的乳腺体表与外界环境间的等效热交换系数, T_e 为外界环境的温度。此外,数值研究中,假设在乳腺中层与层之间界面处温度和热流连续,各层组织相关的热物理参数及肿瘤的生长规律参考 He, Chatterjee, Gautherie 等的文献^[15,18~21]。

3 数值计算与讨论

3.1 正常乳腺温度分布的数值模拟

假设动脉血液温度 $T_a = 36.5^\circ\text{C}$,环境温度 $T_e = 28^\circ\text{C}$,乳腺与周围环境间的等效热交换系数 $h_e = 13.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。图 2 显示了正常乳腺 $x-z$ 截面上的温度和乳腺三维温度分布。从图 2 可以看出,正常乳腺的温度分布从底层沿皮肤表皮层,以乳

头为中心呈近似对称性分布。

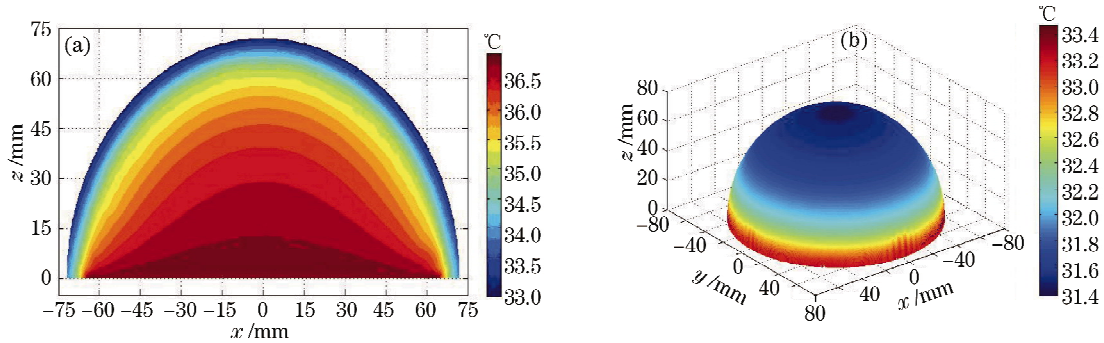


图 2 正常乳腺温度分布。(a) $x-z$ 截面上的温度分布；(b) 三维温度分布

Fig. 2 Temperature distribution of normal breast. (a) Temperature of $x-z$ section; (b) 3-D temperature distribution

图 3 给出了在不同代谢产热和血液灌注的情况下,乳腺体表的温度分布。图中参数 Q_m1, Q_m2 和 Q_m3 分别为乳腺各层代谢产热(皮肤/脂肪层 $Q_m1=400 \text{ W/m}^3, Q_m2=600 \text{ W/m}^3, Q_m3=800 \text{ W/m}^3$;腺体/肌肉层 $Q_m1=700 \text{ W/m}^3, Q_m2=1050 \text{ W/m}^3, Q_m3=1400 \text{ W/m}^3$);参数 C_bW_b1, C_bW_b2 和 C_bW_b3 为乳腺组织各层的血液灌注(皮肤/脂肪层 $C_bW_b1=800 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot \text{C}), C_bW_b2=1200 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot \text{C}), C_bW_b3=1600 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot \text{C})$;腺体/肌肉层 $C_bW_b1=2400 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot \text{C}), C_bW_b2=3600 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot \text{C}), C_bW_b3=4800 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot \text{C})$]。从图中可以明显看出,在不同的代谢产热和血液灌注条件下,乳腺体表的温度分布图是以乳头为对称中心的对称图形,乳头区域温度最低,温度由皮肤层向肌肉层递增,且越靠近肌肉层温度上升得越快。从图 3 还可看出,乳腺体表的温度随着血液灌注或代谢产热的增加而升高,当代谢产热和血液灌注增加相等比例(本图中 $Q_m2/Q_m3=3/4, C_bW_b2/C_bW_b3=3/4$),血液灌注变化对乳腺体表温度的影响相对明显(图中虚线间的变化比实线间的变化大),详细可参阅文献[22]。

