

张旭芳, 王海鹏, 李君, 等. 基于微焦点 CT 与数据约束模型的古代家猪牙齿显微结构研究[J]. CT 理论与应用研究, 2020, 29(6): 677-685. DOI:10.15953/j.1004-4140.2020.29.06.05.
ZHANG X F, WANG H P, LI J, et al. Study on the microstructure of ancient pig teeth based on micro-CT and Data-constrained modeling[J]. CT Theory and Applications, 2020, 29(6): 677-685. DOI:10.15953/j.1004-4140.2020.29.06.05. (in Chinese).

基于微焦点 CT 与数据约束模型的古代家猪牙齿显微结构研究

张旭芳^{1a}, 王海鹏^{1b}✉, 李君^{1c}, 马杰^{1d},
李建莉^{1a}, 杨玉双²✉, 侯亮亮^{1c}, 李莉^{1b}

1. 山西大学 a) 理论物理研究所; b) 物理电子工程学院; c) 历史文化学院; d) 物理电子工程学院, 激光光谱研究所, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 太原 030006
2. 澳大利亚联邦科学工业研究组织, 克莱顿 3169

摘要: 本文对一例考古发掘出土的古代家猪下颌骨及牙齿进行了微焦点 CT 成像, 通过加置滤波片有效减弱了线束硬化对 CT 图像的影响。基于数据约束模型 (DCM) 对样品三维结构进行了定量计算, 获取了包含小于 CT 图像体元尺寸在内的样品跨尺度结构信息。对样品中孔隙及高吸收组分的联通特性进行了跨尺度计算, 得到这两种组分的三维团簇分布。与常见的图像阈值分割法相比, DCM 模型有效减弱了部分体积效应对图像分析的影响。本文研究结果为考古样品的内部形态测量、结构分析提供了数据基础, 为考古样品的数字建模存档提供一种新的方法。

关键词: 微焦点 CT; 数据约束模型; 跨尺度结构

DOI:10.15953/j.1004-4140.2020.29.06.05 中图分类号: TP 391.41 文献标志码: A

考古遗存是古人类活动遗留下来的遗迹和遗物, 价值独一无二, 不可再生。X 射线 CT 成像技术可以无损检测样品内部的显微结构, 近年来在考古研究领域的应用得到了快速的发展^[1-4]。国内外的学者将 CT 成像技术用于剥离金属文物表面的锈蚀^[5]; 揭示古代玻璃珠内部结构特点^[6-7]; 识别赫库兰尼姆卷轴上的文字^[8]; 复原古希腊预测日食和月食的计算器^[9]; 研究古代陶器样品的微观结构^[10-12]。X 射线 CT 成像技术不仅可以成功表征古代器物内部结构, 而且在古人类和动物骨骼化石结构表征领域也发挥着越来越重要的作用。这一技术在拼接和复原古人类头骨化石^[13]、研究始祖鸟飞行模式^[14]、复原乳齿象肋骨^[15]等研究领域都得到了成功的应用。

考古研究中发掘出的动物和人类的牙齿往往保存较好, 对牙齿的结构、形态、磨损程度的分析为揭示古代民生经济, 尤其是食物结构, 家畜的饲养方式等信息提供了重要的参考。石飒飒等^[16]用微焦点 CT 对 2000 年前的畸形的上颌切牙和正常的上颌侧切牙进行扫描重建, 测量并记录了人牙内陷上颌侧切牙根管长度和直径, 计算根管锥度, 并与正常上颌侧切牙比较, 了解古人的畸牙的发生和形态学特征。GILL 等^[17]使用 X 射线 CT 成像技术发现了两类早期哺乳动物牙齿的微小凹面和摩擦痕迹有很大的不同, 说明在当时哺乳动物已经

收稿日期: 2020-06-30。

基金项目: 国家自然科学基金 (21206087)。

进化出进食偏好。

尽管 X 射线 CT 成像技术在考古研究领域取得了广泛的成功,但是基于常见的图像阈值分割算法对考古材料组分进行识别和形态结构的表征过程中仍然存在一些问题。CT 图像上每个像元的 X 射线线性吸收系数是由这个像元中所包含的所有组分对 X 射线吸收所产生,这就是所谓的部分体积效应。如果基于图像阈值分割算法对 CT 图像进行处理,不仅会使得小于像元尺寸的组分信息丢失,同时包含不同组分的像元可能在 CT 图像上表现出相同或相近的灰度值,对组分的识别造成困扰。

