

650 A MeV ^{28}Si 与 C 靶核反应碎裂研究

中文摘要

中高能重离子与不同靶核碰撞的碎裂反应，是研究核反应机制的重要手段，对于核物理、天体物理、放射生物学以及辐射防护有重要意义。近年来，实验上有关核反应碎裂的研究主要集中在反应截面的测量，可用于弹核电荷半径的提取。因此，对于中高能重离子核碎裂的研究是极为必要的。

本实验使用 CR-39 径迹探测器，对最高能量为 650 A MeV ^{28}Si 与 C 靶核反应碎裂进行研究，通过数据处理并分析，得到了其反应截面的实验结果，并研究了不同碎片的发射角、横动量和发射源温度。

结果表明：在误差允许范围内，弹核碎裂电荷变化总截面与 Bradt-Peters 半经验公式的预测值基本相近，与束流能量无关；弹核碎片反应分截面 ($5 \leq Z \leq 13$) 的 $V(Z_f)$ 值间隔分布在 $V(Z_f)=1$ 上下两侧，呈现出明显的奇偶效应，同电荷损失 ΔZ 的关系与 Cummings、Nilsen 等人的理论模型基本一致，随 ΔZ 的增大总体呈现下降趋势。弹核碎片发射角的分布宽于弹核粒子散射角的分布；不同弹核碎片的平均发射角和平均横动量以及对应的分布宽度随着电荷数 Z 的增大呈减小趋势；弹核碎片横动量平方的累积量符合单一瑞利分布，通过计算拟合参数，得到对应的发射源温度，其随电荷数 Z 的增大呈减小趋势。

关键词： 碎裂反应；反应截面；角分布；横动量

Fragmentation of ^{28}Si on C target at 650 A MeV

ABSTRACT

The fragmentation reaction of medium and high energy heavy ions colliding with different target nuclei is an important means to study the nuclear reaction mechanism, and is also of great significance to nuclear physics, astrophysics, radiation biology and radiation protection. In recent years, the experimental research on nuclear reaction fragmentation mainly focuses on the measurement of reaction cross section, which can be used to extract the nuclear charge radius of projectile nucleus. Therefore, it is extremely necessary to study the fragmentation of medium and high energy heavy ion nuclei.

In this experiment, CR-39 track detector was used to study that fragmentation reaction of C target induced by ion beam with a maximum energy of 650 A MeV ^{28}Si . Through data processing and analysis, the experimental results of cross sections are obtained. The emission angle, transverse momentum and source temperature of different projectile fragments are also studied.

The results show that the experimental values of total charge changing cross sections agree well with the predicted values by the Bradt-Peters semi-empirical formula within the experimental uncertainty, and are independent of the beam energy. The $V(Z_f)$ values of partial cross sections ($5 \leq Z \leq 13$) are distributed at the top and bottom of $V(Z_f)=1$ at intervals, and have an obvious odd-even effect. The relation of the charge loss ΔZ are in agreement with the theoretical model of Cummings, Nilsen et al, and show a decreasing tendency with the increase of ΔZ . It is found that the distribution width of projectile fragments is greater than that of the scattering angle of projectile. The average emission angle and the average transverse momentum and the corresponding distribution width of different projectile fragments decrease with the increase of the charge number Z . The cumulative quantity of the square transverse momentum of the projectile fragments conform to the single Rayleigh distribution. The corresponding emission source temperature is obtained by calculating the fitting parameters, which decreases with the increase of the charge number Z .

Keywords: fragmentation reaction; cross section; angular distribution; transverse momentum

目 录

中文摘要	I
ABSTRACT	III
1 引言	1
1.1 中高能重离子核碎裂研究意义	1
1.2 中高能 ^{28}Si 碎裂实验研究进展	2
1.3 本论文的主要工作	3
2 实验仪器介绍	5
2.1 加速器发展简介	5
2.2 CR-39 固体径迹探测器	5
3 实验简介	7
3.1 实验流程	7
3.2 束流照射	7
3.3 径迹蚀刻	8
3.4 径迹扫描及拟合	9
3.5 径迹重建	12
3.5.1 标准径迹选取	12
3.5.2 径迹重建	13
3.5.3 径迹匹配	14
4 实验结果及分析	17
4.1 反应截面	17
4.1.1 电荷变化总截面	17
4.1.2 电荷变化分截面	21
4.2 角分布	26
4.3 横动量分布	30
4.4 弹核碎片发射源温度	32
5 结论	37
参考文献	39
致 谢	43

1 引言

1.1 中高能重离子核碎裂研究意义

碎裂,是高度激发原子核的特征反应,可以将原子核分裂成多个中等质量的碎片^[1]。重离子碰撞过程,体现了极端条件下核物质相互作用的表现形式^[2]。通过对核碎片分布情况的研究,帮助人们更好地了解核碎裂的产生机制,对核反应动力学演化的探索,加深了人们对中高能核-核碰撞反应机制的认识。目前,能够在实验室内进行高温、高密度核物质性质研究的方法,只有中高能重离子核碎裂反应^[3]。而且在核物理、天体物理、放射生物学以及辐射保护领域也有重要研究意义^[4]。

目前,对于中高能重离子核碎裂反应的研究,主要集中在反应截面的测量。通过测量电荷变化分截面,对原始宇宙射线的元素和同位素组成进行了评估,并且对宇宙射线在银河系传播过程中次级核的产生情况进行了解释^[5]。Si 是宇宙射线中含量相对较多的重元素,对近地轨道的航天器及宇航员有较强的辐射损伤,因此,重离子碎裂截面的准确测量影响着辐射剂量的精准估算,对评估宇航员在空间舱内外受到的辐射强度,以及空间舱和宇航服的辐射防护产生影响。未来,人类对于太空的探索会更多,由于对重离子碎裂截面的了解有限,导致对辐射剂量的估算存在较大的不确定性,因此进一步完善核反应数据库变得尤为重要^[6]。1988 年,Bochkarev 等人^[7]首次将电荷变化分截面与核结构联系起来,经过各实验组不断创新研究^[8-10],原子核半径可以由高精度测量电荷变化截面来获得,这已经成为一种新的、有效的研究不稳定原子核的方法,它的可靠性也在稳定原子核上被证实^[5]。

近年来,放射治疗技术高速发展,重离子碰撞在医学领域的研究也很重要。作为重离子的一大物理优势——Bragg 效应,随着能量损失的增大,重离子束的剂量也相应的增大,所以重离子束是治疗肿瘤患者的最佳射线^[11]。数百 A MeV 的重离子射入靶物质,在到达射程末端时,会出现能量的集中损失,形成 Bragg 峰^[12-13]。然而在未到达 Bragg 峰区时仍会有部分重离子与人体组织发生碎裂反应,产生次级离子,进而对人体的正常组织造成损伤,而且碎裂反应产生的弹核碎片会继续以一定的角度进行发射,且随着电荷数的减小,平均发射角会增大,从而使束流分布增加,对人体造成一定的副作用,因此关于弹核碎片发射角分布的精确研究也非常重要^[14]。2020 年 3 月,中国第一个研制

