

·油气地质·

库车坳陷大北气田砂岩气层裂缝分布规律及其对产能的影响

王振宇¹, 陶夏妍¹, 范鹏¹, 张福祥², 牛新年²

(1.西南石油大学 资源与环境学院, 四川 成都 610500; 2.中国石油塔里木油田分公司, 新疆 库尔勒 841000)

摘要:在库车坳陷山前多期推覆叠瓦构造背景下,大北气田普遍发育裂缝。利用野外露头、岩心、成像测井和试井等资料,对大北气田巴什基奇克组砂岩气层裂缝特征、分布规律及其对产能的影响进行研究。研究区裂缝类型包括构造裂缝和非构造裂缝,其中构造裂缝占95%,以高角度单一裂缝和网状裂缝为主,低角度构造裂缝较少;近南北向裂缝最为发育,其次为近东西向,裂缝主体走向与现今主应力方向基本一致,总体具有密度大、张开度小、充填程度高等特征。垂向上,巴二段比巴三段裂缝更发育,储层渗透性能更好;平面上,裂缝主要分布于背斜翼部及断层附近等应力集中区,核部相对不发育。裂缝对单井产能的影响主要表现为对渗透率的改善,裂缝对渗透率的提升可达2~4个数量级,其中裂缝面缝率和裂缝密度与产能的相关性较好,裂缝张开度为产能的必要非充分条件。

关键词:裂缝特征 裂缝分布规律 构造裂缝 主应力方向 产能 大北气田 库车坳陷

中图分类号: TE112.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2014)02-0051-06

在碎屑岩中,对裂缝可作为油气储集空间和沟通孔隙“桥梁”的认识已达成广泛共识^[1-4],尤其在特低孔特低渗透砂岩储层中,裂缝更是决定产能的关键因素。在现今对天然气资源的迫切需求下,向特低孔特低渗透裂缝型砂岩气藏进军已迫在眉睫^[5]。近年在库车坳陷油气勘探中,随着勘探程度的提高,相继发现大北、克拉、依南、吐孜和迪那等一系列气田,已成为西气东输的重要气源地。

前人从野外露头、岩心、三维高分辨率地震资料、常规测井和成像测井等方面入手,运用分形学和数值模拟等方法对裂缝进行了定性一半定量研究^[6-10]。但野外露头裂缝参数偏大,而岩心取样少且在裂缝发育段易破裂,高分辨率地震资料在沙漠地区不易采集,常规和成像测井仅用数学计算手段等,致使裂缝真实性有待考证,这一系列因素制约着对裂缝的精细分析。笔者通过分析大北气田主力气层巴什基奇克组已有的露头、岩心、成像测井及试井等资料,运用岩心和成像解释图像对比校正等手段,对研究区裂缝类型、参数定量描述、分布规律以及裂缝对产能的影响等方面进行研究,以期对库车坳陷后期裂缝研究提供参考,并为气藏开发提

供指导。

1 区域地质概况

大北气田位于库车坳陷克拉苏构造带西缘,受北部造山带影响,发育克拉苏与拜城北2条主断裂,断层面上陡下缓,并向下汇拢成1条主断裂^[11]。2条主断裂所夹持的楔形体内派生一系列次级逆冲断层,形成了由北向南的逆冲叠瓦构造(图1)。研究区自下而上钻遇亚格列木组、舒善河组、巴西盖组、巴什基奇克组及库姆格列木群。巴什基奇克组沉积时期库车坳陷紧靠南天山,地貌北高南低,物源充足,巴什基奇克组可细分为3个亚段^[12]。巴一段为高位体系域辫状河冲积平原沉积,以褐色中细砂岩为主,泥岩夹层薄而少;巴二段为辫状河三角洲沉积,以褐色中细砂岩夹薄层泥岩为主,有相对较纯的泥岩薄层出现;巴三段为冲积扇—扇三角洲沉积,岩性变粗,出现砂砾岩,泥岩夹层变厚。受剥蚀作用影响,大北气田整体缺失巴一段。研究区巴什基奇克组岩心孔隙度为0.68%~11.21%,渗透率为 $0.0002 \times 10^{-3} \sim 3.46 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;测井解释孔隙度主要