此外,在 CT 成像过程中,样品物理尺寸大约是 CT 成像分辨率的 10^3 倍的数量级。如果 CT 成像分辨率提高 10 倍,数据量将增加 1 000 倍,所以针对较大的考古样品进行表征时,CT 成像分辨率不能太高,这意味着小于 CT 成像分辨率尺寸的样品结构信息会被丢失。考古材料埋藏在地下,经过多年的自然环境的侵蚀,样品往往存在不同尺度的裂隙,并且伴随外来物品的污染,使得样品组分更加复杂。尤其是一些外来的矿物类夹杂物与矿化后的样品本身密度接近,更使得基于 CT 图像的组分识别与区分变得困难。

本文利用微焦点 X 射线 CT 对一块考古发掘出来的猪颌骨部位(包括牙齿)进行了 CT 成像,比较分析了不同厚度、不同种类的滤波片对线束硬化的校正效果,基于数据约束模型^[18]对古代猪牙齿的三维微观结构进行了跨尺度表征。相比较常见的图像阈值分割法,数据约束模型建立在单个体元上,可以获得小于 CT 体元尺寸的组分信息,减弱部分体积效应对图像组分识别的影响,更准确地建立 CT 图像与材料物理组分的关联,这一方法已经成功用于多种材料的跨尺度结构表征^[19-24]。

1 样品及 X 射线 CT 成像

本文所表征样品为一块包含牙齿在内的古代猪的部分颌骨。2014 年夏,样品发掘于河北省黄骅市区北部的羊三木回族乡刘皮庄南 2 公里的郭堤城遗址。图 1(a)为样品照片,根据这块颌骨形态和牙齿表面相貌,可判定这块颌骨为猪的下颌骨。由图 1(a)可以看到样品颌骨及牙齿表面有肉眼可见的不同尺度的裂缝,裂缝中存在一些泥沙填充物。图中编号为 1 和 2 的牙齿可见明显缺损,编号为 3 的牙齿形态较为完整。利用天津三英精密仪器股份有限公司生产的 nanoVoxel-3000H X 射线三维高分辨成像系统对图 1(a)中方框部分进行了 X 射线 CT 扫描。扫描样品区域包含部分颌骨和图 1(a)中编号为 1、2 和 3 的三颗牙齿。

为比较不同厚度不同种类滤波片对线束硬化效应的校正效果,在 X 射线管出光窗口分别加置了厚度为 0.2 mm 和 1 mm 的铜滤波片以及厚度为 1 mm 的铝滤波片。综合考虑样品的 X 射线穿透率及探测器光子计数后,CT 扫描过程中 X 射线管电压设置为 170 kV,管电流为 80 μ A,每张投影图曝光时间为 0.6 s。射线源到样品的距离为 173.60 mm,射线源到探测器的距离为 630.50 mm,结合探测器像元尺寸(127 μ m)可知,投影图像元尺寸为 34.97 μ m。扫描开始前先将样品移出视场采集 10 张亮背景图像。扫描过程中,样品每旋转 0.25° 采集一幅投影图,样品旋转 360° 共采集 1 440 幅投影图。为减少探测器背景噪声对 CT 重建的影响,基于采集的亮背景图像对所有投影图进行了减背景处理,之后基于迭代法对投影图重建得到了样品的 CT 切片。

图 1(b)为样品重构后的一张典型 CT 切片。由图 1(b)可看到,基于 CT 切片可初步

区分样品的牙根和牙釉质。在 CT 切片上主要分布有 3 种不同显示亮度的组分，分别是亮度最低的孔隙组分，亮度居中的骨骼组分（图中 A 处方框区域所示）与亮度最高的牙釉质组分（图中 B 处方框区域所示）。从 CT 切片上可看到样品内部存在明显的孔隙及裂隙，牙根附近裂隙可见高吸收组分填充。

