

强流四杆型 RFQ 加速腔水冷系统的设计 and 数值模拟

朱昆 郭之虞 方家驹 郭菊芳

(北京大学重离子物理研究所重离子物理教育部重点实验室 北京 100871)

摘要 为了研制一个强中子发生器,北京大学重离子物理研究所设计了一台高负载因子、高流强的 RFQ 加速器.本文讨论了 RFQ 加速腔水冷系统的设计,使用有限元软件 ANSYS 对水冷系统进行了分析.使用 MAFIA 模拟计算得到的功率密度,并将其作为 ANSYS 水冷模型的边界条件.因为 MAFIA 程序和 ANSYS 程序分网方法的不同,使用一个程序来将 MAFIA 的结果导入到 ANSYS 模型中,从而建立起了 RFQ 加速腔的热分析模型.通过这个热分析模型分析并检验了水冷系统的设计,确定了水冷系统的结构.模拟计算结果表明:使用目前设计的这套水冷系统,能够使 RFQ 加速器工作在适宜的温度下以及长时间稳定的运行.

关键词 RFQ 加速器 水冷系统 有限元方法

1 引言

低能强流加速器是目前国际上加速器发展的主流方向之一,RFQ 加速器是低能强流离子直线加速器的首选机型,在加速放射性核束、肿瘤治疗以及强中子发生(如加速器驱动洁净核能系统、散裂中子源、中子照相装置)等方面都有着重要的应用前景.为了研制一个强中子发生器,北京大学重离子物理研究所对一台高负载因子、高流强的用于加速氙的 RFQ 加速器的水冷结构进行了设计研究.

所设计的 RFQ 加速器的高频发射机峰值功率 400kW,负载因子为 10%,氙离子束的输出能量 2MeV,峰值流强 50mA^[1].故该加速器损耗在 RFQ 高频腔体内的平均功率上限为 30kW.该加速器高频腔体的结构是用 MAFIA 程序设计的^[2],计算的结果表明,损耗在 4 根电极上的功率占总损耗功率的 18%,损耗在支撑板上的功率占总损耗功率的 69%,损耗在底座和其他部分上的功率占总损耗功率的 13%.为了保持 RFQ 加速器内被加速束流运行的稳定性和准直性,需要设计一套合理的水冷系统

将产生的热量从 RFQ 高频腔体内带出,使它工作在一个适当的温度下,并且尽可能减小 RFQ 电极和支撑板的热膨胀变形,使其变形在允许范围之内.

2 计算方法与模型建立

使用常用的有限元计算软件 ANSYS 建立了 RFQ 加速腔的热分析模型^[3],将三维电磁场计算程序 MAFIA 计算出的功率损耗分布导入到 ANSYS 的热分析模型中,并根据流体力学理论计算出冷却水的热学特性参数.功率损耗分布和热学特性参数可作为边界条件加载到 ANSYS 热分析模型上.据此分析了工作时 RFQ 加速腔的温度分布,并根据 RFQ 加速腔的温度分布计算了所产生的热变形.根据 RFQ 加速腔的工作温度和热变形的大小,可以对冷却电极和支撑板所使用的冷却管道的孔径大小是否合理作出判断,从而给出有效的水冷系统的设计.

