

文章编号: 1001-4322(2008)03-0487-05

脉冲功率传输线磁绝缘的建立与特性分析*

晋向旻, 邹 军, 顿月芹, 袁建生

(清华大学 电机系, 北京 100084)

摘 要: 分析了脉冲功率传输线建立磁绝缘的暂态过程,对暂态过程中传输线的击穿与磁绝缘关系、电子的分布规律及其与建立磁绝缘的关系进行了阐述。分析了磁绝缘传输线电极间的电子分布改变传输线工作阻抗值的现象,给出了传输线稳态工作阻抗的求解方法和用稳态工作阻抗计算传输线暂态工作阻抗的方法。研究了截面尺寸变化时传输线中电子的分布和电磁波传播的折反射情况。结果表明:传输线在建立磁绝缘的过程中损失电子是必然的,损失电子是建立磁绝缘的必要条件。截面半径沿轴向变化时,其工作特性与极间距的变化有关。极间距增大时,后半段的电子电流增大,使其工作阻抗增大并与前半段相等,因而在尺寸变化处不产生反射波。极间距减小时,由于后半段提前产生损失电子,因而尺寸变化处产生反射波。

关键词: 脉冲功率; 磁绝缘传输线; 暂态过程; 工作阻抗

中图分类号: TL503 **文献标识码:** A

研究与设计磁绝缘传输线(MITL)是开发研制大功率脉冲系统的关键问题之一^[1]。目前,MITL 技术的研究内容主要包括用解析法求解 MITL 稳定状态时的工作特性^[2-3]和用等效电路或数值方法模拟 MITL 建立磁绝缘的暂态过程^[4-6]。在研究 MITL 的稳态模型和等效电路模型时,分析和研究 MITL 的磁绝缘特性和磁绝缘建立过程是建立计算模型的基础。但是,目前对 MITL 磁绝缘建立的物理机理,尤其是分析截面半径沿轴向变化的 MITL 的磁绝缘特性的研究工作尚不多见。为此,本文从物理本质出发,阐述了 MITL 从阴极发射电子到传输线击穿再到建立磁绝缘的动态过程,并研究了截面半径的变化对 MITL 磁绝缘建立过程的影响。

1 MITL 的磁绝缘建立过程

1.1 初始阶段传输线被击穿现象

与一般的真空传输线相同,当脉冲功率加载到 MITL 上后,传输线的极板上产生电荷,在电极之间建立电磁场,使能量以电磁波的形式传播。当 MITL 阴极表面的电场强度大于导体发射电子的阈值时,阴极开始发射电子。在电子发射的初始阶段,MITL 的电流是由其真空波阻抗决定的,电流产生的磁场作用在极间电子上,总是无法阻止其在电场力的作用下从阴极移动到阳极,因此必然造成传输线击穿。损失电子阶段的极间电子分布如图 1 所示。图中的 MITL 是同轴圆柱形结构,下边线为阴极,上边线为阳极。从电子的分布图看出,极间电子并不是沿电场(即半径)方向运动,而是在轴向发生一定的偏转。这是由于电子上也受到磁场力作用,并且力的方向总与电子的运动方向垂直。



Fig. 1 Distribution of losing electrons between electrodes

图 1 损失电子阶段的极间电子分布

1.2 损失电子对磁绝缘的贡献

当发射电子损失到阳极后,电子电流和极间的位移电流一起与传导电流形成回路。电子从阴极运动到阳极,相当于在极板之间并联了电阻,使传输线的等效阻抗减小,因而相同激励电压产生的传导电流一般大于真空传输线的电流。因此,损失电子后面(MITL 首端)区域的磁场强度大于真空磁场。同时,随着电磁波在传输线中向前传播,传导电流的长度增大,其在 MITL 首端区域产生的磁场随之增加,使电子受到的磁场力也增大。当损失电子增大到一定值,传导电流的长度增大到一定长度时,MITL 首端区域的极间电子受到的磁场力使其回旋半径小于极间距,电子将不再损失到阳极,从而产生磁绝缘现象。

* 收稿日期:2007-11-05; 修订日期:2008-01-09

基金项目:国家自然科学基金资助课题(50677028);高等学校博士点专项科研基金资助课题(20050003007)

作者简介:晋向旻(1979—),女,河北人,博士研究生,主要从事脉冲功率传输线的研究;jinxiang-02@mails. tsinghua. edu. cn.

