

强激光与粒子束

High Power Laser and Particle Beams

高能同步辐射光源用铁氧体高次模阻尼器的研制

陈欣 李晨 赵伟 向军 李天涛 黄刚 杨洁 刘平 秦臻

Development of ferrite high-order mode damper for High Energy Photon Source

Chen Xin, Li Chen, Zhao Wei, Xiang Jun, Li Tiantao, Huang Gang, Yang Jie, Liu Ping, Qin Zhen

引用本文:

陈欣, 李晨, 赵伟, 向军, 李天涛, 黄刚, 杨洁, 刘平, 秦臻. 高能同步辐射光源用铁氧体高次模阻尼器的研制[J]. *强激光与粒子束*, 2025, 37: 044008. doi: 10.11884/HPLPB202537.240278

Chen Xin, Li Chen, Zhao Wei, Xiang Jun, Li Tiantao, Huang Gang, Yang Jie, Liu Ping, Qin Zhen. Development of ferrite high-order mode damper for High Energy Photon Source[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2025, 37: 044008. doi: 10.11884/HPLPB202537.240278

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11884/HPLPB202537.240278>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

加速器用铁氧体-碳化硅混合型高次模阻尼器的研制

Development of a ferrite-silicon carbide hybrid high-order mode damper for accelerators

强激光与粒子束. 2025, 37: 024001-1-024001-6 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202537.240154>

高次模式同轴多间隙腔激励特性研究

Study on excitation characteristics of high-order mode coaxial multi-gap cavity

强激光与粒子束. 2020, 32: 103009-1-103009-7 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202032.200193>

高能同步辐射光源

High Energy Photon Source

强激光与粒子束. 2022, 34: 104002-1-104002-7 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202234.220080>

相对论涡旋高次谐波的产生与调控理论研究

Theoretical investigation of relativistic vortex high-order harmonics generation and manipulation

强激光与粒子束. 2023, 35: 051003-1-051003-7 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202335.220256>

振动线测量技术在高能同步辐射光源增强器预准直单元中的应用

Application of vibration wire measurement technology to pre-alignment units of High Energy Photon Source booster

强激光与粒子束. 2023, 35: 124003-1-124003-9 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202335.230125>

高能同步辐射光源直线加速器初期调束取得重要进展

Progress of the first-stage beam commissioning of High Energy Photon Source Linac

强激光与粒子束. 2023, 35: 054001-1-054001-3 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202335.230061>



·粒子束及加速器技术·

高能同步辐射光源用铁氧体高次模阻尼器的研制

陈 欣, 李 晨, 赵 伟, 向 军, 李天涛,
黄 刚, 杨 洁, 刘 平, 秦 臻

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 大电流加速器束管中, 当带电粒子流通过束管时, 会在束管中激励起高频场影响束流大小和稳定性, 还会在超导腔运行中带来额外的热损耗, 影响超导腔本身运行的稳定性, 所以必须对高次模进行有效控制。采用铁氧体为吸波材料吸收高次模, 通过金属化和钎焊实现铁氧体与铜基板的焊接, 然后与铜束管、冷却系统焊接获得铁氧体高次模阻尼器。使用 CST 软件仿真了铁氧体高次模阻尼器在不同频率下的微波性能, 并与实测结果对比, 发现在测试频段内可以有效抑制高次模, 但是一定频段内两者的结果存在一定差异。使用 COMSOL 软件仿真了铁氧体高次模阻尼器工作时的温度分布状态, 并与测试结果进行了比较; 热测结果表明, 吸收功率 10.14 kW 时, 吸收效率达到 77.4%。真空漏率、极限真空、水路耐压测试结果均满足超导高频腔设计需求。

关键词: 高次模; 阻尼器; 铁氧体; 焊接; 吸收效率

中图分类号: TL503.2

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202537.240278

Development of ferrite high-order mode damper for High Energy Photon Source

Chen Xin, Li Chen, Zhao Wei, Xiang Jun, Li Tiantao,
Huang Gang, Yang Jie, Liu Ping, Qin Zhen