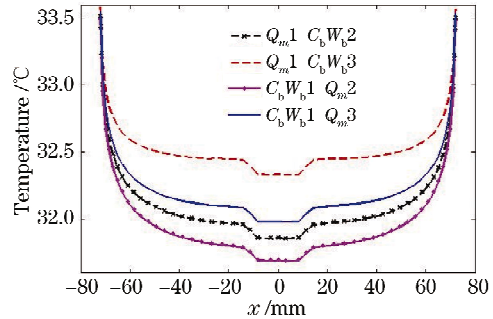


图 3 不同代谢产热、血液灌注对乳腺体表温度的影响

Fig. 3 Surface temperature distribution of breast under different metabolic heat generation and blood perfusion conditions

3.2 嵌合肿瘤乳腺温度分布特征

图 4(a)显示了嵌含一直径为 10 mm 的球形肿瘤乳腺 $x-z$ 截面上的温度分布,肿瘤的中心位于图 1 所示的 z 轴上,位置坐标为(0,0,45 mm),肿瘤生长年龄为 50 天,代谢产热为 $6.54 \times 10^4 \text{ W/m}^3$ 。图 4(b)表示直径为 10 mm 球状肿瘤,中心位于(10 mm,10 mm,46 mm)时,乳腺体表的三维温度分布。

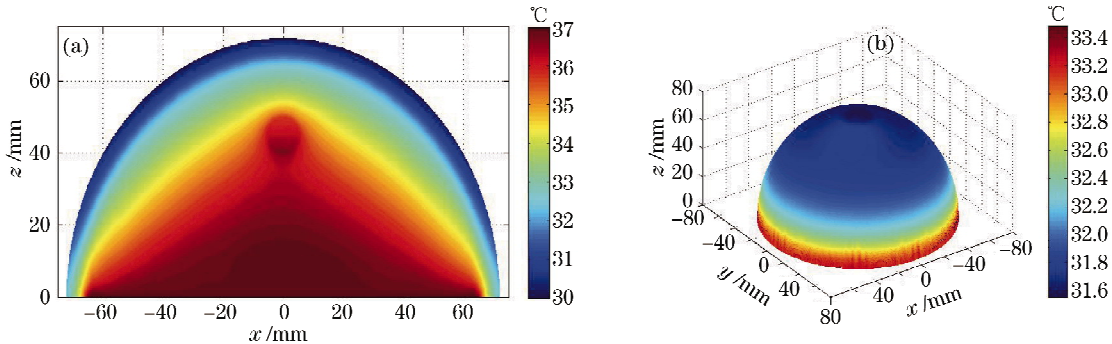


图 4 嵌合肿瘤的乳腺温度分布。(a) $x-z$ 截面的温度分布；(b) 三维温度分布

Fig. 4 Temperature distribution of breast with tumor. (a) Thermal contours of longitudinal section; (b) three-dimensional temperature distribution

3.2.1 肿瘤大小对乳腺体表温度分布的影响

图 5 给出了不同生长阶段的肿瘤,即肿瘤大小对乳腺体表温度分布的影响情况(肿瘤直径分别为 0, 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm, 30 mm)。其中图 5(a)为单肿瘤情况,肿瘤位于(0,0,45 mm);图 5(b)嵌含二个相同大小肿瘤情况,即(0,0,45 mm)和(30 mm,

0,30 mm)处各嵌含有一个直径相同的肿瘤。有关肿瘤大小与生长年龄和代谢产热的关系,参阅文献[20]。从图 5 可以明显看出肿瘤越大,体表的温度也越高,且肿瘤对其正上面区域温度分布的影响最明显。

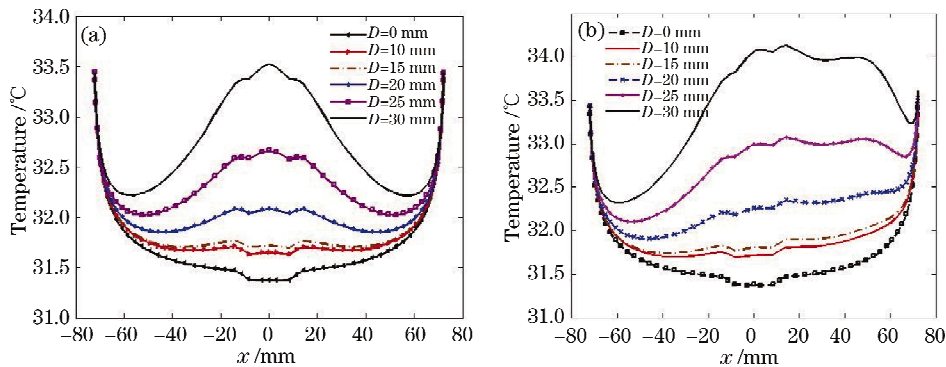


图 5 嵌含不同大小肿瘤乳腺的体表温度分布特征。(a) 单个肿瘤;(b)两个肿瘤

Fig. 5 Temperature distribution characteristics of breast with different tumor sizes. (a) Breast with one tumor; (b) breast with two tumors