成功的医疗专用重离子加速器^[15]，投入临床使用，实现了我国研制大型医疗设备的重大突破^[16]。

实验上，人们通过原子核乳胶^[17]、CR-39 固体核径迹探测器^[18]以及电子学探测器^[19]对高能重离子碰撞核碎裂反应进行了大量研究，当前的实验装置无法精准记录重离子碰撞瞬时的动力学反应过程，只能提供末态碎片粒子的分布特征，因此，建立有效的理论模型对碰撞过程进行合理模拟十分重要。通过大量实验结果的模拟研究，BUU 模型^[20]、QMD 模型^[21]、参数化法^[20-23]、NUCFRG2 算法^[24-25]、定标法^[26]、PHITS 模型^[27]及量子多重散射模型等^[28]被提出，但受到各种因素的影响，实验结果与理论模型之间存在差异^[29]，因此，我们有必要对不同能量束流作用于不同靶核的碎裂反应进行广泛研究，扩大实验基数，得到更为精确的实验数据。

1.2 中高能 ^{28}Si 碎裂实验研究进展

近年来国内外对 ^{28}Si 束流与不同靶核碎裂反应进行了研究，Dong-Hai Zhang, Jun-Sheng Li, Jin-Xia Cheng 等人进行了 624 A MeV、789 A MeV、800 A MeV 的 ^{28}Si 束流与 CH_2 靶核反应碎裂研究，将电荷变化总截面的实验结果与 Bradt-Peters 半经验公式的预测值比较，在误差允许的范围内，与预测值基本一致，与能量没有明显依赖性^[30]。

Cecchini, Chiarusi, Giacomelli 等人进行了中高能 ^{28}Si 束流与元素靶反应弹核碎裂反应截面的研究。实验中采用 1000 A MeV、3000 A MeV、5000 A MeV 的 ^{28}Si 束流垂直照射 C、H、Al、 CH_2 、CR-39 靶，对电荷变化总截面及分截面进行研究^[31]。结果表明：电荷变化总截面与束流能量不显示依赖性；对于同一靶核，电荷变化分截面随电荷损失 (ΔZ) 的增加而减小，不同的弹核碎片，呈现出明显的奇偶效应。

T. Yamaguchi, M. Fukuda, S. Fukuda, G. W. Fan 等人对 ^{28}Si 束流能量在 100 A MeV-600 A MeV 之间的弹核碎裂反应进行了研究，发现 200 A MeV-600 A MeV 范围内的总截面结果不随能量的变化而变化；在 100 A MeV-200 A MeV 之间时，随着能量的增大电荷变化总截面减小^[32]。

F. Flesch, G. Iancu, W. Heinrich, H. Yasuda 等人研究了 490 A MeV 的 ^{28}Si 在 CH_2 、C、Al、Cu、Ag、Pb 不同靶中的核碎裂反应，对弹核碎裂电荷变化总截面及弹核碎片的反应分截面进行研究^[33]。结果表面：对于 Ag、Pb 的重靶，电荷变化总截面在束流能量为 450 A MeV-14.5 A GeV 的范围内有明显的依赖效应，可能与电磁离解作用有关；能

量一定时，随靶核质量数的增加反应截面随之增大。

截至目前，国内外对 ^{28}Si 碎裂研究还远远不够，不同实验组有关反应截面的结果，存在一定的差异性^[34-36]，对于不同弹核碎片发射角分布情况、横动量分布情况以及发射源温度的研究相对较少，因此需进一步对核反应数据库进行补充。

1.3 本论文的主要工作

本论文主要使用 CR-39 径迹探测器对最高能量为 650 A MeV ^{28}Si 束流与 C 靶核碎裂反应展开了研究。

第一部分介绍了中高能重离子核碎裂研究的意义以及国内外有关 ^{28}Si 碎裂反应实验研究进展；

第二部分简单介绍了加速器的发展以及 CR-39 探测器；

第三部分简述了本实验的实验流程，以及粒子径迹的数据处理过程；

第四部分给出了本实验的数据结果并加以分析，对 648A MeV、633 A MeV ^{28}Si 束流与 C 靶核碎裂反应的反应截面以及弹核碎片角分布进行研究给出了最新的实验数据，深入分析了弹核碎片横动量的分布以及发射源温度，并讨论了以上结果与束流能量之间的关系；

第五部分对实验结果进行总结，给出结论。

2 实验仪器介绍

2.1 加速器发展简介

粒子加速器是核物理以及其交叉学科不断发展和深入的有效工具，二者相互依存，彼此促进。20 世纪 50 年代到 70 年代，为满足超重元素合成的需要，重离子加速器开始发展，例如：德国 GSI 的 LINAC 加速器；20 世纪 80 年代初期，核物质引起了科学家们的广泛关注，并推动了中高能重离子加速器的建设，例如：中国的 HIRFL、日本的 RRC 以及意大利 LNS 建成的超导回旋加速器等；20 世纪 80 年代后期，利用在美国劳伦斯伯克利 BEVALAC 加速器上发现的重离子碎裂反应机制，对远离稳定线核结构性质进行了深入研究，加速器得到了迅速发展^[37]。

目前，国际上重离子加速器主要沿中高能直至相对论和超高能区的重离子加速器、放射性束装置及重离子冷却储存环（高品质重离子束的获得）三个方向发展^[38]。20 世纪 80 年代以来，以美国 RIA 计划为代表的第二代放射性束流产生装置，把在线同位素分离和弹核碎裂两种方法相融合，可以同时提供具有高束流强度的不同能量的束流^[37]。德国 GSI 利用新建的重离子冷却储存环将放射性束流存储起来，进行精细的质量测量。兰州重离子研究装置^[39]作为我国现有的核物理大型加速器装置，为我国科研人员开展核物理基础研究提供了中低能稳定离子束流和上千种放射性离子束流^[40]。

本实验所用到的重离子加速器 HIMAC，是日本国立放射线医学综合研究所(NIRS)建成的，用于放射医学和放射生物学的研究以及利用重离子治疗癌症，HIMAC 使用了 ECR 和 PIG（用来产生轻离子）两种不同的离子源，ECR 源用来提高 HIMAC 对重离子的加速能力，因此，HIMAC 不仅可以加速质子与碳核等，同样可对重离子 N、O、Si、Ar、Fe、Kr 等进行加速^[41]。本工作便是基于重离子加速器（HIMAC）提供的 800 A MeV ²⁸Si 束流轰击 C 靶，选取能量 650 A MeV 进行研究。

