



## 15 MA Z箍缩装置真空磁绝缘传输线损失电流的电路模拟

龚振洲 魏浩 范思源 孙凤举 吴撼宇 邱爱慈

## Circuit simulation of current loss in magnetically insulated transmission line system in 15- MA Z-pinch driver

Gong Zhen-Zhou Wei Hao Fan Si-Yuan Sun Feng-Ju Wu Han-Yu Qiu Ai-Ci

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 105202 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20212378

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212378>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

有耗介质层上多导体传输线的电磁耦合时域分析方法

Time domain hybrid method for coupling analysis of multi-conductor transmission lines on the lossy dielectric layer excited by ambient wave

物理学报. 2020, 69(6): 060701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191214>

磁绝缘线振荡器中模式竞争的物理分析和数值模拟

Competitions among modes in magnetically insulated transmission line oscillator

物理学报. 2020, 69(19): 198401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200383>

介质部分填充平行平板传输线微放电过程分析

Multipactor in parallel-plate transmission line partially filled with dielectric material

物理学报. 2018, 67(15): 157901 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180351>

同轴传输线微放电的统计理论稳态建模及敏感区域计算

Multipactor susceptibility chart of coaxial transmission lines with stationary statistical modeling

物理学报. 2018, 67(22): 227901 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181341>

周期与非周期传输线网络的物理与拓扑性质

Physics and topological properties of periodic and aperiodic transmission line networks

物理学报. 2020, 69(15): 150301 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200258>

2 cm电子回旋共振离子推力器离子源中磁场对等离子体特性与壁面电流影响的数值模拟

Numerical simulation of influence of magnetic field on plasma characteristics and surface current of ion source of 2-cm electron cyclotron resonance ion thruster

物理学报. 2021, 70(7): 075204 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201667>

# 15 MA Z 箍缩装置真空磁绝缘传输线 损失电流的电路模拟\*

龚振洲<sup>1)</sup> 魏浩<sup>2)†</sup> 范思源<sup>1)</sup> 孙凤举<sup>2)</sup> 吴撼宇<sup>2)</sup> 邱爱慈<sup>1)2)</sup>

1) (西安交通大学, 电力设备与电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

2) (西北核技术研究所, 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 西安 710024)

(2021 年 12 月 23 日收到; 2022 年 1 月 19 日收到修改稿)

采用 TL-code 电路编码方法, 建立了 15 MA Z 箍缩装置多层圆盘锥磁绝缘传输线的全电路模型, 分析了外磁绝缘传输线、汇流柱和内磁绝缘传输线三个区域电流损失特性. 外磁绝缘传输线磁绝缘形成过程的空间电荷损失持续时间约 30 ns, 对负载电流影响小. 进入磁绝缘稳态时, 外磁绝缘传输线末端鞘层电子流损失约 300 kA. 汇流柱区域电流损失与电极等离子体运动速率密切相关, 当等离子体运动速率为 21 cm/ $\mu$ s 时, 负载峰值电流时刻损失电流约 4 MA. 内磁绝缘传输线电流损失取决于阳极离子流种类, 电流损失在负载峰值电流时刻之后, 损失电流约 2.1 MA. 当 15 MA 装置驱动长度 2 cm、半径 2 cm、质量 3 mg 丝阵负载时, 绝缘堆峰值电流约 18 MA, 负载峰值电流约 13.5 MA、峰值时间 (0—100%) 约为 100 ns.

**关键词:** 磁绝缘传输线, 传输线编码, 鞘层电子流, 离子流

**PACS:** 52.59.Qy, 52.58.Lq, 84.70.+p

**DOI:** 10.7498/aps.71.20212378

## 1 引言

快 Z 箍缩在惯性约束聚变、辐射物理、天体物理等领域有重要应用. 国内外正积极开展下一代超高功率 Z 箍缩装置概念设计和关键技术研究. 电磁能量高效传输与汇聚是制约大型 Z 箍缩装置向更高功率发展的核心技术之一.

大型 Z 箍缩装置真空磁绝缘传输线 (magnetically-insulated-transmission-line, MITL) 在能量传输汇聚过程中存在显著电流损失<sup>[1-4]</sup>. 美国 Sandia 国家实验室 Stygar 等<sup>[1]</sup> 采用 TL-code 电路编码方法, 研究了阴极爆炸发射、真空电子流、阴极等离子体运动、电子碰撞、大电流密度下电极欧姆加热等因素对美国 20 MA Z 装置电流损失的影响, 给出了 MITL 真空电子流的估算公式. Hutsel 等<sup>[2]</sup>

在 Stygar 等<sup>[1]</sup> 基础上, 基于鞘层电子流再俘获理论, 改进了真空电子流计算方法, 使 TL-code 电路模拟与实验结果更加吻合. Spielman 等<sup>[3-4]</sup> 在 15 TW Z 箍缩装置概念设计中, 采用 SCREAMER 电路模型, 获得了磁绝缘形成过程中真空电子流分布规律. 国内中国工程物理研究院宋盛义等<sup>[5]</sup>、西北核技术研究所呼义翔等<sup>[6]</sup> 采用 TL-code 电路编码方法, 建立了美国 Z 装置 4 层圆盘锥 MITL 电路模型. 中国工程物理研究院邹文康等<sup>[7-8]</sup> 开发了 FAST 电路模拟程序, 分析了电流前沿对电流损失的影响规律, 北京应用物理与计算数学研究所薛创等<sup>[9-11]</sup> 建立了全电路数值模拟程序 FCM-PTS, 仿真研究了我国 10 MA 装置电磁能传输规律. 以上电路模型主要用于描述外 MITL 电子流损失, 很少考虑等离子体运动造成间隙闭合引起的柱孔区域电流损失、内 MITL 电流损失<sup>[12-17]</sup>. 随着 Z 箍

\* 国家自然科学基金 (批准号: 51790524, 11975186) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: weihaoyy@sina.com

缩装置功率和电流等级提高, 汇流柱 (post hole vacuum convolute, PHC) 和内 MITL 的电流损失显著增大<sup>[18–26]</sup>, 必须在电路建模中进行考虑.

本文基于 TL-code 编码方法, 建立了 15 MA Z 箍缩装置中心汇流区全电路模型, 考虑了磁绝缘形成前的空间电荷流损失、外层 MITL 真空鞘层电子流损失、电极等离子体运动引起 PHC 间隙闭合、内层 MITL 区域阳离子流损失等多种电流损失机制, 获得了 15 MA 装置在外 MITL, PHC 和内 MITL 等位置电流损失特性.

