

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

裂缝性岩石裂缝扩展的光弹构造物理模拟

——以南华北盆地户部寨沙河阶组为例

颜丹平¹⁾, 周美夫²⁾, 田崇鲁³⁾, 汪昌亮¹⁾, 张建增¹⁾, 郭庆银⁴⁾, 马寅生⁵⁾, 董铁柱¹⁾

- 1) 岩石圈构造、深部过程及探测技术教育部重点实验室, 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京, 100083
2) 香港大学地球科学系, 香港薄扶林道; 3) 石油大学地质科学系, 北京, 100083
4) 核工业北京地质研究院, 100029; 5) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京, 100081

内容提要:以南华北盆地户部寨第三系沙河阶组粉砂岩低渗透储层为例,总结了其中发育的5种类型构造裂缝组合,即:①南北向雁形张节理组成的共轭剪节理带;②东西向雁形张节理组成的共轭剪节理带;③缠结状多组剪切构造裂缝;④组合状交切的多组剪切构造裂缝及张裂缝;⑤散状无序排列的构造裂缝。在此基础上,建立光弹性试验构造物理模型,沿现应力场96°方向,均匀地对该模型逐步增加外载力。结果表明,沿各组合裂缝尖端分别形成对称于裂缝走向、且主轴垂直于裂缝的Ⅰ型等色线条纹;对称于裂缝走向、且主轴平行于裂缝走向的Ⅱ型条纹和斜交于裂缝走向的复合型(Ⅲ型)条纹。第①类组合裂缝尖端以Ⅰ型等色线条纹的拉张应力和张剪应力为主;第②类组合裂缝尖端以复合型(Ⅲ型)等色线条纹的挤压应力为主;第③、④和⑤类组合裂缝尖端的应力分布较为复杂。当模型外载荷接近1000 kg时,裂缝尖端起裂,并开始发育显微裂缝,而当外载荷达1100~1200 kg时,沿裂缝尖端部位形成宏观裂缝,并开始扩展。5种类型的裂缝组合扩展发育程度由强至弱依次为:①,③,⑤,②,④。其中第①类共轭裂缝组合起裂最早,扩展最快,裂缝间的连通趋势最好,说明规则分布的构造裂缝组合,在垂直于外施加载荷时更易达到连通的目的。

关键词: 裂缝;扩展;光弹构造物理模拟;南华北盆地;沙河阶组

构造裂缝,即构造节理,是变形岩石中普遍存在的一种小尺度非连续变形形迹。在低渗透储层油气田中,构造裂缝既是储油空间,又是油气运移的主要通道。在油气田开发过程中,为提高采收率,常常运用钻井压裂技术,对具有先存构造裂缝的岩石进行压裂改造,以期达到使构造裂缝沿设定方向延伸或联合,并达到采油并驱、输油气的效果。

对低渗透储层采取压裂改造措施,需要解决以下基础地质构造问题(黄辅琼等,1999;颜丹平等,2003):一是充分掌握储层已有构造裂缝发育、分布的基本参数和规律,如裂缝密度、延伸长度、高度及产状等,并掌握裂缝分期、配套特征;二是建立裂缝发育的基本地质构造模型,并根据实际地质情况合理设定边界条件;三是掌握并能预测储层裂缝在外加应力场下压裂改造时的发展趋势,包括:裂缝发育速率、扩展方向和规模等(Zolotarevskii et al.,

1986; Li et al., 1994; Vozdvizhenskii et al., 1995; Phillips et al., 1997)。对于第一和第二项内容而言,利用钻井岩心裂缝观察统计,并与测井、地震和油气田动态监测资料分析结合,可以获得解决^①。而对于压裂改造条件下的裂缝发育规律,是问题的核心,目前多采用数值模拟方法进行预测(李德同等,1996;文世鹏等,1996;陈波等,1998;陈忠等,2001)。一些研究实例表明(Georgiyev et al., 1982; 单家增, 1996; 单家增等, 2000a, 2000b; Wahab et al., 2001),构造物理模拟结果能够更直观有效地指导进行压裂改造,与数值模拟结果结合,能够克服边界条件设定过于理想的缺点,增加应用的实际效果。

