

# ECR 离子源微波窗损伤机理研究

魏绪波<sup>1</sup>, 李公平<sup>1,\*</sup>, 潘小东<sup>1</sup>, 武启<sup>2</sup>, 刘玉国<sup>2</sup>

(1. 兰州大学核科学与技术学院, 甘肃兰州 730000; 2. 中国科学院近代物理研究所, 甘肃兰州 730000)

**摘要:** 强束流下微波窗损坏是限制 2.45 GHz 电子回旋共振(ECR)离子源寿命的主要原因, 为延长离子源使用寿命, 对 ECR 离子源微波窗损伤机理进行了研究。利用有限元软件分别计算了 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷微波窗在微波、等离子体和回流电子束作用下的温度及应力分布。计算结果表明, 在微波和等离子体作用下, 微波窗边缘处应力最大, 在电子束作用下, 微波窗中心位置应力最大。增强水冷效果可降低微波和等离子体对微波窗的影响, 增加 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷微波窗表面氮化硼(BN)的厚度可降低电子束的影响, 从而减少微波窗损坏概率, 延长离子源寿命。

**关键词:** 电子回旋共振离子源; 微波窗; 强流离子束; 有限元

**中图分类号:** TL503.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-6931(2020)03-0556-08

**doi:** 10.7538/yzk.2019.youxian.0260

## Study on Damage Mechanism of Microwave Window in ECR Ion Source

WEI Xubo<sup>1</sup>, LI Gongping<sup>1,\*</sup>, PAN Xiaodong<sup>1</sup>, WU Qi<sup>2</sup>, LIU Yuguo<sup>2</sup>

(1. School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

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

**Abstract:** The microwave window of 2.45 GHz electron cyclotron resonance (ECR) ion source is a lossy component when it works on intense ion beam DC mode, resulting in limited service life. In order to study the damage mechanism of microwave window, the finite element software was used to calculate the temperature and stress distributions of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic microwave window under the effect of the microwave, plasma and back-streaming electrons. The calculation result shows that the maximum Von Mises stress is at the edge of the microwave window under the effect of microwave and plasma, while under the effect of the electron beam, the largest stress is at the center of the microwave window. Enhancing water-cooling performance can reduce the influence of microwave and plasma on microwave window, and increasing thickness of BN can protect the window from electron beam more effectively. The combination of these two methods is

收稿日期: 2019-04-09; 修回日期: 2019-09-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21327801)

作者简介: 魏绪波(1991—), 男, 山东梁山人, 博士研究生, 粒子物理与原子核物理专业

\* 通信作者: 李公平, E-mail: ligp@lzu.edu.cn

网络出版时间: 2019-11-07; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20191106.1640.002.html>

feasible and effective in practice to extend the service life of the ECR ion source.

**Key words:** electron cyclotron resonance ion source; microwave window; intense ion beam; finite element

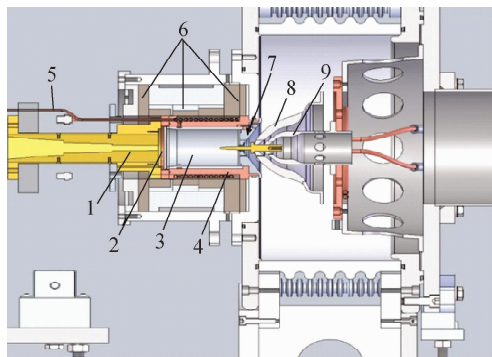
2.45 GHz 电子回旋共振 (ECR) 离子源具有寿命长、质子比高及束流品质好等优点<sup>[1]</sup>, 在强流加速器领域得到了广泛应用<sup>[2-3]</sup>, 如中国科学院核能安全技术研究所的强流氦气聚变中子发生器 HINEG<sup>[4]</sup> 要求 ECR 离子源提供 35 mA 的  $D^+$  束流, 国际聚变材料辐照装置 IFMIF<sup>[5]</sup> 则需要两台可产生 125 mA  $D^+$  束的 ECR 源。兰州大学正在研制的强流中子发生器 ZF400<sup>[6-7]</sup>, 采用 ECR 离子源产生的强流  $D^+$  束经前分析系统注入 400 kV 加速管, 加速后轰击气靶或氦靶产生中子, D-T 预期中子产额大于  $5 \times 10^{12} s^{-1}$ 。ECR 离子源委托中国科学院近代物理研究所加工制作, 要求可为中子发生器系统提供最高 60 mA/60 kV 的氦离子束, 离线测试时则要求其能产生 80 mA 氢离子束。

