

# 400 A MeV 能区核碰撞电荷拾取反应截面与射弹核质量的关系

李蓉, 张东海

(山西师范大学 物理与电子工程学院, 山西 太原 030031)

**摘要:** 本文利用CR-39固体核径迹探测器对400 A MeV能区范围内的 $^{12}\text{C}$ 、 $^{40}\text{Ar}$ 、 $^{56}\text{Fe}$ 、 $^{84}\text{Kr}$ 射弹分别作用于Al、C、 $\text{CH}_2$ 靶的电荷拾取反应截面进行了实验研究, 探索在400 A MeV能区重离子电荷拾取反应截面与射弹核大小的依赖关系, 为此能区的电荷拾取反应机制研究提供实验依据。通过分别利用幂函数和线性函数关系式拟合电荷拾取反应截面与射弹核质量的数据关系, 发现幂函数的幂次拟合参数 $b$ 在 $-0.01\sim 0.71$ 之间, 这种对于射弹核质量 $A_p$ 的依赖关系, 与在更高束流能量更重射弹核观察到的结果不同; 线性函数的斜率拟合参数 $\beta$ 在 $-0.004\sim 0.24$ 之间, 此结果在一定程度上证实电荷拾取反应过程应为边缘及表面反应过程的集体贡献。

**关键词:** 中高能核-核碰撞; 电荷拾取反应截面; CR-39核径迹探测器

**中图分类号:** O571.6 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.08.0016

**引用格式:** 李蓉, 张东海. 400 A MeV能区核碰撞电荷拾取反应截面与射弹核质量的关系[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2025, 46(6): 800-807.

LI Rong, ZHANG Donghai. Dependence of the charge-pickup reaction cross-section on projectile nucleus mass in nuclear collisions at the 400 A MeV energy region[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2025, 46(6): 800-807.

## Dependence of the Charge-Pickup Reaction Cross-Section on Projectile Nucleus Mass in Nuclear Collisions at the 400 A MeV Energy Region

LI Rong, ZHANG Donghai

(School of Physics and Electronic Engineering, Shanxi Normal University, Taiyuan 030031, China)

**Abstract:** This study experimentally investigates the charge pickup reaction cross-sections of  $^{12}\text{C}$ ,  $^{40}\text{Ar}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ , and  $^{84}\text{Kr}$  projectiles incident on Al, C, and  $\text{CH}_2$  targets at around 400 A MeV, using CR-39 solid-state nuclear track detectors. The aim is to explore the dependence of the charge pickup reaction cross-section on the projectile size in the 400 A MeV region and provides experimental evidence for the reaction mechanism in this energy range. The data on the relationship between the charge pickup reaction cross-section and the projectile mass were fitted using both power-law and linear functions. The power-law exponent parameter  $b$  was found to range from  $-0.01$  to  $0.71$ , indicating a dependence on the projectile mass  $A_p$  that differs from observations at higher beam energies with heavier projectiles. The slope parameter  $\beta$  of the linear fit ranged from  $-0.004$

收稿日期: 2025-08-28

基金项目: 山西省青年科技研究基金资助项目(202203021212396)

作者简介: 李蓉(1987-), 女, 实验师, 博士, 主要从事中高能核碎裂实验方面的研究。E-mail: 1041672247@qq.com。

通信作者: 张东海(1964-), 男, 教授, 博士, 主要从事中高能核碎裂及多粒子产生实验方面的研究。E-mail: zhangdh@sxnu.edu.cn。

to 0.24. These results partially support the idea that the charge pickup reaction process involves collective contributions from peripheral and surface interactions.

**Key words:** intermediate and high energy nucleus-nucleus collisions; charge-pickup reaction cross-sections; CR-39 nuclear track detector

### 0 引言

相对论能区和中高能区的核电荷拾取反应在很多基础研究和应用领域中都具有重大的意义,例如天体物理学、宇宙辐射和太空飞行,以及放射性束流的产生。在BNL、SPS、GSI和LBL的不同能区的重离子作用于各种靶的核电荷拾取反应都有相关研究<sup>[1-7]</sup>。理论上讲,电荷拾取反应应该是边缘以及表面两种作用过程的贡献,对于边缘作用,电荷拾取反应截面 $\sigma_{\Delta Z=+1}$ 应正比于 $A_P^{1/3}$ ;对于表面作用电荷拾取反应截面 $\sigma_{\Delta Z=+1}$ 应正比于 $A_P^{2/3}$ 。综合两种效应的贡献, $\sigma_{\Delta Z=+1}$ 应正比于 $A_P$ 。Ren<sup>[1]</sup>和Nilsen<sup>[2]</sup>等用大量的实验数据得到,1 A GeV 能区附近的电荷拾取反应截面对射弹核质量 $A_P$ 的幂函数关系的指数大体上在2倍因子范围内,可以用表达式 $\sigma_{\Delta Z=+1} = 1.7 \times 10^{-4} \gamma_{PT} A_P^2$ (以mb为单位)给出,其中 $\gamma_{PT} = A_P^{1/3} + A_T^{1/3} - 1.0$ 表示外围碰撞。Sümmerer等<sup>[3]</sup>通过测量电荷拾取反应产物中同位素的分布,说明了电荷拾取反应截面对射弹核质量的二次依赖关系很大程度上是由于初级碎片带电粒子的蒸发,即射弹核的一个中子转换成了一个质子,涉及到 $\Delta$ 共振。同样地,Bachelier<sup>[4]</sup>,Roy-Stephan<sup>[5]</sup>等利用磁谱仪测量了0.95 A GeV的<sup>20</sup>Ne作用于Al靶得到<sup>20</sup>Na产物的电荷转移反应中的能量转移,检测到两个峰,一个是由 $np \rightarrow pn$ 引起的低激发能峰,一个是由靶核激发到 $\Delta$ 共振引起的300 MeV的峰值。

