

# 脉冲电流电磁场对淋巴细胞染色单体互换的影响

姚学玲<sup>1</sup>, 陈景亮<sup>1</sup>, 徐晓宙<sup>2</sup>, 徐传骧<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学生命科学与技术学院, 710049, 西安)

**摘要:** 通过不同模式的脉冲电流电磁场 (PCEMFs) 对离体的人体外周血淋巴细胞进行电磁辐射, 初步得出 PCEMFs 对淋巴细胞姊妹染色单体互换 (SCE) 影响的规律: 细胞 SCE 和破坏的程度与 PCEMFs 的磁感应强度  $B_m$  及其变化梯度  $dB/dt$  呈正相关关系. 提出了使细胞 SCE 发生变异的临界参考指标, 其中  $B_m$  为 0.15 T,  $dB/dt$  为  $1.8 \times 10^4$  T/s, 破坏的临界参考指标分别为 2.64 T 和  $3.3 \times 10^4$  T/s, 为强电流脉冲放电环境的电磁防护研究提供了实验依据. 细胞 SCE 及破坏的程度和 PCEMFs 中电场和磁场的空间相对位置有关, 电场和磁场相互垂直的 PCEMFs 对细胞的影响程度比其他结构形式的 PCEMFs 显著.

**关键词:** 脉冲电流电磁场; 姊妹染色单体互换; 临界参考指标

**中图分类号:** Q64 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2004)08-0855-05

## Experimental Investigation of Pulsed Current Electromagnetic Fields on Chromatid Exchange of Lymphocytes

Yao Xueling<sup>1</sup>, Chen Jingliang<sup>1</sup>, Xu Xiaozhou<sup>2</sup>, Xu Chuanxiang<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Life Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The human peripheral lymphocytes are placed in different models of radiated pulsed current electromagnetic fields (PCEMFs) environments, and the elementary experimental results illustrate that sister chromatid exchange (SCE) and breaking of the human lymphocytes are mainly related to the magnetic induction amplitude  $B_m$  and its rising gradient  $dB/dt$  of PCEMFs. The critical reference values of SCE are put forward, where the critical reference values of aberrance refer to 0.15 T ( $B_m$ ) and  $1.8 \times 10^4$  T/s ( $dB/dt$ ), the values of damage approach to 2.64 T ( $B_m$ ) and  $3.3 \times 10^4$  T/s ( $dB/dt$ ) respectively. These data can provide a criterion to study electromagnetic protection in high pulsed current discharging environment. SCE and damage of the human lymphocytes are obviously dependent upon the space structure of pulsed electric and magnetic fields, and the PCEMFs where the electric field is orthogonal to the magnetic fields have more notable influence than the other.

**Key words:** pulsed current electromagnetic fields; sister chromatid exchange; critical reference value

电磁场 (EMFs) 对生物体遗传物质的影响是研究 EMFs 对生物体影响作用的一个重要方面, 这表现在对血细胞、姊妹染色单体互换 (SCE) 以及 DNA 的影响等方面. SCE 指的是在减数分裂 I 前期同源染色体之间的遗传物质的互换、交叉标志的互换. 基因以直线形式排列在染色体上, 每个基因在染色体上都有自己的精确位置, 同源染色体的染色单体通

过断裂或重组的方式互换了片断, 由于互换导致了基因的重新组合, 因而增强了遗传的变异性<sup>[1]</sup>.

由于脉冲电压电磁场 (PVEMFs) 场源较易获得, 因而研究脉冲电磁场 (PEMFs) 对生物体遗传因素的影响较多, 并已得出了一些研究结果: 重复的 PVEMFs 对细胞遗传指标会产生直接的影响, 引起家猪淋巴细胞和人体外周血淋巴细胞 SCE 及染色体

畸变率(CA)的上升<sup>[2-3]</sup>; 高电压脉冲放电环境中的单次 PVEMFs、空间 X 射线、臭氧以及氮氧化物等也会对细胞产生间接的生物效应,引起 SCE 及 CA 的升高<sup>[4-7]</sup>. 单次脉冲电流电磁场(PCEMFs)由强电流脉冲放电环境产生,它存在于高低压防雷器件的冲击电流试验中. 随着防雷业的发展,脉冲电流的等级越来越高(已由原来的 20 kA 升至 100~200 kA),使得防雷器件检测的工作环境越来越恶劣. 由于 PCEMFs 存在的特殊性,很少有学者对其进行专门研究,但是强 PCEMFs 对生物体(小白鼠)具有强烈的生物影响,可引起生物体血细胞数量的减少<sup>[8-9]</sup>.

