



·高功率微波技术·

孔缝对金属腔体强电磁脉冲耦合特性影响研究*

曾美玲^{1,2}, 蔡金良^{2,3}, 易 早¹, 秦 风^{2,3}, 邱向军¹

(1. 西南科技大学 理学院, 四川 绵阳 621010; 2. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621999;
3. 中国工程物理研究院 复杂电磁环境科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 核电磁脉冲和高功率微波等强电磁脉冲易造成电子设备功能失效甚至损毁, 在实际工程实施中用金属腔体对电子设备进行屏蔽是常用的强电磁脉冲抑制手段。基于电磁仿真计算, 对含矩形孔缝金属腔体的强电磁脉冲耦合特性进行了系统研究, 阐述了孔缝宽长比、腔体尺寸等因素对多种不同类型强电磁脉冲(核电磁脉冲、宽带高功率微波、窄带高功率微波)作用下腔体内耦合场的影响; 并以此为基础, 重点分析了强电磁脉冲与含孔缝金属腔体之间的作用机制。研究表明: 不同类型强电磁脉冲耦合信号差异明显, 金属腔体对强电磁脉冲的响应是腔体谐振模式、孔缝谐振频率与强电磁脉冲共同作用的结果; 当腔体谐振模式、孔缝谐振频率在强电磁脉冲的带内时, 腔体内部的耦合场会出现增强效应; 特别地, 腔体与孔缝间的相互作用还可造成腔体与缝隙的谐振频率发生偏移。因此, 在为电子设备设计金属屏蔽外壳时, 应基于不同强电磁脉冲的频带范围, 对腔体与孔缝的尺寸进行综合设计, 抑制腔体、孔缝谐振及谐振频率偏移, 提升其强电磁脉冲防护性能。

关键词: 金属腔体; 强电磁脉冲; 屏蔽效能; 电磁耦合; 谐振模式

中图分类号: O441.4

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.200336

Effect of aperture on shielding performance of metal cavity under excitation of high-intensity electromagnetic pulse

Zeng Meiling^{1,2}, Cai Jinliang^{2,3}, Yi Zao¹, Qin Feng^{2,3}, Kuang Xiangjun¹

(1. College of Science, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;

2. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621999, China;

3. Key Laboratory of Science and Technology on Complex Electromagnetic Environment, CAEP, Mianyang 621999, China)

Abstract: High-intensity electromagnetic pulses like high-altitude electromagnetic pulse (HEMP), high power microwave (HPM) are very harmful to electronic devices, which will cause malfunction or even damage to electronics. Using metallic cavity to isolate electronic systems from high-intensity electromagnetic pulse is an important and effective way to lessen the effect. Herein, we performed a systematic study on coupling property of metallic cavity with a rectangular aperture under the excitation of three types of high-intensity electromagnetic pulses, i.e., HEMP, wide-band HPM, and narrow-band HPM. The width/length ratio of aperture and cavity size were varied to investigate their effect on electromagnetic coupling. The interaction mechanism of high-intensity electromagnetic pulses and the metallic cavity was also carefully analyzed. The results demonstrate that the shielding property of metallic cavity is highly dependent on resonance mode of cavity, resonant frequency of aperture as well as the spectral characteristics of high-intensity electromagnetic pulse. When the resonance mode of cavity, and/or resonant frequency of aperture are within the bandwidth of high-intensity electromagnetic pulse, an enlarged coupling electromagnetic field in the metallic is always produced. Specifically, the interaction between the cavity and aperture can give rise to spectral shift of resonant frequency. Therefore, to obtain excellent shielding effect, we need to take into consideration the suppression of resonance mode of cavity, resonant frequency of apertures as well as the spectral shift when performing electromagnetic protection of electronic devices.

* 收稿日期: 2020-12-14; 修订日期: 2021-03-09

基金项目: 国防预研项目(30105140302)

作者简介: 曾美玲(1996—), 女, 硕士研究生, 从事电子系统电磁环境适应性评估研究; 1594402023@qq.com。

通信作者: 秦 风(1985—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事电磁环境效应及防护技术研究; fq_soul2000@163.com;

蔡金良(1987—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事电子系统电磁环境适应性评估研究; llttkl@163.com。

Key words: metallic cavity; high-intensity electromagnetic pulse; shielding effectiveness; electromagnetic coupling; resonance mode

强电磁脉冲具有瞬时峰值大、覆盖频率范围宽等特点,主要包括核电磁脉冲(HEMP)、宽带高功率微波(WB-HPM)和窄带高功率微波(NB-HPM)等^[1-2]。强电磁脉冲可通过孔缝、线缆等通道耦合进入系统内部,作用于电子设备上使其无法正常工作^[3-5]。随着电子技术的发展,电子设备早已广泛应用于通信、交通、电力、医疗等系统,电子设备无法正常工作将造成以上系统瘫痪或损毁,因此,保障电子设备的生存能力非常重要。

为了提升电子设备在强电磁脉冲环境下的生存能力,必须对其进行电磁防护。而屏蔽技术是最为常用的电磁防护技术,一般的电子设备特别是高度集成的控制设备都会采用金属壳体对其进行防护。然而,由于散热、安装显示屏和连接线等实际需求,屏蔽壳体上不可避免地存在小孔和缝隙,影响金属腔体对强电磁脉冲的防护能力;特别地,小孔、缝隙可能还会带来耦合场的增强效应,对腔体内电子设备造成严重威胁。因此,含有孔缝的金属腔体防护性能成为电磁防护研究的重点,得到了广泛关注。鲍永波等分析了开孔金属腔体对核电磁脉冲的耦合特性^[6],刘强等研究了复杂细缝对电磁屏蔽效能的影响^[7],陈宗盛等研究了孔缝尺寸和位置对开口金属腔强电磁脉冲耦合效应的影响^[8-10];以上研究表明,孔缝尺寸对腔体电磁耦合特性影响大,需关注由孔缝耦合进入腔体内部电磁场对内部电子设备的影响。然而,在上述工作中,主要是针对一种强电磁脉冲开展研究,并未对多种强电磁脉冲耦合特性开展研究,系统性不够。Gu ChunHong, Po'ad Farhana, Zhang Xufeng 等人研究了孔缝效应,但并未对不同类型电磁脉冲与孔缝的耦合效应进行研究分析^[11-13]。并且,目前国内关于强电磁脉冲与含孔缝金属腔体作用机制的研究较少,只是分析了超宽带电磁脉冲与含孔缝腔体的耦合效应^[14-15]。因此,系统性地研究带孔缝金属腔体对多种不同类型强电磁脉冲的耦合特性,分析作用机制,对强电磁脉冲防护设计具有重要意义。

