

## 开口金属腔体对强电磁脉冲的耦合效应\*

陈宗胜, 李志刚

(国防科技大学 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037)

**摘要:**为了评价腔体开口因素对核电磁脉冲(High-amplitude ElectroMagnetic Pulse, HEMP)和高功率微波(High Power Microwave, HPM)破坏效能的影响,采用CST电磁计算软件建立强电磁脉冲的孔缝耦合模型,研究孔缝的位置、大小以及长宽比对HEMP和HPM耦合效应的影响。结果表明,孔缝的位置、大小及长宽比对HEMP的耦合效应影响较大,合理控制孔缝的位置、大小以及长宽比能在一定程度上削弱HEMP的破坏效能。对于HPM,相同条件下其耦合效应要明显强于HEMP。在孔缝达到一定尺寸后,其大小和长宽比对HPM的耦合效应影响较小,仅孔缝位置会带来较大的影响。当开口平面与HPM入射方向平行时,耦合效应最弱,但此时耦合进入腔体内的能量还是很容易达到多种电子元器件的电磁损伤阈值级别。

**关键词:**强电磁脉冲;开口金属腔体;耦合效应

中图分类号:O539 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2020)01-018-06

## Coupling effects of open-ended metal enclosure induced by powerful electromagnetic pulse

CHEN Zongsheng, LI Zhigang

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

**Abstract:** In order to investigate the influence of an opening in a metal cavity on the destruction efficiency of HEMP (high-amplitude electromagnetic pulse) and HPM (high power microwave), the model of electromagnetic pulse coupling into an open-ended metal enclosure was built with the help of CST software. Based on the model, the influences of the location, size and length-to-width ratio of the aperture on coupling effects of HEMP and HPM were researched. As for HEMP, the location, size and length-to-width ratio of the aperture can exert great influence on the coupling effect, so the destruction efficiency of HEMP can be weakened by reasonable controls of these factors. As for HPM, its coupling effect is obviously stronger than that of HEMP under the same conditions. After the aperture reaches a certain size, its size and length-to-width ratio have few influences on the coupling effect of HPM, and only the location of the aperture has a great influence. The coupling effect is the weakest when the plane of the opening is in parallel with the incident direction of HPM, but the energy coupled into the cavity can easily reach the electromagnetic damage level of many electronic components.

**Keywords:** powerful electromagnetic pulse; open-ended metal enclosure; coupling effect

电子设备在各种武器系统中的作用越来越重要,而强电磁脉冲武器的出现对电子设备构成了严重威胁<sup>[1-2]</sup>。一般来说,电子设备外部通常会加有金属腔体进行保护,但是在实际工作中,为便于散热和传输信号等,金属腔体表面不可避免地留有开口和孔缝,这为电磁脉冲信号进入金属腔体内部提供了有效途径<sup>[3-4]</sup>。当强电磁脉冲照射在金属腔体表面时,入射波一方面在金属腔体表面形成次级辐射源,持续向腔内辐射电磁能量,另一方面,通过腔体表面的开口直接耦合进入腔体内部,从而在腔体内部叠加形成复杂的电磁分布。当耦合进入腔体内的能量达到一定程度时,将会

干扰甚至破坏腔体内电子设备的正常工作。

目前,电磁脉冲武器主要有核电磁脉冲(High-amplitude ElectroMagnetic Pulse, HEMP)和高功率微波(High Power Microwave, HPM)两种辐射类型<sup>[5]</sup>,研究这两种强电磁脉冲耦合进入开口金属腔体内的电磁特性,不论是对于己方电磁脉冲武器的效能评估还是对于敌方电磁脉冲武器的防护都具有重要的意义。当前,关于强电磁脉冲的孔缝耦合效应的探讨,国内外进行了大量的研究工作。王建国等采用时域有限差分(Finite Different Time Domain, FDTD)模拟法计算分析了强电磁脉冲通过孔缝的耦合效应,研究表明屏蔽体内孔缝附近的

\* 收稿日期:2019-03-29

基金项目:安徽省自然科学基金资助项目(1908085MF205)

