

华南成矿省福建魁歧晶洞花岗岩样品孔隙结构的工业 X-CT 三维可视化研究

何鹏,魏彪,陈超,冯鹏,米德伶,任勇

重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室,重庆,400044

内容提要:地球科学的发展与各种分析测试技术密不可分。尤其是,随着现代科技的长足进步,产生了更为先进的现代分析测试手段使其在地球科学中的作用日益为世人瞩目,工业 X-CT(X-ray Computed Tomography)测量技术即是其中之一。它具有形象、直观显示地质岩矿样品内部的、无损的、原位的二维或三维(立体)信息等特点,可实现对地质岩矿样品 CT 二维断层图像进行全数字化的三维可视化处理与分析。本研究针对华南成矿省福建魁歧晶洞花岗岩 KQ-6 样品的孔隙结构,依据工业 X-CT 技术的原理及方法,获得了样品的 CT 二维序列图像,借助于数字图像处理分析工具,得到了样品的孔隙度和孔径分布统计结果,孔隙度测量值为 8.14%,孔径尺寸 0.4~2 mm;基于此,开展了该地质样品的三维可视化孔隙结构研究,获得了样品的孔隙连通的拓扑图形,直观展现了样品内部孔隙连通性,这对精细刻画地质样品内部结构特征及成矿流体的研究具有重要意义。

关键词:地质样品孔隙结构;工业 X-CT;三维可视化;孔径分布;孔隙连通性

1895 年,Rontgen 发现了 X 射线,并获得了第一张 X 射线图像(人手),从此揭开了人类利用 X 射线进行成像的序幕。Rontgen 本人也于 1901 年成为第一位诺贝尔物理学奖的获得者。随后,Hounsfield 和 Cormack 发明了 X-CT(X-ray Computed Tomography),即 X 射线计算机层析成像技术或断层扫描成像技术,这对于 X 射线成像技术的研究与发展具有里程碑的意义。为此,Hounsfield 和 Cormack 获得了 1979 年的诺贝尔医学奖(Hounsfield, 1973)。X-CT 通过对 X 射线的利用,能够无损检测出被测物体内部的结构状况及材质组成,以图像的形式,形象、直观、清晰显示被测物体内部的二维或三维结构信息。它最初主要应用于医学,也称为医学 CT。上世纪 80 年代初,美国军方率先将 CT 技术应用于航空、航天及军工产品的无损检测与无损评价中,被称为工业 CT(Industrial CT, ICT)技术(Allan et al., 1985; Spencer, 1989)。相比医学 CT,工业 CT 应用更为广泛,已在工业、航空航天、材料、石油及地质等领域得到了广泛应用,被称作最佳的无损检测与无损评价手段。

工业 X-CT 技术在地球科学中的应用,可以追溯至上世纪 90 年代初期(Coles et al., 1991)。然而,被世人所认识并应用于地球科学(含海洋地质),则始于上世纪 90 年代后期(Rosenberg et al., 1999)。在国外,工业 CT 技术目前主要集中于岩石孔隙、岩芯物理性质及力学行为等方面的研究。例如,玄武岩中的气泡研究、砂岩样品中固体颗粒聚集的形态以及孔隙连通情况的研究和岩石力学行为的研究等(Ashi, 1997; Øren and Bakke, 2003; Egermann et al., 2005; Arns et al., 2005; Pape et al., 2009)。近年来,国外依据工业 CT 技术具有无损、原位、直观的特点,利用工业 CT 技术为地质样品建立数字数据库,例如,为采集的岩石样品建立图像数据库,称为数字岩芯(Digital Core)(Verg et al., 2008)。通过这些数据库,人们可以方便、快捷地提取地质样品的相关物理特征,并对其进行统计与分析,可为矿床成因的研究提供一种新的数据来源。在国内,工业 X-CT 技术应用于地球科学(含海洋地质)尚处于起步阶段。例如,利用工业 X-CT 技术对储集岩石的孔隙度进行了研究,以预测油气藏储量(冯周等, 2011; 梁亚宁等, 2011);利用工业

注:本文为国家“深部探测技术与实验研究专项(SinoProbe)”第三项目“深部矿产资源立体探测技术及实验研究”第一课题(编号 SinoProbe-03-01)资助的成果。