3.2.2 肿瘤位置和肿瘤数目对乳腺体表温度分布的影响

图 6(a)~(c)给出了直径为 10 mm 的肿瘤,当其位置发生变化时,乳腺体表部分区域的等温线图(图中只画出温度不大于 32.0 °C 的区域)。肿瘤中心分别位于(0,0,30 mm),(10 mm,10 mm,46 mm)和(14 mm,14 mm,46 mm);图 6(d)为嵌含多肿瘤

时,乳腺体表的温度分布特征,图中也只画出温度不大于 32.0 °C 的区域等温线图,二个肿瘤直径都为 10 mm,分别位于(-10 mm,-10 mm,46 mm),(10 mm,10 mm,46 mm)。

比较图 6(a),(b)和(c)可知,当肿瘤中心位于 z 轴上时,乳腺体表温度呈现同心圆分布,而当肿瘤的位置偏离 z 轴时,乳腺体表等温线不再是同心圆,体

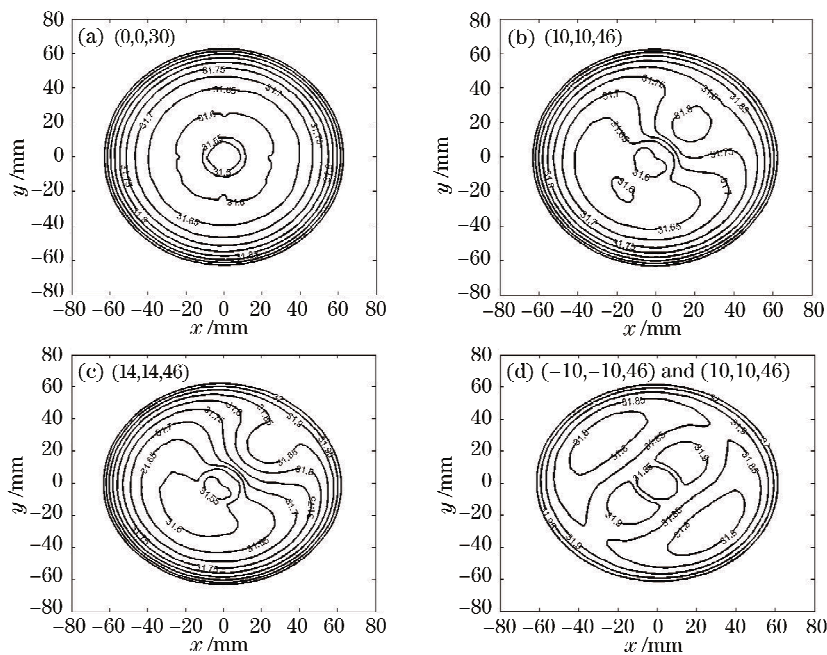


图 6 不同肿瘤位置时,乳腺体表的等温线分布($D=10$ mm)

Fig. 6 Surface thermal contours of breast with tumor under various position conditions ($D=10$ mm)

表温度分布也表现出相应偏离 z 轴。值得注意的是,在肿瘤正上方出现高温热区域的同时,高温热区对角侧出现低温冷区。从图 6(b)和(c)可知,当肿瘤中心离 z 轴较远时,肿瘤所在位置正上面的乳腺体表热区域将变大,即图 6(c)中右上象限温度高于 $31.80\text{ }^\circ\text{C}$ 区域明显比图 6(b)的大;与此同时高温热区对角侧低温冷区域也随之增大,而且随着肿瘤中心离 z 轴越远,乳头区域的温度将越低。从图 6(d)可以看出直径为 10 mm 的两肿瘤分别位于 $(-10\text{ mm}, -10\text{ mm}, 46\text{ mm}), (10\text{ mm}, 10\text{ mm}, 46\text{ mm})$ 时,乳腺体表温度是以乳头为对称中心的对称图形,肿瘤存在区域乳腺体表的温度较高,而乳腺体表温度最低的区域并不是乳头而是出现在正常区域。比较图 6(b)和(d)可知,相同大小的肿瘤,当乳腺内肿瘤个数越多,体表温度越高;肿瘤个数的改变使得乳腺体表温度分布特征明显发生变化。可见肿瘤位置及数目对乳

