

文章编号: 1001-4322(2006)02-0341-04

不同 Z-箍缩负载磁绝缘传输线电流损失特性*

蔡红春¹, Chernenko A S², Korolev V D², Ustroev G I², Ivanov M I²

(1. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900; 2. Kurchatov Institute, Moscow 123182, Russia)

摘 要: 在装置“S-300”上, 通过测量真空磁绝缘传输线中电极间电子流韧致辐射和负载上的电流、电压等参数, 研究了磁绝缘传输线中的电流损失特性。实验中使用了阻抗特性不同的 3 种负载, 结果表明, 磁绝缘传输线中的电流损失特性显著地取决于负载。当负载为丝阵靶时, 电流损失出现在丝阵等离子体最大箍缩时刻, 且其值不超过负载总电流的 5%。

关键词: 磁绝缘传输线; 电流损失; 韧致辐射; X 射线

中图分类号: TL659 **文献标识码:** A

实现特征尺寸 1 mm 左右的热核氘靶的点火, 需要输入的能量超过 10 MJ, 功率高达 10^{14} W, 其增加速度为 $10^{21} \sim 10^{22}$ W/s^[1]。在过去 20 年间得益于脉冲功率技术的迅速发展, 在世界上建立了几个大型装置, 其目的是研究在丝阵靶快速箍缩稠密等离子体产生的 X 射线的辐射下, 氘靶发生热核聚变反应的可能性。其中最典型的是美国的“Saturn”^[2](3.3 MV, 7 MA, 45 ns)和“Z”装置^[3](3 MV, 20 MA, 110 ns), 俄罗斯的“Angara-5-1”^[4](1 MV, 4 MA, 70 ns)和“S-300”^[5](700 kV, 4 MA, 70 ns)。这些装置都是基于多路汇流设计, 主要由 Marx 发生器、中储、形成线、传输线和带有磁绝缘传输线的真空部分组成。Marx 发生器中的能量经过多级压缩后传到靶负载上, 因此电脉冲能量在这些环节中的传输效率就非常重要。

能量从各单个模块经绝缘堆沿磁绝缘传输线向靶传输(即能量在真空磁绝缘传输线中传输)是一个关键的环节。因此监测能量在此环节的传输效率是一项重要的课题。磁绝缘传输线中的电流损失是影响能量在磁绝缘传输线中传输效率的主要参数。通常测量电流是用 Rogowski 线圈或 B-dot。磁绝缘传输线多路汇流的复杂结构(见图 1)排除了使用 Rogowski 线圈的可能性, 同样这也限制了 B-dot 使用。因为每路形成线分成 4 路传输线, 然后各传输线经绝缘堆与磁绝缘传输线相连, 因此磁绝缘传输线中输入电流的准确测量只有通过同时测量 32 路(8 个模块, 每个 4 路)磁绝缘传输线入口电流, 然后把它们积分起来。这是一项非常复杂和艰巨的任务, 因此到目前为止在装置“S-300”上还没进行过。本文通过测量韧致辐射来研究磁绝缘传输线中的电流(即能量)损失。实验分析了装置“S-300”上在 3 种截然不同的负载条件下电流损失的特性。

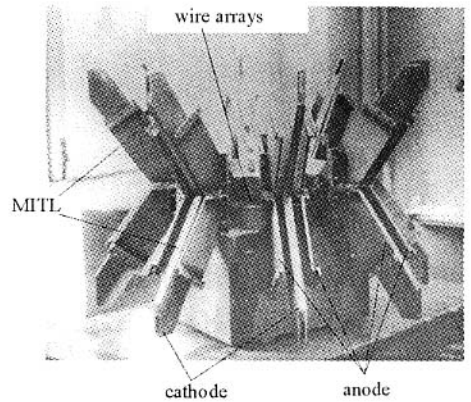


Fig. 1 MITL on installation “S-300”

