



能量密度泛函中不同对关联处理方式对原子核形变描述影响的探讨

师浩强 王小保 董国香 王华磊

Effect of Different Pairing Correlations on the Description of Nuclear Deformations within Energy Density Functional Framework

SHI Haoqiang, WANG Xiaobao, DONG Guoxiang, WANG Hualei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2020006>

引用格式:

师浩强, 王小保, 董国香, 王华磊. 能量密度泛函中不同对关联处理方式对原子核形变描述影响的探讨[J]. *原子核物理评论*, 2020, 37(1):26–33. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2020006

SHI Haoqiang, WANG Xiaobao, DONG Guoxiang, WANG Hualei. Effect of Different Pairing Correlations on the Description of Nuclear Deformations within Energy Density Functional Framework[J]. *Nuclear Physics Review*, 2020, 37(1):26–33. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2020006

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

对关联在反磁转动中的作用 (英文)

Effects of Pairing Correlations on the Antimagnetic Rotation

原子核物理评论. 2017, 34(1): 116–120 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.01.116>

基于相对论平均场有效对力的中子物质BCS–BEC跨越

BCS–BEC Crossover in Neutron Matter with RMF Effective Pairing Interaction

原子核物理评论. 2018, 35(4): 505–510 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.04.505>

协变密度泛函理论中的张量力效应

Effects of Tensor Force in Covariant Density Functional Theory

原子核物理评论. 2018, 35(4): 390–400 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.04.390>

锆掺杂二氧化铀中氧缺陷扩散机制的密度泛函计算研究

Migration Mechanism of Oxygen in Uranium Dioxide Doped with Zirconium

原子核物理评论. 2017, 34(3): 667–671 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.667>

核物质四阶对称能中的交换项相关物理

Physics of Fock Terms on Fourth–order Symmetry Energy of Nuclear Matter

原子核物理评论. 2018, 35(4): 549–554 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.04.549>

可能的原子核形状及硬度演化性质:基于能量面计算的系统分析(英文)

Possible Properties on Nuclear Shape and Stiffness Evolution:A Systematic Analysis Based on Nuclear–Energy–Surface Calculations

原子核物理评论. 2017, 34(3): 481–487 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.481>

文章编号: 1007-4627(2020)01-0026-08

能量密度泛函中不同对关联处理方式对原子核形变描述影响的探讨

师浩强^{1,2}, 王小保^{2,†}, 董国香², 王华磊^{1,†}

(1. 郑州大学物理学院(微电子学院), 郑州 475001;

2. 湖州师范学院理学院, 浙江 湖州 313000)

摘要: 在 Skyrme 能量密度泛函理论的框架下, 研究了不同对关联处理近似, 如 Hartree-Fock-Bogoliubov (HFB)、Hartree-Fock-Bogoliubov Lipkin-Nogami (HFBLN) 及在 HFBLN 基础上考虑粒子数投影, 对于原子核势能曲面计算及基态结合能的影响。同时, 也研究了不同对力, 如体积对力、表面对力及混合对力对结果的影响。研究的对象为典型的双幻核 ^{16}O , ^{40}Ca , ^{100}Sn 和 ^{208}Pb , 它们的基态为球形; 还有典型的形变核 ^{48}Cr , 也研究了相应的 Cr 和 Fe 同位素链的结合能, 最后讨论了对超重核 ^{298}Fl 的势能面计算。研究发现, 对关联基本不改变形变极小点, 但是由于对关联能的引入, 对结合能会带来几个 MeV 的修正能量, HFB、HFBLN 及投影计算的修正能量逐渐递增。对关联可以改变位能面最小点附近曲线的软度, 使得形变较小点变浅, 而在 HFBLN 基础上考虑粒子数投影, 又可以让形变极小点变得更加明显。对关联也降低了位垒高度。在相同对关联处理近似下, 混合对力与体积对力计算的势能面结果相接近, 表面对力带来了更多的对关联能, 对关联的效果更加显著。

关键词: 能量密度泛函; 势能面; 对关联

中图分类号: O571.2

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.37.2020006

1 引言

原子核是一个典型的量子多体系统^[1]。由多个核子间相互作用的复杂性导致的困难, 促使了旨在描述有限核的有效理论模型的发展^[2]。原子核的密度泛函理论, 作为自洽平均场可以微观有效地描述原子核的整体特性, 是在描述核多体问题和预测核素图上原子核的性质方面最成功的模型之一^[3], 可以应用于几乎整个核素图^[4]。用能量密度泛函理论来预测原子核的静态和动力学, 是低能核物理的一个重要手段。静态性质如质量、结合能、电荷半径、形变值等, 其他的如势垒、低位激发、巨共振等, 它提供了一个非常全面的微观框架^[5-7], 使得我们对原子核的集体性质有了更加直观的描述^[8]。

大多数有限核的性质, 可以用平均场近似来进行描述。平均场, 指的是单个核子状态下核子与核子间相互作用的平均值, 在这个平均的过程中必须考虑到核子的费米统计量, 用变分方法来实现, 如可以通过求解著名的 Hartree-Fock (HF) 自洽方程来得到^[1]。早期的原子核能量密度泛函理论是用 HF 方法提出的, 使用了零程且密度相关的有效相互作用^[9]。最早的密度泛函理论中