收稿日期:2013-11-21。

作者简介:王振宇,男,副教授,博士,从事沉积储层研究。联系电话:13909073811, E-mail: wangzhenyu1964@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“塔里木盆地台盆区海相碳酸盐岩油气成藏条件有利区带评价及勘探目标优选研究”(2008ZX05004-004),四川省重点学科建设项目(SZD0414)。

为1.00%~15.62%，渗透率一般小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，属于低孔低渗透—特低孔特低渗透裂缝型砂岩气藏。

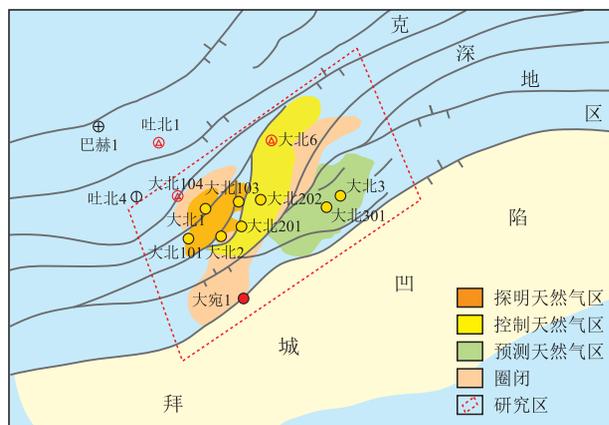


图1 大北气田区域构造

2 裂缝定量描述

裂缝定量描述参数包括裂缝的类型、级别、组合关系、产状、密度、延伸长度、张开度、面缝率和缝充填率等，其中前7个参数属于常用裂缝描述参数，后2个参数对后期开发具有重要意义。

按与构造作用的关系可以将裂缝分为构造裂缝和非构造裂缝，大北气田巴什基奇克组构造裂缝比例约占95%，广泛分布于各类岩性中，裂缝常成组出现，缝面多光滑，少见后期局部扩溶特征，裂缝充填程度较高，多被硅质、钙质、泥质和膏质充填，少量被沥青和铁质充填。研究区非构造裂缝较少，对地层油气渗流贡献小。

2.1 野外露头分析

野外露头资料是裂缝研究的基础，其研究技术简单，能形象直观地反映裂缝宏观参数。研究区露头区裂缝走向以北西—南东向最发育，倾向以北东向为主，少量北西向，倾角为 $5.8^\circ \sim 85^\circ$ ，组合形态以单一裂缝和网状裂缝为主，见少量X型剪切裂缝和Y型裂缝，裂缝张开度为0.9~22.3 mm，裂缝延伸长度为0.001~17.8 m，裂缝密度为0.4~7.3条/m，多为3.0~5.0条/m，说明大北气田受多期推覆构造作用影响，裂缝十分发育，裂缝参数变化大，组合形态多样。

2.2 岩心分析

研究区岩心裂缝主要发育在棕褐色细—中砂岩中，泥质粉砂岩、泥岩和含砾砂岩中少量分布，其中大缝约占4%，中缝占19%，小缝占77%，组合形态以单一裂缝、网状裂缝为主，其次为X型剪切裂缝，

少见Y型裂缝。岩心上可见3期裂缝，第3期斜交裂缝切割第2期低角度裂缝和第1期高角度裂缝，第2期低角度裂缝切割第1期高角度裂缝，缝面多平直。通过岩心地磁定向分析统计，裂缝主体走向为近南北向；倾向以北东向为主，少量北西向，与野外露头裂缝方位统计结果一致；裂缝多为高角度裂缝，次为近垂直裂缝，倾角为 $60^\circ \sim 85^\circ$ ，倾角低于 30° 的裂缝少见。岩心裂缝密度主要为1~4.1条/m，平均为2.1条/m，裂缝张开度为0.1~1.1~3 mm及大于3 mm所占比例分别为74.6%，21.3%和4.1%，面缝率平均值为0.58%，裂缝充填率达74.6%，说明大北气田单裂缝参数虽小，但裂缝发育密度大，且多为高角度裂缝，是库车坳陷超深超压条件下仍能形成大型气田的决定因素。