图 1 装置“S-300”上的磁绝缘传输线

1 实验方法

大型脉冲功率装置可以在功率密度为 $10^{10} \sim 10^{12}$ W/cm², 功率 10^{14} W 的情形下向负载传输高达 10 MJ 的能量。在功率密度为 10^{10} W/cm² 或更高时, 真空传输线中的电场会超过阴极电子爆炸发射的阈值。在磁场作用下, 当电子拉莫尔半径小于电极间距时, 可以约束电极间的电子。当磁绝缘传输线中的电流小于保证磁绝缘传输线磁绝缘的最小电流时, 部分电子在电极间经过加速后会打在阳极上, 导致能量损失^[6-7]。这种能量的损失, 通常在脉冲电流前沿或后沿出现, 此时磁绝缘条件不满足。当存在这种能量损失时, 阴极加速电子打在阳极上会产生韧致辐射, 借助 X 射线探头可以记录此 X 射线。对此测量结果进行处理就可以计算磁绝缘传输线中的电流损失。

* 收稿日期 2005-03-23; 修订日期 2005-11-16
基金项目 俄罗斯基础研究基金资助课题(02-02-16840)
作者简介 蔡红春(1973—), 男, 博士, 主要从事 Z-pinch 物理实验研究, caihcx@yahoo.com.cn.

假定每一时刻电子能量对应于电极间加速电压值,认为在磁绝缘传输线中韧致辐射适用于厚靶模型。用带有不同滤片的半导体探头 SPPD2 来记录磁绝缘传输线中所产生的韧致辐射。探头的线性电流不小于 5 A,最大灵敏度 $2 \times 10^{-1} \text{ A} \cdot \text{cm}^2/\text{W}$,借助不同厚度和材料的滤片,此值可在两个数量级范围内变化,探头的时间分辨率为 8 ns。实验装置如图 2 所示。在靶区上方有 8 mm 厚的铅板,用来为消除丝阵靶箍缩时产生的辐射对探头测量结果的影响。探头前加有不同厚度的复合滤片和铅滤片。探头到磁绝缘传输线中心位置的距离为 105 cm,磁绝缘传输线直径为 80 cm,几乎相当,因此有必要考虑磁绝缘传输线复杂的形状对计算结果的影响。建立了模拟磁绝缘传输线作为韧致射线辐射源的 3 种模型,如图 3 所示。在第 1 种模型中,假设韧致辐射源为点源。在第 2 种模型中,认为韧致辐射源为一个圆盘。在第 3 种模型中,考虑磁绝缘传输线的多路汇流情况,假定韧致辐射是从圆盘中的 16 个径向条形区域产生。

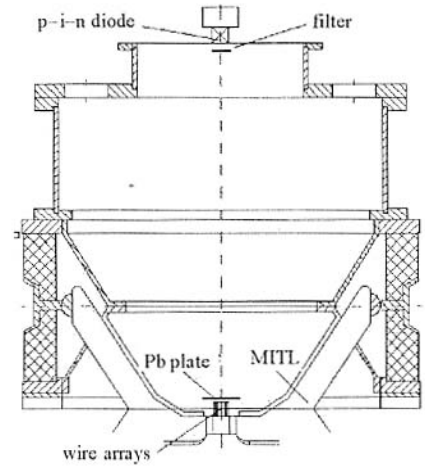


Fig. 2 Measuring bremsstrahlung in MITL

图 2 磁绝缘传输线韧致辐射测量图

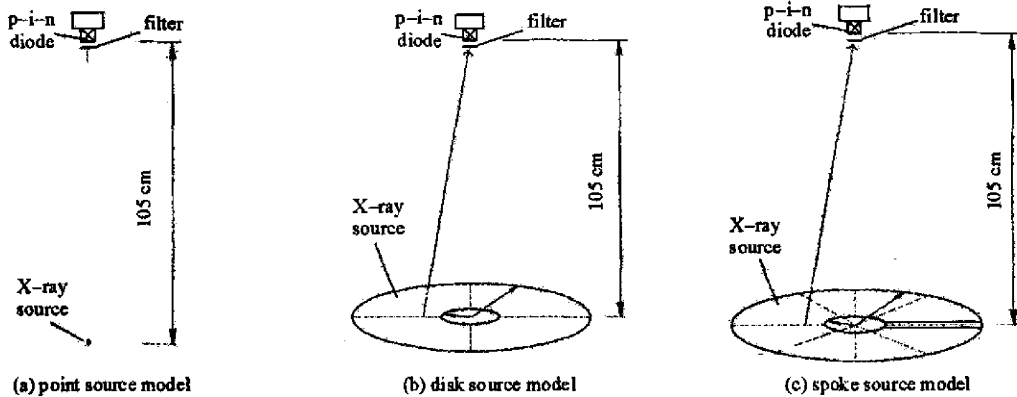


Fig. 3 Three models for calculating bremsstrahlung

图 3 韧致辐射 3 种计算模型

采用这 3 种模型的计算结果表明^[8],在韧致辐射各向同性的假设下,它们相差不大。本文选择较符合实际情形的第 3 种模型来计算。根据这种模型,探头电流与韧致辐射源功率之间的关系为

