远安地堑上白垩统红花套组压实剪切型变形带的微观结构与地层渗透性关系解析

www.geojournals.cn/georev

渠芳[1,2)],连承波[1,2)],柴震瀚[3)],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,成都,610500;
3)中国石化集团西北油田分公司采油三厂,新疆轮台,841600

内容提要:孔隙性砂岩中形成的压实剪切型变形带及其周围的渗透性特征是变形带研究的重要内容之一,由于变形带宽度常为毫米级别,常规渗透率测试方法因分辨率的限制无法满足研究需求。选取远安地堑上白垩统红花套组中不同规模的单条变形带、小型及中大型簇状变形带样品,在对其微观结构进行详细研究的基础上,采用具有高分辨率测试功能的AUTOSCAN进行密集测试,建立了连续渗透率剖面。结果显示,渗透率低值点与变形带有显著对应关系,在渗透率线扫描曲线中呈下拉尖峰特征;不同变形带渗透率异常低值点存在差异,变形带厚度大则异常程度高;不同微观结构要素的渗透率降低程度不同,渗透率由低至高依次为:大型簇状变形带的核心碎裂带<小型簇状变形带的核心碎裂带<带间区域<单条变形带核心碎裂带<边缘过渡区<围岩。分析认为,虽然变形带的厚度和渗透率探测孔的大小会影响探测结果,但变形带的微观结构才是控制渗透率降低程度不同的本质原因。中大型簇状变形带的核心碎裂带密集发育且连续性好,很可能对流体渗流、油气运移等造成较大影响;而单条变形带由于延续性较差,很难真正阻碍流体渗流,而是会增强岩石整体的各向异性特征。

关键词:AUTOSCAN;压实剪切变形带;渗透率;微观结构;核心碎裂带

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,与一般的断裂及裂缝相比,缺少独立、连续的滑脱面(Aydin et al., 2006; Fossen et al., 2007; Braathen et al., 2009)。研究孔隙性砂岩中变形带的渗透性特征,对于油气田勘探开发、环境水利工程、高放废物地质处置等方面均具有重要意义。前人对变形带有不同的分类,主要从变形带的成因机制、母岩泥质含量、力学性质、发育规模及形态等角度将其划分为不同类型(李廷等,2008;渠芳等,2021;Cashman and Cashman, 2000; Aydin et al., 2006; Eichhubl et al., 2010; Fossen et al., 2007; Fossen, 2010; Charalampidou et al., 2011; Schultz, 2011; Fossen et al., 2011, 2015, 2017; Ballas et al., 2013; Nicol et al., 2013; Skurtveit et al., 2013; Soliva et al., 2016; Philit et al., 2018; Robert et al., 2018),其中,应用较广泛的成因分类中,碎裂型、压溶胶结型变形带的孔隙度及渗透率明显低于围岩2~6个数量级(渠芳等,2019b; Pittman, 1981; Cashman and Cashman, 2000; Olsson and Holcomb, 2000; Fisher and Knipe, 2001; Lothe et al., 2002; Shipton et al., 2002; Okubo and Schultz, 2005; Balsamo and Storti, 2010),后续有学者从力学性质出发进行研究,认为造成岩石渗透率降低明显的是由剪切作用力为主形成的变形带(Schultz et al., 2010; Fossen et al., 2011; Rotevatn et al., 2013; Ballas et al., 2015)。也有学者针对单条状发育的碎裂变形带,从其内部结构出发,对其不同结构部分进行了孔隙度和渗透率测定(Rotevatn et al., 2008, 2017)。虽然学者们对变形带对岩石物性的影响做出了诸多探讨,但仍存在一些实际问题。从测量方法来说,研究渗透率的手段通常为野外手持式气体渗透率测量仪或者实验室岩心气体渗透率测定,此种方法对于岩石局部小尺度范围的渗透率测试具有很大的限制,主要是因为渗透率是以截面积

注:本文为国家自然科学基金资助项目"孔隙性砂岩地层中变形带非均质性研究"(编号:41602157)的成果。
收稿日期:2022-03-29;改回日期:2022-05-26;网络首发:2022-06-20;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.06.021
作者简介:渠芳,女,1981年生,博士,讲师,主要从事油气地质、油气藏形成机理与分布规律、开发地质等研究;Email:376871312@qq.com。

折算(李传亮,2007;卢德义,2017),而变形带的厚度通常为毫米级别,因此会造成很大误差。另外,目前多是对几种或某种类型变形带及围岩的孔渗变化进行研究,或是对某一类变形带内部不同结构要素的孔渗变化做出初步探讨,而对不同规模的变形带内部不同结构要素乃至同一微观结构要素的孔渗差异尚未作出进一步的系统研究。

针对以上存在的问题,笔者等以远安地堑上白垩统红花套组高孔砂岩中密集发育的变形带为研究对象,为解析变形带内部及其两侧渗透性特征,采用AUTOSCAN(岩心自动扫描系统)对不同规模的变形带样品的渗透率进行密集测试,并结合变形带的微观结构特征,利用获取的高密度数据精细表征变形带内部不同结构要素间、同一结构要素间以及围岩的渗透性变化,精细解析孔隙性砂岩变形带的微观结构对其渗透性的影响。

1 变形带样品的选择及其微观结构特征

1.1 变形带样品的选择

根据变形带的力学形成机制,在地层中拉张、挤压、剪切等作用力影响下,高孔岩石中倾向于分别形成膨胀带、压实带、剪切带等不同力学成因类型的变形带(Fossen et al.,2011)。不过实际自然界中常见其过渡类型,如埋深小于 1 km 的浅层中发育的膨胀剪切带,埋深大于 1 km 的中深层中挤压和剪切力共同作用形成压实剪切带和剪切增强型压实带。膨胀剪切带对岩石物性影响微乎其微。剪切增强型压实带在形成过程中以压实作用为主导,颗粒破碎以形成中等破碎程度的不连续分布的碎裂核为主,对岩石物性降低有一定影响,但总体影响不大。主要由剪切变形作用形成的压实剪切型变形带在其形成过程中会发生明显的颗粒碎裂及重新排列,因此相较于其它力学成因类型的变形带,压实剪切型变形带显而易见地会对岩石物性产生巨大影响(渠芳等,2021)。本次研究就集中于对岩石物性影响最大的压实剪切型变形带展开详细分析。