收稿日期:2014-02-15;改回日期:2014-03-12;责任编辑:周健。

作者简介:魏彪,男,1963 年生。博士,教授,核探测与成像专业。Email:weibiao@cqu.edu.cn。

X-CT 技术分析冻土蠕变变形特征(马巍等, 1997; 陈世杰等, 2013); 利用工业 X-CT 技术进行岩芯样品孔隙度测量(陈超等, 2013), 等等。

1 技术理论基础

X-CT 成像技术的物理原理是基于 X 射线与物质的相互作用原理。X 射线穿越物体时, 由于产生光电效应、康普顿效应及电子对效应等作用过程, X 射线(即入射光子)将被物质吸收, 使得射线强度发生衰减, 其强度衰减情况遵循 Beer 定律, 如图 1 所示。

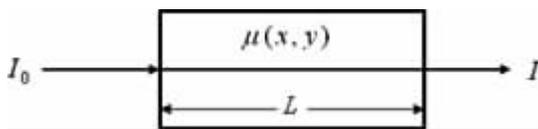


图 1 X 射线穿过物质的示意图

Fig. 1 Sketch map of x-ray interacted with object

由 Beer 定律确定的 I_0 、 I 及 $\mu(x, y)$ 的关系如下:

$$I = I_0 \exp \left[- \int_L \mu(x, y) dx dy \right] \quad (1)$$

$$\int_L \mu(x, y) dx dy = \ln \frac{I_0}{I} \quad (2)$$

实际上, 上式(1)就是 X 射线束穿过物质(体)时所遵循衰减规律 $I = I_0 e^{-\mu L}$ 的另一种表达形式。式中, I_0 为入射射线的初始强度; I 为射线穿越物质被衰减后的强度; μ 为射线穿越不同物质的吸收(衰减)系数, 其与射线的能量和物质的种类(密度及原子序数)等有关; L 为射线在物质中的行程长度, 也即被测物断面部位的横向线度。式(2)表明, 射线路径 L 上衰减系数 $\mu(x, y)$ 的线积分等于射线入射强度 I_0 与出射强度 I 之比的自然对数。 I_0 和 I 可用探测器测得, 则路径 L 上衰减系数的线积分即可算出。可见, 在工业 X-CT 系统中, 探测器的作用是测量 X 射线与物质作用前、后的射线强度 I_0 和 I , 由此便可求得衰减或吸收系数 μ , X-CT 成像就是将不同的 μ 值赋予不同的灰度值。

前已述, X-CT 成像技术的物理原理是基于射线与物质的相互作用原理。这种相互作用有三种主要过程, 即光电效应、康普顿效应及电子对效应, 并且引用吸收系数 μ 来表征 X 射线通过物质的衰减特性, 吸收系数 μ 可以写成如下关系式:

$$\mu = \tau + \sigma + \chi = \rho \left(a + \frac{bZ^{3.8}}{E^{3.2}} \right) \quad (3)$$

式中, τ , σ , χ 分别代表光电效应、康普顿效应及电

子对效应的吸收系数; Z 为介质的原子序数; ρ 为物质密度; E 为入射 X 射线的能量; a 为 X 射线能量决定的物理量; b 为常数。

可见, μ 是与 ρ 成比例的。CT 图像就是将不同的 μ 赋予相应的灰度值来表征的, 据此便可反映介质的物理特性, 如岩样的微观特征等; 此外, μ 还与 E 、 Z 等有关, 据此还能反映介质的化学特性, 如岩矿样的主成分等。因此, X-CT 成像技术在地质学中的应用基础主要是:

(1) 岩性不同, 如岩浆岩与沉积岩, 其岩石密度 ρ 及物质成分 Z 也不尽相同, 因此 μ 也就不同;

(2) 同一岩石, 如金属矿石, 其中的成分(围岩与金属矿物质成分)不同, 则它们的密度 ρ 也不同, μ 也就有差别;