作者简介:陈宗胜(1982—),男,安徽巢湖人,助理研究员,博士,E-mail:chenzongsh12@163.com

耦合场强最大<sup>[6]</sup>;鲍永波等分析了电磁脉冲对正方形孔洞和长方形孔洞的耦合效应,研究表明耦合效应会受到极化方向的影响<sup>[7]</sup>。在前人的基础上,本文进一步研究分析了腔体开口因素对强电磁脉冲破坏效能的影响,利用 CST 电磁仿真软件建立了强电磁脉冲的孔缝耦合模型,利用该模型,通过考察不同情形下腔体内耦合能量的改变,研究了腔体上孔缝的位置、大小以及长宽比等因素对 HEMP 和 HPM 耦合效应的影响。

## 1 仿真模型

图1为利用 CST 软件建立的电磁脉冲孔缝耦合模型,电磁脉冲采用平面波激励,传播方向为 $-z$ 方向,入射波电场和磁场方向分别为 $+x$ 和 $-y$ 方向。腔体大小为 $1000 \times 1000 \times 1000$ (若无特殊说明,模型中尺寸单位均采用 mm),腔体材质设置为完美电导体,腔壁厚度为5,在 $z = 1000$ 、 $xy$ 平面中心处设置正方形开口,开口大小为 $200 \times 200$ ,背景设为空气。

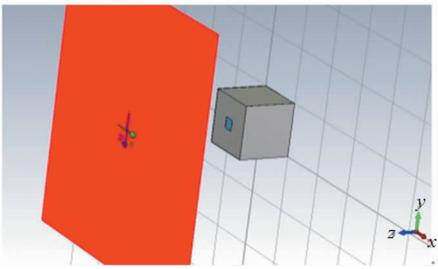


图1 电磁脉冲孔缝耦合模型

Fig. 1 Coupling model induced by powerful electromagnetic pulse

为了便于后续仿真结果分析,在计算过程中,设置电场强度探针用于记录强电磁脉冲在腔体不同位置处的耦合信号特征。将电场探针分别设置在目标腔体内部中轴线不同位置( $yz$ 平面, $x = 500$ ),如图2所示,分别为 Middle probe(500, 500, 1000)、A0 probe(500, 500, 900)、B0 probe(500, 500, 500)、C0 probe(500, 500, 100)。

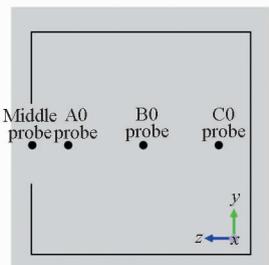


图2 电场强度探针设置示意

Fig. 2 Schematic diagram of electric field probes inside the cavity

## 2 强电磁脉冲设置

### 2.1 HEMP 的设置

目前,电磁脉冲弹是典型电磁脉冲武器之一,其辐射的 HEMP 时域波形可采用双指数函数来表达<sup>[8-9]</sup>,具体为:

$$E(t) = E_0 \cdot k \cdot [\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)]$$

其中, $E_0$ 为脉冲峰值场强, $\alpha$ 、 $\beta$ 的值影响波形脉宽、上升时间等参数。

选取文献[8]所述的典型电磁脉冲弹辐射的电磁脉冲作为参考,假设 $E_0 = 5 \times 10^5$  V/m, $k = 1.214$ , $\alpha = 3.5 \times 10^6$ , $\beta = 1.5 \times 10^9$ ,波形上升时间为2.645 ns,脉冲宽度为100 ns,峰值功率为 $1 \times 10^9$  W/m<sup>2</sup>,在100 ns的时间内辐射的总能量密度为 $1.3 \times 10^{-3}$  J/cm<sup>2</sup>。

### 2.2 HPM 的设置

HPM 辐射电场通常近似表示<sup>[10-11]</sup>为:

$$E(t) = \begin{cases} E_0 \frac{t}{t_1} \sin(2\pi f_0 t) & 0 < t < t_1 \\ E_0 \sin(2\pi f_0 t) & t_1 < t < t_1 + \tau \\ E_0 \left( \frac{2t_1 + \tau}{t_1} - \frac{t}{t_1} \right) \sin(2\pi f_0 t) & t_1 + \tau < t < 2t_1 + \tau \end{cases}$$

其中, $E_0$ 为场强峰值, $\tau$ 为脉宽, $t_1$ 为脉冲上升时间和下降时间, $f_0$ 为载波频率。

选用6 GHz作为 HPM 的载波频率,根据文献[11]给出的高功率微波武器参数,假设有效功率密度为 $5 \times 10^9$  W/m<sup>2</sup>,场强峰值 $E_0 = 2 \times 10^6$  V/m,在100 ns的辐射时间内释放的总能量密度为 $5 \times 10^{-2}$  J/cm<sup>2</sup>。

