

文章编号: 1007-4627(2006)02-0146-05

强流加速器材料研究*

肖国青

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 加速器技术的快速发展以及科学技术研究和应用的不断需求, 使得高流强和高品质成为新一代加速器装置的最重要的指标。目前大型科学实验装置如重离子束驱动的惯性约束聚变装置、对撞机、中微子及介子工厂、散裂中子源等都需要强流加速器。详细介绍了强流加速器中涉及的材料问题以及强流加速器在聚变堆材料研究中的作用和前景。

关键词: 强流加速器; 聚变堆材料; 抗辐照材料; 重离子

中图分类号: TL5; TG17; TL34 **文献标识码:** A

1 引言

人类的进化和发展与工具制造有着非常密切的关系, 而工具制造是离不开材料的。材料对人类社会的进步起着至关重要的作用。随着工具材料的不断改造和更新, 人类从石器时代发展到了纳米科技时代。研究表明, 标志着人类社会进步的工业革命是与材料的发展相关的。冶金钢铁材料的兴起促进了蒸汽机和机器制造业的大力发展, 进而带动了第一次工业革命; 功能材料的涌现使内燃机、发电机及石化工业得到了发展, 又推动了第二次工业革命; 进入 20 世纪后, 出现了电子材料和复合材料, 电子计算机和网络产业的发展激发了第三次工业革命; 21 世纪将是纳米科技的年代, 纳米材料的广泛使用标志着第四次工业革命的到来^[1]。而随着新能源和核能源的进一步发展, 需要大力发展新的抗辐照、低活性材料, 预示着第五次工业革命的即将到来。

随着加速器技术的快速发展以及科学研究和应用的不断需求, 使得高流强和高品质成为加速器装置的最重要的指标。目前许多大型科学实验装置如重离子束驱动的惯性约束聚变装置、对撞机、中微子和介子工厂、散裂中子源、堆材料辐照性能测试装置等都需要强流加速器。

强流加速器的发展与材料研究的进展是同步进行的。强束流的产生、探测和传输需要有强电子和离子发射, 以及产生材料、耐高温耐辐照材料、低活性材料、高真空材料等。强流加速器又是检验材料的强有力工具, 如反应堆和聚变堆材料的检验就需要建立新的强流加速器^[2]。

2 强流加速器的材料问题

强流离子加速器的目标是提供尽可能强的离子束流。但高功率的束流会产生许多问题^[3], 如真空度降低、诊断元件损坏和材料老化等, 因而限制了束流强度的进一步提高。研究和发展新材料对于强流加速器的发展是至关重要的。

2.1 真空管道材料

强流离子束与真空管道中的残余气体分子碰撞会产生电离与激发, 产生二次电子和离子发射, 而次级粒子会受到离子束团的加速, 最后与真空管壁碰撞产生出气, 从而降低真空度, 造成束流损失, 影响了离子的寿命, 限制了离子流强的提高。该现象被称为电子云效应, 最早发现于同步辐射加速器, 后来相继在 CERN, GSI 和 BNL 的离子加速器上被观测到^[4, 5]。电子云问题现已形成了一个研究热点, 从理论上提出了许多模型, 在实验上人们利

收稿日期: 2006-04-06; 修改日期: 2006-04-20

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10405025, 10475035)

作者简介: 肖国青(1962-), 男(汉族), 河北承德人, 研究员, 博士生导师, 从事核物理及核技术应用研究;

