

# 原子核阻止是核子-核子碰撞截面的可能探针\*

刘建业<sup>1,2</sup> 郭文军<sup>2</sup> 赵强<sup>2</sup> 杨艳芳<sup>2</sup> 左维<sup>1,2</sup>

1 (兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

2 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 利用同位旋相关的输运理论,研究了不同中子-质子比的碰撞系统在中能重离子碰撞过程中,原子核阻止的同位旋效应及其对束流能量和碰撞参数的依赖性. 计算表明对于所研究的4个碰撞系统,在从费米能附近到大约150MeV/u的较宽入射能量范围内,近心碰撞的原子核阻止强烈地依赖于核子-核子碰撞截面的同位旋相关性,而对称势对它的影响并不明显. 故原子核阻止是提取介质中核子-核子碰撞截面的灵敏探针. 研究还表明动量相关势对原子核阻止的重要作用是不可忽略的.

**关键词** 原子核阻止 重离子碰撞 同位旋自由度

## 1 引言

随着放射性束流的广泛利用,为通过重离子反应建立原子核同位旋非对称状态方程和提取介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面的知识提供了良好的机遇和条件. 这些知识无论对于了解原子核的性质或是研究宇宙和天体演化过程都是非常重要的.

近年来从理论和实验两个方面选择中能重离子碰撞过程中主要对于对称势  $U^{\text{sym}}$  或者介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面  $\sigma^{\text{iso}}$  灵敏的物理观测量来提取关于  $U^{\text{sym}}$  或者  $\sigma^{\text{iso}}$  的知识,例如李保安等<sup>[1,2]</sup> 建议通过低能区前平衡发射中子-质子比来提取关于对称势的知识,通过椭圆流、横向流和平衡能量来提取介质中核子-核子碰撞截面的知识<sup>[3,4]</sup>. 我们曾建议中能重离子碰撞中多重碎裂的中等质量碎片多重性在某些有选择的束流能量处是提取  $\sigma^{\text{iso}}$  的物理观测量<sup>[5]</sup>. 但总的来说,这方面的研究工作开始不久,对称势和介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面对于核子密度依赖的函数形式和对称势强度等正处于探索阶段,还需要从理论和实验上继续找寻主要对于  $U^{\text{sym}}$  或  $\sigma^{\text{iso}}$  灵敏的物理

2000-04-17 收稿

\* 国家 973 重大基金项目(G2000077400),国家重点基础研究发展规划(G2000077400),中国科学院“百人计划”基金,国家自然科学基金(19775057,19847002,19775020)和中国科学院九五重大课题基金资助

观测量,通过理论计算和实验数据的系统比较来提取关于  $U^{\text{sym}}$  和  $\sigma^{\text{as}}$  的知识.

原子核阻止是描述重离子碰撞中核子动量分布各向异性和决定反应终态产物的重要物理观测量,曾有一些作者<sup>[6-8]</sup>通过重离子碰撞过程中同位旋自由度的平衡过程来研究原子核阻止的性质.随着束流能量的降低,同位旋自由度由不平衡达到平衡,相应的原子核的阻止由透明到完全阻止,两个过程相互关联.但在这里我们感兴趣的是发现了在费米能量以上较宽能区内原子核阻止强烈地依赖于介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面,但在该能区对称势对原子核阻止的影响并不明显.因此我们建议中能重离子碰撞中的原子核阻止是提取介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面知识的一种可能的物理观测量.

## 2 理论模型和有关参数

利用同位旋相关的量子分子动力学(IQMD)来研究原子核阻止.在IQMD中包括密度相关的 Skyrme 势、库仑势、Yukawa 势、泡里势、动量相关作用和对称势.其中 Skyrme 势为

$$U^{\text{Sky}} = \alpha \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right) + \beta \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma \quad (1)$$

$\rho$  是核物质密度,  $\rho_0$  是正常核物质密度. 参数  $\alpha = -390\text{MeV}$ ,  $\beta = 320\text{MeV}$  和  $\gamma = 1.16667$ . 表示有限核表面效应的 Yukawa 势为

$$U^{\text{Yuk}} = t_3 \frac{\exp\{-|r_1 - r_2|/m\}}{|r_1 - r_2|/m} \quad (2)$$

$t_3 = 7.5\text{MeV}$ ,  $m = 0.8$ . 动量相关作用为

$$U^{\text{MDI}} = t_4 \ln^2 [t_5 (\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_2)^2 + 1] \cdot \delta(r_1 - r_2) \quad (3)$$