通讯作者:袁建生,教授,yuan@mail. tsinghua. edu. cn.

损失电子随脉冲功率一起向 MITL 末端传播。当损失电子离开末端,也就是磁绝缘区域发展到末端时,MITL 会形成全线磁绝缘状态。如果此时所加载的脉冲幅值不变,且负载严格匹配,则 MITL 达到磁绝缘线的稳态阶段,电子的分布状态如图 2 所示。

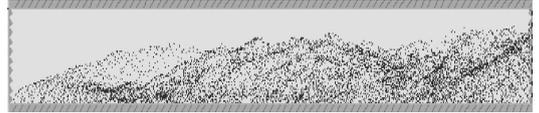


Fig. 2 Distribution of magnetically insulated electrons

图 2 MITL 全线磁绝缘的极间电子分布

1.3 极间电子对磁绝缘的贡献

当 MITL 建立磁绝缘后,电子不再损失到阳极。但是,阴极的电场强度仍大于发射电子的阈值,因而仍有电子从阴极发射。同时,磁场力的作用使电子作回旋运动,电子在阴极附近形成电子层。电子所带的负电荷会使阴极表面的电场减小,使稳定状态下的阴极表面电场维持一个定值。磁绝缘时 MITL 阴极表面的电场基本维持在发射电场的阈值。

2 极间电子对 MITL 工作阻抗的影响

为了使输入脉冲不反射,从而高效地加载到负载上,工程设计时,MITL 的阻抗尽量保证与负载阻抗匹配。但是,由于极间有电子存在,MITL 的工作阻抗不等于其几何特征阻抗。

2.1 电子对工作阻抗的影响

一般真空传输线的阻抗由其几何尺寸决定。同轴电缆的几何特征阻抗为

$$Z_0 = \frac{\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \ln\left(\frac{r_a}{r_c}\right)}{2\pi} \quad (1)$$

式中: ϵ_0 和 μ_0 分别为真空介电常数和真空磁导率; r_a 和 r_c 分别是阳极和阴极的半径。

MITL 工作时,阴极附近存在一个电子层。该电子层的效果是使 MITL 的阻抗减小,其原因可以认为是电子层的存在使 MITL 的阴极半径有所增加。但是,由于极间电子的分布受脉冲波形和传输线尺寸的影响,使电子的分布较复杂,并且在过渡过程中随时间变化。因此,很难准确地求解 MITL 的暂态工作阻抗。但是,MITL 在负载阻抗匹配时,其工作状态总是趋向于单位长度传输能量最小的磁绝缘稳定状态^[7]。因此,在 MITL 的暂态工作阻抗很难准确求解时,可以用稳态工作阻抗近似代替暂态工作阻抗。

2.2 MITL 的稳态工作阻抗计算

MITL 的磁绝缘稳态是指 MITL 全线都已建立磁绝缘,并且电压、电流、极间的电磁场和电子的分布都不随时间变化的稳定状态。一般地,当加载到 MITL 区域的脉冲是其峰值阶段,可认为该区域达到了磁绝缘稳态。磁绝缘稳态的总(阳极)电流等于层流稳态模型给出的总电流的最小值^[7],即

$$I_1 = I_0 g \gamma_1^3 \ln[\gamma_1 + (\gamma_1^2 - 1)^{1/2}] \quad (2)$$

式中: $I_0 = 2\pi m_0 c / \mu_0 e \approx 8500$ A,这里 m_0 , e 和 c 分别是极间电子的静止质量、电子带电量 and 真空光速; g 是 MITL 的几何因子,同轴圆柱传输线 $g = \ln^{-1}(r_a/r_c)$; γ_1 是电子层边界电压 V_1 的标么值,与 V_1 的关系式为

$$\gamma_1 = 1 + eV_1/m_0c^2 \quad (3)$$

γ_1 与阳极电压 V_a 的标么值 γ_a 满足关系式

$$\gamma_a = \gamma_1 + (\gamma_1^2 - 1)^{3/2} \ln[\gamma_1 + (\gamma_1^2 - 1)^{1/2}] \quad (4)$$