腺温度分布影响明显。

3.2.3 环境条件对嵌合肿瘤乳腺体表温度分布的影响

为了定量分析周围环境条件,如热交换系数 h_e 和环境温度 T_e 对嵌合肿瘤乳腺体表温度分布的影响,考虑两直径为 10 mm 的球形肿瘤,其中心位置坐标分别为 $(-10\text{ mm}, -10\text{ mm}, 46\text{ mm}), (10\text{ mm}, 10\text{ mm}, 46\text{ mm})$ 。

首先,假设环境温度 T_e 恒定,为 $T_e=28\text{ }^\circ\text{C}$,研究 h_e 对肿瘤体表温度分布的影响,数值模拟结果如图 7 所示(图中只画出部分的等温线)。从图 7 可以看出,在乳腺体表右上象限及左下象限出现了高温热斑,而乳腺体表的最低温出现在正常区域的正上方,乳腺体表的温度随着 h_e 的增大而降低。当 h_e 从 $13.5\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{ }^\circ\text{C})$ 增大到 $19.8\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{ }^\circ\text{C})$,正常区域上方的冷斑相对缩小,而热斑变化得较不显著。

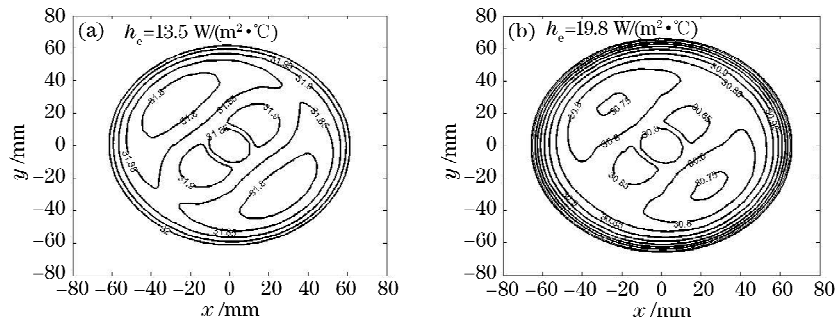


图 7 空气对流系数对嵌合肿瘤乳腺体表温度的影响

Fig. 7 Surface thermal contours of breast with a tumor under various air convective coefficient conditions

其次,研究环境温度的影响。图 8 给出了 h_e 不变条件下,设 $h_e=13.5\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{ }^\circ\text{C})$,周围环境温度对乳腺体表温度分布的影响情况。其中图 8(a)对应 $T_e=22\text{ }^\circ\text{C}$;图 8(b)对应 $T_e=28\text{ }^\circ\text{C}$ 。从图 8 可以看出,随着周围环境温度的上升,乳腺体表温度也将随之升高,但是肿瘤的体表热分布特征各不相同。当周围环境温度较低时,如图 8(a)所示,靠近乳头

区域的等温线图呈现向左倾斜的“8”字型,乳腺体表温度最低的地方出现在乳头区域,正常区域的上方出现低温冷斑,而肿瘤区域上方热斑不明显;而当周围环境温度较高时,如图 8(b)所示,靠近乳头区域的等温线图呈现向右倾斜的“8”字型,乳腺最低温度是在正常区域的上方而不是在乳头区域,而在肿瘤区域的体表出现了明显的热斑,正常区域的体表也

