

100 MeV 强流质子回旋加速器主真空室 辐射剂量的数值研究

毕远杰^{1,3}, 刘 萍², 张天爵³

(1. 清华大学 工程物理系, 北京 100084; 2. 中国原子能科学研究院 核物理研究所, 北京 102413;
3. 中国原子能科学研究院 串列加速器升级工程技术部, 北京 102413)

摘要:中国原子能科学研究院正在设计研究的 100 MeV 强流质子回旋加速器中真空室内的残余气体和磁场中的洛仑兹剥离将导致部分负氢离子束流损失,并在真空室内产生辐射剂量。本工作采用蒙特卡罗方法模拟计算该加速器运行时真空室外壁上沿圆周方向的辐射剂量分布,计算得出其最大值约为 143 Sv/h。同时,研究了在加速器停机后真空室内部的剩余辐射剂量场分布及其随时间的衰减规律。

关键词:回旋加速器;真空室;蒙特卡罗方法;剩余辐射场

中图分类号:TL54.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-6931(2006)04-0439-04

Numerical Investigation on Radiation Dose in Vacuum Tank of 100 MeV High Intensity Proton Cyclotron

BI Yuan-jie^{1,3}, LIU Ping², ZHANG Tian-jue³

(1. *Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*
2. *China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-3, Beijing 102413, China;*
3. *China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-49, Beijing 102413, China*)

Abstract: In CIAE's 100 MeV high intensity proton cyclotron, the H^- dissociation caused by residual gas and Lorentz stripping during acceleration can make some beam losses and result in radioactivity. Monte-Carlo method is used to simulate the dose equivalent rate distribution in the circumference direction of outside wall of the vacuum tank when the machine is running. The simulated result shows that the maximum value of it is about 143 Sv/h. At the same time, the residual radiation field distribution in the vacuum tank and its decay with time were estimated after the machine is shut down.

Key words: cyclotron; vacuum tank; Monte-Carlo method; residual radiation field

中国原子能科学研究院正在进行 HI-13 串列加速器升级工程的设计、建造,100 MeV 回旋加速器为该工程建设的主体部分。在负氢回

旋加速器中,残留气体和洛仑兹力会引起负氢离子的剥离损失^[1,2]。残留气体引起的束流损失主要发生在低能端,而洛仑兹剥离损失则主

要在高端。加速器运行时,损失在真空室内壁上的束流将会产生很大的辐射剂量场。真空室外的辐射剂量场的计算结果将用于决定加速器的局部屏蔽、吸收体等的设计。加速器停机后,活化生成的放射性核素在真空室的内部将产生剩余剂量场。剩余剂量场的计算对于加速器真空室内部的维修及组件设计具有重要意义。

本工作在束流损失研究的基础上^[3],根据主真空室内壁上能量从 1 至 100 MeV 的束流损失分布,计算加速器运行时的辐射剂量以及停机后剩余剂量场的衰减规律。

1 加速器运行时真空室外壁辐射剂量

本工作采用 MCNP 程序^[4],结合美国的中能核数据库 LA150,对加速器运行时真空室外壁上的辐射剂量进行模拟计算。计算时,考虑质子、中子和光子与物质的相互作用,并对这 3 种粒子在 100 MeV 以下能区进行耦合运输。

1.1 几何模型的建立

回旋加速器采用铝合金圆柱形真空室,磁极位于真空室内部,真空室内半径 202 cm,外半径 206 cm,高度 161 cm。对应于 1 个能量段,束流损失沿圆周方向有一分布。在真空室外表面每隔 1° 布置 1 个计数器。模拟粒子数为 5×10^7 ,最大相对误差为 0.05。

1.2 计算结果

以束流损失状况作为运输程序 MCNP 的输入,分别比较计算真空室外表面由中子引起的注量率和剂量当量率。由核反应产生的 γ 射线引起的注量率和剂量当量率的计算结果示于图 1,2。由图 1 可见:中子注量率和核反应产生的 γ 注量率处于同一量级。由图 2 可见:中子剂量当量率比 γ 剂量当量率大 1~2 个量级。相对中子, γ 射线对辐射剂量当量率的贡献较小。

1.3 计算结果分析

辐射剂量在真空室外壁上的分布呈现周期性,每 90° 为 1 个周期。在第 1 个周期内,中子辐射剂量当量率的最大值出现在 46° 处,为 143 Sv/h;最小值在 29° 处,为 17.6 Sv/h。图 3 示出了束流损失和中子剂量当量率的分布。以第 1 个周期为例,比较图 3 中曲线形状可见,在

