

## 射频美容电极在人脑中电磁场和比吸收率分布研究

齐欣哲<sup>1</sup>, 逯迈<sup>2</sup>

1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州交通大学光电技术与智能控制教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730070

**【摘要】**研究在频率40.68 MHz下,使用多极射频电极头对人进行射频美容治疗时在人头部所产生磁场强度、电场强度和比吸收率(Specific Absorption Ratio, SAR)的分布,并将得出的结果与国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)所指定的安全限值进行对比。结果表明,脑组织中磁场强度最大值为0.06 A/m,约为ICNIRP限值的82.19%;电场强度最大值为5.5 V/m,约为ICNIRP安全限值的19.64%;SAR最大约为0.03 W/kg,远小于ICNIRP标准的2 W/kg。所有结果均处于ICNIRP安全限值以内,说明射频美容电极所产生的电磁暴露不会对人体造成威胁。

**【关键词】**射频美容;人头模型;电磁场;比吸收率

**【中图分类号】**R312;TM153

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2020)04-0491-07

### Distributions of electromagnetic field and specific absorption ratio caused by radiofrequency cosmetic electrode in human brain

QI Xinzhe<sup>1</sup>, LU Mai<sup>2</sup>

1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of Opto-Electronic Technology and Intelligent Control (Ministry of Education), Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China

**Abstract:** The study aims to calculate the magnetic field strength, electric field strength and specific absorption ratio (SAR) in human head while using radiofrequency electrodes for radiofrequency cosmetic treatment at a frequency of 40.68 MHz. The obtained results are compared with the limits set by International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). The results show that the maximum magnetic field strength in brain tissue was 0.06 A/m, about 82.19% of the threshold set by ICNIRP, and that the maximum electric field strength was 5.5 V/m, about 19.64% of the threshold set by ICNIRP, and that the maximum SAR was about 0.03 W/kg, far lower than 2 W/kg in the ICNIRP standard. All the results were within the limits set by ICNIRP, indicating that the electromagnetic exposure produced by radiofrequency cosmetic electrode isn't detrimental to one's health.

**Keywords:** radiofrequency cosmetic; human head model; electromagnetic field; specific absorption ratio

### 前言

近些年来,频率介于300 kHz~300 GHz的射频电磁场暴露生物效应正在成为研究的热点,如电磁辐射对作业人员健康的影响、双频双对电极射频热疗中人体内比吸收率(Specific Absorption Ratio, SAR)和温度场的分布、地铁列车司机室八木天线对司机

的电磁暴露影响等<sup>[1-3]</sup>。相关研究表明,长期暴露在射频电磁场下会对人的神经系统、心血管系统、免疫系统产生一定的影响,还会对生物体造成难以修复的遗传物质损伤<sup>[4-6]</sup>,射频电磁场还会使人产生睡眠障碍、抑郁、头痛眩晕等症状<sup>[6]</sup>,并随着强度的变大会出现认知准确度降低、感知速度增加的现象<sup>[7-10]</sup>。

目前,射频电磁场逐渐被广泛应用于医疗、通信、识别等领域,常见的射频美容技术、肿瘤消融手术、移动通信基站等均采用射频频率。射频电磁场对人体的主要影响是当将射频电流施加于人体时,会在人体组织施加位置附近产生相应的电场和感应磁场,而人体内的电场、磁场和SAR超过一定的阈值时就会对人体产生危害。当频率达到10 MHz时,电

**【收稿日期】**2019-11-19

**【基金项目】**国家自然科学基金(51867014,51567015)

**【作者简介】**齐欣哲,研究生,研究方向:射频美容电磁暴露安全评估,E-mail: qixinzhe77@163.com

**【通信作者】**逯迈,博士,教授,博士生导师,研究方向:生物医学电磁学、电磁暴露安全评估,E-mail: mai.lu@hotmail.com

磁场暴露的主要效果从神经和肌肉刺激转换到发热上,尤其是对人的中枢神经等部位<sup>[11]</sup>。为防止电磁辐射对人体健康造成不利的影响,国际非电离辐射防护委员会(International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP)对此也做出了规定<sup>[12]</sup>。

随着人们生活质量的不断提升,人们对保持外表的年轻化也逐渐重视起来。而射频美容作为新兴起的面部年轻化技术,已经在美容领域有了广泛的应用,如“热拉提”、“Plasma离子束”、“热玛吉”等。国内外也有不少学者对射频美容的安全性进行了研究<sup>[13-15]</sup>,但大多仅集中在使用不同类型的电极进行射频美容是否会对人体造成物理损伤进行研究,而并未对射频美容过程中所产生的电磁暴露对受治疗患者产生的影响进行研究。