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

Abstract: In high-current accelerator beam tubes, the flow of charged particles induces a high-frequency field within the tube, which affects the current and stability of the beam. Additionally, this field leads to extra heat loss during the operation of the superconducting cavity, impacting its operational stability. Therefore, it is necessary to effectively control the high-order mode. This study employs ferrite as an absorbing material to absorb high-order modes. The ferrites were welded to copper substrates through metallization and brazing, and then they were joined with the copper beam tube and cooling system to create a ferrite high-order mode damper. The microwave performance of the ferrite high-order mode damper at various frequencies was simulated using CST software, and compared with the measured results. It is found that the high-order mode can be effectively suppressed in the test frequency band, but there are some differences between the two results in a certain frequency band. Additionally, COMSOL software was utilized to simulate the temperature distribution of the ferrite high-order mode damper during operation, and these simulations were compared with experimental data. The test results for loaded power show that the absorption efficiency reaches 77.4% when the absorbed power is 10.14 kW. Furthermore, results of vacuum leak rates, ultimate vacuum and water-resistant all conform to the design requirements for superconducting high-frequency cavities.

Key words: high-order mode, damper, ferrite, welding, absorption efficiency

在带电粒子加速器中, 馈入微波在谐振腔中激发电磁场, 对带电粒子加速。通常加速模选择基模, 束流在腔体中会激发出高次模, 会严重影响束流的能量大小和稳定性, 而且高功率下, 导致腔体过热, 尤其是超导腔可能失超, 进而影响加速器的正常运行。因此, 需要通过有效的手段来抑制超导腔中的高次模, 主要的方式包括对加速腔

* 收稿日期: 2024-08-26; 修订日期: 2025-03-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (12205280)

联系方式: 陈 欣, chenxin10698@126.com。

通信作者: 李 晨, st.eddie@163.com。

进行更加合理的结构设计来控制高次模的产生以及利用微波吸收材料对产生的高次模进行直接吸收^[1-3]。北京正负电子对撞机及在建和将建的高能同步辐射光源(HEPS)、上海硬 X 射线自由电子激光(SHINE)、合肥先进光源等大科学装置上通常采用微波高次模吸收器直接吸收高次谐波^[1-5]。

在日本的非对称正负电子对撞机(KEKB)铁氧体阻尼器中,铁氧体通过热等静压(HIP)方法烧结在铜基管上的方法研制了不同尺寸的阻尼器^[6]。康奈尔大学的 D. Moffat 等^[7]在康奈尔电子存储环(CESR)中采用先对铁氧体进行金属化,然后在金属化层表面和不锈钢水套表面镀锡,再使用焊料焊接铁氧体和不锈钢水套。中国科学院高能物理研究所与中国有色金属研究总院联合研制出国内首只 500 MHz 超导高频腔铁氧体高次模阻尼器试验样机,顺利通过低功率吸波效率测试和高功率热负载测试,吸收效率达 60%、承载吸收功率达 4.4 kW 以上^[8]。虽然可选的吸波材料种类很多^[9-10],但是铁氧体仍是目前采用国际上加速器装置广泛使用的吸波材料,相对研究较多、更受关注^[11-16]。