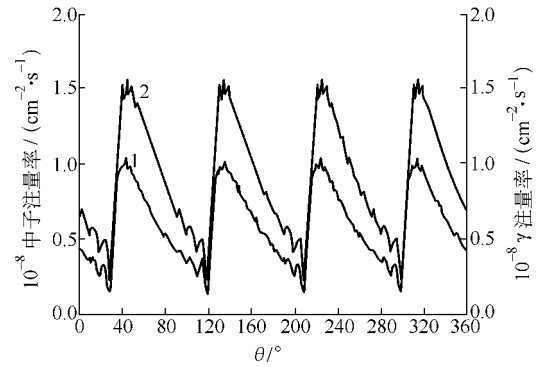


图 1 中子注量率和 γ 注量率比较

Fig. 1 Comparison of neutron fluence rate and γ fluence rate

1——中子注量率;2—— γ 注量率

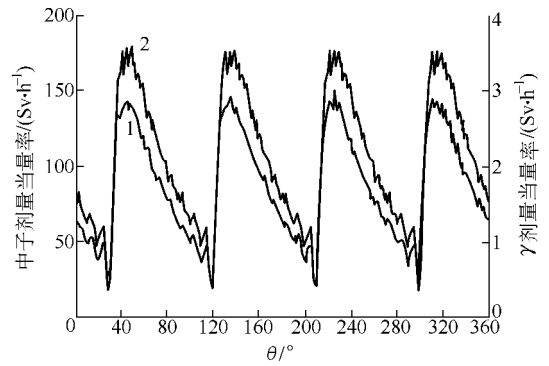


图 2 中子剂量当量率和 γ 剂量当量率比较

Fig. 2 Comparison of neutron dose equivalent rate and γ dose equivalent rate

1——中子剂量当量率;2—— γ 剂量当量率

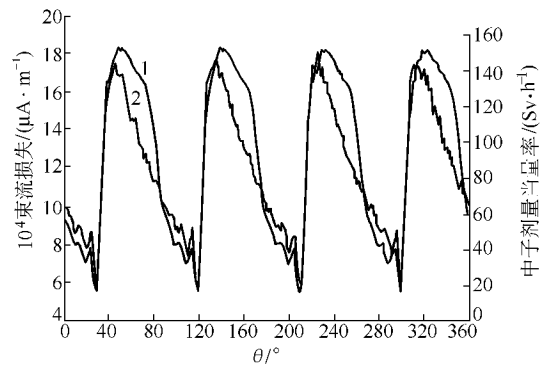


图 3 束流损失和中子剂量当量率的比较

Fig. 3 Comparison of beam loss and neutron dose equivalent rate

1——束流损失;2——中子剂量当量率

56°~78° 范围内,束流损失的曲线比中子剂量

当量率的曲线高许多,这主要是因为束流损失中包括各种能量的负氢离子。图4示出了不同能量段的束流损失。由图4可见,束流在第1个周期的 $56^\circ\sim 78^\circ$ 虽损失很多,但损失的主要是低能粒子,对剂量当量率的贡献较小。

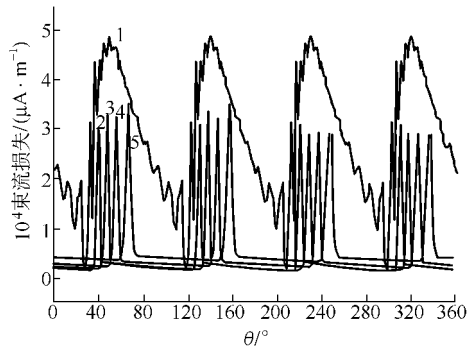


图4 不同能量区间的束流损失

Fig. 4 Beam loss in different energy regions

1—95~100 MeV; 2—75~80 MeV; 3—55~60 MeV;
4—35~40 MeV; 5—15~20 MeV

2 停机后真空室内剩余辐射剂量场

2.1 对剩余辐射剂量场影响显著的放射性核素

100 MeV 质子与铝反应将生成近 40 种放射性核素。其中,半衰期为秒量级的放射性核素在加速器停机几分钟后便衰减干净,半衰期大于 5 000 a 的放射性核素在加速器有效寿命内的积累量微乎其微,可不予考虑。对剩余辐射剂量场影响显著的放射性核素列于表 1。

