

# 强扰动能区非全裸 $C^{q+}$ , $O^{q+}$ ( $q = 1-4$ ) 与 He 原子碰撞过程中截面比的实验研究\*

周春林 邵剑雄 陈熙萌† 高志民 王 俊 孙光智 席发元 陈益峰 陈 林  
丁宝卫 王兴安 娄凤君 徐俊奎 邱玺玉 王 幡 吕 瑛

(兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000)

(2008 年 7 月 3 日收到, 2009 年 3 月 5 日收到修改稿)

利用兰州大学  $2 \times 1.7$  MV 串列加速器离子-原子碰撞实验终端上产生的单核子能量为 20—500 keV 的  $C^{q+}$  和  $O^{q+}$  ( $q = 1-4$ ) 离子与 He 原子碰撞. 采用符合测量方法和多参数数据获取系统得到了散射离子与反冲离子电荷态的二维谱, 从而分别得到直接电离、入射离子俘获电子和入射离子损失电子截面与总截面的截面比  $R^{\text{direct}}$ ,  $R^{\text{capture}}$  和  $R^{\text{loss}}$ , 并对强扰动能区的各个反应道之间竞争关系及同一反应道在不同碰撞体系中所表现出的实验规律进行了比较和定性分析.

关键词: 离子-原子碰撞, 截面比, 竞争关系, 强扰动区

PACC: 3450H, 3470, 5220H

## 1. 引 言

基于加速器的离子-原子碰撞实验在原子物理应用和基础理论研究中都有重要的价值. 碰撞电离的研究对离子束穿越物质时的能量损失<sup>[1]</sup>、可控核聚变<sup>[2]</sup>及加速器离子的寿命<sup>[3]</sup>等方面有重要应用价值. 对于多电子体系动力学<sup>[4]</sup>、电子-电子关联<sup>[5-7]</sup>和原子的电子结构等基础研究同样具有不可忽视的理论价值.

Knudsen 等<sup>[5]</sup>根据 Bohr<sup>[8]</sup>提出的入射离子能量与电荷关系的参数  $\kappa$  把 He 原子双电离过程分为微扰区 ( $\kappa < 0.1$ )、相互作用区 ( $0.1 \leq \kappa \leq 1$ ) 和强扰动区 ( $\kappa > 1$ ) 三个由高到低的能量区间进行讨论. 对于双电离过程, 在微扰区各种 Born 近似可以较好的解决<sup>[9-11]</sup>, 在相互作用区两步机制和震离机制可以比较满意的解决<sup>[12-14]</sup>, 但是在强扰动区由于各个出射道之间的竞争, 情况比较复杂, 目前尚没有公认的统一理论<sup>[13]</sup>. 因此, 对于强扰动区的碰撞机制, 实验研究和定性理解是必要的. 对于全裸离子入射原子态的 He 理论研究比较多, 实验数据的积累和理

论处理也比较充分, 但是非全裸离子入射的实验数据目前还需要积累, 而且其理论理解涉及到多体相互作用, 理论研究定量解释还有困难. 因此, 对非全裸离子与 He 原子碰撞过程所做的定性理解是可行而必要的.

大多数离子与 He 原子碰撞过程的相对测量都是集中在对于 He 原子双单电离截面比的测量上<sup>[5, 13, 15-27]</sup>. 通过对 He 原子双单电离截面比的研究加深了对多电离机制的认识. 而研究截面比的意义主要在于加深对反应道之间竞争关系的认识. 对于多反应道的截面比研究, 目前国内外报道很少. 相对于双单电离截面比  $R$  而言, 测量各个反应道的截面与总截面的截面比所引入的统计误差更小, 在实验数据的处理上更为可取, 因此所反映的物理事实也就更为可靠.

本文利用兰州大学  $2 \times 1.7$  MV 串列加速器实验终端测量了单核子能量为 20—500 keV/u 的  $C^{q+}$  和  $O^{q+}$  ( $q = 1-4$ ) 离子与 He 原子碰撞的直接电离截面比  $R^{\text{direct}}$ 、电子俘获截面比  $R^{\text{capture}}$  和入射离子损失电子的截面比  $R^{\text{loss}}$ . 对于各碰撞体系反应能区, 我们依据 Bohr 提出的全裸重离子入射轻原子的参数  $\kappa$ <sup>[8]</sup>,

\* 国家自然科学基金(批准号:10775063)资助的课题.

† 通讯联系人, E-mail: chenxm@lzu.edu.cn

从实验的角度建议了更为细致的作用机制能区划分. 对各个反应道在入射离子电荷态相同时随能量变化的竞争关系进行了定性分析, 并对相同反应道的截面比随电荷态和能量的变化趋势进行了比较并做了定性解释.

## 2. 实验装置及数据处理

本实验是在兰州大学  $2 \times 1.7$  MV 串列加速器离子-原子碰撞实验终端上完成的<sup>[28]</sup>. 实验采用反冲离子-散射离子飞行时间符合技术, 通过反冲离子飞行时间谱区分不同价态的反冲离子, 利用静电偏转和位置灵敏探测器区分不同电荷态的散射离子. 结合 MPA-3 型多参数获取系统得到一定价态散射离子所对应的反冲离子电荷态的二维符合谱, 从而测量碰撞反应后的靶原子直接电离、入射离子俘获电子和入射离子损失电子三个反应道的截面比  $R^{\text{direct}}$ ,  $R^{\text{capture}}$  和  $R^{\text{loss}}$ . 实验装置如图 1 所示.