本文针对脉冲电流放电环境,研究 PCEMFs 与人体淋巴细胞遗传指标 SCE 之间的关系. 此项研究的开展标志着 PEMFs 生物效应的研究已开始向生命科学交叉,对揭示 PEMFs 与人类遗传之间的关系及脉冲电流放电环境的电磁防护具有重要的理论与现实意义.

## 1 淋巴细胞 SCE 的 PCEMFs 试验环境

为了研究 PCEMFs 和细胞 SCE 之间量的关系,本文建立了两种不同模式的 PCEMFs: 通以脉冲电流的长直导线形成的 PCEMFs 和通以脉冲电流的螺线管形成的 PCEMFs. 脉冲电流采用常用到的 8/20  $\mu$ s 雷电波和 2 ms 方波. 这两种典型的脉冲电流波有着明显的差异: 8/20  $\mu$ s 雷电波(上升时间  $T_1 = 8 \mu$ s, 持续时间  $T_2 = 20 \mu$ s)具有上升时间与持续时间短、幅值大(100 kA)的特征; 2 ms 方波(上升时间  $T_1 = 300 \mu$ s, 持续时间  $T_2 = 2.4$  ms)则具有上升时间与持续时间长、幅值较小的特征. 脉冲电流形成的 PEMFs 如图 1 所示,其中图 1a 为幅值为  $I_m$  的脉冲电流通过长度为  $L$  的直导线时,垂直于载流导线的中心平面上形成的电磁场,图 2b 为幅值为  $I_m$  的脉冲电流通过单位长度匝数为  $n$  的螺线管时,管内中心轴线上所形成的电磁场.

图 1a 中,中心平面上距场点  $o$  距离为  $r$  处的  $B_m$  为

$$B_m = \frac{\mu_0 I_m}{2r} \left[ \frac{L/2}{((L/2)^2 + r^2)^{1/2}} \right] \quad (1)$$

式中:  $\mu_0 = 4 \times 10^{-7}$  (H/m) 为空气的导磁率.

图 1b 中,螺线管中心轴线上任意点的  $B_m$  为

$$B_m = \mu_0 n I_m L (D^2 + L^2)^{-1/2} \quad (2)$$

式中:  $D$  为螺线管的直径;  $L$  为螺线管长度. 在图 1b 中,将螺线管等效为一个电感,通入变化率很快的脉

冲电流,螺线管的两端势必存在较大的感应电动势. 如将这个电动势等效为螺线管两个端点的电位差,则它在螺线管中产生的电场方向将如图 1b 所示(或相反).