$t_4 = 1.57\text{MeV}$ ,  $t_5 = 5 \times 10^{-4}\text{MeV}$ . 泡里势为

$$U^{\text{Pauli}} = V_p \left( \frac{\hbar}{p_0 q_0} \right)^3 \exp \left\{ -\frac{(r_i - r_j)^2}{2q_0^2} - \frac{(p_i - p_j)^2}{2p_0^2} \right\} \delta_{p_i, p_j} \quad (4)$$

$\delta_{p_i, p_j} = \begin{cases} +1 & \text{中子-中子或质子-质子} \\ 0 & \text{中子-质子} \end{cases}$ ,  $V_p = 30\text{MeV}$ ,  $p_0 = 400\text{MeV}/c$  和  $q_0 = 5.64\text{fm}$ .

对称势为

$$U^{\text{sym}} = C \frac{(\rho_n(r) - \rho_p(r))}{\rho_0} \tau_3 \quad (5)$$

$\tau_3 = \begin{cases} +1 & \text{中子} \\ -1 & \text{质子} \end{cases}$ , 本文中对称势强度分别取  $C = 0\text{MeV}$  和  $C = 32\text{MeV}$ ;  $\rho_n, \rho_p$  分别是中子、质子密度. 介质中核子-核子碰撞截面为<sup>[9]</sup>

$$\sigma^{\text{med}} = \sigma^{\text{free}} \left( 1 + \lambda \frac{\rho}{\rho_0} \right) \quad (6)$$

$\lambda = -0.2$ ,  $\sigma^{\text{free}}$  是实验的自由核子-核子碰撞截面. 在  $500\text{MeV}$  以下, 中子-质子碰撞截面  $\sigma_{np}^{\text{as}}$  大约是中子-中子(质子-质子)碰撞截面  $\sigma_{nn}^{\text{as}}(\sigma_{pp}^{\text{as}})$  的 3 倍<sup>[10]</sup>, 不考虑同位旋相关性

的核子-核子碰撞截面  $\sigma_{np}^{\text{nisso}} = \sigma_{nn}^{\text{nisso}} = \sigma_{pp}^{\text{nisso}}$ .

### 3 计算结果和讨论

原子核阻止是描述重离子碰撞中核子动量分布各向异性的物理量,具体公式是

$$R = \frac{2}{\pi} \frac{|p_{\perp}|}{|p_{\parallel}|} = \frac{2}{\pi} \frac{\sum_i^A (p_x^2(i) + p_y^2(i))^{1/2}}{\sum_i^A |p_z(i)|}, \quad (7)$$

其中  $p_x(i)$ ,  $p_y(i)$  和  $p_z(i)$  分别是第  $i$  个核子的动量分量,  $A = A_p + A_t$  是碰撞系统质量. 重离子碰撞初期显然  $|p_z(i)| \gg [p_x^2(i) + p_y^2(i)]^{1/2}$ . 随着核子之间碰撞和动量交换的增加, 粒子动量分布由各向异性向各向同性发展, 原子核阻止逐步增加. 这种过程非常灵敏地依赖于束流能量和碰撞参数. 随着束流能量的降低, 原子核阻止逐步增加, 直到费米能区以下将会达到完全阻止.

