

测效率可达 2%，并指出 ^{85}Kr 和 ^{81}Kr 的探测主要受到丰同位素与残余气体碰撞电离所产生的本底的影响。

近年来，人们还致力于把 CFBLIS 和 CFBLRIS 技术应用于 ^{14}C 断代和中微子探测，已取得阶段性进展。

参 考 文 献

[1] H. J. Andra, A. Gaupp and W. Wittmann, *Phys. Rev. Lett.*, **31**-8(1973), 501.
[2] M. Dufay, M. Carre, M. L. Gaillard et al., *Phys. Rev. Lett.*, **37**-25(1976), 1678.
[3] S. L. Kaufman, *Opt. Commun.*, **17**-3(1976), 309.
[4] W. H. Wing, G. A. Ruff, W. E. Lamb et al., *Phys. Rev. Lett.*, **36**-25(1976), 1488.
[5] K.-R. Anton, S. L. Kaufman, W. Klempt et al., *Phys. Rev. Lett.*, **40**-10 (1978), 642.
[6] W. C. Martin, R. Zalubas and L. Hagan, *Atomic Energy Levels—The Rare Earth Elements*, NSRDS-NBS 60, NBS, Washington, (1978).

[7] 施伟、陆福全、吴松茂等,物理学报,**41**-4 (1992),568.
[8] O. Poulsen, T. Andersen, S. M. Bentzen et al., *Phys. Rev. A*, **24**-5(1981), 2523.
[9] Lu Fuquan, Wu Songmao, Wang Yansen et al., *Phys. Rev. A*, **44**-3(1991), 1843.
[10] R. T. Short, S. Mannervik, M. Larson et al., Abs. 11th Int. Conf. on At. Phys., Paris,(1988), VIII-15.
[11] Shi Wei, Lu Fuquan, Wu Songmao et al.,*Phys. Rev. A*, **43**-3(1991), 1451.
[12] Jian Jin and D. A. Church, *Phys. Rev. Lett.*, **70**-21(1993), 3213.
[13] A. C. Mueller, F. Buchinger, W. Klempt et al., *Nucl. Phys.*, **A403**-2 (1983), 234.
[14] S. A. Ahmad, W. Klempt, R. Neugart et al., *Phys. Lett. B*, **133**-1(1983), 47; *Nucl. Phys.*, **A 483**-2(1988), 244.
[15] S. A. Aseyev, Yu. A. Kudryavtsev, V. S. Letokhov et al., *J. Phys. B*, **24**-11(1991), 2755.

生 物 电 磁 学

周 兴 旺

施 英

(杭州大学物理系,杭州 310028)

(杭州大学环境科学系,杭州 310028)

摘要 生物电磁学是一门关于电磁学与生物、医学相互渗透的边缘交叉学科,它研究生物系统与电磁场的相互作用。介绍了电磁场对生物的热效应和非热效应,人体电磁能吸收的数值模型和安全辐照标准。

关键词 电磁场,生物效应,模型,环境标准

生物电磁学是一门研究电磁波与生物系统相互作用的边缘交叉学科。最初研究当始于第二次世界大战中许多军用电子设备的出现,特别是雷达微波辐射所产生的生物效应。第二次世界大战结束后,许多科学家对于射频和微波治疗肿瘤及电磁波热疗等问题的研究兴趣逐日增长,并注意到微波辐照下的生物危害效应。1966年国际微波功率协会(IMPI)及其出版物 *Journal of Microwave Power* 开始把相当的力量集中于电磁波在医学、生物学的应用上,1968年美国建立了第一个研究生物电磁场的政府机构——辐射卫生局(BHR)。一定场强电磁波对生物的效应除使组织局部受热升温

外,许多理论提出了低能级电磁波对生物体的非热效应存在的可能性。随着对这种效应争论的发展,美国电气和电子工程师协会微波理论与技术学会(IEEE MTT)于1970年建立了“微波辐射生物效应技术委员会”,并于次年出版了生物电磁学专辑。到1978年,生物电磁学的研究日趋广泛,国际无线电科学协会(URSI)于1979年举行了第一次国际会议,并于1980年创办了“*Bioelectromagnetics*”杂志。此后,URSI每年均举行一次电磁辐射生物效应会议。