## 2 15 MA 装置 MITL 系统

15 MA 装置中心汇流区如图 1 所示. 初级脉冲源采用 24 路快脉冲直线变压器驱动源 (fast-linear-transformer-driver, FLTD) 并联 24 路 FLTD 脉冲源分为上下两层, 每层 12 路圆周均布. 单路 FLTD 产生峰值电压约 2 MV、峰值电流约 800 kA 电脉冲. 每一路 FLTD 通过阻抗为  $2.5 \Omega$  的水介质同轴传输线, 连接在直径约 8 m 的中央水池. 在中央水池内部, 24 路矩形三板传输线分为上下两层, 分别连接 4 层整体径向传输线 (monolithic-radial-transmission-line, MRTL). MRTL 传输长度约 1 m, 输出端与 4 层高压绝缘堆连接. FLTD 初级脉冲源、水介质同轴传输线、矩形三板传输线和 MRTL 阻抗基本匹配. 绝缘堆直径约为 2.8 m、高度约为 1.4 m. A, B, C 和 D 层 MITL 阻抗分别为 2, 2, 3 和  $3 \Omega$ , 最小间隙距离为 1 cm, 外 MITL 上层阴极与水平面的夹角为  $12^\circ$ . 4 层外 MITL 经 PHC 并联汇入内 MITL. 4 层 MITL 参数随半径的变化曲线如图 2 所示. 整个中心汇流区真空电感 (包括

绝缘堆、真空喇叭口、MITL、PHC、内 MITL 和负载初始电感) 约为 10.5 nH.

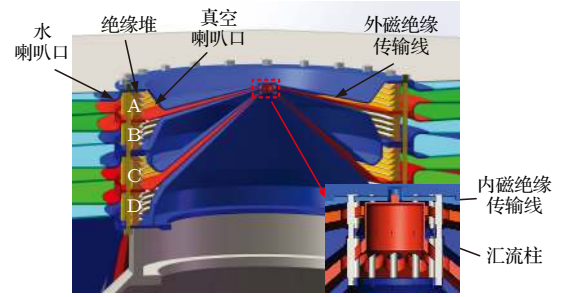


图 1 15 MA 装置中心汇流区示意图

Fig. 1. Cross-sectional view of the central converge region of the 15 MA driver.

## 3 15 MA 装置 MITL 系统电路建模

基于 TL-code 方法, 建立 15 MA 装置 MITL 系统电路模型如图 3 所示. MITL 按照 0.1 ns 电长度分为 163 段. 其中 A 层包含 28 段恒阻抗段 ( $A_{i1}-A_{i28}$ )、8 段恒间隙段 ( $A_{g1}-A_{g8}$ ), B 层包含  $B_{i1}-B_{i28}$ 、 $B_{g1}-B_{g8}$ , C 层包含  $C_{i1}-C_{i35}$ 、 $C_{g1}-C_{g6}$ , D 层包含  $D_{i1}-D_{i37}$ 、 $D_{g1}-D_{g7}$ , 每段传输线并联一个时变电阻以模拟电流损失. PHC 由 3 个传输单元组成,  $R_{\text{loss}, p}$  描述 PHC 电流损失. 内 MITL 由 2 个传输单元组成,  $R_{\text{loss}, i}$  描述内 MITL 电流损失.

### 3.1 外 MITL 电流损失

#### 3.1.1 磁绝缘建立过程的电流损失

当阴极表面场强大于电子发射阈值  $E_t$  时, 阴极表面开始发射电子, 电子在阴阳间隙电场作用下向阳极运动, 并损失在阳极. 通常采用蔡尔德-朗缪

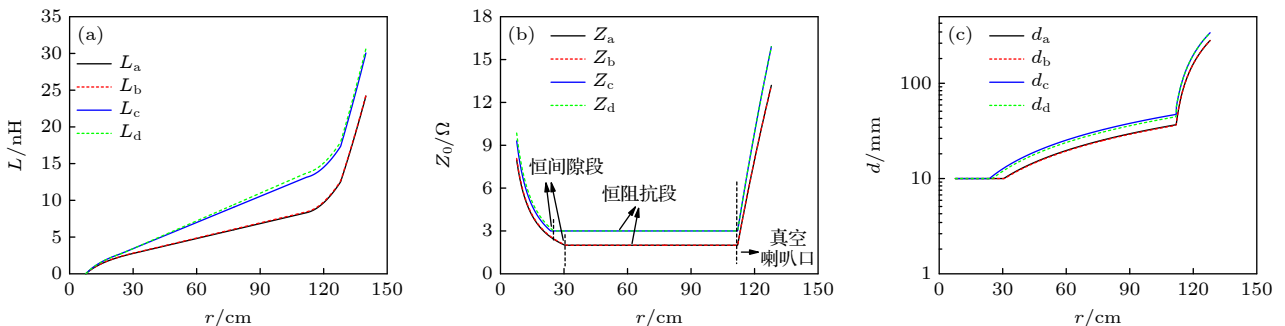


图 2 15 MA 装置 4 层 MITL 电气和结构参数随半径变化规律 (a) 真空电感 (包括绝缘堆和外 MITL); (b) 真空阻抗; (c) 间隙距离

Fig. 2. The outer-MITL parameters of the 15 MA driver: (a) The vacuum inductance (including the stack and MITL); (b) the vacuum impedance; (c) the gap distance.

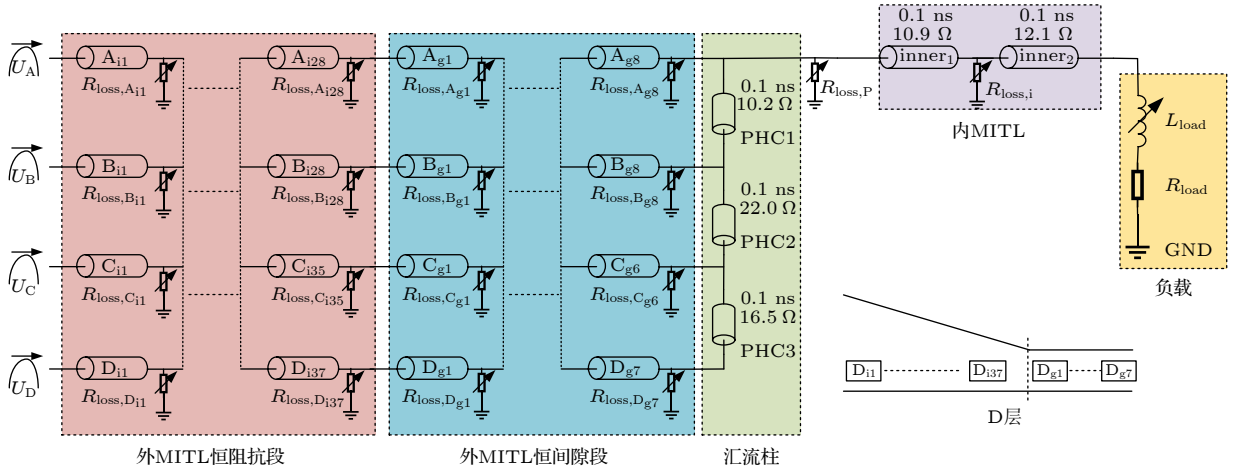


图 3 15 MA 装置 MITL 电路模型

Fig. 3. TL-code model of the MITL system of the 15 MA driver.