(3) 岩石的成因不同或岩石的年代不同, 其中的 ρ 、 Z 等也不同, μ 就不同, 等等。

2 材料与方法

本研究依托国家深部探测技术与实验研究专项(Sino Probe-03-01-4F), 率先在国内针对华南成矿省(陈毓川等, 2007; 徐志刚等, 2008)福建魁歧晶洞的花岗岩样品开展了工业 X-CT 成像技术研究, 获得了该花岗岩样品的图像序列, 通过图像处理及三维可视化等计算机辅助处理, 对样品的孔隙结构进行全数字化的处理与分析, 从孔隙度、孔径分布以及孔隙连通性等方面, 对其进行孔隙结构的研究, 以此精细刻画地质样品内部结构及其特征, 在某种程度上对成矿成因分析有所裨益。

2.1 地质样品特征

地质样品为华南成矿省福建魁歧晶洞的花岗岩, 手标本照片如图 2 所示。福建魁歧晶洞碱性花岗岩(彭亚鸣和袁朴, 1984; 王蓉嵘和刘家远, 1993; 林清茶等, 2011)是在幔源或至少是下地壳起源的碱性岩浆快速侵位到地表、近地表的条件下, 原先岩浆中的气体快速逸失而形成的, 所以其中含有大量的孔隙。KQ-6 花岗岩样品采自福建魁歧的碱性晶洞, 不同于沉积岩和矿石为主的样品, 而是单纯的花岗岩, 其中含有大量的孔隙, 这是研究天然花岗岩的孔隙度及其连通性很好的样品。

2.2 实验方法

实验中, 利用工业 X-CT 设备对 KQ-6 花岗岩样品进行扫描成像, 获取 30 幅 CT 断面序列图像。成像基本参数如表 1 所示; CT 断面序列图像, 如图 3 所示。



图 2 福建魁岐晶洞碱性花岗岩手标本照片
Fig. 2 The photo of Fujian Kuiqi geode alkaline granite hand specimen

表 1 福建魁岐晶洞 KQ-6 碱性花岗岩样品成像参数
Table 1 The imaging parameters of Fujian Kuiqi geode alkaline granite sample KQ-6

X 射线能量	空间分辨率	断层扫描时间	断层图像尺寸
6MeV	2.0 μ l/mm	~5min	1024 \times 1024

本文利用图像边缘检测和阈值分割等图像处理手段对花岗岩样品的 CT 图像进行处理,为样品建立三维空间体数据,从而对岩矿石样品的孔隙结构进行全面有效地分析,包括:孔隙度计算、孔径分布统计和孔隙连通性分析。

根据工业 X-CT 的成像原理,CT 图像以图像灰度值表征物体密度分布。即,花岗岩样品 CT 图像的灰度值,可以分别代表样品该断面上的固体成分和孔隙成分。由此,通过阈值分割方法对花岗岩样品 CT 图像的灰度值进行分类,即可区分样品内部的固体物质和孔隙。由于一幅 CT 图像中,样品所占的感兴趣区域(Region Of Interest, ROI)仅占据整幅图像的一部分。在图像处理实验中,首先利用小波模极大值边缘检测方法提取出 CT 图像的 ROI (Canny, 1986; Mallat and Wang, 1992),即花岗岩样品所属区域;然后利用类间方差最大准则阈值分割方法对 ROI 进行阈值分割处理,分别标记出样品内部的固体物质和孔隙。图 4 展示了实验中对该样品第一幅 CT 图像处理的步骤。此时,样品的孔隙

