

α -结团模型对超重核 α 衰变寿命的研究^{*}

许昌¹ 任中洲^{1, 2, 1)}

1 (南京大学物理系 南京 210008)

2 (兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

摘要 用 α -结团模型计算新合成超重元素的半衰期, 与已知的实验数据进行对比分析, 发现理论和实验数据能够很好地符合, 验证了 α -结团模型对超重核研究的有效性. 同时结合标准的形变 Hartree-Fock 模型核质量表给出半衰期理论计算结果, 可供以后在理论或实验上研究超重核参考, 在此基础上进一步分析超重核区域的 α 衰变能、双中子分离能和双质子分离能, 并讨论 $Z=114$ 和 $N=184$ 处是否存在壳效应.

关键词 超重元素 α -结团模型 半衰期 壳效应 衰变能

1 引言

近几年来, 在超重核领域, 随着现代大型加速器的建成和放射性核束实验的发展, 新的超重元素的合成取得显著的进展. 1995—1996 年, 德国 GSI 实验室的 Hofmann 等人在 Unilac 加速器上成功地合成质子数为 110—112 的新元素^[1-3]. 1999 年俄罗斯 Dubna 实验室在 U-400 重离子回旋加速器上合成 114 号新元素, 一年以后又合成 116 号新元素^[6-9]. 中国在超重元素领域也取得突破, 2000 年中科院近代物理研究所成功地合成超重新核素²³⁹Db^[10]. 这些人工合成的新元素和新核素大多是通过探测它们的 α 衰变产物鉴别的, 新的 α 衰变实验数据不仅可以检验和发展原有的 α 衰变理论及模型, 还将推进对核结构和原子结构的深入研究.

在研究 α 衰变的众多模型中, α -结团模型被广泛用于研究原子核内的 α 结团效应^[11-14], 并取得成功. Buck 等^[14]用 α -结团模型计算轻核和中重核的 α 衰变寿命, 理论结果和实验寿命非常接近, 这表明 α -结团模型对轻核和中重核是适用的. 本文采用文献[14]中的 α -结团模型, 建立我们自己计算 α 衰变寿

命的程序, 将理论计算的超重核寿命 ($Z=106-116$) 和实验数据对比分析, 证明用 α -结团模型来研究超重核是可行的. 另外, 我们还将研究超重核区域的壳效应, 有理论预言质子下一个满壳层是 $Z=114$, 中子下一个满壳层是 $N=184$, 但这些预言还有待于实验和理论上进一步验证. 我们结合文献[15]中标准的形变 Hartree-Fock 模型核质量表计算超重元素的 α 衰变能、双中子分离能和双质子分离能, 并从图形中研究和分析 $Z=114$ 和 $N=184$ 处的曲线变化. 将 α -结团模型与标准的形变 Hartree-Fock 模型数据结合起来, 可有助于可靠预言超重核性质.

2 理论框架

Buck 等提出的 α -结团模型把母核的基态看成有一个 α 粒子处于围绕子核的轨道上, 轨道由主量子数 $L+2n$ 描述, 其中 n 是轨道波函数的节点数, L 是轨道角动量, α 粒子相对子核的势^[14]

$$V(r) = V_N(r) + V_C(r) + \frac{\hbar^2}{2\mu} \left[\frac{L + \frac{1}{2}}{r^2} \right]^2, \quad (1)$$

2003-04-21 收稿

^{*} 国家杰出青年基金(10125521), 教育部博士点基金(20010284036), 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077400), 中国科学院创新工程重点项目(KJCX2-SW-N02)资助

1) E-mail: zren@nju.edu.cn

其中

$$V_N(r) = -V_0 \frac{1 + \cosh(R/a)}{\cosh(r/a) + \cosh(R/a)}, \quad (2)$$

$$V_C(r) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} \quad (r \geq R), \quad (3)$$

$$= \frac{Z_1 Z_2 e^2}{2R} \left[3 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (r \leq R).$$

在方程(1)中, 第一项是核势项(强作用势). 第二项是库仑势项, 把子核看成一个均匀带电的球体, 将 α 粒子看成一个带电质点. 第三项是 Langer 修正离心势项, 离心势做了修改, 为了保证 L 取值的连续性, 将离心势项中的 $L(L+1)$ 用 $\left[L + \frac{1}{2} \right]^2$ 作了替换. Z_1, Z_2 分别是子核和 α 粒子的电荷数, μ 是子核和 α 粒子的约化质量, V_0 是阱深, R 是原子核半径.

