

目前临床医用微波辐射器的缺陷 与改进方向的研究

缪毅强¹⁾ 高蕴雅¹⁾ 张觉先¹⁾ 罗琦琨²⁾ 钱鸿森³⁾

¹⁾上海第二医科大学 物理教研室, 上海, 200025;

²⁾海军医学研究所 计算机室, 上海, 200433;

³⁾南京吉瑞特微波电子有限公司, 江苏, 南京, 210013)

摘要 利用蛋清凝固热图实验和漏能功率仪测量, 分析了不同的医用微波辐射器的能量分布. 指出单极子天线根部辐射能量较大, 顶部较弱, 不适宜作为医用微波体内辐射器. 而实验显示螺旋型天线在靠近顶部时是最强的, 辐射能量集中而有效. 实验结果和多例临床应用证明: 螺旋型天线稳定、高效、安全, 在临床上用有着广泛的应用前景, 建议螺旋型天线代替单极子天线作为研究方向.

关键词 微波, 螺旋辐射器, 单极型辐射器, 蛋清凝固热图.

THE DEFECTS OF CURRENT CLINICAL MICROWAVE RADIATOR AND RESEARCH DIRECTION

MIAO Yi-Qiang¹⁾ GAO Yun-Ya¹⁾ ZHANG Jue-Xian¹⁾ LUO Qi-Kun²⁾ QIAN Hong-Sen³⁾

¹⁾Department of Physics, Shanghai Second Medical University, Shanghai 200025, China;

²⁾Department of computer, Naval Medical Research Institute, Shanghai 200433, China;

³⁾Nanjing Great Microwave Electronics Lab, Nanjing, Jinagsu 210013, China)

Abstract The results, albumen thermo-solidification experiment and leaking dynamometer are used to investigate the radiant power density field radiated from a microwave antenna, show that the microwave field radiated from the monopole antennas, which are used usually in clinical treatments now, is not uniform. The radiation intensity near the root part of the antenna is strong, and near the top part, which is close to affected part, is rather weak. The suggests that monopole antenna was inefficient and was not ideal as a microwave antenna for in-body. For the helical antenna, however near the top part the radiation intensity was rather strong, and the radiation was concentrative and efficient. Experiment results and many clinical examples suggest that the helical microwave antenna is a dependable, stable, safe and efficient one, and has a wide applicant future in clinical practice.

Key words microwave, helical antenna, monopole antenna, albumen thermo-solidifying chart.

引言

目前微波治疗在临床上已被广泛使用. 事实证明在有些场合微波是比其它方法更为理想的治疗手段^[1]. 但与 X 射线、同位素、超声波、激光的医学应用相比较, 显然这些技术的应用要比微波应用成熟得多. 而微波在临床上的使用其关键问题是要制作高效安全的微波辐射器.

作为微波医疗设备, 其对象是人体中患病的器官和组织. 因此, 就提出了不同于一般微波工程设备的独特要求. 任何频率的微波, 只有将一定剂量的微

波能量传送到人体部分组织, 被组织吸收时, 才会产生不同的生物效应. 微波被辐照区域中的皮肤, 肌肉, 腺体、神经, 结缔组织等吸收后的效应, 与更微观的组织细胞的间质, 膜, 核, 甚至线粒体、溶酶体, 高尔基体中带电粒子的电磁相互作用有着密切的关系. 其效果已被国内外临床实践所证明^[2,3]. 但要产生能观察到的效应, 必然与组织吸收微波能量的多少有关.

一台典型的微波医疗设备可分为 3 大部分, 包括微波源、传输线和辐射器, 其中最关键的、直接影响到疗效的、也是最难解决的是如何制作高效稳定,

适合临床各种需要的微波辐射器。

1 单极型医用微波辐射器

微波用于临床治疗的初期,一般多采用体外微波辐射器,用这种辐射器进行治疗,称为微波透热疗法(Microwave diathermy)。因为体外微波辐射器常与人体保持一定距离,故会造成微波泄漏和微波场分布对需治疗组织覆盖过量或覆盖不全。特别是覆盖过量,若微波功率过大或持续时间过长,由于热效应和非热效应^[4],会造成正常组织不必要的损伤^[5]。以后发展成单极型辐射器,将辐射器直接紧贴或插入受照组织进行治疗。这样既减少了正常组织的损伤,又提高了疗效。目前临床应用的微波辐射器大致可分为 3 类:(1) 将较细的微波辐射器插入鼻腔、肛肠道、阴道子宫腔内直接辐射微波进行治疗;(2) 通过内窥镜活检孔插入辐射器,可对体内深部进行治疗;(3) 将针型辐射器直插入肝脏或肿瘤组织或将多支辐射器成阵列式插入或贴近组织进行治疗。