2.1 MAFIA 计算结果的导入

使用三维电磁场计算程序 MAFIA 计算了 RFQ

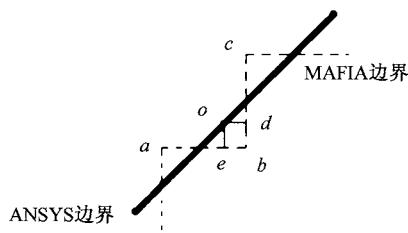


图 1 ANSYS 边界和 MAFIA 边界的区别

加速腔的高频特性,该程序可以计算出 RFQ 加速腔上各处的功率损耗,功率损耗的输出形式可以选择输出功率密度分布或功率分布两种形式^[4].因为 ANSYS 程序可以直接将热流密度,即功率密度分布作为边界条件,所以我们选择将功率密度分布导入到 ANSYS 模型中.但 MAFIA 使用有限差分的方法进行计算,故划分出的网格是阶梯型的网格,而 ANSYS 采用有限元法进行计算,划分出的网格是三角形的网格,这导致两种模型的边界形状不同.如图 1 所示,其中虚线代表 MAFIA 边界,黑色粗线段代表 ANSYS 边界.因此需要使用插值方法将功率密度分布导入到 ANSYS 的模型中.为此编写了专用程序,该程序可将 MAFIA 输出的功率密度分布文件重新整理,转换成 ANSYS 所需要的数组输入文件,再使用 ANSYS 内部自带的线性插值算法将功率密度分布导入 ANSYS 模型中.下面将功率密度分布从 MAFIA 程序导入到 ANSYS 程序的插值计算方法做一介绍.在空间上 ANSYS 的网格和 MAFIA 的网格不一致,对于任一个 ANSYS 的节点 j 来说,它的位置在 MAFIA 模型中两个相邻的垂直于纵向的网格平面之间,设 j 在其中一个平面上的投影为 o 点,而 MAFIA 在该平面上与 o 点相邻的网格点为 a, b, c 点. o 点的功率密度用下边的公式计算:

$$p(o) = p(c) \cdot \frac{bd}{bc} \cdot \frac{ae}{ab} + p(b) \cdot \frac{cd}{bc} \cdot \frac{ae}{ab} + p(a) \cdot \frac{be}{ab}, \quad (1)$$

j 节点在另一个平面上的投影为 o' , o' 的计算和 o 点的计算类似. j 点的功率密度是

$$p(j) = p(o) \cdot \frac{o'j}{oo'} + p(o') \cdot \frac{oj}{oo'}, \quad (2)$$

使用这种插值方法求得了 ANSYS 各个节点上的功率密度分布,以此作为 ANSYS 热分析模型的边界条件.为了检验从 MAFIA 传导到 ANSYS 的功率密度分布的准确性,通过自己编写的程序对 ANSYS 上施加的功率密度分布在整个电极表面进行积分,比较该积分结果和 MAFIA 计算出的电极上的功率损耗的

积分结果,两者计算结果之差在 10% 以内,故可以认为 MAFIA 计算出的功率密度分布结果比较准确的导入了 ANSYS 热分析模型.

2.2 RFQ 电极的冷却计算

冷却系统包括两部分:一部分是支撑板的冷却系统;另一部分是 RFQ 电极的冷却系统.为了便于计算,假定支撑板和 RFQ 电极之间的热传导可以忽略,则支撑板的冷却问题和 RFQ 电极的冷却问题可分别进行计算.

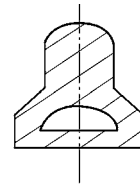


图 2 电极和水冷管横截面形状

本方案采用单水冷管对电极进行冷却,电极和水冷管的形状由图 2 给出.半圆形水冷管的直径是 6mm,该截面的水冷管的水力直径为^[5]

$$d = \frac{4A}{S}, \quad (3)$$

其中, A 为水冷管横截面积, S 为湿周.根据此公式求得水力直径为 3.66mm.等径水管的雷诺数的计算公式是

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu}, \quad (4)$$

其中, ρ 是水的密度, v 是水的流速, μ 是水的动黏度.当 $4000 < Re < 10^5$ 时,可认为水流在光滑管紊流区,此时沿程阻力系数与水管的粗糙程度无关.

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (5)$$

水头损失的经验公式为

$$h_f = \frac{\Delta p}{\rho g} = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (6)$$

由于经过水冷管水压的变化是 2.5 kg/cm^2 , 通过上面的公式可以求出水的流速为 5.08 m/s , 此时的 Re 为 2.31×10^4 . 因此水的流量 m 为 0.0718 kg/s . 水的比热为 $C_p = 4200 \text{ J/kg}$, 消耗在 4 根电极上的功率为 5.45 kW , 平均每根电极上消耗的功率是 1.36 kW . 忽略支撑板和电极之间的热传导, 认为 RFQ 工作时达到热平衡状态, 电极上产生的热量全被水流带走, 水流的温升为

$$\Delta T = \frac{Q}{m C_p} \approx 4.5^\circ \text{C}. \quad (7)$$

普朗克常数 Pr 的公式为

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} = 5.6, \tag{8}$$

其中 k 是水的热导率,大小为 0.6W/mK .在计算流体冷却问题时,努谢尔常数根据经验公式为

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} = 141.84, \tag{9}$$

膜系数的计算公式是

$$h = \frac{Nu k}{d} = 23252\text{W/m}^2\text{K}, \tag{10}$$

其中 d 是水力直径.