在中能和低能区且低于费米能的情况下,电荷拾取反应的机制是转移反应<sup>[6]</sup>,即质子拾取和中子剥离过程。在此能量下,射弹核速度小于原子核内核子的费米速度,接触时费米球重叠,使得核子可以从一个费米海跳到另一个费米海。但在相对论能量下,射弹核和靶核的费米范围完全不重叠,这就阻止了靶核质子向射弹核的转移,则 $\Delta$ 共振的形成和衰退在能区的电荷拾取反应过程中是最可能的基本过程。在这个过程中,射弹核的一个中子转化成一个质子,通过 $n \rightarrow \Delta^0 \rightarrow p + \pi^-$ 反应,质子被射弹核吸收,释放出 $\pi^-$ <sup>[7]</sup>。综上所述,在中能和能区的核-核碰撞

过程中,质子转移反应和 $\Delta$ 共振的形成与衰变这两种机制应该是同时发挥作用。

目前的数据集中在高能区的电荷拾取反应截面的研究,对于中低能区的数据研究较少。为了研究电荷拾取反应与射弹核质量之间的关系,需要排除能量和靶核质量的影响。其中一种方法是在有限的能量区域内作用单一的靶。本文研究的是一定能量范围(400 A MeV 能区附近)的<sup>12</sup>C、<sup>40</sup>Ar、<sup>56</sup>Fe、<sup>84</sup>Kr射弹分别作用于Al、C、CH<sub>2</sub>、H靶的核电荷拾取反应截面与射弹核质量的关系。

### 1 实验部分

1) 利用日本放射线医学综合研究所重离子医用加速器(NIRS HIMAC)产生的射弹核束流分批照射Al、C、CH<sub>2</sub>与CR-39固体核径迹探测器组成的复合靶(垂直照射)。每种复合靶由4个靶和10片CR-39放置排列而成,相邻两个靶中间放置两片CR-39固体核径迹探测器。图1为靶与CR-39固体核径迹探测器<sup>[8]</sup>放置的示意图。

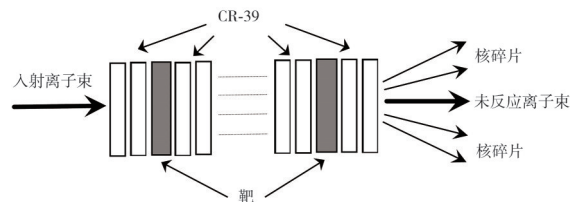


图1 CR-39蚀刻核径迹探测器与靶组成的三明治式复合靶示意图  
Fig. 1 Sketch of the sandwiched Cu-target and CR-39 etched nuclear track detector configuration

实验所用Al、C、CH<sub>2</sub>与CR-39组成的复合靶的面积为5.0×5.0 cm<sup>2</sup>,束流通量约为3 000 离子/cm<sup>2</sup>(具体根据射弹核束流的电荷数而定,以减少束流径迹的相互重叠)。这里的束流能量为出加速器时的能量,束流到达各个靶上表面时的能量可以利用各个靶的厚度及CR-39探测器的厚度通过SRIM计算软件分别计算得到。每个靶上表面的束流能量的不确定度根据束流线长度的不确定度和CR-39探测器的不确定度计算得来,结果小于1 A MeV。

2) 带电粒子进入CR-39探测器后,会在它的径迹区域形成一定的辐射损伤,形成潜径迹,将

CR-39探测器放在温度为70℃,浓度为7 mol/L的NaOH溶液中蚀刻30 h。蚀刻完成后,把CR-39放置在去离子的纯净水中清洗10 h左右。重离子及其碎片在CR-39探测器中形成的径迹经过化学蚀刻后在CR-39上下表面的截面为圆形或接近圆形(垂直照射)。

3) 利用HSP-1000高影像图像分析显微镜扫描CR-39蚀刻径迹探测器中记录的核径迹。

4) 利用图像分析软件PitFit测量CR-39蚀刻径迹探测器记录的各种核碎片蚀刻径迹的坐标、面积等信息。由于PitFit分析软件对径迹进行自动拟合的过程中会出现径迹识别错误的现象,所以在自动拟合后本实验采用手动再进行一遍修正。手动拟合过程是一个非常耗时的过程,但是它可以使检测率达到100%。

5) 先对分析软件测量出来的CR-39固体蚀刻核径迹探测器中的蚀刻径迹截面面积进行修正<sup>[9]</sup>,然后用截面面积大小与弹核碎片所带电荷数成正比的方法来判定弹核碎片的电荷( $Z \geq 5$ )。对于薄靶中弹核的电荷拾取反应,弹核碎片的速度本质上与弹核的速度是一样的,则有如下推论:不论是弹核还是碎片核的蚀刻坑的大小或者短轴与它的电荷之间是单一线性函数关系。由于粒子在探测器上蚀刻径迹截面的面积与粒子的电荷数 $Z$ 呈线性关系,所以本实验用蚀刻径迹在CR-39表面的截面面积分布来确定带电粒子的电荷,从而对带电粒子进行鉴别。

以下以462 A MeV的<sup>56</sup>Fe作用于CH<sub>2</sub>靶为例对具体实验过程加以说明。图2是462 A MeV的<sup>56</sup>Fe作用于CH<sub>2</sub>靶后的<sup>56</sup>Fe束流和碎片的蚀刻径迹面积分布图。