由于人类医学伦理问题,目前无法直接对人体组织中的电磁场强度进行测量,较为理想的方式是对人体组织的电磁场分布进行数值计算。本文研究了在40.68 MHz频率下,人在接受射频美容治疗时射频美容电极产生的电场、感应磁场以及SAR值在头部组织中的分布。电极类型选用被广泛使用的点阵电极,通过合理的建模,分别计算出电极在头部组织中所产生的磁场强度、电场强度和SAR值,并与ICNIRP所规定的标准限值进行比较,对射频美容电极的电磁暴露进行初步的科学评估,同时为相关行业的防护标准的制定提供参考。

## 1 原理与模型

### 1.1 原理

射频美容仪在工作时,由振荡电路产生射频信号后,送至后级进行放大输出,经能量控制单元调整输出电流和功率大小后,由电极头将能量传递至皮肤表面。本文在研究射频美容电磁暴露在人体头部组织中的分布时,要用到电磁学的基本方程组来计算人体部位的电场分布和磁场分布。而人体在电磁场中有着电介质的角色,所以人体的电场和磁场的计算还需要人体组织的电导率、介电常数等参数,同时还与人体组织的形状有关。本文利用有限元法对射频美容电极产生的电场和磁场进行精确计算。

电磁学基本方程组为麦克斯韦方程组:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

式中, $\mathbf{H}$ 为磁场强度矢量(A/m); $\mathbf{J}$ 为电流密度矢量(A/m<sup>2</sup>); $\mathbf{D}$ 为电通密度(C/m<sup>2</sup>); $\mathbf{E}$ 为电场强度矢量(V/m); $\mathbf{B}$ 为磁感应强度矢量(T); $\rho$ 为电荷体密度(C/m<sup>3</sup>)。

3个本构方程式为:

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (6)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (7)$$

式中, $\epsilon$ 、 $\mu$ 、 $\sigma$ 分别为电介质的介电常数(F/m)、磁导率(H/m)和电导率(S/m)。

为便于计算与分析,引入一个矢量函数 $\mathbf{A}$ 和一个标量函数 $\varphi$ :

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (8)$$

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \varphi \quad (9)$$

式中, $\mathbf{A}$ 为磁矢位(Wb/m), $\varphi$ 为标量电位(V)。

将本构方程和式(8)、式(9)代入式(1)和式(3)中,可得到关于 $\mathbf{A}$ 和 $\varphi$ 非齐次方程:

$$\nabla^2 \varphi - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (10)$$

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = -\mu \mathbf{J} \quad (11)$$

式中, $\nabla^2 = (\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2})$ 为拉普拉斯算子。使用有限元法计算出磁矢位 $\mathbf{A}$ 和电势 $\varphi$ ,便可计算出人体内电场强度和磁场强度。

SAR值的计算基于SAR的基本公式:

$$\text{SAR} = \frac{\sigma}{\rho} \mathbf{E}^2 \quad (12)$$

式中,SAR是比吸收率(W/kg), $\sigma$ 是电导率(S/m), $\rho$ 是组织密度(kg/m<sup>3</sup>), $\mathbf{E}$ 为电场强度(V/m)。

### 1.2 模型

**1.2.1 人头模型** 仿真射频美容电极电磁暴露在人体中的分布,首先要建立人体的头部组织模型。为了能够准确得到射频美容电极产生的磁场在头部中的分布,首先需要对头部组织进行建模。目前使用较为广泛的头部组织建模是将头部组织分为头皮、颅骨和大脑3部分<sup>[16]</sup>,其中头皮和颅骨分别由92和85 mm的球壳组成,脑脊液由80 mm的球壳组成<sup>[17]</sup>,脑灰质由78.8 mm的球壳组成<sup>[18]</sup>,脑白质由75.8 mm的球体组成。但由于射频美容电极是作用于人的皮肤组织,所以还需对人的皮肤组织进行更精细的建模。人体皮肤组织自身分为若干层,在建模时参考国内外对皮肤组织建模的方法,将皮肤组织分为角质层(Stratum Corneum, SC)、表皮/真皮层

(Epidermis/Dermis, E/D)和皮下组织层(Hypodermis, HYP)3层<sup>[19]</sup>,而受损的皮肤组织一般存在于真皮层<sup>[20]</sup>,故将受损组织的模型嵌在真皮层中,其中SC

层厚0.02 mm,E/D层厚1.43 mm,HYP层厚5.00 mm,受损组织厚1.20 mm<sup>[21]</sup>。头部模型如图1所示,皮肤组织示意图如图2所示。

