

## 电磁脉冲对高频结构的热效应分析\*

袁玉章, 孟进, 朱丹妮, 王海涛, 崔言程

(海军工程大学舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 湖北武汉 430033)

**摘要:**对于 Cerenkov 型器件, 由高频结构温升引发的热脱附造成的射频击穿, 进而导致输出功率降低和脉冲缩短。基于此, 研究了电磁脉冲对高频结构的加热温升效应, 推导了高频结构的温升公式, 指出了理论公式的适用范围, 并给出了数值求解试件温升的方法。以二周期  $1 \text{ MV} \cdot \text{cm}^{-1}$  的高频结构为例, 进行了温升的数值计算和仿真研究。结果表明, 脉宽 100 ns 的单脉冲对不锈钢试件的温升效应明显高于其他材料。当系统工作在高重频时, 电磁脉冲的温升作用可能使金属材料达到气体脱附的阈值从而引发气体脱附形成局部高压。该研究可为高功率微波源中的气体脱附以及射频击穿等研究提供参考。

**关键词:**高功率微波; 高频结构; 微波热损耗; 气体脱附

**中图分类号:** TN12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2023)01-144-06

## Analysis of the thermal effect of electromagnetic pulse on high frequency structure

YUAN Yuzhang, MENG Jin, ZHU Danni, WANG Haitao, CUI Yancheng

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** For Cerenkov-type devices, the thermal desorption caused by the temperature rise of the high-frequency structure can cause radio frequency breakdown, which in turn leads to a decrease in output power and a shortened pulse. Based on this, the heating temperature rise effect of electromagnetic pulses on the high-frequency structure was studied, the temperature rise formula of the high-frequency structure was deduced, the scope of application of the theoretical formula was pointed out, and a numerical method to solve the temperature rise of the specimen was given. Taking the two-period  $1 \text{ MV} \cdot \text{cm}^{-1}$  high-frequency structure as an example, the numerical calculation and simulation study of temperature rise were carried out. Results show that the temperature rise effect of a single pulse with a pulse width of 100 ns on the stainless steel specimen is significantly higher than that of other materials. When the system is working at a high repetition frequency, the temperature rise of electromagnetic pulses may cause the metal material to reach the threshold of gas desorption and cause the gas to desorb to form a local high pressure. The research in the thesis can provide reference for the research of gas desorption and radio frequency breakdown in high power microwave sources.

**Keywords:** high power microwave; high frequency structure; microwave thermal loss; gas desorption

高功率微波 (high power microwave, HPM) 技术<sup>[1-3]</sup>是从 20 世纪 70 年代逐步发展起来的一门新兴学科, 是离子体物理、脉冲功率技术及电真空技术等相结合的产物。高功率技术发展至今, 输出功率的进一步提高受到了材料特性和加工工艺等限制, 各类型的高功率微波源均出现了射频击穿和脉冲缩短现象<sup>[4-9]</sup>。

对于 Cerenkov 型器件束波相互作用区高频结构的射频击穿, 有学者认为高频结构表面吸附气体的脱附电离是重要原因。此外, 研究人员发现, 金属材料表面距离相近的“微凸起”会对与其间隙垂直的射频磁场分量造成较为明显的场增强, 在强射频磁场的作用下, 该效应可能会使微凸起

的温度急剧上升, 导致其熔融蒸发。

针对高功率微波系统中由于微波的热损耗引起的气体脱附问题。本文就电磁脉冲对高频结构的热损耗进行理论分析、数值计算和仿真研究。本文可为高功率微波源的气体脱附以及射频击穿的研究提供参考与指导。

### 1 慢波结构的温升公式

导体内的电磁波是衰减波<sup>[10]</sup>, 且集中在导体表面很小的深度传播, 即趋肤效应, 良导体的趋肤深度为  $\delta = \sqrt{1/(\omega\mu\sigma)}$ , 其中  $\mu$  是磁导率,  $\omega$  是电磁波的频率,  $\sigma$  是电导率。电磁波的能量进入导体后转化为焦耳热, 使导体的温度升高, 各向同性

\* 收稿日期: 2021-02-06

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (51907202)

作者简介: 袁玉章 (1989—), 男, 内蒙古乌兰察布人, 助理研究员, 博士, E-mail: yuanyuzhang206@163.com

物体的热传导方程<sup>[11-12]</sup>为:

$$\nabla^2 T(r,t) + \frac{1}{k}g(r,t) = \frac{1}{\alpha_d} \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} \quad (1)$$

