

# 宏观-微观模型对奇-偶超重核基态性质的系统研究\*

支启军<sup>1;1)</sup> 任中洲<sup>1,2</sup>

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** 用宏观-微观模型系统计算了  $Z=95-113$  奇-偶超重核的基态性质. 理论计算的结合能、 $\alpha$  衰变能与已知的实验数据符合较好, 也与相对论平均场的计算结果符合很好, 这进一步肯定了宏观-微观模型对超重核研究的可靠性. 理论计算表明形变对超重核的性质起重要作用. 同时, 对一些未知核素基态性质的预言可为将来的实验研究提供理论参考.

**关键词** 宏观-微观模型 结合能  $\alpha$  衰变能 相对论平均场

## 1 引言

寻找新核素一直是核物理中重要的课题. 近20年来, 随着加速器的发展及实验技术的推进, 对超重核的合成取得了很大的进展. 利用热融合技术和冷融合技术, 人们已经合成了118号元素以下的元素(117号元素除外)及相应核素的部分同位素<sup>[1-10]</sup>. 这些新合成的超重核素以及相应的实验数据为检验各种理论模型在超重核区域的有效性和可靠性提供了大量的依据, 必将大大推动超重核理论的发展. 另一方面, 随着世界各国对超重核合成实验研究的开展, 相关的理论计算和超重核性质的理论预言对于超重核实验的开展越发显得重要.

理论计算对于超重元素的实验研究及合成具有重要的意义<sup>[11-20]</sup>. 我们已经成功地用相对论平均场对超重核的基态性质进行了系统的研究<sup>[11-13]</sup>. 作为一种自洽的核模型, 相对论平均场较好地给出了原子核基态的各种性质. 除了相对论平均场外, 宏观-微观模型也被用来研究原子核的性质<sup>[16-20]</sup>, Möller等人用它系统地计算了原子核的基态及激发态性质<sup>[19]</sup>. 在文献[16]中用宏观-微观模型系统地研究了偶偶超重核的基态性质, 结果表明宏观-微观模型能给出比较精

确的原子核基态的性质, 用宏观-微观模型来研究偶偶超重核的性质是有效的和可靠的. 为了进一步检验宏观-微观模型对超重核研究的可靠性以及计算的系统性, 本文将对  $Z=95-113$  奇-偶超重核的基态性质进行系统的计算.

## 2 理论计算简介

由于在文献[16]中详细讨论了有关宏观-微观模型的计算细节, 因此, 在这里只给出一些简要的介绍. 在宏观-微观模型中, 原子核的能量由宏观部分和微观部分共同组成:

$$E_{\text{tot}} = E_{\text{mac}}(Z, N, \bar{\epsilon}) + E_{\text{mic}}(Z, N, \bar{\epsilon}), \quad (1)$$

宏观部分反映原子核的整体性质. 而微观部分主要包括壳修正和对修正.

$$E_{\text{mic}} = E_{\text{shell}}(Z, N, \bar{\epsilon}) + E_{\text{pair}}(Z, N, \bar{\epsilon}). \quad (2)$$

在本文的计算中, 宏观部分采用Myers的形变液滴模型及相应的参数<sup>[20]</sup>. 用改进的谐振子势(Nilsson势)来计算微观单粒子势能级, Strutinsky壳修正方法用来计算壳修正能量, 对修正采用通常的BCS方法.

2006-01-13 收稿

\* 国家自然科学基金(10535010), 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)和中国科学院创新工程重点项目(KJ951-A1-01)资助

1) E-mail: qjzhi@hotmail.com

在计算中, 采用Lund的标准 Nilsson 参数<sup>[21]</sup>, 同时假定超重核是轴对称形变的( $\gamma = 0$ ). 四极和十六极形变参数的计算网格为:  $\varepsilon_2 = -0.6 \rightarrow 0.6$  (0.001),  $\varepsilon_4 = -0.2 \rightarrow 0.2$  (0.001). 具体对质子数  $Z=95-113$  奇-偶超重核同位素链进行了系统计算. 数值计算结果见表1、表2、图1、图2.

