

# 基岩水井压裂增水机理分析

李炳平<sup>1</sup>, 何计彬<sup>1</sup>, 康志鸿<sup>2</sup>

(1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051; 2. 保定自来水公司, 河北 保定 071051)

**摘要:**基岩地层压裂增水与岩层性质密切相关, 不同岩性其力学性质及其裂隙构造不同, 压裂机理与工艺方法就不同。根据基岩地下水岩层特点, 结合水力压裂增水试验, 着重分析了水力压裂的形成机制, 探寻了不同岩层及其力学性质与压裂的关系。

**关键词:**基岩水井; 岩层性质; 压裂; 机理分析

**中图分类号:** TU991.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-7428(2016)01-0061-05

**Analysis on the Mechanism of Water Increase by Fracturing in Bedrock Well/Li Bing-ping<sup>1</sup>, HE Ji-bin<sup>1</sup>, KANG Zhi-hong<sup>2</sup>** (1. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, CGS, Baoding Hebei 071051, China; 2. Water Company of Baoding, Baoding Hebei 071051, China)

**Abstract:** The water increase by fracturing in the bedrock strata is closely related to rock properties. Because of different mechanical properties and fracture structure of each lithology, the fracturing mechanism and process methods are also different. According to the strata characteristics of bedrock groundwater and combined with the water increasing test of hydraulic fracturing, this article focuses on the analysis on the formation mechanism of hydraulic fracturing and explores the relationship between different layers as well as their mechanical properties and the fracturing.

**Key words:** bedrock water well; rock property; fracturing; mechanism analysis

## 1 基岩地下水类型与压裂的关系

### 1.1 基岩地下水类型

基岩地下水类型通常按储水空隙(风化裂隙、构造裂隙、溶隙)特征划分。岩层经长期构造运动形成的裂隙, 其发育程度取决于岩石的性质和构造应力分布状况, 通常以岩石的力学性质和长期的化学溶蚀作用划分为: 风化岩孔隙、裂隙型地下水; 塑性岩石孔隙、裂隙型地下水; 脆性岩石孔隙、裂隙型地下水; 溶蚀型裂隙、溶洞型地下水。

### 1.2 岩石性质与压裂工艺的关系

开采基岩地下水, 成井的前提条件是岩层中必须存在富含地下水的岩溶性裂隙或非岩溶性、张性裂隙构造和补给条件。由于岩层构造裂隙发育的不均匀性, 各种类型的含水构造具有不同的结构特点, 使得地下水的分布和运移规律非常复杂, 给基岩地区打井取水带来很大难度, 对出水量不理想的水井, 可以采用压裂增水法解决, 而水力压裂成功与否取决于岩层性质及其蓄水构造类型。

不同岩性的岩层其性质不同, 按岩石的力学性质可划分为脆性岩石、脆塑性岩石、塑性岩石。根据

岩层的成因和矿物成分与结构特点, 又分为非溶蚀性岩层和沉积类溶蚀性岩层。受地层内应力的影响, 其形成的裂隙构造与类型就不同。此外, 岩层还受其它许多因素的影响, 如风化程度、孔隙、节理发育情况, 裂隙中的矿物充填与胶结程度, 上覆盖层压力等。因此, 压裂增水所采用的工艺与技术方法就不同, 如脆性岩石以清水或普通压裂液压裂就可满足增水要求。塑性岩石压裂形成的裂缝在卸荷后会自行闭合, 需要采用混砂压裂, 以支撑剂支撑裂缝, 使其保留一定的导流能力, 才能达到水井增水的目的。脆、塑性岩石压裂后形成的裂缝通常不会完全闭合, 成井深度相对较浅的井, 采用清水或普通压裂液压裂, 也能获得较好的压裂效果。但是, 基岩水井经压裂形成的裂缝是否闭合除与岩石自身的脆、塑性有关外, 还与岩层的围压有关。当盖层达到某一厚度时, 岩石在围压下也会导致压裂裂缝完全闭合, 导致压裂失败。总之, 基岩水井压裂增水是一项复杂的工艺技术, 若要基岩水井压裂增水成功, 必须选用合理的压裂工艺方法才能获得好的增水效果。