其中,  $k$  是热导率,  $\alpha_d$  是热扩散系数。式(1)和初始条件、边界条件一起构成了完整的热传导方程。格林函数法在求解时将偏微分方程变为积分方程从而便于理论分析和数值计算,因此本文采用格林函数法<sup>[13-15]</sup>进行求解。

由于实际中的金属壁都不是理想导体,电磁波沿金属波导结构传播时会有功率损耗在波导壁上,电磁波将沿传输的方向逐渐衰减,电磁波在非理想导体中的衰减由切向磁场带来,进入波导壁的电磁波能量集中在波导壁的薄层中很快衰减并全部转化为焦耳热,从而加热金属壁。

考虑一维热传导模型,如图 1 所示,仅考虑温度在  $r$  方向的分布。此时由射频磁场带来的单位面积功率损耗为:

$$\left. \frac{dP}{dA} \right|_s = \frac{1}{2} R_s |H_{\parallel}|^2 \quad (2)$$

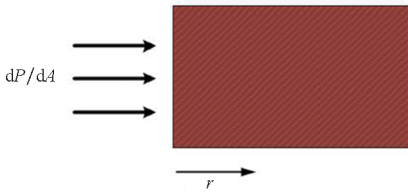


图 1 一维模型示意图

Fig. 1 Diagram of one-dimensional model

单位体积的功率损耗为:

$$g(r,t) = \frac{dP(r,t)}{dA dr} = \frac{dP}{dA} \frac{2}{\delta} e^{-2r/\delta} \quad (3)$$

完整的热传导方程为:

$$\begin{cases} \nabla^2 T(r,t) + \frac{1}{k}g(r,t) = \frac{1}{\alpha_d} \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} & 0 < r < \infty \\ T(r,t=0) = T_0 \\ \left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{r=0} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

采用格林函数法进行求解,对于  $r=0$  的平面,温升公式可化为:

$$T(r=0,t) = T_0 + \frac{2}{\rho c_s} \int_0^t dt' \frac{dP(t')}{dA} \frac{1}{\delta} \cdot \exp\left[\frac{4\alpha_d(t-t')}{\delta^2}\right] \operatorname{erfc}\left[\frac{2}{\delta} \sqrt{\alpha_d(t-t')}\right] \quad (5)$$

当一定频率、脉宽的电磁波和金属材料满足  $\frac{2D}{\delta} \gg 1$  时,温升公式可进一步化为:

$$\Delta T = \frac{R_s \sqrt{t_p} |H_{\parallel}|^2}{\rho c_s \sqrt{\pi \alpha_d}} = \frac{\sqrt{t_p} |H_{\parallel}|^2}{\sigma \delta \rho c_s \sqrt{\pi \alpha_d}} \quad (6)$$

其中,  $D = \sqrt{\alpha_d t_p}$  为电磁脉冲在金属材料内的扩散长度,  $c_s$  是材料比热容,  $\rho$  是材料密度,  $t_p$  为脉冲宽度,  $\delta$  为趋肤深度,均与金属材料和电磁脉冲的参数相关。

## 2 数值计算与仿真研究

### 2.1 数值计算

金属材料的趋肤深度等参数与电磁脉冲频率紧密相关,对于频率  $f=9.38$  GHz,脉宽 100 ns 的电磁脉冲,其在不锈钢、铜和铝中的趋肤深度等参数如表 1 所示。

表 1 微波源常用材料的电参数( $f=9.38$  GHz,  $t_p=100$  ns)  
Tab. 1 Electrical parameters of materials commonly used in microwave sources( $f=9.38$  GHz,  $t_p=100$  ns)

材料	$\delta/m$	$\alpha_d/(m^2/s)$	$D/m$	$2D/\delta$
铜	$6.71 \times 10^{-7}$	$1.19 \times 10^{-4}$	$3.46 \times 10^{-6}$	10.30
不锈钢	$4.95 \times 10^{-6}$	$4.11 \times 10^{-6}$	$6.41 \times 10^{-7}$	0.26
铝	$8.54 \times 10^{-7}$	$6.78 \times 10^{-5}$	$2.60 \times 10^{-6}$	6.10