上述计算出的这些参数将用于 ANSYS 建立的电极热分析模型中.

2.3 支撑板的水冷系统

由于冷却电极的冷却水是通过两端的支撑板中的水管进入电极水管中的,所以两端的 4 个支撑板与中间的支撑板的水冷结构不一样,需要分别进行分析.图 3 中的(a)图是两端的 4 个支撑板的水冷结构示意图.支撑板两边的两根管子是冷却电极的水冷管的进水管或者出水管.中间的管子是用来冷却支撑板的.(b)图是中间的支撑板的水冷结构示意图.支撑板两边使用套管结构伸入到支撑板的两臂中以改善对支撑板顶部的冷却.可以采用与计算电极冷却基本相同的方法,求出水冷管中冷却水的雷诺数,从而求出冷却水的膜系数.求出的参数将用于 ANSYS 建立的支撑板热分析模型中.

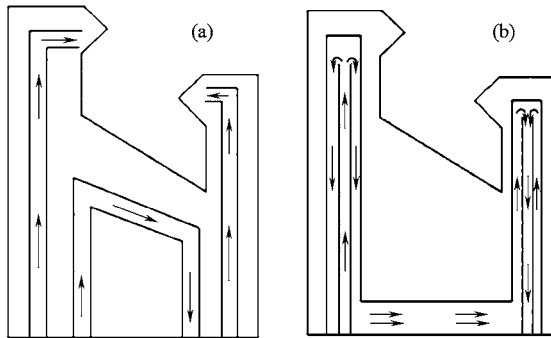


图 3 支撑板水冷结构示意图
(a)两端支撑板的水冷结构;(b)中间支撑板的水冷结构.

3 结果与分析

3.1 ANSYS 对电极热分析的结果

将电极和支撑板的散热问题分开分析,假设电极和支撑板之间没有热交换.电极使用一个直径 6mm 的半圆管进行冷却(见图 2).进水口处的水温是

30°C .由于电极过于细长,使用 ANSYS 程序中的 solid87 单元进行分网,得到的网格划分不理想,故改用 solid90 作为热分析的基本单元,solid95 是等效的结构单元,可以用来进行热应变的分析^[6].将导入的功率密度分布和膜系数等参数加载到模型上,即可对模型进行热分析.计算结果如图 4 所示.由于电极过于细长,为了清楚地显示电极上的温度分布,从整个电极中取出 A,B,C 3 个部分显示,电极上的最高温度达到 44.35°C ,电极在这种温度下进行工作时,它的形变在正常的允许范围内,可以正常工作.

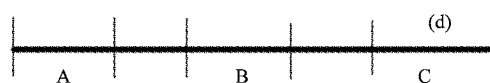
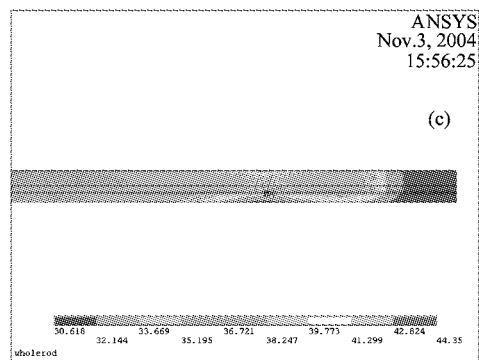
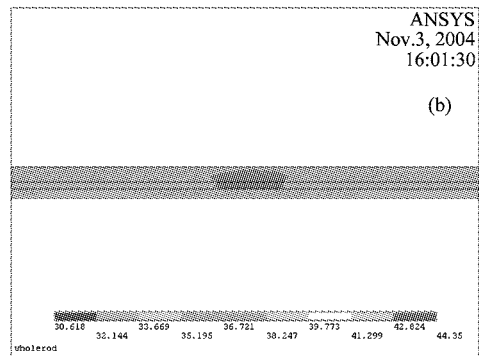
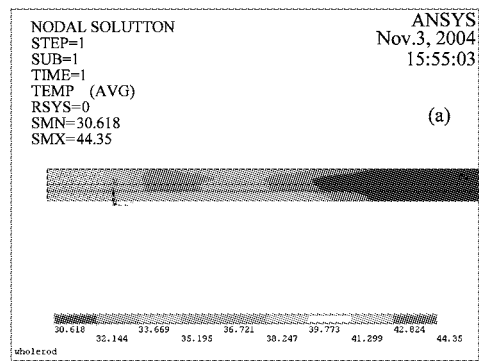


