

一种兆伏级低能加速器端电压的校准方法

王泽松¹ 张瑞² 田灿鑫¹ 王振国³ 付德君³

1 (岭南师范学院 物理科学与技术学院 湛江 524048)

2 (太原科技大学 应用科学学院 太原 030024)

3 (武汉大学 物理科学与技术学院 武汉 430072)

摘要 受设备使用年限、工作环境和零部件更换等因素影响,兆伏(MV)级低能加速器端电压需要通过较准保证经端电压加速决定的出射离子的能量。本方案以 2×1.7 MV 串联加速器为例,利用 $^{12}\text{C}(\text{p}, \text{p})^{12}\text{C}$ 材料非卢瑟福背散射谱在1750 keV能量点附近出现一个孤立的质子共振散射单峰的特点,采用质子(proton, p)束流垂直入射到高纯石墨靶获得 $^{12}\text{C}(\text{p}, \text{p})^{12}\text{C}$ 的非卢瑟福背散射谱,结合多道分析器(Multichannel Analyzer, MCA)和SIMNRA6.05拟合程序,定量测量到入射质子束在石墨靶表面发生共振散射的能量阈值为 (1744 ± 2) keV,从而外推出此时加速器端电压的实际值,并对校准结果进行了误差分析。这为MV级低能静电型范德格拉夫加速器(Van der Graff accelerator)或串联加速器在低能区提供了一种有效的端电压较准方法。

关键词 加速器, 端电压, 非卢瑟福背散射, 能量校准

中图分类号 TL99, 0572.2

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.100201

A calibration method of terminal voltage on the megavolt low energy accelerator

WANG Zesong¹ ZHANG Rui² TIAN Canxin¹ WANG Zhenguo³ FU Dejun³

1(School of Physics and Technology, Lingnan Normal University, Zhanjiang 524048, China)

2(College of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

3(School of Physics and Technology, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract [Background] Due to the influences from durable years, work environment and replacement parts of the dual megavolt tandem accelerator, the terminal voltage output is not accurate enough to ensure the stability of the incident ion energy depends on the terminal voltage acceleration. [Purpose] This study aims to calibrate terminal voltage output of megavolt accelerator for ion-beam materials characterization. [Methods] Taking the 2×1.7 MV accelerator as an example, the calibration method on the terminal voltage is making use of the non-Rutherford backscattering spectrometry (Non-RBS) spectrum of $^{12}\text{C}(\text{p}, \text{p})^{12}\text{C}$, and the proton beam was irradiated vertically on the surface of high-purity graphite target, which was characterized by the scattering peak of the isolated resonance at around 1750 keV. [Results] Combined with multichannel analyzer (MCA) and SIMNRA 6.05 code, the threshold energy of the resonance scattering reaction between incident proton and the surface of graphite target can be detected as (1744 ± 2) keV. The actual terminal voltage was extrapolated and the error after calibration also was analyzed.

深圳科技创新委员会基础研究项目(No.JCYJ20170818112901473)、岭南师范学院自然科学研究项目(No.LZL1809)资助

第一作者: 王泽松, 男, 1983年出生, 2014年于武汉大学获博士学位, 研究领域为离子束分析和离子注入

通信作者: 田灿鑫, E-mail: cxtian@lingnan.edu.cn; 付德君, E-mail: djfu@whu.edu.cn

收稿日期: 2018-06-19, 修回日期: 2018-07-12

Supported by Fundamental Research Project of Shenzhen Scientific and Technological Innovation Committee (No.JCYJ20170818112901473), Natural Science Research Project of Lingnan Normal University (No.LZL1809)

First author: WANG Zesong, male, born in 1983, graduated from Wuhan University with a doctoral degree in 2014, focusing on ion beam analysis and ion implantation

Corresponding author: TIAN Canxin, E-mail: cxtian@lingnan.edu.cn; FU Dejun, E-mail: djfu@whu.edu.cn

Received date: 2018-06-19, revised date: 2018-07-12

[Conclusion] This calibration method on the terminal voltage provides a reference for megavolt Van der Graaff accelerator or tandem accelerator.

