

FTO 质子照相中扩束器的设计*

刘 进, 章林文, 刘 军, 施将君

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 为了达到最佳的扩束效果和充分利用束流, 从多次库仑散射角、能量损失和透射率这三个方面确定扩束器的材料类型。对均方根多次库仑散射(MCS)、质子能量损失和质子的透过率的研究都表明单位面质量下材料原子序数越大, 扩束效果越好。再结合成本和适用性确定扩束器的材料为钨。同时, 从探测器接收到的质子通量均匀而噪声影响小的角度, 确定了扩束器的厚度。研究结果为: 没有准直器的情形下, 扩束器的厚度为 3.1 cm; 准直器角度为 3.0 mrad 时, 扩束器厚度为 2.4 cm。

关键词: 质子照相; FTO 客体; 扩束器; 准直器

中图分类号: O434.1; R814.3 **文献标志码:** A

高能 X 光照相是武器研究的重要工具之一, 但是 X 光照相存在散射大、能谱效应明显等不利因素, 不能得到高精度的实验结果。目前, 高能质子照相成为了一个新的且可能代替 X 光照相的工具。高能质子照相的优势^[1]有: 一、材料对质子的衰减远小于对 X 光的衰减, 因此在统计上达到相同精度所需的质子数远小于光子数, 因而质子束流强也远小于电子束流强; 二、光子由电子转换而来, 能谱范围很宽, 照相中能谱效应明显, 而质子从加速器直接引出, 能散度小, 无能谱影响; 三、短时间内强流的空间电荷力使得电子束的焦斑较大, 目前最好的 X 光机焦斑半高全宽(FWHM)约 1.6 mm^[2], 而空间电荷力对质子束的影响则弱得多, 质子束可以近似成点源; 四、质子照相的多次库仑散射(multiple Coulomb scattering, MCS)质子通过磁透镜和准直器系统后转换为可用以确定材料的组分和密度分布的有用质子, 而 X 光照相中的散射 X 光则完全是对信号的干扰。

质子照相系统通常由加速器段、分束段、扩束器、匹配段、客体区和成像透镜系统组成。本文将研究大尺寸法国试验客体 French Test Object(FTO)照相系统中的扩束器。

1 扩束器材料的选择

扩束器的作用是将质子束扩展并且尽量使探测器探测到的质子信号均匀^[3]。研究的材料为石墨、铝、铜、钽和钨。扩束是通过质子与材料相互作用的多次库仑散射过程实现的。相同的面质量条件下最佳扩束效果和充分利用束流的选择材料的原则是: 均方根多次库仑散射角大; 质子的能量损失小; 质子的透过率高。

1.1 多次库仑散射

高能质子通过材料时, 因受到原子核的库仑力作用, 质子方向发生了偏转。通过材料后, 质子平面角 θ_{plane} 满足高斯分布^[4]

$$f_{\text{MCS}}(\theta_{\text{plane}}) = (1/\sqrt{2\pi}\theta_0) \exp(-\theta_{\text{plane}}^2/2\theta_0^2) \quad (1)$$

其中标准差 θ_0 为均方根多次库仑散射角, 表达式为^[5]

$$\theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0.088 \lg \left(\frac{x}{X_0} \right) \right] \quad (2)$$

其中 $\beta = v/c$, 为相对论量; c 为光速; p 是以 MeV/c 为单位的动量; x 是材料的面质量, 单位是 g/cm²; 辐射长度 X_0 以 g/cm² 作单位。Tsai 以 Fermi 波函数为原子势函数推导出辐射长度表达式, 其简化式为^[6]

$$\frac{X_0}{\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}} = \frac{716.4 A}{Z(Z+1) \ln(287/\sqrt{Z})} \quad (3)$$

式中: Z 和 A 分别是材料的原子序数和原子量。

图 1 给出了 50 GeV 质子在单位面质量(1.0 g/cm²)的石墨、铝、铜、钽和钨中的均方根多次库仑散射角, 表明单位面质量下材料原子序数越高, 多次库仑散射角越大。因此, 根据扩束器的均方根多次库仑散射角最大

