

强激光与粒子束

High Power Laser and Particle Beams

加速器用铁氧体-碳化硅混合型高次模阻尼器的研制

陈欣 李晨 赵伟 黄刚 向军 李天涛 杨洁 刘平 秦臻

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

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

引用本文:

陈欣, 李晨, 赵伟, 黄刚, 向军, 李天涛, 杨洁, 刘平, 秦臻. 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. doi: 10.11884/HPLPB202537.240154

Chen Xin, Li Chen, Zhao Wei, Huang Gang, Xiang Jun, Li Tiantao, Yang Jie, Liu Ping, Qin Zhen. Development of a ferrite-silicon carbide hybrid high-order mode damper for accelerators[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2025, 37: 024001. doi: 10.11884/HPLPB202537.240154

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11884/HPLPB202537.240154>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于碳化硅等离子体器件的功率脉冲锐化技术

Power pulse sharpening technology based on silicon carbide plasma devices

强激光与粒子束. 2024, 36: 013008-1-013008-6 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202436.230209>

宽禁带碳化硅单晶衬底及器件研究进展

Recent development of wide bandgap semiconductor SiC substrates and device

强激光与粒子束. 2019, 31: 040003-1-040003-6 <https://doi.org/10.11884/HPLPB201931.190043>

1.3 GHz 9-cell高性能超导腔高阶模耦合器电磁及热分析研究

Electromagnetic and thermal analysis research of high-order-mode coupler for 1.3 GHz 9-cell high performance superconducting cavity

强激光与粒子束. 2024, 36: 074002-1-074002-7 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202436.230425>

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>

0.34 THz双注高次模折叠波导行波管高频系统设计

Design of high frequency system of 0.34 THz high order mode two-beam folded waveguide traveling wave tube

强激光与粒子束. 2021, 33: 053004-1-053004-8 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202133.210002>

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>



·粒子束及加速器技术·

加速器用铁氧体-碳化硅混合型 高次模阻尼器的研制^{*}

陈 欣, 李 晨, 赵 伟, 黄 刚, 向 军, 李天涛,
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, 为了降低对束流的影响, 束管中产生的高次模需要利用阻尼器将高频场能量转换成热量并通过冷却装置导走。介绍了某混合型高次模阻尼器的研制及主要性能。阻尼器采用的吸收材料为铁氧体和碳化硅, 吸收材料通过金属化和钎焊实现与金属基板的焊接。通过 CST 和 COMSOL 软件分别开展了微波性能仿真和热仿真, 对阻尼器的结构进行了优化设计。阻尼器的测试结果表明: 该混合型阻尼器的吸收效率与计算结果在 1.7 GHz 以下频段相接近, 在 1.7 GHz 以上高频段后, 仿真吸收效率高于实测结果, 相差较大; 真空漏率、极限真空、水路耐压均满足超导高频腔设计需求。

关键词: 高次模; 阻尼器; 铁氧体; 碳化硅; 焊接

中图分类号: TL503.2

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202537.240154

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

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

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

Abstract: In large current accelerator beam tubes, high-frequency fields are generated when charged particles circulate within the beam pipe. To mitigate the impact on beam current, it is essential to use high-order mode damper to convert the high field energy into heat, which can then be dissipated by a cooling system. This paper presents the research, fabrication, and key performance characteristics of a hybrid high-order mode damper. The absorbing materials utilized in the damper include ferrite and silicon carbide, which can be welded to metal substrates through metallization and welding techniques. Microwave performance simulations and thermal simulations were conducted using CST and COMSOL software, respectively, leading to an optimized damper structure. Test results demonstrate that the absorption efficiency of the hybrid damper aligns closely with the calculated values in the frequency range below 1.7 GHz. However, the simulated absorption efficiency exceeds the measured results significantly above 1.7 GHz. Additionally, the vacuum leak rates, ultimate vacuum, and water resistance meet the design requirements for superconducting high-frequency cavities.