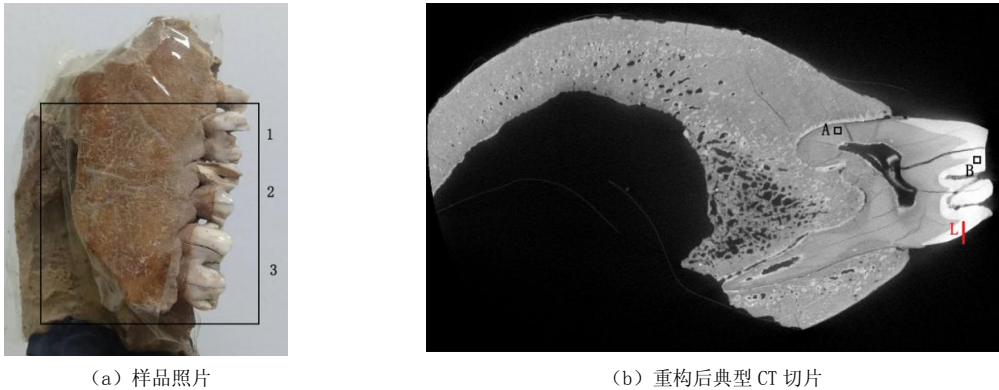


图 1 古代猪下颌骨样品及典型 CT 切片

Fig.1 Ancient pig mandible and a typical CT slice

为了比较不同滤波片对线束硬化的校正效果，在加置不同材料及厚度滤波片获得的样品同一层 CT 切片上相同位置（图 1 (b) 中样品边缘附近横线 L 处）对比了 X 射线线性吸收系数分布曲线，如图 2 所示。

从图 2 可以看到，当加置 1 mm 厚铝滤波片和 0.2 mm 厚铜滤波片时，呈现出明显线束硬化伪影，即在图 1 (b) 横线 L 中的牙釉质区域内各点对应 X 射线线性吸收系数呈现出由样品内向样品边缘升高的现象。这一现象发生的原因在于，入射样品的 X 射线为连续谱射线，当 X 射线穿过样品时，低能的射线会被样品优先吸收，导致出射射线平均能量变高。由图 2 可知，当加置 1 mm 厚的铜滤波片时，横线处牙釉质组分区域的 X 射线线性吸收系数基本保持不变，这说明线束硬化得到了较好的校正，本文后续分析均基于加置 1 mm 厚铜滤波片得到的 CT 数据进行。

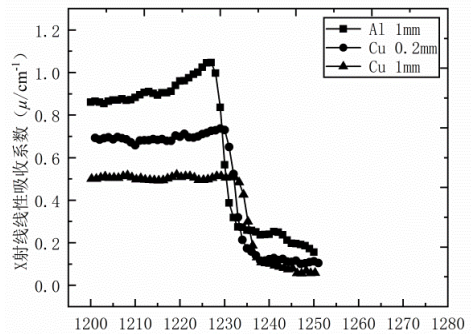


图 1 (b) 横线 L 处各点位置坐标

图 2 不同滤波片线束硬化校正比较

Fig.2 Comparison of beam-hardening correction of different filter

2 DCM 模型及计算结果

2.1 数据约束模型

本文选取图 1 (a) 中形态保存较为完整的 3 号牙齿及其连接的部分骨头所对应 CT 切片进行了 DCM (data-constrained modeling, DCM) 计算。所选样品区域共对应 505 层 CT 切片，每张 CT 切片包含 1076×1080 个像元，505 层 CT 切片共包含 N ($N = 1076 \times 1080 \times 505$)

个体元。DCM 模型建立在每个体元上,模型中所选样品区域由长、宽、高均等于 CT 图像体元尺寸 (34.97 μm) 的 N 个立方体体元构成。在 DCM 模型^[21]中,假设:

- (a) 任意一个体元均由体积分数不同的孔隙、低吸收组分、高吸收组分构成。
- (b) 任一体元对 X 射线的吸收等于这一体元中低吸收组分与高吸收组分对 X 射线的吸收之和。

基于上述假设与比尔定律建立如公式 (1) 所示目标函数:

$$T_n = \left[\sum_{m=1}^3 \mu^{(m)} v_n^{(m)} - \hat{\mu}_n \right]^2 + E_n \quad (1)$$

其中 $n(n=1, 2, \dots, N)$ 代表体元的编号,不同的 n 值代表样品不同的位置处体元; m 取不同的值代表样品中不同的组分, $m=1, 2, 3$ 分别表示孔隙、低吸收组分及高吸收组分; $v_n^{(m)}$ 代表样品中编号为 n 的体元里组分 m 的体积分数; $\mu^{(m)}$ 代表组分 m 在 X 射线管电压为 170 kV 时的理论 X 射线线性吸收系数; $\hat{\mu}_n$ 代表重构后的样品 CT 切片上编号为 n 的体元处的 X 射线线性吸收系数值; E_n 为组分的化学势和组分之间的相互作用能参数,本文计算过程中 E_n 取 DCM 模型中的默认参数^[25]。考虑到,模型中任一体元中不同组分的体积分数和应该等于 1,且每种组分的体积分数不大于 1,亦即:

$$0 \leq v_n^{(m)} \leq 1 \quad (2)$$

$$\sum_{m=1}^3 v_n^{(m)} = 1 \quad (3)$$

公式 (1) ~ 公式 (3) 构成一非线性最优规划问题。DCM 模型是在公式 (2) 和公式 (3) 的约束下,使得公式 (1) 中的目标函数 T_n 取得最小值,从而得到每个体元中各组分的体积分数 $v_n^{(m)}$ 。在求解过程中,由于 CT 实验所用射线源为连续谱射线,不能准确知道穿过样品的 X 射线能谱分布,因此公式 (1) 中的理论 X 射线线性吸收系数 $\mu^{(m)}$ 由如下方法得到:在进行 DCM 模型计算的 CT 切片上,分别选取低吸收组分和高吸收组分分布致密的图像区域(如图 1 (b) 中区域 A 和 B 所示),取相应区域的平均 X 射线线性吸收系数值作为 $\mu^{(m)}$ 值。具体计算方法为:

(1) 从选择进行 DCM 模型计算的 CT 切片中每隔 20 张选一张 CT 切片,共选取 25 张 CT 切片。

(2) 在选取的每张 CT 切片中,分别寻找一处 13×13 像素(像元尺寸为 34.97 μm) 大小的低吸收组分和高吸收组分分布致密的图像区域。

(3) 计算 25 张 CT 切片中低吸收组分和高吸收组分分布致密的图像区域的平均 X 射线线性吸收系数值,所得平均值作为 DCM 模型中低吸收和高吸收组分的理论 X 射线线性吸收系数值。

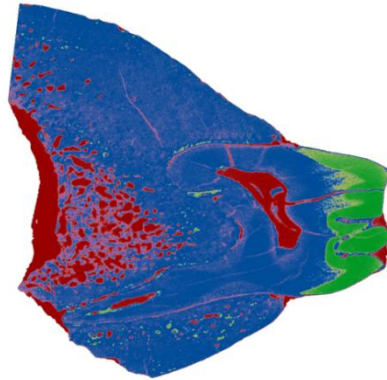
经此方法计算得到 DCM 模型中低吸收组分的理论 X 射线线性吸收系数值 $\mu^{(2)}=0.343 \text{ cm}^{-1}$,高吸收组分的理论 X 射线线性吸收系数值 $\mu^{(3)}=0.516 \text{ cm}^{-1}$ 。本文忽略了孔隙中空气对 X 射线的吸收,孔隙的理论 X 射线线性吸收系数值 $\mu^{(1)}=0$ 。

2.2 DCM 计算结果

图 3 是图 1 (b) 所示 CT 切片的 DCM 计算结果,为提高计算效率,在进行 DCM 计算前截去了图 1 (b) 所示 CT 切片中部分颌骨。对比图 3 和图 1 (b) 可发现,DCM 模型有效提取到

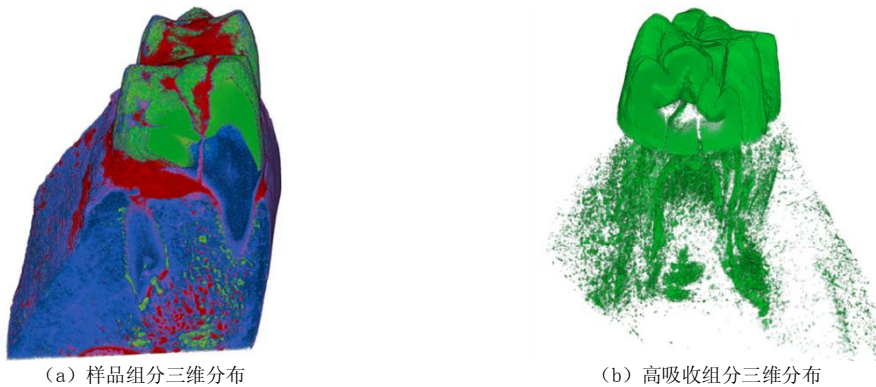
了 CT 切片上各组分的分布特征及结构信息。在图 3 中可看到在不同体元处，各组分所显示颜色强度并不完全相同，有的体元显示为多种颜色的混合色。在样品颌骨中某些区域可看到显示为粉红色的孔隙组分，这说明在这些区域对应体元中孔隙是以部分体积的形式存在。在牙釉质与牙本质的分界处可看到明显呈现混合色的体元存在，说明这个区域的体元中存在多组分共存现象。与常用的图像阈值分割算法相比，DCM 模型不仅在 CT 切片体元尺度上得到了样品结构信息，同时获得了占据部分体元的各组分体积分数，扩展了 CT 成像技术表征尺度的同时更准确地提取出了材料的结构特征。