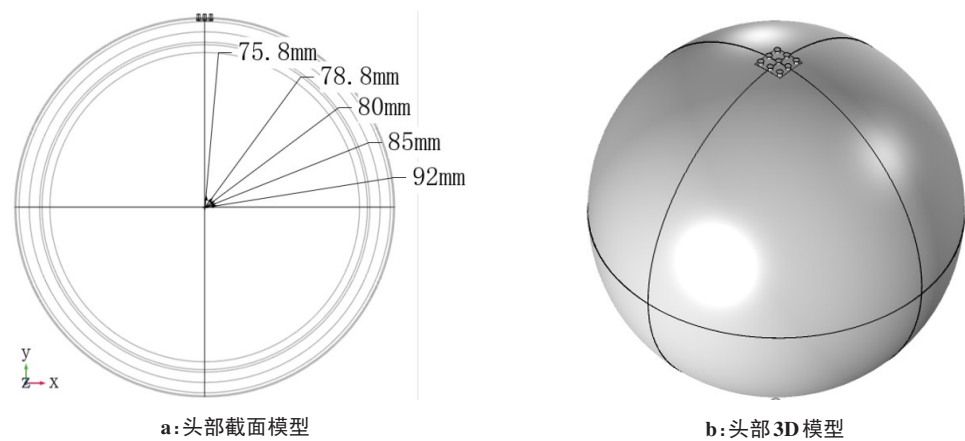


图1 头部模型  
Fig.1 Head model



图2 皮肤组织横截面示意图  
Fig.2 Cross-sectional view of skin tissues

对于人体组织介电参数的提取,目前多采用四阶 Cole-Cole 方程来提取<sup>[22]</sup>,假设头部组织各部分介质分布均匀,在40.68 MHz下的各组织相对介电常数和电导率<sup>[23]</sup>,如表1所示。

**1.2.2 电极模型** 电极头模型参考目前在射频美容中广泛使用的点阵射频电极。在点阵射频电极头部位电极以阵列的形式排列,可在皮肤组织上形成矩阵式的治疗区,射频电流可在微针之间流动,每对电极都可形成一个双级射频的闭合回路<sup>[24]</sup>。对于电极头的建模,材料采用医用级430不锈钢,每个小电极头为底面半径0.8 mm、高为3.0 mm的圆柱体,电极头与电极头之间间隔为1.0 mm。与实际应用中的电极头所不同的是在仿真时仅在受损组织部分加入电极头,而在正常皮肤组织范围内没有放置电极头;并且为了简化模型,电极头以圆柱体来代替实际应用中的圆锥体。所采用的射频频率为目前在射频美容中

表1 40.68 MHz下人体皮肤组织介电参数  
Tab.1 Dielectric parameters of human skin tissues at 40.68 MHz

人体组织	相对介电常数	电导率/ $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$
脑白质	85.78	0.25
脑灰质	126.71	0.45
脑脊液	103.44	2.03
颅骨	35.90	0.15
皮下组织层	15.00	0.50
表皮真皮层	102.62	1.18
角质层	94.59	0.85
受损组织	56.25	0.75

常用的40.68 MHz,功率为40 W<sup>[25]</sup>,所建立的模型如图3所示。

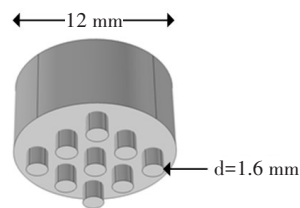


图3 电极头模型  
Fig.3 Electrode head model

**1.2.3 COMSOL 简介** COMSOL Multiphysics 是以有限元法为基础,通过求解偏微分方程或偏微分方程组来实现真实物理现象的高级多物理场数值仿真软件,在工程计算、科学研究、模拟科学等领域有着广泛的应用。在利用 COMSOL 建立仿真模型时,需要先建立适当的几何模型,再对几何模型中不同的边界设置适当的边界条件和激励,并对模型进行网格划分,最后选择求解器进行计算并通过后处理得出仿真结果。

本文计算基于实验室所购买的正版 COMSOL Multiphysics 5.4 版本 RF 模块中的“电磁波、频域”物理场接口,有限元离散后共包含 449 531 个单元,求解的自由度约为 300 万,计算使用的计算机为 4 核、16 GB,计算时间为 30 min 内。

