



(21)申请号 202310164151.X

(22)申请日 2023.02.24

(71)申请人 中国科学院地球化学研究所

地址 550081 贵州省贵阳市观山湖区林城
西路99号

(72)发明人 于雯 唐红 周传娇 莫冰

曾小家 李雄耀

(74)专利代理机构 北京中济纬天专利代理有限
公司 11429

专利代理师 郭萍

(51) Int. Cl.

G01N 21/3563 (2014.01)

G01N 21/3554 (2014.01)

G01N 21/47 (2006.01)

G01N 27/64 (2006.01)

权利要求书2页 说明书6页 附图4页

(54)发明名称

一种原样月壤颗粒表层水含量的红外反射
光谱测量方法

(57)摘要

本发明提供了一种原样月壤颗粒表层水含量的红外反射光谱测量方法,该方法包括测试环境准备步骤,样品准备步骤,红外反射光谱测试步骤,纳米离子探针分析步骤,确定OH/H₂O红外反射峰高与含水量的换算关系的步骤,以及测试月壤样品中硅酸盐矿物单颗粒的表层含水量的步骤。本发明基于红外反射光谱实现了月壤中单颗粒表层水含量的无损、快速、无污染和低成本测试,解决了现有红外光谱分析方法未考虑到地球环境的水和氧对分析月壤颗粒表层水含量的干扰,对细小单颗粒样品的前处理过程会破坏月壤颗粒表层水,以及对颗粒的大小和平整度要求高等问题,为月表水来源研究及水含量测试提供了新的方法。

1. 一种原样月壤颗粒表层水含量的红外反射光谱测量方法,其特征在于,包括以下步骤:

(1) 测试环境准备

将显微红外光谱仪密封在手套箱中,用干燥空气和高纯氮气吹扫手套箱,直到测试背景的红外反射光谱处于稳定状态,此后用高纯氮气持续吹扫手套箱直到整个红外反射光谱测试过程结束;

(2) 样品准备

①用高精度镊子从月壤样品中选取硅酸盐矿物单颗粒,置于容器中;然后将铜网固定于红外样品盘中,将选取的硅酸盐矿物单颗粒置于铜网上;再将红外样品盘置于充高纯氩气的样品转移盒内,密封样品转移盒;该步骤的所有操作均在高纯氩气手套箱内的显微镜下进行;

②将密封的样品转移盒转移至步骤(1)已吹扫至测试背景的红外反射光谱处于稳定状态的手套箱中,高纯氮气吹扫30~60min后,将红外样品盘从样品转移盒中取出置于显微红外光谱仪的样品台上;

(3) 红外反射光谱测试

利用显微红外光谱仪分别测试各硅酸盐矿物单颗粒红外反射光谱,在测试时将焦点聚到各硅酸盐矿物单颗粒表面多个不同测试区域进行测试,所述测试区域为各硅酸盐矿物单颗粒表面相对平整的区域;

(4) 纳米离子探针分析

利用纳米离子探针分析各硅酸盐矿物单颗粒中各测试区域的含水量,该步骤中选取测试区域与步骤(3)进行红外反射光谱测试时选用的测试区域相同;

(5) 确定OH/H₂O红外反射峰高与含水量的换算关系

获取各硅酸盐矿物单颗粒的各测试区域在3000~4000cm⁻¹波数范围的OH/H₂O红外反射峰高,将各OH/H₂O红外反射峰高与相应测试区域由纳米离子探针分析得到的含水量数据对应,对于同一类型的硅酸盐矿物单颗粒,以OH/H₂O红外反射峰高为纵坐标、以含水量为横坐标,点绘各测试区域的OH/H₂O红外反射峰高与含水量之间的关系,并拟合得到该类型的硅酸盐矿物单颗粒表层含水量与OH/H₂O红外反射峰高之间的换算关系式;

(6) 测试月壤样品中硅酸盐矿物单颗粒的表层含水量

以待进行表层含水量测试的月壤样品中的硅酸盐矿物单颗粒作为待测样品,按照步骤(1)~(3)的操作采集得到待测样品的红外反射光谱,获取待测样品在3000~4000cm⁻¹波数范围的OH/H₂O红外反射峰高,根据步骤(5)确定的相应硅酸盐矿物单颗粒表层含水量与OH/H₂O红外反射峰高之间的换算关系式计算出待测样品的表层含水量。

2. 根据权利要求1所述原样月壤颗粒表层水含量的红外反射光谱测量方法,其特征在于,步骤(1)中,先用干燥空气吹扫手套箱至少60min,然后更换为高纯氮气吹扫手套箱。

