

不同脉冲参数的微波对大鼠耳蜗 热应力波影响的理论仿真

王愉炜 张杰

(华东师范大学物理学院 上海磁共振重点实验室 上海 200241)

摘要 通过数值模拟的手段研究了脉冲微波辐照引起的大鼠听觉效应。通过建立基于三维解剖结构的大鼠模型,用时域有限差分(FDTD)方法计算了不同上升沿和脉宽的微波辐照在大鼠体内的电磁能量吸收剂量。在此基础上,采用绝热近似,用FDTD方法进一步仿真了微波吸收产生的温升在大鼠体内激发的应力波。结果表明,在一定的脉冲宽度和辐照方式下的微波辐照时,大鼠模型体内激发的应力波(热声波)谱在人(鼠)的听觉系统可感知的频率范围内。根据仿真数据推算,在脉宽20 μs 的EyHx辐照方式下,大鼠微波听觉效应阈值功率为0.6 kW/m^2 ,这一结果与相关人体微波听觉效应的功率阈值接近。

关键词 微波听觉,时域有限差分法,耳蜗,热应力波

中图分类号 Q64

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0093

CSTR: 32195.14.j.JRRRP.1000-3436.2025-0093

引用该文:

王愉炜,张杰.不同脉冲参数的微波对大鼠耳蜗热应力波影响的理论仿真[J].辐射研究与辐射工艺学报,XXXX,XX(X):XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0093.

WANG Yuwei, ZHANG Jie. Theoretical simulation of the effects of microwaves with different pulse parameters on thermal stress waves in the cochlea of rats[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, XXXX, XX(X): XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0093.



Theoretical simulation of the effects of microwaves with different pulse parameters on thermal stress waves in the cochlea of rats

WANG Yuwei ZHANG Jie

(Shanghai Key Laboratory of Magnetic Resonance, School of Physics, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

ABSTRACT A numerical simulation study was conducted to investigate the auditory effects in rats induced by pulsed microwave exposure. Based on a three-dimensional anatomically realistic rat model, the finite-difference time-domain (FDTD) method was employed to calculate the electromagnetic energy absorption in the rat body under microwave irradiation at different rise times and pulse widths. Subsequently, using the adiabatic approximation, the FDTD method was further applied to simulate the stress waves generated by the temperature rise caused by microwave absorption in the rat body. The results indicate that under specific pulse widths and irradiation conditions, the spectrum of the stress waves (thermoacoustic waves) excited in the rat model falls within the frequency range

第一作者:王愉炜,男,1999年12月出生,2022年6月毕业于华东师范大学,现为华东师范大学在读硕士研究生,无线电物理专业,E-mail: 2451096875@qq.com

通信作者:张杰,博士,高级工程师,E-mail: jzhang@phy.ecnu.edu.cn

收稿日期:初稿 2025-09-30;修回 2025-12-01

First author: WANG Yuwei (male) was born in December 1999, graduated from East China Normal University in June 2022. Now he is a graduate student at East China Normal University, majoring in radio physics, E-mail: 2451096875@qq.com

Corresponding author: ZHANG Jie, doctoral degree, senior engineer, E-mail: jzhang@phy.ecnu.edu.cn

Received 30 September 2025; accepted 01 December 2025

perceivable by the human (or rat) auditory system. Based on the simulation data, the threshold power for the microwave auditory effect in rats was estimated to be 0.6 kW/m^2 under EyHx irradiation with a pulse width of $20 \mu\text{s}$, a result that is consistent with the power threshold reported for the microwave auditory effect in humans.