在本文取样的研究区远安地堑上白垩统红花套组高孔岩屑质石英砂岩中,不同期次形成的压实剪切型变形带最为发育,属于碎裂带的一种,以单条碎裂带及不同规模的簇状碎裂带形式产出,风化面上呈高度不等的肋状突出,新鲜面颜色多浅于围岩,并在平面、剖面上以网状、交叉、共轭、错断等多种组合方式存在(图 1a、b)(渠芳等,2019b,2021;连承波等,2020)。单条碎裂带是由于颗粒发生旋转、破碎,导致应变硬化,从而形成的厚度约 1 mm、长度几米至十几米的变形构造(Aydin, 1978)。簇状碎裂带则是由于岩石受力在单条变形带周围应力增强区继续形成新的密集分布的变形带组成,其厚度可介于几毫米至几十厘米之间,长度可达几十厘米至上百米(Fossen and Bale, 2007; Johansen and Fossen, 2008; Philit et al., 2018)。对于研究区最常见的压实剪切型变形带而言,簇状变形带通常延伸长度比单条变形带平均高出 1~2 个数量级,由于簇状变形带的宽度范围变化很大,且延伸长度正比于其宽度,因此笔者等根据研究区变形带的发育规模,将簇状变形带大致划分为小型(宽度<5 cm)、中型(宽度介于 5~10 cm)、大型(宽度>10 cm)簇状变形带(渠芳等,2021)。

本次研究选取了不同规模的单条变形带、小型簇状变形带、中大型簇状变形带分别进行测试。样品 1 主要包括宽度较小的单条变形带 A、小型簇状变形带 B、C,变形带之间具有交叉组合特征(图 1c)。样品 2 取自宽度约 10 cm 的较大型簇状变形带 D,变形带内部可见多条密集排列的单条变形带,较明显的分别命名为 D-1、D-2、D-3、D-4,其中 D-1 和 D-2 局部形成小分叉,肉眼观测不明显(图 1d)。

1.2 变形带的微观结构特征

孔隙性砂岩中变形带的渗透性研究主要集中在两个方面:一是变形带和未变形围岩之间渗透性的差异性,另一方面是不同规模的变形带内部不同结构要素间的渗透性变化(Rotevatn et al., 2017; 渠芳等,2019a)。本次选取测试的样品变形带与围岩界限明显,将测试样品制作了铸体薄片,显微镜下铸体薄片显示,样品围岩粒径多介于 0.3~0.5 mm,孔隙度约 22%,在变形带发育区颗粒发生程度不同的碎裂。从变形带的微观结构要素来讲(渠芳等,2021),单条变形带 A 包含一条核心碎裂带,碎裂带和围岩之间有宽度不等的边缘过渡区(图 2a)。而簇状变形带不管其外观宽度如何,均由多条核心碎裂带组成,在多条核心碎裂带之间为带间区域(图 2b—e),最外侧核心碎裂带和围岩之间同样有边缘过渡区(图 2c、f)。其共性是核心碎裂带中颗粒破碎程度最高,带内孔隙坍塌最严重,孔隙度<1%;带间区域次之,颗粒多碎裂为棱角状亚颗粒,孔隙度降低为 5%~10%;而边缘过渡区颗粒碎裂程度较低,常为局部碎裂,孔隙度约为 15%。

压实剪切型变形带的核心碎裂带通常连续性较



图 1 远安地堑上白垩统红花套组变形带野外露头特征及测试样品宏观特征(图 c、d 中黑框区域为渗透率测试区)

Fig. 1 Field outcrop characteristics and macro characteristics of test samples of the deformation bands of Upper Cretaceous Honghuatao Formation in Yuan'an graben (the black border is the permeability test area)

好,其形成时受到的剪切力越大则带内颗粒破碎程度越高。如图 2a—d 中,核心碎裂带带内岩屑及长石颗粒多碎裂为暗褐色泥质化碎基,石英颗粒破碎为几十微米的亚颗粒夹裹其中。簇状变形带内部多条核心碎裂带及带间区域颗粒破碎非均质程度较强,从而造成孔隙度和孔隙结构存在较大差异(图 2d—f)。如图 2d 中为变形带 D-3 局部,其核心碎裂带及带间区域内颗粒碎裂程度均强于图 2e、f 中相对应的结构要素,且其核心碎裂带颗粒泥质化程度很强,局部甚至未见孔隙,但可见强烈剪切作用形成的微小剪切缝,周围带间区域也只有少量粒间孔和溶蚀孔,且连通性较差(图 2d)。图 2e、f 分别为变形带 D-2 和 D-4 局部,可清晰看到二者核心碎裂带及带间颗粒碎裂程度分别相当,核心碎裂带颗粒泥质化程度较低,有较多 100~200 μm 左右的棱角状亚颗粒包裹其中。但图 2e 中的带间区域孔隙度明显大于图 2f 中带间区域的孔隙度,约为 10%。这些差异体现了在簇状变形带中,由于各单条变形带之间应变硬化作用大小的不同,而导致形成其内部微观结构的强烈非均质性。总体而言,簇状变形带内部的核心碎裂带数量较多,且宽度较单条变形带核心碎裂带大,介于 1~2 mm 之间。

2　测试仪器及测试方案

2.1　测试仪器及测试原理

本次研究所用测试仪器为油气藏地质及开发工程国家重点实验室 2014 年引进的美国 GIocom Inc 研发的 AUTOSCAN 测试平台,主要由样品放置平台、测试系统、控制与数据处理系统、操作手柄 4 部分组成(图 3)。AUTOSCAN 具有定位精度高、测试结果可靠、测量范围广、自动化强的特点,可以建立详细的岩石渗透率剖面(窦春霞等,2016; 池美瑶