本文对含有孔缝金属腔体电磁耦合特性进行了系统研究。针对三种不同类型的强电磁脉冲(核电磁脉冲、宽带高功率微波、窄带高功率微波),分别建立了不同尺寸孔缝和腔体的仿真模型,通过计算获取了强电磁脉冲作用下含孔缝金属腔体内部耦合场,对比分析了不同强电磁脉冲作用下腔体的耦合特性,阐释了孔缝宽长比对腔体时域屏蔽效能、主频率分量的影响。在此基础上,探讨了含孔缝金属腔体与三种不同类型强电磁脉冲的作用机制。本文的研究结果不仅可加深对孔缝金属腔体强电磁脉冲耦合特性的认识,更可为电子系统强电磁脉冲防护设计提供指导。

1 仿真模型

1.1 典型强电磁脉冲

高空核电磁脉冲、宽带高功率微波及窄带高功率微波三种强电磁脉冲的典型波形及经傅立叶变换后的频谱波形如图1所示。三种强电磁脉冲中,核电磁脉冲、宽带高功率微波为宽谱脉冲,窄带高功率微波为窄谱脉冲。标准中定义的高空核电磁脉冲峰值场强为50 kV/m,为了便于讨论与分析,在本文中将宽带高功率微波和窄带高功率微波的峰值场强均设置为50 kV/m。核电磁脉冲为双指数脉冲,脉冲半高宽为23 ns,能量主要集中在100 MHz以下;宽带高功率微波的半高宽约为5 ns,能量主要集中在300~550 MHz;窄带高功率微波为调制波,半高宽为300 ns,中心频率为1.36 GHz。

1.2 金属腔体模型

金属腔体模型如图2(a)所示,为立方体结构,结构边长为 d ,在腔体一侧的中心位置开有孔缝。强电磁脉冲正对包含有孔缝的金属面照射,电场极化方向为垂直极化。为了研究孔缝宽长比对金属腔体防护性能的影响,在保持金属腔体上孔缝位置和面积不变的情况下,通过改变孔缝的宽度和长度以建立不同的仿真模型。建立的孔缝模型如图2(b)所示,图中 W 为孔缝宽度、 L 为孔缝长度,孔缝的面积设定为60 cm²。本文考虑了多种宽长比情况,孔缝的最小宽度为2 cm、最大宽度为30 cm,即最小的宽长比约为0.07、最大的宽长比为15。此外,金属腔体尺寸也是影响其防护性能的关键因素,本文还分别考虑了边长为30, 40, 50和60 cm的四种金属腔体。

2 典型金属腔内耦合场强

2.1 时域特征

为了对比研究金属腔体对核电磁脉冲、宽带高功率微波及窄带高功率微波的耦合性能,对三种强电磁脉冲辐照下腔体耦合进行电磁建模仿真计算。金属腔体边长为30 cm,孔缝长30 cm、宽2 cm,宽长比约为0.07。入射波

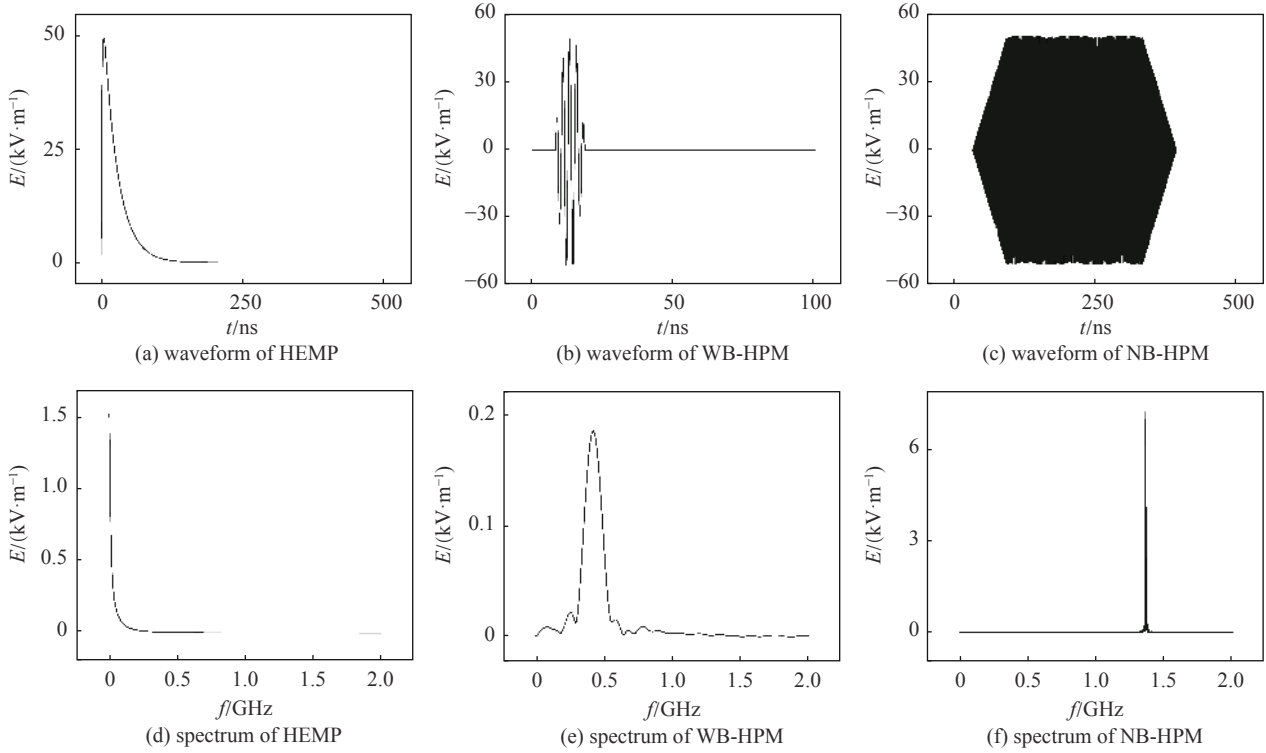


Fig. 1 Typical high-intensity electromagnetic pulses and their corresponding spectral distributions

