



中国散裂中子源上试验型 Muon 产生靶的设计优化

刘艳芬, 许文贞, 谭宗泉, 梁赢, 孔伟, 叶邦角*

中国科学技术大学近代物理系, 合肥 230026

*联系人, E-mail: bjye@ustc.edu.cn

收稿日期: 2012-07-29; 接受日期: 2012-08-30; 网络出版日期: 2012-10-25

国家自然科学基金资助项目(批准号: 11075154)

摘要 中国散裂中子源(China Spallation Neutron Source, CSNS)的建设为我国发展第一条基于高功率质子加速器的 Muon 束及 μ SR 技术提供广阔的平台, 本文运用 Monte Carlo 工具 G4beamLine 模拟计算基于 CSNS 的试验型 Muon 源, 寻求 Muon 靶的最优形状和最佳靶材, 使靶产生的表面 μ^+ 经过简单运输后, 能在 μ SR 实验区获得小尺寸, 小角散, 高强度的束斑, 然后对规则的方形靶利用有限差分法建模计算靶内温度场分布, 并对不规则靶提出由热平衡简单估算靶的温度场的方法, 最后对靶的热应力进行分析计算. 试验型 Muon 源的建造在我国建设与国外同行比拟的 Muon 束线方面有重要意义.

关键词 Muon 靶, G4beamLine, 热应力分析, 有限差分法

PACS: 07.77.Ka, 29.27.Eg, 29.25.Pj

doi: 10.1360/132012-657

中国散裂中子源是由动能为 1.6 GeV 的质子束轰击重金属靶产生强流中子的装置, 主要由质子加速器、中子靶站和中子散射谱仪等部分组成, 其质子束流第一期功率达 120 kW, 有效脉冲中子通量达 2.0×10^{16} n/cm²s, 脉冲重复频率为 25 Hz, 每脉冲含有双束团, 强度为 1.88×10^{13} 质子^[1]. 建成后 CSNS 将为我国提供一个先进的基础研究、应用研究和高技术革新研究的科研平台. 除用于散裂中子源外, 还将依托 CSNS 加速器实现诸如质子束、 μ 子束、快中子束等粒子束的潜在应用. CSNS 第二期提升功率可达到 240 kW, 将建设用于 Muon 源和白光中子源的第二靶站. 本文研究的试验型 Muon 源是从快循环同步加速器(RCS)上引出 4%的质子束轰击靶产生 μ 子, 该靶站

位置如图 1 所示. CSNS 第一期已经开工建设, 而且基于 CSNS 的试验型 Muon 源的设计也已经展开^[2-4]. 基于 CSNS 建成的 Muon 源将与 ISIS, J-PARC 的两大脉冲 Muon 共同为 μ SR 技术的应用与发展提供条件.

现有的国际上的脉冲 Muon 源都基于高功率质子加速器产生. 经过加速后的质子轰击靶后产生的 π 在不同的衰变条件下产生不同的 Muon 源: 衰变 μ^+ 产生于具有选定能量范围的高能 π 衰变; Cloud Muon 产生于靶外近靶飞行 π 衰变; 表面 μ^+ 产生于停留在靶表面附近(100 mg/cm²)的低能 π^+ 衰变. 3 种 Muon 源因其各自不同的特点有不同的应用, 其中表面 μ^+ 因具有固定的低能(动量 29.8 MeV/c, 动能 4.12 MeV), 极化率接近 100%, 在测量材料的磁结构及薄膜物质方面

引用格式: 刘艳芬, 许文贞, 谭宗泉, 等. 中国散裂中子源上试验型 Muon 产生靶的设计优化. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2012, 42: 1204-1211
Liu Y F, Xu W Z, Tan Z Q, et al. Design and optimization for experimental Muon source at CSNS (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2012, 42: 1204-1211, doi: 10.1360/132012-657

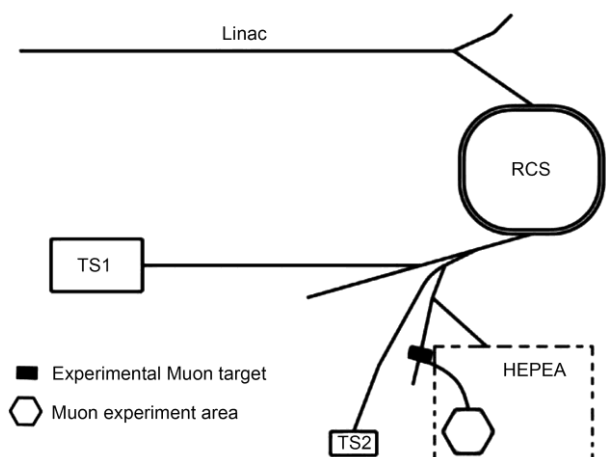


图1 CSNS 布局及试验型 Muon 源位置
Figure 1 The location of experimental Muon source at CSNS.

得到广泛应用^[5-7]. 目前我们的工作模拟计算出基于高功率质子加速器的高产率, 小束斑, 小动量分散的表面 μ^+ 产生靶及收集运输装置, 这对建设我国第一个 Muon 源及 μ SR 技术应用平台很有意义.