2.2 CR-39 固体径迹探测器

核探测技术是粒子物理与原子核物理实验及诸多应用的基础，随着科研工作的不断深入，核探测技术也不断发展变化，本实验使用的 CR-39 固体核径迹探测器，其分子式为： $(C_{12}O_7H_{18})_n$ ，相对分子质量为：272，密度为：1.31-1.32g/cm³，分子结构式如

图 2-1 所示。1978 年，CR-39 被 Cartwright 等人发现可用于核径迹的探测^[42]，图 2-2 (a)、(b) 分别为蚀刻前后的 CR-39。

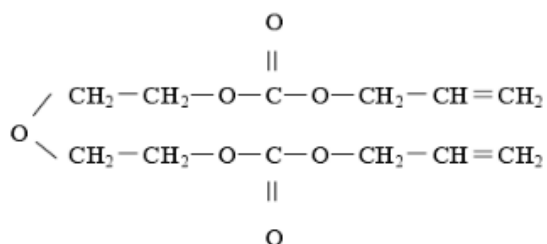
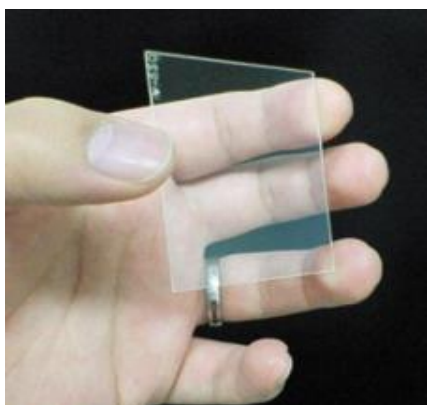
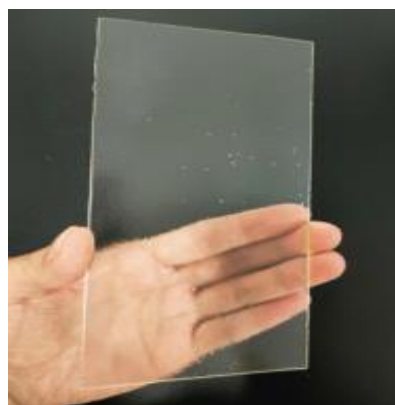


图 2-1 CR-39 探测器分子结构式



(a)



(b)

图 2-2 CR-39 固体核径迹探测器

作为固体核径迹探测器，CR-39 具有质量小、价格低、容易保存、便于处理、灵敏度较高、潜伏径迹稳定、容易蚀刻等优点；而且，CR-39 探测器分辨率高的特点，可以分辨强中子场中重离子的质量、能量与电荷。CR-39 应用于本实验时也存在缺点：不能探测到中高能核碎裂实验中 $Z \leq 4$ 的粒子，由于得出的数据量庞大，导致工作相对繁重，但实验结果会相对精准^[11]。

3 实验简介

3.1 实验流程

本实验流程如图 3-1 所示。



图 3-1 实验流程图示

3.2 束流照射

本实验中 CR-39 探测器与 C 靶交替放置，其中探测器的尺寸为：5cm×5cm，厚度：0.783mm，密度：1.63g/cm³；C 靶厚度：5mm。将此装置紧密贴合放置于 HIMAC 提供的 800 A MeV ²⁸Si 束流中，离子密度为 1250ions/cm²，垂直于靶面进行照射，如图 3-2 所示。束流在穿过 C 靶的过程中会出现能量损失，所以 ²⁸Si 束流到达每个 C 靶的能量不同，利用 SRIM-2008 模拟代码计算可得，本实验两个靶的能量分别为：648 A MeV、633 A MeV。

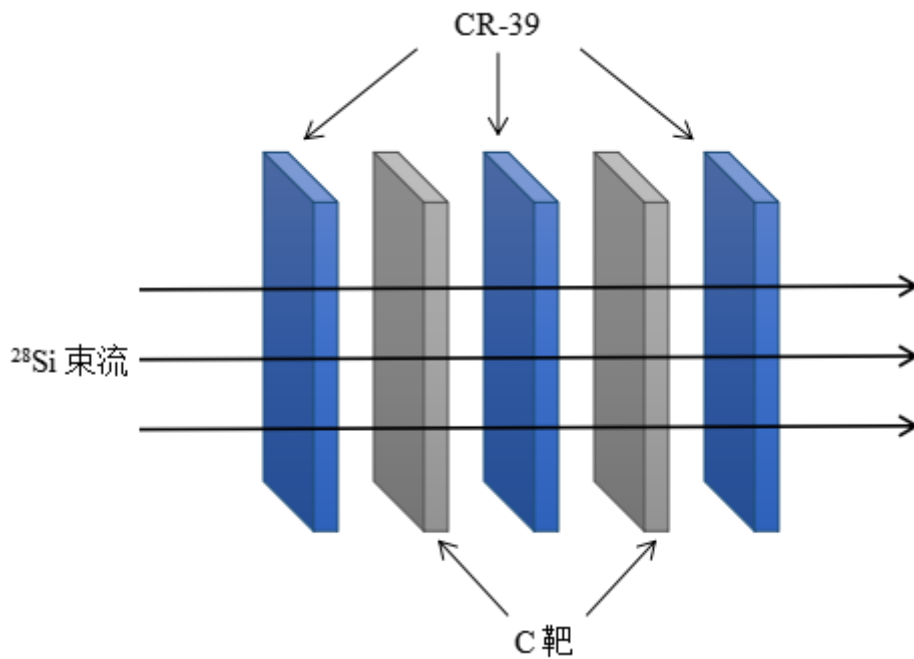
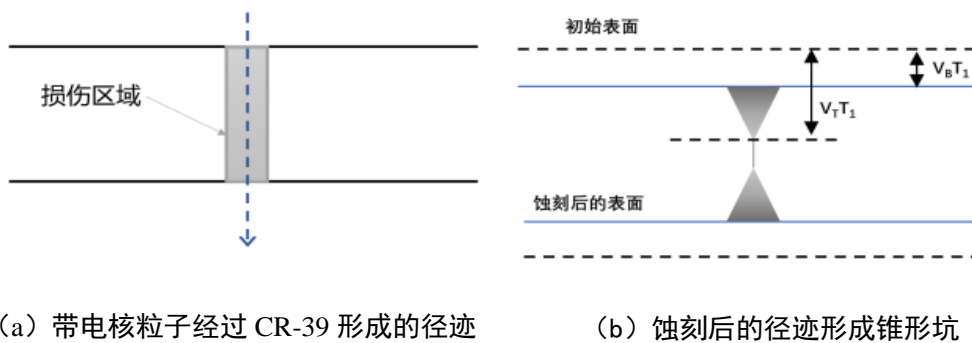


