

基础医学

## 红外热图监测微波辐照式全身热疗中体表温度的变化\*☆

吕永钢, 刘静, 闫井夫

### Human skin temperature monitored with infrared thermal image during microwave radiation induced whole body hyperthermia

#### Abstract

**AIM:** To investigate the feasibility of monitoring human skin temperature with infrared thermal imager.

**METHODS:** Three patients including 2 females (43 and 60 years old with lung cancer metastasis) and 1 male (67 years old with lung cancer), who participated in whole body thermotherapy in Tumor Center of First Hospital Peking University, were selected from April to May 2004. The experiment was permitted by the Hospital Ethics Committee, and agreed by the patients. The body surface temperature of 3 patients underwent whole body hyperthermia was measured and analyzed by the infrared thermal imaging method, in particular the temperature changes in face, breast, neck, hands, legs and foot which were easy for heat aggregation caused by poor blood circulation. Meanwhile, the rectal temperature was monitored during treatment.

**RESULTS:** The thermal state for each part of the patient skin surface was easily displayed on the screen, which was very beneficial for the administration and evaluation of the whole treatment procedure. Slightly increasing temperature was found in only one of the three patients. But no skin burn was observed.

**CONCLUSION:** Infrared thermal imaging is significant to monitor human skin temperature during whole body hyperthermia, especially the limbs with poor local blood circulation. It could effectively prevent skin from burning injury.

Lü YG, Liu J, Yan JF. Human skin temperature monitored with infrared thermal image during microwave radiation induced whole body hyperthermia. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu yu Linchuang Kangfu 2007;11(35):7019-7023(China)  
[www.zgckf.com/zgckf/ejournal/upfiles/07-35/35k-7019(ps).pdf]

#### 摘要

**目的:**探讨利用红外热像仪监测微波辐照式全身热疗中体表温度的可行性。

**方法:**于2004-04/05选择在北京大学第一医院肿瘤中心参加全身热疗治疗的患者3例,女2例(分别为43岁和60岁,患有肺癌并已发生转移),男1例(67岁,肺癌)。实验经医院伦理委员会批准,3例患者均知情同意。采用红外热像仪对3例全身热疗患者的体表温度进行定量测定和分析,重点考察局部血液循环相对较差容易造成热聚集的脸部、胸部、颈部、手部、小腿、脚部的温度变化。治疗过程中同时对患者直肠温度实时监测。

**结果:**患者热疗前后全身各部位体表的热状态易于显示在监视器上,有助于整个治疗过程的进程控制及评价。3例患者中只有1例的脚背温度稍有升高,但未出现皮肤烫伤。

**结论:**使用红外热像仪监测全身热疗中人体表面温度特别是局部血液循环较差的四肢具有重要的参考价值,可有效防止皮肤烫伤。

**关键词:**全身热疗;实时测温;红外热像仪;生物传热

吕永钢,刘静,闫井夫.红外热图监测微波辐照式全身热疗中体表温度的变化[J].中国组织工程研究与临床康复,2007,11(35):7019-7023  
[www.zgckf.com/zgckf/ejournal/upfiles/07-35/35k-7019(ps).pdf]

## 0 引言

全身热疗是通过人为提高体温,运用热作用及继发效应来治疗肿瘤的方法<sup>[1,2]</sup>。此方面的加温措施较多<sup>[3,4]</sup>,如浸浴法(热空气、温水、石蜡溶液、热蒸汽等)、体表加热法(电热毯、热水毯、红外辐射等)和热麻醉气体吸入,以及体外血液循环加热法等,纳米材料也被逐渐应用于增强热疗效果<sup>[5,6]</sup>。现有的热疗设备有微波治疗机、射频治疗机、高强聚焦超声、热空气舱全身热疗、辐射热诱导舱全身热疗和体外循环式全身热疗机等。

然而,由于生物体是一个极其复杂的系统,各组织器官的形态结构、热性能和血液

流量均不规则,难以实施有效的实时测温。另一方面,加热时由于血液会带走热量,而这些热量会在血流相对较小的地方聚集使非目标区正常组织受到损伤,因此热疗中对组织的准确测温对于控制、评价热疗效果有重要意义<sup>[7]</sup>。