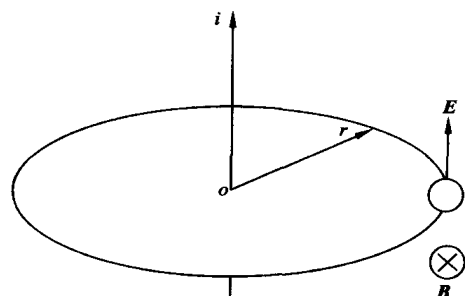
在求得任意点的  $B_m$  后,此点  $B$  的变化率为

$$\frac{dB}{dt} = \frac{B_m}{T_1} \quad (3)$$

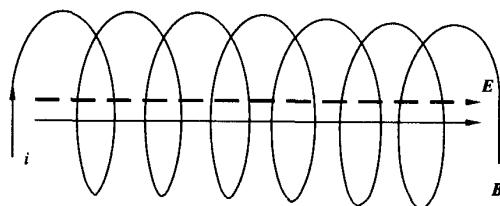
图 1 中两种模式的 PCEMFs 有如下的特征: 当图 1 中通以 8/20  $\mu$ s 脉冲电流且产生相同的  $B_m$  时,图 1a 中形成的 PCEMFs 的  $dB/dt$  远大于图 1b 的  $dB/dt$ ,而通以 2 ms 方波电流且产生相同的  $B_m$  时,图 1a 中形成的 PCEMFs 的  $dB/dt$  和图 1b 的  $dB/dt$  基本相同; 当通以 8/20  $\mu$ s 脉冲电流且产生相同的  $dB/dt$  时,图 1a 中形成的 PCEMFs 的  $B_m$  远小于图 1b 的  $B_m$ ,而通以 2 ms 方波脉冲电流且产生相同的  $dB/dt$  时,图 1a 中形成的 PCEMFs 的  $B_m$  和图 1b 的  $B_m$  相同; 在两种不同模式的 PCEMFs 中,电场方向和磁场方向的相对位置不同,图 1a 中,电场和磁场的位置相互垂直,图 1b 中,电场和磁场的位置相互平行.

## 2 实验对象、实验方法和实验判据

在细胞遗传学中, SCE 一般被看作基因损害程度的敏感指标之一,因此本文选用 SCE 作为



(a) 直导线中心轴线上的 PCEMFs



(b) 螺线管中心轴线上的 PCEMFs

图 1 两种模式的 PCEMFs

PCEMFs对细胞影响程度的检测指标.细胞培养及观察的具体方法<sup>[10]</sup>如下.

### 2.1 培养基

在无菌条件下,将质量分数为80%的PRMI1640培养基(GIBCO)、质量分数为20%的新生牛血清(四季青生物公司)与PHA(phytoheagglutinin,植物血凝素,Sigma公司)0.5 mg/mL混合,用质量分数为5%的NaHCO<sub>3</sub>调整pH至7.0,分装入25 mL培养瓶中,每瓶5 mL.

### 2.2 培养

(1) 采血:无菌采集健康人静脉血,用2 mL注射器抽取0.1 mL无菌肝素(625 unit/mL)后,抽静脉血2 mL,摇动针管,使血与抗凝剂充分混匀.

(2) 接种:在超净台内将培养瓶橡皮塞表面消毒,用针头刺穿皮塞加入0.2 mL抗凝血,轻轻摇匀,置37℃培养箱静置培养68~72 h.

### 2.3 实验

细胞培养24 h,将培养的细胞随机分组(对照组与实验组),并在每瓶内加入滤菌的5-BrdU(5-溴脱氧尿苷,Sigma公司)至终浓度为3 μg/mL,将实验组放置在PCEMFs实验环境中,辐射后对照组和实验组一同放入细胞培养箱中继续培养.

### 2.4 制片

(1) 收获前加入秋水仙胺,常规收获细胞,制备染色体.

(2) 制好的玻片在室温下分别放入0.14 mol/L的NaCl溶液、0.004 mol/L的NaCl溶液、0.01 mol/L的PBS溶液内各5 min.

(3) 取出玻片并甩干后平放于片板上,每张片子滴加数滴150 μg/mL的Hoecht 33258(Sigma)液,以盖玻片覆盖其上,压除其间的空气,避光室温下放置20 min.

(4) 轻轻去除盖玻片,将片子放入0.01 mol/L的PBS液2次,每次10 min,用2xssc液漂洗干净.

(5) 将片子细胞面朝上,水平浸泡在有2xssc液的平皿内,放入50℃水浴,标本上方放置30 W紫外光灯管,灯与标本之间的间距为10 cm,光照及热处理标本30 min,蒸馏水漂洗标本片.

### 2.5 染色

(1) 放入0.01 mol/L的PBS与Gemsa(GIBCO)混合液(10:1)中,pH值为7.0,染色8 min.

(2) 蒸馏水漂洗,晾干镜检.