图 3-2 束流照射中 CR-39 与 C 靶放置结构示意图

3.3 径迹蚀刻

束流照射结束后，CR-39 探测器表面会形成一定程度的辐射损伤，经过适当的化学蚀刻放大处理，形成在光学显微镜下便于观测的径迹^[43]，如图 3-3(a)所示。由于本实验是对径迹截面面积进行测量研究，所以采用双面蚀刻的方法对探测器进行处理^[44-45]。蚀刻溶液为 7mol/L 的 NaOH 溶液，蚀刻温度为恒温 70℃，由于辐射损伤区域的化学活性较高，所以受损伤部分的蚀刻速率 V_T 比未受损伤部分的蚀刻速率 V_B 大，从而形成不同大小截面的锥形坑，如图 3-3(b)所示。蚀刻时间太久，会使 CR-39 上下表面的锥形坑连接，形成“孔洞”；蚀刻时间太短，会对粒子的识别产生不利影响，所以我们将蚀刻时间控制在 15 小时左右。



(a) 带电核粒子经过 CR-39 形成的径迹

(b) 蚀刻后的径迹形成锥形坑

图 3-3 径迹形成图示

3.4 径迹扫描及拟合

如图 3-4 为 HSP-1000 高速成像显微镜，在本实验中，使用该显微镜扫描 CR-39 探测器得到如图 3-5 所示的径迹图像，每个表面可获得 130×257 张清晰的径迹图像。



图 3-4 HSP-1000 高速成像显微镜

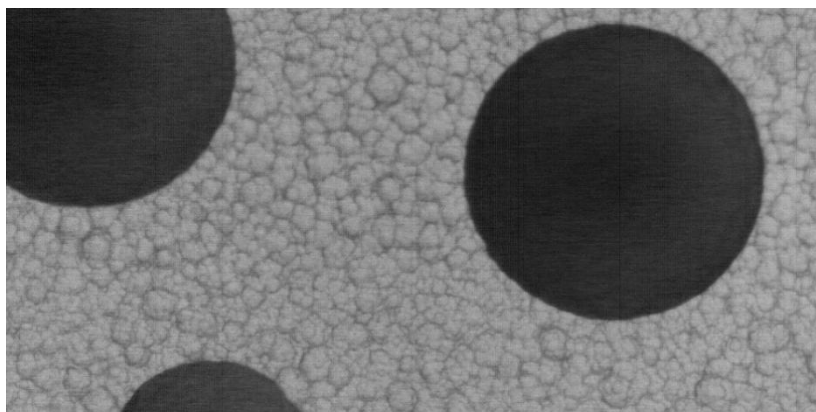


图 3-5 HSP-1000 显微镜扫描后的径迹图像

将显微镜扫描后的径迹图像利用 Pit-Fit 软件进行自动拟合，如图 3-6 所示，我们可以得到以下参量：每个径迹粒子的序号、坐标位置、短长轴比、径迹面积、平均灰度等。在拟合过程中，Pit-Fit 软件可以将大多数的径迹图像进行自动拟合，在蚀刻过程不可避免地会有灰尘及空气等杂质的混入，对粒子径迹的识别产生影响，因此后续的人工检查环节十分重要。

人工检查过程中，一般会遇到以下几种情况：径迹已经拟合，但与扫描得到的径迹边缘并不贴合，需要进行人工修正，可以看到修正后的径迹与扫描得到的径迹贴合更好，如图 3-7(a)所示；两个或两个以上径迹重叠，对重叠的径迹分别进行人工拟合，如图 3-7(b)所示；径迹未被拟合，将其人工重新拟合，如图 3-7(c)所示；气泡或者杂质被拟合，将其删除即可，如图 3-7(d)所示^[46]。但需要注意粒子径迹被多次重复拟合的情况，只保留拟合最好的一种即可。如果遇到个别特殊情况，要结合蚀刻程度，扫描情况进行综合分析判断。

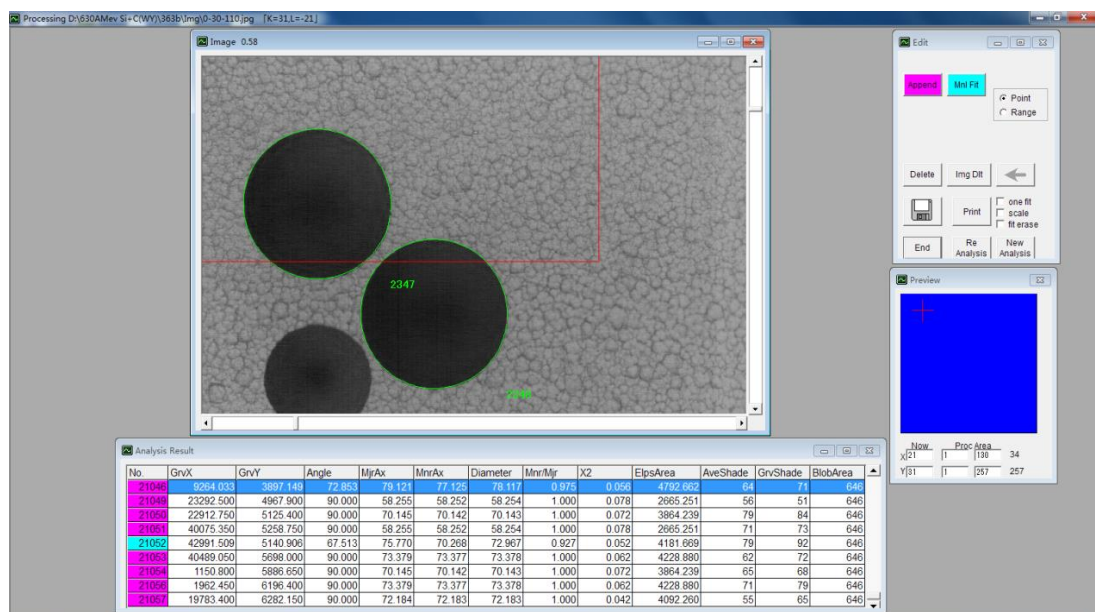
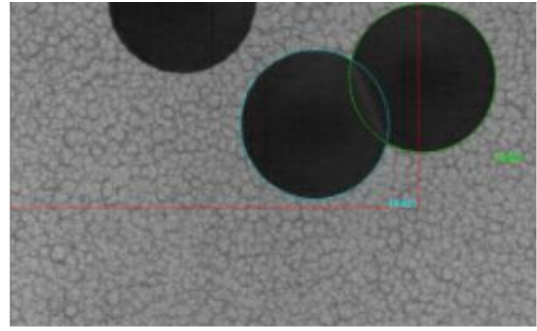
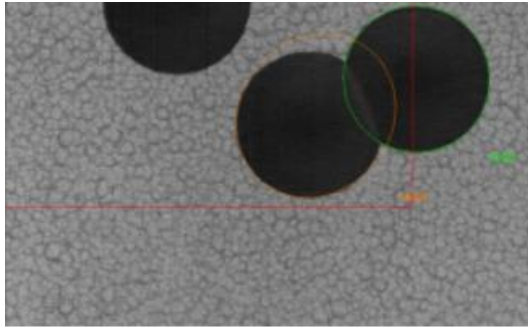
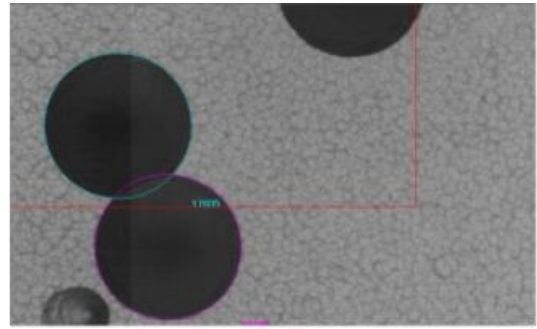
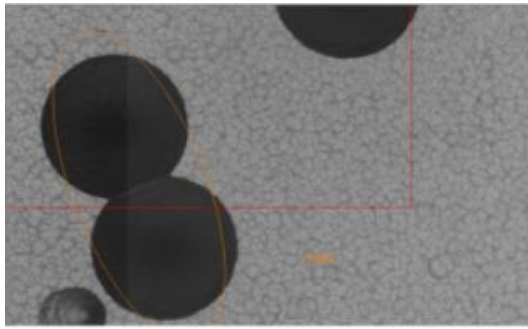


