

文章编号: 1007-4627(2010)04-0416-05

核子-核子碰撞截面的参数化公式*

魏慧玲¹, 于勉², 马春旺^{1, #}

(1 河南师范大学物理学系, 河南 新乡 453007;

2 新乡医学院生命科学技术系, 河南 新乡 453003)

摘要: 核子-核子碰撞截面(σ_{NN})是描述原子核反应模型中的重要物理量。核子-核子碰撞截面包括质子-质子碰撞截面(σ_{pp})、中子-中子碰撞截面(σ_{nn})和中子-质子碰撞截面(σ_{np}), 它们随着核子能量与核物质密度的改变而变化。人们在目前研究中提出了多种核子-核子碰撞截面关于能量和核物质密度的参数化公式, 通过计算 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 的完全反应截面, 比较了不同入射能量下使用各种核子-核子碰撞截面参数化公式对 ^{12}C 完全反应截面的影响。

关键词: 核子-核子碰撞截面参数化公式; 介质中的核子-核子碰撞截面; 核反应模型

中图分类号: O571.41⁺3; O571.42; O571.1

文献标识码: A

1 引言

介质中的核子-核子碰撞截面(σ_{NN})是中能重离子反应中的一个有趣的话题。中能的核子-核子反应从实验上为研究 $(2-3)\rho_0$ (ρ_0 是正常核物质的饱和密度, 一般取 $0.15-0.19 \text{ fm}^{-3}$)密度的核物质的性质提供了独特的研究手段, 也为研究强子在核物质中的性质提供了可能。通过反应的初态和末态产物, 利用输运模型可以模拟反应的整个过程和推导中能反应的一些性质。中能反应中, 平均场效应和两体相互作用在碰撞体系的动力学演化过程中起到同等重要的作用, 对两者需给予同等对待, 并且要合理地处理泡利阻塞效应。在核反应的微观理论模型中, 如 Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck (BUU) 模型^[1-6]和量子分子动力学模型 (quantum molecular dynamics, 简称 QMD)^[7-16], 除了平均场效应, 介质中的核子-核子碰撞截面(σ_{NN}^*)也是重要的组成部分。在核反应的宏观模型和几何模型中, 如核散射模型^[17]、Glauber 模型及其各种扩展模型^[6, 18-26]和擦碎模型^[27-34], 核子-核子碰撞截面也是重要的输

入量, 对估计各种碰撞截面起到关键的作用。

核子-核子碰撞截面随着入射能量和物质密度的改变会发生变化。许多研究组对核子-核子碰撞截面的参数化做过研究, 并总结出了多种参数化公式^[16, 24, 35-45]。本文将列出这些参数化公式, 并将对它们进行简单的比较。

2 核子-核子碰撞截面的参数化公式

核子-核子碰撞截面的参数化包含自由空间的核子-核子碰撞截面 σ_{NN} 对入射能量的参数化和介质中的核子-核子碰撞截面 σ_{NN}^* 对入射能量和介质密度的参数化, 其中一些 σ_{NN}^* 的参数化公式以 σ_{NN} 的参数化公式为基础进行了改进。这些参数化公式分别适合不同的能量区间, 因而在不同能量的实验中获得应用。

2.1 自由空间核子-核子 σ_{NN} 参数化公式

2.1.1 Cugnon 参数化公式

Cugnon 等人总结了当时已有文献中关于自由空间中核子-核子碰撞截面的参数化公式^[35], 形式如下:

* 收稿日期: 2010-03-07; 修改日期: 2010-07-27

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10905017); 河南省高校科技创新团队资助项目(2010IRTSTHN002)

作者简介: 魏慧玲(1978—), 女(汉族), 河南南乐人, 助教, 硕士, 从事原子核反应实验和理论相关研究;