图 1 典型的强电磁脉冲波形与频谱分布

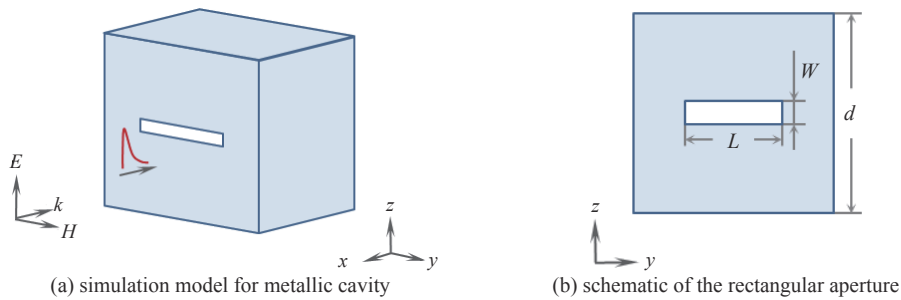


Fig. 2 Simulation model

图 2 电磁仿真模型

电场极化方向为垂直极化,与孔缝的极化相匹配。此处,利用时域屏蔽效能^[6]表征金属腔体对强电磁脉冲的耦合性能;时域屏蔽效能的定义如公式(1)所示,式中 E_{\max}^i 为入射波峰值场强, E_{\max}^o 为腔体中心位置耦合场峰值场强。如前文所述,为了便于对比分析,核电磁脉冲、宽带高功率微波及窄带高功率微波的峰值场强均为 50 kV/m ,由此根据腔体内耦合场的峰值可以计算出该金属腔体对以上三种不同强电磁脉冲的耦合性能,具体结果如表 1 所示。根据计算结果可以看出,该金属腔体对核电磁脉冲的屏蔽能力最强,对窄带高功率微波的屏蔽能力次之,对宽带高功率微波的屏蔽能力最差,仅为 0.4 dB 。

$$SE_{\text{TD}} = 20 \lg \left(\frac{E_{\max}^i}{E_{\max}^o} \right) \quad (1)$$

表 1 典型金属腔体强电磁脉冲耦合性能

Table 1 Electromagnetic coupling of metallic cavity to different high-intensity electromagnetic pulses

electromagnetic pulse	peak value of electromagnetic field/ $(\text{kV}\cdot\text{m}^{-1})$	time domain shielding effectiveness/dB
HEMP	3.2	23.9
WB-HPM	47.8	0.4
NB-HPM	22.8	6.8

三种强电磁脉冲作用下腔体中心位置的场强波形如图 3(a) 所示。根据腔体内场强计算结果可以看出: 在核电磁脉冲和宽带高功率微波作用下, 相比于激励源波形, 腔体内测得信号有所展宽, 而且还伴随有较强的谐振现象; 在窄带高功率微波作用下, 腔体内耦合信号波形与激励源波形几乎相同。

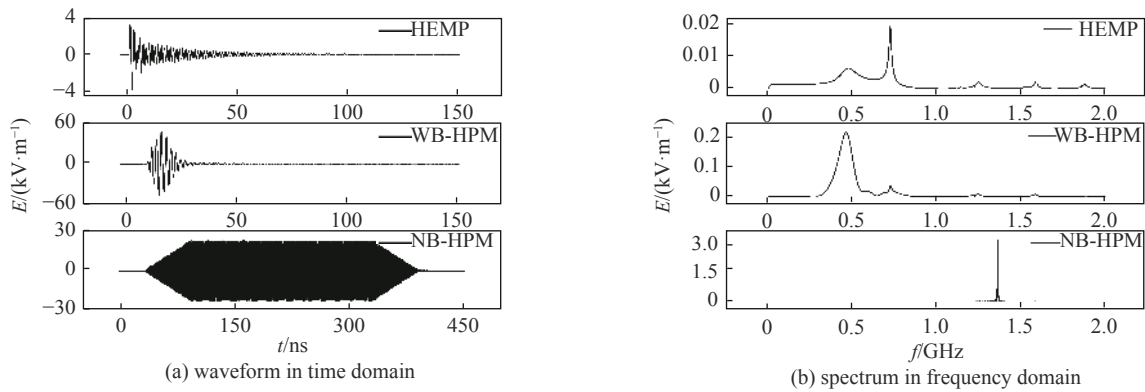


Fig. 3 Electric field and the corresponding spectral characteristics at the central position of metallic cavity

图 3 三种强电磁脉冲辐照下典型腔体中心位置场强波形与频谱

2.2 频域特征

三种强电磁脉冲作用下, 金属腔体中心位置处场强频谱如图 3(b) 所示。通过对比图 3(b) 可以看出, 在核电磁脉冲和宽带高功率微波作用下, 腔体均有谐振模式被激励。特别是在核电磁脉冲作用下, 腔体的 TE_{101} 模式 (707 MHz) 响应十分明显; 腔体的谐振效应导致电磁能量衰减变慢, 场强波形持续时间变长。窄带高功率微波带宽较窄, 并且中心频率为 1.36 GHz, 窄带高功率微波未激励起腔体的谐振模式; 因此, 窄带高功率微波作用下腔体中心位置的场强波形与激励源波形相近。

3 孔缝宽长比对金属腔体内耦合场的影响

3.1 孔缝宽长比影响

为了研究腔体上孔缝宽长比对金属腔体耦合性能的影响, 首先分析了腔体上孔缝宽长比较小 (激励源极化方向与孔缝极化方向匹配)、宽长比接近于 1 (即方孔)、宽长比较大 (激励源极化方向与孔缝极化方向极度失配) 情况下腔体中心位置的耦合场, 孔缝的详细参数如表 2 所示。

表 2 具有不同宽长比孔缝的金属腔体

Table 2 Metallic cavity having aperture with different width to length ratio (W/L)

No.	W/cm	L/cm	W/L	note
1	2	30	~0.07	polarization direction is identical to the aperture direction
2	8	7.5	1.07	nearly a square aperture
3	20	3	6.67	polarization direction is orthogonal to the aperture direction

金属腔体的边长仍为 30 cm, 在强电磁脉冲作用下, 具有不同宽长比孔缝的腔体耦合场波形如图 4 所示。通过图 4 可以看出, 随着腔体孔缝宽长比的增大, 宽带脉冲 (核电磁脉冲、宽带高功率微波) 作用下腔体耦合场波形持续时间增长、场强峰值减小; 而窄带脉冲作用下, 腔体耦合场波形与激励源波形比较接近, 脉冲的持续时间几乎保持不变, 场强峰值随着孔缝宽长比的增大先增大后减小。在宽带脉冲作用下, 当孔缝宽长比变大, 即孔缝与场的极化匹配性变差时, 电磁能量通过孔缝进入腔体激励起腔体的谐振模式, 同时电磁能量难以从孔缝泄露出去, 导致能量衰减变慢, 故随着孔缝宽长比的增大腔体耦合场的持续时间会增大。