## 3 结果及分析

### 3.1 仿真结果与数据处理

利用前面的模型即可计算得到不同时刻强电磁脉冲耦合进入开口金属腔体内的电磁场。图3和图4分别给出了 $t = 3.3$  ns时刻 HEMP 以及 $t = 19.25$  ns时刻 HPM 在 $yz(x = 500)$ 平面上耦合电场的分布。从图中可以看出,两种强电磁脉冲可通过腔体开口向腔内辐射能量,入射波会在腔内振荡传播,形成独特的空间电磁分布。

通过对所设置的电场探针测得的信号进行提取,可以得到不同位置处耦合信号的时域波形,如图5所示。对于 HEMP, Middle probe 和 A0 probe 测得的电场强度峰值较大, B0 probe 和 C0 probe 处电场强度峰值较小,并且均小于入射场强峰值,这说明只有少部分 HEMP 能量能耦合进入腔体

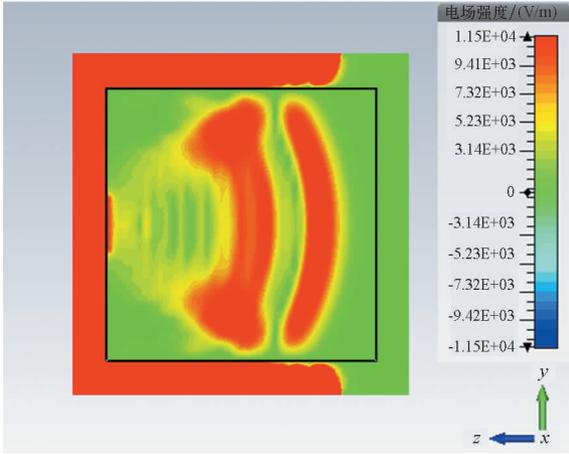


图 3  $t = 3.3$  ns 时刻 HEMP 耦合电场的分布  
 Fig. 3 Coupling electric field of the HEMP inside the cavity at  $t = 3.3$  ns

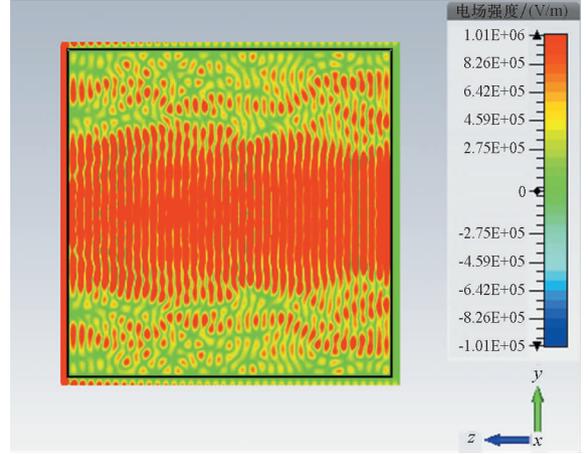
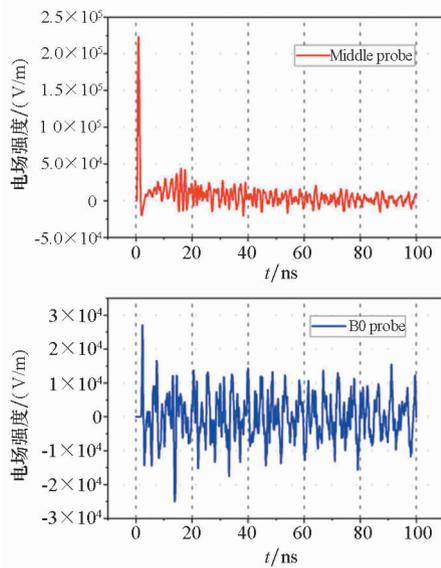
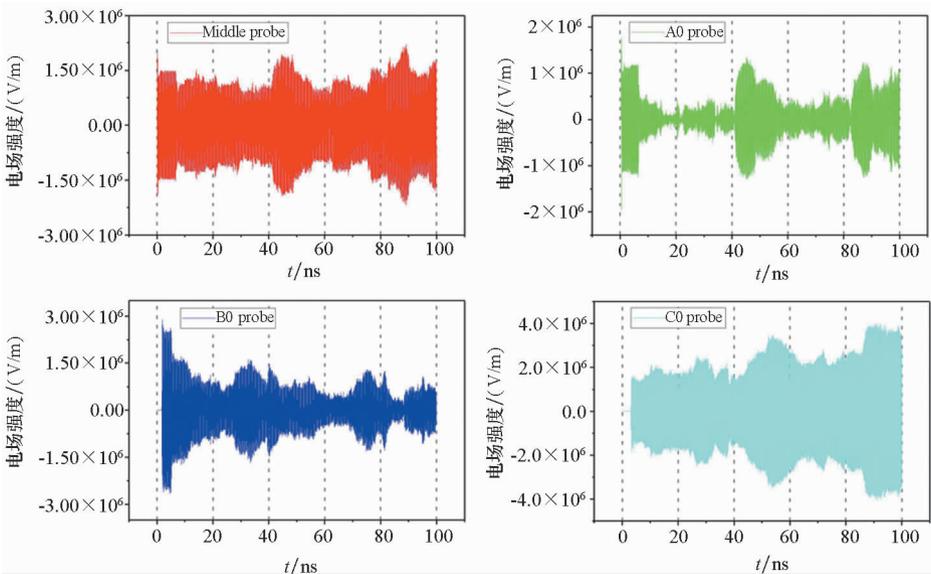