KEYWORDS Microwave hearing, Finite-difference time-domain method, Cochlea, Thermal stress wave
CLC Q64

流行病学研究和动物实验研究表明,电磁波可能致癌^[1],国际癌症研究机构(International agency for research on cancer, IARC)已将电磁辐照列为2B类可疑致癌物^[2]。国际非电离辐射委员会(International commission non-ionizing radiation protection, ICNIRP)于1998年给出了从低频到高频的电磁安全推荐限值^[3],并2020年进行了修订^[4]。科学家们围绕着这个科学问题开展了电磁辐照对活体动物和细胞等影响的研究^[5-7]。电磁辐照参数为重复频率、主频、幅度、脉宽、上升沿和下降沿等,电磁辐照参数不同,产生的生物效应也不同,这是由于不同物理量对电磁生物效应的贡献不同^[8-9]。电磁场极化方向对生物效应有较大的影响,不同极化方向在生物体内的比吸收率(Specific absorption rate, SAR)值相差较大^[10]。

ICNIRP报告指出,目前唯一确认的电磁生物效应为微波听觉。微波听觉在20世纪70年代被发现,是微波能量通过电磁感应产生振动,刺激耳蜗内的毛细胞从而引发听觉反应的现象^[11]。Wilson等^[12]在1980年通过实验对大鼠听觉中枢受到微波辐照的影响进行了证明。不同频率、脉宽、上升(下降)沿等参数的脉冲微波,可能会对微波听觉产生不同的影响^[13],但是对此相关研究较少。为此,本文通过建立高精度的三维耳蜗电磁-热-声多物理场耦合模型,以系统探究了脉冲微波辐照的上升沿和脉宽对其在大鼠耳蜗处产生的声音信号的影响,为电磁安全和应用提供了参考。

1 动物模型及计算方法

1.1 动物模型

雄性SD(Sprague Dawley)大鼠模型(498 g,瑞士IT'IS公司),如图1所示,空间分辨率为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 。大鼠模型含皮肤、脂肪、心脏等66种组织器官,其电导率和相对介电常数来自IT'IS Foundation的器官介电参数数据库^[14]。



图1 SD大鼠模型
Fig.1 The SD rat model

1.2 计算方法

使用时域有限差分算法(FDTD)计算大鼠体内的电磁场分布^[15],边界选用完美匹配介质层(Perfectly matched layer, PML)^[16]。根据电场计算结果,计算出SAR后,用生物传热方程计算生物组织在脉冲微波辐射下的温升。生物传热方程^[17]和对应的边界条件如式(1)、(2)。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = K \nabla^2 T + \rho \text{SAR} + A - B(T - T_b) \quad (1)$$

$$-K \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = H(T - T_a) \quad (2)$$

式中: ρ 为组织密度; C_p 为热容; K 为热导率; A 为代谢热; B 和血流传热有关; H 是环境传热系数。 T , T_a 和 T_b 分别为组织温度、环境温度和血液温度。

热弹性波热应力方程和粒子运动方程来自Lifshitz等^[18]的研究,组织物性参数如表1所示,分别根据大鼠模型中对应组织的类型进行空间赋值,具体通过组织标签与参数表映射实现。根据式(1)和(2),把相关系数代入方程分析可知,由生物传热导致的温度变化发生的时间尺度一般需要毫秒量级以上,而由于微波能量吸收导致的组织温升通常发生在微秒甚至更短时间,因此,在后面的计算中取绝热近似,即认为在热应力波产生的过程中没有热传导发生是合理的。

脉冲微波主频4 GHz,入射方式为迎头辐照和侧面辐照,分别记为EyHx和EzHx,脉冲波形为式(3)。

$$U(t) = \text{erf}[at] - \text{erf}[a(t - t_0)] \quad (3)$$

其中,脉冲上升沿参数 a 分别设置为 $5 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ 和 $2.5 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$,将脉宽 t_0 分别设置为 $10 \mu\text{s}$ 、 $20 \mu\text{s}$ 、 $80 \mu\text{s}$ 。

表1 热应力波方程中的物性参数^[19]
Table 1 Physical property parameters in the thermal stress wave equation^[19]