$$W_{\text{brem}} = \frac{\pi^2 I h (r_2^2 - r_1^2)}{4 S d (\arctan \frac{r_2}{h} - \arctan \frac{r_1}{h})} \quad (1)$$

式中: W_{brem} 是韧致辐射源功率; I 是探头电流; h 、 r_1 、 r_2 、 S 、 d 是磁绝缘传输线和探头的构形参数。根据电子流韧致辐射厚靶模型^[9],可以确定电子流电流(即磁绝缘传输线中的电流损失)

$$i = \frac{W_{\text{brem}}}{3 \times 10^{-6} E_e^{7/4} Z} \quad (2)$$

式中: i 是电子流电流; E_e 是电子能量; Z 是阳极材料核电荷数。我们假设在每一时刻电子能量是单能的^[10]。

2 实验结果

在真空磁绝缘传输线中电流损失的性质(电流脉冲的形状幅值及出现的时间)强烈地依赖于负载的类型。为了确定这些参数对各种类型负载的依赖性,在实验中,采用了 3 种不同特性的负载:直径为 12 mm 的多丝阵靶,其电感在箍缩过程中随时间变化,从 4~5 nH 增大到 7~9 nH;直径为 60 mm 的金属圆柱,其电感非常小,约为 1.5 nH;直径为 1.2 mm 的金属丝,其电感约为 40 nH。

在实验中,取决于负载,其电流在下列范围变化:1.2~3 MA,Marx 发生器总的储能为 200 kJ。

图 4(a)是负载为丝阵靶时,负载电流脉冲和 X 射线波形,滤片为厚度 100 μm 的铅。从图上可以看出 X 射线脉冲(对应于电子电流泄漏)有两个峰值,一个出现在电流前沿 50~60 ns 时刻,第 2 个在电流下降沿 140

~ 150 ns , 对应于负载电流上出现高频振荡时刻 , 即丝阵最大箍缩时 , 第 2 个峰值的强度远高于第 1 个。当滤片为 200 μm 厚度的铅时 , X 射线脉冲的形状发生了变化 , 结果如图 4 (b) 所示。在这种情况下 , 第 1 个峰值几乎消失 , 探头只记录到 140 ~ 160 ns 的第 2 个峰值。

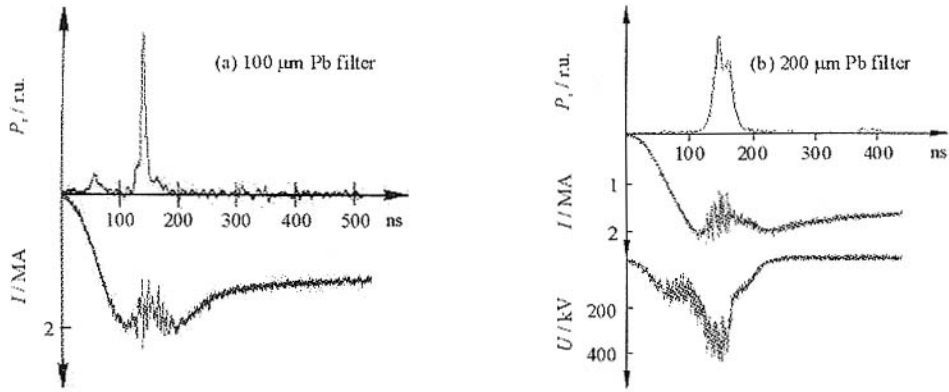


Fig. 4 Current , voltage and X-ray signals with wire arrays load

图 4 丝阵靶时电流 I 、电压 U 脉冲和 X 射线 P_r 波形

从 X 射线的测量结果及加不同滤片的探头频响特性 , 可以分析得出 , 在第 1 个峰值时刻 (50 ~ 60 ns) , X 射线能量小于 100 keV , 而在第 2 个峰值 , 辐射能量在 100 ~ 500 keV 范围内。由图 4 (b) 中的电压波形可以看出在 X 射线脉冲第 1 个峰值时刻 , 磁绝缘传输线电极间隙的电压约为 150 kV , 即电场强度 $E \geq 1.5 \times 10^5$ V/cm , 磁绝缘传输线电极间隙发生电子的爆炸发射。由于在 X 射线脉冲第一个峰值时刻 , 绝大部分辐射能量位于相对较软的区域 , 因此不能穿透较厚 (0.2 mm) 的铅滤片。

