



(21) 申请号 202211584432.2

(22) 申请日 2022.12.09

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 116046830 A

(43) 申请公布日 2023.05.02

(73) 专利权人 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院

地址 430000 湖北省武汉市武昌区小洪山西30号

(72) 发明人 周欣 蒋卫平 郭茜旋 杨玉琪
孙献平 叶朝辉

(74) 专利代理机构 武汉宇晨专利事务所(普通合伙) 42001

专利代理师 庞宽

(51) Int.Cl.

G01N 24/08 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 111505039 A, 2020.08.07

CN 112162001 A, 2021.01.01

审查员 刘博

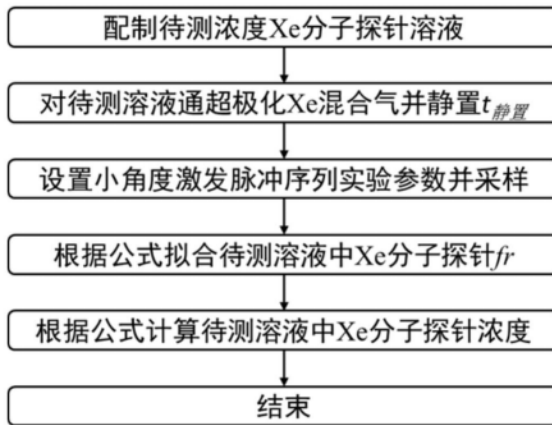
权利要求书1页 说明书5页 附图1页

(54) 发明名称

一种基于小角度脉冲激发的Xe分子探针浓度定量检测方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于小角度脉冲激发的Xe分子探针浓度定量检测方法,包括以下步骤:配制待测浓度Xe分子探针溶液;在待测溶液中通入超极化Xe混合气,停止通气并静置时间 $t_{\text{静置}}$;设置小角度激发脉冲序列实验参数并采样,获得一系列溶解态Xe信号强度;基于上一步骤获得的数据,根据公式拟合待测溶液中Xe分子探针结合Xe与溶解态Xe浓度比 f_r ;根据公式计算待测溶液中Xe分子探针浓度。本发明能降低现有技术中多次通气时Xe信号波动对Xe分子探针浓度定量准确性的影响,并减少采样所需时间。



1. 一种基于小角度脉冲激发的Xe分子探针浓度定量检测方法,包括以下步骤:

步骤1,配制Xe分子探针的待测溶液,测量Xe分子探针与Xe的结合常数K;

步骤2,在待测溶液中通入超极化Xe混合气,静置 $t_{\text{静置}}$ 后;

步骤3,将小角度激发脉冲序列施加至待测溶液N次,每次施加后采样获得待测Xe分子探针溶液溶解态Xe信号强度 S_i ,i为将小角度激发脉冲序列施加至待测溶液的次序;

第i次施加的小角度激发脉冲序列包括由 180° 选择性反转脉冲和间隔时间 $t_{\text{间隔}}$ 组成的 180° 射频脉冲块以及随后的小角度激发脉冲,第i次施加的小角度激发脉冲序列时 180° 射频脉冲块重复 n_i 次, 180° 选择性反转脉冲为形状脉冲,其频率偏置为f1,小角度激发脉冲为bp脉冲,用于激发溶解态Xe信号进行采样检测,小角度激发脉冲的度数为 α ,其频率偏置为f2,其中,频率偏置f1为Xe分子探针结合Xe后Xe与溶解态Xe的共振频率差,频率偏置f2为溶解态Xe的共振频率;

步骤4,基于步骤3依次获得的N个待测Xe分子探针溶液溶解态Xe信号强度 S_i ,根据公式拟合待测Xe分子探针溶液中Xe分子探针结合的Xe与溶解态Xe之间浓度比fr, S_N 为第N次重复小角度激发脉冲序列激发采样时对 180° 射频脉冲块重复 n_i 次数的Xe NMR谱中溶解态Xe信号积分值,

$$S_N = S * \sin \alpha * \cos^{N-1} \alpha * (1 - 2 * fr) \sum_{i=1}^N n_i * e^{-[\sum_{i=1}^N n_i * t_{\text{间隔}} + (N-1) * t_{\text{aq}}] / T_1}$$

t_{aq} 为每次施加小角度激发脉冲序列进行采样时的采集数据时间, T_1 表示待测Xe分子探针溶液中溶解态Xe的纵向弛豫时间,S为待拟合常数值;