南华北盆地第三系沙河阶组是华北及渤海湾油区的主力储油层。勘探资料表明,大多数属于低渗透致密储层,先存构造裂缝是影响油气采收率最重要的地质因素,对裂缝进行压裂改造是各油气田开发

注:本文为国家自然科学基金项目(编号 40472106, 40434011, 40172070)和中原油田勘探开发研究院资助的成果。

收稿日期:2005-01-19;改回日期:2005-06-14;责任编辑:郝梓国。

作者简介:颜丹平,男,1964年生,博士,教授。主要从事构造地质学研究与教学工作。通讯地址:100083,北京市学院路29号,中国地质大学构造室;yandp@cugb.edu.cn。

时普遍采用的工艺措施。前人利用各种地质模型和数字模型进行了多方面的数值模拟(李德同等, 1996;文世鹏等,1996;陈波等,1998;陈忠等,2001),但难以达到理想效果。分析原因,主要表现在:一是在现应力场下,对地下储层进行压裂改造后裂缝的发育特点,有针对性的实验研究很少,因而缺少理论基础;二是难以准确(定量或半定量)地预测和掌握压裂改造后裂缝的发育趋势和特点,对压裂改造后裂缝发育的基本参数,如裂缝密度、性质、延伸长度和方向等难以获得;三是对于压裂改造后裂缝发育的动态变化及过程缺少监测和预测手段。

在对南华北盆地户部寨气田沙河阶组岩心、地震及钻井资料综合分析的基础上,获得了先存裂缝发育的基本参数,并对其中储层构造裂缝发育规律及其地质构造模型进行了研究和总结。本文在此基础上,采用光弹性应力分析方法,模拟了沙河阶组构造裂缝压裂在不同外加载荷条件下,裂缝尖端的应力状态及变化,以及裂缝尖端起裂、稳定发展及失稳扩展的过程,从而获得先存裂缝压裂改造时的发育规律和基本参数,为进一步研究和预测人工压裂缝与现构造应力场之间的空间分布关系和成因联系提供了依据。

1 户部寨地质概况与沙河阶组实验地质模型

户部寨构造位于南华北盆地东濮坳陷的中央隆起带,由户部寨地垒系和濮卫地堑系组成。主要天然气储层(研究目标层)是第三系沙河阶组,主要岩性为粉砂岩。基块平均孔隙度总体为3%~12%,但原生孔隙多已丧失,对天然气储层起主要作用的是次生孔隙,但渗透率很低,仅为 $(0.1\sim 1)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,储层物性差,属于典型的低渗透储层,构造裂缝的存在是储层物性参数改善的主要因素^{①②}。

根据沙河阶组发育构造裂缝的相互制约关系(图1a),确定了5种不同类型的构造组合:①南北向张节理呈雁形排列,形成了NE和NW向共轭剪节理带。相邻裂缝首尾叠接,但不相连,未直接形成裂缝网络(图1a右下);②东西向张节理呈雁形排列,形成了NE和NW向共轭剪节理带。相邻裂缝首尾叠接,但不相连,未直接形成裂缝网络(图1a右上);③多组剪切构造裂缝呈缠结状,使岩石破碎程度增高,同时构成连通性能极好的网络关系(图1a左中);④多组剪切构造裂缝及张裂缝呈组合状交切,使岩石较为破碎,同时构成连通性能较好的网

