

CR-39 固体探测器蚀刻后径迹分析和影响因素分析

王亮 张文艺 焦玲

【摘要】 中子或者氡照射 CR-39 固体探测器后, 其能量产生衰减, 并在 CR-39 上产生了径迹, 利用化学蚀刻等方法使其径迹得到放大, 然后用现代显微镜技术可以进行观察和分析。CR-39 广泛地应用于石油勘探人员的个人剂量监测、加速器放射治疗领域医务人员和患者的辐射防护监测、生活环境中氡含量的测量等方面。该文重点对 CR-39 固体探测器经化学蚀刻后的径迹及影响因素进行分析和介绍。

【关键词】 辐射剂量; CR-39; 固体探测器; 径迹分析

Track analysis and influencing factors analysis on CR-39 solid state detector after etching Wang Liang, Zhang Wenyi, Jiao Ling. Tianjin Key Laboratory of Radiation Medicine and Molecular Nuclear Medicine, Institute of Radiation Medicine, Chinese Academy of Medical Sciences, Peking Union Medical College, Tianjin 300192, China

Corresponding author: Jiao Ling, Email: ljiao.irm@163.com

【Abstract】 When neutron or radon irradiates CR-39 solid state detector, the energy is attenuated, and generating a track on the CR-39, which can be amplified by chemical etching and observed or analyzed by modern microscope. CR-39 is widely used in personal dose monitoring of oil exploration workers, radiation dose monitoring of medical staff and patients in the field of radiation therapy with accelerator and radon levels measurements in the living environments, etc. This article focuses on the CR-39 solid state detector track by chemical etching and the influencing factors are analyzed and introduced.

【Key words】 Radiation dosage; CR-39; Solid state detector; Track analysis

1 背景

CR-39 的化学名称为 2, 5, 8, 10-四氧杂十三碳-12-烯酸-9-氧代-2-烯丙酯, 是一种高分子单体^[1]。它是由液状单体二基醇双烯丙基碳酸酯聚合而成。在聚合时, 单体中两个烯丙基官能团能发生网状交联, 形成热固性塑料。由于这些交联网状的链只要受很少量的辐射就会断裂形成潜在径迹, 因此 CR-39 对带电粒子非常敏感, 是现有固体核径迹探测器^[2]中具有最低能量沉积密度探测阈的材料^[3]。它具有灵敏、稳定、透明等特点。

自 1978 年 Cartwright 等^[4]发现 CR-39 塑料探测器用于测量快中子剂量开始, CR-39 受到了广泛的关注。由于制作原料不同和工艺的差异, 不同来源

的 CR-39 有不同的灵敏度, 来自不同厂商的 CR-39 对辐射的响应是不同的。王丽琴等^[5]对比了几种常用的中子固体核径迹探测器, 并着重介绍了 CR-39 探测器及其蚀刻方法, 同时总结了影响 CR-39 中子探测器蚀刻速率的基本因素, 阐述了 CR-39 探测器蚀刻技术的重要性并展望了其在其他领域中的应用。本文主要对 CR-39 固体探测器蚀刻后的径迹及其影响因素进行了分析和介绍。

2 CR-39 的作用原理及研究进展

CR-39 已广泛用作固体核径迹探测器^[6-7]。这些探测器已经被用来探测和识别核聚变的一些产物, 例如: 它们能够对 ^1H 、 ^2H 、 ^3H 、 ^3He 和 α 粒子进行惯性约束聚变实验^[8]; 也可被用来探测中子^[9]。当带电粒子穿过 CR-39 探测器时, 由于破坏了塑料结构的分子链和自由基, 粒子会在塑料内部留下损害的径迹^[10]。在破坏了分子链自由基的形式下, 对径迹损伤沿其轨道内的塑料进行蚀刻处理, 轨道保

DOI: 10. 3760 / cma. j. issn. 1673-4114. 2014. 02. 013

作者单位: 300192 天津, 北京协和医学院中国医学科学院放射医学研究所, 天津市放射医学与分子核医学重点实验室

通信作者: 焦玲 (Email: ljiao.irm@163.com)

