

生物磁学在医学上的应用¹⁾

李 国 林

(中国科学院物理研究所)

和空间(宇宙)生物学等方面已经得到或可能得到广泛的应用。

一、生物磁学的意义和内容

任何生物体都具有磁性,而且在生命活动中会产生磁场,这是生物磁现象。外部的磁场又在不同程度上影响着生物的生命活动,这是磁场的生物效应,简称生物磁效应。生物磁学是研究和应用磁性、磁场与生命活动、生物特性之间相互联系和相互影响的边缘学科。

从历史上看,磁在人体上的应用(最早生物磁学应用)是很早的。远在两千多年前,我国和国外都有利用磁石(一种主要成分为 Fe_3O_4 的矿物)治病的记载。两千多年来,磁石和磁技术在医药上的应用有了较大的发展(其详细情况可参阅文献[1]),生物磁学的研究和应用领域也有了很大进展。

随着社会生产的不断发展和科学技术的日益进步,当代生物磁学的内容和应用范围相当广泛。它的主要内容和应用范围包括:(1)恒定(直流)磁场对生物的影响,这是狭义的生物磁学;(2)交变(包括脉冲)磁场对生物的影响,有时(2)和(1)合称为磁(场)生物效应或磁生物学;(3)生物在其生命活动中产生的磁场,可称为生物磁现象,有人认为这才是(狭义的)生物磁学;(4)生物的磁性及其与生物结构和功能的关系;(5)磁方法、磁技术和磁器械在生物科学和医学中的应用,也称为生物磁工程或生物磁技术;(6)生物磁现象和生物磁效应在实际(工业、农业、医学、环境保护等)中的各种应用,可称为应用生物磁学。

当前生物磁学不仅在生物磁现象和生物磁效应等方面进行着各种的研究,而且在工农业生产、医药卫生、环境保护、生物工程、遗传工程

二、生物磁学的物理基础

1. 生物的磁性

从磁性上看,生物和非生物都共同具有几种强弱和性质都不相同的磁性。一般说来,虽然任何物质(包括生物和非生物)都有磁性,但绝大多数物质的磁性都很弱,需用灵敏的测磁仪器才能探测到,称为弱磁(性)物质,一般不恰当地称为“无磁性”或“非磁性”物质。只有少数物质如 Fe, Co, Ni 及其一些合金或化合物的磁性才很强,容易被永磁体吸引,称为强磁(性)物质,一般常称为铁磁(性)物质或磁性材料。表示物质磁性强弱是用磁化率 χ 来量度。弱磁物质的 $\chi \sim 10^{-6} - 10^{-4}$, 而强磁物质的 $\chi \sim 1 - 10^5$, 两者相差极为悬殊。弱磁物质又分为两类:一类物质的 χ 为负值,其大小与磁场和温度都无关,这类物质在不均匀磁场中受力方向是趋向磁场减小(对抗磁场)的方向,故称为抗磁(性)物质,如水、铜和大多数有机材料及生物材料;另一类物质的 χ 为正值,随温度降低而增大,它们在不均匀磁场中受力方向是趋向磁场增强(顺着磁场)的方向,故称为顺磁(性)物质,如铝、硫酸亚铁和非氧合的血红蛋白和肌红蛋白等。目前仅在少数水生细菌、蝴蝶、蜜蜂、金枪鱼、海豚、鸽子和两种鼠瘤细胞及一些人的肾脏和鼻窦中发现过微量强磁物质(微颗粒的 Fe_3O_4 或 Fe), 它们的生物学功能和作用机制

