



·高功率微波技术·

X 波段高功率负载的优化设计与测试*

李 秦, 柴熙源, 唐运盖, 王 改, 吴丛凤

(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 合肥 230026)

摘 要: 利用三维电磁场仿真软件 CST 进行了圆形水室水负载的仿真设计, 先后设计的两种不同规格的负载驻波比分别为 1.032 5 和 1.055 3, 在 50 MW 的峰值功率下, 峰值场强分别为 21.16 MV/m 和 17.57 MV/m; 并探究了陶瓷片和水的介电性质对驻波比的影响; 测试驻波比分别为 1.058 2 和 1.076 3。对一种圆筒水负载进行了优化设计, 结果表明其具有很高的功率耐受水平。最后设计了一种不锈钢干负载, 对其吸收齿结构和长度进行了优化, 使其更利于加工。使用 ANSYS 对干负载结构进行了热应力分析, 结果显示, 最高温度和最大应力分别为 83.478 °C 和 63.917 MPa, 最大形变为 0.072 971 mm。

关键词: X 波段; 驻波比; 高功率; 吸收负载; 热应力分析

中图分类号: TN61

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210451

Design and test of X-band high power loads

Li Qin, Chai Xiyuan, Tang Yungai, Wang Gai, Wu Congfeng

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: In the research project of high performance free electron laser, it is necessary to absorb the residual power at the end of its acceleration structure. At the operating frequency of 11.424 GHz, the RF load with the VSWR (voltage standing wave ratio) of less than 1.1 and high power absorption capacity needs to be developed. The software CST (Computer Simulation Technology) is used to design the loads. For the cylindrical water chamber water load, the design VSWRs are 1.0325 and 1.0533; At 50 MW peak power, the peak field intensities are 21.16 MV/m and 17.57 MV/m; the test VSWRs are 1.0582 and 1.0763. The effect of dielectric properties of ceramic and water on VSWR is also investigated. For the cylinder-shaped water load, the simulation results show that it has a high power tolerance level. For the dry load, the length of the load and the structure of the absorbing tooth are optimized to make it more convenient for machining. The results of thermal stress analysis calculated by ANSYS show that the maximum temperature and stress are 83.478 °C and 63.917 MPa respectively, and the maximum deformation is 0.072 971 mm.

Key words: X-band, voltage standing wave ratio, high power, load, thermal stress analysis

自由电子激光 (FEL) 具有高亮度、高相关性、短脉冲、频率连续可调等优点, 在多个学科上有重要的应用^[1]。X 波段波导系统是高性能自由电子激光装置中高功率系统的重要组成部分, 其中吸收负载是用于吸收高功率系统末端剩余功率的重要组成器件, 需要较低的反射率^[2]。对于高功率系统, 吸收负载还必须具有耐受高功率水平的能力, 以保证系统的稳定运行。

吸收负载主要分为水负载和干负载两大类, 其中水负载的基本原理是基于水良好的微波吸收体, 剩余微波被水体吸收; 热量可以被流动的水带走; 通过介质隔绝真空和水, 结构紧凑, 易于加工; 水流通道设计可多样化。干负载则将微波吸收体固定在负载内, 微波吸收体吸收剩余微波功率, 被外部的冷却水冷却。微波吸收体多采用碳化硅或者损耗陶瓷等, 安全性能更优^[3-6]。

国内外各大实验室对吸收负载均进行了相关研究。一种工作在 3.7 GHz 的 S 波段的方形水室水负载, 驻波比低于 1.2 的频带有 70 MHz, 吸收功率达到 750 kW, 已经成功通过 EAST 装置的速调管测试^[7]。麻省理工大学为低混

* 收稿日期: 2021-10-25; 修订日期: 2021-12-13

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFA0401900); 中央高校基本科研业务费专项资金 (WK231000098)

联系方式: 李 秦, lq123123@mail.ustc.edu.cn。

通信作者: 吴丛凤, cfwu@ustc.edu.cn。

合电流驱动系统设计的一种聚四氟乙烯水负载,能够在 4.5 GHz 的工作频率、250 kW 的吸收功率下正常运行 5 s^[8]。美国斯坦福直线加速器实验室研制的 S 波段 FeCrAl 涂层的干负载,成功通过了峰值功率超过 30 MW,平均功率 5 kW 的高功率测试^[9]。

本文在工作频率 11.424 GHz 下,参考北京真空电子研究所研制的一种 S 波段工作频率 2856 MHz 的圆形水室的水负载^[10],完成了水负载的系列设计和加工,并进行了微波小信号测量,尤其是对水室进行了特别的设计;基于俄罗斯科学院应用物理研究所设计的一种大尺寸、结构新颖并且具有高功率耐受水平的圆筒式聚四氟乙烯水负载^[11],将这种水负载入射端口改为标准 C40 圆波导,对结构尺寸进行了详细的优化设计。对于干负载,选择了 CERN, KEK 联合设计的一种不锈钢干负载结构^[12],对该种负载的吸收齿进行了系列设计,优化了该种负载的长度,并使用 ANSYS 对其进行了热应力分析。

1 圆形水室水负载

1.1 水负载的设计和加工

该水负载由水室、波导和介质片三部分构成。介质片采用陶瓷时,由于陶瓷特性,将介质片紧压在波导斜截面的法兰上形成水室,之后对水室和水流通道进行设计。表 1 给出了此次吸收负载的设计要求。

