

SXFEL 与 SHINE 高功率 X 波段干负载研制

高子和^{1,2} 谭建豪³ 王程³ 黄晓霞³ 方方程³

1(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(中国科学院上海高等研究院 上海 201204)

摘要 上海软 X 射线自由电子激光装置(Shanghai soft X-ray Free Electron Laser, SXFEL)与上海硬 X 射线自由电子激光装置(Shanghai High repetition rate XFEL and Extreme light facility, SHINE)需要使用许多大功率微波元件,例如行波加速管、偏转腔、脉冲压缩器等。为了满足这些元件的高功率测试与运行的需求,研发了两台高功率不锈钢吸收负载,在 X 波段两台负载的工作频率分别为 11.424 GHz 和 11.988 GHz。通过模拟仿真的方法,设计了负载的初步模型,并优化了其微波参数。模拟结果显示两台负载在中心频率附近-20 dB 以下的带宽达到百兆赫兹以上。通过理论计算的方法计算了水路中的对流换热系数,并基于此对负载的机械模型进行了热分析,计算了其工作状态下的温度分布。两台负载模型均具有周期性凹槽的类波导结构,在完成负载的加工制造后,使用矢量网络分析仪对两种负载在装夹状态和焊接完成后的射频参数进行了测量。实验测试的结果与模拟计算的结果吻合较好,达到了设计要求。

关键词 干负载, X 波段, 功率吸收, 加速器

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.090206

Design and test of high power X-band dry load for SXFEL and SHINE

GAO Zihe^{1,2} TAN Jianhao³ WANG Cheng³ HUANG Xiaoxia³ FANG Wencheng³

1(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3(Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China)

Abstract [Background] The Shanghai soft X-ray Free Electron Laser (SXFEL) and the Shanghai High repetition rate XFEL and Extreme light facility (SHINE) are equipped with various high-power microwave components, including traveling wave accelerating tubes, deflection cavities, pulse compressors, etc. [Purpose] This study aims to develop two high-power stainless steel absorbing loads, so as to meet the testing and operational requirements of these components at high power levels. [Methods] Firstly, an initial load model was designed through simulation methods, and the microwave parameters were optimized. Then, the convection heat transfer coefficient in the waterway was calculated using theoretical calculations. Based on this information, thermal analysis was conducted on the mechanical model of the load to determine its temperature distribution under working conditions. Finally, the

国家自然科学基金(No.12175292, No.12105345)、"一带一路"国际科学组织联盟(No.ANSO-CR-KP-2020-16)资助

第一作者: 高子和, 男, 1997 年出生, 2020 年毕业于华东理工大学, 现为博士研究生, 研究领域为加速器物理与技术

通信作者: 方方程, E-mail: fangwc@sari.ac.cn

收稿日期: 2024-01-15, 修回日期: 2024-05-17

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.12175292, No.12105345), the Alliance of International Science Organizations in the Belt and Road Region (No.ANSO-CR-KP-2020-16)

First author: GAO Zihe, male, born in 1997, graduated from East China University of Science and Technology in 2020, doctoral student, focusing on accelerator physics and technology

Corresponding author: FANG Wencheng, E-mail: fangwc@sari.ac.cn

Received date: 2024-01-15, revised date: 2024-05-17

loads were manufactured and their RF parameters were measured using a vector network analyzer both in the clamping state and after welding. **[Results]** The two X-band loads feature a waveguide structure with periodic grooves, and are operated at 11.424 GHz and 11.988 GHz respectively. The simulation results show that the bandwidth of two loads below -20 dB near the center frequency reaches over 100 MHz. The experimental test results are in good agreement with the simulation calculation results, meeting the design requirements. **[Conclusions]** The developed high power X-band dry loads described in this study satisfy operating requirements for SXFEL and SHINE.

