

文章编号:1000-0550(2020)02-0420-09

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2019.117

多期构造裂缝发育充填特征及其主控因素 ——以济阳坳陷平南潜山为例

李继岩

中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院,山东东营 257000

摘要 构造裂缝是下古生界碳酸盐岩储层中最重要的储集空间类型之一。以济阳坳陷平南下古生界潜山为研究对象,利用岩芯观察统计、元素地球化学、矿物学、岩芯常规分析等多种技术方法,分析了构造裂缝发育特征,阐明了构造裂缝发育期次与充填特征以及构造裂缝发育主控因素。研究表明:受不同时期、不同性质、不同方向构造应力场控制,研究区下古生界碳酸盐岩中发育形成期次、走向、充填时期、充填程度等具有明显差异的3组构造裂缝,分别为印支期南北向挤压形成的近东西向早期全充填构造裂缝、燕山期北北东—南南西向拉张形成的北西—南东向晚期部分全充填构造裂缝、喜山期北西—南东向拉张形成的北东—南西向晚期部分全充填的构造裂缝。构造裂缝发育程度主要受控于碳酸盐岩岩性、层厚2个内因与距断层距离1个外因等3个因素。

关键词 济阳坳陷;平南潜山;下古生界;碳酸盐岩;构造裂缝;发育期次与充填特征;主控因素

第一作者简介 李继岩,男,1987年出生,博士,副研究员,储层沉积学,E-mail: ljj19870817@163.com

中图分类号 P618.13 **文献标志码** A

0 引言

下古生界碳酸盐岩古潜山作为渤海湾盆地早期勘探重要的油气藏类型之一,已发现了多个高产的“潜山头”,如冀中坳陷的任丘潜山,黄骅坳陷的千米桥潜山、济阳坳陷的广饶潜山、桩西潜山、孤岛潜山等^[1]。近年华北油田在冀中坳陷先后发现了长3、宁古8、牛东1等10多个日产油226~1 036 t的高产、高效隐蔽性深潜山及潜山内幕油气藏^[2-3]。另外胜利油田勘探工作者在济阳坳陷下古生界潜山勘探沉寂了十余年之后,近年来接连发现埕北30等多个日产油气500 t以上的高产、高效的低位潜山油气藏,该类潜山储层的储集空间类型以构造裂缝为主、少量岩溶孔洞。前人大量研究表明下古生界碳酸盐岩经历了多期复杂构造运动改造和长期的成岩作用,产生了大量的成岩次生孔隙、构造裂缝和溶蚀孔洞缝,具有储集空间类型多、结构复杂、分布极不均匀等特点,其中构造裂缝是下古生界碳酸盐岩储层最重要的储集空间类型,在油气成藏期未充填的构造裂缝本身可以成为有效的储集空间,且构造裂缝可成为

后期酸性流体溶蚀碳酸盐岩的主要运移通道,溶蚀孔洞往往沿构造裂缝发育^[4-7]。另外下古生界碳酸盐岩潜山勘探实践也证实了构造裂缝对潜山油气成藏具有非常重要的控制作用。近几年前人对碳酸盐岩潜山储层的研究区域上主要集中在中国中西部塔里木盆地、四川盆地^[8],研究内容上主要为利用多种地球物理技术对缝洞体进行预测,形成了大量非常实用的缝洞预测的地球物理技术^[9-10],但对缝洞体分布的地质规律研究涉及较少。前人对砂岩储层等其他类型储层中构造裂缝地质规律方面研究较多,主要集中在对其分布规律的定性和定量预测方面,近几年逐渐由定性描述向定量评价、由单井分析向空间预测过渡,并形成了一系列定量预测构造裂缝空间分布的方法^[11-12]。综上所述,目前对下古生界碳酸盐岩储层中构造裂缝发育期次与充填规律的研究涉及较少,导致对油气成藏具有重要控制作用的有效构造裂缝分布规律认识不清。为深入分析下古生界碳酸盐岩储层中多期构造裂缝发育充填特征及其主控因素,本文以济阳坳陷平南潜山为研究对象,利用岩芯观察统计、镜下薄片观察、元素地球化学等技术手

收稿日期:2019-10-14;收修改稿日期:2020-01-21

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05006-003)[Foundation: National Science and Technology Major Project, No. 2016ZX05006-003]

段,分析构造裂缝发育特征,搞清构造裂缝发育期次与充填特征,明确构造裂缝发育主控因素,从而为济阳拗陷乃至整个渤海湾盆地下古生界碳酸盐岩储层构造裂缝的预测奠定良好基础。

1 区域地质概况与岩浆侵入时期分析

构造上,平南潜山位于济阳拗陷东营凹陷西部平南断层的上升盘,紧邻博兴洼陷(图1)。平南潜山下古生界不同组段岩性组合特征差异明显,寒武系馒头组以泥—微晶白云岩及紫红色页岩互层为主,夹大套闪长玢岩;毛庄组与徐庄组发育灰岩与页岩互层,夹部分泥—微晶白云岩与侵入岩;张夏组发育鲕粒灰岩与块状灰岩;崮山组与长山组以泥灰岩与瘤状灰岩为主;凤山组发育一套中厚层细—中晶白云岩与灰岩;冶里—亮甲山组发育厚层的细—中晶白云岩;马家沟组以豹皮灰岩、块状灰岩、细—中晶白云岩互层为主;八陡组发育块状灰岩与泥质白云岩互层(图1)。另外研究区下古生界碳酸盐岩潜山经历了印支期南北向挤压、燕山期北北东—南南西的拉张、喜山期北西—南东向拉张等3期不同性质、不同方向构造运动叠加改造^[13-14],从而形成了多期、多方向、多性质的复杂的、立体的构造裂缝网络。