步骤5,根据以下公式计算待测Xe分子探针溶液中Xe分子探针浓度,

$$[\text{Xe分子探针}]_{\text{待测}} = (1/K + [\text{Xe}]) * fr$$

[Xe]为待测Xe分子探针溶液测试过程中溶解态Xe浓度,[Xe]=Xe分压*Xe溶解度,Xe分压为步骤2中使用的混合气体总压力和混合气体中Xe所占比例的乘积。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于:步骤1中所述的Xe分子探针为能够可逆性结合Xe的载体,包括穴蕃、葫芦脲、沸石咪唑酯骨架及其衍生物。

3. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于:步骤2中所述的超极化Xe混合气为基于自旋交换光泵技术的超极化装置制备,通气时间和静置时间 $t_{\text{静置}}$ 分别设置为3~60s和0.1~5s。

4. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于:间隔时间设置为 $t_{\text{间隔}} \geq 3 * t_{\text{滞留}}$, $t_{\text{滞留}}$ 为Xe在Xe分子探针中的停留时间,第i次施加的小角度激发脉冲序列时 180° 射频脉冲块重复 n_i 次数为不小于2的偶数, α 为 $3^\circ \sim 20^\circ$ 。

5. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于:步骤5中Xe溶解度根据步骤3中溶液的温度通过查表获得。

一种基于小角度脉冲激发的Xe分子探针浓度定量检测方法

技术领域

[0001] 本发明属于磁共振技术和分析测量领域,特别涉及一种基于小角度脉冲激发的Xe分子探针浓度定量检测方法,该方法适用于测量溶液中Xe分子探针浓度。

背景技术

[0002] 近年来,利用自旋交换光泵(Spin Exchange Optical Pumping, SEOP)技术和化学交换饱和转移(Chemical Exchange Saturation Transfer, CEST)技术的Xe分子探针被广泛应用于生物大分子、代谢物、金属离子等的检测。得益于自旋交换光泵技术和化学交换饱和转移技术带来的检测灵敏度增强,已实现 10^{-12} M浓度水平Xe分子探针的超灵敏检测。

[0003] 目前,低浓度Xe分子探针的浓度定量方法主要包括:通过(1)对Xe分子探针的CEST z谱数据进行拟合[Analytical solution for the depolarization of hyperpolarized nuclei by chemical exchange saturation transfer between free and encapsulated xenon(HyperCEST). J.Chem.Phys., 2012, 136:144106.]; (2)测量不同饱和照射强度或饱和照射时间时CEST效果与浓度之间的关系[Quantitative Chemical Exchange Saturation Transfer with Hyperpolarized Nuclei(qHyper-CEST): Sensing Xenon-Host Exchange Dynamics and Binding Affinities by NMR. J.Chem.Phys., 2014, 141:194202.]; (3)测量溶解态Xe去极化速率与Xe分子探针浓度线性关系[Quantitative biosensor detection by chemically exchanging hyperpolarized ^{129}Xe . Phys.Chem.Chem.Phys., 2018, 20: 1800-1808.]; (4)CN111505039B公布的测量选择性反转脉冲-长间隔时间重复照射时对比效果等方法获得待测溶液中分子探针浓度信息[Molecular Concentration Determination Using Long-Interval Chemical Exchange Inversion Transfer(CEIT) NMR Spectroscopy. J.Phys.Chem.Lett., 2021, 12:8652-8657.].但由于超极化Xe信号的不可恢复性,通常需要进行多次通气更新溶液中Xe信号,进而一方面导致所需采样时间长,另一方面多次通入超极化Xe混合气的信号波动会影响溶液中溶解态Xe信号大小,进而影响探针分子浓度定量检测的准确性。