迄今,大多数有损(侵入式)测温多采用热电偶、热敏电阻或光纤类测温计,但有损测温系统不仅会给患者带来痛苦,而且还易于引起体内癌细胞转移的危险<sup>[8]</sup>。对于无损测温提出的方法也有不少,如微波辐射、CT、超声和核磁共振测温等,但这些方法基本都处于实验阶段,与临床应用有一定距离。一般来说超声波或电磁波与测温探头的相干作用结果会产生如下效应:使探头自身和探头附近局部过

Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

Li Yong-gang ☆, Doctor, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China  
ygv2001@yahoo.com.cn

Correspondence to: Liu Jing, Professor, Tutor of doctor, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China  
jliu@cl.cry.ac.cn

Supported by: the National Natural Science Foundation of China, No. 50436030\*

Received: 2007-05-08  
Accepted: 2007-06-26

中国科学院理化技术研究所,北京市100080

吕永钢☆,男,1977年生,湖北省黄梅县人,汉族,2005年中国科学院理化技术研究所毕业,博士,主要从事生物传热传质和肿瘤转移方面的研究。  
ygv2001@yahoo.com.cn

通讯作者:刘静,教授,博士生导师,中国科学院理化技术研究所,北京市100080  
jliu@cl.cry.ac.cn

国家自然科学基金资助(50436030)\*

中图分类号:R318  
文献标识码:B  
文章编号:1673-8225(2007)35-07019-05

收稿日期:2007-05-08  
修回日期:2007-06-26  
(07-50-5-2663/Y-A)

**课题背景:** 全身热疗正逐渐被国内生物医学工程界对恶性肿瘤实施有效治疗的一种可行途径。然而,由于生物体是一个极其复杂的系统,各器官、组织、性能、流量均不规律,在治疗过程中,某些局部皮肤或血液循环不良,容易出现皮肤烫伤的现象。为此,实验引入红外测温系统,在无任何损伤的前提下,对局部血液循环相对较差的患者进行检测和评估。

热;改变加热场的形态;产生仪器串入噪声干扰<sup>[1]</sup>。可靠和安全的全身热疗应该实现治疗过程中测量包括体表皮肤、人体主要器官及大脑等部位的温度,以保证加热过程的安全和升温的均匀<sup>[9]</sup>。

目前临床上既有以食道温度作为身体核心温度控制参照的全身热疗方案,也有以直肠或膀胱温度作为体温控制参照的方案,同时大脑组织采用鼓膜温度作为参考温度。但其作为全身温度的指标显然远远不够。

全身热疗中部分患者皮肤各处可有不同程度的烫伤,特别是经体表加热,局部皮肤血液循环不良或散热不佳,可引起局部皮肤烫伤。有报道表明使用某类国产全身热疗仪器出现Ⅱ度烫伤的发生率可达10.6%<sup>[9,10]</sup>,因此体表温度监测至关重要。然而,体表温度测量虽无创,但若测点过多会使实际操作比较困难。本文配合临床实际案例,采用红外热像仪对全身热疗患者的体表温度进行了定量测定和分析,重点考察了局部血液循环相对较差容易造成热聚集的手部、足背、腕部等,并进而探讨该措施在全身热疗患者温度监测和人体组织系统温度重构中的应用价值。

## 1 对象和方法

**设计:** 重复测量设计。

**单位:** 中国科学院理化技术研究所。

**对象:** 于2004-04/05选择在北京大学第一医院肿瘤中心参加全身热疗治疗的患者3例,女2例(分别为43岁和60岁,患有肺癌并已发生转移),男1例(67岁,肺癌)。2例女性患者接受的是1个疗程中的第2次全身热疗,男性患者则为第1次进行全身热疗。实验经医院伦理委员会批准,3例患者均知情同意。测试条件:室温20℃,大气压为标准大气压。测试仪器:HR-2医用红外热像仪(华北光电技术研究所,空间分辨率在距摄像头中心1m处,水平与垂直图像分辨率不大于3mm,温度分辨率≤0.05℃,空间分辨率2毫弧度,视场不小于12°)监测体表温度;治疗过程中同时对患者直肠温度实时监测;北京大学第一医院肿瘤中心所购置的UHR-2000微波热疗机(图1,中国华源医疗设备有限公司,采用顶置微波聚束深部全身热疗技术,可由局部治疗转为全身治疗)。