ECR 离子源微波窗位于波导和弧腔之间, 由石英、 $Al_2O_3$ 、AlN 等材料组成, 起真空密封和阻抗匹配的作用<sup>[8-9]</sup>, 通常在微波窗接触等离子体的一面加装氮化硼 (BN) 片, 用于承受回流电子轰击与等离子体烧蚀<sup>[10]</sup>。在强直流束工作模式下, 微波窗损坏是限制 ECR 离子源寿命的主要原因<sup>[11-12]</sup>。为延长微波窗使用寿命, 北京大学改进了微波窗水冷结构, 换用了纯度更好的 BN 材料, 使得 50 mA/35 kV 离子源 (氢离子束, 下同) 直流引出下的工作寿命由不到 200 h 延长到 306 h 以上<sup>[13]</sup>。中国原子能科学研究院采用单脊波导和 BN 中心挖孔的独特微波窗结构, 在 110 mA/75 kV 条件下连续工作超过 220 h<sup>[14]</sup>。法国 CEA-Saclay 将石英微波窗置于水冷弯波导后, 脊波导与等离子体之间由 BN 隔断, 在 100 mA 直流束引出条件下, BN 更换周期预期为 1 000 h 以上<sup>[15]</sup>。本文结合 60 mA/60 kV ECR 离子源强流束引出时微波窗损坏情况, 利用有限元软件分析微波、等离子体和电子束对微波窗的影响, 以探究微波窗损伤机理, 延长微波窗使用寿命。

## 1 ECR 离子源

ECR 离子源结构如图 1 所示, 主要包括脊

波导、微波窗、永磁环、弧腔及引出部分。微波通过脊波导与微波窗馈入铝弧腔, 弧腔外面嵌套着紫铜水冷套筒, 弧腔内的磁场由铁钨组成的磁环提供, 引出系统采用三电极结构。等离子体电极孔径为 7.2 mm 时, 50 kV 高压下可引出 80 mA 氢离子束, 引出束流强度与微波功率的关系如图 2 所示。



1—脊波导; 2—微波窗; 3—弧腔; 4—水冷套筒;  
5—进气管; 6—永磁环; 7—等离子体电极;  
8—抑制电极; 9—地电极

图 1 ECR 离子源剖面图

Fig. 1 Sectional view of ECR ion source

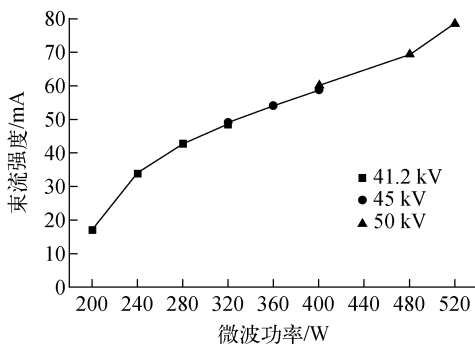


图 2 引出束流强度与微波功率的关系

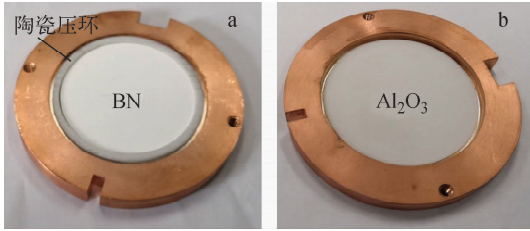
Fig. 2 Extracted beam intensity vs microwave power

## 2 微波窗结构与损伤分析

### 2.1 微波窗结构

ECR 离子源微波窗采用脊波导和微波窗组合的方式, 微波窗位于脊波导和弧腔之间, 为独立的法兰结构。微波窗由  $Al_2O_3$  陶瓷和

BN 组成,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷焊接在铜法兰上, 厚 2 mm、直径 56 mm, BN 位于等离子体一侧, 粘贴在陶瓷表面, 厚 2 mm、直径 48 mm。微波窗实物图如图 3 所示。



a——微波窗正面(朝向弧腔); b——微波窗反面(朝向脊波导)