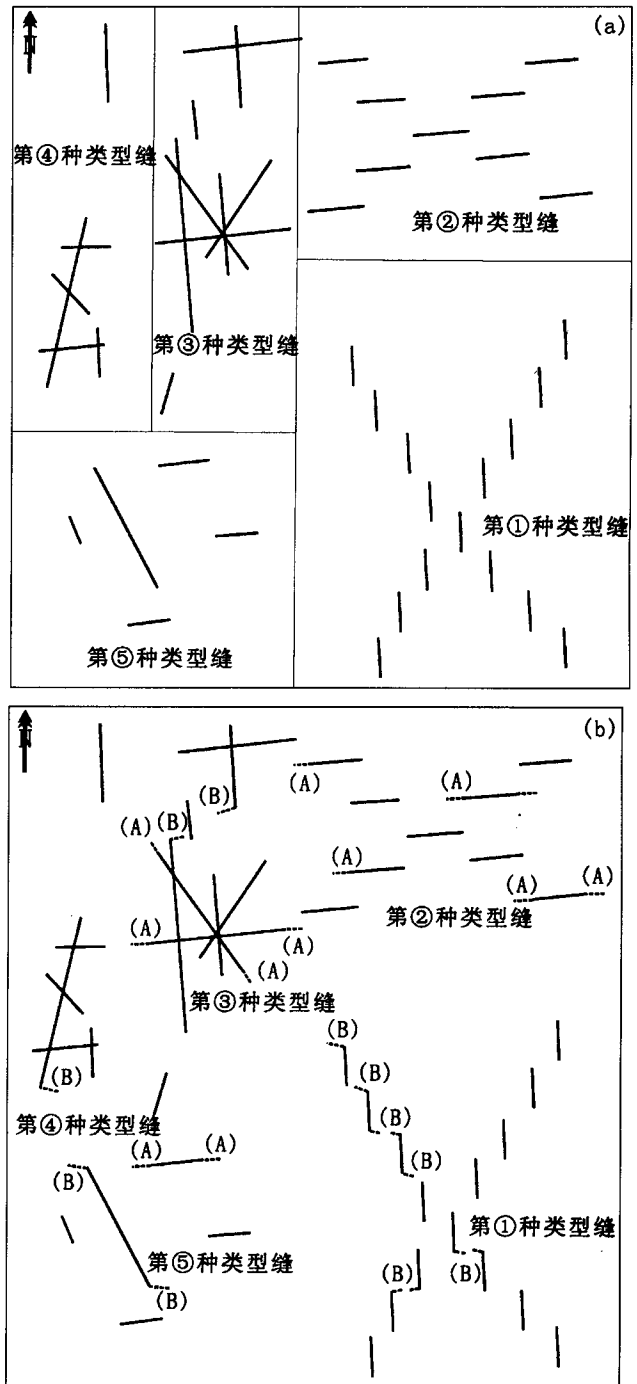


图 1 沙河阶组粉砂岩裂缝发育关系及组合类型图(a)和加载至1200 kg 破裂后的状态图(b)

Fig. 1 Relationship and assemblage types of fracture in the Shahejie Formation(a), the loading forces to the model was added to 1200 kg(b) in the two cases of breaking (b)图内:状态(A)—破裂沿裂缝走向方向;状态(B)—破裂大致平行外力加载方向;虚线表示破裂发生的方向和大小
In figure (b): (A)—Breaking parallel to the fractures; (B)—breaking almost along the loading direction; the broken lines show the breaking direction and extending length

络关系(图1a 左上);⑤ 多组不同性质及方位的构造裂缝呈散状无序排列,裂缝不交切,裂缝的连通性能较差(图1a 左下)。

以上5种裂缝类型构造关系在户部寨沙河阶组岩心裂缝网络中均有发现,其中第⑤种关系最为常见,说明岩石中普遍发育构造裂缝,但总体的连通性较差,这也就能解释沙河阶组具有较高的次生孔隙率,但渗透性很低及物性较差的原因。油气田开发动态资料和现应力场分析表明,目前户部寨气田的现应力场方向为 ESE-WNW 向均匀挤压(96°)^①。

