

毫米波辐射安全问题探讨

黄志洵

(北京广播学院微波工程系)

摘 要

现行的微波安全标准主要是根据在分米波、厘米波段的理论与实验研究成果制订的,对于毫米波是否适用就成问题。应当从多方面开展微波生理学的研究工作。毫米波段辐射容易使人的皮肤及皮下组织受损伤。在毫米波高频端,比吸收率大大增高,这一特点非常值得注意。最后,指出可以用级联传输线分析毫米波中比较重要的“空气-衣服-皮肤”三层平板式模型。

一、我国现行微波辐射暂行标准及存在问题

当人体受微波辐射时,有一个“受辐射每日总剂量”的概念。这一概念可溯源于光的生物效应。当一个光子被一分子吸收时,其能量传给分子,使后者由原来状态或基态升到较高能级,成为被激发分子。进一步,它可以同其他分子碰撞而转变为热。此外,该分子也可能以激发分子的状况停留一段时间,从而参加某些化学反应。研究表明,一束光照射的效应不取决于光强,而取决于强度与照射时间的乘积,即照射总剂量。例如,规定光功率密度为 P_d (以 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 为单位),照射时间为 t (以 h 为单位),则照射总剂量为

$$Q = P_d t \quad (\mu\text{W} \cdot \text{h}/\text{cm}^2). \quad (1)$$

取 $P_d = 20 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, $t = 1/4 \text{ h}$, 则有 $Q = 5 \mu\text{W} \cdot \text{h}/\text{cm}^2$ 。这是美国理疗协会对光疗法所规定的“红斑最低平均剂量”^[1]。

在微波波段,存在连续波辐射(例如人在微波实验室里)和脉冲波辐射(例如人受雷达波束的照射)两种情形。据研究,脉冲形态的微波在动物实验中表现出更强的生物活性,因此更为有害。可见,对这两种情况的最大允许剂量应有不同的规定。在我国,1980年4月由技术标准出版社出版了第一个《微波辐射暂行卫生标准》^[2],主编单位是浙江医科大学微波研究室,批准单位是卫生部和第四机械工业部(现电

子工业部)。这一标准的基本思想是:规定一日最大受辐射剂量为 $300 \mu\text{W} \cdot \text{h}/\text{cm}^2$,按工作 6h 考虑,则要求微波功率通量密度为

$$P_d \leq 50 (\mu\text{W}/\text{cm}^2). \quad (2)$$

但是,后来有人提出我国是 8h 工作制,如坚持原剂量,上述不等式就成为

$$P_d \leq 38 (\mu\text{W}/\text{cm}^2).$$

几年后,浙江医科大学在坚持(2)式的情况下,把日剂量要求改为

$$Q \leq 400 (\mu\text{W} \cdot \text{h}/\text{cm}^2). \quad (3)$$

(2),(3)式均针对连续波。由这一思想形成的新标准已写作国家标准,到本文写作时为止还在等待审批。它与 1983 年国防科学技术工业委员会提出的军用标准是一致的。

现在来考虑存在的问题。首先,根据 1966 年 3. B. Гордон^[3]取不同 P_d 所做的实验研究,证明 P_d 的值小时(例如 $10 \text{ mW}/\text{cm}^2$)辐射时间再长动物也不死亡。当 P_d 大时 ($45-150 \text{ mW}/\text{cm}^2$),则致死剂量可确定为 $77.5 \pm 9.5 \text{ mW} \cdot \text{h}/\text{cm}^2$ ^[4]。因而,在低强度辐射下,微波生物效应并非与时间 t 呈积累增进的关系。那么,微波辐射卫生标准按什么来定义就成为一个问题。其次,上述标准是指以微波操作为职业的人员应遵守的规定,对于居民又该怎样规定呢?最后,无论我国或其他国家,所谓“微波安全标准”往往是指分米波、厘米波这两个波段,有关数据也以这两个波段中的研究为基础。对于毫米波,实验研究较少,特别是动物实验做得少,上述标准是否适用也还是应当考虑的!

二、微波生理学研究的基础

微波生理学研究有多方面的理论基础需要考虑,对毫米波段也并不例外。

1. 场源与场点之间的电磁场分区理论 目前,对大辐射器(天线最大尺寸大于波长)而言,最近的距离内($r < \lambda/2\pi$)是口径场;在给定的波阵面上的任一点可当作一个二次源,造成球状波包,由原始波包的叠加可得出未知场点的波;数学上表现为惠更斯-菲涅耳原理^[9]:

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \frac{1}{4\pi} \iint_S [-j\omega\mu(\mathbf{i}_n \times \mathbf{H}_1)\phi + (\mathbf{i}_n \times \mathbf{E}_1) \\ &\quad \times \nabla\phi + (\mathbf{i}_n \cdot \mathbf{E}_1)\nabla\phi] dS, \\ \mathbf{H} &= \frac{1}{4\pi} \iint_S [j\omega\epsilon(\mathbf{i}_n \times \mathbf{E}_1)\phi + (\mathbf{i}_n \times \mathbf{H}_1) \\ &\quad \times \nabla\phi + (\mathbf{i}_n \cdot \mathbf{H}_1)\nabla\phi] dS, \end{aligned}$$

式中 $\mathbf{E}_1, \mathbf{H}_1$ 是已知的等相面 S 上的场强, \mathbf{i}_n 是等相面外法向单位矢, $\phi = e^{-jkr}/r$ (k 是波数)。

$r < 10\lambda$ 是电抗性近场区(Near-field region, reactive)。在毫米波段,由于波长短,这个区域很小。例如,电子设备的电抗性近场,是紧靠设备而存在。虽然场的电抗性分量对辐射能流无贡献,但它们可耦合到介质中,从而影响能量的吸收! $10\lambda < r < 2D^2/\lambda$ 是辐射性近场区(Near-field region, radiating),其中 D 是辐射器最大尺寸,这个区域也叫菲涅耳区。当 $r > 2D^2/\lambda$,是远场区(Far-field region),也叫夫琅和费区,在这里,电场强度与磁场强度之比是常数,即

$$\frac{E}{H} = Z_0 = 376.62\Omega,$$

而近场区就没有这样的比例关系!

总之,不同区域内 E 与 H 的关系不同, E, H 与距离的关系不同。当生物(包括人)处于不同场区时,考虑方法也不同。多年前,美国军方曾使一些人(志愿者)长期生活在低剂量均匀平面波照射的房屋中,进行观察、研究;美国某大学曾把家兔放在横电磁室(TEM Cell)中做实验。这些工作虽有成果,但不符合暴露于近场

中的情况!又如,透入深度(τ)的公式,是根据平面波理论推导的,但在近场区是否能用也是有问题的。

2. 电场极化的理论 电场极化分为线极化、圆极化、椭圆极化三种情况,后两者又分为左旋、右旋。不同极化的波即使是作用于水分子,其影响也不容易分析。人体细胞远比水复杂,研究就更难!现在一般假定电波是线极化,场力的作用可以造成人体分子极化,如是交变电场,则会频繁改变取向。还有一个弛豫效应(relaxation effect)问题,例如由于水分子的德拜弛豫,在毫米波段,水的 $\text{tg}\delta$ 值很高!

电磁波作用于生物体时,有热效应和非热效应,场力作用是交织于这两种过程之中。

3. 磁场的作用理论 许多研究微波生物效应的著作,只按交变电场分析,显然是不够的,因为来波(电磁波)不仅有电场,而且有磁场。例如,纯水是反磁的,有杂质的水则可能呈顺磁性。交变电场作用于生物组织时,其复杂性超过了磁化水。

4. 量子理论

虽然微波的主要机理表现为波,但亦有粒子性的一面,对于毫米波、亚毫米波尤其如此。微波辐射可看成数目极多的中性微粒(光子)的照射,这一观点导致量子生物学的建立。一个微波场量子的能量、质量可用下述公式进行计算:

$$\epsilon = hf, \quad m = \frac{h}{c^2}f, \quad (4)$$

式中 h 是普朗克常数, m 是场量子的动质量。已知 $h = 6.6256 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$,故取 $f = 300 \text{GHz}$ 时(大约对应 $\lambda = 1 \text{mm}$),可算出 $\epsilon = 19.877 \times 10^{-23} \text{J}$;但又知 $1 \text{eV} = 1.6021892 \times 10^{-19} \text{J}$,故可算出 $\epsilon = 1.24 \times 10^{-3} \text{eV}$ 。我们知道可见光频段的光子能量是 $1.6-3 \text{eV}$,相比之下毫米波的单一场量子能量是比较小的。但微波照射是大群场量子的照射,这种集团作用可给生物细胞带来严重的破坏。实际上,在整个微波区域,毫米波的破坏作用最大!

5. 生物学与生理学理论 微波照射动物或人

时,其作用并不是照射早已切下来的一块脂肪或一块肌肉。由于神经、血管、经络系统是分布于全身的,照射后产生了复杂的作用,必须根据活的生物体的吸收、反应、循环、反馈过程进行分析,其困难是非常大的。一方面,人体组织是非均匀电介质;另一方面,非均匀性又无函数关系可以建立,因而迄今为止还没有什么解析显式的理论,倒是常用数量统计的方法——正如农业科学中的田间实验那样。

因此,微波生理学可定义为“用理论计算或实验测量方法研究微波辐射对生物与人的影响的学科”。鉴于毫米波技术在国民经济、国防建设方面的应用在飞速发展,研究在毫米波段的生理学问题的必要性就更加迫切了!