Key words Accelerator, Terminal voltage, Non-RBS, Energy calibration

20 世纪 60 年代起,不少学者利用电场、磁场等人工手段将带电粒子加速到高能粒子并进行了大量的科学研究工作。例如,早期元素周期表上大部分人工合成的放射性元素都是在加速器上获得的;现代医用放疗电子加速器逐步向更精准的质子加速器发展;还包括同步辐射光源、散裂中子源、强子对撞机等大科学工程装置^[1-2]。而面向实验室的低能加速器(单粒子能量在 30 MeV 以下)设备主要用于加速器质谱仪(Accelerator Mass Spectrometry, AMS)、离子束分析(Ion Beam Analysis, IBA),前者在考古、生物、海洋环境领域应用非常广泛^[3-5],后者多用于材料表征^[6-7]。加速器入射粒子束初始能量取决于加速带电粒子的端电压,而加速器产生端电压主要有静电感应、高压倍加、高频脉冲等方式^[8],加速器端电压作为带电粒子预加速的基准电压必须连续可调、精确度高,才能保证所加速的粒子获得的能量达到设定值。然而,受到设备使用年限、环境和输出控制电路元件老化、更换等因素影响,高压测量值可能与实际终端电压有偏差^[9],对加速器的端电压进行测量、校准来保证入射带电粒子束初始能量就显得尤为重要。

离子束分析中,当入射的兆电子伏特(MeV)带电粒子为质子(p)、氘核(d)或氦核(α)时,与其他核发生相互作用时,在某个能量点附近会发生核共振反应,对应的核反应截面强度很高,在能谱中呈现出一个或多个尖锐的峰,此时的能量为共振核反应的阈值^[7]。

通过核共振反应在某个能量点附近的共振特征峰,能实现宽能量范围内中低能加速器的能量校准,其中以(p, n)、(p, γ)、(d, γ)核反应最为多见^[10-12]。Overley 等^[13]采用入射质子束能量 4~10 MeV 参与的大量的(p, n)核反应,对早期串列型范德格拉夫加速器的 90°分析磁铁进行了能量校准,但多数校准测量并未采用核反应共振能量点来进行。最近, Paneta 等^[14]用 $^{27}\text{Al}(p, \gamma)$ 、 $^{13}\text{C}(p, \gamma)$ 、 $^{12}\text{C}(p, p_0)$ 和 $^{32}\text{S}(p, p_0\gamma)$ 共振核反应分别对一台 5.5 MV 的静电加速器和一台 5 MV 串列加速器进行了能量校准,指出加速器能量如果仅基于旋转伏特计(Generating Voltmeter, GVM)的稳定性,而没有相应的分析磁铁来选择离子种类的话,最终的离子束能量就与入射离子种类密切相关。Csedreki 等^[15]利用氘离子束 1450 keV

附近的 $^{12}\text{C}(d, p\gamma)^{13}\text{C}$ 核反应共振单峰对 5 MV 的范德格拉夫加速器进行了能量校准,不确定度仅为 ± 0.2 keV。由此可见,对于端电压较高的加速器能量校准,质子或氘离子参与的核反应被广泛应用。

实质上,上述能量校准方案多采用核共振反应能量点来实施,一般产生高能 γ 、中子射线,需要相应的探测器来检测,而普通大学实验室缺少高能辐射屏蔽措施,一般多采用半导体探测器来接收探测能量较低的粒子。所以,对端电压在 3 MV 以下的低能加速器来说,因地制宜地选择能量校准方案是必要的。采用非卢瑟福背散射能谱(Non-Rutherford Backscattering Spectrometry, Non-RBS)就是一个可行的方案^[16]。武汉大学加速器实验室有一台早期美国通用离子公司生产的 GIC 4117 型 2×1.7 MV 串列加速器,服役时间已超过 30 a。2012 年底,实验室更换了加速器的加速管,并对旋转伏特计输出电路的电源进行了更换,为了验证新加速管的耐压性能和保证终端高压稳定输出,我们在检修高压控制、输出、测量电路的基础上,对加速器端电压进行了校准^[17]。鉴于此串列加速器的输出高压范围和实验室的条件,我们采用 $^{12}\text{C}(p, p)^{12}\text{C}$ 非卢瑟福背散射分析进行加速器能量及端电压校准,而用该共振能量点来校准低能串列加速器终端高压的例子以前从未被报道过。该方法也同样适用于范德格拉夫加速器及其他 MV 级低能加速器在低能区的端电压及能量校准。