α -结团模型通过计算拟合发现固定阱深 V_0 , 让 α 衰变能决定 R 会获得良好效果. 如果对 R 作近似, 如取 $R = r_0 A^{\frac{1}{3}}$, 调整 V_0 则计算效果就不明显. 通过分析发现当中子壳层没有被填满时, R 的变化会比 $R = r_0 A^{\frac{1}{3}}$ 缓慢, 而当壳层填满时, R 的数值会有一个突然增加, 所以固定 V_0 , 对每个不同的衰变调整 R 是一个很好的选择. 每个具体的衰变通过对方程 $V(r) = Q$ 的数值求解, 可以得到 3 个经典转折点 r_1, r_2, r_3 . 半径参数 R 同时出现在 $V_N(r)$ 和 $V_C(r)$ 中, 利用玻尔-索莫菲量子化条件可以将 α 衰变能和半径 R 联系起来^[14]:

$$\int_{r_1}^{r_2} dr \sqrt{\frac{2\mu}{\hbar^2} [Q - V_N(r) - V_C(r)] - \left[L + \frac{1}{2} \right]^2 / r^2} = (2n+1) \frac{\pi}{2} = (G-L+1) \frac{\pi}{2}, \quad (4)$$

其中 r_1, r_2 分别是第一和第二转折点, Q 值是由 α 粒子实验测量的动能 E_α 求得, 并作了子核反冲修正和电子屏蔽修正:

$$Q = \left[\frac{A_p}{A_p - 4} \right] E_\alpha + (65.3 Z_p^{7.5} - 80.0 Z_p^{2.5}) \times 10^{-6} (\text{MeV}), \quad (5)$$

A_p 和 Z_p 分别是母核的质量数和电荷数, V_0 和 a 是常数, G 值的选取参考了谐振子势情形, G 值在中子壳层没有填满前保持常数, 壳层填满后 G 值会有一个突然的增加. 因此 G 值的选取考虑了中子壳层封闭现象, 通过计算优化后获得最终的一套参数^[14]:

$$V_0 = 162.3 \text{ MeV}, \quad a = 0.40 \text{ fm}, \quad (6)$$

G 取为:

$$\begin{aligned} G_1 &= 22 \quad N > 126, \\ G_2 &= 20 \quad 82 < N \leq 126, \\ G_3 &= 18 \quad N \leq 82, \end{aligned} \quad (7)$$

N 为母核中子数. 通过数值计算方法对方程(4)求根得到 R 的值, 然后将 R 代入半经典近似下的准束缚态衰变宽度公式中,

$$\Gamma = PF \frac{\hbar^2}{4\mu} \exp \left[-2 \int_{r_2}^{r_3} dr k(r) \right], \quad (8)$$

r_3 是第三转折点, P 是 α 粒子在母核内的形成几率. 对于偶偶核(P_{ee}), 假定母核内 α 粒子已经存在, 对于奇偶核(P_{oe})和奇奇核(P_{oo}), 必须考虑到奇核子的阻塞效应, 应取较小的 P 值, 所以奇偶核和奇奇核的 P 值分别下调^[14]:

$$P_{ee} = 1, \quad P_{oe} = 0.6, \quad P_{oo} = 0.35, \quad (9)$$

F 是修正因子, 由下面的表达式给出:

$$F \int_{r_1}^{r_2} dr \frac{1}{k(r)} \cos^2 \left[\int_{r_1}^r dr' k(r') - \frac{\pi}{4} \right] = 1, \quad (10)$$

上面积分式中余弦平方项可以用 $1/2$ 来代替而不会带来明显的精度损失, 因此又可以写成:

$$F \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{2k(r)} = 1, \quad (11)$$

$k(r)$ 是波数:

$$k(r) = \sqrt{\frac{2\mu}{\hbar^2} |Q - V(r)|}, \quad (12)$$

最后 α 衰变寿命可以用衰变宽度表示为

$$T_{1/2} = \hbar \ln 2 / \Gamma. \quad (13)$$

在 α -结团模型中, 将阱深 V_0 取为常数, R 的值由方程(4)定, 将 L 统一取值为 0. 我们根据 Buck 等人提出的 α -结团模型, 建立和发展了计算 α 衰变半衰期的程序, 用于对超重核 α 衰变寿命的计算^[14].