因此,已知 MITL 的磁绝缘稳态阳极电压 V_a ,可依据式(4)求解电子层边界电压的标么值 γ_1 。MITL 的磁绝缘稳态工作阻抗等于稳态的阳极电压与总(阳极)电流之比

$$Z_{ef} = \frac{V_a}{I_1} = \frac{(\gamma_a - 1)m_0c^2}{I_1 e} = Z_0 \left\{ \frac{(\gamma_a - 1)}{\gamma_1^3 \ln[\gamma_1 + (\gamma_1^2 - 1)^{1/2}]} \right\} \quad (5)$$

在工程设计中,用稳态阻抗代替暂态工作阻抗,从而求解出 MITL 的几何特征阻抗,设计其几何尺寸。

3 截面半径变化的 MITL 磁绝缘特性

在实际的脉冲功率系统中,MITL 为了与首端的功率发生器和末端负载的尺寸匹配,当首端与末端阻抗不相等时,需要采用变阻抗的 MITL,即传输线的截面几何尺寸沿轴向变化。另外,为了适应小尺寸的负载,MITL 末端的尺寸应该很小。如在金属丝阵内爆的实验中,MITL 的阳极半径要沿轴向减小。由于截面尺寸变化的 MITL 中会有电磁波的折射和反射,会影响 MITL 的磁绝缘特性,因此,需要特别分析变尺寸 MITL 的

磁绝缘特性。分析时,利用了粒子模拟数值方法^[8]计算。为了简化仿真计算,设 MITL 为轴对称的几何结构,并且由两个同轴圆筒连接而成,也就是说,在尺寸变化的前端和后端区域,MITL 的极间距保持恒定。对于截面尺寸连续变化的情况,仿真时可通过令每段圆筒的轴向长度较短、半径变化较少的多段组合来实现。

3.1 截面尺寸减小的 MITL 磁绝缘特性

仿真的 MITL 前后两段是各长 50 cm 的同轴圆筒,阴极半径固定为 3 cm,前半段的阳极半径为 6 cm,后半段为 5 cm。加载的脉冲是上升沿脉宽 10 ns、峰值电压 1 MV 的阶跃电压波。分别取轴向坐标为 5 和 75 cm 处的电压、电流和功率的时变曲线,如图 3 所示。由于脉冲功率在 MITL 中产生损失电子,因而图中的电压和电流曲线的上升沿都有畸变^[9]。此外,前半段的曲线峰值在某时刻发生明显的变化,即电压值减小、电流值增大,曲线最终都达到稳态,且前半段曲线的稳态值都与后半段相等。观察前半段的曲线峰值发生改变的时刻,并观察该时刻极间电子的分布得到:当前半段的损失电子全部运动到后半段,并与后半段的损失电子合并时,尺寸变化处开始产生反射波。反射波使前半段的电压开始减小、电流开始增大。

分析电压和电流曲线变化的原因:当脉冲的真空波头^[9]传播到尺寸变化处时,由于后半段的阻抗与前半段不匹配,在尺寸变化处会产生电磁波的反射。一般地,当入射波的真空波头发生反射时,脉冲在前半段产生的电子还没有传播到尺寸变化处;并且,由于后半段的极间距小于前半段,其发射电子的阈值小于前半段,因而脉冲的真空波头传播到后半段,会产生极间电子。也就是说,当前半段的电子还没有传播到后半段时,后半段就开始发射电子。图 4 所示是此时极间电子的分布。反射波会使前半段的电压减小、电流增大。当反射波传播到前半段的损失电子处,由于损失电子相当于在传输线的电极间连接了电阻,因而反射波在损失电子处产生的电压和电流需要重新满足该处的电压和电流关系,可看作是反射波经过损失电子后,其产生的影响被损失电子“稀释”。因此,当前半段中还有电子损失时(即前半段未全线磁绝缘),反射波对前半段的影响不明显。