1 实验原理和方法

串列加速器中,加速离子所获得的能量为 $E = E_0 + (1+N)qU$, 其中: E_0 是待加速离子从注入器获得的能量,主要与离子源引出电压或与加速电压有关; N 是剥离后离子所带的电荷数; q 为元电荷电量; U 为加速器端电压值^[18]。

非卢瑟福背散射是指能量为 1~10 MeV 的质子或 α 粒子入射到原子序数 $Z \leq 20$ 的元素靶上,发生的核反应散射截面远高于卢瑟福背散射截面的现象,在某个能量点处,其散射截面是卢瑟福背散射截面的几十甚至上百倍,这个能量下的散射也称为共振散射^[19]。本实验的基本原理是选择某一加速器端电压值,这个电压参考值需满足质子加速后获得的能量为非卢瑟福背散射谱中能出现一个共振散射

峰所需的能量，可以到离子束手册或核反应数据库中寻找符合条件的核反应。通过慢慢改变入射离子的能量直到共振散射反应刚好发生在固体靶的表面处，这时的能量才最接近于入射离子初始能量，相应的电压就是需要的校正值。

图1给出了离子束手册中 $^{12}\text{C}(\text{p}, \text{p})^{12}\text{C}$ 非卢瑟福背散射反应的散射截面与能量的关系^[7]。从图1中可以看出，在1740~1750 keV出现一个很高强度的散射截面 δ ，约是卢瑟福散射截面的 δ_{R} 的58倍，利用此共振散射单峰就很容易估算能量，此能量下对应的电压值最接近加速器端电压值，通过调整GVM输出回路的电阻来校准显示面板的电压值。

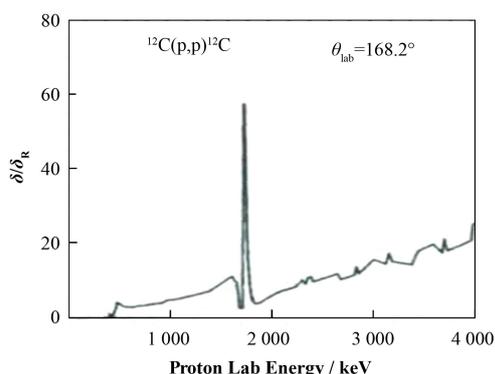


图1 $^{12}\text{C}(\text{p}, \text{p})^{12}\text{C}$ 非卢瑟福背散射截面与入射质子能量的关系^[7]

Fig.1 Non-Rutherford backscattering cross section of $^{12}\text{C}(\text{p}, \text{p})^{12}\text{C}$ as a function of proton lab energy^[7]

本实验中，从铯溅射负离子源引出的 H^- 束流约为0.75 μA ，经导向、加速（端电压约为865 kV）、聚焦、磁铁分析后成为能量约为1750 keV的质子束，圆形束斑直径为2 mm，束流强度5 nA。载能质子束进入分析靶室，垂直入射到表面平坦的高纯厚石墨靶上，将分辨率为15 keV的钝化注入平面硅（Passivated Implanted Planar Silicon, PIPS）半导体探测器放在170°的背散射位置接收背散射的质子，再经信号分析系统输入到计算机多道分析器，得到其散射谱。为了检验校准后的端电压输出，利用加速器设备自身所带的另外一套高压测量系统-高阻伏特计来评估高压输出情况。值得一提的是，高阻伏特计是根据欧姆定律的关系来评估电压的，加速管的外围串联缠绕了很多个阻值高达22 M Ω 的精密分压电阻，端电压加在这些负载电阻的两端，就会产生微安级的电流，显示在设备外接的微安电流表上，此种方法来测量几百千伏特的电压很实用，方便实时观察端电压是否加载到加速管电极上。一旦加速管端电压过高，就会在系统中产生电晕电流，高阻伏特计就不适用了，需要借助于感应电势场类