E-mail: htuwling@126.com

通讯联系人: 马春旺, E-mail: machunwang@126.com

$$\sigma_{nn, pp}(p_{lab}) = \begin{cases} 34 \left(\frac{p_{lab}}{0.4} \right)^{-2.104}, & 0.1 < p_{lab} < 0.4 \\ 23.5 + 1000 (p_{lab} - 0.7)^4, & p_{lab} < 0.8 \\ 23.5 + \frac{24.6}{1 + \exp\left(-\frac{p_{lab} - 1.2}{0.1}\right)}, & 0.8 < p_{lab} < 1.5 \\ 41 + 60(p_{lab} - 0.9)\exp(-1.2p_{lab}), & 1.5 < p_{lab} < 5 \end{cases} \quad (1)$$

$$\sigma_{np}(p_{lab}) = \begin{cases} 6.3555 p_{lab}^{-3.2481} \exp\{-0.377 [\ln(p_{lab})]^2\}, & 0.05 < p_{lab} < 0.4 \\ 33 + 196 |p_{lab} - 0.95|^{2.5}, & p_{lab} < 1 \\ 24.2 + 8.9 p_{lab}, & 1 < p_{lab} < 2 \\ 42, & p_{lab} > 2 \end{cases} \quad (2)$$

其中, p_{lab} 是动量, 单位为 GeV/c , σ 单位为 mb 。

2.1.2 CG 参数化公式

Charagi 和 Gupta 拟合了不同能量下 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 实验数据, 得到形式如下的核子-核子碰撞截面参数化公式^[24]:

$$\begin{aligned} \sigma_{pp, nn} &= 13.73 - 15.04\beta^{-1} + 8.76\beta^{-2} + 68.67\beta^4, \\ \sigma_{np} &= -70.67 - 18.18\beta^{-1} + 25.26\beta^{-2} + 113.85\beta^4, \\ \beta &= \frac{v}{c} = \sqrt{1.0 - \frac{1.0}{(1.0 + E_{lab}/931.5)^2}}. \end{aligned} \quad (3)$$

在实验室系中, (3) 式在 $10 \text{ MeV} < E_{lab} < 1 \text{ GeV}$ 能量范围内均适用。当 $E_{lab} < 10 \text{ MeV}$ 时, σ_{np} 也可以取下式:

$$\sigma_{np} = \frac{2.73}{(1 - 1.0553E_n)^2 + 0.35E_n} + \frac{17.63}{(1 + 0.334E_n)^2 + 6.8E_n}, \quad (4)$$

其中, $E_n = 938 \beta^2/2$ 是实验室系能量, 单位 MeV/u 。

2.2 介质中的核子-核子碰撞截面 σ_{NN}^* 参数化公式

2.2.1 LM 基于微观模型的 σ_{NN}^* 参数化公式

基于 Bonn 介子交换模型和 Dirac-Brueckner 方法, Li 和 Machleidt 两人得出了介质中的核子-核子碰撞截面^[36, 37], 其形式如下:

$$\sigma_{nn, pp}(E_{lab}, \rho) = [23.5 + 0.00256(18.2 - \sqrt{E_{lab}})^{4.0}] \times \frac{1.0 + 0.01667E_{lab}^{1.05}\rho^3}{1.0 + 9.704\rho^{1.2}},$$

$$\sigma_{np}(E_{lab}, \rho) = [31.5 + 0.092 |20.2 - E_{lab}^{0.3529}|] \times \frac{1.0 + 0.0034E_{lab}^{1.01}\rho^2}{1.0 + 21.55\rho^{1.34}}, \quad (5)$$

其中, E_{lab} 为弹核入射能量, 单位为 MeV ; ρ 为介质密度, 单位为 $\text{nucleon}/\text{fm}^{-3}$; σ 单位为 mb 。LM 参数化公式适用的范围为能量小于 300 MeV 和 $\rho < 2\rho_0$ 。

2.2.2 Cai 的 σ_{NN}^* 参数化公式

结合 Charagi 和 Gupta 的自由空间 σ_{NN} 参数化公式(3)和 LM 公式(4), Cai 等人提出了新的 σ_{NN}^* 参数化公式^[38]:

$$\begin{aligned} \sigma_{pp, nn}^* &= \sigma_{pp, nn} \frac{1.0 + 7.772E_{lab}^{0.06}\rho^{1.48}}{1.0 + 19.01\rho^{1.46}}, \\ \sigma_{np}^* &= \sigma_{np} \frac{1.0 + 20.88E_{lab}^{0.04}\rho^{2.02}}{1.0 + 35.86\rho^{1.90}}, \end{aligned} \quad (6)$$