此次设计的水负载波导采用 BJ-100 标准波导,微波窗采用圆陶瓷片,陶瓷片倾斜一定角度将水室和波导真空结构隔开。陶瓷与波导进行陶瓷金属化焊接,以保证波导内真空;水室设计为扁圆柱上叠加圆台,并利用 O 型橡胶圈密封;在圆台上设置进排水口。

利用 CST 设计水负载的水室形状来满足其驻波比小于 1.1。在设计过程中,主要存在 3 个问题:(1)水室的半径应该足够大,使得微波通过陶瓷窗后能完全进入水中,若水室半径太小,则部分微波被水室不锈钢外壳反射,影响水负载的吸收性能;(2)陶瓷需要有一定的厚度来承受水和真空的压强差,另外陶瓷厚度太薄也不便于陶瓷金属化的焊接,本次设计采用的是工厂提供的 6 mm 陶瓷片;(3)陶瓷的半径应该足够大且倾斜角度不宜过小,以避免波导法兰与陶瓷法兰产生干涉。

图 1 给出了水负载在 CST 内的模型;图 2 给出水负载在 10 GHz 到 12 GHz 频段内的驻波比,在工作点 11.424 GHz 时,驻波比计算结果为 1.0325,带宽超过 600 MHz。电场分布如图 3 所示,通过计算,在 50 MW 的峰值功率下,水负载内部峰值场强为 21.16 MV/m,陶瓷片真空侧面峰值场强为 13.8 MV/m。加工所得的实物如图 4 所示。

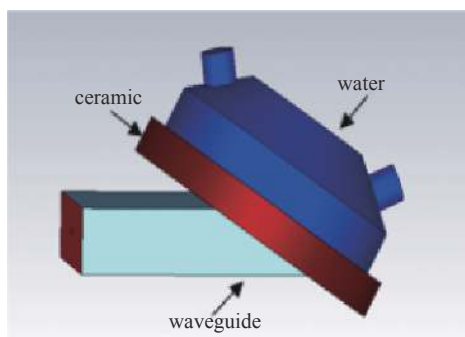


Fig. 1 Water load in CST

图 1 CST 内水负载模型

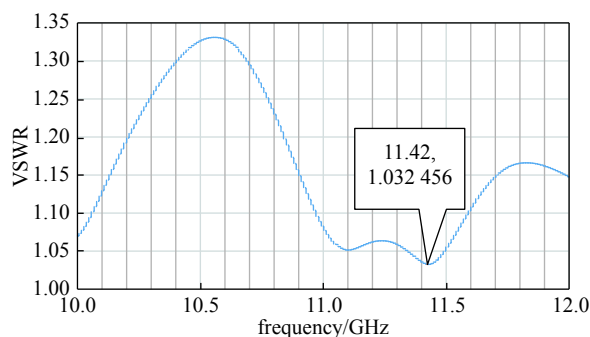


Fig. 2 VSWR of water load by CST

图 2 水负载驻波比

1.2 陶瓷片和水介电性质的影响

考虑到之前设计的水负载峰值电场较高,为进一步优化水负载,探究了陶瓷片介电常数、损耗正切对于驻波比的影响,如图 5、图 6 所示:在 11.424 GHz 条件下,陶瓷片的介电常数越大,对应的驻波比越大,变化明显;而驻波比会随着损耗正切角的变大而减小,但变化极小,主要原因在于水负载的微波吸收主体为水,而非陶瓷片。在水负载的实际工作之中,冷却水水温的变化同样会引起水的介电常数和损耗正切的变化。表 2^[5]给出了 10 GHz 条件下水的介电性质与温度的关系,图 7 和图 8 给出了介电常数和损耗正切对于驻波比的影响,由图可以看出,在进水口温度为室温 25 °C 的情况下,应保证出水口温度约为 45 °C,从而避免因为水温变化引起的水的介电性质的变化,使