图 4 电极 A,B,C 3 个部分上的温度分布
(a)电极上 A 部分的温度分布;(b)电极上 B 部分的温度分布;
(c)电极上 C 部分的温度分布;(d)A,B,C 3 部分在电极上的位置.

3.2 支撑板的热分析计算

对支撑板进行热分析时采用的方法与对电极进行分析时采用的方法相同,将 MAFIA 计算得到的功率密度分布和通过流体力学计算确定的参数导入到 ANSYS 模型中.由于 ANSYS 模型是不规则形状,故采用 solid87 单元进行分网,用 solid92 作为等效的结构单元.因为在电极冷却系统出水口处水温比较高,流经支撑板时冷却效果比较差,所以出水口端的支撑板的温升是最高的.为此,对出水口端的支撑板进行了 ANSYS 热分析和结构分析.与电极冷却系统相连的水冷管中水温为 34.5℃,专门用于冷却支撑板的水冷管进水口处水温为 30℃.图5是分析结果.

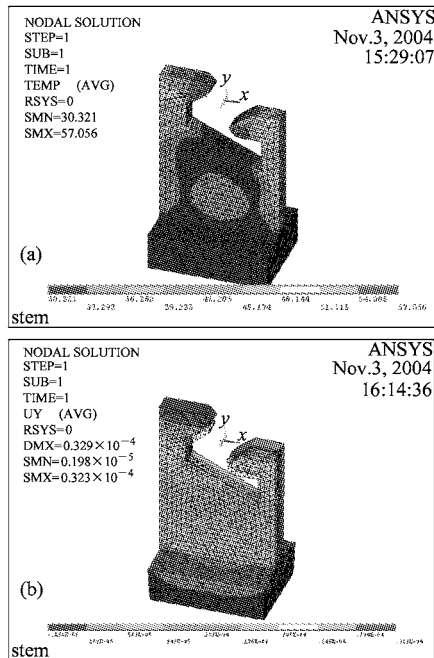


图5 出口端支撑板的温度分布和 y 方向的形变
(a)出口端支撑板上的温度分布;
(b)出口端支撑板 y 方向的形变.

由图中可以看出,支撑板顶部最高温度达到 57℃,这个温度下仍可以比较容易地保持 RFQ 加速器的长时间稳定运行.使用 ANSYS 结构分析模块对支撑板的热应变情况进行了分析,给出了在 y 方向上支撑板的形变.在 y 方向最大的形变是 0.033mm.对中间的支撑板进行了热分析,计算结果在图 6 中给出.由图可见,中间的支撑板的最高温度只有 45℃.对中间支撑板进行了热应变分析,在 y 方向上的最大形变约为 0.007mm.以上结果表明,使用所设计的水冷系统在 RFQ 腔满功率工作时,温度的升高很有限,不会影响 RFQ 加速器的正常运行,所产生的形

变也比较小,两端支板与中间支板的形变量之差在误差允许范围之内,支撑板的热形变造成的电极孔径的改变在允许的误差范围内.

