C^{q+} (q=1-4)与 He, Ne, Ar 碰撞的 电子损失截面测量与研究*

 鲁彦霞[†] 谢安平 李小华 向 东 路兴强 李新霞 黄千红 (南华大学核科学技术学院,衡阳 421001)
 (2010年4月8日收到;2011年3月18日收到修改稿)

在中能区测量了 $C^{q+}(q=1-4)$ 与 He, Ne, Ar 气体原子碰撞的电子损失截面, 计算分析了入射离子损失两个电子与一个电子的总截面比 R_{21} . 单反应道分析无法完全解释所有实验结果, 必须同时考虑入射离子的电子损失、电子俘获和靶原子电离各种出射道间的耦合作用. 对于不同靶原子的碰撞, 入射离子损失一个电子和两个电子的速度阈值可以由屏蔽和反屏蔽理论解释. 然而, 该理论不能完全解释截面比 R_{21} 随入射离子速度变化的实验结果. 随着碰撞速度的提高, 靶的有效电荷增加, 碰撞参数趋小. 由 $C^{q+}(q=1-4)$ 与 Ne, Ar 靶原子碰撞的电子损失总截面比 R_{21} 随速度变化规律和幅度大致相同可以推测 Ne 与 Ar 靶原子的有效电荷相当, 而 He 靶原子的有效电荷比前两者小. 另外, 根据实验结果还分析了入射离子损失电子间的关联.

关键词:离子-原子碰撞,截面,电子损失 PACS: 34.50.Fa, 52.20.Hv

1. 引 言

由于中能区离子-原子碰撞过程出射道的耦合 作用,使得单一反应道的实验截面与理论值无法直 接对应.尤其在入射离子是非全裸的情况下,入射 离子的电子损失使得问题更加复杂化^[1].近年来, 对入射离子的电子损失截面的研究开展得越来越 多^[2-5].本文工作是离子-原子碰撞过程电离、俘 获、电子损失截面研究^[1,2,6,7]的继续.近年来,国内 已开展了高电荷态离子碰撞靶原子的电离和 X 射 线产生截面的研究^[8-10],这将有助于加深对离子-原子碰撞的各反应道产生机制的理解.

屏蔽和反屏蔽理论成功解释了入射离子单电子损失的机制,并得到了实验验证^[11].根据此理论,由入射离子损失两个电子与损失一个电子的截面比可以计算出靶原子在碰撞过程中的等效电荷. 在随散射离子和反冲离子电荷态分布的双微分谱上,由一价反冲离子下的入射离子损失两个电子与损失一个电子截面比的实验结果可以用来直接检验屏蔽和反屏蔽理论的正确性. 在此前的实验中,C,O离子与 He 原子碰撞过 程中,散射离子损失一个电子时二价靶离子与一价 靶离子的截面比的结果验证了屏蔽与反屏蔽理论 的适用性^[2].对入射离子的多电子损失,屏蔽与反 屏蔽理论是否适用需要进一步研究.根据此理论, 入射离子的单电子损失是由于反屏蔽(入射离子的 电子与靶原子的电子)库仑作用所致,而入射离子 的双电子损失是屏蔽(靶原子有效电荷与入射离 子)库仑作用所致^[3].因此,由入射离子损失两个电 子与损失一个电子的截面比的实验结果可以计算 得到靶原子的有效电荷,根据实验结果分析入射离 子损失多个电子的机制.

对于入射离子的多个电子损失, 靶原子的电子 及靶原子有效电荷都有贡献, 是屏蔽作用和反屏蔽 作用共同起作用的结果^[11-13].对于轻的靶原子, 已 经有较好的模型来描述它们的作用, 例如平面波玻 恩近似(PWBA)方法^[12,14].然而对于重的靶原子, PWBA 方法预言的屏蔽作用对总截面的贡献与实验 结果不一致.例如 Sant'Anna 等^[15]测量了入射离子 He⁺总的电子损失截面与靶原子核电荷 Z 的关系, 并且观察到对于 Z ≥ 10 时, 总的电子损失截面不再

^{*}国家重大基础研究前期专项基金(批准号:2002CCA00900)和南华大学博士科研启动基金(批准号:5-2007-XQD-001)资助的课题.