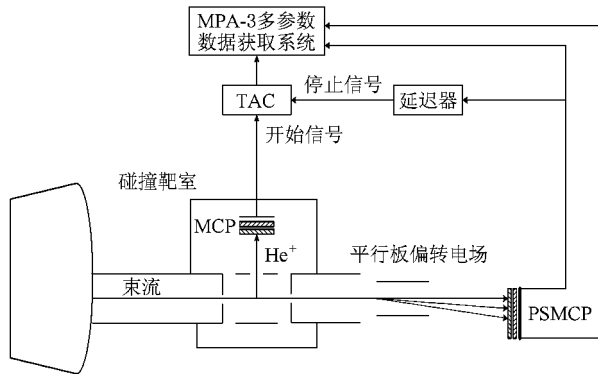


图 1 实验装置示意图

加速器出射束流由  $30^\circ$  分析磁铁选择同一电荷态的单能  $C^{q+}$ ,  $O^{q+}$  ( $q=1-4$ ) 离子, 经相距约 1.5 m 的两个准直光阑后进入靶室, 其中碰撞靶室前为可调光阑. He 原子经针头垂直于入射束流充入靶室, 碰撞后产生的反冲离子由弱电场引出, 经加速、无场漂移和再加速后被微通道板 (MCP) 探测器所探测. 探测器给出两路信号, 一路信号经过处理后通过不同的飞行时间确定反冲离子的电荷态 (形成反冲离子飞行时间谱), 另一路信号作为停止信号输入时幅转换器 (TAC). 散射离子束通过靶室并经平行板电场偏转后, 不同电荷态的散射离子出射角度不同, 从而打到条形位置灵敏探测器 (PSMCP) 的不同位置上. 输出位置信号和时间脉冲, 前者形成散射离子一

维位置谱, 后者经延迟后作为开始信号输入 TAC. 由 MPA-3 型多参数数据获取系统将反冲离子的飞行时间信号与散射离子的位置信号进行符合, 从而得到二维碰撞事件符合谱.

图 2 是一个典型的二维碰撞事件符合谱. 二维谱上的每一个点就对应一次碰撞事件, 而每一个数据集中处代表一个特定的反应道, 图 2 中从左到右分别为入射离子损失两个电子的靶双电离 (DLDI), 入射离子损失两个电子的靶单电离 (DLSI), 入射离子损失单个电子的靶双电离 (SLDI), 入射离子损失单个电子的靶单电离 (SLSI), 直接双电离 (DI), 直接单电离 (SI), 转移电离 (TI), 单电子俘获 (SC) 和双电子俘获 (DC) 等 9 个反应道.

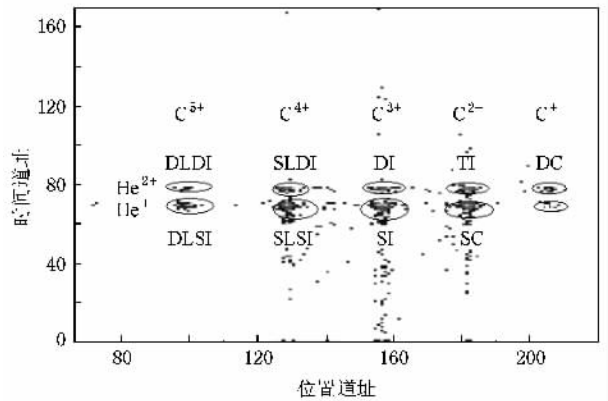


图 2  $3.05$  MeV  $C^{3+}$  与 He 原子碰撞反应的符合二维谱

实验过程中, 我们控制束流强度在 1 pA 以下, 使得偶然符合减少; 选取靶室真空度为  $3.6 \times 10^{-3}$  Pa, 以满足单次碰撞条件. 这样, 实验的误差就主要来自于峰面积的选取, 本工作采取多次选取求平均值的方法, 并加以探测效率修正.

## 3. 实验结果及讨论

如图 2 所示的二维谱, 我们把反应道分为三个过程研究. 这三个过程分别是直接电离过程 (direct ionization), 包括 SI 和 DI 两个反应道; 电子俘获过程 (electron capture), 包括 SC, DC 和 TI 三个反应道; 入射离子损失电子过程 (projectile electron loss), 包括 SLSI, SLDI, DLSI 等反应道. 三个过程的截面与二维谱上探测到的各反应道的总截面的截面比分别表示为  $R^{\text{direct}}$ ,  $R^{\text{capture}}$  和  $R^{\text{loss}}$ , 定义如下:

$$\begin{aligned}
 R^{\text{direct}} &= \frac{\sigma^{\text{direct}}}{\sigma^{\text{total}}} = \frac{\sigma_{\text{SI}} + \sigma_{\text{DI}}}{\sigma^{\text{total}}} \\
 &= \frac{N_{\text{SI}}/\epsilon_1 + N_{\text{DI}}/\epsilon_2}{N_{\text{SI}}/\epsilon_1 + N_{\text{DI}}/\epsilon_2 + N_{\text{SC}}/\epsilon_1 + N_{\text{DC}}/\epsilon_2 + N_{\text{TI}}/\epsilon_2 + N_{\text{SLSI}}/\epsilon_1 + N_{\text{SLDI}}/\epsilon_2 + \dots} \\
 &= \frac{\eta N_{\text{SI}} + N_{\text{DI}}}{\eta N_{\text{SI}} + N_{\text{DI}} + \eta N_{\text{SC}} + N_{\text{DC}} + N_{\text{TI}} + \eta N_{\text{SLSI}} + N_{\text{SLDI}} + \dots} \\
 &= \frac{\eta N_{\text{SI}} + N_{\text{DI}}}{\eta(N_{\text{SI}} + N_{\text{SC}} + N_{\text{SLSI}} + \dots) + (N_{\text{DI}} + N_{\text{DC}} + N_{\text{TI}} + N_{\text{SLDI}} + \dots)} \\
 &= \frac{\eta N_{\text{SI}} + N_{\text{DI}}}{\eta S + D} \\
 &= \frac{\eta N_{\text{SI}} + N_{\text{DI}}}{T}, \tag{1}
 \end{aligned}$$

$$R^{\text{capture}} = \frac{\eta N_{\text{SC}} + N_{\text{DC}} + N_{\text{TI}}}{T}, \tag{2}$$

$$R^{\text{loss}} = \frac{\eta(N_{\text{SLSI}} + N_{\text{DLSI}} + \dots) + (N_{\text{SLDI}} + N_{\text{DLDI}} + \dots)}{T}. \tag{3}$$

这里  $\eta = \epsilon_2/\epsilon_1$  为反冲离子  $\text{He}^{2+}$  的探测效率  $\epsilon_2$  与  $\text{He}^+$  的探测效率  $\epsilon_1$  之比;  $\sigma^{\text{total}}$  表示二维谱上各反应道的总截面,  $N_i$  表示二维谱上第  $i$  反应道的计数;  $S = N_{\text{SI}} + N_{\text{SC}} + N_{\text{SLSI}} + \dots$ ;  $D = N_{\text{DI}} + N_{\text{DC}} + N_{\text{TI}} + N_{\text{SLDI}} + \dots$ ;  $T = \eta S + D$ .

### 3.1. 相同电荷态入射离子的截面比比较

图 3—图 10 描述的是  $\text{C}^{q+}$  和  $\text{O}^{q+}$  ( $q = 1-4$ ) 离子与 He 原子碰撞过程中直接电离截面比  $R^{\text{direct}}$ 、电子俘获截面比  $R^{\text{capture}}$  和入射离子损失电子的截面比  $R^{\text{loss}}$  随入射离子能量的变化。

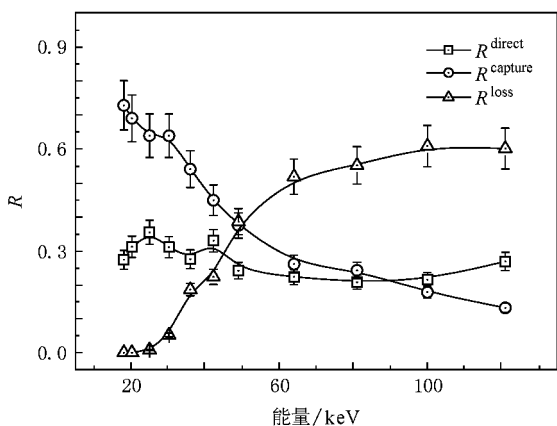


图 3  $\text{C}^+ + \text{He}$  碰撞过程中直接电离截面比  $R^{\text{direct}}$ 、电子俘获截面比  $R^{\text{capture}}$  和入射离子损失电子的截面比  $R^{\text{loss}}$  随入射离子能量的变化关系

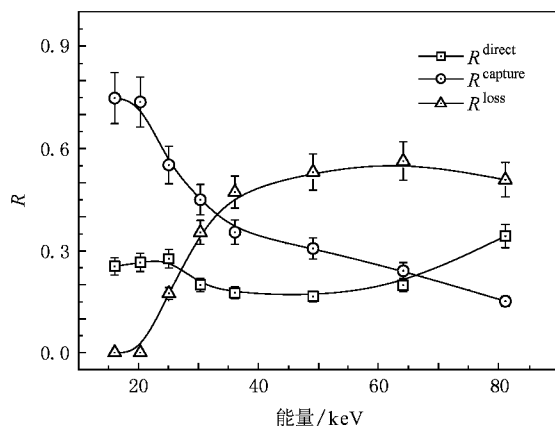


图 4  $\text{O}^+ + \text{He}$  碰撞过程中直接电离截面比  $R^{\text{direct}}$ 、电子俘获截面比  $R^{\text{capture}}$  和入射离子损失电子的截面比  $R^{\text{loss}}$  随入射离子能量的变化关系

主要是入射离子的能量和电荷态, 我们依据 Bohr 提出的描述各个作用能区的参数<sup>[5, 8]</sup>  $\kappa = 2q v_0 / V_p$  (式中  $v_0$  表示靶电子的轨道电子速度,  $V_p$  表示入射离子速度) 及从本试验碰撞系统截面比所显示出的共同性质可以看到, 本实验所在的能区完全包含了各系统的强扰动能区, 但是能量没有高到扰动能区。我们对  $\text{C}^{q+} + \text{He}$  和  $\text{O}^{q+} + \text{He}$  ( $q = 1-4$ ) 碰撞中的强扰动区作简单整理, 结果如表 1 所列, 表中  $E_a$  为强扰动区的低能量值,  $E_b$  为强扰动区的高能量值, 作用能区的参数分别为  $\kappa_a$  和  $\kappa_b$ 。

