



He 与 C60 的碰撞及 He@C60 形成的计算机模拟研究

王泽辉¹, 朱靖², 潘正瑛³, 李之杰¹

1. 内蒙古民族大学物理与电子信息学院, 内蒙古通辽 028043

2. 普渡大学化学系, 印第安纳州 47907, 美国

3. 复旦大学现代物理研究所, 上海 200433

摘要 采用分子动力学方法, 利用 Brenner 势和库仑作用势描述原子间的相互作用, 模拟研究了 He 原子和 C60 分子碰撞以及生成 He 内生 C60 (即 He@C60) 的物理过程。通过改变 He 原子入射动能及 C60 不同位置入射的方法, 得到 He@C60 形成的能量阈值。分析了 He 原子的入射动能对 C60 的能量传递, 结果与实验符合较好。

关键词 分子动力学模拟; 内生 C60; 能量阈值

中图分类号 O411.3

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)03-0025-06

Computer Simulation of He and C60 Collisions and the Formation of He@C60

WANG Zehui¹, ZHU Jing², PAN Zhengying³, LI Zhijie¹

1. College of Physics and Electronics and Information, Inner Mongolia University for Nationalities, Tongliao 028043, Inner Mongolia Autonomous Region, China

2. Department of Chemistry, Purdue University, West Lafayette, Indiana 47907, USA

3. Institute of Modern Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China

Abstract Using the molecular dynamics method, describing the interaction between atoms with Brenner potential and Coulomb potential, the physical process of the collision between He and C60 and the formation of the He@C60 are simulated. By changing the incident energy of the He- E_{in} and the incident position of the C60, the energy threshold of the He@C60 is obtained. The analysis results of the energy transfer from the incident energy of the He to C60 agree with experimental data.

Keywords molecular dynamics simulation; endogenous C60; energy threshold

0 引言

C60 分子于 1985 年被发现^[1]后, 其作为新材料在超导、磁学、光学、催化、高分子、生物等诸多领域得到了广泛应用^[2]。

将其他原子放到 C60 中心的空位处, 便可以形成一种新的分子, 称为内生 C60 分子。制备内生 C60 分子的方法主要有电弧法^[3]、激光烧蚀法^[4]等。

Schwarz 在 1991 年提出, 可以用高能稀有气体原子直接撞击 C60 形成新的团簇^[5]。此后, He 掺杂内生 C60 (He@C60, 以下简称内生 C60) 在实验室中被制备出来^[6]。在实验上, 应用各类质谱仪分析可以检测到各类内生 C60^[7]。

徐志瑾等应用量子化学 EHMO/ASEDE 等方法研究了 He@C60^[8]。本文采用分子动力学 (Molecular Dynamics, MD) 模拟方法, 研究低温 (100 K) 状态下 He 原子碰撞 C60 分子时发生的情况; 分析当 He 以不同方位入射时发生反弹、穿透、被 C60 包裹在里面形成内生 C60 三种情况各自的能量阈值; 重点研究形成内生 C60 分子所需要的各种条件, 以及在形成内生 C60 的过程中 He 原子的入射动能、C60 分子的势能随时间变化的关系。

1 分子动力学方法和原子间作用势

MD 模拟体系的微观状态可以由组成体系的 N 个粒子的坐标和动量完全确定。在原子层次的模拟中, 原子为组成体系的基本粒子, 体系的 Hamilton (哈密尔顿函数) 为原子坐标和动量坐标的函数。如果认为体系中的粒子服从经典运动规

收稿日期: 2008-10-29

基金项目: 内蒙古自治区高等学校科学研究项目 (NJ04062)

作者简介: 王泽辉, 副教授, 研究方向为物理教学与计算物理, 电子信箱: zehuiwang@126.com; 李之杰 (通信作者), 教授, 研究方向为计算物理, 电子信箱: zhijie_li@fudan.edu.cn