能量密度 $E(\rho)$ 是只包含单粒子密度的泛函, 只适用于一些双满壳核性质的描述; 对于开壳核, 特别是远离稳定线的奇特核, 需要考虑粒子-粒子 (p-p) 相互作用^[10]。通过在平均场模型中引入核子配对, 并通过 Bogoliubov 变换, 用准粒子代替粒子的自由度, 有效地引入对关联^[1]。

原子核的能量密度泛函理论在低能物理方面得到了广泛的应用^[6, 11], 在这个框架下, 我们可以使用 Hartree-Fock-Bogoliubov (HFB) 方法^[6]去描述核子间的配对关联。在该框架下, 粒子数不再是好量子数。之后, 人们提出了 Lipkin-Nogami (LN) 方法^[12], 可以作为近似的变分前投影, 一定程度上解决了该问题。如果需要恢复粒子数, 可以进一步使用精确的粒子数投影 (Particle-Number Projection, PNP)^[1]。现在常用的、理论处理较为简单是在变分结束之后再投影 (Projection After Variation, PAV) 的方法。

在不同的框架下, HFB、HFBLN、HFBLN-PAV, 对于原子核基态性质描述, 尤其是结合能及形变的描述将是不同的。我们在本文中, 分别选择了双幻核 (基态形状为球形)、开壳核 (基态有形变), 也选择了超重核,

收稿日期: 2020-01-13; 修改日期: 2020-02-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U1732138, 11605054, 11505056, 11975209, 11305108, 11790325, 11947410)

作者简介: 师浩强 (1994-), 男, 河南开封人, 是郑州大学王华磊和湖州师范学院王小保联合培养的硕士研究生, 从事原子核结构的理论研究; E-mail: 1395028453@qq.com

† 通信作者: 王小保, E-mail: xbwang@zjhu.edu.cn; 王华磊, E-mail: wanghualei@zzu.edu.cn.

做为研究对象，研究了这几种对关联处理的影响。此外，在 Skyrme 力能量密度泛函中，对力的形式选取还有较大的不确定性，如假定配对集中在原子核表面的表面对力，假定配对在可均匀发生在原子核表面内部的体积对力等，我们也将检验这些不同形式的对力对这些核描述的影响。全文分为四部分，第二部分为“理论框架”，第三部分为“讨论”，“结论”在第四部分。

2 理论框架

在局部密度近似的 Skyrme 能量密度泛函理论下，原子核的能量是哈密顿量 $H(r)$ 在空间上的积分，该哈密顿量由单体密度矩阵 ρ 和配对张量 κ 组成^[6]，

$$E = \int d^3r \mathcal{H}(r), \quad (1)$$

哈密顿量密度是由动能项密度 $\tau(r)$ 、势能项密度 χ_t 和配对项密度 $\tilde{\chi}_t$ 组成的^[1]

$$\mathcal{H}[\rho, \kappa] = \frac{\hbar^2}{2m} \tau(r) + \sum_{t=0,1} \chi_t(r) + \sum_{t=0,1} \tilde{\chi}_t(r), \quad (2)$$

指标 t 分别表示能量密度的同位旋标量项 ($t=0$) 和同位旋矢量项 ($t=1$)。

配对项能量密度 $\tilde{\chi}$ 是配对张量 κ 的函数。在粒子-粒子通道中，我们采用密度依赖的 δ 配对相互作用。 δ 对力有如下形式^[13]：

$$V(r_1, r_2) = V_0 \left[1 - \eta \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma \right] \delta(r_1 - r_2), \quad (3)$$

其中： V_0 是中子 (n) 之间或质子 (p) 之间的配对强度； ρ 是总核子密度； ρ_0 是饱和密度，取固定值为 0.16 fm^{-3} ；在我们的计算中 $\gamma = 1$ 。根据 η 的选择的不同，我们可以得到不同的对力。 $\eta = 0, 0.5$ 和 1 分别对应着体积对力、混合对力和表面对力。当 $\eta = 0$ 时是体积对力，意味着没有明显的密度依赖，主要是在核体积内起作用。当 $\eta = 1$ 是表面对力，对核表面比较敏感，会在核表面周围产生一个配对场。而 $\eta = 0.5$ 是体积对力和表面对力两种对力的混合。

Lipkin-Nogami 方法，可以近似地恢复粒子数为好量子数，它的做法相当于在能量项上增加一个二阶的 Kamlah 校正来修正能量^[12, 14]：

$$E \rightarrow E - \lambda_2 \langle \Delta \hat{N}^2 \rangle, \quad (4)$$

其中 $\langle \Delta \hat{N}^2 \rangle = \langle \hat{N}^2 \rangle - \langle \hat{N} \rangle^2$ 。然而，系数 λ_2 不是拉格朗日乘子，它取决于波函数和哈密顿函数^[12, 15-16]

$$\lambda_2 = \frac{G_{\text{eff}} \text{Tr}'(1 - \rho) \kappa \text{Tr}' \rho \kappa - 2 \text{Tr}(1 - \rho)^2 \rho^2}{4 [\text{Tr} \rho (1 - \rho)]^2 - 2 \text{Tr} \rho^2 (1 - \rho)^2}, \quad (5)$$

其中 G_{eff} 是有效强度， $G_{\text{eff}} = -\frac{\Delta^2}{E_{\text{pair}}}$ (E_{pair} 是对能)。如果要得到确定粒子数的波函数，需要使用粒子数投影，中子数投影算符可以写为^[1, 14, 17]

$$\hat{P}_N = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\phi_N e^{i\phi_N (\hat{N} - N)}, \quad (6)$$