尔空间电荷限制流  $I_{scl}$  来描述磁绝缘形成过程中电流损失, 其表达式如 (1) 式. 为了避免电路模拟中损失电流突变, 引入 (2)–(4) 式调制函数  $K(t, |E|)$  和  $F_e(Y)$  来修正空间电荷限制流  $I_{scl}$  [27]. 调制函数  $K(t, |E|)$  用于避免损失电流前沿突变, 调制函数  $F_e(Y)$  用于避免损失电流后沿突变. 磁绝缘形成过程中每个传输线单元的损失电阻  $R_{loss}$  表达式如 (5) 式. 阳极自限制电流  $I_{asl}$  如 (6) 和 (7) 式所示 [4,28]

$$I_{scl} = \frac{4}{9} \varepsilon_0 A_0 \sqrt{\frac{2q}{m}} \frac{V_a^{3/2}}{d_{oi}^2}, \quad (1)$$

$$I_{loss} = F_e(Y) K(t, |E|) I_{scl}, \quad (2)$$

$$K(t, |E|) = \begin{cases} 0, & E \leq E_t, \\ \left| \sin \left( \frac{\pi}{2} \frac{E - E_t}{E_2 - E_t} \right) \right|, & E_t \leq E \leq E_2, \\ 1, & E_2 \leq E, \end{cases} \quad (3)$$

$$F_e(Y) = \begin{cases} \sqrt{1 - I^2/I_{asl}^2}, & I < I_{asl}, \\ 0, & I > I_{asl}, \end{cases} \quad (4)$$

$$R_{loss} = V_a / I_{loss}, \quad (5)$$

$$I_{asl} = \frac{V_a / Z_0}{f_{MC}(V_a) [2f_{MC}(V_a) - 1]^{1/2}}, \quad (6)$$

$$f_{MC}(V_a) = \left( \frac{V_{con}/(4V_a) - 1}{V_{con}/V_a - 1} \right) \pm \left[ \left( \frac{V_{con}/(4V_a) - 1}{V_{con}/V_a - 1} \right)^2 + \frac{1}{V_{con}/V_a - 1} \right]^{1/2}, \quad (7)$$

其中,  $V_a$  为传输线单元阴阳极线电压,  $d_{oi}$  为传输

线单元阴阳电极初始间隙,  $\varepsilon_0$  为真空介电常数,  $q$  为电子电荷量,  $m$  为电子静止质量,  $A_0$  为传输线单元的电极面积,  $E_2$  为调制空间电荷流前沿的电场强度 [27].  $Z_0$  为传输线单元的真空阻抗,  $V_{con} = mc^2 / (2q)$ , 当  $V_{con}/V_a > 1$  时 (7) 式取正值, 否则取负值.

### 3.1.2 稳态磁绝缘后电流损失

随着电流增大、磁场增强, 阴极发射电子在自磁场作用下逐渐偏离阳极, 最终建立磁绝缘. 理论上讲, 稳态磁绝缘后外 MITL 可视为无损传输线, 没有电流损失, 然而由于 MITL 末端 PHC 区域磁场拓扑及位型变化, 恒间隙末端的鞘层电子流最终损失在 PHC 和内 MITL 区域.

采用 Mendel 一维稳态磁压力平衡模型, 考虑阴极等离子体扩散对阴阳极间隙闭合的影响, 以及磁绝缘电子碰撞效应来求解外 MITL 的鞘层电子流 [1,29], 鞘层电子流  $I_f$  大小等于阴阳极电流之差:

$$V_a = \frac{2}{3} Z_0 [1 - (v_{ocp} t / d_{oi})] (I_a^2 - I_k^2)^{1/2}, \quad (8)$$

其中,  $I_a$  为阳极电流,  $I_k$  为阴极电流,  $v_{ocp}$  为外 MITL 阴极等离子体扩散速度 [1].

粒子模拟显示, MITL 恒阻抗段鞘层电子流被俘获回阴极, 不会传输到恒间隙段 [2,30]. 基于鞘层电子流再俘获模型, 恒间隙段鞘层电子流  $I_f$  修正为 (9) 式 [2]:

$$I_{f,n,op} = \begin{cases} I_{f,n-1}, & \text{if } \frac{I_{f,n}}{I_{a,n}} \geq k_{rt}, \\ (I_{f,n-1} - I_{f,n}) \frac{I_{f,n}}{I_{a,n}} \frac{1}{k_{rt}} + I_{f,n}, & \text{if } \frac{I_{f,n}}{I_{a,n}} \leq k_{rt}, \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $I_{a,n}$  为第  $n$  个传输线单元的阳极电流,  $I_{f,n}$  为第  $n$  个传输线单元修正前的鞘层电子流,  $I_{f,n-1}$  为第  $n-1$  个传输线单元修正前的鞘层电子流,  $I_{f,n,op}$  为第  $n$  个传输线单元修正后的鞘层电子流,  $k_{rt}$  为鞘层电子流再俘获系数<sup>[2]</sup>.

### 3.2 PHC 电流损失

Jennings 等<sup>[23]</sup> 通过 Z 装置实验拟合出 PHC 损失电阻如 (10) 式所示:

$$R_{PHC} = \frac{d_{pe}^2}{A_p k \sqrt{V}} + \frac{\eta(d_{pi} - d_{pe})}{A_p}, \quad (10)$$

式中:  $A_p$  为 PHC 放电通道有效截面积,  $d_{pi}$  为 PHC 初始间隙距离,  $d_{pe}$  为 PHC 的有效间隙距离,  $d_{pe} = d_{pi} - v_p t$ ,  $v_p$  为 PHC 电极等离子体运动速度,  $\eta$  为等离子体放电通道等效电阻率,  $k = 4\epsilon_0 \sqrt{2q/m}/9$ .

