

## 普光气田碳酸盐岩储层裂缝的成因及其控制因素

何胡军<sup>1,2</sup>, 曾大乾<sup>2</sup>, 毕建霞<sup>2</sup>, 王秋语<sup>1</sup>

(1 中国石油冀东油田分公司; 2 中国石化中原油田分公司)

**摘要** 普光气田为一边水、高含硫、多裂缝的碳酸盐岩气藏。为防止边水通过裂缝网络进入储层,造成水淹,对裂缝进行了成因机制和控制因素的系统研究。普光气田长兴组和飞仙关组碳酸盐岩储层自沉积以来主要经历了三个不同力源方向的构造挤压运动,形成了一系列与地层变形和断层相关的剪切缝和扩张缝。认为裂缝的发育程度主要受控于构造运动,地层变形越强,裂缝越发育;与断层相关的裂缝系统主要发育在距断层 1200 m 的范围内,离断层越近,裂缝越发育。裂缝发育程度还受岩性、岩层厚度、岩石结构组分、储集物性等因素的综合影响。岩性不同,裂缝发育程度不同;裂缝发育密度随岩层厚度、粒屑含量的增加而减小,随填隙物、基质含量的增加而增大。裂缝主要发育在孔隙度较差的储层中,储层孔隙度较好时,裂缝相对不发育。

**关键词** 碳酸盐岩储层; 储层裂缝; 裂缝成因; 控制因素; 普光气田

**中图分类号**: TE122.2<sup>3</sup>

**文献标识码**: A

四川盆地普光气田为一边水、高含硫的碳酸盐岩气藏,储层内孔隙发育,局部发育裂缝。气田自2009年10月正式投产以来,截至2013年5月,离边水较近的普光105-1H井、普光103-1井和普光105-2井已见水,液气比达1.5 m<sup>3</sup>:10 000 m<sup>3</sup>以上,其中普光105-1H井日产水91.4 m<sup>3</sup>。关于出水的原因,初步认为是裂缝沟通了水层,造成水体锥进。目前,对于普光气田裂缝的研究工作主要基于常规的测井法识别裂缝<sup>[1-4]</sup>。关于裂缝的控制因素,唐永等<sup>[5]</sup>利用岩心裂缝资料对裂缝发育密度与褶皱、沉积相、孔隙流体之间的关系进行了定性探讨;关于裂缝的成因,唐海等<sup>[6]</sup>主要从裂缝形成与褶皱和断层之间的关系进行了讨论;但前人均未从构造演化的角度对裂缝的成因进行过研究,而众所周知,裂缝的发育与构造演化密不可分。

近年来,一些研究者主要是采用地质力学法对裂缝成因和控制因素进行系统研究<sup>[7-9]</sup>,这也是进行裂缝预测的基础和关键。本文以普光气田4口取心井(普光102-1井、普光104-1井、普光302-1井和普光

304-1侧前井)的1515块岩心薄片和19口成像测井等资料为基础,从构造演化的角度出发,对普光气田上二叠统长兴组和下三叠统飞仙关组碳酸盐岩产层的裂缝成因及其控制因素进行研究,同时也为采用地质力学方法预测裂缝奠定基础。

### 1 地质背景及构造特征

普光气田位于四川盆地东北部宣汉—达县断褶带上(图1),该区中生代—新生代经历了长期的、性质多变的构造演化,表现为十分复杂的构造格局,燕山晚期形成大量的北东向构造,喜马拉雅期被北西向构造改造<sup>[10-14]</sup>。普光构造为一西南高、东北低的大型长轴断背斜型构造。平面上,普光构造整体表现为南宽北窄、西南高东北低、西翼陡东翼缓、与逆冲断层有关的北东走向的断背斜特征,各层系构造继承性发育,构造高点基本重合。普光构造发育北东向和北西向两组逆冲断裂体系、4条断层(图1),形成时间为燕山晚期和喜马拉雅期,断层落实程度高。

收稿日期: 2013-10-17; 改回日期: 2014-03-27

何胡军: 1976年生,高级工程师。2011年6月毕业于成都理工大学,获博士学位。现主要从事油气田开发地质研究工作。通讯地址: 063004 河北省唐山市路北区新华西道51号甲区中国石油冀东油田分公司第一科研楼; E-mail: he\_along@qq.com