### 2.6 标本镜下观察

两条姊妹染色单体都淡染者为细胞分裂第一周

期;两条姊妹染色单体一深一浅者为第二周期;两条染色体全浅染者为第三周期.观察计数第二周期的染色体,凡两条染色单体末端交换者其交换数 $n_{SCE}$ 为1,臂内交换者 $n_{SCE}$ 为2,若着丝粒区发生交换者 $n_{SCE}$ 为1.总共观察30个中期分裂相(1380个核型数),并计数每个细胞的 $n_{SCE}$ 和每条染色体的交换率 $SCE'$ .

### 2.7 实验数据分析

采用数理统计中的t检验对实验数据进行处理,以判断PCEMFs是否引起细胞SCE显著性变化.设为差异水平,取 $\alpha=0.05$ 为显著差异水平, $\alpha=0.01$ 为非常显著差异水平.

## 3 实验条件、实验结果及分析

### 3.1 实验条件和实验结果

将培养好的细胞在两种不同的PCEMFs条件下进行辐射,辐射每分钟一次,持续时间为1 h.具体的辐射条件和实验结果如表1、表2所示.图2为PCEMFs作用后,细胞SCE的实验图片,箭头所指为细胞SCE的互换位置.

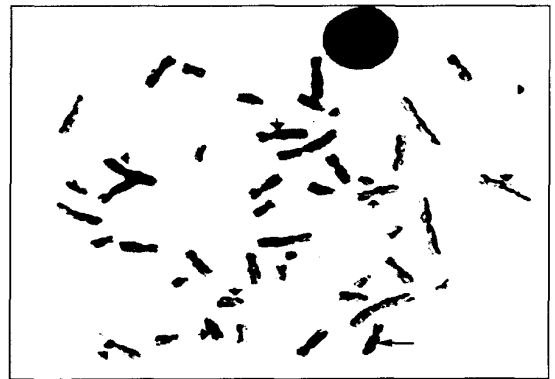


图2 细胞SCE的实验图片(10×100)

### 3.2 实验结果分析

从上面的实验条件和实验数据,我们可以得出如下实验结果.

(1) 螺线管PCEMFs对SCE的影响程度和PCEMFs的波形形状有关.将试品1-2#、1-3#、1-4#和1-5#通以8/20 μs脉冲电流的螺线管形成的PCEMFs,其 $B_m$ 和 $dB/dt$ 较大,持续时间较短;将试品6#、7#通以2 ms脉冲电流的螺线管形成的PCEMFs,其 $B_m$ 和 $dB/dt$ 较小,持续时间较长.试品1-2#和1-6#所处PCEMFs的 $B_m$ 基本相同,而1-2#所处PCEMFs的 $dB/dt$ 远大于1-6#的 $dB/dt$ .

表1 螺线管 PCEMFs 对细胞 SCE 的影响

组别	实验结构及波形	分析细胞核形数/个	$B_m/T$	$B_m T_1^{-1}/(T \cdot s^{-1})$	$n_{SCE}$	SCE
1-1#	对照组	1 380			32	1.06
1-2#	螺线管(80/160 $\mu$ s)	1 380	0.264	3 300	48	1.61*
1-3#	螺线管(80/160 $\mu$ s)	1 380	1.32	16 500	51	1.70**
1-4#	螺线管(80/160 $\mu$ s)	1 380	2.64	33 000	- <sup>1</sup>	0.3~0.5 <sup>1</sup>
1-5#	螺线管(80/160 $\mu$ s)	1 380	5.28	66 000	- <sup>2</sup>	- <sup>2</sup>
1-6#	螺线管(300 $\mu$ s/2.4 ms)	1 380	0.31	1 033	53	1.75**
1-7#	螺线管(300 $\mu$ s/2.4 ms)	1 380	0.344	1 147	60	1.98**

注:上标1表示完好的细胞数量较少,观察不到规定数量的细胞,因此淋巴细胞的 SCE 计数存在一定困难,初步估计有30%~50%的细胞已遭到破坏;上标2表示由于细胞的破坏程度更为严重,细胞基本呈破碎或融合状态,因此无法对细胞的 SCE 进行计数;上标\*表示实验组与对照组比较有显著差异;上标\*\*表示实验组与对照组比较有非常显著的差异。