目前临床常使用的单极型微波辐射器可分为针型、柱型和球型 3 种。

我们在临床应用中经常要求微波辐射器的顶端能量最强,根部(与电缆连接处)能量较弱,可是目前临床使用的单极型微波辐射器的第一时间极值区不在顶端,治疗时不方便,甚至可能损伤正常人体组织。我们对目前临床使用的单极型辐射器作了理论分析和实验研究,以其能改变微波辐射器前端的能量分布,达到临床使用最佳效果。

单极型微波辐射器可将其看作一段被高频电流激励的短导线,或称“元电辐射体”。由于治疗时将辐射器直接插入组织或紧贴组织,故天线的远场区理

论在此已不再适用。实际上医用微波辐射器主要是辐射器的近场区在起作用。从理论上讲,“元电辐射体”的近场区中电场与磁场分量之间相位差 90° ,其能量只能在天线表面附近以能量交换的方式存在,以感应场为主,近场区中辐射场能量远小于感应场能量。但若要对“元电辐射体”场分布进行计算,必须首先考虑辐射体上电流分布、电压分布和电磁场分布,再根据边界条件(人体组织)计算周围场分布,这在计算上有很大困难,主要是因为人体不同的病变组织有完全不同与空间自由场的参数和很大的不确定性。这是当前天线理论暂时无法解决的问题。

有人曾经把螺旋天线分割成若干个元电振子,然后用微分叠加的方法,算出了在自由空间场的螺旋型辐射器的空间能量分布,通过调节螺旋型辐射器的各参数,得到辐射器顶端功率密度较强的理想结果,但由于医用体内辐射是在接近和接触人体病变组织下使用,与自由空间场的条件完全不一致,因此我们用实测的方法(蛋清凝固热图),再辅助于漏能功率仪测出空间各点微波功率密度使其量化,并画出等功率密度线,从热图和等功率密度线可得到该微波辐射器的场分布,同时测定微波辐射器和传输线的驻波比,从而分辨出其传输微波性能的优劣。通过实验室不断地改变螺旋型辐射器的各种参数可以得到比较完善的、符合临床使用的辐射器的能量分布热图。

我们用上述方法对临床应用的针型辐射器作蛋清凝固热图试验,并连续摄影记录。



图 1 单极型辐射器材 3s 和 5s 蛋清凝固热图
Fig.1 Albumen thermo-solidifying chart of monopole antenna after 3 seconds and 5 seconds

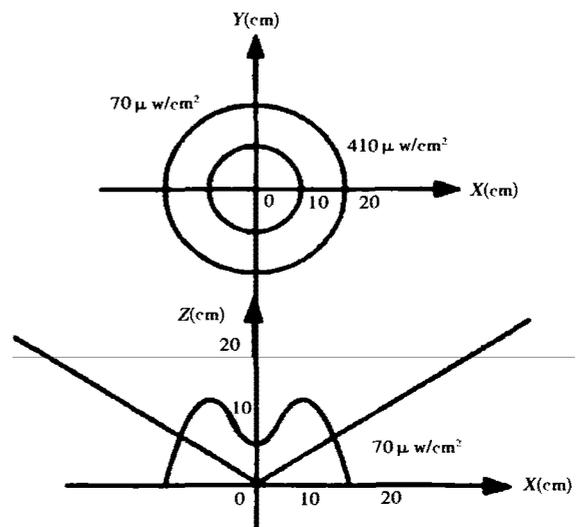


图 2 单极型辐射器 OXY-X 和 OXZ-X 平面的等功率密度线
Fig.2 Curve of same power density of monopole antenna in planes of OXY-X and OXZ-X

当针型微波辐射器完全浸入透明的蛋清液中,微波源发送 2450MHz,60W 的微波,开机后几乎立即在针型辐射器根部(即辐射器与同轴线连接处)出现 2mm 半径圆球状凝固区,以较快速度将凝固区向针尖部延伸(如图 1 所示)经过 6s 后针尖部出现凝固区.再用微波漏能功率仪对该辐射器作量化测试.