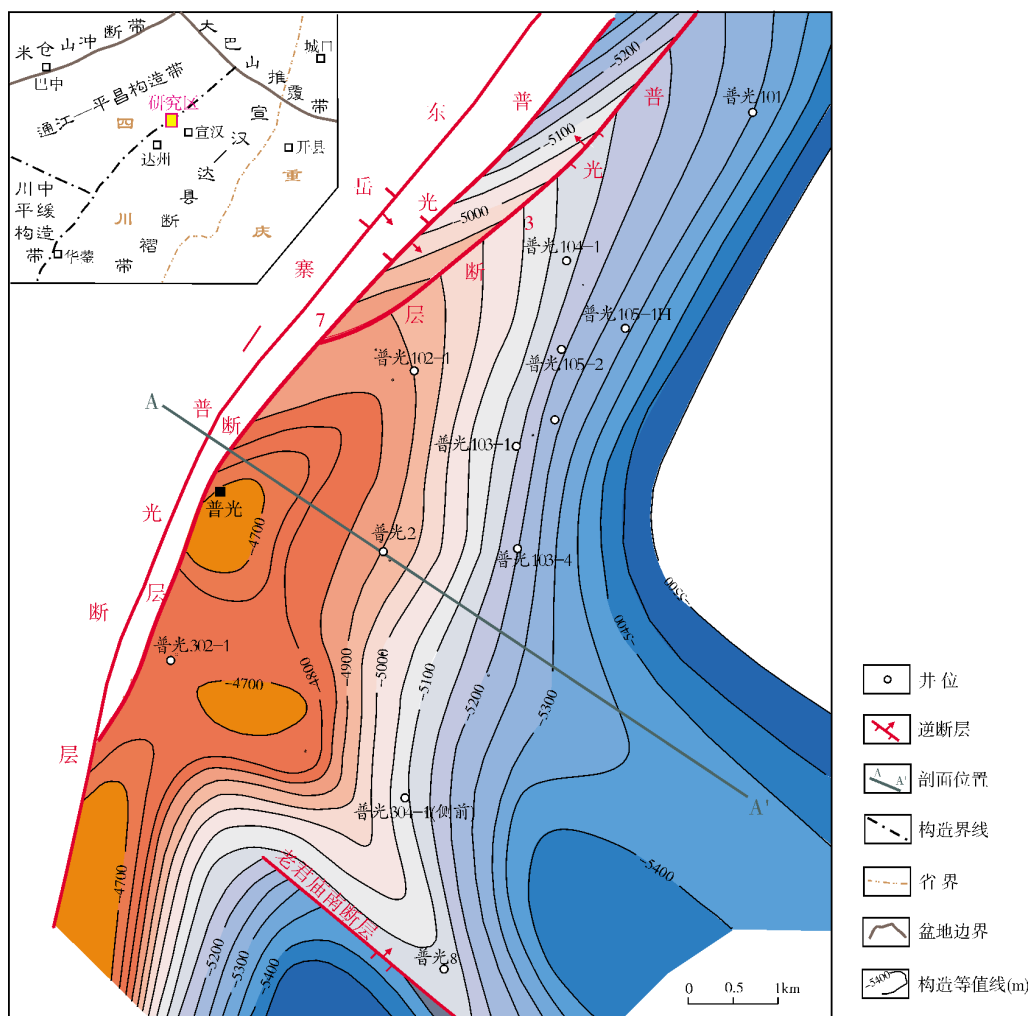


图1 普光气田飞仙关组——二段底面构造图

普光气田主产层为上二叠统长兴组和下三叠统飞仙关组,其中长兴组的岩性为生物灰岩和溶孔白云岩,飞仙关组为鲕粒白云岩与灰岩。自长兴组和飞仙关组沉积以来,普光气田经历了印支、燕山和喜马拉雅三大复杂构造运动<sup>[15-19]</sup>(图2)。

燕山末期以前 构造活动弱,主要表现为整体抬升(图2a)。

燕山末期 由于江南雪峰山的隆起造山活动剧烈,在宣汉—达州地区形成了由SE向NW的挤压应力,在普光褶皱隆起部位的挤压前缘,东岳寨—普光断层和普光7断层发育(图1,图2b)。

喜马拉雅早期 由于龙门山造山活动剧烈,宣汉—达州地区构造在NW向SE的挤压应力作用下,次级的普光3断层发育(图1),褶皱进一步加强,隆起幅度增大。

喜马拉雅末期 南大巴山造山活动加强,宣汉—达州地区在NE向SW的挤压应力作用下,普光构造的西南形成NW走向的老君庙南断层,NE向构造被NW向构造改造,局部形成NW向褶皱(图2c)。

## 2 礁滩相储层裂缝成因

### 2.1 裂缝特征

对普光气田4口取心井中长兴组和飞仙关组储层的147条裂缝进行了统计。结果表明,这些裂缝具有以下特征:

(1)以低角度斜交缝( $5^{\circ}\sim 45^{\circ}$ )为主(图3),水平缝( $0^{\circ}\sim 5^{\circ}$ )和垂直缝( $85^{\circ}\sim 90^{\circ}$ )不发育,其中低角度斜交缝占51.7%,高角度斜交缝( $45^{\circ}\sim 85^{\circ}$ )占31.3%。

