

文章编号:1673-0062(2018)02-0026-05

## 新合成核素 $^{223}\text{Np}$ 及其 $\alpha$ 衰变链上核素的半衰期计算

邓军刚, 李小华\*

(南华大学核科学技术学院, 湖南 衡阳 421001)

**摘要:**基于 $\alpha$ 衰变的两势方法理论模型, 采用考虑了同位旋效应的唯象 cosh 型  $\alpha$ -子核核势和考虑了壳效应及质子—中子相互作用的  $\alpha$  预形成因子解析式系统地计算了最近新合成的短寿命核素 $^{223}\text{Np}$ 及其 $\alpha$ 衰变链上核素 $\alpha$ 的衰变半衰期. 计算结果表明, 采用考虑了壳效应及质子—中子相互作用的  $\alpha$  预形成因子的  $\alpha$  衰变半衰期的理论计算结果能更好地符合实验数据. 这项工作可以作为将来实验和理论研究  $\alpha$  衰变及核结构的参考.

**关键词:**  $\alpha$  衰变;  $^{223}\text{Np}$ ; 两势方法; 唯象核势;  $\alpha$  预形成因子

**中图分类号:** O571.32<sup>+1</sup>      **文献标志码:** A

## Calculations of the $\alpha$ Decay Half-lives of New Synthesized Nucleus $^{223}\text{Np}$ and the Nuclei on its $\alpha$ Decay Chain

DENG Jun-gang, LI Xiao-hua\*

(School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

**Abstract:** Based on the  $\alpha$  decay theoretical model of two-potential approach, the  $\alpha$  decay half-lives of new synthesized short-lived nucleus  $^{223}\text{Np}$  and the nuclei on its  $\alpha$  decay chain are systematically calculated by adopting the phenomenological  $\alpha$ -daughter nucleus potential considering the isospin effect, and the  $\alpha$  preformation probabilities analysis formula considering the shell effect and proton-neutron interaction. The calculations indicate that the calculations of  $\alpha$  decay half-lives with  $\alpha$  preformation probabilities considering the shell effect and proton-neutron interaction can well reproduce the experimental data. This work will be as a reference for experimental and theoretical study of  $\alpha$  decay and nuclear structure in the future.

收稿日期: 2018-02-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(11205083); 湖南省自然科学基金项目(2015JJ3103; 2015JJ2121); 湖南省教育厅重点项目(15A159); 南华大学博士启动基金项目(2010XQD29); 湖南省研究生科研创新资助项目(CX2017B536)

作者简介: 邓军刚(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事原子核理论、 $\alpha$ 衰变等方向的研究. E-mail: dengjungang1016@163.com. \* 通讯作者: 李小华, E-mail: lixiaohuaphysics@126.com

**key words:** α decay; <sup>223</sup>Np; two-potential approach; phenomenological α-core potential; α preformation probability

## 0 引言

重核和超重核的合成一直是核物理研究的热点问题之一,最近中国科学院近代物理研究所等科研机构的科学家们通过<sup>187</sup>Re(<sup>40</sup>Ar,4n)<sup>223</sup>Np 反应,在兰州重离子加速器上(HIRFL)成功地合成了新的短寿命核素<sup>223</sup>Np<sup>[1]</sup>.他们测得的 α 衰变半衰期和衰变能分别为  $T_{1/2} = 2.15 \left( \frac{100}{52} \right) \mu\text{s}$ ,  $Q_\alpha = 9477(44) \text{ keV}$ , 自旋宇称为  $9/2^-$ . 长期以来,在中子数  $N = 126$  附近是否存在支壳层甚至壳间隙是相对论平均场模型,协变密度泛函模型以及微观—微观模型等一直关注和争论的焦点之一.<sup>223</sup>Np 的合成证明了之前一直争论的在中子数  $N = 126$  附近的质子数  $Z = 92$  的支壳层是不存在的<sup>[1]</sup>.

α 衰变是重核和超重核的主要衰变模式,通过对 α 衰变的研究可以得到大量的核结构信息<sup>[2-14]</sup>;同时,对于一些新合成的短寿命核素,α 衰变是鉴别它们身份(中子数和质子数)的重要手段.两势方法(two-potential approach)<sup>[15]</sup>最初作为一种成功研究准静态衰变的模型被提出,最近它被广泛地用来研究 α 衰变<sup>[2-5]</sup>.本文将采用两势方法和考虑了壳效应和质子—中子相互作用的 α 预形成因子计算<sup>223</sup>Np 及其 α 衰变链上核素的 α 衰变半衰期,并与实验值进行比较.