Key words Dry load, X-band, Power absorption, Accelerator

上海软X射线自由电子激光装置(Shanghai soft X-ray Free Electron Laser, SXFEL)与上海硬X射线自由电子激光装置(Shanghai High repetition rate XFEL and Extreme light facility, SHINE)产生的激光在基础科学领域能够发挥重要的作用。在这两台大科学装置中存在许多大功率的射频结构,例如SXFEL中使用到的行波加速管和行波偏转腔^[1-2],加速管通过对电子进行加速以获得高能量的电子束,而偏转腔则是利用横向偏转力来测量电子束的纵向束团长度,或作为束流与激光同步及辐射特征诊断的工具。同样在SHINE中,多套S波段和X波段偏转腔作为束团测量和束流诊断工具。在这些行波结构的末端会产生残余的微波能量,如果这些能量没有被充分地吸收,就会反射回电源,从而对电源造成损害。此外,为了满足某些微波器件的运行要求,例如脉冲压缩器^[3-4],其微波回路的设计并不是匹配的。这种情况下,反射功率的量级与功率源的量级是相当的^[5],进行高功率测试时需要安装环流器和负载以吸收反射功率。

射频负载一般分为干负载与水负载两种,其中水负载的真空度相对较低且容易损坏,如果发生破裂将会对真空度和射频系统造成巨大的损害,而与真空之间不存在任何介电界面的干负载,则没有这种问题^[6]。从吸收材料来看,干负载一般分为碳化硅(SiC)等损耗电介质和全金属两种。从腔体形状上看,可以分为矩形腔和圆柱形腔。大多数加速器系统都会开发相应的吸收负载。日本高能加速器研究组织(National Laboratory for High Energy Physics, KEK)针对正负电子直线对撞机开发有基于碳化硅的C波段射频负载,它的主体是由10个TM011腔组成的圆柱形腔链^[7]。1997年布德克尔核物理研究所(Budker Institute of Nuclear Physics, BINP)设计制造了一种材料为不锈钢的带锯齿表面的射频负载,随后欧洲核子中心(European Organization for Nuclear Research, CERN)在此基础上改进,开发了一种X波段的双频负载^[8-9]。美国斯坦福直线加速器中心(Stanford Linear Accelerator

Center, SLAC)针对圆柱形和矩形干负载都有相关研究^[10-11]。我国国家同步辐射实验室早在1994年针对直线加速器就设计了一款干负载^[6],随后又分别开发了一台水负载和一台不锈钢干负载^[12]。清华大学也在BINP基础上设计制造了一款S波段的射频吸收负载^[13-14]。

本文介绍了用于上海软X射线自由电子激光装置和上海硬X射线自由电子激光装置的射频干负载,工作频率分别为11.424 GHz和11.988 GHz,微波模式为TE01模。通过模拟仿真完成了其真空模型的设计与优化,使用多物理场的方法计算了结构的温升,完成了加工制造及低功率测试与调谐,实验结果符合预期。

1 设计分析与要求

传统干负载通常使用SiC等介电材料来吸收剩余的功率。这种材料的吸收效果好,但温升不稳定,且焊接较为复杂。除此之外,材料的微观结构给真空度的保持带来了麻烦,抽真空时需要进行烘烤来快速降低真空度。本文中的干负载采用全金属结构,焊接方法为氩弧焊,材料为型号SS430的不锈钢。常温下它的电阻率为 $0.6 \mu\Omega \cdot \text{m}$,磁导率为 $6 \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$,能够很好地阻尼表面电流。

X波段干负载的端口采用型号为BJ100(EIA-国际标准WR-90)的标准波导,与SXFEL和SHINE中的波导孔径一致。经过一段匹配段之后,截面尺寸变换为负载主腔体的尺寸(图1)。负载的主腔体分为4个部分:两段过渡段、一段吸收段和一段矩形腔。过渡段有两个作用:一是尽可能地减少反射;二是吸收一部分功率。吸收段是吸收功率的主要部分,吸收段越长,功率反射就越少。矩形腔的作用是留一部分空间在末端加一个真空抽口,避免其与腔体中的钢片冲突;此外,矩形腔的长度对共振峰的位置也有一定影响。最后,负载的末端预留一个真空抽口,在特殊情形下,此处可以连接检漏仪或机组等真空设备。

负载吸收剩余功率主要依靠腔体内的周期性片

状结构,这些结构平行于波导长边所在的面。这样做的原因在于:在波导与腔体中的微波模式均为TE01模,这样磁场的方向平行于片状结构表面,能极大地增加表面损耗,吸收微波功率。

根据微波系统的设计要求,系统内所有微波元件在工作频率处的驻波比 ≤ 1.2 。因此,X波段干负

载在设计时,要求工作频率处的驻波比 ≤ 1.2 ,且驻波比 ≤ 1.2 的频率范围要大于50 MHz,以保证加工误差造成的频率漂移不会超出该频率范围。在保证以上要求的情况下,片状结构的厚度和间距不能过大或过小,片与片之间的缝隙不能太深,否则会增加加工难度。