1 Muon 产生靶材料和形状的计算

靶的选材及形状都会影响最终表面 μ^+ 的产率, 现有的 Muon 靶中, 石墨靶材的圆柱形靶和方形靶已经被广泛使用(如 J-PARC, ISIS), 多层靶在文献[8]中有研究, 但未被广泛使用. 考虑最终的工程技术及现有经验, 我们模拟选取常见常用的材料 C(石墨), Cu, 靶形以比较常见、容易加工的圆柱形和方形为模型. 计算中入射质子束流沿 Z 方向, 能量为 1.6 GeV, 质子束空间为高斯分布 $\sigma_x=\sigma_y=5.732$ mm, 动量沿 Z 方向, 角散为高斯分布 $\sigma_{Xp}=\sigma_{Yp}=14.13$ mrad, 最后选取动能范围是 3.56–4.15 MeV 的 Muon 为表面 μ^+ .

表面 μ^+ 产生于具有较高能量的质子轰击靶, 因此所选的靶材必须能在真空高温环境下稳定工作. 熔点高、热稳定性好、热膨胀系数小、能在真空中稳定工作的材料(如表 1), 就成为靶材的理想选择. 如图 2 为模拟计算中靶与探测器的布局图: 质子沿 Z 轴正方向入射, 靶的尺寸选为 200(X)×150(Y)×150(Z) mm, 靶中心在 X 轴上, 靶表面与质子束的距离为 BX, 在 X 轴正方向上靶表面和距靶心 600 mm 处分别布置探测器 Det1 和 Det2 收集表面 μ^+ , 探测器的面积是 800 mm×800 mm.

表 1 可选靶材的相关参数

Table 1 Material parameters

| 材料 | 密度 (g/cm ³) | 熔点 (K) | 热膨胀系数 (1/K) |
|--------|-------------------------|--------|-----------------------|
| C (石墨) | 2.0 | 3773 | 7.9×10^{-6} |
| Be | 1.85 | 1556 | 11.3×10^{-6} |
| Cu | 8.96 | 1357 | 16.5×10^{-6} |
| Ni | 8.90 | 1726 | 13.4×10^{-6} |
| W | 19.3 | 3680 | 4.5×10^{-6} |

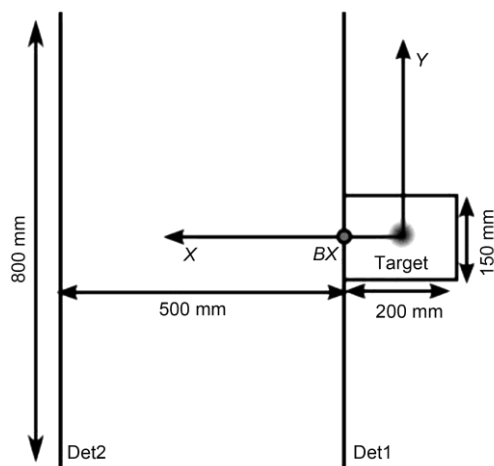


图2 模拟计算中 Muon 产生靶和探测器的布局(质子沿 Z 方向入射)

Figure 2 The schematic of Muon production target and particle detectors.

图 3 中, 由大探测器面 Det1 和不同接收孔径的 Det2 收集到的总的表面 μ^+ 数量可以看出: $BX < 20$ mm 时, Cu 靶都比 C(石墨)靶产率高; 随着 BX 的增大, 两种材料的表面 μ^+ 产率先增大后减小, Cu 在 $BX=5$ mm 时取极值, C(石墨)在 $BX=7.5$ mm 时取极值. 因为 BX 的增大增加了 Muon 收集方向上靶的厚度, 厚靶的阻挡使 π^+ 静止在靶表面附近的比例变小, 表面 μ^+ 的产率随之下降, 计算还表明 Cu 比 C(石墨)产率下降快. 图 3(b)表明: 距靶心为 600 mm 处半径为 135 mm 的孔径由 C(石墨)靶收集到的表面 μ^+ 比 Cu 靶少约 30%(石墨 $\sim 8.64 \times 10^{-7}$ /proton 和 Cu $\sim 12.4 \times 10^{-7}$ /proton); 半径为 67.5 mm 的孔径, 由两种靶材收集的表面 μ^+ 数量相差不大(石墨 $\sim 2.09 \times 10^{-7}$ /proton 和 Cu $\sim 3 \times 10^{-7}$ /proton). 将距靶心 600 mm, 半径为 67.5 mm 孔径收集表面 μ^+ 的 G4beamLine 计算结果与文献[3]的 Fluka 计算结果比较得出, 两种计算方法得到表面 μ^+ 的产率值有差异, 产率极值相差 $\sim 30\%$; 但是两种工具计算的表面 μ^+ 产率随 BX 变化趋势一致, 并且产率取极