图 3 微波窗实物图

Fig. 3 Photo of microwave window

## 2.2 微波窗损伤分析

微波窗常见损伤状况如图 4 所示, BN 表面泛黄, 中心位置有环状或点状烧蚀坑,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷出现贯穿裂纹。陶瓷片破裂后, 不能密封工作气体, 真空计读数持续上升, 离子源无法起弧。微波窗损坏通常发生在离子源强直流束引出模式下, 引出电极打火时, 损坏概率更大。



图 4 损坏的微波窗实物图

Fig. 4 Photo of damaged microwave window

ECR 离子源工作过程中对微波窗产生直接影响的因素有微波、等离子体和回流电子等。微波通过微波窗的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷和 BN 材料时, 存在介电损耗, 一部分能量会转化为热能<sup>[16]</sup>, 即:

$$P = 2\pi f \epsilon \tan \delta |E|^2$$

其中:  $P$  为热功率;  $f$  为微波频率;  $\epsilon$  为材料相对介电常数;  $\delta$  为介电损耗角;  $E$  为材料中的电场强度。BN 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷均为低介电损耗材料,  $\tan \delta$  约为  $5 \times 10^{-4}$ 、入射微波功率为 1 000 W 时, 沉积在 BN 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷内的热功率在 W 量级。

阻抗匹配时入射微波能量几乎均被馈入弧腔, 用于激发、维持等离子体, 等离子体能量主

要通过壁面碰撞以热能的形式传递给弧腔。本文所述 ECR 离子源弧腔直径为 50 mm、长度为 70 mm, 假设等离子体与弧腔壁面碰撞的概率处处相等, 则约有 13% 的能量传递到微波窗 BN 表面。由于在微波窗附近通常存在 1 个 ECR 面, 会形成 1 个高密度的等离子体区域, 且 ECR 离子源径向上用磁镜场来约束等离子体, 故等离子体中相当一部分能量纵向传递给了微波窗。离子源工作时微波功率一般为 300~600 W, 微波窗 BN 面承受的热功率在百 W 量级, 模拟中选用 100 W 作具体分析。

回流电子来源主要有 4 类: 1) 离子束与残余(本底)气体碰撞产生的电子, 即空间电荷补偿电子<sup>[17]</sup>; 2) 束流散射到电极上产生的二次电子; 3) 电极间可能存在的潘宁放电产生的电子; 4) 电极热发射、场致发射产生的电子, 其中等离子体电极和抑制电极之间的引出区产生的空间电荷补偿电子几乎不可避免。离子源正常工作状态下, 抑制电极电流由束流散射离子和上述电子形成, 一般小于 0.5 mA, 调试时也存在超过 2 mA 的情况, 引出电压取 50 kV, 回流电子束功率最大可达 100 W。离子源打火时, 抑制电源过流保护, 回流电子束功率急剧增大, 微波窗会在短时间内损坏。

## 3 微波窗有限元分析

### 3.1 模型设置

为探究微波、等离子体和电子束对微波窗的影响, 利用有限元软件 COMSOL 对其进行了模拟计算。与离子源剖面对应, 模型包括脊波导、微波窗、弧腔及弧腔外面包裹的水冷套筒, 如图 5 所示。将水冷套筒侧面和脊波导上下两面温度设置为 25 °C, 以模拟实际水冷状况。模型前后两端设置为固定约束。  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷和 BN 的基本物性参数分别列于表 1、2。陶瓷材料断裂是一个复杂的力学过程, 与材料初始裂纹分布和形态密切相关, 且应力越大, 裂纹扩展并导致材料破裂的概率越大<sup>[18]</sup>, 本文选择 Von Mises 等效应力定性分析  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷受力情况。

### 3.2 结果分析

#### 1) 微波窗温度与应力分布

ECR 离子源微波频率为 2.45 GHz, 在矩形波导中的传输主模为  $\text{TE}_{10}$ , 微波窗  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶

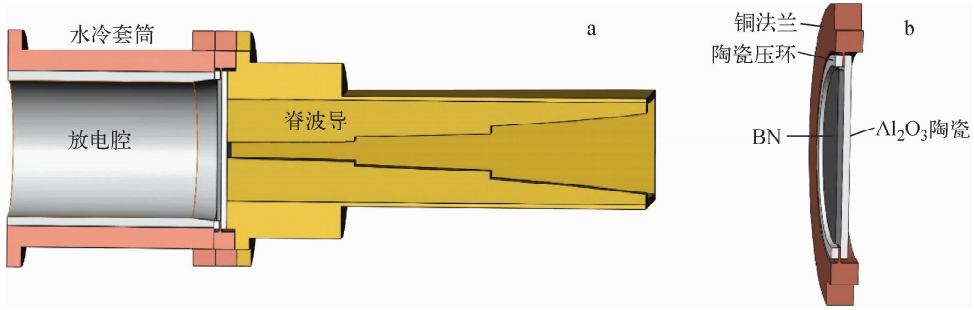


图 5 计算模型(a)及微波窗示意图(b)

Fig. 5 Calculation model (a) and schematic diagram of microwave window (b)

瓷半径为 28 mm,微波传输模式为  $TE_{11}$ 。微波输入功率设定为 1 000 W,阻抗匹配时,模拟得到  $Al_2O_3$  陶瓷和 BN 中的沉积功率约为 6 W。在微波作用下微波窗温度和应力分布如图 6 所示。温度在轴向上分布相对均匀,径向上中心

高、四周低,微波窗正面近似呈矩形,反面受脊波导的影响呈哑铃状,BN 和  $Al_2O_3$  陶瓷最高温度均为 27 °C。应力集中在两处:1)  $Al_2O_3$  陶瓷边缘与铜法兰焊接处(陶瓷压环与 BN 之间),最大值为 86 MPa;2) 陶瓷片背面中间部分,最大值为 53 MPa。

表 1  $Al_2O_3$  陶瓷的基本物性参数

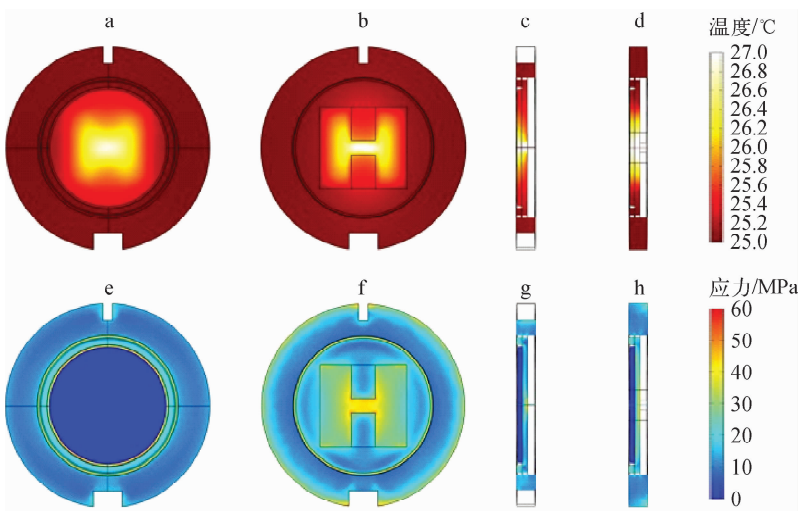
Table 1 Basic physical property of  $Al_2O_3$  ceramic

参数	数值
热导率, $W/(m \cdot K)$	27
密度, $kg/m^3$	3 900
弹性模量, GPa	300
泊松比	0.22
比热容, $J/(kg \cdot K)$	900
抗弯强度, MPa	360
热膨胀系数, $K^{-1}$	$8 \times 10^{-6}$
断裂韧性, $MPa \cdot m^{1/2}$	4

表 2 BN 的基本物性参数<sup>[19]</sup>

Table 2 Basic physical property of BN<sup>[19]</sup>

参数	数值
热导率, $W/(m \cdot K)$	29
密度, $kg/m^3$	1 250
弹性模量, GPa	11
泊松比	0.23
比热容, $J/(kg \cdot K)$	1 200
热膨胀系数, $K^{-1}$	$4 \times 10^{-6}$



