

低能高电荷态离子 ($4 \leq q \leq 7$) 与 He 碰撞中 双俘获与转移电离的截面反转效应*

吕 瑛^{1)†} 陈熙萌¹⁾ 曹柱荣²⁾ 吴卫东²⁾

1) (兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000)

2) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2009 年 5 月 3 日收到; 2009 年 12 月 23 日收到修改稿)

基于入射离子双俘获后势能沉积与双电离靶离子势能的比值定义了势能参数 Ω , 研究了低能高电荷态离子 ($q = 4, 5, 6, 7$) 与 He 原子碰撞系统中双俘获和转移电离反应道的选择规律. 研究发现, 在 Ω 坐标下, 双俘获和转移电离存在截面反转效应, $\Omega < 1.0$ 时双俘获为双电子转移过程主反应道, $\Omega \geq 1.0$ 时转移电离成为双电子转移过程主反应道.

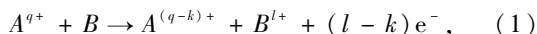
关键词: 离子-原子碰撞, 势能参数, 双俘获, 转移电离

PACC: 3470, 3450H, 8230F

1. 引 言

荷电粒子与原子分子碰撞是实验上揭示量子多体动力学、获取靶原子(分子)内部动力学和结构信息的重要手段. 相互作用势精确已知的静态体系可以由量子力学理论描述并达到非常高的精度, 理论和实验也符合非常好, 而原子分子体系的多体动力学研究依然是理论和实验上面临的挑战, 详细和深入地检验量子多体动力学在碰撞反应过程中随时间的演化规律需要更多、更详细的微分截面实验数据. 但是, 有关粒子与原子碰撞反应的微分截面数据, 特别是多重微分截面数据, 目前仍然极其缺乏^[1-4].

在荷电离子与原子的碰撞体系中, 入射离子 A^{q+} 与原子 B 的各种反应道可以统一表述如下:



其中 q 为入射离子的电荷数, k 为俘获的电子数, l 为靶原子失去的电子数, $(l-k)$ 为出射的电子数. 不同的反应道由末态散射离子电荷态、反冲离子电荷态和电子数确定. 由以上所述可知, 在 l 确定的情况下, 不同反应道的截面变化将直接体现靶原子出射电子的关联信息.

He 原子是最简单的多电子原子, 是研究电子-电子关联作用的理想体系. 有关 He 靶的研究主要集中在反应截面的直接测量方面^[5-9], 也可以通过俄歇谱的测量对散射离子能级结构进行研究^[10]. 但对于反应中同时有两个或两个以上电子出射或者多个电子处于激发态的情形, 实验很难提供出射电子之间的关联信息. 因此, 通过系统研究不同碰撞体系反应道的选择规律仍然是分析多个出射电子关联信息的一个重要途径.

本工作系统研究了 $q = 4, 5, 6, 7$ 的等电荷态离子序列与 He 原子碰撞的双电子转移过程, 给出了转移电离(TI)和双俘获(DC)在双电子转移过程中的相对截面, 在势能参数坐标下分析了不同碰撞体系反应道的选择规律.

2. 实验方法和结果

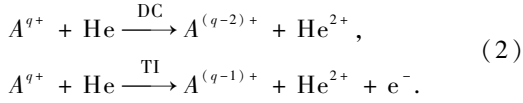
离子束与气体靶原子的碰撞实验是研究离子-原子碰撞的经典方法, 碰撞产生的反冲离子由电子倍增器探测, 散射离子由位置灵敏探测器探测, 通过符合测量得到两维关联密度谱. 由两维关联密度谱的位置信息可以甄别反应道, 并且由两维关联密度谱的密度信息可以给出反应道之间的截面

* 国家自然科学基金(批准号:10134010, 10375080, 10304019)资助的课题.

† E-mail: lvy07@lzu.cn

比^[11-13]. 本实验采用中国科学院近代物理研究所电子回旋共振离子源建立了 $C^{q+} + He$, $N^{q+} + He$, $O^{q+} + He$ 和 $Ne^{q+} + He$ 四种碰撞系统, 入射离子电荷态 q 分别为 4, 5, 6, 7.

