

国产非晶磁芯应用于感应加速组元的可行性研究*

陈思富¹⁾ 李欣 黄子平 石金水 丁亨松 李洪 马冰 王华岑 叶毅
谷占军 郑容峰 王莉萍 章林文 邓建军

(中国工程物理研究院流体物理研究所 绵阳 621900)

摘要 介绍了国产非晶合金应用于感应加速组元的可行性研究的初步结果. 采用国产1K101型铁基非晶合金(FeSiB)带材, 研制了非晶磁芯, 并利用加速腔(或实验腔)对研制的非晶磁芯的磁性能、绝缘性能和稳定性等方面进行了研究. 高压单脉冲实验可获得脉冲幅度为240 kV、脉冲前沿为17 ns(10%—90%)、脉冲平顶为72 ns($\pm 1\%$)的单脉冲; 高压猝发三脉冲实验可获得前沿35 ns、脉冲平顶60 ns的三脉冲, 磁芯的有效平均磁密跳变为1.41 T. 耐压实验研究中, 得到了电压幅值为282 kV的三脉冲. 非晶磁芯的性能稳定, 满足感应加速组元对磁芯性能的要求.

关键词 感应加速组元 磁芯 非晶合金 绝缘 稳定性

1 引言

感应加速组元是强流直线感应加速器^[1]和高压MHz感应猝发多脉冲装置^[2, 3]的关键部件之一. 对于感应加速组元来说, 磁芯性能的好坏影响组元的性能.

当前运行的直线感应加速器的感应加速组元中大多数使用铁氧体作为磁芯, 近来, 根据国内外相关实验研究报告, 金属玻璃具有比铁氧体高得多的磁通密度变化和更小的矫顽力, 因此国外研制的直线感应加速器越来越多地采用金属玻璃作为磁芯材料, 用以取代传统的铁氧体磁芯^[4—8]. 这些使用金属玻璃作为磁芯的直线感应加速器主要是感应叠加器型、长脉冲或低重复频率加速器, 加速腔腔压波形前沿都差于现有的铁氧体加速腔的腔压波形前沿. 在国内, 近来也开展了将国产铁基非晶磁芯应用于单脉冲直线感应加速器和猝发多脉冲装置等相关研究^[3, 9]. 本文报道了这方面的研究进展.

2 铁基非晶磁芯的研制

2.1 铁基非晶合金带材

研制的非晶磁芯使用国家非晶微晶合金工程技术研究中心(安泰科技)生产的牌号为1K101的非晶带材作为磁性材料^[10]. 带材的物理性能参见表1.

表1 1K101非晶合金带材的物理性能

厚度 / μm	密度 /(g/cm^3)	Bs /T	Br /T	Hc /(A/m)	Tc / $^{\circ}\text{C}$	Tx / $^{\circ}\text{C}$	电阻率 /($\mu\Omega\cdot\text{m}$)
~ 30	7.20	1.56	1.25	4	415	550	1.30

2.2 铁基非晶磁芯的研制

所研制的非晶磁芯属于环行磁芯, 因其磁芯尺寸较大(内径约250 mm, 外径范围500—800 mm, 厚度20—30 mm), 因此又称之为非晶大磁环. 由于大磁环所用软磁材料超薄(微米级)、易碎, 对各种应力极度敏感, 因此在研制过程中要考虑如何保证磁环大而薄所带来的灌注强度指标、灌注应力指标、灌注浸油等指标并正常工作于高频、高压、大功率脉冲环境下, 其制造工艺难度较大.

在对大磁环主要制备工序——带料卷绕(包括绝缘涂复)、纵向磁场处理、无气泡绝缘灌注处理、保护盒封装等——进行了相关的技术攻关后, 研制成了不同尺寸的大磁环(表2). 图1示出了加工的III型磁芯实物图.

表2 铁基非晶磁芯的型号

型号	本体尺寸/mm			磁芯成品尺寸/mm		
	外径	内径	厚度	外径	内径	厚度
I	258	504	20	254	508	24
II	266	497	20	254	508	26
III	260	800	20	252	808	26

2007-01-07 收稿

* 国家专项基金资助

1) E-mail: csfcaep@tom.com; csfcaep@gmail.com



图 1 III型非晶大磁环实物图

3 铁基非晶磁芯性能

3.1 脉冲磁性能

对加速组元中的非晶磁芯的脉冲磁性能主要关心两个方面：(1) 磁芯的非线性是否影响腔压波形；(2) 磁芯的平均磁密跳变。

利用磁特性测量仪对单块大磁环分别进行 50 Hz 静态性能测量、筛选后，将性能基本一致的多块大磁环放入加速腔(或试验腔)中，进行整体的脉冲磁性能测试(图2)：对加速腔中的磁芯进行复位后，通过功率系统将主脉冲(单脉冲或三脉冲)馈入加速腔中，测量加速腔的间隙电压波形和加速腔的励磁电流，即可观察磁芯的非线性对腔压波形的影响程度，获得磁芯的平均磁密跳变、所需励磁电流等脉冲磁性能。