表 1 对剩余辐射剂量场影响显著的放射性核素

Table 1 Main nuclides contributing significantly to residual radiation field

核素	生成方式	γ 平均能量/MeV	γ 分支比 ¹⁾ /%	半衰期
^{22}Na	(p,3p3n)	0.78	281.0	2.60 a
^{24}Na	(p,3p1n)	2.06	200.0	15.0 h
^{18}F	(p,5p5n)	0.51	193.4	110 min
^{11}C	(p,8p9n)	0.51	199.5	20.4 min
^7Be	(p,10p11n)	0.48	10.4	53.3 d

注:1) 此列中,281.0%表示每 100 个 ^{22}Na 核将发出 281 条 γ 射线,其余类同

2.2 放射性核素饱和活度 A_0

将能量为 1~100 MeV 的入射质子分成 20 个能量区间,活化生成的放射性核素 m 的饱

和活度 A_0 可由下式计算:

$$A_0 = \sum_i \frac{\sigma_m(E_i)}{\sigma_{ne}(E_i)} N(E_i) \rho(E_i) \quad (1)$$

式中: E_i 为位于第 i 个区间的入射质子的能量; $\sigma_{ne}(E_i)$ 为去弹反应截面^[5]; $\sigma_m(E_i)$ 为放射性核素 m 的生成截面,取自美国的中能核数据库 LA150 和文献[6]; $N(E_i)$ 为入射质子的数目; $\rho(E_i)$ 为质子与铝发生去弹碰撞的几率。

文献[5]给出了 $\rho(E_i)$ 随 E_i 的变化,是对能量积分的结果。因此,要得到每个能量区间的质子与铝发生去弹碰撞几率,须对其给出的结果微分。考虑到入射质子在能量从 E_i 降到 E_{i-1} 时因发生碰撞导致数目的减少,微分碰撞几率由下式给出:

$$d(i/(i-1)) = C(E_i) - C(E_{i-1}) \times (1 - C(E_i) + C(E_{i-1})) \quad (2)$$

式中: $C(E_i)$ 是能量为 E_i 的质子与铝发生去弹碰撞的几率; $C(E_{i-1})$ 是能量为 E_{i-1} 的质子与铝发生去弹碰撞的几率。

2.3 真空室中心剩余剂量当量率

已知放射性核素的活度 A ,若认为放射性核素放出的 γ 射线在 4π 空间中各向同性,那么,真空室中心的剩余剂量当量率 \dot{H} 由下式给出:

$$\dot{H} = \frac{AE}{5.4 \times 10^4 \times 4\pi R^2} \quad (3)$$

式中: E 为放射性核素发射的 γ 射线平均能量; R 为源点到场点的距离。

设加速器运行时间为 t_b ,停机后衰变时间为 t_d ,则 \dot{H} 服从如下关系^[7]:

$$\dot{H}(t_d) = \dot{H}_0 [1 - \exp(-\lambda t_b)] \exp(-\lambda t_d) \quad (4)$$

式中: \dot{H}_0 为放射性核素达到饱和时的剩余剂量当量率; λ 为放射性核素的衰变常量。

2.4 结果与分析

根据式(2~4),计算得到加速器停机后真空室内剩余辐射剂量场分布以及其随时间的衰减规律(图 5)。

由图 5 可见,加速器停机时刻的剩余剂量当量率,68.3% 源于 ^{24}Na , 15.9% 源于 ^{22}Na , 15.8% 由 ^{18}F 产生。停机 10 h 后, ^{18}F 几乎完全衰减,停机 100 h(约 4 d)后, ^{24}Na 几乎衰减完全,此后,真空室内的剂量当量主要由 ^{22}Na 产生。

