

20120117



2012100144600

# 说明书

## 一种高温熔盐同步辐射原位研究装置

### 技术领域

本发明涉及一种辐射原位研究装置，尤其涉及一种同步辐射原位研究装置。

### 背景技术

随着经济快速发展，能源消费与需求也日益增长。大力发展核能是解决高能耗的最为有效的途径之一。基于钚铀燃料循环的钚基核能系统具有资源丰富、核废料少、利于核不扩散、适应性好等优点，是六种第四代核反应堆的其中之一，也是当前国际上核能科学技术领域的前沿方向之一。与其他五种使用固体燃料棒作为燃料的第四代核反应堆不同，它使用高温液体熔融盐作为燃料。由于其燃料具有流动性，因此不需要使用冷却水或者液态金属作为燃料冷却剂来与固体燃料棒进行热量交换，液体燃料可直接进入热交换器中进行热量交换。熔盐堆的燃料主要成分为裂变燃料和可增殖燃料的氟化物熔盐，有如下种类： $UF_4$ ， $PuF_3$ ， $ThF_4$ 。另外，氟化物熔盐中还包含诸如  $NaF$ 、 $ZrF_4$ 、 $LiF$  和  $BeF_2$  等成分用于改善熔盐的物理化学性质（例如熔点、沸点、流动性、热传导性、热稳定性及化学腐蚀性）以及中子慢化和吸收特性。此外，氟盐还可在核废料的高温化学处理、高温反应堆的冷却和高温反应堆至制氢工厂的传热中发挥至关重要的作用。

混合氟盐工作在  $650-1000^{\circ}C$  的高温段，在强辐射环境下服役，其成分和结构对其热效率、诸多的物理化学性质、中子慢化和吸收特性以及对容器的腐蚀性均具有重要影响。为此，我们需要一些强大的原位测试手段对其进行表征。第三代同步辐射光源可提供高品质的 X 射线，为熔盐材料的研究提供了优越的实验平台，例如 X 射线精细结构吸收谱(X-ray Absorption Fine Structure, 简称: XAFS)用于研究熔盐混合物中离子种类和结构的表征 (f 电子与化合价态; 局部结构, 包括配位数、键长、键角和离子间距等; 成分、温度和氧化态对熔盐性质的影响等); X 射线衍射用于结构表征; X 射线小角散射 (Small-Angle X-ray Scattering, 简称: SAXS) 用于表征高温熔体的网

20120117



2012100144600

络结构、熔体中结晶团粒结构粒度和形状及其演化等；高能 X 射线散射可用于裂变盐配位环境研究等。高温熔盐同步辐射原位研究装置为上述这些测试手段提供了一个可靠的平台，其可以利用 XAFS、X 射线小角散射和衍射、非弹性散射等方法原位获取熔盐中离子种类、化学价态和结构等信息，在理解不同组分的熔盐物理化学性质变化、结构材料在熔盐中的腐蚀机制、燃料盐及其裂变产物的价态控制和溶解以及熔盐的净化与再生工艺流程优化等方面发挥不可替代的基础性作用。

高温熔盐同步辐射原位研究装置同样适用于除了氟盐以外的，同族的氯化盐、溴化盐和碘化盐以及碳酸盐和硅酸盐等高温熔体的研究，包括地球化学学科中的水热流体中金属的种类形成和矿物溶解度，矿床研究和勘查及地热系统研究，以及化学工程系统（如，金属熔盐电解冶炼和精炼，湿法冶金，以熔盐为电解质的燃料电池和蓄电池等）、生物环境研究等。例如，获得水热流体中金属复合物的化学计量和稳定性信息有助于理解水热系统中金属的溶解、传输和沉淀过程。

但是，目前高温熔盐原位测试面临着一些挑战，其包括工作温度高达 1000℃ 高温、强烈的熔盐腐蚀、吸湿和熔体挥发等，因此必须要求高温熔盐同步辐射原位研究装置具有为防止蒸发和与周围空气反应所需的高气密性，以及其加热系统与周边实验装置的兼容性。