从表 1 可以看出,对于不锈钢材料,不满足在温升公式推导时的假设,不适用化简后的式(6),须直接对式(5)进行数值积分求解其温升。

表 2 为常温下铜、不锈钢和铝的部分特性参数。

表 2 常温下铜、不锈钢和铝的部分特性参数  
Tab. 2 Partial characteristic parameters of copper, stainless steel and aluminum at normal temperature

材料	电导率/ (s/m)	热导率/ ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	比热容/ ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )	密度/ ( $kg/m^3$ )
铜	$6.0 \times 10^7$	400.0	385	8 700
不锈钢	$1.1 \times 10^6$	16.3	500	7 390
铝	$3.7 \times 10^7$	238.0	900	3 900

下面对式(5)进行数值求解,定义积分项  $J$ ,如式(7)所示。

$$J = \int_0^t \exp\left[\frac{4\alpha_d(t-t')}{\delta^2}\right] \operatorname{erfc}\left[\frac{2}{\delta} \sqrt{\alpha_d(t-t')}\right] dt' \quad (7)$$

令  $x = \operatorname{erfc}\left[\frac{2}{\delta} \sqrt{\alpha_d(t-t')}\right]$ , 则  $dx = -\frac{2\alpha_d}{\delta^2} dt'$ , 积分式(7)可化为:

$$\begin{aligned}
 J &= \int_0^t \exp\left[\frac{4\alpha_d(t-t')}{\delta^2}\right] \operatorname{erfc}\left[\frac{2}{\delta} \sqrt{\alpha_d(t-t')}\right] dt' \\
 &= \frac{\delta^2}{2\alpha_d} \int_{\frac{2\sqrt{\alpha_d t}}{\delta}}^0 x e^{x^2} \operatorname{erfc}(x) dx \quad (8)
 \end{aligned}$$

令  $F(x) = x e^{x^2} \operatorname{erfc}(x)$ , 根据辛普森求积公式可知:

$$J = -\frac{\delta^2}{2\alpha_d} \left(0 - \frac{2\sqrt{\alpha_d t}}{\delta}\right) \left[F(0) + 4F\left(\frac{\sqrt{\alpha_d t}}{\delta}\right) + F\left(\frac{2\sqrt{\alpha_d t}}{\delta}\right)\right] \quad (9)$$

式(9)便是电磁脉冲对管壁加热温升的数值求解公式。

对于高功率微波源,束波互作用的模式多以  $TM_{01}$  模式为主。式(10)是圆波导  $TM_{01}$  模式的场表达式,可以看出其磁场只有角向分量,根据式  $J_s = n \times H$  可知,高频结构侧面的电流是径向的。

$$\begin{cases} E_r = Q_1 \frac{jk_z R}{P_{01}} J_1\left(\frac{P_{01} r}{R}\right) e^{-jk_z z} \\ E_z = Q_1 J_0\left(\frac{P_{01} r}{R}\right) e^{-jk_z z} \\ H_\varphi = Q_1 \frac{j\omega \varepsilon R}{P_{01}} J_1\left(\frac{P_{01} r}{R}\right) e^{-jk_z z} \end{cases} \quad (10)$$

对于二周期  $1 \text{ MV} \cdot \text{cm}^{-1}$  的试件(注入功率为  $2 \text{ GW}$ ),图 2 为当传试件中传输  $TM_{01}$  模时,其中的磁场矢量分布,可以看出磁场分量平行于试件表面。图 3 是试件的表面磁场分布,从图中可以看出,试件最大峰值磁场位于表面,约为  $H_{\parallel} =$

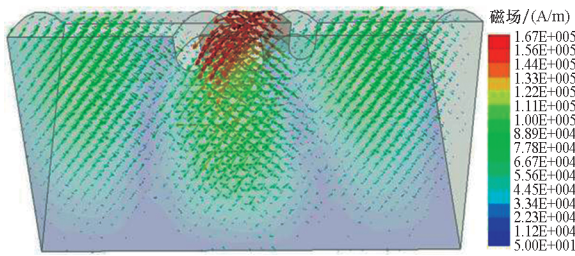


图 2  $TM_{01}$  模式注入慢波试件时试件中磁场分布的矢量图

Fig. 2 Vector diagram of magnetic field distribution in slow wave structure when injected in  $TM_{01}$  mode