图1 UHR-2000微波热疗机

**设计、实施、评估者:** 设计为第一作者,实施为全部作者,评估为全部作者,评估者经过红外测温正规培训。

**技术路线:** 红外测温过程配合手术进行,不对原治疗程序造成任何干扰。患者住院后完成有关检查:头颅CT、心电图、心脏彩超、腹部超声、肺功能等,以及血气分析、肝肾功能、电解质、血液生化、血型、血常规、血小板计数、凝血酶时间等检查。

术前20min口服常规安眠药后进入手术室,平躺静息5min后开始利用红外热像仪测量各部位皮肤温度。

放置好用于测量直肠温度的传感器,使用冰袋保护脑组织。

开启UHR-2000微波热疗机,采用915MHz微波频率,球面微波原理发射大剂量微波,再经聚束装置,形成微波束,使透热有效深度达10cm。在电子监控系统调控下,以9mm/s的速度移动照射人体胸腹部长32.84cm,宽17.45cm的区域,使微波透入组织内产生的能量,随血液循环传输,到达肿瘤组织及全身,恒定一定时间。热疗时间持续150min。

全身热疗过程中静脉注射咪唑安定、芬太尼和氟哌利多等药物使患者深度镇静,完成治疗。同时对患者直肠温度、呼吸、血压和心率进行实时监测。

全身热疗结束后立即利用红外热像仪测量各部位皮肤温度。

本实验系协商情况下配合开展的测试,具体治疗由临床医师操作,红外成像是无损的远距离测温,对患者及手术过程均不产生干预,仅在需要时短时扫描体温即可。

**主要观察指标:** 全身热疗前后患者的直肠、脸部、胸部、颈部、手部、小腿、脚部的温度变化。

## 2 结果

2.1 全身热疗过程中3例患者的直肠温度见图2,第1例患者直肠温度上升较快,15 min即可达到39.8℃,105 min则上升至41℃,直肠温度在41.2℃上维持30 min左右,且基本稳定在41.4℃。第2例患者直肠温度上升到41.6℃后即很稳定,停止微波辐照后,直肠温度仍可稳定35 min。第3例患者微波辐照功率偏小,直肠温度上升较缓慢,直肠温度在40.4℃维持了50 min。

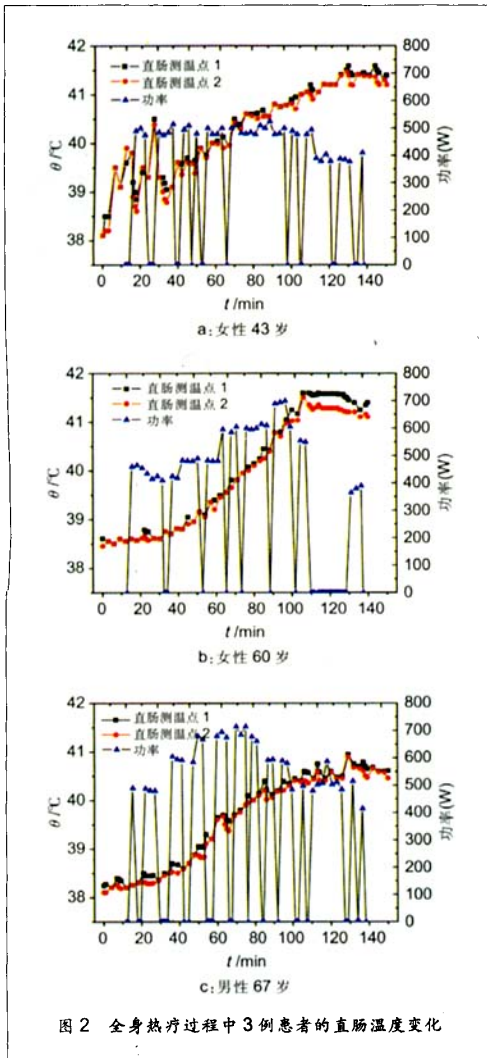


图2 全身热疗过程中3例患者的直肠温度变化

2.2 全身热疗前后脸部温度分布 见图3。以男性患者全身热疗前后体表温度为例,分析通过局部加热达到全身热疗过程中皮肤表面温

度的变化。全身热疗前面部温度比较均匀,鼻腔和口腔附近的温度最高,均在33.2℃左右,脸颊处温度偏低,为29.7℃。全身热疗过程中,头部以冰袋和湿毛巾冷却,以降低脑部温度。全身热疗后,鼻腔附近的温度降为30.3℃,脸颊温度基本保持不变(29.1℃)。由于患者进入休眠状态,口腔附近的温度下降较大,与脸颊温度相近。