3 理论计算结果及分析

我们计算质子数从 106 到 116 新合成超重元素同位素链的半衰期, 分别使用实验 α 衰变能^[1-9, 16-19] 和由标准的形变 Hartree-Fock 模型核质量表计算的理论 α 衰变能, 给出两套理论寿命数据. 第一套理论数据($T_{1/2}(\text{cal})$)检验 α -结团模型对超重核区域半衰期计算的可靠性, 现在理论上还没有很好的模型可以精确地计算半衰期, 所以检验和发展 α -结团模型可以用于精确计算半衰期. 第二套理论

数据 ($T_{1/2}(\text{cal}_2)$) 可以为将来预言更多超重核寿命提供依据和参考. 毫无疑问, 用实验测量的 α 衰变能计算出来的第一套理论寿命数据比第二套数据更加接近半衰期实验值, 因为寿命对衰变能非常敏感, 1MeV 的差别可能导致半衰期相差几个数量级, 第二套理论数据 ($T_{1/2}(\text{cal}_2)$) 和实验值的误差也在一定的范围以内.

表 1 已知超重核的 α 衰变能和半衰期, 用 α -结团模型计算超重核 α 衰变理论半衰期

核素	$Q_\alpha(\text{exp.})$ MeV	$Q_\alpha(\text{cal.})$ MeV	$T_\alpha(\text{exp.})$	$T_\alpha(\text{cal}_1)$	$T_\alpha(\text{cal}_2)$ /s	δ_1	δ_2
$^{292}_{116}$	10.71 ± 0.15	10.69	$33 \begin{pmatrix} +155 \\ -15 \end{pmatrix} \text{ms}$	75ms	2.7×10^{-1}	2.27	8.2
$^{289}_{114}$	9.71 ± 0.02	9.61	30.4s	14s	9.2×10^1	0.46	3.0
$^{288}_{114}$	9.84 ± 0.05	9.74	$1.9 \begin{pmatrix} +3.3 \\ -0.8 \end{pmatrix} \text{s}$	3.5s	2.3×10^1	1.84	1.2×10^1
$^{287}_{114}$	10.29 ± 0.02	9.79	$5.5 \begin{pmatrix} +10 \\ -0.5 \end{pmatrix} \text{s}$	0.35s	2.7×10^1	0.06	4.9
$^{285}_{112}$	8.67 ± 0.02	9.48	15.4min	78min	4.6×10^1	5.09	5.0×10^{-2}
$^{284}_{112}$	9.17 ± 0.05	9.38	$9.8 \begin{pmatrix} +18 \\ -3.8 \end{pmatrix} \text{s}$	68s	5.5×10^1	6.84	5.6
$^{277}_{112}$	11.45(11.65)	11.51	$280(400) \mu\text{s}$	$140 \mu\text{s}$	3.1×10^{-4}	0.50	1.1
$^{272}_{111}$	10.82 ± 0.02	11.92	$1.5 \begin{pmatrix} +2.0 \\ -0.5 \end{pmatrix} \text{ms}$	3.2ms	3.7×10^{-5}	2.13	2.5×10^{-2}
$^{281}_{110}$	8.83 ± 0.02	8.62	1.6min	4.3min	4.8×10^3	2.71	5.0×10^1
$^{273}_{110}$	11.08(9.73)	11.64	0.11(170)ms	0.24ms	4.2×10^{-5}	2.18	3.8×10^{-1}
$^{271}_{110}$	10.75 ± 0.02	12.14	0.62ms	1.3ms	4.2×10^{-6}	2.10	6.8×10^{-3}
$^{270}_{110}$	11.03 ± 0.02	12.21	$100 \begin{pmatrix} +140 \\ -40 \end{pmatrix} \mu\text{s}$	$180 \mu\text{s}$	1.8×10^{-6}	1.80	1.8×10^{-2}
$^{269}_{110}$	11.13 ± 0.02	12.32	$270 \begin{pmatrix} +1300 \\ -120 \end{pmatrix} \mu\text{s}$	$180 \mu\text{s}$	1.9×10^{-6}	0.67	7.0×10^{-3}
^{268}Mt	10.10(10.24)	10.75	$70 \begin{pmatrix} +100 \\ -30 \end{pmatrix} \text{ms}$	43ms	3.4×10^{-3}	0.61	4.9×10^{-2}
^{269}Hs	9.17(9.23)	9.06	7.1(19.7)s	4.4s	3.3×10^1	0.62	4.6
^{267}Hs	9.88 ± 0.02	8.97	74ms	45ms	6.3×10^1	0.61	8.5×10^2
^{266}Hs	10.18 ± 0.02	9.02	$2.3 \begin{pmatrix} +1.3 \\ -0.6 \end{pmatrix} \text{ms}$	4.5ms	2.6×10^1	1.96	1.1×10^4
^{265}Hs	10.57 ± 0.02	9.38	$583 \mu\text{s}$	$840 \mu\text{s}$	3.6	1.44	6.2×10^3
^{264}Hs	10.59 ± 0.05	9.48	$0.54 \pm 0.30 \text{ms}$	0.45ms	1.1	0.83	2.0×10^3
^{267}Bh	8.83 ± 0.03	9.68	$17 \begin{pmatrix} +14 \\ -6 \end{pmatrix} \text{s}$	21s	2.4×10^{-1}	1.24	1.4×10^{-2}
^{266}Bh	9.29 ± 0.02	9.72	$\sim 1 \text{s}$	1.5s	3.1×10^{-1}	1.50	3.1×10^{-1}
^{264}Bh	9.48(9.62)	9.91	$0.44 \begin{pmatrix} +0.60 \\ -0.16 \end{pmatrix} \text{s}$	0.43s	9.6×10^{-2}	0.98	2.2×10^{-1}
^{266}Sg	8.66 ± 0.02	9.29	25.7s	19s	8.1×10^{-1}	0.74	3.2×10^{-2}
^{265}Sg	8.77 ± 0.02	9.33	24.1(7.4)s	14s	1.0	0.58	4.1×10^{-2}
^{263}Sg	9.26 ± 0.02	9.41	117ms	470ms	6.1×10^{-1}	4.02	5.2
^{261}Sg	9.58 ± 0.02	9.49	72ms	60ms	3.6×10^{-1}	0.83	5.0
^{260}Sg	9.93 ± 0.04	9.70	$3.8 \pm 0.8 \text{ms}$	7.2ms	9.5×10^{-2}	1.89	2.5×10^1

