

渠芳, 连承波, 柴震翰, 等. 基于三维 X 射线显微镜的孔隙性砂岩中变形带微观结构解析[J]. CT 理论与应用研究, 2019, 28(2): 167-174. doi:10.15953/j.1004-4140.2019.28.02.02.
QU F, LIAN C B, CHAI Z H, et al. Microstructure analysis of deformation band in porous sandstone based on three-dimensional X-ray microscope[J]. CT Theory and Applications, 2019, 28(2): 167-174. doi:10.15953/j.1004-4140.2019.28.02.02. (in Chinese).

基于三维 X 射线显微镜的孔隙性砂岩中 变形带微观结构解析

渠芳^{1,2}✉, 连承波^{1,2}, 柴震翰², 任冠雄²

1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610500
2. 西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610500

摘要: 孔隙性砂岩中变形带对揭示其相关地质作用过程和工程应用具有重要的意义, 而其微观结构是其相关科学与工程研究的关键点。常规的岩石微观结构分析手段对于全面解析岩石内部的微观结构具有一定的局限性, 而近年发展起来的三维 X 射线显微成像技术可以无损地获得岩石内部微米尺度的三维精细数字化图像, 是建立岩石微观结构并对其进行解析的有效手段。通过三维 X 射线显微镜对孔隙性砂岩中变形带扫描, 建立了高分辨率三维微观结构图像, 利用高密度切片图像, 对其微观结构特征进行解析。根据变形带微观产出状带和颗粒破碎过程的解析, 建立颗粒破碎-破碎颗粒与残余破碎颗粒重新排列-局部颗粒破碎带-弱颗粒破碎变形带-强颗粒破碎变形带-强弱颗粒破碎变形带相间排列-簇状变形带的完整时间发育序列。

关键词: 三维 X 射线显微镜; 孔隙性砂岩; 变形带; 微观结构; 发育序列

doi:10.15953/j.1004-4140.2019.28.02.02 中图分类号: P 315 文献标志码: A

孔隙性砂岩中变形带 (deformation band) 是指发育于孔隙性岩石 (孔隙度大于 15%) 或未完全胶结的颗粒沉积物中, 多表现为小型、断层状结构的局部应变薄层带, 与一般的断裂相比, 缺少独立、连续的滑脱面^[1-3]。孔隙性砂岩中变形带研究具有两方面重要的意义, 一是其发生、发展和形成演化可揭示相关地质作用过程^[4-8]; 二是由于其岩石物理特征与围岩的差异, 在环境工程、水利工程、高放废物地质处置及油气田勘探开发等方面起到重要作用^[5, 8-12]。

目前对于孔隙性砂岩中变形带研究主要集中在宏观产出状态、微观结构、实验模拟和本构模型四个方面^[4-13]。变形带微观结构反映了其形成过程, 且其微观结构特征决定了其物理性质^[4, 8-11]。因此, 变形带的微观结构是其相关科学与工程研究的关键点。目前对于变形带微观结构的研究采用的主要手段为偏光显微镜和场发射扫描电镜, 此类方法可以对变形带局部特征进行解析, 但样品制作会对样品造成一定程度的损害, 且无法高密度制片, 难以表征变形带微观结构的三维特征^[14]。三维 X 射线显微成像技术可以无损地获得岩石内部微米尺度的三维精细数字化图像, 是建立岩石微观结构并对其进行解析的有效手段^[15-16]。三维 X 射线显微成像技术非常适合于具颗粒结构岩石的微观结构观测, 不破坏岩石的内部结构, 且可以直接获得颗粒和孔隙相的空间分布特点^[17-19]。孔隙性砂岩中变形带是一种多孔介质,

收稿日期: 2019-01-18。

基金项目: 国家自然科学基金“孔隙性砂岩地层中变形带非均质性研究”(41602157)。

固相颗粒和孔隙的密度衰减系数有很大差异,可以满足三维 X 射线显微成像的空间分辨率要求。本次尝试采用三维 X 射线显微镜对孔隙性中变形带进行扫描,利用获取的三维图像对变形带微观结构进行了解析。