将辐射器根部置于坐标 O 处,探针与 Z 轴重合,用 2450MHz 微波源通过同轴电缆向针型辐射器发送微波,输出功率为 10W,用微波漏能功率仪探头:在 $OXY-X$ 平面和 $OXZ-X$ 平面内测定其功率密度.发现在 $OXY-X$ 平面内,其等功率密度线几乎是以 O 为圆心的同心圆.而在 $OXZ-X$ 平面内,等功率密度线不是一个以 O 为圆心的同心圆,而是在 Z 轴向 O 点凹陷的曲线.(如图 2 所示)

以上分析均显示该针型微波辐射器场分布不均匀,在针尖端是一个微波功率的弱区.

同时又对柱型辐射器重复上述试验.同样开机后在柱型辐射器和同轴电缆交界处出现凝固区,然后向外端延伸(如图 3 所示).仍出现场分布不均和顶端强度较弱的问题,球型辐射器经测试也是如此.在临床治疗胃出血、胃肠道息肉烧灼和肿瘤治疗中,医生往往习惯用微波辐射器顶端去紧贴出血点或息肉,使用上述微波辐射器在治疗过程中不仅带来不便,且效果不佳.

治疗中需要解决另一个问题是进一步提高辐射器效率,因内窥镜插入体内会刺激胃肠蠕动,治疗需在蠕动间歇中快速发出微波能量,如辐射器顶端微波强度不够集中,需发送 5~6 次,甚至 8~10 次才能奏效;故临床需要辐射器能向受辐照组织在尽量短的时间内发送较强的微波,却不能无限制地去增强微波源的输出功率.如输出功率太大,即使传输

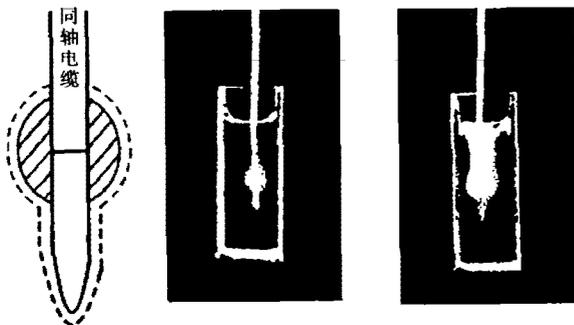


图 3 圆柱辐射器模拟与蛋清凝固 2 秒和 9 秒实验结果
Fig. 3 Results of simulation and experiment of albumen thermo-solidify of columniform antenna after 2 seconds and 9 seconds

线、辐射器的驻波较小,互相匹配良好,也会存在同轴线温度升高,给病人和内窥镜带来不利影响.要提高治疗效率,首选方案应是去寻求高效稳定的微波辐射器.

2 螺旋型医用微波辐射器

经分析和实验,我们发现螺旋式微波辐射器,可形成较均匀的近场区分布或集中定向发送微波的器件.特别对辐射器顶端微波弱区有明显的改进,是一种很有前途,适合临床需要的新颖医用微波辐射器.

通常螺旋式辐射器由导电良好的金属线在同轴电缆顶端绕成各种形状的螺旋状,其一端与同轴电缆内导体连接,另一端处于自由状态.从理论上分析^[6],圆柱形螺旋天线是属于有较宽频带的圆极化天线.其螺旋形状和几何尺寸与微波场分布有很大关系.

一般可以用螺旋圈数 n ,螺旋直径 D 和其邻圈线间距 d ,螺旋轴线总长 L 和螺距角 α 来确定其几何尺寸和形状(如图 4 所示),各几何参量间关系为

$$\text{螺旋轴线总长 } L = nd, \quad (1)$$

$$\text{螺距角 } \alpha = \arctg\left(\frac{d}{\pi D}\right), \quad (2)$$

$$\text{每圈长度 } l = \sqrt{d^2 + (\pi D)^2}. \quad (3)$$

如果当螺旋角 $\alpha = 0$ (即 $d = 0$)时,圆柱形螺旋辐射器将变成环形辐射器;而当 $\alpha = 90^\circ$ (即 $D = 0$)时,圆柱形螺旋辐射器相当于针形辐射器.螺旋辐射器幅射特征取决于辐射金属线上电流分布,是一种周期性慢波结构.根据理论分析该慢波结构中的电流波除有类似一般同轴传输线中基模 T_0 (即 TEM 波)外,还会出现 T_1, T_2 等高次型模,螺旋线的几何参量与这些模的大小有关.当螺旋直径与微波波长之比 $D/\lambda < 0.18$,或者螺旋每圈长度 l 和 λ 之间比 $l/\lambda < 0.5$ 时, T_0 模占主导地位.这种模的相位变化

