

绝缘环打火研究*

夏连胜, 陈思富, 石金水

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 绝缘问题是高电压、高场强器件和设备中不可避免的问题, 是决定器件、设备运行参数和稳定性的重要因素。针对一台直线感应加速器调试中出现的加速腔绝缘环在带束负载情况下的真空沿面闪络现象, 进行了分析和研究。分析表明, 在排除设计、材料、加工、洁净和真空度等常规异常因素后, 导致绝缘环真空沿面闪络的可能因素是电子在绝缘环表面的吸附和累积, 绝缘环上累积的电子来源和加速器中加速、传输的电子束的丢失有关。从加速腔工作状态出发, 分析绝缘环表面积累电荷和丢失电子束的相关途径, 进而提出相应的技术措施, 以提高加速腔运行稳定性。

关键词: 强流加速器; 绝缘环; 真空沿面闪络; 电荷累积; 高能电子诱发等离子体

中图分类号: TM85; TL503

文献标志码: A **doi:** 10.11884/HPLPB202032.200011

Research on vacuum flashover of insulator in induction cavity

Xia Liansheng, Chen Sifu, Shi Jinshui

(Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-106, Mianyang 621900, China)

Abstract: Flashover across the insulator in induction cavity with electron beam load once occurred frequently, which affected the performance parameters and stability of the high voltage high current devices and equipment. This paper studies the vacuum surface flashover across the insulator in the induction cavity of a linear induction accelerator under debugging. After excluding design and fabrication of the insulator as well as cleanness and vacuum degrees, it is found that the electrons from the plasma induced by high energy electrons interacting with the gas adsorbed on the inner cavity wall might play the key role of flashover. These thermal electrons move randomly and some of them will reach and stay on the insulator surface for some time, and flashover happens when high electric field is applied across the insulator with accumulated electrons.

Key words: intensive pulsed accelerator; insulator in an induction cavity; vacuum surface flashover; accumulated free electrons; electrons induced plasma

一台多脉冲直线感应加速器^[1](LIA)在研制、调试过程中出现了诸多和单脉冲 LIA 中不同的物理现象。其中, 加速腔绝缘环的真空沿面闪络问题是典型现象之一。在加速腔设计、研制、考核过程中, 已经有充分试验和数据表明, 在多脉冲电压(电场)作用下绝缘材料的沿面真空闪络现象较单脉冲电压作用下更易发生^[2-3]。在充分考虑这一因素, 并对绝缘环的设计、材料选择、加工工艺及过程控制进行严格控制后, 绝缘环在试验平台上满负荷空载测试、加速器空载全负荷运行正常情况下, 依然出现了带束调试中加速腔较高概率发生绝缘环真空沿面闪络。其表现为: 在排除绝缘环自身耐压因素后(即空载正常), 每天的调试试验刚开始时是正常的, 多次出束试验后, 慢慢出现绝缘环真空沿面闪络现象, 并随着试验进行, 发生概率在增加; 降低试验频率或放置一夜后, 闪络概率显著降低。尽管其闪络电压波形表现出的特征(图 1)和空载试验出现的闪络特征几乎一致, 表现为电压脉冲后沿快速下降, 但闪络诱发机制显然不同。经试验小组充分讨论, 从绝缘材料真空沿面闪络机制出发, 并通过试验反复验证后认为: 带束情况下加速腔绝缘环表面上出现累积电荷是在后续脉冲作用下发生绝缘沿面闪络的主要因素^[4-5]; 累积电荷来源和电子束在传输、加速过程中的丢失有关。但在绝缘环表面电荷累积和电子束丢失电子间联系机理方面存在一定认识上的差异。