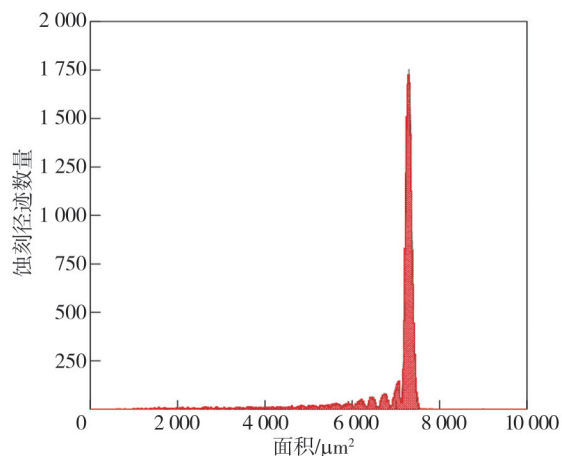


图2 462 A MeV的<sup>56</sup>Fe作用CH<sub>2</sub>靶后的<sup>56</sup>Fe束流和碎片的蚀刻径迹面积分布图

Fig. 2 Etched track area distribution of <sup>56</sup>Fe and its fragments for <sup>56</sup>Fe fragmentation on CH<sub>2</sub>-target at 495 A MeV

<sup>56</sup>Fe束流和一直到电荷数 $Z=20$ 的碎片可以清楚地看到峰值,而对于电荷数 $Z < 20$ 的碎片则无法从图中识别。本实验采用了7个高斯分布叠加拟合,得到了<sup>56</sup>Fe束流和电荷数 $Z > 19$ 的碎片的平均蚀刻径迹面积和误差。图3是图2中的<sup>56</sup>Fe束流和电荷数 $Z > 19$ 的碎片的电荷与高斯拟合蚀刻径迹面积的关系图。可以看到,蚀刻径迹面积随电荷数增加而线性增加。利用这个线性拟合,得到 $Area = 33.39 + 279.36Z$ 以及 $\chi^2_{min} = 0.01$ 。根据这个关系可以确定其他碎片的电荷。

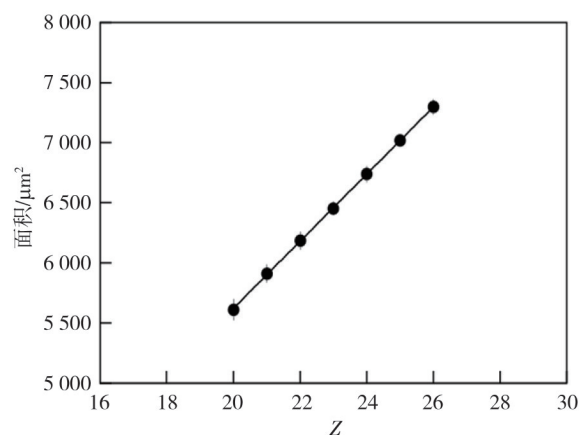
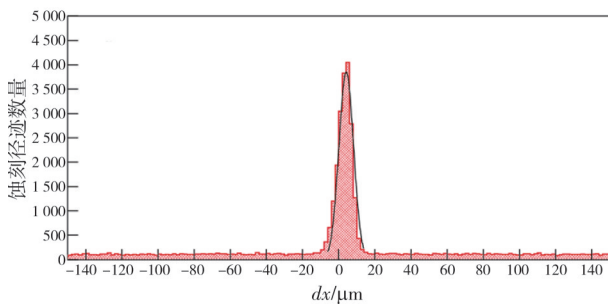


图3 图2中<sup>56</sup>Fe束流和电荷数 $Z > 19$ 碎片的电荷与高斯拟合蚀刻径迹面积关系图

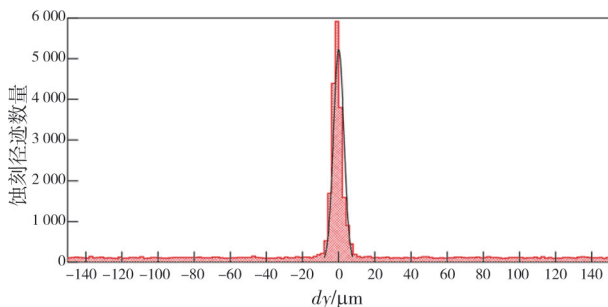
Fig. 3 Relationship between the charge and the Gaussian-fitted etched track area for the <sup>56</sup>Fe beam and fragments with atomic numbers  $Z > 19$  in Fig. 2