1) 本文曾在中国物理学会主办的“物理学在医学上的应用”讲习班(1984年2月,北京)上演讲过,发表时作了若干修改和补充。

都正在进行研究。

2. 磁的力学效应

磁场对任何磁性(弱磁和强磁)物质和运动的带电粒子及载电流的导体都会施加一定的力或力矩。在有梯度 $\frac{dH}{dx}$ 的不均匀磁场 H 中, 质量为 m 、磁化率为 χ 的磁性物质会受到磁力 F_m :

$$F_m \propto m\chi H \frac{dH}{dx}. \quad (1)$$

在均匀磁场 H 中, 磁矩为 P (P 与 H 成夹角 θ) 的磁性物质会受到磁转矩 T 的作用。

$$T \propto P \cdot H \cdot \sin\theta. \quad (2)$$

在均匀磁场 H 中, 以速度 v 垂直于 H 运动、电荷为 Ze 的带电粒子会受到与 H 和 v 垂直的洛伦兹力 F_L 作用。

$$F_L \propto Ze v H. \quad (3)$$

在均匀磁场 H 中, 载有电流 I 、长度为 l 的导体 (l 与 H 垂直时) 也会受到与 I 和 H 垂直的力 F_l 的作用。

$$F_l \propto H I l. \quad (4)$$

生物体内不同组织的磁性 (χ) 不相同, 在外加磁场中受力的大小和方向也不一样。“向磁性”细菌中的 Fe_3O_4 微粒链的磁矩在磁场中会受到转矩作用; 生物体内的电子传递和离子转移, 在磁场中会受到洛伦兹力的作用。

3. 磁的电学效应

磁场或磁性变化能引起物质的电学性质变化, 称为磁(场)的电学效应。直接由磁场引起的电性变化称为磁场电效应。一般有两种磁场电效应。一种是磁场横向电效应, 常称为霍尔效应, 这是指外加磁场 H 与物质中的电流 I 垂直时, 会在与 H 和 I 均垂直的方向产生电势(称为霍尔电势) E_H :

$$E_H \propto H \cdot I. \quad (5)$$

另一种是磁场纵向效应, 常称为磁(致)电阻效应或汤姆孙效应。这是指当 H 与 I 垂直时, 会在电流方向(纵向)引起物质的电阻变化 ΔR 。对于弱磁物质,

$$\Delta R \propto H^2. \quad (6)$$

强磁物质的磁电阻效应更为复杂。利用这两种效应均可制成测量磁场的磁强计。例如, 利用半导体 Ge 或 Si 可制成高斯计(或称特斯拉计), 利用铋(Bi)或其他高磁电阻材料也可制成测量强磁场的磁强计。

另外, 变化的磁场还可使处于磁场中的闭合电路产生感应电势 E_i , 称为电磁感应效应。

$$E_i \propto \frac{\Delta\phi}{\Delta t}, \quad (7)$$

其中 $\Delta\phi$ 是在时间间隔 Δt 内的磁通量变化。

4. 磁共振效应

含有净磁矩的原子或原子核系统在互相垂直的恒定(直流)磁场 H 和高频磁场 $h(\omega)$, (ω 为角频率)的同时作用下, 且满足

$$\omega = \gamma H = \left(\frac{g e}{2 m c}\right) H \quad (8)$$

时, 这系统会从高频电磁场吸收最大的能量, 称为磁共振现象(效应)。(8)式中的 γ 为旋磁比, g 为 g -因数, e 和 m 为电子(电子磁共振)或质子(核磁共振)的电荷和质量, c 为光速。在生物磁学中常用到的有三种磁共振: (1) 电子自旋共振(ESR), 一般出现于过渡族顺磁原子(如 Fe, Co 等)、导电电子、自由基、辐照损伤及含有自旋标记的材料中, 可研究某些蛋白质、酶、光合作用、辐照效应及肿瘤等; (2) 核磁共振(NMR), 出现于核磁矩不为零的核系统(如 1H , ^{13}C , ^{14}N , ^{15}N , ^{17}O , ^{31}P , ^{33}S 和 ^{57}Fe 等)中, 可研究含有这些核的生物材料的结构, 应用于核磁共振谱的证认和成象技术; (3) 穆斯堡尔效应(ME)或称核 γ 共振(NGR), 是发生于穆斯堡尔核素(如 ^{57}Fe , ^{67}Zn , ^{121}I , ^{40}K 等)的基态和激发态之间的共振, 可研究一些含 Fe 蛋白质在氧化和还原状态下的微观结构上的差异, 也可应用于含有 Fe 血黄素沉着病和地中海型贫血病等的诊断。