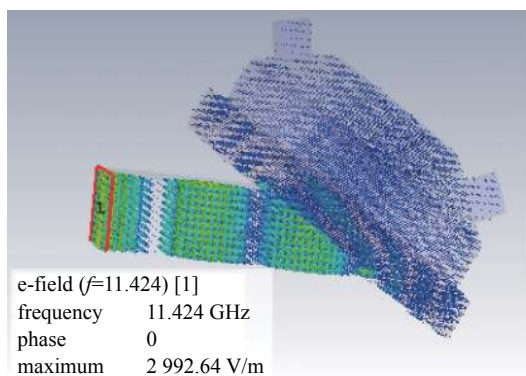


Fig. 3 Electric field of water load in CST

图 3 水负载电场分布



Fig. 4 Water load

图 4 水负载实物图

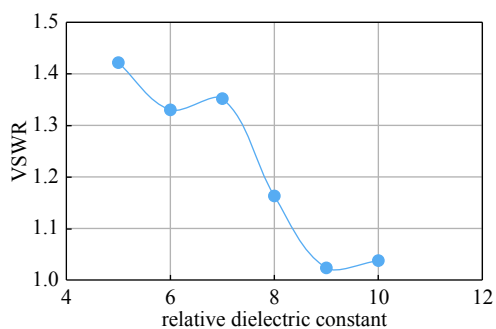


Fig. 5 Effect of relative dielectric constant of ceramic on VSWR

图 5 陶瓷片的介电常数对驻波比影响

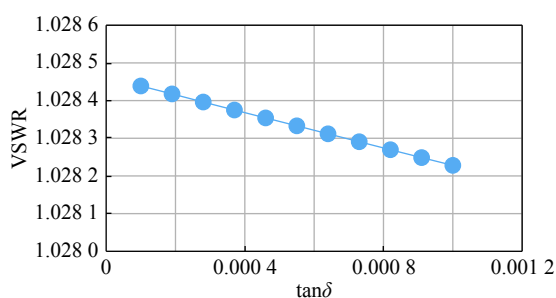


Fig. 6 Effect of loss tangent of ceramic on VSWR

图 6 陶瓷片的损耗正切对驻波比影响

得负载驻波比增大;模拟设计时,选取的水的相对介电常数为 58.5,损耗正切为 0.42。实际工作状态下,水负载的功率容量和冷却水相关参数的关系为

$$P = \rho C Q \Delta T \quad (1)$$

式中: P 为水负载的吸收功率, ρ 为水的密度, C 为水的比热容, Q 为进出水口水流量, ΔT 为进出水口水的温差。而水的流量和流速可由下列公式给出

$$Q = \pi r^2 v \quad (2)$$

式中: r 为进出水口半径, v 为水的流速。因此在其工作状态平均吸收功率 3 kW, 进出水口水温差 20 °C 的条件下, 计算可得水流量为 2.143 L/min。

表 2 10 GHz 下水的介电性质

Table 2 Dielectric properties of water at 10 GHz

temperature/°C	relative dielectric constant	loss tangent
15	49	0.7
25	55	0.54
35	58	0.44
45	59	0.4
55	60	0.36
65	59	0.32
75	57	0.28

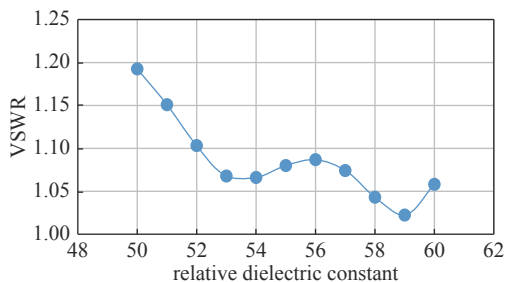


Fig. 7 Effect of relative dielectric constant of water on VSWR

图 7 水的介电常数对驻波比的影响

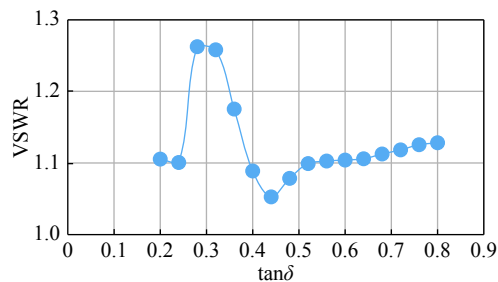


Fig. 8 Effect of loss tangent of water on VSWR

图 8 水的损耗正切对驻波比的影响

1.3 新水负载的设计与加工

在新的水负载的设计过程中,通过进一步增大水室,提高水负载的功率容量。然而在增大水室之后,由于进出

水口与陶瓷片间距增大,水流并不能较好地流经陶瓷片带走微波功率,为了解决这个问题,在水室添加了一块金属挡板。考虑到陶瓷片厚度太薄不利于陶瓷片的焊接且碎裂漏水风险较大。采取了加工工厂提供的3 mm陶瓷片,在得到陶瓷片准确参数之后,更换模拟设计参数,对水室高度,金属板底部和陶瓷片间距进行优化。为了便于控制水的流量,将进出水口直径由6 mm增加为16 mm,进出口水流速降为0.18 m/s。最终得到的优化结构如图9所示。在工作点驻波比为1.0553,驻波比计算结果如图10所示。电场分布如图11所示,峰值功率下的峰值场强为17.57 MV/m,陶瓷片真空侧面峰值场强为11.1 MV/m,有效降低了峰值功率下的峰值场强;加工工厂提供的该陶瓷片的击穿强度 ≥ 20 MV/m,可认为无击穿风险。对最终优化得到的新结构同样进行了加工,实物图如图12所示。