(10) 式第 1 项描述 PHC 间隙闭合前空间电荷限制流过程, 第 2 项描述电极等离子体运动导致有效间隙距离缩短、形成放电通道过程. 本文忽略鞘层电子流对阳极柱的加热时间<sup>[18]</sup>, 假定外 MITL 鞘层电子流传输到阳极柱时 PHC 就产生电极等离子体.

### 3.3 内 MITL 电流损失

内 MITL 电流损失的因素很多, 包括: 鞘层电子流损失, 大电流密度下欧姆加热、磁扩散和导体边界运动引起的能量损失、阳离子流损失等<sup>[1,2,31,32]</sup>. 内 MITL 自身产生的鞘层电子流较小, 可以忽略<sup>[1]</sup>, 大电流密度下欧姆加热引起的能量损耗也可以忽略<sup>[1]</sup>. 本文重点关注阳离子流损失.

内 MITL 间隙中阳离子种类数量众多, 通常包括:  $H^+$ ,  $O^+$ ,  $O^{2+}$ ,  $O^{4+}$ ,  $C^+$  等, 主要由电极表面水分子或碳氢化合物解吸附后电离产生<sup>[2,33]</sup>, 本文主要考虑  $H^+$  和  $O^{2+}$ . 带电粒子在 MITL 间隙中运动, 粒子的运动轨迹取决于荷质比. 荷质比越小运动速度越快, 也越容易被磁绝缘. 阳离子的磁绝缘判据如式 (11)<sup>[2]</sup>:

$$\frac{m_a}{q_a} = \frac{1}{2V_a} \left( \frac{\mu_0 I_a d_{ie}}{2\pi r} \right)^2, \quad (11)$$

式中,  $\mu_0$  为真空磁导率,  $m_a$  为阳离子静止质量,  $q_a$  为阳离子电荷量,  $d_{ie}$  为内 MITL 有效间隙距离,  $d_{ie} = d_{ii} - v_{it}$ ,  $d_{ii}$  为内 MITL 初始间隙距离,  $v_{it}$  为内 MITL 等离子体运动速率.

考虑到外 MITL 鞘层电子流对内 MITL 阳离

子流的增强效果<sup>[2]</sup>, 内 MITL 离子流损失为

$$I_{ion} = n \cdot I_{scl\_a}, \quad (12)$$

其中,  $I_{scl\_a}$  是蔡尔德-朗缪尔空间电荷限制离子流,  $n$  表征由外层 MITL 进入内 MITL 的鞘层电子流对阳极离子流的增强系数.  $I_{scl\_a}$  和增益系数  $n$  分别为

$$I_{scl\_a} = \frac{4}{9} \epsilon_0 A_i \sqrt{\frac{2q_a V_a^{3/2}}{m_a d_{ie}^2}}, \quad (13)$$

$$n = \frac{3}{4} k_{vi} Q_e \frac{d_{ie}}{\epsilon_0 A_i V_a}, \quad (14)$$

式中,  $A_i$  为每个内 MITL 传输线单元的面积.  $k_{vi}$  表示存在空间电荷增强效应的离子发射平均运动速度与无空间电荷增强效应的离子发射平均速度之比<sup>[2]</sup>,  $Q_e$  为内 MITL 积累的电荷量:

$$Q_e = f_{en,im} \int_0^t I_f dt, \quad (15)$$

式中,  $f_{en,im}$  为进入内 MITL 并在间隙积累的鞘层电子流占总鞘层电子流的比例<sup>[2]</sup>.

本文假设内 MITL 阳离子发射起始时间与 PHC 等离子体运动起始时间相同.

## 4 15 MA 装置电流损失计算

负载采用长度 2 cm、半径 2 cm、初始质量 3 mg 的金属丝阵. 采用零维模型模拟丝阵聚爆动态过程<sup>[23,34,35]</sup>, 假定滞止时刻压缩比为 10:1. 电路模型参数如表 1 所示.

表 1 电路模型输入参数  
Table 1. The input parameters of the circuit model..

物理量	符号	单位	数值
阴极表面电子发射阈值 <sup>[1]</sup>	$E_t$	kV/cm	240
调制空间电荷流前沿的电场强度 <sup>[27]</sup>	$E_2$	kV/cm	300
外 MITL 等离子体运动速率 <sup>[1]</sup>	$v_{ocp}$	cm/ $\mu$ s	2.5
PHC 等离子体运动速率 <sup>[23]</sup>	$v_p$	cm/ $\mu$ s	21
内 MITL 等离子体运动速率 <sup>[2]</sup>	$v_i$	cm/ $\mu$ s	3.7
鞘层电子流再俘获系数 <sup>[2]</sup>	$k_{rt}$	—	0.074
PHC 放电通道面积 <sup>[23]</sup>	$A_p$	cm <sup>2</sup>	15
内 MITL 电极面积	$A_i$	cm <sup>2</sup>	100
PHC 放电通道电阻率 <sup>[23]</sup>	$\eta$	$\Omega \cdot m$	0.035
PHC 初始间隙距离 <sup>[1]</sup>	$d_{pi}$	cm	1.14
内 MITL 初始间隙距离	$d_{ii}$	cm	0.6
有无空间电荷增强效应的离子运动速度之比 <sup>[2]</sup>	$k_{vi}$	—	1.3
进入内 MITL 并在间隙积累的鞘层电子流比例 <sup>[2]</sup>	$f_{en,im}$	—	0.02

当 15 MA 装置初级脉冲源 FLTD 充电  $\pm 70$  kV 时, 装置总储能约 6.5 MJ, 绝缘堆电压和电流如图 4 所示. 可以看出 A 层和 B 层绝缘堆峰值电流约 5 MA, 峰值电压约 1.9 MV, C 层和 D 层绝缘堆峰值电流约 4 MA, 峰值电压约 2.3 MV.

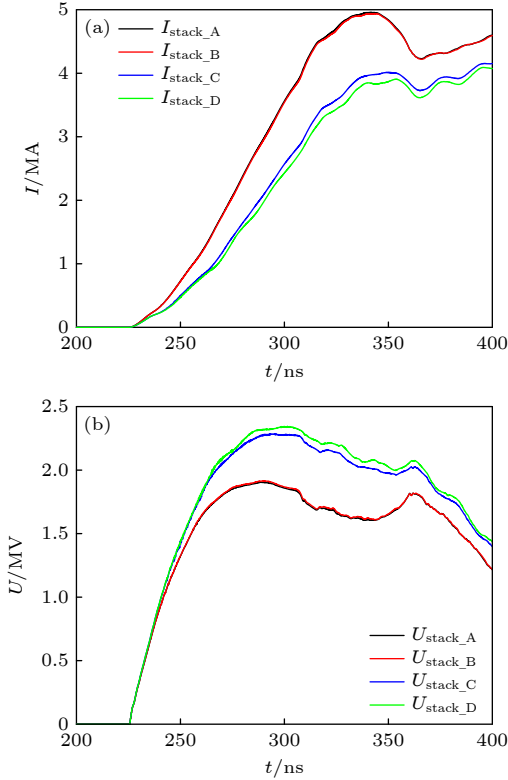


图 4 15 MA 装置绝缘堆参数 (a) 绝缘堆电流; (b) 绝缘堆电压

Fig. 4. The stack parameters of the 15 MA driver: (a) The stack current; (b) the stack voltage.