## 1 理论框架

在两势方法的框架下,α 衰变半衰期  $T_{1/2}$  可以利用衰变宽度  $\Gamma$  或衰变常数  $\lambda$  来计算,具体如下:

$$T_{1/2} = \frac{\hbar \ln 2}{\Gamma} = \frac{\ln 2}{\lambda}, \quad (1)$$

$\Gamma$  可以由下式计算得到

$$\Gamma = \frac{\hbar^2 P_\alpha F P}{4\mu}. \quad (2)$$

$P$  是势垒贯穿概率,它可以由 WKB (Wentzel-Kramers-Brillouin) 近似计算得到,具体表达式如下:

$$P = \exp\left(-2 \int_{r_2}^{r_3} k(r) dr\right), \quad (3)$$

式中  $k(r) = \sqrt{\frac{2\mu}{\hbar^2} |Q_\alpha - V(r)|}$ , 是 α 粒子的波数.

$\mu = \frac{m_d m_\alpha}{m_d + m_\alpha}$  代表衰变子核和预形成的 α 粒子折合质量,  $m_d, m_\alpha$  分别代表衰变子核和预形成的 α 粒子的质量.  $r$  是子核和 α 粒子之间的质心距离.  $V(r)$  代表全部的 α—核心相互作用势.

$F$  是归一化因子,表示了 α 粒子的碰撞频率,它可以由下式近似得到

$$F \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{2k(r)} = 1, \quad (4)$$

$r_1, r_2$  以及式(3)中的  $r_3$  是经典转折点,它们必须满足条件  $V(r_1) = V(r_2) = V(r_3) = Q_\alpha$ .

由于多体问题的复杂性,α 预形成因子  $P_\alpha$  通常采用唯象的方法,通过式(5)得到

$$P_\alpha = P_0 \frac{T_{1/2, \text{cal}}}{T_{1/2, \text{exp}}}, \quad (5)$$

$T_{1/2, \text{exp}}, T_{1/2, \text{cal}}$  分别是 α 衰变半衰期的实验值和采用  $P_\alpha = P_0$  计算得到的值.根据密度依赖的结团模型(density-dependent cluster model)的计算结果,对于偶-偶核,奇  $A$  核和奇-奇核,  $P_0$  的值分别是 0.43, 0.35 和 0.18<sup>[16]</sup>, 在本项工作中,  $P_0 = 0.35$ . 最近,一个考虑了壳结构和质子—中子相互作用修正的预形成因子解析式被提出并表示如下<sup>[4]</sup>:

$$\lg P_\alpha^* = a + b(Z - Z_1)(Z_2 - Z) + C(N - N_1)(N_2 - N) + dA + e(Z - Z_1)(N - N_1), \quad (6)$$

$Z, N$  是母核的中子数和质子数,  $Z_1(N_1)$  和  $Z_2(N_2)$  代表质子(中子)幻数,并且满足条件  $Z_1 < Z < Z_2, N_1 < N < N_2, a, b, c, d, e$  为可调参数.

全部的 α—核心相互作用势包括核势  $V_N(r)$ , 库伦势  $V_c(r)$  以及离心势  $V_l(r)$  三部分,它被定义为

$$V(r) = V_N(r) + V_c(r) + V_l(r), \quad (7)$$

采用 cosh 参数化形式来表示核势  $V_N(r)$ , 即

$$V_N(r) = -V_0 \frac{1 + \cosh(R/a_0)}{\cosh(r/a_0) + \cosh(R/a_0)}, \quad (8)$$

$V_0$  和  $a_0$  分别代表核势深度和表面弥散宽度.根据我们以前的工作<sup>[4]</sup>,  $a_0 = 0.5958 \text{ fm}$ ,  $V_0 = 192.42 + 31.059 \frac{N_d - Z_d}{A_d} \text{ MeV}$ . 这里,  $N_d, Z_d$  以及  $A_d$  分别表示子核的中子数,质子数和质量数.核势半径  $R$  由液