其中, E_{lab} 为弹核入射能量, 单位为 MeV ; $\rho = 0.17 \text{ fm}^{-3}$; σ 单位为 mb 。在之后的研究中, (5) 式被许多研究工作使用。

2.2.3 Warner 的 σ_{NN}^* 参数化公式

Warner 等人分析了 Cai 的参数化公式, 指出式(6)中的密度是一个全局变量, 而与反应区域的密度并没有进行细致关联, 考虑到反应中存在泡利阻塞效应, 他们提出了一个形式简单的 σ_{NN}^* 参数化公式^[41]:

$$\sigma_{NN}^* = \sigma_{NN} P\left(\frac{E_{lab}^i}{E}\right), \quad P(x) = 1 - \left(\frac{7x}{5}\right), \quad (7)$$

其中, E_F 是靶核的费米能, 通过费米动量和靶核局域密度之间的关系 $k_F(r) = [3\pi^2 \rho_t(r)/2]^{1/3}$, 费米能和密度关联起来。

2.2.4 Kohno 的 σ_{NN}^* 参数化公式

利用非相对论 Brueckner 方法, Kohno 等人得出了 σ_{NN}^* 的参数化公式^[42], 其形式如下:

$$\sigma_{pp, nn}^*(E_{lab}, \rho) = a_1(1 + a_2\sqrt{\rho} + a_3\rho) + \frac{a_4(1 + a_5\rho)(\sqrt{E_{lab}/E_0} + a_6 + a_7\sqrt{\rho})}{E_{lab}/E_0 + (a_8 + a_9\sqrt{\rho} + a_{10}\rho)\sqrt{E_{lab}/E_0} + a_{11} + a_{12}\sqrt{\rho}},$$

$$\sigma_{np}^*(E_{lab}, \rho) = b_1(1 + b_2\sqrt{\rho} + b_3\rho) + \frac{b_4(1 + b_5\rho)(\sqrt{E_{lab}/E_0} + b_6 + b_7\sqrt{\rho})}{\sqrt{E_{lab}/E_0} [E_{lab}/E_0 + (b_8 + b_9\sqrt{\rho} + b_{10}\rho)\sqrt{E_{lab}/E_0} + b_{11} + b_{12}\sqrt{\rho}]},$$

(8)

$(a, b)_{1, 2, \dots, 12}$ 是参数, $E_0 = 100$ MeV, E_{lab} 为实验室系入射能量, 单位为 MeV, ρ 为介质密度, 单位为 nucleon/fm⁻³。参数化公式中, 针对考虑有效质量和不考虑有效质量两种不同的情况, (a, b) 有两套不同的参数。该参数化公式适用的能量范围是 $30 \text{ MeV} \leq E_{lab} \leq 200 \text{ MeV}$ 。

2.2.5 约化的 σ_{NN}^* 参数化公式

在一些研究工作中, 经常用到一种约化的 σ_{NN}^* 参数化公式^[39, 43, 44], 形式如下:

$$\sigma_{NN}^* = \left[1 - \left(\frac{\eta\rho}{\rho_0}\right)\right] \sigma_{NN},$$

$$\eta = \frac{\sigma_{NN}^*}{\sigma_{NN}^{free}} = \left(\frac{\mu_{NN}^*}{\mu_{NN}}\right)^2,$$

(9)

η 是与能量相关的约化系数。

$$\eta = \begin{cases} 0.2, & E_{lab} < 150 \text{ MeV/u} \\ 0, & 150 \text{ MeV/u} < E_{lab} < 200 \text{ MeV/u} \\ -0.2, & 200 \text{ MeV/u} < E_{lab} < 400 \text{ MeV/u} \\ -0.4, & E_{lab} > 400 \text{ MeV/u} \end{cases}$$

(10)

2.3 同位旋平均的 σ_{NN}^* 参数化公式

在弹核或者靶核具有较大的同位旋时, 需要考虑同位旋对核子-核子碰撞截面的影响。在文献 [24, 45] 中, 提出了同位旋相关的 σ_{NN}^* 参数化公式:

$$\bar{\sigma}_{NN}^* = \frac{N_P N_T \sigma_{nn} + Z_P Z_T \sigma_{pp} + (N_P Z_T + N_T Z_P) \sigma_{np}}{A_P A_T},$$