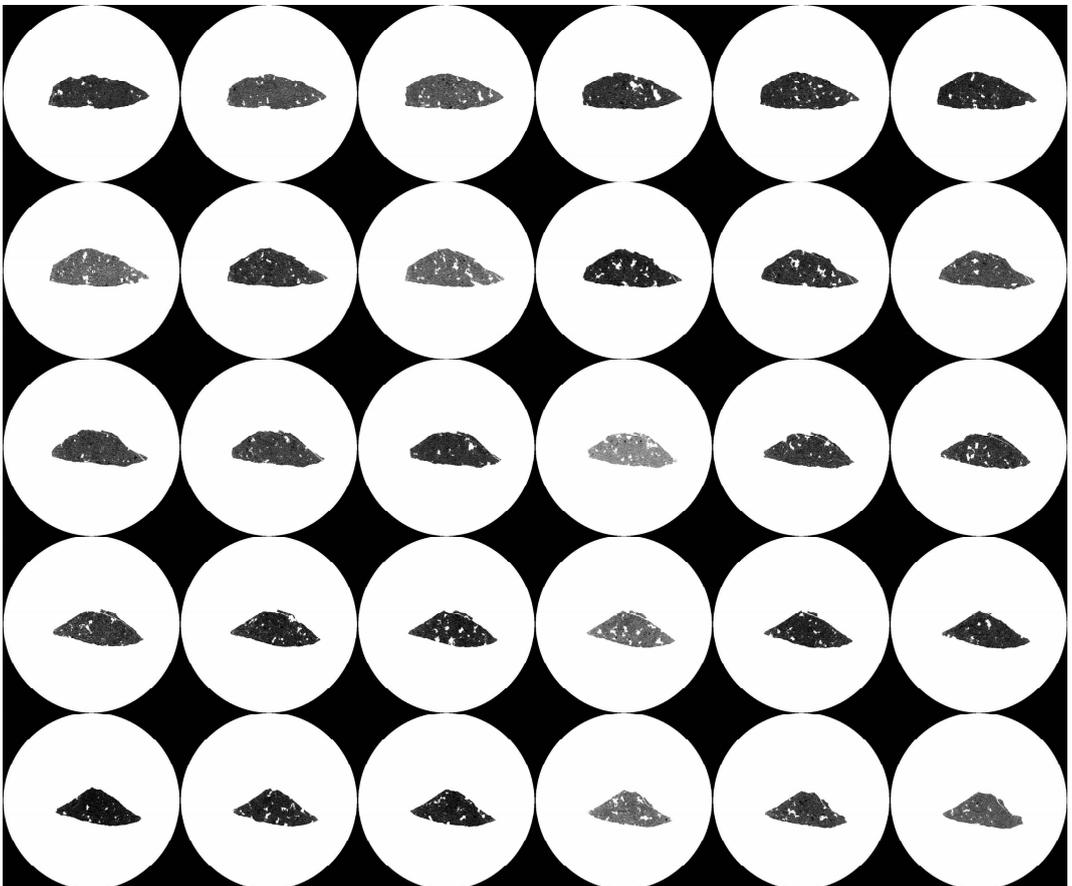


图 3 福建魁岐晶洞碱性 KQ-6 花岗岩样品 CT 断面序列图像
Fig. 3 The CT slice sequence images of Fujian Kuiqi geode alkaline granite sample KQ-6