按照同样的方法,确定了每一种束流在不同靶上的束流和碎片的电荷与蚀刻径迹面积的依赖关系,并识别出了相应的弹核碎片的电荷。

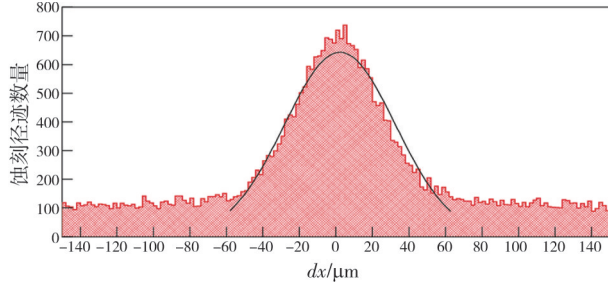
6) 根据图像分析软件PitFit测到的CR-39蚀刻径迹探测器记录的各种弹核碎片蚀刻径迹的坐标,利用径迹重建技术<sup>[10]</sup>(包括蚀刻径迹截面面积修正、标准点选取、利用最小二乘法进行径迹重建以及径迹匹配四个主要步骤)确定发生核碎裂以及电荷拾取的弹核和碎片的数量,并计算电荷拾取反应截面。在径迹匹配这个关键步骤中,由于径迹匹配数据量巨大,本实验采用Fortran语言程序来完成径迹匹配。由于测量值与理论值之间存在误差,故要求在合理的误差范围内完成径迹匹配,图4为462 A MeV的<sup>56</sup>Fe作用于CH<sub>2</sub>靶的坐标差值 $dx$ 和 $dy$ 的分布图,在4倍标准偏差范围内 $[x'_{cal} \pm 4\sigma(dx), y'_{cal} \pm 4\sigma(dy)]$ 搜索匹配径迹,这样,库仑散射效应的影响便可以忽略不计,使得匹配精度可以达到99.99%以上。



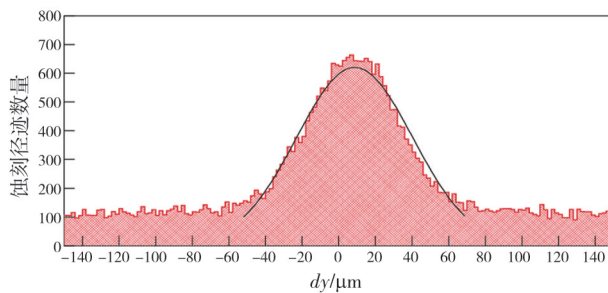
(a) CR-39 上表面的坐标差值



(b) CR-39 下表面的坐标差值



(c) 靶前邻近 CR-39 表面的坐标差值



(d) 靶后邻近 CR-39 表面的坐标差值

图 4 462 A MeV 的 <sup>56</sup>Fe 作用于 CH<sub>2</sub> 靶匹配径迹的坐标差  $dx$  和  $dy$  分布图

Fig. 4 The track coordinate difference  $dx$  and  $dy$  distribution for 462 A MeV <sup>56</sup>Fe fragmentation on CH<sub>2</sub> target

图 4 中, 每个图像中的光滑曲线是高斯分布拟合。当在 4 倍标准偏差范围内匹配径迹时, 会出现以下 5 种情况:

1) 在 4 倍标准偏差范围内有 1 个匹配径迹, 而且匹配径迹的面积在束流的面积范围内, 则考虑没有发生碎裂。

2) 在 4 倍标准偏差范围内有 1 个匹配径迹, 而且匹配径迹的面积小于束流的面积范围, 则考虑发

生了碎裂。

3) 在 4 倍标准偏差范围内有 2~3 个匹配径迹, 而且匹配径迹的电荷之和与束流电荷相同或略小, 也考虑发生了碎裂。

4) 在 4 倍标准偏差范围内有 1 个匹配径迹, 而且匹配径迹的面积大于束流的面积范围, 则考虑发生了电荷拾取反应, 如图 5 中的 21212 号编码的核径迹, 也就是本文所研究的对象。

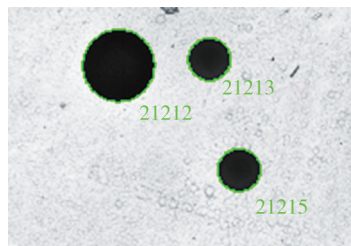


图 5 发生电荷拾取反应的径迹

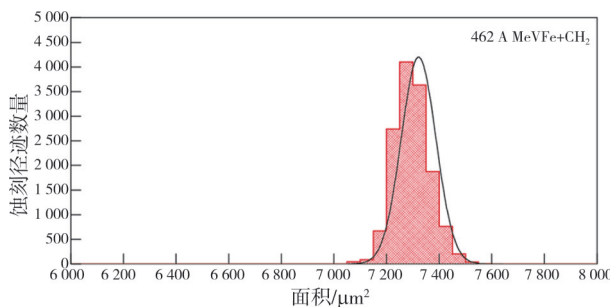
Fig. 5 Tracks resulting from charge pickup reactions

5) 在 4 倍标准偏差范围内没有匹配径迹, 则认为是一个完全碎裂事件, 只是产生的碎片电荷数低于 CR-39 探测器的阈值。

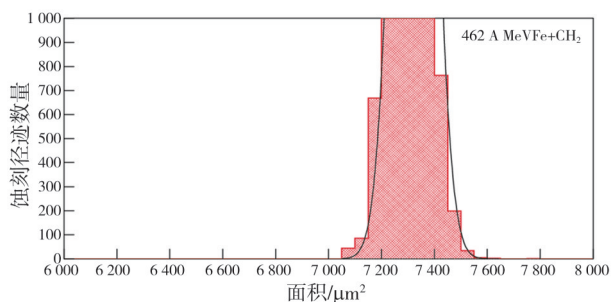
## 2 计算与分析

为了测量电荷拾取反应截面, 最主要的实验要求就是获得一个足够的电荷分辨率, 以便于从大量的穿过靶后未发生电荷变化的射弹核中提取出相对稀少的电荷拾取的碎片。为此, 本文选择了上节实验部分中径迹匹配中的情况(1)和情况(4)来分析。

图 6(a) 是 <sup>56</sup>Fe 束流作用在 CH<sub>2</sub> 靶, 过靶后未发生反应的 <sup>56</sup>Fe 束流粒子和电荷增大的碎片的蚀刻径迹面积分布图。图 6(b) 是图 6(a) 从中间断开的放大图, 可以更清楚地显示蚀刻径迹面积分布。对过靶后未发生反应的束流粒子的蚀刻径迹面积分布图进行高斯拟合, 然后确定电荷拾取事件的数量。