#### 3.1 原子核阻止是提取介质中核子-核子碰撞截面一种可能的探针

我们利用含有动量相关作用和 Pauli 势的 IQMD 对于 4 个不同中子-质子比的碰撞系统:  $^{80}\text{Zn} + ^{80}\text{Zn}$ ,  $^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$ ,  $^{76}\text{Zn} + ^{40}\text{Ar}$  和  $^{76}\text{Kr} + ^{76}\text{Kr}$  (它们的中子-质子比分别为  $N/Z = 1.67, 1.53, 1.42, 1.11$ ), 在较宽能量范围内 ( $E = 45, 72, 120$  和  $150 \text{ MeV/u}$ ) 计算了重离子对心碰撞在 3 种条件下碰撞系统的原子核阻止  $R$  随时间的演化过程, 如图 1 所示, 3 种条件为 (1)  $U^{\text{sym}}(C = 32 \text{ MeV})$  和  $\sigma^{\text{iso}}$ , 即同时考虑对称势和介质中同位旋依赖的核子-核子碰撞截面 (实线); (2)  $U^{\text{sym}}(C = 0)$  和  $\sigma^{\text{iso}}$ , 即不考虑对称势只考虑介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面 (虚线); (3)  $U^{\text{sym}}(C = 32 \text{ MeV})$  和  $\sigma^{\text{nsiso}}$ , 即考虑对称势和介质中同位旋无关的核子-核子碰撞截面 (点线). 按行从上到下的顺序, 碰撞系统分别为  $^{80}\text{Zn} + ^{80}\text{Zn}$ ,  $^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$ ,  $^{76}\text{Zn} + ^{40}\text{Ar}$  和  $^{76}\text{Kr} + ^{76}\text{Kr}$ , 按列从左到右的顺序, 束流能量分别为 45, 100, 150 MeV/u. 计算结果明显表明: 对这里计算的所有碰撞系统和束流能量而言, 图中的实线与点线之间的距离比实线与虚线之间距离大得多. 也就说明原子核阻止强烈地依赖介质中核子-核子碰撞截面的同位旋相关性, 而对称势强度的改变对于原子核阻止的影响不明显. 这种现象表明核子-核子之间碰撞次数的多少是造成重离子碰撞过程中核子之间动量交换过程的主要原因. 根据在该能区, 原子核阻止主要对介质中核子-核子碰撞截面过程灵敏而对于对称势强度的改变不灵敏这一重要性质, 我们建议在较宽能量范围内, 选用中子-质子比不同的碰撞系统, 通过理论计算与实验数据的系统比较来提取介质中核子-核子碰撞截面的知识.

#### 3.2 原子核阻止对于碰撞入射道条件的依赖性

##### 3.2.1 原子核阻止灵敏地依赖于束流能量和碰撞参数

图 2 是  $^{80}\text{Zn} + ^{80}\text{Zn}$  系统对心碰撞时原子核阻止随束流能量的变化. 原子核阻止的绝对值随束流能量降低而增加, 主要因为自由核子-核子碰撞截面  $\sigma^{\text{free}}$  随能量的减小而增