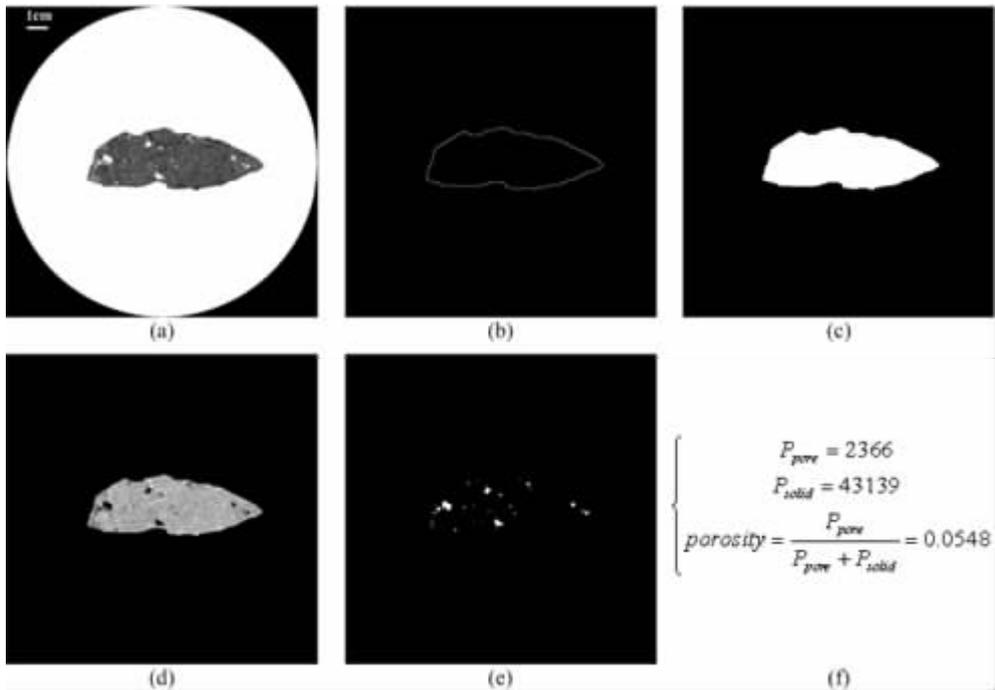


图 4 对 KQ-6 样品第一幅 CT 图像处理步骤

Fig. 4 The processing steps for the first CT image of the sample KQ-6

(a)—原始 CT 图像; (b)—CT 图像 ROI 边缘; (c)—CT 图像 ROI 区域模板; (d)—CT 图像 ROI, 与(a)相比经过了灰度值反转; (e)—阈值分割结果, 白色的像素表示孔隙; (f)—像素统计结果, P_{pore} 、 P_{solid} 、 $porosity$ 分别为孔隙像素数, 固体物质像素数和孔隙度值

(a)—The original CT image; (b)—the CT image ROI edge; (c)—the CT image ROI region template; (d) —compared to (a), the CT image ROI after gray value inversion; (e)——threshold segmentation results, the white pixels represent pores; (f)—pixels statistic results, P_{pore} , P_{solid} and $porosity$ represent the pixel number of pores, the pixel number of solid material and porosity value respectively

度值可以通过统计固体物质和孔隙像素可计算得出, 而孔径分布也可以通过计算每个孔隙的尺寸得到。样品的孔隙连通性分析则需要利用三维可视化方法对二维 CT 序列图像进行处理, 得到表征样品内部孔隙结构的图形。

为了缩短处理时间, 在进行三维可视化时, 选取了样品的一个规则矩形区域, 如图 5a 所示。此将得到体素为 $128 \times 80 \times 30$ 的三维体数据, 它包含了样品中尺寸为 $25.6 \times 16 \times 6\text{mm}$ 的样品块灰度值信息。利用开源软件 VolView 分析工具, 对该体数据进行三维可视化, 如图 5b 所示。同时, 为进一步分析样品的岩石骨架, 在软件中将较低灰度值区域进行了透明处理。在分析样品的孔隙连通性时, 则可将较高灰度值区域作透明处理。经过透明处理后, 所分析样品的三维可视化显示结果, 将能更直观地反映出样品的孔隙结构。

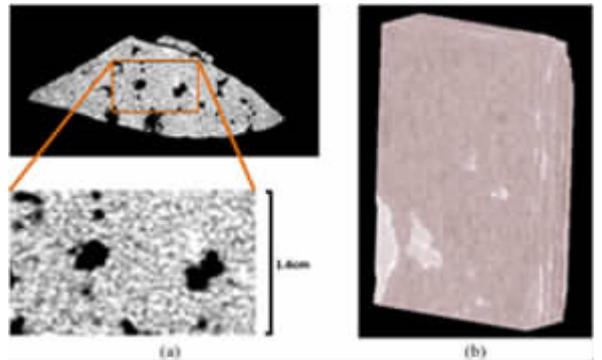


图 5 被截取的 KQ-6 样品区域及其三维重建图形
Fig. 5 The intercepted area and the three-dimensional reconstruction image of sample KQ-6

(a)—某个断面图像被截取区域; (b)—规则截取样品块三维可视化结果, 黑色为背景, 深暗色部分表征样品固体物质, 浅亮色表征孔隙

(a)—The intercepted area of a slice image; (b)—the visualization results of intercepted sample block, the black region represents background, dark-colored region represents sample solid materials, and light bright region represents pores

3 结果与讨论

3.1 孔隙度测量结果

对 KQ-6 样品的第 i 幅 CT 图像进行处理后, 统

计像素数得到 $P_{pore}(i)$ 、 $P_{solid}(i)$, 则样品的整体孔隙度 P 可由下列表达式得到:

$$P = \frac{\sum_i P_{pore}(i)}{\sum_i P_{pore}(i) + \sum_i P_{solid}(i)} \quad (4)$$