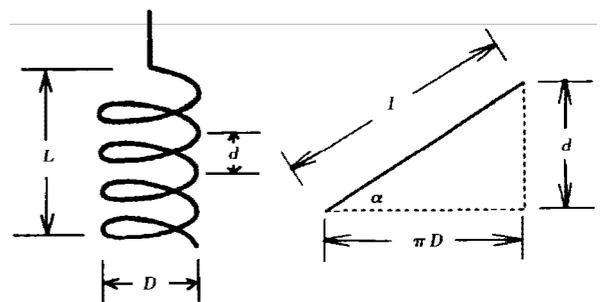


图 4 螺旋型天线几何尺寸示意图
Fig. 4 Geometrical schematic diagram of the helical antenna

周期,是经过若干圈螺旋后才出现一次,其速相当于光速.该模在传输中衰减很小时, $D/\lambda = (0.25 \sim 0.46)$ 或 $l/\lambda = (0.8 \sim 1.3)$ 时, T_0 模会较快衰减下去,而 T_1 模则占了优势.使 T_1 模相位变化一个周期的长度约为螺旋线的单圈长 l ,这时其相速小于光速.并且 T_1 模的波传至终端后会产生 T_0 模与 T_1 模的反射波.由于 T_0 模衰减很快以及反射后 T_1 模很弱,螺旋金属线上电流分布接近于行波;当 $D/\lambda > 0.45$ 或 $l/\lambda > 1.25$ 时, T_0 模和 T_1 模的波都衰减很快,同时还会激励出 T_2 模的波,其相位变化一个周期的长度约为半个螺旋圈长,相速小于光速.根据以上分析,若临床应用微波波长已确定,螺旋辐射器的辐射性能很大程度上由其几何尺寸和形状决定.而且在内窥镜中使用微波辐射器,必经活检孔插入,直径一般只有 $1.8 \sim 2.5$ mm,螺旋辐射器总辐长一般也在 2 cm以下为多.通常使用的在 1 cm之下.所以 T_0 模在螺旋金属线中占主导地位.而且在传至终端后将会产生反射.故螺旋金属线上电流分布接近于驻波状态.由于辐射器在治疗中总是紧贴受辐射组织.其感应场在受辐射组织中起主要作用.只要控制几何尺寸,就可能控制辐射器周围场分布,制成场分布均匀,小范围外微波功率密度急剧衰减、或辐射器顶端功率密度较强的微波临床应用辐射器.

我们又在实验室中用各种金属丝制作螺旋辐射器,发现镀银铜线效果优于其它金属线.改变几何尺寸其驻波比也相应发生变化.淘汰了一批驻波比大于 2 的辐射器.其余的辐射器场分布虽各有不同.同单极型辐射器相比有以下 3 个优点.

1. 顶端微波弱区有较大改变,从热图上看,开机一秒钟,首先出现凝固区的是顶端.

2. 场分布可随要求,制成较均匀的球状和柱

状.如照片热图所示的一种螺线辐射器(图5).开机一秒钟后,辐射器从顶端到四周立即形成一个直径 6 mm凝固圆球,随着时间延长,并不明显变大,这说明该辐射器的微波集中在一个小范围内,稍远离微波功率密度衰减极快,可使正常组织损伤的可能性降到最低点.

3. 效率大大提高,我们在实验室中制作最好的辐射器,在微波输出功率仅 40 W时,几乎在开机同时,螺旋辐射器顶端蛋清凝固(图6),而且出现焦化现象.另有一根辐射器同玻璃管点温计绑在一起,当微波源输出功率达 70 W时,玻璃被融化.控制螺旋辐射器在安全范围内,可在临床使用时降低微波源的输出功率,或降低向受辐照部位发送微波次数,这两点在临床应用都是极有意义的.

经临床要求,我们挑选了一些在实验室中较成熟的微波螺旋式辐射器供使用,经多例临床使用,其效果明显优于过去使用的单极型辐射器,除降低了微波源输出功率外,现在一般只发送 2 次微波就可达到治疗目的,而过去则要发送 $4 \sim 5$ 次,或更多次数.效率明显得到提高,受到了临床的肯定和欢迎.