(a) 过靶后未发生反应的 <sup>56</sup>Fe 束流粒子和电荷增大的碎片的蚀刻径迹面积分布图



(b) 图(a)从中间断开的放大图

图6  $^{56}\text{Fe}$ 作用 $\text{CH}_2$ 靶的电荷拾取反应蚀刻径迹面积分布图Fig. 6 Etch track area distribution of charge pickup reaction for  $^{56}\text{Fe}$  on  $\text{CH}_2$  target

电荷拾取反应截面<sup>[11]</sup>的计算公式为

$$\sigma_{\Delta Z=+1} = \frac{A_T}{\rho d N_A} \cdot \frac{N_{Z+1}}{N_Z}, \quad (1)$$

表1 不同能量不同靶的未反应射弹核 $^{12}\text{C}$ 离子数、产物N的数量以及电荷拾取反应截面Tab. 1 Quantities of unreacted  $^{12}\text{C}$  projectile ions, their product yields N, and the corresponding charge-pickup reaction cross-sections depending on incident energy and target material

束流能量/A MeV	靶核	靶序号	靶厚度/mm	未反应的C数量	N数量	$\sigma_{\Delta Z=+1}/\text{mb}$
398	Al	1	3.0	43 794	5	$6.30 \pm 2.82^{[15]}$
390	Al	2	3.0	43 393	5	$6.35 \pm 2.84^{[15]}$
382	Al	3	3.0	41 825	4	$5.27 \pm 2.64^{[15]}$
374	Al	4	3.0	40 980	4	$5.38 \pm 2.69^{[15]}$
mean	Al					$5.83 \pm 1.37$
398	C	1	5.0	48 325	8	$3.97 \pm 1.40^{[15]}$
389	C	2	5.0	46 712	8	$4.15 \pm 1.47^{[15]}$
380	C	3	5.0	45 042	7	$3.77 \pm 1.43^{[15]}$
371	C	4	5.0	43 284	6	$3.37 \pm 1.37^{[15]}$
mean	C					$3.82 \pm 0.71$
398	$\text{CH}_2$	1	10.0	46 522	14	$2.44 \pm 0.65^{[15]}$
387	$\text{CH}_2$	2	10.0	43 392	13	$2.43 \pm 0.67^{[15]}$
376	$\text{CH}_2$	3	10.0	39 903	12	$2.43 \pm 0.70^{[15]}$
365	$\text{CH}_2$	4	10.0	38 061	12	$2.54 \pm 0.73^{[15]}$
mean	$\text{CH}_2$					$2.46 \pm 0.34$
398	H	1				$1.68 \pm 1.20$
388	H	2				$1.57 \pm 1.25$
378	H	3				$1.76 \pm 1.27$
368	H	4				$2.13 \pm 1.29$
mean	H					$1.78 \pm 0.62$

对于同一种靶,考虑到在一定束流能区内,核电荷拾取反应截面在实验误差内一致,所以本文对表中所包含的同种靶的电荷拾取反应截面取平均值。表1~表4中的mean数值为同种靶的电荷拾取反应截面平均值。同时,利用C和 $\text{CH}_2$ 靶上的实验结果,用 $\sigma_{\text{H}} = 0.5(3\sigma_{\text{CH}_2} - \sigma_{\text{C}})$ 关系式分别计算出不同射弹作用于H靶的电荷拾取反应截面,如4个表中所示。H靶上的束流能量为C靶和 $\text{CH}_2$ 靶前表面束流能量的平均值。

整理表1~表4的实验数据中的电荷拾取反应平均值mean,可以得到一定能量范围

式中: $A_T$ 为靶的原子序数; $d$ 为靶的厚度; $\rho$ 为靶的密度; $N_A$ 为阿伏伽德罗常数; $N_Z$ 为过靶后没有发生电荷变化的束流粒子的数量; $N_{Z+1}$ 为电荷拾取事件的数量。

表1是本实验组以前实验测量和分析计算得到的400 A MeV能区附近不同能量 $^{12}\text{C}$ 、 $^{40}\text{Ar}$ 、 $^{56}\text{Fe}$ 、 $^{84}\text{Kr}$ 射弹作用于Al、C、 $\text{CH}_2$ 靶的核电荷拾取反应截面的相关数据,这里的误差为统计误差。

表1中列出了过靶后未发生电荷变化的束流粒子数量和发生电荷拾取反应的粒子数量,电荷拾取反应截面由式(1)计算得出。有关实验过程、轨迹重建以及数据处理的详细信息可参见之前的研究工作<sup>[12-14]</sup>。

(400 A MeV能区附近)内,同一种靶不同射弹的电荷拾取反应截面数据如表5。

对表5中的数据分别进行幂函数和线性函数拟合,图7和图8分别为本文所研究能量区域的不同靶的电荷拾取反应截面对射弹核质量的幂函数和线性函数关系拟合图。

幂函数拟合关系式为

$$\sigma_{\Delta Z=+1} = aA_p^b, \quad (2)$$

式中: $a$ 和 $b$ 为拟合参数,具体见表6。相应的最小值 $\chi^2/\text{dof}$ 也见表6。

表 2 不同能量不同靶的未反应射弹核 <sup>40</sup>Ar 离子数、产物 K 的数量以及电荷拾取反应截面

Tab. 2 Quantities of unreacted <sup>40</sup>Ar projectile ions, their product yields K, and the corresponding charge-pickup reaction cross-sections depending on incident energy and target material