(11)

σ_{NN} 是自由空间的核子-核子碰撞截面。

2.4 几种参数化公式的简单比较

为了对这些参数化公式进行比较, 图 1 分别给出了从 0 MeV 到 1 GeV 范围内自由空间、Cai.、

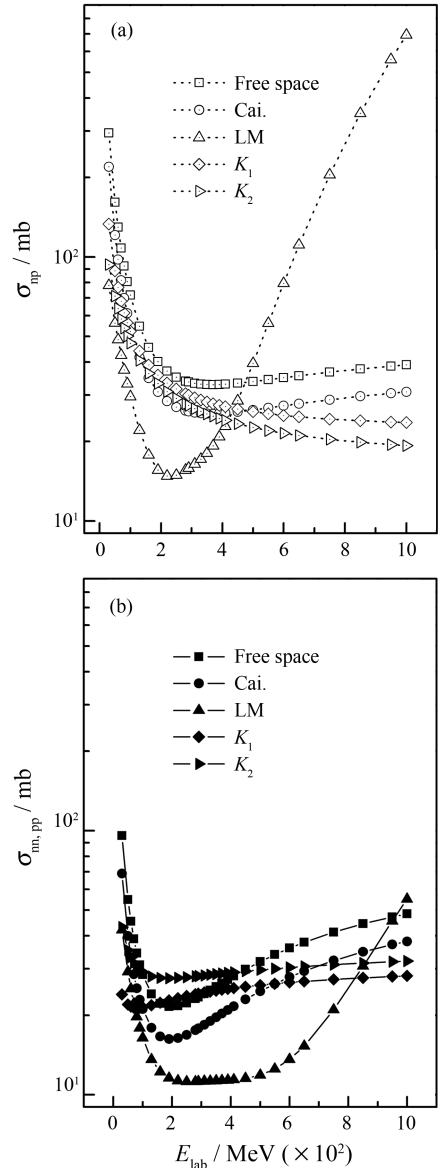


图 1 几个核子-核子碰撞截面参数化公式在不同实验室系能量下的比较

(a) 中子-质子相互作用截面, (b) 质子-质子(中子-中子)相互作用截面; 介质密度取 $\rho = 0.17 \text{ fm}^{-3}$ 。

LM 和 Kohno 参数化公式的曲线(此时, 没有考虑其适用范围)。为了方便标记, 在 Kohno 参数化公式中, 当 (a, b) 取不同的参数时, 我们分别记位 K_1 和 K_2 , 其中, K_1 和 K_2 分别代表不考虑和考虑有效质量修正的两套参数。计算时, 取介质密度为 0.17 fm^{-3} 。从图 1 中可以看出, 在中能区域, 即 50—300 MeV 区间, 不同的 $\sigma_{nn, pp}^*$ 参数化值差别较大。对于 σ_{np}^* 来说, 能量小于 20 MeV 时, 不同的 σ_{np}^* 的参数化公式的值差别较大, 能量大于 20 MeV 小于 400 MeV 时, 除了 LM 参数化公式被大幅压低外, 其它参数化公式的值差别不大。由于 LM 公式适用范围为能量小于 300 MeV, 其曲线在能量大于 300 MeV 后变得不可靠, 与其它的参数化公式曲线显出很大的差别。Kohno 参数化公式中, 取考虑有效质量修正和不考虑有效质量修正的差别并不是很大, 但是相对于不考虑有效质量的参数化公式, 有效质量修正参数化公式的 σ_{np}^* 值被压低, 而有效质量修正公式的 $\sigma_{nn, pp}^*$ 被抬升。

为了在模型中比较这些介质中的核子-核子碰撞截面参数化公式的值, 我们把参数化公式代入到统计擦碎模型中, 计算了不同入射能量下 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 完全碰撞截面的值。图 2 给出了计算的结果。其中, 空心点是实验测量结果, 数据取自文献[41]。从计

