

# 750 keV 射频四极注入器水冷设计\*

杨国君, 张 卓, 何小中, 周 智

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 750 keV, 201.25 MHz 的射频四极注入器为四杆型, 电极长度 124 cm, 共 16 个支撑板。根据加速器射频结构设计的结果进行了水冷管道的结构设计, 理论分析了管路的流体力学特性和传热学特性。在忽略结构形变的情况下, 利用射频计算软件的稳态热分析功能计算了加速腔的温度分布, 降低了模拟计算的难度。计算结果表明: 加速腔的最大温升控制在 1 K 以内, 水冷系统能够使加速器在适宜的温度下长时间稳定运行, 设计结果很好地满足了物理需求。

**关键词:** 射频四极; 加速器; 注入器; 射频结构; 水冷系统

**中图分类号:** TL501.5 **文献标识码:** A

射频四极(RFQ)加速结构利用射频四极电场同时实现横向聚焦、纵向聚束与加速, 适合于加速低能离子。RFQ 以很高的效率捕获离子源出来的低能连续离子束, 在较短的距离内把它加速到几百 keV 到几 MeV, 同时把束流聚成束团。在强流离子注入、加速器驱动洁净核能系统、肿瘤治疗和强中子发生器等方面, RFQ 有着广泛的应用前景。中国工程物理研究院将为 35 MeV 质子直线加速器研制一台 RFQ 加速器作为其注入器。在束流动力学设计<sup>[1]</sup>以及射频结构设计的基础上, 本文将介绍这台机器的水冷设计结果。

## 1 射频结构设计的结果

750 keV RFQ 注入器的射频结构为四杆型, 其电极长度为 124 cm, 共 16 个支撑板。加速器的高频发射机峰值功率 250 kW, 负载因子为 0.125%, 计及束流负载后, 损耗在射频腔体内的平均功率不到 0.3 kW。射频结构设计的计算结果表明, 损耗在四根电极上的功率占总损耗功率的 18.4%, 损耗在支撑板上的功率占总损耗功率的 70.9%, 损耗在底座、腔壁以及其它部分的功率占总损耗功率的 10.7%。

虽然损耗功率相对来说并不大<sup>[2-3]</sup>, 如果不冷却, 加速器连续工作时累积的热量必然会导致结构膨胀变形, 使得加速器无法正常工作。为了保证 RFQ 加速器长时间的稳定运行, 需要把产生的热量从 RFQ 射频腔体内带出。设计的水冷系统将使加速腔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。

## 2 RFQ 冷却系统的分析

冷却系统主要包括两大部分: 一部分是 RFQ 电极的冷却系统, 另一部分是支撑板的冷却系统。电极的水冷管截面形状如图 1 所示, 其进出水需要分别通过两端的支撑板。由于电极的冷却水需要进出水管, 两端 4 个支撑板与其它支撑板的结构是不同的。图 2(a)是两端的 4 个支撑板的水冷结构, 其中两侧的管道是电极水冷管道的进水管或出水管, 中间的管道用来冷却支撑板本身。图 2(b)是中间其它支撑板的水冷结构。为了改善对支撑板顶部的冷却, 采用套管结构伸入到支撑板的两臂中。

计算中事先设定了水冷机组出水口到其回水口的水头损失, 即压强差。需要计算出的参数是管道壁的对流换热系数  $\alpha$ 。由于腔体的功率损耗不大, 假定压强差为  $5 \times 10^4$  Pa。

水冷机组的负载是 20 路并联的管路, 共分 3 类: 第一类管路经过电极杆, 由两端的支撑板进出水; 第二类管路经过两端 4 个支撑板之一; 第三类管路经过中间 12 个支撑板之一。每一条管路都是由腔体外部的进出水

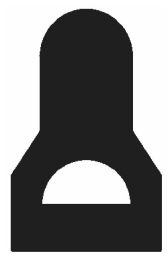


Fig. 1 Cooling pipe of electric rods

图 1 电极的水冷管道截面形状

\* 收稿日期: 2007-11-05; 修订日期: 2008-04-14

基金项目: 国防科技基础研究基金资助课题

作者简介: 杨国君(1976—), 男, 博士, 副研究员, 目前从事加速器技术研究; ygj00@mails.tsinghua.edu.cn.