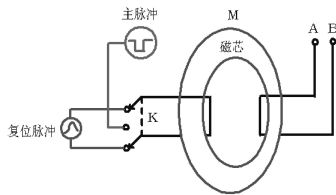


图 2 脉冲磁性能测试示意图

对于I型和II型的非晶磁芯，对其进行了单脉冲和猝发三脉冲磁性能测试，高压单脉冲实验^[11]可获得脉冲幅度为 240 kV，脉冲前沿为 17 ns (10%—90%)，脉冲平顶为 72 ns ($\pm 1\%$) 的脉冲(图3)。高压三脉冲实验可获得脉冲前沿为 35 ns (10%—90%)，脉冲平顶 60 ns ($\pm 1\%$) 的脉冲^[3]。对于III型的非晶磁芯，重新设计了实验腔和励磁电流测试装置(图4)，图5为使用7块III型非晶大磁环的三脉冲实验波形，脉冲幅度为 200 kV，励磁电流最大 2.24 kA，有效平均磁密跳变约 1.41 T。图6为磁化曲线。

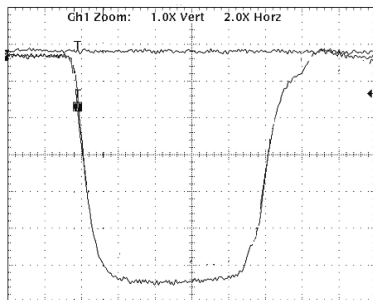


图 3 单脉冲腔压波形^[11]

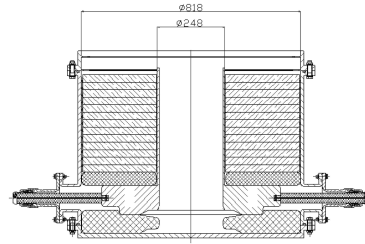


图 4 III型非晶大磁环实验腔

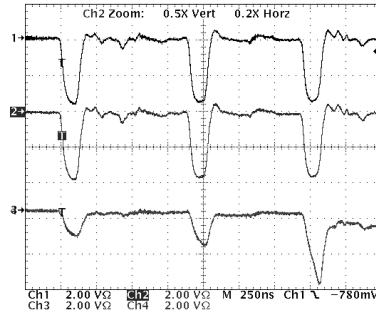


图 5 猝发三脉冲实验波形

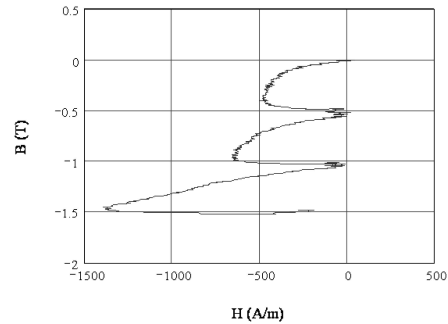


图 6 磁化曲线

3.2 绝缘性能

磁芯的绝缘性能是影响它能否用于感应加速组元的关键因素之一。磁芯的绝缘设计需要考虑带材的层间绝缘、磁芯的无气泡封装等。同时，由于磁芯是放置于不锈钢封装的加速组元中，因此不仅要考虑磁芯之间的电容效应对磁芯绝缘性能的影响，还要考虑磁芯的内外环与加速腔的不锈钢之间的电容造成的电压不均匀对磁芯绝缘性能的影响。

经过不断改进，目前的III型磁芯在进行三脉冲实验时可以工作到 282 kV (参见图7)。

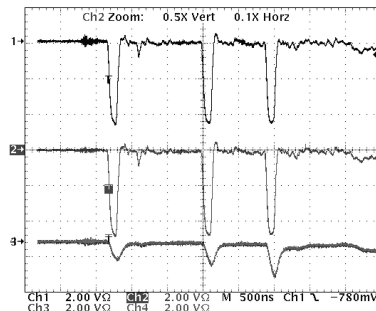


图 7 III型非晶大磁环耐压实验结果

3.3 稳定性

由于非晶态合金的原子结构处于亚稳态, 在一定条件下会向稳定状态转变, 成为晶体, 从而失去原有的优良磁性能, 不能再使用. 因此其稳定性是需要关注的. 文献[12]指出, 从温度稳定性、机械稳定性、磁冲击稳定性和时效稳定性等方面来看, 磁芯的稳定性是有保障的.