滴模型和亲和势计算<sup>[17]</sup>的参数化形式得到,具体表达式如式(9):

$$R = 1.28A^{1/3} - 0.76 + 0.8A^{-1/3}, \quad (9)$$

$A$  代表衰变母核的质量数.库伦势  $V_c(r)$  可以表示如下:

$$V_c(r) = \begin{cases} \frac{Z_d Z_\alpha e^2}{2R} \left[ 3 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right], & r < R \\ \frac{Z_d Z_\alpha e^2}{r}, & r > R \end{cases}, \quad (10)$$

$Z_d, Z_\alpha$  分别表示子核和  $\alpha$  粒子的质子数.在本工作中,采取了 Langer 修正的离心势来计算  $V_l(r)$ , 表示如式(11):

$$V_l(r) = \frac{(l + 1/2)^2}{2\mu r^2}, \quad (11)$$

$l$  表示由  $\alpha$  粒子带走的轨道角动量,对于允许  $\alpha$  衰变,  $l=0$ ,对于禁止  $\alpha$  衰变,  $l \neq 0$ .根据角动量守恒,被  $\alpha$  粒子带走的最小角动量  $l_{\min}$  可以由式(12)计算得到

$$l_{\min} = \begin{cases} \Delta_j & \Delta_j \text{ 是偶数且 } \pi_p = \pi_d \\ \Delta_j + 1 & \Delta_j \text{ 是偶数且 } \pi_p \neq \pi_d \\ \Delta_j & \Delta_j \text{ 是奇数且 } \pi_p \neq \pi_d \\ \Delta_j + 1 & \Delta_j \text{ 是奇数且 } \pi_p = \pi_d \end{cases}, \quad (12)$$

$\Delta_j = |j_p - j_d|$ ,  $j_p, \pi_p, j_d, \pi_d$ , 分别代表母核和子核的自旋宇称值.

## 2 计算结果和讨论

在我们以前的工作中,我们发现对于在同一个被幻数划分的壳层区域内的同一类  $\alpha$  衰变母核(偶-偶核,奇  $A$  核和奇-奇核),其  $\alpha$  预形成因子

的行为可以用公式(6)来进行统一描述.在本文中,计算了  $^{223}\text{Np} \rightarrow ^{219}\text{Pa} \rightarrow ^{215}\text{Ac} \rightarrow ^{211}\text{Fr} \rightarrow ^{207}\text{At} \rightarrow ^{203}\text{Bi}$  这条  $\alpha$  衰变链核素的半衰期,由于  $^{203}\text{Bi}$  只发生  $\beta^+$  衰变,因此  $\alpha$  衰变链到此截止.首先,采用  $P_\alpha = P_0$  计算  $\alpha$  衰变半衰期,得到计算值  $T_{1/2, \text{cal}}$ ,然后使用我们之前的工作<sup>[5]</sup>提取的参数计算得到考虑了壳效应和质子-中子相互作用的  $P_\alpha^*$ ,这些参数在表1中给出.最后将  $P_\alpha^*$  带入式(5)反推得到预测的实验值  $T_{1/2, \text{pre}}$ ,详细的计算结果在表2给出.在表2中,前三列分别是  $\alpha$  衰变的母核、子核和衰变能;第四,第五列是母核,子核的自旋宇称;第六列是  $\alpha$  粒子带走的最小角动量;第七,第八列是  $\alpha$  衰变半衰期实验值和采用两势方法并且令  $P_\alpha = P_0$  计算得到的半衰期;第九列是通过式(5)提取出的  $\alpha$  衰变预形成因子,第十列是考虑了壳效应和质子-中子相互作用的预形成因子  $P_\alpha^*$ ,通过式(6)和表1的参数计算得到;最后一列是考虑了  $\alpha$  衰变预形成因子修正的  $\alpha$  衰变半衰期.通过表2我们可以看出相比  $T_{1/2, \text{cal}}, T_{1/2, \text{pre}}$  基本上能更好地符合  $T_{1/2, \text{exp}}$ .

