

# 高强度微波照射时男性生殖器的受热分布研究

江汉保

C.K. CHOU (四川大学无线电系)

周重光 A. W. Guy 陆孝先

(美国华盛顿大学生物电磁学实验室)

应用模型实验方法和数字化红外热象技术定量地测定了实际尺寸的人体睾丸和阴茎模型在2450MHz电磁场作用下的受热分布(SAR分布)。

实验表明，在2450MHz电磁场作用下，睾丸内部受热是不均匀的，最大比吸收率SAR为 $1.9\text{W/kg}$  ( $1\text{mW/cm}^2$ ) 和 $8.0\text{W/kg}$  (临床条件)。阴茎对电磁波的吸收呈现极化效应。当电磁波的电场平行于阴茎时，吸收最强，最大受热出现在阴茎基部，最大SAR为 $8.0\text{W/kg}$  ( $1\text{mW/cm}^2$ )。

近年来，关于利用微波加热睾丸以抑制精子发生的研究，在国内外均有很多报道，国内在动物实验、临床试用和安全性方面作了不少工作<sup>[1,2]</sup>。目前，定量地了解男性生殖器官在微波照射下的受热分布，是进一步进行临床研究前必须搞清楚的问题，但尚未见这方面的报道。本文的目的是利用模型实验方法，应用红外热象记录仪定量地显示男性生殖器官在微波场(2450MHz)作用下的能量吸收特性分布(SAR分布)，为临床工作和安全防护提供必要的数据。

## 材料和方法

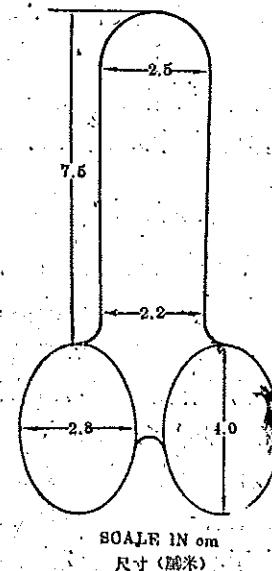
### 一、人体模型和模拟组织

制作了二个实际尺寸的人体模型。模型的外壳是用环氧树脂将玻璃纤维布粘贴在石膏人模型上，凉干后从石膏模型上剪下，修补完整。睾丸和阴茎的制作方法也与人体模型一样，先用橡皮泥制作成合尺寸的睾丸和阴茎模型，用玻璃纤维布做成外壳后再粘贴到人体模型上。

在二个实际尺寸模型中，一个模型通过一侧睾丸中心及腹腔切开为二半。在每半的切口上蒙上一层聚脂纤维布或丝绸，然后向两半模

型内灌注人工模拟组织，使模型受微波照射后可迅速打开，用热象记录仪拍摄睾丸内部的受热情况，见图1(图版四)。另一模型通过两侧睾丸及阴茎切开，以便观察两侧睾丸及阴茎的受热情况。睾丸及阴茎的尺寸见图2。

按照Chou氏配方<sup>[3]</sup>，在模型外壳内灌注



【图2】睾丸和阴茎模型尺寸及其相互位置  
Fig. 2 Size and shape of the testes and penis.

人工模拟肌肉组织，在300~2450MHz波段内，模拟肌肉的成份和比例是：水75.48%，盐1.05%，聚乙烯粉15.01%和粘合剂(TX-150)8.46%。

## 二、照射条件和测量方法

人体模型置于微波吸收室内进行照射。第一种照射是使用一个 $23 \times 17\text{cm}^2$ 的矩形口径喇叭作为辐射器，工作频率为2450MHz。模型距喇叭1.1M，以满足远区条件。为了使模型快速升温，投射到模型表面处的辐射功率密度为 $1\text{W/cm}^2$ ，照射时间约在10~20秒内。第二种照射是模拟临床使用情况。这种照射又分为两种不同的条件：一种是辐射器置于阴茎正上方8~10cm；另一种是辐射器偏离正方法45°以模拟双波束使用<sup>[4]</sup>。使用的辐射器是Transco圆极化辐射器，其圆形口径的直径为13cm，工作频率为2450MHz。输入功率为300W左右，照射时间约在10~20秒。