从图 3—图 10 可以看到, 同种电荷态的各个反应道之间竞争关系表现得非常明显。从表 1 可知, 本实

考虑到影响碰撞过程各反应道竞争强弱的因素

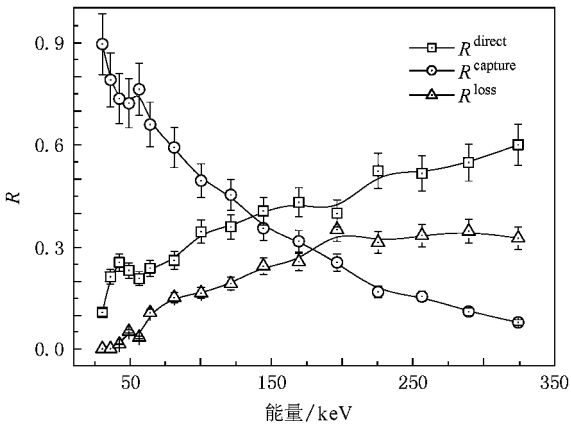


图 5  $C^{2+} + He$  碰撞过程中直接电离截面比  $R^{direct}$ 、电子俘获截面比  $R^{capture}$  和入射离子损失电子的截面比  $R^{loss}$  随入射离子能量的变化关系

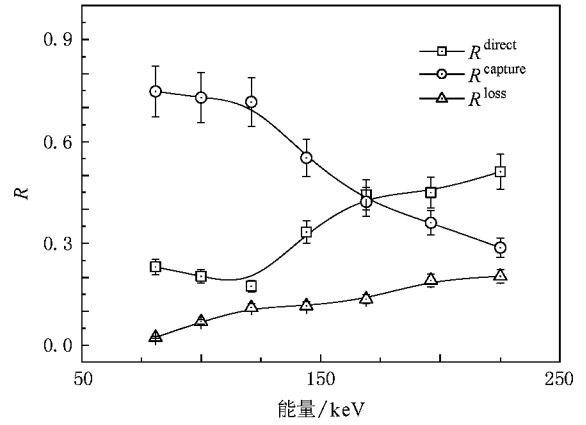


图 8  $O^{3+} + He$  碰撞过程中直接电离截面比  $R^{direct}$ 、电子俘获截面比  $R^{capture}$  和入射离子损失电子的截面比  $R^{loss}$  随入射离子能量的变化关系

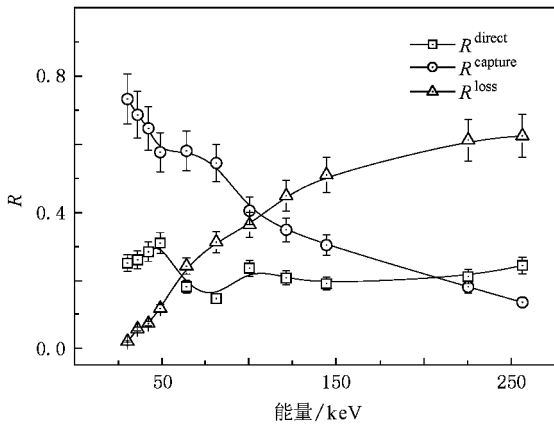


图 6  $O^{2+} + He$  碰撞过程中直接电离截面比  $R^{direct}$ 、电子俘获截面比  $R^{capture}$  和入射离子损失电子的截面比  $R^{loss}$  随入射离子能量的变化关系

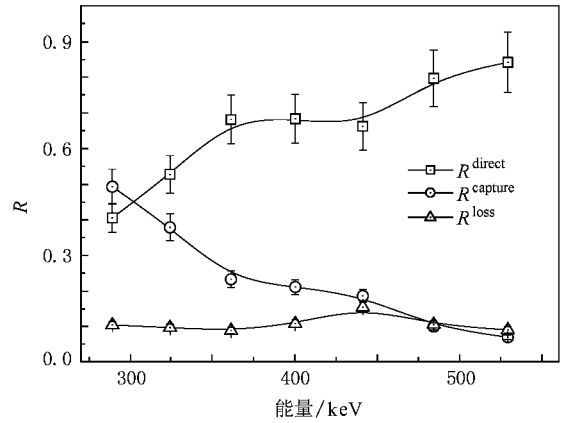


图 9  $C^{4+} + He$  碰撞过程中直接电离截面比  $R^{direct}$ 、电子俘获截面比  $R^{capture}$  和入射离子损失电子的截面比  $R^{loss}$  随入射离子能量的变化关系

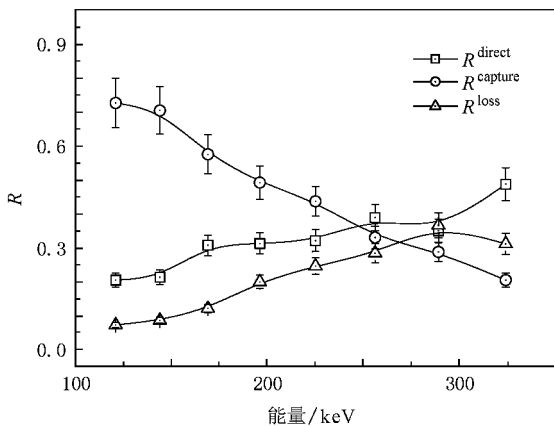


图 7  $C^{3+} + He$  碰撞过程中直接电离截面比  $R^{direct}$ 、电子俘获截面比  $R^{capture}$  和入射离子损失电子的截面比  $R^{loss}$  随入射离子能量的变化关系