质子也有类似的表达式。总之，通过任意一个波函数 $|\Psi\rangle$ 可以获得 N 和 Z 的本征态 $|\Phi(N, Z)\rangle$ ^[6]

$$|\Phi(N, Z)\rangle = \hat{P}_N \hat{P}_Z |\Psi\rangle, \quad (7)$$

从 HFB 或 HFBLN 计算得到的波函数开始，通过使用 $\hat{P}_N \hat{P}_Z$ 可以构造一个具有明确粒子数的波函数，并计算出能量：

$$E^N[\rho, \kappa] = \frac{\langle \Phi | H P^N | \Phi \rangle}{\langle \Phi | P^N | \Phi \rangle} = \frac{\int d\phi \langle \Phi | H e^{i\phi(\hat{N} - N)} | \Phi \rangle}{\int d\phi \langle \Phi | e^{i\phi(\hat{N} - N)} | \Phi \rangle}, \quad (8)$$

由于波函数 $|\Psi\rangle$ 是经过变分求解 HFB 或 HFBLN 的方程得到的，这个投影计算，被称为变分后投影。

3 讨论

在这个工作中，我们主要运用能量密度泛函理论，讨论对相互作用对原子核形变的影响。使用的参数是 SkM* 参数^[18]，计算程序采用了 HFBTHO(v2.00d)^[19]。在本工作的不同对关联处理 (HFB/HFBLN) 的密度泛函计算中，中子的对力强度均通过拟合 ^{120}Sn 的经验对能隙 1.245 MeV 得到，而质子的对力强度取为和中子的对力强度相等。在计算中选取 20 个谐振子壳，对窗截断能量为 60 MeV 。为讨论对关联对于结合能和位能曲面计算的影响，我们分别讨论了双幻核、开壳核及超重核。接下来，我们对这些核进行分别讨论。

原则上，对于不同核区，需要拟合不同的对力强度参数。我们在这个工作当中，作为测试，如无特别说明，均采用针对 ^{120}Sn 拟合得到的对力参数。为比较重新拟合对力的效应，我们还使用五点公式^[20] 计算了 ^{48}Cr , ^{56}Fe 的对能隙，见表 1，并根据该数据调整了对力强度，见表 2，并做了相应的对比计算。

$$\Delta^{(5)}(N) = \frac{1}{8} [B(N+2, Z) - 4B(N+1, Z) + 6B(N, Z) - 4B(N-1, Z) + B(N-2, Z)], \quad (9)$$

其中 $B(N, Z)$ 是指一个有 (N, Z) 个粒子的系统的 (负) 结合能。所求核子的中子对能隙，按照五点质量公式需要该核子及其质子数相同中子数前后各两个的核素的结合能来进行计算。质子对能隙有相同的公式。

表 1 根据五点质量公式计算得到的对能隙 单位: MeV

核素	$\Delta^{(5)}(n)$	$\Delta^{(5)}(p)$
^{48}Cr	2.135	2.128
^{56}Fe	1.425	1.572

表 2 拟合的对力强度 单位: MeV

核素		混合对力	体积对力	表面对力	
					中子
^{48}Cr	HFB	中子	-315.0735	-203.2415	-535.8615
		质子	-324.5435	-215.3425	-542.1865
	HFBLN	中子	-297.9245	-192.9615	-521.3045
		质子	-307.8635	-202.5665	-526.5895
^{56}Fe	HFB	中子	-310.8065	-203.6495	-521.8915
		质子	-320.5325	-207.2045	-566.1085
	HFBLN	中子	-279.3585	-179.1055	-501.7825
		质子	-296.0745	-189.1535	-546.1225
^{120}Sn	HFB	中子	-234.8075	-154.6836	-456.2125
		质子	-234.8075	-154.6836	-456.2125
	HFBLN	中子	-231.8148	-146.8323	-455.2522
		质子	-231.8148	-146.8323	-455.2522

3.1 双幻核

我们分别对不同质量区的几个核进行计算分析, 选取了轻核区 ^{16}O 和 ^{40}Ca , 中等质量区 ^{100}Sn , 以及重核区 ^{208}Pb , 相应的计算结果分别见图 1~4。在这些图中, 我们测试了几种不同的对力如体积对力、表面对力及混合对力, 并展示了几种不同对关联近似的结果, 包括 HFB 近似、HFBLN 以及在 HFBLN 基础上做粒子数投影的 PLN 计算, 也对比了不包含对关联的 HF 近似。

在图 1 展示了 ^{16}O 中使用不同对关联处理的结果, 其中 (a), (b) 和 (c) 分别是使用混合对力、体积对力及表面对力的结果。这些双幻核基态均为球形, 因此这些计算得到的位能面的最小点都在 $\beta_{20} = 0$ 处。首先可以对比一下 HF 和 HFB 近似, 对双核核 ^{16}O , 在球形及球形附近的情况下 HFB 得到的对能隙为 0, 等同于 HF 计算, 因此两个能量相同。HFBLN 近似下, 对能隙均不为 0, 所以在球形附近, HFBLN 由于对关联的影响, 能量要低于 HF 和 HFB。在 HFBLN 的基础上进一步做投影 (PLN), 可以进一步得到关联能, 使得能量进一步降低。此外, 可以明显地发现, 在位能面最小值, 也就是球形形状附近, PLN 的能量相比于其它对关联来讲, 降低得更多, 这与文献 [14] 结果一致。观察这几个位能曲面, 也可以发现, HF 的最小点最明显, 而 HFB、HFBLN、PLN 得到的曲线的最小点附近升高的趋势逐渐变缓。