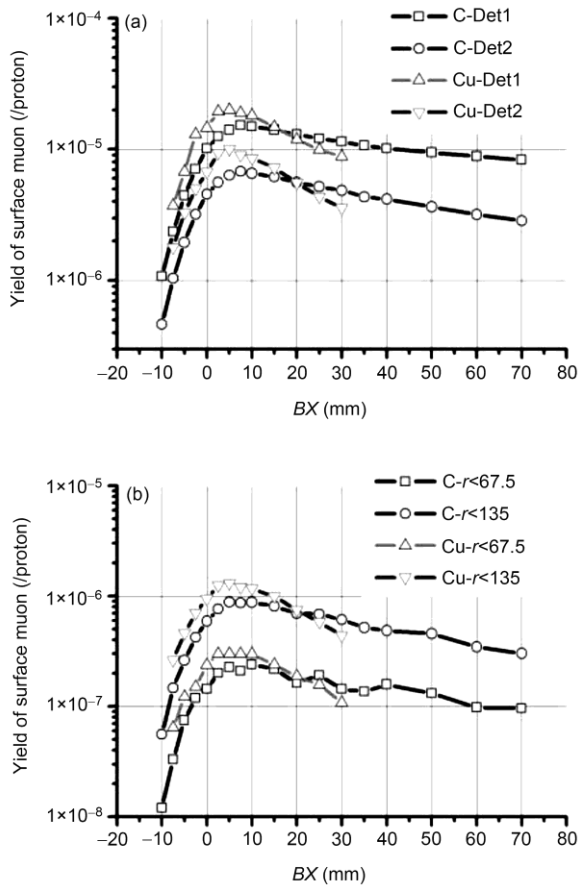


图3 (a) Det1 和 Det2 收集到的表面 μ^+ ; (b) 距靶心 600 mm 处不同孔径探测器收集到的表面 μ^+

Figure 3 (a) total surface Muon collected by Det1 and Det2; (b) surface Muon collected by Det2 in different aperture.

值时的 BX 值一致(石墨 C \approx 7.5 mm、铜 Cu \approx 5 mm), 考虑两种工具的独立性, 认为该结果与文献[3]一致.

对铜和石墨这两种靶材的计算表明, 无论选用何种靶材, 在 Muon 收集方向上靶的厚度不宜太大, 并寻找 π^+ 能停留在靶表面附近最大的厚度; 若收集表面 μ^+ 的第一块四极磁铁的孔径大, 而且实验区要求束斑不是很小时, 可以选择高 Z 的靶材(如铜、镍、钨等)来获得较高产率的表面 μ^+ ; 但是要得到角散和尺寸都较小的表面 μ^+ 束斑时, 高 Z 的靶材, 产率的优势不大, 如果考虑中子的屏蔽难度及表面 μ^+ 的纯度^[9], 此时低 Z 的靶材更合适使用.

以低 Z 材料石墨为靶材, 研究圆柱形、方形、以及基于方形靶的多层薄靶对表面 μ^+ 产率的影响. 研究表面 μ^+ 产率与圆柱形靶半径关系的计算中, 圆柱形靶长为 150 mm, 半径为 10–70 mm, 探测器布局如

图 4 所示, 以靶中心为圆心布置大圆筒探测器, 探测器筒半径为 600 mm, 筒高 270 mm. 质子沿靶的轴线入射, 并定义半径为 135 mm 的探测面与质子出射方向的夹角为收集方向($^\circ$), 分析不同收集方向上半径为 135 mm 孔径内收集到的表面 μ^+ 如图 5 所示.

在图 5 中, 收集方向在 45° – 150° 范围内的小探测器上收集到半径 30 mm 圆柱形靶产生的表面 μ^+ 比其他半径的靶多, 并且在与束流成 120° 方向上半径 30 mm 的靶有最多的表面 μ^+ (可达到 1.03×10^{-6} /proton); 小于 45° 范围的探测器收集到不同半径的靶产生的表面 μ^+ 差别不大, 而且比其他位置探测器收集到的少, 因为表面 μ^+ 的形成是静止在表面附近的 π^+ 衰变, 小于 45° 的方向 π^+ 能量较高, 与束流后端相比这些方向低能量 π^+ 静止在靶表面附近发生衰变概率较低, 表面 μ^+ 产量也就较其他方向小, 因此在 Muon 收集方向上靶的半径 \sim 30 mm 为宜.