几年的高压实验结果表明, 不同的封装工艺、不同的生产时间生产的不同批次的金属玻璃磁芯在其伏秒数足够时所获得的高压脉冲波形是一致的(图8和图9).

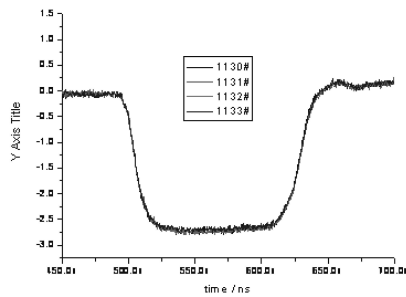


图8 第一批金属玻璃单脉冲实验

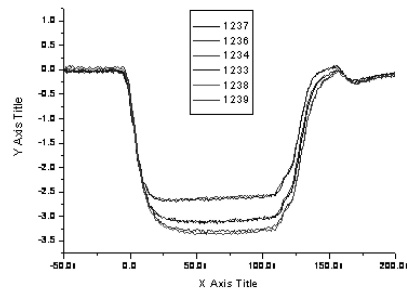


图9 第三批金属玻璃单脉冲实验(不同电压)

4 总结

目前国产金属玻璃带材和绕制工艺已经能够满足感应加速组元对磁芯质量的要求. 利用金属玻璃磁芯加速腔可以产生高压、快前沿、宽平顶的短脉冲, 将非晶磁芯替代铁氧体大磁环, 可以使直线感应加速器和猝发多脉冲装置的长度减少, 缩小系统的体积. 对于直线感应加速器而言, 这还有利于束输运, 减少亮度损失, 便于束聚焦从而实现小焦斑, 同时还可以大大减少投资.

参考文献(References)

- DENG Jian-Jun. Linear Induction Electron Accelerator. Beijing: National Defense Industry Press, 2006 (in Chinese)
- CHEN Si-Fu, LI Xin, HUANG Zi-Ping et al. Appl. Phys. Lett., 2006, **88**: 264107
- CHEN Si-Fu, DENG Jian-Jun, LI Xin et al. Nucl. Instrum. Methods A, 2007, **579**: 941—950
- Corley J P, Alexander J A, Pankuch P J. Eighth IEEE International Pulsed Power Conference, California, 1991. 920—923
- Waldron W L, Reginato L L. XX International Linac Conference, California, 2000. 446—448
- Ashby S, Drury D, James G et al. Eighth IEEE International Pulsed Power Conference, California, 1991. 940—942
- Mamaev G, Ctcherbakov A, Glazov A et al. Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference, Canada, 1997. 1263—1265
- Tokuchi A, Ninomiya N, Yatsui K et al. 12th International Conference on High-Power Particle Beams, ISRAEL, 1998. 175—178
- CHENG Hao, ZHANG Lin-Wen, YE Yi et al. High Power Laser and Particle Beams, 2002, **14**(6): 941—944 (in Chinese)
- AT&M: Advanced Technology & Materials Co., Ltd. <<http://www.atmcn.com/>>
- CHEN Si-Fu, LI Xin, HUANG Zi-Ping et al. Proceedings of Research of Nuclear Physics, Accelerator and Low-Temperature Plasma in Sichuan Province, 2005
- WANG Fa-Hou. Technical data of 4961 factory: 20050720

Feasibility of Applying Home-Made Amorphous Core to Induction Module *

CHEN Si-Fu¹⁾ LI Xin HUANG Zi-Ping SHI Jin-Shui DING Heng-Song LI Hong MA Bing
WANG Hua-Cen YE Yi GU Zhan-Jun ZHENG Rong-Feng WANG Li-Ping
ZHANG Lin-Wen DENG Jian-Jun

(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract The application of the homemade 1K101 amorphous core in induction module is reported in this paper. The properties of magnetic, insulation and stability are studied with the cores. A pulse with pulse width of 120 ns (FWFM), flat-top of 72 ns ($\pm 1\%$) and rise time of 17 ns can be obtained with single-pulse induction module. Triple-pulse with the rise time of 35 ns, flat-top of 60 ns ($\pm 1\%$) and pulse width of 120 ns (FWFM) was obtained when tested with a formal linear induction module at MHz repetition burst mode. The effective average flux swing of the amorphous core is about 1.41 T. The cores work well with triple-pulse of 282 kV. The properties of the cores are stable and suitable for induction module.

Key words induction module, magnetic cores, amorphous, insulation, stability

Received 7 January 2008

* Supported by Special National Fundation of China

1) E-mail: csfcaep@tom.com; csfcaep@gmail.com