铜管和腔体内部的冷却管道串连而成。在水头损失确定以后,并联管路的每一路都可以单独计算。串联管路计算的基础是沿途的流量不变<sup>[4]</sup>

$$Q = vA = \text{const} \quad (1)$$

式中: $Q$  是体积流量; $v$  是流速; $A$  是管道截面积。为了简化计算,只考虑管路的沿程损失,忽略了管道过渡部位的局部损失。

## 2.1 RFQ 电极的冷却计算

管道水力直径的计算公式是

$$d = 4A/x \quad (2)$$

式中: $x$  为湿周。

等径水管雷诺数的计算公式为

$$Re = v d \rho / \mu = v d / \nu \quad (3)$$

式中: $\rho$  是流体的密度; $\mu$  是流体的动力粘度; $\nu$  是流体的运动粘度。

当  $4000 < Re < 10^5$  时,认为水流处在光滑管紊流区,这时沿程阻力系数  $\lambda$  与水管的粗糙程度无关,其表达式为

$$\lambda = 0.3164 / Re^{0.25} \quad (4)$$

水头损失的表达式为

$$h_f = \frac{\Delta p}{\rho g} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

式中: $\Delta p$  是压强差; $l$  为管道长度; $g$  是重力加速度。

RFQ 电极管道所在的管路还包括腔体两侧支撑板的进出水管道以及外接铜管,这些管道是串联关系,总的水头损失为

$$h_t = \sum \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (6)$$

在假定了外接铜管的流速以后,可以利用式(1)计算出管路各段的流速,然后利用式(2)~(5)计算出管路各段的水头损失,再利用式(6)计算出总水头损失。

现在已经知道的是管道两端的总水头损失,流速是未知的,因此求解的是一组非线性的方程组。在精度要求不高的情况下,用试探的方法很容易完成非线性求解。计算得到电极内部冷却水的流速为 1.85 m/s。

水的普朗特常数为<sup>[5]</sup>

$$Pr = c_p \mu / \lambda_T \quad (7)$$

式中: $c_p$  为定压比热容; $\lambda_T$  是水的热导率。

对于 298 K 的水,由于  $c_p = 4180 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ,  $\mu = 0.9 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ,  $\lambda_T = 0.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,计算得到  $Pr = 6.27$ 。

在流体被加热的情况下,努谢尔常数的表达式为

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (8)$$

流体与外部的对流换热系数的表达式为

$$\alpha = Nu \lambda_T / d \quad (9)$$

计算得到,电极内部水冷管道壁的对流换热系数为  $9624 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。此外,物质的温升公式为

$$\Delta T = \frac{q}{c_p m} \quad (10)$$

式中: $q$  是热量; $m$  为质量。假定电极产生的热量全部被冷却水带走,计算得到电极内部冷却水的温升为 0.122 K。

## 2.2 支撑板的水冷计算

采用类似的计算方法,得到支撑板各个管道的对流换热系数,中间支撑板两侧水冷管道为  $6.494 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,底部水冷管道为  $2.281 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,两端支撑板中心水冷管道为  $11 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,两侧水冷管道为  $8.821 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,这些管道冷却水的温升均在 0.1 K 左右。

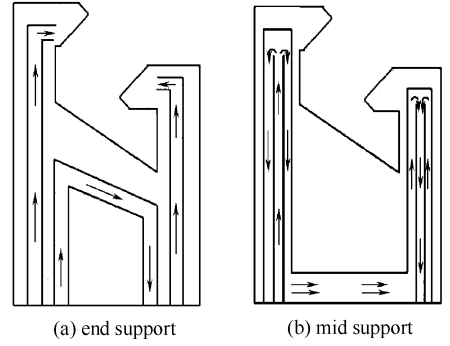


Fig. 2 Cooling structure of supporting plate

图 2 支撑板的水冷结构

### 3 RFQ 冷却系统的模拟计算

#### 3.1 计算模型的建立

四杆型 RFQ 加速腔热分析一般用通用有限元软件 ANSYS 进行<sup>[4-5]</sup>。将 3 维电磁场计算程序(MAFIA 等)计算出的功率损耗分布导入到 ANSYS 的热分析模型中,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。据此可以分析 RFQ 加速腔的温度分布,并根据 RFQ 加速腔的温度分布计算所产生的热变形。