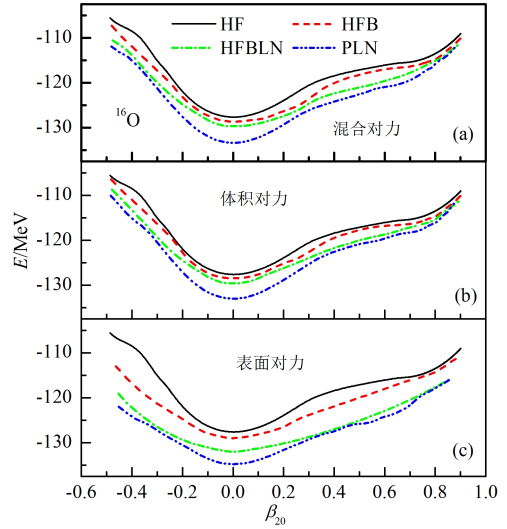


图 1 (在线彩图) ^{16}O 的势能曲线图

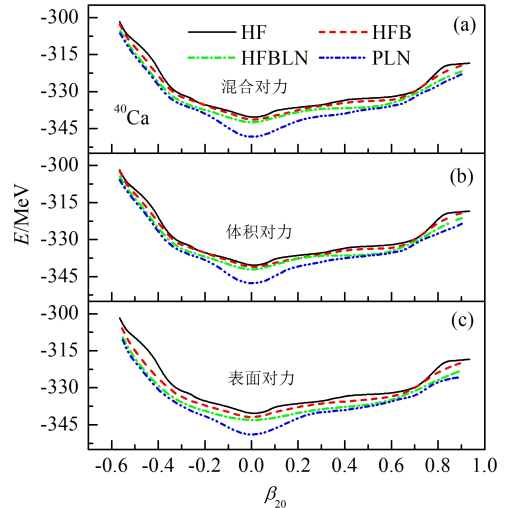


图 2 (在线彩图) ^{40}Ca 的势能曲线图

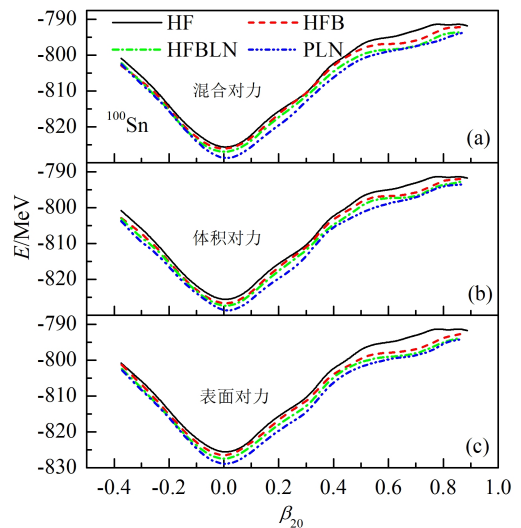
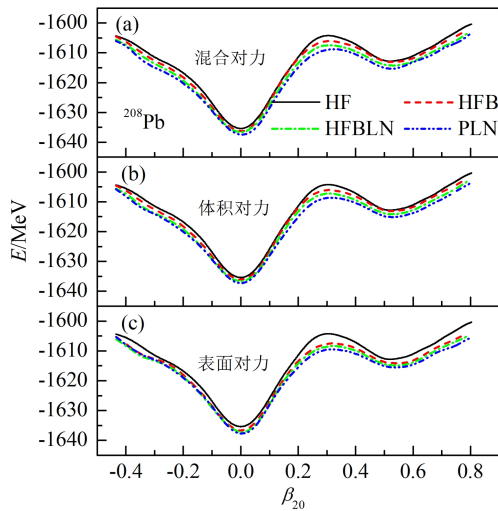


图 3 (在线彩图) ^{100}Sn 的势能曲线图

图 4 (在线彩图) ^{208}Pb 的势能曲线图

比较不同对力的计算可以发现，体积对力和混合对力的结果比较接近，而表面对力的结果和它们有明显的区别。无论是 HFB 还是 HFBLN 的结果，表面对力的势能曲线都要低于混合对力与体积对力的势能曲线，而混合对力的势能曲线又低于体积对力的势能曲线。

对于 ^{40}Ca 而言，在图 2 中同样地可以看出，在表面对力形式下，HF、HFB、HFBLN 之间有明显的差距。而混合对力和体积对力形式下，在 $\beta_{20} = 0$ 的附近才看到明显的区分。势能曲线的情况是 HFBLN 要低于 HFB，而 HFB 的低于 HF 的。

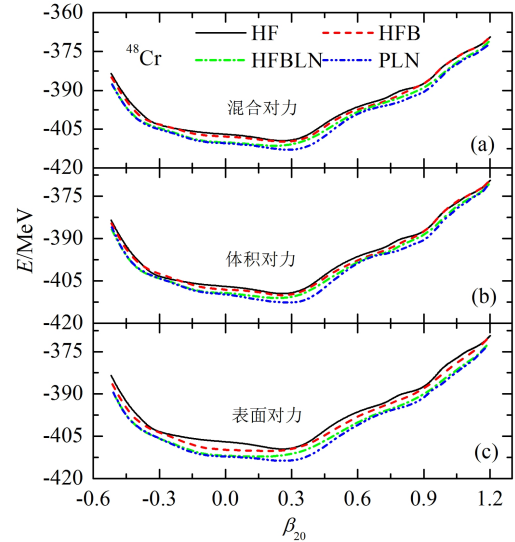
从图 1 的 ^{16}O 、图 2 的 ^{40}Ca 到图 3 的 ^{100}Sn ，对比后可以发现，随着质量数的增加，由轻核到中等质量核的原子核势能曲线在不同的对关联处理方法上的差距越来越不明显，混合对力、体积对力与表面对力之间的差距越来越小。HF、HFB、HFBLN 之间也在缩小差距。