2.3 成像测井分析

对于取心井段，采用网格法对岩心的裂缝参数进行定量统计，可获得相关裂缝参数，但由于研究区新钻井取心越来越少，仅对岩心裂缝参数进行定量统计显然无法满足裂缝研究的需要。因此，引入了FMI/EMI成像测井统计方法，该方法以网格法为基础，在钻井信息和参数信息准确获取的前提下，对取心井段成像裂缝参数进行定量统计，并将统计结果与岩心定量统计结果对比，可得出一个经验差值，然后将其应用于获取未取心段裂缝参数。

通过统计发现，FMI识别0.1 mm以上裂缝的概率可达90%。据研究区10口井成像测井裂缝统计，裂缝主要发育在巴二段和巴三段，共统计裂缝1710条，其中小缝占绝对优势，共计1475条，占86.3%；中缝约占10.9%；大缝所占比例最低，仅为2.8%。裂缝多成组出现，具单一倾向，局部受多期应力作用，裂缝交织成网状。裂缝倾向以北东、南西向为主，北西向次之，南东向裂缝最少；裂缝倾角较大，多为 $50^\circ \sim 80^\circ$ ，平均为 61° ；裂缝密度受断层和褶皱控制特征显著，各单井裂缝密度最小为0.19条/m，最大为1.97条/m，主要为0.50~1.20条/m；裂缝面缝率最小为0.12%，最大为1.72%，主要为0.20%~0.65%，成像测井统计结果比野外露头裂缝参数小，与岩心裂缝统计差值在合理误差范围内。

3 裂缝分布规律

3.1 垂向分布规律

大北气田巴什基奇克组裂缝具有分布范围广、参数变化大的特征。垂向上，裂缝在各亚段内整体呈均匀分布，局部具有差异性。其中巴二段裂缝综

合参数优于巴三段,巴二段裂缝密度约为巴三段的1.3~2倍,说明在相同构造应力作用下,辫状河三角洲相沉积的砂体比冲积扇一扇三角洲相沉积的砂体更易产生裂缝,可能与2类相带的泥质含量和结构成熟度有较大关系,泥岩层和含砂泥岩层中裂缝相对不发育。

裂缝倾向、倾角分布特征从上至下由多变性逐渐过渡为单一性,以大北202井为例(图2),巴二段

上部裂缝倾向具多方位性,倾角呈现高、低角度组合特征,表明上部裂缝更易组合成网状;巴二段下部和巴三段上部裂缝倾向具有一个主体优势方位和一个相反的次级方位,裂缝倾角均较大,裂缝组合成Y和X型剪切缝;巴三段下部裂缝倾向单一,裂缝倾角为64°~88°,裂缝多为单一裂缝,总体表现为裂缝密度向下逐渐变小、单条裂缝张开度和面缝率向下逐渐变大的特征。