型的GVM装置来测量。

2 结果与误差分析

图2是实验得到的数据和SIMNRA6.05拟合数据，其中横坐标是多道分析器的道址，与入射离子能量呈线性关系；纵坐标是背散射产额，表示每道能量下的背散射粒子的统计涨落，反映非卢瑟福背散射截面强度。图2中散射截面最高的共振单峰出现在200道址处，对应共振能量点为1742.8 keV，这与文献[7]报道的1744 keV相差甚小。实际上，出射离子能量也与背散射角度有关，Paneta等^[14]报道的 $^{12}\text{C}(\text{p}, \text{p}_0)^{12}\text{C}$ 共振能量点约为1734 keV，其背散射角为160°。图1中的背散射角为168.2°，本实验采用的是170°，另外综合能量与道址的线性关系，确定本实验 $^{12}\text{C}(\text{p}, \text{p})^{12}\text{C}$ 共振散射能量阈值点为(1744 \pm 2) keV。SIMNRA6.05程序拟合谱在高分区共振单峰部分和实验数据拟合得比较好，有助于数据处理。

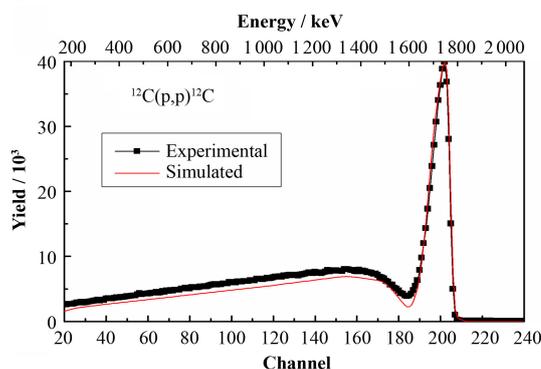


图2 实验测得的 $^{12}\text{C}(\text{p}, \text{p})^{12}\text{C}$ 非卢瑟福背散射谱和SIMNRA6.05拟合谱

Fig.2 The experimental and simulated Non-RBS spectra of $^{12}\text{C}(\text{p}, \text{p})^{12}\text{C}$

具体高压校准的步骤是：在计算机多道分析仪MCA界面获得 $^{12}\text{C}(\text{p}, \text{p})^{12}\text{C}$ 背散射谱后，先微调显示面板高压值，使谱线中的特征共振单峰在某能量点（约1750 keV）两边计数基本处于对称分布，此时表示此共振反应发生在样品内部，利用多道分析软件标记非卢瑟福背散射谱中的感兴趣区域（Region-of-Interest, ROI），记录此时净面积Net Area记为A，如图3(a)所示；逐渐改变高压显示值865 kV，调节幅度为1 kV/step，观察峰的变化，使对称峰的右边部分“消失”，也就是说让MCA谱中粒子计数在道址200左右处几乎“垂直上去”，此时的共振反应发生在样品近表面，对应的Net Area几乎只有全峰的一半，为1/2 A(图3(b))。当 $^{12}\text{C}(\text{p}, \text{p})^{12}\text{C}$ 核共振散射刚好发生在固体石墨靶的表面，初始能量几乎没有损失，此能量对应的高压最接近终端高

压实际值, 调节旋转伏特计测量输出电路中的可变电阻器, 使面板显示高压为这个值即可, 如图 4 所示。

由于此方法所用的入射离子能量不高, 端电压约为 865 kV, 基本不会在系统中产生电晕电流, 用高阻伏特计来评估校准后的端电压也是可行的。图 5 分别给出了校准前(a)和校准后(b)的端电压测试点对应的电流值, 直线为线性拟合曲线。假设高阻伏