将图 4 布局中的圆柱形靶替换为方形靶, 靶长度分别选取 20, 40, 60 和 80 mm, 宽度从 5 mm 起, 以

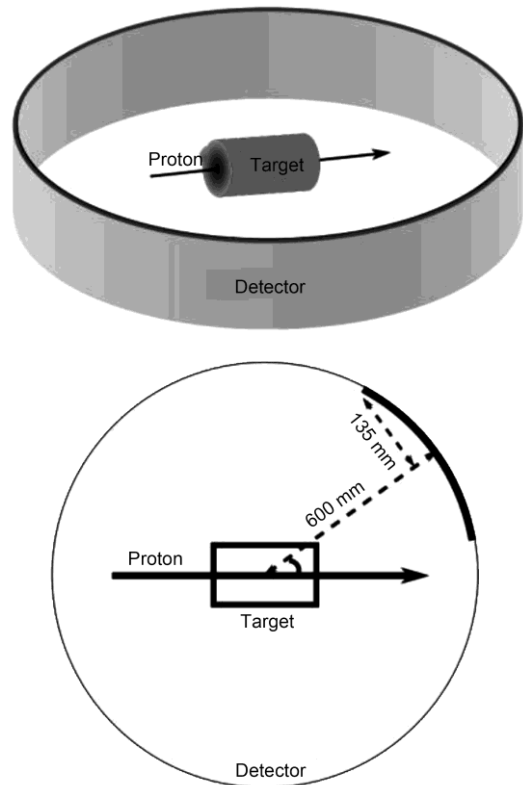


图 4 圆柱形靶及探测器分布图

Figure 4 Schematic of Muon production target and particle detectors.

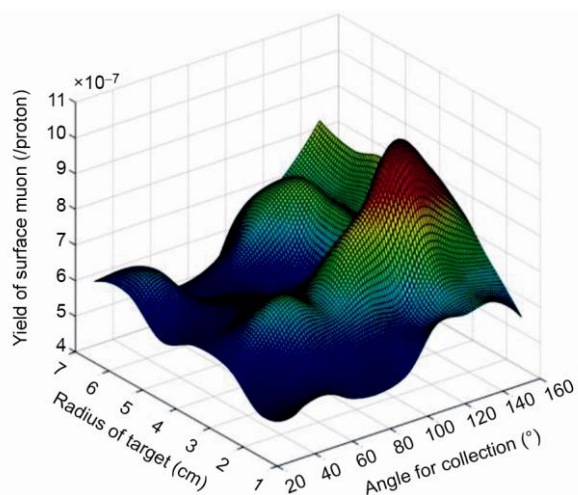


图5 不同位置探测到的表面 μ^+ 数量与靶半径的关系
 Figure 5 The yield of surface Muon vs. radius of target and angle of collection.

5 mm 为步长, 逐渐增加到 80 mm. 经过较大规模的模拟计算得到图 6.

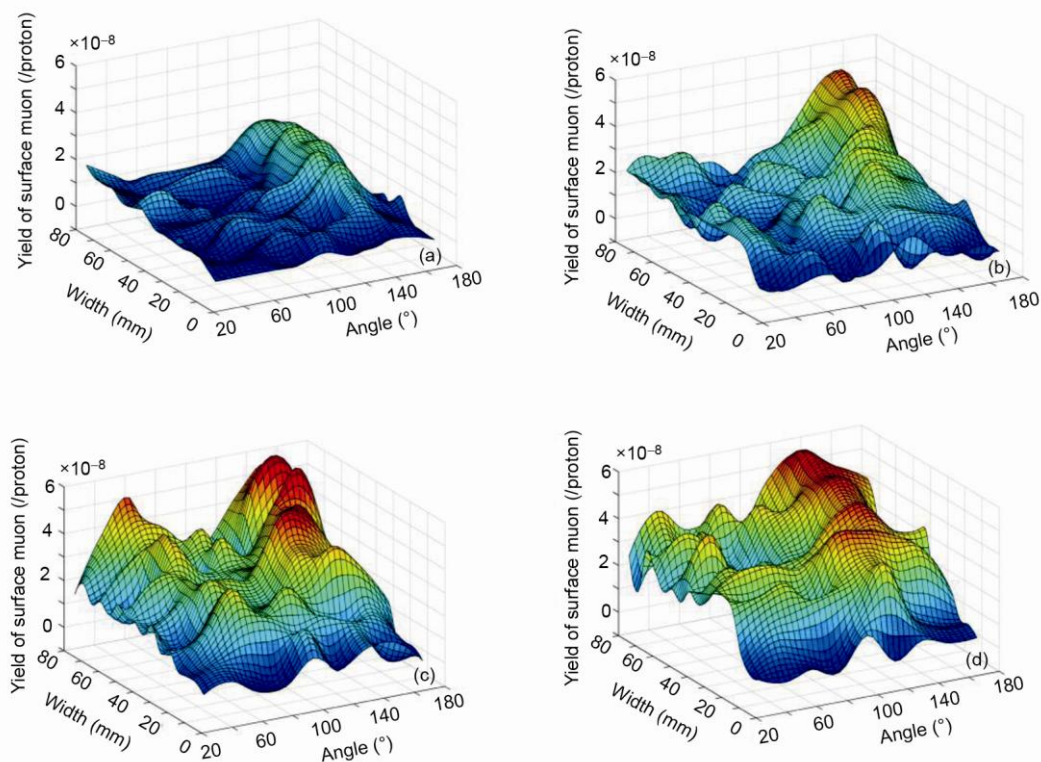


图6 不同尺寸的方形靶的表面 μ^+ 产率

横坐标表示收集角度纵坐标表示截面宽度, 竖坐标表示表面 μ^+ 的产率, (a)–(d)靶长依次为 20, 40, 60 和 80 mm

Figure 6 the yield of surface Muon produced by graphitic rectangle target with different length (Angle: direction of collection, Width: width of rectangle target). (a) 20 mm; (b) 40 mm; (c) 60 mm; (d) 80 mm.