计算中,由于电磁场计算程序的网格和 ANSYS 的网格不同,需要编制专门的程序把场分布的数据在两套网格间进行转换,这是非常繁琐且极易出错的。一般计算中很难对加速腔模型进行整体计算,都把各个元件抽取出来单独计算,这样难以考虑元件之间的换热。由于新版本的射频计算软件大都同时具有稳态热分析的功能(如 CST Microwave Studio, HFSS, Opera/Soprano 等),这里采用了另外一个简单的方法,即用这类软件的多物理场耦合计算功能把射频计算的结果直接导入稳态热分析模块,这样不需要在网格间进行数据转换。750 keV RFQ 注入器的功率损耗相对较低。结构的温升可以控制在一定范围内(如几 K),形变很小,完全可以忽略。因此采用上述方法是可行的。

在建立射频结构计算模型时,已经在结构内部建立了水冷管道。水冷管道的材料电特性设置得与管道外面一致,这样管道的存在不影响射频特性的计算。利用分析计算的结果设置水冷管道表面的对流换热系数和冷却水的温度。射频特性计算完毕以后,利用软件的多物理场耦合计算功能,直接把表面电流的计算结果导入稳态热分析计算模块中计算结构的温度分布。冷却水在从进水口到出水口之间有温升,已经计算得到最大温升约 0.2 K。为了建模方便,模拟计算时采取保守设计,直接把整个水冷管道中的水温设置成其出口温度。实际计算中,环境温度设置为 297.8 K,冷却水温度设置为 298 K。

#### 3.2 模拟计算结果

图 3(a)给出了全尺寸模型的温度分布,其中没有显示加速腔的外壁。从图中可见,温度较高的部分主要是电极杆和支撑板的上部,这些地方正是射频计算结果中表面电流密度较高的地方。整个结构在工作中的温升很小。最高温度为 298.017 K,仅比环境温度高 0.217 K。在这样的情况下,结构的形变很小,水冷系统可以充分保障加速器长时间稳定可靠地运行。

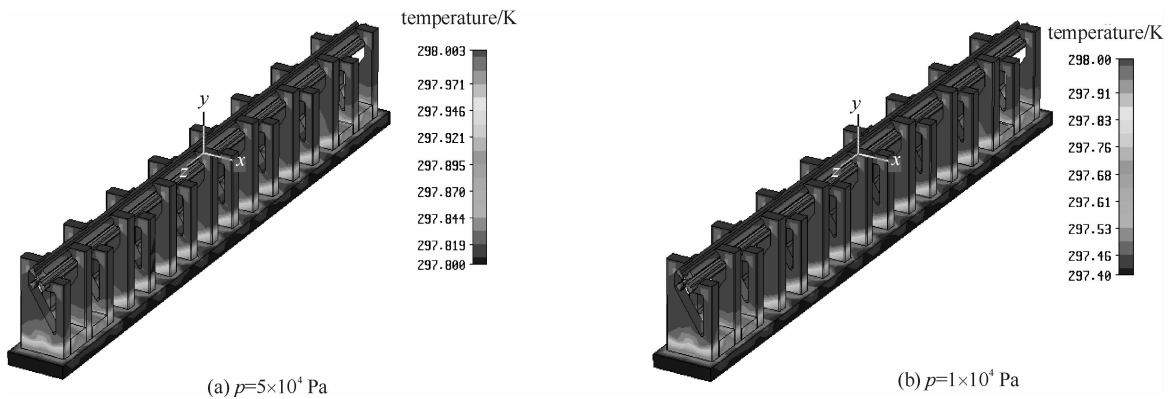


Fig. 3 Temperature distribution of the RFQ model

图 3 RFQ 模型的温度分布

作为比较,计算了管路压强差为  $1 \times 10^4$  Pa 的情况。在这种情况下,冷却水最大温升约 0.6 K。为了计算方便,仍然把模型中冷却水的温度设置为 298 K,而把环境温度设置为 297.4 K。在这种情况下,得到的温度分布如图 3(b)所示。可以发现,电极和支撑板上的温度分布和原来的计算几乎一致。只是由于冷却水流量的减小,最大温升有所增加。