物性参数 Physical property parameters	密度 / (kg·m ⁻³) Density	比热 / (J·(kg·°C) ⁻¹) Specific heat	第一拉梅常数 / GPa The first lame constant	第二拉梅常数 / GPa The second lame constant	热膨胀系数 / °C ⁻¹ Thermal expansivity
软组织 Soft tissue	1 050	3 860	2.240	1.052×10 ⁻⁶	4.100×10 ⁻⁵
骨质 Sclerotin	1 070	1 600	6.923	4.615	1.06×10 ⁻⁵

2 计算结果

2.1 大鼠体内的 SAR

仿真计算微波的电场振幅为 1 V/m, 辐照功率约 0.133 mW/cm²。大鼠体内的 SAR 值分布如图 2

和图 3 所示。由图 3 可知, 鼠耳朵、尾巴处的 SAR 值明显比其他体内组织器官的 SAR 值大, 入射方式不同, SAR 值分布差异较大。如大鼠尾部, EyHx 的辐照方式比 EzHx 的辐照方式产生的 SAR 值小。EyHx 入射情况全身最大 SAR 值为 0.283 mW/kg, EzHx 入射情况全身最大 SAR 值为 0.258 mW/kg。

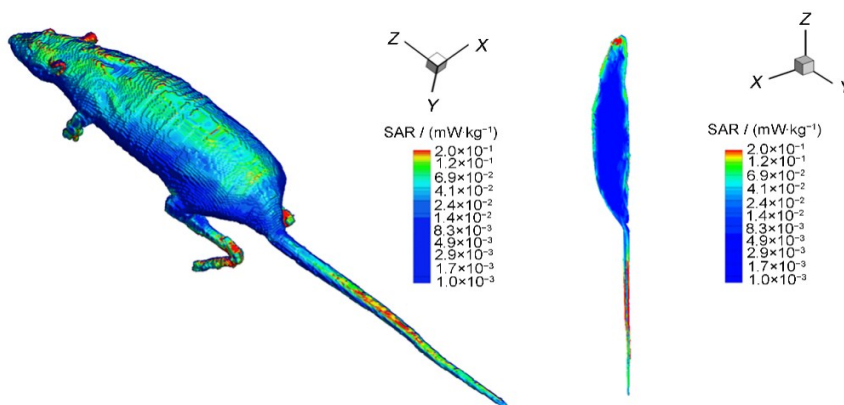


图2 EyHx照射时大鼠体内 SAR 值分布
Fig.2 SAR distribution in rats under EyHx irradiation

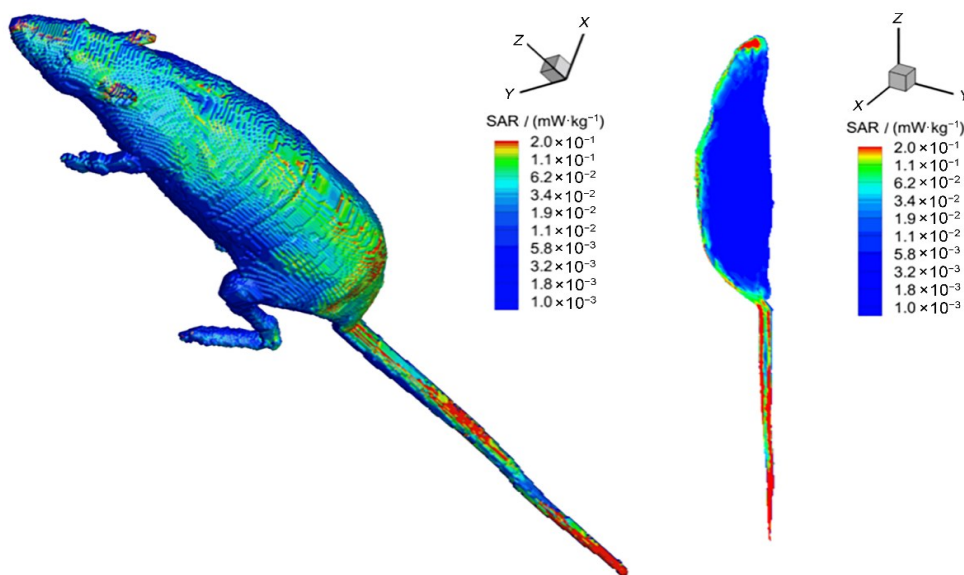


图3 EzHx照射时大鼠体内 SAR 值分布
Fig.3 SAR distribution in rats under EzHx irradiation

2.2 右耳耳蜗处热应力波