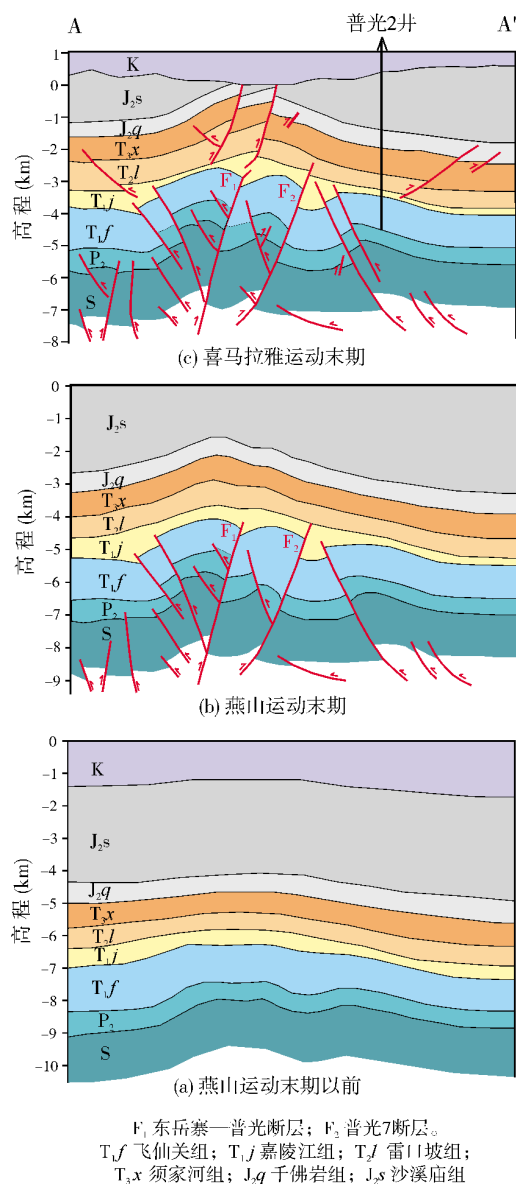


图2 四川盆地东部宣汉—达州地区构造演化剖面图

A—A'剖面位置见图1

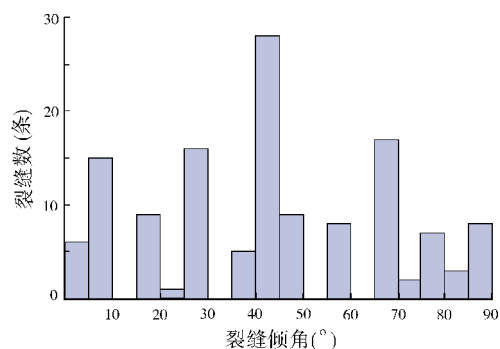


图3 普光气田岩心裂缝倾角统计直方图

(2) 裂缝有效程度高,以未充填缝为主(占 51.1%),其次为方解石半充填缝和碳质沥青充填缝,方解石全充填缝最少(图4)。未充填缝常发育擦痕和阶步。

(3) 以近东西走向的裂缝为主。

(4) 裂缝宽度以小于 1 mm 的为主。

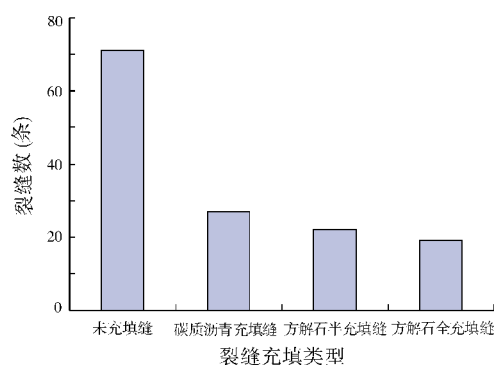


图4 普光气田裂缝充填类型统计直方图

## 2.2 裂缝成因

对岩心裂缝的观察以及对构造演化史的研究表明,普光气田在漫长的地质历史时期主要形成了与褶皱和断层相关的两类裂缝系统,其成因分析如下。

### 2.2.1 与褶皱相关的裂缝系统成因

普光的NE向褶皱构造主要形成于燕山晚期,至喜马拉雅早期进一步加强,促进了构造内的裂缝进一步发育。

燕山运动晚期的初始阶段,在来自SE方向雪峰山的挤压应力作用下,近水平产状岩层受到与岩层面平行的侧向水平挤压应力作用,当压力强度达到能使岩层发生破裂而又未弯曲时,就形成了一组产状直立的平面“X”共轭剪切裂缝和扩张缝(图5a)。平面“X”共轭剪切裂缝又称为变形前“X”共轭剪切裂缝,该类裂缝走向与最大主应力之间呈内摩擦角相交,其产状随岩层的弯曲而变缓;变形前扩张缝的走向平行于最大主应力,呈NW—SE向,产状直立,呈锯齿状延伸。随着SE向挤压应力的加强,地层弯曲变形,形成NNE走向的褶皱,平面“X”剪切裂缝进一步发育;同时,由于局部应力场发生变化,形成剖面“X”共轭剪切裂缝(图5b),其轴向与褶皱轴向一致,走向近EW向,倾角较平缓。褶皱形成过程中,褶皱两翼会产生层间滑动,诱导产生局部剪应力,形成层间剪切裂缝,走向平行褶皱走向,裂缝倾角较缓(图5c)。