律,那么体系的 Hamilton 就可进一步表示所有原子的动能 K 和原子间相互作用的总势能之和,电子对原子运动的平均效应在势能函数中反应。

1.1 原子间相互作用势

势能函数选取的好坏直接关系到 MD 模拟结果的正确与否。下面介绍本模拟过程采用的作用势。

1.1.1 C—C 相互作用势

C—C 之间的相互作用势分为短程作用势和长程作用势,作用距离分别为 0~0.2 nm 和 0.2~1.5 nm。由于 C60 分子中 C—C 键的短程作用势比长程作用势高出几个数量级,短程作用势起主导作用。为方便计算,在实际模拟计算中,忽略 C—C 之间的长程作用势,仅考虑短程作用势。

在 MD 模拟中,计算短程势通常采用 Brenner 半经验多体势,该作用势^[9-10]是在 Tersoff^[11]键序函数的基础上改进、发展而来的。体系的总势能 E^{C-C} ,表示为如下形式:

$$E^{C-C} = \frac{1}{2} \sum_i \sum_{j \neq i} [V_R(r_{ij}) - \bar{B}_{ij} V_A(r_{ij})] \quad (1)$$

式中, $V_A(r_{ij})$, $V_R(r_{ij})$ 分别是 i, j 两原子间两体相互作用的吸引势部分和排斥势部分,它们只与 i, j 原子间的距离 r_{ij} 有关。 $V_A(r_{ij})$, $V_R(r_{ij})$ 的表示式为

$$V_R(r_{ij}) = \frac{f_c(r_{ij}) \cdot D_{ij}^{(e)}}{(S_{ij}-1)e^{-\sqrt{2S_{ij}} \beta_{ij}(r_{ij}-R_{ij}^{(e)})}} \quad (2)$$

$$V_A(r_{ij}) = \frac{f_c(r_{ij}) \cdot D_{ij}^{(e)} \cdot S_{ij}}{(S_{ij}-1)e^{-\sqrt{2S_{ij}} \beta_{ij}(r_{ij}-R_{ij}^{(e)})}} \quad (3)$$

其中 $f_c(r_{ij})$ 为截断函数,其表达式为

$$f_c = \begin{cases} 1 & r < R_{ij}^{(1)} \\ \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left[\frac{\pi(r - R_{ij}^{(1)})}{(R_{ij}^{(2)} - R_{ij}^{(1)})} \right] \right] & R_{ij}^{(1)} \leq r \leq R_{ij}^{(2)} \\ 0 & r > R_{ij}^{(2)} \end{cases} \quad (4)$$

Brenner 势中最有特色的部分是式(1)中的键序函数 $\bar{B}_{ij}$,它反映了某两原子所成键与其所处环境(周围原子)的多体相互作用。 $\bar{B}_{ij}(r_{ij})$ 的形式为

$$\bar{B}_{ij} = \frac{(B_i + B_j)}{2} + F_{ij}(N_i^{(i)}, N_j^{(i)}, N_{ij}^{conj}) \quad (5)$$

式中, $F_{ij}(N_i^{(i)}, N_j^{(i)}, N_{ij}^{conj})$ 用于修正 C—C 原子间成键发生的非物理行为。

Brenner 势不但能够正确模拟金刚石、石墨的晶体结构,以及许多不同碳氢化合物分子中的共价键相互作用,而且能反映原子间共价键的形成、断裂的化学反应过程^[10]。

1.1.2 He—C 间相互作用势

在模拟过程中 He 的能量较高, C 与 He 之间主要是碰撞的两体相互作用,可以用库仑屏蔽势^[12]表示,库仑势 E^{A-C} 的表达式为

$$E^{A-C} = \sum_{j=1}^{60} \frac{Z_1 Z_2}{r_{Aj}} \chi \left(\frac{r_{Aj}}{a} \right) \quad (6)$$

式中, Z_1, Z_2 表示 2 个原子的核电荷数, e 为电子电量, r_{Aj} 为稀有气体原子和碳原子的距离, χ 为 Moliere 截断函数^[13], a 为截断长度。库仑势理论上是一个长程作用势。但在实际情况中,由于相距较远的 2 个原子间的库仑力作用很小,可以忽略不计,为节省模拟计算的步骤,可设定一个截断长度 a , 如果 2 个原子之间的相互距离大于 a , 就可不计其间的库仑作用。

1.2 计算模型

采用 Brenner 作用势模拟 C60 分子的稳定结构, 得到稳定 C60 分子中每个碳原子的平均结合能为 -7.043 6 eV, 与目前公认的 -7.01 eV 符合得很好。