图4为4 GHz微波迎头辐照,脉宽 t_0 为20 μs ,脉冲上升沿参数 α 为 $5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 的脉冲调制下的左右耳

蜗处的应力波波形和频谱图。可以看出,在主峰范围内两者表现出高度的相似性,右耳产生的听觉在大部分频率下都强于左耳。

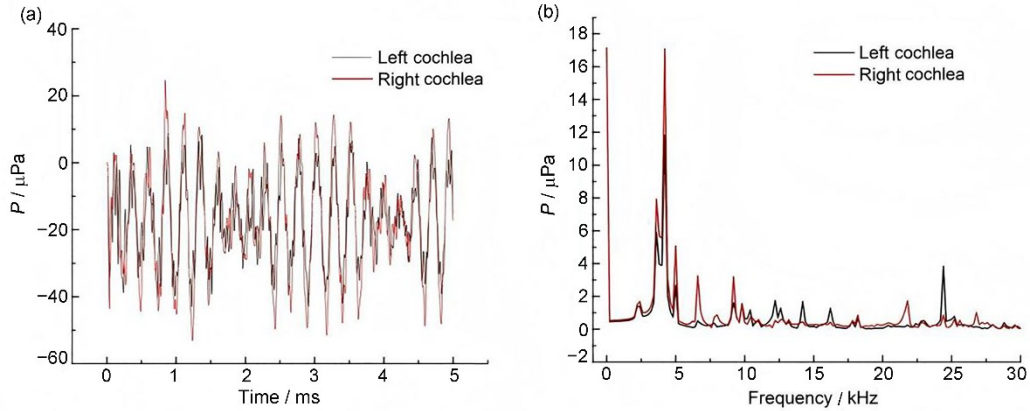


图4 左、右耳蜗的应力波区别:(a)应力波波形;(b)应力波频谱(彩色见网络版)

Fig.4 Differences in stress waves between the left and right cochlea: (a) stress wave waveforms; (b) stress wave spectrum (color online)

图5为4 GHz脉冲微波在不同辐照方式下右耳耳蜗处的应力波压强 P 的波形和频谱图。由图5可知,在所考虑的入射功率为 0.133 mW/cm^2 时,应力幅值均在 $70 \mu\text{Pa}$ 以内,能量主要集中在 10 kHz 以下的几个离散的频点上。

越高。但同时,更陡的脉冲所对应的应力波的幅度也较小。

不同脉冲上升沿的微波辐照产生的应力波波形和频谱如图6所示(脉宽为20 μs)。由图6可知,脉冲上升沿对应应力波谱的改变比对幅度的影响显著得多。脉冲上升沿越陡,应力波主要谱峰的频率

越高。但同时,更陡的脉冲所对应的应力波的幅度也较小。EyHx辐照方式下,不同脉宽的微波辐照产生的应力波波形和频谱如图7所示。结果表明,脉宽对应应力波的强度存在比较明显的影响:在所考虑的入射功率范围内,脉宽和应力波最大幅度之间存在近似的线性增长关系。虽然脉宽对应应力波频谱有一定影响(例如在图7(b)虚线圈中 10 kHz 附近的频谱差异),但效果远不如对幅度的影响显著。