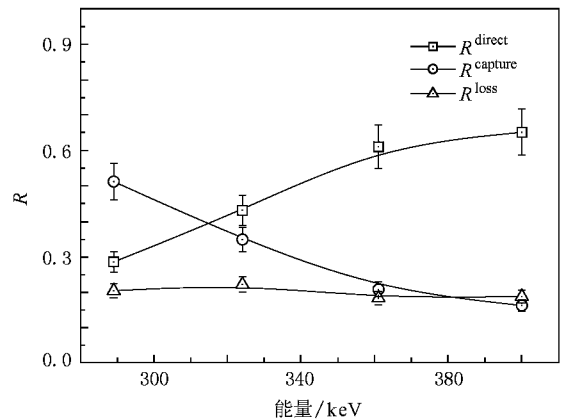


图 10  $O^{4+} + He$  碰撞过程中直接电离截面比  $R^{direct}$ 、电子俘获截面比  $R^{capture}$  和入射离子损失电子的截面比  $R^{loss}$  随入射离子能量的变化关系

的各碰撞系统  $\kappa$  值随入射离子电荷的升高而升高,但是大致都在 1—2.5 范围内.对于强扰动区以下的更低能区,有比较成熟的低能统计理论即蒸发模型来描述其反应机制<sup>[29,30]</sup>,因此我们把本实验碰撞系统在强扰动区以下的区间称作蒸发区.下面对本实验的蒸发区、相互作用能区、强扰动区的性质分别进行描述.

表 1  $C^{q+} + He$  和  $O^{q+} + He$  ( $q = 1-4$ ) 碰撞中的强扰动区

碰撞体系	$E_a/\text{keV}$	$E_b/\text{keV}$	$\kappa_a$	$\kappa_b$
$C^+ + He$	45	90	1.490712	1.054093
$O^+ + He$	26	66	1.961161	1.230915
$C^{2+} + He$	135	180	1.721326	1.490712
$O^{2+} + He$	60	205	2.581989	1.396861
$C^{3+} + He$	248	268	1.905002	1.832542
$O^{3+} + He$	170	—	2.300895	—
$C^{4+} + He$	300	483	2.309401	1.820063
$O^{4+} + He$	314	381	2.257331	2.049262

在蒸发区,由图 3—图 10 实验数据可知截面比的大小关系为  $R^{\text{capture}} > R^{\text{direct}} > R^{\text{loss}}$ .这时俘获过程是主要反应道,支配该能量区间的反应,俘获截面远大于电离截面.同时,我们发现入射离子损失电子过程的截面比存在一个阈值,只有能量大于这一阈值时入射离子损失电子的过程才发生.我们认为这主要是低能区动量转移很小,而且碰撞低能区的平均碰撞参数较大,靶原子本身是电中性,仅仅依靠其有效电荷电离入射离子的伴随电子从而致使入射离子电离的概率极小.

在相互作用能区,入射离子损失电子反应道的截面比随价态增加而递减,该反应道在入射离子伴随电子数较多且其外层电子电离能较低时具有较大的截面比,但是这并没有影响直接电离过程逐渐成为主要反应道并支配反应的趋势.从图 9、图 10 可以看到,相同价态的 C 离子的入射离子损失电子截面比较 O 小得多.这个实验结果可以定性理解为相同价态的  $C^{4+}$  最外层电子电离能较  $O^{4+}$  高得多,电子损失当然也就困难得多.因此其截面比也就小得多.当入射离子为二价和三价时,其外层电子电离能与 He 的外层电子电离能相当,使得发生靶电离和入射离子损失电子的概率相当,从而导致靶电离和入射离子损失电子截面比大致相当.

在强扰动区,由图 3—图 10 实验数据可知  $R^{\text{direct}}$ ,  $R^{\text{capture}}$  和  $R^{\text{loss}}$  三者大致相当,反应道间的竞争

激烈,各过程之间的强弱对比因为碰撞系统的不同而略有差异.对此进行定量的理论理解较为困难,但是可以肯定,影响碰撞过程各反应道竞争强弱的因素主要是入射离子的能量和电荷态,这也是作用区间划分的基本依据.从图 3—图 10 我们还可以看到,电荷态在这个区域对截面比的调制作用强于能量的因素.一般而言,如果  $q$  很小(如  $C^+$ ,  $O^+$  和  $O^{2+}$ ),入射离子损失电子过程起主导作用;如果  $q$  稍大(如  $C^{2+}$ ,  $O^{3+}$  和  $O^{4+}$ ),则变为直接电离过程起主导作用.

### 3.2. 相同反应道的截面比比较

图 11—图 16 描述的是  $C^{q+}$  和  $O^{q+}$  ( $q = 1-4$ ) 与 He 原子碰撞中直接电离过程截面比  $R^{\text{direct}}$ 、电子俘获过程截面比  $R^{\text{capture}}$  和入射离子损失电子过程截面比  $R^{\text{loss}}$  与入射离子能量和电荷态的关系.