发明内容

[0004] 本发明的目的就在于克服现有Xe分子探针浓度定量方法存在的缺点和不足,提出一种基于小角度脉冲激发的Xe分子探针浓度定量检测方法,该方法通过多次小角度脉冲激发进行采样,减少了实施检测的扫描过程中所需通气次数,从而使本方法具有采样耗时短和避免多次通气时Xe信号波动影响浓度定量的特点。

[0005] 本发明的目的实现步骤如下:

[0006] 一种基于小角度脉冲激发的Xe分子探针浓度定量检测方法,包含如下步骤:

[0007] 步骤1,配制Xe分子探针的待测溶液,测量Xe分子探针与Xe的结合常数K;

[0008] 步骤2,在待测溶液中通入超极化Xe混合气,静置 $t_{\text{静置}}$ 后;

[0009] 步骤3,将小角度激发脉冲序列施加至待测溶液N次,每次施加后采样获得待测Xe

分子探针溶液溶解态Xe信号强度 S_i , i 为将小角度激发脉冲序列施加至待测溶液的次序;

[0010] 第 i 次施加的小角度激发脉冲序列包括由 180° 选择性反转脉冲和间隔时间 $t_{\text{间隔}}$ 组成的 180° 射频脉冲块的预处理,和随后的小角度激发脉冲 α ,第 i 次施加的小角度激发脉冲序列时 180° 射频脉冲块重复 n_i 次, 180° 脉冲为形状脉冲,其频率偏置为 f_1 ,小角度激发脉冲 α 为bp脉冲,用于激发溶解态Xe信号进行采样检测,小角度激发脉冲的度数 α ,其频率偏置为 f_2 ;

[0011] 步骤4,基于步骤3依次获得的 N 个待测Xe分子探针溶液溶解态Xe信号强度 S_i ,根据公式拟合待测Xe分子探针溶液中Xe分子探针结合的Xe与溶解态Xe之间浓度比 f_r , S_N 为第 N 次重复小角度激发脉冲序列激发采样时对 180° 射频脉冲块重复 n_i 次数的Xe NMR谱中溶解态Xe信号积分值,

$$[0012] \quad S_N = S * \sin \alpha * \cos^{N-1} \alpha * (1 - 2 * f_r) \sum_{i=1}^N n_i * e^{-[\sum_{i=1}^N n_i * t_{\text{间隔}} + (N-1) * t_{aq}] / T_1}$$

[0013] t_{aq} 为每次施加小角度激发脉冲序列进行采样时的采集数据时间, T_1 表示待测Xe分子探针溶液中溶解态Xe的纵向弛豫时间, S 为待拟合常数值;

[0014] 步骤5,根据以下公式计算待测Xe分子探针溶液中Xe分子探针浓度,

$$[0015] \quad [\text{Xe分子探针}]_{\text{待测}} = (1/K + [\text{Xe}]) * f_r$$

[0016] $[\text{Xe}]$ 为待测Xe分子探针溶液测试过程中溶解态Xe浓度, $[\text{Xe}] = \text{Xe分压} * \text{Xe溶解度}$,Xe分压为步骤2中使用的混合气体总压力和混合气体中Xe所占比例的乘积。

[0017] 进一步地,步骤1中的Xe分子探针为能够可逆性结合Xe的载体,包括穴蕃、葫芦脲、沸石咪唑酯骨架等及其衍生物。

[0018] 进一步地,步骤2中的超极化Xe混合气为基于自旋交换光泵技术的超极化装置制备,通气时间和静置时间 $t_{\text{静置}}$ 分别设置为3~60s和0.1~5s。

[0019] 进一步地,步骤3中的频率偏置 f_1 为Xe分子探针结合Xe后Xe与溶解态Xe的共振频率差,频率偏置 f_2 为溶解态Xe的共振频率,间隔时间设置为 $t_{\text{间隔}} \geq 3 * t_{\text{滞留}}$, $t_{\text{滞留}}$ 为Xe在Xe分子探针中的停留时间,第 i 次施加的小角度激发脉冲序列时 180° 射频脉冲块重复 n_i 次数为不小于2的偶数, α 为 $3^\circ \sim 20^\circ$ 。