持洞或坑的形式。这些坑的大小和形状与粒子的质量、电荷、能量和运动方向等相关^[11]。因此, CR-39 探测器可以用来区分粒子类型和能量。惯性约束聚变实验的优点是具有电磁噪声不敏感性、抗机械损伤性、对电子、X 射线和 γ 射线的相对不敏感性^[12]。因此, CR-39 探测器可以放置在靠近 γ 放射源处而不被破坏。此外, CR-39 能够接受射线的持续照射, 这意味着每次的照射将会永久压印在探测器表面。所以, CR-39 探测器可用于检测偶发性事件或持续性事件。目前, CR-39 探测器主要用于中子剂量、 α 粒子的测量。化学蚀刻后可通过各种方法记录照射产生的径迹, 通过计算求出照射剂量。

3 CR-39 探测器化学蚀刻后分析

在不同的溶液、温度、浓度和时间条件下对 CR-39 进行蚀刻, 产生的径迹不同。一般采用显微镜将径迹放大后进行分析。目前国内主要是通过光学显微镜观察计数^[13], 求出径迹密度, 根据径迹密度和照射剂量的关系估算照射剂量。另一分析方法主要采用一些新的方法或新的显微镜技术记录图像, 通过软件处理图像, 识别出径迹的数目, 进而通过计算机处理, 估算照射剂量。两种方法均存在不同的优缺点。

3.1 蚀刻后轨道模型和分析

在不同的蚀刻条件下产生的观测值不同, 因此确定合适的观测模型对于掌握合适的蚀刻时间和分析蚀刻后的径迹痕迹起着至关重要的作用。

Nikezic 和 Yu^[14]认为在垂直入射探测器表面时, 其径迹模型如图 1 所示。图中, I 为探测器初始表面, I' 为蚀刻后的径迹表面, V_i 为径迹蚀刻率, V_b 为体蚀刻率, O 为入射点, E 为在探测器材料中的径迹终点, h 为 I' 与 I 之间的距离。Nikezic 和 Yu^[14]

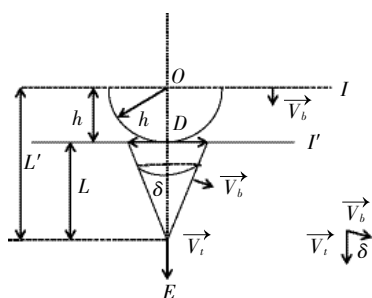


图 1 射线垂直入射探测器表面时的径迹几何模型
Fig. 1 After irradiated vertically by rays, CR-39 detector surface shows track geometry

认为径迹的形成是类似于波形传播, 根据惠更斯原理, 在波形中最外面的波中的每一点都是下一个波的波源。因此在径迹发展中, 以半径为 $h=V_i t$ 的半球向外扩展(其中 t 为蚀刻时间), 从而形成了探测器表面的点, 其中不包括沿着垂直于探测器进行的 V_i 。蚀刻的径迹是由 $V=V_i/V_b$ 控制的。Nikezic 和 Yu^[14]认为蚀刻进行的程度取决于蚀刻模型中圆锥形底部一点能否观察到, 如果呈现尖锐的圆锥形点表明存在浅径迹, 如果尖锐的圆锥形点变成光滑的圆形或者介于圆锥和圆形结构之间都属于过腐蚀。这种模型是现在普遍接受和使用的蚀刻轨道模型。通过合理的模型分析才能计算出合理可靠的观测值。还有一些模型基本上是根据不同的条件, 对上述模型做出相应的修改与简化, 使得模型更能适合自己的研究。