Key words: high-order-mode, damper, ferrite, silicon carbide, welding

在加速器中, 超导高频腔通常用来加速带电粒子, 而腔体中的加速模通常选择基模。同时在腔体中会激发出高次模, 高次模会严重影响束流的能量大小和稳定性, 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管中的高次模, 主要的方式包括对超导管进行更加合理的结构设计来控制高次模的产生以及利用吸收材料对产生的高次模进行直接吸收^[1-3]。相对来说, 后一种方式更容易实现, 美国康奈尔大学电子存储环(CESR)和日本的非对称正负电子对撞机(KEKB)均采用该方式, 相应的装置研制技术也主要被这两国垄断。因此, 发展具有

* 收稿日期: 2024-05-11; 修订日期: 2024-11-27

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (12205280)

联系方式: 陈 欣, chenxin10698@126.com。

通信作者: 李 晨, st.eddie@163.com。

自主知识产权的高次模阻尼器具有非常重要的实用意义。

目前主流的阻尼器是铁氧体材料阻尼器^[4-8]。在 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,大束管高次模阻尼器的束管内直径为 300 mm,小束管高次模阻尼器的束管内直径为 220 mm^[9]。康奈尔大学的 Moffat D 等^[10]设计和制造了用于 CESR-B 的铁氧体衬里高次模(HOM)负载,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,再使用焊料将铁氧体与不锈钢水套焊接在一起。中国科学院高能物理研究所从 2008 年开始与中国有色金属研究总院联合攻关,成功研制出国内首只 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^[11]。碳化硅(SiC)材料是另外一种应用广泛的吸波材料,目前,国外先进的高次模阻尼器在高频段较多使用 SiC 陶瓷作为吸收材料^[12-15]。

本文利用铁氧体和碳化硅在不同频段的吸波特性,设计混合型高次模阻尼器,采用较小尺寸的长方体铁氧体和碳化硅,再组成吸波材料阵列,研制了铁氧体-碳化硅双吸波材料的高次模阻尼器,并对研制的铁氧体-碳化硅混合型高次模阻尼器进行了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、水路耐压等测试及分析。

1 混合型高次模阻尼器的研制及测试

1.1 混合型高次模阻尼器的研制

混合型高次模阻尼器的组成如图 1 所示,其主要由不锈钢外壳、不锈钢法兰、无氧铜水套、金属基板、铁氧体和碳化硅组成。图 1 为阻尼器的高度方向图,阻尼器内部直径大小为 320 mm,其最外层为不锈钢外壳(图 1(a)),水套(图 1(b))与外壳气密焊接。为了使阻尼器在工作时产生的热量能被快速带走,水套选用的材料为高热导率的无氧铜。阻尼器最里层为铁氧体与金属基板的焊接部件(图 1(c)),长短金属基板上分别焊接有四块碳化硅体和两块铁氧体,金属基板尺寸分别为 275 mm×29 mm×5 mm 和 140 mm×29 mm×5 mm,铁氧体和碳化硅尺寸均为 60 mm×28 mm×4 mm。