特计测得的电流 I (μA)与端电压 U (kV)的线性关系为 $I=AU+B$, 其中: A 为斜率, 对应加速管总分压电阻的电导; B 为截距, 因为端电压是由加速器设备的高压倍加电路的基准电压 (约 30 kV) 逐步倍加得到的, 所以电压为零时的截距 B 在这里没有实际意义。从表 1 可以看出, 校准后线性关系的斜率 A 、截距 B 的标准误差均降低, 拟合度相关系数 R^2 更接近于 1, 说明校准后的端电压值更准确。

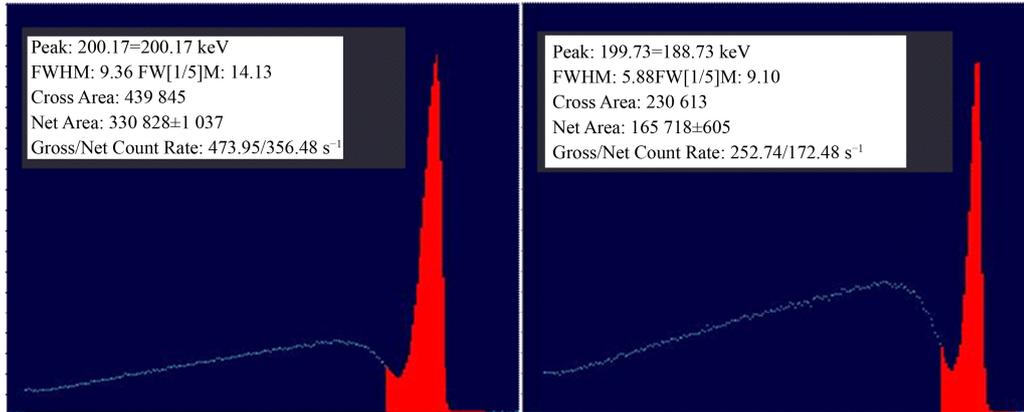


图 3 计算机 MCA 界面共振谱, 其中纯色标记区域表示 ROI, 内插图表示该 ROI 的采谱信息
(a) 样品内部共振峰, (b) 样品近表面共振峰

Fig.3 The resonance scattering spectra of MCA interface, the marked ROI and inset with its sampling parameters
(a) Inside resonance, (b) Near-surface resonance

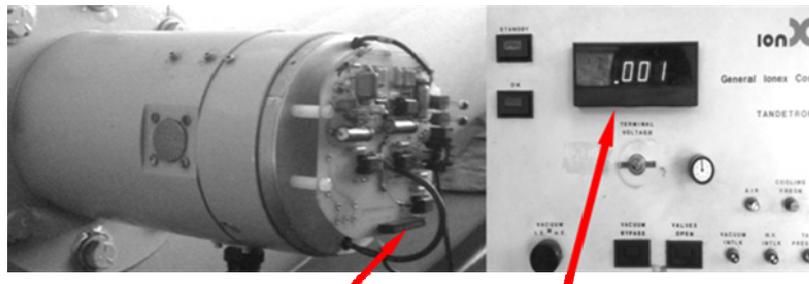


图 4 旋转伏特计外部控制电路和高压显示面板图片

Fig.4 Pictures of generating voltmeter external control circuit and high voltage display panel

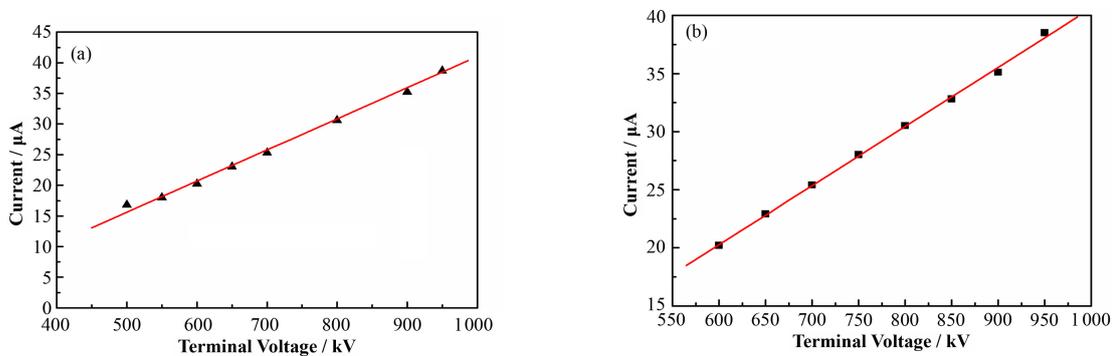


图 5 高阻伏特计测量的电流与端电压测试点的关系曲线 (a) 校准前, (b) 校准后

Fig.5 Measured current vs. terminal voltage test points by high-resistance voltmeter
(a) Before calibration, (b) After calibration