根据 α -结团模型计算了 27 个超重核素的半衰期, 表 1 中 $Q_\alpha(\text{exp.})$ 是实验 α 衰变能, 计算中对未修正的实验 α 衰变能做了子核反冲修正和电子屏蔽修正. $Q_\alpha(\text{cal.})$ 是用标准的形变 Hartree-Fock 模型核质量表计算的 α 衰变能理论值, $Q_\alpha(\text{cal.})$ 和实验值 $Q_\alpha(\text{exp.})$ 的误差都在 1.5MeV 之内. $T_\alpha(\text{exp.})$ 是实验的半衰期数据, $T_\alpha(\text{cal}_1)$ 是用 $Q_\alpha(\text{exp.})$ 计算得出的半衰期值, $T_\alpha(\text{cal}_2)$ 是用理论值 $Q_\alpha(\text{cal.})$ 计算得出的半衰期数据. δ_1 是 $T_\alpha(\text{cal}_1)$ 和 $T_\alpha(\text{exp.})$ 的比值, δ_2 是 $T_\alpha(\text{cal}_2)$ 和 $T_\alpha(\text{exp.})$ 的比值, δ_1 和 δ_2 反映理论值偏离实验值的幅度. 从 δ_1 值的分析中可以发现 $T_\alpha(\text{cal}_1)$ 和实验值 $T_\alpha(\text{exp.})$ 符合得非常好, 其中有 17 个数据的 δ_1 值在 $\frac{1}{2}$ —2 之间, 有 6 个数据的

δ_1 值在 $\frac{1}{3}$ —3 之间, δ_1 值在 $\frac{1}{5}$ —5 值之外只有 3 个(核素²⁸⁷114, ²⁸⁵112 和 ²⁸⁴112), 误差最大的 δ_1 值(核素²⁸⁷114)也只有 0.06, 即理论值相当于实验值的 1/16, 其余核素的半衰期理论值和实验值都在同一个数量级上, 并且大部分理论值和实验值的误差都在 2 倍以内. 因此 α -结团模型在超重核区域用于半衰期的计算是成功的, 有理由相信将来更加精确的实验数据会有助于进一步改进模型和参数. 用实验 α 衰变能计算出来的理论半衰期和实验半衰期非常好的符合, 也暗示着当前测量到的 α 衰变能和 α 衰变寿命自洽, 实验结果是可信的. 表中第二套理论半衰期 $T_\alpha(\text{cal}_2)$ 和实验值的误差稍大于第一组, 其中有 11 个数据的 δ_2 值在 $\frac{1}{10}$ —10 以内, 和实验值符合的比较好, 另外 16 个数据的 δ_2 值偏大或偏小, 但没有出现偏差特别大的情况, 作为半衰期的纯理论预测, 已经获得良好的计算结果. 因此可以结合 α -结团模型和标准的形变 Hartree-Fock 模型核质量表对目前尚未合成的新元素进行计算, 为实验或理论研究提供参考和帮助.