在模拟过程中, 计算 C—C 间相互作用时, 忽略 C—C 间的长程作用, 仅考虑短程作用。用 Brenner 势计算 C—C 间近程作用, 其作用距离为 0~0.2 nm。对于 He 与 C 间相互作用, 用库仑屏蔽势计算, 计算时采用的屏蔽半径为 0.238 7 nm。

理论上, 该模型可以模拟 He 原子以任何角度和速度撞击 C60 的情况。下面选取了两种具有代表性的碰撞情况加以说明。图 1 给出的是一个 C60 分子在 xy 平面上的六边形面示意图, A 点表示六边形的中心, B 点是 A 点到 C 原子连线的中心。选择两种入射方式, 一种是 He 原子沿 A 点和 C60 质心的连线方向入射, 以下称对心碰撞; 另一种是 He 原子保持对心碰撞的入射方向不变, 瞄准 B 点入射, 以下称偏心碰撞。

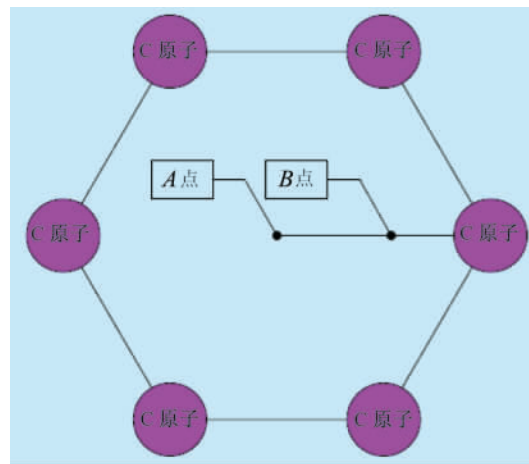


图 1 C60 中六边形面和 He 原子入射点位置(A, B)示意
Fig. 1 Schematic diagram of hexagon surface of C60 and He incident position (A, B)

两种碰撞的初始状态为, He 原子离 C60 分子质心所在的 xz 平面的距离都为 1.0 nm。图 2 是两种方案初始状态的 yz 方向的截面图。

He 原子入射动能变化范围为 5~50 eV。在碰撞进行的过程中, 根据各个原子的位置计算它们的相互作用势; 并利用相互作用势对作用距离的导数求出原子间的相互作用力; 再根据时间步长 Δt , 采用跳蛙法求出各个原子的速度和位移, 最后根据计算结果, 综合求出 C60 的动能、相互作用势能以及 He 原子动能等物理量随时间的变化关系。

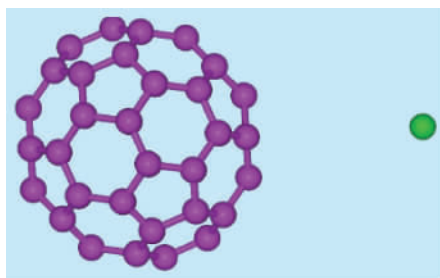


图2 He原子与C60碰撞前的初始状态
(绿色圆为He原子)

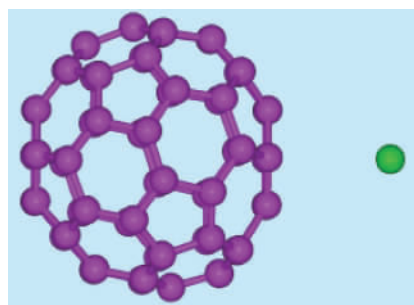
Fig. 2 Initial state before the collision of He and C60, where the green circle is He

2 模拟结果与讨论

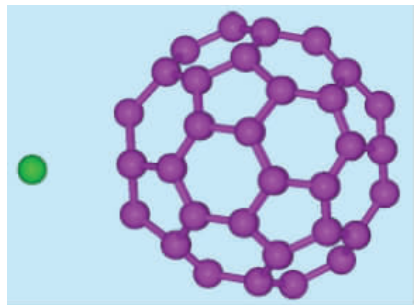
2.1 He粒子被反弹和穿越C60模拟

2.1.1 对心碰撞的反弹和穿越

选择He的入射能量为10 eV, He入射后, 经过约35 fs, He离C60质心最近, 此时He与C60六边形6个角上的原子形成共价化学键; 35 fs以后, He开始被C60反弹, 反弹后He的动能为6.53 eV。图3(a)是60 fs时He被C60反弹的快照。