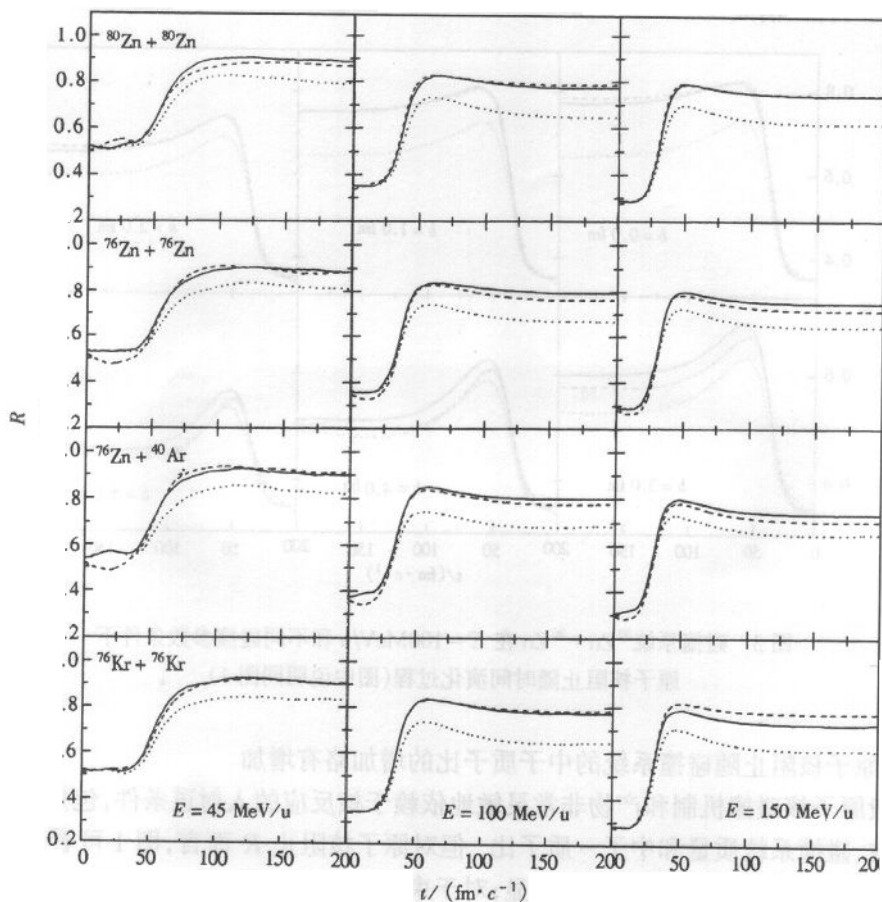


图1 4种碰撞系统在对心碰撞下原子核阻止在3种情况的时间演化过程  
 —— $U^{sym}(C=3\text{MeV}) + \sigma^{infty}$ , - - -  $U^{sym}(C=0) + \sigma^{infty}$ , .....  $U^{sym}(C=32\text{MeV}) + \sigma^{infty}$ .

加. S. A. Bass等已证明这种过程反映了同位旋自由度由非平衡到逐渐平衡的过程<sup>[6-8,11]</sup>

图3为系统 $^{80}\text{Zn} + ^{80}\text{Zn}$ 与图1相同的情况,在 $E=100\text{MeV/u}$ 和不同碰撞参数时的时间演化过程.可以明显看出原子核阻止随着 $b$ 的减小而增加,因为 $b$ 减小时核子之间的碰撞变得很激烈,即核子之间的碰撞次数和动量交换率增加.同时还可以看出 $b=0.0, 1.0, 2.0\text{fm}$ 时,原子核阻止灵敏地依赖于介质中核子-核子碰撞截面的同位旋相关性(实线与点线相距较远),而对对称势的影响不明显(实线与划线相距较近).随着 $b$ 的增加核子-核子碰撞减弱,介质中核子-核子碰撞截面的同位旋相关性对原子核阻止的影响减弱,近心碰撞

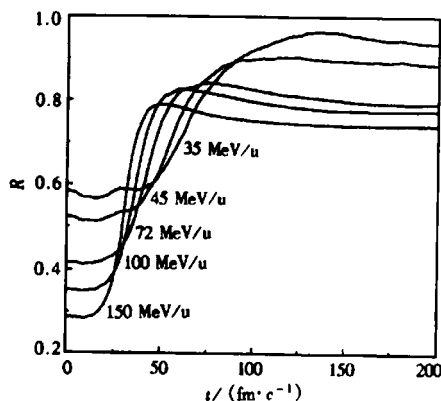


图2 碰撞系统 $^{80}\text{Zn} + ^{80}\text{Zn}$ 在 $U^{sym}(C=32\text{MeV}) + \sigma^{infty}$ 和不同束流能量条件时对心碰撞原子核阻止随时间演化

中所表现的特征消失.

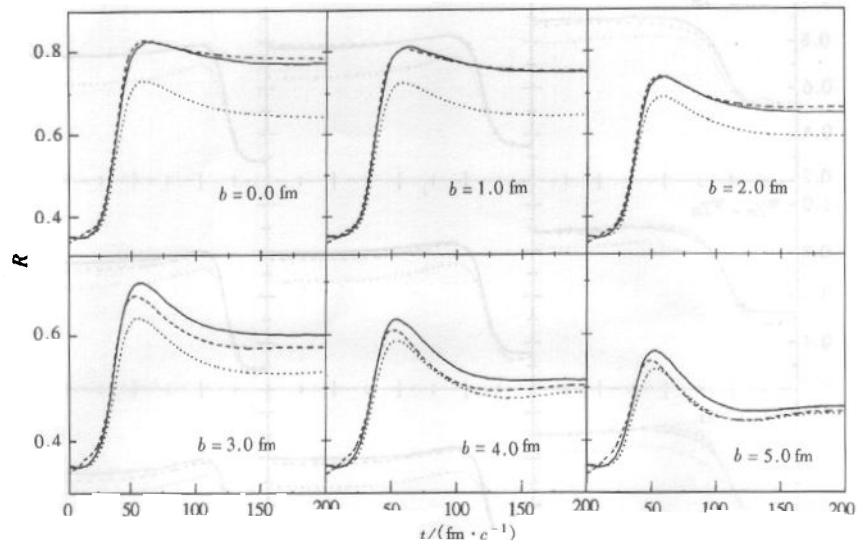


图 3 碰撞系统 $^{80}\text{Zn} + ^{80}\text{Zn}$ 在  $E = 100\text{MeV/u}$  和不同碰撞参数条件下原子核阻止随时间演化过程(图中说明同图 1)