### 1.3 压裂工艺原理

收稿日期: 2015-05-30

作者简介: 李炳平, 男, 汉族, 1958年生, 教授级高级工程师, 探矿工程专业, 主要从事水文地质钻探及成完井工艺研究工作, 河北省保定市七一中路1305号, libingping19580310@163.com。

岩(层)石裂缝的形成与延伸是一力学行为,其原理是利用高压泵以超过地层吸液能力的排量向地层内注入压裂液,当流体压力达到或超过地层应力和岩石的抗张强度时,岩石起裂并形成裂缝。压裂裂缝除与地层的岩性及其力学性质有关外,还与岩层的裂隙与孔隙结构、节理及岩石的溶蚀性裂隙发育程度有关。

### 1.3.1 脆性岩石压裂

通过压入高压流体,使孔壁岩石被压裂,形成新的裂缝并延伸至蓄水构造,使井孔直接与储水构造贯通,达到增水的目的(见图1)。

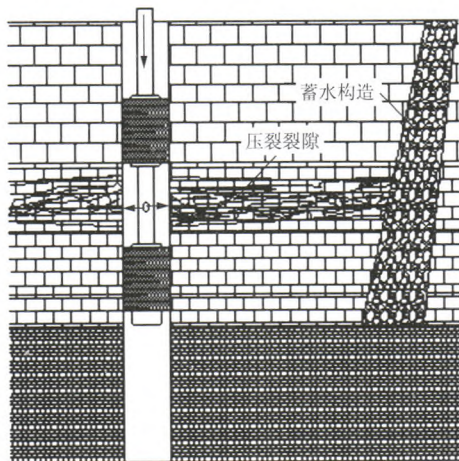


图1 完整基岩井压裂示意图

### 1.3.2 高压流体洗井

对已有的含水裂隙,因其裂隙内含有充填物或已形成胶结,钻井时泥浆和岩粉堵塞,其透水能力较低,经高压流体强力剪切、冲蚀和运移后,使得裂隙扩展和疏通,将原有裂隙的水流由径向流变为线性流,使含水层的渗流条件得以改善,实现增水的目的,见图2。

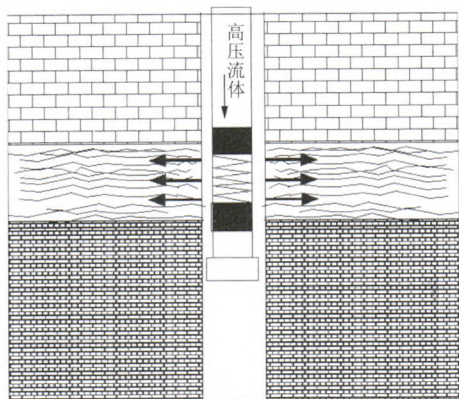


图2 高压流体洗井示意图

### 1.3.3 压裂、洗井并存增水

首先将井孔内局部岩石压裂,不断注入的高压流体则沿着低应力的岩层面如解理面、微孔隙、裂隙层延伸,同时将岩层中的无数小裂隙和孔隙连通,增大井(孔)含水岩层的汇流面积,使水井的水量增加,见压裂、洗井示意图3。

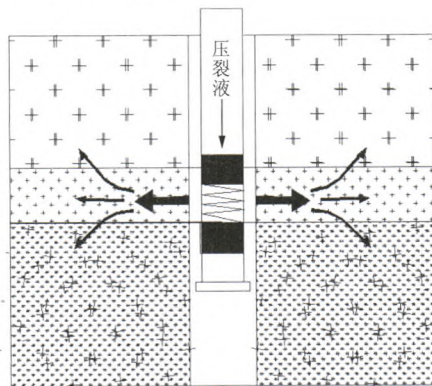


图3 压裂、洗井示意图

## 2 岩石力学性质与水力压裂机理分析

### 2.1 水力压裂造缝机理

#### 2.1.1 水力压裂造缝过程

水力压裂裂缝起裂从井壁某些点开始,逐步连接成线源缝,裂缝沿井筒轴向扭曲起裂,在延伸过程中逐步扭曲到与地层最小主应力(如岩石解理、节理、孔隙、裂隙)的方向上,然后沿该方向延伸并逐步形成一条或数条主裂缝。岩石起裂首先要克服地层应力和岩石的抗张强度,即岩石的破裂压力,该压力是压裂过程中的最高压力,被称为岩石的起裂压力。