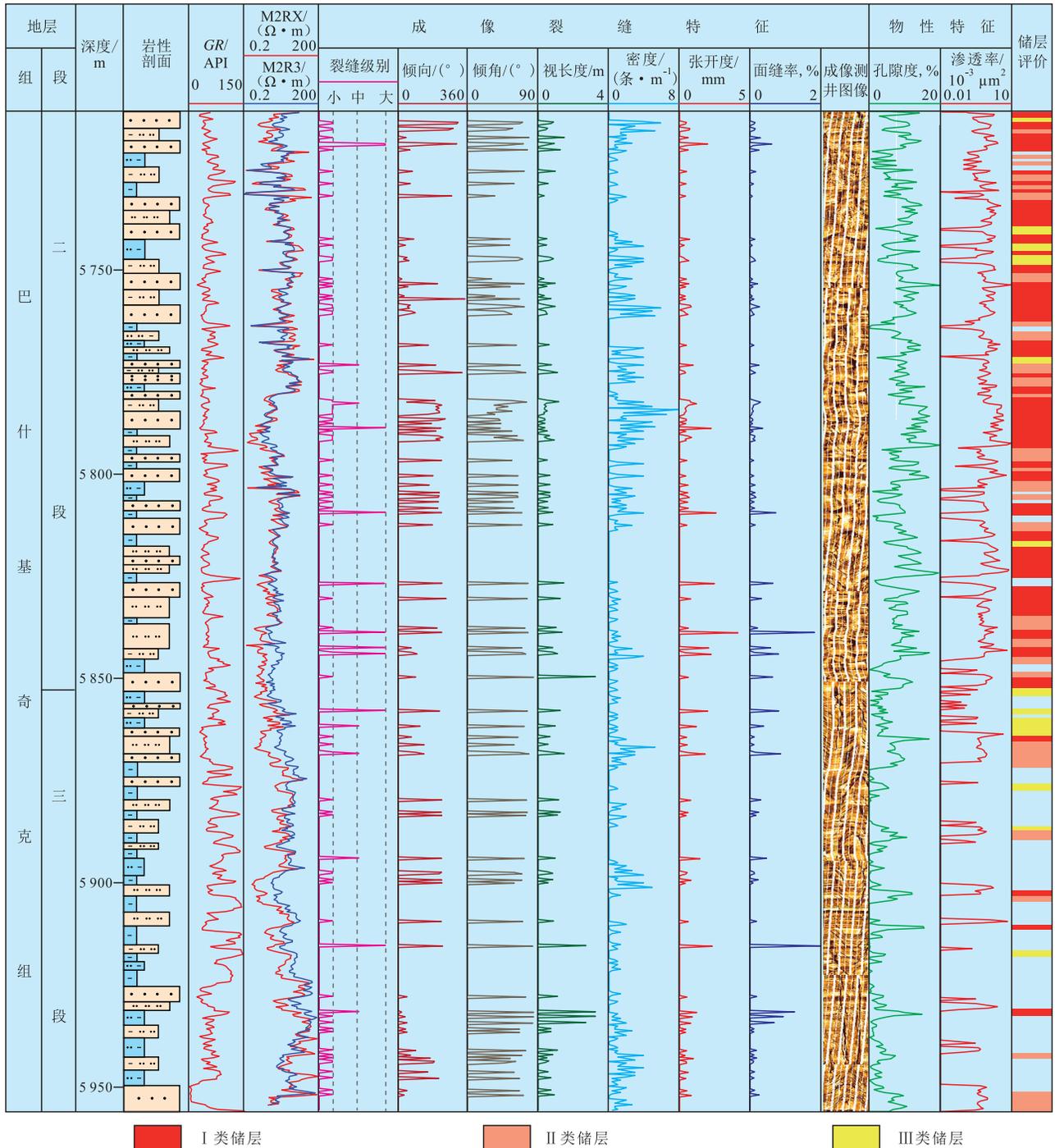


图2 大北202井巴什基奇组裂缝综合评价

3.2 平面分布规律

以古应力场为基础,结合10口井裂缝数据和构

造曲率特征,对大北气田裂缝平面分布规律进行了分析。平面上裂缝参数由北向南逐渐减小,受小型

构造影响可局部增大。裂缝主要分布于背斜翼部和断层附近等古应力集中区,如位于背斜翼部的大北201井和断层附近的大北103、大北104井裂缝密度均较高;逆冲挤压背斜多与断层伴生,核部形态宽缓,构造曲率低,裂缝相对不发育,局部区域小断层发育可使核部裂缝密度增大,如大北202井(图

3)。虽然裂缝主要发育在背斜翼部和断层附近,核部相对不发育,但核部裂缝多以张性裂缝为主,渗透性较好;翼部裂缝多为剪切裂缝和网状裂缝,裂缝张开度小,渗透性较差;断层上盘裂缝发育且多为高角度张性裂缝,是渗透性最好的部位。因此,选取井位时应综合考虑构造部位和裂缝分布规律。