### 3.2.2 原子核阻止随碰撞系统的中子质子比的增加略有增加

一般原子核碰撞机制和产物非常灵敏地依赖于核反应的人射道条件,包括束流能量、碰撞参数、碰撞系统质量和中子-质子比.但对原子核阻止  $R$  而言,图 1 可看出,  $R$  对于碰撞系统中子-质子比的依赖性不明显;对于束流能量和碰撞参数相同情况下的不同碰撞系统,尽管系统中子-质子比从 1.67 到 1.11 之间变化,但原子核阻止随碰撞系统中子-质子比的增加略有增加,因为重离子碰撞过程中核子之间动量交换过程主要受核子之间碰撞截面影响.然而中子之间和质子之间的动量交换过程相差不大,所以原子核阻止随系统中子-质子比的变化不很明显.

### 3.3 动量相关作用对于原子核阻止的重要影响

原子核阻止是核子动量分布的各向异性的观测量,故核子动量相关作用对它产生明显影响.图 4 是反应 $^{80}\text{Zn} + ^{80}\text{Zn}$ 在  $E = 150\text{MeV/u}$  的中心碰撞情况下,有动量相关作用(左图)和无动量相关作用(右图)时原子核阻止的时间演化过程.图中曲线说明与图 1 相同.可以看出动量相关作用增大了原子核阻止,使实线( $U^{\text{sym}}(C = 32\text{MeV}) + \sigma^{\text{iso}}$ )接近于虚线( $U^{\text{sym}}(C = 0) + \sigma^{\text{iso}}$ ),从而突出了介质中核子-核子碰撞截面的同位旋相关性对原子核阻止的灵敏性.

### 3.4 原子核阻止随束流能量的演化

为了与实验比较,图 5 给出与图 1 相同情况下,4 种碰撞系统在  $t = 200\text{fm/c}$  时原子核阻止随能量的演化(从图 1 可以看出在  $t = 100\text{fm/c}$  以后所有曲线都趋于平衡).原子

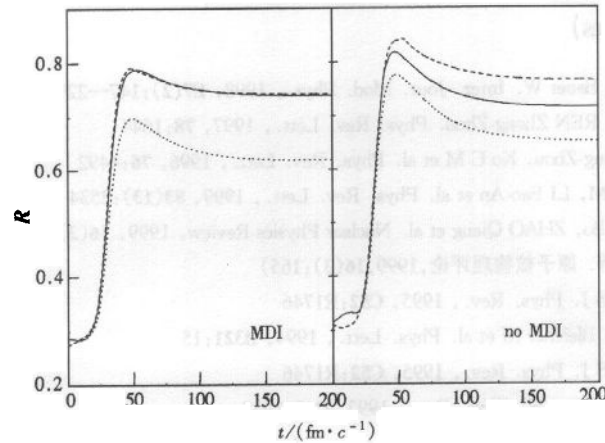


图 4 碰撞系统<sup>80</sup>Zn + <sup>80</sup>Zn 在 E = 150MeV/u 和中心碰撞条件下有动量相(左图)和无动量相关势(右图)条件下原子核阻止的时间演化过程(图中说明同图 1)

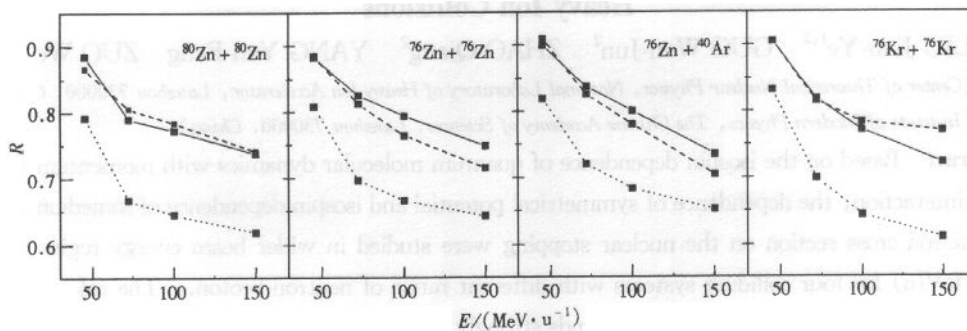


图 5 4 种碰撞系统在 t = 200fm/c 时原子核阻止随入射能量的演化(图中说明同图 1)

核阻止随入射能量的减小而增加.