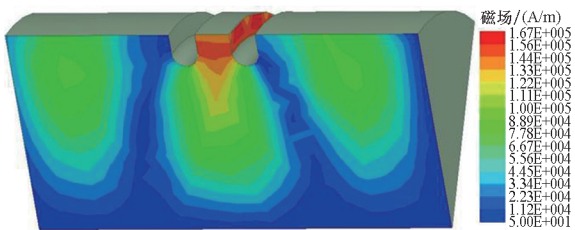


图 3 二周期  $1 \text{ MV} \cdot \text{cm}^{-1}$  试件表面磁场分布

Fig. 3 Magnetic field distribution on the surface of two periodic  $1 \text{ MV} \cdot \text{cm}^{-1}$  slow wave structure

$167 \text{ kA/m}$ 。此时用式(6)计算得到铜、不锈钢和铝试件的表面温升分别为  $3.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $113.6 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $5.4 \text{ }^\circ\text{C}$ ,利用式(9)得到的温升分别为  $2.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $21.7 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $4.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 。结果表明,由于不锈钢材料的特性不满足推导过程的假设,采用式(6)计算温升得到的结果有很大误差。同时,上述分析计算结果表明单个百纳秒的电磁脉冲导致的高频结构加热温升不明显。

根据电磁脉冲的脉宽和试件表面的磁场分布,通过式(6),便可计算得到高频结构的温升。在 HFSS 软件中导出高频结构表面的切向磁场仿真结果,计算功率  $2 \text{ GW}$ 、脉宽  $100 \text{ ns}$  的电磁脉冲对不锈钢材料高频结构的加热温升。该  $1 \text{ MV} \cdot \text{cm}^{-1}$  试件及相应区域的加热温升计算结果分别如图 4 和图 5 所示。

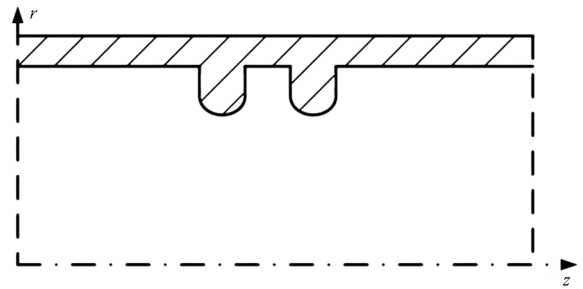


图 4 二周期  $1 \text{ MV} \cdot \text{cm}^{-1}$  矩形试件示意图

Fig. 4 Schematic diagram of two periodic  $1 \text{ MV} \cdot \text{cm}^{-1}$  rectangular slow wave structure

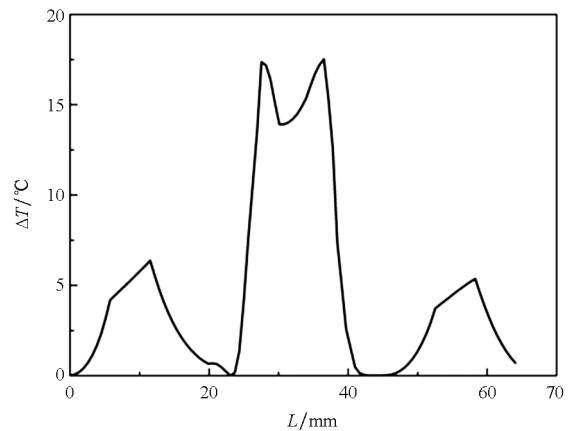


图 5 二周期  $1 \text{ MV} \cdot \text{cm}^{-1}$  不锈钢试件对应的表面温升  
Fig. 5 Surface temperature rise of two periodic  $1 \text{ MV} \cdot \text{cm}^{-1}$  stainless steel slow wave structure

从图 5 可以看出,单脉冲导致的温升不高,但当系统重频工作时,温升造成的释气可能会使高频结构倒角处的局部气压升高,而爆炸发射产生的电子轰击该处的气体层形成等离子体,造成射频击穿和脉冲缩短。接下来利用商业软件 COMSOL 对上述理论计算得到的结果进

行验证。

## 2.2 仿真研究

利用商业软件 COMSOL 对微波的热损耗进行仿真研究,结果与数值计算进行对比<sup>[16]</sup>。

利用该软件的微波加热模块研究一定频率和功率的电磁脉冲注入高频结构时的加热温升效应。分析该问题须求解两个方程:与电磁场相关的麦克斯韦方程和与温度场相关的热传导方程。图 6 所示为求解模型的网格剖分,采用正四面体网格,真空区域的最大网格设置为导波波长的 1/5。