根据(1)式, 低能高电荷态离子与 He 原子的双电子过程有两种反应道, 可分别表示为



由此可见, TI 过程是靶原子丢失两个电子, 其中一个被入射离子俘获, 另一个电子被发射 ($l=2$). DC 过程是靶原子两个电子全部被入射离子俘获 ($l=k=2$), 无电子发射. TI 和 DC 在双电子转移过程中的截面比 R_{TI} 和 R_{DC} 可分别表示为

$$\begin{aligned} R_{TI} &= \frac{\sigma_{TI}}{\sigma_{DC} + \sigma_{TI}} \\ &= \frac{N_{q-1}^2}{N_{q-2}^2 + N_{q-1}^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} R_{DC} &= \frac{\sigma_{DC}}{\sigma_{DC} + \sigma_{TI}} \\ &= \frac{N_{q-2}^2}{N_{q-2}^2 + N_{q-1}^2}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 σ_{TI} 和 σ_{DC} 分别是 TI 和 DC 过程的反应截面, N_{q-1}^2 和 N_{q-2}^2 分别是 TI 和 DC 过程的符合真计数. 实验得到的 TI 和 DC 在双电子转移过程中截面比 R_{TI} 和 R_{DC} 如表 1 所列, 截面比的实验误差主要来自统计误差^[14].

表 1 实验得到 TI 和 DC 过程的截面比 R_{TI} 和 R_{DC}

碰撞体系	R_{TI}	R_{DC}
$C^{4+} + He$	0.078095	0.921905
$N^{4+} + He$	0.032852	0.967148
$Ne^{4+} + He$	0.210526	0.789474
$C^{5+} + He$	0.902299	0.097701
$N^{5+} + He$	0.067073	0.932927
$O^{5+} + He$	0.236364	0.763636
$N^{6+} + He$	0.810811	0.189189
$O^{6+} + He$	0.366197	0.633803
$Ne^{6+} + He$	0.828947	0.171053
$O^{7+} + He$	0.974194	0.025806

3. 结果分析及讨论

3.1. 势能参数定义

低能离子-原子碰撞的基本特征是碰撞系统的

势能决定靶原子的进一步电离. 由于势能可以通过靶原子进一步电离进行耗散, Müller 等^[14]认为, 在低能离子-原子碰撞中, 作为一种近似, 靶原子得到的能量(势能)将分配给最外层的电子, 使最外层的某些电子“蒸发”, 由此可以定量计算靶原子电子进一步电离的概率. 影响靶原子电子蒸发的主要物理参量包括基于碰撞系统势能定义的最大沉积能量和平均电离能. 当碰撞反应为 TI 过程时, 入射离子多重俘获后的自电离衰变是主要的反应道. 因为 He 原子核外只有两个电子, TI 过程不能直接采用统计模型计算 TI 截面.

在离子与 He 的双电子转移过程研究中, 不妨以双电子集体转移来描述碰撞系统的势能沉积. 因为 He 原子核外只有两个电子, DC 形成的能量沉积在靶原子上没有新的分配对象, 因此碰撞系统在 DC 后的能量沉积将贡献给入射离子多重俘获后的自电离衰变. 所以, 碰撞系统可以分为两个过程描述. 第一个过程是电子“蒸发”和俘获, 形成的末态反应道主要是 DC. 第二个过程是入射离子 DC 后的自电离衰变, 这个过程主要决定于两种离子分离前的势能大小.

能量沉积的大小主要决定于入射离子的性质. 能量沉积最大值 ΔE_{2e} 可表示为

$$\Delta E_{2e} = I_A^{(q)} - (I_{He}^{(1)} + I_{He}^{(2)}), \quad (5)$$

其中 $I_A^{(q)}$ 为入射离子 A^{q+} 的第 q 级电离能, $I_{He}^{(1)}$ 和 $I_{He}^{(2)}$ 为 He 原子的第一级和第二级电离能, $I_{He}^{(1)}$ 和 $I_{He}^{(2)}$ 分别为 24.587 和 54.416 eV. 入射离子电离能可以查表获得^[15], 与本工作相关的碰撞体系的入射离子电离能如表 2 所列, 表中空缺部分为 C^{7+} , Kr^{4+} , Kr^{5+} 和 Kr^{6+} 四种离子, 其电离能与本工作无关, 故略去.