3.2 蚀刻后径迹描述量

蚀刻径迹的研究一般都是通过蚀刻径迹的描述和评价指标反映出径迹水平。Nikezic 和 Yu^[15]引入描述和评价径迹的参数为: ①径迹蚀刻率: 沿径迹方向的蚀刻速度, 一般表示为 V_i 。②体蚀刻率: 蚀刻探测器表面方向的蚀刻速率, 一般表示为 V_b ^[16]。③蚀刻速率比: $V=V_i/V_b$ ^[17]。因此, 蚀刻后径迹的轮廓就由 V 决定。在分析径迹几何结构时, 如图 1 所示, 能够观测到的量为表面蚀刻厚度 h (h 为 I' 与 I 之间的距离)、体蚀刻量 $B(B=v_b t, t$ 为蚀刻时间)、观测径迹深度 L 、锥半顶角 $\delta[\delta=\arcsin(V_b/V_i)]$ 和径迹直径 D 。根据这些可以观测的量, 经过计算可以推导出径迹蚀刻率、体蚀刻率、蚀刻速率比。

3.2.1 体蚀刻率

体蚀刻率为蚀刻探测器表面方向的蚀刻速率, 一般表示为 V_b 。体蚀刻率使得在蚀刻过程中探测器变得越来越薄。目前主要可以通过以下方法确定体蚀刻率:

①通过测量径迹直径确定体蚀刻率: 该方法使用时间最久, 认为径迹蚀刻率 (V_i) 是保持不变的, 射线垂直照射后根据公式就可以求出体蚀刻率, 即:

$$D=2h\sqrt{\frac{V-1}{V+1}} \quad (1)$$

其中, $V=(V_i/V_b)$, h 为蚀刻过程中探测器蚀刻的层厚(即图 1 中 h 为 I' 与 I 之间的距离)。如果 $V \gg 1$, 那么公式可以简化成 $D \cong 2h=2V_i t$, 其中 t 为蚀刻时间。探测器经过射线照射后, 通过蚀刻腐蚀,

探测器的蚀刻半径就能通过光学显微镜进行测量。

②通过探测器质量的改变确定体蚀刻率：该方法基于对蚀刻前后探测器质量的测量。方法原理是以已知探测器密度和质量改变为前提，通过蚀刻的层厚，推导出体蚀刻率。该方法有时又称为测重法，即：

$$V_b = \frac{\Delta m}{2A\rho t} \quad (2)$$

其中， Δm 为质量改变量， A 为蚀刻表面积， ρ 为探测器密度， t 为蚀刻时间，该方法的不足之处在于测量探测器前后质量的精确度制约了体蚀刻率的准确性。

以上两种方法属于间接测量的方法。如要直接测量就必须采用数字测微计、原子力显微镜(atomic force microscope, AFM)或者表面光度仪。数字测微计测量 V_b 是以蚀刻后探测器层厚的变化为根据，不足之处在于两次分别测量的压力不能保持相同。Yasuda等^[18]的研究通过局部覆盖法来得到 V_b ，即将探测器一半用环氧树脂和固化剂覆盖，然后再蚀刻，则覆盖区域不会被蚀刻，通过测量不同时间的蚀刻区域和未蚀刻区域的高度差来计算 V_b 。Ho等^[19]通过局部覆盖法结合表面光度测量研究CR-39的蚀刻率。AFM蚀刻研究是一项相对新颖的技术，Yasuda等^[18]使用AFM研究了CR-39探测器的表面粗糙程度与灵敏度的关系。Vuković和Antanasijević^[20]对比了蚀刻研究中不同种类的扫描显微镜及其适用性。通过使用局部覆盖法和AFM能够更精确地测量出蚀刻率^[21]。不足之处在于径迹深度与AFM探头不能很好地兼容，使得采用AFM的方法在测量径迹深度和径迹轮廓方面需要进一步改善。