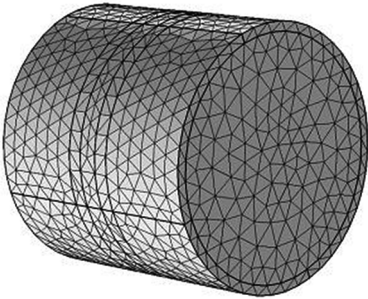


图 6 COMSOL 模型的网格剖分

Fig. 6 Mesh division of the COMSOL model

通过波端口注入功率 2 GW 的纯  $TM_{01}$  模,图 7 所示为试件中磁场的矢量分布,可以看出磁场在试件表面最大且只有角向分量,与理论计算和图 2 所示的仿真结果一致。

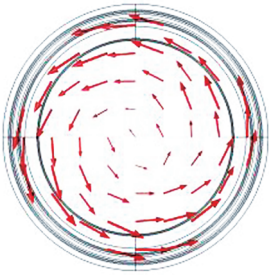


图 7 试件中磁场的矢量图

Fig. 7 Vector diagram of the magnetic field in the slow wave structure

电磁脉冲的能量通过内表面耦合到试件中,将其内表面的损耗设置为热源。由于脉宽仅 100 ns,因此将试件外壁设置为绝热边界,忽略与空气的散热过程。

图 8 所示为电磁脉冲结束时试件的温度分布,可以看出最高温度出现在磁场最大处,结果与理论计算一致。

对铜、不锈钢和铝在 2 GW、9.38 GHz、100 ns 电磁脉冲注入情形下的温升进行了仿真研究。

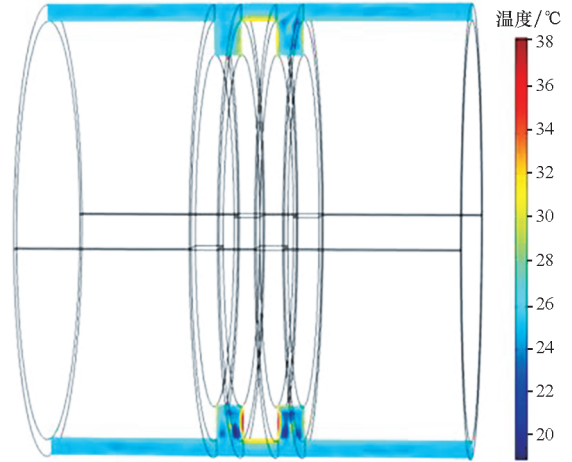


图 8 100 ns 时不锈钢试件的温度分布

Fig. 8 Temperature distribution of stainless steel slow wave structure at 100 ns

图 9 所示为仿真和理论计算结果的对比。可以看出对试件温升在电磁脉冲结束时达到最大值,且理论和软件仿真结果一致性较高。

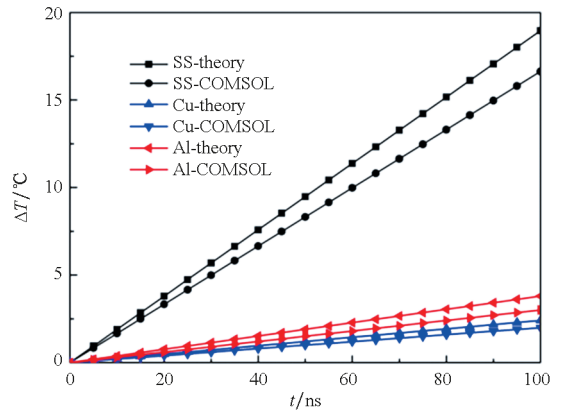


图 9 试件最高温度随时间的变化

Fig. 9 Variation of maximum temperature distribution of the slow wave structure with time

## 2.3 重频运行时的情况

当系统重频运行时,如图 10 所示,电磁脉冲循环加载于高频结构。假设电磁脉冲的脉宽为 100 ns,由于脉宽较短,在脉冲持续时间内忽略散热效应,而在脉冲间隔中,需考虑散热效应,本文考虑的重频为 1 ~ 30 Hz。