此外，对于重核 ^{208}Pb ，从图 4 可以看到，势能曲线有两个极小点，最低点的位置仍是 $\beta_{20} = 0$ 处。在两个较小点之间的位垒，HFB、HFBLN、PLN 相比于 HF 的结果，逐渐降低。表面对力的结果相对于混合对力及体积对力的位垒降低得更加明显一些。

3.2 开壳核

在表 2 可以看到，由于核子数相近，Cr、Fe 核区的对力强度相近，与 ^{120}Sn 拟合得到的对力强度相比偏大。接下来，我们使用了重新拟合的 ^{48}Cr 的对力强度计算分析了典型的形变核 ^{48}Cr ，结果见图 5。整体来讲，趋势和幻数核的类似，也可以看到，不同对关联处理方法，形变极小点的位置比较接近，而形变极小点的软度 (softness) 有较明显的差别，HFB、HBLN 的势能面形变极小点均偏软，而 PLN 的势能面极小点又比 HFB

及 HFBLN 的偏硬。不同的对力形式下，不同对关联近似在使用体积对力的条件下它们之间的势能曲线的差距最小，其次是混合对力、表面对力的差距最大；在同一种对关联处理中表面对力的势能曲线最低，其次是混合对力的，最高的是体积对力的势能曲线。

图 5 (在线彩图)形变核 ^{48}Cr 的势能曲面图

我们又根据重新拟合的 ^{48}Cr 和 ^{56}Fe 的对力强度计算了 Cr 和 Fe 的同位素链的结合能。从图 6 可以看出，对于同位素链而言，随着中子数的增加，原子核 Cr 和 Fe 的结合能增加的速率随着靠近中子滴线而逐渐减小。不同对处理的结果在这幅图中并不明显，因此我们进一步给出了结合能的理论值和实验值的差值，见图 7。对于结合能的差值而言，我们对比了两种不同的对力强度，分别是根据 ^{120}Sn 与根据 ^{48}Cr 调整的对力强度的比较，以及根据 ^{120}Sn 与 ^{56}Fe 调整的对力比较。从图中可以看出，基于 ^{120}Sn 的对力强度下的结合能差的绝对值要普遍地小于 ^{48}Cr 和 ^{56}Fe 对力强度下的结合能差的绝对值。

在此基础上我们又计算了 Cr 和 Fe 同位素链的双中子分离能，发现在实验上幻数核及其附近核素的双中子分离能下降的趋势都比较平滑，没有发生较为明显的突变，理论值也是相似的变化。尤其是包含对关联之后，对该分离能趋势的描述更加合理。如图 8 所示。

从结合能的理论值和实验值的差值上分析可以看出，HF 的情况起伏变化较大。可以看到，HFB、HFBLN、PLN 相较于 HF 的结果，降低了 4~18 MeV，其中降低最多的是 PLN 的能量，HFBLN 的结果和 PLN 的结果比较接近。也可以看到，HFB、HFBLN、PLN 的曲线相对于 HF 的，并不是简单的平移，有些地方，尤其是在幻数出现的附近，如中子数为 20，有比较大的变化，