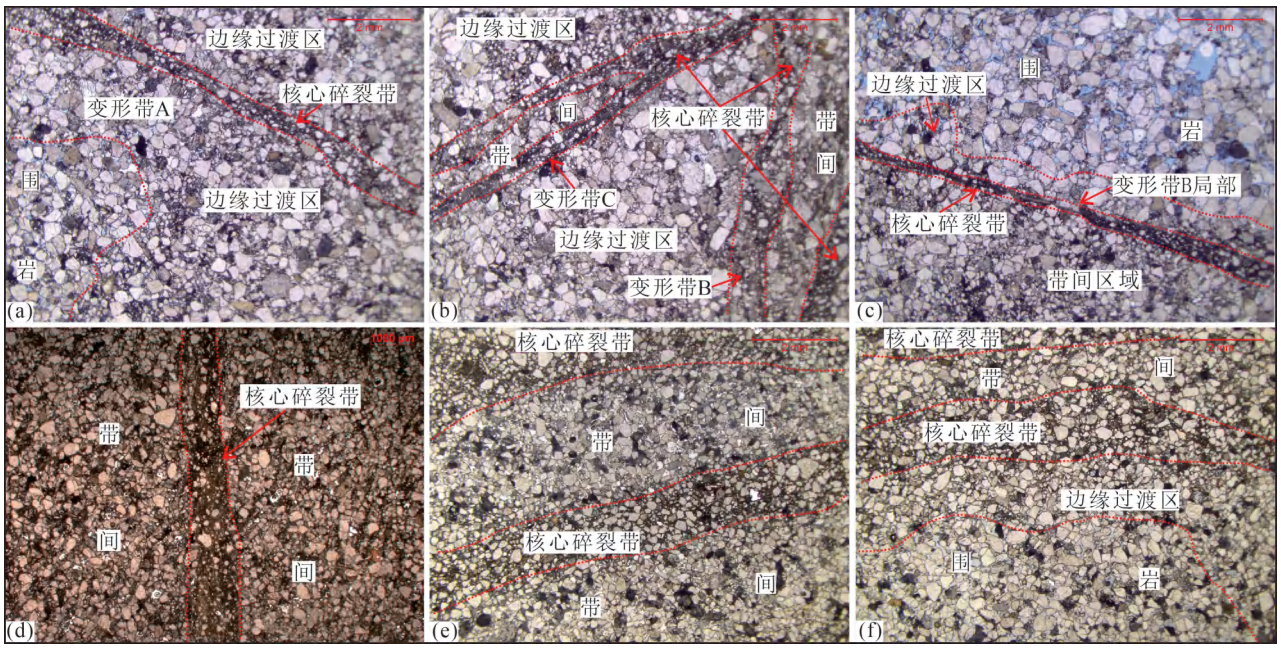


图 2 单条及簇状变形带微观结构特征

Fig. 2 Microstructural characteristics of the single and clusters of deformation bands

(a)单条变形带 A 的微观结构;(b)小型簇状变形带 B 和 C 交叉处的微观结构;(c)簇状变形带 B 局部,和围岩接触界面较为清晰;(d)大型簇状变形带 D 中 D-3 变形带局部微观结构;(e)簇状变形带 D 中 D-2 变形带局部微观结构;(f)簇状变形带 D 中 D-4 变形带局部微观结构,围岩受边缘过渡区的影响较大

(a) Microstructure of single deformation band A; (b) microstructure at the intersection of small clusters of deformation bands B and C; (c) local characteristics of the cluster of deformation bands B and the contact interface with surrounding rock are relatively clear; (d) local microstructure of D-3 in large cluster of deformation bands D; (e) local microstructure of D-2 in cluster of deformation bands D; (f) local microstructure of D-4 in cluster of deformation bands D, and the surrounding rock is greatly affected by the margin transitional band

等,2019)。

AUTOSCAN 配有激光位移传感器,可以通过人工或软件系统将探测仪对测试点进行准确定位和移动,移动范围在长 1.36 m、宽 0.75 m 之间,移动步长最大精度可达 1 mm。因此,AUTOSCAN 具有对岩石任意点的渗透率进行测量的功能,可以测量出毫米尺度空间范围渗透率变化。其测量基本原理是通过毫米尺度直径的探测孔压在所需测量点,且形成探测孔顶端与岩石表面的密闭,然后采用稳态注气技术从探测孔顶端向岩石表面注入加压气体,气体通过岩石而后流向大气。在这个过程中测定流过岩石的气体流速和压力降,再根据压力变化来计算渗透率。为了提高渗透率测试的准确性,在渗透率计算方法中考虑了高速流动效应、气体滑脱效应和非达西流等因素对渗透率的准确性的影响,并对最终渗透率结果做了对应修正,提高了测试结果的可靠性。

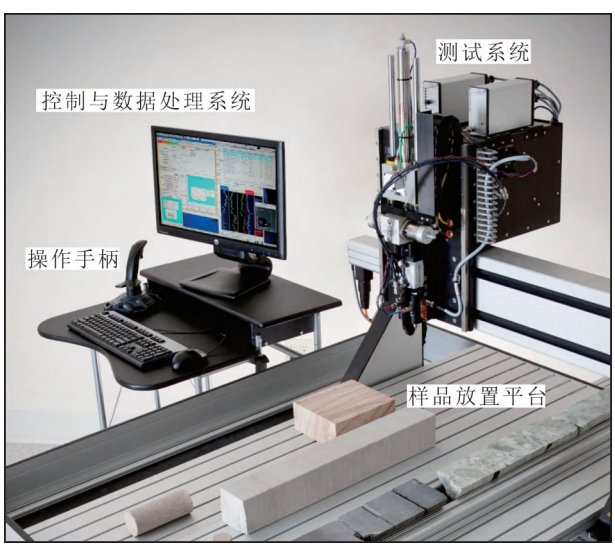


图 3 AUTOSCAN 测试平台的组成

Fig. 3 Composition of AUTOSCAN test platform

2.2 样品渗透率测试方案

为了防止测试结果的片面性,本次测试遵循着尽可能多的穿越变形带的原则,且穿越变形带的方向测点密度要尽可能大,这样有利掌握变形带向两侧渗透性的变化,以达到解决孔隙性砂岩中变形带

渗透性特征的关键问题。根据上述原则和研究目的,本次扫描区域如图 1c、图 1d 中黑框所示区域,以水平方向为 X 方向,竖直方向为 Y 方向。网格设计方案为:两个样品沿 X 方向的测点间隔均为 1 mm,样品 1 在 Y 方向的测点间隔为 5 mm,样品 2 在 Y 方向的测点间隔为 10 mm。根据上述网格设计,在 AUTOSCAN 测试平台上依据样品形状和大小进行初始点设置和网格划分,样品 1 共设置四条测线,每条测线沿 X 方向为 46 个测试点;样品 2 共设置六条测线,每条测线沿 X 方向为 41 个测试点。然后让其自动对网格渗透率进行测试(图 4a、图 5a)。

