

# 325 MHz 高功率波导窗设计研究

秦成, 朱志斌, 杨誉, 吴青峰, 窦玉玲, 王修龙

(中国原子能科学研究院 核技术应用研究所, 北京 102413)

**摘要:** 为了使漂移管加速结构运行更加稳定, 传输功率可更好地馈入质子直线加速器中, 本文对漂移管加速结构的波导窗进行设计与研究。利用微波仿真软件 CST 对波导窗的结构进行计算, 并通过改善匹配结构对射频参数进行分析及优化。通过仿真结果计算频率带宽、电场分布及功率损耗。最终对波导窗进行热分析, 通过公式计算所需冷却水的流量。结果表明, 该波导窗可应用于 325 MHz 加速结构中。

**关键词:** 波导窗; 驻波比; 漂移管加速结构

中图分类号: TL53

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2020)05-0870-06

doi: 10. 7538/yzk. 2019. youxian. 0582

## Design of 325 MHz High Power RF Window

QIN Cheng, ZHU Zhibin, YANG Yu, WU Qingfeng,  
DOU Yuling, WANG Xiulong

(*Department of Nuclear Technology Application,  
China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*)

**Abstract:** In order to make sure that the drift tube linac could work more stable and the transmission power could be fed into the linac better, the waveguide window of accelerating structure was designed and studied in this paper. The structure of waveguide window was calculated by CST, and the RF parameters were analyzed and optimized by improving the matching structure. Then the frequency bandwidth, electric field distribution and power loss were calculated by the simulation result. Besides, the thermal analysis of the RF window was carried out, and the flow rate of the cooling water was calculated by the formula. The result shows that the waveguide window can be applied to the 325 MHz acceleration structure.

**Key words:** waveguide window; standing wave ratio; drift tube linac

强流质子直线加速器根据接入的束流时间结构可分为连续束和脉冲束两类。连续束质子加速器可用于核能领域, 如嬗变核废料、增殖核燃料、提供洁净核能<sup>[1]</sup>等。脉冲束强流质子直

线加速器可提供高通量的质子和中子, 是具有重要价值的科学研究装置<sup>[2-5]</sup>。质子加速器还可应用于放射医疗及粒子物理和核物理等领域的科学研究<sup>[6-8]</sup>。波导窗的性能对质子直线加

速器的性能及长期稳定运行起着重要作用。它的作用是隔离大气与加速管内的真空状态,并保证在馈入电磁波时,仅产生较小的插入损耗、反射损耗等。波导窗的结构、材料是影响其性能的主要因素,因此,本文利用 CST 软件对波导窗的结构设计、射频特性及温度变化进行研究计算,为后续的加工及应用打下基础。

## 1 波导窗结构及影响因素

### 1.1 波导窗结构

肖永川等<sup>[9]</sup>为中国散裂中子源(CSNS)设计了一种内部加脊的 324 MHz 波导窗结构,使电场主要分布于脊中间,减小了功率分布面积,从而使陶瓷片半径减小。其从高功率时陶瓷片的热应力是否小于其屈服强度、抽真空时与陶瓷片相焊接的薄壁所受应力是否小于其机械强度、窗内是否会发生打火现象 3 个方面分析了波导窗的可靠性,从理论上验证了这种波导窗应用在 CSNS 上的可行性。

美国散裂中子源(SNS)设计了一种新型波导窗结构,其陶瓷片可拆卸,若陶瓷片发生破裂等情况可对其进行更换。这种窗真空侧的矩形窗体高度仅为大气侧的一半,且在真空侧采用了锥形脊的结构,使得陶瓷片附近电场强度的峰值明显减小,插入损耗最小可达 0.002 6 dB,从而能有效降低陶瓷片发生破裂的情况<sup>[10]</sup>。

本文设计的波导窗结构为 Pillbox 盒型窗(图 1),这种波导窗的结构较为简单,两边由 WR2300 矩形波导组成,中间连接一段圆柱形过渡波导,圆柱波导间插入一圆形介质窗片,波导材料选用无氧铜,介质窗片选用氧化铝陶瓷片,陶瓷片与无氧铜圆波导之间可通过镀膜钎焊等方法连接。