上述 KEBK 采用热等静压法实现铁氧体与铜的机械连接^[6],铁氧体的强度较低,容易发生碎裂,且机械连接方式的导热效果相对较差;而康奈尔大学需要对铁氧体金属化层和不锈钢镀锡,锡的润湿性较差,容易出现虚焊、空洞^[7]。本文所研制的铁氧体高次模阻尼器,通过对铁氧体进行金属化处理,然后与铜基板焊接在一起;铜束管与不锈钢法兰、铜水管钎焊,最后与焊后的铜基板钎焊在一起完成阻尼器的制造,因此,本文所设计与研制的高次模阻尼器与国内外产品相比,在铁氧体焊接方式和水冷结构上做了创新性设计和改进。通过对铁氧体进行金属化处理,无需镀锡直接与铜基板焊接,束管腔体采用导热性、可焊性好的无氧铜材料,128 片铁氧体与铜基板焊好后再将铜基板与铜束管进行焊接。KEKB、康奈尔大学的研制方案一旦有铁氧体片焊接出现问题会导致整个阻尼器报废,而本文先将铁氧体与铜基板进行焊接,可以检验两者的焊接质量,选择焊接良好的铁氧体-铜基板组件进行下一步焊接,铜基板与铜束管是同质材料焊接,比大量铁氧体直接与铜束管进行异质材料的焊接更容易,可靠性更高。此外,一般的阻尼器通常焊接额外的不锈钢外壳作为水路,大尺寸的束管与外壳之间焊接有多圈甚至十余圈螺旋式的焊缝,很容易出现虚焊、漏焊等问题,导致冷却水往虚焊位置流动,影响水冷效果,甚至出现漏水问题。本文采用铜水管作为冷却系统,外置在铜束管的外侧,这样不需要焊接不锈钢外壳来做水路密封;同时整个水路通过水管进行流动,不会出现串水问题,还可以有效防止冷却水进入到高次模阻尼器内部从而导致整个超导腔出现进水风险;此外,束管采用铜材料,与铜束管为同质材料外部焊接,便于焊接和补焊。

本文使用铁氧体陶瓷作为吸波材料,设计并研制了铁氧体高次模阻尼器,仿真计算了其微波性能和工作时的温度分布,并对研制的铁氧体高次模阻尼器进行了低功率下吸波效率、高功率连续波下的热测(吸收功率、水冷效果等)及真空漏率、极限真空、水路耐压等测试及分析。

1 铁氧体高次模阻尼器的物理设计、研制及测试

1.1 铁氧体高次模阻尼器的物理设计

高次模阻尼器是高能同步辐射光源加速器高频系统超导加速组元的重要部件,用于吸收束流通过超导腔组元时激励起的高次模。高次模阻尼器作为超导高频腔系统的关键装置,其性能直接关系到束流在整个加速器内运行的稳定性。针对 499.8 MHz 超导腔高次模阻尼器项目需求,以铁氧体材料作为吸波材料,设计了在连续波下吸收功率 10 kW 的铁氧体高次模阻尼器,其主要设计参数指标如表 1 所示。低功率冷测吸收效率仿真结果满足吸收效率在工作频段内(0.6~3.0 GHz)≥30%、关键频段内(0.8~1.5 GHz)≥50%的设计要求。

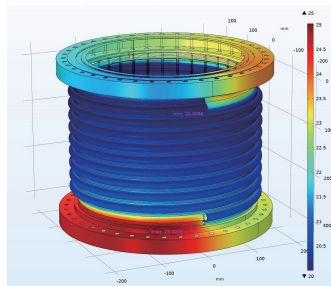
另外,通过 COMSOL 对热状态下铁氧体高次模阻尼器的工作温度进行了仿真计算。铜束管外焊接有铜水管,设水管入口流量为 60 L/min,水压约为 0.373 MPa,环境温度为 20 ℃。从图 1(a)中可以看出,当吸收功率 10 kW 时,水管出水平均温度约 21.3 ℃,铜束管外壳最高温度为 25 ℃。从图 1(b)可以看出铁氧体表面最高温度 56.8 ℃,最低温度 50.2 ℃,温度相比本单位研制的铁氧体-碳化硅混合型高次模阻尼器,在相同吸收功率时铁氧体表面最高温度 32.9 ℃,最低温度 30.5 ℃ 要高一些^[17]。这是因为铁氧体陶瓷的热导率比碳化硅低得多,导致热阻较大,铁氧体表面温度较高。吸收功率为 10 kW 时铁氧体表面最高温度为 56.8 ℃,这个温度远远低于烘烤除气温度(100~150 ℃),长时间的烘烤时铁氧体与铜基板结合良好,未发生脱落等现象。说明铁氧体高次模阻尼器在工作时,铁氧体与铜基板之间的残余应力较小。