结果表明: 靶在束流后端 Muon 产率要显著高于前端; 不同靶长情况下截面宽度~60 mm 时, 表面 μ^+ 产率较高, 与上面圆柱形靶最佳直径的计算结果一致; 靶长小于 60 mm 时 Muon 产率随靶长增加明显. 另外我们选择了 60 mm×60 mm×60 mm 和 80 mm×80 mm×80 mm 两种尺寸靶对束线上第一个四极磁铁 (孔径的半径为 135 mm)能收集到的表面 μ^+ 产率进行计算, 产率分别为 $(7.1\pm 0.8)\times 10^{-8}/\text{proton}$ 和 $(9.6\pm 0.8)\times 10^{-8}/\text{proton}$. 根据 CSNS 上为试验型 Muon 靶提供的 4%质子功率计算, 我们可以得到第一个四极磁铁能收集到表面 μ^+ 强度达到 $10^6 \mu^+/\text{s}$ 量级, 按 10%的束线输运效率计算, 最终在实验端至少能够获得 $10^5 \mu^+/\text{s}$ 量级的 Muon 源强度, 可以达到设计指标.

考虑靶长增大时 Muon 子在第一块四极磁铁中大入射角的数量变多, 给小束斑粒子输运带来难度. 两个方形靶产率相差不大时, 我们选取较短的靶 60 mm×60 mm×60 mm. 以此参照计算多层靶模型, 将图 4 中的圆柱形靶换为多层靶计算, Muon 的收集方向如

图 7 所示. 多层靶截面为 60 mm×60 mm, 靶总长度为 60 mm, 每层厚度平均分配总长度, 靶间距为两靶间相邻面间的距离. 分析不同间距(20, 40, 60 和 80 mm)的多层靶(1-4 层)在距靶心 600 mm 处半径为 135 mm 的孔径收集到的表面 μ^+ 数量如图 8 所示.

图 8 的计算结果表明 3 层靶的束流前端(30°-50°)和束流后端(80°-150°)均出现较多表面 μ^+ (~ 5.4×10^{-7} /proton), 而侧面出现较少, 这一结果主要由探测器

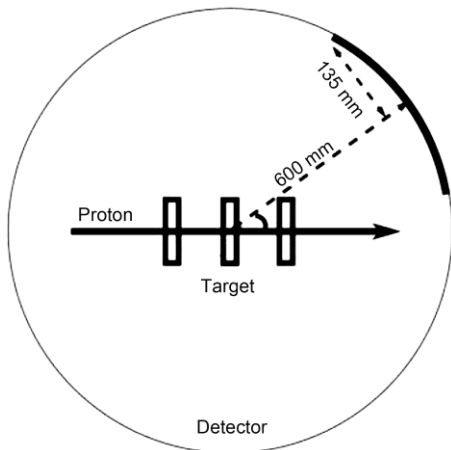


图 7 多层薄靶及探测器分布图
Figure 7 Schematic of thin targets and particle detector.

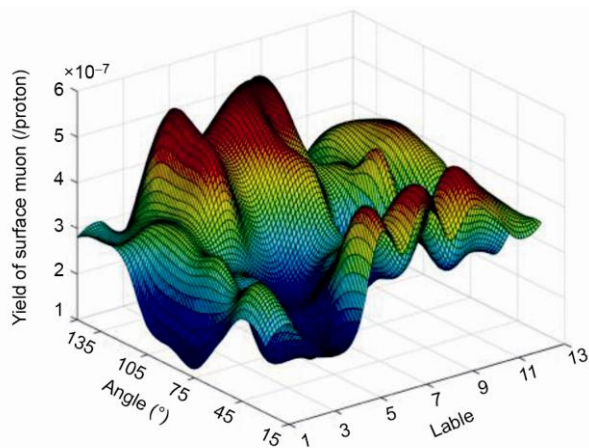


图 8 不同多层靶表面 μ^+ 产率

坐标 Label 为多层靶的靶形. 1 表示整靶, 2 表示间距为 20 mm 的两层靶, 3 表示间距为 40 mm 的两层靶, 4 表示间距为 60 mm 的两层靶, 5 表示间距为 80 mm 的两层靶, 依此类推 6-9 表示 3 层靶, 10-13 表示 4 层靶; Angle 为小探测面收集 Muon 的方向

Figure 8 Yield of surface Muon from different thin targets. Label stands for layers and distance of targets (1 stands for a target with one layer; 2-5: target of two layers, 6-9: target of three layers, 10-13: target of four layers.); Angle stands for the direction of collection.