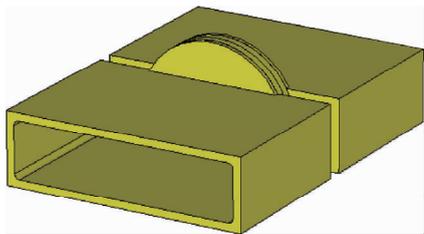


图 1 Pillbox 盒型窗

Fig. 1 Pillbox window

### 1.2 波导窗影响因素

1) 窗片厚度和几何尺寸。在波导窗设计中,会根据不同需求设计不同形状的窗片,其中较为普遍的是圆形窗片。窗片直径大小决定着波导窗制作过程的复杂程度,在窗片与圆波导焊接过程中,若窗片直径过大,则导致圆波导直径相应增大,不易于加工,且高次模不易截止,易发生窗片破裂等情况。若窗片直径太小,则不利于较高的微波功率传输,同时在波导连接中也不易做到带宽的匹配。而窗片厚度则影响波导窗的损耗、驻波及机械强度。

2) 窗片位置。若窗片两边圆波导长度相等则被称为对称窗,此时两端矩形波导一般也为同样尺寸的标准波导,这种窗的工作频带较宽。

3) 窗片材料。介电常数和介质损耗对波导窗的性能起着重要作用,二者对驻波系数、频带特性、窗片散热性能均有较大影响。选取窗片材料时,需同时考虑封接、焊接和应力平衡等因素。窗片在实际工作中常会发生二次电子倍增效应,可在真空一侧涂覆低二次电子发射的涂层来改善该情况<sup>[11]</sup>。

4) 焊接工艺。虽然陶瓷窗片与圆波导的焊接过程并不复杂,但在焊接过程中焊料是否均匀流散,影响着窗片损耗特性和驻波系数的好坏。若焊料未能均匀流散,则窗片和波导将连接成不对称或不均匀,从而导致不同频率的微波在穿过窗片过程中变化得不连续,或直接增加了介质窗片损耗。陶瓷片与波导段较为常见的焊接方法有 3 种:Ti-Ag-Cu 活性金属法、Mo-Mn 高温金属化法、氧化物焊料法<sup>[12]</sup>。

5) 波导窗中矩形波导与圆波导过渡段的波导板的尺寸、形状和封接工艺,对波导窗的性能有一定的影响。圆波导与矩形波导之间一般为直接跃变,即二者之间的夹角为  $90^\circ$ ,跃变的不连续性会引起并联电感和电容变化。可通过将波导窗圆波导与方波导的夹角设计为钝角的方式,即改变波导截面封接板的形状和位置,以减少窗片表面电场垂直分量,有利于抑制二次电子倍增效应。

6) 波导窗的散热和冷却措施影响其功率容限和寿命。波导窗的冷却效果越好,窗片的热积累越少,波导窗能承受的功率越大,其寿命也越长。

## 2 波导窗参数计算

### 2.1 窗片材料选择

目前较为常见的介质窗片有3种,分别为陶瓷窗片、玻璃窗片及宝石窗片。

1) 陶瓷窗片,常见的材料有氮化硼陶瓷、氧化铍陶瓷、氧化铝陶瓷等。氮化硼相对介电常数较低、导热系数大、热稳定性优良、机械强度适中,但成本较高,封接较困难;氧化铍导热能力最好,但气密性较差,且具有毒性、加工复杂,对环境会造成不良影响;氧化铝具有较好的导热性能,机械强度适中、相对介电常数较高、频带较窄<sup>[13-14]</sup>。

2) 玻璃窗片,玻璃的介电常数较低,能满足较宽的频带,但机械强度低、导热性能差、承受功率低。

3) 宝石窗片,具有机械强度大、气密性高、可耐受焊接及真空排气时的高温等特点,相对介电常数偏高、导热率一般,而天然宝石较为稀有,因此在电真空器件及电子光学器件中大多数使用的为人造蓝宝石材料,在传输功率较低的盒型窗中较为常见<sup>[15]</sup>。