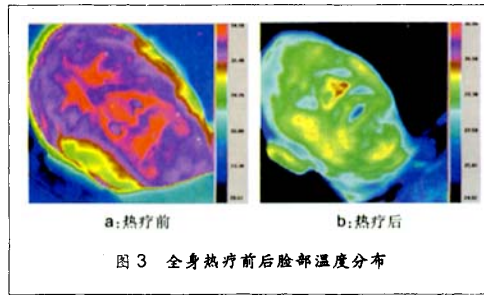


图3 全身热疗前后脸部温度分布

2.3 全身热疗前后胸部、颈部温度分布 患者在热疗前穿有无袖背心,胸部温度在29.3~30.7℃,明显低于手臂温度(32.1℃),全身热疗后患者皮肤表面大量出汗,胸部温度降低为26.3~28.5℃(图4),颈部的温度也在31.4~32.0℃(图5)。在治疗过程中微波主要辐照胸腹部,从上述测量结果看胸腹部皮肤表面温度处于正常状态,无皮肤烫伤问题。

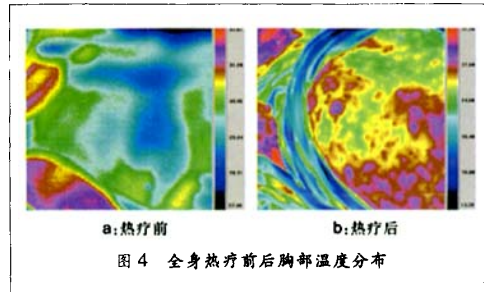


图4 全身热疗前后胸部温度分布

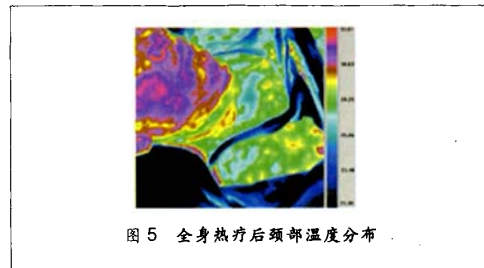


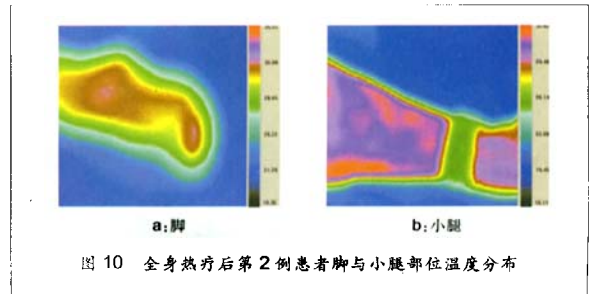
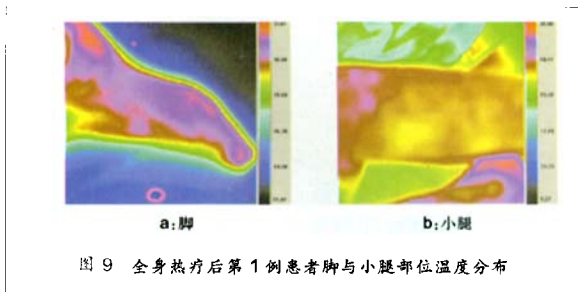
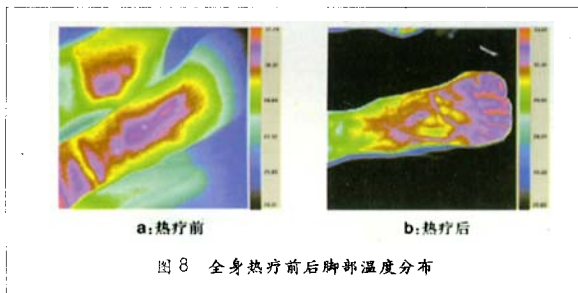
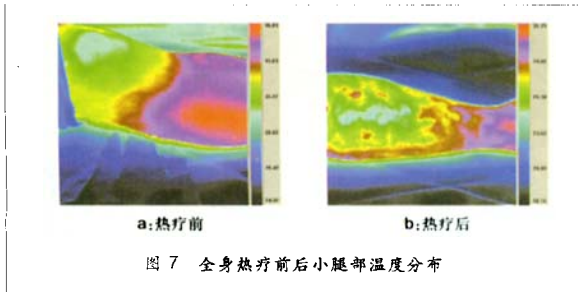
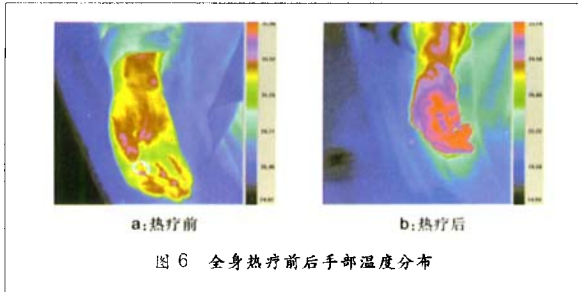
图5 全身热疗后颈部温度分布