喜马拉雅早期,由于龙门山造山活动,力源来自 NW 向。在 NW 向挤压应力作用下,与褶皱相关的裂缝系统进一步发育,裂缝走向以近 EW 向为主(图 5d)。

喜马拉雅晚期,由于南大巴山活动的加强,其力源主要来自 NE 向。在 NE 向的挤压应力下,早期形成的 NE 向构造被 NW 向的应力所改造,在普光 8 井附近形成 NW 向的褶皱,因此与褶皱相关的裂缝系统主要发育在普光 8 井附近,裂缝走向以近 SN 向为主(图 5e),它们与早期裂缝形成了叠加。

### 2.2.2 与断层相关的裂缝系统成因

燕山晚期,东岳寨—普光断层开始断裂,与断层相关的裂缝(包括断层派生的和与断层伴生的裂缝系统)主要沿东岳寨—普光断层和普光 7 断层发育

(图 1,图 5c)。形成与断层相伴生的裂缝系统与形成东岳寨—普光断层和普光 7 断层的构造应力场是一致的,它们主要来自 SE 方向雪峰山的挤压应力。裂缝与断层走向存在两种关系,一种是与断层平行,另一种是与断层共轭,主要分布在距断层一定的范围内(图 5c)。断层派生裂缝是在断层活动时的应力扰动所产生的局部应力场下形成的裂缝系统,主要发育在断层的应力扰动带附近,裂缝发育的宽度与断层的性质、规模和断层作用的强度有关。

喜马拉雅早期,由于龙门山造山活动,主应力主要来自 NW 向。在 NW 向挤压应力作用下,次级逆冲断层(普光 3 断层)发育,与断层相关的裂缝系统也进一步发育(图 5d)。喜马拉雅晚期,由于南大巴山活动的加强,发育了老君庙南断层,因而与断层相关的裂缝系统主要围绕该断层发育(图 5e)。

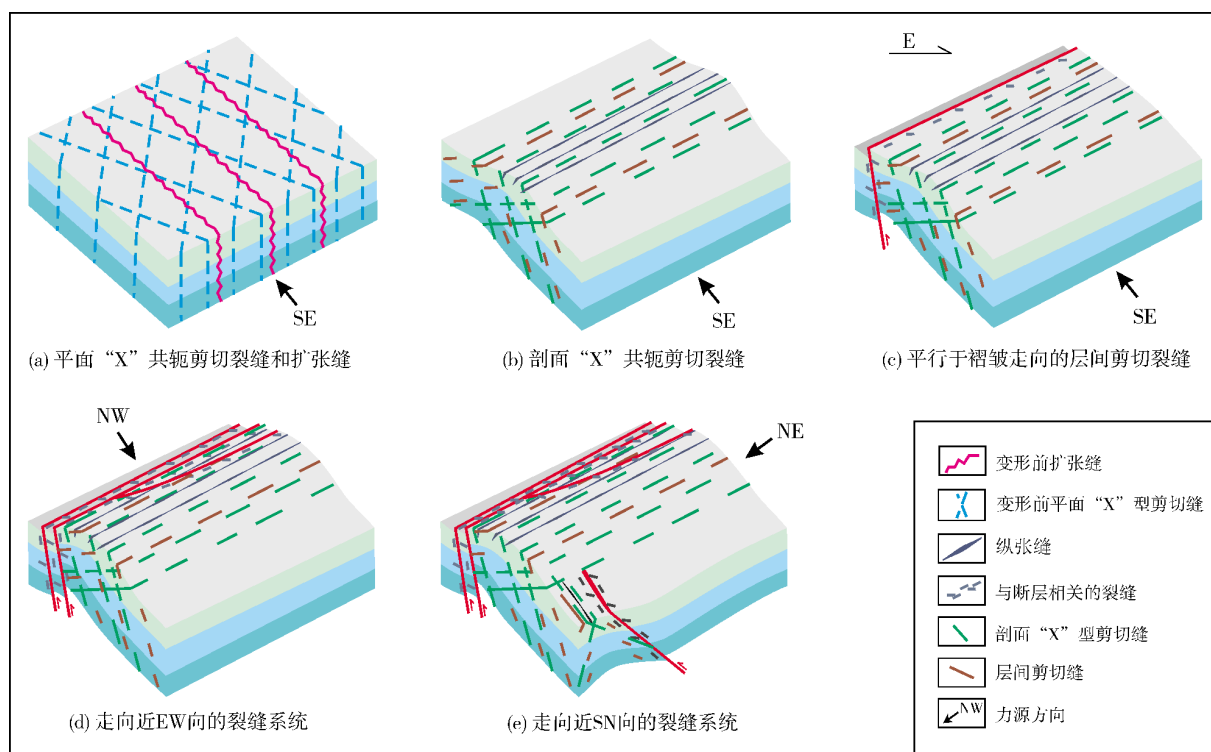


图 5 普光气田碳酸盐岩储层裂缝成因机理

## 3 裂缝发育的控制因素

构造裂缝的形成是构造活动中由构造应力作用造成的地层破裂,因此,构造裂缝发育程度主要受控于构造运动。一般来说,构造部位不同,遭受的应变强度就不同,裂缝的密集程度也就不等;应变能越