表 2 入射离子的电离能

碰撞体系	$I_A^{(4)}/eV$	$I_A^{(5)}/eV$	$I_A^{(6)}/eV$	$I_A^{(7)}/eV$
$C^{q+} + He$	64.492	392.077	489.981	
$N^{q+} + He$	77.472	97.888	552.057	667.029
$O^{q+} + He$	77.412	113.896	138.116	739.315
$Ne^{q+} + He$	97.110	126.210	157.930	207.270
$Ar^{q+} + He$	59.810	75.020	91.007	124.319
$Kr^{q+} + He$				111.000

由于双电子俘获后出现了以下两种离子: 俘获双电子后的入射离子和靶离子 He^{2+} . 它们对双电子的作用具有相同的机会, 而自电离衰变过程决定于

两种离子的势能大小. 因此, 定义入射离子 DC 后的能量沉积与靶离子势能之比为碰撞体系的势能参数 Ω . Ω 表示为

$$\Omega = \frac{\Delta E_{2e}}{I_{\text{He}}^{(1)} + I_{\text{He}}^{(2)}} = \frac{I_A^{(q)} - (I_{\text{He}}^{(1)} + I_{\text{He}}^{(2)})}{I_{\text{He}}^{(1)} + I_{\text{He}}^{(2)}}. \quad (6)$$

本工作研究的等电荷序列 ($q = 4, 5, 6, 7$) 离子与 He 原子碰撞体系的 Ω 值如图 1 所示, 图中横坐标为入射离子的原子序数 Z . 由图 1 可见: Ω 值在 $q = 4, 5, 6, 7$ 的四个序列里, 在 Z 相同的情况下, q 越大 Ω 越大; 在 q 相同的情况下, Z 越大 Ω 的变化趋势越小. 这说明 Ω 可以反映等电荷序列碰撞体系的碰撞反应能力.

3.2. 势能参数坐标下的 DC 和 TI 相对截面变化

图 2 为势能参数坐标下四个等电荷序列 R_{TI} 和 R_{DC} 的实验结果比较, 图中标注了碰撞系统的入射离子种类, 其中 $\text{Ar}^{4+} + \text{He}, \text{Ne}^{5+} + \text{He}, \text{Ar}^{5+} + \text{He}, \text{Ar}^{6+} + \text{He}, \text{Ne}^{7+} + \text{He}, \text{Ar}^{7+} + \text{He}$ 和 $\text{Kr}^{7+} + \text{He}$ 碰撞系统的 R_{TI} 和 R_{DC} 取自文献 [16].