* 收稿日期: 2008-09-09; 修订日期: 2008-11-28

基金项目: 国防技术基础研究基金资助课题

作者简介: 刘 进(1978—), 男, 博士研究生, 从事闪光照相研究; jnl0517@sina.com。

原则,扩束器材料确定为高原子序数金属钨。

1.2 能量损失

通过材料时,一部分质子的能量损失给了电子和原子核。质子能量损失的 Bethe-Bloch 方程为

$$-\frac{dE}{dx} = Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left(\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{C}{Z} - \frac{\delta}{2} \right) \quad (4)$$

式中: $K=4\pi N_A r_e^2 m_e c^2$; N_A 是阿佛伽德罗常数; z 是事件粒子的电荷量; m_e 是以 MeV/c^2 为单位的电子质量; I 是材料的平均激发能; C 是壳层修正系数; $\delta/2$ 是密度效应修正量; T_{\max} 是最大的反冲电子动能。详细的描述和系数见文献[7]。

图 2 给出了 50 GeV 质子的在石墨、铝、铜、钽和钨中的能量损失率,表明单位面质量下材料原子序数越高,能量损失越小。鉴于此,根据设计对能量损失最小的要求,确定扩束器材料为钨。

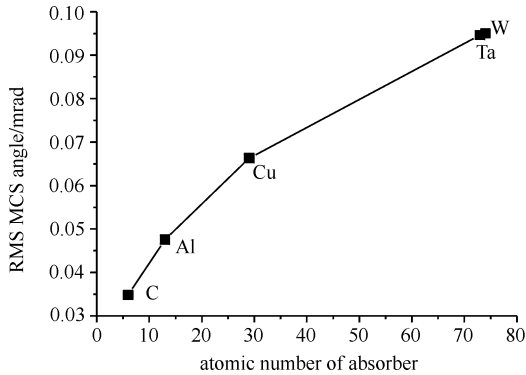


Fig. 1 RMS MCS angle per areal mass for different materials

图 1 单位面质量材料的均方根多次库仑散射角

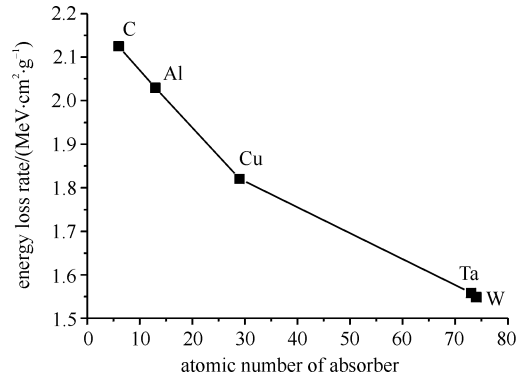


Fig. 2 Energy loss rate per areal mass for different materials

图 2 单位面质量材料的能量损失率

1.3 透过率

通过材料时,质子与材料发生了非弹性碰撞和核反应而使得质子的通量减少。质子的透过率表示为

$$T = \exp(-l_{\text{opt}}) \quad (5)$$

其中 l_{opt} 表示材料的平均自由程数,表示为

$$l_{\text{opt}} = (N_A \sigma / A) x \quad (6)$$

其中: σ 是质子微观截面,单位为 mb,表达式为[8]

$$\sigma = 45A^{0.7} [1 + 0.016 \sin(5.3 - 2.63 \ln A)] \quad (7)$$

图 3 给出了 50 GeV 质子在单位面质量的石墨、铝、铜、钽和钨中的平均自由程数。设计要求穿透率最大,结合方程(5),则要求对应的平均自由程数最小。同时图 3 表明了单位面质量下材料原子序数越高,平均自由程数越小,因此扩束器材料确定为钨。

综上所述,从 3 个角度一致确定扩束器材料为钨。上述研究表明单位面质量下材料原子序数越高,扩束效果越好。

金和铅的扩束效果都会比钨好。没有选择两者,是因为金的造价太高,铅熔点太低,多脉冲质子照相时,容易形成粒子反流和被击穿。洛斯阿拉莫斯实验室选择了与钨具有相近扩束效果的钽作为扩束器的原料[9]。

2 FTO 照相系统扩束器的厚度

从式(1)可知,质子束通过扩束器后呈高斯型分布,且本文研究的客体和准直器的对质子的衰减和改变几乎都是中心强,边缘弱,能够在探测器上形成较均匀的质子通量分布。因此确定扩束器厚度时,关注的物理量为客体边缘质子束强度与中心质子束强度的比值,设计的扩束器厚度对应于质子通量均匀分布的情形。