由于结构区域没有散热等外部冷却,仅考虑热传导,热传导方程如下:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \alpha_d^2 \Delta T = 0 \quad (11)$$

$$\alpha_d = \frac{k}{\rho C} \quad (12)$$

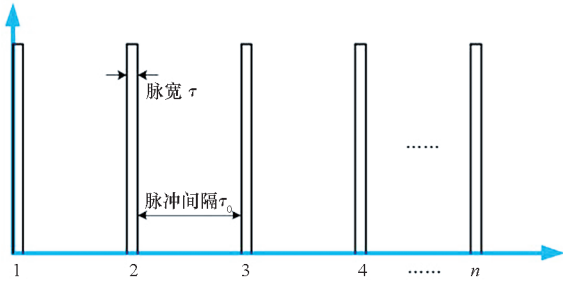


图 10 重频运行下脉冲加热示意图

Fig. 10 Diagram of pulse heating in the case of repeated frequency

边界条件为:

$$T|_{r=0} = \begin{cases} T_m & r < r_b \\ T_0 & r > r_b \end{cases} \quad (13)$$

其中,  $r_b$  为电磁脉冲温升的作用区域,  $T_0$  是材料的初始温度,  $T_m$  为求解区域的最大温度。根据方程(11) ~ (13) 可得:

$$T(t) = \frac{1}{\alpha_d \sqrt{\pi t}} \left[ T_m \int_0^{r_b} e^{-\frac{r^2}{4\alpha_d^2 t}} dr + T_0 \int_{r_b}^{\infty} e^{-\frac{r^2}{4\alpha_d^2 t}} dr \right] \quad (14)$$

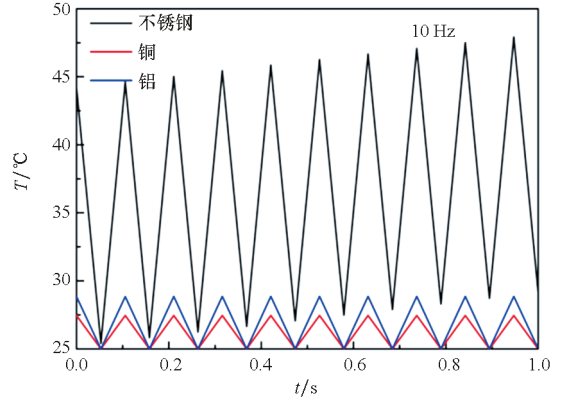
对结果进行进一步化简可得:

$$\begin{aligned} T(t) &= \frac{1}{\alpha_d \sqrt{\pi t}} \left[ T_m \int_0^{r_b} e^{-\frac{r^2}{4\alpha_d^2 t}} dr + T_0 \int_{r_b}^{\infty} e^{-\frac{r^2}{4\alpha_d^2 t}} dr \right] \\ &= \frac{1}{\alpha_d \sqrt{\pi t}} \left[ T_m \cdot \alpha_d \cdot \sqrt{\pi t} \cdot \operatorname{erf}(x) + T_0 \cdot \right. \\ &\quad \left. \alpha_d \cdot \sqrt{\pi t} \cdot (1 - \operatorname{erf}(x)) \right] \\ &= (T_m - T_0) \operatorname{erf}(x) + T_0 \end{aligned} \quad (15)$$

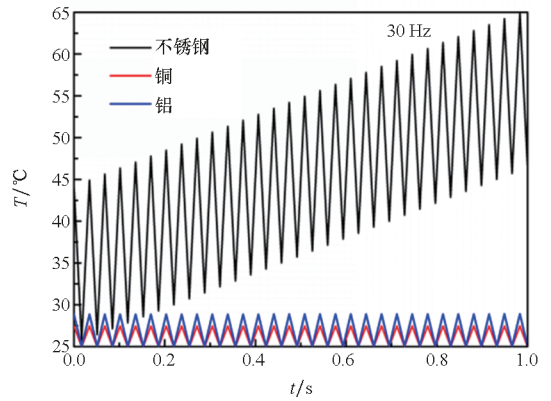
其中,  $x = \frac{r_b}{2\alpha_d \sqrt{t}}, \operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ .

由式(15)可知,电磁脉冲间隔中的冷却与材料的热扩散率、冷却时间和温升作用的区域有关。

在电磁脉冲脉宽 100 ns, 试件表面最大射频磁场  $H_{\parallel} = 157 \text{ kA/m}$  时, 对铜、不锈钢和铝材料试件在不同重复频率情况下的表面温升进行计算。研究中发现作用区域对金属材料温升的影响较为明显, 根据实验结果合理选择参数, 在重频 10 Hz 和 30 Hz 时铜、不锈钢和铝材料试件的最大温升计算结果如图 11 所示。在电磁脉冲持续时间里, 温度上升, 前一个脉冲结束后, 试件表面温度缓慢下降直到下一个脉冲到来。由于材料特性等原因, 单脉冲对铜和铝试件的温升作用低, 且在脉冲间隔时温度降低较为明显, 几乎没有温度升高的趋势。而对于不锈钢材料, 当重复频率较高时, 表面温升有可能达到气体热脱附的阈值<sup>[17]</sup>。



(a) 10 Hz



(b) 30 Hz

图 11 典型重复频率时三种金属材料的表面温升

Fig. 11 Surface temperature rise of three metal material at typical repeated frequency

高功率微波源中的热效应包含本文研究的微波热损耗导致的温升及电子束轰击收集极产生的温升效应等, 是一个综合的结果, 热效应对于射频击穿的影响需要进一步研究分析。

### 3 结论

本文对 HPM 源中高频结构的热损耗通过理论分析、数值计算和仿真分析等方法进行了研究, 得到了如下结论:

电磁脉冲对金属材料的加热温升式(6)有适用范围, 对于不锈钢等材料, 须用数值方法进行求解; 以二周期  $1 \text{ MV} \cdot \text{cm}^{-1}$  试件为例进行的求解结果表明: 脉宽 100 ns 的单脉冲对不锈钢试件的温升效应明显高于其他材料; 当系统工作在高重频时, 电磁脉冲的温升作用有可能使金属材料达到气体脱附的阈值从而引发气体脱附形成局部高压; COMSOL 软件的仿真研究结果和理论计算结果符合良好。

### 参考文献 (References)

[1] ZHANG J, ZHANG D, FAN Y W, et al. Progress in

- narrowband high-power microwave sources [J]. *Physics of Plasmas*, 2020, 27(1): 010501.
- [2] ZHOU F G, ZHANG D, ZHANG J, et al. A novel cross-band frequency hopping gigawatts class high-power microwave oscillator[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2022.
- [3] XIAO R Z, CHEN K, MIAO T Z, et al. Electron autoacceleration and efficient microwave generation in a radial three-cavity transit-time oscillator with two output ports[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2022, 69(2): 736-740.
- [4] WANG F Y, ADOLPHSEN C, NANTISTA C. Performance limiting effects in X-band accelerators[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2010, 1299(1): 280-285.
- [5] ZHANG X, CHANG C, GIMENO B. Multipactor analysis in circular waveguides excited by TM<sub>01</sub> mode [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2019, 66(11): 4943-4951.
- [6] YUAN Y Z, MENG J, ZHANG J, et al. Influence of RF breakdown plasma on dispersion relation of high frequency structures and characteristics of generated microwave in relativistic backward wave oscillators [C]//*Proceedings of Photonics & Electromagnetics Research Symposium-Fall*, 2019: 686-693.
- [7] DOLGASHEV V A. RF breakdown in high vacuum multimegawatt X-band structures [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2002, 625(1): 77-82.
- [8] WILSON P B. A theory for the RF surface field for various metals at the destructive breakdown limit[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2006, 877(1): 27-40.
- [9] HASSANEIN A, INAEPOV Z, NOREM J, et al. Effects of surface damage of RF cavity operation[J]. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 2006, 9(6): 062001.
- [10] 李承祖, 赵凤章. 电动力学教程[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1994.
- LI C Z, ZHAO F Z. *Electrodynamics course*[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1994. (in Chinese)
- [11] 袁玉章. X波段高功率微波射频结构真空击穿研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.
- YUAN Y Z. *Investigation on vacuum breakdown characteristic of high frequency structure of X-band high power microwave generators* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018. (in Chinese)
- [12] LIENHARD J H, IV, LIENHARD J H, V. *A heat transfer textbook*[M]. 3rd ed. USA: Phlogiaton Press, 2001.
- [13] BECK J V. Green's function solution for transient heat conduction problems[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1984, 27(8): 1235-1244.
- [14] Greenberg M D. *Application of Green's functions in science and engineering*[M]. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1971.
- [15] Butkovakiy A G. *Green's functions and transfer functions handbook*[M]. Halstead Trans, New York, 1982.
- [16] WARREN B, AWIDA M H, FATHY A E. *Microwave heating of metals* [J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2012, 6(2): 196.
- [17] 荀涛. 清洁强流真空二极管相关技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2010.
- XUN T. *Investigation of related techniques for a vacuum clean high-current diode* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)