该装置的研制碰到的第一个困难就是耐高温熔盐腐蚀材料的选择：以熔融的氟化盐为代表的高温熔盐具有强烈的腐蚀性，所有氟化盐在高温下极易和氧反应，因此在与之直接接触的材料中应避免氧化物的存在。由于这个原因，将熔融的氟化盐推广应用于工业是困难的。但根据使用氟化盐的经验积累，镍基合金，难熔金属，玻碳（玻璃态石墨），氮化硼和无氧陶瓷等（例如，SiC 和 AlN）被认为对熔融的氟化盐具有足够的稳定性。综合考虑耐熔盐腐蚀性和透光度，氮化硼为一个较好的选择。另外，玻碳在做 SAXS 和低角度衍射时具有低衍射干扰信号的优势，但是其价格比热解氮化硼贵许多。

法国和日本较早地在这一领域开展工作。法国的研究小组(A. Rollet, C. Bessada, Y. Auger, P. Melin, M. Gailhanou, D. Thiaudiere)在名称为“Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B” (Vol.226, 2004, 第 447-452 页) 的文献中公开了一种高温熔盐同步辐射原位研究装置，其采用插槽式设计，核心部件包括一个热解氮化硼样品池，其装载的原料为高纯度、低孔隙度、

20120117



2012100144600

高热导率的热解氮化硼；测试圆片，其由一定比例氟盐和 BN 粉末的混合粉末压制而成，熔融氟盐被氮化硼基体吸附。这样设计安全性好，样品安装与更换较为方便。

日本东京工业学院研究小组 (H. Matsuura, S. Watanabe, H. Akatsuka, Y. Okamoto, A.K. Adya) 在名称为“Journal of Fluorine Chemistry” (Vol.130, 2009, 第53-60页) 的文献中公开了一种高温熔盐同步辐射原位研究装置，其桶状炉加热元件为用 Pt-Rh20% 贵金属合金加热丝缠绕的两个氧化铝陶瓷片，陶瓷片与光路平行站立，热效率较低。其样品池基本与法国的一致。采用多孔氧化铝/氧化硅于隔热和水冷铝外壳于散热，以保证外窗的工作温度和环境温度低于安全值。真空炉腔体内壁辅助热屏蔽材料为镍箔或铝箔，外窗为镀了铝膜的 KAPTON<sup>®</sup> 聚酰亚胺薄膜。采用 (R 型热电偶) 铂铑 13-铂热电偶测温 and 控温。炉子由 Rigaku Corp. (日本理学株式会社) 设计制造，其最大优点为便于换样和维护修理。

上述两个研究小组的装置虽然都有一些优点，但是他们的设计存在两个主要的问题：一是他们的样品池均采用以高熔点 BN 粉末为骨架吸附高温熔盐的方法，此时熔盐呈薄膜状态，存在较大的表面张力作用，这就很可能破坏了熔盐的原始状态，从而引入假象；二是没有荧光探测模式。XAFS 高温实验方法的选择主要依据样品中待测元素的重量百分比含量，含量在 10% 以上应采用透射方法；含量在 10% 以下，则需采用荧光 XAFS 方法。可见，当试样中的待测元素的重量百分比含量小于 10% 乃至仅为数十 ppm 量级时，上述装置无法对其进行测试。

### **发明内容**

本发明的目的是提供一种高温熔盐同步辐射原位研究装置，该装置应当不仅能够检测较大体积的液态熔盐，而且还应当增加荧光探测模式；此外，该装置还应当具有较大的探测角，并且应当能够对试样进行均匀地加热，从而满足各种测试的要求。

根据上述发明的目的，本发明提出了一种高温熔盐同步辐射原位研究装置，其包括：

一熔盐试管；

一真空炉，其内为一腔体，真空炉的炉壁上开设有一入射窗口、一透射

20120117



2012100144600

窗口和一荧光窗口，其中入射窗口与透射窗口同轴共线设置，荧光窗口的轴线与入射窗口和/或透射窗口的轴线垂直；

一加热装置，其设于真空炉的腔体内，用于对设于其内的熔盐试管进行加热，加热装置上设有与入射窗口、透射窗口和荧光窗口分别对应的一入射孔、一透射孔和一荧光孔；

一第一电离室，其对应入射窗口设于真空炉的外部，一入射 X 光依次经过第一电离室、入射窗口和入射孔照射在熔盐试管内的试样上；

一第二电离室或一 CCD 探测器，其对应透射窗口设于真空炉的外部，用以收集与入射 X 光对应的透射信号；

一荧光探测器，其对应荧光窗口设于真空炉的外部，用以收集与入射 X 光对应的荧光信号。

采用本技术方案进行测试时，试样放置在熔盐试管中，熔盐试管放置在真空炉中，并且通过加热装置对其进行均匀加热。入射 X 光依次经过第一电离室、入射窗口和入射孔照射在熔盐试管内的试样上；入射 X 光通过试样的透射信号依次经过透射孔、透射窗口，照射在第二电离室或 CCD 探测器，第二电离室或 CCD 探测器收集透射信号以对其进行后续分析；入射 X 光通过试样的荧光信号依次通过荧光孔、荧光窗口，照射在荧光探测器上，荧光探测器收集荧光信号以对其进行后续分析。