表2 直导线 PCEMFs 对细胞 SCE 的影响

组别	实验结构及波形	分析细胞核形数/个	$B_m/T$	$B_m T_1^{-1}/(T \cdot s^{-1})$	$n_{SCE}$	SCE
2-1#	对照组	1 380			53	1.77
2-2#	直导线(8/20 $\mu$ s)	1 380	0.10	13 043	71	2.37*
2-3#	直导线(8/20 $\mu$ s)	1 380	0.15	18 292	82	2.73**
2-4#	直导线(8/20 $\mu$ s)	1 380	0.25	31 250	85	2.83**
2-5#	直导线(8/20 $\mu$ s)	1 380	0.75	93 750	90	2.99**

$dt$ ,从实验结果看,试品1-6#实验结果比1-2#的显著,这就说明螺线管 PCEMFs 对 SCE 的影响和形成 PCEMFs 的波形形状有关。

螺线管 PCEMFs 对细胞的破坏程度和  $B_m$ 、 $dB/dt$  有关,当 PCEMFs 的  $B_m$ 、 $dB/dt$  超过一定值后,可能引起细胞的破坏。试品1-4#和1-5#所处 PCEMFs 的  $B_m$  和  $dB/dt$  都较大,另一方面,它们的 PCEMFs 持续时间(160  $\mu$ s)又小于试品1-6#和1-7#的持续时间(2.4 ms)。也就是说,在 PCEMFs 对细胞作用的过程中,起主要作用的不是 PCEMFs 的持续时间,PCEMFs 的强  $B_m$ 、 $dB/dt$  才是引起人体外周血淋巴细胞破坏的主要原因。因此,将开始出现大量损伤时的试品1-4#的  $B_m$ 、 $dB/dt$  实验条件作为螺线管 PCEMFs 引起人体外周血淋巴细胞破坏的临界参考指标,其值大约为  $(B_m, dB/dt) = (2.64 T, 3.3 \times 10^4 T/s)$ 。

(2)直导线 PCEMFs 对人体淋巴细胞 SCE 的影响程度与  $B_m$ 、 $dB/dt$  有关。直导线 PCEMFs 对人体外周血淋巴细胞的影响程度是一个逐渐变化的过程,和对照组相比,试品2-2#细胞的 SCE 发生了显著性变化( $<0.05$ ),试品2-3#、2-4#、2-5#细胞的 SCE 发生了非常显著的变化( $<0.01$ ),即

随着直导线 PCEMFs 的  $B_m$  和  $dB/dt$  的升高,PCEMFs 对细胞的影响程度逐渐增加。从显著性变化到非常显著性变化有一个临界点,我们将这一点定为 PCEMFs 使细胞发生变异的临界点,将试品2-3#的实验条件  $(B_m, dB/dt) = (0.15 T, 1.829 \times 10^4 T/s)$  作为直导线 PCEMFs 使细胞变异的临界参考指标。

(3)PCEMFs 对细胞遗传指标的影响程度可能和 PCEMFs 的结构模式有关。在  $B_m$  基本一致的条件下,长直导线 PCEMFs 对 SCE 的影响程度要比螺线管 PCEMFs 对细胞的影响程度显著,这可从1-2#和2-3#的实验数据对比结果中看出。在  $dB/dt$  基本一致的条件下,长直导线 PCEMFs 对细胞 SCE 的影响程度要比螺线管 PCEMFs 对细胞的影响程度显著,这可从1-3#和2-2#、2-3#的实验数据对比结果中看出。

另外,从螺线管和直导线 PCEMFs 使细胞变异的临界参考指标也可以得出,在  $B_m$  不超过一定数值的情况下(本文中  $B_m$  在1.32~2.64 T之间,确切的  $B_m$  尚需要进一步的实验论证),直导线 PCEMFs 对细胞 SCE 的破坏程度要比螺线管 PCEMFs 显著。因此,我们得出 PCEMFs 对细胞的影响程度可能和 PCEMFs 的结构模式(电场和磁场的空间位置关系)

有关的实验结论.