随着电磁辐射广泛应用于临床、医学研究及保健等方面,随着通讯设备、工农业、交通、科研,生活中电子电器设备的迅速增加,电磁辐射

物理

对人体健康和其他生物体的危害也愈来愈引起人们的关注。电磁波对生物体的作用机理极为复杂,研究电磁场的生物效应及其机理已成为一门涉及电磁学、生物学、医学等领域的交叉学科——生物电磁学,生物电磁学是生物物理学的一个分支学科。生物电磁学研究的主要内容是电磁场的生物效应及其应用,电磁辐射的生物模型及边值问题和电磁辐射安全卫生标准等。

1 电磁辐射的生物效应

1.1 电磁辐射的生物热效应

电磁辐射的生物热效应已是众所周知,也已被普遍承认。

生物体可简单地视为一个具有电阻、电容的装满生理盐水的大容器,在电磁场作用下,生物组织内的极性分子(如水、氨基酸等介电偶极子)产生取向作用,同周围分子碰撞、摩擦产生热量;同时生物组织内的离子(如 Na^+ , K^+ , Ca^{++} , HCO_3^- 等)在电磁场作用下产生迁移而引起传导电流,该传导电流通过具有一定电阻值的组织时产生欧姆热。在高频电磁场中的生物体导体因电磁感应产生温流而使组织加热。早在 60 年代初,人们就把电磁辐射应用于临床治疗肿瘤和热疗上。现在已没人会怀疑用电磁辐射产生的 $42-45^\circ\text{C}$ 高温可杀灭癌细胞。利用电磁辐射(射频或微波)治疗四肢、肢体、盆腔、管部肿瘤及利用天线插入法治疗组织内及内脏器深部的肿瘤也已收到疗效^[1]。

电磁辐射热效应对生物也会带来危害。当人体暴露于一定强度电磁场中产生的初期热效应会使人发生血压和心律的变化(初期热效应的症状会随电磁场消除而消失)。当人体受较长时间一定强度的电磁辐射所产生的热效应会使脑功能失调、甲状腺机能亢进、头痛、易激动等症状。当人体长期受一定强度电磁辐射所产生的热效应会使心电图失常,易引发白内障、妇女月经失调、男性不育等。当人体受高强度微波辐射还会诱发癌症发病、眼睛失明、体温升

高、心率加快、血压升高、喘气、出汗等症状,严重时还会出现抽搐、呼吸障碍甚至死亡。

1.2 电磁辐射的生物非热效应

在医学上,电磁波的作用使生物体活组织局部升温、组织热化、局部神经感受器产生热反射、毛细血管增加、细胞膜渗透性和新陈代谢改变等热效应还是较好理解的。然而大多数情况下,生物体更多的是暴露于更低强度的电磁场中,许多理论提出了低能量级电磁波对生物组织存在非热效应的可能性。电磁波对生物体的作用产生极低的热能变化,这种极弱的热能马上被周围组织所传导而不会引起组织任何温度变化。但人们也发现这种低能量电磁波作用对人体健康具有重要意义,也能引起神经衰弱及心血管机能紊乱的症状。

极低频电磁场能引起生物表面电荷和感应电势,刺激肌肉神经。人们发现肌肉神经在弱高频电磁场中其兴奋性能增加,实验表明弱微波辐照下会使神经膜输入阻抗减少,而未受到辐照的细胞的输入阻抗是稳定的^[2]。有人把青蛙心脏放在弱短波电磁场中,青蛙心脏跳动变慢,最终停止,当切断电磁波源后心脏又恢复跳动。在弱电磁场中动物条件反射出现反应潜伏期延长。同时实验表明,在相当低强度的微波中就能诱发耳蜗下丘脑的电活动,脑电波也因射频电磁波作用出现异常波。这被认为是射频电磁波作用于生物的体表感受器,兴奋了脑干网状结构的上行系统,最后作用于大脑皮层。人体在低强度电磁辐射后,发现尿中 17-酮固醇含量增高,血液中胆碱脂酶受抑制^[3]。

电磁辐射的生物非热效应往往被各种正常的生物生理变化所掩盖而不能表现出任何症状来,但研究证明对其危害性的担忧已逐渐表现出来。关于非热效应的机理问题已提出多种假设,美国从 1989 年开始一项研究计划,研究 60 Hz 电磁场的致癌作用。目前已有许多国家开始这方面的研究。但这方面的知识目前还是很有限的。