(a) $E_n = 10$ eV, $t = 60$ fs



(b) $E_n = 16$ eV, $t = 80$ fs

图3 He原子被反弹(a)和He原子穿越C60分子
(b)的快照(A点, 绿色圆为He原子)

Fig. 3 Snapshot of He rebound (a) and penetration through C60 (b) (Site A, the green circle is He)

选择He的入射能量为16 eV时, He直接穿过C60。此过程中, He原子需要穿越2个六边形的中心, 在靠近每个六边形的过程中, He的动能减少; 过六边形中心后远离六边形的过程中, He的动能有所增加, 这是由于He—C化学键键能的变化所引起的。图3(b)是80 fs时, He穿越并远离C60的快照。

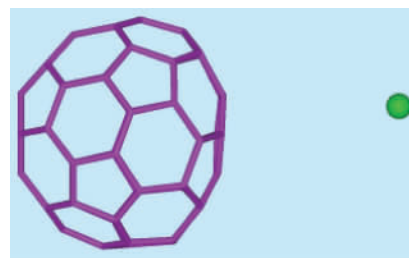
照。穿越后He的动能为8.12 eV。

对应上述2种不同的能量入射, 在与C60作用的时候均未破坏C60本身的化学键结构。

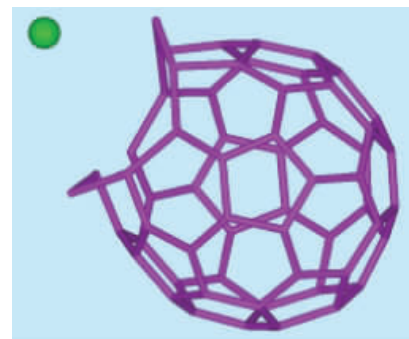
2.1.2 偏心碰撞的反弹和穿越

当He以15 eV入射时, 直接被C60分子反弹, 但在接近六边形时, 在He—C共价键的作用下, He原子先被拉到了六边形的中心, 然后再转弯离去, 其最终动能为8.04 eV。整个过程从侧面观察, He所走的路线类似于抛物线。图4(a)为60 fs时He被C60反弹的快照。

当以50 eV入射时, 当He穿越六边形后, 速度发生改变, 到达C60的另一端时正好撞在C—C化学键上, C—C化学键断裂, He原子速度方向瞬间再次发生改变, 然后从C—C键的裂口处飞出, 如图4(b)所示, 在经历足够长的时间后, 断裂的C—C化学键再次合上, C60分子恢复到原来的足球状态。此时He的最终动能为15.61 eV。



(a) $E_n = 15$ eV, $t = 60$ fs



(b) $E_n = 50$ eV, $t = 50$ fs

图4 He原子被反弹(a)和穿越C60分子(b)的快照
(B点, 绿色圆为He原子)

Fig. 4 Snapshot of He rebound (a) and penetration through C60 (b) (Site B, the green circle is He)

2.2 He@C60形成模拟

2.2.1 对心碰撞的内生C60

在对心碰撞中, 如果He原子的入射能量为12 eV, 那么它既不会被反弹, 也不会穿越C60, 而是被C60包罗在内。这是一种新的分子, 称为内生C60(即He@C60)。

图5给出的是对心碰撞过程中, He原子的入射能量为12 eV, 体系中原子位置在不同时刻的快照图, 它反映了由原子碰撞生成He@C60的动力学过程。

从图5(a)可以看出, 当He原子进入C60的六边形截面时, 由于He原子与C原子之间力的作用, 导致六边形的边长

增大,这一点比较图中 C60 分子前后两个面的六边形大小可以很明显地看出。同时,伴随着六边形边长的变大,C60 分子的势能也开始增大。

从图 5 (b),(c) 可知,在 He 进入到 C60 内部并生成 He@C60 后,He 并没有静止,而是基本沿着入射直线来回做振荡运动,它在 C60 分子中运动的轨迹如图 6 所示。

