

文章编号: 1000-4734(2022)04-0516-09

高分辨率 X 射线计算机断层扫描技术在流体包裹体研究中的应用与前景

梁伟安^{1,2}, 严冰¹, 向云燕¹, 魏文凤^{1,2*}

(1. 成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059;
2. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 高分辨率 X 射线计算机断层扫描 (HRXCT) 由于其具有无损分析、三维成像、高分辨率的优点, 被作为一种定量研究手段广泛应用于地球科学研究中。HRXCT 在透明矿物与不透明矿物的流体包裹体和熔体包裹体研究中展示了强大的三维成像能力, 可以辅助确定包裹体的位置和性质, 并有助于解决包裹体岩相学上原生和次生包裹体的判别问题以及包裹体体积计算问题。近年来, HRXCT 在流体包裹体研究中得到了广泛应用, 取得了许多重要研究成果。为此, 本文综述了 HRXCT 的工作原理、仪器方法、以及其在流体包裹体及熔体包裹体研究中的应用和进展, 同时也给出了 HRXCT 在地球科学研究中可能存在的部分问题。

关键词: 高分辨率 X 射线断层扫描; 三维成像; 流体包裹体; 熔体包裹体

中图分类号: P575; P579

文献标识码: A

doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2022.42.052

第一作者: 梁伟安, 男, 1996 年生, 硕士研究生, 地球化学专业. E-mail: liangweian@stu.cdut.edu.cn

Applications and prospects of the high-resolution X-ray computed tomography in the study of fluid inclusions

LIANG Wei-an^{1,2}, YAN Bing¹, XIANG Yun-yan¹, WEI Wen-feng^{1,2*}

(1. Institute of Earth Sciences of Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China)

Abstract: High-resolution X-ray Computed Tomography (HRXCT), due to its advantages of nondestructive analysis, three-dimensional imaging, and high-resolution tomography, has been widely used as a quantitative analytical method in geoscience researches. The HRXCT has a strong power of 3D imaging for studying fluid and melt inclusions in transparent and opaque minerals. It offers helps on determining the location and nature of the inclusions, petrographic discriminating the primary and secondary inclusions, and calculating the inclusion volumes. In recent years, many important research achievements have been made with wide applications of the HRXCT in fluid inclusions studies. Here, we have reviewed the principle, instrumentation, analytical methods, and applications and progresses of the HRXCT in the study of fluid inclusions, and have pointed out some possible problems regarding on applications of HRXCT in earth science researches.

Keywords: high resolution X-ray computed tomography; three-dimensional imaging; fluid inclusion; melt inclusion

流体包裹体是古流体的信息载体, 能记录矿物形成时的 p - V - T - X 等物理及地球化学信息^[1]。包裹体在矿物晶体内的三维空间分布、形状及不同相的体积比可以提供晶体生长、变形及流体和熔体性质等关键信息^[2]。然而, 传统的光学显微镜仅能获得包裹体的二维图像, 存在透视效果不佳和投影问题, 难

收稿日期: 2021-08-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: U1967207); 国家重点基础研究发展计划 (编号: 2014CB440902)

* 通讯作者, E-mail: weiwenfenghao@163.com

以准确分析包裹体形状、各相体积比及分布等信息。为了解决包裹体形状不规则带来的计算难题，从最简单的积分算法求取面积进而推导出体积分数，到引入修正球形体积模型来计算包裹体各相体积比^[3-4]，再到在确定出包裹体的顶底界后进行“z”轴扫描以期获得更多相关信息，技术手段日趋丰富^[2, 4-10]。

高分辨率 X 射线计算机断层扫描 (HRXCT) 作为一种非破坏性的分析方法，具有高分辨率、高灵敏度和能观察空间结构的独特优点，在包裹体研究中展示了其强大的三维成像能力，已成功在萤石、天然/人工合成石英、橄榄石、闪锌矿、黄铁矿、磁黄铁矿、石榴子石和黑钨矿中开展了流体和熔体包裹体成像研究^[2, 11-16]。HRXCT 在包裹体研究的成功应用，不仅为研究者提供包裹体的三维空间分布、形状及准确的体积计算，还有助于解决了矿物内原生包裹体和次生包裹体判别的难题。前人的研究成果表明，HRXCT 在包裹体研究中具有传统方法无可比拟的优越性，也将是促进地质学进一步发展的有利技术。

1 HRXCT 工作原理及研究设备

1.1 X-CT 成像原理

X-CT 成像设备最简单要素就是 X 射线源、旋转台以及用于测量 X 射线在物体内部衰减程度的探测器^[14]。其成像原理是：1) 利用物理技术测定 X 射线在物体内的衰减系数；2) 使用数学方法呈现衰减系数值在物体某剖面上的二维分布矩阵；3) 将二维分布矩阵转换为数字图像，采用灰度阈工具分割图像的灰度分布，实现断层图像的重建^[17]，简单归纳为数据采集、图像重建和图像显示。

现代实验室 CT 系统大多数采用锥束装置，待测样品置于旋转台上，X 射线源发射窄束 X 射线，透过样品后投射到平面检测器上 (图 1a)，采用层析-重建算法将数字投影数据转换成计算机生成的图像，每一幅图像都由许多几乎无法分辨的小点组成 (或称为像素)^[14, 18]。重建后的每一幅图像都可以表示为 1 组连续的二维灰度图 (称为切片)，当多个切片相互叠放在一起的时候，平面像素就呈现出 1 个新的维 (三维)，可提供样品基于空间体积特征的三维视图 (图 2)^[19]。二维切片的像素大小通常等于连续切片的间距，而此设备每次可以收集数千个切片的数据，因此它的三维成像比较好，图像分辨率高^[18-20]。通过延长扫描时间，能增加样品内部三维成像的信息量，有效降低图像噪声 (图 3)^[14, 21]。平行光束或近平行光束成像能提供准确的体积变化 (图 1b)，由于其所需平面检测器小 (从 cm 到 mm 甚至更小)，像素密度更高，通过控制检测器分辨率，可以提供更清晰的图像。