用热象仪测定模型受热分布(SAR分布)的过程与Guy的方法一样<sup>[5,6]</sup>。本实验所用的热象仪为AGA-680医用热象仪，附装有Oscar数字化磁带记录装置，拍摄时间为1/100秒。热象仪拍出的模型受热分布经数字化后送计算机处理和储存。测量过程的示意图如图3。计算机处理后所绘制出的模型受热分布是以比吸收率SAR为单位，用灰度的深浅来直观地表现模型各部分受热的强弱。在每张热象图上可任选4~8条扫描线(B-Scan)以便详细了解关键部位的SAR值(或温度分布值)。每条扫描线

在热象图上均有标记(如A-A'，B-B'等)，以便明确扫描观察的部位。全部扫描线构成一个浮雕式的立体受热分布图，形象地显示出模型的受热情况，见图4。

前述的比吸收率SAR是指单位质量受照组织在单位时间内所吸收的电磁能量，单位是W/kg。在热损失可忽略的条件下，通过测量受热体各部份的温升，可以确定受照体各部份的SAR值。对模拟肌肉组织的计算式为：

$$\text{SAR} = \frac{3470 \Delta T}{t} (\text{W/kg})$$

式中 $\Delta T$ 为受照体温升(℃)。 $t$ 为照射时间(s)。

所以，只要照射和测量时间很短，物体的热传导损失便可忽略，测出的受照体各部份受热分布即为SAR分布。

下面实验结果中所列出的SAR值是归一化值。对远区照射条件，是对 $1\text{mW/cm}^2$ 归一化；对临床照射条件，是对1W输入功率归一化。

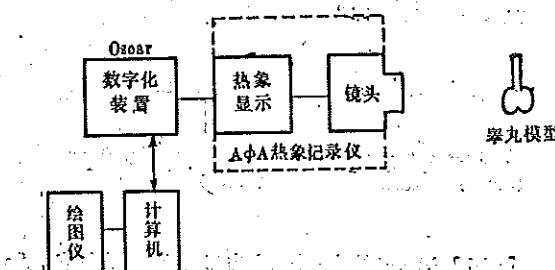
## 结 果

### 一、远区照射条件

在该照射条件下，模型受热分布可分为两种情况：一是当投射来的电磁波的电场E平行于阴茎，最大发热出现在阴茎基部，最大SAR为 $3.0\text{W/kg}$ ，见图4；另一是用同样强度的电磁波照射，但电场E垂直于阴茎，这时最大发热却出现在两侧睾丸，最大SAR为 $1.9\text{W/kg}$ ，见图5。图6示一个睾丸内部的受热分布细节，可以看到，在2450MHz电磁波照射下，人体睾丸有聚焦作用，睾丸内部发热最强，最大的SAR为 $1.4\text{W/kg}$ 。

### 二、临床使用情况

当Transco圆极化的辐射器置于阴茎正上方时，睾丸和阴茎的受热分布如图7所示。由于这是一种圆极化的辐射器，其电场方向随时间推移而旋转，故图上未标明电场方向。这时，最大发热区域出现在两侧睾丸处，其次为阴茎



【图3】数字化的热象记录系统示意图

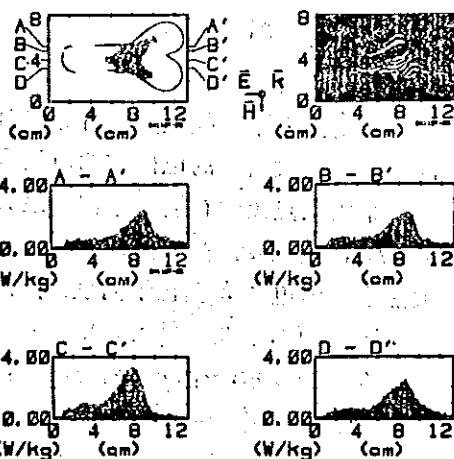
Fig. 3 Block diagram of the computerized thermographic system.