图 4  $t = 19.25$  ns 时刻 HPM 耦合电场的分布  
 Fig. 4 Coupling electric field of the HPM inside the cavity at  $t = 19.25$  ns



(a) HEMP



(b) HPM

图 5 电场强度探针测得的耦合信号

Fig. 5 Coupled signals measured by the electric field probes

内部。对于 HPM, B0 probe 和 C0 probe 处测得的电场强度大于 Middle probe 和 A0 probe 处, 并且峰值大于入射场强峰值  $2 \times 10^6$  V/m, 这一现象与 HEMP 孔缝耦合效应有所不同。产生这种现象的原因在于: 入射 HPM 频率较高, 耦合进入腔体内部受到孔缝的限制较小, 同时, 耦合过程中进入腔体内部的电磁能量不断叠加积累, 从而导致腔体内部分区域的场强峰值会大于入射场强峰值。

对不同条件下探针测得的电场信号进行处理, 得到的功率密度和能量密度值如表 1 所示。从表中可以看出, HEMP 和 HPM 耦合到腔体内的能量已达多种电子元器件破坏阈值级别<sup>[12-14]</sup>。若进一步增加辐射功率和辐射时间, 则会导致更多的电子元器件被破坏。此外, 对比两种强电磁脉冲释放的总能量以及腔体内的耦合能量可以看出, 在上述仿真条件下, HPM 进入腔体内的耦合效率要明显高于 HEMP。

考虑强电磁脉冲进入金属腔体内部的耦合效应还会与腔体开口的大小与分布等因素有关, 为此, 下面从腔体开口因素展开研究, 分析开口位置、大小以及开口长宽比对耦合效应的影响, 考察不同情形下耦合能量的改变。

### 3.2 开口位置对腔内电场的影响

保持激励波的大小和方向不变, 开口大小仍设为  $200 \times 200$ , 分别将开口位置设置在  $x$  平面 ( $x = 1000$ , 此时开口平面与激励波入射方向平

行, 与电场方向相垂直)、 $y$  平面 ( $y = 1000$ , 此时开口平面与激励波入射方向平行, 垂直于磁场方向) 和  $z$  平面 ( $z = 1000$ , 此时开口平面与激励波入射方向相垂直), 并按照开口位置对相应的电场探针进行调整, 其他仿真条件设置不变。

对计算所得的数据进行整理计算, 可以得到不同探针处的平均功率密度和总的能量密度值。表 2 为 C0 probe 处的数据处理结果。从表中可以看出, 不同开口位置下电场探针测得的电场信号值差别较大, 这说明腔体开口位置对强电磁脉冲耦合效应具有较大影响。不论是对于 HEMP 还是 HPM, 当腔体开口平面与激励波入射方向垂直 ( $z$  平面) 时, 入射波耦合效应最显著, 能够耦合进入目标腔体的电磁能量最多; 当开口平面平行于入射波方向时, 电磁脉冲耦合值相对较小。另外, 值得注意的是, 开口在任意位置时 HPM 耦合信号功率密度都比较大, 达到了多种电子元器件的电磁损伤阈值级别。

