

植入金标患者做MRI检查的安全性

喻伟¹, 马永红², 徐胜¹, 孟岩¹

1. 上海东方肝胆外科医院放疗科, 上海 200438; 2. 上海市胸科医院放射科, 上海 200030

【摘要】目的:探讨对植入金标患者进行磁共振(MRI)检查的安全性。**方法:**理论计算金标在MRI磁场中的受力和加热情况。**结果:**金标受力 F 正比于金标体积 ν 、主磁场 B_0 和梯度磁场 G , 即 $F \propto \nu GB_0$, 其值远小于本身的重力, 在1.5、3.0和8.0 T的MRI下金标所受的力分别为 3.287×10^{-10} 、 6.574×10^{-10} 和 17.531×10^{-10} N, 远小于自身的重力 3.798×10^{-4} N。金原子为抗磁性物质, 所受力矩 T 均为0 Nm。金标的温度升高 ΔT 与射频场频率平方根 \sqrt{f} 成正比, 与射频场幅度平方 B_1^2 成正比, 与检查时间 t 成正比, 与金标直径 d 成反比, 即 $\Delta T \propto \sqrt{f} B_1^2 t / d$ 。在检查期间, 金标的温度升高非常小, 即使在临床最高磁场8.0 T下和最长检查时间1 h内, 金标的温度升高也不到1.1 °C。**结论:**对植入金标的患者, 做MRI检查是安全的。

【关键词】金标; 磁共振; 磁场; 力矩; 安全

【中图分类号】R445.2; R594.8

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2017)04-0377-03

Safety of magnetic resonance imaging in patients with gold seed implantation

YU Wei¹, MA Yonghong², XU Sheng¹, MENG Yan¹

1. Department of Radiotherapy, Shanghai Eastern Hepatobiliary Surgery Hospital, Shanghai 200438, China; 2. Department of Radiology, Shanghai Chest Hospital, Shanghai 200030, China

Abstract: Objective To assess the safety of magnetic resonance imaging (MRI) examination in patients with gold seed implantation. **Methods** The force and heating effect imposed by the magnetic field in MRI on the implanted gold seeds were calculated theoretically. **Results** The force imposed by MRI magnetic field on a gold seed (F) was proportional to the seed's volume (ν), main magnetic (B_0) and gradient magnetic (G), i.e., $F \propto \nu GB_0$. In MRI of 1.5, 3.0 and 8.0 T, the forces on the gold seed were 3.287×10^{-10} , 6.574×10^{-10} and 17.531×10^{-10} N, respectively, which were much smaller than the gravity of the gold seed itself (3.798×10^{-4} N). As the gold atom is diamagnetic, the moment of force on the gold seed is 0 Nm in any magnetic field. The temperature increase (ΔT) of the gold seed was proportional to the root square of radio frequency (RF) field frequency (\sqrt{f}), square of RF field amplitude (B_1^2) and the examination time (t), and was inversely proportional to the seed's diameter (d), i.e., $\Delta T \propto \sqrt{f} B_1^2 t / d$. The temperature increase of the gold seed was only marginal in the examination, and even in a MRI examination with the strongest magnetic field of 8.0 T and with a prolonged examination time of 1 h, the temperature increase of the gold seed was less than 1.1 °C. **Conclusion** MRI examination is safe in patients with gold seed implantation.

Keywords: gold seeds; magnetic resonance imaging; magnetic field; moment of force; safety

前言

射波刀治疗周围型非小细胞肺癌安全、有效, 可获得较好的肿瘤控制率^[1], 而金标追踪是射波刀精确治疗

肝、肺等部位肿瘤的基础^[2-4], 金标植入后将永久留在体内。金标在磁共振(MRI)磁场作用下可能发生平移、扭转, 给MRI检查带来危险, 另外涡旋电流会加热金标, 给MRI检查带来不安全^[5-6]。对于植入金标的患者, MRI检查的安全问题已经引起人们的重视。本文将讨论金标与MRI磁场的相互作用, 并对结果进行探讨。