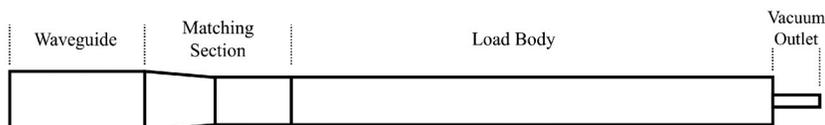


图1 吸收负载截面示意图
Fig.1 Diagram of the cross-section of the load

2 电磁仿真及优化

通过模拟仿真的方法对负载的几何参数进行了优化,以达到更大的带宽和更低的反射率。采用分段式的方法,把整个结构分开进行单独优化,最终进

行完整模型的仿真计算。为方便起见,该干负载结构分成两段,第一段是从BJ100波导口到匹配段结束,第二段是从过渡段开始至真空抽口(图2)。先单独优化波导至匹配的第一段,然后再在优化结果的基础上对整个结构进行系统性地调整参数。

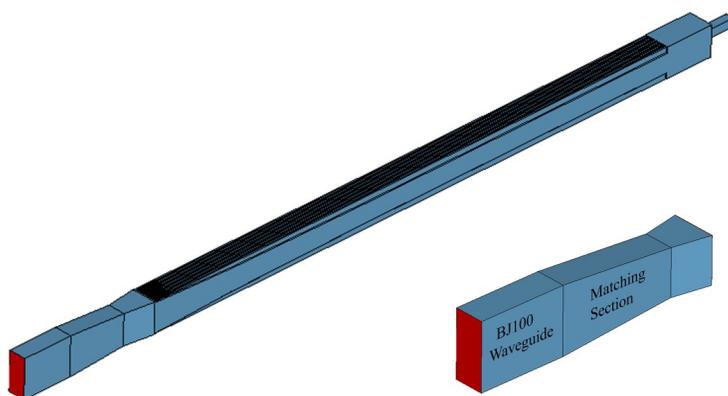


图2 负载真空模型示意图
Fig.2 Diagram of the vacuum model of load

2.1 波导口至匹配段仿真

匹配段的模型是两段斜面过渡,先将波导宽边尺寸过渡至腔体宽边尺寸,再进行窄边尺寸过渡。这样设计的优势在于,可以将反射做到足够小;但是也有一定的问题,比如腔体的两条边与匹配段的几何尺寸深度关联,在进行腔体尺寸调整时,之前计算的匹配段结果就不可靠了,需要重新验证。

匹配段模型中间有一个收窄的截面,调整这个截面在 z 轴上的位置,图3中的峰会左右移动。另外一个重要的参数是整个匹配段的长度,它们两个共同决定了 S_{11} 参数的峰值的位置和高度。通常情况下,在调整截面位置的时候,峰在移动的同时高度也发生着变化,且不是单调的,存在一个极值。调整匹配段的长度可以改变这个极值的位置。通过这样的

方式可以获得一个在很大频率范围内功率反射都很低的几何参数,最终结果如图3所示。

2.2 完整结构仿真

干负载全长0.5 m,其中片状结构设计为三个部分:两个不同斜率的斜坡组成的过渡段和结构高度不变的吸收段,如图4所示。

主要优化的目标有两个:一是在工作频率处的反射系数;二是在工作频率附近 S_{11} 曲线 -20 dB以下的频带范围。优化过程中,尽量使得反射系数小且频带范围宽。更小的功率反射代表负载能更好地吸收剩余功率,并且对功率源的损伤更小。考虑到X波结构频率高、负载尺寸小,对加工误差的敏感性高,在加工和焊接的过程中容易产生较大的频率漂

