

射频四极场加速器腔体多物理场分析

赵博^{1,2} 张斌² 陈叔平¹ 王锋锋² 朱铁明² 金晓凤²

1(兰州理工大学 石油化工学院 兰州 730050)

2(中国科学院近代物理所 兰州 730000)

摘要 射频四极场(Radio Frequency Quadrupole, RFQ)加速器在大功率运行时会导致温度升高和热变形。针对其热稳定性的研究,在很多的物理分析方法中,研究者将模型局限于二维RFQ截面或三维RFQ局部结构,忽略了冷却流体的流动运动。本文提出了一种结合计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)热流耦合的三维多物理场数值分析方法,包括电磁-流体-热-结构的多物理场耦合分析。基于实验工况,分析了3种(Standard, RNG, Realizable) $k-\varepsilon$ 湍流模型在同样工况下的换热效果,通过仿真结果与实验结果比较,验证方法的可行性和可靠性。选择合适的湍流模型,分析不同参数下腔体温度、结构和频率的变化规律。结果表明:应用CFD数值模拟方法可以较好的模拟RFQ加速器稳态传热状态,为未来加速器的结构优化、性能改进提供有效的数值模拟平台。

关键词 计算流体力学, 加速器, 耦合, 数值模拟

中图分类号 TL29

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.030202

Multi-physics field coupling analysis of radio frequency quadrupole cavity

ZHAO Bo^{1,2} ZHANG Bin² CHEN Shuping¹ WANG Fengfeng² ZHU Tieming² JIN Xiaofeng²

1(Institute of Petrochemical Technology, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

2(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract [Background] Radio frequency quadrupole (RFQ) field accelerator causes temperature rise and thermal deformation during high power operation. Among many multi-physical analysis methods for RFQ cavity, these models are limited to 2D RFQ section or 3D RFQ local structures whilst the fluid flow motion was ignored. [Purpose] This study aims to propose a novel three-dimensional multi physical field numerical method for coupling analysis of RFQ cavity. [Methods] Combined with computational fluid dynamics (CFD) and heat flow coupling, electromagnetic, fluid, thermal, structure were integrated into electromagnetic multi physical field coupling analysis. A 81.25 MHz RFQ cavity was taken as sample for verification and the heat transfer effects of three (Standard, RNG, Realizable) $k-\varepsilon$ turbulence models under the same experimental conditions were analyzed. [Results & Conclusions] The results show that the CFD numerical simulation method can better simulate the steady-state heat transfer of RFQ accelerator. The feasibility and reliability of the method were verified by comparison with the experimental results. The variation of cavity temperature, structure and frequency under different parameters were analyzed using a suitable turbulence model. Hence this study provides an effective numerical simulation platform for the structural optimization and performance improvement of the accelerators in future.

国家自然科学基金(No.11427904)资助

第一作者: 赵博, 女, 1985年出生, 2011年于大连理工大学获得硕士学位, 现在博士在读, 研究领域为加速器技术及应用

通信作者: 陈叔平, E-mail: chensp@lut.cn

收稿日期: 2019-08-22, 修回日期: 2019-10-14

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.11427904)

First author: ZHAO Bo, female, born in 1985, graduated from Dalian University of Technology with a master's degree in 2011, doctoral student, focusing on accelerator technology and applications

Corresponding author: CHEN Shuping, E-mail: chensp@lut.cn

Received date: 2019-08-22, revised date: 2019-10-14

Key words Computational fluid dynamics, Accelerator, Coupled, Numerical simulation

随着计算机科学与技术以及数值求解理论与方法的发展,计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)数值方法已经成为流动和传热问题数值分析中的研究工具以及工程设计中的设计工具。射频四极场(Radio Frequency Quadrupole, RFQ)加速器是直线加速器中常用的加速结构^[1],无论在其设计过程中还是其在线运行过程中,它的热稳定性一直是一个被关注的重要问题。很多研究者在RFQ热稳定性研究中将模型局限于二维RFQ截面或三维RFQ局部结构,此外,假设忽略了流体流动运动和温度变化^[2-12]。结合流体流动换热的研究很少,将CFD模拟方法应用到RFQ加速器的研究中,可以作为理解加速器冷却系统的流动换热机理的重要研究手段。