据式(4),实验得到的孔隙度测量结果,如图 6 所示。实验中,测得的 KQ-6 样品整体孔隙度值为 8.14%,此与显微镜(Microscopy)获得的孔隙度值相吻合,基本反映了福建魁歧晶洞碱性花岗岩的特征。

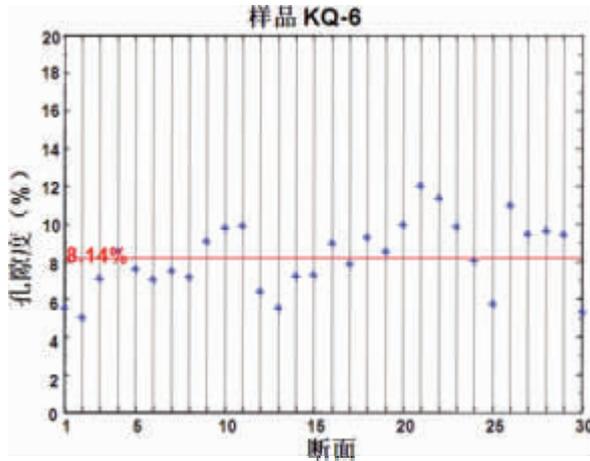


图 6 KQ-6 样品孔隙度测量结果

Fig. 6 The porosity measurement results of sample KQ-6

8.14%为整体孔隙度值

8.14% represent the overall porosity value

3.2 孔径分布统计结果

在 KQ-6 样品 CT 三维体数据中,选取尺寸范围为 0.4~4 mm 的孔隙进行频率统计,得到了孔径分布,如图 7 所示。统计结果表明,该晶洞花岗岩样品孔隙的尺寸主要集中于 0.4~2 mm。其中,孔径为 0.6 mm 的孔隙出现频率最高,为 13.48%。

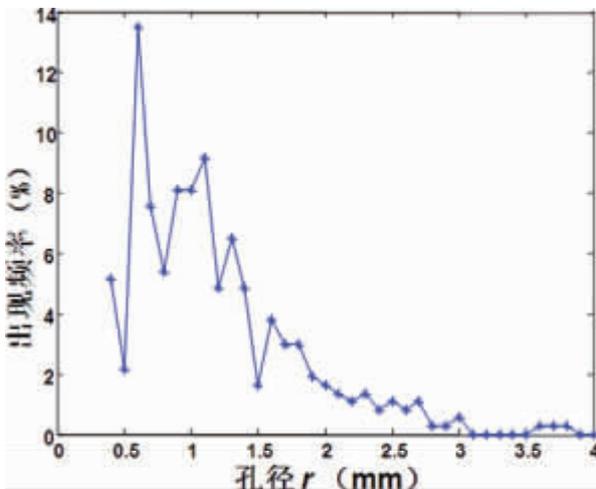


图 7 KQ-6 样品孔径分布统计结果尺寸

Fig. 7 The pore distribution statistic results of sample KQ-6

3.3 孔隙连通性三维可视化分析结果

借助于 VolView 软件分析工具,对 KQ-6 样品 CT 三维体数据低灰度值区域进行透明处理,得到该样品的岩石骨架三维图形,如图 8a;同时,还可对样品的高灰度值区域进行透明处理,得到其孔隙拓扑图形,如图 8b。

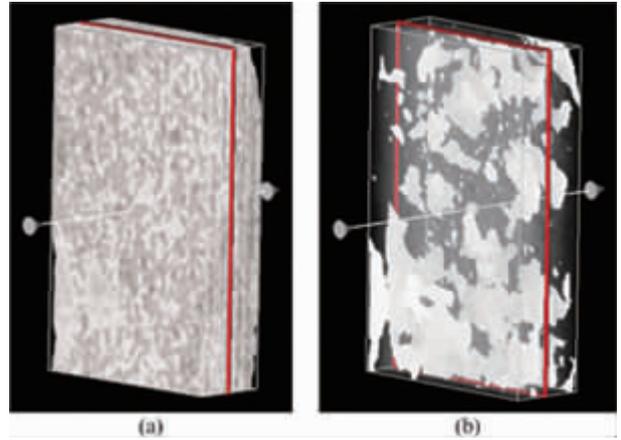


图 8 KQ-6 样品孔隙连通性分析结果

Fig. 8 The pore connectivity analysis results of sample KQ-6

(a)一样品岩石骨架三维图形;(b)一样品孔隙连通拓扑图形

(a)—Three-dimensional graph of rock sample;