[†] E-mail: luyanxia_67@126.com

^{©2011} 中国物理学会 Chinese Physical Society

增加.这在一级近似计算下,反屏蔽作用对入射离子的电子损失是有贡献的,但屏蔽作用没有贡献. Sigaud 等^[16]随后也报道了相似的实验结果,他们用 1.0 MeV 的 He⁺入射原子和分子的气体靶,发现入 射离子损失电子总产额随着靶原子序数的增加而 趋于饱和.在处于激发态的高电荷态离子与中性靶 原子碰撞实验中也观察到了同样的饱和屏蔽作 用^[17-21].有一些理论试图解释这些实验结果,在某 些情况下也取得了部分成功^[17,18,21].Xu 等^[19]测量 了 Ca^{19+,18+}入射离子与气体靶原子碰撞过程中入射 离子 K 层电离和激发截面,分别用 Glauber 近似方 法和 PWBA 方法进行了计算比对,表明此能区许多 因素起作用,例如靶电子对靶核的屏蔽作用、极化 作用、结合能等影响因素.

利用一级微扰来处理非全裸离子与重的中性 靶原子碰撞过程中屏蔽作用对电子损失截面的贡 献是失败的,其原因在于小碰撞参数下靶原子的有 效电荷接近于靶原子序数.这意味着入射离子的内 层电子与被电子屏蔽的靶原子核的作用是非扰动 的^[22].另一方面,反屏蔽作用的贡献可以用扰动计 算方法来处理,因为它是由几个电子间的相互作用 引起的^[23].

屏蔽作用对总的电子损失截面的非扰动计算 可以用耦合道的方法, McGuire^[24]用 He⁺入射不同 的气体靶原子, 测量了入射离子电子损失截面与靶 原子核电荷的关系. Grande 等^[25]对 He⁺的实验数 据进行了计算研究. 尽管与一级近似计算相比有很 大的进步, 这些计算也只是部分成功. 这种模型仍 不能完全解释用重的靶原子所做的实验结果.

Voitkiv 等^[26]采用了瞬时接近的计算方法.计 算表明:靶原子的电离反应道对 He⁺电子损失过程 有着重要作用.然而,对于重的带有多个电子的入 射离子,不能采用这种繁琐的方法计算.

综上所述,在中高能区还没有成功的理论来描述入射离子损失多个电子的情况.为了探索入射离子损失多个电子的机制,我们采用靶原子电离和电子俘获耦合作用的方法,对不同靶原子碰撞时入射离子损失两个电子与损失一个电子的截面比进行研究.

2. 实验方法

本实验是在兰州大学 2×1.7 MV 串列加速器

上完成的.用静电偏转方法获得了散射离子谱,用 加速电场飞行时间方法获得了反冲离子谱,用符合 测量技术获得了不同价态散射离子和反冲离子的 符合谱^[1].

满足单次碰撞条件的离子-原子碰撞的反应式 如下:

 $A^{q^+} + B \rightarrow A^{q'^+} + B^{i^+} + (q' - q + i)e,$ (1) 式中A代表入射离子, B代表靶原子, q和q'分别为 入射离子碰撞前和碰撞后的电荷态, i 为碰撞后反 冲离子的电荷态, (q' - q + i)表示碰撞后入射离子 与靶原子丢失的净电子数.

对于某一特定的反应道(q,q',i),考虑到探测 效率和传输效率的影响,实验测量任一反应道的双 微分截面需要对所有散射离子进行积分,即由下式 计算:

$$\sigma_{qq'}^{i} = \frac{n_{q'}^{i} / \eta_{r}^{i}}{\left[\sum_{i} (I^{q'} / \eta_{p}^{q'})\right] NLT}, \qquad (2)$$

式中 $n_{q'}^{i}$ 为价态i的反冲离子与价态q'的散射离子的 符合计数; η_{r}^{i} 为+i价反冲离子的探测效率; $I^{q'}$ 为q'价态的散射离子束计数; $\eta_{p}^{q'}$ 为q'价散射离子的探测效 率,在实验能区各价态散射离子探测效率均为100%; N为单位体积内的气体靶原子数;L为碰撞区靶气体的 有效长度;T为反冲离子产生后能够到达探测器的传 输效率.实验测得了 $C^{q+}(q=1-4)$ 离子与He,Ne,Ar 气体原子碰撞过程随散射离子价态和反冲离子价态分 布的双微分谱,根据(2)式计算得到了微分截面.