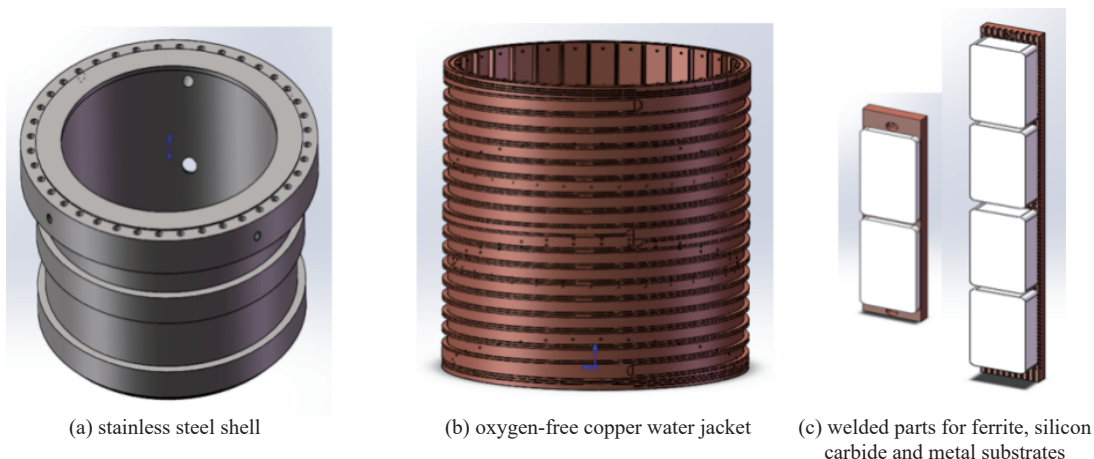


Fig. 1 Schematic of the hybrid high-order mode damper

图 1 高次模阻尼器结构示意图

阻尼器所有部件的焊接方式均为钎焊,使用合理的温度梯度焊料依次将阻尼器的部件进行焊接。首先将铁氧体与金属基板焊接,此步骤的焊接温度稍高;同时利用焊料将水套与不锈钢法兰、不锈钢外壳进行焊接。然后将焊接好的腔体与铁氧体-金属基板、碳化硅-金属基板焊接件进行钎焊。最后对获得的高次模阻尼器进行机械加工,并对其性能进行测试。图 2 所示为混合型高次模阻尼器成品。

1.2 混合型高次模阻尼器的测试内容及方法

对研制的混合型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

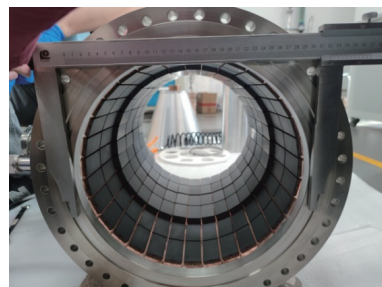


Fig. 2 Hybrid high-order mode damper with an inner diameter of 320 mm and a height of 445 mm

图 2 混合型高次模阻尼器,内径为 320 mm,高度为 445 mm

冷效果等)及真空漏率、极限真空、水路耐压等。

混合型高次模阻尼器的低功率吸波效率测试装配方法如下,在阻尼器内部放入内导体,将阻尼器两端依次接上锥形测试夹具和6寸转N型头,两端通过N型头接网络分析仪(3656D)进行低功率吸波效率测试。

混合型高次模阻尼器的高功率热负载测试则先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,另一端接高短路活塞。同时将高次模阻尼器进出水端与冷却水系统连接在一起,并在进出水口贴温度传感器贴片测试进出水温度。调整功率源,加大功率源输出,检验阻尼器的热负载能力和冷却能力。

将密封法兰利用铝密封圈与混合型高次模阻尼器密封连接,使用机械泵、分子泵、离子泵进行抽真空,经过烘烤后使用真空计(ZDF-5227-Ⅲ)测量稳定后的真空度。使用水压装置和氦质谱检漏仪分别测试混合型高次模阻尼器的耐受水压和真空漏率。

2 混合型高次模阻尼器的性能测试及分析

2.1 混合型阻尼器低功率的微波吸收性能

混合型高次模阻尼器在无短路活塞下低功率测试的吸收效率结果如图3所示,图中横坐标为吸波频率,纵坐标为吸收效率。可以看出该混合型阻尼器的吸收效率在1.45 GHz时达到了96%,在1 GHz时也达到了60%,在设计要求的工作频段内(0.6~3.0 GHz)≥30%,关键频段内(0.8~1.5 GHz)≥50%。在1.7 GHz以下频段仿真与实测结果及趋势比较接近,但是在1.7 GHz以上高频段后,仿真吸收效率高于实测结果,相差较大。跟团队前期研制的纯铁氧体高次模阻尼器相比,纯铁氧体高次模阻尼器在1.25 GHz以下和1.8~2.2 GHz频段内,其吸收效率明显高于混合型高次模阻尼器,而在1.25~1.8 GHz频段内,混合型高次模阻尼器的吸收效率明显高于纯铁氧体高次模阻尼器,在2.2~3 GHz频段内,两者的吸收效率则相当。对于混合型高次模阻尼器,其仿真与实测吸收效率在1.5 GHz频段以下结果和趋势比较一致,在1.5~3 GHz频段,其趋势大致相同,但是实测吸收效率低于仿真值。

2.2 混合型高次模阻尼器热仿真及测试

通过COMSOL对热状态下混合型高次模阻尼器的工作温度进行了仿真计算,设入口流量为0.7 L/s时,水压约为0.382 MPa,环境温度为20℃。如图4所示,当吸收功率为10 kW时,出水温度为22.6℃(碳化硅方向,传热快所以温度高)和22℃,平均温度约22.3℃。