2 光弹构造物理实验

2.1 实验原理

光弹实验是由光学和弹性理论相结合,用以对研究对象进行应力分析的实验方法。它将光弹性材料做成研究对象的相似模型,用仪器测定出模型在相似载荷作用下光学性质的变化,以达到分析研究对象中应力分布的目的。

根据户部寨沙河阶组低渗透裂缝性储层的地质模型特点,本实验采用对二维光弹模型进行加载和直接获取等色线条纹的方法。差异应力由二维应力光学定律给出:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = nf/t$$

其中: f 为光弹性材料材料条纹值(kg/cm 条), t 为模型厚度(cm), n 为等色线条纹级数。

当实验模型做好后, f 和 t 为常数,差应力($\sigma_1 - \sigma_2$)或最大剪应力 $\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_2)/2$ 与条纹级数成正比。因此光弹实验的等色线条纹图案直接反映差应力或最大剪应力的分布,其相对大小则可由等色线条纹图案直接读出。

2.2 实验模型

实验的光弹性材料是以 E44-6101 型环氧树脂

为基体,顺丁烯二酸酐为固化剂,邻苯二甲酸二丁酯为增塑剂在特定条件下配制而成的。在模型作用过程中,根据地质模型,将5种类型的裂缝组合,按实际方向进行简化后,分别刻划在模型的不同区域中(图2)。模型制成后,需要在烘箱内加温对模型进行退火,以清除其中的初应力(特别是刻划的裂缝处)。模型成型后,模拟的裂缝侧向不连续,裂缝面相接触(代表地下环境,裂缝不开启),有较好的传力性能。

实验时,分别将模型置于万能材料实验机上,使其按选定的边界条件加均匀载荷,于光弹仪上分别摄取等色线图,得到该模型的等色线条纹图案,并用光弹仪确定模型内各裂缝的受力方式。

该光弹实验所采用的边界条件是 ESE-WNW 向均匀挤压(96°),裂缝受力方向包括与挤压方向垂直的共轭裂缝系(第①种类型)、与挤压方向平行的共轭裂缝系(第②种类型)及与挤压方向呈不同夹角的剪切裂缝(第③、④、⑤种类型)。实验时,外载荷分别采取了 200 kg、500 kg、700 kg、900 kg、1000 kg、1100 kg 和 1200 kg 等,观察其变化过程,并记录了 200 kg、500 kg、700 kg、1100 kg 和 1200 kg 加载时应力场及裂缝扩展变化特征。

3 裂缝扩展及其与应力场关系分析

3.1 等色线条纹类型

实验结果为一套反映不同应力状态下由不同级数的等色线条纹组成的图案,据此可以直接判断模型内各裂缝的受力状态,进而对实验模型和实验对象的应力分布及其对先存裂缝破裂扩展的影响进行分析(单家增,1996;单家增等,2000a,2000b)。