标准的形变 Hartree-Fock 模型核质量表系统地给出了原子核的质量数据, 我们计算了质子数为 94—120 的超重核同位素链的 α 衰变能、双中子和双质子分离能, 并作图分析和研究 $Z=114$ 和 $N=184$ 附近是否存在壳效应.

为了避免曲线的重叠, 将理论 α 衰变能分成两组, 考虑到对能效应的影响, 只计算偶偶核的 α 衰变能和双中子分离能, 并且将双中子分离能曲线之间间距加大. 从图 1(a) 和 (b) 偶偶核 α 衰变能中可以

看出在中子数为 184 时, 质子数为 94, 96, 98, 100 和 102 的同位素链上可以清晰地观察到壳效应, 说明 $N=184$ 是一个幻数, 但当质子数逐渐变大时 ($Z=104$ —120), 这种现象渐渐不明显, 最后趋于消失.

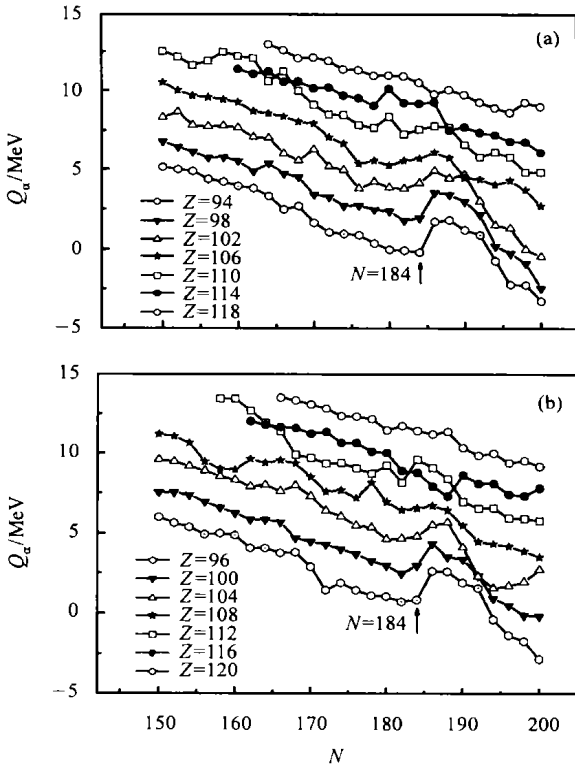


图 1 理论偶偶核衰变能

另外, 从图 2 偶偶核双中子分离能中 ($Z=98, 102, 108, 114, 120$) 也看到上述类似的现象, 其中以 $Z=98$ 在 $N=184$ 处壳效应最为明显, 而 $Z=102, 108, 114, 120$ 时在 $N=184$ 处壳效应基本上消失. 在图 3 的双质子分离能中 ($N=162, 172, 184, 190$ 的同中子链), 我们关心的 $Z=114$ 处没有发现很明显的曲线变化情况, 这似乎暗示了 $Z=114$ 不是一个幻数, 但是还有待于实验上的进一步验证.