和靶的相对位置引起. 对于束流前端和后端收集方向, 多层靶模型束流前端和后端探测器大面积正对各层靶的端面, 有利于收集停留在靶表面附近的 π^+ 衰变后的表面 μ^+ ; 而对于侧面的收集方向, 因为多层靶间的间隙只有很少的靶面与探测面正对, 即使有表面 μ^+ 在靶表面产生也很难被该方向上的探测器探测到.

综合以上几种靶的计算表明对不同的靶形, 考虑低能 π^+ 能停留在靶表面附近衰变几率较大的情况计算表面 μ^+ 的最佳收集角度. 例如圆柱形靶和方形靶最佳收集方向分别在束流后端 120°方向附近, 多层靶在束流后端 135°方向附近.

2 Muon 运输线的简单设计

较高能量的质子打靶后产生的中子, γ 等粒子将成为 μ SR 实验的高辐射背景, 为此我们需要运输线将符合要求的表面 μ^+ 高效率的运输到 μ SR 实验区. 参照国际上已经使用的表面 μ^+ 的运输线设计, 考虑我们的运输线采用简单的较为常见的 Q+B+Q+B+Q 模式, 实现表面 μ^+ 的获取、聚焦、运输, 期望在 μ SR 实验端获得动量展宽小、角散小和尺寸小的表面 μ^+ 束斑供 μ SR 谱仪使用. 简易布局如下图 9 所示: 其中四极磁铁(Q)可以获取、聚焦、运输粒子, 偏转磁铁(B)用来选择合适的粒子动量, 粒子分离器用来分离出相同动量的正电子以净化表面 μ^+ 束, 冲击磁铁可以将一个脉冲中的两个束团分离开, 另外束流线留有足够的空间安装束流控制器件(如束流阻挡块、插板阀、束流狭缝等),总长度约为 14 m.

对于图 9 所示简易运输线, 采用束流矩阵计算程序 Transport 和 Turtle 模拟研究 Muon 在其中的运输^[4], 计算其不同相椭圆的传输效率, 以 30(X) mm×150(Y) mm×150(Z) mm 的石墨靶为例, 在 X 方向距 Muon 靶 600 mm 处选取不同的 Muon 初始相椭圆, 计算最终能够得到的表面 μ^+ 的强度如表 2 所示.

该运输线只是简单设想, 依照现有束流光学的运输设计经验, 还有很大的优化空间, 即运输线稍加优化, 运输效率可以接近 100%. 所以在 μ SR 实验区得到强度 10^5 的表面 μ^+ 容易实现.

3 Muon 产生靶的温度场和热应力分析

高功率靶设计中必须考虑靶温度分布及热应力

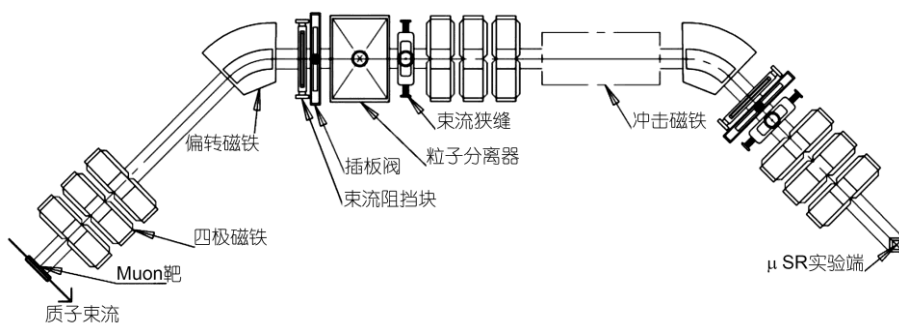


图9 简易表面 μ^+ 的输运线

Figure 9 The layout of surface Muon beamline.

表2 不同相椭圆表面 μ^+ 的强度以及经过输运后的强度

Table 2 The intensity of surface Muon from target and after transport in different emittance ellipses

| $\epsilon_x, \pi \text{ mm mrad}$ | $\epsilon_y, \pi \text{ mm mrad}$ | 靶产生的 Muon 源强度 ($\times 10^6 \mu^+/\text{s}$) | 输运效率(%) | 实验端 Muon 源强度 ($\times 10^5 \mu^+/\text{s}$) |
|-----------------------------------|-----------------------------------|--|---------|---|
| 7099 | 3685 | 1.505 | 24 | 3.612 |
| 5246 | 2822 | 1.015 | 32 | 3.248 |
| 2566 | 1714 | 0.406 | 50 | 2.03 |

大小等工程因素. 靶的温度必须保持在一个合理水平, 才能保证靶持续正常工作, 而热应力直接决定了靶的寿命, 特别是在靶不冷却的情况下这些问题尤为突出. 根据 CSNS 试验型 Muon 靶设计方案, 依据热传导微分方程^[10], 先用 G4beamLine 计算出内热源分布函数, 运用有限差分法建模分析 Muon 靶的温度和热应力问题. 热传导微分方程:

$$\nabla^2 T(x, y, z, t) + \frac{1}{k} g(x, y, z, t) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t}, \quad (1)$$

其中 $T(x, y, z, t)$ 为温度场, $g(x, y, z, t)$ 为能量沉积, 即内热源, k 为物质的导热系数, α 为热扩散系数.