三、磁场在医疗中的应用

1. 磁场治疗(磁疗)

磁场治疗是指在人体的一定部位(经穴或



图1 小儿斜颈病的磁疗

患处)施加一定强度的恒定磁场或变化磁场治疗疾病的医疗方法,简称磁疗。也有称“磁穴疗法”或“经络磁场疗法”的。一般采用的磁场强度约500—3000G。目前疗效较为显著的有急性扭挫伤、腰肌劳损、小儿斜颈病(图1)、风湿性关节炎、类风湿性关节炎、高血压病、神经性头痛、支气管哮喘、功能性腹泻、痛经等多种的常见病和多发病。有效率(包括治愈、显著疗效和好转)一般可达到80%以上。目前采用的磁疗法有磁片(贴敷)法、旋磁机法、电磁法和综合法。磁片法是用永磁片贴敷一定穴位或患处,用的恒定磁场,只有生物磁效应;旋磁机法是将数块永磁片固定在旋转圆盘上,用的脉动磁场,兼有生物磁效应和电效应(电磁感应);电磁法是用含有叠片磁心的电磁铁产生交变或脉冲磁场,除磁效应和电效应外,还有由磁致伸缩产生的机械振动效应和电磁损耗产生的热效应;综合法则是同时采用前述的两种或三种磁疗法进行治疗。不同的磁疗法对于各种疾病的疗效也不相同。但总的说来,磁疗法具有下述的特点:适用性较广泛(尚未发现完全不能采用的禁忌病);疗效较为显著;治疗时安全,无创伤和痛苦,副作用极少;操作技术简单,容易掌握和推广;所用的磁片和器械可多次应用;在一定条件下,可以同时治疗几种疾病,也可与其他治疗方法配合应用。目前,磁疗法虽然得到较多的试验和临床应用,有过一些初步的探索,但其治疗机理的研究尚少,有待于进一步的研究。

2. 磁水治疗

磁水是磁(场)处理水的简称,习惯上称为磁化水。它是指流动的水通过一定强度的垂直磁场(一般约1000—5000G)后所得到的水。实验表明,经过磁场处理的水会在物理化学、力学、电学和光学性质上发生一些变化,称为磁水的非生物效应,也会对一些生物产生影响,称为磁水的生物效应。近年来把磁水应用到一些疾病的临床治疗上,也得到较好的疗效。磁水在医疗中的应用主要是治疗结石病。经过X射线照相和其他检验证明,各种(尿道、肾、胆、涎腺)结石患者在较长期服用磁水后,可使人体中的结石消失、碎裂或排除,有效率达到50%以上。各地的试验和临床应用还表明,磁水对于肠道寄生虫病、单纯腹泻、喉痛、扁桃腺炎、糖尿病、氟中毒病和一些皮肤病等也显示不同程度的疗效。但是磁场对水作用的微观结构变化,以及磁水的非生物和生物效应的机制都还需要进一步的研究。

3. 磁场镇痛(磁麻)

近年来,在磁场治疗的基础上发展了利用磁场镇痛(磁麻)效应进行外科手术的新方法。这是在手术前对患者施手术部位加强磁场(约 $5 \times 10^3 - 10^4 G$),同时在患者耳穴贴敷磁片和施加脉冲电场进行诱导后,不再需要用麻醉剂便可进行多种外科手术,如切除阑尾、结扎输卵管、剖腹产等腹部手术。还将磁麻手术应用于拔牙、切除扁桃体、切除粉瘤、乳腺纤维瘤、淋

巴肿大、脓肿、皮质腺囊肿等，都收到较好的效果。在某些方面，磁麻与针（刺）麻（醉）相类似，但磁麻的牵拉效应较小。从动物试验和磁麻时生理指标的测量表明，磁场提高了痛阈，但其作用机制尚不清楚，需要继续深入研究。