综合考虑,陶瓷窗片更具有优势,而陶瓷窗片中,无毒、介电常数较高、机械强度较强、价格适中的氧化铝陶瓷为最恰当的选择。高功率下的射频损耗主要来自于陶瓷片里的氧化镁杂质。若采用高纯度的陶瓷片,便可减小氧化镁杂质所带来的射频损耗。因此,有必要提高陶瓷片的纯度,以减少因陶瓷片自身缺陷所带来的影响。且当传输高功率微波时,低纯度的陶瓷片的导热性能较差,易造成局部过热,从而损坏陶瓷片。本文选用介电常数为9.9的99.5%高纯度氧化铝陶瓷片作为波导窗的介质窗片。

### 2.2 射频参数计算

通过对波导窗的结构进行理论分析,在325 MHz工作频率下,采用仿真软件CST对结构参数进行优化计算,得到波导窗结构参数与电压驻波比 $\rho$ 、反射损耗 $S_{11}$ 、插入损耗 $S_{21}$ 等之间的变化关系,如图2~5所示。可看出,陶瓷片半径、厚度、间隔及波导板厚度会对波导窗的电压驻波比、反射损耗与插入损耗产生较大的影响。在325 MHz工作频率下,陶瓷片半径、厚度越大,电压驻波比、反射损耗、插入损耗越小。陶瓷片间隔越小,电压驻波比、反射损

耗、插入损耗越小。而随着波导板厚度的增大,电压驻波比与 $S_{11}$ 先减小后增大, $S_{21}$ 则先增大后减小,当厚度为11 mm左右时,其电压驻波比、反射损耗、插入损耗达到一极值。

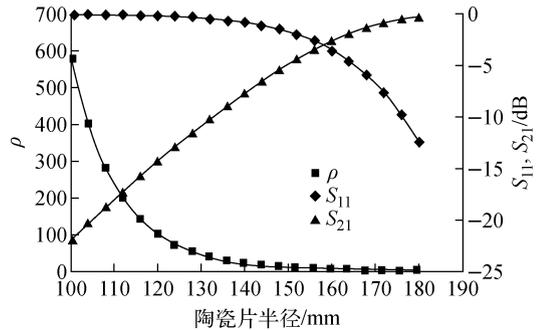


图2  $S_{11}$ 、 $S_{21}$ 和 $\rho$ 随陶瓷片半径的变化  
Fig. 2  $S_{11}$ ,  $S_{21}$ , and  $\rho$  vs ceramic chip radius

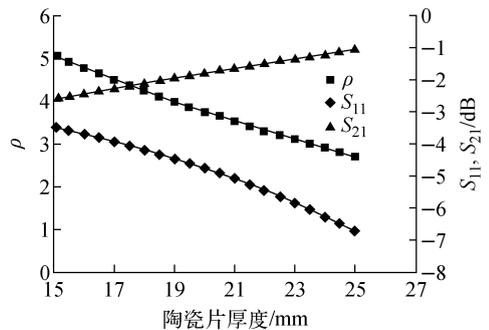


图3  $S_{11}$ 、 $S_{21}$ 和 $\rho$ 随陶瓷片厚度的变化  
Fig. 3  $S_{11}$ ,  $S_{21}$ , and  $\rho$  vs ceramic chip thickness

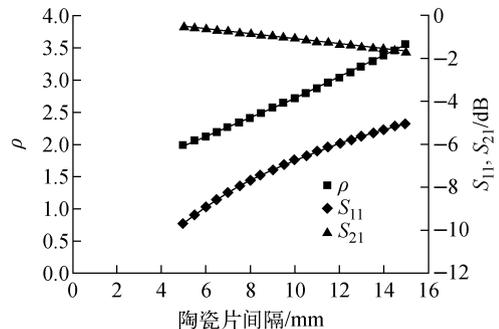


图4  $S_{11}$ 、 $S_{21}$ 和 $\rho$ 随陶瓷片间隔的变化  
Fig. 4  $S_{11}$ ,  $S_{21}$ , and  $\rho$  vs ceramic chip spacer