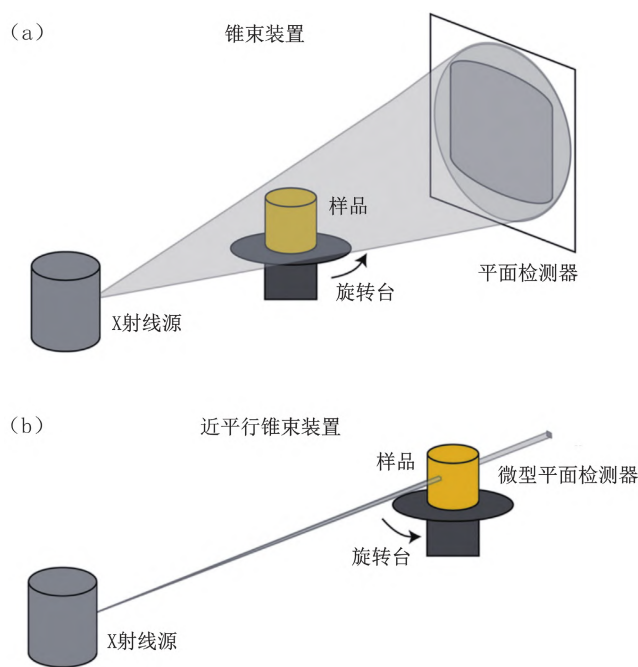


图 1 高分辨率 X 射线计算机断层扫描设备原理图 (据文献[14]修改)

Fig. 1. Schematic illustration of the high resolution X-ray computed tomography facility.

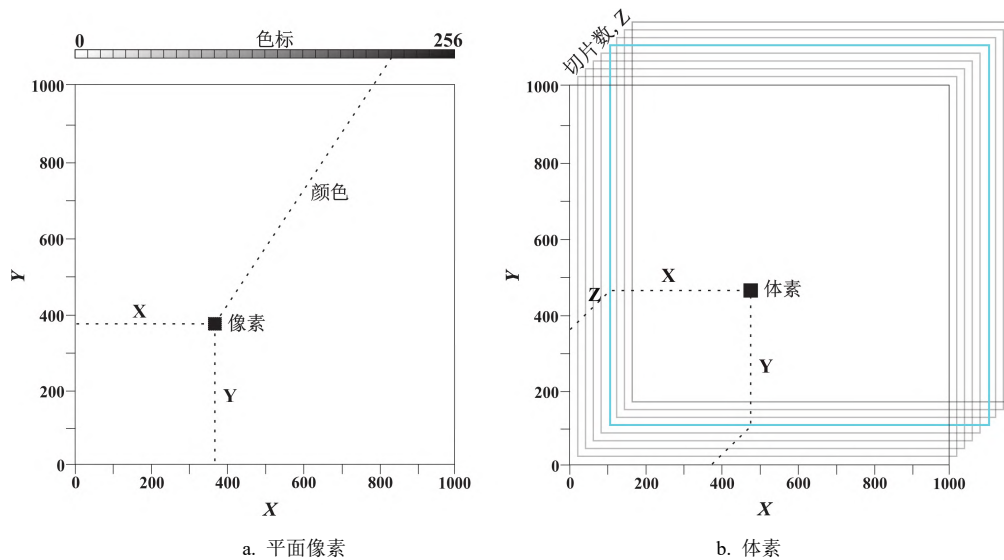


图2 三维视图形成原理(据文献[19]修改)

Fig. 2. Principle of the 3D imaging.

HRXCT能够快速、无损地对不透明的固体物体内部进行三维成像。对于不能破坏的稀有的或不可替代的标本或样品,一些关于内部材料或几何形状或无法从外部观察其特征的信息,X射线CT可能是获取其内部信息的有效手段。拥有高分辨率的三维成像决定了图像的清晰度和细节的显示。澳大利亚资源研究中心的XRADIA XRM500 HRXCT三维成像空间分辨率能达到 $0.7\ \mu\text{m}$ ^[18]。中国科学技术大学国家同步辐射实验室的同步辐射X射线光刻技术已实现纳米级的超高空间分辨率,约为 $60\ \text{nm}$ 断层扫描重建,利用此技术实现了对闪锌矿中单个流体包裹体进行三维成像研究^[4]。三维重建图像显示矿石内不同矿物的大小、形状及其分布相较于传统二维观察估计更具客观性。以包裹体不同相体积分数的计算为例,传统光学显微镜下包裹体不同相体积分数的计算,主要通过改变样品内的聚焦深度获得沿Z轴的包裹体厚度,这种方法具有很强主观性^[3]。通过HRXCT三维重建包裹体可以准确获取其形状、大小及Z轴上的厚度,各相体积分数的计算结果更具客观性。因此,其优点可总结为:具备无损分析能力、高分辨率及实现研究物体的定量研究。