此外，利用磁场治疗作用制成了磁手镯、磁手表、磁项鍊、磁椅、磁枕和磁床等磁疗器械，在治疗高血压、支气管哮喘和消除疲劳上，亦显示了较好的效果。

四、磁性材料在医药中的应用

1. 磁性药物

利用天然磁石（磁铁矿，主要成分为 Fe_3O_4 ）

作为内服和外用的药物治疗已经有两千多年的历史。在我国历代的许多医药书籍上都或略或详地记载了磁石的性能、作用和治病种类。例如，明代著名药物学家李时珍（1518—1593年）的著作《本草纲目》（1578年）中便描述慈（磁）石的气味（性能）为：辛、寒、无毒；列举了磁石在医药上的十余种应用：治疗耳卒聾闭、肾虚耳聾、老人耳聾、老人虚损、阳事不起、眼昏内障、小儿惊痫、子宫不收、大肠脱肛、金疮肠出、金疮血出、误吞针铁、丁肿热毒和诸般肿毒等，都附有处方和用法。目前我国审定的正式药典《中华人民共和国药典》（1963年）中亦载有磁石及以磁石为重要成分的中药的成分、功能和主治病症（表1）。它们是我国人民医疗实践经验的积

表1 《中华人民共和国药典》（1963年）中含磁石的中药

药名	主要成分	功能	主治
磁石	煨磁石（加热后于醋中煨酥、再煨碎）	潜阳、纳气	头目眩晕、耳鸣、耳聾、虚喘
耳聋左慈丸（蜜丸）	煨磁石、牡丹皮、茯苓等八种	滋肾、和肝	肾虚肝郁、耳鸣失聪、头晕目眩
紫雪（散）	生磁石、黄金、犀角、麝香等17种	镇静安神、清心开窍	烦热不解、神昏谵语、发斑发狂、小儿惊风
磁朱丸（蜜丸）	煨磁石、朱砂曲三种	镇心、去翳	心悸怔忡、惊惕失眠、内障视物朦朧

累，对于治疗疾病和保障健康起了重要的作用。

2. 磁造影剂

利用X射线拍取生物和人体软组织照片时，需要在软组织中加入能强烈吸收X射线的造影剂，才能获得清晰的相片。一般采用硫酸钡（盐）作造影剂，但服用这种钡盐是使人难受和痛苦的。如果改用既无毒性、又对X射线吸收强的铁氧体磁性细粉作造影剂，可采用口服、注射或喷雾的方法送入人体或生物体内，便可以代替钡盐拍取肠胃、血管、支气管等软组织器官的X射线相片，供检查、诊断或研究之用。一般常用的铁氧体材料是镁铁氧体（ $MgFe_2O_4$ ）或磁石（ Fe_3O_4 ）。

3. 磁示踪剂

在原子能医学应用中，可采用放射性同位素作示踪剂，跟踪药物或显示体内的生理或病

理状态。这种方法是在体外测量所用应用的位素的放射性的分布和变化。根据相似的原理，将磁化过的永磁铁氧体细粉用口服、注射或喷雾的方法送入体内后，测量由铁氧体剩磁在体外产生的磁场分布，便可判定磁示踪剂在体内的分布情况。如果在不同时间测量某一部位剩磁场的消减曲线，便可反映磁示踪剂的代谢和排除情况。从磁示踪剂的分布和消减可获得有关体内的生理和病理状态或活动的信息，从而有助于生物学和医学的研究和诊断。例如，曾经用粒径约 $2.8\mu m$ 的 Fe_3O_4 细粉作为磁示踪剂吸入试验者的肺中，检测它们从肺中排除情况与吸烟的关系。对三名吸烟者和九名不吸烟（对照）者的试验表明：在吸入 Fe_3O_4 细粉并在660G均匀磁场中磁化后，经五和十一个月后检测，不吸烟者排除约80%和90%的磁粉，而吸