2.4 全身热疗前后手部、小腿部、后脚的温度分布 为进一步考察全身热疗对局部皮肤的烫伤可能性,还测量了局部皮肤血液循环不良和散热不佳的易烫伤部位—手和脚。全身热疗

应用要点:①红外成像因其无损远距离测温特点,对患者及手术过程均不产生干预,体温扫描迅速,可在获取人体全身热状态的同时确保既定全身热疗程序一切如常。②考察全身热疗过程中局部血液循环相对较差容易造成热聚集的手部、足背、腕部等处温度变化,防止患者体表发生不同程度的损伤。③深入探索红外测温措施在全身热疗患者温度监测和人体组织系统温度重构中的应用价值。

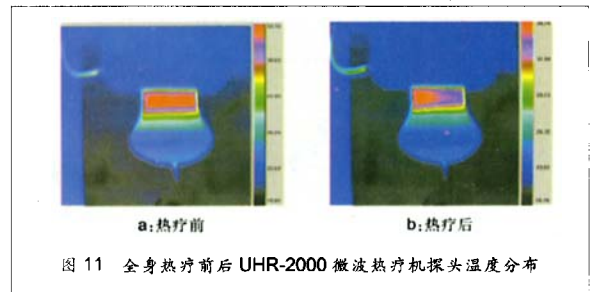
相关链接:全身热疗是通过人为提高体温,运用热作用及继发效应来治疗肿瘤的方法。由于生物体是一个极其复杂的系统,各组织器官的形态结构、热性能和血液流量均不规则,难以实施有效的实时测温。另外加热时由于血液会带走热量,而这些热量会在血流相对较小的地方聚集使非目标区正常组织受到损伤,因此热疗中对组织的准确测温对于控制、评价热疗效果有重要意义。迄今,大多数有损(侵入式)测温多采用热电偶、热敏电阻或光纤类测温计,但有损测温系统不仅会给患者带来痛苦,而且还易于引起体内癌细胞转移的危险。对于无损测温提出的方法也有不少,如微波辐射、CT、超声和核磁共振测温等,但这些方法基本都处于实验阶段,与临床应用有一定距离。

前后手部的温度分布见图 6,正常情况下手部最高温度为 33.1℃,热疗结束后手部最高温度下降至 31.8℃。全身热疗前小腿部和后脚的温度分布分别见图 7,8。小腿部位的温度变化较小,而患者脚背部位的微循环特别差,脚部最高温度从 31.0℃升高到 31.8℃。由于第 3 例男性患者系第 1 次接受全身热疗,施加的热剂量比其他两例患者稍低一些。进一步的研究表明,即使加热剂量偏高一点,也不会造成患者皮肤表面的烫伤。第 1 例患者的脚部最高温度也仅有 31.2℃,小腿部位体表温度非常均匀为 28.8℃(图 9)。第 2 例患者脚和小腿部位的温度比第 1 例患者还要稍低一些(图 10)。