受控于多期复杂构造运动的控制,研究区岩浆活动非常强烈,岩浆侵入过程中会携带大量的成矿

物质发生沉淀,从而充填研究区下古生界碳酸盐岩中的构造裂缝^[15]。因此,为了研究构造裂缝充填时期,对研究区岩浆侵入时期进行了分析。岩浆侵入受断裂控制明显,早期北西向断层、晚期切穿基底平南断层两侧是侵入岩主要分布区,且形成了与岩浆活动相关的非常典型无机成因CO₂气藏^[16-17],为了系统研究岩浆侵入时期,选用岩浆锆石U-Pb测年方法,该方法是目前应用在大地构造定年中应用非常普遍的一种测年方法,在含油气盆地地层定年中应用较少^[16-20]。本次研究选取滨古斜15、滨古26、滨古9等井中的6块闪长玢岩样品进行锆石U-Pb测年分析,样品处理及测试在南京大学内生金属矿床成矿机制国家重点实验室完成。首先使用常规的重液浮选和电磁分离方法挑选锆石,然后将其镶嵌在环氧树脂中并抛光,进行锆石阴极发光(CL)、反射光、投射光照相机LA-CIP-MS同位素分析。测试使用与New Wave 213 nm 激光取样系统连接起来的Agilent 7500a ICP-MS完成。分析过程中,激光束斑直径采用20~30 μm,频率5 Hz。样品经剥蚀后,由He气作为载气,再和Ar气混合后进入ICP-MS进行分析,U-Pb分馏据澳大利亚锆石标样GEMOC GJ-1(²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb age of (608±1.5) Ma)来校正,锆石标样Mud Tank (Inercept age of (730±8) Ma)为内标,控制分析精度。每个测试流程的开头和结尾分别测试2个GJ标样,

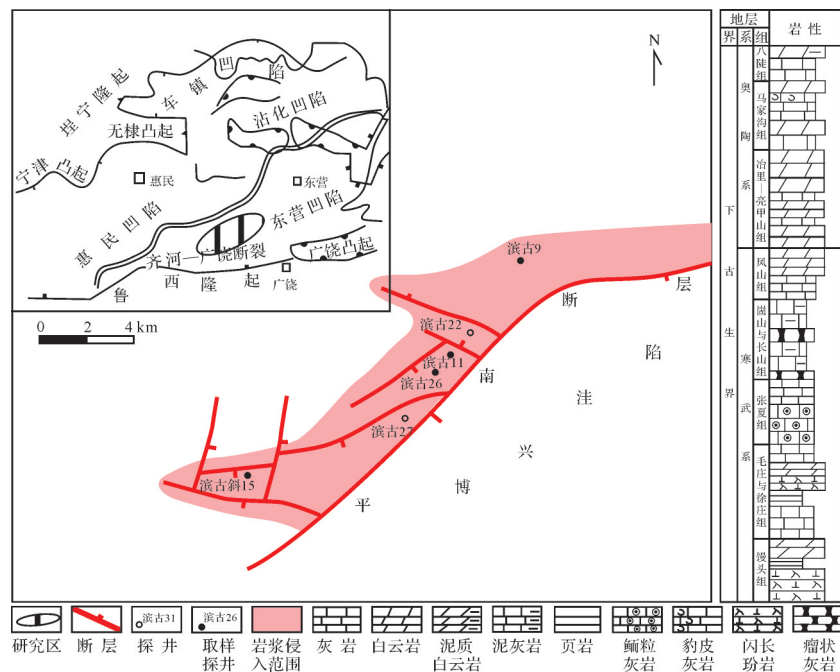


图1 研究区构造位置与地层分布

Fig.1 Structural location and stratigraphic distribution diagram of the study area

另外测试1个MT标样和10个待测样品点。本次对挑选出的59颗锆石进行测试分析, $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 所确定的年龄显示2个聚集分布区域(图2),第一组共30个测点, $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 各自确定的年龄分别在167.9~187.3 Ma和169.1~183.9 Ma,为早中侏罗纪沉积时期,第二组共29个测点, $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 各自确定的年龄分别在26.5~32.1 Ma和25.6~32.6 Ma,为东营组沉积时期。因此,锆石测年结果表明,研究区地质历史时期发生了2期岩浆侵入,第一期对应早中侏罗纪沉积时期,第二期对应东营组沉积时期。

2 构造裂缝基本特征

本次利用成像测井资料、岩层产状法、古地磁等3种方法相结合,确定了研究区构造裂缝的产状。首先是利用滨古26、滨古22两口井的声成像测井资料进行了统计,结果表明:构造裂缝的倾角在 5° ~ 81° ,其中倾角 0° ~ 10° (低角度缝)的占总数量7.14%,倾角 10° ~ 40° (低角度缝)的占总数量11.8%,倾角 40° ~ 70° (高角度缝)的占总数量58.69%,倾角 70° ~ 90° (直立缝)的占总数量22.37%;走向主要为 50° ~ 80° 、 210° ~ 240° (北东—南西走向),以及 121° ~ 153° 、 303° ~ 330° (北西—南东),另外少量 90° 左右的(近东西向)。另外,通过对研究区滨古26、滨古11、滨古22、滨古斜15等6口探井的岩芯观察,利用沿层产状法对构造裂缝进行了定向,主要是将岩芯上层产状与构造图上地层产状对比,可以实现岩芯定向,根据岩芯层面与裂缝关系,确定出裂缝走向、倾向、倾角等产状,并结合对5块岩芯样品进行了古地磁岩芯裂缝定向实验(表1),对岩芯定向结果进行了校正。结果发

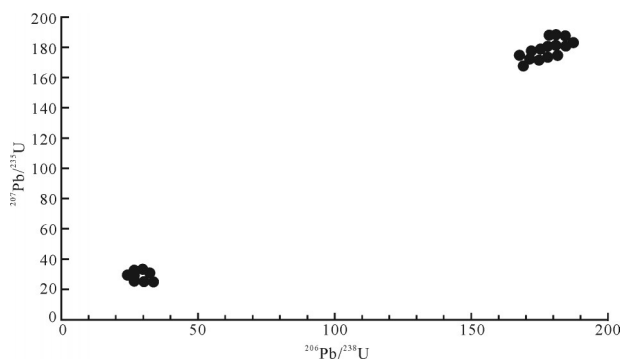


图2 锆石中 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 所确定的年龄分布特征

Fig.2 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ and $^{208}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ identified age distribution characteristics in the zircon