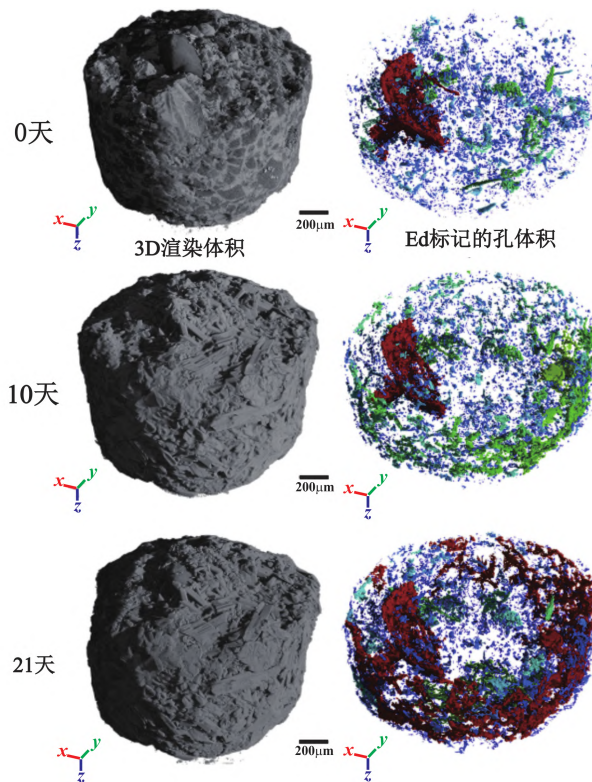


图3 钙质砂岩三维微观成像过程示意图(据文献[21]修改)

Fig. 3. Schematic diagrams of 3D microscopic imaging processes for the calcareous sandstone.

1.2 仪器设备及样品制备

主体部分主要为 X 射线源、旋转台、平面检测器及计算机辅助成像设备。目前可用于地球科学研究的扫描系统主要来自德国 ZEISS、Phoenix 和日本 Nikon, 现常用的 HRXCT 设备型号有 ZEISS Xradia 510 Versa、Phoenix Nanotom S scanner 及 Nikon XTH 320/225 等。

岩矿样品制备普遍制作成圆柱体, 据测试需要将样品加工成合适大小^[2, 16, 22-24], 例如, Richard 等^[2]将样品制作成规格为(3~30) mm×(4~50) mm×(0.15~20) mm 的圆柱体, 依据 CT 设备、切片数量及图像分辨率的不同调整扫描时长(37~280 min), 将扫描获取的 1200~3141 张切片图像通过计算机处理即可得到矿物内包裹体的形状、大小、数量及三维空间分布。

2 HRXCT 在包裹体领域的应用

作为一种无损三维分析技术, HRXCT 通过与其他方法获得的数据进行融合, 实现三维可视化和动态观察。近年来该技术在矿床研究中得到广泛应用, 本文主要针对 HRXCT 在包裹体岩相学及包裹体体积重建方面展开讨论。

2.1 流体/熔体包裹体岩相学

由于矿物相、流体相和气相对于 X 射线的衰减差异巨大, HRXCT 可重建矿物中流体包裹体的图像(图 4), 确定流体(和熔体)包裹体的大小、几何形态、空间分布等, 对微观尺度包裹体研究具有重要意义^[14]。

目前, HRXCT 在包裹体研究中主要发挥 2 个重要的作用: 1) 依靠三维成像能力辅助确定包裹体的位置和性质, 从而提高常规分析的效率和质量; 2) 通过包裹体三维成像辅助计算包裹体体积及各相体积分数。HRXCT 已被成

功应用于萤石、天然/合成石英、橄榄石、闪锌矿、黄铁矿、磁黄铁矿、祖母绿、石榴子石和黑钨矿的流体或熔体包裹体研究中(图 5)^[1, 4, 11-16]。Richard 等^[2]利用 HRXCT 对萤石、天然/合成石英、长石、硅酸盐、祖母绿和黑钨矿等矿物中的熔体和流体包裹体进行了三维成像和体积重建, 发现其可以很好的识别各矿物相的组成以及帮助计算包裹体中各相的体积分数, HRXCT 重建分辨率能达到 $\sim 1 \mu\text{m}^3$ /体素。当分辨率达到 $1 \mu\text{m}^3$ /体素时, HRXCT 可以识别大于 $5 \mu\text{m}$ 的流体包裹体, 对于较大($>25 \mu\text{m}$)的包裹体可以进行不同相的体积重建。由图 5 可以看出 HRXCT 无论在透明矿物(橄榄石、石英、长石)还是不透明矿物(磁黄铁矿、黑钨矿)中成像效果都比较好, 矿物相和包裹体相边界清晰。包裹体内的矿物相、汽相及液相密度差异巨大, 对比度高, 足以正确识别。因此, HRXCT 对不同类型矿物中的流体和熔体包裹体进行观察是一种强有力的技术。