### 3 计算结果及讨论

#### 3.1 结合能

表1列出了 Am, Bk, Es, Md, Lr 和 Db 奇  $Z$  偶  $N$

核同位素链基态性质的理论计算结果, 表2列出了 Bh, Mt,  $Z=111$  和  $Z=113$  同位素链的计算结果. 表中列出的计算结果包括四极形变参数( $\varepsilon_2$ )、结合能( $B$ ),  $\alpha$ 衰变能( $Q_\alpha$ ), 以及相应的实验结合能( $B_{\text{exp}}$ ) 和  $\alpha$ 衰变能( $Q_{\alpha}$ ). 表中的实验数据取自 Audi 等人的原子核质量表<sup>[22]</sup>, 为了全面地比较, 表中也包括了估计值, 用 # 标记.

先来分析原子核的结合能. 从表1和表2中可以看到理论计算的结合能与实验值符合较好. 对 Am 同位素链来说, 理论计算结合能与实验值的最大误差为 1.1MeV ( $^{245}\text{Am}$ ). 相对于原子核的总结合能 1842MeV

表 1 宏观-微观模型计算的  $Z=95-105$  奇-偶超重核同位素链的形变、结合能和衰变能

核素	$\varepsilon_2$	$B$	$B(\text{exp})$	$Q_\alpha$	$Q_\alpha(\text{exp})$	核素	$\varepsilon_2$	$B$	$B(\text{exp})$	$Q_\alpha$	$Q_\alpha(\text{exp})$
$^{233}\text{Am}$	0.182	1763.52	1763.11#	7.07	6.97#	$^{245}\text{Md}$	0.229	1823.71	1823.05#	8.91	9.02#
$^{235}\text{Am}$	0.191	1778.13	1777.78#	6.41	6.61#	$^{247}\text{Md}$	0.223	1839.17	1838.67#	8.61	8.83#
$^{237}\text{Am}$	0.197	1792.14	1791.96#	6.09	6.2#	$^{249}\text{Md}$	0.223	1854.03	1853.31#	8.32	8.46#
$^{239}\text{Am}$	0.205	1805.53	1805.33	5.83	5.92	$^{251}\text{Md}$	0.226	1868.36	1867.94#	8.02	7.99#
$^{241}\text{Am}$	0.221	1818.36	1817.94	5.56	5.63	$^{253}\text{Md}$	0.227	1881.88	1881.81#	7.92	7.7#
$^{243}\text{Am}$	0.22	1830.74	1829.84	5.12	5.43	$^{255}\text{Md}$	0.227	1894.99	1894.33#	7.55	7.90
$^{245}\text{Am}$	0.22	1842.42	1841.25	4.96	5.21	$^{257}\text{Md}$	0.228	1907.52	1906.32	7.31	7.56
$^{247}\text{Am}$	0.226	1853.48	1852.25#	4.76	4.85#	$^{259}\text{Md}$	0.231	1919.62	1917.90	6.95	7.11#
$^{249}\text{Am}$	0.224	1864.08	1862.27#	4.44		$^{261}\text{Md}$	0.220	1931.19	1929.1#	6.62	6.65#
$^{251}\text{Am}$	0.222	1874.16		4.23		$^{263}\text{Md}$	0.212	1942.24		6.29	
$^{253}\text{Am}$	0.212	1883.84		3.97		$^{265}\text{Md}$	0.211	1952.71		6.10	
$^{255}\text{Am}$	0.216	1893.03		3.74		$^{267}\text{Md}$	0.210	1962.68		5.86	
$^{237}\text{Bk}$	0.195	1784.09	1783.9#	7.74	7.5#	$^{249}\text{Lr}$	0.224	1842.36		9.65	
$^{239}\text{Bk}$	0.208	1799.00	1798.95#	7.43	7.2#	$^{251}\text{Lr}$	0.229	1858.13	1857.46#	9.33	9.43#