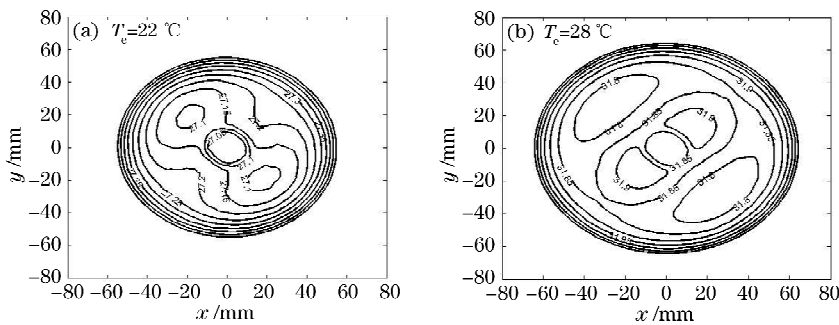


图 8 环境温度对嵌合肿瘤乳腺体表温度的影响

Fig. 8 Surface thermal contours of breast under various environmental temperatures

出现了明显的冷斑。研究结果与文献[23]基本一致,具体的形成原因有待进一步深入研究。

图7和图8分析表明,肿瘤的体表热分布特征表达在很大程度上依赖于乳腺体表与周围环境间的热交换。因此在乳腺热图像的拍摄实验过程中,环境条件的控制很重要。

4 结 论

利用有限元法数值研究了稳态条件下乳腺的三维温度分布,分析了乳腺代谢产热、血液灌注率、乳腺肿瘤情况以及空气对流系数、环境温度等因素对乳腺体表温度分布特征的影响。研究结果表明,随着代谢产热的增加,乳腺体表温度随之升高,但是到一定程度,升高的幅度有所下降;血液灌注率越高,乳腺温度也升高,但深部组织温度较体表组织升高得慢,而当血液灌注率达到一定程度,深部组织温度有所下降,说明血液灌注在防止深部组织温度过高方面起着重要的调节作用;肿瘤越大,对乳腺体表温度分布影响越大,当肿瘤位于 z 轴,乳腺体表等温线呈现同心圆分布,而当肿瘤位置偏离 z 轴时,乳腺体表温度等温线不再是同心圆,相应地偏离 z 轴,且在肿瘤正上方出现高温热区域,高温热区域对角侧出现低温冷区,肿瘤中心离 z 轴远,高温热区域扩大,冷区域也随之扩大且乳头区域的温度也将降低;且肿瘤个数的增加明显改变了乳腺体表的温度分布特征。嵌含肿瘤乳腺的体表温度分布在对侧角伴随有冷区的现象与我们前期的实验研究结果基本一致,有可能是乳腺肿瘤的一种外在表征,而且这种表征受空气对流等环境因素的影响。此外,研究还发现,乳腺体表的温度随着 h 的增大而逐渐降低,肿瘤体表温度分布特征随着周围环境温度的升高而增强。因此,乳腺红外热图像实验时环境条件的精确控制十分重要。