大,裂缝的密度就越大。影响研究区裂缝发育的构造因素主要有断层和地层变形程度两方面。另外,裂缝的发育程度还受到岩性、岩石结构组分、岩层厚度和物性的影响。

断层是裂缝发育的主控因素。对研究区内的成像测井,分层段统计裂缝发育密度与裂缝到就近断



层垂直距离的关系,同时为了减小因地层变形而产生的裂缝对断层相关裂缝发育密度的影响,在此采用裂缝发育密度与地层曲率之间的比值来表示断层相关的裂缝发育程度(单位为条)(图6),结果表明:断层相关裂缝的发育程度和井点与断层之间的距离呈负相关关系,断层距离越远,裂缝越不发育;此外,这种负相关的影响范围也有限,当离断层的垂直距离超过1200m时,断层对裂缝发育的影响将减弱(图6)。也就是说,与断层相关的裂缝系统主要发育在距断层1200m的范围之内。

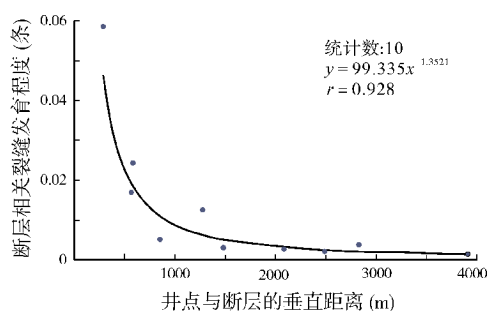


图6 普光气田断层对裂缝发育密度的影响

地层变形程度 对研究区内的成像测井分层段进行裂缝发育密度与地层曲率之间关系的统计,同时为了减小断层相关裂缝对地层变形裂缝发育密度的影响,在此采用裂缝的发育密度和它与断层垂直距离的乘积来表示与地层变形相关裂缝的发育程度(单位为条)(图7)。结果表明:地层变形相关裂缝发育程度与地层曲率之间呈正相关关系,即随着地层曲率的增大,裂缝发育的数量也增多(图7)。

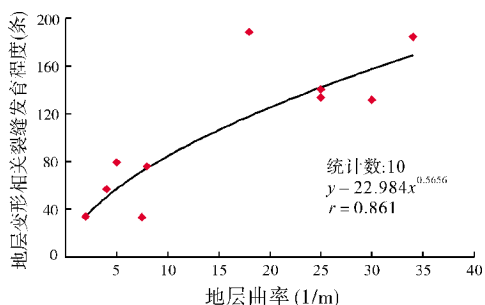
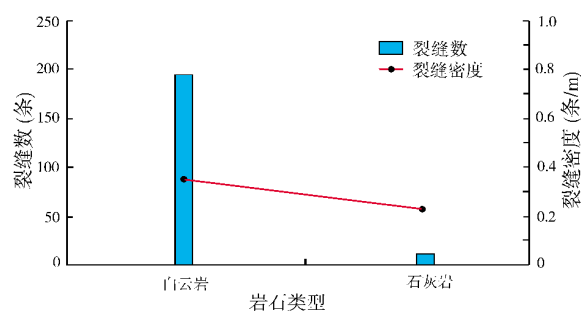


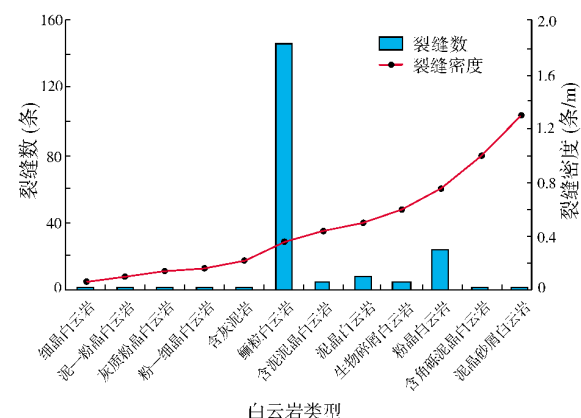
图7 普光气田飞仙关组一二段地层变形对裂缝发育密度的影响

岩性 是影响裂缝发育的最基本的因素<sup>[20-21]</sup>。对4口取心井中白云岩和石灰岩两类岩石分别进行了裂缝的发育密度统计,结果表明:白云岩裂缝

的密度为0.35条/m,石灰岩裂缝密度为0.23条/m,白云岩较石灰岩裂缝发育(图8a);白云岩中,细晶白云岩裂缝较不发育,裂缝密度仅为0.05条/m,泥晶砂屑白云岩裂缝最发育,裂缝密度为1.29条/m(图8b)。



(a) 白云岩和石灰岩中裂缝密度



(b) 白云岩中各岩性裂缝密度

图8 普光气田长兴组—飞仙关组裂缝发育密度在不同岩性中的分布

岩石结构组分 碳酸盐岩的结构和组分与岩石的成因密切相关<sup>[22]</sup>。碳酸盐岩结构组分不同,尤其是脆性组分含量的不同,当它们处于相同的应力环境条件下,脆性组分含量高的岩石比脆性组分含量低的更易破裂和产生裂缝。对普光气田1515块岩心薄片微裂缝发育所在岩石的粒屑、填隙物、亮晶和基质以及微裂缝发育密度等进行的统计表明,粒屑和填隙物的含量不同,微裂缝的发育密度也不同:微裂缝发育密度随粒屑含量的增加而减小(图9a),随填隙物的含量增加而增大(图9b),同时也随填隙物中的基质含量增加而增大(图9c),但微裂缝发育密度与亮晶含量之间没有明显的相关性(图9d)。