图 5 中进一步总结了孔缝宽长比在 0.07~15 范围内变化时, 不同强电磁脉冲作用下腔体中心位置处耦合场的峰值。在宽带脉冲条件下, 腔体耦合场峰值随着孔缝宽长比的增大而减小; 当孔缝宽长比大于 0.6 后, 孔缝宽长比的变化对腔体耦合场峰值的影响明显变小。相同的腔体和孔缝情况下, 相比于宽带高功率微波, 核电磁脉冲的耦合能力显著减弱; 但是, 当孔缝的宽长比大于 1 后, 腔体对核电磁脉冲和宽带高功率微波的耦合能力变得较为接近。然而, 孔缝长度由 30 cm 减小至 2 cm 过程中, 腔体对窄带高功率微波的耦合能力先增强、后减弱, 耦合场峰值先增大后减小。

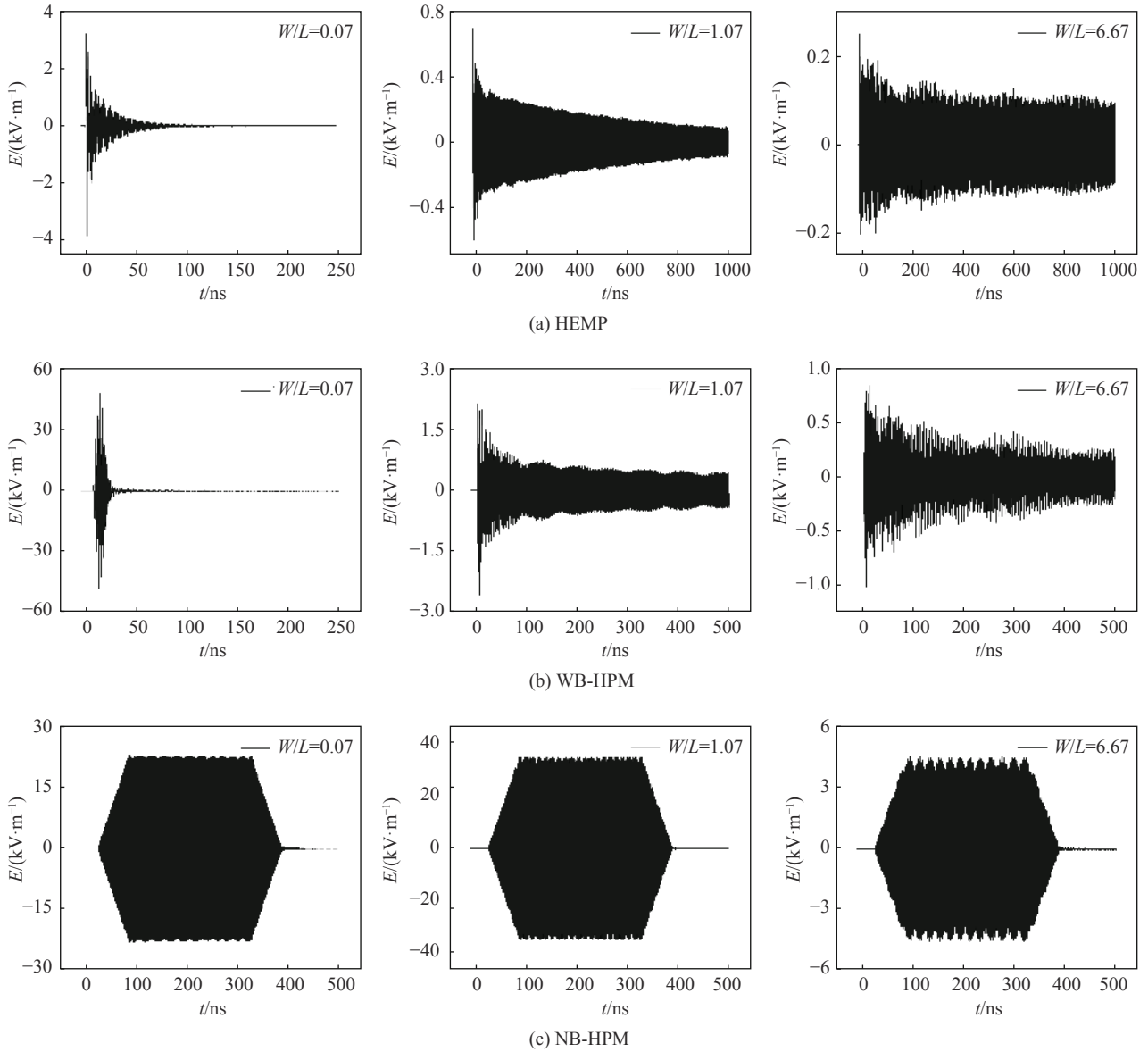


Fig. 4 Coupling electric field of metallic cavity with different W/L under excitation of high-intensity electromagnetic pulse

图 4 具有不同宽长比孔缝金属腔体强电磁脉冲耦合场波形

3.2 腔体尺寸影响

参照边长为 30 cm 的金属腔体的计算条件, 进一步计算了边长为 40, 50 和 60 cm 的有缝金属腔体中心位置的耦合场(图 6)。可以看出, 核电脉冲和宽带高功率微波两种宽带脉冲作用下(图 6(a)和(b)), 腔体耦合场峰值随孔缝宽长比的变化规律基本一致, 而且腔体尺寸的影响较小。相同面积条件下, 当孔缝宽长比小于 1 时, 场强峰值随着孔缝宽长比的增大而迅速减小; 当孔缝宽长比大于 1 时, 场强峰值仍随着孔缝宽长比的增大而减小, 但是减小的幅度很小, 最后趋于不变。窄带高功率微波作用下(图 6(c)), 腔体耦合场的变化规律与宽带脉冲作用下的结果不同; 然而, 不同尺寸腔体的耦合场峰值变化规律比较接近, 峰值场强都是随着孔缝宽长比的增大而先增大后减小; 但腔体尺寸对场强的变化有明显的影 响, 60 cm 腔体的耦合场远高于小腔体的耦

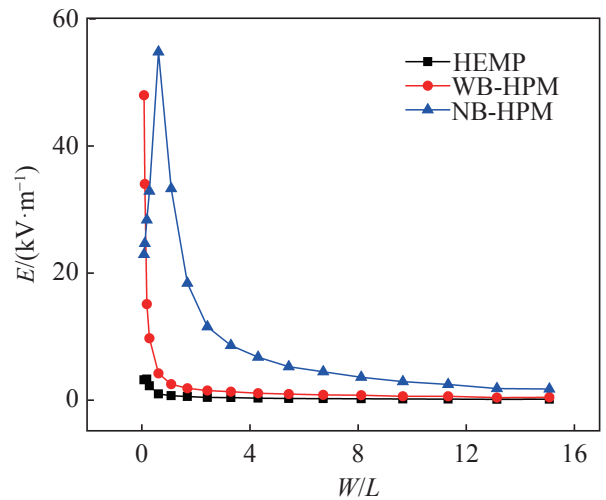


Fig. 5 Evolution of peak value of the coupling electric field with W/L of metallic cavity under the excitation of high-intensity electromagnetic pulse