3.2.2 径迹蚀刻率

径迹蚀刻率(V_t)与探测器蚀刻效率和离子径迹有关。当 $V_t > V_b$ 时径迹形成。对于倾斜入射的离子，在 $\sin\delta > V_b/V_t$ 时径迹形成。通常介于两者之间，就采用 $V = V_t > V_b$ 。在早期的径迹蚀刻研究中， V 被认为是定值。但是总的来说在径迹中 V 是随轨道痕迹的不同而变化的。因此 V 的确定是很困难的。有文献报道了一些方法，Al-Najjar等^[22]采用如下公式进行计算：

$$V = \frac{V_t}{V_b} = \frac{4V_b^2 t^2 + D^2}{4V_b^2 t^2 - D^2} \quad (3)$$

其中， D 为径迹直径， t 为蚀刻时间。公式中

默认 V_t 是常量，这就是其不足之处。Yip等^[23]则是从径迹影响因素的角度来研究，通过确定合适的径迹影响因素来确定 V 值。研究者通过调整入射能量和入射角度，确定径迹因素，也可以通过计算机程序选取 V 的函数，通过与实验数据比较，从而确定 V 值。这种方法采用间接的测量并且需要花费很长时间。另一种方法是根据径迹轮廓确定 V 值，方法的难点在于获得径迹轮廓。理论计算出径迹轮廓的值是比较容易实现的，但是想通过实验确定径迹轮廓却十分困难。一些实验方法例如三维共焦显微技术、轮廓照射探测技术等都有涉及这方面的问题。Meesen和Poffijn^[24]采用激光扫描共焦显微镜研究CR-39探测器上的 α 径迹。由于CR-39的透明度比较高，想通过折射模型在低的对比度条件下直接观察径迹是不合适的。另一种方法采用液态荧光覆盖在探测器表面，从而能够获得径迹的三维图像。Jakes等^[25]也用共焦显微镜研究了CR-39探测器的电化学蚀刻。Yu等^[26]提出采用表面光度计测量轮廓模型来反映CR-39的径迹长度。将探测器放入盛有某树脂和固化剂的方盒中，固化后再放在溶液中溶解CR-39，树脂可以保留下径迹模型的轮廓。通常入射能量为4 MeV的 α 径迹推荐采用这种方法，经照射和化学蚀刻后，轮廓的高度很容易通过表面光度仪测定。

3.3 蚀刻后径迹分析的研究进展与现状

CR-39蚀刻后的径迹分析包括核径迹轮廓参数($V = V_t > V_b$)的观测和体蚀刻量(B)的测量。通常我们是利用显微镜进行放大后观察，采用数码相机获取蚀刻后的图像，然后传输到计算机进行图像处理，获得需要分析参数的观测量。目前在没有更新的技术和方法的前提下，径迹的分析处理主要集中在蚀刻后径迹的图像处理，通过图像分析或者编程实现对于重叠径迹的区分，或者更精确地识别观测因素。Paul等^[27]采用计算机编程实现了快速估计核径迹探测器的径迹因素，能够快速确定三维尺寸因素，例如蚀刻深度和角度。一些常见的因素，例如直径、椭圆长轴和短轴、径迹密度等也能通过程序精确得到，程序能够精确地识别真正的蚀刻径迹，分离重叠径迹，忽略一些背景目标。Azooz等^[28]使用MATLAB编程能够计算径迹深度、直径、剩余射程、饱和时间蚀刻率等。Azooz等^[29]还提出了一个新的经验公式，公式中涉及4个自由变量，能够

计算出在不同的能量和蚀刻时间条件下 CR-39 的 α 照射的径迹深度。Paul 等^[30]使用灰度分析二维图像, 希望能够测量径迹长度。Immè 等^[31]研究使用一个半自动系统分析径迹, 系统由光学显微镜和电荷耦合器件照相机连接存储图片的电脑, 能够依据直径长度和平均灰度值将径迹分类。通过分析能够获得径迹深度, 结合这两种因素能够确定 α 剂量。Yasuda 等^[32]将 AFM 应用到 CR-39 探测器去评估表面粗糙和径迹灵敏度, 通过实验证实了蚀刻后径迹灵敏度与表面粗糙程度呈反比。Franci 和 Aureli^[33]通过建立探测器有效性和探测径迹数量上的关系设计了一套新的实验方法来评估重叠的径迹, 并通过了实验验证和软件模拟。