图 5 是负载为金属圆柱即短路放电时 , 实验所得电流电压和 X 射线脉冲波形 , 滤片为厚度 200 μm 的铝。从图上可以看出 X 射线脉冲峰值 , 出现在电流的前沿和后沿 , 在相应时刻 , 电压也达到极大值 , 并且具有不同的极性。

图 6 是负载为高阻抗金属丝时的实验结果 , 滤片为厚度 200 μm 的铅。在这种情形下 , X 射线脉冲波形截然不同 , 电流损失只出现在电流前沿 , 且对应其幅值时刻 , 电压也达到最大值。

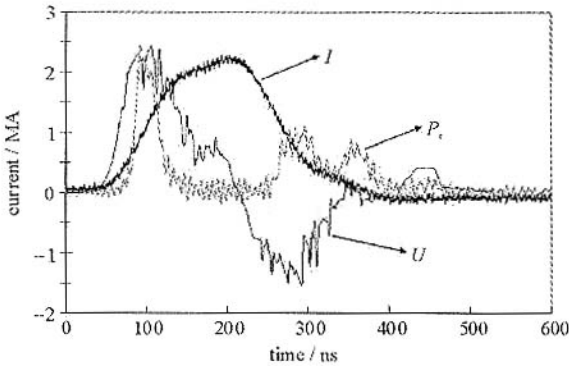


Fig. 5 Current , voltage and X-ray signals with low inductance load

图 5 低感抗负载时电流 I 、电压脉冲 U 和 X 射线 P_r 波形

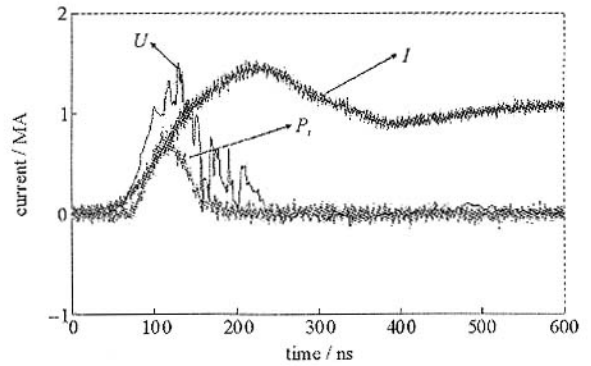


Fig. 6 Current , voltage and X-ray signals with high inductance load

图 6 高感抗负载时电流 I 、电压脉冲 U 和 X 射线 P_r 波形

3 讨论

根据磁绝缘传输线理论^[6-7] , 磁绝缘传输线中的最小电流值为

$$I_{\min} = 8.5 \times 10^3 G \gamma \ln [\gamma + (\gamma^2 - 1)^{1/2}] \quad (3)$$

式中 G 是取决于传输线结构的几何系数 , γ 为相对论因子。

在电流前沿 , 当磁绝缘传输线中的电流 I_1 小于最小电流值 I_{\min} 时 , 磁绝缘条件不满足。因此在丝阵靶负载实验时出现的第一个 X 射线脉冲峰值可以这样解释 : 在起始阶段 , 真空磁绝缘传输线中的电流增大 , 同时电压也在增大 , 但电极间电场强度较小 , 不至于导致电子的爆炸发射。随着电压的进一步增加 , 电极间电场达到爆炸发射阈值。当磁绝缘传输线中的电流小于最小电流值 I_{\min} 时 , 磁绝缘条件不满足 , 从阴极发射的电子打在阳极 , 这导致以韧致辐射形式出现的能量损失。第一个峰值时刻辐射光子的能量 , 根据滤片法得出在 20 ~ 100