3. 根据权利要求1所述原样月壤颗粒表层水含量的红外反射光谱测量方法,其特征在于,步骤(3)中,在各硅酸盐矿物单颗粒表面至少3个不同的测试区域进行测试。

4. 根据权利要求1至3中任一权利要求所述原样月壤颗粒表层水含量的红外反射光谱测量方法,其特征在于,步骤(3)利用显微红外光谱仪测试各硅酸盐矿物单颗粒的红外反射光谱时,采集的波数范围至少包括3000~4000cm⁻¹。

5. 根据权利要求4所述原样月壤颗粒表层水含量的红外反射光谱测量方法,其特征在于,步骤(3)利用显微红外光谱仪测试各硅酸盐矿物单颗粒的红外反射光谱时,采集的波数范围为 $8000\sim 650\text{cm}^{-1}$ 。

6. 根据权利要求1至3中任一权利要求所述原样月壤颗粒表层水含量的红外反射光谱测量方法,其特征在于,步骤(6)中,按照步骤(1)~(3)的操作采集得到待测样品的红外反射光谱时,在待测样品上选择至少1个测试区域进行采集。

一种原样月壤颗粒表层水含量的红外反射光谱测量方法

技术领域

[0001] 本发明属于月球水测量领域,涉及一种原样月壤颗粒表层水含量的红外反射光谱测量方法。

背景技术

[0002] 水是人类进行深空探测最重要的目标之一。月球一直被认为是一个非常干燥的天体,直到Cassini,Chandrayaan-1,Deep Impact和EPOXI上的仪器通过红外光谱测量发现了在 $3\mu\text{m}$ 附近有明显的吸收特征,为羟基和/或水($\text{OH}/\text{H}_2\text{O}$,以下简称“水”)的OH拉伸基团产生的吸收峰。前人通过对阿波罗样品中氢同位素的分析证明月表水的主要来源为太阳风成因。月壤中主要的矿物为硅酸盐矿物,包括橄榄石、辉石和斜长石。1keV的太阳风质子注入含氧的月壤矿物中,破坏其晶体结构,形成表层 $\sim 100\text{nm}$ 的非晶层,非晶层中的缺陷位置将捕获太阳风中的H,与硅酸盐矿物中的氧相互作用形成OH。因此,太阳风成因的水主要存贮在月壤颗粒的表层。嫦娥五号(CE5)任务返回了1.731公斤的月壤,为科学家们研究月表水提供了珍贵的样品,使得科学家们再次关注到月表水的研究。

[0003] 为了获取月壤颗粒表层太阳风成因的水含量,可进行月表特定环境下的红外光谱分析。红外光谱分析主要用于物相鉴别、结构定性研究、化学键半定量/定量分析,在化学、环境科学、地球与行星科学等领域有广泛应用。该技术相比于纳米离子探针/离子探针等其他技术手段而言,在分析过程中具有无损、快速、无污染、低成本等优点。然而,在利用红外光谱研究嫦娥五号等探测器返回的月壤样品特性时,针对地球样品的常规红外光谱分析技术则不适用,主要原因为:(1)常规红外光谱测试未考虑月表环境条件(如:无水无氧条件等),月表无水无氧的特定条件会直接影响月壤中OH的红外光谱;(2)目前对于细小单颗粒的红外测试,均是将样品包埋于树脂中进行表面抛光,这种样品前处理方法对月壤颗粒表层(表层 $\sim 100\text{nm}$)的水会造成严重的破坏;(3)常规红外光谱水含量定量方法对样品的颗粒大小和平整度有很高要求,不适用于估算月壤细颗粒表层的水含量。鉴于测量月表水的重要性及当前方法存在的局限,开发出适用于月表环境,无损、快速、无污染、低成本实现月壤颗粒中表层水含量测试方法是十分迫切的。

发明内容

[0004] 针对现有红外光谱分析方法未考虑到地球环境的水和氧对分析月壤颗粒表层水含量的干扰,对细小单颗粒样品的前处理过程会破坏月壤颗粒表层水,以及对颗粒的大小和平整度具有很高的要求等问题,本发明提供了一种原样月壤颗粒表层水含量的红外反射光谱测量方法,以基于红外反射光谱实现月壤中单颗粒表层水含量的无损、快速、无污染和低成本测试,为月表水来源研究及水含量测试提供新的途径。

[0005] 为实现上述发明目的,本发明采用的技术方案如下:

[0006] 一种原样月壤颗粒表层水含量的红外反射光谱测量方法,包括以下步骤:

[0007] (1) 测试环境准备

[0008] 将显微红外光谱仪密封在手套箱中,用干燥空气和高纯氮气吹扫手套箱,直到测试背景的红外反射光谱处于稳定状态,此后用高纯氮气持续吹扫手套箱直到整个红外反射光谱测试过程结束;