4 总结与展望

径迹读取技术和设备的发展为提高 CR-39 探测器径迹测量的精确度提供了有力保障, 将进一步推动 CR-39 的研究与使用。由于 CR-39 的化学蚀刻缺少统一的标准进行指导, 并且蚀刻后的分析方法也不统一, 这样就会导致测量方法存在差异。不同制造商生产的 CR-39 的灵敏度不尽相同, 这需要进一步研究影响蚀刻分析的因素, 制定出可重复性的执行标准, 并且探索到能够普遍使用的蚀刻、分析方法等。同时, 由于重叠的径迹使得探测器精度降低^[34], 许多研究者尝试一些方法希望能够定量分析重叠径迹区域^[35-36]。光学显微镜识别径迹的方法简单可靠^[37], 但是目测存在人为误差并且相当费力。光学显微镜、步进电机、电荷耦合器件、计算机和图像记录系统的组合在一定程度上提高了检测效率, 使得光学显微镜径迹图像观测向着高分辨率、高速和自动化的方向发展。但是一些新技术, 例如 AFM 等存在扫描时间长、价格昂贵等不足, 一些模型也有待进一步完善, 这些都是今后需要解决的问题。

参 考 文 献

- [1] 钱卫星, 林辉. 二甘醇双烯丙基碳酸酯的合成研究[J]. 浙江医科大学学报, 1996, 25(6): 252-253.
- [2] Salih NF, Jaafar MS. The optimum time of etching proved the Sensitivity of the CR-39 detector[J/OL]. Int J Sci Eng Res, 2012, 3(9): 1-8[2013-02-15]. http://www.ijser.org/ResearchPaperPublishing_September2012_Page2.aspx.
- [3] 翟鹏济, 唐孝威, 王龙, 等. CR-39 核径迹探测器及其在核科学等研究领域中的应用[J]. 物理, 2000, 29(7): 397-400.
- [4] Cartwright BG, Shirk EK, Price PB. A nuclear-track-recording polymer of unique sensitivity and resolution[J]. Nucl Instrum Methods, 1978, 153(2): 457-460.
- [5] 王丽琴, 屈喜梅, 焦玲, 等. CR-39 固体核径迹探测器蚀刻技术新进展[J]. 核技术, 2012, 35(11): 863-868.
- [6] Rygg JR, Séguin FH, Li CK, et al. Proton radiography of inertial fusion implosions[J]. Science, 2008, 319(5867): 1223-1225.
- [7] Li CK, Séguin FH, Frenje JA, et al. Charged-particle probing of x-ray-driven inertial-fusion implosions[J]. Science, 2010, 327(5970): 1231-1235.
- [8] Séguin FH, Frenje JA, Li CK, et al. Spectrometry of charged particles from inertial-confinement-fusion plasmas[J]. Rev Sci Instrum, 2003, 74(2): 975-995.
- [9] Phillips GW, Spann JE, Bogard JS, et al. Neutron spectrometry using CR-39 track etch detectors[J]. Radiat Prot Dosimetry, 2006, 120(1-4): 457-460.
- [10] Frenje JA, Li CK, Séguin FH, et al. Absolute measurements of neutron yields from DD and DT implosions at the OMEGA laser facility using CR-39 track detectors[J]. Rev Sci Instrum, 2002, 73(7): 2597-2605.
- [11] Chan KF, Lau BMF, Nikezic D, et al. Simple preparation of thin CR-39 detectors for alpha-particle radiobiological experiments[J]. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B, 2007, 263(1): 290-293.
- [12] Mosier-Boss PA, Szpak S, Gordon FE, et al. Triple tracks in CR-39 as the result of Pd-D Co-deposition: evidence of energetic neutrons[J]. Naturwissenschaften, 2009, 96(1): 135-142.
- [13] Luszik-Bhadra M, Alberts WG, Piesch E. Neutron energy response and background of electrochemically etched nuclear track detectors: Study of various CR-39 materials[J]. Radiat Prot Dosimetry, 1990, 32(2): 99-103.
- [14] Nikezic D, Yu KN. Formation and growth of tracks in nuclear track materials[J]. Mater Sci Eng R, 2004, 46(3): 51-123.
- [15] Nikezic D, Yu KN. Analyses of light scattered from etched alpha-particle tracks in PADC[J]. Radiat Meas, 2008, 43(8): 1417-1422.
- [16] Eappen KP, Mayya YS. Factors affecting the registration and counting of alpha tracks in solid state nuclear track detectors[J]. Indian J Phys, 2009, 83(6): 751-757.
- [17] Salam MA, Ahmed K, Morshed AJM, et al. Measurement of Natural and Artificial Radionuclides of Stevia Rebaudiana Bertoni Extract [J]. Bangladesh J Sci Ind Res, 2009, 44(4): 467-472.
- [18] Yasuda N, Uchikawa K, Amemiya K, et al. Estimation of the latent track size of CR-39 using atomic force microscope[J]. Radiat Meas, 2001, 34(1): 45-49.
- [19] Ho JPY, Yip CWY, Nikezic D, et al. Effects of stirring on the bulk etch rate of CR-39 detector[J]. Radiat Meas, 2003, 36(1): 141-143.
- [20] Vuković JB, Antanasijević R. Scanning probe microscopy (tunneling, atomic force, confocal and acoustic) in particle track detectors[J]. Radiat Meas, 1995, 25(1): 745-748.
- [21] Vázquez-López C, Fragoso R, Golzarri JI, et al. The atomic force