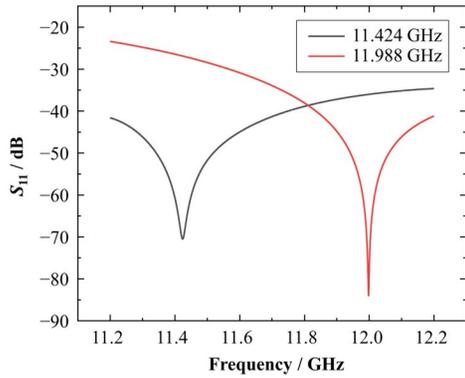


图3 匹配段模型 S_{11} 曲线
Fig.3 S_{11} curve of matching part

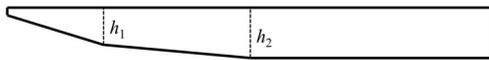
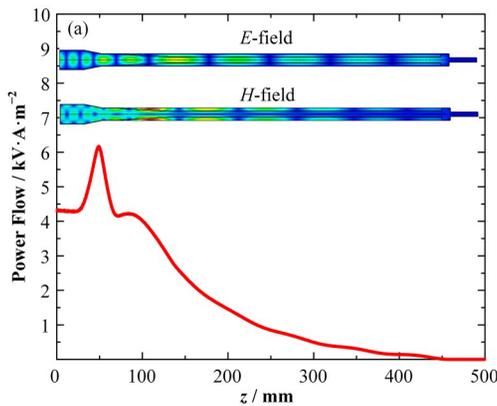


图4 吸收段中片状结构示意图
Fig.4 Diagram of the shape of lamellar textures

移。大的频带范围可以保证即使频率发生变化负载依然可以正常工作。

主要调整的参数有：片状结构的厚度与间隙、两段斜坡的斜率、吸收段片状结构的高度、腔体的尺寸等。其中，片状结构的厚度与间隙会影响功率吸收的效果，一般两者的数值比较接近；吸收段片状结构的高度会影响吸收峰的频率和吸收效果，通常情况下为腔体尺寸的1/4左右；腔体的尺寸主要影响吸收峰的频率，且在一定范围内对吸收效果不会产生较大的影响，所以在加工完成之后，还可以通过二次加工修正腔体尺寸，从而调整吸收峰的位置。最主要优化的参数是两段斜坡的斜率，它可以保证一个吸收峰位置不变的情况下调整另一个吸收峰的位置，从而使得两个吸收峰处于较为接近但没有完全融合的状态，这种情况下的频带范围会有明显的提升。



在优化的过程中，还要考虑到结构的长度，在保证性能的情况下尽量缩短结构的长度，以节省材料。在大范围内，吸收段的长度越长，吸收效果越好；但在小范围内，由于微波要在腔体内共振，腔体并不是越长越好，合理的长度能使功率吸收更好，反射更少。另外，片状结构的厚度和间距不能过大或过小，间距过窄，加工用的锯片就需要很薄，在加工过程中极易损坏；如果间距过宽，片状结构过薄，则片状结构容易损坏。

经过对各个参数的调整后，我们得到完整结构的 S_{11} 曲线如图5所示，分别在11.424 GHz和11.988 GHz处达到了-40 dB以下，-20 dB以下的频带范围达到了几百兆赫兹。

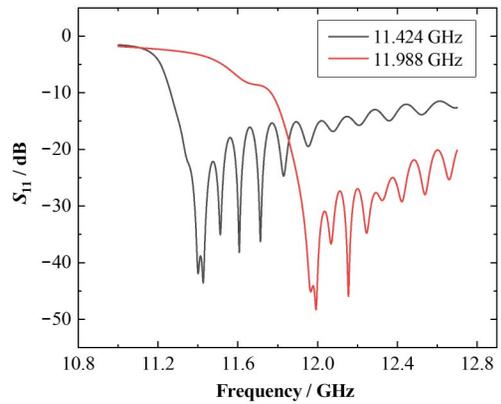


图5 对于完整结构仿真得到的 S_{11} 曲线
Fig.5 The S_{11} curve obtained by simulation of whole structures

观察轴线上的功率流分布(图6)，可以看到其在匹配段收窄处短暂增长，随后快速衰减。当观察微波场的动态变化时，其呈现出一种类似行波的、从波导口向负载末端运动的模式，而非驻波结构中的振荡形式。这种现象也标志着微波被负载充分地吸收。