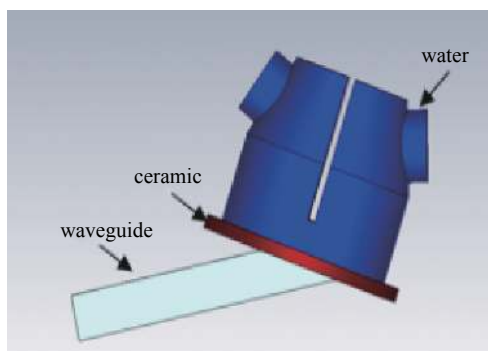


Fig. 9 New water load in CST
图9 CST内新水负载模型

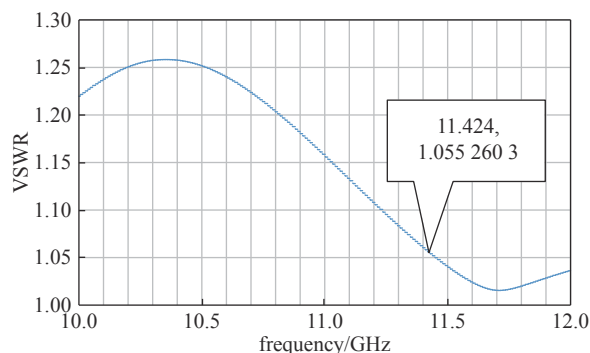


Fig. 10 VSWR of new water load by CST
图10 新水负载驻波比

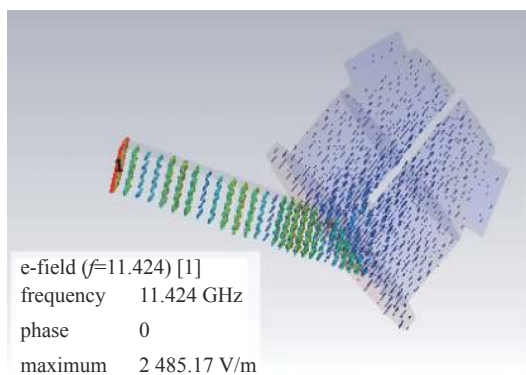


Fig. 11 Electric field of water load in CST
图11 新水负载电场分布



Fig. 12 New water load
图12 新水负载实物图

1.4 驻波比的测量

在第一个水负载加工完成之后,使用网络分析仪,测量了负载在11.424 GHz的工作频率下的驻波比,测量结果如图13所示。驻波比测量值为1.0582,与设计值1.0325相吻合,均满足设计要求,表明设计方法和加工工艺是可靠的。对增大水室容积,再优化水流通道得到的新水负载的测量结果如图14所示,驻波比测量值为1.0763,同样与设计值1.0553相吻合,满足设计要求。

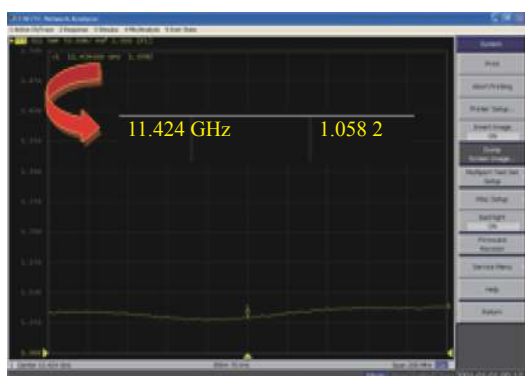


Fig. 13 Water load measurement result (VSWR=1.0582)
图13 水负载测量结果 (VSWR=1.0582)

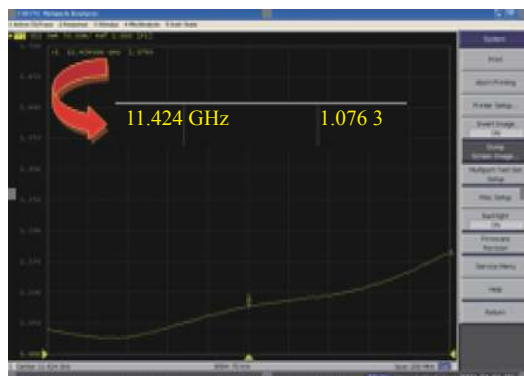


Fig. 14 New water load measurement result (VSWR=1.0763)
图14 新水负载测量结果 (VSWR=1.0763)

2 圆筒水负载

X 波段微波器件相对于其他低频段的微波器件,由于器件本身尺寸限制,导致在相同的吸收功率下,负载内部的峰值场强要高于低频段的微波器件。这种圆筒式水负载,是通过圆波导接头,将剩余功率引入到大的圆筒之中进行吸收,突破 X 波段器件本身的大小限制,从而提高负载的高功率耐受水平。

此种水负载需要剩余功率以 TE_{10} 模入射到大圆筒内,在圆筒内壁通过一层聚四氟乙烯隔绝外部冷却水和真空;在聚四氟乙烯层上有周期性排列的聚四氟乙烯环,环与环之间和环上部为冷却水;在圆筒末端有向内凹陷的金属锥,用于将剩余功率反射到壁面进行吸收。参考文献 [11] 中给出的入射端口直径为 46 mm,更改尺寸为标准 C40 圆波导(直径 52 mm),但并未给出聚四氟乙烯环和水层厚度,以及金属锥底面半径,因此对这种水负载的结构进行了优化设计。图 15 给出了该圆筒水负载在 CST 内的建模图。图 16 给出了在 10 GHz 到 12 GHz 频段内的驻波比,在工作点 11.424 GHz,驻波比为 1.0553。图 17 给出此种水负载的电场分布图,在峰值功率 50 MW 下,峰值场强为 4.82 MV/m,由此可见,此种水负载具有很高的功率容量。