### 3 讨论

与传统的全身热疗设备相比,UHR-2000 高功率聚束微波肿瘤热疗机可以在显著减少对体表热损伤的情况下,提高穿透深度和疗效。常用的医用微波热疗频率有 2 450,915,433 MHz,微波电磁波振幅随传播深度增加而衰减,大部分能量消耗在体表附近<sup>[11]</sup>;但这种衰减在脂肪层并不明显,而是进入肌肉组织后急剧衰减,因此普通微波难以实施深部加温。本实验所使用的设备为 UHR-2000 高功率聚束微波肿瘤热疗机,其电磁波频率为 915 MHz,它无射频加温时出现的脂肪过热现象,亦不同于超声波加温,加温区域因组织密度不同而受影响。UHR-2000 高功率聚束微波肿瘤热疗机设计时使用了高功率微波透镜,通过透镜天线的作用,能将初级辐射源的弱方向性电磁波聚集为锐方向性电磁波束,使入射的微波功率密度增加<sup>[12,13]</sup>。当微波穿透到 3 cm 后能量虽然降至,但仍有对深部组织进行加温的能力,从而解决深部组织的加温问题。此外,由于治疗头与皮肤间需要保持 30 cm 左右的距离以保证波束聚集空间,结果由于空气的热平衡作用而使表皮高温得到缓解。图 11 为全身热疗前后 UHR-2000 微波热疗机探头温度分布,从中可以看出整个设备中发射器部位的温度最高,同轴电缆也产生一定的热量,其余部位产生的热量则非常小。当输入功率为 600 W 时,UHR-2000 微波热疗机发射器的温度从 32.8℃升高到 34.3℃,聚束装置、标尺和数据传输线的温度也都有 2℃的升高,但温度均处于比较低的水平。



大量动物和临床实践表明,机体可以较长时间耐

受 41.8 °C 的全身热疗治疗,而无明显的毒性反应,自身温度调节能力受心脏输出量的限制<sup>[14]</sup>。有学者观察到,对于全身热疗来说,进一步提升治疗温度(至 42.5~43 °C)并不明显增强对肿瘤的杀伤效应<sup>[15]</sup>;加之全身热疗治疗肿瘤不仅包括热作用对癌细胞的直接损伤,也涉及到热作用的继发效应所致。所以 41.8 °C (或 42.0 °C) 是目前被广泛接受为全身热疗的治疗温度,恒温时间一般选择 60~90 min<sup>[16-19]</sup>。从这一结果来说,上述第 3 例男性患者治疗温度偏低,可能难以确保疗效,在后续治疗中需适当提高加热功率以提高直肠温度,且需延长热疗时间。

热疗时组织的准确测温对于控制、评价热疗效果有重要意义。为避免局部皮肤烫伤,皮肤表面温度的监测同样显得尤为重要。人体的体表温度在一定环境条件下,主要取决于局部血流量、组织产热和热传导等因素。在手背和足背部位,皮下组织很少,组织的产热和热传导对体表温度的影响约在 1 °C 范围,局部血流量成为重要的影响因素<sup>[20]</sup>。微波辐照人体局部,通过血液循环传输,提高人体全身温度。最近文献<sup>[10]</sup>报道了 1 例利用 1-ET-SPACE 热疗系统引起的表皮热损伤,本文 3 例利用 UHR-2000 进行全身热疗的患者都没有发生皮肤烫伤,只有 1 例患者脚背部温度稍有升高,但这些都揭示对局部血液循环相对较差的患者肢体末端进行温度监测的重要性。初步研究表明,红外热图有助于监测皮肤表面温度,特别是局部血液循环较差的四肢,避免局部组织烫伤。更进一步,若能发展出只需要利用人体表面温度变化情况(这部分温度可用红外热像仪遥测得到)就能推算出人体内部组织温度,则无论从理论还是从工程角度看都具有重要的意义,可促成生物系统热响应研究的一个飞跃。综合测量的体表温度和数字模拟方法重建组织系统的温度分布,可以研究血流分布、肿瘤形状和微波辐照能量等变量对重建的组织温度的影响。

综上所述,本文结合实际的临床全身肿瘤热疗监测,配合临床医师的治疗,采用红外热像仪对人体全身及局部的热响应问题进行了测定和剖析。结果表明利用 UHR-2000 微波热疗机进行全身热疗时,人体组织大量出汗,体表温度均有所下降,不会造成局部皮肤表面烫伤,将红外热像仪作为全身热疗辅助测温工具以