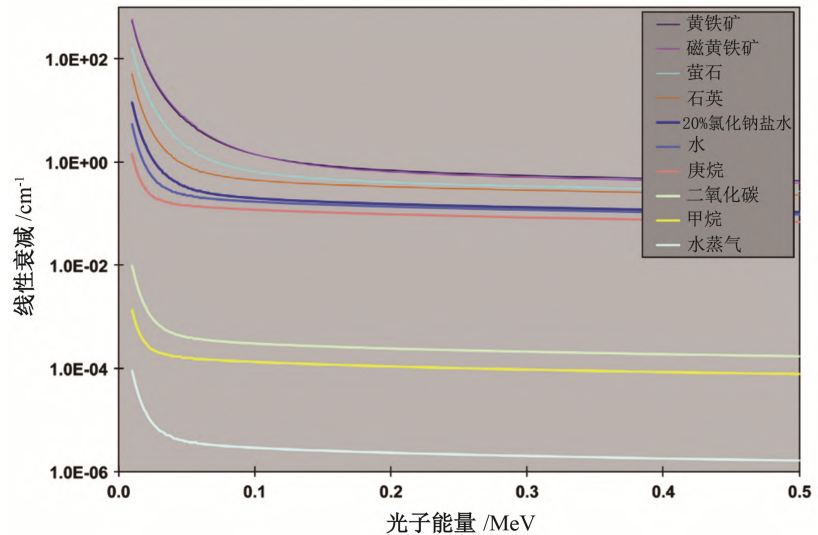
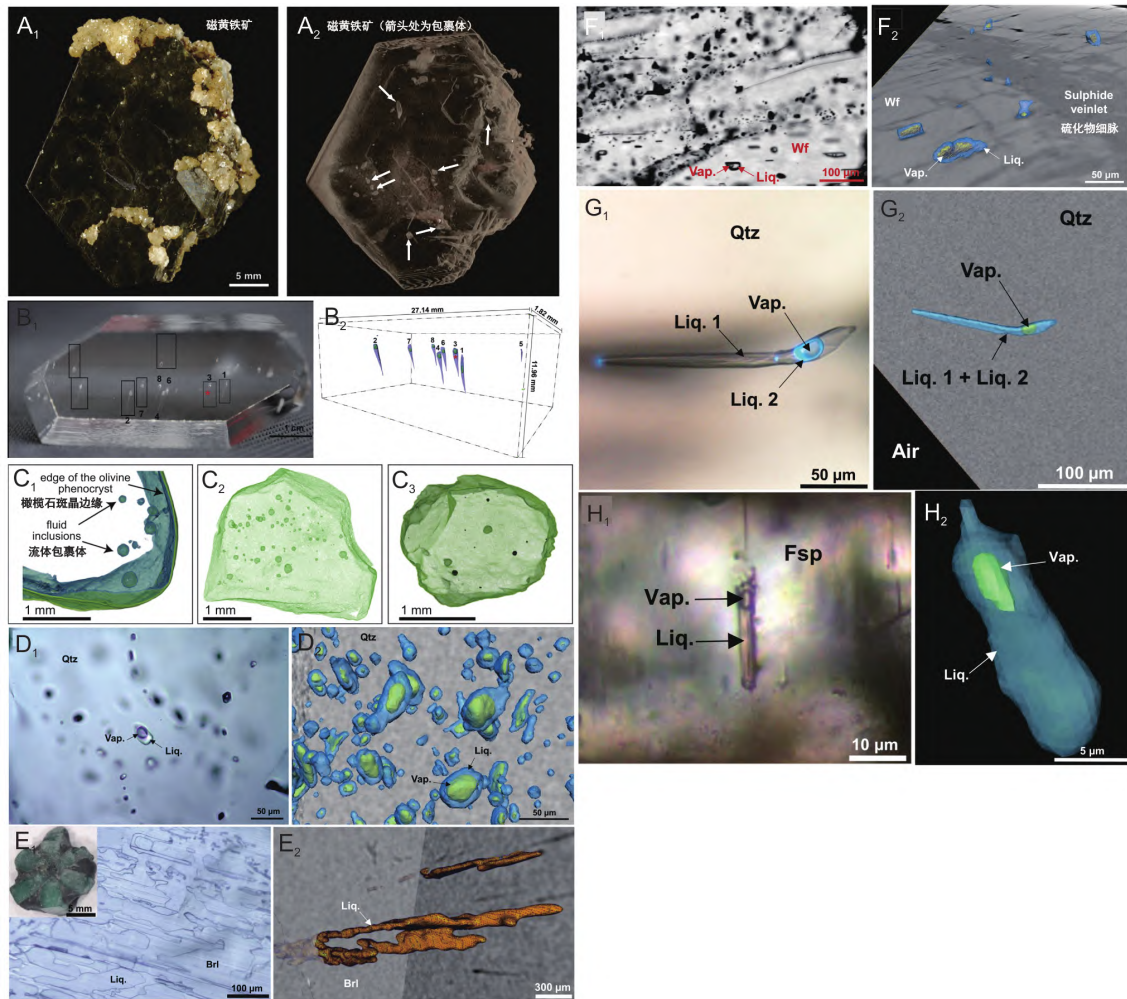


图 4 几种常见物体的线性衰减系数图(图据文献[14]修改)

Fig. 4. Linear attenuation coefficients for several common objects.



A₁A₂为磁黄铁矿(据文献[14]修改); B₁B₂为合成石英,绿色部分属于气相,蓝色部分为液相(据文献[2]); C₁C₂C₃为橄榄石(据文献[16]修改); D₁D₂为天然石英(据文献[2]); E₁E₂为祖母绿(据文献[2]); F₁F₂为黑钨矿(据文献[2]); G₁G₂为合成石英(据文献[2]); H₁H₂为长石(据文献[2])

图5 透明矿物及不透明矿物包裹体的三维成像图

Fig. 5. Three-dimensional images for inclusions in transparent and opaque minerals.

对包裹体研究者来说,确定原生和次生包裹体是一个关键问题,传统的区分方法包括以下几种:1)矿物生成反推法;2)矿物单个晶体中的包裹体;3)晶体生长环带中的包裹体;4)利用偏光显微镜和阴极发光显微镜确定主矿物的共生组合、生成顺序和结构来确定包裹体与主矿物之间的关系,进而确定其是原生还是次生包裹体;5)包裹体在矿物中和矿物间的分布^[25]。透明矿物中的包裹体可以通过一般的光学显微镜和阴极发光进行观察,而不透明矿物中的包裹体则需要借助红外显微镜进行观察。依据原生和次生包裹体的判别方法,HRXCT无论在透明或是不透明矿物均有较好的成像效果^[2, 4, 25],且能在更大尺度上直接依据包裹体形状、分布排列去直接判别原生和次生包裹体,也解决了一些不透明矿物在红外显微镜下透明度不佳的问题。因此,HRXCT可能会成为判别矿物中原生包裹体和次生包裹体的重要技术手段。