RFQ加速器在线运行时,射频损耗分布在腔体内表面,会加热腔体,引起腔体结构变形进而导致加速器性能下降。为了使腔体维持热平衡,有必要对RFQ腔的冷却过程进行分析。为了了解传热过程和机理,应考虑流动换热过程。本文针对加速器腔体进行完整的三维多物理场耦合分析,重点研究了RFQ腔体流动和传热问题。采用三维稳态热流耦合数值方法模拟计算流动传热过程,将流动场和温度场相互结合,根据实验过程中流体的流动换热效果验证该方法的有效性至关重要。

1 RFQ 结构

RFQ加速器总长5 968.92 mm,腔壁厚68 mm。腔体的主体结构由4块电极,4块腔壁,4根Pi-mode稳定杆(PISL)和8个调谐器组成,其中调谐器安装在4块腔壁上,结构如图1所示。腔体主体由无氧铜焊接而成^[13]。Pi-mode稳定杆设计为中空直杆用于通水冷却。每块电极上有三路流道(翼水路),每块

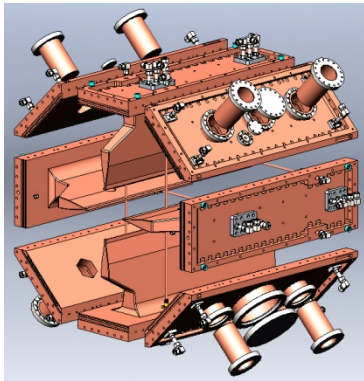


图1 RFQ腔体结构
Fig.1 The structure of RFQ cavity

腔壁上有两路流道(壁水路)均用于腔体冷却。

2 RFQ 冷却传热分析

RFQ的冷却过程包括腔体结构的热传导、流道固-液交界面上的对流传热和流体的流动传热。这是一个典型的流体-固体共轭传热问题。图2显示了腔体冷却通道壁面的耦合传热模型。

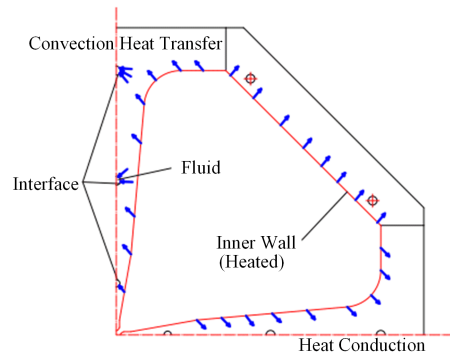


图2 腔体冷却通道壁的耦合传热模型
Fig.2 The coupled heat transfer model of the cooling channel wall of the cavity

固体的稳态导热问题遵循傅里叶定律^[14]:

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad (1)$$

式中: q 为热流密度;比例系数 λ 为导热系数,也称为热导率,它是一种热物性参数,表征材料导热性能的优劣,不同材料的导热系数是不同的。Fluent计算固体区域的热传导,其能量方程为:

$$\partial(\rho h)/\partial t + \nabla(\bar{V} \rho h) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_h \quad (2)$$