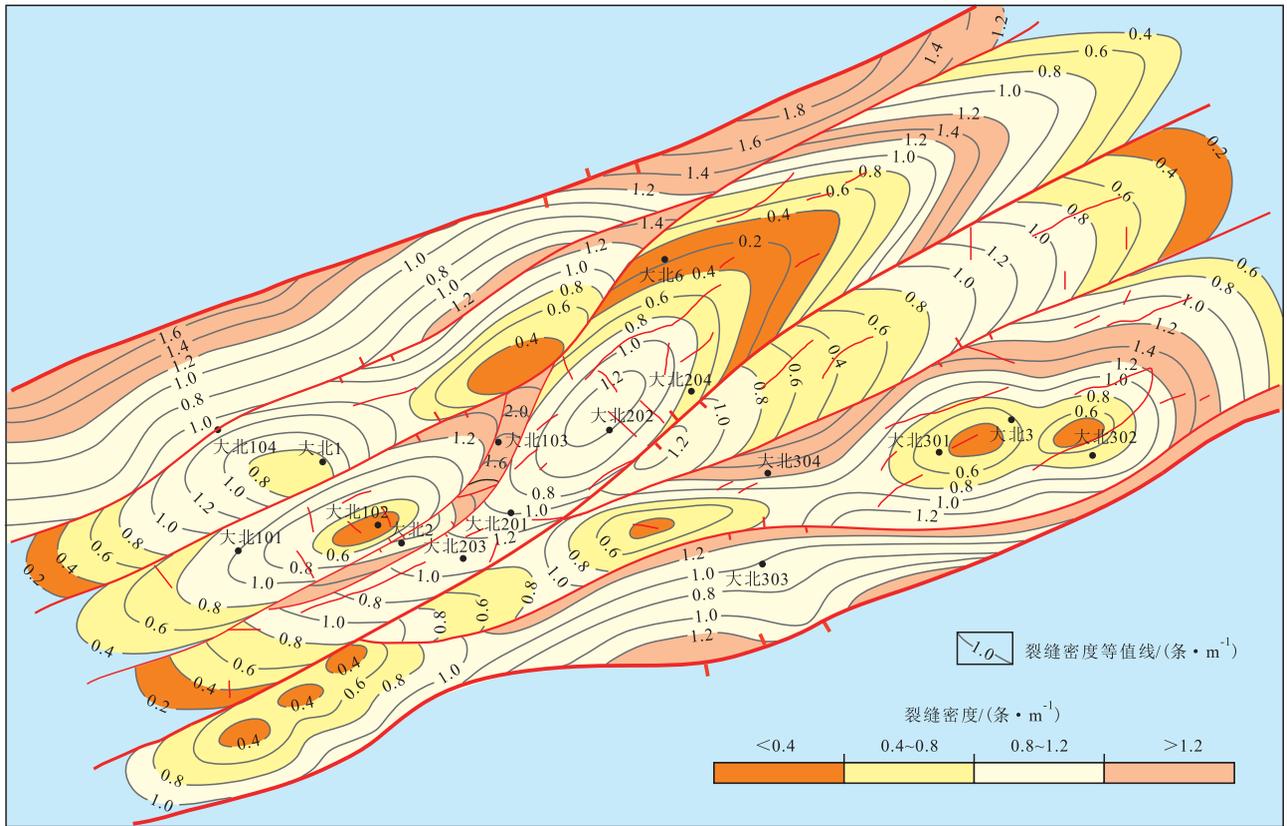


图3 大北气田巴什基奇克组裂缝平面分布

4 裂缝对产能的影响

库车坳陷大北气田作为埋深超过5 000 m的异常高压气藏^[13],在低孔低渗透—特低孔特低渗透的条件下,却能获得高产气流,其决定因素是研究区普遍发育的裂缝网络。裂缝对产能的影响主要体现在对渗透率的改善方面,通常在渗透率研究过程中会接触到试井渗透率、岩心测试渗透率以及测井渗透率,一般试井渗透率比岩心测试渗透率及测井渗透率高数倍甚至1~2个数量级^[14],说明岩心和测井渗透率受采样和井位影响较大,而试井渗透率反映测试动态半径区域内的总体渗流特征,是地层的真实渗透率,裂缝网络的建设作用显著。通过对小岩塞和全直径岩心进行物性测试,并做孔渗交会分析,结果显示无缝样品孔隙度与渗透率具线性相关性,随孔隙度增加岩心渗透率也略有增大;当岩心