[0020] 进一步地,步骤5中Xe溶解度根据步骤3中溶液的温度通过查表获得。

[0021] 本发明为一种基于小角度脉冲激发的Xe分子探针浓度定量检测方法,可以直接测量一定条件Xe分子探针的浓度,相比现有的Xe分子探针浓度定量检测方法:本方法只需要通入超极化Xe混合气1次,即可完成后续扫描,一方面缩短了数据采集所需总时间,另一方面避免了其它定量方法所需多次通气导致超极化Xe信号波动对浓度定量准确性的影响。

附图说明

[0022] 图1为小角度激发脉冲序列图,首先通入超极化Xe混合气并静置 $t_{\text{静置}}$ 更新溶液中Xe信号,其次,进行 n_i 次频率偏置为 f_1 的 180° 选择性反转脉冲和间隔时间 $t_{\text{间隔}}$ 组成的预处理,随后使用频率偏置为 f_2 的小角度脉冲 α 激发溶解态Xe信号并采样,并根据实验设置重复预处理和采样过程 N 次;

[0023] 图2为本发明的一种基于小角度脉冲激发的Xe分子探针浓度定量检测方法的流程图。

具体实施方式

[0024] 下面结合附图对本发明作进一步的阐述,应当理解,此处所描述的实施方式仅用于说明和解释本发明,并不是对本发明的限定。

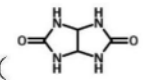
[0025] 一种基于小角度脉冲激发的Xe分子探针浓度定量检测方法,小角度激发脉冲序列如图1所示,首先通入超极化Xe混合气并静置 $t_{\text{静置}}$ 更新溶液中Xe信号,其次,进行 n_i 次频率偏置为 f_1 的 180° 选择性反转脉冲和间隔时间 $t_{\text{间隔}}$ 组成的 180° 射频脉冲块的预处理,随后使用频率偏置为 f_2 的小角度脉冲 α 激发溶解态Xe信号并采样,并根据实验设置重复预处理和采样过程N次。

[0026] 一种基于小角度脉冲激发的Xe分子探针浓度定量检测方法,包括以下步骤:

[0027] 步骤1,配制待测浓度Xe分子探针溶液;

[0028] 配制已知浓度的待测Xe分子探针溶液,Xe分子探针为能够可逆性结合Xe的载体,包括穴蕃、葫芦脲、沸石咪唑酯骨架等Xe载体分子及其衍生物。

[0029] 穴蕃包括发明专利W02012051323A2公布的由环三藜芦烃其及对映体通过三个桥连接形成的金属化的环番主体分子(Cryptophane笼);

[0030] 葫芦脲是由亚甲基桥($-\text{CH}_2-$)连接的甘脲()单体制成的大环分子。氧原子沿着带的边缘定位并向内倾斜,形成部分封闭的空腔。葫芦脲通常被写成葫芦脲[n]uril,其中n是甘脲的单位数目(并且n可以是例如5、6、7、8和10)。两种常见的缩写是CB[n],或简称CB n。葫芦脲是有效的分子识别主体分子,并且对带正电或阳离子的化合物具有特别高的亲和力。他们被确定为有效的Hyper-CEST溶质(Kunth等人,2015)。EP3251702A1公布了CB[6]uril,CB[7]uril,CB[8]uril,CB[9]uril和CB[10]uril,均可作为Xe分子探针。

[0031] 沸石咪唑酯骨架是由羧酸MOF配体与金属A离子配体相连形成的具有微孔的片状网络结构,每个金属A离子配体与6个羧酸MOF配体中的一个去质子羧基相连,微孔内径为3.8~20.4Å。

[0032] 步骤2,在待测溶液中通超极化Xe混合气,静置 $t_{\text{静置}}$ 后;

[0033] 将装有待测溶液的样品管与基于自旋交换光泵技术的超极化装置连接后,放入磁共振检测设备中,并以一定流速和压力通超极化Xe混合气,通气一段时间后停止通气并静置 $t_{\text{静置}}$,通气时间和静置时间 $t_{\text{静置}}$ 分别设置为3~60s和0.1~5s。