基部。最大 SAR 为  $5.2 \text{W/kg}$ 。图 8 示当 Transco 辐射器向左偏离阴茎正上方  $45^\circ$  时，睾丸和阴茎的受热分布。这时，左侧睾丸内最大 SAR 为  $6.6 \text{W/kg}$ 。图 9 示出睾丸内部的受热分布细节，与远区照射情况相似，受热最强区域出现在睾丸内部，最大 SAR 为  $8.0 \text{W/kg}$ 。

## 讨 论

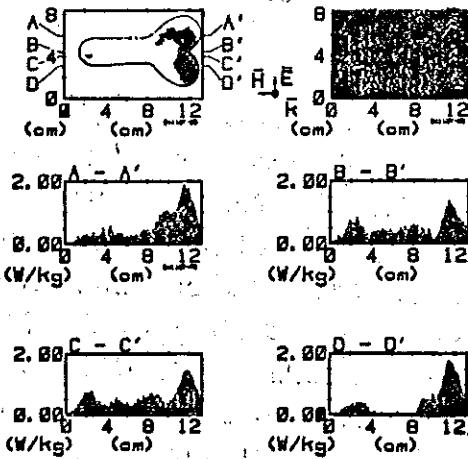
一、正如一些医生估计，无论用  $2450 \text{MHz}$  矩形口径辐射器或是用 Transco 圆极化辐射器照射，睾丸内部的受热是不均匀的。虽然在实际工作中由于血流及热传导等的作用，实际睾丸内的温度应比模型均匀得多，但用微波照射所造成的受热不均匀，可能是其节育有效率起伏的原因之一。

二、当阴茎和睾丸的相互位置如模型所示时（与临床照射情况相似），阴茎对电磁波的吸收显示出明显的极化效应。当投射来的电磁波的电场  $E$  平行阴茎时，最大受热区出现在阴茎基部（该处相对狭窄）；而用同样强度的电磁波



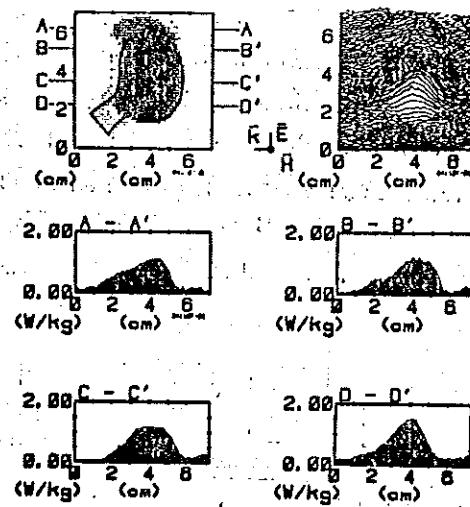
【图 4】远区照射时睾丸和阴茎的受热分布(经计算机处理)。 $K$  表示电磁波传播方向，电场  $E$  平行于阴茎。工作频率  $f=2450 \text{MHz}$

Fig 4 Computer-processed heating pattern for the testes and penis exposed to  $2450 \text{MHz}$  electromagnetic (EM) wave with  $E$  field parallel to penis. The models were set in the far-field of a  $\approx 23 \times 17 \text{cm}^2$  rectangular horn antenna.  $K$  denotes the direction of propagation of the EM wave



【图 5】远区照射时睾丸和阴茎的受热分布细节。电场垂直于阴茎，其它同图 4

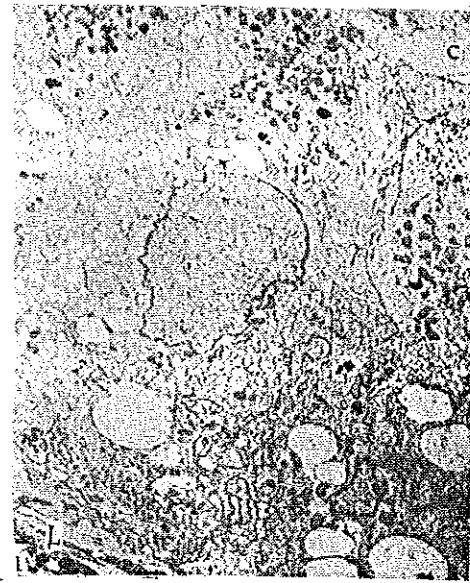
Fig. 5 Computer-processed heating pattern for the testes and penis exposed to  $2450 \text{MHz}$  EM wave with  $E$  field perpendicular to penis. Others were the same as in Fig 4