1.2 铁氧体高次模阻尼器的研制

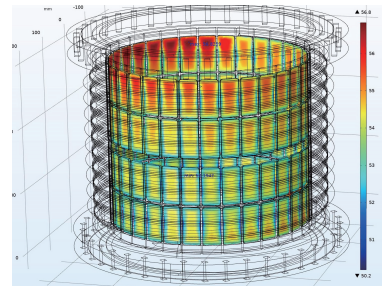
铁氧体高次模阻尼器主要由不锈钢法兰、铜束管、铜水管、铜基板和铁氧体组成,其主要组成见图 2。铁氧体

表 1 高次模阻尼器主要的设计指标
Table 1 The main design metrics of the high-order mode damper

working mode	absorbed power/kW	absorption efficiency	absorbing material	vacuum leak rates/(Pa·L·s ⁻¹)	ultimate vacuum/Pa	water-resistant/MPa	temperature difference between the outlet and inlet cooling water/°C
continuous wave	≥10	operating frequency band after welding, the surface (0.6~3.0GHz)≥30%, critical frequency bands (0.8~1.5GHz)≥50%	of ferrite shall be clean and flat, without particle shedding or cracks	≤1×10 ⁻⁷	≤6.5×10 ⁻⁸	≥0.9	when the absorbed power is 10 kW, the temperature rise of the outlet and inlet cooling water is ≤ 5 °C.



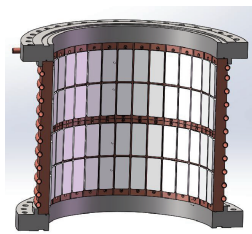
(a) simulation results of water temperature distribution



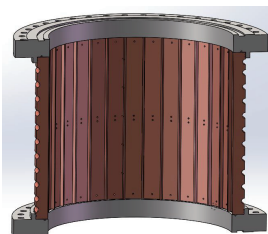
(b) simulation results of absorbing materials temperature distribution

Fig. 1 Simulation results of temperature distribution for the high-order mode with an absorbed power of 10 kW

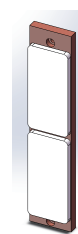
图 1 铁氧体高次模阻尼器在吸收功率为 10 kW 时温度分布仿真结果



(a) overall structure



(b) copper beam tube with stainless steel flange



(c) weld parts for ferrite and Cu substrates

Fig. 2 Schematic of the ferrite high-order mode damper

图 2 高次模阻尼器结构示意图

高次模阻尼器内部直径大小为 320 mm, 其最外层为铜束管外壳和铜水管, 最里层为铁氧体与铜基板的焊接部件。铜基板上分别焊接有两块铁氧体, 铜基板尺寸为 140 mm×29 mm×5 mm, 铁氧体尺寸均为 60 mm×28 mm×4 mm, 共 128 片铁氧体。

铁氧体高次模阻尼器中铁氧体、铜基板、铜水管、铜束管、不锈钢法兰等需要通过钎焊的方式有效连接起来。先将铁氧体与铜基板之间进行焊接, 不锈钢法兰与铜束管、铜水管焊接; 然后将焊接后的铁氧体-铜基板与铜束管焊接在一起, 铁氧体吸收并传输的热量通过冷却水管带走。

图 3(a) 为铁氧体与铜金属基板焊接后使用超声扫描电镜测得的钎着率, 达到 95.02%, 参照钢件硬钎焊技术要求航天行业标准 QJ1156B-2014 要求 (钎着率 ≥ 90% 为一级), 高于一级要求; 图 3(b) 为铜基板与铜束管焊接所用焊料钎焊界面效果图, 图 3(c) 为铜水管与铜束管焊接所用焊料钎焊界面效果图, 从图中可以看出两种焊料均与铜形成了良好的冶金反应。完成焊接后, 对法兰进行二次加工。