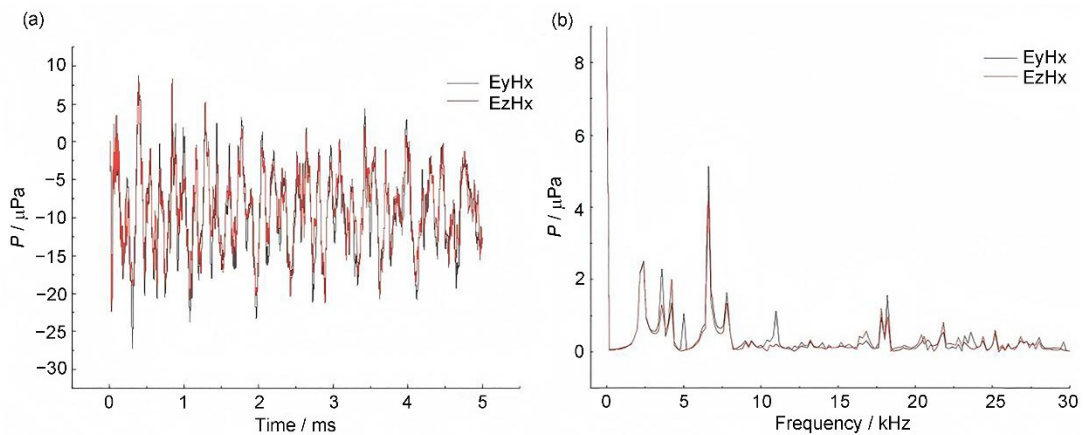


图5 不同辐照方式下,右耳耳蜗处的应力波:(a)应力波波形;(b)应力波频谱

Fig.5 Stress waves at the right cochlea under different irradiation methods: (a) stress wave shape; (b) stress wave spectra

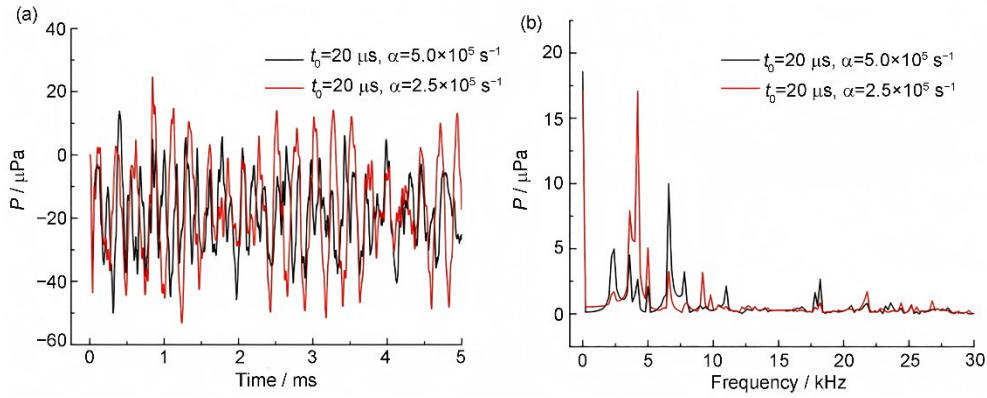


图6 不同上升沿的脉冲下,右耳耳蜗处的应力波:(a)应力波波形;(b)应力波频谱
Fig.6 Stress waves emerging from the right cochlea under microwave irradiation of different ascending edges: (a) stress wave shape; (b) stress wave spectra