keV 范围内,由电阻分压器所测得的电压值与此能量相符合。

随着电流的进一步增加,在某个时刻超过保证磁绝缘的最小电流值,磁绝缘起作用,电子流形式的电流损失受到抑制。到丝阵等离子体箍缩时,负载电感急剧增加,这导致电流下降,电压急剧增加。此时磁绝缘条件不满足,电极间又出现电子流形式的能量损失,于是出现了第二个韧致辐射峰值。此时电压非常高,所以韧致辐射谱移向较硬的区域 100 ~ 500 keV。通过对实验结果的处理,得到在丝阵靶等离子体箍缩最大时刻磁绝缘传输线中总的电流损失为 40 ~ 60 kA,这不到流经负载总电流的 5%。

4 结 论

磁绝缘传输线中电流损失的评估,用通常测量电流的方法难以进行。提出用测量电子流韧致辐射的方法来计算磁绝缘传输线中的电流损失。对于不同的负载类型,磁绝缘传输线中电流损失的大小和出现的时刻也截然不同。在装置“S-300”上,当负载为丝阵靶时,电流损失出现在丝阵等离子体最大箍缩时刻,且其值不超过负载总电流的 5%。

需要指出的是,本文所述方法未考虑电子流韧致辐射的方向性,在计算中对磁绝缘传输线采用近似模拟,这会引入一定的误差,因此更适合作为定性分析方法。

致 谢：感谢“S-300”工作组同事给予的帮助。

参 考 文 献：

- [1] Babeikin M V , Bartov A V . Methods of achieving critical electrical power in short puls[R] . IAE-2253 , Moscow , 1972 .
- [2] Spielman R B , Corcoran P , Fockler J , et al . A double post-hole vacuum convolute diode for Z-pinch experiments on SATURN[C]//Proceedings of the 7th IEEE Pulsed Power Conference . 1989 :445-448 .
- [3] Spielman R B , Long F , Martin T H , et al . PBFA II-Z : a 20-Ma driver for Z-pinch experiments[C]//Proceedings of the 10th IEEE Pulsed Power Conference . 1995 :396-404 .
- [4] Albinkov Z A , Velihov E P , Veretennikov A I , et al . Experiment installation “ Angara-5-1 [J] . *Atomic Energy* , 1990 , **68**(1) :26-35 .
- [5] Chernenko A S , Gorbunin Y M , Kalinin Y G , et al . S-300 , new pulsed power installation in Kurchatov Institute—Investigation of stable liner implosion[C]//Proceedings of the 11th Int Conf on High Power Particle Beams . 1996 :154-157 .
- [6] Lovelace R N , Ott E . Theory of magnetic insulation[J] . *Phys Fluids* , 1974 , **17**(6) :1263-1268 .
- [7] Gordeev A V . Magnetic insulation in vacuum coaxial lines[R] . IAE-3076 , Moscow 1978 .
- [8] Cai H C . The efficiency of energy transportation and concentration on installation “ S-300 [D] . Moscow : Moscow engineering physics institute , 2004 :87-93 .
- [9] Komar A P , Kruglov S P , Lopatin I V . Measurement of total bremsstrahlung energy from electron accelerator[M] . Leningrad : Electronic Industry Press , 1972 .
- [10] Ivanov M I , Kazanov V M , Kozlov O V , et al . Research of high current relative electron beams by bremsstrahlung yield[J] . *Atomic Energy* , 1978 , **4**(10) :280-284 .

Influence of Z-pinch load on current loss in magnetically insulated transmission line

CAI Hong-chun¹ , Chernenko A S² , Korolev V D² , Ustrov G I² , Ivanov M I²

(1 . Institute of Fluid Physics , CAEP , Mianyang 621900 , China ; 2 . Kurchatov Institute , Moscow 123182 , Russia)

Abstract : The current loss in magnetically insulated transmission line(MITL) on pulsed power installation “ S-300 ” is studied by measuring bremsstrahlung between the electrodes , current and voltage in the load . Three kinds of load were used in experiments and the results show that the characteristics of current loss in MITL notably depend on the types of load . When the load is wire arrays , the current loss occurs at the moment of wire arrays stagnation and the maximum amplitude is no more than 5% of total current in the load .

Key words : MITL ; Current loss ; Bremsstrahlung ; X-ray