表1 校准前、后线性拟合参数
Table 1 Linear fitting parameters of before and after calibration

$I=AU+B$	B	标准偏差 Standard deviation	A	标准偏差 Standard deviation	R^2
校准前 Before calibration	-8.190	0.995 2	0.049	0.001 38	0.994 0
校准后 After calibration	-10.276	0.646 5	0.051	0.000 83	0.998 2

本文以 2×1.7 MV 串列加速器为例，采用 $^{12}\text{C}(\text{p}, \text{p})^{12}\text{C}$ 非卢瑟福背散射反应来校准 2×1.7 MV 串列加速器入射质子束能量，从而反推出终端电压大小，其本身的误差主要来源于质子共振反应的初始能量点。实际上，GVM 实时采集的端电压信号反馈到高压信号显示面板上时，其稳定性可以保证。因此，只要保证入射质子束能量准确就能减少端电压的校准误差。假如质子参与的 $^{12}\text{C}(\text{p}, \text{p})^{12}\text{C}$ 反应发生共振散射的阈值能量点为 Q ，当能量高于 Q 时，共振散射会发生在石墨靶表面以下；能量低于 Q ，可能不会发生共振反应。本方案中通过调节端电压，让入射质子束初始能量从 1750 keV 逐步降低到 1742 keV 附近，让共振散射反应从石墨靶内部逐步移到表面发生，此时入射束能量损失最小，对应的端电压最为准确。此外，入射离子束初始能量的误差还来源于^[6]：1) 系统真空度的误差。载能离子束与系统的残余气体碰撞会损失能量，损失能量的多少很大程度上与系统的真空度有关；2) 入射离子加速前从离子源获得的能量。此能量相对于加速电场所提供的能量要小得多，但是对加速器能量校准也有不可忽略的贡献；3) 核数据采集系统所带来的误差。入射束、靶材、探测器处在靶室的相对几何位置、二次电子发射率、探测器灵敏度等因素对散射粒子的能量分辨率有影响，从而影响多道谱仪测得的探测器计数，从散射谱中计算共振峰的净面积也会带来数据处理上的误差。通过多次调试和数据统计，我们发现质子共振核反应 $^{12}\text{C}(\text{p}, \text{p})^{12}\text{C}$ 能量阈值点为 (1744 ± 2) keV，才能最大程度上满足 MCA 谱中共振峰净面积只有原峰面积的一半，此能量下对应的端电压值为需要的校准值。

3 结语

受到低能加速器终端高压输出范围和使用条件的限制，对 MV 级端电压输出的较准来保证出射离子束能量是必要的。我们在用 2×1.7 MV 串列加速器引出初始能量约为 1.75 MeV 的质子束的基础上，采用 $^{12}\text{C}(\text{p}, \text{p})^{12}\text{C}$ 非卢瑟福背散射谱结合离子束分析的核电子学系统，对加速器端电压进行了校准。并利用系统自带的高阻伏特计对校准前后的电压值

进行了测量评估，发现校准后的高压测试点线性更好，说明 GVM 测试端电压值与显示面板预设值趋于同步。基于 GVM 测试系统的稳定性，端电压的校准误差主要取决于入射质子束的初始能量。通过调试、数据统计，质子共振核反应 $^{12}\text{C}(\text{p}, \text{p})^{12}\text{C}$ 能量阈值点为 (1744 ± 2) keV。这为 MV 级低能加速器端电压及能量较准提供了一种可行性方案。