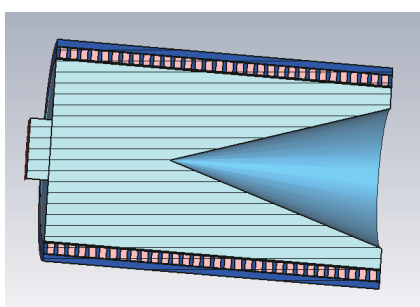


Fig. 15 Cylinder-shaped water load in CST
图 15 CST 内圆筒水负载模型

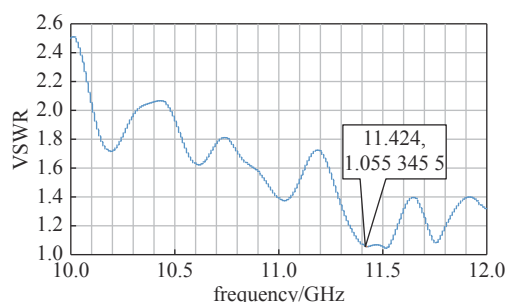


Fig. 16 VSWR of cylinder-shaped water load by CST
图 16 圆筒水负载驻波比

3 不锈钢干负载

该种不锈钢干负载由 CERN 制造,并在 KEK 进行了 50 MW 的 X 波段高功率测试^[12]。清华大学基于该种干负载,在 S 波段 2856 MHz 下,同样进行了加工和高功率测试,结果表明,该干负载具有良好的热稳定性和高功率耐受能力^[13],该种干负载可分为干负载主体和外部的水冷通道,采用 SS430 不锈钢作为吸收材料。SS430 不锈钢为铁素体不锈钢,是磁性材料 ($\mu=6$),具有微波吸收能力。负载内部具有密集排列的齿结构;干负载主体部分可分为最前端的波导连接部分、耦合部分、吸收部分和最后的尾端封口。在耦合部分,负载内部的齿从接口处向后逐渐升高,变化较快;在吸收部分,齿的高度变化较缓。

3.1 吸收齿结构的影响

图 18 给出了该种干负载的截面图。在设计过程中,对吸收齿正对和错开两种结构进行了仿真计算,图 19 给出了正对齿结构图和错开齿结构图,图 20 和图 21 分别给出了正对结构和错开结构的电磁场分布,50 MW 峰值功率下,峰值场强分别为 14.41 MV/m 和 14.21 MV/m;在 11 GHz 到 12 GHz 的驻波比仿真结果如图 22 所示,正对结构的驻波比为 1.0393,错开结构的驻波比为 1.0372,错开齿结构的仿真结果稍优于正对齿结构,由于半周期的齿台加工较难,错开齿结构可以降低一侧的加工难度。

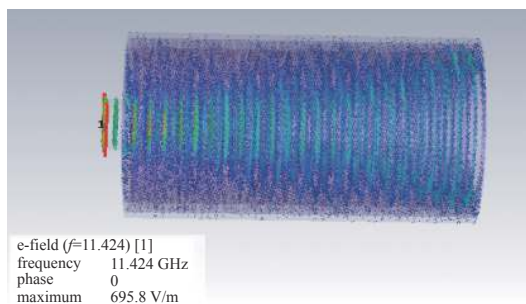


Fig. 17 Electric field of cylinder-shaped water load in CST
图 17 圆筒水负载电场分布

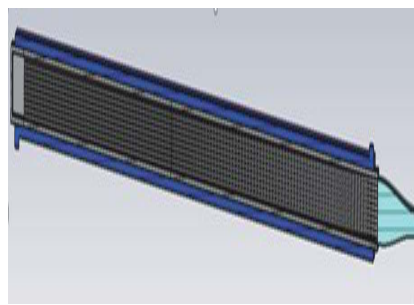


Fig. 18 Dry load in CST
图 18 CST 内干负载模型

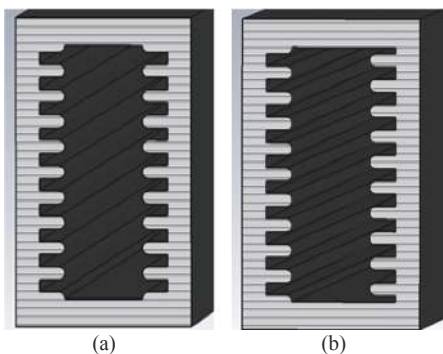


Fig. 19 Aligned (a) and staggered structure (b)

图 19 正对 (a) 和错开结构 (b)

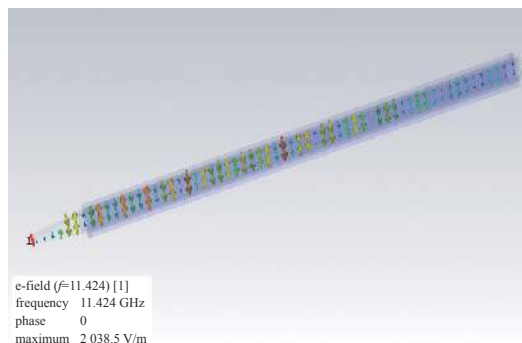


Fig. 20 Electric field in CST (aligned structure)

图 20 电场分布 (正对结构)

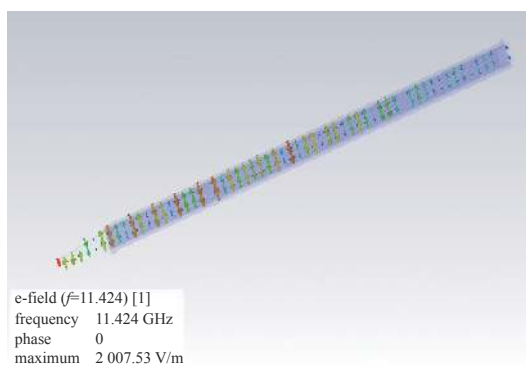


Fig. 21 Electric field in CST (staggered structure)

图 21 电场分布 (错开结构)