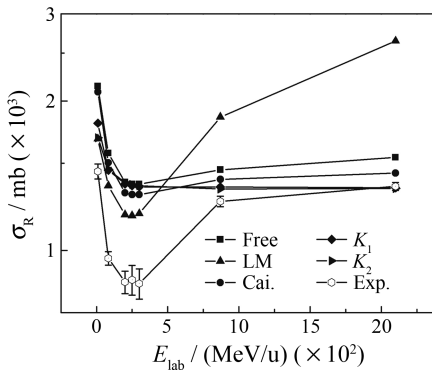


图 2 不同能量下 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 完全碰撞截面的统计擦碎模型计算结果

算结果看, 统计擦碎模型计算出的完全碰撞截面结果比实验结果偏大, LM 参数化公式在入射能量大于 300 MeV/u 时不适用, 其结果与实验测量趋势不符合。其它参数化公式在整个能量范围内与实验结果趋势相符合。 K_1 和 K_2 参数化公式计算的完全碰撞截面差别不大。4 个参数化公式的计算结果中, 相对于自由空间的核子-核子碰撞截面参数化公式,

其余参数化公式计算结果都有压低, LM 参数化公式计算结果最小。

3 总结和展望

中能区核反应由于反应机制复杂, 是检验核反应理论的良好工具。在核反应理论中, 核子-核子碰撞截面是重要的输入量。本文总结了目前文献中的核子-核子碰撞截面关于能量和密度的参数化公式, 并对其中的几个参数化公式进行了比较。由于核子-核子碰撞截面是理论模型模拟核反应的重要输入量, 选取合适的参数化公式对理论分析具有重要的作用。本文中仅对这些参数化公式进行了简单比较, 将来我们将通过理论模型并结合实验数据对这些参数化公式进行分析, 检验这些参数化公式的可靠性。

参考文献 (References):

- [1] Bertsch G F, Kruse H, Gupta S D. Phys Rev, 1984, **C29**: 673.
- [2] Molitoris J J, Hoffer J B, Kruse H, *et al.* Phys Rev Lett, 1984, **53**: 899.
- [3] Gale C, Berstch G F, Gupta S D. Phys Rev, 1987, **C35**: 1666.
- [4] Li B A. Phys Rev, 1993, **C48**: 2415.
- [5] Li B A, Gross D H E. Nucl Phys, 1993, **A554**: 257.
- [6] Cai X Z, Zhang H Y, Shen W Q, *et al.* Phys Rev, 2002, **C65**: 024610.
- [7] Aichelin J. Phys Rep, 1991, **202**: 233.
- [8] Chen L W, Zhang F S, Jin G M. Phys Rev, 1998, **C58**: 2283.
- [9] Li Q F, Li Z X, Mao G J. Phys Rev, 2000, **C62**: 014606.
- [10] Li Z X, Hartnack C, Stöcker H, *et al.* Phys Rev, 1991, **C44**: 824.
- [11] Ma Y G, Shen W Q. Phys Rev, 1995, **C51**: 710.
- [12] Zhang F S, Chen L W, Ming Z Y, *et al.* Phys Rev, 1999, **C60**: 064604.
- [13] Wei Y B, Ma Y G, Shen W Q, *et al.* Chin Phys Lett, 2004, **21**: 629; Phys Lett, 2004, **B586**: 225.
- [14] Liu J Y, Guo W J, Ren Z Z, *et al.* Chin Phys, 2006, **15**: 1738.
- [15] Liu J Y, Guo W J, Xing Y Z. Chin Phys, 2007, **16**: 3305.
- [16] Li B A, Chen L W, Ko C M. Phys Rep, 2008, **464**: 113, and the reference therein.
- [17] Bertulani C A, Campbell C M, Glasmacher T, Comput Phys Commun, 2003, **152**: 317.