1.3 ICNIRP 标准

为防止电磁辐射对人体健康造成不利的影响,国际非电离辐射防护委员会在 1998 年建立了《限制时变电场、磁场和电磁场暴露的导则》来限制电磁暴露<sup>[12]</sup>。由于人体组织为有耗介质,因此会导致人体吸收和耗散能量,也就是人体组织的升温加热,这种加热的物理过程在生物计量学中常用 SAR 来表示<sup>[11]</sup>。在 ICNIRP 导则中,分别对职业暴露和公众暴露在不同频率段给出了相关限值。在仿真中取射频美容的频率为 40.68 MHz,针对该频率,ICNIRP 导则所给出的限值如表 2 所示。

表2 ICNIRP 导则限值  
Tab.2 Limits provided by ICNIRP guidelines

暴露类别	磁场强度/A·m <sup>-1</sup>	电场强度/V·m <sup>-1</sup>	SAR(头部和躯干)/W·kg <sup>-1</sup>
	(1~400 MHz)	(1~400 MHz)	(10 MHz~10 GHz)
公众暴露	0.073	28	2
职业暴露	0.160	61	10

2 结果

2.1 头组织中磁场强度

为了探究磁场在人脑中的分布,对头部组织在

yz 平面做切片,切片垂直于电极,通过计算可得在头组织纵向切片上磁场分布如图 4 所示。由于所采用的射频电极头为点阵射频,在电极头表面电极以阵列的方式排列,每对电极在这其中起着一对双极射频的作用,电流从一级流出,再从另一极流入。而在整个电极头上,磁场是向四周同时发散的。因此在分布图上,磁场从电极发出,再回到电极。

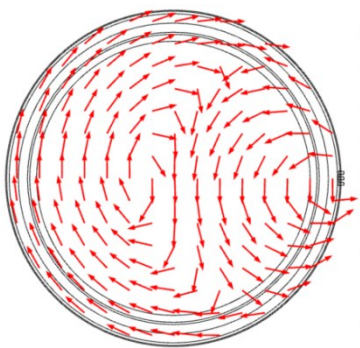


图4 头组织|H|分布图  
Fig.4 Distribution of |H| in head tissues

在仿真模型中,由于需要利用射频电流所产生的高温杀死受损的皮肤组织,所以将电极头沿 y 轴方向嵌入到皮肤组织约 1 mm。为了得到磁场强度沿 y 轴方向(模型中心为原点)在脑组织内部的变化情况,在模型内部设置一沿 y 轴方向长为 60 mm 的截线,计算在脑组织中沿 y 轴的磁场分布情况,结果如图 5 所示。可看出磁场强度在脑组织内部最大值位于距离脑组织边缘 20 mm 处,最大值约为 0.063 A/m,没有超出 ICNIRP 安全限值 0.073 A/m,处于安全标准阈值内。

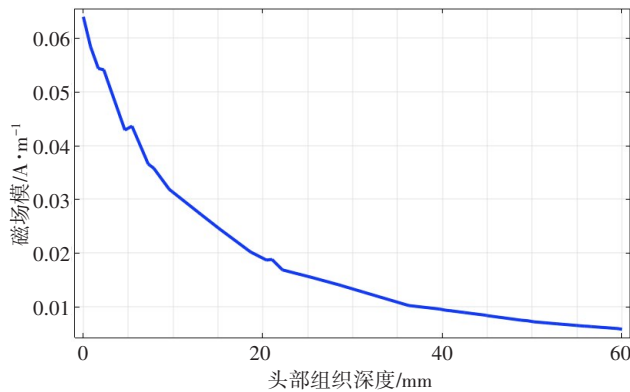


图5 脑组织中|H|沿y轴分布图  
Fig.5 Distribution of |H| in the brain along the y axis

除了需要对磁场强度在 xy 平面上的分布情况进行分析,还需要分析在垂直于电极头刺入皮肤的方向(xz 平面)的分布情况。因此对头模型的中心位置



取一切片进行分析。在脑组织中 $y_1=60\text{ mm}$ 处作一切片,通过分析计算得出切片的磁场分布如图6所示。

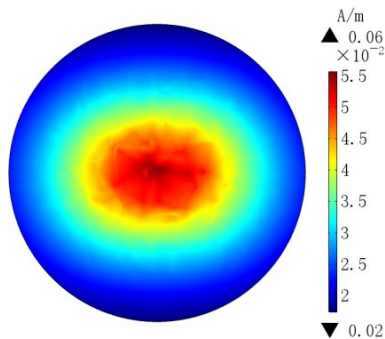


图6 脑组织 $|H|$ 切片图  
Fig.6 The slice of  $|H|$  at cross section in brain tissues

由于人体不属于磁性物质,因此人体组织介电特性的不同不影响磁场的传播。观察可得,从切片中央至外围,和电极的距离越大,磁场的分布就越大,同时磁场值也越小。在切片中央部位磁场最大值约为 $0.06\text{ A/m}$ ,该部位的磁场最大值没有超出ICNIRP的标准限值 $0.073\text{ A/m}$ ,处于安全标准范围内。