[0009] (2) 样品准备

[0010] ①用高精度镊子从月壤样品中选取硅酸盐矿物单颗粒,置于容器中;然后将铜网固定于红外样品盘中,将选取的硅酸盐矿物单颗粒置于铜网上;再将红外样品盘置于充高纯氩气的样品转移盒内,密封样品转移盒;该步骤的所有操作均在高纯氩气手套箱内的显微镜下进行;

[0011] ②将密封的样品转移盒转移至步骤(1)已吹扫至测试背景的红外反射光谱处于稳定状态的手套箱中,高纯氮气吹扫30~60min后,将红外样品盘从样品转移盒中取出置于显微红外光谱仪的样品台上;

[0012] (3) 红外反射光谱测试

[0013] 利用显微红外光谱仪分别测试各硅酸盐矿物单颗粒红外反射光谱,在测试时将焦点聚到各硅酸盐矿物单颗粒表面多个不同测试区域进行测试,所述测试区域为各硅酸盐矿物单颗粒表面相对平整的区域;

[0014] (4) 纳米离子探针分析

[0015] 利用纳米离子探针分析各硅酸盐矿物单颗粒中各测试区域的含水量,该步骤中选取测试区域与步骤(3)进行红外反射光谱测试时选用的测试区域相同;

[0016] (5) 确定OH/H₂O红外反射峰高与含水量的换算关系

[0017] 获取各硅酸盐矿物单颗粒的各测试区域在3000~4000cm⁻¹波数范围的OH/H₂O红外反射峰高,将各OH/H₂O红外反射峰高与相应测试区域由纳米离子探针分析得到的含水量数据对应,对于同一类型的硅酸盐矿物单颗粒,以OH/H₂O红外反射峰高为纵坐标、以含水量为横坐标,点绘各测试区域的OH/H₂O红外反射峰高与含水量之间的关系,并拟合得到该类型的硅酸盐矿物单颗粒表层含水量与OH/H₂O红外反射峰高之间的换算关系式;

[0018] (6) 测试月壤样品中硅酸盐矿物单颗粒的表层含水量

[0019] 以待进行表层含水量测试的月壤样品中的硅酸盐矿物单颗粒作为待测样品,按照步骤(1)~(3)的操作采集得到待测样品的红外反射光谱,获取待测样品在3000~4000cm⁻¹波数范围的OH/H₂O红外反射峰高,根据步骤(5)确定的相应硅酸盐矿物单颗粒表层含水量与OH/H₂O红外反射峰高之间的换算关系式计算出待测样品的表层含水量。

[0020] 上述技术方案的步骤(1)中,先用干燥空气吹扫手套箱至少60min,然后更换为高纯氮气吹扫手套箱。

[0021] 上述技术方案的步骤(3)中,在各硅酸盐矿物单颗粒表面选择的测试区域的数量,根据各硅酸盐矿物单颗粒的尺寸进行确定,但对于同一个硅酸盐矿物单颗粒应选择至少3个测试区域进行红外反射光谱测试,若硅酸盐矿物单颗粒的尺寸较大,则可以选择更多的测试区域进行红外反射光谱测试。

[0022] 上述技术方案中,步骤(3)利用显微红外光谱仪测试各硅酸盐矿物单颗粒的红外反射光谱时,采集的波数范围至少包括3000~4000cm⁻¹。例如,步骤(3)利用显微红外光谱仪测试各硅酸盐矿物单颗粒的红外反射光谱时,采集的波数范围可以为8000~650cm⁻¹。

[0023] 上述技术方案的步骤(6)中,按照步骤(1)~(3)的操作采集得到待测样品的红外

反射光谱时,在待测样品上选择至少1个测试区域进行采集。

[0024] 与现有技术相比,本发明提供的技术方案产生了以下有益的技术效果:

[0025] 1. 本发明提供了一种原样月壤颗粒表层水含量的红外反射光谱测量方法,该方法通过构建无水无氧的测试环境,消除了可能来自地球水的干扰,同时,在样品准备过程中也避免了地球水的干扰,然后借助于纳米离子探针分析建立了确定OH/H₂O红外反射峰高与含水量的换算关系。在此基础上,利用3000~4000cm⁻¹波段的OH/H₂O红外反射峰高实现了月壤硅酸盐矿物单颗粒表层含水量的测定。本发明为获取月壤颗粒表层太阳风成因的水含量测定提供了新的方法,为月表水来源的研究提供了新的研究手段。