三、基本物理参数公式及数据

除了复介电常数、功率反射系数外,其他的重要物理参数是透入深度、吸收功率、比吸收率三者,现分述如下。

1. 透入深度 均匀平面波向体内透射,表面功率衰减到 $1/e^1$ (即 13.6%) 时的距离,称为透入深度 (penetration depth), 用 τ 表示。设 z 为向介质内坐标 (表面处 $z = 0$), P_1 为来波在表面处的功率,则有

$$P = P_1 e^{-2\alpha z},$$

α 是波在介质内的衰减常数。按上述定义有

$$\tau = \frac{1}{\alpha}.$$

电磁理论给出^[6]

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\epsilon \mu}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2} - 1 \right)},$$

式中 ω 是入射波角频率, ϵ , μ , σ 分别为生物介质的介电常数、导磁率、导电率。当 $\sigma \ll \omega \epsilon$ 时,有

$$\alpha \cong \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \pi f \sqrt{\epsilon \mu} \operatorname{tg} \delta = \frac{\pi \sqrt{\epsilon_r \mu_r}}{\lambda} \operatorname{tg} \delta,$$

式中 λ 是波长, $\operatorname{tg} \delta = \sigma / \omega \epsilon$, ϵ_r 是相对介电常数, μ_r 是相对导磁率。故可得

$$\tau \cong \frac{\lambda}{\pi \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \operatorname{tg} \delta}. \quad (5)$$

可见,波长越短,透入越浅。例如,毫米波时 $\tau < 1-2\text{mm}$, 即主要在皮肤层及皮下组织。

2. 吸收功率 设生物介质内电场矢量为 \mathbf{E} , 电流密度矢量为 \mathbf{J} , 单位体积内的功率损耗 (即吸收功率) 为

$$P = \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} = \sigma E^2 = \omega \epsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot E^2.$$

上式也可写作

$$P_{\text{abs}} = 2\pi f \epsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot E^2, \quad (6)$$

下标 abs 代表吸收 (absorption)。上式并不表示吸收功率与频率成正比,因 ϵ , $\operatorname{tg} \delta$ 均与频率有关,但频率高时吸收功率较大,这一点可以肯定。这就不难理解,为什么毫米波辐射易使人的皮肤受到显著烧伤。

纯水 (H_2O) 的主要参数值为: $\epsilon_r \cong 78$, $\operatorname{tg} \delta \cong 0.3$, 弛豫频率 $f_r = 1.33\text{GHz}$; ϵ , $\operatorname{tg} \delta$ 均较大,故吸收微波厉害。由于人体组织含水多 (血液尤甚),所以容易受到伤害。

3. 比吸收率 比吸收率的原文为 specific Absorption rate, 故写作 SAR, 它的定义是吸收功率 P_{abs} 与受试物的质量 m 的比值

$$\text{SAR} = \frac{P_{\text{abs}}}{m} \text{ (W/kg)}. \quad (7)$$

因此,比吸收率就是单位质量的吸收功率。它比 P_{abs} 更好地描绘出受试物的功率吸收和热分布状况,称为“SAR 分布”。在频率较低的频段 (如分米波), SAR 值可能是几个 W/kg; 在毫米波段, SAR 值可达几十甚至几百 W/kg。

SAR 是 z 的函数,可写作 $\text{SAR}(z)$; 对于生物 (包括人) 的皮肤表面,可写作 $\text{SAR}(0)$ 。下面,我们将导出 $\text{SAR}(0)$ 的计算公式。设均匀平面波向平整的介质表面垂直入射,而表面复反射系数为 ρ , 则有

$$P_{\text{abs}} = P_1 (1 - |\rho|^2).$$

设功率通量密度 (power flux density) 为 P_d , 则入射到具有表面积 S 的体积 V 时,有

$$P_{\text{abs}} = P_d S (1 - |\rho|^2).$$

近似地认为 $V \cong \tau S$, 则有

$$P_{\text{abs}} \cong V \frac{P_d (1 - |\rho|^2)}{\tau}.$$

设受试物体密度为 δ , 故 $m = \delta V$, 则有

$$SAR(0) = \frac{P_{abs}(0)}{m} = \frac{1}{\delta} \frac{P_d(1 - |\rho|^2)}{\tau} \quad (8)$$

在指定入射强度 (P_d) 的情况下, 只要知道 δ , $|\rho|$, τ 这三个参数, 就可以算出 $SAR(0)$ 之值. 对于毫米波来讲, 取得 $SAR(0)$ 的数据是至关重要的. 如规定 $P_d = 5mW/cm^2$, 则可对人的皮肤的 $SAR(0)$ 进行计算^[7], 见表 1. 可见, 在毫米波段, 当频率升高时, ϵ_r 的实部、虚部均减小, 但由于波长 λ 下降, 趋肤深度 τ 还是减小的. 另外, 频率升高时功率反射系数减小. 这两个因素共同作用, 造成在频率升高时 $SAR(0)$ 急剧增长. 这很值得注意! 图 1 是我们绘出的曲线变化规律.