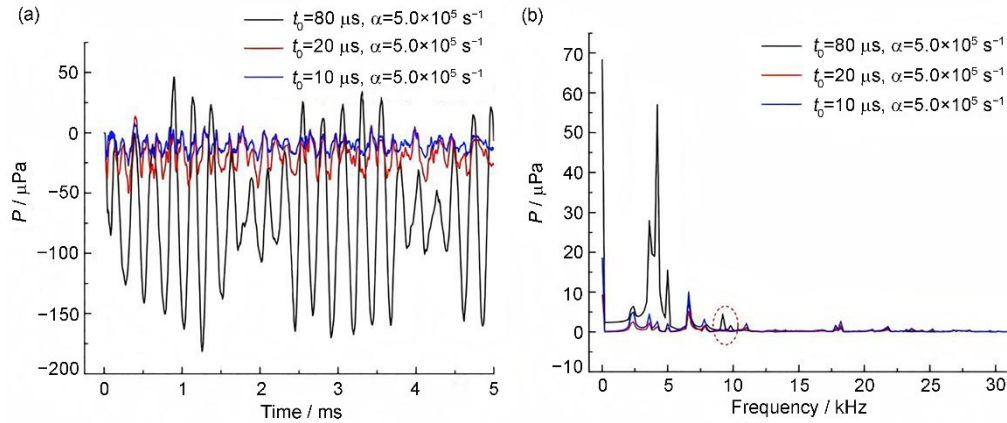


图7 不同脉宽的微波辐照下,耳蜗处应力波:(a)应力波波形;(b)应力波频谱
Fig.7 Stress waves at the cochlea under microwaves irradiation of different pulse widths: (a) stress wave shape; (b) stress wave spectra

3 结论

本文通过建立基于三维解剖结构的大鼠模型,用FDTD方法计算了不同频率的微波辐照在大鼠体内的电磁能量吸收情况。采用绝热近似,仿真了微波吸收产生的温升在大鼠体内激发的应力波。结果表明,大鼠左右耳蜗应力波一致,热声波(应力波)的主要频率均在10 kHz以内,处于鼠听觉系统可感知的频率范围;辐照方式主要影响了SAR值分布,对于热应力波影响较小;脉冲上升沿越大,产生的应力波高频成分增多,但是所占能量减小;脉宽增加时,热应力波幅值明显增加,但是变化较小。

尽管大鼠与人类在听觉频率范围上存在差异,但目前缺乏大鼠骨导声阈值的直接实验数据。本研究暂引用人体阈值作为近似,后续研究将结合大鼠听觉生理数据进一步验证。据文献[20]报道,7~10 kHz范围内人的骨导声波压强的听觉阈值大约在20 mPa。假设鼠的听觉阈值与人相同,当脉宽为

20 μs, EyHx 辐照方式时引起鼠听觉效应的功率约为60 mW/cm²(或0.6 kW/m²)。根据文献[19]报道,人耳在3 GHz脉冲(脉宽为10~15 μs)微波暴露下的听觉阈值为2.25~20 kW/m²,这个阈值明显高于我们的计算。考虑到模型的复杂性,并假设人和鼠的听觉声压阈值相同为前提,本研究对引起鼠听觉的微波阈值功率的估算值和人体听觉的实验值相差在一个数量级之内是可信的。这将为进一步理论和实验分析微波热效应及其微波安全提供研究方法。

作者贡献声明 王愉炜负责文献查阅、理论计算、实验和论文初稿写作;张杰负责论文的最终修订、审阅及定稿等。所有作者均对稿件的最终版本给予了认可。

参考文献

- 1 Lin J C. Carcinogenesis from chronic exposure to radio-frequency radiation[J]. *Frontiers in Public Health*, 2022, **10**: 1042478. DOI: 10.3389/fpubh.2022.1042478.