式中: h 为显焓;对于压力求解器, $\nabla \cdot (k \nabla T)$ 为固体区域各向异性导热系数; S_h 为源项。

针对对流传热过程,采用牛顿冷却公式,当流体被加热时,液体-固体交界面向流体传递的热量通过以下公式组计算^[13]:

$$q = h \Delta T \quad (3)$$

$$\Delta T = T_w - T_f \quad (4)$$

式中: ΔT 为温差; T_w 为壁面的温度; T_f 为流体温度, $^{\circ}\text{C}$ 。比例系数 h 为表面传热系数,也称为对流传热系数。

3 RFQ 三维多物理场耦合分析

3.1 高频分析

高频分析时应用RFQ结构内部的真空部分。高频分析计算出RFQ腔体的频率,并给出腔体内表

面的电流分布,以此作为热流耦合分析中的热边界条件。RFQ设计的频率为81.25 MHz,高频分析计算得到腔体频率为81.107 5 MHz, Q 值为18 448。

3.2 热-流耦合分析

考虑到腔体壁上的功率损耗为35.7%,而翼上的功率损耗为54%^[7],壁和翼的冷却水流速是有差别的。当冷却水的流速太低时将无法维持流体的湍流运动,当冷却水的流速太高时,一方面易造成管道腐蚀,另一方面容易引发腔体振动。从文献[7-8]中可以看到,RFQ的流速保持在 $2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 附近更合理,表1所示为不同RFQ的流速参数。

表1 不同RFQ冷却水流速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
Table 1 The cooling water velocity of different RFQs ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

	ADS RFQ ^[5]	FRIB RFQ ^[15]	ISNS RFQ ^[16]
壁流道 Wall channels	2.29	1	2.5
翼流道 Vane channels	2.29	1.4~1.6	2.5

在CW He⁺离子束流实验中,功率损耗为24 kW,将其作为数值模拟计算的热边界条件。环境温度为20 °C。壁和翼的冷却水流速分别是 $2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。腔体外壁面与空气接触,因此,在腔体的外表面施加对流传热系数为 $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ 。表2中冷却水参数为模拟计算中流体动力学的边界条件。

表2 冷却水参数
Table 2 The parameters of cooling water

参数 Parameters	速度 Velocity / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	温度 Temperature / °C
PI模杆PISL	2	20
壁流道Wall channels	2	20
翼流道Vane channels	1.5	20.5

热-流耦合分析采用CFD Fluent软件,根据腔体结构和尺寸建立三维模型,模型包括腔体实体和冷却水流体。求解域包括腔体的固体区域(腔体)和流体区域(冷却水)。利用高频结构模拟器(High Frequency Structure Simulator, HFSS)对腔体内部表面的功率损耗分布进行了模拟,并将其应用于热流体耦合分析中。将热量导入腔体内壁,腔体区域会发热,热量通过流道壁面传递给流体被流体带走。通过求解固体区域沿厚度方向的热传导和流体流动实现冷却通道壁与流体之间的传热耦合。

采用基于压力的求解方法,并选择耦合算法,以获得更稳健、更有效的稳态单相流解。对能量和动

量解方程组采用二阶精度离散化方案以提高计算精度,稳定地实现收敛性。采用 k - ε 湍流模型用于处理这个高雷诺数流动问题(雷诺数高于10 000)。为了确定模型的准确性,采用 k - ε 湍流模型下的三种湍流模型包括标准 k - ε 模型、RNG k - ε 模型和Realizable k - ε 模型分别进行稳态分析。

3.3 结构分析

由于腔体的温度升高,腔体结构会发生热变形。加速器在运行过程中,应该避免发生永久的塑形变形,因此需要在热分析的基础上,对RFQ腔体进行结构分析。结构分析可以得出腔体因受热而发生的变形趋势,结构分析计算所求解区域是RFQ腔体的实体部分。在结构分析中,环境温度保持不变,将热分析得出的腔体的温度结果导入结构分析中,同时根据RFQ腔体的固定方式对其相关部位进行自由度的约束。结构变形结果将用来进行高频分析,从而可得频率偏离结果。

