

碎屑岩储层孔隙结构地质特征探究

刘志明

中法渤海地质服务有限公司 天津 300450

摘要: 基于钻井、岩心及高压压汞、扫描电镜等测试资料,对研究区碎屑岩储层的基础地质特征、微观孔隙结构及演化规律进行了系统分析。结果表明,储层属中低孔、低渗类型,次生孔隙是主要储集空间,孔喉以微细喉道为主,非均质性较强。结合物性与孔喉参数将储层划分为四种孔隙结构类型,其中水下分流河道砂体储集性能最好。沉积、成岩和构造作用共同制约了孔隙发育,成岩改造与构造裂缝优化是储层质量提升的关键因素。该结果可为研究区油气勘探开发提供地质参考。

关键词: 碎屑岩储层; 孔隙结构; 地质特征

引言: 碎屑岩储层孔隙结构决定油气储集与渗流能力,其空间组合特征直接影响勘探开发效果。研究区经历多期构造与沉积演化,储层非均质性强,孔隙发育机制及主控因素仍不清楚,有利储层预测精度受到制约。基于区域地质背景,本文对储层岩石学、物性及微观孔隙结构进行精细表征,分析不同地质作用的控制机制,梳理孔隙动态演化规律,划分孔隙结构类型,以明确储层发育规律,为油气高效勘探开发提供依据。

1 研究区地质概况与储层基础特征

1.1 区域地质背景

研究区位于盆地一级构造单元内的次级凹陷带,呈北东—南西向展布。受多期构造运动影响,先后经历了断陷期、拗陷期及构造活化期,形成“早期断陷分割、中期广覆沉降、晚期构造调整”的演化格局。多期构造叠加改造对储层原始孔隙保存与后期成岩改造有明显控制作用。

自下而上发育古近系、新近系及第四系地层,目的层段为古近系碎屑岩沉积序列,地层厚度稳定,与下伏地层呈角度不整合接触。沉积演化自早到晚由冲积扇—辫状河过渡为三角洲—滨浅湖,再演变为曲流河—泛滥平原,构成一套完整的湖侵—湖退旋回^[1]。

研究区烃源岩条件较好,有机质以混合型为主,成熟度适中。储集体以三角洲前缘水下分流河道砂体和滨浅湖滩坝砂体为主,砂体厚度较大、横向连续性好。盖层条件有利,生储盖组合配置良好,具备形成岩性—构造圈闭油气藏的基本地质条件。

1.2 碎屑岩储层岩石学特征

储层岩石类型以岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩为主,局部发育少量岩屑砂岩。岩性组合为浅灰色、灰绿色细砂岩与灰色、深灰色泥岩不等厚互层,单层砂岩厚度 2~8 m,砂地比 30%~50%。

碎屑组分中石英含量 45%~65%,长石 15%~25%,岩屑 12%~25%,岩屑以火山岩和变质岩为主。粒度以中—细粒为主,粒径 0.1~0.5 mm。分选中等至较好,磨圆以次棱角状为主,局部见次圆状,结构成熟度中等。

填隙物含量 8%~18%,包括黏土矿物(高岭石、伊利石、绿泥石)、碳酸盐胶结物(方解石、铁方解石、白云石)及少量硅质胶结物。纵向上碳酸盐胶结物含量随深度增加递增,黏土矿物在三角洲前缘相带富集。

1.3 储层宏观物性特征

研究区储层孔隙度分布在 6%~16% 之间,平均 11.2%。纵向上,孔隙度随埋深增大递减,3000 m 以浅平均 13.5%,3000 m 以深降至 9.0% 以下。横向上,三角洲前缘主河道带孔隙度较高,向侧缘及湖相方向降低。

渗透率分布在 $0.1 \times 10^{-3} \sim 15 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,平均 $4.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属中—低孔、低渗储层。层内非均质性较强,渗透率变异系数 0.6~1.2,突进系数 2.5~4.0,层间非均质性受沉积微相变化控制^[2]。