在进行结构设计时,陶瓷片半径不宜过大,不利于圆波导的焊接及热量的散发,且过厚还会导致反射损耗的增大,降低其电磁波的传输效率。当陶瓷片中积累的热量所产生的热应力大

于陶瓷片自身的屈服强度时,会造成陶瓷片破裂。若陶瓷片太薄,其机械性能及真空气密性将降低。因此,综合考虑各方面因素后,选取合适的波导窗结构尺寸,再通过改变波导内倒角等结构尺寸进行微调,最终使其达到设计指标。

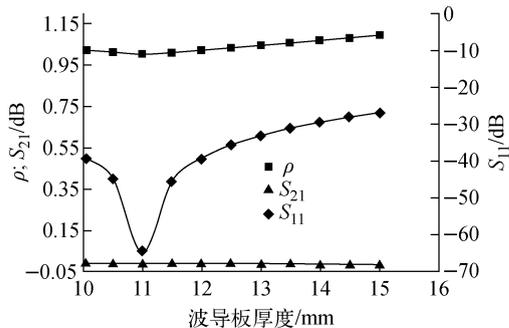


图 5  $S_{11}$ 、 $S_{21}$  和  $\rho$  随波导板厚度的变化

Fig. 5  $S_{11}$ ,  $S_{21}$ , and  $\rho$  vs waveguide thickness

### 3 波导窗结构设计

对波导窗进行设计优化时,需通过对波导窗的射频电磁场的反射、场分布、场大小及方向的计算分析,多次迭代改进波导窗的结构参数,从而达到设计要求。

首先需降低波导窗内反射,避免反射引起的射频电击穿,以提高波导窗的承受功率。当微波从矩形波导过渡到圆波导及通过高介电常数的陶瓷片时,均会产生较大的反射现象,可能会发生射频电击穿现象,从而引起波导窗破裂,损坏高功率速调管和电子枪等加速器关键部件。根据散射参数网络理论,可通过调节波导板厚度和圆波导尺寸及相对位置,来降低波导窗的反射损耗。

其次是均匀化波导窗内的电磁场分布,避免因圆波导内部局部场强过高而引起的击穿现象。通过改善场方向,抑制二次电子倍增现象发生,避免局部过热而引起的陶瓷片破裂。

#### 3.1 波导窗尺寸及仿真结果

经过计算分析后,确定的波导窗结构尺寸列于表 1。

通过 CST 进行仿真,其主要参数计算结果如图 6~8 所示。可看出,在 325 MHz 工作频率下,反射损耗为  $-73.8085$  dB,插入损耗为  $0.0032$  dB,电压驻波比为  $1.0004$ 。

表 1 波导窗结构尺寸

Table 1 Structure size of waveguide window

参数	数值/mm
方波导端口宽	548.2
方波导端口高	292.1
方波导段长度	400
波导板厚度	11
陶瓷片半径	185
陶瓷片厚度	26
陶瓷片间隔	10