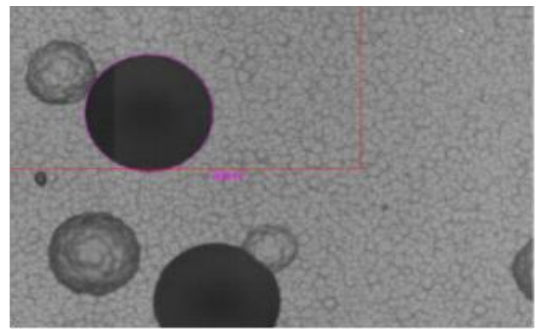
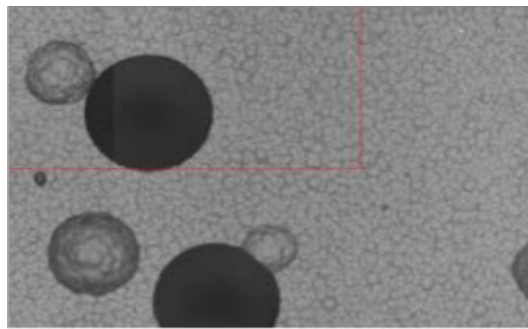
图 3-6 Pit-Fit 软件分析



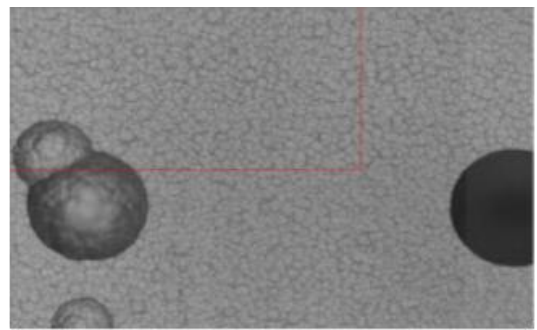
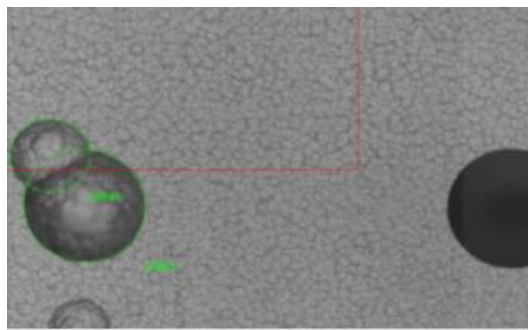
(a)



(b)



(c)



(d)

图 3-7 人工检查径迹类型

3.5 径迹重建

在得到每个粒子的径迹参量数据后，需要对其进行轨迹追踪，即径迹重建。

3.5.1 标准径迹选取

从每个 CR-39 探测器的上、下表面四个角共选取一百多个标准径迹，即未同靶核发生反应的径迹，本实验中为 ^{28}Si 束流径迹。CR-39 上、下表面进行扫描时，需要进行翻转，在选取标准径迹时要注意翻转方向。图 3-8 为 CR-39 上表面右下角的粒子径迹分布，图 3-9 为同一 CR-39 经过短边翻转后对应于下表面右上角的粒子径迹分布，图中标红径迹为选取的 ^{28}Si 束流径迹，可以看到，不同形状圈出的径迹能够一一对应。