通过对模拟动画的观察和轨迹计算的分析可知,He 在来

回振荡时速度不断减小;同时 C60 的形状也开始发生变化,偏离了原来的足球形结构,出现了轻微的形变振荡。并且随着 He 速度的减小,C60 分子的形变振荡也变得越来越大。当 He 与 C60 分子的振荡频率达到相同,He 的动能便不再减少,达到稳定状态。此时,He 的动能稳定在 0.6 eV 左右。C60 分子的总动能在 3~9 eV 之间振荡摆动,60 个 C 原子之间相互作用势的总和的摆动幅度在 6 eV 左右。

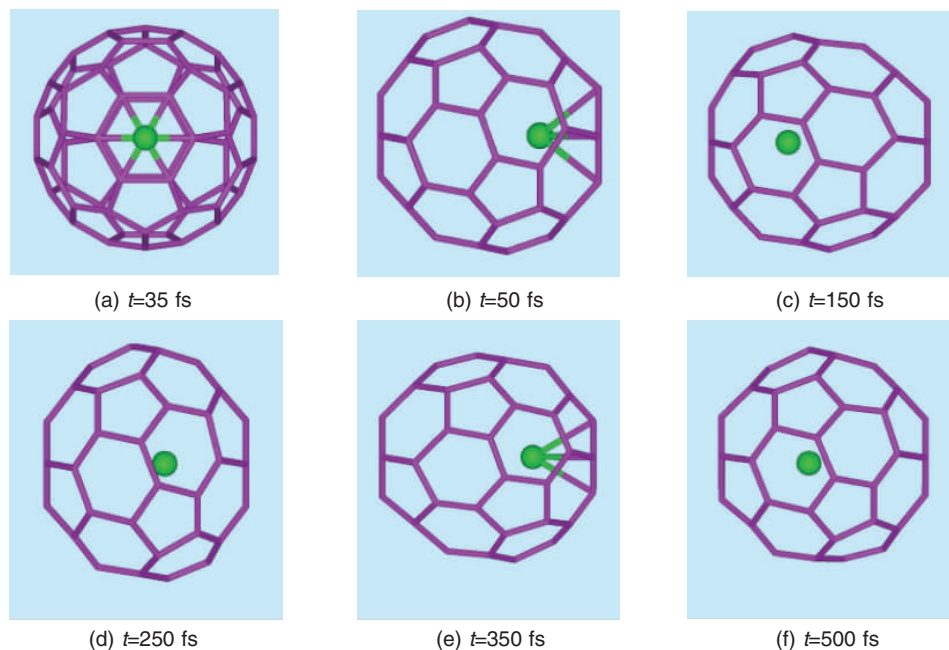


图 5 He@C60 形成过程中不同时刻的快照 ($E_{in}=12$ eV, A 点, 绿色圆为 He 原子)

Fig. 5 Snapshot of formation process of He@C60 at different times
($E_{in}=12$ eV, Site A, the green circle is He)

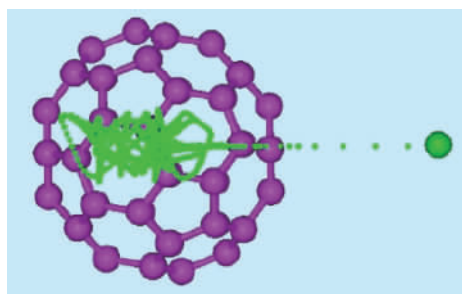


图 6 He 原子在 C60 分子中振荡运动的轨迹
($E_{in}=12$ eV, A 点, 绿色圆为 He 原子)

Fig. 6 Oscillating motion trajectory of He in C60
($E_{in}=12$ eV, Site A, the green circle is He)