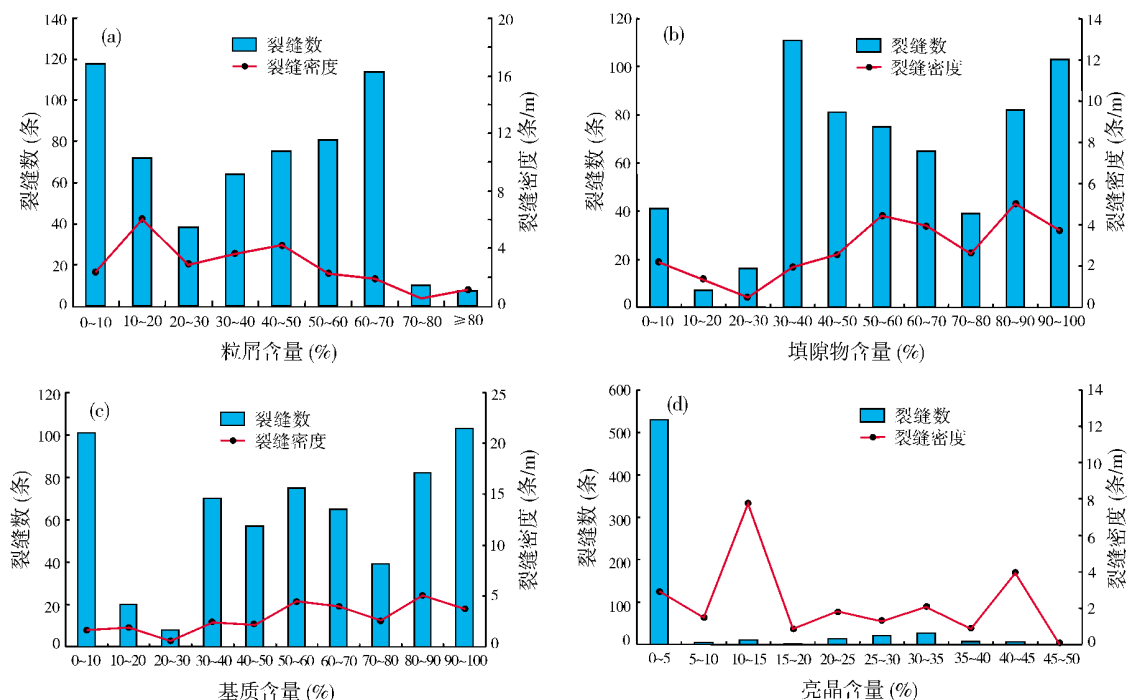


图9 普光气田长兴组—飞仙关组微裂缝发育密度与岩石结构组分之间的关系

岩层厚度 是控制裂缝发育的重要因素<sup>[23-24]</sup>。对普光气田长兴组—飞仙关组裂缝密度与层厚之间的关系所进行的统计表明:岩层厚度越小,裂缝越发育(图10)。当层厚小于2 m时,平均裂缝密度为1.63 条/m;层厚在2~4 m时,平均裂缝密度迅速减至0.65 条/m;当层厚大于4 m时,平均裂缝密度为0.37 条/m。

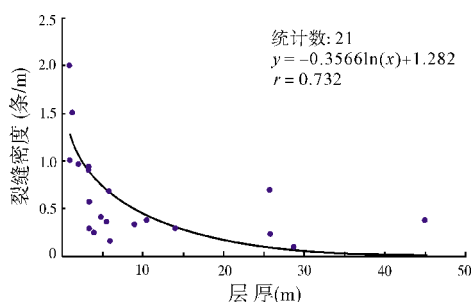


图10 普光气田长兴组—飞仙关组裂缝发育密度与岩层厚度之间的关系

储集物性 对研究区内4口取心井岩心观察后所做的裂缝与孔隙度之间关系的统计表明,73.15%的裂缝主要发育于孔隙度小于9%的岩石中(图11a)。从裂缝发育密度与孔隙度之间的关系分析,孔隙度在1%~2%时,裂缝发育密度最大,裂缝发育密度与孔

隙度之间存在随孔隙度增大、裂缝发育密度减小的趋势,但该趋势不明显(图11b)。

对研究区内1515块薄片观察的微裂缝与面孔率之间的关系进行统计,其结果表明:98.06%的微裂缝主要发育于面孔率小于9%的岩石薄片(图11c);从微裂缝发育密度与面孔率之间的关系分析,面孔率在0~1%时,微裂缝发育密度最大,微裂缝发育密度与面孔率之间存在随面孔率增大、微裂缝发育密度减小的趋势,该趋势相对宏观裂缝与孔隙度之间的关系更密切(图11d)。