2.2 包裹体体积重建

流体包裹体的 p - T - V - X 能反映地壳深处的水岩反应的过程,其各相准确的体积分数也能推断出共生包裹体组合最初是从单相还是多相孔隙中捕获流体的^[2]。Yao等^[4]指出准确定义单个流体包裹体和共生流体包裹体组合的几何特征对流体包裹体成分研究有极大帮助。例如,精确计算流体包裹体的体积能

有效提升质子诱导 X 射线 (PIXE) 和同步辐射诱导 X 射线荧光 (SRXRF) 的数据准确度。因此, 精确计算包裹体的体积与各相体积是对包裹体深入研究至关重要的一步。

为准确获取流体和熔体包裹体的结构、形态以及体积, 在几十年间发展出了气相百分数、冰点温度和均一温度与 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 体系中流体的体积特征之间的关系^[5]、主轴台技术^[6]、激光共焦扫描显微镜^[7]、透射电子显微镜^[8]、二次谐波显微镜^[9]、基于同步加速器的 X 射线荧光计算机断层扫描^[10]和纳米级 X 射线计算机断层扫描^[4]等方法和技术。过去体积特征的计算依赖不准确的光学估计, 为了解决包裹体不规则的形状带来的计算困难, 引入了球形模型来进行修正^[3], 而在自然界中球形包裹体是非常罕见的。如果包裹体具有不同的方向, 即使包裹体的形状相似, 所含气相的体积分数完全相同, 在光学显微镜下估算仍会出现偏差。随着观察包裹体的方向不同, 计算出的体积分数会存在差异^[3], 包裹体各相体积分数的准确估算需要获取 Z 轴上包裹体的厚度和形状信息, 主轴台技术因此发展而来^[6], 该方法用于估算规则形状的两相 (液体和气体) 单个流体包裹体和相同均一温度的流体包裹体组合的体积分数时, 精确度较高, 但其缺点是计算复杂和有过多的条件限制^[3]。HRXCT 计算包裹体各相体积分数相对于上述方法更方便快捷, 三维重建能显示出包裹体的大部分形状 (近球形、细长状、管状或复杂的负晶形), 克服了气泡被压扁或包裹体形状复杂时气相体积计算的困难。法国洛林大学 GeoResources 实验室的 Phoenix Nanotom S scanner 设备能区分石英流体包裹体气液两相中的气相最小直径为 $2\ \mu\text{m}$, 在 HRXCT 三维成像后, 使用简单的灰度阈工具手动分割包裹体内的不同相, 当选定的灰度值范围包含某个相的所有体素而不包含其他相的体素时, 这种分割是最佳的, 然后通过包裹体不同相体素簇中的体素数量计算体积^[2]。

传统的方法计算包裹体体积也常常采用球形修正模型, 因为球形修正模型适用于所有形状的包裹体, 在不能获得流体包裹体深度的情况下, 需要假设流体包裹体为球体或椭球体 (即假设宽度值=深度值), 然后运用球体或椭球体的体积公式计算流体包裹体的体积^[4]。这种方法必然会带来较大的误差, 特别是用于负晶形的流体包裹体。为了比较传统流体包裹体体积估算值与基于 HRXCT 三维成像的流体包裹体体积计算值之间的误差, Yao 等^[4]利用纳米级 X 射计算机断层扫描重建了闪锌矿流体包裹体的三维图像, 依据断层扫描获取的图像和动画将流体包裹体视为椭球体 (在断层扫描获取的图片没有合成三维模型图的情况下), 从 -60° 至 $+60^\circ$ 以 2° 的间隔采集 61 张图像 (切片图像), 从中挑出包裹体的最大宽度和最小宽度作为轴 A 和轴 B (椭球体的宽度与深度), 流体包裹体最长的长度视为轴 C, 轴 A、B、C 分别记为 $a=8.838\ \mu\text{m}$ 、 $b=6.873\ \mu\text{m}$ 、 $c=10.912\ \mu\text{m}$, 然后根据椭球体体积计算公式: $V_{3D}=(4/3)\pi abc=2776.339\ \mu\text{m}^3$; 在光学显微镜下二维成像的流体包裹体测得宽度值为 $8.765\ \mu\text{m}$, 长度值为 $10.699\ \mu\text{m}$, 在无法得知深度的情况下同样假设流体包裹体的宽度等于深度, 即深度值为 $8.765\ \mu\text{m}$, 根据椭球体体积计算公式: $V_{2D}=(4/3)\pi b^2c=3442.989\ \mu\text{m}^3$ 。该研究认为基于三维切片图像计算值比传统方法估计的值低了 19%, 精确度更高。

2.3 HRXCT 应用实例

HRXCT 在包裹体研究中仍处于起步及探索阶段, 当前仪器在包裹体领域的开发和使用主要是弥补传统方法研究包裹体的不足, 结合仪器的成像优点多方位丰富包裹体研究。

2.3.1 包裹体稀有气体分析

压碎法是获取矿物包裹体中稀有气体的主要方式, 其优点是不易释放晶格中的气体, 可有效降低后期放射成因稀有气体和大气的影响, 能获得丰富的包裹体群的成分信息。其存在不足是压碎后稀有气体提取率不高, 需要多次压碎^[27]。在实验分析前采用 HRXCT 对岩石样品进行前处理有 2 个优点: 1) 可挑选和定位含气体丰富及直径较大的包裹体, 提高压碎后的提取效率; 2) 能避免挑选错漏而混入次生包裹体, 保证数据分析的质量。Horton 等^[16]对美属萨摩亚 Ofu 和 Olosega 岛上的野外玄武岩堤坝中