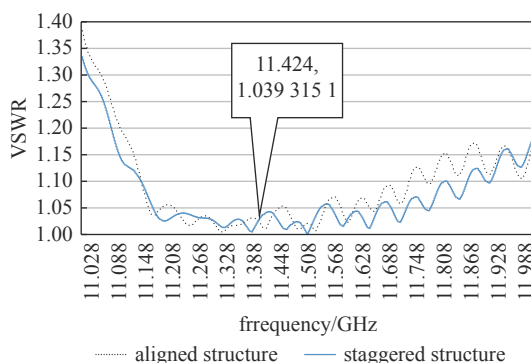


Fig. 22 VSWR of dry load by CST

图 22 负载驻波比

另外, 还对两种结构的干负载使用 ANSYS 进行了热应力分析, 图 23~28 分别给出了在平均吸收功率 3 kW 下达到稳态的热分布, 应力分布和形变; 最大温度和最大的应力均分布在干负载中间部分, 正对结构分别为 82.023℃ 和 63.7 MPa, 错开结构分别为 76.54℃ 和 66.899 MPa, 最大形变均在干负载的接口处, 分别 0.091 516 mm 和 0.075 431 mm。错开结构的最大温度和形变均小于正对结构, 但最大应力偏大, 均满足要求。

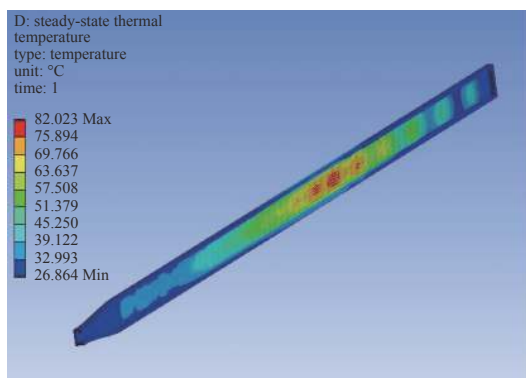


Fig. 23 Temperature distribution (aligned structure)

图 23 温度分布 (正对结构)

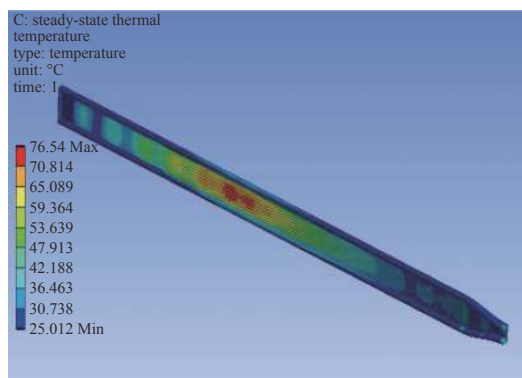


Fig. 24 Temperature distribution (staggered structure)

图 24 温度分布 (错开结构)

3.2 耦合段长度和吸收齿半径的影响

由 CERN 设计的负载吸收齿共有 15 个周期, 吸收齿厚度为 1 mm, 总长 892 mm; 清华大学设计的负载吸收齿共有 21 个周期, 吸收齿厚度为 1.5 mm, 总长约为 1 mm。本文探究了负载耦合段长度和吸收齿半径对于驻波比的影响, 如图 29、图 30 所示, 耦合段长度越长, 吸收齿半径越短越有利于负载的吸收效率, 但会提高实际加工难度。

3.3 干负载的仿真设计

综合考虑, 选择吸收齿为 19 个周期, 为降低加工难度, 去掉了半尺台结构, 吸收齿厚度选择 1.2 mm, 干负载的长度选择约 800 mm, 得到的负载模型, 电场分布以及驻波比如图 31~33 所示。驻波比为 1.024, 50 MW 峰值功率

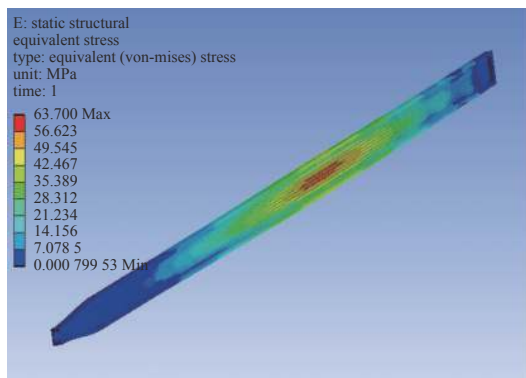


Fig. 25 Stress distribution (aligned structure)

图 25 应力分布 (正对结构)

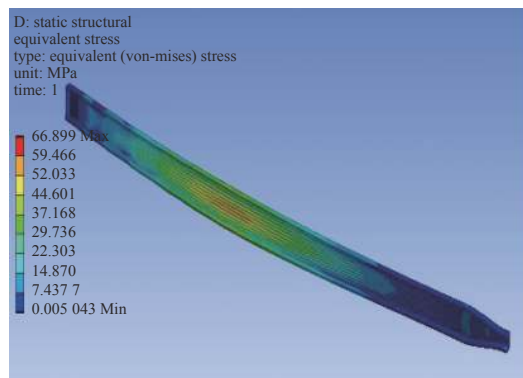


Fig. 26 Stress distribution (staggered structure)

图 26 应力分布 (错开结构)