裂缝发育时,孔隙度变化不明显,而渗透率成倍增长,裂缝张开度越大、延伸越长,渗透率甚至可增大2~4个数量级(图4)。

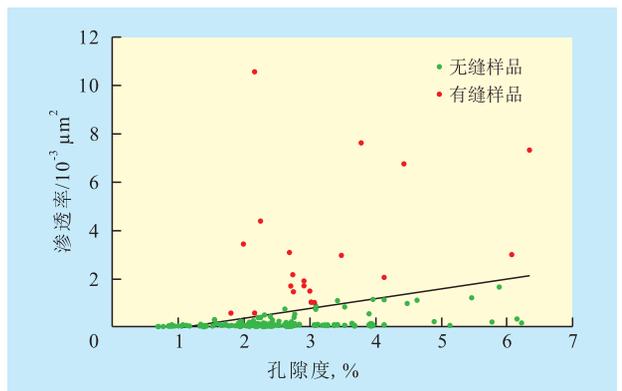


图4 大北气田孔隙度与渗透率相关性分析

库车坳陷储层总体上具有物性差、非均质性强等特征,裂缝发育特征和发育规模成为控制气井产能的关键。研究发现,地下宏观裂缝在区域古应力

大于岩石剪切破裂压力时产生,是区域古应力的反应,也是裂缝发育型砂岩气藏渗流的导向因子,而区域普遍发育的微裂缝能提升显著气藏的渗流能力。

分析大北气田各单井测试层段裂缝面缝率、密度、张开度和裂缝视长度与米采气系数的关系(图5)发现,裂缝面缝率与米采气系数相关性最好,面缝率越大,单井米采气系数越高,因为面缝率是裂缝密度、张开度和倾角的函数,属于裂缝综合指标;

裂缝密度与米采气系数相关性次之,当其他条件不变时,裂缝密度越大,单位体积内油气渗流通道越多,渗流能力越强,二者能较好反映裂缝对产能的影响;裂缝张开度与米采气系数相关性中等,产能高的井裂缝张开度大,但裂缝张开度大,产能却不一定高,换言之,裂缝张开度为产能的必要非充分条件;裂缝视长度(单位面积井壁上裂缝长度之和)与米采气系数相关性最差,受成像测井和岩心采样井筒直径影响较大。