3. 实验结果及分析

为了清楚地了解入射离子损失电子的机制,我 们研究了入射离子损失单个电子和两个电子的速 度阈值,结果列于表1.表1中的理论值是假定入射 离子与靶原子上的束缚电子单独作用,即独立电子 模型下计算得到的结果.计算方法是用类氢离子的 计算方法得到,其中有效电荷是根据基态时的逐级 电离能计算得到.

从表1中实验值与理论值比较可知,对于不同 靶原子碰撞,入射离子价态较低时损失电子的速度 阈值大致相当,实验的速度阈值较理论值稍高,这 是由于对于过低的散射离子计数无法测量到对应 的速度下限.然而,入射离子价态较高时实验值较 理论值偏高很多,除了上述原因外,还由于入射离 子俘获靶原子的电子反应道的影响,使得实验上的 C³⁺和C⁴⁺的1s电子较难失去,而C³⁺的2p电子较易失去,这是由于1s电子激发能的传递(俄歇机

制)和处于激发态使电离能降低与俘获道影响共同 作用的结果.

表1 入射离子 C^{q+} 损失电子的速度阈值的测量结果和理论结果(单位为玻尔速度)

q(损失电子数)	1(1)	1(2)	2(1)	2(2)	3(1)	3(2)	4(1)	4(2)
He	1.1	1.4	1.3	2.0	1.7	3.0	未测	未测
Ne	未测	未测	未测	1.3	未测	3.4	未测	未测
Ar	1.1	1.4	1.3	2.0	1.7	2.8	未测	3.8
理论值	0.91	1.34	1.34	1.88	1.88	2.18	2.18	2.85

从表1可以看出,用 He 原子和 Ar 原子实验得 到的速度阈值大致相同.这可以用屏蔽与反屏蔽理 论进行解释,即反屏蔽作用(电子-电子作用)使入 射离子和靶原子各丢失一个电子,接着在一价靶离 子作用下使入射离子丢失第二个电子(屏蔽作用). 因此,在此能区入射离子的电子损失是两步机制. 而与靶原子多重直接电离的两步机制不同的是,这 里的两个电子损失是反屏蔽作用加上直接电离作 用,而使入射离子直接电离的靶原子的有效电荷随 着速度的升高而增加,即碰撞参数小于入射离子与 靶原子的半径之和.

从表1还可以看出,C²⁺失去一个电子的速度 阈值比C⁺失去两个电子的速度阈值低.同样,C³⁺ 失去一个电子的速度阈值比C²⁺失去两个电子的速 度阈值低,且更加明显.这表明入射离子损失两个 电子之间存在关联,即失去的第一个电子的原始存 在"妨碍"了丢失第二个电子.这可以理解为:即使 在小碰撞参数下,入射离子最外面电子的损失概率 仍然小于1.这说明两步机制下入射离子损失两个 电子的反应道与其他反应道是耦合在一起的,如单 俘获道.当入射离子价态较高时,这种影响就更加 明显.

表1 中尽管只列出 Ne 碰撞的两个速度阈值,却 与 He 和 Ar 明显不同,不能由屏蔽和反屏蔽理论解 释,暗示着入射离子损失两个电子间的关联与靶原 子的结构有关. 对于 Ne 靶原子,C²⁺失去两个电子 的速度阈值明显低于 He 原子和 Ar 原子,而 C³⁺损 失两个电子的速度阈值却明显高于 He 原子和 Ar 原子. 对于 C³⁺损失两个电子的速度阈值,Ar 靶原 子稍高于 He 靶原子. 可能的原因是 C⁵⁺的单俘获 截面与 C²⁺损失两个电子以及 C³⁺失去两个电子的 反应道对于 Ne 靶原子在速度阈值附近是严重耦合 的,从而使得 Ne 靶原子实验中 C²⁺损失两个电子的 速度阈值降低、而 C³⁺失去两个电子的速度阈值 升高.