表1 奇质-偶中  $\alpha$  衰变母核在  $82 < Z < 126$ ,  $126 < N < 152$  区域内的  $P_\alpha^*$  参数

Table 1 The parameters of  $P_\alpha^*$  for odd Z- even N  $\alpha$  decay parent nuclei in region of  $82 < Z < 126, 126 < N < 152$

$a$	$b$	$c$	$d$	$e$
10.682 5	0.004 2	0.003 5	- 0.058 7	0.001 5

表2  $^{223}\text{Np}$  及其  $\alpha$  衰变链核素的  $\alpha$  衰变半衰期实验值,计算值和预测值及  $\alpha$  预形成因子的计算结果

Table 2 Calculations of  $\alpha$  decay half-lives of experimental data, calculated ones and predicted ones and  $\alpha$  preformation probabilities for nucleus  $^{223}\text{Np}$  and the nuclei on its decay chain

元素	子核	$Q_\alpha/\text{MeV}$	母核 $J^\pi$	子核 $J^\pi$	$l_{\min}$	$T_{1/2, \text{exp}}/\text{s}$	$T_{1/2, \text{cal}}/\text{s}$	$P_\alpha$	$P_\alpha^*$	$T_{1/2, \text{pre}}/\text{s}$
$^{223}\text{Np}$	$^{219}\text{Pa}$	9.48	$9/2^-$	$9/2^-$	0	$2.15 \times 10^{-6}$	$9.33 \times 10^{-6}$	1.52	0.31	$1.05 \times 10^{-5}$
$^{219}\text{Pa}$	$^{215}\text{Ac}$	10.08	$9/2^-$	$9/2^-$	0	$5.30 \times 10^{-8}$	$8.55 \times 10^{-8}$	0.56	0.22	$1.35 \times 10^{-7}$
$^{215}\text{Ac}$	$^{211}\text{Fr}$	7.75	$9/2^-$	$9/2^-$	0	$1.70 \times 10^{-1}$	$3.21 \times 10^{-2}$	0.07	0.14	$7.96 \times 10^{-2}$
$^{211}\text{Fr}$	$^{207}\text{At}$	6.66	$9/2^-$	$9/2^-$	0	$2.13 \times 10^2$	$4.40 \times 10^1$	0.07	0.08	$1.92 \times 10^2$
$^{207}\text{At}$	$^{203}\text{Bi}$	5.87	$9/2^-$	$9/2^-$	0	$6.52 \times 10^4$	$1.69 \times 10^4$	0.09	0.04	$1.45 \times 10^5$

注:除了  $^{223}\text{Np}$  的实验数据来自文献[1]以外,表中的自旋,宇称,衰变能和半衰期数据都来自 NUBASE2016<sup>[18]</sup>

在图1中,我们绘制了  $\alpha$  衰变实验值,计算值和预测值的对数形式.图1中的三角形、五角星和圆点分别代表实验半衰期、用两势方法计算的半

衰期和考虑  $\alpha$  预形成因子修正的半衰期的对数值.从图1中我们可以看出,无论是  $T_{1/2, \text{cal}}$  还是  $T_{1/2, \text{pre}}$  都能够很好地重现实验值,并且  $T_{1/2, \text{pre}}$  和

$T_{1/2,exp}$  的偏差要更小一些.

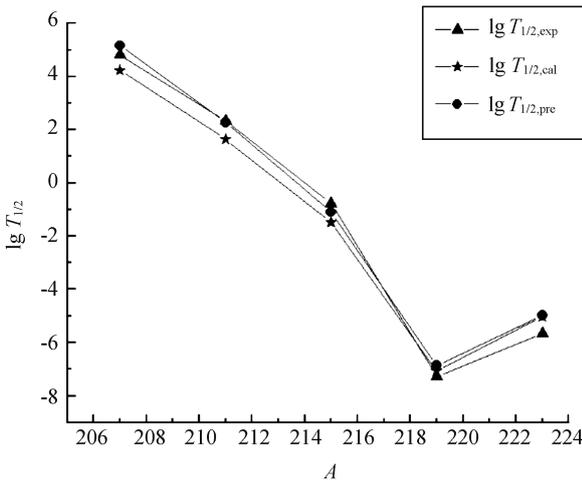


图 1 α 衰变半衰期实验值,采用两势方法并且令  $P_{\alpha}=P_0$  计算的半衰期以及预测的半衰期的对数值

Fig.1 α decay logarithmic half-lives of experimental data and calculations within TPA taking  $P_{\alpha}=P_0$  and predicted ones

为了更直观地观察,在图 2 的上半部分我们绘制了采用  $P_{\alpha}=P_0$  计算的半衰期与实验值的对数差别,在图 2 的下半部分我们绘制了考虑 α 预形成因子修正的半衰期和实验值的对数偏差.从图 2 中,我们可以看出和  $\lg T_{1/2,cal}-\lg T_{1/2,exp}$  相比,  $\lg T_{1/2,pre}-\lg T_{1/2,exp}$  的值基本都在 0 附近,并且  $\lg T_{1/2,pre}-\lg T_{1/2,exp}$  的值更小.我们的预测结果  $T_{1/2,pre}$  最大误差在实验值的 4.9 倍以内,这表明考虑了预形成因子修正的 α 衰变半衰期能更好地重现实验值.