1 材料与方法

1.1 金标

金标一般用纯金制成, 密度 $\rho = 19.26 \text{ g/cm}^3$, 25 °C

【收稿日期】2016-11-18

【作者简介】喻伟, 硕士研究生, 研究方向: 肿瘤放射物理和影像物理,
E-mail: ywll@163.com

【通信作者】孟岩, 硕士, 副主任医师, 研究方向: 肝胆肿瘤放射治疗, E-mail: yanmeng_ehbh@163.com

时的比热容 $C=128 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$, 单位体积磁化率 $X_v = -2.74 \times 10^{-6}$, 磁导率 $\mu=1.256 \times 10^{-6} \text{ Tm/A}$, 电导率 $\sigma = 6.301 \times 10^7 \text{ S/m}$ 。临床使用的金标一般为圆柱体, 直径 $d=0.8 \text{ mm}$, 高 $h=4.0 \text{ mm}$, 体积 $v=2.01 \text{ mm}^3$ (图1)。



The diameter of gold seed is 0.8 mm, with a length of 4.0 mm.

图1 通过CT或B超植入人体的金标

Fig.1 Morphology of gold seeds for implantation in patients through CT or B-scan ultrasonography

金原子的总磁矩为零, 为抗磁性物质。抗磁性是磁场对电子轨道运动所起作用的结果。电子轨道运动在磁场中会发生旋进, 旋进角动量方向与磁场方向一致。电子带负电荷, 产生的磁矩方向和磁场方向相反, 而这就是抗磁性的来源。抗磁性发生在任何原子中, 但对于原子, 只有在总磁矩为零的情况下, 抗磁性才显示出来。

1.2 MRI 磁场

MRI 磁场 B 由主磁场 B_0 、梯度磁场 G 和射频磁场 $B_1(t)$ 组成, $B=B_0+G+ B_1(t)$ 。临床使用MRI 机器见图2, 磁场一般为0.064~8.000 T, 本文磁场取1.5、3.0和8.0 T。



图2 临床用MRI 机器

Fig.2 A typical magnetic resonance imaging (MRI) machine used in a clinical setting

对1.5 T的MRI, 取主磁场 $B_0=1.5 \text{ T}$, 梯度场 $G=(50, 50, 50) \text{ mT/m}$, 梯度场上升时间=250 us, 射频场 $B_1(t)=10 \text{ } \mu\text{T}$, 射频场频率 $f=63.86 \text{ MHz}$; 对3.0 T的

MRI, 取主磁场 $B_0=3.0 \text{ T}$, 梯度场 $G=(50, 50, 50) \text{ mT/m}$, 梯度场上升时间=250 us, 射频场 $B_1(t)=10 \text{ } \mu\text{T}$, 射频场频率 $f=127.74 \text{ MHz}$; 对8.0 T的MRI, 取主磁场 $B_0=8.0 \text{ T}$, 梯度场 $G=(50, 50, 50) \text{ mT/m}$, 梯度场上升时间=250 us, 射频场 $B_1(t)=10 \text{ } \mu\text{T}$, 射频场频率 $f=340.64 \text{ MHz}$ 。

1.3 物质与静磁场作用:

磁矩为 m 的磁偶极子在外磁场 B_e 中的势函数 $U=-m \cdot B_e$, 磁偶极子在外磁场中所受力 $f=-\nabla U=\nabla(m \cdot B_e)=m \times (\nabla \times B_e)+m \cdot \nabla B_e$, 由于产生外场的电流不出现在磁矩 m 所在的区域内, $\nabla \times B_e=0$ 。则 $f=m \cdot \nabla B_e$ 。