### 3.3 开口大小对腔内电场的影响

入射波保持不变, 开口位置设置在  $z$  平面, 依次设置开口的大小为  $50 \times 50$ 、 $100 \times 100$ 、 $200 \times 200$ 、 $300 \times 300$  和  $400 \times 400$ , 其他仿真条件设置不变。

对计算所得的数据进行整理计算, 同样可以得到该仿真条件下不同位置处的平均功率密度和总的能量密度值。表 3 为开口大小 (表中  $d$  表示

表 1 电场强度探针测得信号的主要参数

Tab. 1 Typical parameters of the coupled signals measured by the electric field probes

	探针	电场强度峰值/(V/m)	平均功率密度/(W/cm <sup>2</sup> )	总能量密度/(J/cm <sup>2</sup> )
HEMP	Middle probe	$2.2 \times 10^5$	102.7	$1.03 \times 10^{-5}$
	A0 probe	$1.27 \times 10^5$	35.3	$3.53 \times 10^{-6}$
	B0 probe	$2.7 \times 10^4$	10.7	$1.07 \times 10^{-6}$
	C0 probe	$3.05 \times 10^4$	14.4	$1.44 \times 10^{-6}$
HPM	Middle probe	$2.2 \times 10^6$	$2.42 \times 10^5$	$2.42 \times 10^{-2}$
	A0 probe	$2.0 \times 10^6$	$5.7 \times 10^4$	$5.7 \times 10^{-3}$
	B0 probe	$2.9 \times 10^6$	$1.45 \times 10^5$	$1.45 \times 10^{-2}$
	C0 probe	$4.0 \times 10^6$	$8.18 \times 10^5$	$8.18 \times 10^{-2}$

表 2 不同开口位置条件下耦合信号的主要参数

Tab. 2 Typical parameters of the coupled signals with different locations of the aperture

	测量参数	$x$ 平面	$y$ 平面	$z$ 平面
HEMP	平均功率密度/(W/cm <sup>2</sup> )	1.49	0.48	14.40
	总能量密度/(J/cm <sup>2</sup> )	$1.49 \times 10^{-7}$	$4.79 \times 10^{-8}$	$1.44 \times 10^{-6}$
HPM	平均功率密度/(W/cm <sup>2</sup> )	$1.67 \times 10^4$	$1.84 \times 10^3$	$8.19 \times 10^5$
	总能量密度/(J/cm <sup>2</sup> )	$1.67 \times 10^{-3}$	$1.84 \times 10^{-4}$	$8.18 \times 10^{-2}$

表 3 不同孔缝大小条件下耦合信号的主要参数

Tab. 3 Typical parameters of the coupled signals with different sizes of the aperture

测量参数		$d = 50$	$d = 100$	$d = 200$	$d = 300$	$d = 400$
HEMP	平均功率密度/(W/cm <sup>2</sup> )	0.022	1.28	14.40	35.83	63.90
	总能量密度/(J/cm <sup>2</sup> )	$2.18 \times 10^{-9}$	$1.28 \times 10^{-7}$	$1.44 \times 10^{-6}$	$3.58 \times 10^{-6}$	$6.39 \times 10^{-6}$
HPM	平均功率密度/(W/cm <sup>2</sup> )	$2.11 \times 10^4$	$1.21 \times 10^5$	$8.19 \times 10^5$	$7.97 \times 10^5$	$7.62 \times 10^5$
	总能量密度/(J/cm <sup>2</sup> )	$2.1 \times 10^{-3}$	$1.2 \times 10^{-2}$	$8.18 \times 10^{-2}$	$7.92 \times 10^{-2}$	$7.6 \times 10^{-2}$