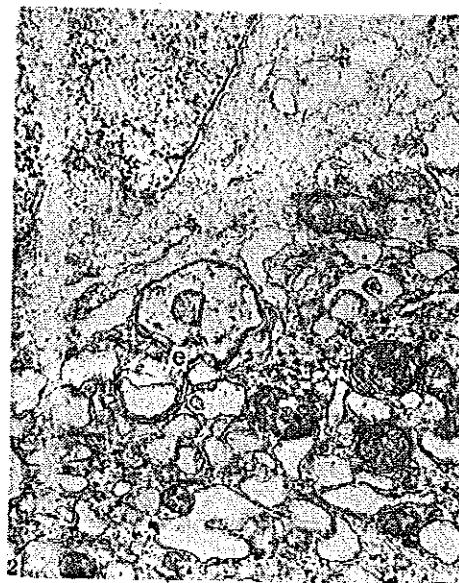
【图 6】远区照射时一个睾丸内部的受热分布细节。 $f=2450 \text{MHz}$ ，其它同图 4

Fig. 6 Computer-processed heating pattern showing the details in one testis exposed to  $2450 \text{MHz}$  EM wave. Others were the same as in Fig 4.

图版一



【图1】横跨曲细精管全层的一个支持细胞，图左下角为基底膜(L)右上角为管腔(C)  
×35,000



【图2】支持细胞内质网的扩张及盘曲折叠状态(e)  
×25,000

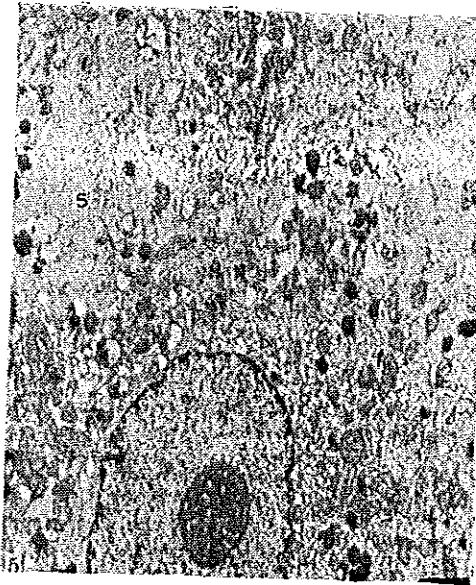


【图3】支持细胞粗面内质网扩张，内含平行纹理状结晶(i)  
×22,000

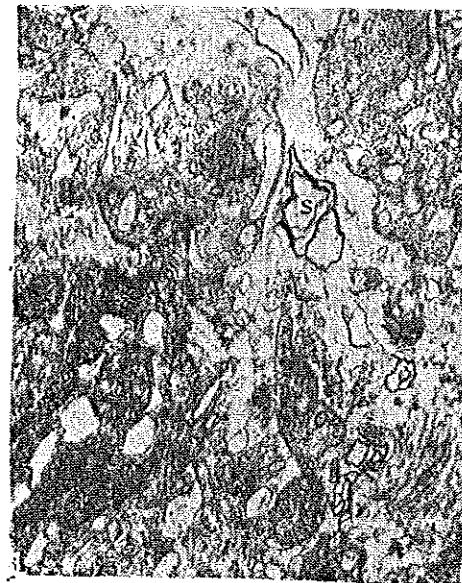


【图4】曲细精管外基底板层状疏松增厚(L)，部分突入支持细胞  
×15,000

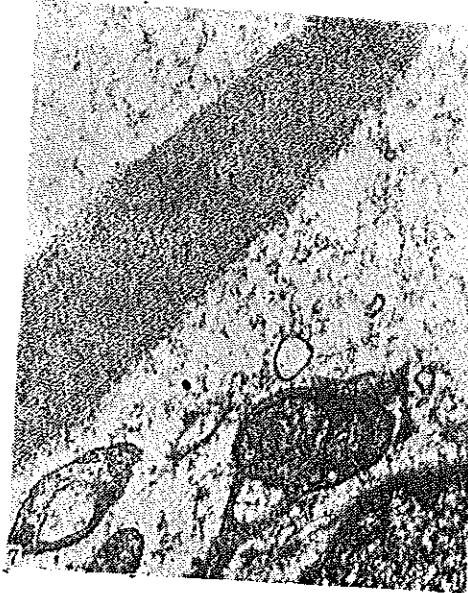
## 图版二



【图5】间质细胞内多数脂褐素颗粒和溶酶体部分胞质(S)呈无序短杵状结构。



【图6】局部间质细胞膜缺损，可见糙样结构形成(S)