图 4 是 DCM 计算得到的样品组分三维分布。由图 4 (a) 可看到，样品主要由显示为蓝色的颌骨构成。显示为绿色的高吸收组分主要存在于牙齿表面的牙釉质位置及牙根处，在颌骨中也存在少量弥散分布的高吸收组分。显示为红色的孔隙主要存在于样品牙齿表面的牙冠处和牙齿与颌骨结合处，在颌骨中也存在一些弥散的孔隙。由图 4 (a) 可明显看到，在样品中有些区域也呈现出明显的多颜色混合显示，这说明在这些区域对应的体元中，相应组分是以部分占据体元的形式存在。



注：图中孔隙、低吸收组分、高吸收组分分别用红色、蓝色及绿色表示，同一体元中共存的多组分由各自对应颜色形成的混合色表示，各颜色显示强度正比于该体元中相应组分的体积分数。

图 3 图 1 (b) 所示 CT 切片的 DCM 计算结果
Fig.3 DCM calculation results of the CT slice as Fig.1(b) shown



(a) 样品组分三维分布 (b) 高吸收组分三维分布
注：图中孔隙、低吸收组分、高吸收组分分别用红色、蓝色及绿色表示，同一体元中共存的多组分由各自对应颜色形成的混合色表示，各颜色显示强度正比于该体元中相应组分的体积分数。本图三维在线交互式数据^[26]可访问如下网址：<https://data.csiro.au/dap/SupportingAttachment?collectionId=45809&fileId=3503>；<https://data.csiro.au/dap/SupportingAttachment?collectionId=45809&fileId=3504>。

图 4 DCM 计算得到样品组分三维分布

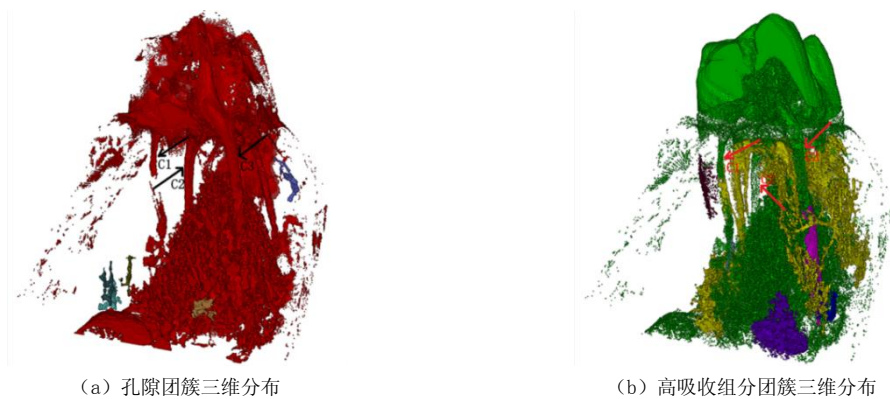
Fig.4 The three-dimensional distribution of the sample compositions calculated by DCM

为了更清楚地提取牙齿中高吸收组分的分布特征，图 4 (b) 单独显示了高吸收组分在样品中的三维分布。从图 4 (b) 可明显观察到牙釉质和牙根的形态，样品中的高吸收组分主要集中分布在牙釉质处和牙根对应位置处，此外，在颌骨中也有一些弥散分布的高吸收

组分。结合家猪牙齿解剖学特征可知，牙根位置处的高吸收组分应该有一部分属于牙根外表的牙骨质，此外牙髓腔形成的孔隙通道也可供外来矿物进入样品中，而颌骨中弥散分布的高吸收组分应该有一部分来自于埋藏过程中由地下水侵蚀而进入样品中的外来矿物。

本文基于 DCM 计算得到各体元中不同组分的体积分数后，进一步对孔隙组分和高吸收组分的联通特性进行了计算，计算方法为当任意两个相邻体元中某种组分的体积分数均大于我们设定的联通阈值时，即认为对于这一组分而言这两个体元是相互联通的，属于同一团簇，遍历所有体元即可得到样品中特定组分的联通团簇分布。

本文分别设定孔隙组分联通阈值为 50%，高吸收组分联通阈值为 30%，计算得到了这两种组分在样品中的团簇分布，如图 5 所示。图 5 中不同颜色代表不同团簇，在给定阈值下，同一团簇内体元相互联通，不同团簇之间互不联通。



注：图中属于同一团簇的体元由同一颜色表示，不同颜色代表不同团簇。本图三维在线交互数据^[26]可访问如下网址：<https://data.csiro.au/dap/SupportingAttachment?collectionId=45809&fileId=3506>；<https://data.csiro.au/dap/SupportingAttachment?collectionId=45809&fileId=3505>。