通过对电子束丢失的电子和加速腔间相互作用过程的分析, 作者认为, 在带束条件下, 导致加速腔绝缘环真空

* 收稿日期: 2020-01-11; 修订日期: 2020-02-25

基金项目: 国家专项基金项目

作者简介: 夏连胜(1970—), 男, 博士, 研究员, 从事强流脉冲加速器和脉冲功率技术研究; xialiansheng@caep.cn。

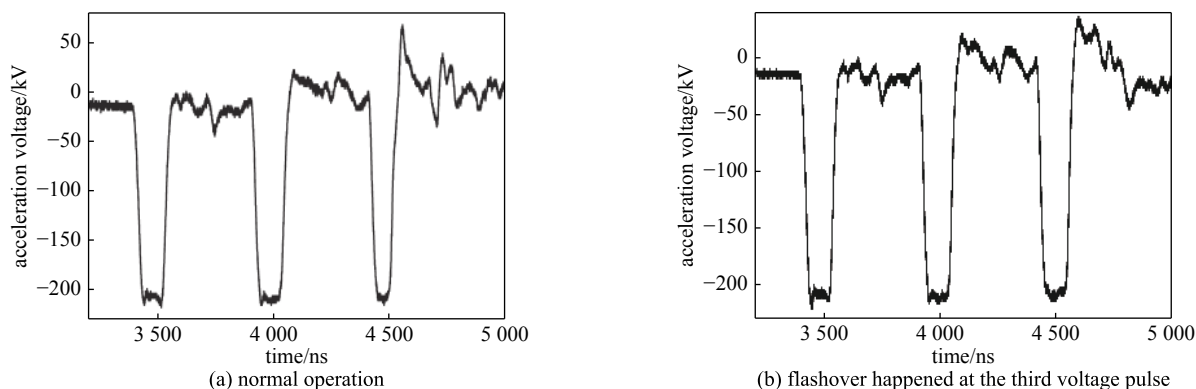


Fig. 1 Acceleration voltage waveforms of induction cavity under normal operation and flashover happened

图1 三脉冲电压作用下加速器的加速腔正常工作加速电压波形和发生绝缘环沿面闪络时的加速电压波形

沿面闪络的绝缘环表面累积电荷来源为: 电子束传输过程中丢失的电子与真空管道壁发生碰撞、轰击; 电子的轰击引起管道壁上吸附的气体解吸附和电离; 电离形成的等离子体中的热电子自由扩散至绝缘环表面; 绝缘环材料的高表面电阻率使得热电子附着、累积。

1 束流传输、加速过程中的电荷丢失

电子束在输运过程中, 如果输运系统和束流匹配, 则束包络没有或很小的振荡, 束流可以实现几乎无损传输; 如果输运系统和束流失配, 则会引起束流包络振荡并导致束流(电荷)明显丢失。在 DARHT-II 全束线输运模拟中, 有观测到束输运磁场与输出电子束的不配导致束包络的振荡现象并由此引起束晕产生和电子的丢失^[6-7]。

在直线感应加速器注入器中, 由于用于加速、引出电子束的二极管电压脉冲不是理想方波以及阴极工作特性等因素, 不是所有引出的电子获得二极管设计电场的完全加速。因此, 注入器输出的电子束能量并不单一。除了脉冲平顶部分具有较小的能散(约 2%), 在二极管电压脉冲前后沿时引出的束流能量差异是很大的。对于天鹅绒等场致等离子体阴极而言, 由于存在发射(阴极等离子体形成)阈值, 导致某种程度上对二极管引出电子束能谱上的锐化, 在电压脉冲前沿阶段引出电子束能量范围相对较窄, 但绝不是单能的; 在电压脉冲后沿段, 电子束则是从阴极等离子体表面几乎无阻碍引出, 电子能量几乎从 0 eV 到设计输出能量的数 MeV^[7], 如图 2 所示。

简单计算表明, 对于一个引出设计电子能量 2.5 MeV 的注入器, 能量 100 keV 的电子自由传输至阴极面下游 500 cm 处时间和 2.5 MeV 的电子相差约 13 ns, 这会导致这些低能电子得不到同步加速, 同时约束磁场是针对设定能量的, 因此这些低能电子在传输过程中会失去约束, 逐渐丢失在管道中。试验结果也证明了这点。无论在脉冲前后沿, 采用天鹅绒阴极的直线感应加速器中存在显著束流丢失现象^[8]。图 3 为参考文献 [8] 给出的另一台加速器注入器出口和加速器出口处的束流波形, 无论是前后沿还是幅度, 两个束流波形都有较明显差异。