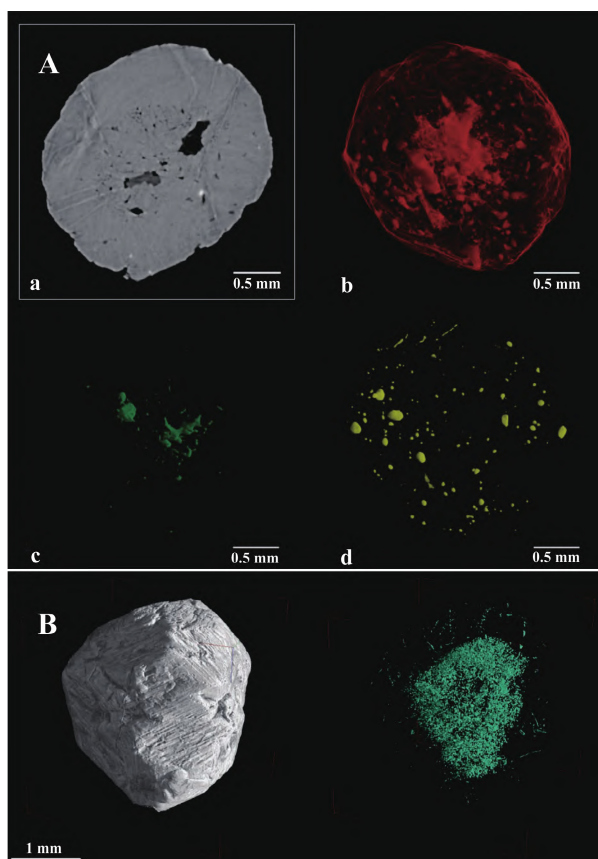
的橄榄石晶体进行 He 同位素分析之前,选取在室温下预先做好干燥处理的 1065 个最大的橄榄石斑晶,放置于直径 1 cm、高 1 cm 的圆柱体塑料胶囊中,使用微 CT 观察橄榄石中的包裹体数量、空间分布(图 5C₁C₂C₃),最终选择 157 个包裹体体积较大的颗粒用压碎法进行稀有气体分析,以此确保分析的准确性及数据解释的合理性。

2.3.2 火成岩晶体研究

晶体大小、形状和空间分布记录了火成岩结晶历史的重要信息,特别是结构演化对成核、生长历史和条件很敏感^[28]。传统的薄片研究不能完全观察到晶体的纹理结构及空间分布,薄片制作过程也可能导致玻璃基质中晶体破碎,得到的实验数据存在一定误差。HRXCT 能提供详细的火成岩晶体结构,以浮岩为例,高孔隙度和晶体分散的特点影响薄片研究的效率^[29],而浮岩晶体通常单独分散在气泡状的玻璃基质中,X 射线 CT 无疑是研究浮岩晶体的理想手段^[30]。通过 X 射线 CT 收集浮岩样品的层析数据成像,可获取浮岩晶体的普遍尺寸,绝大多数晶体尺寸在 10~1000 μm 的范围内,对这些晶体的尺寸、分布及纹理研究可以了解火山喷发前和喷发时的晶体结晶历史^[30]。而以往不同研究方法(如铀石地质年代学^[32]、氧同位素^[33]、热力模型及纹理和扩散计时法^[34])得到火山喷发前和喷发时的晶体结晶历史的结果存在较大差异。Pamukcu et al^[13]采用 HRXCT 对石英晶体中的熔体包裹体进行三维成像,通过观察包裹体的结构(大小、形状及位置),计算石英结晶时间和生长速率,得出了巨型岩浆体能在 10 a 到 100 a 的短时间尺度内积聚喷发的新认识。

2.3.3 矿物生长研究

通过 HRXCT 对包裹体和寄主矿物的系列扫描和三维重组,对于矿物的生长方式、形成环境等方面的分析研究具有重要的作用。例如,Parisatto et al^[15]使用 HRXCT 对石榴子石及其中的熔体包裹体和流体包裹体进行三维空间分布成像,通过专用的图像处理协议,将宿主石榴子石透明化,分别展示熔体包裹体、流体包裹体、孔隙及较重的含矿物子晶包裹体(图 6A)。这样可以研究不同相包裹体及其他矿物相在石榴子石内的分布规律,同时基于三维成像图形计算石榴子石内从核心到边缘包裹体密度的变化(包裹体密度连续下降)(图 6B),探讨在单一生长阶段中,包裹体密度的变化与石榴子石生长速率的关系,并指明其中一种可能性——在反应速率恒定的情况下,从石榴子石核心到边缘包裹体密度的连续下降,石榴子石的径向生长也有类似的下降。



A. (a)石榴子石的层析二维切片;(b)熔体包裹体呈红色,并伴有较大的夕线石和斜长石,以及半透明的石榴子石外表;(c)孔隙和流体包裹体呈绿色;(d)含矿物子晶包裹体呈黄色。B.石榴子石的三维效果图(左)以及石榴子石(左)透明化处理后显示的熔体包裹体和流体包裹体(右)(据文献[15])

图 6 石榴子石的三维效果图

Fig. 6. Three-dimensional rendering images for the garnet.