入射离子损失两个电子与损失一个电子的截 面比 R₂₁与入射离子速度的关系可以用分子库仑过 垒模型来定性解释. 入射离子速度越高,入射离子 与靶原子核的最小接近距离越小,核间库仑势垒越 低,将有更多的电子被分子化,故在此能区 R₂₁大致 随速度的增加而增加. 如果入射离子速度低于阈 值,则入射离子上的电子不能被分子化,所以只有 当入射速度超过阈值时才有可能使电子丢失,俄歇 电子的截面除了在阈值附近有所影响外基本可以 忽略.

根据实验结果,由(2)式可以计算得到 C⁴⁺(q=1--4)与 He,Ne,Ar 气体原子碰撞过程两个电子损失总截面与一个电子损失总截面之比为

$$R_{21} = \frac{\sum_{i} \sigma_{q+2}^{i}}{\sum_{i} \sigma_{q+1}^{i}} = \frac{\sum_{i} (n_{q+2}^{i}/\eta_{r}^{i})}{\sum_{i} (n_{q+1}^{i}/\eta_{r}^{i})}.$$
 (3)

不同价态的 C 离子与 He, Ne, Ar 靶原子作用的 损失两个电子与损失一个电子的截面比 *R*₂₁ 如图 1—图 3 所示, 图中横坐标以玻尔速度 *V*₀ 为单位.

从图 1—图 3 对比中可以看出,入射离子的双 单电子损失的总截面比 R₂₁呈现出复杂的现象,我们 需要从入射离子和靶原子的原子结构上来寻找规 律性.

对于相同靶原子碰撞的不同价态的入射离子, 电荷态越高, R₂₁的值越小.随着电荷态升高, 电离 能依次增大, 入射离子失去两个电子的截面更小, 因此,速度阈值随电荷态的升高而增加.

Ne 原子和 Ar 原子的实验曲线大致相同,可以 解释为仅最外层 8 个电子起作用;而 He 原子的曲 线幅度明显低于相同速度下的 Ne 原子和 Ar 原子



图 1 C^{q+}与 He 碰撞过程 C 离子损失两个电子与损失一个电子的总截面比 R₂₁与速度 V 的关系



图 2 C^{*q*+} 与 Ne 碰撞过程 C 离子损失两个电子与损失一个电子 的总截面比 *R*₂₁ 与速度 *V* 的关系



图 3 C^{q+} 与 Ar 碰撞过程 C 离子损失两个电子与损失一个电子 的总截面比 *R*₂₁ 与速度 *V* 的关系

的曲线幅度,这是由于 He 原子的有效电荷低,而 Ne 原子和 Ar 原子的有效电荷大致相当.随着速度的

提高,由于靶原子有效电荷的增加,对入射离子的 电子损失作用也随之增大,因而 R₂₁随着速度的升高 而增大.

随着速度升高,对于 He 靶原子已经出现极大 值点,可以预计随速度的进一步升高,对于不同靶 原子的入射离子双单电子损失总截面比 R₂₁都将出 现极大值.这说明,当达到一定速度后靶原子的等 效电荷将达到最大值,故 R₂₁不再增加,也就是靶原 子的有效电荷对入射离子损失电子的屏蔽作用达 到了饱和.由于原子的电离能依次增大,所以电荷 态越高的入射离子峰位出现得越晚(即对应速度越 高).当速度进一步升高至高能区时,可以预计 R₂₁ 将趋于平缓直至为常数,这是由于震离(shake off) 机制作用的结果^[6].

理论上,截面比 *R*₂₁应正比于 C^{(q+1)+} 与 C^{q+} 的 几何截面比,即

$$R_{21} \propto \frac{r_{q+2}^2}{r_{q+1}^2} = \left(\frac{E_{q+1}}{E_{q+2}}\right)^2,$$

其中 E 为相应电子正常组态下的逐级电离能. 一般 情况下,入射离子失去第二个电子的概率小于失去 第一个电子的概率,因此,可以粗略计算得到不同 价态下截面比 R_{21} 的极大值. 我们计算得到 q = 1-4的 C^{q+} 截面比 R_{21} 的峰值分别为 0.295, 0.484, 0.027, 0.640. 与图 1—图 3 的比对可知,理论值与 实验值相差甚远. 我们却意外发现

$$R_{21} \propto \frac{r_{q+2}^2}{r_{q+1}^2} \approx \left(\frac{5-q}{6-q}\right)^4$$