表1 平南潜山岩石样品古地磁分析结果
Table 1 Paleomagnetic analysis of rock samples from the Pingnan buried hill
(The experiment was completed in the Institute of Geophysics of the National Seismological Bureau)

取样井	深度/m	退磁场H (Oe)	偏角/(°)	倾角/(°)	标志线方位/(°)
滨古26	2 514.6	25~50	231.4	49.6	128.6
滨古26	2 514.6	75~100	32.9	39.2	327.1
滨古9	2 231.7	0~25	310.7	-53.3	49.3
滨古11	2 429.6	25~50	179.9	-60.5	180.1
滨古斜15	2 304.7	75~100	115.0	-32.8	245.0

现:平南潜山下古生界碳酸盐岩中主要发育北西—南东、北东—南西走向的2组构造裂缝,另外少量近东西走向的构造裂缝,其中前2种构造裂缝以高角度缝为主,直立缝次之,少量低角度和水平缝,近东西走向构造裂缝以低角度为主(图3)。另外,对构造裂缝的线密度、宽度、充填物类型进行了岩芯观察统计,构造裂缝的线密度在3.2~20条/m之间,平均约10.2条/m;构造裂缝的宽度在0.2~12 mm之间,平均约2.3 mm;构造裂缝充填物以方解石为主,少量硬石膏、铁质、泥质、黄铁矿等其他充填物(图3)。

3 构造裂缝发育期次和充填时期确定

平南潜山下古生界经历了多期不同性质、不同方向应力场的叠加改造,形成了多期、不同方向的构造裂缝^[13-14],本文结合对不同时期应力场方向和大小的数值模拟,确定构造裂缝形成时期,并选择对不同方向构造裂缝内的充填物进行C、O同位素及包裹体测温,确定构造裂缝充填时期,从而明确了平南潜山下古生界发育三期不同类型的构造裂缝:1)印支期形成的近东西向全充填低角度构造裂缝;2)燕山期形成的北西—南东向部分全充填高角度构造裂缝;3)喜山期形成的北东—南西向部分全充填高角度构造裂缝。

3.1 印支期形成的近东西向全充填低角度构造裂缝

受控于印支期近南北向区域挤压应力场^[13-14],平南潜山下古生界碳酸盐岩中发育一组近东西向的构造裂缝,该类构造裂缝中充填物以方解石为主,见少量石英、石膏、铁质和泥质,另外岩芯观察结果显示宽度大于1 cm的构造裂缝均被完全充填(图3a)。通过对构造裂缝中充填物进行C、O同位素分析及流体包裹体测温,结果发现(图4):方解石样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 和

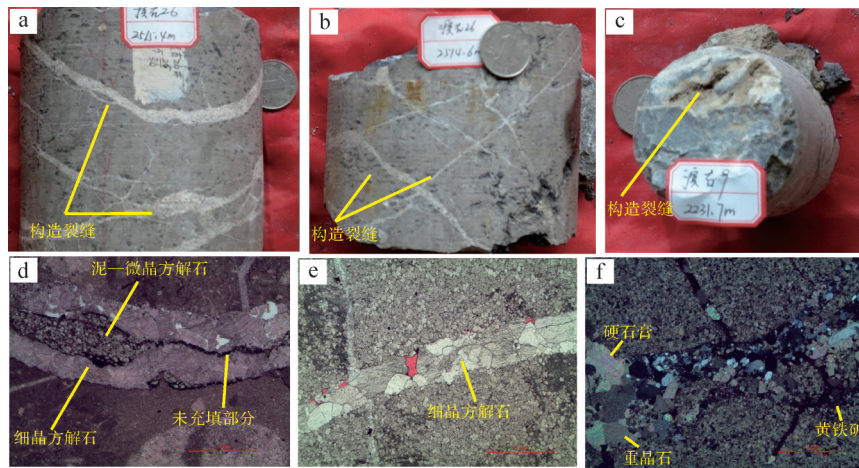


图3 岩芯观察构造裂缝特征

(a)滨古26,2 515.4 m, 马家沟组灰岩中被完全充填的低角度构造裂缝, 充填物为方解石; (b)滨古26,2 514.6 m, 马家沟组灰岩中被完全充填的高角度构造裂缝, 充填物为方解石; (c)滨古9,2 231.7 m, 马家沟组灰岩中半充填的构造裂缝, 充填物为泥质和方解石; (d)滨古11,2 429.3 m, 马家沟组灰岩中构造裂缝大部分被充填, 两期充填现象明显, 单偏光下; (e)滨古11,2 450.3 m, 马家沟组灰岩构造裂缝充填, 单偏光下; (f)滨古11,2 303.2 m, 八陡组灰岩构造裂缝充填物为硬石膏、重晶石、黄铁矿等, 正交光下

Fig.3 Structural fracture characteristics of core observations

$\delta^{18}\text{O}$ 分别落在了2个不同区间, 大部分构造裂缝方解石充填物中 $\delta^{13}\text{C}$ 值 $-2.78\text{‰} \sim -3.96\text{‰}$, 平均 -3.25‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 值在 $-20.52\text{‰} \sim -16.23\text{‰}$, 平均大约 -18.265‰ , 研究区下古生界围岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值 -0.85‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 平均值在 -8.7‰ , 对比前人发表的邻区围岩的碳、氧同位素的数据值^[21-24], 该类构造裂缝中方解石充填物碳、氧同位素值落在了靠近d区和d区的范围中, 属于中—高温岩浆热液淀积方解石的区域, 即沿断层和裂缝输导上来的热液在潜山中温度、压力、流速等不断下降, 达到方解石过饱和状态后在裂缝中沉淀下来, 形成脉状方解石。同时该类构造裂缝方解石充填物中大部分流体包裹体测温达到了 $175\text{ }^\circ\text{C}$ 。该类构造裂缝形成时期早(三叠纪沉积末期), 其形成后研究区发生第一期大规模岩浆侵入(早中侏罗纪沉积时期), 所以推测充填作用主要与研究区第一期岩浆活动有关。另外还有少量构造裂缝方解石充填物中的C、O同位素落在b区, $\delta^{13}\text{C}$ 值 $-0.85\text{‰} \sim -1.56\text{‰}$, 平均 -1.02‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 值在 $-8.25\text{‰} \sim -9.86\text{‰}$, 平均大约 -9.23‰ , 对比前人发表的邻区围岩的碳、氧同位素的数据值^[21-24], 充填作用与地下水溶蚀碳酸盐岩本身沉淀有关。从以上分析可以看出, 该类构造裂缝充填时期早, 且在漫长的地质历史时期充填程度非常高, 对油气成藏的意义不是很大。