束流能量/A MeV	靶核	靶序号	靶厚度/mm	未反应的 Ar 数量	K 数量	$\sigma_{\Delta Z=+1}/\text{mb}$
495	Al	1	3.0	29 155	7	13.29±5.02 <sup>[16]</sup>
475	Al	2	3.0	28 480	6	11.66±4.76 <sup>[16]</sup>
455	Al	3	3.0	27 269	6	12.18±4.97 <sup>[16]</sup>
435	Al	4	3.0	26 094	5	10.61±4.74 <sup>[16]</sup>
mean	Al		3.0			11.94±2.44
495	C	1	5.0	32 330	9	6.81±2.27 <sup>[16]</sup>
473	C	2	5.0	29 898	8	6.54±2.31 <sup>[16]</sup>
451	C	3	5.0	28 348	8	6.90±2.44 <sup>[16]</sup>
429	C	4	5.0	26 636	7	6.43±2.43 <sup>[16]</sup>
mean	C		5.0			6.67±1.18
495	CH <sub>2</sub>	1	10.0	28 423	11	3.17±0.96 <sup>[16]</sup>
467	CH <sub>2</sub>	2	10.0	24 575	9	3.00±1.00 <sup>[16]</sup>
439	CH <sub>2</sub>	3	10.0	23 322	10	3.52±1.11 <sup>[16]</sup>
411	CH <sub>2</sub>	4	10.0	22 111	8	2.97±1.05 <sup>[16]</sup>
mean	CH <sub>2</sub>		10.0			3.16±0.51
495	H	1				1.35±1.83
470	H	2				1.23±1.89
445	H	3				1.83±2.06
420	H	4				1.24±1.99
mean	H					1.41±0.97

表 3 不同能量不同靶的未反应射弹核 <sup>56</sup>Fe 离子数、产物 Co 的数量以及电荷拾取反应截面

Tab. 3 Quantities of unreacted <sup>56</sup>Fe projectile ions, their product yields Co, and the corresponding charge-pickup reaction cross-sections depending on incident energy and target material

束流能量/A MeV	靶核	靶序号	靶厚度/mm	未反应的 Fe 数量	Co 数量	$\sigma_{\Delta Z=+1}/\text{mb}$
497	Al	1	2.0	15 299	4	21.70±10.85 <sup>[17]</sup>
478	Al	2	1.5	14 553	3	22.82±13.17 <sup>[17]</sup>
mean	Al		1.75			22.26±8.53
497	C	1	5.0	14 206	4	6.97±3.49 <sup>[17]</sup>
468	C	2	5.0	15 173	5	8.06±3.60 <sup>[17]</sup>
mean	C		5.0			7.52±2.51
497	CH <sub>2</sub>	1	10.0	15 625	3	1.57±0.91 <sup>[17]</sup>
462	CH <sub>2</sub>	2	10.0	14 149	5	2.90±1.30 <sup>[17]</sup>
mean	CH <sub>2</sub>		10.0			2.24±0.79

表 4 不同能量不同靶的未反应射弹核 <sup>84</sup>Kr 离子数、产物 Rb 的数量以及电荷拾取反应截面

Tab. 4 Quantities of unreacted <sup>84</sup>Kr projectile ions, their product yields Rb, and the corresponding charge-pickup reaction cross-sections depending on incident energy and target material

束流能量/A MeV	靶核	靶序号	靶厚度/mm	Kr 数量	Rb 数量	$\sigma_{\Delta Z=+1}/\text{mb}$
395	Al	1	2.0	24 251	10	22.82±7.22 <sup>[18]</sup>
359	Al	2	2.0	24 275	10	22.80±7.21 <sup>[18]</sup>
mean	Al		2.0			22.81±5.10
395	C	1	5.0	24 586	4	3.98±1.99 <sup>[18]</sup>
354	C	2	5.0	23 276	3	3.15±1.82 <sup>[18]</sup>
mean	C		5.0			3.57±1.35
395	CH <sub>2</sub>	1	10.0	16 323	4	2.01±1.00 <sup>[18]</sup>
341	CH <sub>2</sub>	2	10.0	20 886	5	1.96±0.88 <sup>[18]</sup>
mean	CH <sub>2</sub>		10.0			1.99±0.67
395	H	1				1.03±1.80
348	H	2				1.37±1.60
mean	H					1.20±1.20

表5 一定能区内作用于4种靶的不同射弹的电荷拾取反应截面数据  
Tab. 5 Charge-pickup reaction cross-sections for different projectiles on four targets within a specific energy range

靶核	射弹核	电荷拾取反应截面 $\sigma_{\Delta Z=+1}/\text{mb}$
Al	$^{12}\text{C}$	$5.83 \pm 1.37$
Al	$^{40}\text{Ar}$	$11.94 \pm 2.44$
Al	$^{56}\text{Fe}$	$22.26 \pm 8.53$
Al	$^{84}\text{Kr}$	$22.81 \pm 5.10$
C	$^{12}\text{C}$	$3.82 \pm 0.71$
C	$^{40}\text{Ar}$	$6.67 \pm 1.18$
C	$^{56}\text{Fe}$	$7.52 \pm 2.51$
C	$^{84}\text{Kr}$	$3.57 \pm 1.35$
$\text{CH}_2$	$^{12}\text{C}$	$2.46 \pm 0.34$
$\text{CH}_2$	$^{40}\text{Ar}$	$3.16 \pm 0.51$
$\text{CH}_2$	$^{56}\text{Fe}$	$2.24 \pm 0.79$
$\text{CH}_2$	$^{84}\text{Kr}$	$1.99 \pm 0.67$
H	$^{12}\text{C}$	$1.78 \pm 0.62$
H	$^{40}\text{Ar}$	$1.41 \pm 0.97$
H	$^{56}\text{Fe}$	
H	$^{84}\text{Kr}$	$1.20 \pm 1.20$