图 5 样品孔隙及高吸收组分团簇三维分布

Fig.5 The three-dimensional distribution of pore and high X-ray absorption composition clusters in the sample

由图 5 (a) 可看到，显示为红色的孔隙团簇最大，呈现出上下截面大而中间截面小的特征，其他孔隙团簇明显小于红色团簇。结合样品形态可看出，这一红色孔隙团簇主要由牙齿与牙槽骨分界处的孔隙、牙根管（图中 C1、C2 和 C3）及颌骨中蜂窝状的孔隙构成，这些位置处的孔隙属于同一团簇，说明这些孔隙在给定阈值下是联通的。由图 5 (b) 可看到，牙釉质及颌骨区域蜂窝状的高吸收组分构成了最大的绿色的联通团簇，各条牙根（图中 C1、C2 和 C3 处）附近的高吸收组分所构成的团簇（图中黄色）大小仅次于绿色团簇。

对比孔隙团簇和高吸收组分团簇可以发现，牙根处的高吸收组分和孔隙团簇中的牙根管位置基本重合，而颌骨中蜂窝状的孔隙团簇与蜂窝状的高吸收组分位置基本重合。结合孔隙团簇和高吸收组分团簇的形态可知，颌骨中蜂窝状的高吸收组分中的外来矿物更多可能是由颌骨下端面进入样品中，而牙根处的外来矿物更多可能是经牙釉质与牙槽骨分界面处的孔隙通道进入。

3 结论

本文基于 DCM 模型与微焦点 CT 成像，对一考古发掘出土的古代家猪颌骨及牙齿的三维

结构进行了定量可视化表征。通过加置 1 mm 的铜滤波片有效减弱了线束硬化对 CT 图像的影响。研究表明, DCM 模型获得了包含小于 CT 成像分辨率尺寸在内的样品跨尺度结构信息, 有效减弱了部分体积效应对图像分析的影响。基于 DCM 模型可以准确提取样品组分的跨尺度分布信息, 对样品中不同组分的联通特性进行跨尺度计算分析。本文所提供的方法为进一步分析测量样品结构特征提供了数据基础, 为考古样品的数字建模存档, 无损分析提供了一种新的思路。

需要说明的是, 准确挖掘考古样品所承载的历史信息需要多种实验技术的支持, 并融合不同学科的分析结果, 仅依靠 CT 图像分析显然无法满足这一需要, 这也将作为我们今后工作的重点之一。

参考文献

- [1] STELZNER J, MILLION S. X-ray computed tomography for the anatomical and dendrochronological analysis of archaeological wood[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2015, 55: 188-196.
- [2] TAFFOREAU P, BOISTEL R, BOLLER E, et al. Applications of X-ray synchrotron microtomography for non-destructive 3D studies of paleontological specimens[J]. *Applied Physics A-Materials Science & Processing*, 2006, 83(2): 195-202.
- [3] BRADFIELD J, HOFFMAN J, DE BEER F. Verifying the potential of micro-focus X-ray computed tomography in the study of ancient bone tool function[J]. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2016, 5: 80-84.
- [4] MILES J, MAVROGORDATO M, SINCLAIR I, et al. The use of computed tomography for the study of archaeological coins[J]. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2016, 6: 35-41.
- [5] MACHADO A S, SILVA A S S, CAMPOS G N, et al. Analysis of metallic archaeological artifacts by X-ray computed microtomography technique[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2019, 151: 274-279.
- [6] 谷舟, 杨益民, 齐雪义, 等. 显微 CT 技术在古代料珠研究中的应用——以河南淅川县马川墓地出土料珠为例[J]. *CT 理论与应用研究*, 2014, 23(5): 797-803.
GU Z, YANG Y M, QI X Y, et al. Analysis of ancient Liao Zhu by using micro-CT from Machuan cemetery[J]. *CT Theory and Applications*, 2014, 23(5): 797-803. (in Chinese).
- [7] BERTINI M, MOKSO R, KRUPP E M. Unwinding the spiral: Discovering the manufacturing method of Iron Age Scottish glass beads[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2014, 43(1): 256-266.
- [8] MOCELLA V, BRUN E, FERRERO C, et al. Revealing letters in rolled Herculaneum papyri by X-ray phase-contrast imaging[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 5895-5901.
- [9] FREETH T, BITSAKIS Y, MOUSSAS X, et al. Decoding the ancient Greek astronomical calculator known as the Antikythera Mechanism[J]. *Nature*, 2006, 444(7119): 587-591.
- [10] PAVEL C, CONSTANTIN F, SUCIU C I, et al. X-ray tomography studies of prehistoric ceramic artifacts[C]//*International Journal of Modern Physics Conference Series*, 2014, 27: 1460135-1460142.
- [11] ABRAHAM E, BESSOU M, ZIEGLE A, et al. Terahertz, X-ray and neutron computed tomography of an Eighteenth Dynasty Egyptian sealed pottery[J]. *Applied Physics A-Materials Science & Processing*, 2014, 117(3): 963-972.
- [12] KAHL W A, RAMMINGER B. Non-destructive fabric analysis of prehistoric pottery using high-resolution X-ray microtomography: A pilot study on the late mesolithic to neolithic site Hamburg-Boberg[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2012, 39(7): 2206-2219.
- [13] LI Z Y, WU X J, ZHOU L P, et al. Late pleistocene archaic human crania from Xuchang, China[J]. *Science*, 2017, 355(6328): 969-972.
- [14] VOETEN D F A E, CUBO J, MARGERIE E D, et al. Wing bone geometry reveals active flight in *Archaeopteryx*[J]. *Nature communication*, 2018, 9(1): 923-931.
- [15] Waters M R, Stafford T W, McDonald H G, et al. Pre-clovis mastodon hunting 13,800 years ago at the Manis Site, Washington[J]. *Science*, 2011, 334(6054): 351-353.