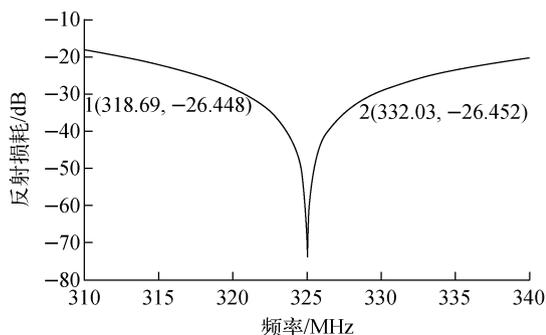


图 6 波导窗的反射损耗

Fig. 6  $S_{11}$  of waveguide window

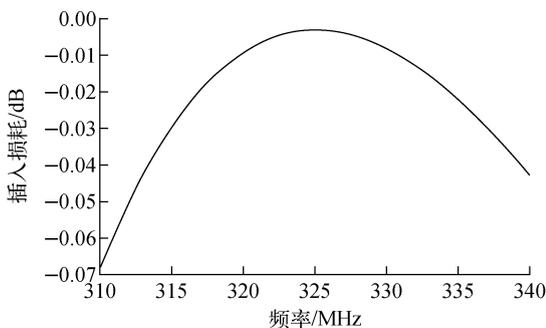


图 7 波导窗的插入损耗

Fig. 7  $S_{21}$  of waveguide window

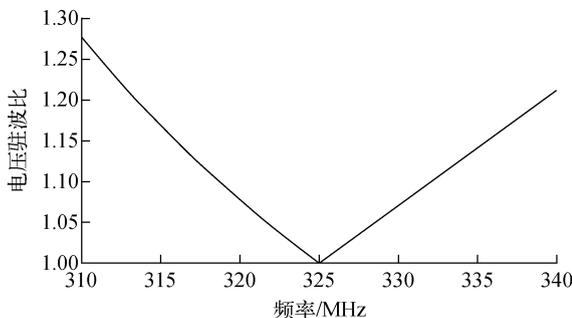


图 8 波导窗的电压驻波比

Fig. 8  $\rho$  of waveguide window

通过式(1)、(2)可计算波导窗的频率带宽:

$$\tau = (\rho - 1)/(\rho + 1) \quad (1)$$

$$S_{11} = 20 \lg \tau \quad (2)$$

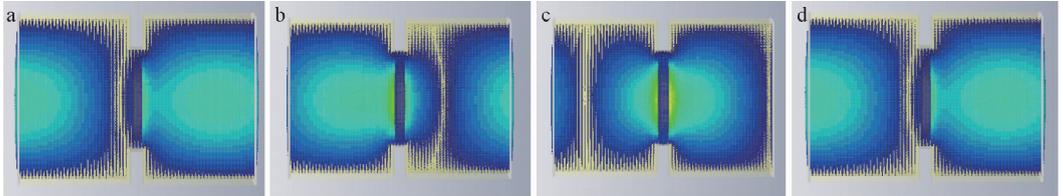
其中: $\rho$ 为电压驻波比,取其设计目标 1.1 作为参考点计算; $\tau$ 为比例系数。

经过计算可得到  $S_{11} = -26.444$  dB,从图 6 中 1、2 两个标记点可看出,其所对应的频

率分别为 318.69 MHz 及 332.03 MHz,因此该波导窗的频率带宽为  $\pm 6$  MHz。

### 3.2 波导窗内场分布随相位的变化

已知在大气侧空气的击穿场强为 3 MV/m,经计算可得到该波导窗电场强度为 0.5 MV/m,小于临界值,打火概率较小。场分布随相位的变化如图 9 所示。



相位: a—0°; b—60°; c—120°; d—180°

图 9 不同相位时的场分布

Fig. 9 Field distribution at different phases

### 3.3 温度变化及功率损耗

CST 仿真计算结果表明,在 325 MHz 工作频率下,该波导窗具有较小的功率损耗,由图 7 可得到其插入损耗为 0.003 2 dB,已知波导窗所设计的输入功率  $P_{in}$  为 100 kW,根据式(3)、(4),可求得输出功率  $P_{out}$  为 99.93 kW,损耗功率为输入功率的 0.07%,经计算得到冷却系统所需水流量  $F$  为 1 L/m。

$$S_{21} = 10 \lg(P_{in}/P_{out}) \quad (3)$$

$$14.35(P_{in} - P_{out}) = \Delta T \times F \quad (4)$$

其中, $\Delta T$ 为温度变化量。

## 4 结论

本文运用软件 CST 进行了一系列的仿真计算与优化,确定了波导窗的结构及具体尺寸,得到了波导窗的性能参数。该波导窗具有较低的电压驻波、较低的功率损耗及较宽的频率带宽。在加工成型及通过高功率实验验证后,可应用于强流质子直线加速器的射频系统。

### 参考文献:

[1] FROLOVA T A. Optimization of breeding properties of the spallation neutron source target for ADS[J]. Nuclear Energy and Technology, 2017, 3(1): 60-64.  
[2] 陈和生. 中国散裂中子源[J]. 现代物理知识,

2016,28(1):3-10.