磁矩为 m 的磁偶极子在外场 B_e 中所受力矩 $\tau=m \times B_e$ 。

单位体积物质在磁场中所受力 F 和力矩 Γ 为:

$$F=\sum f=\sum m \cdot \nabla B_e=M \cdot \nabla B_e \quad (1)$$

$$\Gamma=\sum \tau=\sum m \times B_e=M \times B_e \quad (2)$$

1.4 射频场下良导体损耗功率

取 z 轴沿指向导体内部的法线方向, 射频场在导体内电场为 E , 磁场为 H , 导体内电流密度为:

$$J(r, t)=\sigma E(r, t)=\sigma E_0(x, y)e^{-\alpha z}e^{i\beta z-i\omega t} \quad (3)$$

其中, α, β 为波矢 k 的虚部和实部, $k=\beta+ia$ 。导体内平均损耗功率密度为:

$$\frac{1}{2}\text{Re}(J^* \cdot E)=\frac{1}{2}\sigma E_0^2 e^{-2\alpha z} \quad (4)$$

导体表面单位面积平均损耗功率为:

$$P_L=\frac{1}{2}\sigma E_0^2 \int_0^\infty e^{-2\alpha z} dz=\frac{\sigma E_0^2}{4\alpha} \quad (5)$$

导体内磁场与电场关系为:

$$H=\frac{1}{\omega\mu} k \times E \quad (6)$$

在良导体情况下 $\alpha \approx \beta \approx \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}$, 有:

$$H^2=\frac{\sigma}{\omega\mu} E^2 \quad (7)$$

对于非铁磁物质, 一般有磁感应强度 $B=\mu H$, 则

$$P_L=\frac{\sqrt{2}}{4} \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}} H_0^2=\frac{\sqrt{2}}{4\mu} \sqrt{\frac{\omega}{\mu\sigma}} B_0^2 \quad (8)$$

这里 B_0 对应于MRI 射频场 B_1 值。

2 结 果

2.1 金标在MRI 中受力

MRI 磁场 $B=B_0+G+ B_1(t)$, 则 $\nabla B=G$ 。金标磁矩 $\nu M=\nu X_v H=\frac{\nu X_v}{\mu_0(1+X_v)} B$, 由于 X_v 远小于1, 梯度场 G 和射频场 $B_1(t)$ 远小于主磁场 B_0 , 则

$\nu M \approx \nu X_\nu B_0 / \mu_0$ 。由公式(1),金标受力为:

$$F = \nu G \cdot B_0 X_\nu / \mu_0 \quad (9)$$

金标为抗磁性物质,磁矩方向和磁场方向相反,故所受力矩 $\Gamma = 0$ 。

表1计算了金标在1.5、3.0和8.0 T的MRI下的受力情况,以及与重力的比值。金标所受重力 $mg = \rho \nu g = 3.798 \times 10^{-4}$ N,重力加速度 g 取 9.8 N/kg。

表1 金标在1.5、3.0和8.0 T磁共振下的受力情况
Tab.1 Force imposed by magnetic field on a gold seed in MRI of 1.5, 3.0 and 8.0 T

B_0/T	F/N	G/N	Γ/Nm
1.5	3.287×10^{-10}	0.865×10^{-6}	0
3.0	6.574×10^{-10}	1.731×10^{-6}	0
8.0	17.531×10^{-10}	4.616×10^{-6}	0

2.2 金标在MRI射频场中温度升高估算

假设射频场垂直金标长轴入射,且对金标侧面各个方向作用相同。由式(8),1.5 T的MRI下金标表面单位面积平均损耗功率 $P_L = 0.0634$ J/m²·s,3.0 T的MRI下金标表面单位面积平均损耗功率 $P_L = 0.0896$ J/m²·s,8.0 T的MRI下金标表面单位面积平均损耗功率 $P_L = 0.1464$ J/m²·s。 t 时间内,金标产生的热量为 $P_L \cdot \pi d h \cdot t$,温度升高 ΔT :

$$\Delta T = \frac{P_L \cdot \pi d h \cdot t}{C \cdot \rho \nu} = \frac{4 P_L t}{C \rho d} \quad (4)$$