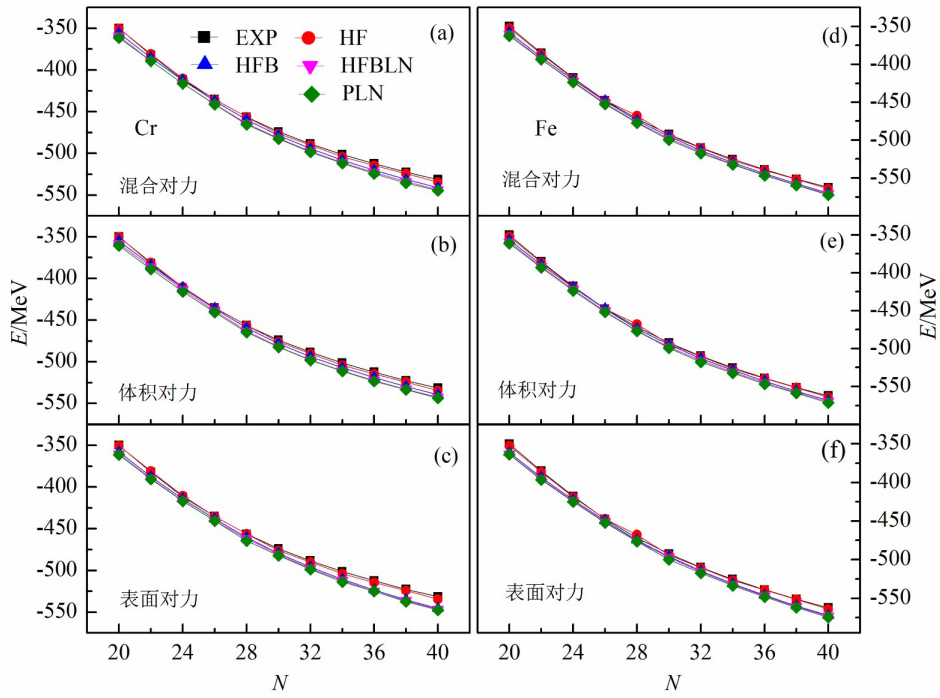


图 6 (在线彩图)Cr 和 Fe 的结合能随中子数的变化

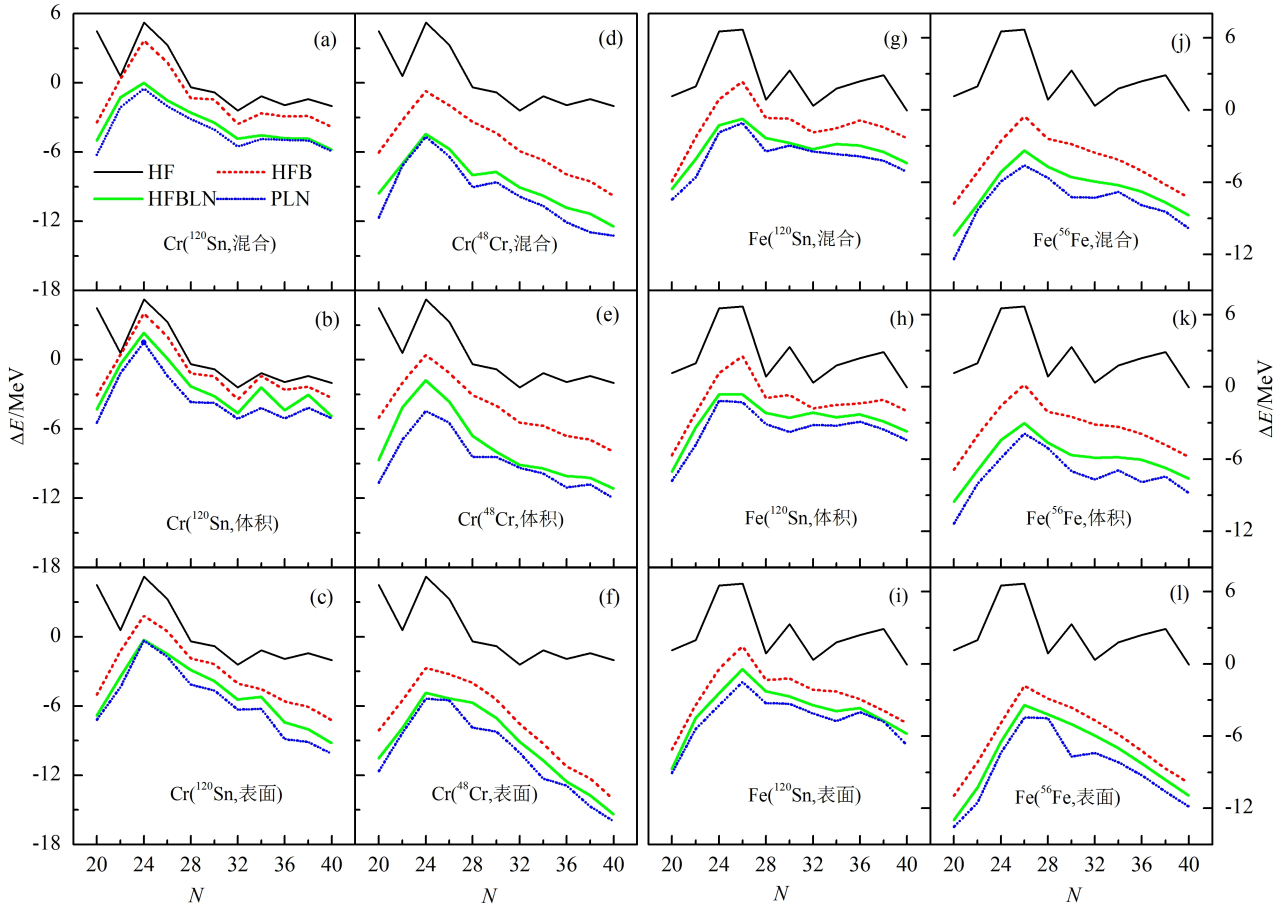


图 7 (在线彩图)Cr 和 Fe 的结合能差值 (理论值减去实验值) 随中子数的变化

差值如果小于零意味着理论预期比实验结果更加束缚。图中括号标注“¹²⁰Sn”，“⁴⁸Cr”，“⁵⁶Fe”，指的是使用根据这几个核素调整的对力强度参数。“混合”、“体积”、“表面”，分别指使用了混合、体积、表面对力。