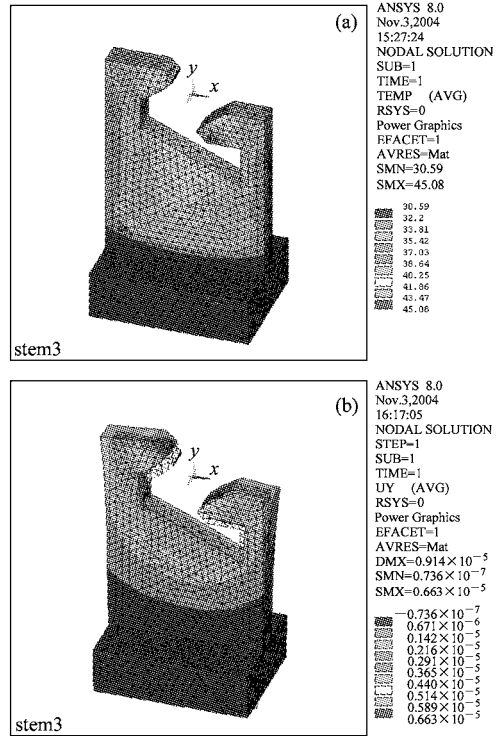


图6 中间支撑板的温度分布和 y 方向的形变
(a)中间支撑板的温度分布;
(b)中间支撑板 y 方向的形变.

在上述模型分析中,将支撑板与电极杆的冷却分开计算,忽略了二者之间的热传导.从计算结果来看,在支撑板与电极接触的部分存在有温差,因此在支撑板与电极之间必然存在热交换.但是因为两者之间的接触面积比较小,所以两者交换的热量与两者自身产生的热量相比,是一个小量.本文给出的计算结果能够大致反映出支撑板和电极总体上的温度分布.同时因为支撑板的温度比电极温度高,所以热交换的结果会使支撑板顶部温度略微降低,其实际形变会更小.

4 结论

为了使 RFQ 加速器能够正常工作,设计了 RFQ 加速腔的水冷系统并对其进行了数值模拟计算.利用三维电磁场模拟计算程序 MAFIA 的计算结果和通用的有限元分析软件 ANSYS 对 RFQ 腔体的水冷系统进行了热分析.计算结果验证了这套水冷系统的有效性.从数值计算的结果来看,该水冷系统可以保证 RFQ 加速器运行在一个适当的温度下,支撑板

的形变较小,从而有利于 RFQ 运行的稳定性,使加速器结构比较稳定.

作者感谢李纬国教授,于茂林高级技师和高淑丽工程师在水冷结构设计时给予的帮助和有益的讨论.

参考文献 (References)

- 1 GUO Zhi-Yu, ZHANG Chuan, Schempp A et al. Design of a Deuteron RFQ for Neutron Generation. Proc. of LINAC2004
- 2 ZHU Kun, GUO Zhi-Yu, FANG Jia-Xun et al. Simulation and Experimental Studies on a 4 Rod RFQ RF Property. HEP & NP, 2005, 29(5): 512 (in Chinese)
(朱昆,郭之虞,方家驯等.高能物理核物理, 2005, 29(5): 512)
- 3 Murdoch G R, Vormann H. Thermal Design of an RFQ Cell for an Radio Frequency Quadrupole Under Construction for ISIS. Proc. of EPAC 1998, Stockholm, Sweden. 1453
- 4 Balleyguier P, Launay F. A Mafia to I-Deas Link for Thermal Studies in the IPHI RFQ. Proc. of EPAC 2002, Paris, France. 2121
- 5 YAN Qiang-Sheng. Convective Heat and Mass Transfer. Beijing: Higher Education Press, 1985. 42 (in Chinese)
(杨强生.对流传热与传质.北京:高等教育出版社, 1985. 42)
- 6 ANSYS User's Manual Revision 8.0

Design and Simulation of a Cooling System for the High Current 4-Rod RFQ Cavity

ZHU Kun GUO Zhi-Yu FANG Jia-Xun GUO Ju-Fang
(Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract To develop a high current neutron generator, preliminary studies on a high current, high duty factor 4-rod RFQ accelerator has been carried out in the Institute of Heavy Ion Physics, Peking University. This paper discusses the design of a cooling system of the RFQ cavity. Finite element program ANSYS was used to analyze the cooling system. The power density was simulated by MAFIA and used as the boundary condition of ANSYS. Due to the different meshing methods between MAFIA and ANSYS, a program was written to transfer the result of MAFIA to ANSYS. Then a thermal analysis model of RFQ cavity was built by using ANSYS. The design of the cooling system was analyzed and checked by using this model, and then the structure of cooling system is determined. Simulation results showed that the design of the cooling system makes RFQ accelerator working steadily at proper temperature.

Key words RFQ accelerator, cooling system, finite element method