优选地，在上述的高温熔盐同步辐射原位研究装置中，熔盐试管的材料为热解氮化硼或玻碳。这两种材料均具有纯度高、导热率高、密闭性好的优点。玻碳在做 SAXS 和低角度衍射测试时具有低衍射干扰信号的优势，但其价格比热解氮化硼高很多。两种材料各有优劣，可根据实际实验要求进行选择。

优选地，在上述的高温熔盐同步辐射原位研究装置中，还包括：

一定位台，其设置为可在 X、Y、Z 三个方向上移动，并可绕着一转轴转动，真空炉设置于定位台上；定位台能够调整试样与入射 X 光光路的相对位置，并保证透射信号、荧光信号能够分别通过透射窗口、荧光窗口照射到第二电离室或 CCD 探测器与荧光探测器上，从而使得实验人员能够方便地将入射 X 光、第二电离室或 CCD 探测器、荧光探测器对准试样，进行测试实验；

一氦气供气装置，其通过设于真空炉上的一氦气进气口与真空炉连接，该氦气供气装置能为样品测试提供高纯氦气气氛保护；

20120117



2012100144600

一真空泵小车，其通过设于真空炉上的一抽气口与真空炉连接；真空泵小车能够使测试实验在真空环境中进行，或者在充入氦气前，提供一个比较纯净的真空环境，此外，该真空泵小车还具有移动便利的优点；

一温控装置，其与加热装置连接，闭环控制加热装置对熔盐试管的加热温度，温控装置能够精确地对试样的温度进行控制；

真空炉的炉壁上设有若干个水冷循环腔，一冷却水循环仪通过设于真空炉上的至少一个冷却水进口和至少一个冷却水出口与各个水冷循环腔导通连接，冷循环腔能够保证外壳和窗口处于安全的工作温度下。也就是说，本技术方案中采用环抱式大面积侧面和顶部夹层水冷设计，钟罩式双层水冷真空炉侧壁和顶壁均为双层，两层合金壁之间的空隙层为大面积环抱式的冷却水通路。

在上述的高温熔盐同步辐射原位研究装置中，入射窗口、透射窗口和荧光窗口上均设有一用于透X光的薄膜，薄膜为纯铍薄膜或是镀铝膜的聚酰亚胺薄膜。纯铍薄膜对X光的透光度较好，并且其密封性强、强度高，从而易于保证真空环境，并且较为经久耐用，但是其成本很高，并具有一定毒性，需小心操作；镀铝膜的聚酰亚胺薄膜成本较低、无毒，也能耐受200℃左右的温度，但是其较易破裂漏气。两种薄膜各有优劣，可根据实际实验要求进行选择。

优选地，在上述的高温熔盐同步辐射原位研究装置中，入射孔为圆柱形孔，透射孔和荧光孔为锥形孔。锥形孔较小直径的一端位于加热装置的内壁，较大直径的一端位于加热装置的外壁，从而能够获得更大的探测角。

优选地，在上述的高温熔盐同步辐射原位研究装置中，加热装置包括：一加热基座，其基本为圆柱形；加热基座上沿其轴向方向开设有一通孔，用以放置熔盐试管；通孔内试管下方垫有热压氮化硼高度调整棒。高度调整通过不同长度组成的热压氮化硼高度调整棒组来实现。如此设计便于调整熔盐液面的高度和清理试管意外破裂后泄漏的熔盐（避免泄漏的熔盐塞积）。加热基座上沿其轴向方向还开设有一热电偶插孔；加热基座上部和下部的外圆周面上分别开有一周向方向的环形槽，各环形槽内分别设有一加热环，加热环包括竖直排放的陶瓷绝缘管形成的环形阵列和弯折上下穿行于陶瓷绝缘管之中的金属电阻丝，陶瓷绝缘管上下两端分别开有供电阻丝绕行通过的槽口。