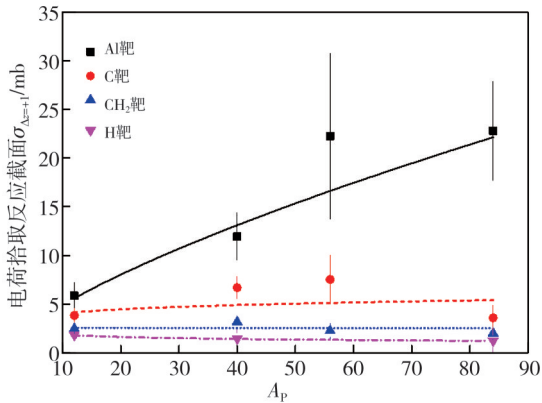


图7 4种靶的电荷拾取反应截面对射弹核质量的幂函数拟合图  
Fig. 7 Power-law fit describing the dependence of the charge-pickup reaction cross-section on the projectile mass number for the four targets

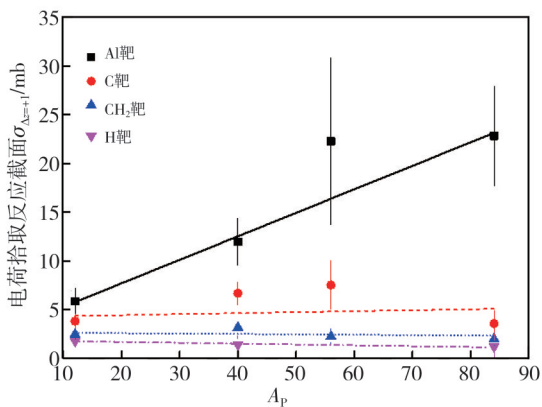


图8 4种靶的电荷拾取反应截面对射弹核质量的线性函数拟合图  
Fig. 8 Linear function fit describing the dependence of the charge-pickup reaction cross-section on the projectile mass number for the four targets

表6 幂函数拟合式(2)中的拟合参数a和b,以及 $\chi^2/dof$   
Tab. 6 Fitting parameters a and b, and  $\chi^2/dof$  from the power-law fitting function (2)

靶核	a	b	$\chi^2/dof$
Al	$0.96 \pm 0.36$	$0.71 \pm 0.10$	0.36
C	$2.98 \pm 2.37$	$0.13 \pm 0.23$	2.63
$\text{CH}_2$	$2.61 \pm 1.17$	$-0.01 \pm 0.14$	1.17
H	$2.92 \pm 0.04$	$-0.20 \pm 0.01$	1.37

线性函数拟合关系式为

$$\sigma_{\Delta Z=+1} = \alpha + \beta A_p, \quad (3)$$

式中: $\alpha$ 和 $\beta$ 为拟合参数,具体见表7。相应的最小值 $\chi^2/dof$ 也见表7。

表7 线性函数拟合式(3)中的拟合参数 $\alpha$ 和 $\beta$ ,以及 $\chi^2/dof$   
Tab. 7 Fitting parameters a and b, and  $\chi^2/dof$  from the linear fitting function (3)

靶核	$\alpha$	$\beta$	$\chi^2/dof$
Al	$2.89 \pm 0.93$	$0.24 \pm 0.03$	0.27
C	$4.23 \pm 1.45$	$0.01 \pm 0.04$	2.98
$\text{CH}_2$	$2.67 \pm 0.42$	$-0.004 \pm 0.01$	1.09
H	$1.86 \pm 0.09$	$-0.01 \pm 0.002$	0.02

由图7及表6可以看出,本实验结果利用幂函数式(2)来拟合的幂拟合参数b在 $-0.01 \sim 0.71$ 之间。这种对于射弹核质量 $A_p$ 的依赖关系,与在更高束流能量更重射弹核观察到的结果<sup>[1-2,5]</sup>不同。由图8及表7可以看出,本实验结果利用线性函数式(3)拟合的拟合参数 $\beta$ 在 $-0.004 \sim 0.24$ 之间,此结果在一定程度上证实电荷拾取反应过程应为边缘及表面反应过程的集体贡献。

### 3 结论

对于一种特定类型的相互作用,核截面对质量 $A_p$ 的依赖强度长期以来都被用作相关机制的线索。在核物质中,反应截面对 $A_p$ 的线性依赖关系通常表示射弹核中长的平均自由程;对 $A_p^{2/3}$ 的依赖关系表示非常短的平均自由程,因此是表面相互作用;对 $A_p^{1/3}$ 的依赖关系表示周长处的相互作用。本实验结果在一定程度上证实电荷拾取反应过程应为边缘及表面反应过程的集体贡献,但这两种过程又不能完全解释结果。在中高能重离子电荷拾取反应中,因为是高激发能且是边缘碰撞,所以会出现一种反应机制就是射弹核中的一个中子被激发到 $\Delta$ 共振态,随后马上衰变为一个质子,然后释放出一个 $\pi$ 介子,它的反应截面应与射弹核的中子密度和分布有很大的关系。 $\Delta$ 共振态( $S=3/2, T=3/2$ )是核子的一种激发态,这个