$^{241}\text{Bk}$	0.219	1813.26	1813.28#	7.18	7.11#	$^{253}\text{Lr}$	0.236	1873.28	1872.71#	9.05	8.94
$^{243}\text{Bk}$	0.22	1826.95	1826.75	6.88	6.87	$^{255}\text{Lr}$	0.228	1887.81	1887.52#	8.85	8.61#
$^{245}\text{Bk}$	0.225	1840.15	1839.78	6.51	6.46	$^{257}\text{Lr}$	0.234	1901.72	1901.1#	8.46	9.01#
$^{247}\text{Bk}$	0.233	1852.72	1852.30	6.32	5.89	$^{259}\text{Lr}$	0.229	1915.17	1914.01#	8.11	8.58#
$^{249}\text{Bk}$	0.227	1864.58	1864.01	6.14	5.53	$^{261}\text{Lr}$	0.232	1928.03	1926.44#	7.79	8.14#
$^{251}\text{Bk}$	0.229	1876.01	1874.80	5.77	5.65#	$^{263}\text{Lr}$	0.222	1940.39	1938.57#	7.53	7.62#
$^{253}\text{Bk}$	0.229	1886.96	1885.1#	5.42	5.4#	$^{265}\text{Lr}$	0.215	1952.22	1950.4#	7.28	7#
$^{255}\text{Bk}$	0.227	1897.41		5.05		$^{267}\text{Lr}$	0.215	1963.41		7.14	
$^{257}\text{Bk}$	0.214	1907.42		4.72		$^{269}\text{Lr}$	0.210	1974.06		6.96	
$^{259}\text{Bk}$	0.211	1916.96		4.37		$^{271}\text{Lr}$	0.201	1984.34		6.64	
$^{241}\text{Es}$	0.211	1804.3224	1803.89#	8.06	8.32#	$^{253}\text{Db}$	0.229	1860.76		9.90	
$^{243}\text{Es}$	0.22	1819.4734	1819.1#	7.83	8.03	$^{255}\text{Db}$	0.228	1876.74	1876.31#	9.69	9.72#
$^{245}\text{Es}$	0.225	1834.05	1833.6#	7.51	7.91	$^{257}\text{Db}$	0.233	1892.07	1891.78#	9.51	9.23
$^{247}\text{Es}$	0.232	1848.0722	1847.56#	7.18	7.49#	$^{259}\text{Db}$	0.227	1906.82	1906.24#	9.28	9.62
$^{249}\text{Es}$	0.23	1861.5024	1861.07#	6.95	6.94#	$^{261}\text{Db}$	0.231	1921.07	1920.18#	8.95	9.22#
$^{251}\text{Es}$	0.231	1874.235	1873.94	6.78	6.60	$^{263}\text{Db}$	0.228	1934.74	1933.58#	8.73	8.83#
$^{253}\text{Es}$	0.235	1886.5256	1885.58	6.36	6.74	$^{265}\text{Db}$	0.219	1947.93	1946.16#	8.39	8.49#
$^{255}\text{Es}$	0.228	1898.2714	1896.64	6.04	6.44	$^{267}\text{Db}$	0.216	1960.61	1958.98#	8.08	7.9#
$^{257}\text{Es}$	0.23	1909.5182	1907.5#	5.74	6.05#	$^{269}\text{Db}$	0.207	1972.51	1970.43#	8.01	8.4#
$^{259}\text{Es}$	0.22	1920.23		5.48		$^{271}\text{Db}$	0.194	1983.92		7.79	
$^{261}\text{Es}$	0.226	1930.5174		5.21		$^{273}\text{Db}$	0.186	1994.92		7.43	
$^{263}\text{Es}$	0.219	1940.2417		5.02		$^{275}\text{Db}$	0.169	2005.47		7.17	