从 He 原子开始入射到在 C60 内部达到稳定这段过程中,He 原子没有破坏 C60 本身的 C—C 化学键,这与前述的反弹和穿越结果保持一致。

2.2.2 偏心碰撞的内生 C60

当 He 以 30 eV 偏心碰撞入射,最终也形成 He@C60。图 7 给出了入射和形成内生 C60 过程中不同时刻的快照。

从图 7(a)可以看出,当 He 原子运动到 C60 六边形附近,

由于 He 与 C 之间的作用,导致六边形有形变,这与对心入射有些类似。只是在对心入射时,六边形的所有键同时被均匀拉长,而此种情况下六边形的化学键的变化既不同时也不均匀。另外,比起对心碰撞生成的 He@C60,该情况下生成 He@C60 需要较长时间的振荡才达到稳定。如图 7(b)~(c)所示,He 开始进入 C60 内部时,破坏了个别 C—C 键,但 C60 有保持最佳结构的趋势,很快又恢复到原来的结构。He 原子进入 C60 内部后,仍然具有较大动能,因此在与 C60 内壁发生碰撞时,每次都给 C60 带来较大形变,同时与周围的多个 C 原子形成键。但在经历多次碰撞以后,He 原子的动能渐渐减小,C60 分子的形变振荡也越来越剧烈。最终,He 碰撞 C60 的周期与 C60 的形变振荡周期达成一致,He@C60 分子达到稳定状态。

观察图 5(a)、图 7(a)可以看出,这两种情况下,在 He 原子入射进入 C60 的过程中,C60 前表面的六边形都出现了化学键伸长。当 He 与 C60 对心碰撞,He 原子自始至终没有破坏 C—C 化学键,因此生成的 He@C60 振荡并不很剧烈。而偏心碰撞比起对心碰撞形成的 He@C60 分子振荡要剧烈,因此在稳定性方面差一些。

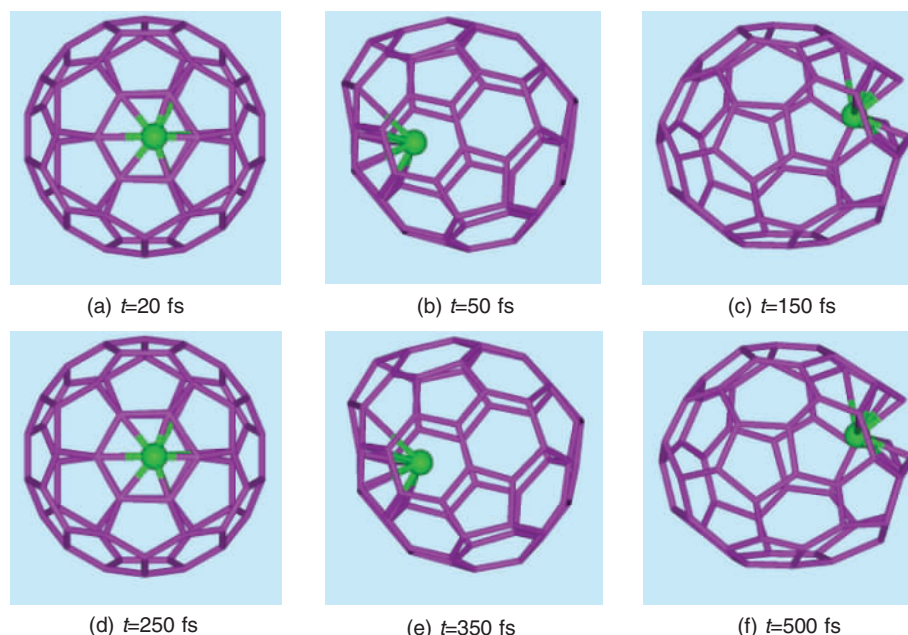


图 7 He@C60 形成过程中不同时刻的快照 ($E_{in}=30$ eV, B 点, 绿色圆为 He 原子)
Fig. 7 Snapshot of formation process of He@C60 at different times ($E_{in}=30$ eV, Site B, the green circle is He)

2.3 He@C60 能量阈值

对心碰撞, 本文采用 He 原子的入射能量分别为 5, 10, 11, 13, 15, 16, 20 eV。偏心碰撞, 采用 He 原子的入射能量分别为 15, 16, 18, 19, 20, 30, 40, 41, 42, 45, 50 eV。通过对大量模拟实验结果分析, 得到内生 C60 形成存在的能量阈值, 且不同入射情况下阈值有所区别。

两种入射方案下, He@C60 的入射能量阈值如表 1 所示。

表 1 对心和偏心碰撞过程能量阈值模拟结果

Table 1 Heart and eccentricity of the collision energy threshold process simulation results

He 原子入射能量		与 C60 作用的结果
对心碰撞	偏心碰撞	
≤ 11 eV	≤ 18 eV	He 原子被直接反弹
12~15 eV	19~41 eV	生成 He@e60
≥ 15 eV	≥ 42 eV	He 原子穿越 C60