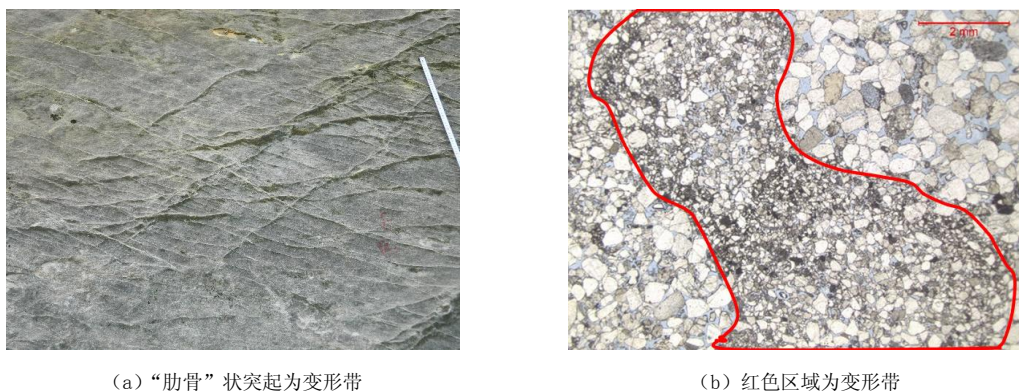
1 三维 X 射线显微成像原理及特点

三维 X 射线显微镜作为一种基于同步辐射光源先进光学发展起来的成像技术,采用传统 CT 技术与光学显微技术相结合,而形成的一种新型的三维透视显微成像系统。当 X 射线穿过样品时,由于样品内部不同成分对 X 射线的吸收率不同可在探测器上形成透射图像。通过旋转样品可以获得不同角度的系类透视图像,再采用图像重建技术可以建立样品内部三维结构的图像^[15, 20-23]。通过三维可视化软件可以获得样品内部任意部位的图像,并可对感兴趣部分进行三维渲染和展示。

本次实验采用的仪器为美国 ZEISS 公司生产的 Xradia 510 Versa 三维 X 射线显微镜。该系统采用独特的二级放大即几何放大和光学放大成像技术,最后由高灵敏度、高分辨率 CCD 相机得到数字图像。在保证高三维分辨率的前提下,样品可在 X 射线源和成像系统之间灵活移动,具有成像速度快、图像衬度佳的特征点。Xradia 510 Versa 三维 X 射线显微镜可以对样品进行高分辨率、高衬度的扫描和重构,提供各种尺寸样品和实验样品内部结构的三维定量信息。

2 孔隙性砂岩中变形带的基本特征

孔隙性砂岩中的变形带是在局部应力场作用下而形成毫米级别的薄层条带,带内颗粒明显小于带外颗粒。变形带强度明显强于带外,由于风化作用的差异性,在野外常呈“肋骨”状突起,且常有多种组合方式(图 1(a))。显微镜下的铸体薄片显示,孔隙性砂岩中变形带与周围相比颗粒明显变小且分选和磨圆差,导致变形带孔隙变小且孔隙之间连通性变差(图 1(b))。



(a) “肋骨”状突起为变形带

(b) 红色区域为变形带

图 1 孔隙性砂岩中变形带的宏观和微观特征

Fig.1 Macroscopic and microscopic characteristics of deformation band in porous sandstones

孔隙性砂岩中变形带最初是在实验中发现的,直到近年来野外露头上的发现才引起众多学者的关注。目前对于孔隙性中砂岩带探讨比较多的是野外宏观产出状态描述、室内实

验模拟和本构模型，而对于微观结构关注较少，且主要偏注于简单描述与分析^[4-13]。孔隙性砂岩中变形带的微观结构特征是探讨其发生、发展和演化的重要前提。为了全面获取孔隙性砂岩中变形带的微观结构信息，在变形带基本特征分析的基础上，选取典型的含变形带的样品，利用高分辨三维 X 射线显微镜扫描获取的三维结构信息，对其进行解析。