2.2 头组织中电场强度

为了探究电场在人脑中的分布,对头部组织在 $xy$ 平面做切片,切片垂直于电极,通过计算可得在头组织纵向切片上电场分布如图7所示。同磁场分布原理类似,在整个电极头上,电场是向四周同时发散的。因此在分布图上,电场同样从电极发出,再回到电极。

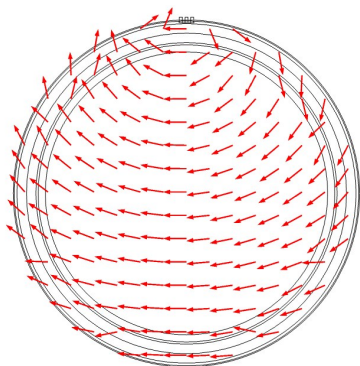


图7 头组织 $|E|$ 分布图  
Fig.7 Distribution of  $|E|$  in head tissues

对于电场分布,在模型内部设置一沿 $y$ 轴方向长为 $80\text{ mm}$ 的截线,截线的长度设置为脑组织的半径,通过计算可得出电场沿该截线在脑组织内部的分布图,结果如图8所示。可看出电场强度在脑组织内部

最大值约为 $5.5\text{ V/m}$ ,没有超出ICNIRP安全限值的 $28\text{ V/m}$ ,约为ICNIRP安全限值的 $19.64\%$ ,处于安全标准内。

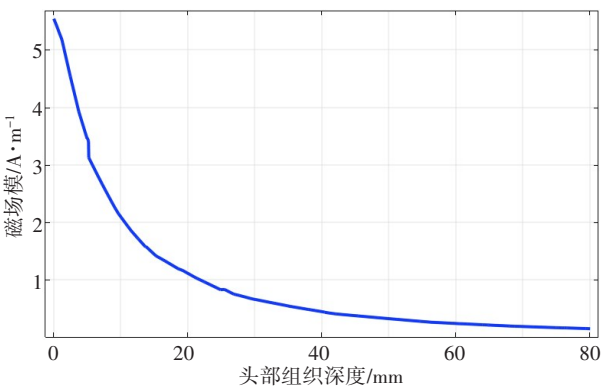


图8 脑组织中 $|E|$ 沿 $y$ 轴分布图  
Fig.8 Distribution of  $|E|$  in the brain along the  $y$  axis

脑组织作为中枢神经最重要的部分,需要更清晰地得出大脑内的电磁场分布规律,因此在脑脊液、脑灰质和脑白质部位分别取了3个切片,脑脊液切片位于 $y_1=79\text{ mm}$ 处,脑灰质切片位于 $y_2=77\text{ mm}$ 处,脑脊液切片位于 $y_3=40\text{ mm}$ 处,切片平面均位于 $xz$ 平面上。通过计算各个切片电场分布图如图9所示。观察可得,从脑脊液至脑灰质,再到脑白质,电场的分布就越大,同时电场值也越小。在脑脊液部位电场切片最大值为 $5.24\text{ V/m}$ ,在脑灰质部位切片电场最大值为 $3.81\text{ V/m}$ ,在脑白质部位切片电场最大值为 $1.11\text{ V/m}$ 。3个部位的最大电场值均没有超出ICNIRP的标准限值,分别为标准限值的 $18.71\%$ 、 $13.60\%$ 和 $3.96\%$ 。

2.3 头组织中SAR

SAR表示单位时间内单位质量的人体组织所吸收的电磁功率,与人体的电导率与密度有关。在人头组织沿 $y$ 轴的SAR值分布曲线如图10所示。可以看出SAR值最大约为 $0.03\text{ W/kg}$ ,没有超出ICNIRP安全限值 $2\text{ W/kg}$ ,处于安全标准范围内。

在代表脑脊液、脑灰质和脑白质的平面上SAR的分布如图11所示。由图可得,3个部位切片的SAR最大值依次为 $0.03$ 、 $3.12\times 10^{-3}$ 和 $1.48\times 10^{-4}\text{ W/kg}$ ,3个部位的磁场最大值均没有超出ICNIRP的标准 $2\text{ W/kg}$ ,处于安全标准的范围内。