E-mail: xiaogq@impcas.ac.cn

用残余气体分析仪对离子轰击材料的出气进行了测试研究, 其实验装置如图 1 所示。研究表明, 各种

常规使用的材料都会在离子轰击下产生大量的出气 (如图 2 所示), 降低了真空度。

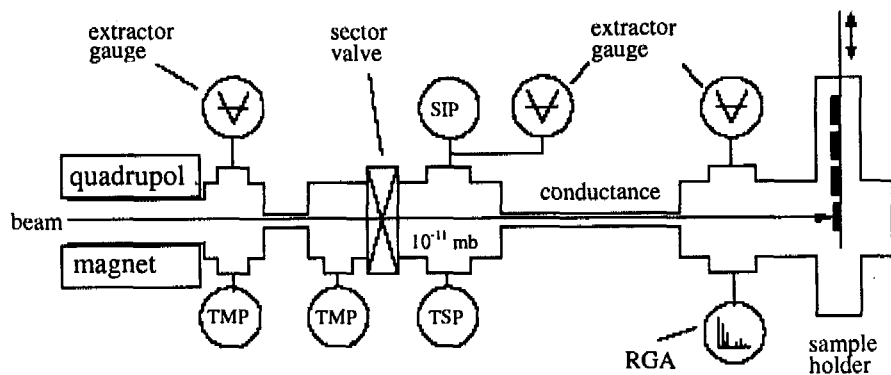


图 1 离子轰击材料出气测试实验装置^[6]

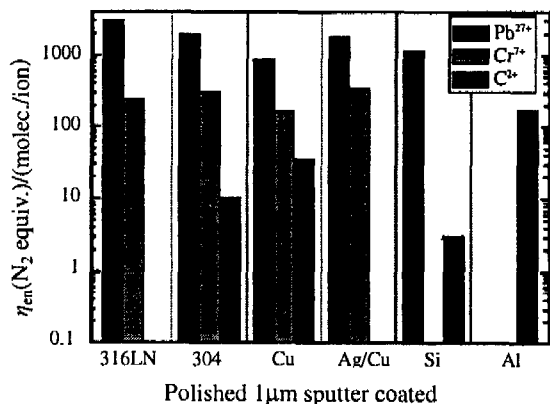


图 2 Pb, Cr 和 C 离子轰击下各种材料的出气情况^[6]

目前采取的办法是用涂层技术在真空管内壁上涂附一层防出气材料(一般 100 nm 厚), 以降低真空管壁出气的出气, 但对放置在真空中的铁氧体凸轨磁铁则需要考虑涂层产生的涡流和性能改变等影响^[7]。

2.2 阻挡型诊断探针材料

强流离子束的功率大, 通常避免使用阻挡型诊断探针, 而采用非拦截式诊断探针。当用阻挡型诊断探针如单丝剖面探针探测强流离子束时, 易引起丝的熔化和损坏。一般采取高熔点的材料, 如钨和钽等。近年来的研究表明, 用低 Z 的碳纤维材料制造的单丝剖面诊断元件比使用高 Z 材料所承受的离子数要高 1 个量级^[8]。

2.3 抗辐照材料

强流离子束会产生高辐射剂量而加热超导磁铁造成失超, 并且强辐射损伤会破坏超导磁铁的超导

线圈、Cu 稳定部件和绝缘材料等。研究新的抗辐照材料, 如新型陶瓷材料和复合材料, 有利于解决抗辐照绝缘问题。表 1 给出了一些材料的辐射敏感性。

表 1 超导磁铁材料的辐射敏感性

材料	辐射极限/Gy
NbTi	$\sim 5 \times 10^8$
Nb ₃ Sn	$\sim 5 \times 10^8$
Cu	$> 10^{10}$
陶瓷 (Al ₂ O ₃ , MgO 等)	$> 10^9$
有机物	$10^6 - 10^8$

2.4 低活性材料

高辐射场会产生强的活化本底污染, 给加速器维修和废物存放带来严重问题。加速器上有许多易损坏元件如诊断元件, 当元件损坏和更换时, 需要维修位置处的辐射本底低于辐射防护允许的范围, 同时被换下的损坏元件通常具有长寿命的放射性, 在存放时需要特殊处理。

2.5 靶室材料

重离子驱动的惯性约束聚变装置的关键设备之一是聚变靶室系统, 其靶室要能够承受极高辐射剂量的辐照。特别是对靶室室壁材料要求较高, 现在使用的靶室室壁保护有下面 3 种方法, 如干墙法、湿墙法和厚液墙法。在没有找到合适的固体材料前, 循环的液体材料是抗辐照的最佳替代材料。