#### 2.1.2 裂缝延伸

岩石破裂形成裂缝的同时,连续压入的流体使缝内液体压力总是垂直于最小主应力方向、沿最大主应力方向延伸。井壁附近岩石起裂时的情况较复杂,可能形成数条主裂缝,若天然裂隙较发育时可能形成更多裂缝,如图4所示。延伸压力指裂缝扩展和延伸所需压力,一般低于岩石起裂(破裂)压力。



图4 岩石压裂示意图



### 2.1.3 裂缝闭合压力

裂缝闭合压力指压裂作业停泵后,裂缝逐渐闭合的力。由于高压液体自裂缝壁面向地层内不断滤失,孔隙压力增高,造成支撑裂缝的压力逐渐下降,引起地层应力场变化,在岩层围压作用下,裂缝逐渐闭合,裂缝闭合压力总是高于地层水平最小主应力。

总之,水力压裂过程包括岩层造缝阶段(起裂与初始造缝)、裂缝延伸阶段和裂缝闭合阶段,3个阶段的控制将影响压裂效果。

## 2.2 岩石的力学性质与水力压裂的关系

### 2.2.1 地层应力

就地层的某一深度而言,作用在任意单元体上的垂直应力来自上覆岩层的重力,其大小可以根据岩层的密度计算:

$$\sigma_z = \int_0^H \rho_s g dz \quad (1)$$

式中: $\sigma_z$ ——垂直主应力,Pa; $H$ ——地层垂深,m; $g$ ——重力加速度,9.81 m/s<sup>2</sup>; $\rho_s$ ——上覆岩层密度,kg/m<sup>3</sup>。

由于承压含水岩层存在孔隙压力 $P_s$ ,则有效垂直应力为:

$$\bar{\sigma}_z = \sigma_z - P_s \quad (2)$$

如果岩石处于弹性状态,考虑到构造应力等因素的影响,可以得到最大、最小水平主应力为:

$$\sigma_{H_{\max}} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\xi_1 E}{1-v} - \frac{2v(\sigma_z - \alpha P_s)}{1-v} + \frac{\xi_2 E}{1+v} \right] + \alpha P_s \quad (3)$$

$$\sigma_{H_{\min}} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\xi_1 E}{1-v} - \frac{2v(\sigma_z - \alpha P_s)}{1-v} - \frac{\xi_2 E}{1+v} \right] + \alpha P_s \quad (4)$$

式中: $\sigma_{H_{\max}}$ 、 $\sigma_{H_{\min}}$ ——最大、最小水平主应力,Pa; $\xi_1$ 、 $\xi_2$ ——水平应力构造系数,无因次; $v$ ——泊松比,无因次; $E$ ——岩石弹性模量,Pa; $\alpha$ ——毕奥特(Biot)常数,无因次。

### 2.2.2 井壁岩层应力

当井孔完成后,井壁及其周围岩层的应力将受到改变,应力状况变得更加复杂。为便于分析,可简化为二维方法考虑,设岩层为均匀应力分布,只存在岩层内承压水体的压力平衡,这势必造成井壁岩石应力集中,压裂时裂缝的形态及方位与此应力密切相关。为此,可以依据弹性力学理论来计算井孔岩层的周向应力。

#### 2.2.2.1 井壁岩层周向应力及其分布

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \left( 1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos(2\theta) \quad (5)$$

式中: $\sigma_\theta$ ——井孔周向应力,Pa; $a$ ——井孔半径,m; $\sigma_x$ ——水平应力,Pa; $\sigma_y$ ——垂向应力,Pa; $r$ ——裂缝前端距井孔中心距离,m; $\theta$ ——任意径向与 $\sigma_x$ 方向的夹角。