参 考 文 献

- 1 E. Y. K. Ng, N. M. Sudharsan. Effect of blood flow, tumor and cold stress in a female breast; a novel time-accurate computer simulation [J]. *J. Eng. Medic.*, 2001, **215**(4): 393~404
- 2 E. Y. K. Ng, N. M. Sudharsan. An improved three-dimensional direct numerical modeling and thermal analysis of a female breast [J]. *J. Eng. Medic.*, 2001, **215**(1): 25~37
- 3 T. Z. Tan, C. Quek, G. S. Ng *et al.*. A novel cognitive interpretation of breast cancer thermography with complementary learning fuzzy neural memory structure [J]. *Exp. Syst. Appl.*, 2007, **33**(3): 652~666
- 4 L. Hu, A. Gupta, J. P. Gore *et al.*. Effect of forced convection on the skin thermal expression of breast cancer [J]. *J. Biom. Eng.*, 2004, **126**(2): 204~211
- 5 Sun Xiaolan, Han Benyi, Cao Wei *et al.*. Comparison of the diagnostic value of high resolution ultrasonography VS mammography and their combination for early breast cancer [J]. *J. Chinese Modern Imaging*, 2006, **3**(3): 207~209
- 6 孙晓岚, 韩本宜, 曹伟等. 高频超声、钼靶X线及二者联合诊断早期乳腺癌的价值比较 [J]. *中华现代影像学杂志*, 2006, **3**(3): 207~209
- 7 Tian Jiawei, Chen Yu, Liu Yujie. Diagnostic value of high frequency ultrasound combined with mammography for early breast cancer [J]. *Chinese J. Medical Imaging Technol.*, 2006, **22**(4): 557~559
- 8 田家玮, 陈宇, 刘宇杰. 高频超声与X线钼靶联合应用对早期乳腺癌的诊断价值 [J]. *中国医学影像技术*, 2006, **22**(4): 557~559
- 9 Ling Hong, Gu Yajia, Wang Xiaohong *et al.*. Value of magnetic resonance imaging in diagnosing breast lesions which need biopsy [J]. *Chinese J. Surgery*, 2006, **44**(15): 1036~1039
- 10 凌泓, 顾雅佳, 汪晓红等. 核磁共振在需要活检的乳腺病灶诊断中的应用价值 [J]. *中华外科杂志*, 2006, **44**(15): 1036~1039
- 11 Z. Q. Liu, C. Wang. Method and apparatus for thermal radiation imaging [P]. United States Patent, No. 6023637, 2000
- 12 J. R. Keyserkingj, P. D. Ahlgren, E. Yu *et al.*. Infrared imaging of breast; initial reappraisal using high resolution digital technology in 100 successive cases of stage I and stage II breast cancer [J]. *The Breast Journal*, 1998, **4**(4): 241~251
- 13 E. Y. K. Ng. A review of thermography as promising non-invasive detection modality for breast tumor [J]. *International J. Thermal Sciences*, 2009, **48**(5): 849~859
- 14 M. M. Chen, C. O. Pederson, J. C. Chato. On the feasibility of obtaining three dimensional information from thermographic measurements [J]. *J. Biomech. Engng*, 1977, **99**(2): 58~64
- 15 M. M. Osman, E. M. Afify. Thermal modelling of the normal woman's breast [J]. *J. Biomech. Engng*, 1984, **106**(2): 123~130
- 16 M. M. Osman, E. M. Afify. Thermal modelling of the malignant woman's breast [J]. *J. Biomech. Engng*, 1988, **110**(4): 269~276
- 17 N. M. Sudharsan, E. Y. K. Ng, S. L. Teh. Surface temperature distribution of a breast with and without tumor [J]. *Int Comput Meth Biomed Engin.*, 1999, **2**(1): 187~199
- 18 Y. He, M. Shirazaki, H. Liu *et al.*. A numerical coupling model to analyze the blood flow, temperature, and oxygen transport in human breast tumor under laser irradiation [J]. *Computers in Biology and Medicine*, 2006, **36**(12): 1336~1350
- 19 J. W. Mitchell, E. Myers. An analytical model of the countercurrent heat exchange phenomena [J]. *Biophysics Journal*, 1968, **8**(8): 897~911
- 20 Lin Qingyuan, Yang Hongqin, Ye Zhen *et al.*. Numerical study on temperature distribution of breast [J]. *J. Fujian Normal University* (Natural Science Edition), 2008, **24**(3): 50~53
- 21 林清源, 杨洪钦, 叶真等. 乳腺组织温度分布的数值模拟研究 [J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2008, **24**(3): 50~53
- 22 I. Chatterjee, R. E. Adams. Finite element thermal modeling of the human body under hyperthermia treatment for cancer [J]. *Internal J. Computer Appl. Technol.*, 1994, **17**(3-6): 151~159
- 23 M. Gautherie. Thermopathology of breast cancer; measurement and analysis of in vivo temperature and blood flow [J]. *Ann. New York Acad. Sci.*, 1980, **335**: 383~415
- 24 M. Gautherie, Y. Quenneville, C. Gros. Metabolic heat production, growth rate and prognosis of early breast carcinomas [J]. *Biomedicine*, 1975, **22**: 328~336
- 25 L. Priebe. Heat transport and specific blood flow in homogeneously and isotropically perfused tissue [J]. *In Physiological and Behavioural Temperature Regulation*, 1970: 272~280
- 26 Yang Hongqin, Lin Qingyuan, Ye Zhen *et al.*. Finite element analysis for temperature distribution of normal breast [J]. *Acta Laser Biology Singica*, 2007, **16**(4): 424~427
- 27 杨洪钦, 林清源, 叶真等. 正常乳腺温度分布的有限元分析 [J]. *激光生物学报*, 2007, **16**(4): 424~427
- 28 Yang Hongqin, Lin Qingyuan, Ye Zhen *et al.*. Finite element thermal analysis of breast with tumor and its comparison with thermography [C]. *SPIE*, 2007, **6826**: 68260T-1