激发态是通过旋转一个夸克的自旋和同位旋得到的。在中高能重离子碰撞的电荷拾取反应中,主要是 $\Delta$ 共振引起了自旋-同位旋反应<sup>[19]</sup>。质子转移反应和 $\Delta$ 共振的形成与衰变,在中能区的核-核碰撞过程中应是同时发挥作用的。

#### 参考文献:

- [ 1 ] REN G X, PRICE P B, WILLIAMS W T. Systematics of charge-pickup reactions by GeV/nucleon heavy nuclei [J]. *Physical Review C*, 1989, 39(4): 1351-1358.
- [ 2 ] NILSEN B S, WADDINGTON C J, BINNS W R, et al. Charge pickup by heavy relativistic nuclei [J]. *Physical Review C, Nuclear Physics*, 1994, 50(2): 1065-1076.
- [ 3 ] SÜMMERER K, BLANK B. Modified empirical parametrization of fragmentation cross sections [J]. *Physical Review C: Nuclear Physics*, 2000, 61(3): 034607.
- [ 4 ] BACHELIER D, BOYARD J L, HENNINO T, et al. First observation of the  $\Delta$  resonance in relativistic heavy-ion charge-exchange reactions [J]. *Physics Letters B*, 1986, 172(1): 23-26.
- [ 5 ] ROY-STEPHAN M, BACHELIER D, BOYARD J L, et al. Excitation of the  $\Delta$  resonance in heavy ion charge exchange reactions [J]. *Nuclear Physics A*, 1988, 482(1/2): 373-382.
- [ 6 ] LENSKE H, WOLTER H H, BOHLEN H G. Reaction mechanism of heavy-ion charge-exchange scattering at intermediate energies [J]. *Physical Review Letters*, 1989, 62(13): 1457-1460.
- [ 7 ] SÜMMERER K, REINHOLD J, FAUERBACH M, et al. Charge-pickup processes in relativistic heavy-ion reactions [J]. *Physical Review C*, 1995, 52: 1106-1109.
- [ 8 ] 翟鹏济, 唐孝威, 王龙, 等. CR-39 核径迹探测器及其在核科学等研究领域中的应用 [J]. *物理*, 2000, 29(7): 397-400.  
ZHAI Pengji, TANG Xiaowei, WANG Long, et al. CR-39 plastic nuclear track detector and its application in nuclear science [J]. *Physics*, 2000, 29(7): 397-400. (in Chinese)
- [ 9 ] 白彩艳, 张东海. 重离子在 CR-39 固体蚀刻核径迹探测器中截面面积修正研究 [J]. *晋中学院学报*, 2019, 36(3): 15-19.  
BAI Caiyan, ZHANG Donghai. Correction of etched track area of heavy ions in CR-39 solid state nuclear track detector [J]. *Journal of Jinzhong University*, 2019, 36(3): 15-19. (in Chinese)
- [10] 夏艳红, 张东海. CR-39 塑料蚀刻径迹探测器中重离子径迹的重建 [J]. *山西师范大学学报(自然科学版)*, 2014, 28(1): 47-52.  
XIA Yanhong, ZHANG Donghai. Reconstruction of heavy ion track in CR-39 plastic etched nuclear track detector [J]. *Journal of Shanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2014, 28(1): 47-52. (in Chinese)
- [11] CECCHINI S, CHIARUSI T, GIACOMELLI G, et al. Fragmentation cross sections of  $\text{Fe}^{26+}$ ,  $\text{Si}^{14+}$  and  $\text{C}^{6+}$  ions of 0.3-10 A GeV on polyethylene, CR-39 and aluminum targets [J]. *Radiation Measurements*, 2008, 807(3/4): 206-213.
- [12] WANG L H, HUO L D, ZHU J H, et al. Projectile fragment emission in the fragmentation of  $^{56}\text{Fe}$  on Al, C, and  $\text{CH}_2$  targets [J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2019, 30(12): 186.
- [13] HUO L D, WANG L H, ZHU J H, et al. The total charge-changing cross sections and the partial cross sections of  $^{56}\text{Fe}$  fragmentation on Al, C, and  $\text{CH}_2$  targets [J]. *Chinese Journal of Physics*, 2019, 60: 88-97.
- [14] ZHANG D H, SHI R, LI J S, et al. Projectile fragment emission in the fragmentation of  $^{20}\text{Ne}$  on C, Al and  $\text{CH}_2$  targets at 400 MeV/u [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2018, 435(15): 174-179.
- [15] ZHENG S H, LI W, GOU CH W, et al. Measurement of cross sections for charge pickup by  $^{12}\text{C}$  on elemental targets at 400 MeV/n [J]. *Nuclear Physics A*, 2021, 1016:122317.
- [16] ZHENG S H, DUAN H R, WU J Y, et al. Measurement of cross sections for charge pickup by  $^{40}\text{Ar}$  on elemental targets at 500 MeV/n [J]. *Chinese Journal of Physics*, 2022, 77: 1145-1155.
- [17] LI R, ZHANG D H. Measurement of cross sections for charge pickup reaction by  $^{56}\text{Fe}$  on Al, C, and  $\text{CH}_2$  targets at 500 MeV/n [J]. *Nuclear Physics A*, 2020, 1001:121923.
- [18] LI R, ZHANG D H. Measurement of cross sections for charge pickup by  $^{84}\text{Kr}$  on Al, C and  $\text{CH}_2$  targets at 400 MeV/u [J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2020, 31(6): 59-65.
- [19] ROY-STEPHAN M. Collective excitations of spin-isospin modes [J]. *Nuclear Physics A*, 1988, 488: 187-201.