表2分别计算了金标在1.5、3.0和8.0 T MRI下检查10、20、30和60 min的温度升高情况,临床MRI检查时间一般在30 min左右,这里取检查的极限时间,为60 min。

表2 金标在1.5、3.0和8.0 T磁共振下的温度升高情况
Tab.2 Temperature increase of gold seed in MRI of 1.5, 3.0 and 8.0 T

B_0/T	$\Delta T/^{\circ}C$			
	$t=10$ min	$t=20$ min	$t=30$ min	$t=60$ min
1.5	0.077	0.154	0.231	0.462
3.0	0.109	0.218	0.327	0.654
8.0	0.178	0.356	0.534	1.068

3 讨论

MRI是临床重要的检查手段,特别对肝部肿瘤^[7-10]。检查时要把人体置于强大的外加静态磁场和变化的梯度磁场中,当对带有金属置入物的患者进

行MRI检查时,置入物和MRI磁场相互作用可能会对患者造成危害^[11-14]。文献[15]报道金、银、纯钛、银汞合金因其导磁率低在MRI成像中无伪影,但在高于3.0 T特别是高达8.0 T时,会出现明显的磁场相互作用,导致置入物位移,发生危险。本文计算表明,金标所受力 F 正比于金标体积 ν ,主磁场 B_0 和梯度磁场 G ,即 $F \propto \nu G B_0$,其值远小于本身的重力。金标为抗磁性物质,所受力矩 Γ 为0。由公式(2)和公式(10),金标的温度升高 ΔT ,和射频场频率平方根 \sqrt{f} 成正比,射频场幅度平方 B_1^2 成正比,和检查时间 t 成正比,和金标直径 d 成反比,即 $\Delta T \propto \sqrt{f} B_1^2 t / d$,在检查期间,金标的温度升高非常小,即使在临床最强磁场8.0 T下,检查最长时间1 h内温度升高也不到1.1℃,对患者来讲是非常安全的。

精确求解有限金属圆柱体在射频场里损耗功率是困难的,本文做了一些近似,假设射频场垂直金标长轴入射,对金标侧面各个方向作用相同,这些假设不影响结果的数量级。我们把1颗金标放到MRI中,未发现位移,用手背触碰,温度没有明显升高。

在MRI检查中,一般对有置入物的部位不做直接成像检查,美国检测和材料协会在1.5 T试验中对MRI安全性的定义是器械在MRI的环境下使用不会给患者造成危险,但可能影响诊断信息^[16]。通过对金标的研究,可以推断对非铁磁性良导体金属置入物,做MRI检查也是安全的。

【参考文献】

- [1] 方芳,居小萍,张火俊,等.射波刀治疗周围型非小细胞肺癌临床分析[J].第二军医大学学报,2016,37(1):98-101.
FANG F, JU X P, ZHANG H J, et al. Cyberknife radiosurgery treatment of peripheral non-small lung cancer: clinical analysis[J]. Academic Journal of Second Military Medical University, 2016, 37(1): 98-101.
- [2] SCHWEIKARD A S, ADLER J. Respiration tracking in radiosurgery[J]. Med Phys, 2004, 31(10): 2738-2741.
- [3] IONASCU D, JIANG S, NISHIOKA S, et al. Internal-external correlation investigations of respiratory induced motion of lung tumors[J]. Med Phys, 2007, 34(10): 3893-3903.
- [4] GUCKENBERGER M, KRIEGER T, RICHTER A, et al. Potential of image-guidance, gating and real-time tracking to improve accuracy in pulmonary stereotactic body radiotherapy[J]. Radiother Oncol, 2009, 91(3): 288-295.
- [5] BUDINGER T F. Thresholds for physiological effects due to RF and magnetic fields used in NMR imaging[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1979, 26(2): 2821-2825.
- [6] HOULT D I, SILVER M S, CHEN C N, et al. Nuclear magnetic resonance imaging in medicine[J]. J Comput Assist Tomogr, 1982, 6(4): 862.

(下转383页)