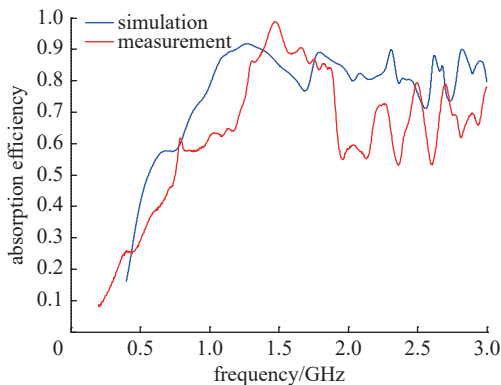


Fig. 3 Simulation and measurement of absorption efficiency of hybrid high-order mode damper (no short piston)

图3 混合型高次模阻尼器仿真与实测吸收效率(无短路活塞)

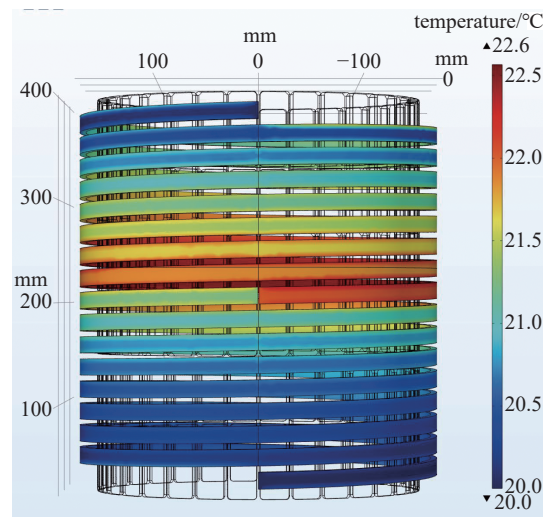


Fig. 4 Simulation results of water temperature distribution for the hybrid high-order mode damper with an absorbed power of 10 kW

图4 混合型高次模阻尼器在吸收功率为10 kW时的水路温度分布仿真结果

从图5可以看出铁氧体表面最高温度为32.9℃,最低温度为30.5℃,平均温度约为31.7℃;碳化硅表面最高温度为27.5℃,最低温度为24.3℃。铁氧体、碳化硅等吸波材料表面的温度均较低,吸波材料吸收的热量可以有效地传导出。较低的温差导致吸波材料与金属之间产生的热应力较小,从而可以有效保障阻尼器焊接质量的可靠性。

图6为混合型阻尼器在不同吸收功率下测量的进出口水的温升(水压约0.4 MPa),图中横坐标为吸收功率,纵坐标为进出口水的温差。从图中可以看出,随着吸收功率的增大,吸波材料吸收的能量越多,传导到冷却水套的热

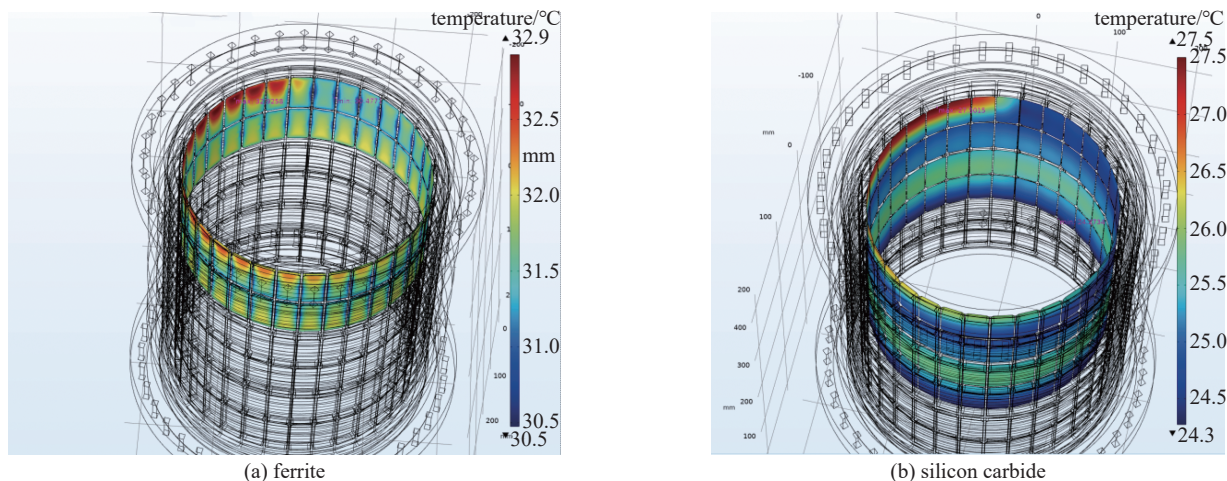


Fig. 5 Simulation results of absorbing materials temperature distribution for the hybrid high-order mode damper with an absorbed power of 10kW