参考文献

- 谢家麟. 加速器与科技创新[M]. 北京: 清华大学出版社; 广州: 暨南大学出版社, 2000.
XIE Jialin. Accelerator and technological innovation[M]. Beijing: Tsinghua University Press; Guangzhou: Jinan University Press, 2000.
- 赵籍九, 尹兆生. 粒子加速器技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
ZHAO Jijiu, YIN Zhaosheng. Particle accelerator technology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- Vogel J S, Turteltaub K W, Finkel R, *et al.* Accelerator mass spectrometry[J]. Analytical Chemistry, 1995, **67**(11): 353A-359A.
- 刘克新, 丁杏芳, 傅东坡, 等. 北京大学 AMS ^{14}C 国际比对样品测量[J]. 第四纪研究, 2007, **27**(3): 469-473.
LIU Kexin, DING Xingfang, FU Dongpo, *et al.* The AMS measurement of VIRI samples at Peking University[J]. Quaternary Science, 2007, **27**(3): 469-473.
- 何明, 庞义俊, 姜山. 加速器质谱技术及其在环境科学中的应用[J]. 现代科学仪器, 2016, **6**: 23-29.
HE Ming, PANG Yijun, JIANG Shan. Technology of accelerator mass spectrometry and its applications in environmental science[J]. Modern Scientific Instruments, 2016, **6**: 23-29.
- Chu W K, Mayer J W, Nicolet M A. Backscattering spectrometry[M]. New York: Academic Press, 1978.
- Wang Y Q, Michael A N. Handbook of modern ion beam materials analysis[M]. 2nd ed. Materials Research Society, 2010.
- 陈佳洱. 加速器物理基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 2012.
CHEN Jiaer. Accelerator physics[M]. Beijing: Peking

- University Press, 2012.
- 9 王广甫. GIC4117 2×1.7 MV 串列加速器的运行、改进和应用[J]. 现代仪器, 2008, 1: 53–55.
WANG Guangfu. The operation, improvement and application of GIC4117 2×1.7 MV tandemtron accelerator[J]. Morden Instruments, 2008, 1: 53–55.
- 10 Marion J B. Accelerator energy calibrations[J]. Reviews of Modern Physics, 1961, 33(2): 139.
- 11 Scott D M, Paine B M. Accelerator energy calibration using nonresonant nuclear reactions[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1983, 218(1): 154–158.
- 12 Cohen D, Friedman M, Paul M. Calibration of proton accelerator beam energy[J]. arXiv preprint arXiv: 1703. arXiv:1703.00644, 2017.
- 13 Overlay J C, Parker P D, Bromley D A. The energy calibration of tandem accelerators[J]. Nuclear Instruments and Methods, 1969, 68(1): 61–69.
- 14 Paneta V, Kokkoris M, Lagoyannis A, *et al.* Accurate accelerator energy calibration using selected resonances in proton elastic scattering and in (p, γ) and (p, p' γ) reactions[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2017, 406: 108–111.
- 15 Csedreki L, Sziki G Á, Szikszai Z, *et al.* Resonance parameters of the reaction $^{12}\text{C}(\text{d}, \text{p}\gamma)^{13}\text{C}$ in the vicinity of 1 450 keV for accelerator energy calibration[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2015, 342: 184–187.
- 16 Colaux J L, Terwagne G, Jeynes C. On the traceably accurate voltage calibration of electrostatic accelerators[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2015, 349: 173–183.
- 17 王泽松. 基于 2×1.7 MV 串列加速器的材料合成与分析研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
WANG Zesong. Investigation of materials synthesis and analysis based on 2×1.7 MV tandemtron accelerator[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014.
- 18 Bachiller-Perea D, Munoz-Martin A, Corvisiero P, *et al.* New energy calibration of the CMAM 5 MV tandem accelerator[J]. Energy Procedia, 2013, 41: 57–63.
- 19 丁富荣, 班勇, 夏宗璞. 辐射物理[M]. 北京: 北京大学出版社, 2004.
DING Furong, BAN Yong, XIA Zonghuang. Radiation physics[M]. Beijing: Peking University Press, 2004.