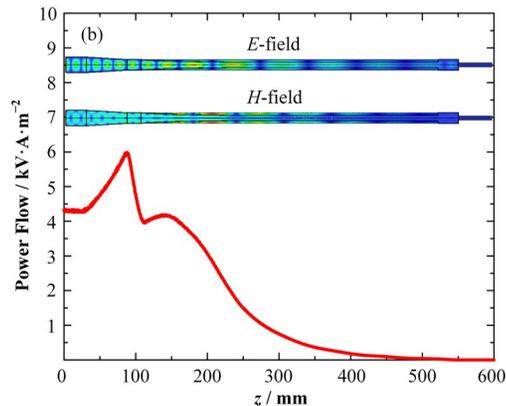


图6 负载中的电磁场与轴线上的功率流分布 (a) 11.424 GHz, (b) 11.988 GHz
Fig.6 The electromagnetic field in the load and the power flow distribution on the axis (a) 11.424 GHz, (b) 11.988 GHz

3 机械设计与测量

完成射频设计后,设计了结构的机械模型。加工完成后,使用网络矢量分析仪对两种负载进行了微波测量,并进行了误差分析。

3.1 机械设计

对于机械模型的初步设计以及加工过程中,均采用较为保守的策略。其主体由4块不锈钢板组成(图7),上下两个为具有片状结构的条形板,结构较为复杂,因此加工难度高,而两侧的侧板则加工较为简单,其宽度与腔体尺寸深度相关。初步加工的端板需要更宽一些,以预留一定的尺寸。完成加工后,对各配件进行装夹,并在该状态下进行一次测量,通

常情况下测量结果中吸收峰的频率偏低。根据测量结果,计算需要对端板进行二次切削的量。二次切削后,腔体尺寸变小,吸收峰向高频移动。这种调谐的方法是单向的,即无法使得吸收峰向低频移动。常规的加速管或高频腔结构,在装夹后进行测量,如果频率偏高,可以对结构的内表面进行二次加工,通过扩大内表面的方法使得频率向低频移动。与上述结构不同的是,负载的内表面过于复杂,且SS430不锈钢的硬度相较于无氧铜更高,二次加工是得不偿失的。如果测量得到的吸收峰频率偏高,可以通过更换侧板的方法重新修正其频率。首个干负载的加工完成,并进行了数次切削之后,测量结果达到要求,此时可得到实际合理的侧板尺寸,在后续的批量加工中直接加工到指定尺寸即可。

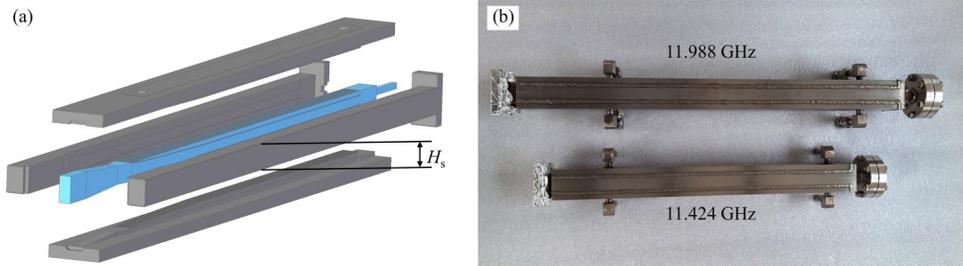


图7 负载的机械模型示意图(a)和负载实物图(b)
Fig.7 Diagram of mechanical model of the load (a) and photo of physical objects (b)

该结构中上下两个条形板开有水槽,在其中通水来吸收微波损耗产生的热量。对两台负载在高功率下的温升进行了计算。将在微波计算中得到的表面功率损耗分布导入到稳态热分析模块进行计算。其中,工作频率为11.424 GHz的负载用于SXFEL。考虑该负载在装置中的极限工作状态,即直接接在功率源上进行测试。功率源的峰值功率为16 MW,脉冲宽度为1 μ s,重复频率为10 Hz。计算可得馈入口的平均功率为160 W。11.988 GHz的负载用于SHINE的偏转腔末端。与SXFEL不同的是,SHINE的重复频率为50 Hz,因此平均功率为800 W。

为了简化计算,对水槽内壁的对流换热系数采用公式法求解。历史上应用最广泛的关联式为Dittus-Boelter公式^[15],

$$\begin{aligned} Nu &= 0.023Re^{0.8}Pr^n \\ h &= \frac{Nu \cdot \lambda}{d} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: Nu 是努塞尔数; Re 是雷诺数; Pr 是普朗特数; h 为对流换热系数; λ 为热导率; d 为管道的等效直径。加热流体时 $n=0.4$;冷却流体时 $n=0.3$ 。水槽的截面积为72 mm²,等效直径为8.372 mm,当水流量