3.2 燕山期形成的北西—南东向部分全充填高角度构造裂缝

受控于燕山期北北东—南南西区域拉张应力

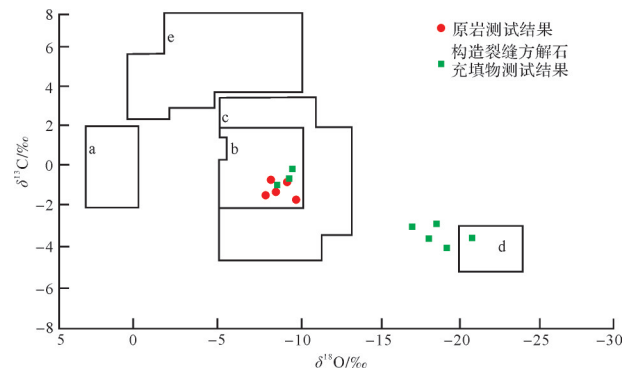


图4 印支期产生构造裂缝中方解石充填物的C、O同位素(底图据文献[21-24])

(a)低盐度矿液淀积方解石; (b)海水盐度矿液淀积方解石; (c)低温热液淀积方解石; (d)岩浆高温热液淀积方解石; (e)湖相淀积方解石

Fig.4 C and O isotopes of calcite fillings in tectonic fractures of the Indosinian epoch (references [21-24] for the base map)

场^[13-14], 平南潜山下古生界碳酸盐岩中发育一组北西—南东向的构造裂缝, 岩芯和镜下薄片观察表明该类构造裂缝部分被完全充填, 充填物以方解石为主(图3d), 少量石英、石膏、铁质和泥质(图3e, f), 且充填具有明显的分期特征, 第一期充填物为泥—微晶方解石, 第二期充填物为细晶方解石(图3d)。通过对构造裂缝中充填物进行C、O同位素分析及流体包裹体测温, 结果发现(图5): 方解石样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分别落在了2个不同区间, 大部分构造裂缝充填物方解石中碳氧同位素落在了c区和靠近c区的

区域内,方解石充填物中 $\delta^{13}\text{C}$ 值 $-2.02\text{‰} \sim -3.85\text{‰}$,平均 -3.10‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 值在 $-12.16\text{‰} \sim -15.2\text{‰}$,平均大约 -14.25‰ ,对比前人发表的邻区围岩的碳、氧同位素的数据值^[21-24](图5),分析为与低温热液沉积方解石有关,另外流体包裹体测温达到了 $165\text{ }^\circ\text{C}$,与研究区第二期(馆陶组沉积时期)岩浆侵入所携带的矿物质沉淀有关,形成了大量与热液相关的细晶方解石。另外还有少量构造裂缝方解石充填物中的C、O同位素落在b区, $\delta^{13}\text{C}$ 值 $-0.25\text{‰} \sim -1.76\text{‰}$,平均 -0.95‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 值在 $-7.65\text{‰} \sim -9.86\text{‰}$,平均大约 -8.52‰ ,对比前人发表的邻区围岩的碳、氧同位素的数据值^[21-24],该区域内为海水盐度矿液沉积方解石,分析是燕山期—喜山期漫长的地质历史时期,地下水或有机酸溶蚀碳酸盐岩沉淀有关,形成了大量泥—微晶方解石。

3.3 喜山期形成的北西—南东向部分全充填高角度构造裂缝

受控于喜山期北西—南东向区域拉张应力场^[13-14],平南潜山下古生界碳酸盐岩中发育一组北东—南西向的构造裂缝。该类构造裂缝部分被充填,充填物以方解石为主,少量石英、石膏、铁质和泥质。通过对构造裂缝中充填物进行C、O同位素分析及流体包裹体测温,结果发现(图6):方解石样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分别落在了2个不同区间,大部分构造裂缝充填物方解石中碳氧同位素落在了c区和靠近c区的区域内,方解石充填物中 $\delta^{13}\text{C}$ 值 $-2.25\text{‰} \sim -3.42\text{‰}$,平均 -2.45‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 值在 $-11.78\text{‰} \sim -15\text{‰}$,平均大约 -13.75‰ ,对比前人发表的邻区围岩的碳、氧同位素的数据值^[21-24](图6),分析为与低温热液沉积方解

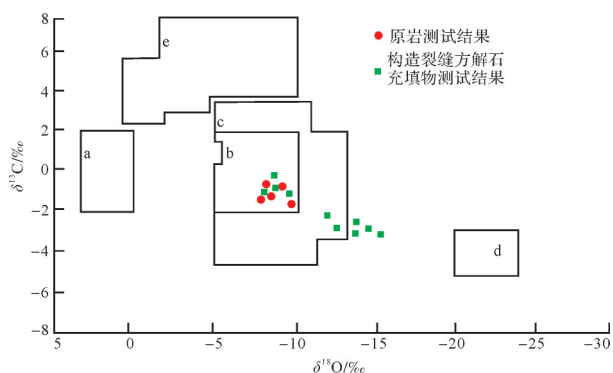


图5 燕山运动中晚期产生构造裂缝中方解石充填物的C、O同位素(底图据文献[21-24])