开口边长)变化时 CO probe 处的数据处理结果。从表中可以看出,开口尺寸对电磁脉冲耦合效应具有较大的影响。对于 HEMP 激励来说,开口尺寸越大,腔体内耦合信号越强,耦合的能量也就越多。对于 HPM 激励来说,其变化趋势略有不同,当开口尺寸由 50 增加到 200 时,腔内耦合能量显著增加,但当开口尺寸继续增大时,腔内耦合能量不但没有增加反而略微下降。这一现象的出现与耦合电磁波的频谱范围有关。HEMP 激励波是一宽频电磁波,频率范围主要分布在 0 ~ 1 GHz,当开口尺寸较小时,仅有小部分频谱分量能够耦合进入目标腔体内部,因而耦合能量较小。随着开口尺寸增大,越来越多的频谱分量能够耦合到腔体中,耦合能量显著增加。而 HPM 属于窄频信号,能量主要集中在载波频率  $f_0$  附近,仿真时  $f_0$  设置为 6 GHz,波长为 50 mm,当开口尺寸较小时,随着尺寸增加,耦合面积随之增加,腔体内的耦合能量也就不断增大;但当开口尺寸较大时,继续增大开口尺寸,耦合信号在腔体内的振荡过程会更为剧烈,振荡中从开口位置逃离的电磁能量逐渐增多,因而,此时随着开口尺寸增大,耦合能量不但不能继续增加,反而会略微下降。

### 3.4 开口长宽比对腔内电场的影响

保持激励波方向和大小不变,孔缝位置设置在  $z$  平面,固定开口面积,依次调节孔缝的尺寸为  $50 \times 800$ 、 $100 \times 400$ 、 $200 \times 200$ 、 $400 \times 100$  和  $800 \times 50$ ,其他仿真条件设置不变。

与前面类似,表 4 给出了开口长宽比变化时

CO probe 处的数据处理结果,表中  $L_x$  为腔体开口与入射电场极化方向平行的边长。从表中可以看出,对于两种强电磁脉冲,长宽比对耦合效应的影响具有不同的变化规律。对于 HEMP 激励来说,耦合功率密度随开口  $x$  方向边长的增加而减小,即腔体开口与入射电场极化方向垂直的边越长,腔体中耦合能量越大,这一现象反映了矩形孔缝耦合的极化特性。产生这一特性的原因在于矩形孔缝的特征频率发生改变,当与入射波电场的极化方向垂直的孔缝边长越长时,矩形孔缝的特征频率越小,导致能够进入到腔体内部的强电磁脉冲耦合能量也就越多。对于 HPM,孔缝耦合的极化特性并不明显,当腔体开口长宽比改变时,腔内耦合信号值变化较小。这是因为 HPM 的激励波频率相比于孔缝特征频率大得多,受矩形孔缝的影响较小。

## 4 结论

HEMP 和 HPM 两种强电磁脉冲都能够通过孔缝耦合进入腔体内部,从而给腔内电子元器件造成干扰甚至破坏。对于 HEMP,当开口平面与激励波入射方向垂直时,耦合效应最强;同时,开口的尺寸越大、腔体开口与入射电场极化方向垂直的边越长,腔体中耦合能量越大。但由于 HEMP 的耦合效应受孔缝的位置、大小以及长宽比影响较大,因此合理控制孔缝的位置、大小以及长宽比可以减小耦合进入腔体内的能量,在一定程度上削弱 HEMP 的破坏效能。对于 HPM,在相

表 4 不同孔缝长宽比条件下耦合信号的主要参数

Tab. 4 Typical parameters of the coupled signals with different length-width ratios of the aperture

测量参数		$L_x = 50$	$L_x = 100$	$L_x = 200$	$L_x = 400$	$L_x = 800$
HEMP	平均功率密度/(W/cm <sup>2</sup> )	51.6	24.8	14.4	4.3	0.3
	总能量密度/(J/cm <sup>2</sup> )	$5.2 \times 10^{-6}$	$2.6 \times 10^{-6}$	$1.4 \times 10^{-6}$	$4.3 \times 10^{-7}$	$3.0 \times 10^{-8}$
HPM	平均功率密度/(W/cm <sup>2</sup> )	$7.6 \times 10^5$	$6.1 \times 10^5$	$8.2 \times 10^5$	$5.8 \times 10^5$	$6.0 \times 10^5$
	总能量密度/(J/cm <sup>2</sup> )	$7.7 \times 10^{-2}$	$6.2 \times 10^{-2}$	$8.2 \times 10^{-2}$	$5.8 \times 10^{-2}$	$6.2 \times 10^{-2}$