2 生物电磁辐射作用的特征

随着电磁辐射生物效应的研究,要求确定生物体吸收电磁辐射的定量问题。电磁波对生物体的作用极为复杂,因为生物体不同于无生命的电工器材,生物体的体模、介电常数、电导率、生理特征等非常复杂。电磁波与生物体作用的定量表述的物理量主要是电磁能量比吸收率 SAR (specific absorption rate), $SAR \propto E^2$ 。体内场强 E 的分布不仅同人射电磁波的频率、能量密度、波形(脉冲波或连续波)、辐射特征(近场或远场、波阵面等)有关,还同生物体的电特征(电导率、介电常数、对地绝缘情况等)有关,与生物体的轮廓外形、大小尺寸有关,同周围环境条件(温度、湿度、通风情况、反射条件等)也有关。例如人体的皮肤、肌肉、血液等富水组织,骨骼、脂肪等乏水组织及骨髓、脑、肺、内脏器官等中等含水组织的电特性千差万别,对电磁波的吸收、穿透、热导等性能各异,都将影响电磁波的吸收。

随着电子计算机的迅速发展,生物电磁场边值问题数值计算研究也有了许多进展。求解任意形状均匀介质中麦克斯韦方程的矩量法、有限差分法、有限元法、边界元法等工程电磁场边值问题的数值方法已广泛应用于生物电磁学中。例如 Magmann 等的人体区域剖分法将人体剖分为 180 个大小不一的小块^[4],应用近似边界条件,利用矩量法计算了人和动物模型的各小块的 SAR。又如 Schaubert 等改进了 Magmann 的模型,提出对任意形状非均匀介电体的三角剖分单元模型^[5]。矩量法受计算机存储和计算时间的限制,Spiegel 等用时域差分法(FDTD)按人体解剖结构剖分成尺寸为 2×2 cm 的大约 8300 个小块的模型^[6],计算的 SAR 与体模实验结果吻合较好。

生物体还是一个复杂的热调节系统,在电磁场中能把体温自动调节到一个恒定的温度。生物体的热运输模型既要考虑热传导、对流和辐射,也要考虑因血管收缩、出汗、颤抖等生理

热调节因素,不同环境条件下生物体又具有不同的热响应。因此,生物体在电磁场中的热运输方程可表示为^[7]

$$\rho c(\partial T/\partial t) = \nabla(k\Delta T) + (1/V)(Q_M + Q_{EM} - Q_S - Q_R),$$

式中 ρ 为组织质量密度, c 为组织比热, K 为组织热导率, V 为组织体积, Q_M 为新陈代谢产生热, Q_{EM} 为吸收的电磁能量, Q_S 为皮肤蒸发热损耗, Q_R 为肺脏呼吸热损失。为了计算热运输方程, R. J. Spiegel 等建立的模型将人体剖分为 15 个圆柱体和一个球体(头),每个部分又分成四层(中心、肌肉、脂肪、皮肤)。根据这个模型求解上述热方程来确定各剖分因电磁辐射所产生的热分布。

目前对生物体的电磁场边值问题研究和实验却是在线性、静止的生物体模型(与生物组织相似的物质)上进行。

3 电磁辐射的安全卫生标准

由上所述,电磁辐射生物效应的危害除热损害外,还可能非热效应的危害。随着社会发展,电磁辐射污染问题已日渐突出,各国相继制定了电磁辐射安全暴露标准。由表 1 可见,东西方的安全标准有很大差别。前苏联在 1958 年规定射频以上电磁辐射能量密度小于 $10\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时才是安全的。但是,美国学者通过对人和动物的实验结果认为,暴露于 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 能量密度下才会产生有意义的生物效应,并取安全因子为 10,于 1966 年规定将频率范围从 10MHz~100GHz 的电磁辐射安全标准定在 $10\text{mW}/\text{cm}^2$ 。

造成安全暴露标准如此大的差别的关键还是对非热生物效应是否存在,是否对生物造成危害的分歧。随着非热效应及其机理研究的深入,各国都正在不断地修订安全卫生标准。

由于经济、社会的迅速发展,人类生存环境受到电磁波的影响也愈来愈大,电磁波的生物效应对人类的利害关系、电磁波的环境污染程度等等都是亟待研究的问题。(下转第 51 页)