在模型内各裂缝尖端上的等色线图案,主要有3种类型等色线条纹。

I 型条纹:其特征是等色线条纹分布近对称于

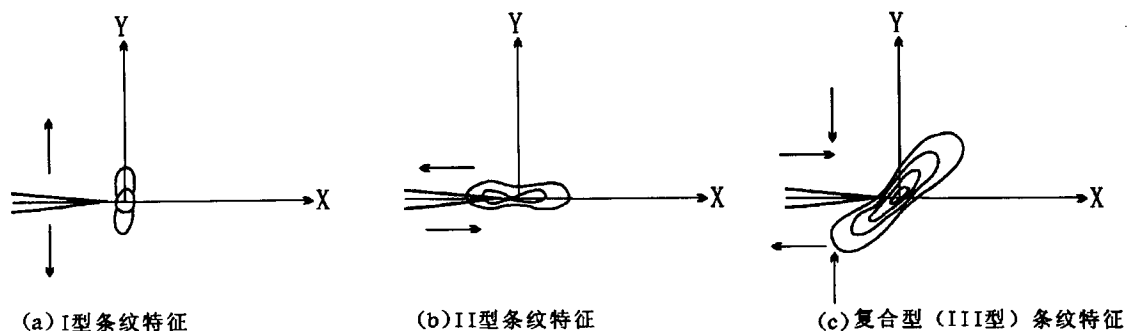


图 2 光弹实验等色线条纹特征

Fig. 2 The isochromatic curve of photoelastic experiment

裂缝走向,等色线条纹主轴与裂缝走向垂直(图2a)。它既可以由垂直于裂缝走向的压应力作用而形成,又可以由垂直于裂缝走向的张应力作用而产生。区分裂缝是受压应力还是张应力,可以用针刺法在光弹仪上鉴定。

Ⅱ型条纹:其特征是等色线条纹分布近对称于裂缝走向,等色线条纹主轴与裂缝走向平行(图2b)。

复合型(Ⅲ型)条纹:其特征是等色线条纹既不对称于裂缝走向,也不平行于裂缝走向。它们的形成是裂缝受剪应力、压应力或张应力联合作用的结果(图2c)。区分裂缝是受张剪应力还是压剪应力,可以用针刺法在光弹仪上鉴定。

因此,根据裂缝上的等色线条纹类型,我们就可以确定出各裂缝的应力状态。

3.2 裂缝发育区局部应力场分析

实验等色线图案(图版 I-1~5)显示,在挤压外力作用下,不同类型的构造裂缝组合中形成的局部应力场特征差异较大:

第①类组合裂缝尖端以Ⅰ型等色线条纹为主,等色线条纹主轴与外力施加方向一致。随外力增加,逐渐在裂缝端点及相邻裂缝的叠接部位形成明显的应力高值区。外力施加至1000 kg及以上时,等色线条纹级数达3级以上,局部达4级,相邻裂缝端点处的高应力值Ⅰ型条纹并有复合联结的趋势。用针刺法鉴定,等色线条纹以拉张应力和张剪应力为主。

第②类组合裂缝尖端以复合型等色线条纹为主,等色线条纹主轴与外力施加方向及裂缝走向斜交;但在两个共轭带的共有裂缝(裂缝组合的中心部位)的尖端部位,形成Ⅰ型条纹,裂缝中间部位形成Ⅱ型条纹。随外力增加,等色线条纹逐渐向Ⅰ型条纹转变,但应力高值区(等色线条纹级数在3级以上)主要发生在Ⅰ型条纹发育区域。用针刺法鉴定,等色线条纹以挤压应力为主。

第③、④和⑤类组合裂缝尖端的应力分布较为复杂。裂缝尖端普遍发育复合型条纹,局部点位,如与外力斜交的裂缝端点处,发育Ⅱ型条纹,裂缝中部等色线条纹类型则以Ⅰ型较为多见。在剪切裂缝围限的夹角区域及附近应力值相对较低(等色线条纹级数为1~2级),其他区域,特别是裂缝尖端可以达到4~5级。用针刺法鉴定,等色线条纹以剪切应力为主。

3.3 裂缝起裂与扩展

裂缝起裂与扩展主要发生于裂缝尖端部位,其特征与外力施加大小、方向、裂缝组合类型、局部应

力场类型(等色线条纹类型)及性质均有关系:

(1)当模型外载荷接近1000 kg时,部分裂缝组中分别发出“啪!啪!”的破裂声,但未观察到明显的破裂,这表明微裂缝开始发育,进入裂缝起裂阶段。而当外载荷达1100 kg时,可以观察到宏观裂缝开始扩展,裂缝扩展起始部位均是沿裂缝的尖端部位(图版 I-4)。当外载荷达1200 kg时,宏观扩展裂缝发育已经较为完善(图版 I-5)。