当前半段的损失电子传播到后半段,由于尺寸变化处有轴向电场分量,使电子产生指向阴极的运动分量,如图 5 所示。部分极间电子在轴向电场的作用下将会返回阴极,使极间的电子电流减小。此外,脉冲的真空波头在后半段已经产生了极间电子。当前半段的极间电子与后半段的合并后,后半段的总电子电流使后半段的工作阻抗小于前半段。因此,脉冲在尺寸变化处仍然产生反射波。此时,前半段已经没有损失电子“稀释”反射波。反射波开始使前半段的电压减小、电流增大,造成电压和电流的峰值明显改变。

由于脉冲在 MITL 的尺寸变化处产生反射波,将使输入功率部分返回传输线前半段而无法加载到负载上,造成传输能量减小。图 6 所示是前后半段的功率曲线。可以看到,当前半段的损失电子与后半段合并后,前半段的脉冲功率受反射波的影响开始减小,使后半段的功率值小于前半段。

3.2 截面半径增大的 MITL 磁绝缘特性

仿真计算截面尺寸增大的 MITL 的工作特性时,也令 MITL 由两段各长 50 cm 的同轴圆筒连接而成。阴

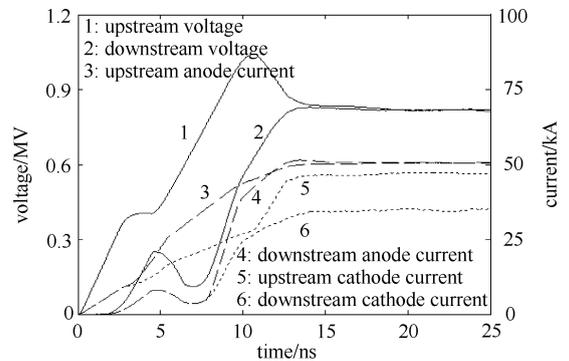


Fig. 3 Upstream and downstream voltages and currents in decreasing-radius MITL

图 3 截面半径减小的 MITL 前后段电压和电流曲线

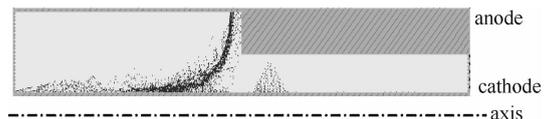


Fig. 4 Emitting electrons in downstream of decreasing-radius MITL

图 4 截面半径减小的 MITL 后半段电子发射示意图

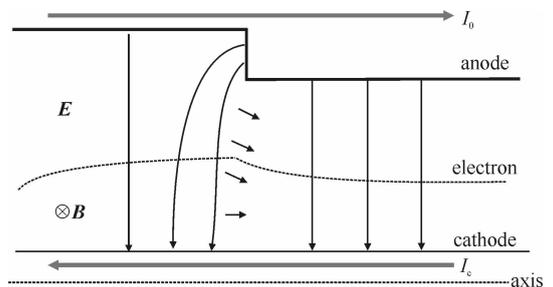


Fig. 5 Electron distribution and electromagnetic fields in decreasing-radius MITL

图 5 截面半径减小的 MITL 的电磁场和电子受力示意图

极半径固定为 3 cm, 前后段的阳极半径分别为 6 和 5 cm。加载的阶跃电压波与尺寸减小的 MITL 的相同。同样, 观察轴向坐标 5 和 75 cm 处的阳极电压、阳极和阴极电流的时变值, 如图 7 所示。