3 微观结构的三维重构

基于高分辨三维 X 射线显微镜对样品尺寸的要求和变形带特征，本次选取了变形带条数且具有交叉组合特征的样品，具体特征如图 2 所示。考虑到样品固定方便和获取图像的高分辨率，本次将样品制作成约为 $2\text{ cm} \times 2.5\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 的长方体。



红色箭头所指为变形带，左为样品的正面，右为样品的反面

图 2 测试样品照片

Fig.2 Test sample photos

通过三维 X 射线显微镜对测试样品的 360° 扫面获取了大量的高密度二维切片图，将这些二维切片图依次叠加组合即可得到测试样品的三维灰度图像。由于三维 X 射线显微镜获取的初始灰度图像中存在一定的系统噪声，对其进行了滤波处理。考虑计算机处理的速度和后续解析微观结构的方便，将样品自上而下分割为四个三维重构图（图 3）。三维重构图像可显示孔隙性砂岩中变形带内部和带外微米尺度结构特征，颗粒的大小、形状及其排列组合特征清晰可见，保留了岩石微观结构特征信息，可以用其进行微观结构解析。

4 微观结构解析

基于三维 X 射线显微镜解析岩石微观结构特征具有明显的优势，主要体现在两个方面：一是对岩石内部结构无损伤，这一点对于孔隙性砂岩中变形带微观结构特征解析尤为重要，因为颗粒破碎是变形带微观结构的基本特征，避免人为颗粒破碎是分析其微观结构特征的前提；二是建立了岩石高分辨率三维微观结构图像，可以获取任意部位的图像，这为全面认识孔隙性砂岩中变形带微观结构特征提供了可能，并为后续相关分析奠定了基础。

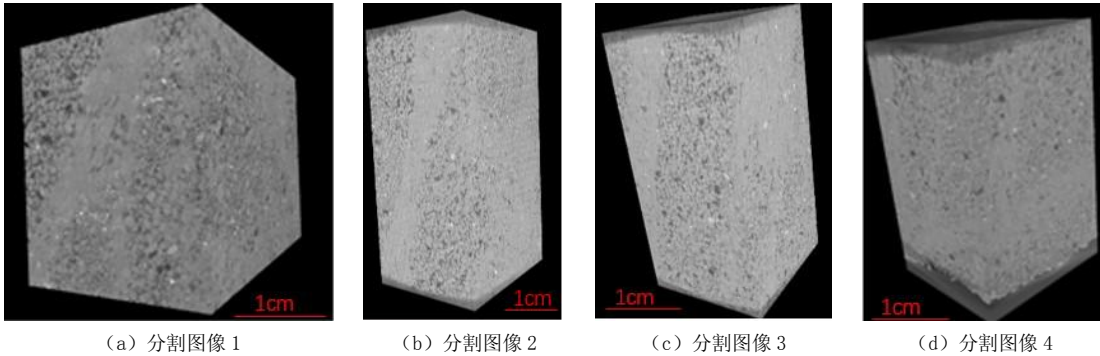


图3 测试样品的三维重构图像

Fig.3 Three-dimensional reconstructed image of the test sample

孔隙性砂岩中变形带微观特征主要表现为薄层的颗粒破碎带，根据颗粒破碎程度可以划分为弱颗粒破碎带变形带和强颗粒破碎变形带两种基本类型。弱颗粒破碎变形带微观结构（图4（a））主要表现为带内颗粒比带外颗粒小，颗粒之间含有大量的微孔隙，孔隙之间具有较好的连通性。强颗粒破碎变形带内颗粒破碎进一步破碎变小，孔隙基本完全丧失，仅局部残留了少量微孔，形成强烈的致密带（图4（b））。