3 HRXCT 在地质学上的亟待解决的问题及应用前景

自 20 世纪 70 年代起, 工业 HRXCT 经过 40 多年的发展, 已经在矿床学研究中得到广泛应用, 为矿物岩石学研究提供了可靠的定量研究方法。由于不同矿物相、气体相和流体相之间的密度差异显著, CT 与相关研究提供了独特的技术, 以确定矿物晶粒的原位特征。这种研究在金和其他高密度贵金属方面尤为突出, 例如在金刚石矿床^[35]、斑岩型 Cu-Au 矿床^[36]及岩浆 PGE-Ni-Cu 矿床开展综合经济评价^[18, 37]。贵金属矿物通常与其他高密度金属矿物伴生, 也可能包裹贵金属晶粒, 从而影响贵金属的提取与回收, CT 无损分析为评估矿石中金属矿物晶粒原位组合提供了一种可靠的手段; 再者, 微 CT 技术应用于亚微米范围内的小扫描体积, 对高密度金属晶粒的大小及形状进行定量研究, 不仅有助于贵金属矿体成因的科学研究, 还提供了有关矿物晶粒大小和组合的独特原位信息, 这些信息在矿物回收和加工有实际应用, 促进所含金属资源的回收^[14], 可见 HRXCT 在经济地质学和矿床学领域的应用前景广阔。未来 HRXCT 将会是包裹体分析前的先行手段, 例如通过 HRXCT 提前标记的包裹体进行冷热台测温、LA-ICP-MS 原位分析。此外, HRXCT 还能与电子探针 (EPMA)、扫描电镜 (SEM)、激光拉曼光谱 (LRS) 等技术设备相结合。在目前 CT 仪器分辨率水平上, CT 研究的实际应用可能是对包裹体进行侦察或勘探, 特别是在破坏性分析或分析之前, 通过确定包裹体的位置和性质, 从而提高常规分析的效率和质量。未来的发展应侧重于: 1) 通过优化数据处理和改进实验装置, 实现更高的空间分辨率和更有效的相位识别; 2) 对流体和熔体包裹体分布和体积重建采取更定量的方法, 包括更好地估计计算体积的准确性和精度^[2]。

但目前 HRXCT 应用过程中的仍存在问题待解决, 问题归结为以下几个方面: 1) 高能量区衰减不明显, 在高能量区域, 假如矿石内部几种矿物密度均较大, X 射线衰减不明显, 矿物之间可能难以分辨^[21], 在未来可能需要提高平面检测器的分辨率及 X 射线在矿物内部衰减的灵敏度, 或通过测试调整最佳的 X 射线能量范围来解决此类问题; 2) 矿物内部因素的影响, 矿物内某些元素的存在会使衰减程度加大, 如密度比石英和正长石大的方解石由于钙的存在, 方解石衰减程度比石英和正长石大得多^[20], 使原本在图像显示上方解石比石英和正长石亮, 而转变成方解石比两者均暗, 容易造成对矿物的误判; 3) 噪声影响, X 射线成像技术与所有成像技术一样, 都会受到噪声影响, 即泊松噪声^[38], 噪声的存在会使图像对比度变小以及图像细节信息被掩盖, 可以通过图像增强来降低噪声, 例如中值滤波、平滑滤波、小波降噪及维纳滤波; 4) 离散化影响, 物体在成像时会做旋转运动, 当被分析的小结构和孔的表面积与体积之比较大时, 得到的成像会是伪像, 降低了数据分析的准确性, 这样可能会造成较大的误差^[20, 39]; 5) 可能存在样品破坏, 取样和固定样品同样会破坏原始样品, 因此三维重建需要一个刚性样品, 能在 CT 扫描过程中不移动, 特别是要达到很高的空间分辨率^[21]。

参 考 文 献:

- [1] 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等. 2004. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [2] Richard A, Morlot C, Creon L, et al. Advances in 3D imaging and volumetric reconstruction of fluid and melt inclusions by high resolution X-ray computed tomography [J]. *Chemical Geology*, 2019, 508: 3-14.
- [3] Bakker R J, Diamond L W. Estimation of volume fractions of liquid and vapor phases in fluid inclusions, and definition of inclusion shapes [J]. *American Mineralogist*, 2006, 91(4): 635-57.
- [4] Yao JM, Chen HY, Tian YC, et al. Three-dimensional imaging of a single fluid inclusion in sphalerite by nano X-ray tomography [J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 71: 116-20.
- [5] Bodnar R J. A method of calculating FI volumes based on vapor bubble diameters and PVTX properties of inclusion fluids [J]. *Economic Geology*, 1983, 78: 535-42.
- [6] Anderson A J, Bodnar R J. An adaptation of the spindle stage for geometric analysis of fluid inclusions [J]. *American Mineralogist*, 1993, 78(5/6): 657-64.
- [7] Petfod N, Miller J A, Rankin A H. Preliminary confocal scanning laser microscopy study of fluid inclusions in quartz [J]. *Journal of Microscopy*, 1995, 178(1): 37-41.