- [18] Fang D Q, Shen W Q, Feng J, *et al.* Phys Rev, 2000, **C61**: 064311.
- [19] Fang D Q, Shen W Q, Feng J, *et al.* Eur Phys J, 2001, **A12**: 335.
- [20] Ma Y G, Shen W Q, Feng J, *et al.* Phys Rev, 1993, **C48**: 850.
- [21] Shukla P. Phys Rev, 2003, **C67**: 054607.
- [22] Vitturi A, Zardi F. Phys Rev, 1987, **C36**: 1404.
- [23] Charagi S K, Gupta S K. Phys Rev, 1992, **C46**: 1982.
- [24] Charagi S K, Gupta S K. Phys Rev, 1990, **C41**: 1610.
- [25] Suzuki T, Geisse H, Bochkarev O, *et al.* Phys Rev Lett, 1995, **75**: 3241.
- [26] Lenzi S M, Vitturi A, Zardi F. Phys Rev, 1988, **C38**: 2086.
- [27] Fang D Q, Shen W Q, Feng J, *et al.* Phys Rev, 2000, **C61**: 044610.
- [28] Fang D Q, Feng J, Shen W Q, *et al.* HEP & NP 1999, **23**: 475(in Chinese).
(方德清, 冯军, 沈文庆, 等. 高能物理与核物理, 1999, **23**: 475.)
- [29] Brohm T, Schmidt K H. Nucl Phys, 1994, **A569**: 821.
- [30] Ma C W, Fu Y, Fang D Q, *et al.* Chin Phys, 2008, **B17**(04): 1214.
- [31] Ma C W, Wei H L, Wang J Y, *et al.* Phys Rev, 2009, **C79**: 034606.
- [32] Ma C W, Wei H L, Wang J Y, *et al.* Chin Phys, 2009, **B18**: 4781.
- [33] Ma C W, Wei H L, Liu G J, *et al.* J Phys, 2010, **G37**: 015104.
- [34] Ma C W, Wei H L, Wang H Y, *et al.* Nucl Phys, 2010, **A834**: 581c.
- [35] Cugnon J, L'Hote D, Vandermeulen J. Nucl Instr and Meth, 1996, **B111**: 215.
- [36] Li G Q, Machleidt R. Phys Rev, 1993, **C48**: 1702.
- [37] Li G Q, Machleidt R. Phys Rev, 1994, **C49**: 566.
- [38] Cai X Z, Feng J, Shen W Q, *et al.* Phys Rev, 1998, **C58**: 572.
- [39] Persram D, Gale C. Phys Rev, 2002, **C65**: 064611.
- [40] Ou L, Li Z X, Wu X Z. J Phys, 2008, **G35**: 055101.
- [41] Warner R E, Thompson, Tostevin J A, Phys Rev, 2002, **C65**: 044617.
- [42] Kohno M, Higashi M, Watanabe Y, *et al.* Phys Rev, 1998, **C57**: 3495.
- [43] Zhang Y X, Li Z X, Danielewicz P. Phys Rev 2007, **C75**: 034615.
- [44] Li B A, Chen L W. Phys Rev, 2005, **C72**: 064611.
- [45] Hussien M S, Rego R A, Bertulani C A. Phys Rep, 1991, **201**: 279.

Parameterizations of Nucleus-nucleus Cross Sections^{*}

WEI Hui-ling¹, YU Mian², MA Chun-wang^{1, #}

(1 *Department of Physics, Henan Normal University, Xinxiang 453007, Henan, China;*

(2 *Department of Life Sciences and Technology, Xinxiang Medical University, Xinxiang 453003, Henan, China*)

Abstract: The nucleus-nucleus cross sections(σ_{NN}) include the proton-proton cross section, neutron-neutron cross section, and neutron-proton cross section. σ_{NN} change with the variations of the incident energies and the densities. Some parameterizations of σ_{NN} as a function of incident energy and density have been proposed in the theoretical and experimental study of nuclear reactions. Through the calculation of reaction cross sections of $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ at different energies, the effect of different σ_{NN} parameterizations in the reaction cross sections of ^{12}C are studied.

Key words: parameterization of nucleus-nucleus cross section; in-medium nucleus-nucleus cross section; nuclear reaction model

* **Received date:** 7 Mar. 2010; **Revised date:** 27 Jul. 2010

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10905017); Program for Innovative Research Team(in Science and Technology) in University of Henan Province(2010IRTSTHN002)

Corresponding author: Ma Chun-wang, E-mail: machunwang@126.com