3　测试结果与讨论

为了探讨孔隙性砂岩中变形带渗透率结果,本次重点结合变形带的微观结构特征,联合变形带的力学性质、宏观特征和测试仪器自身特点进行综合解析。

3.1　变形带的总体渗透性特征

根据测试结果归位,对每块样品的 4 条横向测点线的渗透率测试结果进行了统计(图 4b,图 5b),结合测点位置、样品微观结构分析具有以下特征:

(1)样品 1 中,Y 值为 10、15、20 mm 的横向点线的渗透率均有三个明显渗透率异常低值点,形成向下的尖峰曲线的特征;Y 值为 5 mm 的横向点线位于岩样最下方,横穿多条变形带交叉区域,呈现 4 个渗透率低值点;样品 2 则整体呈现 4 个较明显的尖峰低值点,且与变形带发育区域对应;

(2)渗透率异常低值点存在差异,即异常程度存在差异,变形带厚度大则异常程度高。样品 1 的围岩测试渗透率高达(7000~8000)$\times10^{-3}\mu m^2$,其变形带渗透率最低值为(3~4)$\times10^{-3}\mu m^2$,位于小型簇状变形带 C 中下部(图 4b 中蓝色线 $X=40$ mm 处下拉尖峰);样品 2 为厚度较大的簇状变形带,未涉及真正围岩,其变形带渗透率最低值为 0.47$\times10^{-3}\mu m^2$,位于 D-3 变形带上部(图 5b 中绿色线 $X=29$ mm 处下拉尖峰)。

3.2　变形带的微观结构与渗透性的关系解析

将研究视角更加细致化,结合变形带的微观结构来看,可以发现以下几点特征:

(1)不同规模的变形带,不同的结构要素其渗透率降低程度不同。渗透率由低至高进行排序为:大型簇状变形带的核心碎裂带<小型簇状变形带的核心碎裂带<带间区域<单条变形带核心碎裂带<边缘过渡区<围岩(表 1)。

(2)即使是同一变形带内部的同一结构要素,其渗透率也存在较明显差异。例如单条变形带 A,其核心碎裂带沿走向延伸方向渗透率变化区间为(170.8~401.1)$\times10^{-3}\mu m^2$;簇状变形带 D 内部的不同核心碎裂带以及不同带间区域,其渗透率差异很大(表 2)。D-1、D-3 核心碎裂带渗透率降低剧烈,整体呈特低渗特征;D-4 核心碎裂带总体表现为低渗特征;D-2 核心碎裂带总体为中等渗透率。并且由于核心碎裂带碎裂程度的差异,导致带间区域 DJ3~4 相较于 DJ1~2 和 DJ2~3 呈现更低的渗

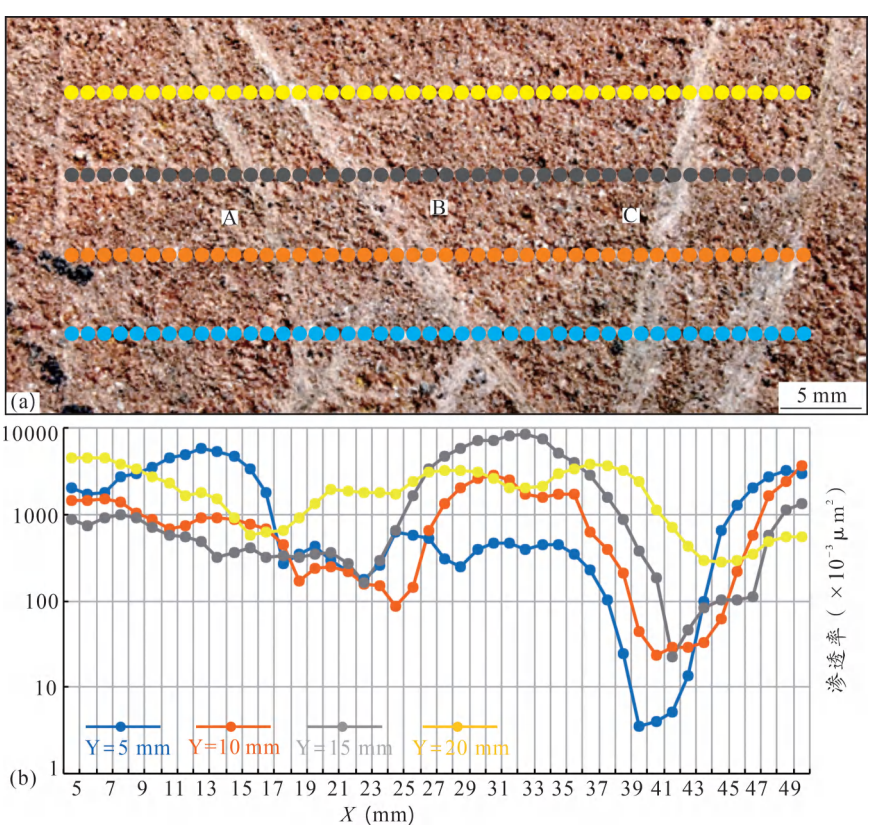


图 4 样品 1 渗透率点线扫描测试网格方案与测试结果

Fig. 4 Permeability point line scanning test grid scheme and test results of sample 1

(a)样品 1 测试点位分布;(b)渗透率测试曲线,其点位沿 X 方向与(a)中测试点位一一对应

(a) Distribution of test points of sample 1; (b) the permeability test curves, which points position corresponds to the point of (a) one by one along the X direction

(3)变形带的微观结构是导致测试渗透率降低程度不同的主要因素。通过测试结果发现变形带为渗透率的低值区,这说明变形带的形成导致了岩石内部结构的变化。孔隙性砂岩中变形带与未变形围岩相比颗粒明显变小且分选和磨圆差,导致变形带内孔隙变小且孔隙之间连通性变差,而孔隙的大小和连通性决定了其渗透性,这是变形带渗透率低的本质原因。

表 1 样品中变形带不同结构要素的渗透率测定值统计

Table 1 Statistics of permeability values of different structural elements of deformation bands in the samples