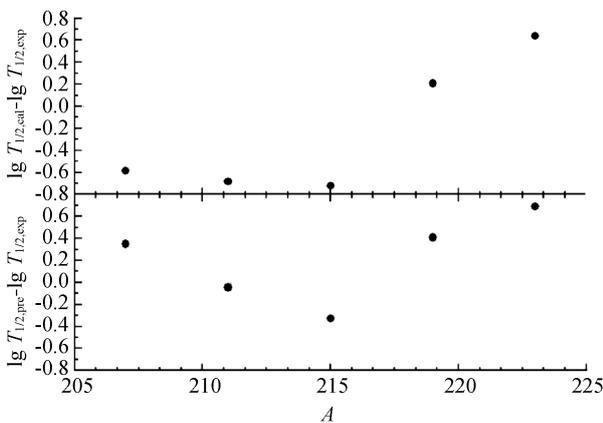


图 2  $T_{1/2,cal}, T_{1/2,pre}$  分别与  $T_{1/2,exp}$  的对数偏差

Fig.2 The logarithmic differences between,  $T_{1/2,cal}, T_{1/2,pre}$  and  $T_{1/2,exp}$ , respectively

### 3 结 论

采用 α 衰变的两势方法理论模型计算了 <sup>223</sup>Np 及其 α 衰变链上核素的 α 衰变半衰期.其中核势选择了考虑同位旋效应的唯象 cosh 型核势,在内部空间积分得到归一化因子,反映了 α 粒子的势垒碰撞频率;基于 WKB 近似方法,得到了粒子的势垒穿透概率;利用考虑了壳效应及价核子影响的解析式计算得到了 α 预形成因子.计算结果能很好地再现实验数据,这表明考虑采用壳效应和质子—中子相互作用的 α 预形成因子来计算 α 衰变半衰期是可靠的,这项工作也从理论计算方面验证了实验测得的<sup>223</sup>Np 的半衰期是精确的.

#### 参考文献:

- [1] SUN M D, LIU Z, HUANG T H, et al. New short-lived isotope <sup>223</sup>Np and the absence of the Z=92 subshell closure near N=126 [J]. Physics letters B, 2017, 771: 303-308.
- [2] 孙小东, 郭萍, 李小华. 通过铀同位素的衰变研究核素的同位旋效应[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2016, 53(3): 597-600.
- [3] 孙小东. 基于两势方法研究 α 衰变的半衰期[D]. 衡阳: 南华大学, 2016.
- [4] SUN X D, GUO P, LI X H. Systematic study of α decay half-lives for even-even nuclei within a two-potential approach[J]. Physical review C, 2016, 93(3): 9.
- [5] SUN X D, DUAN C, DENG J G, et al. Systematic study of α decay for odd-A nuclei within a two-potential approach[J]. Physical review C, 2017, 95(1): 14319.
- [6] REN Z Z, LÜ M J, WAN N. Investigations of cluster effects in atomic nuclei [J]. Nuclear physics review, 2017, 34(3): 338-343.
- [7] QIAN Y B, REN Z Z. Cluster radioactivity in trans-lead nuclei reexamined[J]. Nuclear physics review, 2017, 34(3): 499-503.
- [8] 甘再国, 姜舰, 杨华彬, 等. 缺中子同位素<sup>215-217</sup>U 的 α 衰变研究[J]. 科学通报, 2016, 61(22): 2502-2511.
- [9] 包小军. 超重核合成与衰变性质的理论研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [10] 周波, 任中洲. 原子核结团的非局域化运动[J]. 物理学进展, 2015, 35(3): 107-144.
- [11] 周波, 任中洲. 原子核中的结团运动[J]. 物理, 2015, 44(5): 291-297.

(下转第 36 页)

函数模型,是非常有效的.