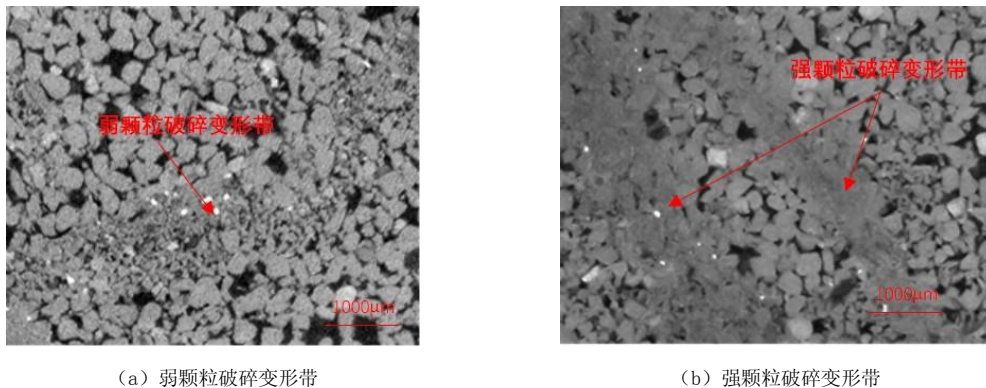


图4 孔隙性砂岩中变形带微观特征的两基本类型

Fig.4 Two basic types of microscopic characteristics of deformation band in porous sandstones

通过对岩石样品三维微观结构图像大量的多角度二维切片图像统计发现，弱颗粒破碎带变形带仅局部可见孤立产出状态，常与强颗粒破碎变形带相间出现（图5（a）），这种相间分布特征沿某一方向会出现多条强颗粒破碎变形带汇聚成在一起而呈现为簇状产出状态（图5（b））。

基于孔隙性砂岩中变形带微观产出状态特征，可以揭示弱颗粒破碎变形带-强颗粒破碎变形带-强弱颗粒破碎变形带相间排列-簇状变形带的变形带时间发育序列。在孔隙性砂岩中由于局部应力场作用下导致颗粒破碎，在变形带形成初始，颗粒发破碎程度弱，形成弱颗粒破碎变形带。随着应力作用增强导致颗粒进一步破碎，形成强颗粒破碎变形带。与此同时在强颗粒破碎变形带侧向又形成了弱颗粒破碎变形带，形成了强弱颗粒破碎变形带相