## 4 结 论

根据两种不同模式的 PCEMFs 对人体外周血淋巴细胞 SCE 的实验得出, PCEMFs 对细胞的 SCE 有显著的影响. PCEMFs 和细胞 SCE 之间的作用关系如下.

(1) PCEMFs 对细胞 SCE 的影响程度和 PCEMFs 的波形参数有关. 在  $B_m$  一定的情况下, 细胞 SCE 和 PCEMFs 的  $dB/dt$  呈较显著的正相关性.

(2) 强  $B_m$ 、 $dB/dt$  的 PCEMFs 可以引起细胞的变异和破坏, 通过实验初步提出了使细胞发生变异和破坏的两个临界参考指标分别为  $(B_m, dB/dt) = (0.15 \text{ T}, 1.8 \times 10^4 \text{ T/s})$  和  $(B_m, dB/dt) = (2.64 \text{ T}, 3.3 \times 10^4 \text{ T/s})$ .

(3) PCEMFs 对细胞 SCE 的影响程度和 PCEMFs 中电场、磁场的空间相对位置有关. 因为从实验结果来看, 电场、磁场相互垂直的 PCEMFs 对细胞 SCE 的影响作用要比其他形式的 PCEMFs 对细胞 SCE 的影响作用显著.

### 参考文献:

- [1] 程在玉. 医学遗传学基础与临床[M]. 青岛: 青岛出版社, 1993.
- [2] Zou Fangdong, Xu Liu, Wang Zishu, et al. Cytogenetic ef-

fects of pulsing electromagnetic field on domestic pig lymphocytes in vitro[J]. Zoological Research, 2001, 22(2): 89 - 92.

- [3] Antonopoulos A, Eisenbrandt H, Obe G. Effects of high frequency electromagnetic fields on human lymphocytes in vitro[J]. Mutation Research, 1997, 395(2 - 3): 209 - 214.
- [4] Yang Baochu, Zao Wenzheng, Zhang Maohua, et al. Effects of high voltage discharging on human bodies of worker[J]. Electricity, 1991, 12(2): 41 - 48.
- [5] 张茂华, 杨保初, 王元芳, 等. 生物体细胞在高压放电环境中的畸变效应[J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 1996, 14(6): 335 - 339.
- [6] 杨保初, 赵文正, 张茂华. 高压放电对人体生物效应影响的研究[J]. 中国辐射卫生, 1994, 3(3): 129 - 132.
- [7] 张茂华, 杨保初, 王元芳, 等. 高压放电对小鼠和离体人血影响的实验观察[J]. 环境与健康杂志, 1995, 12(4): 145 - 147.
- [8] 钟力生, 徐晓宙, 徐传骥. 脉冲电磁场对小白鼠血细胞的影响[J]. 西安交通大学学报, 1998, 32(2): 9 - 11.
- [9] 吴广宁, 徐 蓉, 谢恒堃, 等. 脉冲电磁场对雄性小白鼠生物效应的研究[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(2): 141 - 144.
- [10] 鄂 征. 组织培养技术[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1986.

(编辑 杜秀杰)

### [文摘预登]

## 小波包频带能量分解在断路器机械状态监测中的应用

孟永鹏, 贾申利, 荣命哲

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

基于小波包原理, 将断路器操作振动信号分解到独立的频带内, 不同频带内信号能量的变化反映了断路器机械运行状态的改变. 提取主要的频带能量作为断路器状态监测的特征向量, 并根据试验结果确定了不同状态下能量特征向量的容差范围, 从而实现了不同机械状态的简单分类, 为断路器的机械状态监测提供了相应的量化依据. 试验中模拟了 ZN12-35 型真空断路器 4 种不同的合闸同期性状态, 采用单个加速度传感器在机构箱上获取合闸时的触头振动信号. 该信号经过小波包频带能量分解后, 各种合闸同期性状态分类集中在复平面中明显区分的不同区域内, 从而验证了该方法在断路器机械状态监测中的有效性. 重复试验表明, 在保证监测系统稳定的前提下, 该方法具有较高的状态监测准确率.