变形带名称	$K_{核心碎裂带}$($\times10^{-3}\mu m^2$)		$K_{带间}$($\times10^{-3}\mu m^2$)		$K_{边缘过渡区}$($\times10^{-3}\mu m^2$)		$K_{围岩}$($\times10^{-3}\mu m^2$)	
	最小~最大	均值	最小~最大	均值	最小~最大	均值	最小~最大	均值
单条变形带 A	170.8~401.1	315.9			445.5~1796.3	883.2	2796~8622.09	5841.53
簇状变形带 B	88.1~161.8	135.5	157.9~393.2	283.3	386.4~1936.2	1036		
簇状变形带 C	3.5~45.5	23.2	62.5~340.3	177.8	102.1~1734.2	805.8		
簇状变形带 D	0.5~39	10.7	14.9~646.4	202.6	52.8~1791.5	895.7		

无论是单条变形带还是簇状变形带,其核心碎裂带的孔喉结构均明显变差,与边缘过渡带、带间区域等结构要素相比,核心碎裂带的渗透率降低最大,在本次测试中最大可降低五个数量级。簇状变形带的带间区域颗粒碎裂程度总体呈中等,但在测试中发现,由于其颗粒碎裂非均质程度较强,导致渗透率差异最大。如簇状变形带 D,由于其各条核心碎裂带之间存在明显渗透率差异,代表着核心碎裂带及其周围带间区的颗粒碎裂及应变硬化程度也存在较大差异。因此,带间渗透率可低至 $14\times10^{-3}\mu m^2$,也可高达 $600\times10^{-3}\mu m^2$ 左右(表 2)。核心碎裂带之间的间距越小,则其应变硬化作用会越强,对应的带间渗透率也越低。边缘过渡区虽然也有一定程度的渗透率降低,但不会影响流体渗流。因此,变形带能否影响流体渗流,主要取决于其核心碎裂带及带间区域的发育特征。

3.3 影响变形带渗透性的其他因素

(1)变形带的厚度和渗透率探测孔的大小会影响渗透率测试结果。虽然 AUTOSCAN 可以探测毫米尺度变形带渗透率特征,但是渗透率探测孔的半径为 2 mm,当变形带厚度小于其探测直径时,所测得渗透率则会附加围岩的影响。变形带厚度越大,围岩影响越小。测试样品 1 中变形带厚度在 1~3 mm 范围,样品 2 中被测试簇状变形带厚度约 4 cm。将渗透率归位测试样品点发现,样品 1 除了左边的 A、B、C 3 条变形带之外,在其最右侧还有一条厚度约 1~2 mm 的小型变形带,在测点过程中下面两条测线稍有涉及,但在测试数据中相对应位置并未表现出明显的渗透率降低(图 4)。这主要是因为一方面变形带厚度较小,所测渗透率叠加了周围围岩的渗透率;另一方面最右下这条变形带位于样品 1 的边缘,且岩石比较疏松高孔,在制样过程中样品边缘难免会形成一定的微裂缝,从而影响到真实渗透率的探测结果。因此本次实验针对样品 1 取相对远离边缘的探测数据更为可信。而样品 2 中变形带厚度远大于探测孔直径及 A、B、C 变形带,其所测渗透率异常低值幅度也远大于样品 1。这主要因为所测点的渗透率是折算到探测孔截面积之上的渗透率,当变形带厚度越大,越能表征接近变形带的真实渗透率。尽管由于变形带厚度的差异导致 AUTOSCAN 所测渗透率接近真实渗透率的程度不同,但是由于位移精度可达 1 mm,通过高密度渗透率扫描而建立的渗透率剖面在一定程度上可以客观反映变形带及其向周边的渗透率演化规律。

虽然变形带的厚度会对其渗透率产生影响,但这只是表层现象。变形带厚度的大小并不是控制渗透高低的主要因素,变形带自身渗透率的高低主要受控于变形带的微观结构。

(2)变形带力学性质、宏观发育特征影响渗透率。笔者等曾从变形带力学性质角度探讨了常见的剪切型碎裂带和剪切增强型压实带的物性差异(渠芳等,2021)。不同力学成因类型的变形带之所以会产生巨大的物性差异,归根结底还是由于其形成的微观结构不同导致的。但即使是同一种力学成因

表 2 样品 2 中簇状变形带 D 主要结构要素渗透率($\times10^{-3}\mu m^2$)测定值

Table 2 Measured permeability ($\times10^{-3}\mu m^2$) of main structural elements of the D cluster in sample 2

结构要素名称	D-1 核心碎裂带		D-2 核心碎裂带		D-3 核心碎裂带		D-4 核心碎裂带		DJ1~2 和 DJ2~3		DJ3~4	
	最小~最大	均值	最小~最大	均值	最小~最大	均值	最小~最大	均值	最小~最大	均值	最小~最大	均值
渗透率	1.5~20.3	9.9	76.1~320	144.8	0.5~26	8.8	0.7~192	23.4	19.9~646.4	249.9	14.9~192.7	64.5