1.3 铁氧体高次模阻尼器的测试

对研制的铁氧体高次模阻尼器进行性能检测, 主要有低功率下的吸波效率、高功率连续波下的热测 (吸收功率、水冷效果等) 及真空漏率、极限真空、水路耐压等。

低功率冷测时先在铁氧体高次模阻尼器内部放入内导体, 两端依次接上锥形测试夹具和 152.4 mm 转 N 型头, 然后在两端通过 N 型头接网络分析仪, 采用网络分析仪测试铁氧体高次模阻尼器 S 曲线, 设置扫描范围为 200 MHz~3.0 GHz。高功率热测时在阻尼器内部放入内导体, 将高次模阻尼器两端依次接上锥形测试夹具, 一端接高功率微波源, 另一端接短路活塞, 测试装配如图 4 所示。同时将铁氧体高次模阻尼器进出水端与冷却水系统连接在一起,

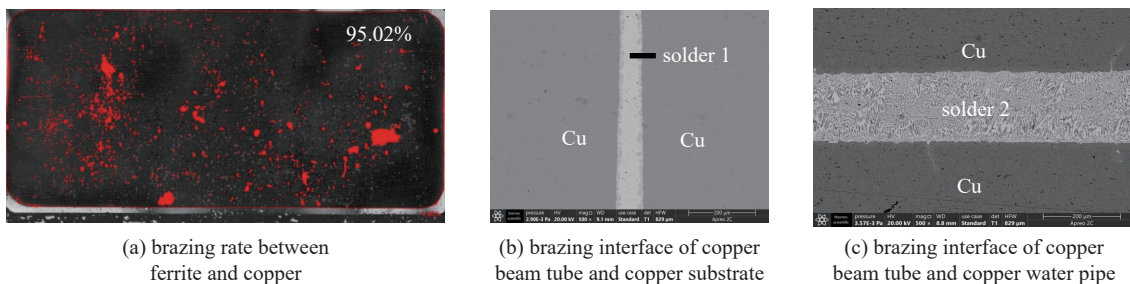


Fig. 3 Quality diagram of welding effects

图 3 焊接质量效果图

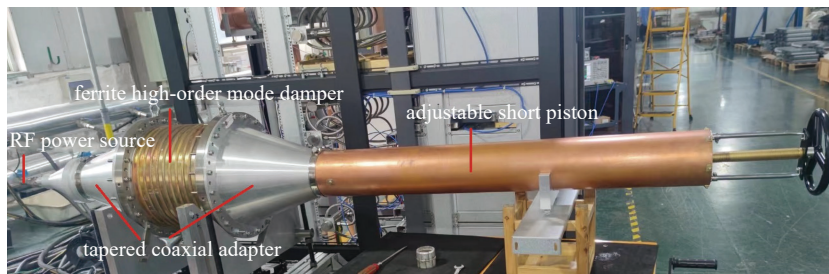


Fig. 4 High power test assembly diagram of ferrite high-order mode damper

图 4 铁氧体高次模阻尼器的高功率测试装配图

并在进出水口贴温度传感器贴片测试进出水温度。

为了保证在烘烤时法兰与铁氧体高次模阻尼器之间仍然有良好的密封性,使用铝密封圈连接密封法兰与铁氧体高次模阻尼器,使用真空计(ZDF-5227-Ⅲ)测量烘烤、抽真空稳定后的真空度。分别使用水压装置和氦质谱检测仪检验水路耐压和真空漏率检测。