为10 L·min⁻¹时,计算可得对流换热系数 $h=5\,932.2\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

根据计算得到的对流换热系数来模拟水冷散热,利用仿真软件计算得到了两种负载的温度分布(图8)。由于SS430不锈钢的导热系数较低,仅为26 W·K⁻¹·m⁻¹,图中结构的温度分布并不均匀,高温区集中在过渡段的片状结构表面,负载的外表面接近室温。其中,11.424 GHz的负载的最高温升为7.5 °C,11.988 GHz的负载的最高温升为28 °C。需要强调的是,负载在实际工作时安装于X波段偏转腔的末端,需要承受的功率在经过衰减后会大幅降低。因此负载是实际温度要低于计算得到的结果。

3.2 测量结果与误差分析

测量得到的 S 参数曲线如图9所示,均达到了设计指标。可以看出,实测的结果与仿真结果相比,频率有一定偏差,但是由于带宽比较宽,工作频率的 S 参数仍在可接受的范围内。工作点的 S_{11} 参数分别为-36.40 dB和-31.33 dB。对于实测与模拟之间的误差,一方面,X波段结构的尺寸较小,加工误差对频率的影响较大;另一方面,经过多次切削后,端板的尺寸误差有一定累积,且多次装夹也使其发生了

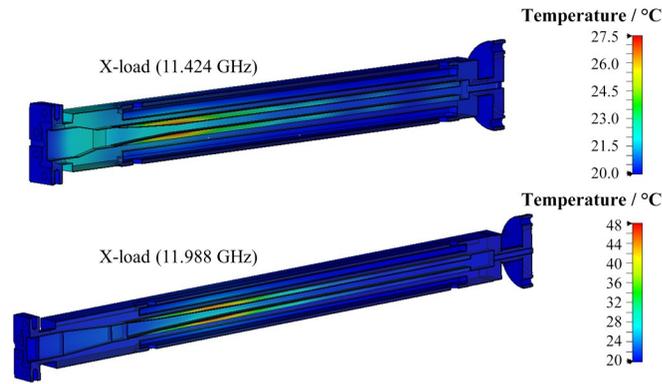


图8 两种负载的温度分布示意图
Fig.8 Diagram of temperature distribution of two loads

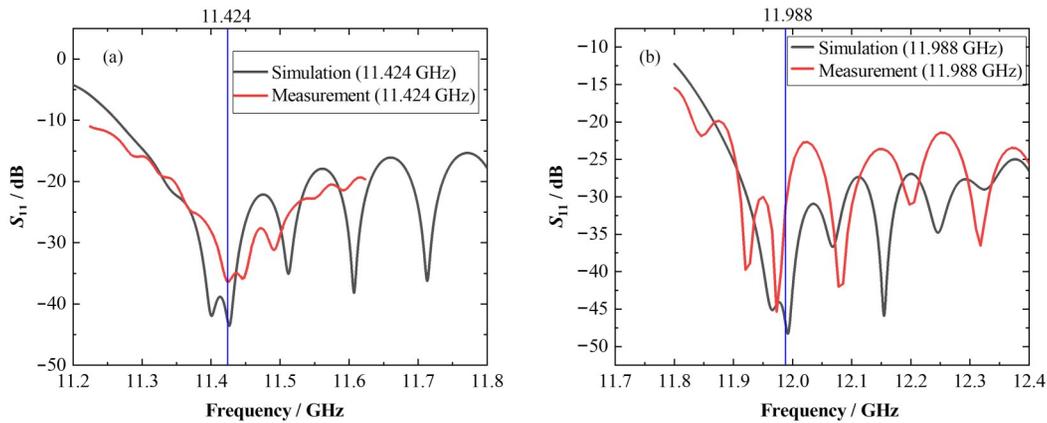


图9 11.424 GHz (a)、11.988 GHz (b)吸收负载 S_{11} 曲线
Fig.9 S_{11} curve of 11.424 GHz (a) and 11.988 GHz (b) absorptive load