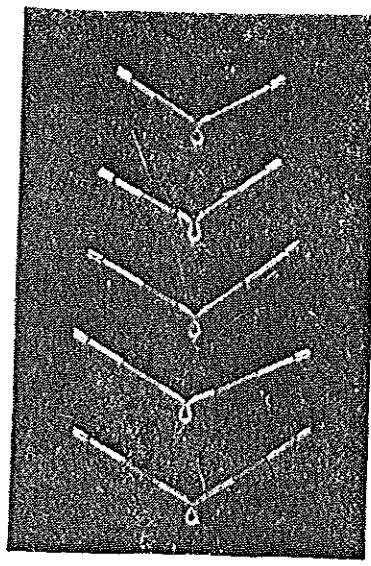


【图7】Reinke's结晶体



【图8】间质细胞胞质内的胶原原纤维样结构(S)  
X25,000

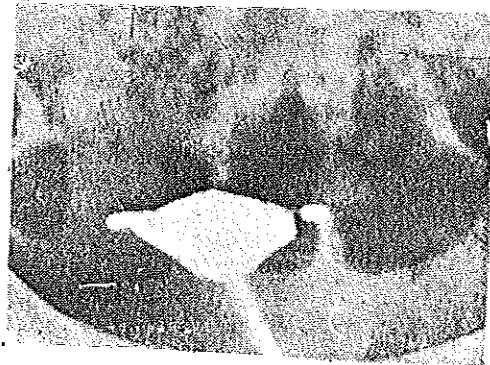
图版三



【图1】 UTE 节育器  
Fig 1 Utero-tubal Elastic Device



【图2】 置器后碘油透影—双输卵管未显影，两铜塞进入间质部  
Fig 2 HSG 1 month after insertion, Both copper plugs entered interstitial portion of the tube. Fallopian tubes were not shown



【图3】 置器后碘油透影—双输卵管未显影，两铜塞进入输卵管间质部  
Fig 3 HSG 8 months after insertion

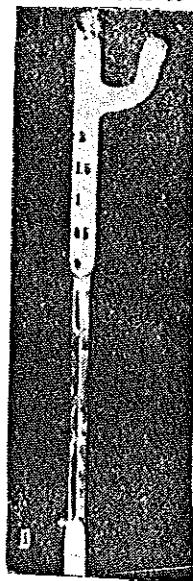


【图4】 碘油透影—加压后显示两输卵管显影  
Fig 4 HSG under pressure 1 month after insertion, Bilateral tubes were shown

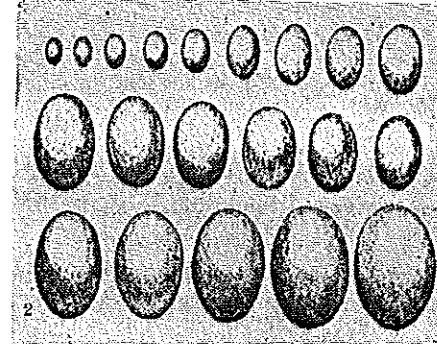
图版四



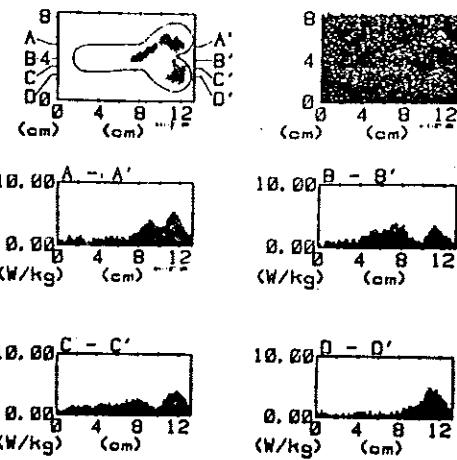
[图1] 人体模型，可见到两半合起来的情况  
Fig 1 The full-sized man model showing the two halves of the model are combined