#### 2.2.2.2 压裂机理分析

(1)若 $r=a$ , $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_H$ 时, $\sigma_\theta = 2\sigma_x = 2\sigma_y = 2\sigma_H$ ,孔壁上各点的应力相等,与 $\theta$ 无关,则岩层含有裂隙带,若裸孔井壁不发生坍塌,压裂时类似于高压流体疏通扩展原裂隙通道,起水力剪切、冲蚀、运移裂隙中的胶结物和岩粉,起高压流体洗井作用,压裂时的压力峰值较低,见图5曲线3,该峰值取决于裂隙中的胶结强度与矿物或岩粉的充填程度,随压裂时间的延长,压力缓慢降低至稳定。

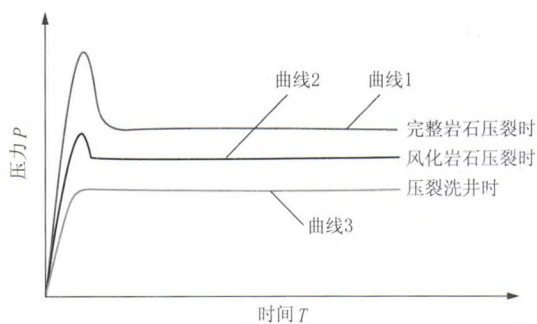


图5 压力随时间变化关系图

(2)当 $r=a$ ,水平应力大于垂向应力( $\sigma_x > \sigma_y$ )时,周向最大应力在 $\sigma_y$ 上,岩石破裂(起裂)时的起裂压力最高,随着裂缝延伸,即 $r$ 增加,周向应力变为原始岩层的应力,岩层内应力迅速降低,由于这种应力的分布状况与作用,使得井壁周围岩层的应力集中而比径向内部岩层的应力要大很多,反应到压裂时,岩层破裂(起裂)压力总是大于裂缝延伸压力(见图5曲线1),岩石由完整到裂隙带时,表现为压力突降至稳定。相应条件下,如果覆盖层厚度较小,岩层中层理、解理、微小孔隙发育或为风化岩层,反应到压裂时,岩层破裂(起裂)压力和裂缝延伸压力介于完整岩层压裂和裂隙层压裂洗井的压力之间(见图5曲线2),即压裂洗井并存。

(3)在压裂过程中,向井孔内不断注入高压流体,使井内压力快速升高,该压力作用在井壁上形成周向应力。假设井壁周围的岩石为一个具有无限厚

的圆筒,根据拉梅公式(拉应力为负)则有:

$$\sigma_{\theta} = \frac{P_e r_e^2 - P_i r_a^2}{r_e^2 - r_a^2} + \frac{(P_e - P_i) r_e^2 r_a^2}{r^2 (r_e^2 - r_a^2)} \quad (6)$$

式中:  $P_e$ ——井壁外边界压力, Pa;  $r_e$ ——井壁外边界半径, m;  $r_a$ ——井孔半径, m;  $r$ ——距井中心半径, m;  $P_i$ ——流体压力, Pa。

当  $r_e \rightarrow \infty$ 、 $P_e = 0$ 、 $r = r_a$  时,井壁上的周向应力为:  $\sigma_{\theta} = -P_i$ ,即井壁周向应力与井筒内压大小相等,符号相反。

(4) 压裂液径向渗入地层所引起的井壁应力。

由于注入井孔内的高压流体在岩石破裂前,会通过一些裂隙、孔隙、节理等渗入到井壁周围的岩层中形成另一个压力区,它的作用增大了井壁周围岩石中的应力,周向应力增加值为:

$$\sigma_{\theta} = (P_i - P_s) \alpha \frac{1-2\nu}{1-\nu} \quad (7)$$

式中:  $\alpha = 1 - (C_r/C_b)$ ;  $C_r$ ——岩石骨架压缩系数;  $C_b$ ——岩石体积压缩系数;  $P_s$ ——盖层压力, Pa;  $\nu$ ——液体滤失系数。

(5) 井壁上最小总周向应力。

岩层破裂前,井壁上的最小周向应力为岩层应力、井孔内压和流体渗滤所引起的周向应力之和,即:

$$\sigma_{\theta} = (3\sigma_y - \sigma_x) - P_i + (P_i - P_s) \alpha \frac{1-2\nu}{1-\nu} \quad (8)$$