比较对心和偏心碰撞可发现, 如果入射点越靠近六边形的边缘, 生成 He@C60 所需入射能量就越大, 但同时生成 He@C60 的能量范围也增大。

实验结果显示, 在低温下 He⁻对心入射到 C60 形成 He@C₆₀ 的能量域值范围为 (6 ± 2) eV^[14]。本模拟计算所得出的能量跨度为 (3 ± 1) eV, 在误差允许的范围内和实验符合的比较好。

2.4 He 原子动能与 C60 能量转化关系

图 8(a)表示的是 He 原子和 C60 分子的动能随时间的变化, He 原子以 30 eV 偏心入射。观察 He 原子的动能随时间的变化可以看出, 在 200 fs 以前, He 原子的动能经历了多次波动, 这是由于此时 He 原子的能量较大, 不断与 C60 的内部碰撞而造成的; 同时, 每次能量波峰的不断降低, 则说明每次碰撞 He 原子都要损失一部分动能, 转化为 C60 分子的动能和势能; 200 fs 以后, He 原子的动能的变化开始减少, 动能稳定

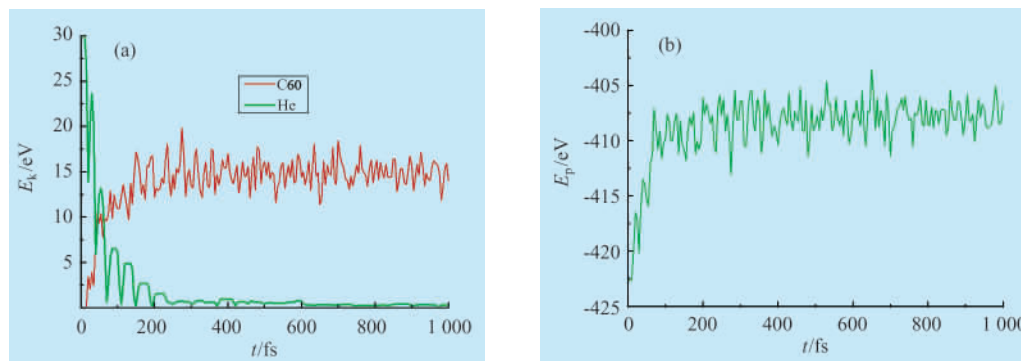


图 8 C60 分子、He 原子动能 (a) 和 C60 分子势能 (b) 随时间的变化 ($E_{in}=30$ eV, B 点)

Fig. 8 Kinetic energy of C60 and He (a), and the C60 potential (b) varying with time ($E_{in}=30$ eV, Site B)

在约 0.68 eV,大大小于原来的入射能量。图 8(a)中的绿线表示 C60 中各个原子的动能的总和,采用的速度是指各个原子的绝对速度,而不是质心系速度。可以看出,随着 He 原子能量的减少,C60 分子的动能在不断增大随着 He 原子的动能趋于稳定,C60 的动能的变化稳定在 (15 ± 2) eV。

图 8(b)是 C60 分子的势能随时间的变化。比较图 8(a)可知,随着 He 原子能量的减少,C60 分子的势能开始渐渐增大,由开始的 -421 eV 增大到稳定时的 -407 eV,增幅为 14 eV。势能相对增加幅度为 33%,变化比较小,C60 分子的本身结构保持得较为完好,因此可以形成比较稳定的 He@C60 分子。

3 结论

1) 通过 He 原子碰撞 C60,可以制备内生 C60,并存在 He@C60 的形成阈值,且不同入射情况下阈值有所区别。入射点越靠近六边形的边缘,生成 He@C60 的能量范围也增大。此结果与实验符合。

2) 在形成 He@C60 的过程,C—C 化学键有伸长、断裂和恢复等变化。He 原子与 C60 有能量交换,偏心碰撞过程振荡较剧烈。

3) 模拟体系中采用单个 He 原子入射,而通常是 He 离子。但没有根据温度的变化选择库仑截断势中的截断距离,这是产生一些细小误差的原因。

参考文献 (References)

- [1] Kroto H W, Heath J R, O'Brien S C, *et al.* C60: Buckminsterfullerene[J]. *Nature*, 1985, 318(6042): 162-163.
- [2] 韩旭,李疏芬. 富勒烯材料的催化作用研究进展 [J]. 化学进展, 2006, 18(6): 715-720.
Han Xu, Li Shufen. *Progress in Chemistry*, 2006, 18(6): 715-720.