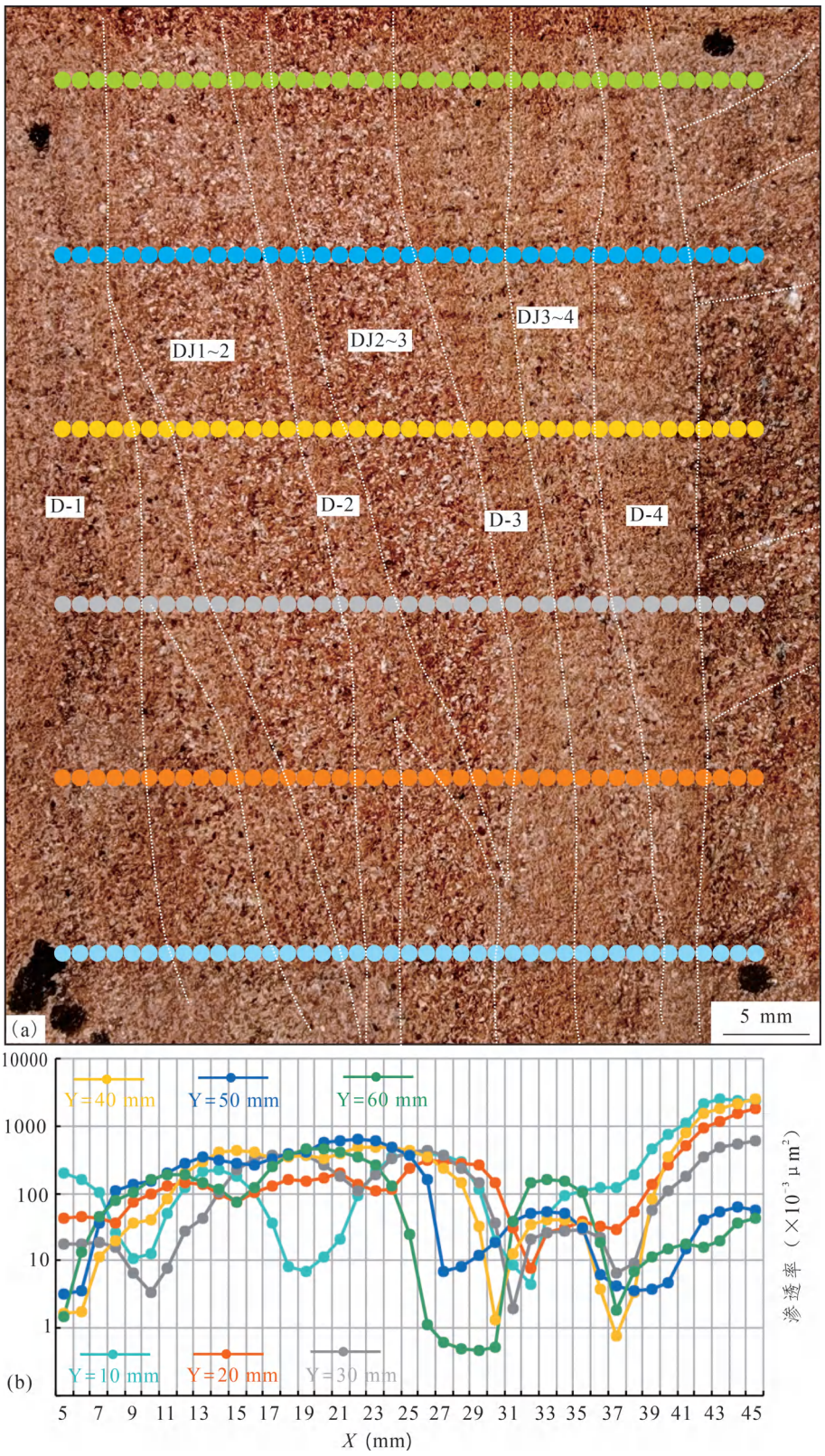


图 5 样品 2 渗透率点线扫描测试网格方案与测试结果

Fig. 5 Permeability point line scanning test grid scheme and test results of sample 2

(a)样品 2 测试点位分布;(b)渗透率测试曲线,其点位沿 X 方向与(a)中测试点位一一对应

(a) Distribution of test points of sample 2; (b) the permeability test curves, which points position corresponds to the points of (a) one by one along the X direction

的变形带,受其宏观发育特征的影响,不同延伸长度、发育密度、展布宽度、三维连续性等宏观发育特征均会在整体上对岩石渗透率产生不同影响。对于中大型簇状变形带而言,由于其核心碎裂带密集发育,间距小,带间应变硬化作用也较强,且在三维空间中连续性好,因此渗透率降低剧烈,很可能对流体渗流、油气运移等造成较大影响;而单条变形带由于其延续性较差,即使局部核心碎裂带渗透率很低,但总体上很难真正阻碍流体渗流,而是会增强岩石整体的各向异性特征。因此,在对高孔砂岩中广泛展布的压实剪切型变形带的宏观发育规律进行研究的基础上,进一步剖析变形带内部微观结构对岩石渗透性的影响,对之后进行孔隙性岩层流体渗流模拟、高精度掌握流体运移特征,甚至是断裂带的精细化建模、提高油气采收率等方面均具有重要意义。

4　结论

(1)对于常见的压实剪切型碎裂变形带,单条变形带的微观结构要素包括核心碎裂带及边缘过渡区;簇状变形带则包括多条核心碎裂带、带间区域及边缘过渡区。核心碎裂带中颗粒破碎程度最高,带内孔隙坍塌最严重,孔隙度<1%;带间区域次之,颗粒多碎裂为棱角状亚颗粒,孔隙度降低为 5%~10%;而边缘过渡区颗粒碎裂程度较低,常为局部碎裂,孔隙度约为 15%。

(2) AUTOSCAN 建立的变形带渗透率详细剖面显示

渗透率低值点与变形带有非常显著的对应关系,在渗透率线扫描曲线中造成下拉尖峰特征。变形带厚度越大则渗透率异常幅度越大。

(3)变形带的微观结构是导致测试渗透率降低程度不同的主要因素。测试渗透率由低至高进行排序为:大型簇状变形带的核心碎裂带<小型簇状变形带的核心碎裂带<带间区域<单条变形带核心碎裂带<边缘过渡区<围岩。核心碎裂带的颗粒碎裂程度越强,间距越小,则应变硬化作用越强,对应渗透率越低。变形带能否影响流体渗流,主要取决于其核心碎裂带及带间区域的发育特征。

(4)变形带的厚度、渗透率探测孔的大小及其力学性质、宏观发育特征均会影响渗透率探测结果。变形带厚度越大,测试结果可靠程度越高。中大型簇状变形带核心碎裂带密集发育,在三维空间中连续性好,很可能对流体渗流、油气运移等造成较大影响;而单条变形带延续性较差,即使局部核心碎裂带渗透率很低,但总体上很难真正阻碍流体渗流,而是会增强岩石整体的各向异性特征。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

池美瑶, 唐新功, 向葵, 孙斌. 2019. 由岩石电性和弹性参数求取地层储层参数. 科学技术与工程, 19(27): 41~46.

窦春霞, 唐新功, 向葵, 孙斌, 严良俊. 2016. 筇竹寺组和龙马溪组页岩弹性与复电阻率特性研究. 岩性油气藏, 28(1): 111~116.

李传亮. 2007. 孔喉比对地层渗透率的影响. 油气地质与采收率, 14(5): 78~79.