## 2.2.3 裂缝形成

### 2.2.3.1 垂直裂缝

如果地层的破裂以张力破坏,压裂时随着注入井内的流体压力不断升高,当施加在井壁上的周向力达到或超过井壁附近岩石的最小周向应力及岩石水平方向的抗张强度时,岩石则在垂直于水平周向应力的方向上产生脆性破裂,即在与井壁周向应力相垂直的方向上产生垂直裂缝。在产生裂缝的同时,注入井孔内的流体压力  $P_i$  即为地层的破裂压力  $P_F$ ,则有:

$$P_F - P_s = \frac{3\bar{\sigma}_y - \bar{\sigma}_x + \sigma_1^h}{2 - \alpha \frac{1-2\nu}{1-\nu}} \quad (9)$$

通常,盖层厚度在 400 m 以深时,垂直裂缝会发生在最小周应力的部位,由于岩层的非均质性和局部应力场不平衡的影响,裂缝往往存在不对称性。

### 2.2.3.2 水平裂缝

由于流体滤失增大了岩层的垂向应力,若应力

增量与水平方向的情况相同,那么垂向的总应力为:

$$\sigma_z = \sigma_z + \alpha(P_i - P_s) \frac{1-2\nu}{1-\nu} \quad (10)$$

当施加在井壁上的周向应力达到或超过井壁附近岩石最小垂向应力及岩石垂直方向的抗张强度时,岩石将在垂直于垂向应力的方向上产生脆性破裂,即在与井壁周向应力相平行的方向上产生水平裂缝,形成水平裂缝的盖层厚度相对较浅,通常  $> 400$  m。在产生裂缝的同时,同样注入井孔内的流体压力  $P_i$  即为地层的破裂压力  $P_F$ ,则有:

$$P_F = \frac{\bar{\sigma}_z + \sigma_1^v}{1 - \alpha \frac{1-2\nu}{1-\nu}} + P_s \quad (11)$$

破裂压力  $P_F$  大于岩石的抗张强度和地层应力时,岩石产生破裂,就形成初始裂缝,连续注入高压流体,裂缝则延伸。

## 2.3 泵压确定

泵压力构成由岩层破裂压力和管线与管柱产生的沿程压力损失减去井孔内的液柱压力,也是压裂岩层的最大压力:

$$P = P_F + \nabla P - P_y \quad (12)$$

式中:  $\nabla P$ ——管路及钻柱沿程压力损失, MPa;  $P_y$ ——井孔内液柱压力, MPa。

## 3 压裂实例分析

### 3.1 完整岩层压裂

河北省顺平县常庄大村井,成井深度 180 m,地层岩性为白云岩,静水位 88 m,该井在 80~90 m 井段存在含水裂隙,以下岩层完整。由于钻遇裂隙构造深度较浅,水井出水量偏小,因此对该井实施了压裂增水。根据含水裂隙构造倾角,设计在 125.5~135 m 和 149~158.65 m 2 个段次压裂。压裂作业时,泵排量为 15 m<sup>3</sup>/h,2 个压裂段次的岩层存在上覆盖层压力,白云岩的抗张强度较高且井壁岩层应力集中,则起裂压力最大,分别达到 19.6 MPa 和 18.7 MPa,裂缝延伸压力在 13.2~11.2 MPa 之间,压裂后经抽水试验,增水 86%,见表 1。

### 3.2 压裂、洗井并存增水

河北省唐县山阳庄村和北京市昌平区南庄村井,地层岩性分别为片麻岩和花岗岩,成井深度相对较浅,取水孔段为风化孔隙岩层段与小裂隙含水层段。压裂作业时先将井内局部岩石压裂,随着裂缝