[0034] 步骤3,将小角度激发脉冲序列施加至待测溶液N次,每次施加后采样获得待测Xe分子探针溶液溶解态Xe信号强度 S_i ,i为将小角度激发脉冲序列施加至待测溶液的次序;

[0035] 第i次施加的小角度激发脉冲序列包括由 180° 选择性反转脉冲和间隔时间 $t_{\text{间隔}}$ 组成的 180° 射频脉冲块的预处理,和随后的小角度激发脉冲 α ,第i次施加的小角度激发脉冲序列时 180° 射频脉冲块重复 n_i 次, 180° 脉冲为形状脉冲,其频率偏置为 f_1 ,小角度激发脉冲 α 为bp脉冲,用于激发溶解态Xe信号进行采样检测,小角度激发脉冲的度数 α ,其频率偏置为 f_2 ,其中,频率偏置 f_1 为Xe分子探针结合Xe后Xe与溶解态Xe的共振频率差,频率偏置 f_2 为溶解态Xe的共振频率,间隔时间设置为 $t_{\text{间隔}} \geq 3 * t_{\text{滞留}}$, $t_{\text{滞留}}$ 为Xe在Xe分子探针中的停留时间,第i次施加的小角度激发脉冲序列时 180° 射频脉冲块重复 n_i 次数为不小于2的偶数, α 为 $3^\circ \sim 20^\circ$ 。

[0036] 步骤4,基于步骤3依次获得的N个待测Xe分子探针溶液溶解态Xe信号强度 S_i ,根据

公式拟合待测Xe分子探针溶液中Xe分子探针结合的Xe与溶解态Xe之间浓度比 fr , S_N 为第 N 次重复小角度激发脉冲序列激发采样时对 180° 射频脉冲块重复 n_i 次数的Xe NMR谱中溶解态Xe信号积分值,

$$[0037] \quad S_N = S * \sin \alpha * \cos^{N-1} \alpha * (1 - 2 * fr) \sum_{i=1}^N n_i * e^{-[\sum_{i=1}^N n_i * t_{\text{间隔}} + (N-1) * t_{aq}] / T_1}$$

[0038] t_{aq} 为每次施加小角度激发脉冲序列进行采样时的采集数据时间, T_1 表示待测Xe分子探针溶液中溶解态Xe的纵向弛豫时间, S 为待拟合常数值, 为未知数。

[0039] 步骤5, 根据以下公式计算待测Xe分子探针溶液中Xe分子探针浓度,

$$[0040] \quad [\text{Xe分子探针}]_{\text{待测}} = (1/K + [\text{Xe}]) * fr$$

[0041] $[\text{Xe}]$ 为待测Xe分子探针溶液测试过程中溶解态Xe浓度, $[\text{Xe}] = \text{Xe分压} * \text{Xe溶解度}$, Xe分压为步骤2中使用的混合气体总压力和混合气体中Xe所占比例的乘积; Xe溶解度根据步骤3中溶液的温度通过查表获得。

[0042] 实施例1

[0043] 本实施例中以穴蕃衍生物 $\text{CrA}-(\text{COOH})_6$ 作为Xe分子探针进行基于小角度脉冲激发的Xe分子探针浓度定量检测, 所有磁共振相关实施检测均在Bruker400M宽腔谱仪上完成。

[0044] 一种基于小角度脉冲激发的 $\text{CrA}-(\text{COOH})_6$ 浓度定量检测方法, 包括以下步骤:

[0045] 步骤1, 配制浓度为 $2.500\mu\text{M}$ 的Xe分子探针待测水溶液, Xe分子探针为 $\text{CrA}-(\text{COOH})_6$, $\text{CrA}-(\text{COOH})_6$ 与Xe的结合常数 K 如CN111505039B实施例所示为 $K = 3148.184\text{M}^{-1}$;

$$[0046] \quad K = [\text{Xe@分子探针}] / (([\text{Xe分子探针}] - [\text{Xe@分子探针}]) * [\text{Xe}])$$