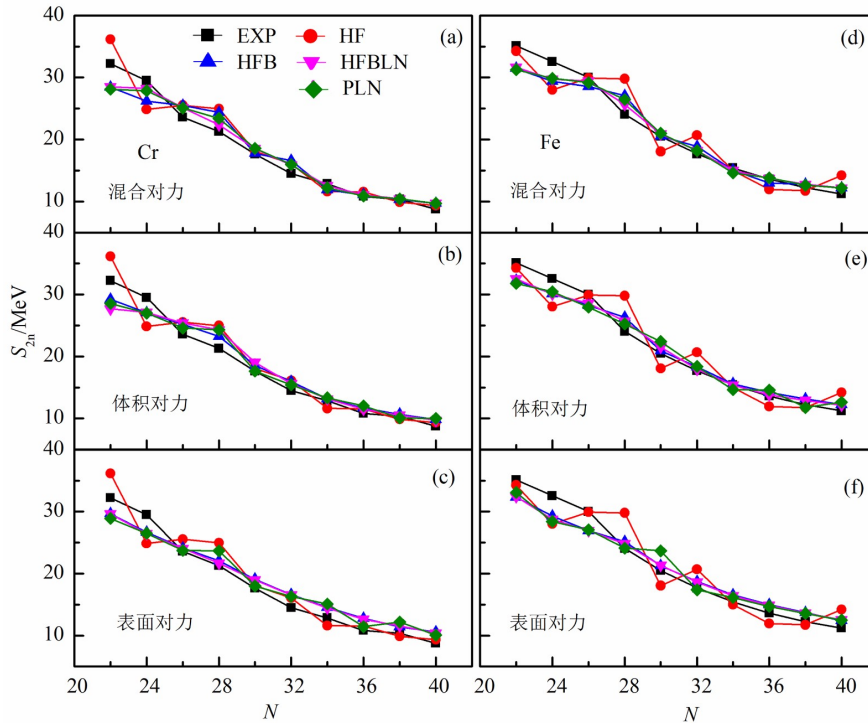


图 8 (在线彩图) 根据 ^{48}Cr 和 ^{56}Fe 对力强度理论计算和实验值得到的 Cr 和 Fe 双中子分离能

这说明确对关联的引入对于基态结构影响较大，影响了形变组态。对于同一种处理方式，混合对力和体积对力的结合能差的绝对值要小于表面对力的结合能差的绝对值，更加接近于实验值，似乎混合对力和体积对力的描述效果优于表面对力。

3.3 超重核

对可能的超重稳定岛中心的核素 ^{298}Fl ，质子、中子都处于闭壳，我们也计算了它的位能面，见图 9。 ^{298}Fl 的所有计算的位能面的最低点在 $\beta_{20} = 0$ 处，在较大形变处会出现另外一个极小点。整体结果，包括对关

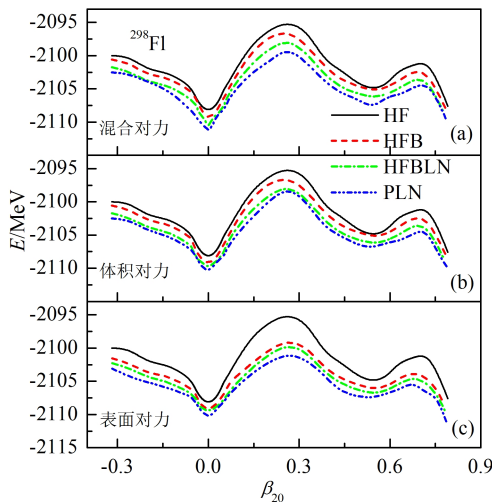


图 9 (在线彩图) 超重核 ^{298}Fl 的势能曲面图

联带来的修正能量均和图 4 的 ^{208}Pb 类似。球形极小点时，HFB 近似由于对能隙为 0，退回了 HF 近似，而在形变较大时对能隙不为 0，带来了一定的关联能量，并使得位垒降低，且在使用表面对力的时候降低得最多。

4 结论

本文主要测试了不同对关联处理方法，HFB、HFBLN、PLN，其中，PLN 的处理方法微观基础更好，可以近似地达到变分前投影的精度 [14]。在 Skyrme 能量密度泛函中，由于对力是另外引入的，其形式有较大的不确定性，我们也检验了体积对力、表面对力、混合对力的效果。

我们首先使用 Skyrme 能量密度泛函理论对双幻核 ^{16}O ， ^{40}Ca ， ^{100}Sn 和 ^{208}Pb 的势能曲线进行了计算研究。它们的基态都是球形，附近的 HFB 对能隙为 0，HFB 近似退化为 HF 近似。而在同一种对力情形，HFB、HFBLN、PLN 带来的关联能量一般相较于 HF 计算逐渐增加，势能曲面逐渐降低。比较不同对力选取可以发现，在 HFB、HFBLN、PLN 中使用表面对力带来的对关联能量最大，势能面也降低得最明显；而随着质量数的增加，混合对力和体积对力计算得到的势能曲线与表面对力情况下的势能曲线的差距在逐步减小。

然后我们计算了形变核 ^{48}Cr 。和双幻核的位能面一样，HFB、HFBLN、PLN 带来的关联能逐渐增多。

并且,形变极小点的软度有明显差别, HF 到 HFB、HFBLN 逐渐变软,而似乎 PLN 极小点软度类似于 HF,也有比较明显的形变极小点,这也许也证明了 PLN 的优越性。不同的对力形式下,可以看到 HF 与 HFB、HFBLN 之间有明显的区分,使用体积对力的 HF 势能曲面与 HFB、HFBLN 之间差距最小,其次是混合对力和表面对力。而表面对力的势能曲线最低,其次是混合对力、体积对力的势能曲线,也说明了表面对力情况下 HFB、HFBLN、PLN 的对关联能最大。同时我们也计算了 Cr 和 Fe 的同位素链,得到了结合能的理论值。通过结合能的理论值与实验室的差值分析得到,对关联在结合能的理论计算中起到了重要作用,可以带来几个 MeV 的修正能量。