a, b, c, d——温度分布; e, f, g, h——应力分布

a, e 朝向弧腔; b, f 朝向脊波导; c, g 为竖直切面; d, h 为水平切面

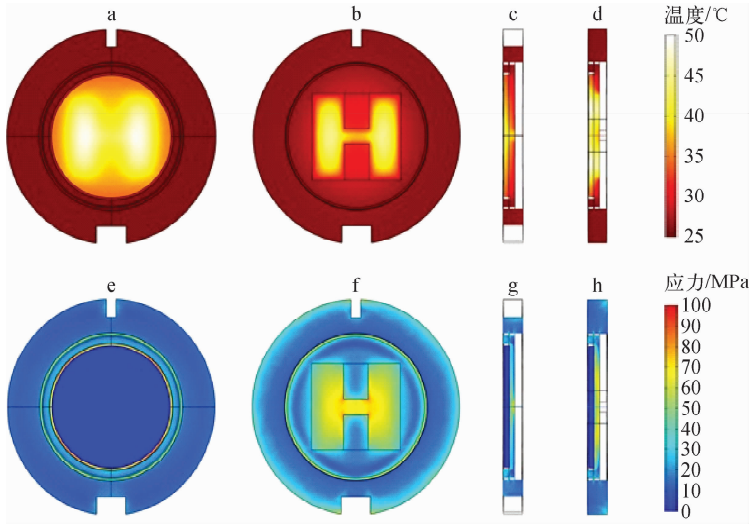
图 6 在微波作用下微波窗温度和应力分布

Fig. 6 Temperature and stress distributions of microwave window under microwave action

等离子体与微波窗接触面积较大,通过在BN表面施加面热源的方式来模拟计算,热源功率为100 W,在等离子体作用下微波窗温度和应力分布如图7所示。相比于微波,等离子体加热条件下温度分布受脊波导影响更明显,微波窗正反两面均呈哑铃状,BN最高温度为49℃,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷最高温度为47℃。应力分布同样集中在两处:1) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷边缘与铜法兰焊接处,最大值为126 MPa;2) 陶瓷片背面

靠中间部分,最大值为87 MPa。

电子束能量集中在微波窗BN表面中心很小的区域,模拟中用半径1 mm的点源代替,功率设置为100 W。在电子束作用下微波窗温度和应力分布如图8所示。温度集中在微波窗BN中心区域,BN最高温度为638℃,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷最高温度为320℃。最大应力(512 MPa)出现在Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷中心靠近BN材料的一面,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷边缘处最大应力为133 MPa。

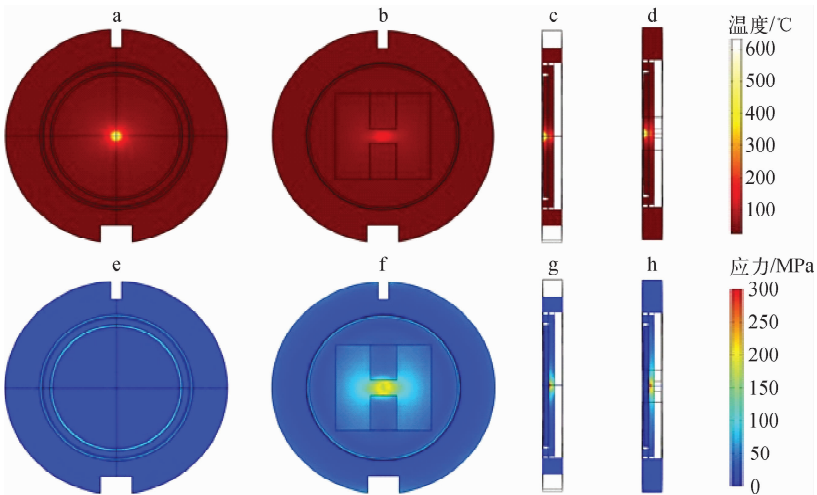


a, b, c, d——温度分布; e, f, g, h——应力分布

a, e 朝向弧腔; b, f 朝向脊波导; c, g 为竖直切面; d, h 为水平切面

图7 在等离子体作用下微波窗温度和应力分布

Fig. 7 Temperature and stress distributions of microwave window under plasma action



a, b, c, d——温度分布; e, f, g, h——应力分布

a, e 朝向弧腔; b, f 朝向脊波导; c, g 为竖直切面; d, h 为水平切面

图8 在电子束作用下微波窗温度和应力分布

Fig. 8 Temperature and stress distributions of microwave window under backstreaming electron action

对于入射功率为 1 000 W 的微波, 100 W 的等离子体在  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷内产生的最大热应力远小于其抗弯强度(本文取 360 MPa), 微波窗破裂概率较小; 在 100 W 电子束作用下,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷最大应力超过了其抗弯强度, 破裂概率较大。