(2)5种类型的裂缝组合按扩展发育程度由强至弱依次为:①,③,⑤,②,④。其中第①类和第②类两个共轭裂缝组合相比较,第①种类型明显具有较快的扩展速率,并且大多数裂缝尖端形成了扩展裂缝,裂缝之间具有明显的贯穿连结趋势。表明初始裂缝与外施载荷大角度相交,或近于垂直时,其破裂和扩展特性更易于发生。

(3)就裂缝起裂与扩展的局部应力场性质看,以张应力或张剪应力为主。这与格里菲斯脆性破裂准则是相符合的。

(4)所有裂缝,不论其初始方位如何,其扩展位置均为裂缝端部,因为这是局部应力最为集中的部位。裂缝最初扩展方向是与施加外力方向有一定交角,在设计模型中,扩展方向约为NNW,与施加外力方向有约15°~20°交角,也有少部分构造缝沿平行裂缝方向扩展,即属状态(A)(图1b),散布裂缝的扩展方向则多平行主压应力方向扩展,但经过初期的扩展后,裂缝的扩展方向则均转变为与外力施加方向一致。因为岩石力学分析表明,裂缝的产生和再活动不仅与应力值的大小有关,而且与结构条件,即与裂缝的走向和主应力间的夹角有关。若模型中裂缝与主压应力方向夹角为30°~45°时,裂缝峰值强度低,故裂缝容易活动并出现扩展;若在两组裂缝或两组以上裂缝组合条件下,只要其中任一组裂缝与主压应力轴夹角为30°~45°,而不管另一组裂缝的走向如何,其结果只能是状态(B)(图1b)。但需要指出的是在状态(A)与状态(B)的一些部位或邻近区应力值偏高,这些区域条纹级数达到4级以上(图1b,图版 I-5)。

(5)第①类共轭裂缝组合扩展开始最早,扩展最快,裂缝间的连通趋势最好(图1b),说明在具备上述破裂条件基础上,规则分布的构造裂缝组合更易于连通,达到油气田压裂改造的预定效果。

值得指出的是,上述5种模型是由户部寨油田沙河阶组总结出来的,但在油层中5种模型并非等同发育,从裂缝网络关系分析,我们可以看出,散布式裂

缝是沙河阶组中最常见的形式。可见,这可能是油田实际压裂改造效果不好的主要原因。

4 结论

(1) 在外施载荷作用下,沿先存裂缝形成了3种类型的局部应力场等色线条纹。对称于裂缝走向、且主轴垂直于裂缝的Ⅰ型等色线条纹;对称于裂缝走向、且主轴平行于裂缝走向的Ⅱ型条纹和斜交于裂缝走向的复合型条纹(Ⅲ型)。第①类裂缝组合以Ⅰ型等色线条纹为主,局部应力场并以拉张应力和张剪应力为主;第②类裂缝组合以复合型等色线条纹(Ⅲ型)为主,局部应力场以挤压应力为主;第③、④和⑤类裂缝组合的应力分布较为复杂。

(2) 当模型外施载荷接近1000 kg时,部分裂缝组的裂缝尖端起裂,并发育显微裂缝;而当外载荷达1100 kg时,沿裂缝的尖端部位可以观察到宏观裂缝的扩展;当外载荷达1200 kg时,宏观扩展裂缝发育已经较为完善。裂缝扩展方向主要包括平行先存裂缝与平行外施载荷方向两种。5种类型的裂缝组合按扩展发育程度由强至弱依次为:①,③,⑤,②,④。其中第①类共轭裂缝组合扩展开始最早,扩展最快,裂缝间的连通趋势最好,说明在具备上述破裂条件基础上,规则分布的构造裂缝组合更易于连通,达到油气田压裂改造的预定效果。

致谢:本文在研究过程中,中原油田勘探开发研究院杨意超高级工程师提供了协助,中国地质科学院地质力学研究所光弹实验室王砚庆先生帮助进行了光弹物理模拟实验,在此一并表示衷心的感谢。笔者特别要感谢审稿人提出的建设性意见,这些意见提高了本文的研究水平。

注 释

- ① 田崇鲁,颜丹平. 2000. 低渗透致密储层裂缝精细描述技术及发育规律研究. 石油天然气总公司研究报告.
- ② 中原石油勘探局勘探开发研究院. 1996. 户部寨气田开发方案.