#### 4 结束语

本文利用有 Pauli 势和动量相关作用的 IQMD 在束流能量(45—150MeV/u) 范围内研究了具有不同中子-质子比的 4 个碰撞系统原子核阻止对于对称势和的依赖性,以及这种依赖性随束流能量和碰撞参数 *b* 的演化. 结果表明原子核近心碰撞过程中原子核阻止强烈地依赖于介质中核子-核子碰撞截面同位旋相关性,而对称势对原子核阻止的影响并不明显. 根据以上计算结果,建议在入射能量从费米能量直至大约 150MeV/u 范围内,利用近心重离子碰撞中的原子核阻止作为提取介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面知识的可观测物理量.

对称势和介质中核子-核子碰撞截面的同位旋相关性对原子核阻止的影响与束流能量 *E*、碰撞参数 *b* 和动量相关作用密切相关.

## 参考文献 (References)

- 1 LI Bao-An, Ko C M, Bauer W. *Inter. Jour. Mod. Phys.*, 1998, **F7(2)**:147—229
- 2 LI Bao-An, Ko C M, REN Zhong-Zhou. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**:1644
- 3 LI Bao-An, REN Zhong-Zhou, Ko C M et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **76**:4492
- 4 ZHENG Y M, Ko C M, LI Bao-An et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **83(13)**:2534
- 5 LIU Jian Ye, CHEN Bo, ZHAO Qiang et al. *Nuclear Physics Review*, 1999, **16(3)**:165(in Chinese)  
(刘建业, 陈波, 赵强等. *原子核物理评论*, 1999, **16(3)**:165)
- 6 LI Bao-An, Yennello S J. *Phys. Rev.*, 1995, **C52**:R1746
- 7 Bass S A, Konopka J, Bleicher M et al. *Phys. Lett.*, 1994, **B321**:15
- 8 LI Bao-An, Yennello S J. *Phys. Rev.*, 1995, **C52**:R1746
- 9 Klakow D, Welke G, Bauer W. *Phys. Rev.*, 1993, **C48**:1982
- 10 Chen K, Fraenkel Z, Friedlander G et al. *Phys. Rev.*, 1968, **166**:949
- 11 CHEN Lie-Wen, GE Ling-Xiao, ZHANG Xiao-Dong et al. *J. Phys.*, 1997, **G23**:211

### Nuclear Stopping as a Probe to Nucleon-Nucleon Cross Section in Heavy Ion Collisions \*

LIU Jian-Ye<sup>1,2</sup> GUO Wen-Jun<sup>2</sup> ZHAO Qiang<sup>2</sup> YANG Yan-Fang ZUO Wei<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> (Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator, Lanzhou 730000, China)

<sup>2</sup> (Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract** Based on the isospin dependence of quantum molecular dynamics with momentum dependent interaction, the dependence of symmetrical potential and isospin dependence of in-medium nucleon-nucleon cross section on the nuclear stopping were studied in wider beam energy region (45—150MeV/u) for four colliding systems with different ratios of neutron-proton. The calculation results show that the nuclear stopping depends strongly on the isospin dependence of in-medium nucleon-nucleon cross section  $\sigma^{\text{iso}}$  and weakly on symmetrical potential  $U^{\text{sym}}$  for the all of colliding systems in wider beam energy region studied here. It is suggested that the information on the isospin dependence of in-medium nucleon-nucleon cross section could be extracted from the comparisons between the theoretical results and the experiment data on the nuclear stopping in the process of intermediate energy heavy ion collisions. The dependence of the nuclear stopping on  $\sigma^{\text{iso}}$  is very sensitive to beam energy  $E_L$ , and impact parameter  $b$ . The results also show that the effect of momentum dependence interaction on the nuclear stopping is important.

**Key words** nuclear stopping, heavy ion collision, isospin degree of freedom

Received 17 April 2000

\* Supported by National 973 Project under Grant (G2000077400), Major State Basic Research Development Program (G2000077400), 'One Hundred Persons Project' of The Chinese Academy of Sciences, NSFC (19775057, 19847002, 19775020) and Major Subject of The Chinese Academy of Sciences