[0026] 2. 由于红外反射光谱的采集过程是一种对待测月壤样品颗粒表层无损和无污染的分析过程,可应用于原样月壤样品颗粒进行分析,在分析前无需进行样品前处理,同时红外反射光谱的采集过程较快,具有无损和快速的特点。因此,本发明的方法可以克服现有红外定量方法需要进行样品前处理,以及前处理过程无法保存表层几十到上百纳米处月壤颗粒的信息而导致的无法准确的获取月壤颗粒表层太阳风成因水含量的问题。

[0027] 3. 由于本发明的方法只需要在建立OH/H₂O红外反射峰高与含水量的换算关系的过程中用到纳米离子探针分析技术,在建立换算关系之后对待测月壤颗粒样品进行表层含水量的测试过程中便无需依赖于纳米离子探针分析,而由于显微红外光谱仪相对于纳米离子探针仪的价格更低并且更常见。因此本发明还克服了现有纳米离子探针获取月壤样品表层水含量分析存在的成本高昂和难以实现推广应用的不足。

附图说明

[0028] 图1是实施例在采用干燥空气吹扫前、采用干燥空气吹扫1h、采用高纯氮气吹扫40min时测试背景的红外反射光谱,图中,从上至下的三条曲线分别代表采用高纯氮气吹扫40min、采用干燥空气吹扫1h和采用干燥空气吹扫前的测试背景的红外反射光谱。

[0029] 图2是实施例在样品准备步骤操作过程中的一些照片。

[0030] 图3是实施例用于纳米离子探针分析中水含量的校准线,图中,SCOL:圣卡洛斯橄榄石(N=5),DAP:杜兰戈磷灰石(N=29),SWIFT:SWIFT MORB玻璃(N=24),KOV:科夫多尔磷灰石(N=16),1833:玄武玻璃(N=6),误差为0.50%。

[0031] 图4是实施例线性拟合得到的橄榄石单颗粒、长石单颗粒以及辉石单颗粒表层含水量与OH/H₂O红外反射峰高之间的换算关系曲线。

[0032] 图5是实施例的步骤(6)测试得到的橄榄石单颗粒的红外反射光谱在3000~4000cm⁻¹波数范围的反射率随波数变化曲线。

[0033] 图6是实施例的步骤(6)测试得到的长石单颗粒的红外反射光谱在3000~4000cm⁻¹波数范围的反射率随波数变化曲线。

[0034] 图7是实施例的步骤(6)测试得到的辉石单颗粒的红外反射光谱在3000~4000cm⁻¹波数范围的反射率随波数变化曲线。

具体实施方式

[0035] 下面通过实施例对本发明所述原样月壤颗粒表层水含量的红外反射光谱测量方法作进一步说明。有必要指出,以下实施例只用于对本发明作进一步说明,不能理解为对本

发明保护范围的限制,所属领域技术人员根据上述发明内容对本发明做出一些非本质的改进和调整进行具体实施,仍属于本发明的保护范围。

[0036] 下述实施例中,所采用的显微红外光谱仪为Thermo IS50continuum,采用显微红外光谱仪进行测试时使用的测试环境和测试参数条件为:干燥空气吹扫、高纯氮气吹扫,扫描波数范围为 $8000\sim 650\text{cm}^{-1}$,分辨率为 4cm^{-1} ,扫描次数为256次,束斑面积为 $75\mu\text{m}\times 75\mu\text{m}$;所述干燥空气是指水的露点为 -70°C (含水量约2.58ppm)的空气,所述高纯氮气是指氮气含量 $\geq 99.999\%$ 的氮气。

[0037] 下述实施例中,用到的月壤样品为嫦娥五号返回的粉末样品,编号为CE5C0400YJFM00504,该月壤样品保存在高纯氦气环境中。

[0038] 实施例

[0039] 本实施例中,详细说明原样月壤颗粒表层水含量的红外反射光谱测量方法,步骤如下:

[0040] (1) 测试环境准备

[0041] 将显微红外光谱仪置于手套箱中,手套箱的尺寸根据将显微红外光谱仪的尺寸进行定制,手套箱能完全容纳显微红外光谱仪,密封手套箱。先用干燥空气吹扫手套箱1h,然后用高纯氮气吹扫手套箱40min,此时测试背景的红外反射光谱已处于稳定状态,之后用高纯氮气持续吹扫手套箱直到整个红外反射光谱测试过程结束。

[0042] 在采用干燥空气吹扫前、采用干燥空气吹扫1h、采用高纯氮气吹扫40min时,采用显微红外光谱仪对测试背景进行红外反射光谱测试,测试条件:扫描波数范围为 $8000\sim 650\text{cm}^{-1}$,分辨率为 4cm^{-1} ,扫描次数为256次,束斑面积为 $75\mu\text{m}\times 75\mu\text{m}$ 。测试背景的红外反射光谱如图1所示,由图1可知,通过干燥空气和高纯氮气吹扫,已将测试环境中来自地球水的干扰消除。