2)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷应力变化规律

在前文所述计算条件下,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷最大应力随温度的变化情况如图 9 所示, 图 9 中各曲线最右端对应热平衡时的温度和应力。微波、等离子体加热时,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷窗边缘处应力最大, 应力与温度呈正相关, 温度(大于 24 °C)较高时, 应力随温度变化近似呈线性关系。电子束加热时,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷最大应力随其最大温度升高线性增大。相比于等离子体, 微波沉积在微波窗中的能量很少, 对微波窗的影响也较小。相同功率的等离子体和电子束分别作用于微波窗, 电子束对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷窗的影响远大于等离子体。

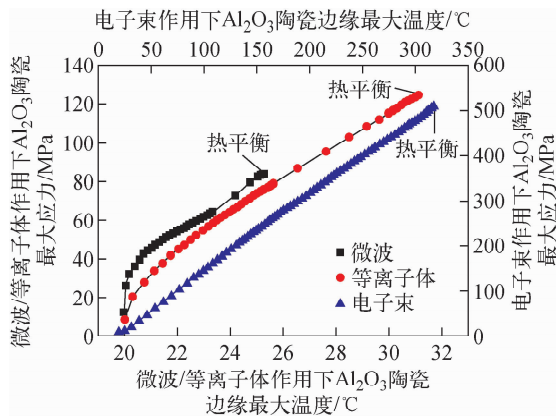


图 9  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷最大应力随温度的变化  
Fig. 9 Maximum stress of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramic vs temperature

$\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷窗最大应力随加热时间的变化情况如图 10 所示, 3 种因素分别作用于微波窗, 均在 10 s 左右建立起热平衡, 但在电子束作用下, 陶瓷窗 1 s 左右所受应力即大于 400 MPa, 大功率电子束在极短时间内即可能损坏微波窗。

仅改变加热功率, 分别计算了等离子体和电子束不同功率下,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷最大应力的变化, 结果如图 11 所示, 应力随加热功率线性变化。等离子体加热功率由 100 W 增长到 1 000 W, 最大应力由 124.7 MPa 变为 674 MPa。电子束加热功率由 10 W 增加至 100 W, 最大应力由

77.5 MPa 增加至 508.6 MPa。

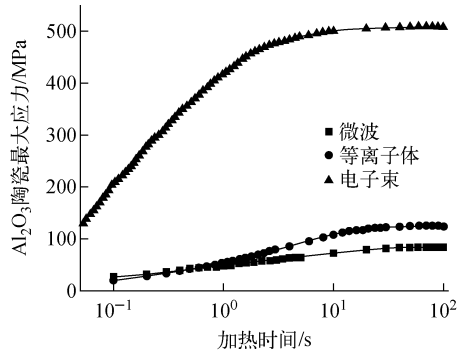


图 10  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷最大应力随加热时间的变化  
Fig. 10 Maximum stress of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramic vs time

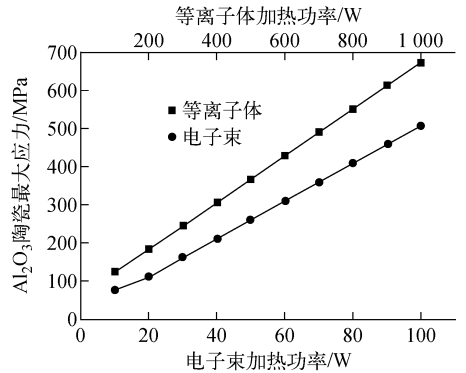


图 11  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷最大应力随功率的变化  
Fig. 11 Maximum stress of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramic vs power

3) 解决方案

通过改变水冷套筒和脊波导上下表面的温度, 模拟计算冷却效果不同时微波窗的应力响应, 结果如图 12 所示。环境温度设置为 25 °C

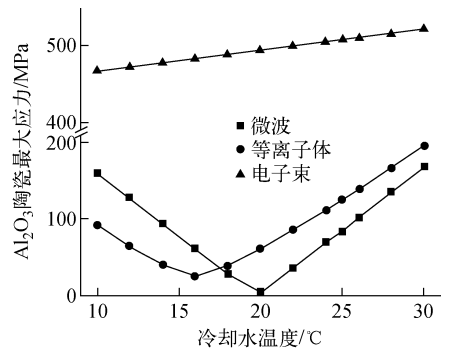


图 12  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷最大应力随冷却水温度的变化  
Fig. 12 Maximum stress of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramic vs cooling temperature