孔隙度与渗透率呈正相关,相关性中等($R^2 \approx 0.58$),表明孔隙结构对渗流能力有重要影响。储层储集能力受沉积微相和成岩作用双重控制,水下分流河道砂体物性最优,是研究区最有利的储集相带。

2 碎屑岩储层微观孔隙结构特征精细表征

2.1 储层孔隙类型及发育特征

原生孔隙以残余粒间孔为主,呈三角形、多边形或不规则状,孔径 $20\sim 80\mu\text{m}$,面孔率 $2\%\sim 5\%$ 。晶间孔发育于高岭石等黏土矿物晶体间,呈片状或弯曲片状,孔径普遍小于 $5\mu\text{m}$,其发育程度受自生黏土矿物含量及赋存状态控制。

次生孔隙是储集空间的主体。粒内溶孔见于长石及火山岩岩屑内部,沿解理缝或双晶纹选择性溶蚀,呈蜂窝状或不规则状,孔径 $10\sim 50\mu\text{m}$ 。铸模孔为长石等可溶颗粒完全溶蚀后保留的完整印模,边界清晰,多呈矩形或椭圆形。溶蚀大洞沿层理面或微裂缝发育,孔径可达 $200\mu\text{m}$ 以上,常与粒间溶孔伴生。次生孔隙总面孔率 $6\%\sim 12\%$,对储集性能贡献显著。

微裂缝包括构造缝与成岩缝,缝宽 $1\sim 5\mu\text{m}$,面密度约 $1.0\text{mm}/\text{mm}^2$ 。构造缝以穿粒缝和贴粒缝为主,成岩缝包括收缩缝、压实缝等。微裂缝将孤立溶孔连通,形成孔—缝网络,改善储层渗流能力^[3]。

2.2 孔喉结构定量特征分析

高压压汞毛管压力曲线呈单峰型和双峰型两种形态。单峰型压汞曲线较陡、平台段明显,反映孔喉分布相对集中;双峰型呈阶梯状下降,存在两个平台段。按孔喉半径 $>1.0\mu\text{m}$ 、 $0.1\sim 1.0\mu\text{m}$ 、 $<0.1\mu\text{m}$ 划分为大、中、微三级。

孔喉半径主要分布于 $0.05\sim 2.0\mu\text{m}$,平均中值半径约

$0.35\mu\text{m}$ 。排驱压力 $0.5\sim 5.0\text{MPa}$,平均 1.8MPa ;中值压力 $2.0\sim 15.0\text{MPa}$,平均 5.6MPa 。关键参数与渗透率呈良好幂函数相关。

孔喉分选系数 $1.5\sim 3.5$,平均 2.4 ,分选中等偏差。连通性方面,水下分流河道砂体进汞饱和度 $75\%\sim 85\%$,席状砂多低于 65% 。纵向上随埋深增大孔喉变细、排驱压力递增;横向上主河道向侧缘孔喉分选变差,非均质性增强。

2.3 孔隙结构微观形貌特征

扫描电镜下孔喉呈平行板状或“墨水瓶”状。前者孔壁平直、连通顺畅;后者孔隙体大但喉道狭窄,呈瓶颈状收缩,流体可动性较差。孔壁常见绿泥石薄膜或长石溶蚀残留结构。

岩屑长石砂岩中溶孔发育,孔壁多呈不规则港湾状;长石岩屑砂岩中残余粒间孔较多,孔壁相对平滑。细砂岩孔喉配置优于粉砂岩,后者以微细孔喉为主,多呈“墨水瓶”形态。

孔喉半径 $>0.5\mu\text{m}$ 时,渗透率随孔喉半径增大呈指数上升;孔喉半径 $<0.1\mu\text{m}$ 时渗透率降至 $1.0\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 以下。微裂缝可提高渗流能力 $1\sim 2$ 个数量级^[4]。