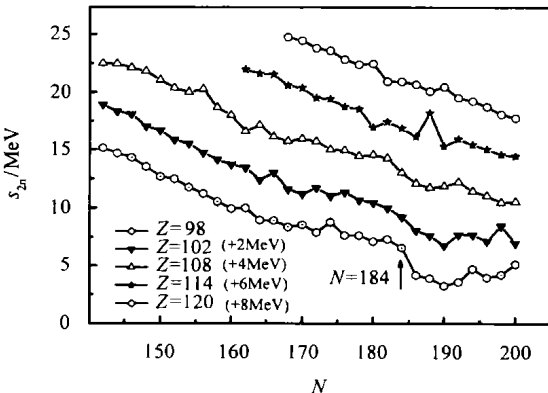


图 2 理论偶偶核双中子分离能

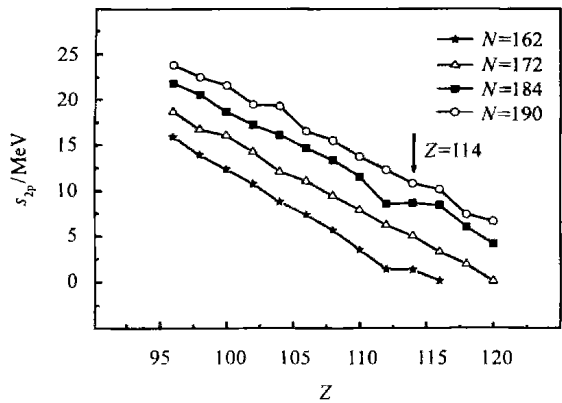


图 3 理论双质子分离能

4 结论

用 α -结团模型计算了近年来人工合成的超重新

核素的半衰期,得到了两组理论半衰期,第一组根据实验的 α 衰变能计算的寿命与实验寿命非常符合,从而肯定 α -结团模型对超重元素寿命的研究是可靠的.这也表明当前的实验 α 衰变能和实验 α 衰变寿命自洽,从而暗示当前关于新元素 $Z=110-112$, $Z=114$ 和 $Z=116$ 的实验结果是可靠的.第二组采用标准的形变 Hartree-Fock 模型核质量表数据,给出纯理论的半衰期,也与实验基本符合.本文还给出已经合成和尚未合成的超重核的 α 衰变能、双中子分离能和双质子分离能.发现对 $Z \leq 102$, 中子数 $N=184$ 是一个幻数,而对超重元素($Z \geq 104$) $N=184$ 不再是幻数,壳效应消失.本文将标准的形变 Hartree-Fock 模型核质量表数据和 α -结团模型结合起来,也有助于将来可靠预言 α 衰变寿命.

参考文献 (References)

1 Hofmann S et al. Z. Phys., 1995, **A350**: 277

2 Hofmann S et al. Z. Phys., 1995, **A350**: 281

3 Hofmann et al. Z. Phys., 1996, **A354**: 229

4 Hofmann S et al. Euro. Phys. J., 2001, **A10**: 5

5 Hofmann S. Rep. Prog. Phys., 1998, **61**: 639

6 Oganessian Yu Ts et al. Nature, 1999, **400**: 242

7 Oganessian Yu Ts et al. Phys. Rev., Lett., 1999, **83**: 3154

8 Oganessian Yu Ts et al. Phys. Rev., 2001, **C63**: 011301(R)

9 Oganessian Yu Ts et al. Phys. Rev., 2000, **C62**: 041604(R)

10 GAN Z G, QIN Z, FAN H M et al. Eur. Phys. J., 2001, **A10**: 21

11 REN Zhong-Zhou, XU Gong-Ou. Phys. Rev., 1987, **C36**: 456

12 REN Zhong-Zhou, XU Gong-Ou. Phys. Rev., 1988, **C38**: 1078

13 REN Zhong-Zhou, XU Gong-Ou. J. Phys., 1989, **G15**: 465

14 Buck B, Merchant A C. Atomic Data and Nuclear Data Table., 1993, **54**: 53

15 Goriely S, Tondeur F, Pearson J M. Atomic Data and Nuclear Data Table, 2001, **77**: 311

16 Dillmann Ch E et al. Nature., 2002, **V418**: 859

17 Wilk P A et al. Phys. Rev. Lett., 2000, **85**: 2697

18 Audi G et al. Nucl. Phys., 1997, **A624**: 1

19 Audi G, Wapstra. Nucl. Phys., 1993, **A565**: 1

Study on the α -Decay Lifetimes of Superheavy Elements^{*}

XU Chang¹ REN Zhong-Zhou^{1,2; 1)}

1 (Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210008, China)

2 (Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy-Ion Accelerator, Lanzhou 730000, China)

Abstract The α -decay lifetimes of the newly synthesized superheavy elements are calculated using the α -cluster model and the results are in good agreement with experimental data. This indicates the reliability of the α -cluster model. The theoretical lifetimes based on the Hartree-Fock nuclear mass table are also calculated, which are useful for further theoretical and experimental researches on superheavy nuclei. We have also analyzed the α -decay energies, the separation energies of the last two neutrons and the separation energies of the last two protons of the superheavy nuclei. The shell effect at $Z=114$ and $N=184$ is discussed.

Key words superheavy element, α -cluster model, half-lifetime, shell effect, α -decay energy

Received 21 April 2003

^{*}Supported by National Natural Science Found for Outstanding Young Scientists of China (10125521), the Fund of the Education Ministry (20010284036), Major State Basic Research Development in China (G2000077400), Chinese Academy of Sciences Knowledge Innovation Project (KJ9X2-SW-N02)

1) E-mail: zren@nju.edu.cn