2 铁氧体高次模阻尼器的性能测试及分析

2.1 铁氧体阻尼器低功率冷测下的吸收性能

使用 CST 软件仿真计算铁氧体高次模阻尼器的吸收效率,并测试在无短路活塞下低功率冷测的吸收效率,结果如图 5 所示。从图中可以看出,随着频率的增大,该铁氧体高次模阻尼器实测的吸收效率不断增大,在 0.85 GHz 时达到了 83%,在 1 GHz 也达到了 75% 以上,满足设计要求的工作频段内(0.6~3.0 GHz) $\geq 30\%$,关键频段内(0.8~1.5 GHz) $\geq 50\%$ 。仿真和实测的吸收效率结果表明在 1.4 GHz 以下,实测的吸收效率高于仿真结果;而在 1.4~1.7 GHz 以上频段,总体上仿真的吸收效率比实测值高;在 1.7~3 GHz 频段,仿真和测试结果相差较大,无明显规律,但是吸收效率均较高,在 50% 以上。仿真和实测结果表明,铁氧体在低频段的吸收效率较好,铁氧体高次模阻尼器在 0.5~1.5 GHz、1.7~2.1 GHz 频段内,其吸收效率最佳,在 60% 以上。测试结果与仿真结果有一定的差异,其主要原因是:铁氧体关键参数介电损耗角正切值会对高次模阻尼器的微波性能产生重要的影响,在 CST 进行微波仿真时,输入的介电损耗角正切值采用了典型铁氧体的参数,但是与实际使用的铁氧体不可避免会存在一定差异,从而导致仿真结果存在偏差。未来的进一步研究中,可以通过建立铁氧体样品介电参数测量实验系统来对铁氧体的介电损耗角正切值进行准确测量,然后再作为输入进行仿真,可以提高仿真精度。即使如此,目前的仿真结果对阻尼器设计也有了很好的指导意义。

2.2 铁氧体高次模阻尼器热高功率热测下的水路温升

图 6 为测得的不同吸收功率时铁氧体高次模阻尼器进出口水温差(水压约 0.4 MPa)。可以看出,随着吸收功

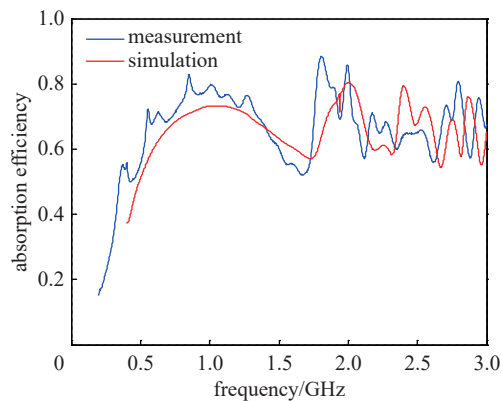


Fig. 5 Simulation and measurement of absorption efficiency of ferrite high-order mode damper (no short piston)

图 5 铁氧体高次模阻尼器仿真与实测吸收效率(无短路活塞)

率增大,进出口水温的温差也随之增大。吸收功率为 10 kW 保持 2 h,温差稳定在 2.3 °C 左右,与仿真结果相比,可以发现两者比较接近,测量值(2.3 °C)比仿真值要高(平均 1.3 °C),这是因为铜水管与铜束管之间焊接的有效接触面积小于理论面积,且铜水管在折弯时变扁,导致实际水流流量低于理论值,从而导致测量出进水温差值较高。测量结果和仿真结果表明铁氧体高次模阻尼器满足进出口水温差 ΔT 低于 5 °C 的设计指标要求,各级焊接质量良好,铁氧体吸收的能量转化为热量能有效传导到水套经冷却水带走,且可以在更低的冷却水压下工作。

2.3 铁氧体高次模阻尼器高功率热测下的吸收功率及效率

输入不同的功率,测试铁氧体高次模阻尼器的吸收功率及效率。图 7 为铁氧体高次模阻尼器在高功率工作状态下不同输入功率时的吸收功率、对应的吸收效率。从图中可以看出,随着输入功率的增大,吸收效率逐步减小,在输入功率为 13.1 kW 时,吸收功率达到 10.14 kW,吸收效率达到 77.4%。这说明铁氧体材料在测试频段具有良好的吸波性能,能够将大部分高次模能量吸收,有效抑制高次模。