时,冷却水温度从 30 °C 降低至 20 °C,在微波和等离子体作用下,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷最大应力分别减少了 97% 和 69%。但温度进一步降低时,冷却水作为冷源增大了微波窗的温度梯度,应力转而增大。电子束加热的情况下,虽然陶瓷窗应力随冷却水温度降低而持续下降,但绝对值始终处于较高的状态。

计算了微波窗 BN 厚度变化时,在微波、等离子体和电子束作用下微波窗的应力响应,结果如图 13 所示。BN 厚度由 1 mm 增加到 10 mm,在微波和等离子体作用下,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷最大应力几乎不变,但在电子束作用下,应力由 771 MPa 变为 123 MPa。但 BN 厚度增加,会对微波馈入产生一定影响,从弧腔微波储能的角度看<sup>[20]</sup>,BN 厚度越大,微波能量馈入得越少(图 14)。在电子束作用下,BN 厚度由 1 mm 变为 3 mm,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷最大应力减小了 61%,弧腔微波储能减少了 20%。实际选用的 BN 厚度在 2 mm 左右,并采取中心加厚的方式增加使用寿命。

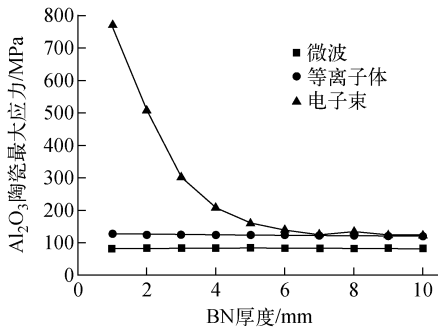


图 13 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷最大应力随 BN 厚度的变化

Fig. 13 Maximum stress of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic vs BN thickness

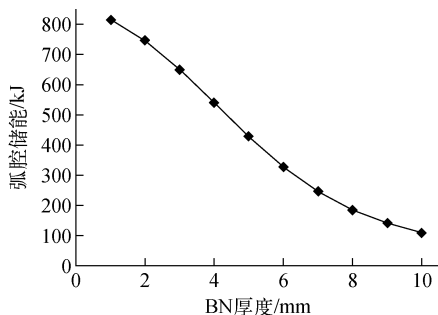


图 14 弧腔储能随 BN 厚度的变化

Fig. 14 Stored energy of arc chamber vs BN thickness

## 4 实验验证

对本文所述的 ECR 离子源,微波窗 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷厚 2 mm、BN 厚 2 mm 时,冷却水温度 35 °C、水压 1 kg/cm<sup>2</sup>、30 mA/40 kV 氢离子束引出情况下寿命为 3 h;冷却水温度 20 °C、水压 4 kg/cm<sup>2</sup>、40 mA/40 kV 氢离子束引出情况下寿命超过 1 周。换用 2 mm 厚 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷和 1 mm 厚 BN 组合的微波窗,冷却水温度 20 °C、水压 4 kg/cm<sup>2</sup>、40 mA/40 kV 氢离子束引出情况下寿命为 45 h。实验结果表明,提高水冷效果和 BN 厚度有利于延长微波窗寿命。

## 5 结论

微波窗在 ECR 离子源强直流束工作模式下属于易损耗部件,限制了离子源的使用寿命和维护周期。利用有限元软件分析了微波、等离子体和回流电子束 3 种因素对微波窗的影响。在微波和等离子体作用下,微波窗 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷边缘处应力最大,从边缘位置开始出现裂纹的可能性较高,通过增强水冷的方式可降低微波和等离子体的影响。在电子束作用下,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷最大应力出现在中心位置,从中部开始产生裂纹,增加 BN 厚度能有效降低电子束的影响。实际应用中,通过调整冷却铜管位置改进微波窗水冷状态,整体加厚 BN 或增加 BN 中心区域厚度,以增加微波窗寿命。

## 参考文献:

- [1] 魏宝文,赵红卫. 离子的喷泉:电子回旋共振离子源[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
- [2] LIU S H, WANG Z J, JIA H, et al. Physics design of the CiADS 25 MeV demo facility[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2017, 843: 11-17.
- [3] TUSKE O, CHAUVIN N, DELFERRIERE O, et al. Commissioning of the ECR ion source of the high intensity proton injector of the facility for antiproton and ion research (FAIR)[J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(5): 052303.
- [4] WU Y C. Development of high intensity D-T fusion neutron generator HINEG[J]. International Journal of Energy Research, 2018, 42(1): 68-72.