假设在扩束器上 50.0 GeV 质子束分布的标准偏差($\sigma_{x,y}$)为 0.5 mm,对应的 FWHM 为 1.17 mm,归一发射度 ϵ_n 为 $5.0 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ($\epsilon_n = 4\gamma\beta\sigma'$) [10]。经扩束器后角度 $\theta_{\text{dif-expand}}$ 为 1.25 mrad 的质子束通过客体边缘。该扩束器耦合上含有 2 个四极子的匹配磁透镜系统,能够辐照整个 FTO 客体区。四极子参数分别为长 5.92 m、梯度 7.3 T/m 和长 5.80 m、梯度 5.1 T/m。此时,辐照质子束的特性是在 x 方向和 y 方向关于客体对称的点

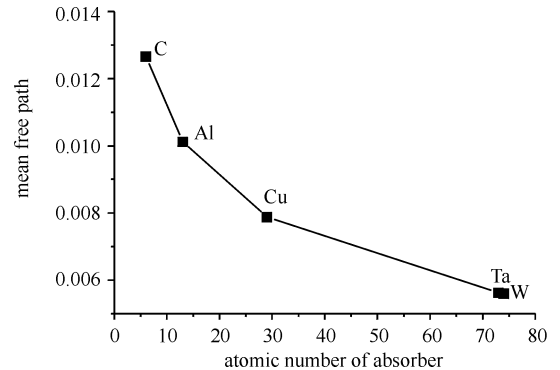


Fig. 3 Mean free path numbers per areal mass for different materials

图 3 单位面质量材料的平均自由程数

源,即在客体上质子的位置和方位角(照相轴为 z 方向)的关系满足 $\phi = \omega x, \phi = -\omega y$, 其中 $\omega = 0.116 \text{ m}^{-1}$ 。虽然增大四极子强度能够减小 $\theta_{\text{dif-expand}}$ 和相应的扩束器厚度,但是对于四极子的制造和成本而言,本文所用的四极子已经是代价昂贵了。

FTO 客体的成分和结构如表 1 所示。因为 FTO 客体不同位置上材料的成分和面质量不同,所以不同位置上质子穿透率不同,如图 4 所示。为了使得经过客体后的质子束均匀而减小噪声的影响,需要扩束到客体边缘的质子束的强度为中心质子束的 35%。

表 1 FTO 的成分和结构

Table 1 Component and structure of FTO

material	radius/cm	density/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)
copper	6.5	8.9
tungsten	4.5	18.7
void	1.0	0

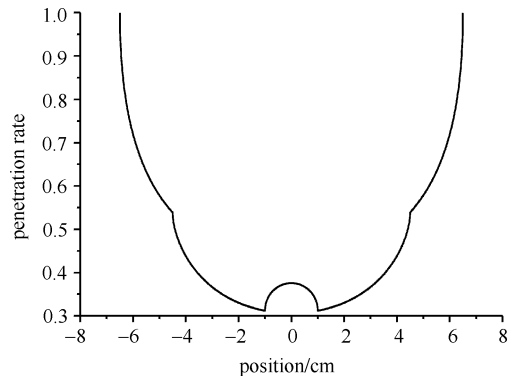


Fig. 4 Proton penetration rate for different positions of FTO

图 4 FTO 客体不同位置上质子的穿透率

利用 Monte-Carlo 法并结合质子经多次库仑散射后的高斯角分布特性,研究了不同均方根库仑散射角下扩展到 1.25 mrad 处束强度与中心(0 mrad)强度的比值,如图 5 所示。由此可以得到比例为 35% 时对应的均方根多次库仑散射角为 0.86 mrad,利用公式(2)计算得到对应的密度为 18.7 g/cm^2 的钨扩束器厚度为 3.1 cm。