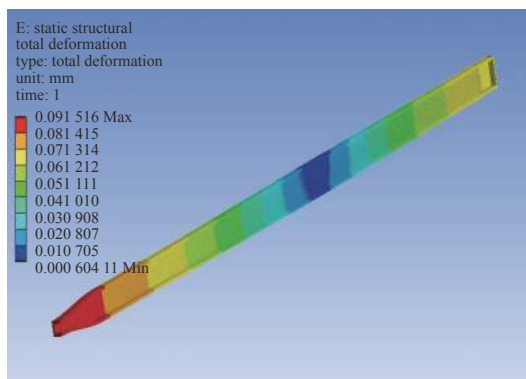


Fig. 27 Deformation distribution (aligned structure)

图 27 形变分布 (正对结构)

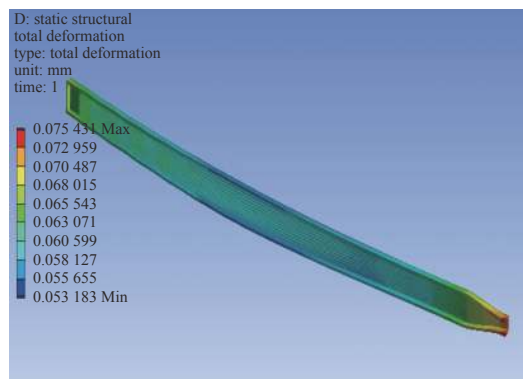


Fig. 28 Deformation distribution (staggered structure)

图 28 形变分布 (错开结构)

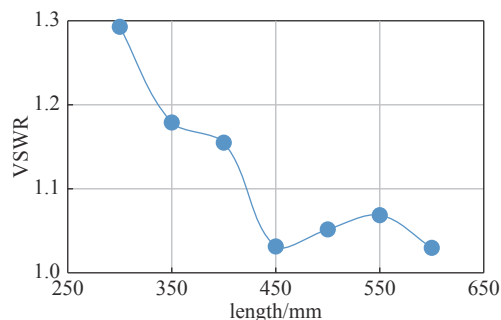


Fig. 29 Effect of coupling length on VSWR

图 29 耦合段长度对驻波比影响

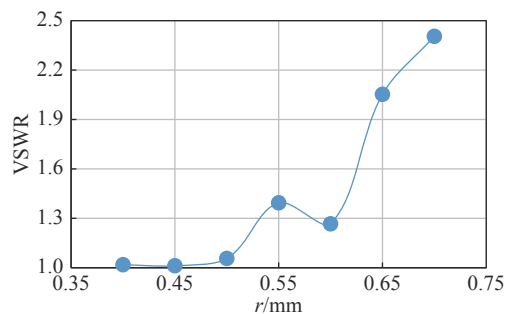


Fig. 30 Effect of absorption tooth radius on VSWR

图 30 吸收齿半径对驻波比影响

下峰值场强为 17.14 MV/m。图 34~36 给出了到达稳态的热应力分析结果, 相比之前结构, 新结构的最高温度和最大应力处在中部偏接口处, 分别为 83.478 °C 和 63.917 MPa, 最大形变仍在接口处, 为 0.072 971 mm。