(a)低盐度矿液沉积方解石;(b)海水盐度矿液沉积方解石;(c)低温热液沉积方解石;(d)岩浆高温热液沉积方解石;(e)湖相沉积方解石

Fig.5 C and O isotopes of calcite fillings in tectonic fractures of the Yanshanian period (references [21-24] for the base map)

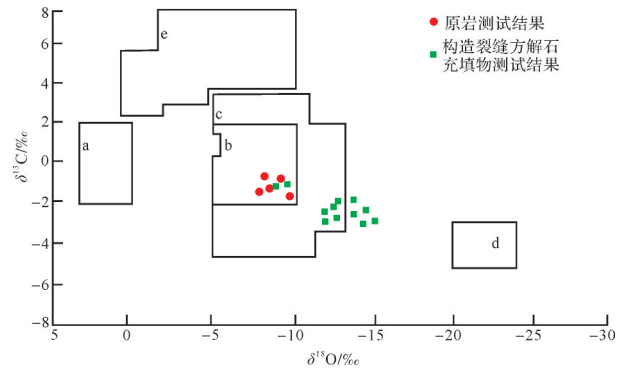


图6 喜山期产生构造裂缝中方解石充填物的C、O同位素(底图据文献[21-24])

(a)低盐度矿液沉积方解石;(b)海水盐度矿液沉积方解石;(c)低温热液沉积方解石;(d)岩浆高温热液沉积方解石;(e)湖相沉积方解石

Fig.6 C and O isotopes of calcite fillings in tectonic fractures of the Himalaya period (references [21-24] for the base map)

石有关,与研究区第二期(馆陶组沉积时期)岩浆侵入所携带的矿物质沉淀有关。另外还有少量构造裂缝方解石充填物中C、O同位素落在B区, $\delta^{13}\text{C}$ 值 $-1.35\text{‰} \sim -1.37\text{‰}$,平均 -0.16‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 值在 $-8.9\text{‰} \sim -9.7\text{‰}$,平均大约 -9.25‰ ,对比前人发表的邻区围岩的碳、氧同位素的数据值^[21-24],该区域内为海水盐度矿液沉积方解石,为地下水或有机酸溶蚀碳酸盐岩沉淀有关,形成了大量泥—微晶方解石。

综上所述,印支期形成的近东西向全充填低角度构造裂缝,由于其充填时期早,充填程度高,对油气成藏没有任何意义,为无效裂缝;燕山期形成的北西—南东向部分全充填高角度构造裂缝以及喜山期形成的北东—南西向部分全充填高角度构造裂缝,保留了部分未被充填的构造裂缝,可成为有利的油气储集空间,为有效的构造裂缝。

4 构造裂缝发育的主控因素分析

4.1 岩石类型对构造裂缝发育的控制作用

通过对平南潜山取不同类型碳酸盐岩岩石样品做静力学测试(表2),不同的岩石其强度变化较大,其中白云岩抗压强度最低,灰岩的抗压强度最高,灰质白云岩位于中间,从抗张强度的测定值来看,三种岩类的抗张强度均比抗压强度小10倍以上,所以张应力环境易破裂,碳酸盐岩中裂缝发育由弱到强的岩性顺序依次为灰质白云岩(岩性不纯的白云岩或灰岩)、灰岩、白云岩。另外,本文通过

表2 平南潜山岩石样品静力学参数测定结果表
Table 2 The determination results of static parameters for rock samples from the Pingnan buried hill

岩石类型	风干密度 (g/cm ³)	抗压强度/MPa	弹性模量 /10 ³ MPa	泊松比	抗张强度/MPa
灰岩	2.58	92.8	45.1	0.22	8.3
灰质白云岩	2.7	61.5	45.8	0.18	5.4
白云岩	2.67	48.9	16.2	0.12	5.1

注:表中数据同一岩性为多个数据点的平均值。

岩芯观察研究区下古生界不同类型岩石中构造裂缝线密度,结果发现构造裂缝发育次序为:细一中晶白云岩(15.6条/m)>泥—微晶白云岩(12.3条/m)、灰质白云岩(12.1条/m)>豹皮灰岩(10.1条/m)>块状灰岩(7.2条/m)>泥灰岩(4.1条/m)。

4.2 岩石层厚对构造裂缝发育的控制作用

在工程实践中,人们发现工程岩体的失稳破坏有相当一部分是沿着松软结构面破坏的,因此,结构面的存在不仅影响岩体的变形与强度性质,而且还

控制着岩体的变形与破坏机理,整体状岩体结构的强度最大,其次为层间结合较好的中厚层状结构,层间结合不良的薄层、中厚层互层结构强度最低^[25-26]。本次研究通过对山东淄博博山下古生界碳酸盐岩中构造裂缝发育情况进行野外观察,结果发现构造裂缝切割深度、延伸长度与岩石层厚具有很大的关系,碳酸盐岩单层厚度越薄,构造裂缝越发育,薄层与厚层互层结构中,薄层碳酸盐岩中构造裂缝最为发育,整体观察发现,碳酸盐岩岩石中构造裂缝切割深度大部分在2~6 m,延伸长度小于20 m(图7)。在野外观察的基础上,利用岩芯观察结果统计了岩石层厚与构造裂缝线密度之间的关系(图8),两者呈明显的正相关,随着层厚增大,构造裂缝线密度逐渐减小。另外,通过对平南潜山20余口井进行储层测井解释结果统计发现,大部分I、II类层优质储层主要分布在厚层碳酸盐岩所夹的薄层碳酸盐岩中,且通过对研究区下古生界碳酸盐岩内幕油藏进行解剖发现,内幕油藏主要呈薄层状分布(图9)。