优选地，在上述的高温熔盐同步辐射原位研究装置中，加热基座的材料

20120117



2012100144600

为热压氮化硼。热压氮化硼虽然孔隙率高、杂质多,不适合用作与熔盐接触的容器,但其易于加工、价格低,导热率大于  $20\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,是普通陶瓷的十倍,因此可将其加工成热应力低、抗热震性能好的复杂零件。

优选地,在上述的高温熔盐同步辐射原位研究装置中,金属丝为 Pt-20%Rh 合金金属丝、钼丝或钽丝。Pt-20%Rh 合金金属丝具有熔点高、抗氧化、韧性好、寿命长的优点,但其价格昂贵;钼丝和钽丝价格便宜,但寿命偏短。这些金属丝各有长处,可根据实际实验要求进行选择。

优选地,在上述的高温熔盐同步辐射原位研究装置中,真空炉的底面上设有一热绝缘底座,热绝缘底座上设有一凹槽,加热装置设置于凹槽内。热绝缘底座除阻断热量向与底部连接的定位台传递外,还起到定位加热装置的作用,从而对试样进行定位。

优选地,在上述的高温熔盐同步辐射原位研究装置中,熔盐试管的内径为  $1.5\text{-}4.5\text{mm}$ ,其外径为  $2\text{-}5\text{mm}$ 。调节熔盐试管的管径能够实现试样对 X 光的吸收系数的调节。

本发明所述的高温熔盐同步辐射原位研究装置具有以下优点:

(1) 本发明所述的高温熔盐同步辐射原位研究装置能够检测较大体积的液态熔盐,从而消除了采用以高熔点 BN 粉末为骨架吸附高温熔盐的样品会引入假象的现象;

(2) 本发明所述的高温熔盐同步辐射原位研究装置具有荧光探测模式,从而能够对待测元素的重量百分比含量小于 10% 的试样进行测试;

(3) 本发明所述的高温熔盐同步辐射原位研究装置具有探测角较高、密封性好、能够对试样进行均匀加热以及能够在真空或者氦气气氛的环境中进行测试的优点,从而使其能够满足各种测试的要求。

## 附图说明

图 1 是本发明所述的高温熔盐同步辐射原位研究装置在一种实施方式下的立体结构示意图。

图 2 是本发明所述的高温熔盐同步辐射原位研究装置在一种实施方式中各实验装置的连接结构示意图。

图 3 是本发明所述的高温熔盐同步辐射原位研究装置在一种实施方式中真空炉的立体结构示意图。

20120117



2012100144600

图 4 是本发明所述的高温熔盐同步辐射原位研究装置在一种实施方式中真空炉的剖面侧视图。

图 5 是本发明所述的高温熔盐同步辐射原位研究装置在一种实施方式中真空炉的剖面俯视图。

图 6 是本发明所述的高温熔盐同步辐射原位研究装置在一种实施方式中加热装置的立体结构示意图。

图 7 是本发明所述的高温熔盐同步辐射原位研究装置在一种实施方式中加热装置的平面结构示意图。

图 8 是本发明所述的高温熔盐同步辐射原位研究装置在一种实施方式中加热装置的俯视图。

图 9 是图 7 中 E-E 面的剖视图。

图 10 是图 8 中 G-G 面的剖视图。

图 11 是本发明所述的高温熔盐同步辐射原位研究装置在一种实施方式中加热装置的加热环的立体结构示意图。

### 具体实施方式

下面将结合说明书附图和具体的实施例对本发明所述的高温熔盐同步辐射原位研究装置做进一步的详细说明。

图 1 显示了发明所述的高温熔盐同步辐射原位研究装置在本实施例的结构。如图 1 所示, 真空炉 100 设于定位台上, 其炉壁上分别设有入射窗口、透射窗口与荧光窗口, 其中入射窗口与透射窗口同轴共线设置, 荧光窗口的轴线与入射窗口和透射窗口的轴线垂直。熔盐试管与加热装置配套地设于真空炉 100 的腔体内 (如图 4、图 5 所示)。定位台调整真空炉 100 的位置, 其包括依次连接的 X 轴位移定位台 701、Y 轴位移定位台 702、Z 轴位移定位台 703 以及旋转样品定位台 704。X、Y、Z 轴位移定位台 701、702、703 能够使真空炉 100 在 X、Y、Z 三个方向上移动, 旋转样品定位台 704 能够使真空炉绕着一转轴转动。第一电离室 400、第二电离室或 CCD 探测器 500、荧光探测器 600 分别对应入射窗口、透射窗口、荧光窗口设于真空炉 100 的外部。入射 X 光 A 经过第一电离室 400 射入真空炉 100 的内腔, 第二电离室或 CCD 探测器 500、荧光探测器 600 分别通过透射窗口、荧光窗口接收透射信号与荧光信号。