[3] LIU Huachang, PENG Jun, GONG Keyun, et al. The design and construction of CSNS drift tube linac[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2018, 911: 131-137.  
[4] GAROBY R, DANARED H, ALONSO I, et al. The European Spallation Source design[J]. Physica Scripta, 2018, 93(1): 2-121.  
[5] KIM S H, AFANADOR R, BARNHART D L, et al. Overview of ten-year operation of the superconducting linear accelerator at the spallation neutron source[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2017, 852: 20-32.  
[6] 郁庆长. 质子直线加速器设计研究[J]. 高能物理与核物理, 2001, 25(5): 429-435.  
YU Changqing. Study on design of proton linacs [J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2001, 25(5): 429-435 (in Chinese).  
[7] 周立农, 张沐天, 罗紫华, 等. 医用质子直线加速器的设计研究[J]. 高能物理与核物理, 1998, 22(11): 1 042-1 048.  
ZHOU Linong, ZHANG Mutian, LUO Zihua, et al. Preliminary design of a dedicated proton therapy linac[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 1998, 22(11): 1 042-1 048 (in Chinese).  
[8] 刘世耀. 质子治疗设备的现状和发展[J]. 基础

- 医学与临床,2005,25(2):123-127.
- LIU Shiyao. Current situation and development of proton therapy equipment[J]. Basic & Clinical Medicine, 2005, 25(2): 123-127(in Chinese).
- [9] 肖永川, 巩克凡, 荣林艳. 漂移管直线加速器高功率波导窗的物理设计[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(8): 2 031-2 034.
- XIAO Yongchuan, GONG Kefan, RONG Linyan. Design of high power RF window for drift tube linac[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(8): 2 031-2 034(in Chinese).
- [10] KANG Y, CHAMPION M, LEE S W, et al. High power RF couplers and windows at ORNL Spallation Neutron Source[C]// The 3rd Worldwide Meeting on Fundamental RF Power Coupler. [S. l.]: [s. n.], 2017.
- [11] 张雪, 王勇, 范俊杰, 等. 金属壁与介质窗之间次级电子倍增效应的研究[J]. 物理学报, 2014, 63(16): 167901.
- ZHANG Xue, WANG Yong, FAN Junjie, et al. Multipactor phenomenon between metal and dielectric window[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(16): 167901(in Chinese).
- [12] 张巨先, 苟燕红, 陈丽梅, 等. 高纯氧化铝陶瓷材料的焊接性能研究[J]. 真空电子技术, 2006(4): 14-16.
- ZHANG Juxian, XUN Yanhong, CHEN Limei, et al. Study of high pure alumina ceramic to metal joining[J]. Vacuum Electronics, 2006(4): 14-16(in Chinese).
- [13] 王茜, 苏党帅, 焦晓静, 等. 几种高功率微波介质窗材料的研究综述[J]. 材料导报, 2009, 23(14): 329-331.
- WANG Qian, SU Dangshuai, JIAO Xiaojing, et al. Review of research on high power microwave dielectric window materials[J]. Materials Review, 2009, 23(14): 329-331(in Chinese).
- [14] 张巨先. 低介电损耗、细晶  $Al_2O_3$  陶瓷材料应用性能研究[J]. 真空电子技术, 2013(4): 19-22.
- ZHANG Juxian. Review on application properties of low dielectric loss and fine grained  $Al_2O_3$  ceramics[J]. Vacuum Electronics, 2013(4): 19-22(in Chinese).
- [15] 袁广江, 卢玉华, 罗积润, 等. 蓝宝石输出窗的成功封接[J]. 真空科学与技术学报, 2004, 24(4): 299-302.
- YUAN Guangjiang, LU Yuhua, LUO Jirun, et al. Vacuum sealing of sapphire output windows in high power microwave device fabrication[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2004, 24(4): 299-302(in Chinese).