假设活化生成的放射性核素在真空室壁上

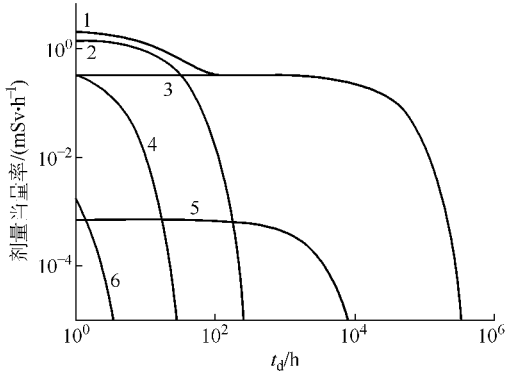


图5 停机后真空室中心剩余辐射场
随时间的变化

Fig. 5 Decay of residual radiation field
in center of vacuum tank after shutdown

1——总剩余剂量当量率; 2—— ^{24}Na 的贡献;
3—— ^{22}Na 的贡献; 4—— ^{18}F 的贡献;
5—— ^7Be 的贡献; 6—— ^{11}C 的贡献

的分布与加速器运行时真空室壁上的辐射剂量分布形状相同,则真空室内任意一点的剂量当量率由下式给出:

$$\dot{H} = \int_{\theta} \frac{A(\theta)E}{5.4 \times 10^4 \times 4\pi D^2(\theta)} d\theta \quad (5)$$

式中: θ 为角度; E 为放射性核素发射的 γ 射线的平均能量; $A(\theta)$ 为放射性核素的活度; $D(\theta)$ 为源点到场点的距离。

从图6可看出,靠近真空室壁外的剩余辐射剂量当量率最大。加速器停机时刻,距离真空室中心 $R=200$ cm 处,辐射剂量当量率最大值为 164.64 mSv/h。随着时间的推移,真空室

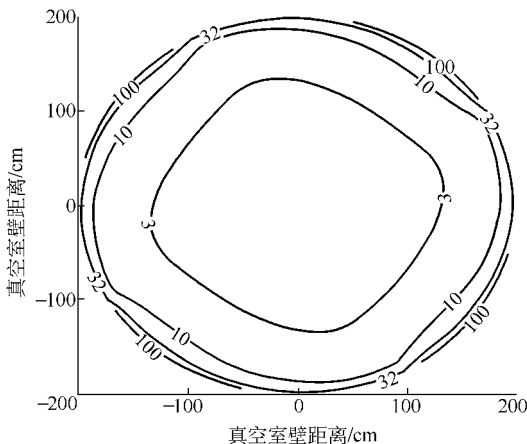


图6 加速器停机时刻的剩余辐射场

Fig. 6 Residual radiation field after shutdown

内各点的辐射剂量当量率遵从相同的衰减规律。

3 结论

本工作研究结果表明:1) 加速器运行时, 100 MeV 回旋加速器真空室外壁的辐射剂量主要来源于中子;2) 辐射剂量在真空室外壁上呈周期性分布, 90° 为 1 个周期,但形状与束流损失有所不同;3) 加速器运行时真空室外壁剂量当量率的最大值约为 143 Sv/h;4) 加速器停机 100 h 后,真空室内辐射剂量最大处的剩余剂量当量率约为 25 mSv/h;5) 在真空室内部,从真空室中心到真空室壁的边缘,剩余辐射剂量当量率快速升高。

本工作仅讨论了高能质子在纯铝中的活化。在进一步的计算中,将考虑 $5\text{A}02$ 或 $5\text{A}03$ 铝合金中其他成分的活化影响以及次级中子的活化作用^[8]。

参考文献:

- [1] SCHWABE J. Magnetic dissociation conditions of acceleration of H^- , D^- beams on the AIC-144 S cyclotron[J]. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect, 1996, A373(1):1-9.
- [2] GILLESPIE G H. Double closure calculation of the electron-loss cross section for H^- in high-energy collisions with H and He [J]. Physical Review, 1977, A15(2):563-573.
- [3] 张天爵. 100 MeV 负氢回旋加速器内部束流损失的研究与数值模拟[R]. 北京:中国原子能科学研究院,2002.
- [4] LANL Group-6. MCNP—A general Monte-Carlo N-particle transport code (Version 4C); LA-13709-M[R]. USA: LANL, 2000.
- [5] MEASDAY D F. The loss of protons by nuclear inelastic interactions in various materials; CERN-69-17[R]. Swizaland: CERN, 1969.
- [6] MICHEL R. Cross sections for the production of residual nuclides by low-and medium-energy protons from the target elements C, N, O, Mg, Al, Si, Ca, Ti, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Sr, Y, Zr, Nb, Ba and Au [J]. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect, 1997, B129: 153-193.
- [7] 陈伯显,安继刚. 核辐射物理及探测学[R]. 北京:清华大学工程物理系,2004.