[0043] (2) 样品准备

[0044] ①用高精度镊子从月壤样品中选取硅酸盐矿物单颗粒,本实施例中具体从月壤样品中选用了长石、辉石和橄榄石这3种硅酸盐矿物单颗粒。将这3种硅酸盐矿物单颗粒置于事先准备好的锡纸杯中。

[0045] 根据选取的硅酸盐矿物单颗粒的尺寸,选取孔径合适的铜网。将铜网固定于红外样品盘中,红外样品盘的尺寸根据铜网的尺寸进行定制,以确保将铜网稳定地固定于红外样品盘上。然后将选取的硅酸盐矿物单颗粒置于铜网上;再将红外样品盘置于充高纯氦气的样品转移盒内,密封样品转移盒。

[0046] 该步骤的所有操作均在高纯氦气手套箱内进行,其中从月壤样品中选取硅酸盐矿物单颗粒,以及将选取的硅酸盐矿物单颗粒置于铜网的操作需要高纯氦气手套箱内的显微镜下进行。图2展示的是步骤操作过程中的一些照片。

[0047] ②将密封的样品转移盒转移至步骤(1)已吹扫至测试背景的红外反射光谱处于稳定状态的手套箱中,高纯氮气吹扫30min后,将红外样品盘从样品转移盒中取出置于显微红外光谱仪的样品台上,准备进行红外反射光谱测试。

[0048] (3) 红外反射光谱测试

[0049] 采用与步骤(1)对测试背景进行红外反射光谱测试相同的测试参数,利用显微红外光谱仪分别测试3种硅酸盐矿物单颗粒红外反射光谱,在测试时将焦点聚到各硅酸盐矿

物单颗粒表面4个不同测试区域进行测试,所述测试区域为各硅酸盐矿物单颗粒表面相对平整的区域。

[0050] (4) 纳米离子探针分析

[0051] 利用纳米离子探针分析各硅酸盐矿物单颗粒中各测试区域的含水量,该步骤中选取测试区域与步骤(3)进行红外反射光谱测试时选用的测试区域相同。具体如下:

[0052] ①在高纯氦气手套箱中分别将各硅酸盐矿物单颗粒压入钢靶中,红外反射光谱测试的一面朝上,在 $10\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$ 范围内预溅射硅酸盐矿物单颗粒表面约10s,去除Au涂层,消除地面污染,并通过实时成像模式进行监测。

[0053] ②采用blanking技术对经过步骤①处理的样品中心 $5\mu\text{m}\times 5\mu\text{m}$ 区域进行分析,每次测量200个周期。所有电子脉冲都校正了44ns的死亡时间,并使用电子枪进行电荷补偿。纳米离子探针分析的测试区域与红外反射光谱的测试区域相吻合。

[0054] ③硅酸盐矿物单颗粒的含水量是使用 $1\text{H}^-/180^-$ 和 H_2O 校准线测定,该校准线基于一套地面标准,包括Kovdor磷灰石、玄武玻璃1838、SWIFT MORB玻璃、Durango磷灰石和圣Carlos橄榄石,校准线斜率为 $(7.149\pm 0.0639)\times 10^{-5}$,如图3所示。其中,采用无水圣卡洛斯橄榄石中的 $1\text{H}^-/180^-$ 来评估纳米离子探针的氢背景,对应于含水量为 $12\pm 2.07\text{ppm}$ 。最后,测试硅酸盐矿物单颗粒获得水含量需要去掉该氢背景值。

[0055] (5) 确定OH/ H_2O 红外反射峰高与含水量的换算关系

[0056] 获取各硅酸盐矿物单颗粒的各测试区域在 $3000\sim 4000\text{cm}^{-1}$ 波数范围的OH/ H_2O 红外反射峰高,将各OH/ H_2O 红外反射峰高与相应测试区域由纳米离子探针分析得到的含水量数据对应,对于同一类型的硅酸盐矿物单颗粒,以OH/ H_2O 红外反射峰高为纵坐标、以含水量为横坐标,点绘各测试区域的OH/ H_2O 红外反射峰高与含水量之间的关系,并进行线性拟合得到该类型的硅酸盐矿物单颗粒表层含水量与OH/ H_2O 红外反射峰高之间的换算关系式。