图 5 孔缝宽长比对金属腔体强电磁脉冲耦合场峰值影响

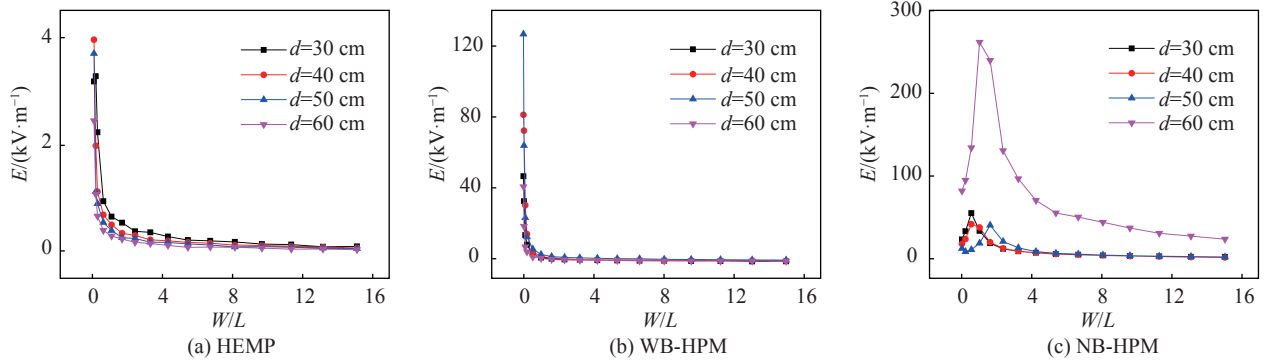


Fig. 6 Influence of cavity size on the peak value of coupling electric field

图 6 腔体尺寸对场强峰值的影响

合场。此外,通过图 6(c)中的场强峰值结果可以看出,腔体对窄带高功率微波存在着场强增强效应,即腔体内部耦合场的幅度超过激励源的幅度,特别是 60 cm 腔体增强效应尤为明显。由此可知,孔缝与腔体尺寸是影响腔体强电磁脉冲耦合特性的重要因素。

4 强电磁脉冲耦合特性分析

腔体与强电磁脉冲的耦合作用是腔体谐振特性、孔缝谐振特性与激励源共同作用的结果。通过研究腔体耦合场的频谱,可进一步分析有缝腔体对瞬态脉冲的耦合特性。

孔缝的谐振特性主要由孔缝的有效长度决定,即孔缝与激励源极化匹配的有效长度。腔体谐振频率是由腔体的尺寸决定,而且金属腔体具有多种谐振模式。孔缝与金属腔体均具有多个谐振频率或谐振模式,理论上是无限的谐振模式。孔缝的最小谐振频率估算公式为^[17]

$$f_{\min} = c/2l_{\max} \quad (2)$$

式中: f_{\min} 为孔缝最小谐振频率; $c=3 \times 10^8$ m/s; l_{\max} 为孔缝最大有效长度。同时,针对本文中的 7 种典型宽长比孔缝,开展了孔缝耦合特性电磁仿真研究。利用吸收边界条件模拟建立有限大金属平面,在平面上建立孔缝模型,具体的仿真模型如图 7 所示,通过计算获得孔缝的谐振频率特征。表 3 中总结了不同宽长比孔缝最小谐振频率的估算结果与仿真结果。可以看出,相同面积的孔缝,孔缝宽长比越大其最小谐振频率越高。由于孔缝最小谐振频率

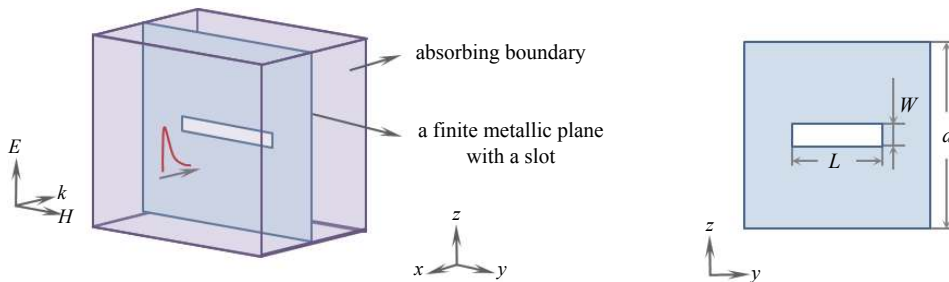


Fig. 7 Simulation model of a slot

图 7 理想孔缝仿真模型

表 3 孔缝最小谐振频率

Table 3 Minimum resonant frequency of aperture

No.	W/cm	L/cm	W/L	estimated f_{\min}/MHz	simulation f_{\min}/MHz
1	2.0	30.0	~0.07	500	449
2	2.8	21.4	0.13	700	606
3	3.2	18.75	0.17	800	680
4	4.0	15.0	0.27	1000	832
5	4.4	13.6	0.32	1103	911
6	6.0	10.0	0.60	1500	1198
7	8.0	7.5	1.07	2000	1654

估算公式主要适用于细长缝隙,孔缝宽长比较小的情况下,仿真结果与估算结果相符程度较高;但随着孔缝宽长比增大,宽边会对孔缝耦合特性造成较大影响,进而导致孔缝最小谐振频率估算公式不适用,孔缝最小谐振频率估算公式计算结果与仿真结果差别较大,大宽长比孔缝的耦合特性需通过仿真计算获取。