20120117



2012100144600

图 2 显示了本发明所述的高温熔盐同步辐射原位研究装置在本实施例中各实验装置的连接结构。如图 2 所示, 真空炉 100 设于定位台 700 上, 其分别与氦气供气装置、冷却水循环仪 901、真空泵小车 1001 以及温控装置 311 连接。其中, 氦气供气装置包括依次导通连接的氦气瓶 801、减压阀 802、流量计 803, 流量计 803 与真空炉 100 上的氦气进气口导通连接, 该氦气供气装置能够给真空炉 100 提供氦气, 使其能够在氦气的环境下进行实验。冷却水循环仪 901 通过真空炉 100 上的冷却水进口和冷却水出口, 与真空炉 100 壳体内的水冷循环腔导通连接。真空泵小车 1001 通过阀门 1002 与真空炉 100 炉盖上的抽气口导通连接, 其能够保证真空炉 100 内部处于  $10^{-2}$ - $10^{-3}$ Pa 范围内的高真空度环境, 真空计 1003 设于真空泵小车 1001 与真空炉 100 的气路上, 用以检测炉内的真空度。温控装置 311 分别与真空炉 100 内的加热装置以及计算机连接, 其采用闭环控制方式控制加热装置对熔盐试管进行加热, 将温度控制在室温-1000℃的工作温度内, 最高不超过 1100℃, 其恒温精度为  $\pm 1^\circ\text{C}$ ; 温控装置 311 不仅能够控制加热装置对试样进行加热并在计算机上显示相关数据, 还起到为加热装置传输电能的作用。

图 3 显示了本发明所述的高温熔盐同步辐射原位研究装置在本实施例中真空炉的外部结构。图 4、图 5 分别显示了本发明所述的高温熔盐同步辐射原位研究装置在本实施例中真空炉的内部结构。如图 3、图 4 和图 5 所示, 真空炉包括炉体 101、炉盖 102 以及转接底盘 103。其中, 转接底盘 103 用于真空炉与定位台的固定连接。炉盖 102 上设有抽气口 110、带吊耳的紧固螺钉 112、冷却水进口 109a、冷却水出口 109b, 其盖壁内还设有水冷循环腔 111。其中, 带吊耳的紧固螺钉 112 用于将炉盖 102 与炉体 101 密封固定连接并便于真空炉的吊装和微调定位, 抽气口 110 与真空泵小车导通连接, 用以将真空炉内腔抽至真空; 抽气口 110 还设有一个防尘塞, 用于在抽气口 110 未与真空泵小车连接时, 防止灰尘杂质进入到真空炉内部。炉体 101 的炉壁上设有入射窗口 104、透射窗口 105、荧光窗口 106、冷却水进口 109a、冷却水出口 109b, 以及温控装置接口 108 与设于温控装置接口 108 附近下方的氦气进口 113。氦气进口 113 通过不锈钢管向样品中心处深入, 可在高温下达到高真空时关闭分子泵阀门, 微开机械泵阀门边抽边充氦气对样品进行保护。入射窗口 104 与透射窗口 105 同轴共线设置, 荧光窗口 106 的轴线与入射窗口 104 和透射窗口 105 的轴线垂直。入射窗口 104、透射窗口 105、荧光窗口 106 均设有用



20120117



2012100144600

于透光的薄膜, 该薄膜为纯铍薄膜或镀铝膜的聚酰亚胺薄膜。其中, 氦气进口 113 用于与氦气供气装置导通连接, 从而实现对真空炉提供氦气。温控装置接口用于与温控装置数据连接, 并获得供电。炉体 101 的炉壁内也设有若干水冷循环腔 111 以及冷却水进口 109a 和冷却水出口 109b, 冷却水循环仪分别通过冷却水进口 109a 和冷却水出口 109b 与各水冷循环腔 111 导通连接, 形成冷却水通路, 从而保证真空炉外壳和各窗口处于安全的温度。真空炉内腔的底部中心设有一个设有凹槽的热绝缘底座 107, 其除了能够阻断热量向与底部连接的定位台传递外, 还起到定位加热装置的作用, 从而对试样进行定位。熔盐试管 201 设于加热装置 300 内, 加热装置 300 固定设于热绝缘底座 107 的凹槽内。热压氮化硼高度调整棒 203 用于调整熔盐液面的高度, 同时也便于当试管意外破裂后取出试管并对泄漏熔盐进行清理。