- microscope as a fine tool for nuclear track studies[J]. Radiat Meas, 2001, 34(1): 189-191.
- [22] Al-Najjar SAR, Bull RK, Durrani SA. Electrochemical etching of CR-39 plastic: applications to radiation dosimetry[J]. Nucl Tracks, 1979, 3(4): 169-183.
- [23] Yip CWY, Ho JPY, Koo VSY, et al. Effects of stirring on the bulk etch rate of LR 115 detector[J]. Radiat Meas, 2003, 37(3): 197-200.
- [24] Meesen G, Poffijn A. Semi-automated analysis of three-dimensional track images[J]. Radiat Meas, 2001, 34(1): 161-165.
- [25] Jakes J, Gais P, Voigt J. Electrochemically etched tracks by means of confocal microscopy[J]. Radiat Meas, 1997, 28(1-6): 853-856.
- [26] Yu KN, Ng FMF, Ho JPY, et al. Measurement of parameters of tracks in CR-39 detector from replicas[J]. Radiat Prot Dosim, 2004, 111(1): 93-96.
- [27] Paul S, Tripathy SP, Sarkar PK. Analysis of 3-dimensional track parameters from 2-dimensional images of etched tracks in solid polymeric track detectors[J]. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A, 2012, 690: 58-67.
- [28] Azooz AA, Al-Nia'emi SH, Al-Jubbori MA. A parameterization of nuclear track profiles in CR-39 detector[J]. Comput Phys Commun, 2012, 183(11): 2470-2479.
- [29] Azooz AA, Al-Nia'emi SH, Al-Jubbori MA. Empirical parameterization of CR-39 longitudinal track depth[J]. Radiat Meas, 2012, 47(1): 67-72.
- [30] Paul S, Pandey M, Tripathy SP, et al. Grey level analysis of 2D images to determine length of α -tracks in CR-39 detectors[J]. Indian J Pure Appl Phys, 2012, 50(7): 486-489.
- [31] Immè G, Morelli D, Aranzulla M, et al. Nuclear track detector characterization for alpha-particle spectroscopy[J]. Radiat Meas, 2013, 50: 253-257.
- [32] Yasuda N, Yamamoto M, Amemiya K, et al. Track sensitivity and the surface roughness measurements of CR-39 with atomic force microscope[J]. Radiat Meas, 1999, 31(1-6): 203-208.
- [33] Franci D, Aureli T. A method to account for track overlap in CR-39 detectors[J]. Radiat Prot Dosim, 2014, 158(1): 107-110.
- [34] Ibrahim ZF, Howarth CB, Miles JCH. Sources of error in etched-track radon measurements and a review of passive detectors using results from a series of radon intercomparisons[J]. Radiat Meas, 2009, 44(9-10): 750-754.
- [35] Zylstra AB, Frenje JA, Seguin FH, et al. A new model to account for track overlap in CR-39 data[J]. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A, 2012, 690: 58-67.
- [36] Aljarrah IA, Al-Khaleel OD, Al-Khateeb HM, et al. A new method for measuring tracks density in CR-39 detectors by compensating for overlapping tracks[J]. Radiat Meas, 2012, 47(7): 537-540.
- [37] 黄三玻, 魏志勇, 方美华, 等. CR-39 固体核径迹探测器观测方法[J]. 核电子学与探测技术, 2011, 31(9): 1008-1013.