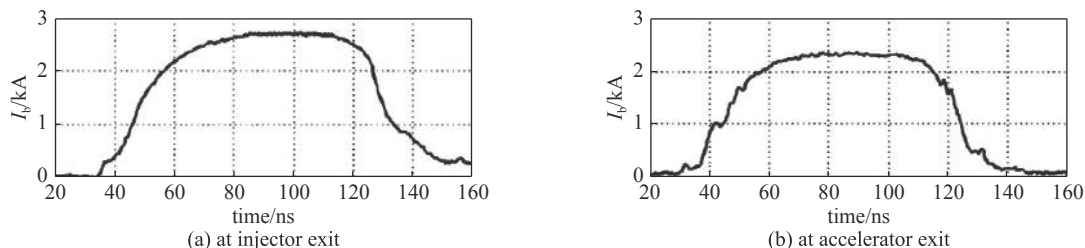


Fig. 3 Waveform of electron beam at injector exit and accelerator exit

图3 加速器注入器出口和加速器出口束流

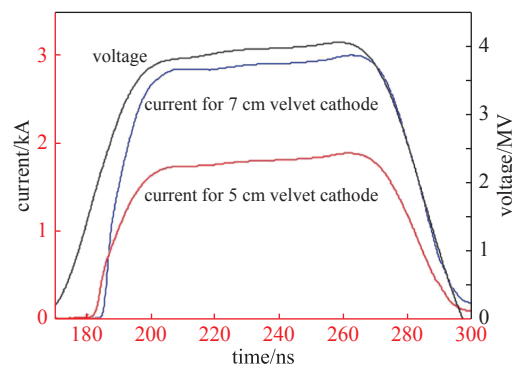


Fig. 2 Waveforms of diode voltage and electron beams with 5 cm velvet cathode and 7 cm cathode

图2 DARHT I 注入器二极管电压和 5 cm 和 7 cm 天鹅绒阴极时的束流波形(测量点在阴极面下游 82 cm 处)

对多脉冲加速器注入器而言,由于使用的是热阴极^[9-10],不存在发射阈值问题,因此在整个二极管电压脉冲期间,不论是电压脉冲前沿段还是后沿段,引出电子束能量范围都是从 0 eV 到设计工作值(约 2.7 MeV)。这对于加速器的束输运系统而言具有一定的挑战^[11]。或者说,注入器输出的电子束能量范围大,对具有能量(速度)选择的磁场约束在传输、加速过程中发生电子丢失是一种正常现象。同样,为了减小二极管电压脉冲长达 500 ns 前沿的低能束带来的影响,采用热阴极的 DARHT II 在注入器出口处采取准直技术,将大部分低能束剥离^[12]。如果束输运系统合适,多脉冲加速器面对情况和单脉冲基本一致,只是多脉冲加速器的脉冲前沿以及脉冲数增加等的因素导致丢失电荷量相对显著增多。因此,稍有不慎,就会导致束流中大量电荷的丢失^[13-14]。图 4 给出的是某次试验中注入器的二极管第一个脉冲电压波形以及相应的注入器出口处束流波形(阴极面下游约 400 cm 处)和加速器中段处束流波形。从图中可以看出,在输运磁场配置下,注入器出口束流波形和二极管电压波形存在较大差异,束流脉冲宽度窄于二极管电压脉冲宽度,束流顶部宽度大于电压脉冲顶部宽度,这些意味着无论在低能段还是在高能段,在注入器中均存在束流丢失的可能;相对于注入器出口处的束流波形,加速器中段的束流波形脉宽也稍有变窄,表明在加速段,低能段的电子束在传输过程中也有电荷丢失(考虑到探测器的定标精度的因素,不能明确束流脉冲顶部是否有显著电荷丢失)。

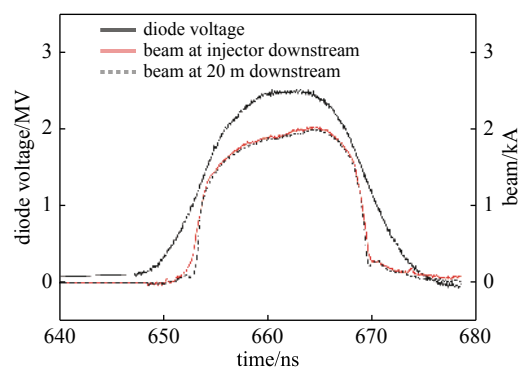


Fig. 4 Waveforms of diode voltage, electron beam at injector downstream and at 20 m downstream