4 仿真结果及模型验证

4.1 仿真结果

热流耦合计算可得到RFQ腔体的温度分布情况,如图3所示,从图3中可以看出,RFQ腔体的温度在20~23 °C,可见腔体的温度得到了有效控制。根据腔体的温度结果进行结构分析,结果显示:腔体的最大应力为8.08 MPa,远小于腔体材料的屈服强度,说明腔体发生形变后可以恢复。根据腔体的变形结果再次计算腔体的频率。经分析,腔体频率为81.098 1 MHz,与最初高频分析的结果81.107 5 MHz相比较,频率漂移量为9.4 kHz。

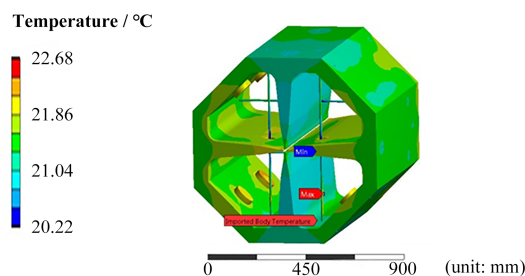


图3 腔体温度分布
Fig.3 Distribution of the cavity temperature

4.2 模拟验证

由于不同部位的功率损耗不同,各通道的水温变化也不同。RFQ加速器有一套完整的水冷系统^[17]。加速器运行实验过程中,通过温度传感器对各流道出口水温进行监测。图4所示为腔体流道分

布。流道出口水温的监测值与数值模拟结果的比较见表3。结果表明:采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型进行数值计算,电极水路的监测值与模拟值之间存在较大的

数据误差。在数值模拟分析中使用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型并不合适。

表3 流道出口水温的监测值与数值模拟结果的比较

Table.3 Comparisons between measured and simulated values of outlet water temperatures at steady state analysis							
部位 Parts	监测结果 Measured / °C	Standard $k-\varepsilon$ / °C	相对误差 Relative error / %	RNG $k-\varepsilon$ / °C	相对误差 Relative error / %	Realizable $k-\varepsilon$ / °C	相对误差 Relative error / %
PISL	20.3	20.421	0.590	20.420	0.591	20.412	0.551
W-UR	20.2	20.384	0.910	20.383	0.905	20.360	0.792
V-L1	20.7~20.79	20.764	0.309	20.762	0.299	20.781	0.391
V-L2	20.7~20.79	20.878	0.859	20.879	0.864	21.248	2.647
V-L3	20.9	21.015	0.550	21.034	0.641	23.201	11.009
V-U1	20.6~20.7	20.663	0.305	20.662	0.301	20.678	0.378
V-U2	20.6~20.7	20.656	0.271	20.655	0.266	21.024	2.058
V-U3	20.9	20.771	0.617	20.773	0.607	22.873	9.440

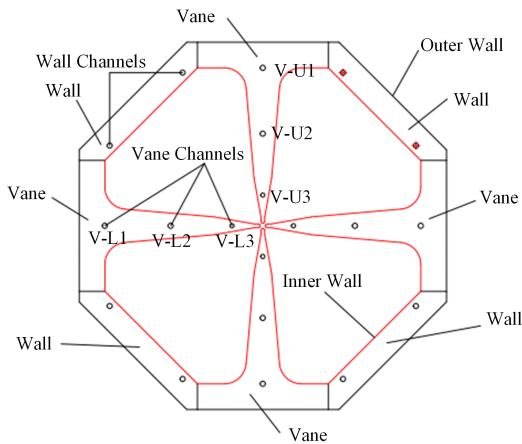


图4 腔体流道分布
Fig.4 Distribution of the cavity channels

5 参数化分析

采用热流耦合方法,分析计算不同条件下,腔体的温度、结构和频率变化。

5.1 冷却水温度对腔体性能的影响

腔体在冷却过程中,由于温度的变化会引起腔体结构发生改变,基于热流耦合分析,可以计算不同水温对腔体结构的影响。图5和图6所示分别为全功率时壁水温和翼水温对腔体温度和应力的影响。