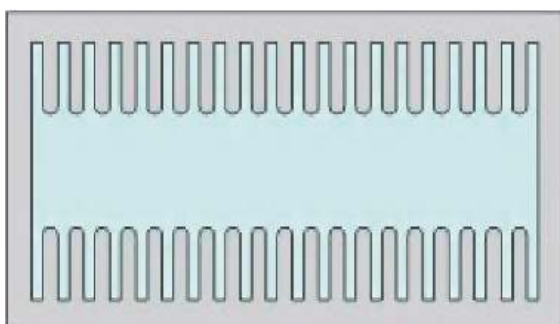


Fig. 31 Structure of the new dry load

图 31 新干负载结构

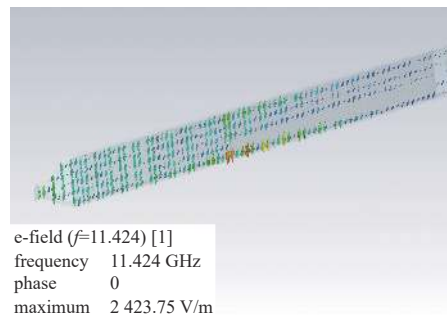


Fig. 32 Electric field in CST of the new dry load

图 32 新干负载电场分布

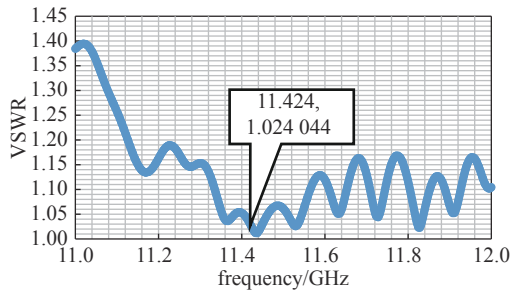


Fig. 33 VSWR of the new dry load by CST

图 33 新干负载驻波比

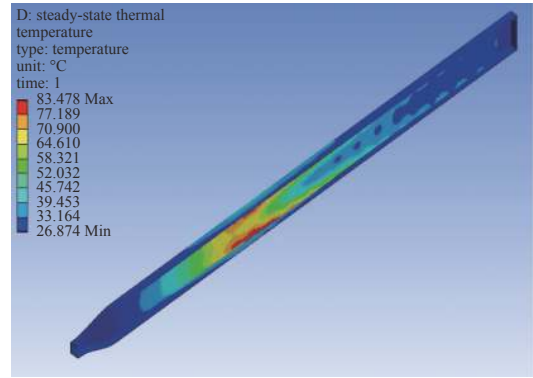


Fig. 34 Temperature distribution of the new dry load

图 34 新干负载温度分布

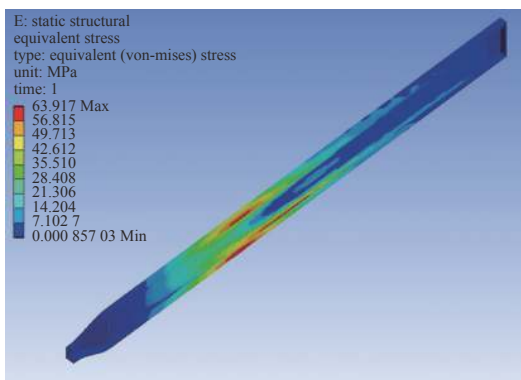


Fig. 35 Stress distribution of the new dry load

图 35 新干负载应力分布

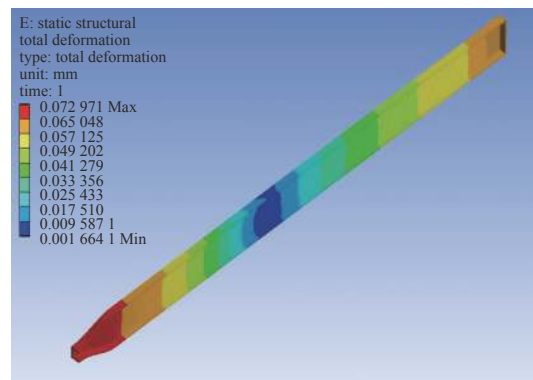


Fig. 36 Deformation distribution of the new dry load

图 36 新干负载形变分布

4 结论

本文研究并仿真设计了三种负载。其中圆形水室水负载进行了样件制作和冷测,负载驻波比的实验测量值和设计值相吻合,表明其具有较低的反射率,满足设计要求。平均吸收功率下,水流速较缓,理论计算表明可以满足设计要求。对水室高度、陶瓷片参数以及水流通道的优化有效降低了水负载的峰值场强。对于圆筒水负载,更改入射端口为标准圆波导,进行了仿真设计,为后续的加工实验提供了理论依据。对于不锈钢干负载,对吸收齿结构和负载长度进行了系列优化,热应力分析结果表明最高温度和最大应力分别为 83.478 °C 和 63.917 MPa,最大形变为 0.072 971 mm,满足实际工作需求。

参考文献:

- [1] 赖龙伟, 冷用斌, 阎映炳, 等. 自由电子激光装置数字化束流位置信号处理器研制及应用[J]. 核技术, 2018, 41(7): 43-49. (Lai Longwei, Leng Yongbin, Yan Yingbing, et al. Development and application of digital beam position measurement processor for FEL[J]. Nuclear Techniques, 2018, 41(7): 43-49)
- [2] 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 Chengen. Fundamentals of microwave technology[M]. Xi'an: Xidian University Press, 1994: 270-271)
- [3] 丁海兵, 高冬平, 唐亮, 等. S波段高功率窗型水负载的设计[J]. 真空电子技术, 2016(4): 26-28. (Ding Haibing, Gao Dongping, Tang Liang, et al. Design of an S-band high power window-type water load[J]. Vacuum Electronics, 2016(4): 26-28)
- [4] 李沅楷. 波导结构水负载大功率率的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014: 1-2. (Li Yuankai. The research of water load power meter with waveguide structure[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014: 1-2)
- [5] 陈亮. 6.5-18.0GHz大功率双脊波导水负载的研制[D]. 成都: 电子科技大学, 2008, 12-16. (Chen Liang. Development of high power 6.5-18.0 GHz double ridge waveguide water load. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008, 12-16)
- [6] Eves E, Yakovlev V. Analysis of operational regimes of a high power water load[J]. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 2002, 37(3): 127-144.
- [7] Liu Liang, Liu Fukun, Shan Jiafang, et al. Design of a new water load for S-band 750 kW continuous wave high power klystron used in EAST tokamak[J]. Plasma Science and Technology, 2007, 9(2): 223-226.
- [8] Koert P, Macgibbon P, Beck W, et al. High power water load for lower hybrid current drive at 4.6 GHz on Alcator C-Mod[C]//IEEE 22nd Symposium on Fusion

Engineering. 2007.

- [9] Krasnykh A , Maxwell T , Sheppard J , et al. Overview of high power vacuum dry RF load designs[C]//Proceeding of the 7th International Particle Accelerator Conference. 2016: 504-506.
- [10] 杨立霞. S波段大功率水负载的研制[J]. [真空电子技术](#), 2015(3): 58-60,74. (Yang Lixia. The development of S-band high-power water load[J]. [Vacuum Electronics](#), 2015(3): 58-60,74)
- [11] Kuzikov S V, Rodin Y V, Vikharev A A. X-band high power loads[J]. *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*, 2017, 22(1): 69-74.
- [12] Riddone G , Wuensch W, Matsumoto S, et al. High power evaluation of X-band high power loads[C]//Proceeding of Linear Accelerator Conference LINAC. 2010: 226-228.
- [13] Meng Xiangcong, Shi Jiaru, Zha Hao, et al. Development of high-power S-band load[J]. *Nuclear Inst and Methods in Physics Research, A*, 2019, 927: 209-213.