图 5 混合型高次模阻尼器在吸收功率为 10kW 时的吸波材料温度分布仿真结果

量越多,出水与进水温度差逐步增大,在吸收功率为 10 kW 时,出进水温差为 1.1 °C,其结果见表 1。

通过表 1 可以发现测量结果与仿真结果比较接近,测量结果(1.1 °C)比仿真结果要低(平均 2.3 °C),这是因为测量时温度传感器贴片放置在不锈钢冷却水套表面,测得出水端温度要比实际值低,从而导致测量出进水温差值较低。测试结果满足进出口水温差低于 5 °C 的设计指标要求,较低的进出口温差为工作水压留有充足的裕量,阻尼器可以降低水压工作,经仿真计算出口水温差 5 °C 时的水压约为 0.18 MPa。测量结果和仿真结果表明铁氧体、碳化硅等吸波材料与金属基板之间的热阻较小,形成了良好的焊接,混合型阻尼器吸波材料吸收的热量能够有效通过束管和水套由冷却系统带走。

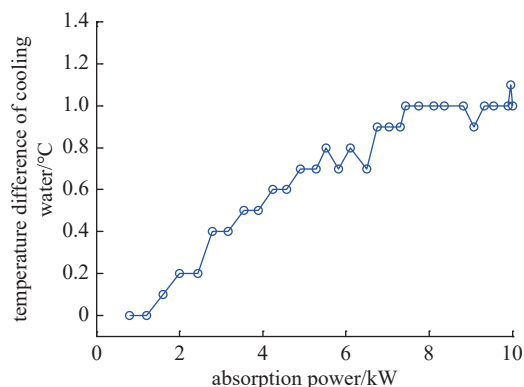


Fig. 6 Temperature rise of inlet and outlet water under different absorbed power (about 0.4 MPa water pressure)

图 6 不同吸收功率下进出口水的温升(约 0.4 MPa 水压)

表 1 混合型高次模阻尼器在吸收功率为 10 kW 时的温度分布仿真及测试结果

Table 1 Simulation and measurement results of temperature distribution for the hybrid high-order mode damper with an absorbed power of 10 kW

	temperature difference between the inlet and outlet cooling water/°C
simulation result	2.3
measurement result	1.1

2.3 混合型高次模阻尼器吸收功率测试结果

图 7 为混合型高次模阻尼器在高功率工作状态下,输入功率与吸收功率的关系曲线,纵坐标分别为不同输入功率下的吸收功率和对应的吸收效率。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 15.4 kW 时,吸收功率达到了 10 kW,吸收效率达到了 65%。

高功率测试后,对阻尼器进行外观检查,两种吸波材料(如碳化硅和铁氧体等)表面清洁、平整,无颗粒脱落和裂痕。

2.4 其他测试结果

对真空漏率、极限真空、水路耐压等参数进行了测试,测试结果如表 2 所示。

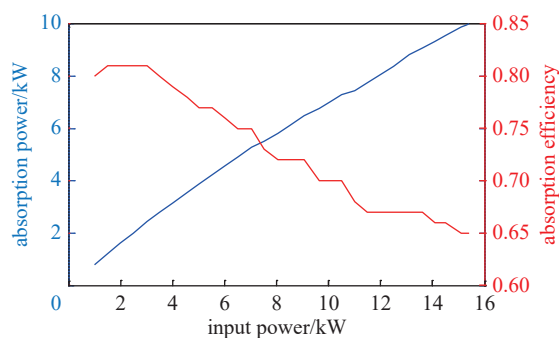


Fig. 7 Absorption power and absorption efficiency under different input power

图 7 不同输入功率下吸收功率及吸收效率

从表2可以看出, 混合型高次模阻尼器的真空漏率极低, 达到了 $5 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$, 极限真空度达到了 $4.6 \times 10^{-8} \text{ Pa}$, 从而保障了该阻尼器可以在超高真空下工作, 水路耐压可以达到 0.92 MPa, 可以在高水压下工作。