- [5] GOBIN R, BOGARD D, CARA P, et al. International fusion materials irradiation facility injector acceptance tests at CEA/Saclay; 140 mA/100 keV deuteron beam characterization[J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(2): 02A918.
- [6] 卢小龙, 马占文, 黄智武, 等. 强流氘束引出系统与加速管束流匹配的研究[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(8): 1 519-1 525.  
LU Xiaolong, MA Zhanwen, HUANG Zhiwu, et al. Study on beam matching of extraction system and accelerating column for high current deuterium beam[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(8): 1 519-1 525(in Chinese).
- [7] 贾泽华, 李公平, 潘小东, 等. 用于强流中子发生器的低能束流传输线的设计模拟[J]. 原子核物理评论, 2017, 34(3): 314-319.  
JIA Zehua, LI Gongping, PAN Xiaodong, et al. Design and simulation of low energy beam transport line for intense neutron generator[J]. Nuclear Physics Review, 2017, 34(3): 314-319(in Chinese).
- [8] GOTO T, SATO K I, YABUTA Y, et al. Mirror-field confined compact plasma source using permanent magnet for plasma processings [J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(12): 123508.
- [9] JAIN S K, SHARMA D, SENECHA V K, et al. Study of microwave components for an electron cyclotron resonance source; Simulations and performance[J]. Sadhana, 2014, 39(4): 901-920.
- [10] WU Q, SUN L T, CUI B Q, et al. Design of an intense ion source and LEBT for Jinping Underground Nuclear Astrophysics experiments[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2016, 830: 214-218.
- [11] PENG S X, XU R, ZHAO J, et al. The influence of magnetic field configuration on an electron cyclotron resonance ion source[J]. Review of Scientific Instruments, 2008, 79(2): 02A310.
- [12] TORII Y, SHIMADA M, WATANABE I. Advanced high-current ECR ion sources for implanters[J]. Review of Scientific Instruments, 1992, 63(4): 2 559-2 561.
- [13] PENG S X, ZHANG A L, REN H T, et al. Continuous operation of 2.45 GHz microwave proton source for 306 hours with more than 50 mA DC beam[J]. Chinese Physics B, 2015, 24(7): 075203.
- [14] 唐兵, 崔保群, 马瑞刚, 等. CIAE 强流 ECR 离子源研制[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(增刊): 544-546.  
TANG Bing, CUI Baoqun, MA Ruigang, et al. Development of high current ECR ion source at CIAE[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(Suppl.): 544-546(in Chinese).
- [15] LAGNIEL J M, BEAUVAIS P Y, BOGARD D, et al. Status and new developments of the high intensity electron cyclotron resonance source light ion continuous wave, and pulsed mode (invited) [J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(2): 830-835.
- [16] 郭瑞松, 蔡苏, 季惠明, 等. 工程结构陶瓷[M]. 天津: 天津大学出版社, 2002.
- [17] WINKLEHNR D, LEITNER D. A space charge compensation model for positive DC ion beams [J]. Journal of Instrumentation, 2015, 10(10): T10006.
- [18] 龚江宏. 陶瓷材料断裂力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001: 125-171.
- [19] 李端, 张长瑞, 李斌, 等. 氮化硼透波材料的研究进展与展望[J]. 硅酸盐通报, 2010, 29(5): 1 072-1 078.  
LI Duan, ZHANG Changrui, LI Bin, et al. Progress and prospect of wave-transparent boron nitride materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2010, 29(5): 1 072-1 078(in Chinese).
- [20] MEGIA-MACIAS A, CORTAZAR O D, VIZCAINO-de-JULIAN A. Influence of microwave driver coupling design on plasma density at test bench for ion sources plasma studies, a 2.45 GHz electron cyclotron resonance plasma reactor[J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(3): 033310.