腔体结构形变会引发腔体频率漂移。图7和图8所示分别为壁水温和翼水温对腔体频率影响。结果可以看出:壁水温和翼水温对腔体频率的影响趋势是相反的,为了使腔体的频率偏移最小,可以同时调节壁水路和翼水路的冷却水温度。

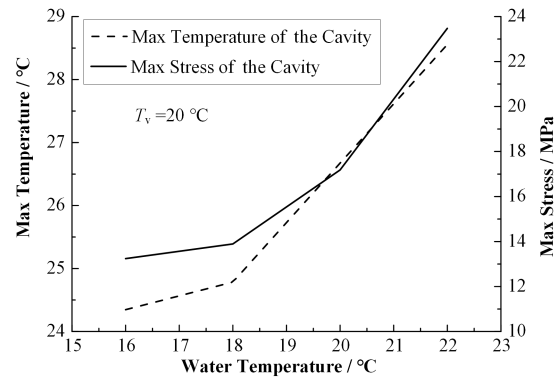


图5 壁水温对腔体温度和应力的影响
Fig.5 Effects of wall temperature on maximum cavity temperature and the maximum stress

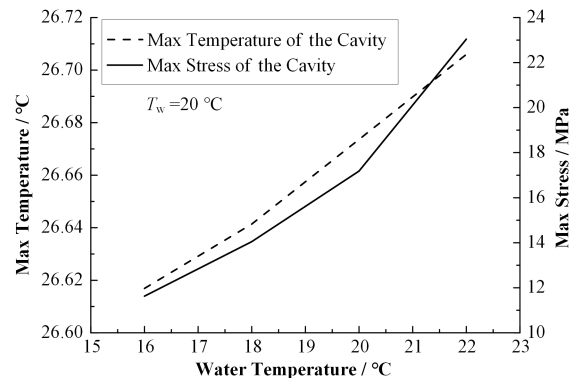


图6 翼水温对腔体温度和应力的影响
Fig.6 Effects of vane temperature on maximum cavity temperature and the maximum stress

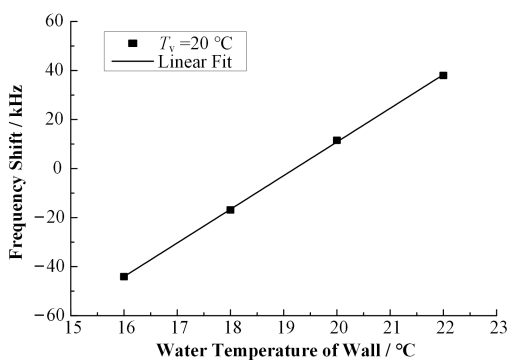


图7 壁水温对频率的影响
Fig.7 Effect of wall temperature on frequency

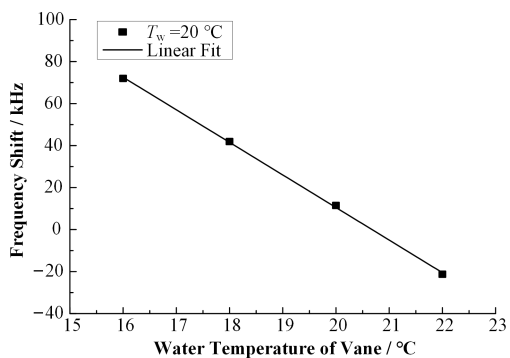


图8 翼水温对频率的影响
Fig.8 Effect of vane temperature on frequency

5.2 馈入功率对腔体性能的影响

分析计算当腔体馈入功率分别为总功率的20%、60%和100%时,在冷却水的流速和冷却水的温度保持不变,环境温度维持恒定不变的情况下,腔体的温度升高、结构形变以及腔体频率的变化情况。图9所示为馈入功率对腔体温度、形变和应力的影响。腔体最高温度、形变量以及应力都呈线性变化。图10所示为馈入功率对腔体频率的影响。腔体在满功率运行时由温度升高引起的频率漂移约在10 kHz附近,能够为腔体在线调节提供参考。