成像透镜系统中加入准直器以后,因不同厚度的客体材料对质子束的均方根多次库仑散射角不同,准直器对不同位置质子通量的改变因子不同。取准直器的准直角 θ_{cut} 为 3.0 mrad。图 6 是 FTO 客体不同位置对应的均方根多次库仑散射角。图 7 则是因库仑散射而引起的准直器对不同位置质子通量的改变因子,其是表达式(1)对立体角的积分。再结合图 4 中 FTO 对质子的衰减,得到了如图 8 所示的 FTO 客体和准直器对质子通量的总衰减。由此可知,质子通量均匀化要求质子束扩到 1.25 mrad 时,客体和准直器对质子通量的总衰减应达到 25.0%。从图 5 得到此时对应的均方根多次库仑散射角为 0.75 mrad。利用公式(2)计算得到对应的密度为 18.7 g/cm^2 的钨材料厚度为 2.4 cm。通过 Monte-Carlo 模拟,得到了没有准直器下的计算机合成质子图像。从图 9 可知,质子有效地辐照了客体区,到达非客体区的质子很少,同时客体区的质子通量分布比较均匀。

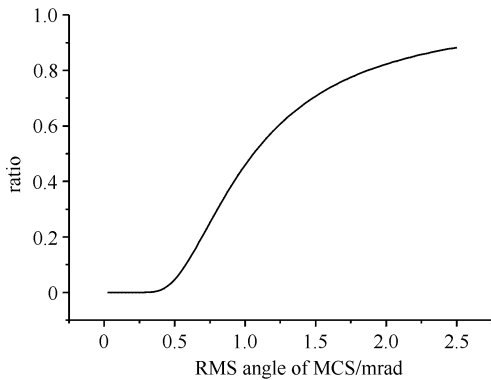


Fig. 5 Ratios of proton flux at 1.25 mrad to that at 0 mrad for different RMS angles of MCS

图 5 不同均方根多次库仑散射角下扩展到 1.25 mrad 的质子通量对 0 mrad 的比值

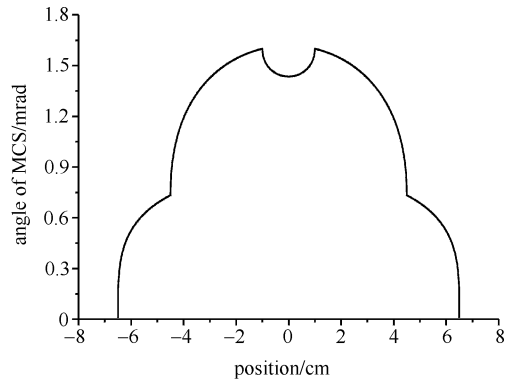


Fig. 6 RMS MCS angles of FTO

图 6 FTO 客体对质子的均方根多次库仑散射角

表 2 不同准直角系统需要的靶厚度

Table 2 Target thicknesses for different collimator angles

collimated angle/mrad	ratio/%*	MCS angle/mrad	thickness/cm
1.0	6.8	0.54	1.3
2.0	20.0	0.69	2.0
3.0	25.0	0.75	2.4
4.0	30.0	0.80	2.7
∞	35.0	0.86	3.1

* : the ratio of proton flux at 1.25 mrad to that at 0 mrad.

对不同角度的准直器系统对应的钨扩束器厚度进行了计算,结果如表 2 所示,其中准直角为 ∞ 对应于没有准直器的情形。可以看出准直角越小,虽然对应的靶厚度越小,但是探测到的质子通量也越少,降低了测量的统计精度。因而准直角不宜太小,通常在

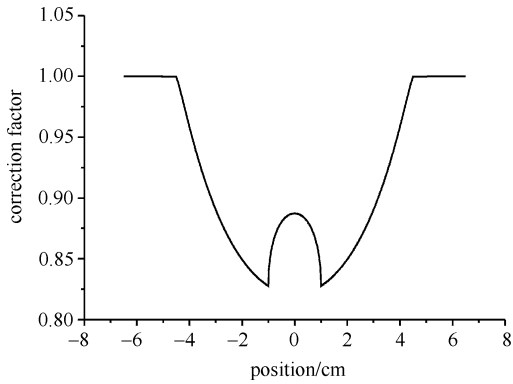


Fig. 7 Correction factor of collimator to proton flux
图 7 准直器对质子通量的改变因子

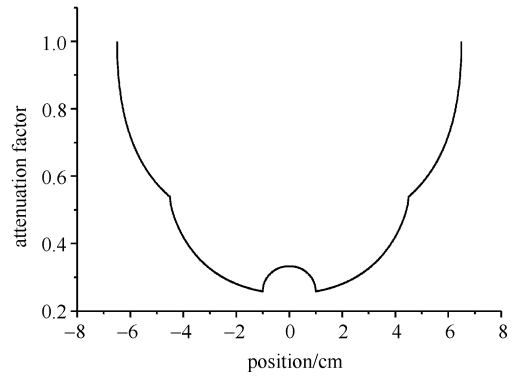


Fig. 8 Attenuation factor of FTO and collimator to proton flux
图 8 FTO 客体 and 准直器对质子通量总的改变因子