参 考 文 献

- 陈波,田崇鲁. 1998. 储层构造裂缝数值模拟技术的应用实例. 石油学报,19:50~54.
- 陈忠,张吉昌,罗玉庆,邢玉忠,马全华. 2001. 有限元数值模拟在构造裂缝定量预测中的应用. 特种油气藏,8:64~68.
- 黄辅琼,宋惠珍,曾海容,肖承文,欧阳健. 1999. 储集层构造裂缝定量预测方法研究. 地震地质,21:261~267.
- 李德同,文世鹏. 1996. 储层构造裂缝的定量描述和预测方法. 石油大学学报(自然科学版),20:6~10.
- 单家增. 1996. 构造模拟实验在石油地质学中的应用. 北京:石油工

业出版社,163.

- 单家增,孟庆任,岳乐平,陈月娥. 2000a. 古应力场定量研究的光弹物理模拟实验法. 石油勘探与开发,27:103~108.
- 单家增,王捷,王秉海,陈月娥,赵平,金健. 2000b. 光弹物理模拟实验法在古应力场研究中的应用. 石油大学学报(自然科学版),24:61~67.
- 文世鹏,李德同. 1996. 储层构造裂缝数值模拟技术. 石油大学学报(自然科学版),20:17~24.
- 颜丹平,田崇鲁,孟令波,张建增,周美夫. 2003. 伸展构造盆地的平衡剖面及其构造意义——以松辽盆地南部为例. 地球科学,28:275~280.

References

- Chen B, Tian C L. 1998. Numerical simulation technique for structural fractures in a reservoir: cases studies. Acta Petrol. Sinica, 19: 50~54 (in Chinese with English abstract).
- Chen Z, Zhang J C, Luo Y Q, Xing Y Z, Ma Q H. 2001. Application of finite numerical simulation in quantitative prediction of structural fractures. Special Oil and Gas Reservoirs, 8: 64~68 (in Chinese with English abstract).
- Georgiyev M N, Strok L P. 1982. X-ray study of fracture structure. Fizika Metallov I Metallovedenie, 54: 1161~1165.
- Huang F Q, Song H Z, Zeng H R, Xiao C W, Ou Y J. 1999. Study on the method of quantitative analysis of fissure volume density in reservoirs. Seismology and Geology, 21: 261~267 (in Chinese with English abstract).
- Li D T, Wen S P. 1996. Methods quantitative description and prediction for structural fracture of subsurface reservoir. Journal of the University of Petroleum China, 20: 6~10 (in Chinese with English abstract).
- Li P L, Rao C T. 1994. Tectonic characteristics and evolution history of the Pearl river mouth basin. Tectonophysics, 235: 13~25.
- Phillips W S, House L S, Fehler M C. 1997. Detailed joint structure in a geothermal reservoir from studies of induced microearthquake clusters. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 102 (B6): 11745~11763.
- Shan J Z. 1996. Application of structural modelling experiment to petroleum geology. Beijing: Petroleum Industrial Press, 163 (in Chinese).
- Shan J Z, Meng Q R, Yue, L P, Chen, Y E. 2000a. Quantitative studies on paleotectonic stress field by photoelastic experiments. Petroleum Exploration and Development, 27: 103~108 (in Chinese with English abstract).
- Shan J Z, Wang J, Wang B H, Chen Y E, Zhao P, Jing J. 2000b. Application of photoelastic experiments method to study of paleotectonic stress field. Journal of the University of Petroleum China, 24: 61~67 (in Chinese with English abstract).
- Vozdvizhenskii V M, Mamonov A M, Vozdvizhenskaya M V, Zasytkin Y V, Pavlov A O. 1995. A study of fracture of VT23 titanium alloy after hydrogen-heat treatment. Russian Metallurgy, 6: 98~102.
- Wahab M A, Sakano M. 2001. Experimental study of corrosion

fatigue behaviour of welded steel structures. *Journal of Materials Processing Technology*, 118: 117~122.