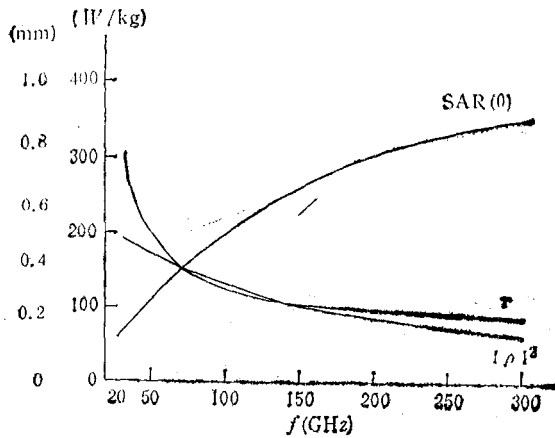


图 1

表 1

频率 f (GHz)	皮肤复介电常数 ϵ_r	功率反射系数 $ \rho ^2$	趋肤深度 τ (mm)	$SAR(0)$ (W/kg)
30	$18.12 - j19.2$	0.488	0.782	65.5
60	$8.89 - j13.15$	0.411	0.426	158.3
100	$5.92 - j8.57$	0.333	0.318	209.7
150	$4.88 - j5.88$	0.266	0.271	270.8
200	$4.49 - j4.45$	0.223	0.249	312.0
250	$4.32 - j3.58$	0.195	0.238	338.2
300	$4.22 - j2.99$	0.175	0.231	357.1

四、三层平板结构的分析方法

三层平板结构如图 2(a) 所示, 按照入射波的方向标示 1, 2, 3. 这一模型可用来分析不

同的情况, 例如: (1) 空气层-衣服层-皮肤层; (2) 空气层-皮肤层-脂肪层; (3) 衣服层-空气层-皮肤层; (4) 皮肤层-脂肪层-肌肉层. 情况(2), (4)未考虑衣服, 但即使是夏季, 人也不一定会裸体受微波照射, 故可以暂不纳入我们的视野. 情况(1), (3)的区别, 只在于来波是先透过空气还是先透过衣服之不同. 虽然, 由于衣服与人体并非紧密相连, 而使情况(3)不无存在的价值; 但就总体而言, 情况(1)的意义是最大的, 对毫米波尤其如此. 因而, 我们应将“空气层-衣服层-皮肤层”这一模型作为毫米波辐射安全问题研究的基本出发点.

对于这种三层平板式结构, 我们认为可以用三节传输线的级联来代表, 见图 2(b). 三节传输线的特性阻抗分别为 Z_{01} , Z_{02} , Z_{03} . 第三层是皮肤, 厚度有限, 不能认为是“半无限厚”. 因此, l_3 的终端只能认为接有阻抗 Z_L , 代表皮肤下面组织的影响. 由于阻抗不匹配, l_1 , l_2 , l_3

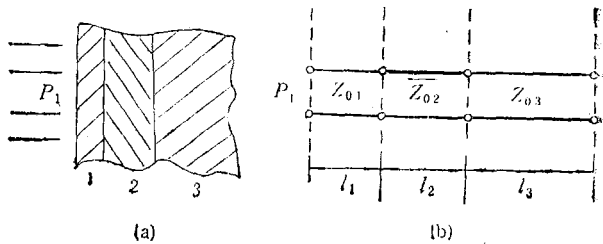


图 2

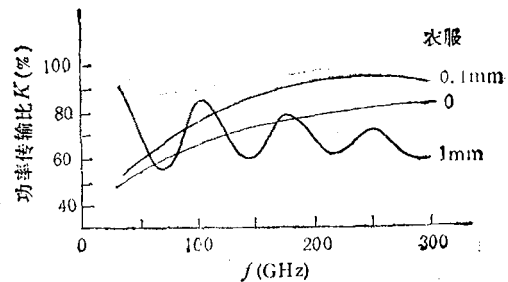


图 3

上均有驻波存在. 图 3 是计算结果, 可见, 只有中间层足够厚时 ($l_2 \geq 1mm$), 才能看到功率吸收随频率的波动. 频率变化实际上是造成比值 l/λ 改变, 可见取三段传输线级联的分析方法是有道理的. 几个最大值是与 $\lambda_e/4, 3\lambda_e/4, \dots$

(下转第 162 页)