图 4 多脉冲加速器注入器二极管电压、注入器出口处束流及加速器中段束流波形

2 丢失的电荷和加速腔内壁的作用

丢失在加速管道中的电子,具有一定能量和定向运动速度。无论是二极管电压的前后沿还是平顶部分,注入器输出的电子束均具有一定的能量,其中绝大部分能量体现为轴向动能。因此,这些具有一定轴向运动速度(基本上都是相对论性束)的电子不易通过通道复杂的加速间隙直接作用到绝缘环表面^[15](参见图 5),激发沿面真空闪络的发生。所以,这些具有一定轴向速度的电子和加速腔的主要作用形式应该表现为电子束和加速腔金属(一般为不锈钢)内壁发生相互作用,相互作用的次级效应导致绝缘环表面电荷累积、真空沿面闪络发生。

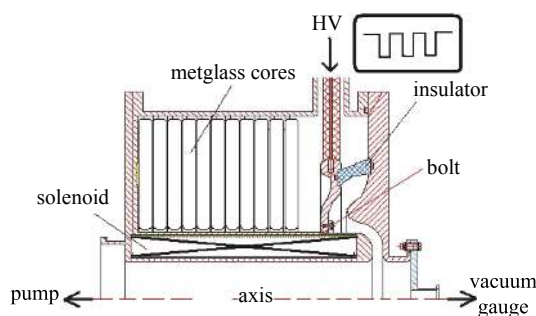


Fig. 5 Acceleration gap of an induction cavity

图 5 直线感应加速器加速腔加速间隙结构

一般说来,电子与物质相互作用的过程是复杂的。当电子能量在 4 MeV 以下时(注入器输出以及束流脉冲前后沿的电子),和加速腔管道壁的作用形式主要有韧致辐射、散射、激发和电离等。首先,高能电子束和不锈钢加速腔管道内壁作用,可通过韧致辐射产生 X 射线。X 射线与物质的相互作用一般有三种方式:光电效应(靶原子吸收一个光子并发射出一个轨道电子的反应)、康普顿散射(光子与靶原子的外层电子发生非弹性碰撞,使之脱离原子成为自由的反冲电子,同时光子损失能量并改变方向)、电子对效应(当光子能量足够高(>1.022 MeV),光子从原子核旁经过时,在原子核的库仑作用下,光子转化成成一个正电子和一个负电子的过程)。因此,X 射线作用管道壁后产生的电子具有较高的初始动能(速度),是不易直接到达绝缘环表面并附着的。对于散射效应,被管道壁散射的电子同样具有较高的定向速度,也不易直接到达绝缘环表面并附着。而激发效应则产生光效应,电子的剩余能量同样能使电子具有较高的定向速度。电离损失是电子在物质中能量损失的主要形式。同时,上述效应发生是一种小概率事件。

无论对单脉冲加速器还是多脉冲加速器,丢失的高能电子束轰击加速腔管道内壁是一种高概率事件,使管道壁表面吸附的气体解吸,散射的电子能量损失电离气体,气体电离后形成的等离子体中的电子是处于热运动状态,其非定向运动的特性使其中部分热电子自由运动到绝缘环表面并附着、累积、耗散。只是由于多脉冲加速器运行在猝发多脉冲状态下,电荷累积显著增加,进而在多脉冲电压(电场)作用下更易发生真空沿面闪络现象。

3 结 论

本文讨论了直线感应电子加速器中的离散自由电荷形成因素,即丢失的电子和管道壁吸附气体的相互作用形成的电离并逸出热电子。真空管道表面吸附气体是客观存在的。一般射频加速器的真空腔均采用多种措施进行除气作业,如放电老炼、真空加热除气等等。对于体积较大的直线感应加速器加速腔,采用额外真空除气则是条件不太允许的。加速腔管道内壁吸附的气体总是存在的,但随着真空保持时间长、高真空运行以及电子轰击在不断减少的。因此,在非必要时,建议运行和局部检修中尽量减小系统暴露大气以及暴露大气时间长度。