由此计算得到的 R₂₁的峰值分别为 0.410,0.316, 0.198,0.0625,与实验值较为符合.这似乎表明入 射离子损失电子是发生在主量子数为 6-q+1 的原 子态上,即入射离子的最外面两个电子是在被激发 到激发态上以后才被电离的.这意味着入射离子的 电子在损失前每个电子都占据一个主壳层.作者未 见文献有过类似的报道.如此高量子数的激发态和 多电子的共同激发需要进一步验证.为了验证屏蔽 和反屏蔽理论,我们选取 C^{q+}与 He 碰撞的散射离子 谱进行研究,入射离子失去两个电子的概率 P 如图 4 所示.

按照屏蔽和反屏蔽理论, 入射离子的单电子损 失主要是由于反屏蔽作用, 应有

$$R_{21} = \frac{\sigma_{\rm loss2}}{\sigma_{\rm loss1}} \propto \frac{P^{\rm s} P^{\rm 2nd}}{P^{\rm s}} = P^{\rm 2nd}$$

即图4中损失两个电子的概率 P 随速度 V 的变化

规律与图 1 应该一致. 这里 P^{*}为损失单个电子的概率, P^{2nd}为损失第二个电子的概率. 从图 1 与图 4 的对比可知, 两图中的相对应的曲线形状基本一致, 从而验证了理论的正确性.



图4 C^{q+}与 He 碰撞过程 C^{q+}损失两个电子的概率 P

- [1] Lu Y X, Chen X M, Ding B W, Fu H B, Cui Y, Shao J X, Zhang H Q, Gao Z M 2007 Acta Phys. Sin. 56 4461 (in Chinese)[鲁彦霞、陈熙萌、丁宝卫、付宏斌、崔 莹、邵剑 雄、张红强、高志民 2007 物理学报 56 4461]
- [2] Chen X M, Lu Y X, Ding B W, Liu Y W, Cui Y, Gao Z M, Fu H B, Du J, Shao J X 2007 Chin. Phys. 16 2384
- [3] Song M Y, Litsarev M S, Shevelko V P, Tawara H, Yoon J S 2009 Nucl. Instrum. Meth. B 267 2369
- [4] Dmitriev I S, Teplova Y A, Belkova Y A, Novikov N V, Fainberg Y A 2010 At. Data Nucl. Data Tab. 96 85
- [5] Voitkiv A B 2005 Nucl. Instrum. Meth. B 233 157
- [6] Chen X M, Lu Y X, Gao Z M, Cui Y, Liu Y W, Du J 2007 Nucl. Instrum. Meth. B 262 161
- [7] Lu Y X, Xiao D T, Yu T, Liu L J, Chen X M, Cui Y, Shao J X 2009 Nucl. Instrum. Meth. B 267 474
- [8] Song Z Y, Yang Z H, Shao J X, Cui Y, Zhang H Q, Yuan F F, Du J, Gao Z M, Yu D Y, Chen X M, Cai X H 2009 Chin. Phys. B 18 1443
- [9] Liu C L, He B, Yan J, Wang J G 2007 Acta Phys. Sin. 56 327 (in Chinese)[刘春雷、何 斌、颜 君、王建国 2007 物理 学报 56 327]
- [10] Shi Y L, Dong C Z, Zhang D H, Fu Y B 2008 Acta Phys. Sin.
 57 88 (in Chinese)[师应龙、董晨钟、张登红、符彦飙 2008 物理学报 57 88]
- [11] Montenegro E C, Sigaud G M, Meyerhof W E 1992 Phys. Rev. A 45 1575
- [12] Montenegro E C, Meyerhof W E, McGuire J H 1994 Adv. At. Mol. Opt. Phys. 34 249