同条件下其耦合效应要明显强于 HEMP,并且在孔缝达到一定尺寸后,耦合效应受孔缝的大小和长宽比的影响较小,仅受孔缝位置的影响。当开口平面与激励波入射方向垂直时,其耦合效应最显著;在开口平面平行于 HPM 入射方向情况下,耦合效应最弱,但此时耦合进入腔体内的能量还是能很容易达到多种电子元器件的电磁损伤阈值级别,因而 HPM 具有很强的破坏效能。

## 参考文献 (References)

- [1] 张胜涛,赵英俊,耶亚林. 电磁脉冲弹对雷达“前门”损伤研究[J]. 航天电子对抗, 2007, 23(3): 18-20.  
ZHANG Shengtao, ZHAO Yingjun, YE Yalin. Research on damage of electromagnetic pulse bomb to radar through "front door" couple [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2007, 23(3): 18-20. (in Chinese)
- [2] Sweetman B. Microwave weapons for U. S. defense [J]. Aviation Week & Space Technology, 2015, 177(31): 1.
- [3] 邓峰,丁凡,郑生全. 通信设备机箱强电磁脉冲耦合预测方法[J]. 中国舰船研究, 2015, 10(2): 70-73.  
DENG Feng, DING Fan, ZHENG Shengquan. Time-domain investigation on the EMP transient coupling into metallic enclosures[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2015, 10(2): 70-73. (in Chinese)
- [4] Ma Z Y, Chai C C, Ren X R, et al. The pulsed microwave damage trend of a bipolar transistor as a function of pulse parameters[J]. Chinese Physics B, 2013, 22(2): 028502.
- [5] Eileen M. High power microwave strategic and operational implications for warfare [M]. Center for Strategy and Technology Air War College, 2000.
- [6] 王建国,屈华民,范如玉. 孔洞厚度对高功率微波脉冲耦合的影响[J]. 强激光与粒子束, 1994, 6(2): 282-286.  
WANG Jianguo, QU Huamin, FAN Ruyu. Effects of slot depth on couplings of high power microwave pulses[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1994, 6(2): 282-286. (in Chinese)
- [7] 鲍永波,田杨萌,王彩霞,等. 核电磁脉冲与开口金属腔体耦合特性研究[J]. 微波学报, 2017, 33(6): 75-80.
- BAO Yongbo, TIAN Yangmeng, WANG Caixia, et al. Research on the characteristics on the NEMP coupling into a metallic cavity with apertures [J]. Journal of Microwaves, 2017, 33(6): 75-80. (in Chinese)
- [8] Abrams M. The dawn of the E-bomb [J]. IEEE Spectrum, 2003, 40(11): 24-30.
- [9] 毛超,邱志明,张国栋,等. 电磁脉冲弹辐射功率空间分布仿真[J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(9): 977-980.  
MAO Chao, QIU Zhiming, ZHANG Guodong, et al. The radiation power's space distribution of the high power EMP-bomb [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2014, 34(9): 977-980. (in Chinese)
- [10] 曾旭,冯进军. 高功率微波源的现状及其发展[J]. 真空电子技术, 2015(02): 18-19.  
ZENG Xu, FENG Jinjun. Current situation and developments of high power microwave sources [J]. Vacuum Electronics, 2015(02): 18-19. (in Chinese)
- [11] 胡少飞,王伟力. 高功率微波弹对雷达接收机保护器的毁伤[J]. 兵工自动化, 2009, 28(5): 50-53.  
HU Shaofei, WANG Weili. Damage analysis of high-power microwave bomb to radar receiver protector [J]. Ordnance Industry Automation, 2009, 28(5): 50-53. (in Chinese)
- [12] 任兴荣. 半导体器件的电磁损伤效应与机理研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.  
REN Xingrong. Research on the electromagnetic damage effects and mechanisms of semiconductor devices [D]. Xi'an: Xidian University, 2014. (in Chinese)
- [13] 胡凯,李天明,汪海洋,等. 多级PIN限幅器高功率微波效应研究[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(6): 063015.  
HU Kai, LI Tianming, WANG Haiyang, et al. High power microwave effect of multi-stage PIN limiter [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(6): 063015. (in Chinese)
- [14] 马振洋,柴常春,任兴荣,等. 不同样式的高功率微波对双极晶体管的损伤效应和机理[J]. 物理学报, 2013, 62(12): 128501.  
MA Zhenyang, CHAI Changchun, REN Xingrong, et al. The damage effect and mechanism of the bipolar transistor induced by different types of high power microwaves [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(12): 128501. (in Chinese)