以方形靶为例, G4BeamLine 算出靶内各小区域内能量沉积如图 10 所示, r 为靶上有限小区域与其所在截面中心的距离. 结果表明在与质子束垂直的平面内, 因为入射质子是高斯分布, 能量沉积也呈现高斯分布, 中心大边缘小; 随着质子入射深度的增加, 能量沉积有减小的趋势, 主要因为质子束在穿过靶物质的时候能量逐渐损失.

对这些数值进行拟合, 得到内热源分布函数 $g(x, y, z)$, 考虑质子入射后, 在几 μs 内完成能量沉积, 并使靶的温度升高, 能量沉积可以当作瞬间完成, 相应的内热源可以用 δ 热源描述. 将靶划分成 $60 \times 60 \times 60$ 个网格, 按照有限差分法求解温度场: 认为每一个网格都有内部产热, 按 $g(x, y, z)$ 为其赋值, 边界上的网格还要同环境辐射换热. 以一秒为步长, 每一步算出

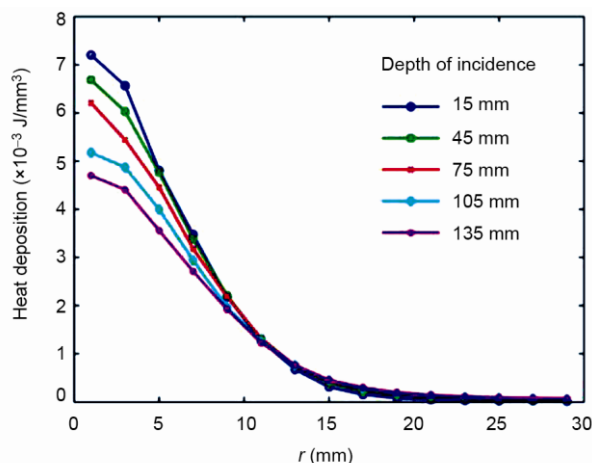


图10 靶中沿质子入射方向不同深度处 x - y 平面内能量沉积分布

Figure 10 Heat deposition at different incident depth.

瞬态平衡解, 直到温度场趋于稳定, 得到石墨靶和钨靶的体积平均温度和体积最高温度随时间的演化. 计算结果表明两种靶材初始阶段温度增加较快, 随后增速放缓; 石墨靶在 3000 s 后平均温度和最高温度分别趋于稳定值 288°C 和 290°C, 钨靶在 400 s 后平均温度和最高温度分别趋于 783°C 和 789°C, 相对于这两种材料的熔点(石墨: 3500°C, 钨: 3410°C), 这些温度值为合理可接受水平.

上述稳态靶表面温度计算过程庞大, 下面提出

另一种由靶内部产热过程与靶向环境辐射换热过程热平衡原理估算稳态时靶表面温度的方法. 因石墨靶导热良好, 可假设靶表面温度均匀, 达到稳态时有

$$\varepsilon\sigma(T_{\text{surface}}^4 - T_{\text{surrounding}}^4) \cdot S = \sum_{x,y,z} g(x,y,z). \quad (2)$$

取环境温度为 $T_{\text{surrounding}}=300$ K 时, 估算出石墨靶稳态(Steady-state)时表面的平均温度 $T_{\text{surface}}=267$ K, 与上面利用有限差分法建模求解出的温度场(平均温度 288°C)相差 3.7%, 从工程应用的角度看, 该方法估算出的结果是可靠的. 对于复杂形状的靶, 只需给出靶表面积, 便可快速估算出稳态温度, 省去了大量的建模和计算时间.

上面讨论表明质子注入靶后必然引起靶温度的变化, 而且温度变化是非均匀、脉冲式的, 若此时靶不能自由伸缩或伸缩受到制约, 靶中就会产生热应力. 我们讨论的表面 $\mu+$ 靶设计方案中, 靶能够自由伸缩, 由于温度分布不均匀产生的静态热应力为 $S_{\text{static}} \propto \alpha E \Delta T$, 其中 α 为热膨胀系数, E 为杨氏模量, ΔT 为温度差^[11]. 石墨靶和钨靶的静态热应力值分别为 0.47 和 1.7 MPa, 远小于材料的抗压强度和抗剪强度, 材料不会被静态热应力破坏.

由脉冲质子束入射在靶中引起的温度突变引起的动态热应力是周期性的, 频率与脉冲质子的频率相同. 靶中不同位置, 沉积能量的大小不同, 动态热应力也不同. 靶中心处能量沉积最大, 温度突变可表示为 $\delta T_{\text{max}} = g_{\text{max}} / (\rho C_p)$, 其中 g 为能量沉积密度, ρ 为靶材料密度, C_p 为比热容. 最大动态热应力¹⁾:

$$S_{\text{dynamic}} \propto \begin{cases} \alpha E \delta T & \text{for } v_s \tau \leq l, \\ \alpha E \delta T (l / v_s \tau) & \text{for } v_s \tau \geq l, \end{cases} \quad (3)$$

其中 $v_s = \sqrt{E/\rho}$ 是该物质中的声速, l 是靶的特征长度, τ 是脉冲质子束的宽度 500 ns. 计算中石墨: $v_s \tau \approx 1.3$ mm, $l=60$ mm; 钨: $v_s \tau \approx 0.68$ mm, $l=50$ mm, 二者均满足 $v_s \tau \leq l$ 的条件. 石墨和钨的最大动态热应力分别为 0.59 和 2.5 MPa, 亦小于相应材料的疲劳极限, 材料不会发生疲劳.