[0047] 其中, $[\text{Xe}]_y$ 为溶液中溶解态Xe浓度 $= (\text{Xe分压} * \text{Xe溶解度})$, Xe分压为测试时使用的混合气体总压力和混合气体中Xe所占比例的乘积, Xe溶解度取决于测试时溶液的温度, 可通过查表获得, $[\text{Xe分子探针}]$ 为配制溶液中Xe分子探针浓度, $[\text{Xe@分子探针}]$ 表示与Xe结合的Xe分子探针浓度, $[\text{Xe@分子探针}] = I1/I2 * [\text{Xe}]_y$, $I1$ 和 $I2$ 分别为溶液中与Xe结合的Xe分子探针浓度的积分值和溶解态Xe浓度的积分值, $I1$ 和 $I2$ 的值是分别通过对1D Xe NMR谱中与Xe结合的Xe分子探针信号范围, 及溶解态Xe信号范围进行积分获得的。

[0048] 步骤2, 将装有 $\text{CrA}-(\text{COOH})_6$ 待测溶液的样品管与基于自旋交换光泵技术的超极化装置连接后, 放入磁共振检测设备中, 在超极化Xe混合气体(Xe所占体积比为0.02)总压力为 4.477atm 时, 以 0.1 标准升每分钟流速对待测溶液通气 60s , 停止通气并静置时间 $t_{\text{静置}} = 3\text{s}$, 准备采样。

[0049] 步骤3, 使用小角度激发脉冲序列进行采样, 小角度激发脉冲序列激发采样 N 次, i 为将小角度激发脉冲序列施加至待测溶液的次序, 第 i 次施加的小角度激发脉冲序列包括由 180° 选择性反转脉冲和间隔时间 $t_{\text{间隔}}$ 组成的 180° 射频脉冲块的预处理, 和随后的小角度脉冲 α 激发并采样, 第 i 次施加的小角度激发脉冲序列时 180° 射频脉冲块重复 n_i 次, 180° 脉冲为形状脉冲, 其频率偏置为 $f1$, 小角度激发脉冲 α 为矩形脉冲, 用于激发溶解态Xe信号进行采样检测, 小角度激发脉冲的度数 α , 其频率偏置为 $f2$ 。

[0050] 本实施例中, 小角度激发脉冲序列激发采样总次数 $N = 8$, 第 $i = 1 \sim 8$ 次小角度激发采样前 180° 射频脉冲块的重复次数 $n_1 \sim n_8$ 分别为2、4、6、8、10、12、14和16, 小角度激发脉冲 $\alpha = 15^\circ$, 频率偏置 $f1$ 为 $\text{CrA}-(\text{COOH})_6$ 结合Xe与溶解态Xe的共振频率差, $f1 = -14889.15\text{Hz}$, 频率偏置 $f2 = -14889.15\text{Hz}$ 为溶解态Xe的共振频率, 间隔时间为 $t_{\text{间隔}} = 0.124\text{s} \geq 3 * t_{\text{滞留}}$, $t_{\text{滞留}}$ 为

Xe在Xe分子探针中的停留时间,测试时样品温度设为298K。分别对第 $i=1 \sim 8$ 次小角度激发脉冲激发采样时,180°射频脉冲块重复次数 $n_1 \sim n_8$ 依次为2、4、6、8、10、12、14和16时获得的Xe NMR谱中溶解态Xe信号进行积分,获得相应的溶解态Xe信号积分值 $S_1 \sim S_8$ 依次为9.725、9.471、8.655、7.603、6.515、5.729、4.940和4.279。

[0051] 步骤4,基于步骤3中获得的数据,根据公式

$$[0052] \quad S_N = S * \sin \alpha * \cos^{N-1} \alpha * (1 - 2 * fr) \sum_{i=1}^N n_i * e^{-[\sum_{i=1}^N n_i * t_{\text{间隔}} + (N-1) * t_{aq}] / T_1}$$