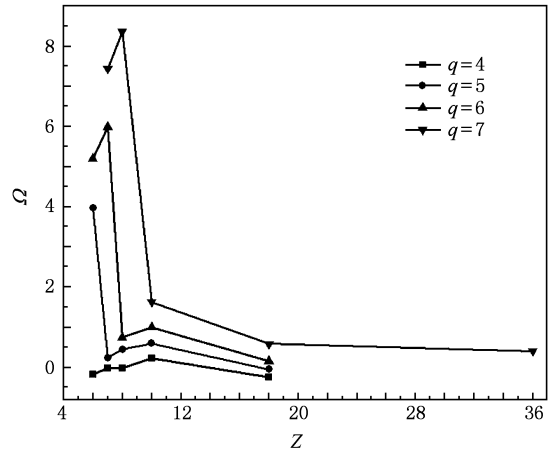


图 1 等电荷序列 ($q = 4, 5, 6, 7$) 离子与 He 原子碰撞体系的 Ω 与原子序数 Z 的关系

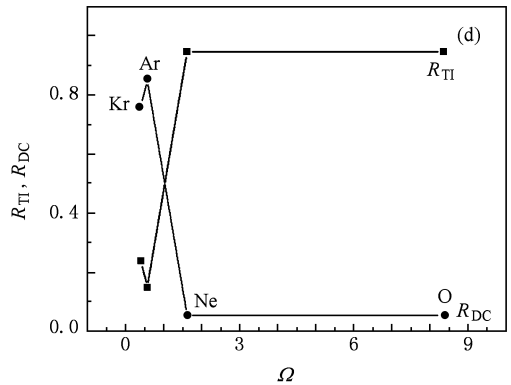
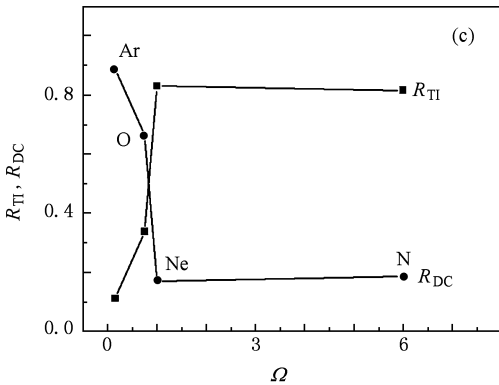
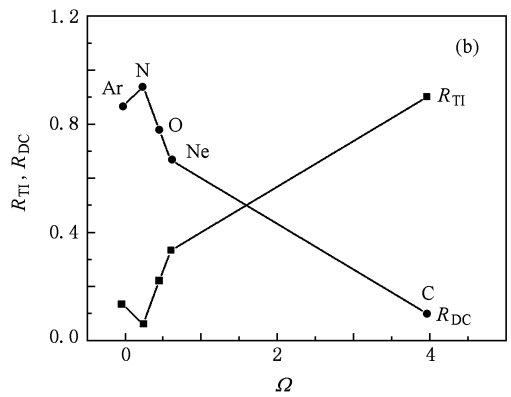
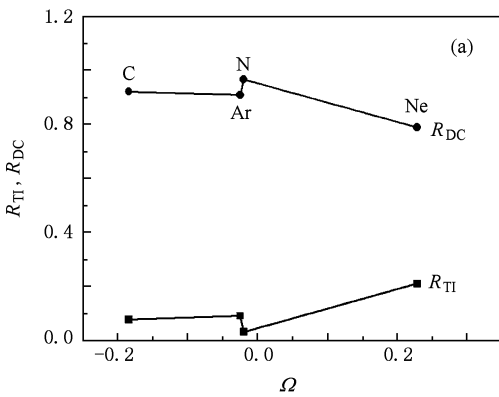


图 2 等电荷序列 ($q = 4, 5, 6, 7$) 离子与 He 原子碰撞体系的 R_{TI} 和 R_{DC} 在势能参数 Ω 下的变化 (a) $q = 4$, (b) $q = 5$, (c) $q = 6$, (d) $q = 7$

由图 2 可见,对于 $q = 4$ 序列,四个碰撞系统的 Ω 值都小于 1.0, $R_{\text{TI}} < R_{\text{DC}}$, DC 占绝对优势. 随着 Ω 值的增大, R_{TI} 与 R_{DC} 逐渐接近. 对于 $q = 5$ 序列, $\text{Ar}^{5+} + \text{He}$, $\text{N}^{5+} + \text{He}$, $\text{O}^{5+} + \text{He}$ 和 $\text{Ne}^{5+} + \text{He}$ 碰撞系统与 $q = 4$ 序列的四个碰撞系统发生的现象相同, 而 $\text{C}^{5+} + \text{He}$ 碰撞系统出现截面比反转现象, 即 $R_{\text{TI}} > R_{\text{DC}}$. 对于 $q = 6$ 序列, $\text{Ar}^{6+} + \text{He}$ 和 $\text{O}^{6+} + \text{He}$ 碰撞系统的 $R_{\text{TI}} < R_{\text{DC}}$, 而 $\text{Ne}^{6+} + \text{He}$ 和 $\text{N}^{6+} + \text{He}$ 的 $R_{\text{TI}} > R_{\text{DC}}$, 出现截面比反转的位置在 $\Omega = 1.0$ 处. 对于 $q = 7$ 序列, $\text{Kr}^{7+} + \text{He}$ 和 $\text{Ar}^{7+} + \text{He}$ 的 $R_{\text{TI}} < R_{\text{DC}}$, 而 $\text{Ne}^{7+} + \text{He}$ 和 $\text{O}^{7+} + \text{He}$ 的 $R_{\text{TI}} > R_{\text{DC}}$.