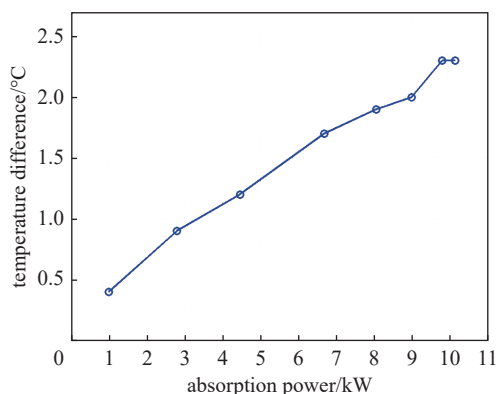


Fig. 6 Temperature rise of inlet and outlet water under different absorbed power (about 0.4MPa)

图 6 不同吸收功率下进出口水的温升(约 0.4 MPa)

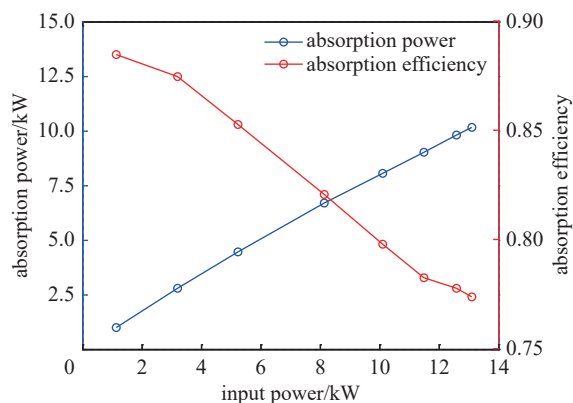


Fig. 7 Absorption power and absorption efficiency under different input power

图 7 不同输入功率下吸收功率及吸收效率

2.4 其他测试及检测结果

按照 1.3 所述检漏、真空度测试、水路耐压方法分别对铁氧体高次模阻尼器进行真空漏率、极限真空、水路耐压测试,其漏率达到了 2.7×10^{-8} Pa·L/s,极限真空度顺利达到了 3.7×10^{-8} Pa,水路耐压 0.93 MPa/2 h 未发生漏水、水压下降现象,保障了该阻尼器可以在超高真空、高水压下工作。

上述测试和高功率测试后,对阻尼器进行外观检查,在经过长时间的高温烘烤(100~150 °C)和正常工作的热测试,铁氧体材料表面清洁、平整,无脱落,铁氧体与铜基板之间牢固结合在一起。

3 结 论

利用铁氧体的吸波特性,本文研制了铁氧体高次模阻尼器。实验结果表明,铁氧体高次模阻尼器在 0.5~1.5 GHz、1.7~2.1 GHz 频段内,其冷测吸收效率在 60% 以上,在 0.85 GHz 时达到了 83%。仿真和实验结果表明,焊接是连接铁氧体的一种有效方法,铁氧体与金属之间可以实现可靠连接,铁氧体吸收的能量转化为热量后可以有效传导出去,从而使铁氧体高次模阻尼器长时间可靠运行。该铁氧体高次模阻尼器在吸收功率 10.14 kW 时,其吸收效率达到 77.4%,进出口温差 2.3 °C;真空漏率小于 2.7×10^{-8} Pa·L/s;极限真空达到 3.7×10^{-8} Pa,水路耐压可以达到 0.93 MPa;满足超导高频腔高次模阻尼器的设计要求。

参考文献:

- [1] 周文中,潘卫民,葛锐,等. 中国散裂中子源二期双 spoke 超导腔设计[J]. 强激光与粒子束, 2023, 35: 034004. (Zhou Wenzhong, Pan Weimin, Ge Rui, et al. Design of the China Spallation Neutron Source phase II double spoke resonator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2023, 35: 034004)
- [2] 蒲小云,侯洪涛,马震宇,等. 上海光源 500MHz 超导腔水平测试[J]. 强激光与粒子束, 2019, 31: 115104. (Pu Xiaoyun, Hou Hongtao, Ma Zhenyu, et al. Horizontal test of 500 MHz superconducting cavity for SSRF[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 115104)
- [3] 米正辉,沙鹏,孙毅,等. BEPC II 国产 500 MHz 超导腔运行综述[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30: 085103. (Mi Zhenghui, Sha Peng, Sun Yi, et al. Operation of domestic 500 MHz superconducting cavity for BEPC II [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 085103)
- [4] Hao Xuerui, Li Zhongquan, Ye Kuangkuang, et al. 500 MHz higher order mode damped cavity designed for 4th generation synchrotron radiation sources[J].

- Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2022, 1040: 167273.
- [5] Wu Congfeng, Tang Yungai, Tan Mingsheng, et al. Research of the 499.8 MHz superconducting cavity system for HALF[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2023, 1050: 168176.
- [6] Nishiwaki M, Akai K, Furuya T, et al. Developments of HOM dampers for SuperKEKB superconducting cavity[C]//Proceedings of SRF2013. 2013: 1058-1060.
- [7] Moffat D, Barnes P, Kirchgessner J, et al. Design and fabrication of a ferrite-lined HOM load for CESR-B[C]//Proceedings of International Conference on Particle Accelerators. 1993: 977-979.
- [8] Huang Tongming, Pan Weimin, Wang Guangwei, et al. The development of the 499.8MHz superconducting cavity system for BEPCII[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2021, 1013: 165649.
- [9] Xu Wencan, Conway Z A, Daly E, et al. High-power test results for a cylindrical-shell silicon carbide higher-order-mode damper[J]. [Physical Review Accelerators and Beams](#), 2024, 27: 031601.
- [10] Alesini D, Bellaveglia M, Cardelli F, et al. Realization and high power test of damped C-band accelerating structures[J]. [Physical Review Accelerators and Beams](#), 2020, 23: 042001.
- [11] Tajima T, Asano K, Furuya T, et al. Bonding of a microwave-absorbing ferrite, TDK IB-004, with copper for the HOM damper of the KEK B-factory SC cavities[C]//Proceeding of the 6th Workshop on RF Superconductivity. 1993: 1914-1916.
- [12] Terui S, Ishibashi T, Shirai M, et al. Development of ferrite higher order mode damper for SuperKEKB vacuum system[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2023, 1053: 168371.
- [13] Liu Zongkai, Chang Fuyu, Chang L H, et al. Design and optimization of the high order modes damper for a 1.5 GHz superconducting harmonic cavity[J]. [IEEE Transactions on Applied Superconductivity](#), 2021, 31: 3500605.
- [14] Ego H, Tanaka H, Inagaki T, et al. Compact HOM-damping structure of a beam-accelerating TM020 mode rf cavity[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2024, 1064: 169418.
- [15] Hahn H, Ben-Zvi I, Belomestnykh S, et al. HOMs of the SRF electron gun cavity in the BNL ERL[J]. [Physics Procedia](#), 2015, 79: 1-12.
- [16] Marhauser F. Next generation HOM-damping[J]. [Superconductor Science and Technology](#), 2017, 30: 063002.
- [17] 陈欣, 李晨, 赵伟, 等. 加速器用铁氧体-碳化硅混合型高次模阻尼器的研制[J]. [强激光与粒子束](#), 2025, 37: 024001. (Chen Xin, Li Chen, Zhao Wei, et al. Development of a ferrite-silicon carbide hybrid high-order mode damper for accelerators[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2025, 37: 024001)