3 结 论

本文主要研究人在接受射频美容治疗时,射频美容所使用的多级射频电极头在人体内所产生的电磁场对人体头部(尤其是中枢神经系统)的安全是否

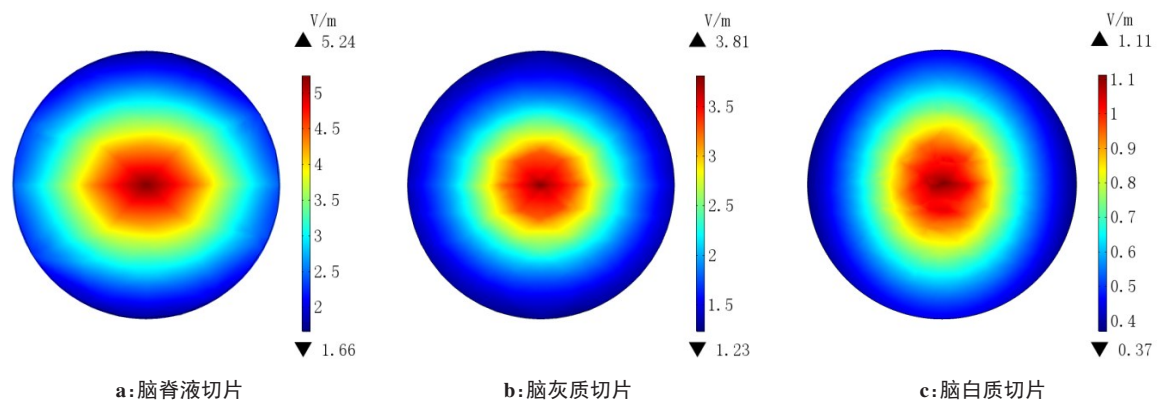


图9 脑组织|E|切片图

Fig.9 The slices of |E| at cross section in brain tissues

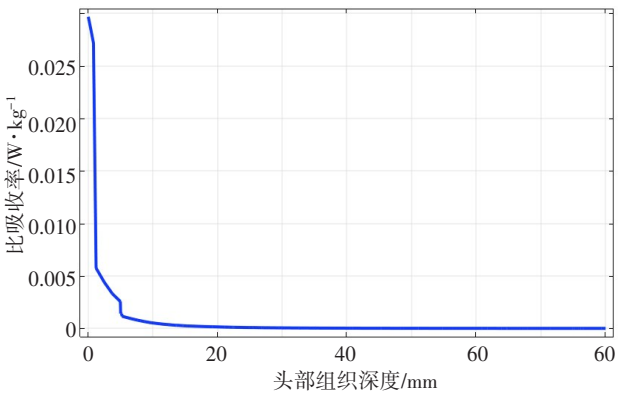


图10 脑组织中SAR沿y轴分布图

Fig.10 Distribution of SAR in the brain along the y axis

有危害。结果表明:(1)对于磁场的分布,无论在xy平面还是xz平面,磁场最大值在距离电极最近的部位。在垂直面磁场最大值在距脑组织边缘20 mm处,磁场最大值为0.06 A/m,约为ICNIRP安全限值的82.19%,处于安全标准以内。(2)对于电场强度的分布,组织深度越深,和电极的距离越大,电场强度就越小,在垂直面电场最大值在脑组织边缘处,电场最大值为5.5 V/m,约为ICNIRP安全限值的19.64%,处于安全标准内。在脑脊液、脑灰质和脑白质3个部位的切片上,电场强度在脑脊液部位最大,最大值为5.24 V/m,约为ICNIRP限值的18.71%,处于安全标