(收稿日期: 2013-02-15)

(上接第 105 页)

- [31] Subramanian S, Jaffer FA, Tawakol A. Optical molecular imaging in atherosclerosis[J]. J Nucl Cardiol, 2010, 17(1): 135-144.
- [32] Sheth RA, Maricevich M, Mahmood U. In vivo optical molecular imaging of matrix metalloproteinase activity in abdominal aortic aneurysms correlates with treatment effects on growth rate [J]. Atherosclerosis, 2010, 212(1): 181-187.
- [33] Li D, Patel AR, Klivanov AL, et al. Molecular imaging of atherosclerotic plaques targeted to oxidized LDL receptor LOX-1 by SPECT/CT and magnetic resonance[J]. Circ Cardiovasc Imaging, 2010, 3(4): 464-472.
- [34] Rosenbaum D, Millon A, Fayad ZA. Molecular imaging in atherosclerosis: FDG PET[J]. Curr Atheroscler Rep, 2012, 14(5): 429-437.
- [35] Lenglet S, Thomas A, Chaurand P, et al. Molecular imaging of matrix metalloproteinases in atherosclerotic plaques[J]. Thromb Haemost, 2012, 107(3): 409-416.
- [36] Hartung D, Petrov A, Haider N, et al. Radiolabeled Monocyte Chemoattractant Protein 1 for the detection of inflammation in experimental atherosclerosis[J]. J Nucl Med, 2007, 48(11): 1816-1821.
- [37] Flaumenhaft R, Tanaka E, Graham GJ, et al. Localization and quantification of platelet-rich thrombi in large blood vessels with near-infrared fluorescence imaging[J]. Circulation, 2007, 115(1): 84-93.
- [38] Duerschmied D, Meißner M, Peter K, et al. Molecular magnetic resonance imaging allows the detection of activated platelets in a new mouse model of coronary artery thrombosis[J]. Invest Radiol, 2011, 46(10): 618-623.
- [39] Matter CM, Schuler PK, Alessi P, et al. Molecular imaging of atherosclerotic plaques using a human antibody against the extracellular domain B of fibronectin[J]. Circ Res, 2004, 95(12): 1225-1233.
- [40] Nahrendorf M, McCarthy JR, Libby P. Over a hump for imaging atherosclerosis: nanobodies visualize vascular cell adhesion molecule-1 in inflamed plaque[J]. Circ Res, 2012, 110(7): 902-903.
- [41] Zhao Y, Kuge Y, Zhao S, et al. Comparison of ^{99m}Tc -annexin A5 with ^{18}F -FDG for the detection of atherosclerosis in ApoE^{-/-} mice[J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2007, 34(11): 1747-1755.
- [42] Lee DE, Koo H, Sun IC, et al. Multifunctional nanoparticles for multimodal imaging and theragnosis[J]. Chem Soc Rev, 2012, 41(7): 2656-2672.
- [43] Nahrendorf M, Zhang H, Hembrador S, et al. Nanoparticle PET-CT imaging of macrophages in inflammatory atherosclerosis[J]. Circulation, 2008, 117(3): 379-387.

(收稿日期: 2013-05-08)