[图1] 自制毛细玻璃管精液粘度计  
Fig 1 Self-made capillary tube as viscosimeter for seminal plasma

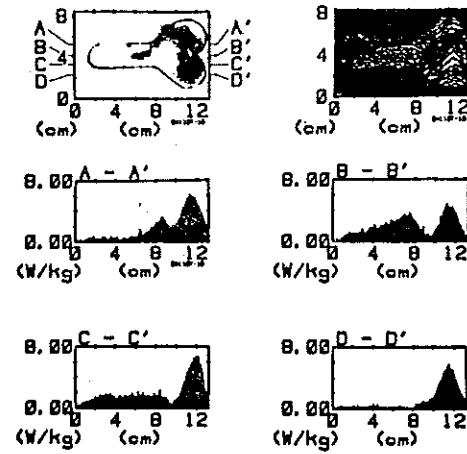


[图2] 用自制睾丸模型测量睾丸容积  
Fig 2 Self-made testicular model for the measurement of testicular model



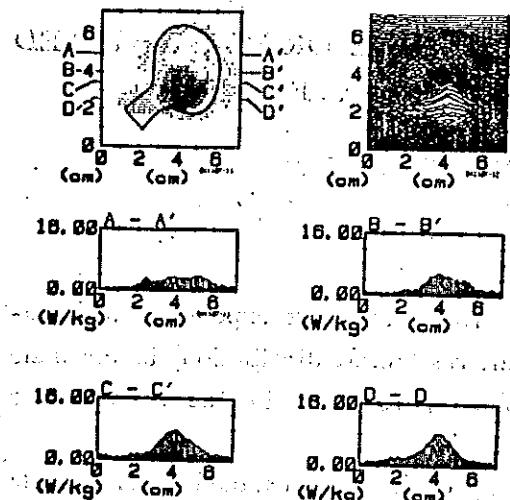
[图7] Transco 圆极化辐射器近区照射时睾丸和阴茎的受热分布。工作频率  $f = 2450\text{MHz}$ , 辐射器在阴囊正上方  $d = 10\text{cm}$ 。

Fig 7 Computer-processed heating pattern for testes and penis exposed to the near-field of a Transco circularly polarized applicator ( $f = 2450\text{ MHz}$ ). The applicator was placed 10 cm directly above the model



[图8] Transco 圆极化辐射器近区照射时睾丸和阴茎的受热分布。辐射器向左偏离阴囊正上方  $45^\circ$ ，其它同图7

Fig 8 Computer-processed heating pattern for testes and penis exposed to the near-field of a Transco circularly polarized applicator ( $f = 2450\text{ MHz}$ ). The applicator was placed 10 cm away from the model and at  $45^\circ$  angle from the normal to the model. Others were the same as in Fig7



[图 9] Transco 圆极化辐射器近区照射时睾丸内部受热分布。d=8cm, 其它同图 7

Fig. 9 Computer-processed heating pattern showing the details in one testis exposed to the near-field of a Transco circularly polarized applicator ( $f = 2450 \text{ MHz}$ ). The applicator was placed 8 cm directly above the model. Others were the same as in Fig 7

照射, 但电场  $E$  垂直于阴茎时, 最大受热却出现在两侧睾丸。因此从计划生育临床应用来说, 如果使用非圆极化辐射器, 应使其辐射的电磁波的电场垂直于阴茎, 以便使睾丸相对受热更强。由于所观察到的这种极化效应是普遍存在的<sup>[10]</sup>, 因此, 在微波其它的医学应用上或安全防护上对此应予以考虑。

三、在微波男性节育临床试用中, 测温点的选择一直难以决定, 从微波照射的有效性考虑, 希望能在阴囊上找一个适当的部位, 它的温度值能反映睾丸内部的平均温度; 但从安全性考虑, 则应将测温点选择在靠近最热区域。从图 7 和图 8 可看到, 使用 Transco 圆极化辐射器时, 在阴囊下端的中间一带很靠近受热最强处, 如将温度探头置于该处则反映最热区的温度变化, 这一结果与医生的临床经验大体相符。但由于受照体的发热区域与使用的辐射器及周围环境有关, 以上实验结果仅适宜于上述条件。