3 用于聚变堆材料研究的强流加速器 IFMIF

国际聚变材料辐照装置 (IFMIF) 能够提供强中子束, 是用来研究和检验聚变示范堆 (DEMO) 所选

材料的强流加速器 (见图 3), 以保证受检材料能够在 DEMO 整个使用期限内的安全使用, 特别是检验 DEMO 和 ITER (国际热核实验反应堆) 的包壳材料。IFMIF 已经完成了可行性设计, 其指标如表 2 所示。

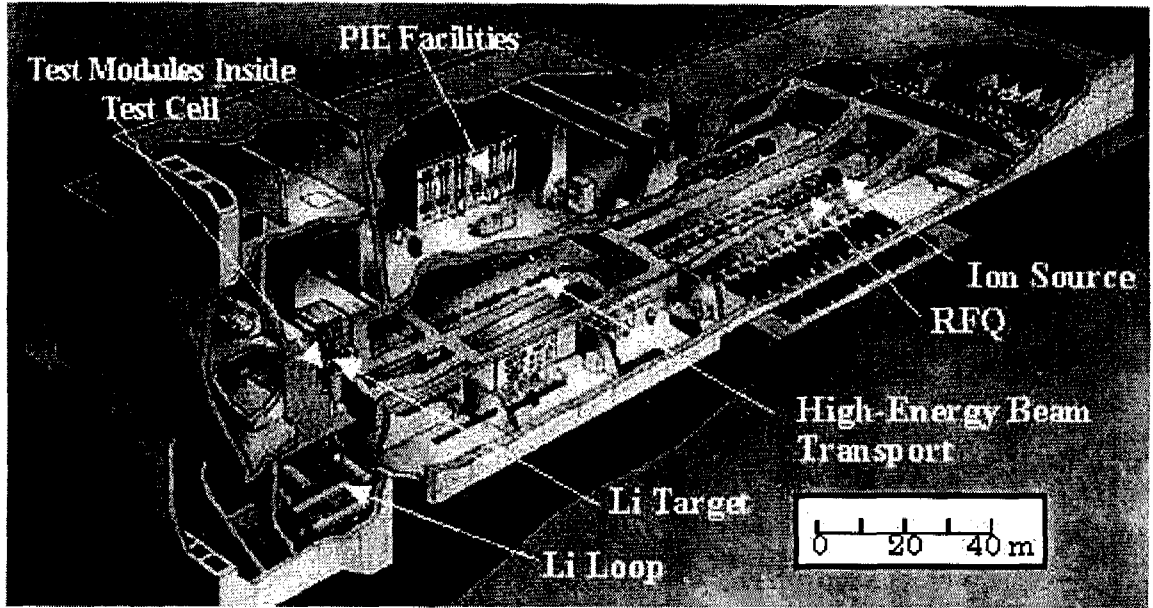


图 3 用于研究聚变堆材料的强流加速器 IFMIF^[2]

表 2 IFMIF 的参数和指标^[2]

参数名称	指标
中子通量/(n · cm ⁻² · s ⁻¹)	4.5 × 10 ¹³
中子能量/MeV	14
D 束能量/MeV	40
D 束流强/mA	250

4 兰州重离子加速器材料研究平台

中国科学院近代物理研究所和兰州重离子加速器国家实验室提供了多种材料辐照研究平台, 用于开展重离子束与物质的相互作用基础研究、重离子束材料辐照效应和新材料合成应用基础研究, 进行纳米结构材料、抗辐照材料、先进核能装置结构材料、特殊功能材料和先进的离子束材料改性分析新技术的研究。

4.1 320 kV 高电荷态 ECR 源离子高压平台

320 kV 高电荷态 ECR 源离子高压平台用于高电荷态离子与表面相互作用研究的原子物理实验平台如图 4 所示。高电荷态离子(能量 5—320 qkeV)