[0053] 联立方程计算待测溶液中CrA-(COOH)₆结合的Xe与待测溶液中溶解态Xe之间浓度比fr,其中,S为待拟合常数值,每次施加小角度激发脉冲时的数据采集时间 $t_{aq}=0.983s$,待测Xe分子探针溶液中溶解态Xe的纵向弛豫时间 $T_1=121.7s$ 。一般重复将小角度激发脉冲序列施加至待测溶液至少2次,就可以,联立两个方程,就可拟合得到fr,若重复将小角度激发脉冲序列施加至待测溶液超过2次,拟合得到的fr更加准确。

[0054] 使用Matlab拟合获得 $fr=0.003568$ 。

[0055] 步骤5,进一步,根据以下公式计算待测Xe分子探针溶液中Xe分子探针浓度,

$$[0056] \quad [\text{Xe分子探针}]_{\text{待测}} = (1/K + [\text{Xe}]) * fr$$

[0057] CrA-(COOH)₆与Xe的结合常数 $K=3148.184M^{-1}$, [Xe]为待测Xe分子探针溶液测试过程中溶解态Xe浓度, $[\text{Xe}] = (\text{Xe分压} * \text{Xe溶解度})$, Xe分压为步骤3中使用的混合气体总压力和混合气体中Xe所占比例的乘积,步骤3中使用的超极化Xe混合气总压力4.477atm,混合气中Xe所占体积比为0.02,混合气体中Xe分压为 $4.477\text{atm} * 0.02 = 0.08954\text{atm}$,步骤3中待测溶液温度为298K,查表获得298K时溶液中Xe溶解度为4.4mM/atm,待测溶液中溶解态Xe浓度 $[\text{Xe}] = 0.08954\text{atm} * 4.4\text{mM/atm} = 394\mu\text{M}$,代入公式

$$[0058] \quad [\text{Xe分子探针}]_{\text{待测}} = (1/K + [\text{Xe}]) * fr$$

[0059] 计算获得待测溶液中CrA-(COOH)₆浓度为2.539 μM ,测得的溶液中Xe分子探针浓度与配制浓度差异较小,基于小角度脉冲激发的Xe分子探针浓度定量检测方法可以实现待测溶液Xe分子探针浓度的快速测量。

[0060] 需要指出的是,本发明中所描述的具体实施例仅是对本发明作举例说明。本发明所属技术领域的技术人员可以对所描述的具体实施例作各种各样的修改或补充或采用类似的方式替代,但并不会偏离本发明的精神或超越所附权利要求书所定义的范围。

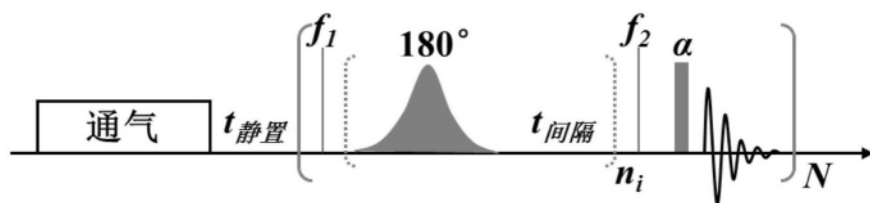


图1

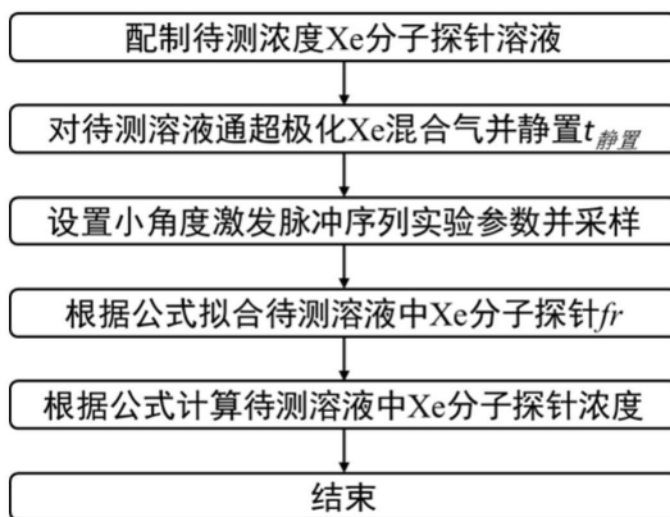


图2