造成这个结果的原因在于设计的水冷系统的负载能力远大于 RFQ 的实际需求。对比文献[2]中的结果,这里加速腔的损耗只有其 1%,而冷却水流量只比其流量小得多,因此流量再减小对结构的温度分布影响很小。当然还可以进一步降低压强差,但这没有必要。因为对于水冷机组来说,要维持  $5 \times 10^4$  Pa 以下的压强差是很容易的。而且一般情况下,冷却水应处于紊流状态<sup>[6]</sup>。在  $1 \times 10^4$  Pa 的情况下,已经有很大一部分冷却水处于从紊流到层流的过渡区,如果继续降低压强差,这些冷却水将由紊流转变为层流。

设计中没有计算结构的形变。在高工作比的四杆型 RFQ 加速器上,可以容许近 30 K 的结构温升<sup>[2]</sup>。因此,在这里温升很小的情况下,不计算结构的形变也是可行的。

## 4 结 论

本文在 750 keV RFQ 注入器动力学设计和射频结构设计的基础上,开展了水冷系统的设计研究。由于加速器的工作比较低,利用新版本射频计算软件的稳态热分析功能,大大降低了建立计算模型的难度。设计的结果可以把 RFQ 腔体的温升控制在 1 K 以内,很好地满足了加速器水冷的物理需求。

## 参考文献:

- [1] 杨国君,张卓,何小中. 750 keV 射频四极注入器束流动力学设计[J]. 强激光与粒子束,2007,**19**(9):1533-1536. (Yang G J, Zhang Z, He X Z. Beam dynamics design of a 750 keV radio frequency quadrupole injector. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(9): 1533-1536)
- [2] 朱昆,郭之虞,方家驹,等. 强流四杆型 RFQ 加速腔水冷系统的设计和数值模拟[J]. 高能物理与核物理,2005,**29**(8):797-801. (Zhu K, Guo Z Y, Fang J X, et al. Design and simulation of a cooling system for the high current 4-rod RFQ cavity. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2005, **29**(8): 797-801)
- [3] Murdoch G R, Vormann H. Thermal design of an RFQ cell for the radio frequency quadrupole under construction for ISIS[C]//Proceedings of European Particle Accelerator Conference. 1998:1453-1455.
- [4] 周谟仁. 流体力学泵与风机[M]. 3 版. 北京:中国建筑工业出版社,1994. (Zhou M R. Hydrodynamics, liquids and gas pumps. 3rd ed. Beijing: China Construction Press, 1994)
- [5] 俞佐平,陆煜. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,1995. (Yu Z P, Lu Y. Theory of thermal conduction. Beijing: Higher Education Press, 1995)
- [6] 李泉凤. 电磁场数值计算与电磁铁设计[M]. 北京:清华大学出版社,2002. (Li Q F. Numerical computation of electromagnetic field and designing of electrical magnets. Beijing: Tsinghua University Press, 2002)

# Design of water-cooling system for 750 keV radio frequency quadrupole injector

YANG Guo-jun, ZHANG Zhuo, HE Xiao-zhong, ZHOU Zhi

(Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-106, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The cooling design of a 201.25 MHz, 750 keV radio frequency quadrupole injector is described in this paper. The essential parameters for the design of the cooling pipes are obtained from the RF structure design. The hydrodynamics and thermal characteristics are theoretically analyzed. Computer simulation is performed using the steady state thermal analysis module of the radio-frequency software. Numerical computation shows that the increase of temperature is controlled within 1 K, the accelerator can work steadily with this cooling system. The cooling design satisfies the physical requirement very well.

**Key words:** Radio frequency quadrupole; Accelerator; Injector; RF structure; Cooling system