- [3] Bethune D S, Johnson R D, Salem J R, *et al.* Atoms in carbon cages: The structure and properties of endohedral fullerenes [J]. *Nature*, 1993, 366: 123.
- [4] Chai Y, Guo T, Jin C, *et al.* Fullerenes with metals inside[J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1991, 95(20): 7564.
- [5] Weiske T, Bohme D K, Hrusak J, *et al.* Endohedral cluster compounds: Inclusion of helium within C60 and C70 through collision experiments[J]. *Angew Chem Int Ed Engl*, 1991, 30: 884.
- [6] Ross M M, Callahan J H. Formation and characterization of carbon mol-helium[J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1991, 95: 5720.
- [7] 任小元, 刘子阳, 孙学青, 等. 富勒烯及富勒烯衍生物的质谱研究进展 [J]. 质谱学报, 2004, 25(4): 242-248.
Ren Xiaoyuan, Liu Ziyang, Sun Xueqing, *et al.* *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2004, 25(4): 242-248.
- [8] 徐志瑾, 严继民. He+C60 $\rightleftharpoons$ (He@C60)的反应势垒研究[J]. 物理化学学报, 1995, 11(4): 346-350.
Xu Zhijin, Yan Jimin. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 1995, 11 (4): 346-350.
- [9] Brenner D W. Relationship between the embedded-atom method and tersoff potentials[J]. *Physical Review Letters*, 1989, 63: 1022.
- [10] Brenner D W. Empirical potential for hydrocarbons for use in simulating the chemical vapor deposition of diamond films [J]. *Physical Review B*, 1990, 42(15): 9458-9471.
- [11] Tersoff J. Empirical interatomic potential for carbon, with applications to amorphous carbon[J]. *Physical Review Letters*, 1988, 61: 2879.
- [12] Mowrey R C, Ross M M, Callahan J H. Molecular dynamics simulations and experimental studies of the formation of endohedral complexes of buckminsterfullerene [J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1992, 96: 4755.
- [13] Moliere G. Theorie der Streuung schneller geladener Teilchen I. Einzelstreuung am abgeschirmten Coulomb -Feld [J]. *Z Naturforsch*, 1947, 2a: 133.
- [14] Campbell E E B, Ehlich R, Hielscher A, *et al.* Collision energy dependence of He and Ne capture by C60*[J]. *Z Phys*, 1992, D23: 1.

(责任编辑 朱宇)

·学术动态·



“中华中医药学会周围血管病分会 第二届学术大会”征文通知

“中华中医药学会周围血管病分会第二届学术大会”拟于 2009 年 5 月在北京召开,会议由中华中医药学会主办,其周围血管病分会承办,首都医科大学附属北京中医医院和北京武警医院协办。

此次大会的征稿内容包括:中医治疗周围血管疾病的思路、策略;周围血管疾病领域的理论研究及文献整理;周围血管疾病领域中医诊治的规范化研究;周围血管疾病领域中医证候研究;皮肤血管疾病治疗经验与研究;常见动脉硬化性闭塞症、糖尿病下肢血管病变等坏疽的临床研究;周围血管疾病领域外治法研究;周围血管疾病领域诊治经验与教训举隅;周围血管疾病典型验案分析;周围血管疾病领域的中医护理经验与体会;周围血管疾病领域的中医科研思路与进展;周围血管疾病领域名老中医诊疗经验总结;周围血管疾病领域中西药物治疗的疗效分析;周围血管疾病手术指征经验与研究;周围血管疾病领域各种检查的诊断意义和方法研究。

截稿日期为 2009 年 2 月 28 日。

联系方式:北京市东城区美术馆后街 23 号首都医科大学附属北京中医医院外二科 (100010) 吕培文, 杨焕杰; 电话: 13661154124, 13651042564, 010-52176642; 电子信箱: zywk6642@sina.com。