## 4.1 MITL 电流损失计算

### 4.1.1 磁绝缘形成前电流损失

由于 D 层 MITL 电压最高、电流最低, 磁绝缘工作条件最苛刻, 本文以 D 层为例分析外 MITL 电流损失规律. D 层外 MITL 各段阴阳极电压、电场强度和电流损失如图 5 所示. 结果显示: 外 MITL 电压沿功率传输方向逐渐降低, 电场强度先增大后减小, 在恒阻抗末端 (恒间隙始端) 达到最大值. D 层 MITL 空间电荷损失电流总和约为 310 kA. 从空间电荷流降至零的时间上看, 恒间隙末端最早进入磁绝缘稳态, 并向上游扩散直到全段都进入磁绝缘稳态. 总的来说, 磁绝缘形成过程中空间电荷流损失出现在电流起始阶段, 持续时间约为 30 ns, 对负载电流影响较小.

### 4.1.2 磁绝缘稳态电流损失

图 6(a) 给出了 D 层 MITL 恒间隙各段的鞘层电子流, 可以看出  $D_{g7}$  段最早出现鞘层电子流, 说明恒间隙末端最早进入磁绝缘稳态, 其主要原因如下: 从图 5(a) 可以看出  $D_{g7}$  段阴阳极电压最小, 在所有恒间隙段中  $D_{g7}$  段电场强度最小, 在电流基本相同情况下, 间隙电场越小, 越早进入磁绝缘稳态. 鞘层电子流波形呈马鞍型, 这是因为在脉冲起始阶段, 外 MITL 电流较小, 磁场对鞘层电子束缚弱, 鞘层电子流较大; 负载聚爆时刻附近, 负载等效阻

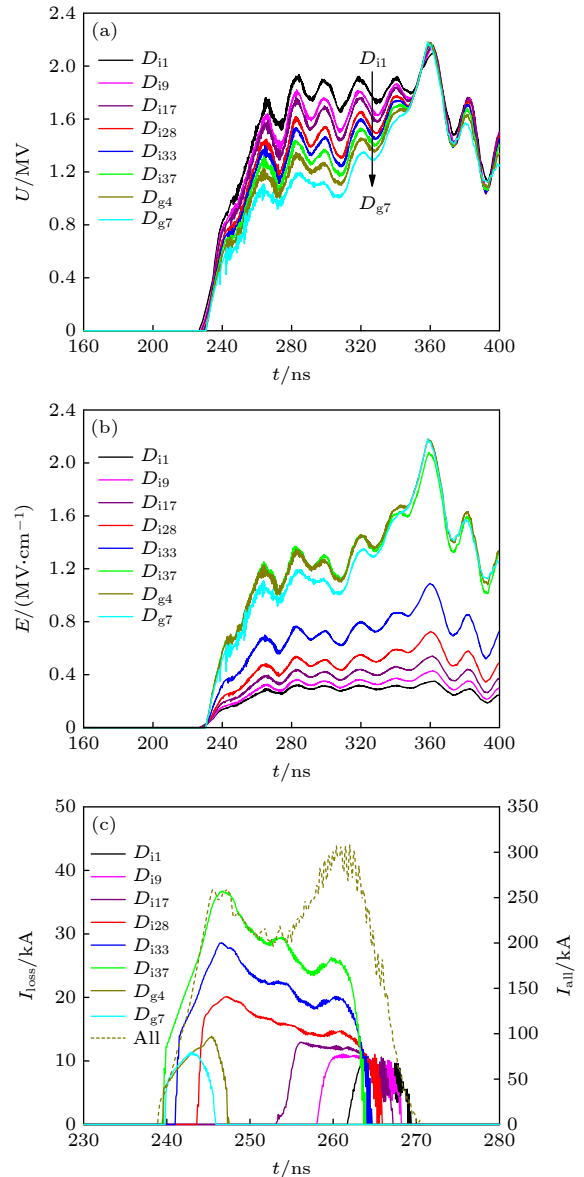


图 5 D 层 MITL 不同传输线单元电参数 (a) 阳极电压; (b) 电场强度; (c) 空间电荷流损失

Fig. 5. The MITL parameters of several elements within the D Level: (a) Line voltage; (b) electric field; (c) electron-loss current.

抗增大, MITL 线电压增大, 鞘层电子流随之增大. 在负载峰值电流时刻, D 层 MITL 鞘层电子流峰值约 180 kA, 在负载聚爆滞止时刻最高约 480 kA. 恒间隙段从外到内 ( $D_{g1}$ — $D_{g7}$ ) 鞘层电子流幅值呈现下降趋势. 最终损失在汇流柱和内 MITL 区域的鞘层电子流由恒间隙段末端 ( $D_{g7}$ ) 决定. 图 6(b) 给出了 15 MA 装置 4 层 MITL 末端鞘层电子流分布, 最终进入 PHC 和内 MITL 区域的鞘层电子流峰值为 300 kA.

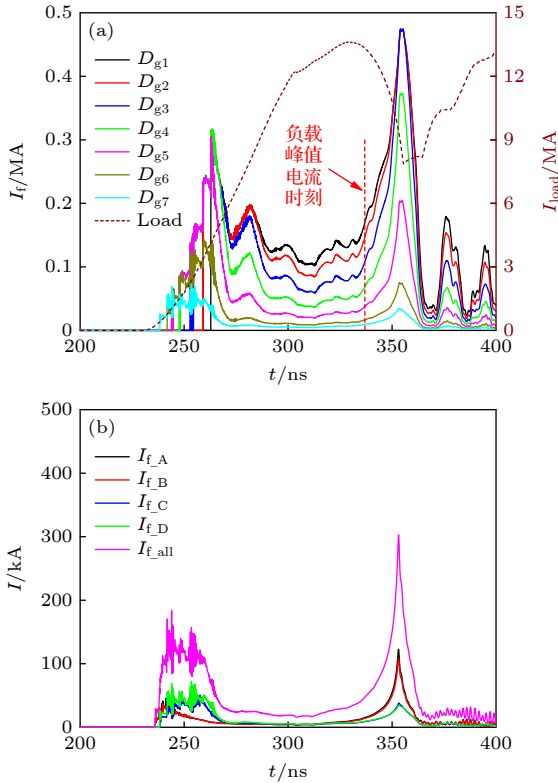


图 6 鞘层电子流对比(负载聚爆时刻约 355 ns) (a) D 层 MITL 恒间隙各段; (b) 4 层 MITL 恒间隙末端及 4 层之和  
Fig. 6. The comparison of the electron flow current in each element (the Z-pinch stagnation approximately equal to 355 ns): (a) Each element of the constant-gap MITL segment of the D-level; (b) the end of the four level constant-gap MITL and the sum of the flow current.