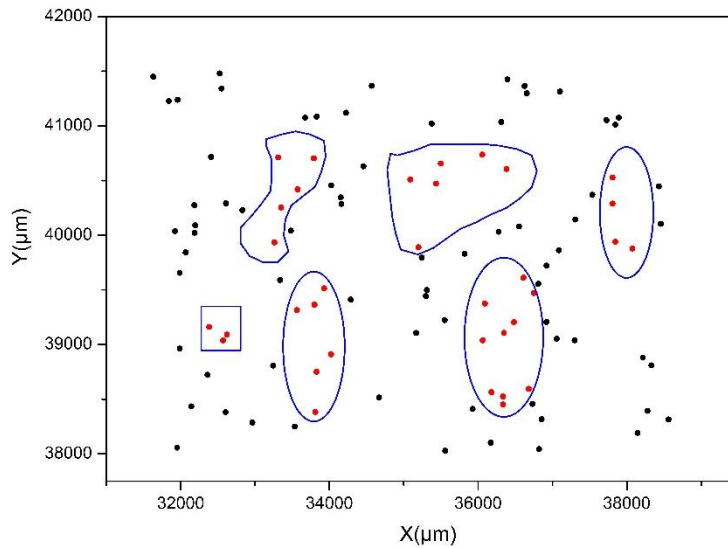


图 3-8 探测器上表面右下角粒子径迹分布情况

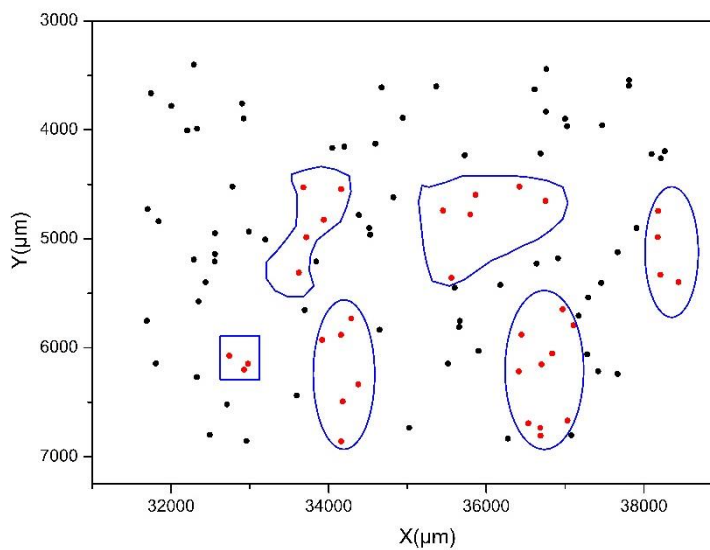


图 3-9 同一探测器下表面右上角粒子径迹分布情况

3.5.2 径迹重建

选出标准径迹后，根据其位置坐标，通过最小二乘法得到同一探测器上下表面的对应关系，完成该探测器上下表面的坐标转换^[47]。与 C 靶相邻的探测器两面（即 C 靶前探测器的下表面和 C 靶后探测器的上表面），也要选取一百多个标准径迹并进行坐标转换。设 (x, y) 是 CR-39 探测器上表面（或 C 靶前探测器下表面）在 xoy 坐标系下的径迹坐标， (x', y') 是同一 CR-39 探测器下表面（或 C 靶后探测器的上表面）在 $x'oy'$ 坐标系下的径迹坐标，坐标转换关系，如公式(3-1)所示：

$$\begin{cases} x'_{th} = ax + by + c \\ y'_{th} = a'x + b'y + c' \end{cases} \quad (3-1)$$

其中， a 、 b 、 c 、 a' 、 b' 、 c' 为拟合参数，由选出的标准径迹使用最小二乘法得出。 (x'_{th}, y'_{th}) 为同一 CR-39 上表面的径迹坐标对应在下表面（或 C 靶前 CR-39 下表面的径迹坐标对应 C 靶后 CR-39 上表面）坐标系中的理论值。入射束流在穿过 CR-39 探测器时，由于受到库仑散射作用的影响，径迹位置会有小幅度的偏移，即理论坐标 (x'_{th}, y'_{th}) 与实际坐标 (x', y') 不相等存在偏差，径迹的匹配与否就可以通过偏差的大小分布来判断，即：

$$\begin{cases} dx = x'_{th} - x' \\ dy = y'_{th} - y' \end{cases} \quad (3-2)$$

图 3-10 为 633 A MeV ^{28}Si 束流与 C 靶反应弹核径迹的 dx 、 dy 的分布，其中图(a)、(b)为 CR-39 上下表面的 dx 、 dy 分布，图(c)、(d)为 C 靶前后相邻 CR-39 表面的 dx 、 dy 分布，可以看到偏差较小的径迹位于峰值处，即这部分径迹比较匹配，其他的径迹均匀分布在峰值周围。对比(a)、(b)图与(c)、(d)图，可以看到同一 CR-39 上下表面的位置偏差要比 C 靶前后相邻 CR-39 表面的位置偏差小。将 dx 、 dy 分布进行高斯拟合，如图 3-10 中标红的光滑曲线所示，得到对应的标准偏差 $\sigma(dx)$ 、 $\sigma(dy)$ ，本实验中同一个 CR-39 上下表面的 $\sigma(dx)$ 、 $\sigma(dy)$ 大约分布在 6-13 μm 之间，同一个 C 靶前后相邻 CR-39 表面的 $\sigma(dx)$ 、 $\sigma(dy)$ 大约分布在 39-45 μm 之间。随着能量的损失，库仑散射的影响也逐渐增大，靶后径迹的位置偏移相对较大，本实验中选用最大的 $\sigma(dx)$ 、 $\sigma(dy)$ ，且在 $[x'_{th} \pm 4\sigma(dx)$ 、 $y'_{th} \pm 4\sigma(dy)]$ 的范围内对径迹进行匹配。