- [16] 石飒飒, 邵金陵, 段小红, 等. 2000 年前人牙内陷畸形上颌侧切牙根管形态的显微 CT 研究[J]. 牙体牙髓牙周病学杂志, 2013, 23(4): 240-243.
SHI S S, SHAO J L, DUAN X H, et al. Micro-CT analysis of the root canal anatomy in maxillary yllateral incisors with dens invaginatus in ancient Chinese of 2000 years ago[J]. Chinese Journal of Conservative Dentistry, 2013, 23(4): 240-243. (in Chinese).
- [17] GILL P G, PURNELL M A, CRUMPTON N, et al. Dietary specializations and diversity in feeding ecology of the earliest stem mammals[J]. Nature, 2014, 512(7514): 303-305.
- [18] YANG Y S, TULLOH A, CHEN F, et al. Data-constrained characterization of sandstone microstructures with multi-energy X-ray CT[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2013, 463: 012048-012052.
- [19] 赵丹, 陈平, 韩焱, 等. 基于先验组分的多谱 CT 序列 DCM 融合算法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(3): 968-972.
ZHAO D, CHEN P, HAN Y, et al. Multi-spectral CT sequence DCM fusion algorithm based on priori components[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(3): 968-972. (in Chinese).
- [20] YANG S, WANG Y D, MAYO S, et al. 3D microstructure characterisation of tight reservoir rocks and effective recoverable reserve estimation[C]//APPEA Conference & Exhibition, Perth Convention Centre, Perth, Western Australia, 2014: 6-9.
- [21] WANG H P, YANG Y S, WANG Y D, et al. Data-constrained modelling of an anthracite coal physical structure with multi-spectrum synchrotron X-ray CT[J]. Fuel, 2013, 106: 219-225.
- [22] HUGHES A E, YANG Y S, HARDIN S G, et al. Diversity of internal structures in inhibited epoxy primers[J]. AIMS Materials Science, 2015, 2(4): 379-391.
- [23] CHEN W H, YANG Y S, XIAO T Q, et al. A synchrotron-based local computed tomography combined with data-constrained modelling approach for quantitative analysis of anthracite coal microstructure[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2014, 21(3): 586-593.
- [24] WANG H P, ZHANG J F, YANG Y S, et al. Microstructure-based multi-scale evaluation of fluid flow in an anthracite coal sample with partially-percolating voxels[J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2019, 27(6): 065003-065015.
- [25] YANG S, CHU C, TULLOH A, et al. DCM-A software platform for advanced 3D materials modelling, characterisation and visualization[DB/OL]. CSIRO Data Access Portal. (2020-08-28) [2020-11-13]. <https://doi.org/10.25919/5f48f4eb11cfc>.
- [26] ZHANG X F, WANG H P, LI J, et al. Micro-CT and DCM microstructure data of an ancient pig mandible and teeth[DB/OL]. CSIRO Data Access Portal. (2020-08-06) [2020-08-28]. <https://doi.org/10.25919/5f2bb0e58681f>.