### 4.2 PHC 电流损失

从图 7(a) PHC 等效损失电阻变化轨迹可以看出, 在 304 ns 时刻损失电阻降低至约 0.4  $\Omega$  并保持恒定, 表明该时刻 PHC 阴阳间隙完全闭合, 阴阳电极间形成稳定放电通道. 从图 7(b) 可以看出, 在 304 ns 时刻, 汇流柱电压突然下降, 这正是因为 PHC 间隙闭合造成的. PHC 损失电流从 300 ns 时刻开始急剧增大, 负载峰值电流时刻损失

电流约 4 MA, 在 355 ns 时刻到达最大值, 约 6.5 MA.

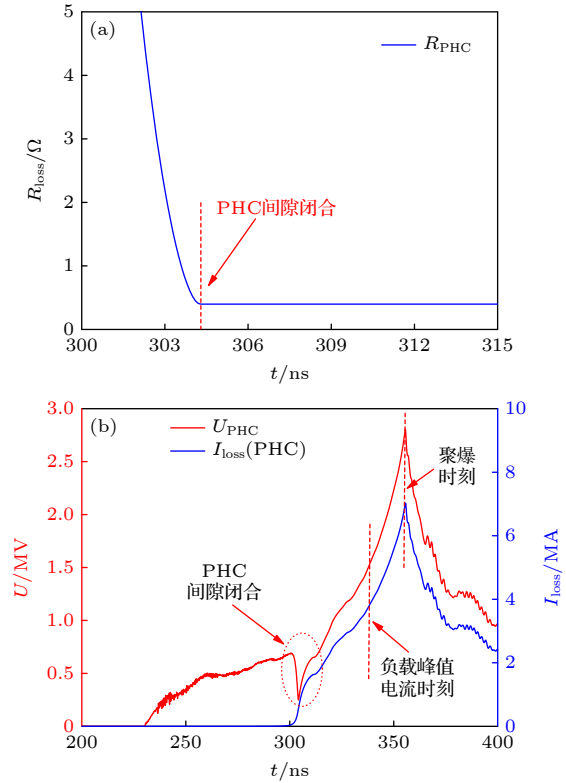


图 7 汇流柱电参数 (a) 等效损失电阻; (b) 汇流柱电压及损失电流对比  
Fig. 7. Electrical parameters of the PHC: (a) The loss resistance; (b) comparison of the voltage and the loss current of the PHC.

### 4.3 内层 MITL 电流损失

内 MITL 电流损失如图 8 所示, 在脉冲起始阶段因为  $H^+$  荷质比小,  $H^+$  离子损失电流比  $O^{2+}$  离子大, 随着脉冲电流增大,  $H^+$  被磁绝缘, 而  $O^{2+}$  继续向阴极运动. 内 MITL 电流损失集中在 350 ns

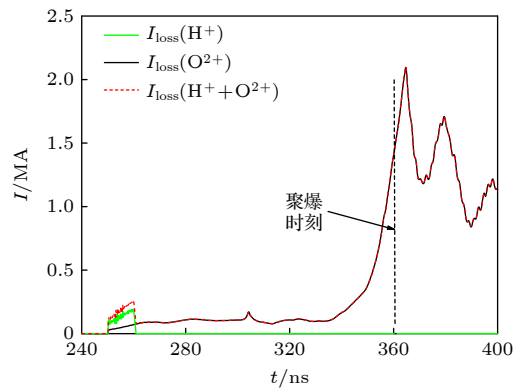


图 8 内 MITL 电流损失  
Fig. 8. The current loss in the inner-MITL region.

以后, 约在 365 ns 时刻达到峰值 2.1 MA. 这主要是由于负载等效阻抗的上升造成内 MITL 阳极电压增大所致.

#### 4.4 不同位置电流损失对比

中心汇流区不同位置损失电流对比如图 9 所示. 外 MITL 鞘层电子流损失相对较小. PHC 和内 MITL 电流损失很大. 由于 PHC 区域等离子体运动速度快 (21 cm/ $\mu$ s), 间隙闭合时间早, PHC 电流损失起始时间早, 幅值大, 对负载电流峰值影响大, 内 MITL 损失电流集中在聚爆时刻附近.

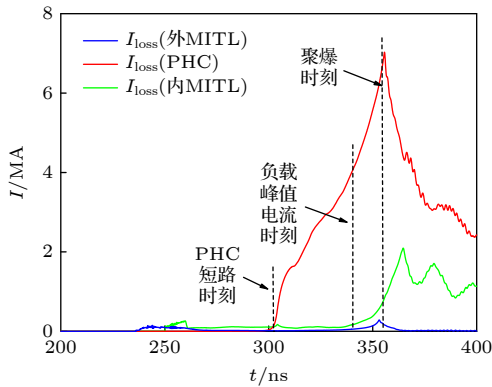


图 9 中心汇流区典型位置电流损失对比  
Fig. 9. Comparison of the loss current in the typical locations of the central converge region.

15 MA 装置中心汇流区 3 个典型位置 (绝缘堆、PHC 下游和负载) 电流对比如图 10 所示. 绝缘堆峰值电流约 18 MA, 汇流柱下游电流约 14 MA. 在电流起始阶段, 绝缘堆和汇流柱下游电流存在微小差异, 主要原因有两点: 一是由于磁绝缘建立过程中存在空间电荷限制流损失; 二是由于 4 层

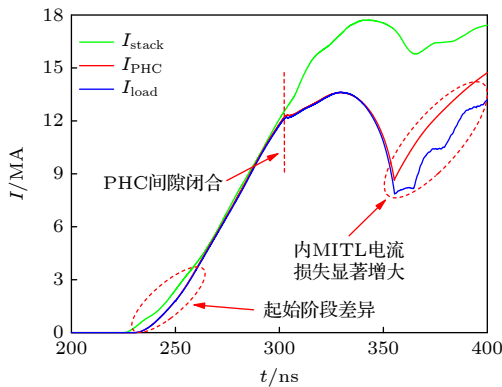


图 10 中心汇流区典型位置电流对比  
Fig. 10. Comparison of the current in the typical locations of the central converge region.