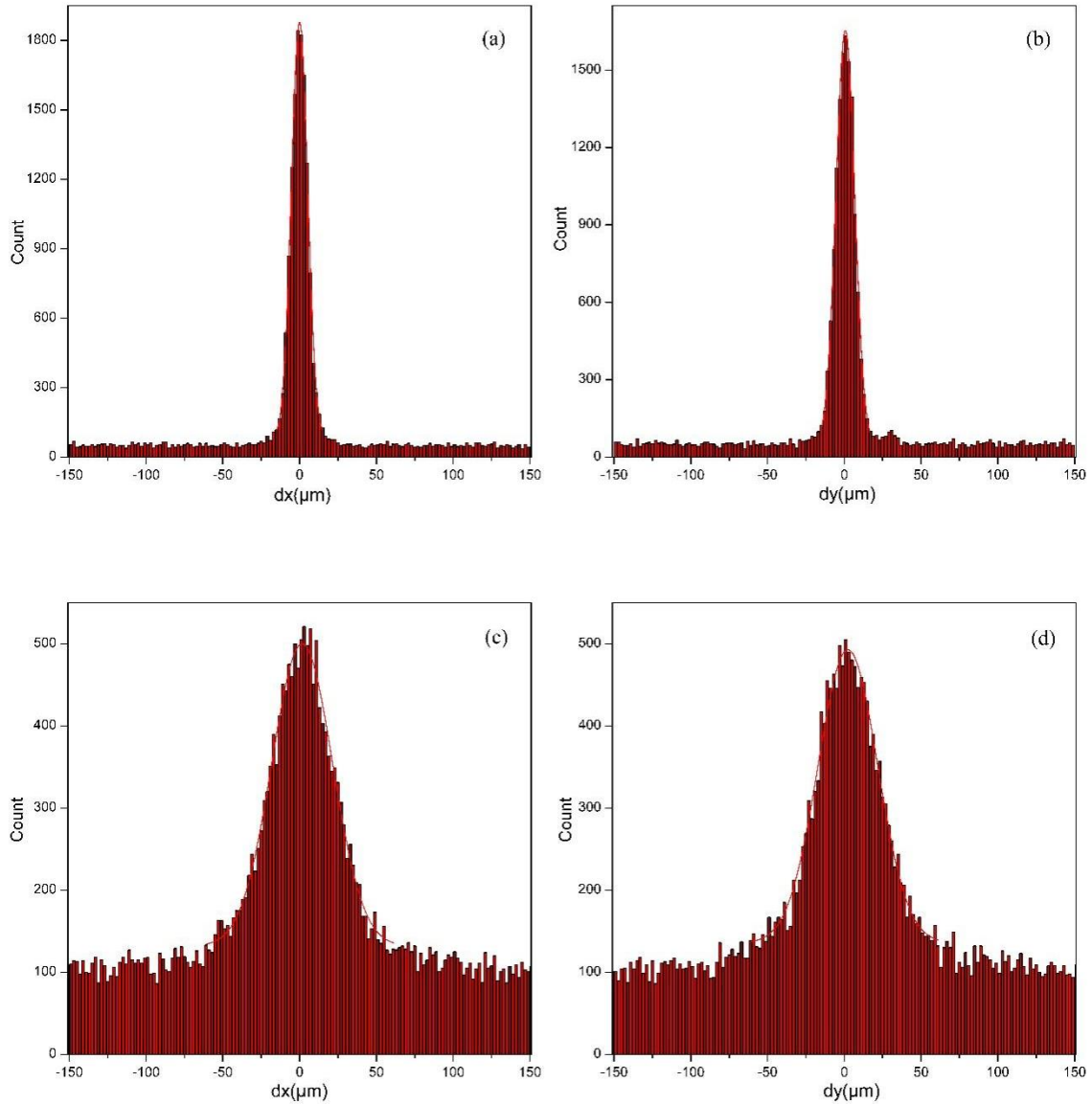


图 3-10 633 A MeV ^{28}Si 束流与 C 靶反应 dx、dy 的分布

(a) 为 CR-39 上下表面 dx 分布；(b) 为 CR-39 上下表面 dy 分布

(c) 为 C 靶前后相邻 CR-39 表面 dx 分布；(d) 为 C 靶前后相邻 CR-39 表面 dy 分布

3.5.3 径迹匹配

使用 Fortran 语言程序在 $[x'_{\text{th}} \pm 4\sigma(dx), y'_{\text{th}} \pm 4\sigma(dy)]$ 的范围内寻找与 (x, y) 匹配的径迹坐标 (x', y') ，匹配过程中要综合径迹面积、位置偏差、灰度等参数进行考虑，必要时可以重新找到该粒子的径迹图像进行判断和确认。

情况一：束流穿过探测器。束流在穿过探测器时几乎不会发生碎裂反应，所以大部分粒子都可以一对一匹配。本实验中，粒子匹配范围为 $[x'_{th} \pm 80\mu\text{m}, y'_{th} \pm 80\mu\text{m}]$ ，比 4σ 值略大，可以更好地将所有能够匹配的粒子筛选出来，减小匹配误差。同时也存在部分粒子没有匹配的情况，可能是探测器翻转扫描时没有完全对齐，导致探测器上表面处于边缘的入射粒子在下表面没有被扫描上；也可能是人工检查过程中杂质或者气泡被保留没有完全删除^[47]。

情况二：束流穿过 C 靶。束流穿过 C 靶时会发生核-核碰撞碎裂反应，所以在匹配过程中会出现一个束流粒子匹配一个或者多个粒子的情况，此时需要综合径迹面积、位置偏差、灰度等参数进行正确匹配。本实验中，粒子匹配范围为 $[x'_{th} \pm 200\mu\text{m}, y'_{th} \pm 200\mu\text{m}]$ ，在此范围内重复筛选匹配，使得匹配结果更为准确。受探测器带电粒子鉴别能力的限制，本实验中 ^{28}Si 束流只可能被探测到碎裂成两个轻质量的碎片，分别为 $Z=9$ 与 $Z=5$ 、 $Z=8$ 与 $Z=6$ 、 $Z=8$ 与 $Z=5$ 、 $Z=7$ 与 $Z=7$ 、 $Z=7$ 与 $Z=6$ 、 $Z=7$ 与 $Z=5$ 、 $Z=6$ 与 $Z=6$ 、 $Z=6$ 与 $Z=5$ 和 $Z=5$ 与 $Z=5$ 这九种情况。但仍有部分粒子没有匹配，可能是弹核与靶核碰撞全部碎裂，产生电荷数 $Z < 5$ 的弹核碎片，无法在 CR-39 上探测到；或者是靶前处于 CR-39 下表面边缘的入射粒子未能全部进入靶后相邻 CR-39 上表面^[47]。同时，匹配过程中也要注意部分粒子发生电荷拾取反应的情况^[48]。

图 3-11 为 648 A MeV ^{28}Si 束流与 C 靶核反应碎裂后各粒子的径迹面积分布，从图中可以明显地分辨出 $5 \leq Z \leq 14$ 的粒子，可以看到绝大多数为 ^{28}Si 束流粒子。多峰高斯拟合后，可以得到该能量下不同电荷数的粒子径迹面积分布范围，根据拟合数据，做出其与电荷数 Z 的关系，如图 3-12 所示，粒子的径迹面积与电荷数 Z 之间表现出明显的线性关系，随着电荷数 Z 的增大而增大。

由此可以得到本实验中 648 A MeV、633 A MeV 能量下粒子径迹面积与电荷数 Z 的拟合关系：

$$648 \text{ A MeV } ^{28}\text{Si} + \text{C} \quad \text{Area} = -2176.0 + 1120.3Z \quad \chi_{\min}^2 = 0.345$$

$$633 \text{ A MeV } ^{28}\text{Si} + \text{C} \quad \text{Area} = -1620.2 + 1058.6Z \quad \chi_{\min}^2 = 0.170$$