从以上比较可以看出,在势能参数坐标下,等电荷序列 R_{TI} 和 R_{DC} 变化趋势基本一致, $\Omega < 1.0$ 时, $R_{\text{TI}} < R_{\text{DC}}$, DC 占绝对优势, $\Omega \geq 1.0$ 时, 出现截面比反转现象, $R_{\text{TI}} > R_{\text{DC}}$, TI 占绝对优势. 图 2 结果显示, 截面比反转现象与电荷态大小的关系比较弱, R_{TI} 和 R_{DC} 的值主要由碰撞系统的势能参数 Ω 决定.

当不考虑入射离子电荷态的大小时,碰撞体系的截面比 R_{TI} 和 R_{DC} 随势能参数 Ω 的变化趋势如图 3 所示. 图 3 中的数据点全部来自图 2, 为了比较势能参数对碰撞系统截面比变化的总体效应, 图中不再标明每个数据点对应的碰撞体系. 由图 3 可见: 当 $\Omega < 1.0$ 时, $R_{\text{TI}} < R_{\text{DC}}$, DC 占绝对优势; 当 $\Omega \geq 1.0$ 时, 即从 $\text{Ne}^{6+} + \text{He}$ 碰撞系统开始出现 $R_{\text{TI}} > R_{\text{DC}}$ 的截面比反转现象, 即 TI 占绝对优势. 由此可见, Ω 决定了高电荷态离子与 He 碰撞系统双电子转移反应道的选择过程. DC 后的高电荷态离子与 He^{2+} 两种离子对“蒸发”掉的双电子作用机会相同, 但是作用势能不同. 两者作用势能的不同决定了不同的反应道截面比, 如果 DC 后高电荷态离子的势能小于 He^{2+} 的势能, 即 $\Omega < 1.0$, 则能量沉积主要完成电子“蒸发”过程并形成稳定的 DC, 此时反应道选择表现为 $R_{\text{TI}} < R_{\text{DC}}$, DC 在双电子转移过程中占绝对优势. 反之, 当 $\Omega \geq 1.0$ 时, 能量沉积开始能够满足第二个过程的完成, 反应将持续到入射离子俘获后的自电离衰变, 此时反应道表现为 $R_{\text{TI}} > R_{\text{DC}}$, TI 在双电子转移

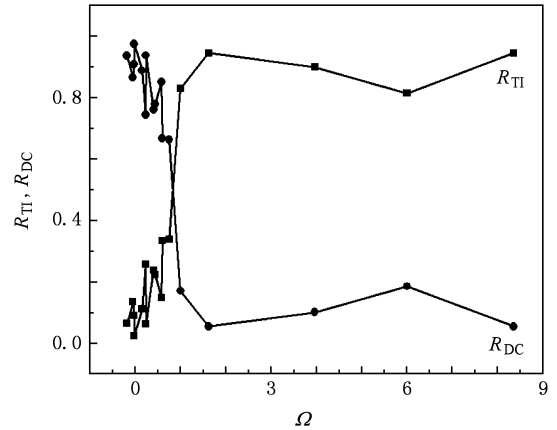


图 3 不考虑入射离子电荷态下的等电荷序列 ($q = 4, 5, 6, 7$) 离子与 He 原子碰撞体系的 R_{TI} 和 R_{DC} 在势能参数 Ω 下的变化

过程中占绝对优势.