间排列的状态，在顺着变形带发展方向由于局部强应力作用下弱颗粒破碎变形带向强颗粒破碎带转变，呈现出多条强颗粒破碎变形带汇聚的簇状产出状态。

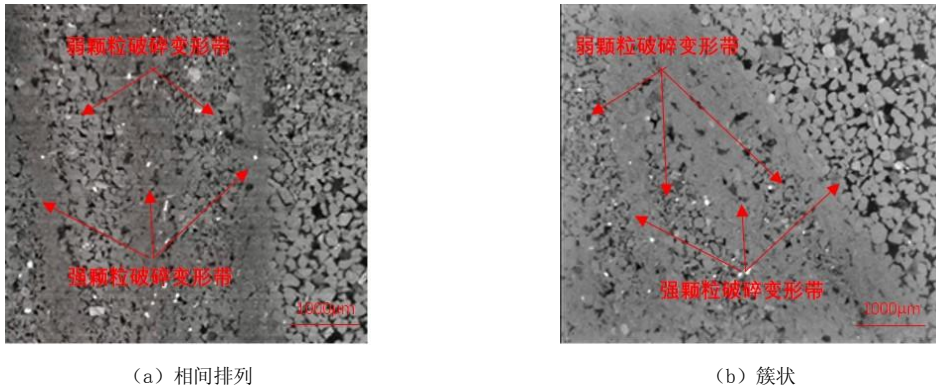


图 5 强弱颗粒破碎变形带组合类型

Fig.5 Combination types of strong and weak grain fracture deformation band

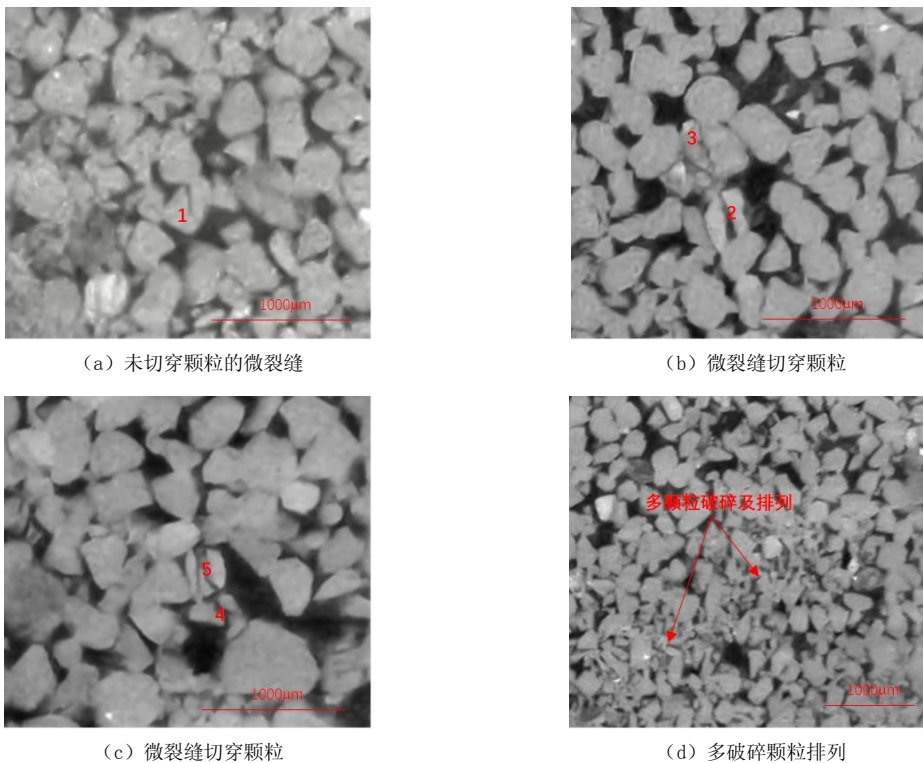


图 6 单颗粒破碎和多颗粒破碎特征

Fig.6 Fragmentation characteristics of single particle and multi-particle

孔隙性砂岩中变形带内颗粒破碎的过程是变形带微观结构揭示的关键问题。本次通过颗粒破碎程度不同部位的高密度切片对孔隙性砂岩中变形带内颗粒的破碎的过程进行解析。变形带内颗粒破碎的最大特点是颗粒破碎主要发生在单个颗粒内，颗粒破碎初

始特征为从颗粒点接触的地方形成未切穿颗粒的微裂缝(图 6(a)“1”),随着应力增强微裂缝切穿颗粒(图 6(b)“2”和图 6(c)“4”)并形成多条次级微裂缝导致颗粒进一步破碎(图 6(b)“3”和图 6(c)“5”),破碎的小颗粒随着颗粒破碎数量的增多,形成了局部破碎区,此过程中由于存在大量的原生粒间孔的存在导致残余颗粒与破碎颗粒的重新排列(图 6(d))。局部破碎区域相互连接成条带状就形成了弱颗粒破碎变形带。需要强调变形带主要发育于孔隙度高且颗粒为脆性的岩石中,脆性颗粒决定了主要通过颗粒破碎的方式进行应力释放,而高孔孔隙度导致破碎的小颗粒离开原体进入孔隙中且与破碎残余颗粒重新排列,局部应力得到迅速释放,无法形成传统意义上的裂缝。

基于孔隙性砂岩中变形带中颗粒破碎和变形带强弱颗粒破碎带类型的演化,可以建立颗粒破碎-破碎颗粒与残余破碎颗粒重新排列-局部颗粒破碎带-弱颗粒破碎变形带-强颗粒破碎变形带-强弱颗粒破碎变形带相间排列-簇状变形带的完整时间发育序列。

5 结论与认识

(1) 三维 X 射线显微镜对于孔隙性砂岩中变形带微观结构解析具有很强的适用性,其形成的无损高分辨率三维精细图像保留了微观结构的重要信息,高密度切片图像为全面认识孔隙性砂岩中变形带微观结构特征及其解析奠定了基础。