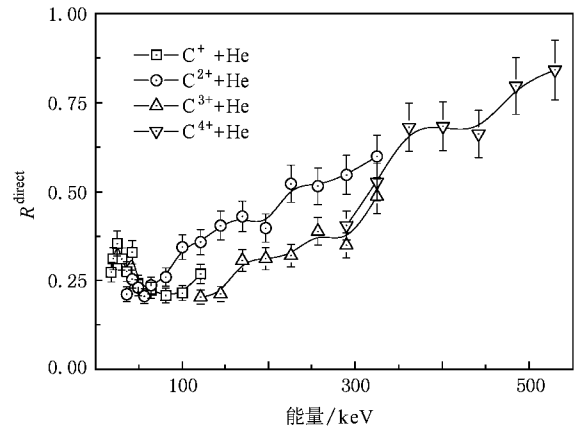


图 11  $C^{q+} + He$  ( $q = 1-4$ ) 碰撞过程中直接电离过程的截面比  $R^{\text{direct}}$  与入射离子能量和电荷态的关系

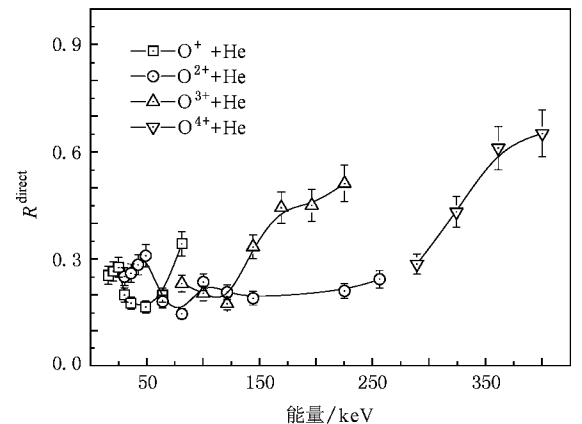


图 12  $O^{q+} + He$  ( $q = 1-4$ ) 碰撞过程中直接电离过程的截面比  $R^{\text{direct}}$  与入射离子能量和电荷态的关系