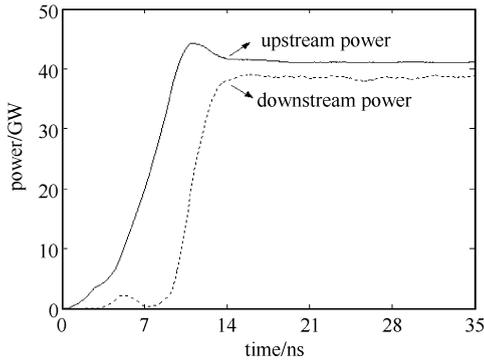


Fig. 6 Upstream and downstream powers in decreasing-radius MITL

图 6 截面半径减小的 MITL 前后段功率曲线

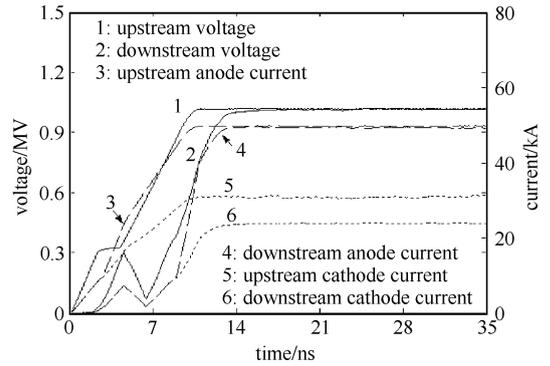


Fig. 7 Upstream and downstream voltages and currents in increasing-radius MITL

图 7 截面半径增大的 MITL 前后段电压和电流曲线

与尺寸减小的情况相似, 前半段的电压和电流曲线在上升沿也有畸变。当前半段的损失电子没有完全传播到后半段时, 反射波也会被前半段的损失电子“吸收”, 使前半段的电压和电流没有明显的变化。与尺寸减小的情况不同的是, 前半段的电压和电流曲线的峰值都没有变化, 阳极电压和阳极电流的峰值与后半段相等, 而阴极电流恒小于后半段。

分析曲线峰值不变的原因: 极间电子传播到后半段时, 由于半径增大处有轴向电场分量, 使原来电子产生指向阳极的运动分量, 如图 8 所示。因而, 部分前半段已经磁绝缘的电子运动到后半段后会损失到阳极, 并且电子在后半段的回旋半径会增大。因此, 后半段的阴极表面电场无法维持在阈值场强, 阴极将会发射更多电子, 从而后半段的阴极电流小于前半段, 极间的电子电流大于前半段。由于极间电子电流越大时, MITL 的工作阻抗越小。虽然后半段的几何特征阻抗大于前半段, 但是由于其极间的电子电流较大, 电子的回旋半径也较大, 因而使后半段的工作阻抗减小, 并最终与前半段相等。因此, 当前半段的损失电子传播到后半段时, 由于后半段的工作阻抗与前半段相等, 使脉冲电磁波在尺寸变化处不产生反射波, 因而使前半段的曲线峰值不变。

虽然, 脉冲功率在截面尺寸增大的 MITL 中没有明显的反射波, 但由于脉冲功率在后半段产生的发射电子较多, 使其极间电子电流和电子的总动能都增大, 导致传输的能量减小。由图 9 所示的前后段的功率曲线看到, 后半段的功率小于前半段。因此, 截面尺寸增大的 MITL 也使传输的脉冲功率减小。

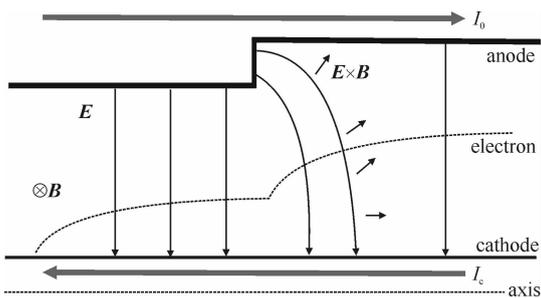


Fig. 8 Electron distribution and electromagnetic field in increasing-radius MITL

图 8 截面半径增大的 MITL 的电磁场和电子受力示意图

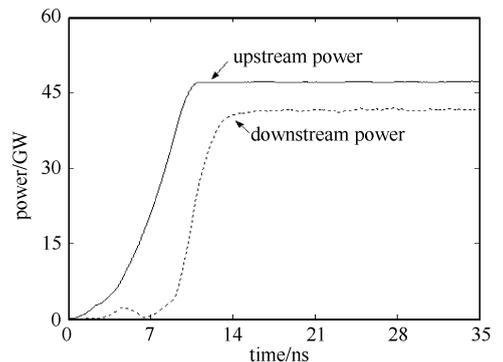


Fig. 9 Upstream and downstream powers of increasing-radius MITL

图 9 截面半径增大的 MITL 前后段功率曲线

4 结 论

脉冲功率传输线加载脉冲功率后要经历一个从损失到绝缘的过程。初始阶段, 阴极发射的电子总会损失到阳极。电子损失会增加电流和磁场强度, 空间电子还会减小阴极表面的电场, 就构成了建立和维持磁绝缘的两个因素。MITL 磁绝缘后, 阴极表面电场基本维持在发射电子的阈值。