- 2 International Agency for Research on Cancer. IARC classifies radiofrequency electromagnetic fields as possibly carcinogenic to humans[EB/OL]. (2011-05-11) [2025-09-30]. https://www.iarc.who.int/en/media-centre/pr/2011/pdfs/pr208_E.pdf.
- 3 International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. ICNIRP guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz) [J]. *Health Physics*, 1998, **74**(4): 494-522.
- 4 International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)[J]. *Health Physics*, 2020, **118**(5): 483-524. DOI: 10.1097/HP.0000000000001210.
- 5 薛一哲, 张兆文, 郭玲, 等. 5G手机辐射对小鼠精子质量和性激素水平的影响[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2023, **41**(1): 010301. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0062.
XUE Yizhe, ZHANG Zhaowen, GUO Ling, *et al.* Effects of 5G mobile phone radiation on sperm quality and sex hormone levels in mice[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2023, **41**(1): 010301. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0062.
- 6 杜玥, 逯迈, 谢主煜. 毫米波5G天线阵列电磁暴露剂量学分析[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2025, **43**(6): 060501. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0040.
DU Yue, LU Mai, XIE Guiyu. Dosimetric analysis of electromagnetic exposure by millimeter-wave 5G antenna arrays[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2025, **43**(6): 060501. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0040.
- 7 Karipidis K, Baaken D, Loney T, *et al.* The effect of exposure to radiofrequency fields on cancer risk in the general and working population: a systematic review of human observational studies - Part II: Less researched outcomes[J]. *Environment International*, 2025, **196**: 109274. DOI: 10.1016/j.envint.2025.109274.
- 8 Schoenbach K H, Joshi R P, Beebe S J, *et al.* A scaling law for membrane permeabilization with nanopulses[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2009, **16**(5): 1224-1235. DOI: 10.1109/TDEI.2009.5293932.
- 9 Choi Y J, Jun Y J, Kim D Y, *et al.* A 3D cell printed muscle construct with tissue-derived bioink for the treatment of volumetric muscle loss[J]. *Biomaterials*, 2019, **206**: 160-169. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2019.03.036.
- 10 Chen B X, Wang J M, Qi H X, *et al.* The specific absorption rate of tissues in rats exposed to electromagnetic plane waves in the frequency range of 0.05–5 GHz and SAR_{wb} in free-moving rats[J]. *Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine*, 2017, **40**(1): 21-28. DOI: 10.1007/s13246-017-0522-x.
- 11 Frey A H. Auditory system response to radio frequency energy. Technical note[J]. *Aerospace Medicine*, 1961, **32**: 1140-1142.
- 12 Wilson B S, Zook J M, Joines W T, *et al.* Alterations in activity at auditory nuclei of the rat induced by exposure to microwave radiation: autoradiographic evidence using [¹⁴C]₂-deoxy-D-glucose[J]. *Brain Research*, 1980, **187**(2): 291-306. DOI: 10.1016/0006-8993(80)90204-8.
- 13 Lin J C. Auditory effects of microwave radiation[M]. Springer, 2021: 1-348. DOI: 10.1007/978-3-030-64544-1.
- 14 ITIS Foundation. Dielectric properties database[DB/OL]. (2024-01-15) [2025-09-30]. <http://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/dielectric-properties>.
- 15 Sullivan D M. Electromagnetic simulation using the FDTD method[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Ltd., 2013: 1-19. DOI: 10.1002/9781118646700.
- 16 Berenger J P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves[J]. *Journal of Computational Physics*, 1994, **114**(2): 185-200. DOI: 10.1006/jeph.1994.1159.
- 17 Pennes H H. Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm[J]. *Journal of Applied Physiology*, 1998, **85**(1): 5-34. DOI: 10.1152/jappl.1998.85.1.5.
- 18 Lifshitz E M, Kosevich A M, Pitaevskii L P. Chapter III - elastic waves[M]. 3rd Ed. *Theory of Elasticity*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 1986: 87-107. DOI: 10.1016/B978-0-08-057069-3.50010-3.
- 19 Lin J C. The microwave auditory effect[J]. *IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology*, 2022, **6**(1): 16-28. DOI: 10.1109/JERM.2021.3062826.
- 20 Watanabe Y, Tanaka T, Taki M, *et al.* FDTD analysis of microwave hearing effect[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2000, **48**(11): 2126-2132. DOI: 10.1109/22.884204.