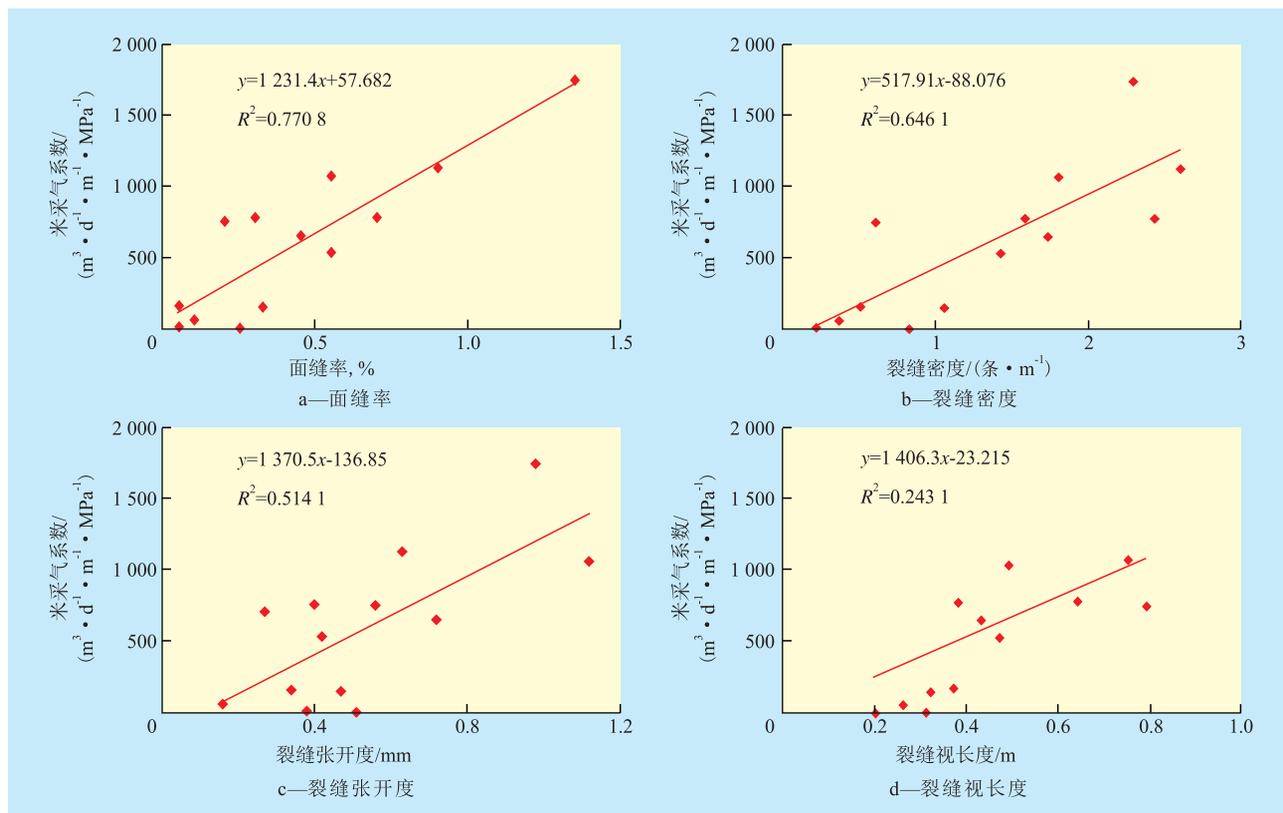


图5 大北气田裂缝参数与产能相关性分析

裂缝张开度是影响产能的重要因素,与构造应力场、裂缝产状、埋深及充填程度有关。在埋深变化较小的情况下,构造高部位、断背斜附近和逆断层上盘裂缝张开度大,张性裂缝比例高,反映库车坳陷山前经多期逆冲构造活动,破裂带附近剪切应力释放,断层上盘和背斜核部拉张应力增强,裂缝张开度变大。

裂缝张开度还受裂缝产状的影响,当裂缝走向与现今主应力方向一致或夹角较小时,裂缝张开度大,裂缝渗透率高。根据成像测井井壁应力释放缝统计和水力压裂分析,大北气田现今主应力方向为近南北向,裂缝走向与主应力方向一致的井米采气系数均较高;裂缝倾角越大,裂缝张开度也相对越大^[15]。如大北202井巴二段平均裂缝倾角为 60° ,平

均裂缝张开度为 0.72 mm ;巴三段平均裂缝倾角为 71° ,平均裂缝张开度为 1.04 mm ,从岩性、岩相分析巴二段发育裂缝的各项参数应优于巴三段,且巴三段埋深更大,静岩围压条件下裂缝张开度应更小,但实际巴三段裂缝张开度更大,说明裂缝倾角对裂缝张开度的影响比地层静压和岩性、岩相的影响更显著。在相同静岩围压作用下,发育高角度裂缝的地层,基质主要承受上覆静压,裂缝面两侧压力小,缝面不易闭合,张开度大;对低角度裂缝而言,静岩围压经基质传递,缝壁两侧压力仍较高,裂缝易减小甚至闭合,渗透率降低。此外裂缝充填率也会影响裂缝张开度,但在后期开发过程中采用合理的酸压改造措施可使早期充填裂缝和闭合裂缝重新打开,提高单井产能。