4. 结 论

通过双电子转移的势能参数 Ω , 系统研究了低能高电荷态离子 ($q = 4, 5, 6, 7$) 与 He 碰撞的双电子转移反应道的选择规律. 结果表明, 在 Ω 坐标下, DC 反应道和 TI 反应道之间存在明显的竞争关系, 并且两个反应道的相对截面比在 $\Omega = 1.0$ 时出现反转效应, $\Omega < 1.0$ 时 DC 为主反应道, $\Omega \geq 1.0$ 时反应道的相对截面出现反转, TI 成为主反应道. 研究表明, TI 反应道是 DC 反应道的衰变过程, DC 完成后, 如果入射离子俘获双电子后剩余势能沉积大于 He^{2+} 的势能沉积, 其中一个电子将存在较大的二次电离概率, 否则 DC 就是一种稳定的反应道. 当然, 在更多电子参与的碰撞体系中 (如高电荷态离子与 Ar, Kr 或 Xe 等靶原子的碰撞体系), Ω 对反应道选择的影响有待进一步的实验研究和理论分析.

感谢中国科学院近代物理研究所蔡晓红教授和于得洋副研究员在实验方面给予的支持和帮助.

- [1] Rescigno T N, Baertschy M, Isaacs W A 1999 *Science* **286** 2474
 [2] McCurdy C W, Rescigno T N 2000 *Phys. Rev. A* **62** 32712
 [3] McGuire J H, Godunov A L, Tolmanov S G 2001 *Phys. Rev. A* **63** 052706
 [4] Cao S P, Ma X W, Dorn A, Dürr M, Ullrich J 2007 *Acta Phys.*

- Sin.* **56** 6386 (in Chinese) [曹士娉、马新文、Dorn A、Dürr M、Ullrich J 2007 物理学报 **56** 6386]
 [5] Andersson H, Astner G, Cederquist H 1988 *J. Phys. B* **21** L187
 [6] Iwai T, Kaneko Y, Kimura M 1984 *J. Phys. B* **17** L95
 [7] Tawara H, Iwai T, Kaneko Y 1985 *J. Phys. B* **18** 337

- [8] Mann R 1986 *Z. Phys.* D **3** 85
- [9] Selberg N, Biedermann C, Cederquist H 1997 *Phys. Rev. A* **56** 6
- [10] Flécharde X, Harel C, Jouin H 2001 *J. Phys.* B **34** 2759
- [11] Cai X H, Chen X M, Shen Z Y 1996 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **114** 208
- [12] Cai X H, Shen Z Y, Chen X M 1997 *Acta Phys. Sin.* **46** 6 (in Chinese) [蔡晓红、申自勇、陈熙萌 1997 物理学报 **46** 6]
- [13] Cao Z R, Cai X H, Yu D Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2943 (in Chinese) [曹柱荣、蔡晓红、于得洋 2004 物理学报 **53** 2943]
- [14] Müller A, Groh W, Salzborn E 1983 *Phys. Rev. Lett.* **51** 107
- [15] Xu K Z 2000 *Advanced Atomic and Molecular Physics* (Beijing: Science Press) (in Chinese) [徐克尊 2000 高等原子分子物理学 (北京:科学出版社)]
- [16] Justiniano E, Cocke C L, Gray T J 1984 *Phys. Rev. A* **29** 1088

Cross section inversion between double electron capture and transfer ionisation in low energy collision of highly charged ion ($4 \leq q \leq 7$) with He*

Lü Ying^{1)†} Chen Xi-Meng¹⁾ Cao Zhu-Rong²⁾ Wu Wei-Dong²⁾

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

2) (Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 3 May 2009; revised manuscript received 23 December 2009)

Abstract

Based on the potential parameter Ω , which was defined as energy deposits ratio of incidence ion with target ion after double electron capture, the selection rule between double electron capture and transfer ionization of helium target induced by A^{q+} ($q=4,5,6,7$) ions was studied. It is found that there is a cross point for the cross-section ratio curve of double electron capture and transfer ionization at $\Omega=1.0$, and for $\Omega < 1.0$ the double electron capture is a key reaction channel of double electron transfer, for $\Omega \geq 1.0$ the transfer ionization is a key reaction channel of double electron transfer.

Keywords: ion-atom collision, potential parameter, double electron capture, transfer ionization

PACC: 3470, 3450H, 8230F

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10134010, 10375080, 10304019).

† E-mail: lvy07@lzu.cn