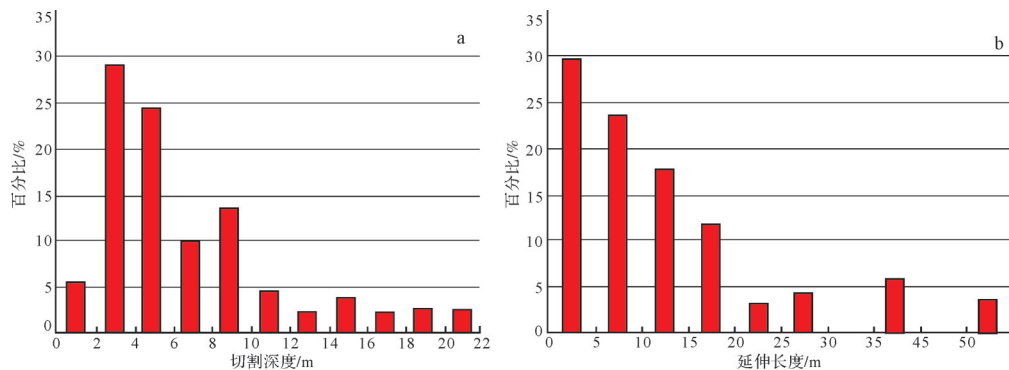


图7 博山野外构造裂缝切割深度(a)与延伸长度(b)百分比图

Fig.7 Percentage diagram of cutting depth and extension length for structural fractures in Boshan field

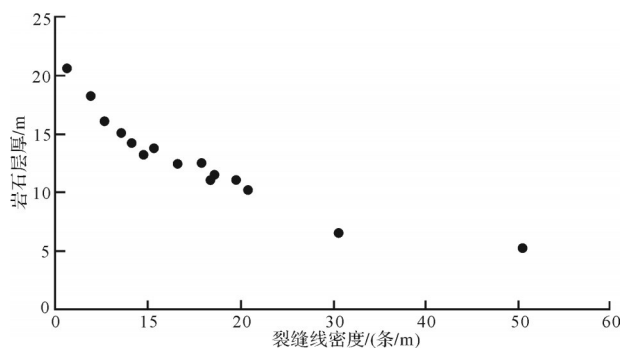


图8 室内岩芯观察统计的岩石层厚与裂缝线密度关系

Fig.8 The relationship between rock thickness and fracture line density in indoor core observation

4.3 断层发育对构造裂缝发育的控制作用

断层与构造裂缝的发育具有密切的关系。前人研究济阳坳陷义和庄地区和埕岛地区下古生界断层影响构造裂缝的范围为300 m左右,博山露头区断层影响构造裂缝为200 m左右^[1]。本次研究主要统计岩芯观察构造裂缝、以及滨古26和滨古斜15两口井的成像测井资料显示的构造裂缝数量,分析了距断层距离与构造裂缝发育程度的关系,两者具有很好的相关性,离断层距离越近,构造裂缝越发育,离断层400 m范围内,构造裂缝的分布与断层关系密切,远离处主要与区域构造应力场有关(图10)。另外对研究区碳酸盐岩日产液量与距断层距离进行统计发

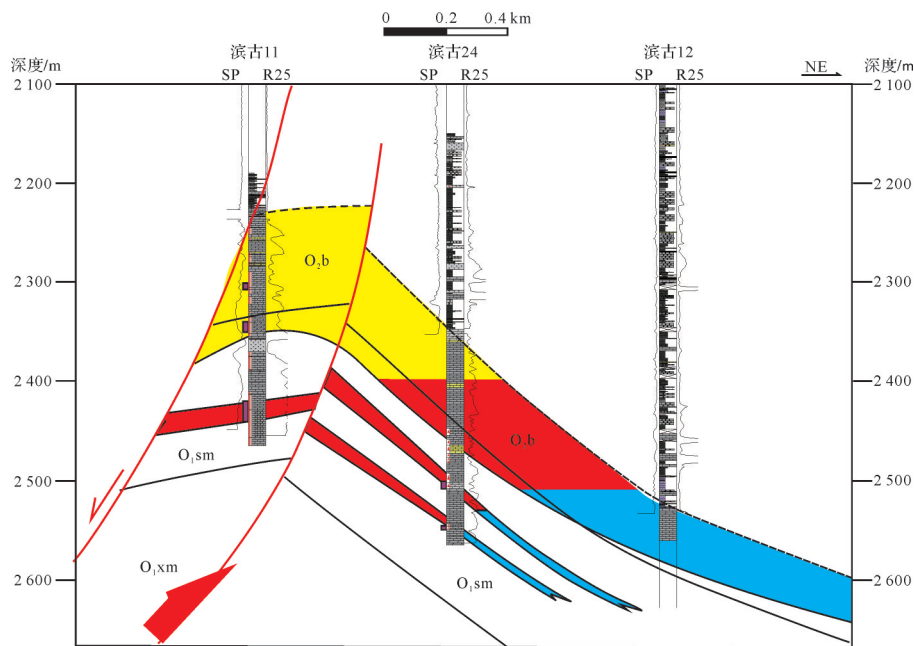


图9 平南地区潜山内幕层状油层分布

Fig.9 Distribution diagram of inner buried hill inner oil reservoirs in the Pingnan area

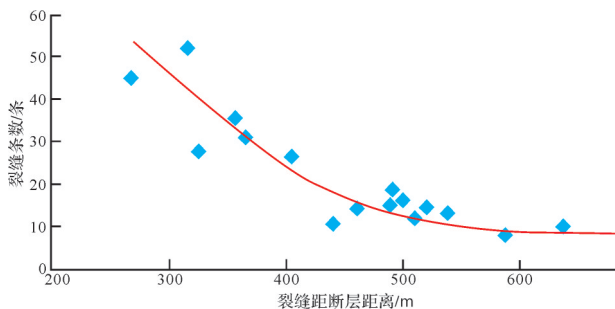


图10 距断层距离与裂缝发育程度关系

Fig.10 Relation between distance from fault and degree of fracture development

现,离断层越近,产液量越高,影响范围大约在500 m之内。以上分析充分说明了局部断层发育区是构造裂缝相对发育的区域。

5 结论与认识

有效的构造裂缝是优质储层形成的关键性因素,研究区发育三期构造裂缝:印支期形成的近东西向全充填低角度缝,燕山期形成的北西—南东向部分全充填高角度缝,喜山期形成的北东—南西向部分全充填高角度缝。第一种构造裂缝充填与第一期岩浆活动有关,充填程度高,对油气成储和成藏意义不大;后两种构造裂缝大规模充填时期与第二期热液流体活动有关,充填时期相对较晚,且保留了部分