(b)—sample pore connectivity topology graph

3.4 讨论

目前国内对地质样品孔隙度的测量方法主要有传统的称重测量法和 CT 平均孔隙度测量法,以上两种孔隙度测量方法在测量精度上存在严重的不足,因而无法分析地质样品孔隙内部精细结构及连通性,不利于探寻或刻画地质演变线索及其规律。本研究采用高能量高分辨率的工业 X-CT 测量技术,对华南成矿省福建魁歧晶洞的花岗岩样本密集等间隔扫描,获得了大量高分辨率断层图像信息,从孔隙度原始定义出发,计算花岗岩样本孔隙度,提高了孔隙度的测量精度。同时,对花岗岩样本进行三维可视化分析,形象、直观呈现了岩石样本内部孔隙结构特征。

此外,从实验结果还可以看出,该晶洞花岗岩样品孔隙多,其中孔道宽敞且与外部连通的孔隙占据小部分;相反,孔道狭窄的孔隙以及盲孔占据多数。这为分析岩浆中原先包裹的气液如何逸失,原始岩浆中究竟可溶解多少气体或液体提供了有益的线索。

尽管如此,在本文中,虽然研究了魁歧花岗岩样品的内部孔隙结构获得了初步满意的研究结果,但是仍需做进一步的实验分析以完善此类测量技术研

究的理论体系,例如,今后将分析原始岩浆中挥发性组分的体积比例和推测原始岩浆中挥发分的溶解度作为该项研究的重要应用方向。

4 结 论

本文将工业 X-CT 无损检测技术应用于岩矿石样品三维孔隙结构分析,从整体孔隙度测量、孔径分布统计以及孔隙连通性分析三个方面对华南成矿省福建魁岐晶洞花岗岩样品的三维孔隙结构进行考察。实验中,测得整体孔隙度为 8.14%;孔径尺寸主要集中于 0.4~2 mm,而孔径为 0.6 mm 的孔隙出现频率最高。孔隙连通性方面,孔道宽敞且与外部连通的孔隙占据小部分。研究结果表明,KQ-6 样品的孔隙特征基本符合晶洞花岗岩特性,其孔隙度较高,可以容纳丰富的气液成分,有助于理解福建魁岐地区岩浆岩的成因机制。本研究既可为对华南成矿省地壳岩浆系统成因、演化的地质模型探索提供丰富准确的依据,又可为岩矿石样品三维孔隙结构分析提供一种新方法或新途径。

致谢:对中国地质科学院矿产资源研究所王登红研究员给予的指导表示感谢,对中国地质科学院矿产资源研究所李建康副研究员提供的岩石样品表示感谢,对重庆大学 ICT 中心王珏教授、张平老师表示感谢!

参 考 文 献

陈世杰,赵淑萍,马巍,等. 2013. 利用 CT 扫描技术进行冻土研究的现状和展望. 冰川冻土, 35(1):193~200.

陈超,魏彪,梁婷,等. 2013. 一种基于工业 CT 技术的岩芯样品孔隙度测量分析方法. 物探与化探, 37(3):500~507.

陈毓川,王登红,朱裕生,等. 2007. 中国成矿体系与区域成矿评价. 北京:地质出版社.

冯周,刘瑞林,应海玲,等. 2011. 岩心 CT 扫描图像分割计算缝洞孔隙度与测井资料处理结果对比研究. 石油天然气学报, 11(4):100~104.

梁亚宁,张士诚,叶银珠,等. 2011. CT 扫描技术在低渗透砂岩岩心试验中的应用. 石油钻采工艺, 33(2):98~102.

林清茶,程雄卫,张玉泉,等. 2011. 活动大陆边缘花岗岩类演化——以福州复式岩体为例. 地质学报, 85(7):1128~1133.