注: exp 代表实验值<sup>[22]</sup> (# 为估计值).

表 2 与表 1 相同, 宏观-微观模型计算的  $Z=107-113$  奇-偶超重核同位素链的计算结果

核素	$\varepsilon_2$	$B$	$B(\text{exp})$	$Q_\alpha$	$Q_\alpha(\text{exp})$	核素	$\varepsilon_2$	$B$	$B(\text{exp})$	$Q_\alpha$	$Q_\alpha(\text{exp})$
$^{259}\text{Bh}$	0.231	1894.78		10.27		$^{267}_{111}$	0.206	1927.99		11.59	
$^{261}\text{Bh}$	0.237	1910.29	1909.48#	10.08	10.56	$^{269}_{111}$	0.207	1944.00		11.47	
$^{263}\text{Bh}$	0.235	1925.34	1924.37#	9.78	10.08#	$^{271}_{111}$	0.210	1959.51		11.29	
$^{265}\text{Bh}$	0.234	1939.82	1938.74#	9.55	9.77#	$^{273}_{111}$	0.198	1974.50	1973.52#	11.07	11.2#
$^{267}\text{Bh}$	0.230	1953.76	1952.31#	9.28	9.37#	$^{275}_{111}$	0.178	1988.82	1987.43#	11.00	11.55#
$^{269}\text{Bh}$	0.217	1967.13	1965.85#	9.10	8.84#	$^{277}_{111}$	0.177	2002.59	2000.22#	10.65	11.18#
$^{271}\text{Bh}$	0.229	1979.73	1977.76#	9.18	9.5#	$^{279}_{111}$	0.176	2015.87	2013.83#	10.31	10.45#
$^{273}\text{Bh}$	0.244	1991.81	1989.63#	9.00	8.9#	$^{281}_{111}$	0.159	2028.58	2027.14#	10.08	9.64#
$^{275}\text{Bh}$	0.219	2003.48	2001.45#	8.74		$^{283}_{111}$	0.001	2041.44	2040.43#	9.54	8.96#
$^{277}\text{Bh}$	0.218	2014.71		8.51		$^{285}_{111}$	-0.018	2054.33		8.58	
$^{263}\text{Mt}$	0.217	1911.28		11.79		$^{271}_{113}$	0.199	1943.14		13.16	
$^{265}\text{Mt}$	0.221	1927.17	1926.82#	11.42	11.07#	$^{273}_{113}$	0.212	1959.40		12.90	
$^{267}\text{Mt}$	0.227	1942.50	1941.9#	11.14	10.87#	$^{275}_{113}$	0.199	1975.20		12.61	
$^{269}\text{Mt}$	0.220	1957.27	1956.44#	10.85	10.53#	$^{277}_{113}$	0.171	1990.33		12.47	
$^{271}\text{Mt}$	0.211	1971.52	1970.72#	10.54	10.14#	$^{279}_{113}$	-0.003	2004.46		12.65	
$^{273}\text{Mt}$	0.201	1984.94	1983.11#	10.49	10.82#	$^{281}_{113}$	-0.002	2019.43		11.46	
$^{275}\text{Mt}$	0.186	1997.87	1995.95#	10.15	10.12#	$^{283}_{113}$	0.002	2033.92	2031.37#	10.25	10.6#
$^{277}\text{Mt}$	0.157	2010.36	2008.53#	9.75	9.5#	$^{285}_{113}$	-0.002	2047.91	2045.52#	8.97	10.02#
$^{279}\text{Mt}$	0.134	2022.67	2021.23#	9.10	8.7#	$^{287}_{113}$	0.000	2061.49	2059.53#	8.25	9.34#
$^{281}\text{Mt}$	0.120	2034.61		8.40		$^{289}_{113}$	0.000	2074.59		8.04	

来说, 相对误差不超过 0.1%。对于 Bk 同位素链来说, 在有实验数据区域, 理论计算值与实验值的最大误差为 1.2MeV。对 Es 和 Md 同位素链来说, 最大误差分别为 1.5MeV 和 1.7MeV, 相对误差也不超过 0.1%。由此可见, 我们的理论计算结果能有效和准确地给出超重核的结合能。另外, 从图 1 理论计算结合能与实验结合能的比较中, 也可以看出我们的理论计算结果与实验值符合较好。

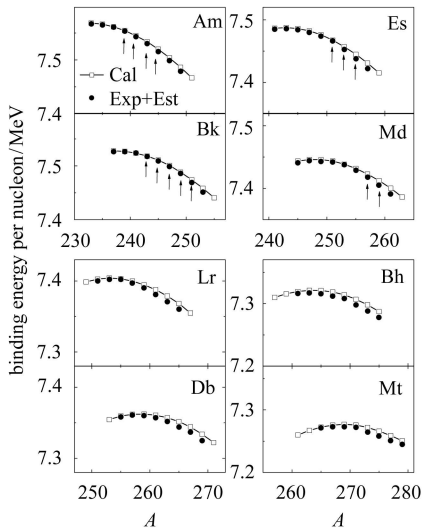


图 1  $Z=95-109$  奇-偶超重核同位素链平均结合能理论值与实验值的比较图  
箭头所指的点为实验值<sup>[22]</sup>, 其余黑点为估计值。

为了进一步考察计算的可靠性, 在图 2 中比较了

宏观-微观模型与相对论平均场的理论计算结果。图中相对论平均场的计算结果来自我们前期相对论平均场的理论计算<sup>[11, 12]</sup>。从图中可以看到, 我们的计算结果与实验值(包括估计值)及相对论平均场的计算结果符合很好。具体来说, 我们前期相对论平均场的两套计算结果(TMA 力参数和 NL-Z2 力参数)给出了结合能的上下限, 而宏观-微观模型的计算结果更接近实验值。因此, 结合相对论平均场及宏观-微观模型的理论计算结果, 可以有效和可靠地对未知超重核的结合能进行预测, 为将来的实验提供理论参考。