核电磁脉冲、宽带高功率微波及窄带高功率微波作用下,不同尺寸腔体耦合场的频谱结果分别如图8、图9和图10所示。

图8(a)为核电磁脉冲作用下,具有不同孔缝的30 cm腔体耦合场的频谱。核电磁脉冲的频谱分布范围在0至1 GHz,主要集中在100 MHz以下。30 cm腔体的 TE_{101} 模式谐振频率约为700 MHz。通过图8可以看出,当孔缝宽长比较小时,腔体耦合场的频谱是孔缝和腔体谐振特性共同主导对核电磁脉冲的响应,而且具有较宽的响应带宽。随着孔缝宽长比的增大,孔缝长度变小,使得孔缝谐振频率变高、响应能力变强,由腔体耦合主导逐渐变成孔缝耦合主导。孔缝的谐振频率超出HEMP覆盖的频率范围后,腔体内部场主要为腔体 TE_{101} 模式分量,并且随着孔缝宽长比增大,核电磁脉冲通过孔缝的能力变差,腔体耦合的总能量变小、防护能力变强。同时,通过对比图8(a)中三种孔缝条件下的结果,发现孔缝与腔体之间的相互作用会导致腔体和孔缝的谐振频率发生频移。60 cm腔体内部耦合场的频域结果如图8(b)所示,该组结果与30 cm腔体结果有所不同;对于60 cm腔体,在不同宽长比孔缝条件下,其耦合特性均主要由腔体谐振特性主导,缝隙谐振效应影响较小。这是因为60 cm腔体的 TE_{101} 模式谐振频率约为353 MHz,与缝隙的谐振频率和30 cm腔体的 TE_{101} 模式相比,该谐振频率更接近于HEMP的主能量分布范围,以致腔体的谐振作用远超过孔缝的谐振作用。上述计算结果表明:具有孔缝金属腔体对强电磁脉冲的耦合特性依赖于腔体、孔缝的谐振特性及激励源的频谱特征,是腔体尺寸、孔缝尺寸和强电磁脉冲频带特性三因素共同作用的结果。

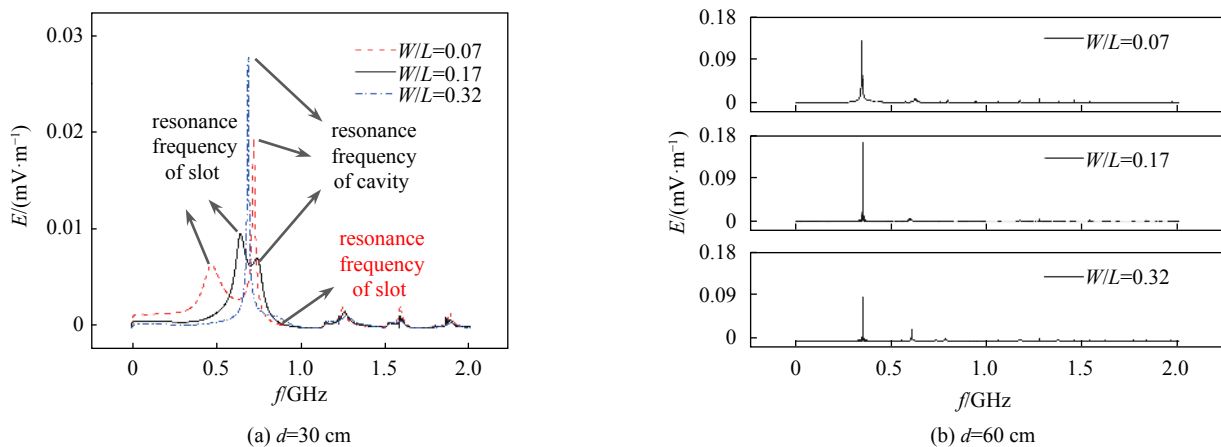


Fig. 8 Electric field and the corresponding spectral characteristics at the central position of metallic cavity under the excitation of HEMP

图8 不同尺寸腔体在核电磁脉冲作用下场强频谱随孔缝宽长比的变化

图9(a)为宽带高功率微波作用下,具有不同孔缝的30 cm腔体耦合场的频谱分布。宽带高功率微波的中心频率约为420 MHz,能量主要集中在300~550 MHz的频率范围内。当孔缝宽长比较小时,孔缝主谐振频率与宽带高功率微波中心频率较为接近。宽带高功率微波的大部分频率分量可以通过孔缝进入腔体内部。因此,相同的腔体情况下,腔体对宽带高功率微波的耦合能力强于对核电磁脉冲的耦合能力。相同条件下,宽带高功率微波作用下腔体耦合场峰值高于核电磁脉冲,特别是当孔缝宽长比较小时,宽带高功率微波的威胁性更明显。通过图6(b)可以看出,50 cm的腔体对宽带高功率微波的耦合最强,最大场强峰值可达126.7 kV/m,远远超过了激励源峰值,具有非常强的增强效应。这是因为,50 cm腔体的 TE_{101} 模式谐振频率约为424 MHz,宽长比为0.07的孔缝的主谐振频率约为449 MHz,而宽带高功率微波中心频率约为420 MHz,三者几乎相同,这意味着腔体和孔缝对激励源都有很强的响应,而且响应会叠加在一起,该情况下腔体耦合场频谱如图9(b)所示。但是,随着孔缝宽长比的增大,孔缝对宽带高功率微波的响应能力减弱,腔体 TE_{101} 谐振模式对宽带高功率微波的响应占主导地位。对比图9(b)中三种孔缝条件下腔体耦合场频谱可以发现,虽然 $W/L=0.07$ 条件下耦合场的总能量最大,但与 $W/L=0.13$ 和 $W/L=0.60$ 条件下的结果相比,该条件下腔体未发生明显谐振。这是由于孔缝的谐振频率与腔体的谐振频率非常接近,因此腔体谐振频率对应的能量分量可以通过孔缝泄露至腔体外部,使腔体谐振效应减弱。腔体上的孔缝是电磁能量进出腔体的主要通道,孔缝谐振频率直接影响腔体耦合与电磁能量衰减特性,在设计屏蔽壳体时需综合考虑孔缝的影响。

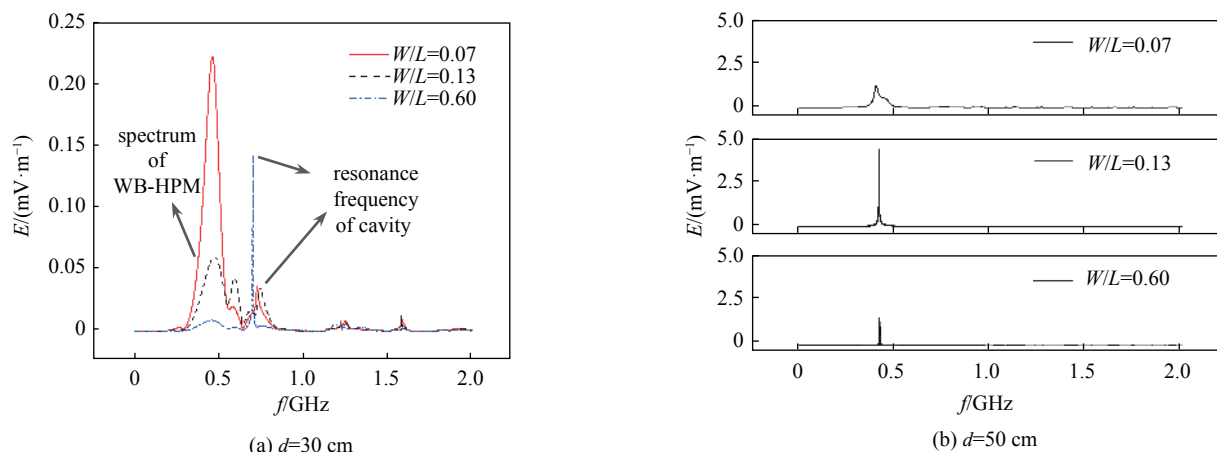


Fig. 9 Electric field and the corresponding spectral characteristics at the central position of metallic cavity under the excitation of WB-HPM