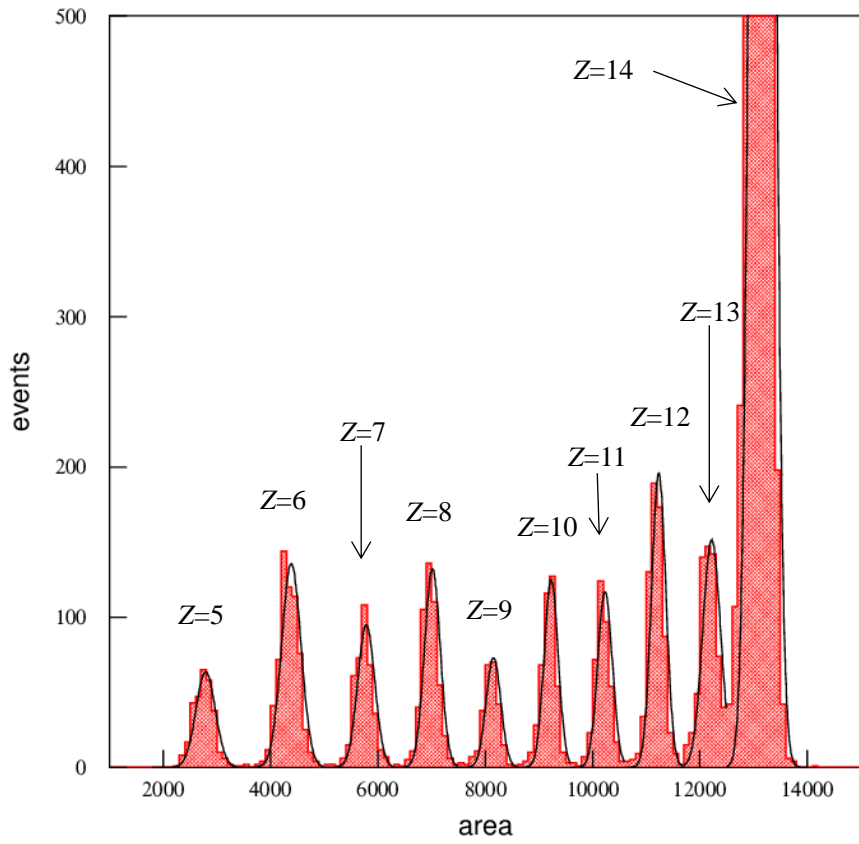


图 3-11 648 A MeV ^{28}Si 束流与 C 靶反应弹核碎片径迹面积分布

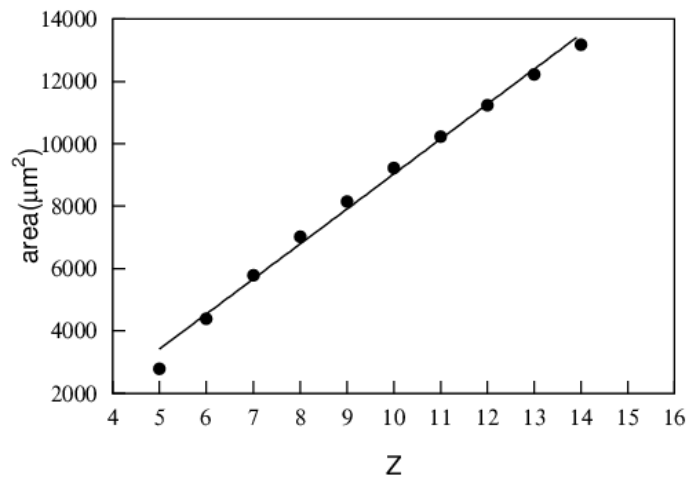


图 3-12 648 A MeV ^{28}Si 束流与 C 靶反应弹核碎片的径迹面积与电荷数的关系

4 实验结果及分析

4.1 反应截面

径迹重建完成后，计算得到本实验中电荷变化总截面和分截面的结果，并对其进行分析。

4.1.1 电荷变化总截面

电荷变化总截面为^[31]：

$$\sigma_{\text{tot}} = \frac{A_{\text{T}} \ln(N_{\text{in}}/N_{\text{out}})}{\rho_{\text{T}} t N_{\text{AV}}} \quad (4-1)$$

式(4-1)中， A_{T} 是C靶的相对原子质量； N_{in} 是C靶前入射的弹核粒子 ^{28}Si 的个数， N_{out} 是C靶后出射的弹核粒子 ^{28}Si 的个数； ρ_{T} 是C靶的密度； t 是C靶的厚度； N_{AV} 是阿伏伽德罗常数。

其统计误差为：

$$\Delta \sigma_{\text{tot}} = \frac{A_{\text{T}}}{\rho_{\text{T}} t N_{\text{AV}}} \cdot \frac{\sqrt{N_{\text{out}}^{\text{f}}}}{N_{\text{out}}} \quad (4-2)$$

在(4-2)式中的 $N_{\text{out}}^{\text{f}}$ 指穿过C靶后发生反应的弹核粒子 ^{28}Si 的个数；

计算出本实验的反应总截面结果后，与Bradt-Peters半经验公式的预测值进行比较，Bradt-Peters半经验公式如下^[49-50]：

$$\sigma_{\text{tot}} = \pi r_0^2 (A_{\text{P}}^{1/3} + A_{\text{T}}^{1/3} - b_0)^2 \quad (4-3)$$

式(4-3)中， $r_0 = 1.31\text{fm}$ ， $b_0 = 0.94$ ，为拟合参数， A_{P} 和 A_{T} 分别为弹核和靶核的质量数。则 ^{28}Si 束流与C靶反应总截面的预测值为1037mb。

表4-1列出了不同能量下 ^{28}Si 束流与不同靶核碎裂反应的电荷变化总截面及其统计误差。本实验中，648 A MeV、633 A MeV能量下 ^{28}Si 作用于与C靶的总截面，分别为 $1049 \pm 57\text{mb}$ 、 $1086 \pm 59\text{mb}$ ，在误差允许范围内，与Bradt-Peters半经验公式的预测值进行比较，基本相近，与束流能量无关。

表 4-1 不同能量下 ^{28}Si 束流与不同靶核碎裂反应的电荷变化总截面

靶核	束流能量 (A MeV)	电荷变化总截面 $\sigma_{\text{tot}}/\text{mb}$	NUCFRG2 $\sigma_{\text{tot}}/\text{mb}$	Bradt-Peters $\sigma_{\text{tot}}/\text{mb}$	参考文献
C	14500	1185.0 ± 30.0			[51]
	1296	1215 ± 12			[52]
	1158-1136	1100 ± 16	1208		[53]
	1000	1117 ± 62			[54]
	788	1127 ± 42		1037	[30]
	770	1183 ± 12			[52]
	770-760	1110 ± 14	1196		[53]
	736	1179 ± 50			[34]
	723	1186 ± 42			[34]
	648	1049 ± 57		1037	本工作
	633	1086 ± 59		1037	本工作
	618	1081 ± 60		1037	同组工作
	603	1061 ± 61		1037	同组工作
	568-536	1142 ± 16	1154		[53]
	550	1124 ± 7			[32]
	503	1176 ± 12			[52]
	488	1124 ± 6			[32]
	467	1136.4 ± 12.8			[33]
	453	1114 ± 6			[32]
	412	1103 ± 7			[32]
	364-340	1125 ± 16	1115		[53]
	309	1119 ± 8			[32]
	278-262	1131 ± 34	1112		[53]

续表 4-1 不同能量下 ^{28}Si 束流与不同靶核碎裂反应的电荷变化总截面

靶核	束流能量 (A MeV)	电荷变化总截面 $\sigma_{\text{tot}}/\text{mb}$	NUCFRG2 $\sigma_{\text{tot}}/\text{mb}$	Bradt-Peters $\sigma_{\text{tot}}/\text{mb}$	参考文献
	255	1119 ± 6			[32]
	225	1117 ± 7			[32]
	208	1138 ± 17			[32]
	175	1164 ± 12			[32]
	144	1195 ± 12			[32]
	90	1292 ± 35			[32]
H	1296	407 ± 10			[52]
	1000	483 ± 76			[54]
	770	387 ± 10			[52]
	503	379 ± 9			[52]
	467	367.6 ± 16.7			[33]
CH ₂	5000	757 ± 168			[54]
	1000	694 ± 70			[54]
	1000	1065 ± 140			[55]
	800	770 ± 99			[56]
	788	761 ± 24			[30]
	624	818.37 ± 157.96			[57]
Al	14500	1620.0 ± 25.0			[51]
	3000	1533 ± 133			[54]
	1000	1397 ± 138			[54]
	453	1637.7 ± 23.0			[33]

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/338047054075007006>