MITL 极间的电子使其工作阻抗小于其几何特征阻抗。在工程设计时, 可采用磁绝缘稳态阻抗近似代替

工作阻抗值。

MITL 的截面尺寸沿轴向变化时,其工作特性与极间距的变化情况有关:极间距增大时,MITL 后半段的极间电子电流增大,使后半段的工作阻抗与前半段相等,因而在尺寸变化处不产生反射波;极间距减小时,由于后半段提前产生损失电子流,因而尺寸变化处会有反射波产生。

参考文献:

- [1] Shope S, Mazarakis M, Frost C, et al. Application of magnetically insulated transmission lines for high voltage electron beam accelerators [C]// Proc 9th Int Conf High Power Particle Beams. 1992: 492-498.
- [2] Creedon M. Relativistic Brillouin flow in the high diode[J]. *Journal of Applied Physics*, 1975, **46**(7):2946-2955.
- [3] Mendel C W, Rosenthal S. Dynamic modeling of magnetically insulated transmission line systems[J]. *Physics of Plasmas*, 1996, **3**(11): 4207-4219.
- [4] Hiraoka K, Nakajima M, Horioka K. Equivalent circuit modeling of space charge dominated magnetically insulated transmission lines[C]// Proc 11th Int Conf High Power Particle Beams. 1996: 1022-1025.
- [5] 宋盛义, 王文斗, 曹文彬, 等. 4 层圆盘锥形磁绝缘传输线的等效电路模型[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(4):800-804. (Song S Y, Wang W D, Cao W B, et al. Equivalent-circuit model for a four-level-coaxial-circular-cone-like magnetically insulated transmission line. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(4):800-804)
- [6] 宋盛义, 仇旭, 王文斗, 等. 磁绝缘传输线的有损线模型[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(5):746-750. (Song S Y, Qiu X, Wang W D, et al. Circuit model for magnetically insulated transmission line. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(5):746-750)
- [7] Wang M Y, Di Capua M S. Operating point of long magnetically insulated vacuum transmission lines[J]. *Journal of Applied Physics*, 1981, **51**(11):5610-5614.
- [8] Birdsall C K, Langdon A. Plasma physics via computer simulation[M]. Britain: Adam Hilger, 1991.
- [9] 晋向旻, 邹军, 袁建生. 脉冲功率传输线传输效率的分析与计算[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(1):343-348. (Jin X M, Zou J, Yuan J S. Analysis and calculation of transmission efficiency of magnetically insulated transmission lines. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(2):343-348)

Analysis of magnetic insulation and characteristics of pulsed power transmission lines

JIN Xiang-min, ZOU Jun, DUN Yue-qin, YUAN Jian-sheng

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The magnetic insulation establishment in a pulsed power transmission line has been analyzed. The analysis involves in the interaction and dependence between the breakdown of the transmission line and the magnetic insulation. It illustrates how the emission and the distribution patterns of the electrons contribute to the establishment of magnetic insulation. In addition, it shows how the distribution of electrons impacts the operating impedance of the transmission line. Based on the magnetic insulation steady-state models, an operating impedance calculation method is proposed using steady-state impedance to substitute the transient operating impedance. Through simulating transmission lines with varying radius, it is clarified that the regional operating impedances in different geometrical regions vary with the regional electron distributions. Finally, the change of the operating impedance of the magnetic insulation transmission lines with varying radius, its effects on the transmission characteristics of pulsed electromagnetic wave and the pulsed power are summarized.

Key words: Pulsed power; Magnetic insulation transmission lines; Transient process; Operating impedance