## 4 结 论

普光气田上二叠统长兴组和下三叠统飞仙关组自沉积以来经历了印支、燕山和喜马拉雅三大构造运动,这些构造运动在不同地质历史时期使盆地的构造边界向盆内推进,形成了普光气田复杂的叠加和复合的关系,在构造运动过程中主要形成了与地层变形相关和与断层相关的两类裂缝系统。与地层变形相关的裂缝系统包括变形前扩张缝、变形前平面“X”型剪切缝、纵张缝、剖面“X”型剪切缝和层间剪切缝,与断层相关的裂缝系统主要为断层伴生缝和断层派生缝两种。

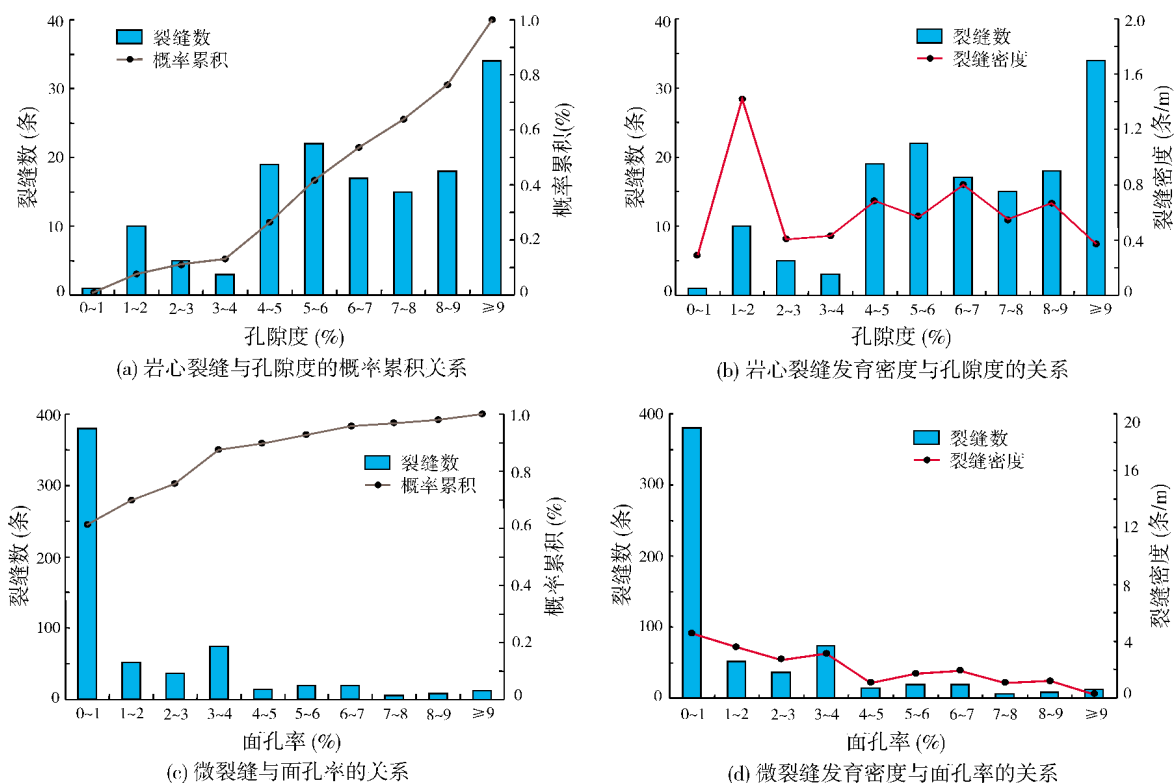


图11 普光气田长兴组—飞仙关组裂缝与孔隙度(或面孔率)之间的关系

裂缝发育程度主要受地层变形和断层的双重作用控制。与地层变形相关的裂缝系统主要发育于地层变形强的地区,地层变形越强,裂缝越发育;与断层相关的裂缝系统主要发育在距断层1 200 m的范围内,离断层越近,裂缝系统越发育。

裂缝发育程度还受岩性、岩层厚度、岩石结构组分和储集物性的影响。岩性不同,裂缝的发育程度会不同,白云岩的裂缝发育密度高于石灰岩;裂缝的发育密度随岩层厚度、粒屑含量增加而减小,随填隙物、基质含量增加而增大;裂缝主要发育在孔隙度较差的储层中,而储层孔隙度较好的,裂缝则相对不发育。