MITL 长度存在差别. 在 304 ns 时刻, PHC 间隙闭合, 绝缘堆电流与 PHC 下游电流出现明显差异. 从 355 ns 时刻开始, 内 MITL 电流损失显著增大, PHC 下游电流与负载电流出现差异.

#### 5 结论

本文采用 TL-code 电路编码方法, 建立 15 MA Z 箍缩装置真空汇流区的全电路模型, 获得了外 MITL, PHC 和内 MITL 三个区域电流损失特性.

1) 外 MITL 磁绝缘形成过程的空间电荷电流损失持续时间约 30 ns, 且出现在负载电流起始阶段, 对负载电流影响很小. 进入稳态磁绝缘后, 外 MITL 恒阻抗末端 (恒间隙始端) 的真空鞘层电子流最大, 并沿功率传输方向逐渐减小. 真空鞘层电子流在负载聚爆时刻达到峰值, 15 MA 装置 4 层 MITL 末端真空鞘层电子流损失约 300 kA.

2) PHC 区域电流损失在电极间隙闭合后快速增大, 在负载电流峰值时刻约 4 MA. 内 MITL 区域存在阳离子流损失, 内 MITL 电流损失在负载电流峰值时刻之后, 损失电流约为 2.1 MA.

3) 15 MA 装置 4 层绝缘堆电流峰值约 18 MA, 绝缘堆最高电压 2.3 MV, 驱动丝阵负载时, 负载峰值电流约 13.5 MA.

#### 参考文献

- [1] Stygar W A, Corcoran P A, Ives H C, Spieman R B, Douglas J W, Whitney B A, Mostrom M A, Wagoner T C, Speas C S, Gilliland T L, Allshouse G A, Clark R E, Donovan G L, Hughes T P, Humphreys D R, Jaramillo D M, Johnson M F, Kellogg J W, Leeper R J, Long F W, Martin T H, Mulville T D, Pelock M D, Peyton B P, Poukey J W, Smith J W, Van De Valde D M, Wavrik R W 2009 *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **12** 120401
- [2] Hutsel B T, Corcoran P A, Cuneo M E, Gomez M R, Hess M H, Hinshelwood D D, Jennings C A, Laity G R, Lamppa D C, McBride R D, Moore J K, Myers A, Rose D V, Slutz S A, Stygar W A, Waisman E M, Welch D R, Whitney B A 2018 *Phys. Rev. Accel. Beams* **21** 030401
- [3] Spielman R B, Froula D H, Brent G, Campbell E M, Reisman D B, Savage M E, Shoup III M J, Stygar W A, Wisher M L 2017 *Matter Radiat. Extremes* **5** 204
- [4] Spielman R B, Reisman D B 2019 *Matter Radiat. Extremes* **4** 027402
- [5] Song S Y, Wang W D, Cao W B, Lin Q W, Feng X H, Sun C W 2004 *High Power Laser and Partical Beams* **16** 800 (in Chinese) [宋盛义, 王文斗, 曹文彬, 林其文, 冯晓晖, 孙承伟 2004 强激光与粒子束 **16** 800]
- [6] Hu Y X, Qiu A C, Wang L P, Huang T, Cong P T, Zhang X J, Li Y, Zeng Z Z, Sun T P, Lei T S, Wu H Y, Guo N, Han J