[0057] 该步骤中,最终获得的橄榄石单颗粒表层含水量与OH/ H_2O 红外反射峰高之间的换算关系式为 $Y=(6.07\pm 0.547)\times 10^{-4}\times X, R^2=0.984$,长石单颗粒表层含水量与OH/ H_2O 红外反射峰高之间的换算关系式为 $Y=(3.12\pm 0.205)\times 10^{-4}\times X, R^2=0.991$,辉石单颗粒表层含水量与OH/ H_2O 红外反射峰高之间的换算关系式为 $Y=(5.99\pm 0.838)\times 10^{-4}\times X, R^2=0.981$,如图4所示。各换算关系式中,X代表相应的硅酸盐矿物单颗粒的表层含水量,单位为ppm,Y代表 $3000\sim 4000\text{cm}^{-1}$ 波数范围的OH/ H_2O 红外反射峰高, R^2 为拟合得到的换算关系式的拟合系数。

[0058] (6) 测试月壤样品中硅酸盐矿物单颗粒的表层含水量

[0059] 以待进行表层含水量测试的月壤样品中的硅酸盐矿物单颗粒作为待测样品,按照步骤(1)~(3)的操作采集得到待测样品的红外反射光谱,获取待测样品在 $3000\sim 4000\text{cm}^{-1}$ 波数范围的OH/ H_2O 红外反射峰高,根据步骤(5)确定的相应硅酸盐矿物单颗粒表层含水量与OH特征峰的反射率之间的换算关系式计算出待测样品的表层含水量。具体操作如下:

[0060] 该步骤以上述编号为CE5C0400YJFM00504的月壤样品中的其他硅酸盐矿物单颗粒作为待测样品,具体包括从上述月壤样品中选取的橄榄石单颗粒、长石单颗粒、辉石单颗粒各1颗。

[0061] 在这3颗待测样品中各选取1个测试区域,按照步骤(1)~(3)的操作采集得到这3颗待测样品的红外反射光谱,分别如图5~7所示。在完成对这3颗待测样品的红外反射光谱的采集后,可以停止向容纳显微红外光谱仪的手套箱中通入高纯氮气。获取待测样品在

3000~4000 cm^{-1} 波数范围的OH/H₂O红外反射峰高,根据步骤(5)确定的橄榄石单颗粒、长石单颗粒、辉石单颗粒表层含水量与OH/H₂O红外反射峰高之间的换算关系式,分别计算出3颗待测样品的表层含水量,如下面的表1所示:

[0062] 表1月壤样品中3种硅酸盐矿物颗粒的表层水含量

样品	OH/H ₂ O 红外反射峰高	OH/H ₂ O 含量(ppm)
橄榄石 CE-OL	0.189	311 ± 30
[0063] 长石 CE-PL	0.13	433 ± 4
辉石 CE-PY	0.126	210 ± 19