图 9 不同尺寸腔体在宽带高功率微波作用下场强频谱随孔缝宽长比的变化

图 10 中对比了 30 cm 腔体和 60 cm 腔体在窄带高功率微波作用下, 耦合场最强频率分量随孔缝宽长比的变化。从图 10(a)中可以看出, 30 cm 腔体耦合场最强频率分量始终为 1.362 GHz, 与窄带高功率微波中心频率相同; 而对于 60 cm 腔体, 在孔缝宽长比较大的情况下, 其耦合场最强频率分量由 1.362 GHz 变为 1.367 GHz。这是由于窄带高功率微波中心频率为 1.36 GHz 并且带宽较窄, 其主要能量分量与 60 cm 腔体的谐振模式并未重合, 但其频带覆盖了 60 cm 腔体的高次谐振模式(TE_{125})。因此, 30 cm 腔体的耦合场频谱与入射波频谱一致, 孔缝宽长比仅影响其幅度, 而 60 cm 腔体的高次谐振模式出现在窄带高功率微波带内。对于 60 cm 腔体, 当孔缝宽长比较小时, 孔缝极化方向与入射波极化方向匹配, 窄带高功率微波的主频率分量能量直接进入腔体内部, 但随着孔缝宽长比的增大, 窄带高功率微波通过孔缝的能力降低, 腔体的高次模式谐振作用变得更为明显甚至超过入射波的中心频率, 具体如图 10(b)所示。

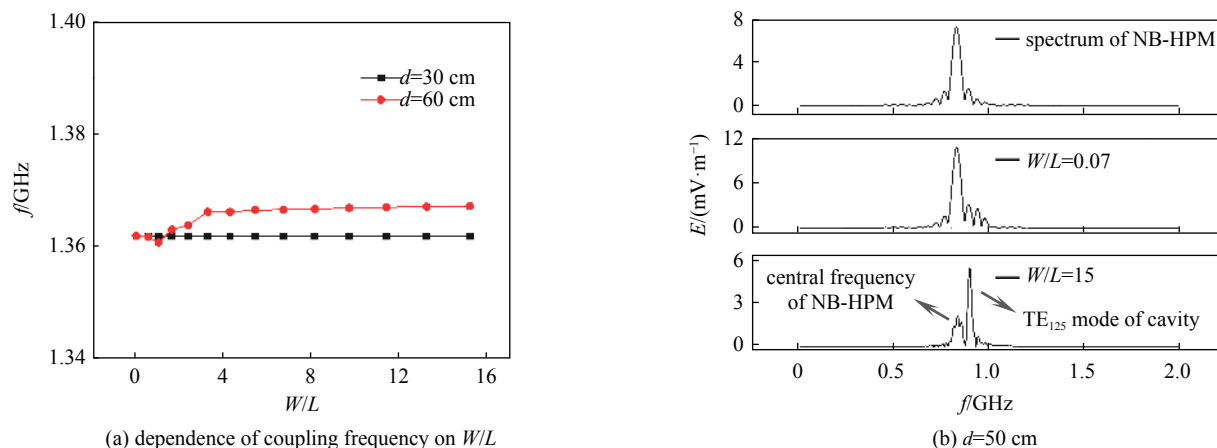


Fig. 10 Electric field and the corresponding spectral characteristics at the central position of metallic cavity under the excitation of NB-HPM

图 10 不同尺寸腔体在窄带高功率微波作用下场强频谱随孔缝宽长比的变化

基于上述孔缝金属腔体强电磁脉冲耦合特性分析, 图 11 进一步给出了具有不同宽长比孔缝的 30, 50 cm 腔体对文中三种强电磁脉冲的防护能力。腔体对核电磁脉冲的防护能力最强, 对宽带高功率微波的防护能力次之, 对窄带高功率微波的防护能力最差。在孔缝面积保持不变的情况下, 孔缝宽长比显著影响着腔体对强电磁脉冲的防护能力; 随着孔缝宽长比的增大, 腔体对宽带脉冲(核电磁脉冲、宽带高功率微波)的防护能力逐渐增大, 而对窄带高功率微波的防护能力则先减小后增大。并且, 对于具有相同宽长比孔缝的不同尺寸腔体, 其电磁防护能力是有区别的。带孔缝金属腔体的电磁屏蔽效能不仅依赖于孔缝宽长比、腔体尺寸, 还依赖于强电磁脉冲频谱特征, 是孔缝大小、腔体尺寸及强电磁脉冲频带特性共同作用的结果。

综上, 具有孔缝的金属腔体与强电磁脉冲的作用机制是腔体谐振模式与孔缝谐振频率共同对强电磁脉冲的响应。当腔体的谐振模式(包括高次模式)和孔缝的谐振频率在强电磁脉冲带内时, 腔体内部的耦合场非常强甚至出现增强效应, 对其内部的电子设备造成严重威胁。因此, 在为电子设备设计金属屏蔽体时, 应以强电磁脉冲频带为