2.4 孔隙结构类型划分与特征对比

以渗透率为主线,综合孔隙类型、孔喉半径、排驱压力及分选性等参数,建立I~IV类孔隙结构分类评价标准,关键参数对比见表1。

表1 孔隙结构类型划分及关键参数对比

类型	孔隙组合	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	排驱压力/MPa	中值半径/ μm	压汞形态
I类	残余粒间孔+粒间溶孔	12~16	5.0~15.0	<1.0	>0.5	双峰式
II类	粒间溶孔+粒内溶孔	8~12	1.0~5.0	1.0~2.5	0.2~0.5	单峰式
III类	溶孔+铸模孔	5~8	0.1~1.0	2.5~4.0	0.05~0.2	单峰式
IV类	微孔+微裂缝	<5	<0.1	>4.0	<0.05	平台式

I类孔隙度 $>12\%$ 、渗透率 $>5\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,压汞呈双峰式;II类孔隙度 $8\%\sim 12\%$ 、渗透率 $1\sim 5\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$;III类孔隙度 $5\%\sim 8\%$ 、渗透率 $0.1\sim 1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$;IV类孔隙度 $<5\%$ 、渗透率 $<0.1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,压汞呈平台式。

空间分布上,I类见于水下分流河道主砂体带;II类见于河口坝及分流河道侧缘;III类多见于席状砂;IV类发育于远砂坝及湖相泥质夹层。随埋深增大,储层孔隙结构由I类向IV类过渡,非均质性增强。

3 碎屑岩储层孔隙结构主控因素与演化规律

3.1 沉积作用对孔隙结构的控制作用

水下分流河道砂体以中—细砂岩为主,粒度较粗,原始粒间孔发育,初始孔隙度可达 $30\%\sim 35\%$;河口坝砂体粒度略细,以细砂岩为主,原始孔隙度约 $25\%\sim 30\%$;席状砂和远砂坝以粉砂岩和泥质粉砂岩为主,原始孔隙度普遍低于 20% 。

沉积水动力对孔喉分选和连通性有直接控制。水动力较强的分流河道带,颗粒分选好、杂基含量低,孔喉配置优良,连通性较好;水动力较弱的席状砂和远砂

坝,分选较差,杂基及泥质含量较高,孔喉常被堵塞,连通性显著变差。

平行层理和交错层理发育段,颗粒定向排列形成优势渗流方向,渗透率各向异性明显;块状层理段内部孔隙分布相对均匀。层理面常成为溶蚀流体的优先通道,沿层理面次生孔隙发育程度较高。

3.2 成岩作用对孔隙结构的改造机制

压实作用贯穿整个埋藏过程。早成岩阶段以机械压实为主,颗粒重新排列,塑性岩屑变形,原生粒间孔急剧缩减,孔隙度损失率可达 20%~25%;中成岩阶段压溶作用增强,颗粒接触关系由点接触发展为线接触和凹凸接触,孔喉空间被进一步压缩。

胶结作用对孔隙和孔喉的充填改造显著。碳酸盐胶结物(方解石、铁方解石)呈基底式或孔隙式胶结,占原生孔隙空间的 30%~50%;硅质胶结以石英次生加大边形式产出,使孔喉半径明显减小;黏土矿物胶结中,绿泥石薄膜对原生孔隙起保护作用,伊利石和绢云母则呈桥接状堵塞孔喉。

溶蚀作用表现为酸性流体沿颗粒边缘和内部解理缝选择性溶蚀。有机质热演化释放的有机酸和 CO₂ 形成酸性流体进入储层后,长石和火山岩岩屑发生溶蚀,形成粒内溶孔和铸模孔,溶蚀增孔率可达 5%~10%。

研究区成岩演化序列为:早成岩期机械压实→绿泥石薄膜形成→长石溶蚀→石英次生加大→碳酸盐胶结→晚期铁方解石充填。各成岩事件对孔隙结构的影响具有叠加效应,早期溶蚀形成的次生孔隙可被晚期胶结作用部分破坏,最终孔隙结构为多期成岩作用综合叠加的结果。