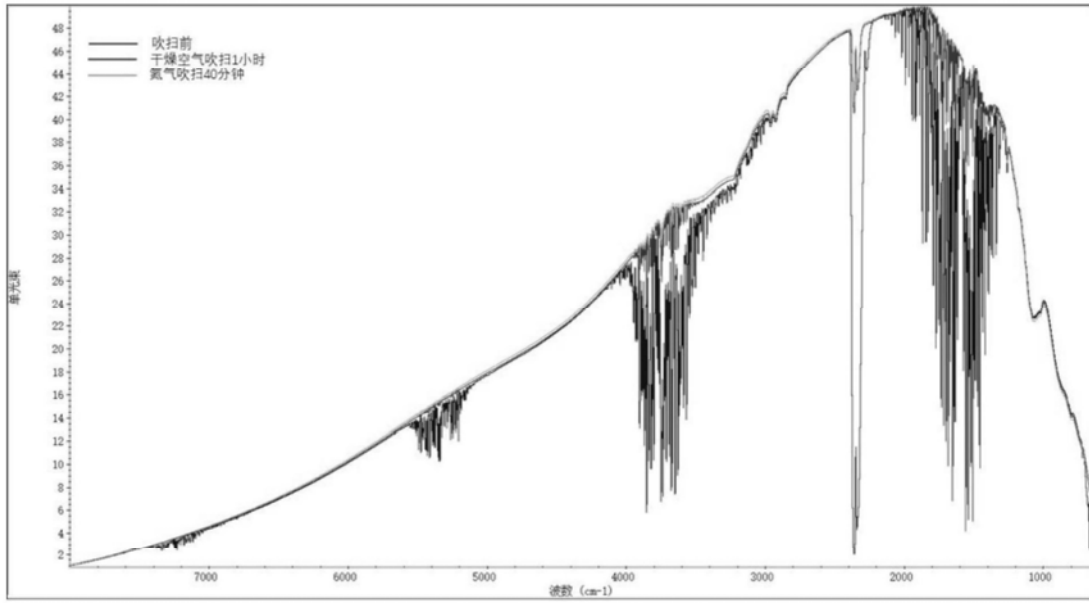


图1

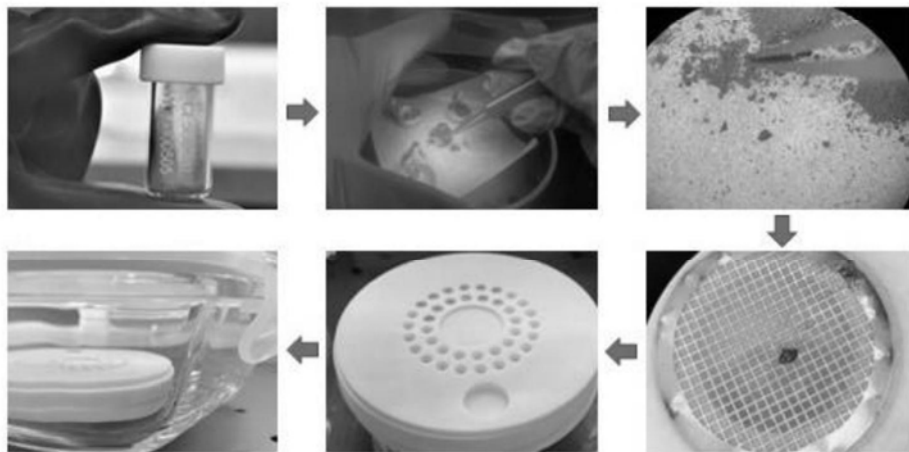


图2

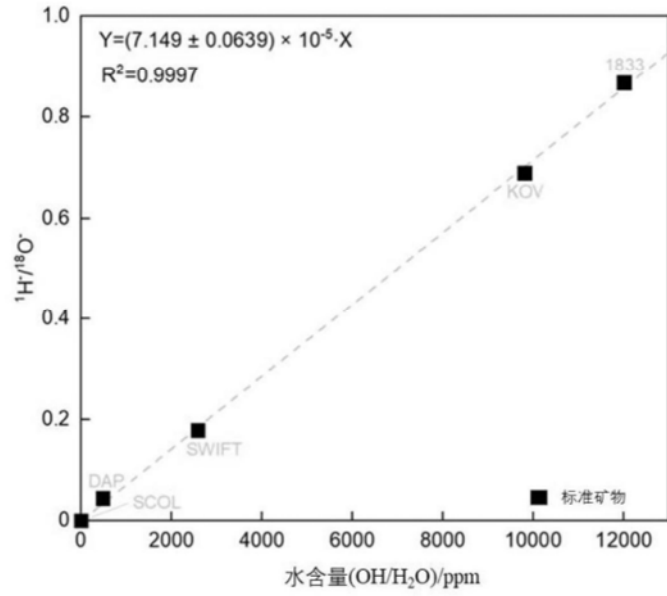


图3

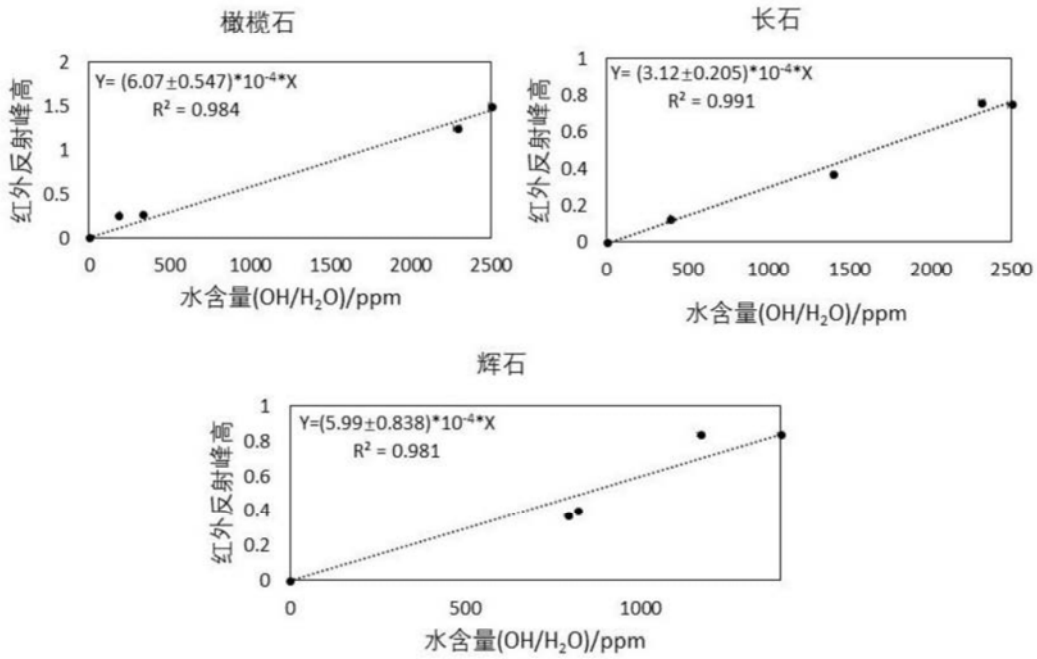