通过靶温度场的和热应力的分析, 按照现有设计建造的试验型 Muon 靶, 能量沉积不高冷却问题可以暂不考虑, 但是提出的分析方法可以供第二靶站 Muon 靶建设时应用; 两种材料应力引起的材料疲劳也在可接受范围内.

4 结论

针对影响 Muon 产率的几个因素, 我们在靶材方面对 C(石墨), Cu 等计算, 靶形方面以圆柱形靶、方形靶以及基于方形靶的多层薄靶计算, 根据束流运输的相关经验, 最后计算得出高 Z 的材料和多层薄靶有较为可观的表面 $\mu+$ 产率, 但是考虑高 Z 材料靶周围高能粒子的辐射屏蔽难度、多层靶的工程加工困难以及国外其他小组运行的经验认为选取已经成熟运用的石墨靶材, 以及工程难度不大的方形靶作为试验型 Muon 源的产生靶, 计算中有优势的多层靶及高 Z 靶材结果可以在升级优化中验证.

致谢 感谢中国科学院高能物理研究所唐靖宇研究员和敬罕涛副研究员对本工作的深入分析和讨论提供的大量帮助.

参考文献

- 1 Wei J, Chen H S, Chen Y W, et al. China spallation neutron source: Design, R&D, and outlook. Nucl Instrum Methods Phys Res A, 2009, 600: 10–13
- 2 Tang J Y, Fu S N, Jing H T, et al. Proposal for muon and white neutron sources at CSNS. Chin Phys C, 2010, 34(1): 121–125
- 3 Jing H T, Meng C, Tang J Y, et al. Production target and muon collection studies for an experimental muon source at CSNS. Nucl Instrum Methods Phys Res A, 2012, 684: 109–116
- 4 Xu W Z, Liu Y F, Ye B J. Simulation and design of tentative muon source based on CSNS. Plasma Sci Technol, 2012, 14: 469–472
- 5 Park J T, Inosov D S, Niedermayer C, et al. Electronic phase separation in the slightly underdoped iron pnictide superconductor $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$. Phys Rev Lett, 2009, 102: 117006

1) Kalbreier W, Middelkoop W, Sievers P, CERN LAB II/BT/74-1, 1974

- 6 Shermadini Z, Krzton-Maziopa A, Bendele M, et al. Coexistence of magnetism and superconductivity in the iron-based compound $\text{Cs}_{0.8}(\text{FeSe}_{0.98})_2$. *Phys Rev Lett*, 2011, 106: 117602
- 7 Goko I T, Aczel A A, Baggio-Saitovitch E, et al. Superconducting state coexisting with a phase-separated static magnetic order in (Ba, K) Fe As, (Sr, Na) Fe_2As_2 , and CaFe_2As_2 . *Phys Rev B*, 2009, 80: 024508
- 8 Bungau A, Cywinski R, Bungau C, et al. Geometry optimization of the ISIS muon target. In: MOPEA076, IPAC10, Kyoto: IPAC'10 OC/ACFA, 2010. 250–252
- 9 Bungau A, Cywinski R, Bungau C, et al. Material studies for the ISIS muon target. In: MOPEA077, IPAC10, Kyoto: IPAC'10 OC/ACFA, 2010. 253–255
- 10 Wang L Q, Zhou X S, Wei X H, *Heat Conduction: Mathematical Models and Analytical Solutions*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. 18–39
- 11 Abrmov A G, Galyaev N A, Garkusha V I, et al. Beam optics and target conceptual designs for the NuMI project. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 2002, 485: 209–227

Design and optimization for experimental Muon source at CSNS

LIU YanFen, XU WenZhen, TAN ZongQuan, LIANG Ying, KONG Wei
& YE BangJiao*

Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

The μSR technology based on spallation neutron source has developed very well in the international. The construction of China Spallation Neutron Source (CSNS) will provide us a large platform to develop the first Muon beam and μSR technology in China. According to the experiences from other Muon target, we study the materials and geometries of Muon production target by G4beamLine, a Monte Carlo tool, to find the optimistic design for the first target in China. Finally the temperature and thermal stress distribution for the Muon production target are discussed through finite-difference method, and a simple way to estimate target temperature is put out, which will contributed to constructing an advanced Muon beam in China theoretically.

Muon target, G4beamLine, thermal stress, finite-difference method

PACS: 07.77.Ka, 29.27.Eg, 29.25.Pj

doi: 10.1360/132012-657