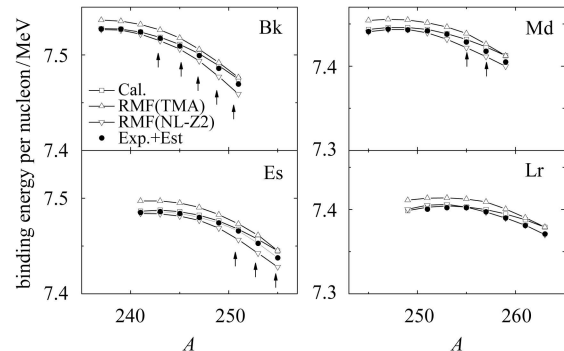


图 2 Bk, Es, Md, Lr 奇-偶核同位素链平均结合能理论计算值与相对论平均场计算结果的比较  
箭头所指的点为实验值<sup>[22]</sup>, 其余黑点为估计值。

### 3.2 $\alpha$ 衰变能

一般来说, 超重新元素和新核素的发现都是通过鉴别相应的  $\alpha$  衰变产物来实现的, 因此  $\alpha$  衰变

能对超重核的研究具有重要意义. 在表1和表2中也给出了 $\alpha$ 衰变能的理论计算值. 从表1中可以看出,  $\alpha$ 衰变能的理论计算结果与实验值符合得很好. 理论计算的 $^{259}\text{Db}$ 的衰变能9.28MeV与兰州所的实验值9.47MeV符合很好<sup>[8]</sup>. 中科院兰州近代物理所实验合成 $^{265}\text{Bh}$ 新核素并给出它的 $\alpha$ 衰变能实验值为 $9.24\pm 0.05\text{MeV}$ <sup>[9, 10]</sup>, 后来修正后的结果为9.38MeV, 这与我们的计算结果9.55MeV (Audi的估计值为9.77MeV)符合很好, 也与我们先前相对论平均场的计算结果(9.62MeV (NL-Z2力参数)和9.42MeV (TMA力参数))符合很好<sup>[11]</sup>. 这表明宏观-微观模型的计算结果与相对论平均场的计算结果是一致的.

就表1和表2中列出有实验数据的核来说,  $\alpha$ 衰变能的理论计算值与实验数据的最大差异不超过0.6MeV. 而 $\alpha$ 衰变能理论值与实验值的均方根偏差为0.31MeV, 这表明我们的计算结果比较精确地给出了超重核的 $\alpha$ 衰变能, 这为准确预测核素的寿命、稳定性及超重核的鉴别提供了比较可靠的理论参考. 总的来说计算很好地给出了 $\alpha$ 衰变能的实验值, 在此基础上对未知核素 $\alpha$ 衰变能的理论预言是可靠的. 对未知超重核素 $\alpha$ 衰变能的预测可为将来的相关实验提供理论参考.

### 3.3 原子核的形变

原子核的性质与原子核的形状密切相关<sup>[11, 14]</sup>, 在表1和表2中也列出了超重核基态的四极形变. 从表1和表2中可看出对于 $Z=95-113$ 的奇-偶超重核来说, 大部分原子核是形变的, 且主要为长椭球. 这表明原子核普遍是形变的, 形变对超重核的性质起着重要的作用. 相对论平均场<sup>[11, 12]</sup>及Möller等人<sup>[19]</sup>的计算也

表明形变是超重核的普遍现象. 同时也可以发现在每一个同位素链里, 基态的四极形变随中子数的增加有先增加而后减小的趋势, 这个变化趋势是原子核中子壳效应的反映. 在壳附近或次壳附近, 由于壳效应, 原子核为球形或形变很小, 而在远离壳或次壳的区域, 原子核的形变变大. 也发现当中子数 $N$ 处在170附近时, 可能出现长椭球与扁椭球相互竞争使原子核处于基态, 即超重核的形状共存现象<sup>[13, 14]</sup>. 在文献[15]中用相对论平均场对这个现象进行了比较详细的讨论, 在宏观-微观模型的基础上对形状共存现象及与形变相关的现象(比如裂变位垒, 超形变态……)作理论研究是非常有意义的, 今后将会对这一问题进行比较深入的讨论.