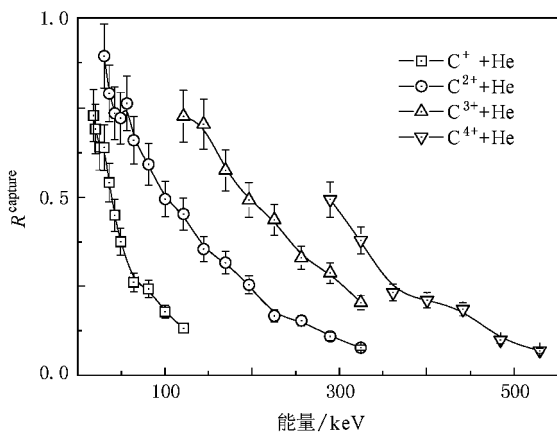


图 13  $C^{q+} + He$  ( $q=1-4$ ) 碰撞过程中电子俘获过程的截面比  $R_{capture}$  与入射离子能量和电荷态的关系

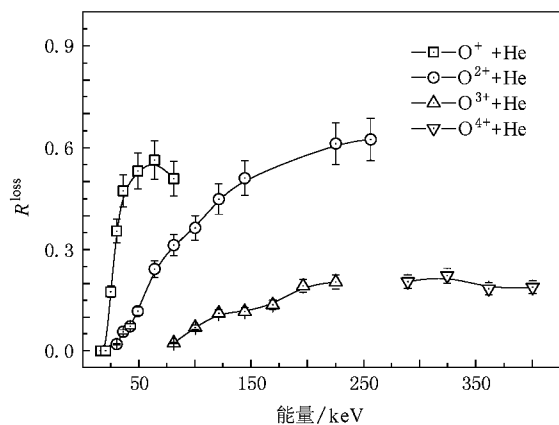


图 16  $O^{q+} + He$  ( $q=1-4$ ) 碰撞过程中入射离子损失电子过程的截面比  $R_{loss}$  与入射离子能量和电荷态的关系

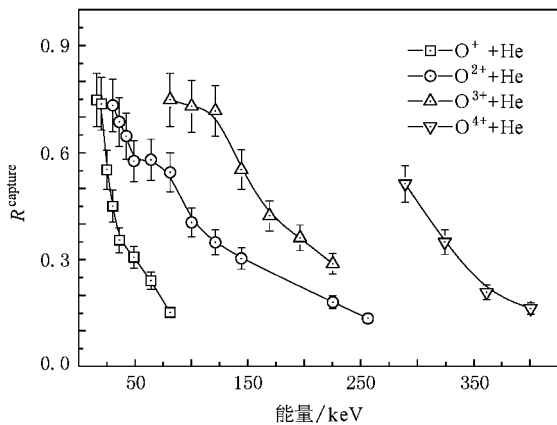


图 14  $O^{q+} + He$  ( $q=1-4$ ) 碰撞过程中电子俘获过程的截面比  $R_{capture}$  与入射离子能量和电荷态的关系

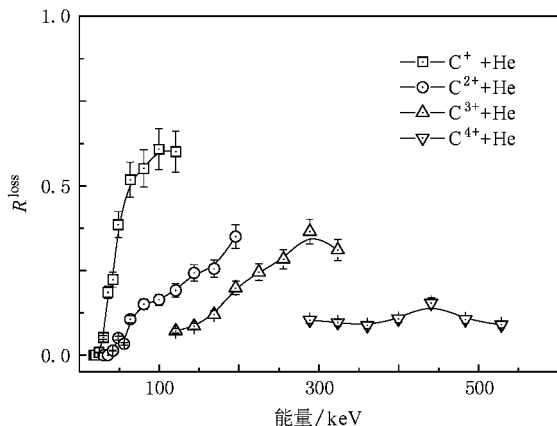


图 15  $C^{q+} + He$  ( $q=1-4$ ) 碰撞过程中入射离子损失电子过程的截面比  $R_{loss}$  与入射离子能量和电荷态的关系

$He$  ( $q=1-4$ ) 碰撞中直接电离过程的截面比  $R_{direct}$  随入射离子能量的增大而增大, 与入射离子的电荷态关系并不十分紧密, 特别是在低能端几乎与入射离子的电荷态无关. 在由低能区进入能量较高的强扰动区时, 入射离子损失电子过程由能量很低时不参与竞争到过阈后其截面逐渐增大, 直接电离绝对截面随能量的增大而增大, 俘获截面随入射离子能量的增大而减小, 以上三个反应道的共同作用使得直接电离截面比随入射离子能量的增大而增大. 从强扰动区到更高能区, 俘获截面的减少和本实验中这部分能区的电荷态增高导致入射离子损失电子截面减少使得直接电离截面比继续增加.

由图 13 和图 14 可以看出,  $C^{q+} + He$  和  $O^{q+} + He$  ( $q=1-4$ ) 碰撞中电子俘获过程截面比  $R_{capture}$  随入射离子能量的增大而下降.  $R_{capture}$  表现出与电荷态很强的依赖关系, 即在某一能量下, 入射离子的电荷态越高, 离子与原子碰撞过程中入射离子俘获电子过程的截面比  $R_{capture}$  越大. 由 Bohr 提出的描述电荷态与速度关系的参量  $\kappa$  进行分析, 图中在不同能区所表现出的相同趋势实际上都发生在  $\kappa$  的值大致相当时. 这说明, 对于电荷态不同的碰撞体系, 相同能量下入射离子电荷态越高的碰撞体系, 电子俘获截面比就越大.

由图 15 和图 16 可以看出,  $C^{q+} + He$  和  $O^{q+} + He$  ( $q=1-4$ ) 碰撞中入射离子损失电子过程的截面比  $R_{loss}$  随入射离子能量的增大存在一个极大值. 对于不同电荷态的入射离子,  $R_{loss}$  的极大值对应的能量有依次升高的趋势, 极大值所占的份额 (即截面比) 也在依次减少. 对于  $R_{loss}$  的极大值对应的能量依

由图 11 和图 12 可以看出,  $C^{q+} + He$  和  $O^{q+} +$

次升高,由此可知,碰撞中入射离子损失电子过程绝对截面的最大值出现在入射离子与靶的相对速度  $v_p$  和电子轨道速度  $v_e$  相当时<sup>[6,26]</sup>,但随着电荷态的增加,最外层电子的电离能增加,其轨道速度  $v_e$  也相应增加,所对应的  $v_p$  即能量也就依次升高.各个入射离子损失电子过程截面比的最大值随入射离子能量的增大而依次减小,是电离过程逐渐主导该能区的反应、入射离子损失电子过程的绝对截面随电荷态增加而减少以及俘获截面快速下降趋势共同决定的.

## 4. 结 论

本工作利用在兰州大学  $2 \times 1.7$  MV 串列加速器

高电荷态离子-原子碰撞实验平台,测量了 20—500 keV 的  $C^{q+}$  和  $O^{q+}$  ( $q = 1-4$ ) 离子与 He 原子碰撞的直接电离、入射离子俘获电子和入射离子损失电子截面与总截面的截面比  $R^{\text{direct}}$ ,  $R^{\text{capture}}$  和  $R^{\text{loss}}$ . 分别对相同电荷态入射离子的截面比和相同反应道的截面比进行了比较和定性分析,得到了强扰动区各个反应道的实验规律.依据 Bohr 提出的电荷态与能量关系的参数,我们从实验角度建议了更为细致的作用机制区间划分.通过截面比的研究,为理解 He 原子多反应道电离提供了一个较新的视角,也为下一步理论解释 He 原子碰撞电离积累了数据.

感谢陈子纯工程师、李兰亭工程师在  $2 \times 1.7$  MV 串列加速器运行及维护上给予的协助.