防止皮肤烫伤是可行有效的。本文对临床全身热疗监测人体表面温度特别是局部血液循环较差的四肢具有重要的参考价值,有助于医师及时调整热剂量,对于重构人体组织系统的温度分布也有一定的指导意义。

致谢:感谢北京大学第一医院肿瘤中心方红主治医师及其助手对本实验测试工作给予的支持和帮助。

#### 4 参考文献

- 1 Ismail-Zade RS, Zhavrid EA, Potapnev MP. Whole body hyperthermia in adjuvant therapy of children with renal cell carcinoma. *Pediatr Blood Cancer* 2005;44(7):679-681
- 2 Hildebrandt B, Hegewisch-Becker S, Kerner T, et al. Current status of radiant whole-body hyperthermia at temperatures >41.5 degrees C and practical guidelines for the treatment of adults. The German 'Interdisciplinary Working Group on Hyperthermia. *Int J Hyperthermia* 2005;21(2):169-183
- 3 Falk MH, Issels RD. Hyperthermia in oncology. *Int J Hyperthermia* 2001; 17(1):1-18
- 4 Oglesbee MJ, Diehl K, Crawford E, et al. Whole body hyperthermia: effects upon canine immune and hemostatic functions. *Vet Immunol Immunopathol* 1999;69(2-4):185-199
- 5 Lv YG, Deng ZS, Liu J. 3-D numerical study on the induced heating effects of embedded micro/nanoparticles on human body subject to external medical electromagnetic field. *IEEE Trans Nanobioscience* 2005; 4(4):284-294
- 6 Wust P, Gneveckow U, Johannsen M, et al. Magnetic nanoparticles for interstitial radiotherapy—feasibility, tolerance and achieved temperatures. *Int J Hyperthermia* 2006;22(8):673-685
- 7 李丰彤,谭维溢.肿瘤热疗中测控温的研究现状[J].国外医学:物理医学与康复学分册,2004,24(1):28-31
- 8 Fu BM, Lv YG, Zeng M, et al. Adhesion of wild type and integrin signaling defective mammary tumor cells to microvascular endothelium in vivo. *FASEB J* 2007;21: 589
- 9 王洪武.现代肿瘤靶向治疗技术[M].北京:中国医药科技出版社,2004:1-545
- 10 Chen XL, Wang F, Bao YQ. An accidental burn resulted from whole body hyperthermia therapy. *Burns* 2007;33(2):252-254
- 11 李鼎九,胡自省.肿瘤热疗学[M].郑州:河南医科大学出版社,1995:1-424
- 12 谢卓.雷达手册[M].北京:国防工业出版社,1978:1-20
- 13 刘珈,曾文海,张百帆,等.高功率微波深部加热治疗的原理及安全性研究[J].中华放射肿瘤学杂志,2004,13(1):34-38
- 14 Wust P, Nadobny J, Szimtenings M, et al. Implications of clinical RF hyperthermia on protection limits in the RF range. *Health Phys* 2007;92 (6):565-573
- 15 Eisler K, Hipp R, Gogler S, et al. New clinical aspects of whole body hyperthermia. *Adv Exp Med Biol* 1990;267:393-398
- 16 Westermann AM, Grosen EA, Katschinski DM, et al. A pilot study of whole body hyperthermia and carboplatin in platinum-resistant ovarian cancer. *Eur J Cancer* 2001;37(9):1111-1117
- 17 Wiedemann GJ, Robins HI, Gutsche S, et al. Ifosfamide, carboplatin and etoposide (ICE) combined with 41.8 degrees C whole body hyperthermia in patients with refractory sarcoma. *Eur J Cancer* 1996;32A(5):888-892
- 18 Wiedemann GJ, d'Oleire F, Knop E, et al. Ifosfamide and carboplatin combined with 41.8 degrees C whole-body hyperthermia in patients with refractory sarcoma and malignant teratoma. *Cancer Res* 1994;54 (20): 5346-5350
- 19 魏红梅,郭坤元,尚振川,等.全身热疗系统治疗恶性血液病 15 例:加热、测温 and 控温技术的安全、顺应及有效性观察[J].中国临床康复,2006,10(8):38-40
- 20 闻智鸣.医用红外热像仪用于早期诊断糖尿病性微、小血管、神经末梢合并症的探讨[J].医师进修杂志,2002,25(4):21-23