3 临床应用实例

病员蔡XX,女性,43岁.患乙结肠息肉,经检查属增生性息肉,腺瘤样变伴异型增生.距肛门 20 cm,蒂宽 0.6 cm大小,使用螺旋型微波辐射器,频率为 2450 MHz,输出功率 90 W,辐射器顶端轻触蒂顶端.发送 2 次微波,每次 2 s.息肉被烧灼消除.局部变白,而周围正常组织观察无任何损伤.

病员赵X,男,45岁,患横结肠息肉.息肉底宽 0.4 cm同上述方法和剂量,息肉消除,疤痕平整.周围组织观察无任何损伤.

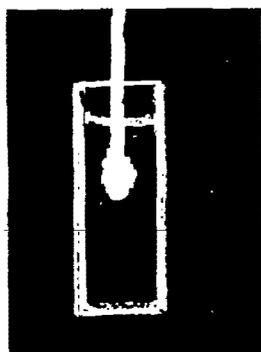


图5 螺线辐射器1s蛋清凝固热图
Fig.5 Albumen thermo-solidifying chart of helical antenna after 1 second



图6 螺线辐射器0秒和1秒蛋清凝固热图
Fig.6 Albumen thermo-solidifying chart of helical antenna after 0 and 1 second

病员王 XX,患胃窦前壁息肉,大小为直径 2cm,经微波螺旋型辐射器用 2450MHZ 的频率,90W 功率,3 次发送微波.息肉被烧灼消失,周围组织观察无损伤.

病员林 X,男性,63 岁.患有前列腺肥大,排尿缓慢、困难,肛门指诊,前列腺有不同程度增大,使用体腔螺旋辐射器置肛门内,频率为 2450MHZ;输出功率 10W,每日 1 次,15min,两个疗程(15 次为一疗程).排尿困难有改善,肥大之前列腺缩小.

目前螺旋型微波辐射器已由实验室进入临床使用.实践证明:它是一种可靠稳定高效安全的医用微波辐射器,而且可以制成几十种场分布各异的螺旋型微波辐射器,一改过去一台微波治疗仪只配有二三种单调的辐射器,以满足临床不同患者不同部位不同病情的需要,该仪器的使用可为微波临床应用的推广做更多的贡献.

4 结语

为制造高效安全的微波辐射器,以前大都尽力用各种方法在单极子天线原理上改进医用辐射器,我们经过多年研究和实践,认为单极子天线虽有一定的优点,但在多数情况下,临床需要辐射器的第一时间极值区应在顶端,单极子天线很难满足临床的这一需求,而螺旋型天线恰能解决这一难题,因此,

建议放弃单极子天线模式,而改用螺旋天线模式去进行探索研究,事实证明这一方向是可行的,并已得到临床的验证.

REFERENCES

- [1] ZHUO Da-Hong. Some new problems of thermo-therapy. *Chinese Journal of physical therapy*(卓大宏,热疗法的几个新问题. *中华理疗杂志*)1978,1(2):110
- [2] Carter S B. Tissue homeostasis and the biological basis of Cancer. *Nature*, 1968,220:970
- [3] HUANG Ka-Ma, LI Ying, LIU Ning, *et al.* Current development of research on biological effects of low-intensity EMF(W). *Chinese Journal of Medical Physics* (黄卡玛,李颖,刘宁,等.近年来弱电磁场(波)生物效应机理研究的进展. *中国医学物理学杂志*),2000,17(1):36—40
- [4] WANG Bao-Yi. The Research of Non-heat Biologic Effect of cell with Low-energy Microwave Radiation. *Chinese Journal of Medical Physics* (王保义,低强度微波辐射对人体细胞非热生物效应的研究. *中国医学物理杂志*), 1995,12(1):13
- [5] JIANG Huai. *Healthy Influence and Biologic Effect With Microwave and High-frequency*. Beijing: People healthy Press(姜槐. *微波、高频对健康的影响与生物效应*. 北京:人民卫生出版社), 1985
- [6] ZHANG De-Qi. *Basic of Microwave Antenna*. Beijing: Beijing Industry College Press(张德齐. *微波天线基础*. 北京:北京工业学院出版社),1985,174