Wen S P, Li D T. 1996. Numerical simulation technology for structural fracture of reservoir. *Journal of the University of Petroleum China*, 20: 17~24 (in Chinese with English abstract).

Yan D P, Tian C L, Meng L B, Zhang J Z, Zhou M F. 2003. Balanced geological section for extensional tectonic basin and its implication: an example from south Songliao basin. *Journal of China University of Geosciences*, 28: 275~280 (in Chinese with English abstract).

Zolotarevskii V S, Kurdyumova T A, Rafikov V Z. 1986. Features of

the fracture structure of silumins under tension. *Russian Metallurgy*, 2: 157~162.

图版说明

沙河阶组5种类型构造裂缝在光弹试验下的应力场及裂缝扩展实验结果(详细说明见正文)。

1. 第①类组合裂缝尖端以Ⅰ型等色线条纹为主,等色线条纹主轴与外力施加方向一致。
2. 第②类组合裂缝尖端以复合型等色线条纹为主,等色线条纹主轴与外力施加方向及裂缝走向斜交。
- 3~5. 第③、④和⑤类组合裂缝尖端的应力分布较为复杂。

A Photoelastic Experiment for Fracture Extending in Fractured Rocks: An Example from the Shahejie Formation in the Southern North China Basin

YAN Danping¹⁾, ZHOU Meifu²⁾, TIAN Conglu³⁾, WANG Changliang¹⁾, ZHANG Jianzeng¹⁾, GUO Qingyin⁴⁾, MA Yinsheng⁵⁾, DONG Tiezhu¹⁾

1) *The Key Laboratory of Lithosphere Tectonics and Exploration, Ministry of Education, School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing, 100083*; 2) *The University of Hong Kong, Hong Kong*

3) *Department of Earth Sciences, China Oil University, Beijing, 100083*

4) *Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing, 100029*

5) *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100081*

Abstract

Five types of fracture assemblage were summarized from the siltstone of the Tertiary Shahejie Formation in the southern North China basin, i. e., ① conjugated shear fracture belts arranged in en échelon N-S-striking tension fracture; ② conjugated shear fracture belts arranged in en échelon E-W-striking tension fracture; ③ tangly shear fractures with variable striking; ④ shear and tension fractures cutting each other; and ⑤ sporadic fractures. Furthermore, a photoelastic physical model for experiment was established with well-proportioned and gradually increased loading along the direction of 96° (ESE-WNW). The results suggest that 3 types of isochrome map, which marks the local stress along the fractures, could be identified: type I has a symmetrical shape in respect to the fracture with the main axis perpendicular to the fracture, and type II has a symmetrical shape in respect to the fracture with the main axis parallel to the fracture, whereas the compound type (type III) has an asymmetrical shape in respect to the fracture with the oblique main axis. Fracture assemblage of type ① has type I isochrome map with tensional or tensional-shear stress, and fracture assemblage of type ② has compound type (type III) isochrome map with compressional stress, and fracture assemblage of type ③, ④ and ⑤ have very complicated stresses. Micro-fracture starts to form when loading is increased to 1000 kg, and macro-fracture starts to extend when loading is increased to 1100~1200 kg. The order of the extending of broken fracture from strong to weak is ①, ③, ⑤, ② and ④. The fracture assemblage of type ① is the earliest one to start tension with the greatest tensional velocity; Therefore, the fact that the best tendency to connect the fractures occurs to type ① suggests that a perpendicular loading to the en échelon fracture could easily result in the occurrence of connectedness.

Key words: fracture; tension; photoelastic physical model; southern North China Basin; Shahejie Formation