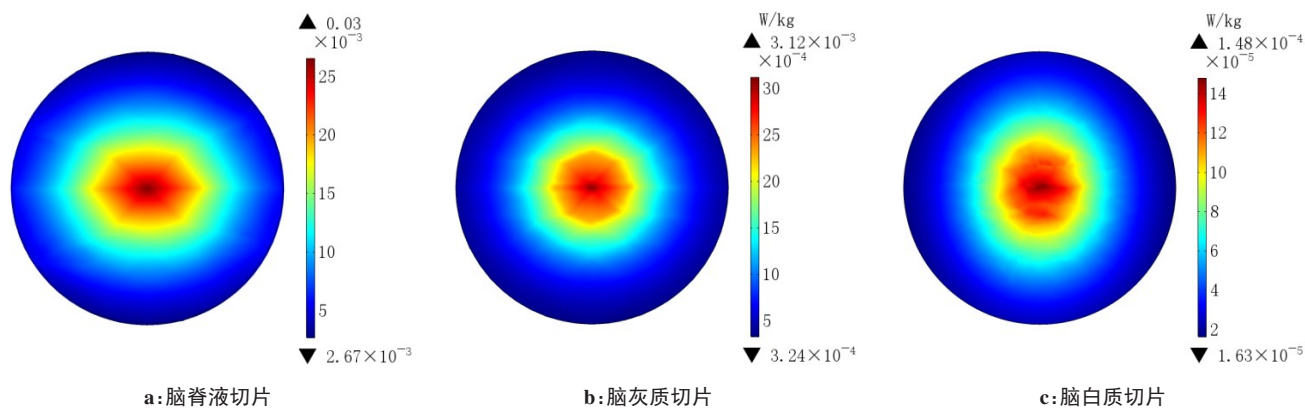


图11 脑组织SAR切片图

Fig.11 The slices of SAR at cross section in brain tissues

准内。(3)对于SAR的分布,SAR值最大处在接近电极处,在垂直面SAR值最大处在脑组织的边缘处,最大约为0.03 W/kg,远小于ICNIRP标准的2 W/kg,处于安全标准范围内。SAR在脑组织中的分布较为均匀,在脑脊液、脑灰质和脑白质3个部位的切片上,SAR值最大处为脑脊液部位,SAR值为0.03 W/kg,约为ICNIRP限值的1.5%,处于安全标准内。

研究表明脑组织中的磁场、电场和SAR值均小

于ICNIRP标准限值,说明射频美容仪所使用的多级射频电极头在人体内所产生的电磁场对人体头部没有造成伤害。本研究的结果能够较为真实地反映射频美容电极的辐射情况,但还存在不足之处,例如本文仅对40.68 MHz下的多级点阵射频进行研究,未对其他频率下的其他种类的射频美容电极进行研究,同时还需更加详细地对人体进行分析。