## 4 结论

采用宏观-微观模型, 选取改进的谐振子势作为单粒子势, 我们对质子数为 $Z=95-113$ 的奇-偶超重核的基态性质进行了系统的理论计算. 计算给出了原子核基态的形变, 结合能以及 $\alpha$ 衰变能. 理论计算的结合能、 $\alpha$ 衰变能与实验值较好符合. 计算结果表明对质子数 $Z=95-113$ 的区域, 大多数超重核的基态为长椭球形变, 形变对超重核的性质有重要作用. 理论计算结果与相对论平均场计算结果的比较表明宏观-微观模型能给出比较精确的超重核基态的结合能和衰变能. 这进一步表明, 采用改进谐振子势的宏观-微观模型可以可靠和有效地用来研究超重核. 用宏观-微观模型对未知超重核素基态性质的预言可以为将来有关超重核的实验研究提供理论参考.

## 参考文献(References)

- Hofmann S, Münzenberg G. Rev. Mod. Phys., 2000, **72**: 733
- Hofmann S et al. Eur. Phys. J., 2001, **A10**: 5
- Oganessian Yu Ts et al. Nature., 1999, **400**: 242
- Oganessian Yu Ts et al. Phys. Rev., 2004, **C70**: 064609
- Ginter T N et al. Phys. Rev., 2003, **C67**: 064609
- Morita K et al. Nucl. Phys., 2004, **A734**: 101
- Folden III C M et al. Phys. Rev. Lett., 2004, **93**: 212702
- GAN Z G, QIN Z, FAN H M et al. Eur. Phys. J., 2001, **A10**: 21
- GAN Z G, GUO J S, WU X L et al. Eur. Phys. J., 2004, **A20**: 385
- FAN H M, WU X L, GUO J S et al. HEP & NP, 2005, **29**(5): 451(in Chinese)  
(范红梅, 吴晓蕾, 郭俊盛等. 高能物理与核物理, 2005, **29**(5): 451)
- REN Zhong-Zhou et al. Phys. Rev., 2003, **C67**: 064302
- REN Zhong-Zhou et al. Phys. Rev., 2002, **C66**: 064306
- REN Zhong-Zhou et al. Phys. Rev., 2002, **C65**: 051304(R)
- Cwiok S, Heenen P H, Nazarewicz W. Nature., 2005, **433**: 705
- PEI J C, XU F R, Stevenson P D. Phys. Rev., 2005, **C71**: 034302
- ZHI Qi-Jun, REN Zhong-Zhou. HEP & NP, 2006, **30**(1): 32(in Chinese)  
(支启军, 任中洲. 高能物理与核物理, 2006, **30**(1): 32)
- ZHI Qi-Jun, REN Zhong-Zhou. Chin. Phys. Lett., 2006, **23**(1): 58
- ZHI Qi-Jun, REN Zhong-Zhou. J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 2006, **32**: 375
- Möller P et al. At. Data & Nucl. Data Tables., 1995, **59**: 185

20 Myers W D et al. Ark. Phys., 1967, **36**: 343

22 Audi G, Bersillion O, Blachot J et al. Nucl. Phys., 2003,

21 Bengtsson T, Ragnarrson I. Nucl. Phys., 1985, **A436**: 14

**A729**: 3

## Macroscopic-Microscopic Calculation on the Ground State Properties of Superheavy Odd-Even Nuclei \*

ZHI Qi-Jun<sup>1;1)</sup> REN Zhong-Zhou<sup>1,2</sup>

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

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

**Abstract** Using the macroscopic-microscopic model, we systematically calculate the ground state properties of superheavy odd-even nuclei with proton number  $Z=95-113$ . The theoretical binding energies and alpha-decay energies are in good agreement with the experimental data and with the results from relativistic mean-field (RMF) model. The reliability of macroscopic-microscopic model which is used in superheavy nuclei is further confirmed by our calculations and comparisons. The calculations show that the deformations play important role for the properties of superheavy nuclei. The predicted properties of some unknown nuclei are useful for future experimental research.

**Key words** macroscopic-microscopic model, binding energy,  $\alpha$  decay energy, relativistic mean-field model (RMF)

---

Received 13 January 2006

\* Supported by National Natural Science Foundation of China (10535010), National Natural Science Fund for Distinguished Young Scholar (10125521), Doctoral Fund of Ministry of Education of China (20010284036), Major State Basic Research Development in China (G2000077400) and Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (KJCX2-SW-N02)

1) E-mail: qjzhi@hotmail.com