- [ 1 ] Stockl C, Boine-Frankenheim O, Geißel M, Roth M, Wetßler H, Seelig W, Iwase O, Spiller P, Bock R, Stüß W, Hoffmann D H H 1998 *Nucl. Instrum. Meth. A* **415** 558
- [ 2 ] Logan B G, Celata C M, Kwan J W, Lee E P, Leitner M, Seidl P A, Yu S S, Barnard J J, Friedman A, Meier W R, Davidson R C 2002 *Laser Part. Beams* **20** 369
- [ 3 ] Beyer H, Shevelko V P 1999 *Atomic Physics with Heavy Ions* (Berlin: Springer)
- [ 4 ] Cocke C L, Berenyi D, Hock G 1990 *Lecture Notes Phys.* **376** 253
- [ 5 ] Knudsen H, Andersen L H, Hvelplund P, Astner G, Cederquist H, Danared H, Liljeby H, Rensfelt K G 1984 *J. Phys. B* **17** 3545
- [ 6 ] Edwards A K, Wood R M, Ezell R L 1985 *Phys. Rev. A* **32** 1346
- [ 7 ] Shah M B, Gilbody H B 1985 *J. Phys. B* **18** 899
- [ 8 ] Bohr N 1948 *K. Danske Vidensk. Selsk. Mat.-Fys. Meddr.* **18** 8
- [ 9 ] Inokuti M 1971 *Rev. Mod. Phys.* **43** 297
- [ 10 ] Inokuti M 1978 *Rev. Mod. Phys.* **50** 23
- [ 11 ] Gillespie G H 1979 *Phys. Lett. A* **72** 329
- [ 12 ] Mittleman M H 1966 *Phys. Rev. Lett.* **16** 498
- [ 13 ] McGuire J H, Weaver L 1977 *Phys. Rev. A* **16** 41
- [ 14 ] McGuire J H 1982 *Phys. Rev. Lett.* **49** 1153
- [ 15 ] Gao Z M, Chen X M, Liu Z Y, Ding B W, Lu Y X, Fu H B, Liu Y W, Du J, Cui Y, Shao J X, Zhang H Q, Sun G Z 2007 *Acta. Phys. Sin.* **56** 2079 (in Chinese) [高志民、陈熙萌、刘兆远、丁宝卫、鲁彦霞、付宏斌、刘玉文、杜娟、崔莹、邵剑雄、张红强、孙光智 2007 物理学报 **56** 2079]
- [ 16 ] Shao J X, Chen X M, Ding B W 2007 *Phys. Rev. A* **75** 012701
- [ 17 ] Andersen L H, Hvelplund P, Knudsen H, Moller S P, Sorensen A H, Elsner K, Rensfelt K G, Uggerhoj E 1987 *Phys. Rev. A* **36** 3612
- [ 18 ] Wood R M, Edwards A K, Ezell R L 1986 *Phys. Rev. A* **34** 4415
- [ 19 ] Dubois R D, Toburen L H, Rudd M E 1984 *Phys. Rev. A* **29** 70
- [ 20 ] Montenegro E C, Wong K L, Wu W, Richard P, Ben-Itzhak I, Cocke C L, Moshhammer R, Giese J P, Wang Y D, Lin C D 1997 *Phys. Rev. A* **55** 2009
- [ 21 ] Wang J, McGuire J H, Burgdorfer J 1995 *Phys. Rev. A* **51** 4687
- [ 22 ] Forest J L, Tanis J A, Ferguson S M, Haar R P, Lifrieri K, Plano V L 1995 *Phys. Rev. A* **52** 350
- [ 23 ] Woiitke O, Zawadzky P A, Ferguson S M, Houck J H, Tanis J A 1998 *Phys. Rev. A* **57** 2692
- [ 24 ] McGuire J H, Salzborn E, Muller A 1987 *Phys. Rev. A* **35** 3265
- [ 25 ] McGuire J H 1982 *Phys. Rev. Lett.* **49** 1153
- [ 26 ] Zhou C L, Shao J X, Chen X M, Sun G Z, Zou X R 2008 *Chin. Phys. Lett.* **17** 1139
- [ 27 ] Haugen H K, Andersen L H, Hvelplund P, Knudsen H 1982 *Phys. Rev. A* **26** 1962
- [ 28 ] Cai X, Chen X M, Shen Z Y, Liu Z Y 1996 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **114** 208
- [ 29 ] Muller A, Groh W, Salzborn E 1983 *Phys. Rev. Lett.* **51** 107
- [ 30 ] Groh W, Schlachter A S, Muller A, Salzborn E 1982 *J. Phys. B* **15** L207

# An experimental investigation of the cross-section ratios in the collisions of partially stripped $C^{q+}$ , $O^{q+}$ ( $q = 1-4$ ) on helium atom at the strong-interaction region<sup>\*</sup>

Zhou Chun-Lin Shao Jian-Xiong Chen Xi-Meng<sup>†</sup> Gao Zhi-Min Wang Jun Sun Guang-Zhi  
Xi Fa-Yuan Chen Yi-Feng Chen Lin Ding Bao-Wei Wang Xin-An Lou Feng-Jun  
Xu Jun-Kui Qiu Xi-Yu Wang Fan Lü Ying

( School of Nuclear Science and Technology , Lanzhou University , Lanzhou 730000 , China )

( Received 3 July 2008 ; revised manuscript received 5 March 2009 )

## Abstract

We measured the cross-section ratios of helium induced by  $C^{q+}$  and  $O^{q+}$  ( $q = 1-4$ ) produced by the  $2 \times 1.7$  MV tandem accelerator of Lanzhou University in the energy range from 20 to 500 keV. We obtained the two-dimensional spectrum by employing coincidence method combined with the MPA-3 data acquisition system. Thus, we obtained the ratios of direct ionization, projectile capture electrons and projectile loss electrons to the total cross-section which are denoted by of  $R^{\text{direct}}$ ,  $R^{\text{capture}}$  and  $R^{\text{loss}}$  in this paper. A qualitative explanation of the competitive relation of the three reaction-channels and the empirical laws of the three reaction channels are separately presented.

**Keywords** : ion-atom collisions , cross-section ratios , competitive relation , strong-interaction region

**PACC** : 3450H , 3470 , 5220H

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 10775063 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : chenxm@lzu.edu.cn