未充填的部分,对晚期有机酸及油气的运移起到重要的沟通作用。

致谢 感谢审稿专家及沉积学报编辑部工作人员对本文提出的宝贵修改意见与建议。

参考文献(References)

- [1] 李丕龙,张善文,王永诗,等. 多样性潜山成因、成藏与勘探:以济阳拗陷为例[M]. 北京:石油工业出版社,2003:1-35. [Li Pilon, Zhang Shanwen, Wang Yongshi, et al. The cause of formation, accumulation and exploration of diversity buried-hill—for Jiyang Depression example [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 1-35.]
- [2] 赵贤正,王权,金凤鸣,等. 冀中拗陷隐蔽型潜山油气藏主控因素与勘探实践[J]. 石油学报,2012,33(增刊):71-79. [Zhao Xianzheng, Wang Quan, Jin Fengming, et al. Main controlling factors and exploration practice of subtle buried-hill hydrocarbon reservoir in Jizhong Depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(Suppl.): 71-79.]
- [3] 赵贤正,金凤鸣,崔周旗,等. 冀中拗陷隐蔽型潜山油藏类型与成藏模拟[J]. 石油勘探与开发,2012,39(2):137-143. [Zhao Xianzheng, Jin Fengming, Cui Zhouqi, et al. Types of subtle buried-hill oil reservoirs and their accumulation simulation in Jizhong Depression, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 137-143.]
- [4] 蒋有录,叶涛,张善文,等. 渤海湾盆地潜山油气富集特征与主控因素[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(3):20-29. [Jiang Youlu, Ye Tao, Zhang Shanwen, et al. Enrichment

- characteristics and main controlling factors of hydrocarbon in buried hill of Bohai Bay Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2015, 39(3): 20-29.]
- [5] 董月霞,赵宗举,曹中宏,等. 南堡凹陷奥陶系碳酸盐岩岩溶残丘圈闭勘探潜力及意义[J]. *石油学报*, 2015, 36(6): 653-663. [Dong Yuexia, Zhao Zongju, Cao Zhonghong, et al. Exploration potential and significance of Ordovician carbonate karst monadnock traps in Nanpu Sag [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(6): 653-663.]
- [6] 赵凯,蒋有录,刘华,等. 济阳拗陷孤岛与埕岛潜山油气差异富集原因分析[J]. *地质力学学报*, 2018, 24(2): 220-228. [Zhao Kai, Jiang Youlu, Liu Hua, et al. Analysis on the causes of different enrichment of hydrocarbon in Gudao and Chengdao buried-hills, Jiyang Depression [J]. *Journal of Geomechanics*, 2018, 24(2): 220-228.]
- [7] 王永诗,李继岩. 济阳拗陷平方王油田碳酸盐岩潜山内幕储层特征及其主控因素[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2017, 41(4): 27-35. [Wang Yongshi, Li Jiyang. Characteristics and main controlling factors of layered reservoir in buried hill of carbonate rock in Pingfangwang oilfield, Jiyang Depression [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2017, 41(4): 27-35.]
- [8] 邓世彪,关平,庞磊,等. 塔里木盆地柯坪地区肖尔布拉克组优质微生物碳酸盐岩储层成因[J]. *沉积学报*, 2018, 36(6): 1218-1232. [Deng Shibiao, Guan Ping, Pang Lei, et al. Genesis of excellent Xiaoerbulak microbial carbonate reservoir in Kalpin area of Tarim Basin, NW China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(6): 1218-1232.]
- [9] 姚清洲,孟祥霞,张虎权,等. 地震趋势异常识别技术及其在碳酸盐岩缝洞型储层预测中的应用:以塔里木盆地英买2井区为例[J]. *石油学报*, 2013, 34(1): 101-106. [Yao Qingzhou, Meng Xiangxia, Zhang Huquan, et al. Principles and application of a seismic trend anomaly diagnostic technique: A case study on carbonate fractured-cavity reservoirs in Yingmai 2 area, Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(1): 101-106.]
- [10] 卫平生,潘建国,张虎权,等. 石油地震储层研究及应用:以塔里木盆地塔中地区碳酸盐岩为例[J]. *石油学报*, 2013, 34(3): 496-501. [Wei Pingsheng, Pan Jianguo, Zhang Huquan, et al. Application and research of the petroleum seismic reservoir: A case study of carbonate reservoirs in the central Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(3): 496-501.]
- [11] 高金栋,周立发,冯乔,等. 储层构造裂缝识别及预测研究进展[J]. *地质科技情报*, 2018, 37(4): 158-166. [Gao Jindong, Zhou Lifa, Feng Qiao, et al. Progress in reservoir structural fracture characterization and prediction [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2018, 37(4): 158-166.]
- [12] Casini G, Hunt D W, Monsen E, et al. Fracture characterization and modeling from virtual outcrops [J]. *AAPG Bulletin*, 2016, 100(1): 41-61.
- [13] 李理,钟大赉. 渤海湾盆地济阳拗陷碎屑锆石裂变径迹年龄记录的构造抬升事件[J]. *岩石学报*, 2018, 34(2): 483-494. [Li Li, Zhong Dalai. Tectonic uplift recorded by detrital zircon fission track age in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(2): 483-494.]
- [14] 束宁凯,汪新文,王金铸,等. 义和庄地区潜山内幕构造演化特征及其控藏作用[J]. *油气地质与采收率*, 2017, 24(3): 25-29. [Shu Ningkai, Wang Xinwen, Wang Jinzhu, et al. Tectonic evolution characteristics of inner buried hills in Yihezhuang area and its controlling effect on the hydrocarbon accumulation [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2017, 24(3): 25-29.]
- [15] 李继岩,王永诗,刘传虎,等. 热液流体活动及其对碳酸盐岩储集层改造定量评价:以渤海湾盆地东营凹陷西部下古生界为例[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(3): 359-366. [Li Jiyang, Wang Yongshi, Liu Chuanhu, et al. Hydrothermal fluid activity and the quantitative evaluation of its impact on carbonate reservoirs: A case study of the Lower Paleozoic in the west of Dongying Sag, Bohai Bay Basin, East China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(3): 359-366.]
- [16] Qiu N S, Jiang G, Mei Q H, et al. The Paleozoic tectonothermal evolution of the Bachu Uplift of the Tarim Basin, NW China: Constraints from (U-Th)/He ages, apatite fission track and vitrinite reflectance data [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41(6): 551-563.
- [17] Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, et al. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U - Pb zircon geochronology [J]. *Chemical Geology*, 2004, 211(1/2): 47-69.
- [18] 郭佩,刘池洋,王建强,等. 碎屑锆石年代学在沉积物源研究中的应用及存在问题[J]. *沉积学报*, 2017, 35(1): 46-56. [Guo Pei, Liu Chiyang, Wang Jianqiang, et al. Considerations on the application of detrital-zircon geochronology to sedimentary provenance analysis [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(1): 46-56.]
- [19] 杨华,邓秀芹. 构造事件对鄂尔多斯盆地延长组深水砂岩沉积的影响[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(5): 513-520. [Yang Hua, Deng Xiuqin. Deposition of Yanchang Formation deep-water sandstone under the control of tectonic events, Ordos Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(5): 513-520.]
- [20] 许立权,刘翠,邓晋福,等. 内蒙古额仁陶勒盖银矿区火成岩岩石地球化学特征及锆石 SHRIMP U-Pb 同位素定年[J]. *岩石学报*, 2014, 30(11): 3203-3212. [Xu Liquan, Liu Cui, Deng Jinfu, et al. Geochemical characteristics and zircon U-Pb SHRIMP age of igneous rocks in Erentaolegai silver deposit, Inner Mongolia [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(11): 3203-3212.]
- [21] 王大锐,张映红. 渤海湾油气区火成岩外变质带储集层中碳酸盐胶结物成因研究及意义[J]. *石油勘探与开发*, 2001, 28(2): 40-42. [Wang Darui, Zhang Yinghong. A study on the ori-