- J 2011 *Plasma Sci. Technol* **13** 631
- [7] Zou W K, Guo F, Chen L, Song S Y, Wang M, Xie W P, Deng J J 2014 *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **17** 110401
- [8] Zou W K, Guo F, Wang G L, Chen L, Wei B, Song S Y 2015 *High Volat. Engineer.* **41** 1844 (in Chinese) [邹文康, 郭帆, 王贵林, 陈林, 卫兵, 宋盛义 2015 高电压技术 **41** 1844]
- [9] Xue C, Ding N, Sun S K, Xiao D L, Zhang Y, Huang J, Ning C, Su X J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 125207 (in Chinese) [薛创, 丁宁, 孙顺凯, 肖德龙, 张杨, 黄俊, 宁成, 束小建 2014 物理学报 **63** 125207]
- [10] Xue C, Ding N, Zhang Y, Xiao D L, Sun S K, Ning C, Su X J 2016 *High power laser and Partical Beams* **28** 015014 (in Chinese) [薛创, 丁宁, 张杨, 肖德龙, 孙顺凯, 宁成, 束小建 2016 强激光与粒子束 **28** 015014]
- [11] Mao C Y, Xue C, Xiao D L, Ding N 2020 *High power laser and Partical Beams* **32** 025004 (in Chinese) [毛重阳, 薛创, 肖德龙, 丁宁 2020 强激光与粒子束 **32** 025004]
- [12] VanDevender J P, Stinnett R W, Anderson R J 1981 *Appl. Phys. Lett.* **38** 229
- [13] Stinnett R W, Stanley T 1982 *J. Appl. Phys.* **53** 3819
- [14] Stinnett R W, Palmer M, Spielman R B 1983 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **11** 216
- [15] Presura R, Bauer B S, Esaulov A, Fuelling S, Ivanov V, Le Galloudec N, Makhin V, Siemon R E, Sotnikov V I, Wirtz R, Astanovitskiy A, Batie S, Faretto H, Le Galloudec B, Oxner A, Angelova M, Laca P, Guzzetta S, Keely S, Rogowski S 2003 *IEEE Pulsed power conference*, Dallas, Texas, June 15–18, 2003 p859
- [16] Ivanov V V, Laca P J, Bauer B S, Presura R, Sotnikov V I, Astanovitskiy A L, Galloudec B L, Glassman J, Wirtz R A 2004 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **32** 1843
- [17] Bakshaev Y L, Bartov A V, Blinov P I, Chernenko A S, Dan'ko S A, Kalinin Y G, Kingsep A S, Korolev V D, Mizhiritskii V I, Smirnov V P, Shashkov A Y, Satorov A Y, Tkachenko S I 2007 *Plasma Phys. Rep.* **33** 259
- [18] Rose D V, Welch D R, Hughes T P, Clark R E 2008 *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **11** 060401
- [19] Madrid E A, Rose D V, Welch D R, Clark R E, Mostrom C B, Stygar W A, Cuneo M E, Gomez M R, Hughes T P, Pointon T D, Seidel D B 2013 *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **16** 120401
- [20] Rose D V, Madrid E A, Welch D R, Clark R E, Mostrom C B, Stygar W A, Cuneo M E 2015 *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **18** 030402
- [21] Gomez M R, Gilgenbach R M, Cuneo M E, Jennings C A, McBride R D, Waisman E M, Hutsel B T, Stygar W A, Rose D V, Maron Y 2017 *Phys. Rev. Accel. Beams* **20** 010401
- [22] Waisman E M, Desjarlais M P, Cuneo M E 2019 *Phys. Rev. Accel. Beams* **22** 030402
- [23] Jennings C A, Chittenden J P, Cuneo M E, Stygar W A, Ampleford D J, Waisman E M, Jones M, Savage M E, LeChien K R, Wagoner T C 2010 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **38** 529
- [24] Bennett N, Welch D R, Jennings C A, Yu E, Hess M H, Hutsel B T, Laity G, Moore J K, Rose D V, Peterson K, Cuneo M E 2019 *Phys. Rev. Accel. Beams* **22** 120401
- [25] Rose D V, Waisman E M, Desjarlais M P, Cuneo M E, Hutsel B T, Welch D R, Bennett N, Laity G R 2020 *Phys. Rev. Accel. Beams* **23** 080401
- [26] Bennett N, Welch D R, Laity G, Rose D V, Cuneo M E 2021 *Phys. Rev. Accel. Beams* **24** 060401
- [27] Samokhin A A 2010 *Plasma Phys. Rep.* **36** 149
- [28] Otttinger P F, Schumer J W, Allen R J, Commisso R J 2003 *IEEE Pulsed power conference*, Dallas, Texas, June 15–18, 2003 p849
- [29] Stygar W A, Wagoner T C, Ives H C, Corcoran P A, Cuneo M E, Douglas J W, Gilliland T L, Mazarakis M G, Ramirez J J, Seamen J F, Seidel D B, Spielman R B 2006 *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **9** 090401
- [30] Pointon T D, Savage M E 2005 *IEEE Pulsed Power Conference*, Monterey, California, June 13–17, 2005 p151
- [31] Stygar W A, Rosenthal S E, Ives H C, Wagoner T C, Allshouse G O, Androlewicz K E, Donovan G L, Fehl D L, Frese M H, Gilliland T L, Johnson M F, Mills J A, Reisman D B, Reynolds P G, Speas C S, Spielman R B, Struve K W, Toor A, Waisman E M 2008 *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **11** 120401
- [32] Stygar W A, Awe T J, Bailey J E, Bennett N L, Breden E W, Campbell E M, Clark R E, Cooper R A, Cuneo M E, Ennis J B, Fehl D L, Genoni T C, Gomez M R, Greiser G W, Gruner F R, Herrmann M C, Hutsel B T, Jennings C A, Jobe D O, Jones B M, Jones M C, Jones P A, Knapp P F, Lash J S, LeChien K R, Leckbee J J, Leeper R J, Lewis S A, Long F W, Lucero D J, Madrid E A, Martin M R, Matzen M K, Mazarakis M G, McBride R D, McKee G R, Miller C L, Moore J K, Mostrom C B, Mulville T D, Peterson K J, Porter J L, Reisman D B, Rochau G A, Rochau G E, Rose D V, Rovang D C, Savage M E, Sceiford M E, Schmit P F, Schneider R F, Schwarz J, Sefkow A B, Sinars D B, Slutz S A, Spielman R B, Stoltzfus B S, Thoma C, Vesey R A, Wakeland P E, Welch D R, Wisher M L, Woodworth J R 2015 *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **18** 110401
- [33] Cuneo M E 1999 *IEEE Trans. Dielectrics Electrical Insul.* **6** 469
- [34] Bloomberg H W, Lampe M, Colombant D G 1980 *J. Appl. Phys.* **51** 5277
- [35] Zou W K, Chen L, Zhou L J, Wang M, Yang L B, Xie W P, Deng J J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 115204 (in Chinese) [邹文康, 陈林, 周良骥, 王勳, 杨礼兵, 谢卫平, 邓建军 2011 物理学报 **60** 115204]

# Circuit simulation of current loss in magnetically insulated transmission line system in 15- MA Z-pinch driver<sup>\*</sup>

Gong Zhen-Zhou<sup>1)</sup> Wei Hao<sup>2)†</sup> Fan Si-Yuan<sup>1)</sup> Sun Feng-Ju<sup>2)</sup>  
 Wu Han-Yu<sup>2)</sup> Qiu Ai-Ci<sup>1)2)</sup>

1) (*State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Institute of Electrical and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

2) (*State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China*)

( Received 23 December 2021; revised manuscript received 19 January 2022 )

## Abstract

In this paper, a transmission line circuit model of a magnetically insulated transmission line(MITL) system is developed for a 15-MA Z-pinch driver. The current loss characteristics of multi-level MITL and the ion emission due to the expansion of anode and cathode plasma in the post hole vacuum convolute(PHC) and inner-MITL region are analyzed. The spatiotemporal distribution of current loss of the outer-MITL and ion current of the PHC and inner-MITL of the 15 MA driver are obtained. The results show that the first electron emission happens at the end of constant-impedance MITL and the beginning of constant-gap MITL, and the end of constant-gap MITL firstly achieves fully magnetic insulation. Electron emission occurs at the start of load current and its duration is about 30 ns, which is short for a single pulse and has little effect on the rising edge nor peak value of the load current. The waveform of the electron flow varying with time resembles a saddle shape, whose amplitude first goes up, then comes down, and increases again. The electron flow current decreases from upstream to downstream in constant-gap MITL in space. The starting time of the loss current of the PHC is synchronized with the gap closing time. The loss current amplitude increases rapidly, reaching 4 MA at the peak load current time and 6.5 MA in the end. In the inner-MITL region, the main positive ion species are protons and oxygen 2+. At the beginning, the ion loss current of protons is larger than that of oxygen 2+, and then the protons are quickly magnetically insulated due to the small charge-to-mass ratio. The ion loss current of the inner-MITL region mainly increases after the peak load current time, and its peak value is 2.1 MA. Given the input conditions, the stack is going to deliver current of about 18 MA, the hold voltage is about 2.3 MV, and the peak load current is about 13.5 MA.

**Keywords:** magnetically insulated transmission line, TL-code, electron sheath current, ion current

**PACS:** 52.59.Qy, 52.58.Lq, 84.70.+p

**DOI:** 10.7498/aps.71.20212378

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51790524, 11975186).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [weihaoyy@sina.com](mailto:weihaoyy@sina.com)