5 结论

库车坳陷山前大北气田巴什基奇克组裂缝普遍发育,可分为构造裂缝和非构造裂缝,其中构造裂缝以高角度单一裂缝和网状裂缝为主,低角度裂缝较少;近南北走向裂缝最发育,其次为近东西向。总体上,裂缝具有密度大、张开度小、充填率高等特征。垂向上,巴二段比巴三段裂缝更发育、倾向方位变化亦更多,裂缝更易组合成网状,储层渗透性更好;平面上,裂缝主要分布于背斜翼部和断层附近等应力集中区,背斜核部宽缓,构造曲率小,裂缝相对不发育,但多为张性裂缝。

裂缝对单井产能的影响主要表现为对渗透率的改善,裂缝对渗透率的提升可达2~4个数量级,其中裂缝面缝率和裂缝密度与产能的相关性最好,裂缝张开度为产能的必要非充分条件,在后期开发过程中通过酸压改造重新开启充填、闭合裂缝,可提高井网内单井产能。

参考文献:

- [1] 曾联波,高春宇,漆家福,等.鄂尔多斯盆地陇东地区特低渗透砂岩储层裂缝分布规律及其渗流作用[J].中国科学:D辑 地球科学,2008,38(增刊1):41-47.
- [2] 张奎华.密度投影技术在页岩裂缝储层预测中的应用——以渤南洼陷罗家地区沙三段下亚段为例[J].油气地质与采收率,2013,20(3):46-48.
- [3] 张博,袁文芳,曹少芳,等.库车坳陷大北气田砂岩储层裂缝主控因素的模糊评判[J].天然气地球科学,2011,22(2):250-

- 253.
- [4] 范存辉,郭彤楼,王本强,等.四川盆地元坝中部地区须家河组储层裂缝发育特征及控制因素[J].油气地质与采收率,2013,20(5):52-54.
- [5] 张惠良,张荣虎,杨海军,等.构造裂缝发育型砂岩储层定量评价方法及应用——以库车前陆盆地白垩系为例[J].岩石学报,2012,28(3):827-835.
- [6] 韩波,贾红义,李国栋,等.基于三维构造恢复技术的特殊岩性体裂缝预测方法——以惠民凹陷商541井区为例[J].油气地质与采收率,2013,20(6):51-53,60.
- [7] 罗群.致密砂岩裂缝型油藏的岩心观察描述——以文明寨致密砂岩为例[J].新疆石油地质,2010,31(3):229-231.
- [8] 谢风猛.东营凹陷平方王—平南潜山油藏裂缝性储层描述[J].油气地质与采收率,2010,17(3):42-44.
- [9] 李军,张超谟,肖承文,等.库车地区砂岩裂缝测井定量评价方法及应用[J].天然气工业,2008,28(10):25-27.
- [10] 张博,李江海,吴世萍,等.大北气田储层裂缝定量描述[J].天然气地球科学,2010,21(1):42-46.
- [11] 杜金虎,王招明,胡素云,等.库车前陆冲断带深层大气区形成条件与地质特征[J].石油勘探与开发,2012,39(4):385-393.
- [12] 刘春,张惠良,韩波,等.库车坳陷大北气田深部碎屑岩储层特征及控制因素[J].天然气地球科学,2009,20(4):504-512.
- [13] 王波,张荣虎,任康绪,等.库车坳陷大北—克拉苏深层构造带有效储层埋深下限预测[J].石油学报,2011,32(2):212-217.
- [14] 张福祥,王新海,李元斌,等.库车山前裂缝性砂岩气层裂缝对地层渗透率的贡献率[J].石油天然气学报,2011,33(6):149-152.
- [15] Jon E Olson, Stephen E Laubach, Robert H Lander. Natural fracture characterization in tight gas sandstones: Integrating mechanics and diagenesis [J]. AAPG Bulletin, 2009, 93 (11) : 1 535-1 549.

编辑 经雅丽

欢迎投稿 欢迎订阅