马巍,吴紫汪,蒲毅彬,等. 1997. 冻土三轴蠕变过程中结构变化的 CT 动态监测. 冰川冻土, 19(1):52~57.

彭亚鸣,袁朴. 1984. 福建魁岐碱性花岗岩特征及其成因类型. 南京大学学报(自然科学版), 20(4):740~752.

王蓉嵘,刘家远. 1993. 福建魁岐晶洞碱性花岗岩特征及成因. 桂林冶金地质学院学报, 13(1):14~23.

徐志刚,陈毓川,王登红,等. 2008. 中国成矿区带划分方案. 北京:地质出版社.

Allan C J, Keller N A, Lupton L R, et al. 1985. Tomography: an overview of the AECL Program. Applied Optics, 24(23):4067~4074.

Ashi J. 1997. Computed tomography scan image analysis of sediments. Proc. of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 156:151~157.

Arns C, Bauguet F, Limaye A, et al. 2005. Pore scale characterization of carbonates using X-ray microtomography. SPE Journal, 10(4):475~484.

Coles M E, Muegge E L, Sprunt E S, et al. 1991. Application of CT scanning for oil and gas production research. IEEE Trans. On Nucl. Sci., 38(2):804~809.

Canny J. 1986. A computational approach to edge detection. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8(6):679~698.

Egermann P, Lenormand R, Longeron D, et al. 2005. A fast and direct method of permeability measurements on drill cuttings. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 8(4):269~275.

Hounsfield G N. 1973. Computerized transverse axial scanning (tomography): part I. Description of system Br. J. Radiol, 46:1016~22.

Mallat S, Wang W L. 1992. Singularity detection and processing with wavelets. IEEE Transactions on Information Theory, 38(2):617~643.

Pape H, Arnold J, Pechnig R, et al. 2009. Permeability prediction for low porosity rocks by Mobile NMR-Springer. Pure and Applied Geophysics, 166(5~7):1125~1163.

Øren P, Bakke S. 2003. Reconstruction of Berea sandstone and pore-scale modelling of wettability effects. Journal of Petroleum Science and Engineering, 39(3~4):177~199.

Rosenberg E, Ferreira R, Guerout P, et al. 1999. Microtomography applications in rock analysis and related fields. Computerized Tomography for Industrial Applications and Image Processing in Radiology, Berlin, Germany. DGZfP-Proceedings BB 67-CD, March 15~17.

Spencer K A. 1989. Computer tomography-an overview. The Journal of Photographic Science, 37:84~85.

Verg E, Ayala D, Grau S, et al. 2008. Virtual porosimeter. Computer-Aided Design and Applications, 5(1~4):557~564.

The Three-Dimensional Visualization Study on Pore Structure of Fujian Kuiqi Geode Granite Sample in South China Metallogenic Belt Based on Industrial Computed Tomography

HE Peng, WEI Biao, CHEN Chao, FENG Peng, MI Deling, REN Yong

*The Key Lab of Optoelectronic Technology and Systems of the
Education Ministry of China, Chongqing University, Chongqing, 400044*

Abstract

A variety of analytical techniques is indispensable for the development of earth sciences. In particular, with the great advances in modern technology, more advanced modern analytical testing methods play a role in earth sciences, industrial X-CT (X-ray Computed Tomography) is one of important modern test technology. It could intuitive display geological rock samples interior structure, which demonstrates two-dimensional or three-dimensional information, we could use two-dimensional images to take full digital processing and three-dimensional visualization analysis. Based on the principles and methods of industrial computed tomography (CT) technology, studying pore structure of Fujian Kuiqi geode granite KQ-6 sample in South China metallogenic belt, acquiring two-dimensional CT image sequences of the sample, by means of digital image processing analysis tools, finally we obtained the sample porosity and pore size statistics distribution, which the measured value of porosity is 8.14%, and pore size is 0.4~2 mm; Thus, carrying out three-dimensional visualization study on pore structure of geological samples to obtain topological graph of porous connection of the samples, can intuitively demonstrate interior pore connectivity of samples, which is vital for depiction on the interior structure characteristics of geological samples and ore-forming fluid.

Key words: geological sample pore structure; industrial X-ray computed tomography; three-dimensional visualization; pore size distribution; pore connectivity