3.0 mrad 以上。对应的扩束器厚度大于 2.4 cm。

3 总 结

从均方根多次库仑散射角、质子的能量损失和质子的透过率等角度,一致确定扩束器材料为钨。研究了质子通过 FTO 客体的透射率,并结合不同准直器给出了对应的扩束器厚度。没有准直器的情形下,扩束器厚度为 3.1 cm;准直角为 3.0 mrad 时,扩束器厚度为 2.4 cm。Monte-Carlo 模拟的合成质子图像显示,没有准直器时,质子有效地辐照了客体区且其通量分布比较均匀。总之,设计的扩束器配合匹配磁透镜系统使得质子束能够有效地辐照客体和成像客体信息区形成噪声影响小的高品质图像。

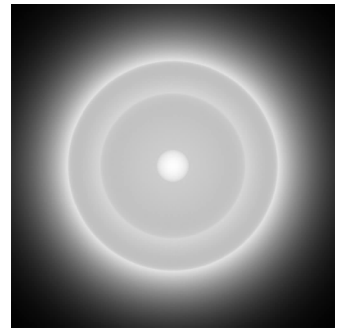


Fig. 9 FTO radiography image synthesized by the Monte-Carlo method
图 9 Monte-Carlo 模拟的合成 FTO 质子照相图像

参 考 文 献:

- [1] Amann J F, Espinoza C J, Gomez J J, et al. High-energy test of proton radiography concepts[R]. LA-UR-97-1520, 1997.
- [2] Scarpetti R D, Nath S, Barraza J, et al. Status of the DARHT 2nd axis accelerator at the Los Alamos National Laboratory[C]//Proceedings of the 2007 Particle Accelerator Conference. 2007.
- [3] Ziocck H J, Adams K J, Alrick K R, et al. The proton radiography concept[R]. LA-UR-98-1368, 1998.
- [4] 许海波. 高能质子照相中面密度的测量和不确定性分析[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(3): 477-482. (Xu H B. Measurement of areal density and its uncertainty in high-energy proton radiography. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(3): 477-482)
- [5] Lynch G R, Dahl O I. Approximations to multiple Coulomb scattering[J]. *Nucl Instrum Meth Phys Res B*, 1991, 58: 6-10.
- [6] Tsai Y S. Pair production and Bremsstrahlung of charged leptons[J]. *Rev Mod Phys*, 1974, 46: 815.
- [7] Groom D. Energy loss in matter by heavy particles[Z]. Particle Data Group Note PDG-93-06, 1993.
- [8] Letaw J R, Silberberg R, Tsao C H. Proton-nucleus total inelastic cross sections: an empirical formula for E greater than 10 MeV[J]. *The Astrophysical Journal*, 1983, 51: 271-276.
- [9] Mottershead C T, Zumbro D. Magnetic optics for proton radiography[C]//Proceedings of 1997 Particle Accelerator Conference. 1997.
- [10] Neri F, Thiessen H A, Walstrom P L, et al. Synchrotrons and beamlines for proton radiography[C]// Proceedings of 1997 Particle Accelerator Conference. 1997.

Diffuser design for FTO's proton radiography

Liu Jin, Zhang Linwen, Liu Jun, Shi Jiang-jun

(Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-105, Mianyang 621900, China)

Abstract: In order to achieve the best expanding efficiency of the diffuser and to use most protons to radiate the French Test Object, the material is chosen from three aspects. They are MCS (multiple Coulomb scattering) angle, energy loss and penetration rate for proton per unit areal mass. The analyzed results of these aspects show that the bigger the atomic number is, the higher the efficiency is. The material is determined to be tungsten considering cost and applicability. The thickness of the diffuser is designed according to the demands of uniform proton flux distribution and small noise. As a result, the diffuser thicknesses are 3.1 cm without collimator and 2.4 cm with 3.0 mrad collimator.

Key words: proton radiography; French Test Object; diffuser; collimator