形变。另外可以观察到,两种负载的 S 参数均表现为测量结果高于仿真结果,这源自于测量时用到的同轴波导转换结构,它本身存在一定的功率反射,导致整体的反射功率增加。

4 结语

本文设计了两根X波段吸收负载,工作频率分别为11.424 GHz和11.988 GHz。这两种负载采用周期性片状结构,增加了表面电流,高效地将微波功率转换为热能。使用模拟仿真的方法,通过调整几何参数,降低了腔体的功率反射,增加了吸收峰的带宽。分析了两种负载在工作状态下的温度分布。完成了腔体加工,并完成了测试,测试结果达到设计和使用需求。同时,本次完成的两根X波段吸收负载将进一步分别在SXFEL和SHINE中完成高功率测试。

作者贡献声明 高子和负责方法论、调研、背景分析、软件仿真、实验测量、原稿撰写;谭建豪负责资源、监督、实验测量、写作审查与编辑;王程负责监

督、实验测量、写作审查与编辑;黄晓霞负责监督、实验测量;方方程负责概念化、资金获取、资源、监督、写作审查与编辑。

参考文献

- 1 Fang W C, Gu Q, Sheng X, *et al.* Design, fabrication and first beam tests of the C-band RF acceleration unit at SINAP[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2016, **823**: 91 - 97. DOI: 10.1016/j.nima.2016.03.101.
- 2 Tan J H, Fang W C, Tong D C, *et al.* Design, RF measurement, tuning, and high-power test of an X-band deflector for Soft X-ray Free Electron Lasers (SXFEL) at SINAP[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, **930**: 210 - 219. DOI: 10.1016/j.nima.2019.03.093.
- 3 Li Z B, Fang W C, Gu Q, *et al.* RF design of a C-band compact spherical RF pulse compressor for SXFEL[J].

- Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2017, **863**: 7 - 14. DOI: 10.1016/j.nima.2017.05.017.
- 4 Citterio A, Stettler J, Zennaro R. C-band load development for the high power test of the SwissFEL RF pulse compressor[C]. Geneva, Switzerland: Proceedings of the 27th International Linear Accelerator Conference (LINAC'14), 2014: 329-332.
- 5 廖承恩. 微波技术基础[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994: 270-271.
LIAO Cheng'en. Fundamentals of microwave technology [M]. Xi'an: Xidian University Press, 1994: 270-271.
- 6 金凯. 大功率射频干负载的研制[J]. 中国科学技术大学学报, 1994, **24**(3): 394-396.
JIN Kai. Develop high-power all metal RF Dummy load [J]. Journal of China University of Science and Technology, 1994, **24**(3): 394-396.
- 7 Winet S S. Development of the New C-band 50-MW class SiC RF load[C]. Gyeongju, Korea: Particle Accelerator. Proceedings, 3rd Asian Conference (APAC'04), 2004: 557.
- 8 Matsumoto S, Higo T, Riddone G, *et al.* High power evaluation of X-band high power loads[C]. Tsukuba, Japan: 25th International Linear Accelerator Conference (LINAC'10), 2010: 226 - 228.
- 9 Federmann S, Caspers F, Grudiev A, *et al.* High temperature radio frequency loads[C]. San Sebastian, Spain: 11th International Particle Accelerator Conference (IPAC'11), 2011: 1783 - 1785.
- 10 Neubauer M, Dudas A, Krasnykh A. S-band load design for SLAC[C]. Pasadena, CA, USA: 1st North American Particle Accelerator Conference (NAPAC'13), 2013: 975 - 977.
- 11 Krasnykh A, Brachmann A, Decker F, *et al.* Overview of high power vacuum dry RF load designs[C]. Busan, Korea: Proceedings of the 7th International Particle Accelerator Conference (IPAC'16), 2016: 504 - 506.
- 12 李秦, 柴熙源, 唐运盖, 等. X波段高功率负载的优化设计与测试[J]. 强激光与粒子束, 2022, **34**(4): 79 - 87. DOI: 10.11884/HPLPB202234.210451.
LI Qin, CHAI Xiyuan, TANG Yungai, *et al.* Design and test of X-band high power loads[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, **34**(4): 79 - 87. DOI: 10.11884/HPLPB202234.210451.
- 13 Meng X C. Development of S-band high power load[C]. Busan, Korea: Proceedings of the 7th International Particle Accelerator Conference (IPAC'16), 2016: 383 - 385.
- 14 Meng X C, Shi J R, Zha H, *et al.* Development of high-power S-band load[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, **927**: 209 - 213. DOI: 10.1016/j.nima.2019.02.002.
- 15 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006.