4. 结 论

本文研究了中能区 C^{q+} 丢失电子的阈值速度和 C 离子与 He, Ne, Ar 原子碰撞过程中入射离子损失 两个电子与损失一个电子总截面比随入射离子速 度的变化规律.实验结果表明,随着速度的提高, 入 射离子开始损失电子, 在速度阈值附近其电子处于 基态, 而高于阈值速度后其电子可能处于激发态而 出射.截面比随着速度的升高而增大, 但有见顶回 落趋势.实验表明屏蔽与反屏蔽理论可以解释双电 子损失机制, 但不能给出随速度变化的规律.入射 离子的电子损失是两步作用机制, 反屏蔽作用(即 靶原子单电子作用)由 C^{q+}与 He 碰撞的实验结果得 以验证, 屏蔽作用即靶原子有效电荷的库仑作用没 有很好的理论能加以描述, 其原因在于不同碰撞速 度下靶原子的有效电荷不同.

- [13] McGuire J H, Stolterfoht N P, Simony R 1981 Phys. Rev. A 24 97
- [14] Bernard S, Elisabeth W R, Roger V R 1982 Nucl. Instrum. Meth. 194 437
- [15] Sant'Anna M M, Melo W S, Santos A C F, Sigaud G M, Montenegro E C 1995 Nucl. Instrum. Meth. B 99 46
- [16] Sigaud G M, Jora's F S, Santos A C F, Montenegro E C, Sant'Anna M M, Melo W S 1997 Nucl. Instrum. Meth. B 132 312
- [17] Brendle B, Gayet R, Rozet J P, Wohrer K 1985 Phys. Rev. Lett. 54 2007
- [18] Wohrer K, Chetioui A, Rozet J P, Jolly A, Fernandez F, Stephan C, Brendle B, Gayet R 1986 J. Phys. B 19 1997
- [19] Xu X Y, Montenegro E C, Anholt R, Danzmann K, Meyerhof W E, Schlachter A S, Rude B S, McDonald R J 1988 Phys. Rev. A 38 1848
- [20] Chung H K, Lee R W, Chen M H 2007 High Ener. Dens. Phys. 3 342
- [21] Chabot M, Wohrer K, Chetioui A, Rozet J P, Touati A, Vernhet D, Politis M F, Stephan C, Grandin J P, Macias A, Martin F, Riera A, Sanz J L, Gayet R 1994 J. Phys. B 27 111
- [22] Walters H R J 1975 J. Phys. B 8 54
- [23] Woitke O, Za'vodszky P A, Ferguson S M, Houck J H, Tanis J A 1998 Phys. Rev. A 57 2692
- [24] McGuire J H 1987 Phys. Rev. A 36 1114
- [25] Grande P L, Schiwietz G, Sigaud G M, Montenegro E C 1996 Phys. Rev. A 54 2983
- [26] Voitkiv A E, Sigaud G M, Montenegro E C 1999 Phys. Rev. A 59 2794

Cross sections of C^{q+} (q=1-4) electron loss in collision with He, Ne and Ar investigating^{*}

Lu Yan-Xia[†] Xie An-Ping Li Xiao-Hua Xiang Dong Lu Xing-Qiang

Li Xin-Xia Huang Qian-Hong

(School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China) (Received 8 April 2010; revised manuscript received 18 March 2011)

Abstract

Electron-loss cross sections in C^{q+} (q = 1-4) collisions with He, Ne, Ar are measured in the intermediate-velocity regime, and the ratio of the two-electron-loss cross section to the one-electrom-loss cross section, R_{21} , are calculated. It is shown that a single-channel analysis is not sufficient to explain the results, and that projectile electron loss, electron capture by the projectile, and target ionization must be considered together to interpreter the data. The screening and antiscreening theory can annalyse the threshold velocity, but cannot totally explain the data of R_{21} with velocity increasing. The effective charge of target increases with velocity increasing. Ne and Ar have the same effective charges in the velocity regime, but He has a smaller one at the same velocity. The correlation between loss electrons is also analyzed.

Keywords: ion-atom collision, cross section, electron loss **PACS**: 34.50. Fa, 52.20. Hv

^{*} Project supported by the Special Foundation for State Major Basic Research Program of China (Grant No. 2002CCA00900) and the Scientific Research Foundation for Doctor of University of South China (Grant No. 5-2007-XQD-001).

[†] E-mail: luyanxia_67@126.com