李廷, 杜赟, 王鑫, 席道瑛. 2008. 高孔岩石局部变形带的野外证据和实验研究进展. 岩石力学与工程学报, 27(s1): 2593~2693

连承波, 柴震瀚, 渠芳, 任冠雄. 2020. 远安地堑碎裂带的微观特征及形成机制. 油气地质与采收率, 27(5): 25~32.

卢德义. 2017. 室内岩心渗透率测定方法现状. 石油化工应用, 36(2): 1~4.

渠芳, 连承波, 柴震瀚, 任冠雄. 2019a. 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. CT 理论与应用研究, 28(2): 167~174.

渠芳, 连承波, 柴震瀚, 任冠雄, 夏青松, 刘宏. 2019b. 孔隙性砂岩地层中变形带研究述评. 油气地质与采收率, 26(5): 10~20.

渠芳, 连承波, 柴震瀚, 任冠雄. 2021. 孔隙性砂岩中单条变形带与簇状变形带的特征与区别——以远安地堑上白垩统红花套组中变形带为例. 地质论评, 67(6): 1636~1648.

Aydin A. 1978. Small faults formed as deformation bands in sandstone. Pure and Applied Geophysics, 116(4~5): 913~930.

Aydin A, Borja R I, Eichhubl P. 2006. Geological and mathematical framework for failure modes in granular rock. Journal of Structural Geology, 28(1): 83~98.

Ballas G, Soliva R, Sizun J, Fossen H, Benedicto A, Skurtveit E. 2013. Shear-enhanced compaction bands formed at shallow burial conditions; implications for fluid flow (Provence, France). Journal of Structural Geology, 47: 3~15.

Ballas G, Fossen H, Soliva R. 2015. Factors controlling permeability of cataclastic deformation bands and faults in porous sandstone reservoirs. Journal of Structural Geology, 76: 1~21.

Balsamo F, Storti F. 2010. Grain size and permeability evolution of soft-sediment extensional sub-seismic and seismic fault zones in high-porosity sediments from the Crotone basin, southern Apennines, Italy. Marine and Petroleum Geology, 27(4): 822~837.

Braathen A, Tveranger J, Fossen H, Skar T, Cardozo N. 2009. Fault facies and its application to sandstone reservoirs. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 93(7): 891~ 917.

Cashman S, Cashman K. 2000. Cataclasis and deformation-band formation in unconsolidated marine terrace sand, Humboldt County, California. Geology, 28(2): 111~114.

Charalampidou E M, Hall S A, Stanchits S, Lewis H. Viggiani G. 2011. Characterization of shear and compaction bands in a porous sandstone deformed under triaxial compression. Tectonophysics, 503(1~2): 8~17.

Chi Meiyao, Tang Xingong, Xiang Kui, Sun Bin. 2019&. Estimating Reservoir Parameters from Rock Electrical and Elastic Parameters. Science Technology and Engineering, 19(27): 41~46.

Dou Chunxia, Tang Xingong, Xiang Kui, SunBin, YanLiangjun. 2016&. Elastic and electrical properties of shales from Qiongzhusi and Longmaxi Formation. Lithologic Reservoirs, 28(01): 111~116.

Eichhubl P, Hooker J N, Laubach S E. 2010. Pure and shear-enhanced compaction bands in Aztec Sandstone. Journal of Structural Geology, 32(12): 1873~1886.

Fisher Q J, Knipe R J. 2001. The permeability of faults within siliciclastic petroleum reservoir of the North sea and Norwegian continental shelf. Marine and Petroleum Geology, 18(10): 1063~1081.

Fossen H, Bale A. 2007. Deformation bands and their influence on fluid flow. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 91(12): 1685~1700.

Fossen H, Schultz R A, Shipton Z K, Mair K. 2007. Deformation bands in sandstone: a review. Journal of the Geological Society, 164: 755~769.

Fossen H. 2010. Structural geology. New York: Cambridge University Press: 119~185.

Fossen H, Schultz R A, Torabi A. 2011. Conditions and implications for compaction band formation in the Navajo Sandstone, Utah. Journal of Structural Geology, 33(10): 1477~ 1490.

Fossen H, Zuluaga L F, Ballas G, Soliva R. Rotevatn A. 2015. Contractional deformation of porous sandstone: insights from the Aztec Sandstone, SE Nevada, USA. Journal of Structural Geology, 74: 172~ 184.

Fossen H, Soliva R, Ballas G, Trzaskos B, Cavalcante C, Schultz R A. 2017. A Review of Deformation Bands in Reservoir Sandstones: geometries, mechanisms and distribution. Geological Society London Special Publications, 459(1): 25p

Johansen T, Fossen H. 2008. Internal geometry of fault damage zones in interbedded siliciclastic sediments. Geological Society, London, Special Publications. 299(1): 35~56.

Li Chuanliang. 2007&. Effect of pore—throat ratio on reservoir

permeability. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 14(5): 78~79.

Li Ting, DU Yun, WANG Xin, Xi Daoying. 2008&. Field evidence and experimental research on localized deformation bands in high-porosity rocks. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 27(s1): 2593~2693.

Lian Chengbo, Zhong Jianhua, Yang Yufang, Yang Jun. 2010&. Characteristicsofporoperm and microscopic pore structure of the low porosity and low permeability reservoirof Quan4 formation sandstonein Longxiarea, Songliao Basin Journal of Geology, 45(4): 1170~1179.

Lian Chengbo, Chai Zhenhan, Qu Fang, Ren Guanxiong. 2020&. Micro-characteristics and deformation mechanism of cataclastic band in Yuan'an Graben . Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 27(5): 25~32.

Lothe A E, Gabrielsen R H, Hagen N B, Larsen B T. 2002. An experimental study of the texture of deformation bands: effects on the porosity and permeability of sandstones. Petroleum Geoscience, 8(3): 195~207.

Lu Deyi. 2017&. Current situation of core permeability measuring methods in laboratory. Petrochemical Industry Application, 36(2): 1~4.

Nicol A, Childs C, Walsh J J, Schafer K W. 2013. A geometric model for the formation of deformation band clusters . Journal of Structural Geology, 55: 21~33.

Olsson W A, Holcomb D J. 2000. Compaction localization in porous rock. Geophysical Research Letters, 27(21): 3537~3540.

Okubo C H, Schultz R A. 2005. Evolution of damage zone geometry and intensity in porous sandstone: Insight gained from strain energy density. London: Journal of the Geological Society, 162(6): 939~949.