- gin of the carbonate cements within reservoirs in the external metamorphic belt of the Bohai Bay oil-gas bearing region [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2001, 28 (2): 40-42.]
- [22] 黄思静. 碳酸盐岩的成岩作用[M]. 北京:地质出版社,2010. [Huang Sijing. Carbonate diagenesis[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010.]
- [23] 金强,毛晶晶,杜玉山,等. 渤海湾盆地富台油田碳酸盐岩潜山裂缝充填机制[J]. *石油勘探与开发*,2015,42(4):454-462. [Jin Qiang, Mao Jingjing, Du Yushan, et al. Fracture filling mechanisms in the carbonate buried-hill of Futai oilfield in Bohai Bay Basin, East China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(4): 454-462.]
- [24] 张云峰,王清晨. 济阳坳陷奥陶系碳酸盐岩及缝洞充填方解石C、O同位素特征及其意义[J]. *地质科学*,2007,42(3):570-578. [Zhang Yunfeng, Wang Qingchen. Characters and implications of C, O isotopes in the Ordovician carbonate rocks and calcite filled in porosities/fissures in the Jiyang Depression[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2007, 42(3): 570-578.]
- [25] 赵文韬,侯贵廷,张居增,等. 层厚与岩性控制裂缝发育的力学机理研究:以鄂尔多斯盆地延长组为例[J]. *北京大学学报(自然科学版)*,2015,51(6):1047-1058. [Zhao Wentao, Hou Guiting, Zhang Juzeng, et al. Study on the development law of structural fractures of Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2015, 51(6): 1047-1058.]
- [26] 孟庆峰,侯贵廷,潘文庆,等. 岩层厚度对碳酸盐岩构造裂缝面密度和分形分布的影响[J]. *高校地质学报*,2011,17(3):462-468. [Meng Qingfeng, Hou Guiting, Pan Wenqing, et al. Layer thickness controls on surface density and fractal dimension of structural fractures in carbonate strata [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2011, 17(3): 462-468.]

Filling Characteristics and Main Controlling Factors for the Development of Multi - Phase Structural Fractures: A case of the Pingnan buried hill from Jiyang Depression

LI JiYan

Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257000, China

Abstract: Structural fracture is one of the most important reservoir space types in carbonate reservoirs of the lower Paleozoic. In this paper, the development characteristics of structural fractures are analyzed, the development period and filling characteristics of structural fractures are clarified, and the main controlling factors of the development of structural fractures are defined by taking the Lower Paleozoic buried hills in Pingnan of Jiyang Depression as the research object, by means of variety of technical methods such as core observation and statistics, element geochemistry, mineralogy, core routine analysis, etc. The results show that there are three groups of tectonic fractures in the Lower Paleozoic carbonate rocks in the study area controlled by the tectonic stress field in different periods, and directions, properties, which have obvious differences in development and formation stages, fault strike, filling degree, and filling period. They are: early full-filling structural fractures in the east-west direction formed by compression in the nearly north-south direction of the Indosinian epoch, the northwest-southeast (NW-SE) direction late full filling structural fractures formed by north NNE-SSW direction tension in the Yanshanian period, and the NE-SW direction late partial full-filling structural fracture formed by NW-SE direction tension in the Himalayan period. The development degree of structural fracture is mainly controlled by three factors: 2 internal causes of lithology and thickness of carbonate rocks and 1 external cause: distance from fault.

Key words: Jiyang Depression; Pingnan buried hill; Lower Paleozoic; carbonate rock; structural fracture; development period and filling characteristics; main controlling factors