由目前世界上最大的永磁 ECR 源(重约 1 t)提供, 在高压平台上束流经过聚束器和光栏的聚焦和准直及 90°偏转分析磁铁将确定电荷态的离子选出, 其中 Ar⁸⁺ 离子束流强度约为 1 mA, 然后传输到物理实验终端。总共有 5 个实验终端分别用于开展表面研究、材料研究、原子和分子物理研究以及生物物理研究。材料研究终端主要用于探索材料离子束辐照相变、离子束辐照材料改性和离子束工程新材料合成研究, 研制抗辐照材料, 检验强流加速器用材料以及模拟中子检验聚变堆材料。

4.2 兰州 HIRFL-CSR 重离子加速器

图 5 所示为兰州 HIRFL-CSR 重离子加速器系统。HIRFL-CSR 加速器系统由兰州重离子研究装置(HIRFL)和冷却储存环(CSR)大科学装置以及放射性束装置(RIBLL)所组成, 用于开展重离子核物理及交叉学科研究、粒子加速器及核技术应用研究。HIRFL-CSR 可提供从质子到铀的全离子束(重离子能量从约 1 keV/u 到 1 000 MeV/u, 质子能量为 2.8 GeV), 为开展离子束辐照材料科学研究提

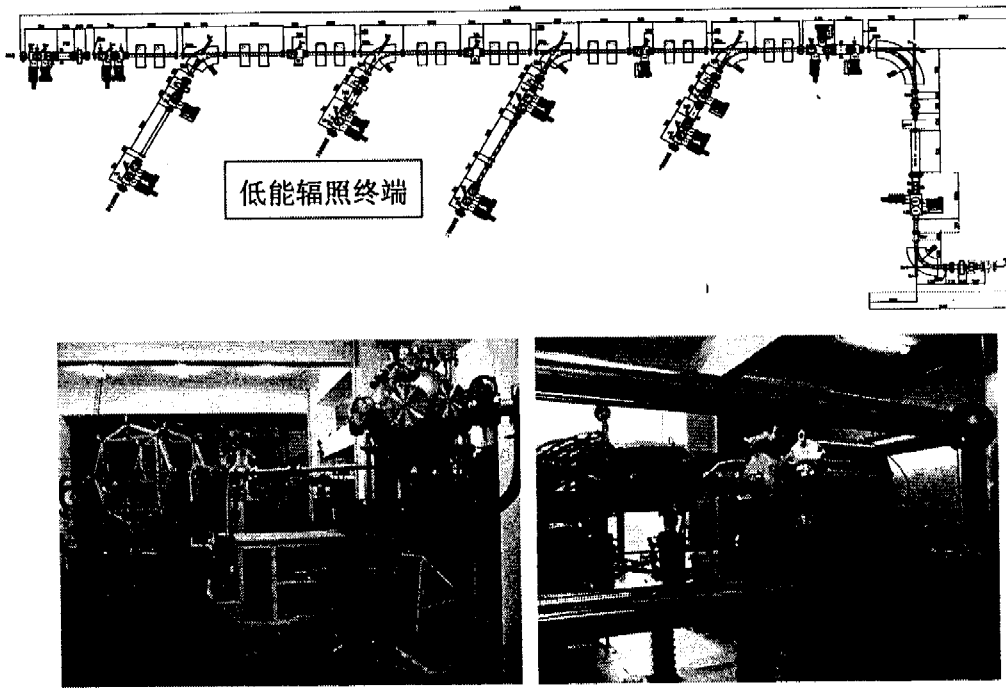


图 4 320 kV 高电荷态 ECR 源离子高压平台

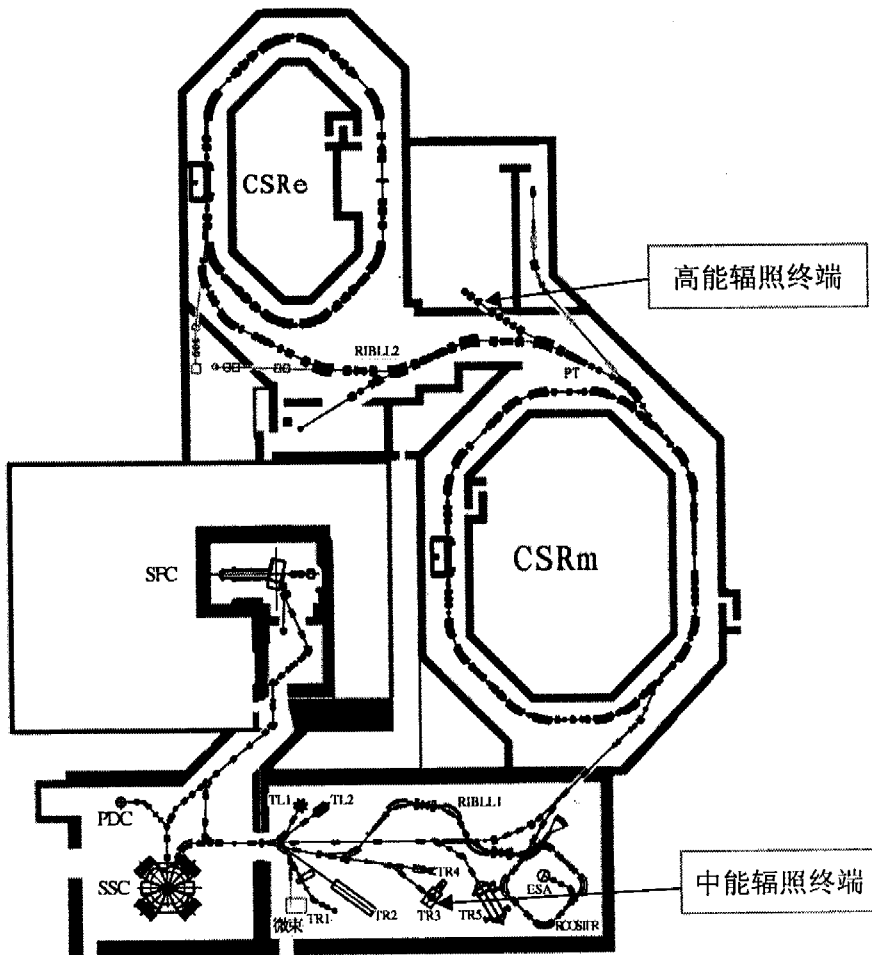


图 5 兰州 HIRFL-CSR 重离子加速器系统

供了实验平台。CSR 辐照材料实验平台正在规划中, 该平台将会配置均匀扫描装置和旋转靶系统。利用 CSR 快引出方法可以产生短脉冲的强束流离

子, 然后再通过强聚焦磁系统将束流集中在靶点上, 用以开展高能量密度等离子体的研究。

参 考 文 献:

- [1] 马远荣. 纳米科技. 汕头: 汕头大学出版社, 2003.
- [2] IFMIF Comprehensive Design Report, 2004.
- [3] Heavy Ion Fusion White Paper. US, 2002.
- [4] Mahner E, Efthymiopoulos I, Hansen J, *et al.* EPAC2004, 2004, 1 633.
- [5] Mahner E, Hansen J, Kuechler D, *et al.* EPAC2002, 2002, 2 568.
- [6] Kraemer A, Boine-Frankenheim O, Mustafin E, *et al.* EPAC2002, 2002, 2 547.
- [7] Wei J, Blaskiewicz M, Brodowski J, *et al.* BNL-69484-CPI/LBNL-51828, 2003.
- [8] Field C, McCormick D, Raimondi P, *et al.* Wire Breakage in SLC Wire Profile Monitors, AIP Conference Proceedings 451, 1998, 440—445.

High Intensity Accelerators for Material Researches*

XIAO Guo-qing

(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: With the increasing development of accelerator technology and the growing requirements from scientific and technical researches as well as applications, high intensity and high performance become the most important characters of the new accelerator facilities. Currently, many large-scale scientific experimental facilities such as the heavy-ion driven inertial confined fusion facility, the collider, the neutrino and muon factories, the spallation neutron source and so on all need the high intensity accelerators. In this paper, the material issues relevant to the high intensity accelerators and the applications of high intensity accelerators are introduced.

Key words: high intensity accelerator; fusion reactor material; irradiation resistant material; heavy ion

* Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10405025, 10475035)