图 6 显示了本发明所述的高温熔盐同步辐射原位研究装置在本实施例中加热装置的外部结构。图 7、图 8、图 9、图 10 分别显示了本发明所述的高温熔盐同步辐射原位研究装置在本实施例中加热装置的内部结构。如图 6-图 10 所示, 熔盐试管 201 设有管帽 202, 其材料为热解氮化硼或者玻碳, 内径为 1.5-4.5mm, 外径为 2-5mm, 调节熔盐试管 201 的管径能够实现试样对 X 光的吸收系数的调节。加热装置包括加热基座 301、热电偶和加热环 311。加热基座 301 为一圆柱体, 其上沿其轴向方向开设有通孔 306, 用以放置熔盐试管 201; 加热基座 301 上设有与入射窗口、透射窗口、荧光窗口分别对应的入射孔 302、透射孔 303、荧光孔 304。其中, 入射孔 302 为圆柱形孔, 透射孔 303 与荧光孔 304 均为锥形孔, 其对加热基座 301 外侧的张角均为  $22^\circ$ , 以获得较大的探测角。加热基座 301 上沿其轴向方向还开设有热电偶插孔 305, 用以放置热电偶, 该热电偶与温度控制装置连接。加热基座 301 上部和下部的外圆周面上分别开有周向方向的环形槽 307, 各环形槽 307 内分别设有加热环 311; 加热基座 301 的底部设有一个与热绝缘底座相匹配的定位槽 308, 用以将加热装置固定在热绝缘底座上。加热基座 301 的材料为热压氮化硼。

图 11 显示了本发明所述的高温熔盐同步辐射原位研究装置在本实施例中加热装置的加热环的结构。加热环包括竖直排放的陶瓷绝缘管 310 形成的环形阵列和弯折上下穿行于陶瓷绝缘管之中的金属电阻丝 309。陶瓷绝缘管 310 上下两端分别开有供电阻丝绕行通过的槽口。穿好金属电阻丝的陶瓷绝缘管形成阵列后, 两端收拢, 闭环包裹加热基座。金属电阻丝 309 两端之间为避

20120117



2012100144600

免短路上下错开并隔着一根绝缘瓷管。金属丝的材料可以采用 Pt-20%Rh 合金金属丝、钼丝或钽丝。

结合图 1 与图 5 来看, 在进行实验时, 需先进行装样, 试验的氟盐纯度不低于 99.9%, 将氟盐融化、凝固、研磨成数个微米级的均匀粉末混合物, 装入熔盐试管 201 中, 取得试样。装样全程均在真空手套箱中操作, 并通过石蜡或者高纯密封带加强密封, 避免试样受潮和吸氧。试样转入真空炉 100 后, 先在室温下把腔体抽至真空, 然后加热, 把石蜡或高纯密封带烧除, 再进一步抽至  $10^{-2}$ - $10^{-3}$ Pa 的高真空, 并将样品加热至所需温度开始测试。装载有试样的熔盐试管 201 设于加热装置 300 的加热基座的通孔中, 加热装置 300 设于热绝缘底座 107 的凹槽中, 使真空炉 100 腔体内形成光路 B、C、D; 其中, 光路 B 依次经过第一电离室 400、入射窗口 104、入射孔 302, 照射到试样上; 光路 C 从试样出发, 依次经过透射孔 303、透射窗口 105、第二电离室或 CCD 探测器 500; 光路 D 从试样出发, 依次经过荧光孔 304、荧光窗口 106、荧光探测器 600。在测试过程中, 入射 X 光 A 通过光路 B 照射到试样上, 然后得到的透射信号与荧光信号分别通过光路 C 与光路 D 照射到第二电离室或 CCD 探测器 500 与荧光探测器 600 上。第二电离室或 CCD 探测器 500 与荧光探测器 600 接收透射信号与荧光信号, 以便于后续分析。

要注意的是, 以上列举的仅为本发明的具体实施例, 显然本发明不限于以上实施例, 随之有着许多的类似变化。本领域的技术人员如果从本发明公开的内容直接导出或联想到的所有变形, 均应属于本发明的保护范围。