图4

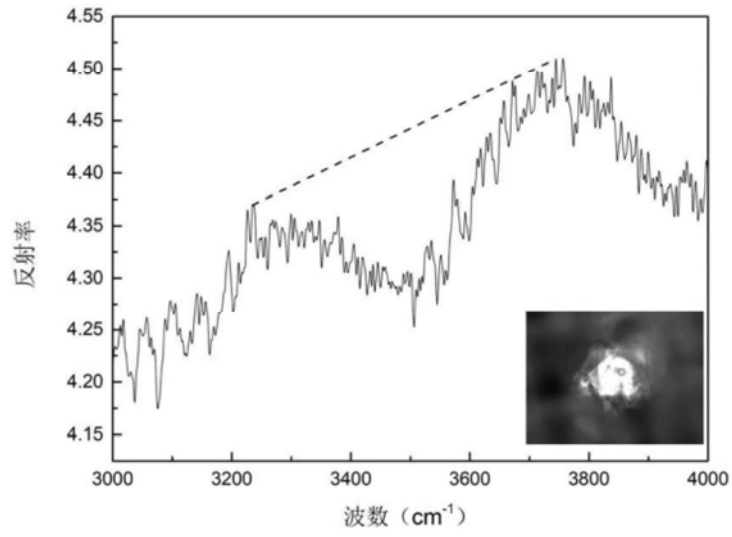


图5

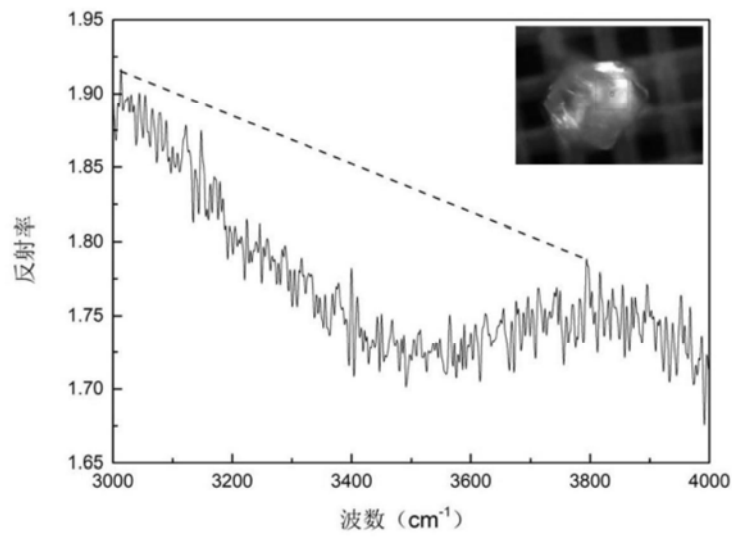


图6

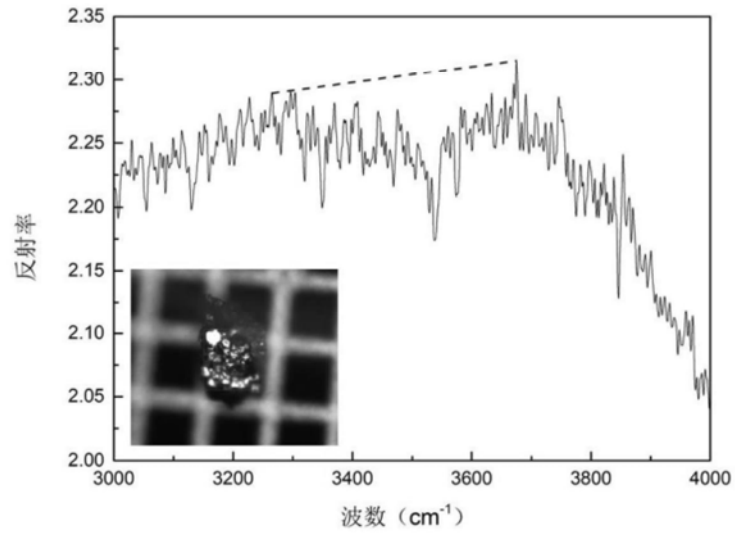


图7