我们也计算了超重核 ^{298}Fl 的势能曲面,它也是一个双幻核,所有计算得到的基态为球形,也得到了一个形变极小点,它的整体图像和 ^{208}Pb 类似,我们也发现对关联的出现降低了位垒的高度,尤其是表面对力降低的最为明显。

总体而言,对关联是原子核内最重要的基本关联之一,对处理的不同方式带来的对关联能还是有比较大的差别。PLN 方法上更加精确,带来的对关联能最多,但是由于在参数拟合的时候通常没有包含该部分对关联,在本文的计算中,PLN 对结合能的描述却并不理想,可以在今后参数拟合的时候进一步改进。而本文的计算也无法得出哪种对力处理方式更加合理,不过在研究中发现,如果使用表面对力,则 HFB、HFBLN、PLN 带来的对关联的影响会更加显著。

参考文献:

- [1] RING P, SCHUCK P. The Nuclear Many-Body Problem[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1980.
- [2] EGIDO J L. *Phys Scr*, 2016, 91: 073003.
- [3] DOBACZEWSKI J, NAZAREWICZ W, STOITSOV M V. *Eur Phys J A*, 2002, 15: 55.
- [4] KORTELAINE M, MCDONNELL J, NAZAREWICZ W, et al. *Phys Rev C*, 2014, 89: 054314.
- [5] DOBACZEWSKI J, FLOCARD H, TREINER J. *Nucl Phys A*, 1984, 422: 103.
- [6] BENDER M, HEENEN P H, REINHARD P G. *Rev Mod Phys*, 2003, 75: 121.
- [7] WANG X B, FRIAR J L, HAYES A C. *Phys Rev C*, 2016, 94: 034314.
- [8] DONG G X, WANG X B, LIU H L, et al. *Phys Rev C*, 2013, 88: 024328.
- [9] VAUTHERIN D, BRINK D M. *Phys Rev C*, 1972, 5: 626.
- [10] DOBACZEWSKI J, NAZAREWICZ W, WERNER T R, et al. *Phys Rev C*, 1996, 53: 2809.
- [11] STOITSOV M V, DOBACZEWSKI J, KIRCHNER R, et al. *Phys Rev C*, 2007, 76: 014308.
- [12] ANGUIANO M, EGIDO J L, ROBLEDO L M. *Phys Lett B*, 2002, 545: 62.
- [13] CHEN W J, BERTULANI C A, XU F R, et al. *Phys Rev C*, 2015, 91: 047303.
- [14] WANG X B, DOBACZEWSKI J, KORTELAINE M, et al. *Phys Rev C*, 2014, 90: 014312.
- [15] LIPKIN H J. *Ann Phys*, 1960, 9: 272.
- [16] NOGAMI Y. *Phys Rev*, 1964, 134: B313.
- [17] SCHUNCK N, DOBACZEWSKI J, SATULA W, et al. *Comput Phys Comm*, 2017, 216: 145.
- [18] BARTEL J, QUENTIN P, BRACK M, et al. *Nucl Phys A*, 1982, 386: 79.
- [19] STOITSOV M V, SCHUNCK N, KORTELAINE M, et al. *Comput Phys Comm*, 2013, 184: 1592.
- [20] MOLLER P, NIX J R. *Nuclear Physics A*, 1992, 536: 20.

Effect of Different Pairing Correlations on the Description of Nuclear Deformations within Energy Density Functional Framework

SHI Haoqiang^{1,2}, WANG Xiaobao^{2,†}, DONG Guoxiang², WANG Hualei^{1,†}

(1. School of Physics (School of Microelectronics), Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. School of Science, Huzhou University, Huzhou 313000, Zhejiang, China)

Abstract: In this paper, using the Skyrme energy density functional theory, we have investigated the effect of different treatment of pairing correlations, *e.g.*, Hartree-Fock-Bogoliubov (HFB), Hartree-Fock-Bogoliubov Lipkin-Nogami (HFBLN), and particle number projection on HFBLN, *etc.*, on the potential energy surface (PES) calculations and ground-state energy. We also tested the effect of different pairing force, such as volume-pairing, surface-pairing, mixed-pairing force. We studied typical doubly-magic nuclei, such as ^{16}O , ^{40}Ca , ^{100}Sn and ^{208}Pb , which have spherical shape in their ground states. We studied the typical deformed nucleus ^{48}Cr , and the binding energies of Cr and Fe isotopes. The PES of superheavy nucleus ^{298}Fl is also studied. It is learned that the deformed minimum is not changed much by different pairing correlations. The pairing correlations bring about several MeV to the total binding energies. The correlation energy brought by HFBLN is more than that by HFB approximation, and that by projection method increases further. The softness of the deformed minimum is also changed by pairing correlations. The one by HFBLN is softer than the one by HFB. However, the deformed minimum become explicit by projection method. Pairing correlation can lower down the barrier in the PES. In the same approximation of the pairing correlation, PES results calculated by mixed-pairing and volume-pairing force are similar. It seems that in the PES calculations, the surface pairing force can bring more pairing correlations, thus the effect of surface pairing force is larger than that of volume- and mixed-pairing forces.

Key words: energy density functional; potential energy surface; pairing correlation

Received date: 13 Jan. 2020; **Revised date:** 15 Feb. 2020

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (U1732138, 11605054, 11505056, 11975209, 11305108, 11790325, 11947410)

† **Corresponding author:** WANG Xiaobao, E-mail: xbwang@zjhu.edu.cn; WANG Hualei, E-mail: wanghualei@zzu.edu.cn.