## 参考文献

- [1] 靳秀菊,王寿平,毕建霞,等. 礁滩相储层裂缝识别方法研究[J]. 断块油气田,2011,18(2):165-168.
- [2] 刘洪磊,陈建,靳秀菊,等. 普光气田礁滩相储层裂缝测井识别方法与应用[J]. 石油天然气学报,2013,35(3):106-108.
- [3] 徐维胜,何川,龚彬,等. 普光气田基于多井资料的储层裂缝综合地质分析[J]. 中外能源,2011,16(2):51-56.
- [4] 何胡军,毕建霞,曾大乾,等. 基于测井曲线斜率的KNN分类算法常规测井裂缝识别——以普光气田礁滩相储层为例[J]. 中外能源,2014,19(1):70-74.
- [5] 唐永,梅廉夫,张春生,等. 普光气田飞仙关组储层裂缝特征及其控制因素[J]. 石油天然气学报,2010,32(2):48-53.
- [6] 唐海,汪全林,彭鑫岭,等. 川东宣汉地区飞仙关组裂缝特征及成因研究[J]. 西南石油大学学报,2011,33(4):78-84.
- [7] 杨广林. 东濮凹陷三叠系砂岩裂缝形成机理及控制因素[J]. 断块油气田,2009,16(4):22-24.
- [8] 毕海龙,周文,谢润成,等. 川西新场地区须二段气藏天然裂缝分布综合预测及评价(上)[J]. 物探化探计算技术,2012,34(6):713-716.
- [9] 毕海龙,周文,谢润成,等. 川西新场地区须二段气藏天然裂缝分布综合预测及评价(下)[J]. 物探化探计算技术,2013,35(1):76-78.
- [10] 唐大卿,陈新军,张先平. 川东北宣汉—达县地区断裂系统及构造演化[J]. 石油实验地质,2008,30(1):58-63.
- [11] 甘昭国,梁恩宇. 四川盆地褶皱形成时间及其对油气聚集的控制[J]. 天然气工业,1988,8(4):1-6.
- [12] 四川省地质矿产局. 四川省区域地质志[M]. 北京:地质出版社,1991:552-667.
- [13] 童崇光. 四川盆地构造演化与油气聚集[M]. 北京:地质出版社,1992:1-127.
- [14] 郭正吾,邓康领. 四川盆地形成与演化[M]. 北京:地质出版社,1996:1-163.
- [15] 刘和甫,李景明,李晓清,等. 中国克拉通盆地演化与碳酸

- 盐岩—蒸发岩层序油气系统[J]. 现代地质, 2006, 20(1): 1-18.
- [16] 吴世祥, 马永生, 金之钧, 等. 米仓山前陆盆地东段构造演化模式与油气聚集[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(1): 14-16.
- [17] 汪泽成, 赵文智, 徐安娜, 等. 四川盆地北部大巴山山前带构造样式与变形机制[J]. 现代地质, 2006, 20(3): 429-435.
- [18] 石文斌. 南大巴山构造特征及演化[D]. 中国地质大学, 2007: 51-55.
- [19] 唐大卿, 汪立君, 曾韬, 等. 川东北宣汉—达县地区构造演化及其对油气藏的改造作用[J]. 现代地质, 2008, 22(4): 230-238.
- [20] 张小莉, 冯乔, 尹成明, 等. 柴达木盆地红沟子构造裂缝控制因素与定量模拟[J]. 西北大学学报, 2009, 39(3): 497-500.
- [21] 周进松, 童小兰, 冯永宏. 柴窝堡背斜储层构造裂缝发育特征及控制因素[J]. 石油学报, 2006, 27(3): 53-56.
- [22] 姜在兴. 沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 182-196.
- [23] 张莉. 陕甘宁盆地储层裂缝特征及形成的构造应力场分析[J]. 地质科技情报, 2003, 22(2): 21-24.
- [24] 张震, 鲍志东. 松辽盆地朝阳沟油田储层裂缝发育特征及控制因素[J]. 地学前缘, 2009, 16(4): 166-172.

编辑: 赵国宪

## Genesis and Control Factors of Fractures in Carbonate Reservoirs in Puguang Gas Field

He Hujun, Zeng Daqian, Bi Jianxia, Wang Qiuyu

**Abstract:** Puguang Gas Field is composed of the Changxing( $P_3$ ) and Feixianguan( $T_1$ ) carbonate reservoirs with abundant fractures, edge water and high content of sulfur in gas. To prevent edge water from entering reservoirs along fracture nets to floods, it is important to know the genesis and control factors of fractures in these reservoirs. A series of shearing and extending fractures that are relative to strata deformation and faulting have developed because of different force-source tectonic compressions from three directions since Changxing and Feixianguan reservoirs deposited in this field. It is deemed that the development of fractures was controlled by tectonism, the more intensive strata deformation is, the more fractures develop. Fracture system related with faults mostly distributes within about 1200m distance from faults, the closer distance from faults is, the more fractures develop. In addition, development of fractures is also controlled by lithology, strata thickness, rock constituents, and physical property of reservoirs. Different lithology results in different extent of development of fractures. Density of fractures decreases with increasing strata thickness and clast content but increases with increasing interstitial material and matrix content. According to classification of reservoirs, it is realized that fractures develop commonly in the reservoir rocks with low porosity and fractures do not develop usually in the reservoir rocks with high porosity.

**Key words:** Carbonate reservoir; Reservoir fracture; Fracture genesis; Control factor; Puguang Gas Field; Sichuan Basin  
He Hujun; male, DSc., Senior Geology Engineer. Add: PetroChina Jidong Oilfield Branch Company, Jiaqu, 51 Xinhua Xi Dao, Tangshan, Hebei, 063004, China