- [8] Viti C, Frezzotti M L. Transmission electron microscopy applied to fluid inclusion investigations [J]. *Lithos*, 2001, 55(1/2/3/4): 125-38.
- [9] Stoller P, Kruger Y, Ricka J, et al. Femtosecond lasers in fluid inclusion analysis: Three-dimensional imaging and determination of inclusion volume in quartz using second harmonic generation microscopy [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 253(3/4): 359-68.
- [10] Cauzid J, Philippot P, Bleuett P, et al. 3D imaging of vapour and liquid inclusions from the Mole Granite, Australia, using helical fluorescence tomography [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2007, 62(8): 799-806.
- [11] Nakashima Y, Hiral H, Koishikawa A, et al. Three-dimensional imaging of arrays of fluid [J]. *Mineral*, 1997, 12: 559-568.
- [12] Pamukcu A S, Gualda G A, Rivers M L. Quantitative 3D petrography using X-ray tomography 4: Assessing glass inclusion textures with propagation phase-contrast tomography [J]. *Geosphere*, 2013, 9(6): 1704-1713.
- [13] Pamukcu A S, Gualda G A, Bégué F, et al. Melt inclusion shapes Timekeepers of short-lived giant magma bodies [J]. *Geology*, 2015, 43(11): 947-50.
- [14] Kyle J R, Ketcham R A. Application of high resolution X-ray computed tomography to mineral deposit origin, evaluation, and processing [J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 65(4): 821-39.
- [15] Parisatto M, Turina A, Cruciani G, et al. Three-dimensional distribution of primary melt inclusions in garnets by X-ray microtomography [J]. *American Mineralogist*, 2018, 103(6): 911-26.
- [16] Horton F, Farley K, Jackson M. Helium distributions in ocean island basalt olivines revealed by X-ray computed tomography and single-grain crushing experiments [J]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 2019, 244: 467-77.
- [17] Ketcham R A, Iturrin G J. Nondestructive high-resolution visualization and measurement of anisotropic effective porosity in complex lithologies using high-resolution X-ray computed tomography [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 302(1/2/3/4): 92-106.
- [18] Godel B. High-Resolution X-Ray Computed Tomography and Its Application to Ore Deposits: From Data Acquisition to Quantitative Three-Dimensional Measurements with Case Studies from Ni-Cu-PGE Deposits [J]. *Economic Geology*, 2013, 108(8): 2005-2019.
- [19] Kayser A, Knackstedt M, Ziauddin M. A Closer Look at Pore Geometry [J]. *Oilfield Review*, 2006, 18(1): 4-13.
- [20] Ketcham R A, Carlson W D. Acquisition, optimization and interpretation of X-ray [J]. *Computers and Geosciences*, 2001, 27(4): 381-400.
- [21] Cnudde V, Boone M N. High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications [J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 123: 1-17.
- [22] Godel B, Rudashevsky N S, Nielsen T F D, et al. New constraints on the origin of the Skaergaard intrusion Cu-Pd-Au [J]. *Lithos*, 2014, 190: 27-36.
- [23] Godel B M, Barnes S J, Barnes S J. Deposition Mechanisms of Magmatic Sulphide Liquids: Evidence from High-Resolution X-Ray Computed Tomography and Trace Element Chemistry of Komatiite-hosted Disseminated Sulphides [J]. *Journal of Petrology*, 2013, 54(7): 1455-81.
- [24] Prichard H M, Barnes S J, Godel B, et al. The structure of and origin of nodular chromite from the Troodos ophiolite, Cyprus, revealed using high-resolution X-ray computed tomography and electron backscatter diffraction [J]. *Lithos*, 2015, 218: 87-98.
- [25] 卢焕章. 流体包裹体岩相学的一些问题探讨 [J]. *高校地质学报*, 2014, 20(2): 177-84.
- [26] Kesler S E, Bodnar R J, MERNAGH T P. Role of fluid and melt inclusion studies in geologic research [J]. *Geofluids*, 2013, 13(4): 398-404.
- [27] 武丽艳. 稀有气体同位素地球化学在矿床学研究中的应用进展 [J]. *岩石学报*, 2019, 35(1): 215-32.
- [28] Baker D R, Mancini L, Polacci M, et al. An introduction to the application of X-ray microtomography to the three-dimensional study of igneous rocks [J]. *Lithos*, 2012, 148: 262-76.
- [29] Gualda G A R, Cook D L, Chopra R, et al. Fragmentation, nucleation and migration of crystals and bubbles in the Bishop Tuff rhyolitic magma [J]. *Earth Sciences*, 2004, 95(1-2): 375-90.
- [30] Gualda G A R, Rivers M. Quantitative 3D petrography using x-ray tomography: Application to Bishop Tuff pumice clasts [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2006, 154(1/2): 48-62.
- [31] Pamukcu A S, Gualda G A R, Anderson A T. Crystallization Stages of the Bishop Tuff Magma Body Recorded in Crystal Textures in Pumice Clasts [J]. *Journal of Petrology*, 2012, 53(3): 589-609.
- [32] Crowley J L, Schoene B, Bowring S A. U-Pb dating of zircon in the Bishop Tuff at the millennial scale [J]. *Geology*, 2007, 35(12): 1123-1126.
- [33] Bindeman I N, Valley J W. Oxygen isotope study of the Long Valley magma system, California: isotope thermometry and convection in large silicic magma bodies [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 144(2): 185-205.
- [34] Gualda G A, Pamukcu A S, Ghiorsio M S, et al. Timescales of quartz crystallization and the longevity of the Bishop giant magma body [J]. *Plos One*, 2012, 7(5): e37492.
- [35] Taylor L A, Keller R A, Snyder G A, et al. Diamonds and Their Mineral Inclusions, and What They Tell Us: A Detailed "Pull-Apart" of a Diamondiferous Eclogite [J]. *International Geology Review*, 2010, 42(11): 959-83.
- [36] Kyle J R, Mote A S, Ketcham R A. High resolution X-ray computed tomography studies of Grasberg porphyry Cu-Au ores, Papua, Indonesia [J]. *Mineralium Deposita*, 2008, 43(5): 519-32.
- [37] Godel B, Barnes S J, Barnes S-J, et al. Platinum ore in three dimensions: Insights from high-resolution X-ray computed tomography [J]. *Geology*, 2010, 38(12): 1127-30.
- [38] Tlustos L, Campbell M, Heijne E, et al. Signal variations in high-granularity Si pixel detectors [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2004, 51(6): 3006-12.
- [39] Kerckhofs G, Schrooten J, Van Cleynenbreugel T, et al. Validation of x-ray microfocus computed tomography as an imaging tool for porous structures [J]. *Rev Sci Instrum*, 2008, 79(1): 013711.