(2) 根据颗粒破碎程度可以划分为弱颗粒破碎带变形带和强颗粒破碎变形带两种基本类型,二者常相间发育,一定条件下呈现簇状产出状态,且具有弱颗粒破碎变形带-强颗粒破碎变形带-强弱颗粒破碎变形带相间排列-簇状变形带的发育序列特征。

(3) 孔隙性砂岩中变形带内颗粒破碎主要发生在单个颗粒内,颗粒破碎具有单颗粒边缘微裂缝-微裂缝切穿颗粒-多次级微裂缝切穿颗粒-多颗粒破碎-局部破碎区的发育序列特征。

(4) 孔隙性砂岩中变形带的完整时间发育序列为颗粒破碎-破碎颗粒与残余破碎颗粒重新排列-局部颗粒破碎带-弱颗粒破碎变形带-强颗粒破碎变形带-强弱颗粒破碎变形带相间排列-簇状变形带。

参考文献

- [1] AYDIN A, BORJA R I, EICHHUBL P. Geological and mathematical framework for failure modes in granular rock[J]. *Journal of Structural Geology*, 2006, 28(1): 83-98.
- [2] FOSSEN H, SCHULTZ R A, SHIPTON Z K, et al. Deformation bands in sandstones: A review[J]. *Journal of Geological Society (London)*, 2007, 164(4): 755-769.
- [3] BRAATHEN A, TVERANGER J, FOSSEN H, et al. Fault facies and its application to sandstone reservoirs[J]. *Aapg Bulletin*, 2009, 93(7): 891-917.
- [4] OKUBO C H, SCHULTZ R A. Evolution of damage zone geometry and intensity in porous sandstone: Insight gained from strain energy density[J]. *Journal of the Geological Society, London*, 2005, 162(6): 939-949.
- [5] 李廷, 杜赞, 王鑫, 等. 高孔岩石局部变形带的野外证据和实验研究进展[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(s1): 2593-2693.
LI T, DU Y, WANG X, et al. Field evidence and experimental research on localized deformation bands in high-porosity rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(s1): 2593-2693. (in Chinese).
- [6] SCHULTZ R A, OKUBO C H, FOSSEN H. Porosity and grain size controls on compaction band formation in Jurassic Navajo Sandstone[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(22): 333-345.