Study on the Microstructure of Ancient Pig Teeth Based on Micro-CT and Data-constrained Modeling

ZHANG Xufang^{1a}, WANG Haipeng^{1b✉}, LI Jun^{1c}, MA Jie^{1d},
LI Jianli^{1a}, YANG Yushuang^{2✉}, HOU Liangliang^{1c}, LI Li^{1b}

1.a).Institute of Theoretical Physics and Department of Physics; b).College of Physics and Electronics Engineering; c).College of History and Culture; d).State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optic Devices, Institute of Laser Spectroscopy, College of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China
2.CSIRO, Private Bag 10, Clayton, Victoria 3169, Australia

Abstract: In this paper, the jaw bone and teeth of an ancient pig unearthed from a historic site were imaged using a micro-CT. The three-dimensional (3D) structure of the sample was quantitatively calculated based on data-constrained modeling (DCM). The multi-scale structure of the sample including those smaller than CT

imaging resolution size was obtained. The multi-scale connectivity of pore and high X-ray absorption compositions in the sample were calculated respectively. The 3D distribution form of pore and high X-ray absorption compositions clusters was obtained. Compared with common image threshold segmentation method, DCM efficiently reduces the influence of partial volume effect on image analysis. The results of this study provide a data basis for the internal morphological measurement and structural analysis of archaeological samples. The method presented in this paper can be applied to the digital modeling and archiving of archaeological samples.

Keywords: micro-CT; data-constrained modeling; multi-scale structure



作者简介：张旭芳（1996—），女，山西大学理论物理研究所凝聚态物理专业硕士研究生，主要从事基于微焦点 CT 和数据约束模型的多孔材料的跨尺度结构研究，Tel: 13293817682, E-mail: 1462405553@qq.com; 王海鹏[✉]（1980—），男，山西大学物理电子工程学院副教授，硕士生导师，主要从事定量 CT，统计物理等方面的研究，Tel: 13403460018, E-mail: whp@sxu.edu.cn; 杨玉双[✉]（1957—），男，澳大利亚联邦科学工业研究组织研究员，博士生导师，主要从事统计物理、材料科学、非破坏性物质微观结构表征及性能模拟等方面的研究，Tel: 15635108028, E-mail: sam.yang@csiro.au。

《CT 理论与应用研究》稿件要求

1. 所投稿件要求观点明确, 论据可靠, 层次分明, 论述精练, 语言准确, 符合规范。
2. 缩写。外文缩写词必须符合国际规范, 缩写文中第一次出现时需要标明全称并说明中文含义。
3. 量、符号和单位, 数值精度

期刊刊登论文中的量名称、量符号及其单位采用国家标准。量符号和代表变动性数字的符号, 以及坐标轴的符号均排斜体; 量符号的下标, 属“变动性的”用斜体, 其他情况用正体。量符号在文中首次出现时, 必须给出其量名称及单位。向量、矩阵排黑斜体; 张量排花斜体。单位名称及符号采用国际标准制, 单位符号用正体。常用的数学符号(自然对数的底 e , 圆周率 π , 转置符号 T , 微分符 d 等)排正体。文中提及的数值, 除有特殊要求以外, 一般精确到小数点后 3 位。

4. 图件

投稿稿件请附必要的图件。图件要求具有科学性, 符合规范, 清晰美观, 能直接用于制版, 图件的精度不小于 300 线。每幅图件注明唯一图号和图题, 图题中英文对照, 图号和图题在图的下方, 用小五号宋体字。坐标轴以“量符号/单位”规范形式表示, 如 f/Hz , $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 。图中内容要用六号宋体字。对于涉及国界的图件, 必须符合我国规定的地图出版要求。必要时可加图注, 图注用六号宋体字。

5. 表格

采用三线表, 必要时可加辅线。表号和表题置于表的上方(小五号宋体字), 表题中英文对照。表中量和单位的标示形式同图(六号宋体字)。

图表一般直接列于文中, 也可另附图片文件。

6. 数据统计和模拟

论文中凡涉及数理统计或模型模拟的内容, 须给出统计检验。如: “本文的结果与文献[1]的相同/高/低”, 应给出单一样本均值的检验; 如涉及两个总体的均值比较问题, 应给出独立样本或配对样本均值的检验。如: 论文涉及回归模型, 应给出模型和模型参数检验, 以及模型的拟合优度。

7. 参考文献

投稿稿件遵循著作权法, 凡引用他人资料、数据、方法、图表以及结果、结论的, 必须注明出处, 列出文献。参考文献的著录格式采用“顺序编码制”, 著录格式详见“《CT 理论与应用研究》投稿样式”(可向编辑部索取)。

8. 其他

请提交论文研究工作的基金来源、编号, 以及 200 字以内的第一作者和通信作者简介(见投稿样式)及 1 英寸照片。