烟者仅排除约 45% 和 50% 的磁粉(图 2)。这一试验说明,吸烟者排除率的显著降低,反映了

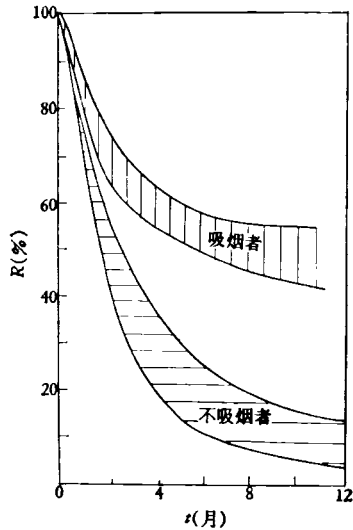


图 2 吸烟者与不吸烟者的剩磁消减对照曲线

其肺部由于吸烟而使排除异物的功能受到损伤,这样便可解释吸烟者容易患肺癌、肺气肿和肺纤维性病变等的原因。这种磁示踪剂方法可用来检查冶金工人、电弧焊工人和煤矿、石棉矿(石棉矿常与磁铁矿共生)工人在工作中受强磁粉尘污染及有关的职业病,对环境保护有重要的作用

五、磁技术在诊断和其他方面的应用

1. 人体磁图和磁象

心电图、脑电图等是医学诊断中常用的方法,它们是测量某一组织器官产生的生物电位(电场)随时间的变化,这些变化反映了相关组织的生理或病理状态。一般说来,生物电位会产生相应的生物电流,生物电流又会产生相应的生物磁场。但是一方面由于生物磁场很微弱(心磁场约 10^{-7} — 10^{-5} G, 脑磁场约 10^{-9} — 10^{-8} G),需要极灵敏的磁强计[如超导量子干涉式磁强计(SQUID)]才能进行测量;另一方面由于地(球)磁场(约 0.5G)和电气设备的电磁干扰(约 5×10^{-3} G),需要性能良好的磁屏

蔽室(如由软磁合金和铝板制成的多层磁屏蔽室)(图3)才能测得无干扰的人体磁场,如心磁、脑磁、肌磁、眼磁图等。最近研制成梯度式

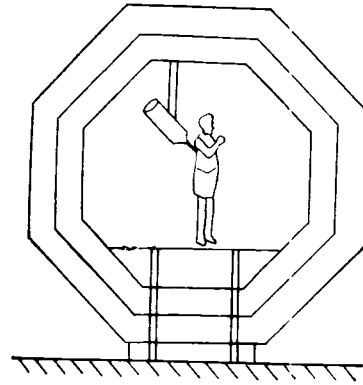


图 3 在磁屏蔽室中测人体磁切示意图

SQUID磁强计,可以不用磁屏蔽室,但灵敏度降低。人体磁图比人体电图具有下列优点:无接触电极干扰,恒定(直流)和交变磁场都可测量(电图只能测交变电场),可测量三维空间分布(电图只能测二维平面分布),有较高分辨率。目前,已能测量心、脑、肌肉、肺、眼等组织的磁场,预期不久将获得临床应用。

各种医学成象是当代医学研究中发展迅速的一个分支。X射线成象和超声成象仅能观察生物体的密度分布,而核磁共振(NMR)成象则能观察生物体的成分和状态分布。简单说来,NMR成象是采用一定的磁场梯度扫描,使生物体在一定范围内按扫描顺序依次产生某一种核的核磁共振,共振线强度和弛豫时间等参量分别与该元素(核)的浓度和状态有关。利用电子计算机控制和处理,可以得到所研究范围(层析剖面)的成分分布和状态变化。图4是核磁共振成象装置及测量示意图。目前NMR成象技术尚只能观测氢核(质子)的成象,在一些实验室和少数医院中试验,已能观察到X射线照相所未观察到的脑瘤(图5);通过假彩色处理,还观察到肝癌的扩散。可以预期,这一新的磁技术将很快地向广度(扩大核的种类)和深度(提高分辨率)发展,在短期内获得临床应用。最近,国外已有核磁共振成象仪的商品生产。