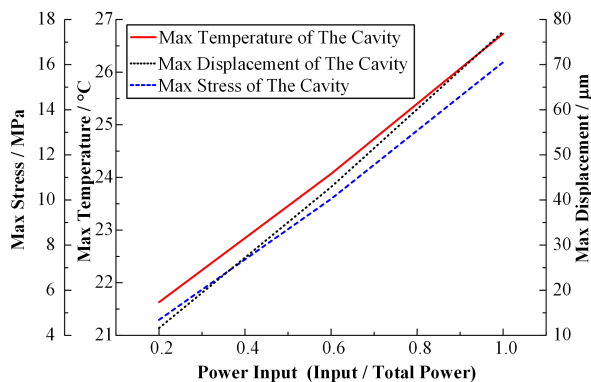


图9 馈入功率对腔体温度、形变和应力的影响
Fig.9 Effects of power input on maximum cavity temperature, the maximum displacement and stress

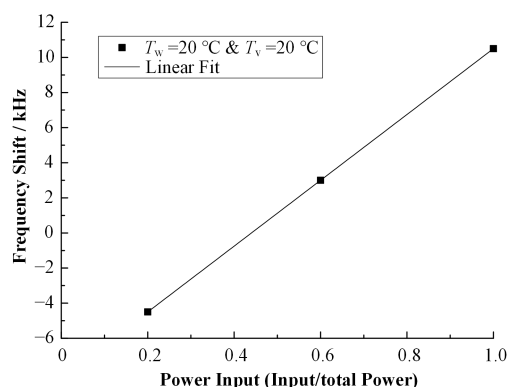


图10 馈入功率对频率的影响
Fig.10 Effect of power input on frequency

5.3 环境温度对腔体性能的影响

分析计算当环境温度分别为15 °C、20 °C和25 °C时,腔体性能的变化情况。分析结果如图11所示,从图11中可以看出,当环境温度升高变化时,腔体的频率以2.3 kHz·°C⁻¹的比率上升。在RFQ加速器运行的过程中,为了避免环境温度的变化对RFQ加速器腔体频率的影响,要尽量将环境温度维持恒定不变。

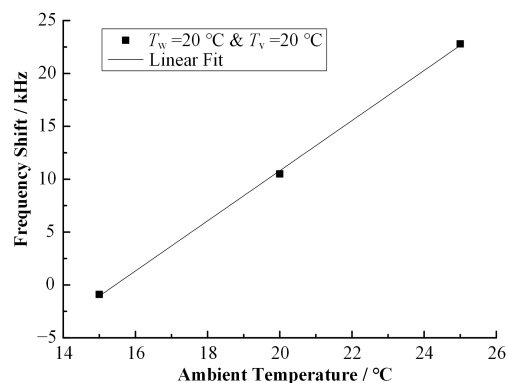


图11 环境温度对频率的影响
Fig.11 Effect of ambient temperature on frequency

6 结语

利用热流耦合方法对RFQ腔体的冷通道设计进行了三维稳态模拟,并通过RFQ束流实验的温度监测结果加以验证,得出如下结论:

1)考虑流体流动运动,采用三种k-ε模型进行数值计算,确定了Realizable k-ε模型并不适合于流体模拟分析。

2)通过数值模拟计算结果与实验数据的比较,可以深入了解冷却系统的性能。在实际运行中,水冷却参数的控制和监测直接反映了腔体的安全状态。基于热流体耦合分析的数值计算,将射频、流场

与结构分析相结合,了解RFQ冷却通道的传热情况,有助于冷却通道的设计和优化。

3)研究了馈入功率、水冷系统中冷却水温度以及环境温度对腔体高频性能的影响。结果表明:该RFQ腔体在CW模式运行条件下,频率漂移范围在腔体的频率可控调节范围之内,水冷系统满足腔体正常运行的需求。