Philit S, Soliva R, Castilla R, Ballas G, Taillefer A. 2018. Clusters of cataclastic deformation bands in porous sandstones. Journal of Structural Geology, 114: 235~250.

Pittman E D. 1981. Effect of fault-related granulation on porosity and permeability of quarts sandstones, Sinpson Group (Ordovician), Oklahoma. AAPG Bulletin, 65(11): 2381~2387.

Qu Fang, Lian Chengbo, Chai Zhenhan, Ren Guanxiong. 2019&. Microstructure analysis of deformation band in porous sandstone based on three-dimensional X-ray microscope. CT Theory and Applications, 28(2): 167~174.

Qu Fang, Lian Chengbo, Chai Zhenhan, Ren Guanxiong, Xia Qingsong, Liu Hong. 2019&. Review of research on deformation band in porous sandstone formations. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 26(5): 10~20.

Qu Fang, Lian Chengbo, Chai Zhenhan, Ren Guanxiong. 2021&. Discussion on the characteristics and differences between single deformation bands and clusters of deformation bands in porous sandstone—Taking the deformation bands of Upper Cretaceous Honghuatao Formation in Yuan'an Graben as an example. Geological Review, 67(6): 1636~1648.

Robert R, Robion P, Souloumiac P, David C, Saillet E. 2018. Deformation bands, early markers of tectonic activity in front of a fold-and-thrust belt: example from the Tremp—Graus basin, southern Pyrenees, Spain. Journal of Structural Geology, 110: 65~85.

Rotevatn A, Torabi A, Fossen H, Braathen A. 2008. Slipped deformation bands: a new type of cataclastic deformation bands in Western Sinai, Suez rift, Egypt. Journal of Structural Geology, 30(11): 1317~1331.

Rotevatn A, Sandve T H, Keilegavlen E, Kolyukhin D, Fossen H. 2013. Deformation bands and their impact on fluid flow in sandstone reservoirs: the role of natural thickness variations. Geofluids, 13(3): 359~371.

Rotevatn A, Fossmark H S, Bastesen E, Thorsheim E, Torabi A. 2017. Do deformation bands matter for flow? Insights from permeability measurements and flow simulations in porous carbonate rocks. Petroleum Geoscience, 23(1): 104~119.

Schultz R A, Okubo C H, Fossen H. 2010. Porosity and grain size controls on compaction band formation in Jurassic Navajo Sandstone. Journal of Geophysical Research, 37: 1~5.

Schultz R A. 2011. Relationship of compaction bands in Utah to Laramide fault-related folding. Earth and Planetary Science Letters, 304: 29~35.

Shipton Z K, Evans J P, Robeson V R, Forster C B, Snelgrove S. 2002. Structure heterogeneity and permeability in faulted eolian sandstone: Implications for subsurface modeling of faults. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 86(5): 863~883.

Skurtveit E, Torabi A, Gabrielsen R H, Zoback M D. 2013. Experimental investigation of deformation mechanisms during shear-enhanced compaction in poorly lithified sandstone and sand. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 118(8): 4083~4100.

Soliva R, Ballas G, Fossen H, Philit S. 2016. Tectonic regime controls clustering of deformation bands in porous sandstone. Geology, 44(6): 423~426.

Relationship between microstructure and permeability of compactional shear deformation bands of Upper Cretaceous Honghuatao Formation in Yuan'an graben

QU Fang[1, 2)], LIAN Chengbo[1, 2)], CHAI Zhenhan[3)], REN Guanxiong[2)]

1) *State Key Laboratory of Oil / Gas Reservoir Geology and Exploitation*, *Chengdu*, 610500;

2) *School of Geoscience and Technology*, *Southwest Petroleum University*, *Chengdu*, 610500;

3) *No.* 3 *Oil Production Plant*, *SINOPEC Northwest Company*, *Luntai*, *Xinjiang*, 841600

Objectives: Compactional shear deformation bands formed in porous sandstone often reduce the rock permeability to a certain extent. The permeability characteristics of deformation band and its surroundings are one of the important contents in the study of deformation bands in porous sandstone. Because the width of a deformation band is often millimeter, the conventional permeability test method can not meet the research needs due to the limitation of resolution. In this paper, the effect of microstructure of deformation bands on permeability is analyzed based on AUTOSCAN with intensive testing function in order to solve this problem.

Methods: Single deformation bands, small cluster of deformation bands and medium and large cluster of deformation bands of different sizes in the upper Cretaceous Honghuatao formation of Yuan'an graben are selected as research samples. Based on the detailed study of their microstructure, AUTOSCAN with high-resolution testing function is used for intensive testing, and the continuous permeability profile is established.

Results: The test results show that the low permeability points are characterized by drop-down peaks in the permeability line scanning curve, and have a significant corresponding relationship with the deformation bands. There are differences in the range of abnormal low permeability in different deformation bands. The greater the thickness of the deformation bands, the higher the degree of abnormality; The permeability of different microstructural elements decreases differently. The order of permeability from low to high is: central cataclastic bands of large cluster of deformation bands < central cataclastic bands of small cluster of deformation bands < inter band area < central cataclastic band of single deformation band < Marginal transition area < surrounding rock.

Conclusions: The analysis shows that although the thickness of deformation bands and the size of permeability detection hole will affect the permeability detection results, the change of rock internal microstructure caused by the formation of deformation band is the essential reason for the decrease of permeability. The central cataclastic bands of medium and large clusters of deformation bands are densely developed, the strain hardening between bands is strong, and the continuity is good in three-dimensional space, which is likely to have a great impact on fluid seepage and oil and gas migration. Due to the poor continuity of a single deformation band, it is difficult to really hinder fluid flow, but will enhance the anisotropy of the whole rock.

Keywords: AUTOSCAN; compactional shear deformation bands; permeability; microstructure; central cataclastic band

Acknowledgements: This research was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41602157)

First and corresponding author: QU Fang, female, born in 1981, Ph. D., lecturer; mainly engaged in petroleum geology, the formation mechanism and distribution of oil and gas reservoirs, and development geology; Email: 376871312@qq.com

Manuscript received on: 2022-03-29; Accepted on: 2022-05-26; Network published on: 2022-06-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2022.06.021 **Edited by**: LIU Zhiqiang