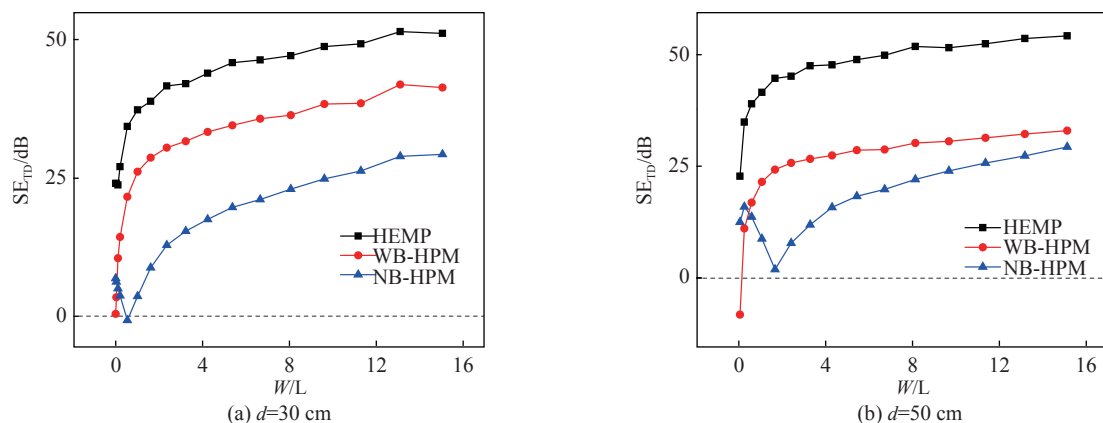


Fig. 11 Evolution of the shielding effectiveness of metallic cavity with W/L under the excitation of high-intensity electromagnetic pulse

图 11 孔缝宽长比对金属腔体强电磁脉冲屏蔽效能影响

基础,抑制带内的腔体谐振模式和孔缝谐振频率,提升其防护性能。

5 结论

本文系统地研究了有孔缝金属腔体对强电磁脉冲的耦合特性,获得了核电磁脉冲、宽带高功率微波及窄带高功率微波等多种强电磁脉冲辐照下腔体的耦合规律。分别从时域和频域对腔体耦合场进行深入分析,进一步揭示了有缝金属腔体与强电磁脉冲之间的作用机制。研究表明:三种强电磁脉冲耦合特性差异明显,金属腔体对强电磁脉冲的响应是腔体谐振模式、孔缝谐振频率与强电磁脉冲共同作用的结果。当腔体谐振模式、孔缝谐振频率落在强电磁脉冲频带范围内时,腔体内耦合场会出现明显的增强效应,可对金属腔体内部的电子设备造成严重威胁;特别地,腔体与缝隙之间的相互作用还可造成腔体与缝隙的谐振频率发生一定的偏移。因此,为电子设备或系统设计金属屏蔽壳体时,需综合考虑强电磁脉冲频谱特征、腔体及孔缝尺寸等,以抑制腔体内耦合场增强、谐振频率偏移等问题,进而提升对强电磁脉冲的防护效果。

参考文献:

- [1] 周壁华,陈彬,石立华. 电磁脉冲及其工程防护[M]. 北京:国防工业出版社,2003. (Zhou Bihua, Chen Bin, Shi Lihua. EMP and EMP protection[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003)
- [2] MIL-STD-464, Electromagnetic environmental effects requirements for systems[S].
- [3] Camp M, Gerth H, Garbe H, et al. Predicting the breakdown behavior of microcontrollers under EMP/UWB impact using a statistical analysis[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2004, 46(3): 368-379.
- [4] Månsson D, Thottappillil R, Bäckström M, et al. Vulnerability of European rail traffic management system to radiated intentional EMI[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2008, 50(1): 101-109.
- [5] Bäckström M G, Löfstrand K G. Susceptibility of electronic systems to high-power microwaves: summary of test experience[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2004, 46(3): 396-403.
- [6] 鲍永波,田杨萌,王彩霞,等. 核电磁脉冲与开孔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 of the NEMP coupling into a metallic cavity with apertures[J]. *Journal of Microwaves*, 2017, 33(6): 75-80)
- [7] 刘强,徐勇,孟雪松,等. 基于CP-FDTD的复杂细缝屏蔽效能分析方法[J]. 强激光与粒子束, 2019, 31: 103209. (Liu Qiang, Xu Yong, Meng Xuesong, et al. Method of analyzing shielding effectiveness of complex thin slots based on CP-FDTD[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 103209)
- [8] 陈宗胜,李志刚. 开口金属腔体对强电磁脉冲的耦合效应[J]. 国防科技大学学报, 2020, 42(1): 18-23. (Chen Zongsheng, Li Zhigang. Coupling effects of open-ended metal enclosure induced by powerful electromagnetic pulse[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2020, 42(1): 18-23)
- [9] 刘顺坤,傅君眉,周辉,等. 电磁脉冲对目标腔体的孔缝耦合效应数值研究[J]. 电波科学学报, 1999, 14(2): 202-206. (Liu Shunkun, Fu Junmei, Zhou Hui, et al. Numerical studies on coupling effects of EMP into slots[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 1999, 14(2): 202-206)
- [10] 付继伟,侯朝桢,窦丽华. 电磁脉冲斜入射时对孔缝耦合效应的数值分析[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(3): 249-252. (Fu Jiwei, Hou Chaozhen, Dou Lihua. Numerical analysis on hole coupling effects of an oblique incidence of electromagnetic pulse[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(3): 249-252)
- [11] Gu Chunhong, Li Shufang. Shielding effectiveness of an enclosure with apertures[C]//2005 IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. Beijing, China: IEEE, 2005: 614-618.
- [12] Po'ad F A, Jenu M Z M, Christopoulos C, et al. Shielding effectiveness of rectangular metallic enclosures with apertures[C]//2005 Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics. Johor, Malaysia: IEEE, 2005: 5.

- [13] Zhang Xufeng, Zhang Weidong, Cui Xiang. Research on shielding effectiveness of enclosure with apertures[C]//2010 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Beijing, China: IEEE, 2010: 928-931.
- [14] 史鹏飞, 刘小龙, 斛彦生, 等. 超宽谱电磁脉冲对有孔缝腔体耦合效应的研究[C]//2010振动与噪声测试峰会论文集. 2010. (Shi Pengfei, Liu Xiaolong, Hu Yansheng, et al. Research on the coupling effect of ultra-wide spectrum electromagnetic pulse on cavity with slots[C]//2010 Proceedings of the Vibration and Noise Testing Summit. 2010)
- [15] 肖金石, 刘文化, 张世英, 等. 超宽带电磁脉冲对腔体孔缝耦合效应的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(12): 2959-2963. (Xiao Jinshi, Liu Wenhua, Zhang Shiyong, et al. Numerical simulation on coupling effects of ultra wide band electromagnetic pulse into slots in a cavity[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2010, 22(12): 2959-2963)
- [16] Celozzi S, Araneo R. Alternative definitions for the time-domain shielding effectiveness of enclosures[J]. [IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility](#), 2014, 56(2): 482-485.
- [17] 王建国, 刘国治, 周金山. 微波孔缝线性耦合函数研究[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(11): 1093-1099. (Wang Jianguo, Liu Guozhi, Zhou Jinshan. Investigations on function for linear coupling of microwaves into slots[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2003, 15(11): 1093-1099)