## 【参考文献】

- [1] 彭清涛,王京,夏本立,等.应用生物体微弱磁场检测技术对某部电磁辐射作业人员健康评估研究[J].中国医学物理学杂志,2013,30(3): 4189-4193.
- PENG Q T, WANG J, XIA B L, et al. Advances in auxiliary diagnosis of neuropsychiatric diseases based on machine learning[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2013, 30(3): 4189-4193.
- [2] 赵镇南,李丰彤,王海磐.双频双对电极射频热疗比吸收率及温度场模拟[J].生物医学工程学杂志,2006,23(1): 16-20.
- ZHAO Z N, LI F T, WANG H P. Simulation of SAR and temperature distribution for tumor RF thermotherapy with double-frequencies and double-plates[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2006, 23(1): 16-20.
- [3] 周文颖,逯迈.地铁司机室双八木天线射频电磁场暴露的健康风险评估[J].高电压技术,2016,42(8): 2549-2557.
- ZHOU W Y, LU M. Health risk assessment of the radio frequency electromagnetic field generated by subway cab's double yagi-uda antennas[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(8): 2549-2557.
- [4] 郭庶,彭晓武,刘芸,等.极低频电磁场和射频电磁辐射对人体健康影响的研究进展[J].环境与健康杂志,2011,28(5): 463-466.
- GUO S, PENG X W, LIU Y, et al. Human health effects of radio frequency and extremely low frequency electromagnetic radiation: a review of recent studies[J]. Journal of Environment and Health, 2011, 28(5): 463-466.
- [5] 段临林,廖艳艳,喻慧,等.射频电磁辐射遗传学毒性的研究进展[J].军事医学,2017,41(3): 237-241.
- DUAN L L, LIAO Y Y, YU H, et al. Genotoxicity produced by radiofrequency electromagnetic radiations: research advances [J]. Military Medical Sciences, 2017, 41(3): 237-241.
- [6] 林锦文,刘合,张杰,等.电磁脉冲对大鼠心脏和肝脏损伤及修复的影响[J].辐射研究与辐射工艺学报,2015,33(6): 060201.
- LIN J W, LIU H, ZHANG J, et al. Effects of electromagnetic pulses on the heart and liver of rat and subsequent self-recovery[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2015, 33(6): 060201.
- [7] ATTWELL D. Interaction of low frequency electric fields with the nervous system: the retina as a model system [J]. Radiat Prot Dosimetry, 2003, 106(4): 341-348.
- [8] FEYCHTING M, FLODERUS B, AHLBOM A. Parental occupational exposure to magnetic fields and childhood cancer (Sweden) [J]. Cancer Causes Control, 2000, 11(2): 151-156.
- [9] ALICJA B, MAREK Z, AGATA S, et al. Subjective symptoms reported by people living in the vicinity of cellular phone base stations: review[J]. Med Pr, 2004, 55(2): 345-351.
- [10] HUTTER H P, MOSHAMMER H, WALLNER P, et al. Subjective symptoms, sleeping problems, and cognitive performance in subjects living near mobile phone base stations[J]. Occup Environ Med, 2006, 63(5): 307-313.
- [11] 白杨,左胜,张玉,等.基于高阶有限元方法的人体头部比吸收率分析[J].微波学报,2019,35(1): 79-82.
- BAI Y, ZUO S, ZHANG Y, et al. Analysis of human head specific absorption rate based on the higher order finite element method[J]. Journal of Microwaves, 2019, 35(1): 79-82.
- [12] ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (up to 300 GHz) [J]. Health Phys, 1998, 74(4): 494-522.
- [13] ALAM M, LEVY R, PAJVANI U, et al. Safety of radiofrequency treatment over human skin previously injected with medium-term injectable soft-tissue augmentation materials: a controlled pilot trial [J]. Laser Surg Med, 2010, 39 (5): 468.
- [14] SUH D H, BYUN E J, LEE S J, et al. Clinical efficacy and safety evaluation of a novel fractional unipolar radiofrequency device on facial tightening: a preliminary report [J]. J Cosmet Dermatol, 2017, 16(2): 199-204.
- [15] 周成霞,孙林潮,王一臣,等.点阵双极射频面部皮肤年轻化治疗临床疗效及安全性观察[J].中国美容医学杂志,2013,22 (21): 2117-2119.
- ZHOU C X, SUN L C, WANG Y C, et al. The efficacy and safety of fractional rejuvenation using a bipolar radio frequency system [J]. Chinese Journal of Aesthetic Medicine, 2013, 22 (21): 2117-2119.
- [16] RUSH S, DRISCOLL D A. Current distribution in the brain from surface electrodes [J]. Anesth Analg, 1968, 47(6): 717-723.
- [17] 吴祖河,刘光启,王健,等. TES 的人体头部3维有限元模型构建[J].清华大学学报(自然科学版),2014,54(9): 1220-1224.
- WU Z H, LIU G Q, WANG J, et al. Human head 3-D finite element model for transcranial electric stimulation [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2014, 54(9): 1220-1224.
- [18] 宾果,汪天富,秦璟,等.结构MRI对青少年癫痫皮质厚度的研究进展[J].国际医学放射学杂志,2016,39(2): 123-126.
- BIN G, WANG T F, QIN J, et al. An overview on the research of cortical thickness of juvenile epilepsy based on structural magnetic resonance [J]. International Journal of Medical Radiology, 2016, 39 (2): 123-126.
- [19] HUCLOVA S, BAUMANN D, TALARY M S, et al. Sensitivity and specificity analysis of fringing-field dielectric spectroscopy applied to a multi-layer system modelling the human skin [J]. Phys Med Biol, 2011, 56(24): 7777-7793.
- [20] GABRIEL C, BENTALL R H, GRANT E H. Comparison of the dielectric properties of normal and wounded human skin material [J]. Bioelectromagnetics, 1987, 8(1): 23-27.
- [21] HUCLOVA S, ERNI D, FRÖHLICH J. Modelling and validation of dielectric properties of human skin in the MHz region focusing on skin layer morphology and material composition [J]. J Phys D Appl Phys, 2012, 45(45): 025301.
- [22] COLE K S, COLE R H. Dispersion and absorption in dielectrics: I. alternating current characteristics [J]. J Chem Phys, 1941, 4: 341-351.
- [23] GABRIEL S, LAU R W, GABRIEL C. The dielectric properties of biological tissues: III parametric models for the dielectric spectrum of tissues [J]. Phys Med Biol, 1996, 41(11): 2271-2293.
- [24] 李曼,朱威.点阵射频的临床应用进展[J].实用皮肤病学杂志,2018,11(6): 353-356.
- LI M, ZHU W. Clinical application progress of fractional radiofrequency [J]. Journal of Practical Dermatology, 2018, 11(6): 353-356.
- [25] 张庆瑞,尹璐,耿庚.射频技术面部除皱的疗效分析[J].中华医学美容杂志,2011,17(2): 144-145.
- ZHANG Q R, YIN L, GENG G. Analysis of the effect of radio frequency technology on face and neck wrinkle removal [J]. Chinese Journal of Medical Aesthetics and Cosmetology, 2011, 17(2): 144-145.

(编辑:陈丽霞)