上述耦合分析是对真实情况的稳态分析,在后续工作中可以进行瞬态分析,使计算结果更有实际意义。

参考文献

- Shi H, Ouyang H, Wang S, *et al.* RF tuning and beam commissioning of CW RFQ for China-ADS Injector-I[J]. Nuclear Science and Techniques, 2018, **29**: 142. DOI: 10.1007/s41365-018-0478-x.
- Pepato A, Scantamburlo F, Dima R, *et al.* Engineering design and first prototype tests of the IFMIF-EVEDA RFQ[C]. Proc of IPAC'10, Kyoto, Japan: 600–602.
- Zhang Z L, He Y, Shi A M, *et al.* Design of a four-vane RFQ for CHINA ADS project[C]. Proc of LINAC2012, Tel-Aviv, Israel, 942–944.
- Tiede R, Heilmann M, Mäder D, *et al.* A coupled RFQ-IH-DTL cavity for Franz: a challenge for RF technology and beam dynamics[C]. Proc of HB2016, Malmö, Sweden, 404–408.
- Wang J, Huang J L, Zhang B, *et al.* Frequency tuning with RFQ temperature in China ADS Injector II[J]. Chinese Physics C, 2016, **40**(3): 037003. DOI: 10.1088/1674-1137/40/3/037003.
- Wang J, Huang J L, He Y, *et al.* Multi-physics analysis of the RFQ for Injector II Scheme of C-ADS driver linac[J]. Chinese Physics C, 2014, **38**(10): 107005. DOI: 10.1088/1674-1137/38/10/107005.
- Ma W, Lu L, Xu X B, *et al.* Design of an 81.25 MHz continuous-wave radio-frequency quadrupole accelerator for low energy accelerator facility[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2017: 130 – 135. DOI: 10.1016/j.nima.2016.11.056.
- Ma W, Lu L, Liu T, *et al.* Three-dimensional multi-physics analysis and commissioning frequency tuning strategy of a radio-frequency quadrupole accelerator[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2017: 190–195. DOI: 10.1016/j.nima.2017.06.004.
- Joshi S C, Sharma N K, Kumar N, *et al.* 3D thermal-fluid coupled analysis for 350 MHz RFQ for INDIAN SNS PROGRAMME[C]. Proceeding of APAC 2004, Gyeongju, Korea, 2004: 314–316.
- Li C X, He Y, Xu X B, *et al.* RF structure design of the China Material Irradiation Facility RFQ[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2017, **A869**: 38–45. DOI: 10.1016/j.nima.2017.06.045.
- Li C X, He Y, Wang F F, *et al.* Radio frequency measurements and tuning of the China Material Irradiation Facility RFQ[J]. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, 2018, **A890**: 43 – 50. DOI: 10.1016/j.nima.2018.02.047.
- Zhu X W, Wang H, Lu Y R, *et al.* 2.5 MeV CW 4-vane RFQ accelerator design for BNCT applications[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2018, **A883**: 57–74. DOI: 10.1016/j.nima.2017.11.042.
- Zhao B, Chen S P, Zhu T M, *et al.* The design and fabrication of 81.25 MHz RFQ for low energy accelerator facility[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2019, **51**: 556–560. DOI: 10.1016/j.net.2018.10.003.
- 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 第四版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- 曾加. CW-RFQ加速器水冷分析与设计[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- ZENG Jia. Water-cooling analysis and design for CW RFQ accelerator[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- Joshi S C, Sharma N K, Kumar N, *et al.*, 3D thermal-fluid coupled analysis for 350 MHz RFQ for INDIAN SNS programme[C]. Proceeding of APAC2004, Gyeongju, Korea, 2004: 314–316.
- Zhao B, Zhu T M, Chen S P, *et al.* 3D thermal-fluid coupled analysis for 81.25 MHz RFQ accelerator[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, **931**: 172 – 180. DOI: 10.1016/j.nima.2019.03.032.