3.3 构造作用对孔隙结构的优化改造

构造应力促进微裂缝发育。燕山晚期—喜山期的多期构造运动在储层中形成大量构造微裂缝,开度 1~5 μm,线密度平均 0.5~2 条/cm,基质渗透率提高 1~2 个数量级。多组系裂缝相互切割构成网络状连通系统,改善储层渗流能力,同时微裂缝面为后期酸性流体提供运移通道,扩大储集空间贡献。

构造抬升与沉降影响成岩流体及溶蚀作用。抬升期地层暴露或埋藏变浅,大气淡水淋滤增强,长石等不稳定矿物溶蚀强度增大;快速沉降期异常高压发育,抑制压实和胶结作用,利于原生孔隙保存。长石溶蚀形成次生孔与原生粒间孔叠加,异常高压使埋藏期孔隙衰减速率降低 30%以上^[5]。

构造样式不同,孔隙空间分布也有差异。背斜轴部和断裂带附近微裂缝和溶蚀孔隙发育,孔隙度较翼部高出 2%~4%;向斜和构造平缓区孔隙保存条件相对稳

定,次生溶蚀较弱,孔隙结构以原生孔为主。轴部以裂缝-溶孔复合型为主,翼部及平缓区则以原生粒间孔-残余孔组合占优,整体呈现“高部位增孔、低部位保孔”的分布格局。

3.4 储层孔隙结构动态演化过程

沉积期至早成岩期是原始孔隙发育阶段。水下分流河道中一细砂岩原始粒间孔大量发育,初始孔隙度 30%~35%,孔喉以中—大喉为主,分选较好,为后期孔隙演化提供了较好的初始条件。

早成岩期至中成岩期 A 阶段为孔隙改造调整期。压实作用使原生孔隙度损失 20%~25%,孔隙度降至 10%~15%,早期碳酸盐胶结对孔隙进一步充填破坏。有机质热演化产生的有机酸进入储层后,长石和岩屑发生大规模溶蚀,形成大量次生溶孔,孔隙度回升至 12%~18%。

中成岩期 B 阶段至晚成岩期为孔隙定型优化阶段。晚期碳酸盐胶结和石英加大作用使部分次生孔隙被充填,孔隙度最终稳定在 6%~16%。构造运动形成的微裂缝改善了储层渗流能力。最终孔隙结构受沉积、成岩和构造三因素综合控制,不同相带的差异性定型受各自构造—成岩演化路径影响。

结束语

本文揭示了研究区碎屑岩储层孔隙结构的地质特征、主控因素与演化过程,沉积微相奠定了储层基础物性,成岩作用主导了孔隙改造与定型,构造作用优化了储层渗流能力。四类孔隙结构空间分异特征明显,水下分流河道是最有利的储集相带。研究阐明了多地质因素叠加改造的孔隙演化机制,为储层精细化研究提供了参考。后续可结合生产数据开展储层物性预测,为油气高效开发提供支撑。

参考文献

- [1] 唐禾元,张新涛,于福生.南堡凹陷碎屑岩储层质量层间差异及成因[J].沉积学报,2023,41(03):589-598.
- [2] 夏玉磊,王继平,刘艳.致密砂岩储层微观孔喉结构及可动流体分布特征[J].地质科技通报,2023,42(04):112-120.
- [3] 赵丁丁,李胜利,屈红军.致密砂岩气藏不同岩石相孔喉结构对储层特征的控制机理[J].地质科技通报,2023,42(02):98-106.
- [4] 王波,王清斌,李慧勇.基于数字岩石技术的致密砂岩储层微孔隙特征及地质意义[J].海洋地质前沿,2024,40(05):45-53.
- [5] 刘志达,贾承造,李传新.超深层致密碎屑岩储层成岩演化与孔隙结构响应机制[J].地球科学,2024,49(08):2567-2579.