## 5 结 论

本文分别采用临界权重函数模型和全局稳态权重函数模型计算了 IQS 中子动力学结果,通过分析计算值与基准值的误差发现,在临界权重函数模型和全局稳态权重函数模型中,前者适用于启堆过程,后者适用于断束工况;从权重函数的物理意义“次临界堆中子价值”以及外源中子对权重函数影响的滞后现象出发,可以推断,在临界权重函数模型和全局稳态权重函数模型之间,可能存在一种局部稳态权重函数,可以使得计算误差进一步减小.

在局部稳态权重函数模型中,在共轭外源项中引入权重系数  $\omega(r)$  对模型修正,使得局部稳态权重函数模型能满足对“堆芯某一位置是否存在外源中子”和“外源中子能否引发裂变”这两方面意义的描述,其中,归一化的权重系数  $\omega(r)$  通过非增殖介质内中子扩散方程求取,用于描述堆芯某位置存在外源中子的概率.将采用局部稳态权重函数模型的计算误差与其他两种权重函数的计算误差进行对比,结果表明局部稳态权重函数模型能够有效提高 IQS 中子动力学结果的准确性.

### 参考文献:

- [1] 李泽霞,刘小平,朱相丽,等.加速器驱动次临界系统发展态势分析[J].科学观察,2011,6(3):32-43.  
[2] 于涛,谢金森,刘紫静.加速器束流瞬变 ADS 次临界

反应堆动态特性分析方法研究[J].核动力工程,2014(增刊2):48-51.

- [3] 奥特.核反应堆动力学导论[M].北京:原子能出版社,1992:58-61.  
[4] 于涛.加速器驱动次临界系统(ADS)束流瞬变动态响应的微机仿真研究[D].北京:中国原子能科学研究院,2005.  
[5] 于涛,李吉根,凌球,等.ADS 加速器束流瞬变分析程序开发[J].核动力工程,2007,28(2):124-127.  
[6] RINEISKI A, MASCHEK W, RIMPAULT G. Performance of neutron kinetics models for ADS transient analyses [J]. Accapp/adta, 2001, 1: 11-15.  
[7] 宋英明,高庆瑜,徐宇超,等.基于 IQS/MC 方法的 ADS 次临界反应堆中子时空动力学模拟分析[J].原子能科学技术,2017,51(3):450-456.  
[8] RINEISKI A, MASCHEK W. On application of quasistatic and point-kinetics schemes for subcritical systems with-external neutron source [J]. Pharmacopsychiatry, 2003, 5(1):1-12.  
[9] 黄祖洽.核反应堆动力学基础[M].2版.北京:北京大学出版社,2007:175-180.  
[10] 王苏,沈峰.ADS 次临界反应堆的中子共轭方程[J].原子能科学技术,2011,45(7):775-779.  
[11] DULLA S, RAVETTO P. Interpretation of Local Flux Measurements in Subcritical Systems and Reactivity Determination [J]. Science and technology and nuclear installations, 2012(2012):347-359.  
[12] 谢金森.ADS 次临界反应堆物理特性的谐波展开法研究[D].北京:中国原子能科学研究院,2016.

(责任编辑:扶文静)

(上接第 29 页)

- [12] 张海飞,包小军,王佳眉,等.推广的液滴模型及其应用[J].原子核物理评论,2013,30(3):241-259.  
[13] 许昌,任中洲.奇 Z 超重核的禁戒  $\alpha$  衰变(英文)[J].原子核物理评论,2013,30(3):308-311.  
[14] 包小军,张海飞,李君清,等.超重核<sup>292-310</sup>122 同位素链的  $\alpha$  衰变和自发裂变的竞争[J].原子核物理评论,2013,30(3):318-323.  
[15] GURVITZ S A, SEMMES P B, NAZAREWICZ W, et al. Modified two-potential approach to tunneling problems [J]. Physical review A, 2004, 69(4): 361-367.

- [16] 任中洲,许昌.密度依赖的结团模型研究原子核的  $\alpha$  衰变和结团放射性[J].原子核物理评论,2005,22(4):344-350.  
[17] ROYER G. Alpha emission and spontaneous fission through quasi-molecular shapes [J]. Journal of physics g: nuclear and particle physics, 2000, 26(8): 1149-1170.  
[18] AUDI G, KONDEV F G, WANG M, et al. The NU-BASE2016 evaluation of nuclear properties [J]. Chinese physics C, 2017, 41(3): 30001.

(责任编辑:扶文静)