- [7] OLSSON W A, HOLCOMB D J. Compaction localization in porous rock[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(21): 3537-3540.
- [8] LOTHE A E, GABRIELSEN R H, BJØRNEVOLL-HAGEN N, et al. An experimental study of the texture of deformation bands; Effects on the porosity and permeability of sandstones[J]. *Petroleum Geoscience*, 2002, 8(3): 195-207.
- [9] SHIPTON Z K, EVANS J P, ROBESON V R, et al. Structure heterogeneity and permeability in faulted eolian sandstone: Implications for subsurface modeling of faults[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 2002, 86(5): 863-883.
- [10] FOSSEN H, BALE A. Deformation band and their influence on fluid flow[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 2007, 1(12): 1685-1700.
- [11] BJØRNEVOLL-HAGEN N, LARSEN B T. An experimental study of the texture of deformation bands; effects on the porosity and permeability of sandstones[J]. *Petroleum Geoscience*, 2002, 8(3): 195-207.
- [12] PITTMAN E D. Effect of fault-related granulation on porosity and permeability of quartz sandstones, Simpson Group (Ordovician), Oklahoma[J]. *AAPG Bulletin*, 1981, 65(11): 2381-2387.
- [13] FISHER Q J, KNIPE R J. The permeability of faults within siliciclastic petroleum reservoir of the North sea and Norwegian continental shelf[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2001, 18(10): 1063-1081.
- [14] 李云祯, 黄涛, 戴本林. 高孔岩石局部压缩变形研究新进展[J]. *地球物理学进展*, 2011, 26(1): 349-356.
LI Y Z, HUANG T, DAI B L. Research progresses on compaction bands in porous rocks[J]. *Progress in Geophysics*, 2011, 26(1): 349-356. (in Chinese).
- [15] 张中卫. 多种显微镜介绍[J]. *现代物理知识*, 2009, 21(3): 19-28.
ZHANG Z W. The introduction of a variety of microscope[J]. *Modern Physics Knowledge*, 2009, 21(3): 19-28. (in Chinese).
- [16] 须颖, 邹晶, 姚淑艳. X 射线三维显微镜及其典型应用[J]. *CT 理论与应用研究*, 2014, 23(6): 967-977.
XU Y, ZOU J, YAO S Y. 3D X-ray microscope and its typical applications[J]. *CT Theory and Applications*, 2014, 23(6): 967-977. (in Chinese).
- [17] CNUDE 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): 1-17.
- [18] 张磊, 姚军, 王锋, 等. 考虑分形特征的岩石扫描图像合理分割方法[J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(24): 1671-1815.
ZHANG L, YAO J, WANG F, et al. Consider fractal characteristics rational core scanned image segmentation[J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(24): 1671-1815.
- [19] 姚军, 赵秀才, 衣艳静, 等. 数字岩心技术现状及展望[J]. *油气地质与采收率*, 2005, 12(6): 52-54.
YAO J, ZHAO X C, YI Y J, et al. Present situation and prospects of digital core technology[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2005, 12(6): 52-54. (in Chinese).
- [20] 刘向君, 洪林, 梁利喜. 基于微 CT 技术的砂岩数字岩石物理实验[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(4): 1133-1140.
LIU X J, HONG L, LIANG L X. Digital rock physical of sandstone based on micro-CT technology[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(4): 1133-1140. (in Chinese).
- [21] SHEPPARD A, LATHAM S, MIDDLETON J, et al. Techniques in helical scanning, dynamic imaging and image segmentation for improved quantitative analysis with X-ray micro-CT[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2014, 324(1): 49-56.
- [22] RITMAN E L. Current status of developments and applications of micro-CT[J]. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 2011, 13(5): 31-52.
- [23] 桂建保, 胡战利, 周颖, 等. 高分辨显微 CT 技术进展[J]. *CT 理论与应用研究*, 2009, 18(2): 106-116.
GUI J B, HU Z L, ZHOU Y, et al. Technology development of micro-CT with high spatial

resolution[J]. CT Theory and Applications, 2009, 18(2): 106-116. (in Chinese).

Microstructure Analysis of Deformation Band in Porous Sandstone Based on Three- dimensional X-ray Microscope

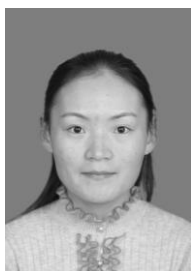
QU Fang^{1,2}✉, LIAN Chengbo^{1,2}, CHAI Zhenhan², REN Guanxiong²

1.State Key Laboratory of Oil/ Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu 610500, China

2.College of Geosciences and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

Abstract: Deformation bands in porous sandstones is of great significance in revealing their related geological processes and engineering applications. Its microstructure is the key point of its related scientific and engineering research. Conventional methods of rock micro structural analysis have some limitations in comprehensively analyzing the internal microstructures of rocks. Three-dimensional X-ray micro-imaging technology developed in recent years can acquire three-dimensional fine digital images of micro-scale inside rocks nondestructively. It is an effective means to establish and analyze rock microstructures. High resolution three-dimensional micro structural image of deformation band in porous sandstones was established by scanning the deformation band with three-dimensional X-ray microscopy. The micro structural characteristics of deformation band in porous sandstones were analyzed by using continuous slice images. Based on the analysis of micro-occurrence zones and particle breaking process of deformation band, a complete time series of grain breaking-broken particles and residual broken particles rearrangement-local particle breaking zones-weak particle breaking deformation zones-strong particle breaking deformation zones-strong and weak particle breaking deformation zones-cluster deformation zones was established.

Keywords: three-dimensional X-ray microscope; porous sandstone; deformation band; microstructure; development sequence



作者简介: 渠芳✉ (1981—), 女, 博士, 西南石油大学讲师, 现主要从事石油地质学、构造解析方面的科研与教学工作, Tel: 15102877158, E-mail: qufang@swpu.edu.cn。