四、根据成都市计划生育指导所临床试用

记录, 在 2450MHz 微波照射下, 要使一位成年健康男子暂时失去生精能力(每毫升精液中精子少于 400 万), 其睾丸处的温度至少须达到 40~41℃, 并维持 25~35 分钟以上, 这时热疗机输出功率约在 60W<sup>[4]</sup>。因此, 根据本实验结果(图 7、8 图版四、9), 在临床使用条件下, 睾丸中的最大比吸收率 SAR 约为 480W/kg。在微波照射下, 当肌肉的比吸收率 SAR 达到 200W/kg 左右时即会明显温升。因此, 从本实验结果看, 人体的阴囊似乎有强得多的热调节能力。

五、由于模型与人体睾丸毕竟有差异, 也不能如人体阴囊在受热后有舒张变化, 同时由于需向睾丸模型内灌注模拟组织, 所以在睾丸模型上预留了灌注孔道, 这也使睾丸外型与实际有差别(如图 6 所见睾丸一端的孔道), 这些均需今后进一步改进。

(对 John McDougall, Carroll Sorenson 和 Art Don 先生的帮助, 表示感谢。)

## 参 考 文 献

- [1] 李维信等: 微波照射对家兔曲细精管上皮超微结构的影响 《生殖与避孕》 2(3): 41, 1982
- [2] 刘瑜璐等: 微波辐射对大白鼠精原细胞染色体畸变的影响 《生殖与避孕》 4(4): 19, 1984
- [3] Chou CK et al: Formulas for preparing phantom muscle tissue at various radiofrequencies. Bioelectromagnetics 5: 435, 1984
- [4] 江汉保等: 医用双波束微波系统 《四川大学学报》(自然科学版) (2): 57, 1985
- [5] Guy AW et al: Determination of power absorption in man exposed to high frequency electromagnetic fields by thermographic measurements on scale models. IEEE Trans BME 23: 361, 1976
- [6] Guy AW et al: Average SAR and SAR distribution in man exposed to 450 MHz radiofrequency radiation IEEE Trans MTT 32: 752, 1984

(1986年4月21日收稿)

## HEATING PATTERNS IN MALE REPRODUCTIVE ORGANS EXPOSED TO HIGH INTENSITY MICROWAVES

Jiang Han-bao, et al.

(Sichuan University)

### ABSTRACT

Two full-sized man models with male reproductive organs were exposed to both far-field and near-field microwaves and the heating patterns (SAR distribution) in the male reproductive organs were determined thermographically using an interactive computer system.

The experimental results showed that the heating of the testes exposed to 2450 MHz microwave was not uniform and that the peak SAR values were 1.9 W/kg for  $1\text{mW/cm}^2$  and 8.0 W/kg for clinic condition respectively. The power absorption in the penis, when exposed parallel to E field vector, reached maximum with the peak SAR value of 3.0 W/kg ( $1\text{mW/cm}^2$ ) at the base of penis.

**Key words:** Heating pattern, Microwave radiation, Male reproductive organ

# Effets thermiques organes reproducteurs mâles exposés aux micro-ondes de hautes intensités.

Jiang Han-Bao, et al.

(Université de Sichuan)

## Abstract / Résumé

Deux modèles différents d'homme avec organes reproducteurs mâles ont été exposés à la fois aux champs lointains et aux champs proches d'irradiation par les micro-ondes avec l'étude des effets thermiques (DAS Distribution).

Il a été réalisé l'édition de graphes thermiques avec des capteurs installés dans les organes reproducteurs mâles, l'ensemble ayant été traité au moyen d'un système informatique interactif.

Les résultats expérimentaux ont montré que l'effet thermique sur les testicules exposées à la fréquence micro-ondes de 2450 MHz n'étaient pas répartis uniformément et que les pics des valeurs "cliniques" DAS étaient respectivement de 1.9W/kg pour  $1\text{mW/cm}^2$  et 8.0W/kg.

Le pouvoir d'absorption dans le pénis avait atteint, en cas d'exposition parallèle à un champ vectoriel E, son maximum avec des valeurs de DAS de pointe à 3.0W/kg ( $1\text{mW/cm}^2$ ) à la base du pénis.

Ndlr de Next-up organisation : fin de la partie disponible du résumé de l'étude.