参考文献:

- [1] 石金水, 邓建军, 章林文, 等. 神龙二号加速器及其关键技术[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 010201. (Shi Jinshui, Deng Jianjun, Zhang Linwen, et al. Dragon-II accelerator and its key technology[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 010201)
- [2] 陈思富, 何佳龙, 王远, 等. 平行平板型真空沿面闪络试验系统的放电诊断[J]. *高电压技术*, 2015, 41(12): 4027-4035. (Chen Sifu, He Jialong, Wang Yuan, et al. Discharge diagnosis of parallel-plate-type surface flashover test system in vacuum[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(12): 4027-4035)
- [3] 何佳龙, 彭宇飞, 陈思富, 等. 多脉冲加载下材料的绝缘特性[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(4): 927-930. (He Jialong, Peng Yufei, Chen Sifu, et al. Characteristic of insulation material under multiple pulses[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(4): 927-930)
- [4] 何佳龙, 陈思富, 张篁, 等. 加速器绝缘环真空沿面闪络[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 095101. (He Jialong, Chen Sifu, Zhang Huang, et al. Vacuum flashover of Dragon-II accelerator insulator ring[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 095101)
- [5] 何佳龙. MHz猝发率高压脉冲作用下介质真空沿面闪络特性研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2014. (He Jialong. Investigation on vacuum flashover characters of insulated dielectric under MHz burst high voltage pulse[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2014)
- [6] Ekdahl C. Tuning the DARHT long-pulse linear induction accelerator[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2013, 41(10): 2774-2780.
- [7] Coleman J E, Moir D C, Ekdahl C A, et al. Increasing the intensity of an induction accelerator and reduction of the beam breakup instability[J]. *Physical Review Special Topics—Accelerators and Beams*, 2014, 17: 030101.
- [8] 代志勇, 章文卫, 谢宇彤, 等. 神龙一号加速器束流运输系统研制[J]. *高能物理与核物理*, 2007, 31(4): 395-399. (Dai Zhiyong, Zhang Wenwei, Xie Yutong, et al. Development of beam transport system of Dragon-I LIA[J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2007, 31(4): 395-399)
- [9] Xia Liansheng, Zhang Huang, Yang Anming, et al. Design and initial results of a multi-pulsed intense electron beam source[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85: 066108.
- [10] 夏连胜, 杨安民, 张篁, 等. 促发强流多脉冲电子束源物理设计[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(3): 706-710. (Xia Liansheng, Yang Anming, Zhang Huang, et al. Design of multi-pulsed electron source[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(3): 706-710)
- [11] 代志勇, 杨志勇, 臧宗喙, 等. 神龙二号热阴极注入器束流调试[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 075102. (Dai Zhiyong, Yang Zhiyong, Zang Zongyang, et al. Beam transport tuning of Dragon-II injector with thermal cathode[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 075102)
- [12] Ekdahl C, Abeyta E O, Bender H, et al. Initial electron-beam results from the DARHT-II linear induction accelerator[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2005, 33(2): 892-900.
- [13] 江孝国, 王远, 夏连胜, 等. 神龙二号注入器阳极杆内电子束包络测量技术[J]. *强激光与粒子束*, 2017, 29: 085101. (Jiang Xiaoguo, Wang Yuan, Xia Liansheng, et al. Measurement technology for electron beam envelope in anode pipe of Dragon-II injector[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2017, 29: 085101)
- [14] Jiang Xiaoguo, Wang Yuan, Yang Zhiyong, et al. Time-resolved measurement technique for pulsed electron beam envelope basing on framing and streaking principle[J]. *Chinese Physics C*, 2016, 40: 017003.
- [15] Chen Sifu, Li Xin, Huang Ziping, et al. Design of a high-power linear induction prototype cell at megahertz repetition rate burst mode[C]//International Conference on High Power Particle Beams. Xi'an. 2008: 741-742.