表2 混合型高次模阻尼器的性能测试结果

Table 2 Performance test results of the hybrid high-order mode damper

vacuum leak rate/($\text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$)	ultimate vacuum/Pa	water-resistant/MPa
5×10^{-10}	4.6×10^{-8}	0.92

混合型高次模阻尼器主的设计参数、仿真和测试结果见表3, 测试结果满足超导高频腔的设计要求。

表3 混合型高次模阻尼器的设计要求及性能测试结果

Table 3 Design requirements and performance test results of the hybrid high-order mode damper

	absorbed power/kW	absorption efficiency	vacuum leak rate/($\text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$)	ultimate vacuum/Pa	water-resistant/MPa	temperature difference between the outlet and inlet cooling water/ $^{\circ}\text{C}$
design requirements	≥ 10	operating frequency band(0.6~3.0 GHz) $\geq 30\%$, critical frequency bands(0.8~1.5 GHz) $\geq 50\%$	$\leq 1 \times 10^{-7}$	$\leq 6.5 \times 10^{-8}$	≥ 0.9	≤ 5
simulation results	10	operating frequency band(0.6~3.0 GHz) $\geq 53\%$, critical frequency bands(0.8~1.5 GHz) $\geq 61\%$	—	—	—	2.3
measurement results	10.2	operating frequency band(0.6~3.0 GHz) $\geq 38\%$, critical frequency bands(0.8~1.5 GHz) $\geq 60\%$	5×10^{-10}	4.6×10^{-8}	0.92	1.1

3 结 论

利用铁氧体和碳化硅的吸波特性, 本文研制了铁氧体-碳化硅混合型高次模阻尼器。实验结果表明, 在 1.25~1.8 GHz 频段内, 混合型高次模阻尼器的吸收效率明显高于纯铁氧体高次模阻尼器, 在 2.2~3 GHz 频段内, 两者的吸收效率则相当。

采用焊接的方式, 可以有效地将吸波材料吸收的热量及时传导出去, 从而使铁氧体、碳化硅等吸波材料在高次模阻尼器工作时较低的温差, 这样吸波材料与金属之间产生的热应力也较小, 满足了焊接质量的可靠性。

其吸波效率在设计要求的工作频段内(0.6~3 GHz) $\geq 30\%$, 关键频段内(0.8~1.5 GHz) $\geq 50\%$; 在吸收功率 10 kW 时, 其吸收效率达到 65%, 进出口温差为 1.1 $^{\circ}\text{C}$; 真空漏率小于 $5 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$; 极限真空达到 $4.6 \times 10^{-8} \text{ Pa}$, 水路耐压可以达到 0.92 MPa, 满足超导高频腔的设计要求。

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] 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]//Proceedings of the 6th Workshop on RF Superconductivity. 1993: 1914-1916.
- [5] 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.
- [6] Tajima T, Akai K, Asano K, et al. Beam test results on HOM absorber of superconducting cavity for KEKB[C]//Proceedings of 1997 Particle Accelerator Conference. 1997: 3090-3092.
- [7] Tajima T, Asano K, Furuya T, et al. HOM absorbers of superconducting cavities for KEKB[C]//Proceedings of the 5th European Particle Accelerator Conference. 1996: 2127-2129.
- [8] Tajima T, Asano K, Furuya T, et al. Recent development of HOM absorbers for KEKB superconducting cavities[C]//Proceedings of 1997 Workshop on RF Superconductivity. 1997: 709-724.
- [9] Nishiwaki M, Akai K, Furuya T, et al. Developments of HOM dampers for SuperKEKB superconducting cavity[C]//Proceedings of SRF2013. 2014: 1058-1060.
- [10] Moffat D, Barnes P, Kirchessner 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.

- [11] Huang Tongming, Pan Weimin, Wang Guangwei, et al. The development of the 499.8 MHz superconducting cavity system for BEPCII[J]. [Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment](#), 2021, 1013: 165649.
- [12] Valles N, Eichhorn R, Hoffstaetter G, et al. HOM studies of the Cornell ERL main linac cavity: HTC-1 through HTC-3[C]//Proceedings of IPAC2013. 2013: 2461-2463.
- [13] Nishiwaki M, Akai K, Furuya T, et al. Developments of SiC damper for superKEKB superconducting cavity[C]// Proceedings of SRF2015. 2015: 1289-1293.
- [14] 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.
- [15] 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.