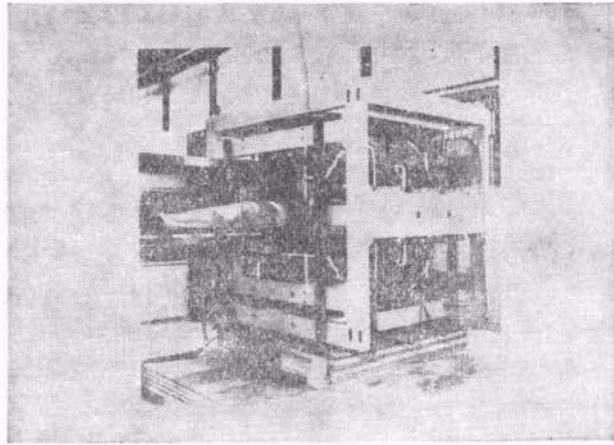


图4 NMR 成象装置

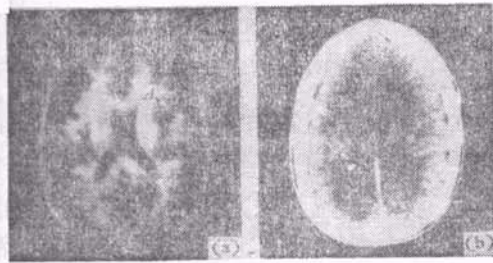


图 5

(a) 脑部的核磁共振层析成象;
(b) 脑部的X射线层析成象
[(a)图中右边黑斑A为脑瘤]

2. 磁共振谱

磁共振是一种探测物质微观结构的有效方法。核磁共振和电子自旋共振分别是利用特定的原子核和电子作为微探针，用来观测它们的微观环境（如原子排列、电子组态和磁矩排列等）。因此，这些共振吸收随磁场（或频率）变化的磁共振谱便反映了所观测元素的微观环境的信息，可用来探测生物体内的生理、病理状态及其变化。例如，曾发现正常人和肿瘤患者血清的核磁共振谱（图6）有较显著的差异，其中 α 谱线与 β 谱线的面积比为 1.85 ± 0.06 （正常

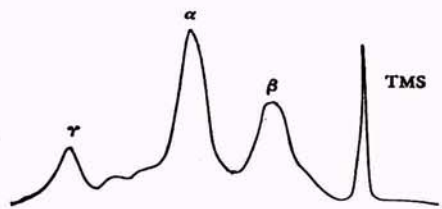


图6 人体血清的部分核磁共振谱 (250MHz)

人)，小于2.20（肿瘤患者）。在200余人的试验中虽还有极少数的例外，仅从血清还不能确定肿瘤部位，但这一试验结果是值得重视的。又如，利用脉冲核磁共振谱仪测量正常组织和肿瘤组织的自旋-晶格弛豫时间 T_1 ，发现各种肿瘤组织的 T_1 （约1.0—1.4s）显著长于相应正常组织的 T_1 （约0.4—1.0s）。目前，一些国家已准备将这方法作为诊断恶性肿瘤的一种辅助方法。还有一些实验表明，某些癌症病变常伴随着自由基或顺磁原子浓度的变化，可以利用灵敏度很高的电子自旋共振进行检测，因而也提供了一种检查和诊断癌症的可能途径。

3. 磁器械

根据磁性材料的特性和磁场的作用可以制成多种多样的磁医疗器械，有些已在医学中得到较广泛的应用。例如，利用磁场电效应（霍尔效应）和核磁共振原理，可制成测量生物体内血流速度的电磁型血流计和核磁共振型血流计。利用电磁感应原理，可制成心肌刺激器和神经刺激器，其特点是无接触点，可在体外控制刺激器工作。利用静磁力作用原理，可制成磁控导管、磁控药针、磁吸器和磁假肢。磁控导管插入人体内部（头颅或支气管），在体外控制其操作以进行诊断或完成特殊手术；磁控药针是将带药的细磁针注入血管中，在体外加磁场控制其运动和固定部位；磁吸器可取出眼中或体内的强磁性异物；磁假肢借磁力可以恢复失效器官

（下转第188页）