表 1 基岩水井水力压裂综合成果

| 试验地点     | 地层岩性 | 压裂试段/m         | 起裂与裂缝延伸压力/MPa    | 增水效果/% |
|----------|------|----------------|------------------|--------|
| 河北顺平常庄村  | 白云岩  | I 149 ~ 158.65 | 19.6/13.2 ~ 11.2 | 86.0   |
|          |      | II 125.5 ~ 135 | 18.7/12.4 ~ 11.1 |        |
| 河北唐县山阳庄村 | 片麻岩  | I 44.5 ~ 54    | 7.1/5.1 ~ 4.1    | 900.0  |
|          |      | II 17 ~ 31     | 5.01/3.7 ~ 3.1   |        |
| 北京昌平区南庄村 | 花岗岩  | I 45.7 ~ 54.6  | 8.1/7.9 ~ 5.7    | 164.1  |
|          |      | II 15.4 ~ 44.6 | 4.1/4.1 ~ 3.8    |        |
| 河北顺平杨辛庄村 | 灰岩   | I 70.28 ~ 86   | 5.25/5.25 ~ 4.25 | 127.3  |
|          |      | II 118.3 ~ 131 | 6.35/6.35 ~ 5.72 |        |
| 山东临朐县大楼村 | 灰岩   | I 93.2 ~ 114   | 3.2/3.2 ~ 2.8    | 51.5   |

的延伸,压裂裂缝会将地层内的无数小裂隙和孔隙连通,增大井(孔)岩层的汇面积,使水井出水量增加。该类层的岩层受风化的影响,地层应力低,起裂压力和裂缝延伸压力也相对较低,但压裂增水效果较好(见表 1)。

3.3 高压流体洗井

河北省顺平县杨辛庄村、山东省临朐县大楼村水井,地层岩性为灰岩,因其裂隙内充填有大量黏土类矿物,其透水能力较低,经高压流体强力剪切、冲蚀和运移后,使得裂隙扩展和疏通,使含水层的渗流条件得以改善,实现增水的目的。压裂该类水井时因为没有井壁岩石应力集中,只存在管路沿程压力损失和剪切推移岩层裂隙内充填物压力,趋于稳定。

4 结论

(1)通过压裂机理分析和检测实际压裂作业时

(上接第 60 页)

进行定期校验;现场要采用准确的磁偏角和校正系数。

(4)提高工程技术人员的专业素质。工程技术人员加强学习,提高自身专业素质,减少操作中的失误,熟悉各种仪器的操作及取值方法。

(5)在施工精确对接井时,在仪器可以接收到信号前,就要求精控,掌握工具造斜能力以及地层的影响,在用主动磁导向系统引导施工时,更要做好精控工作,认真做好记录,并实时分析数据,顺利完成施工。

参考文献:

[1] 武程亮,商敬秋,陈剑垚,等.两水平井“点对点”精确中靶对接

的泵压力变化,当地层存在含水裂隙时,孔壁上各点的应力相等,压裂时类似于高压流体疏通、扩展原裂隙通道,起水力剪切、冲蚀、运移裂隙中的胶结物和岩粉,达到高压流体洗井的作用,相应的泵压力较低。

(2)较完整岩层,成孔后井壁周围岩层的应力会集中而比径向内部岩层的应力大很多,反应到压裂时,起裂压力总是大于裂缝延伸压力。相应条件下,如果覆盖层厚度较小,岩层中层理、解理、孔隙发育或为风化岩层,反应到压裂时,岩层起裂压力和裂缝延伸压力较压裂完整岩层的压力低很多。

参考文献:

[1] 王德胜.现代油藏压裂酸化开采新技术实用手册[M].北京:石油工业出版社,2009.  
[2] 李炳平,叶明成,等.基岩水井增水技术研究报告[R].2013.  
[3] 罗银福,隆正峰,谢剑飞,等.对含有启动压力梯度的达西公式的改进[J].油气井测试,2007,(5):10-11,75.  
[4] 李道品,等.低渗透砂岩油开发[M].北京:石油工业出版社,1997.  
[5] 杨新安,章梦涛.岩石水力压裂机理的研究[J].山西矿业学院学报,1991,9(1):26-31.  
[6] 刘光亚.基岩地下水[M].北京:地质出版社,1979.  
[7] 李小杰,叶成明,李炳平,等.基岩水井水力分段压裂增水技术研究与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(S1):56-61.  
[8] 李炳平,李小杰,叶成明,等.止水栓塞封隔-阀式压水器组合检测技术的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(3):69-71.  
[9] 王鸿勋.水力压裂原理[M].北京:石油工业出版社,1987.  
[10] J. L. Gidley.水力压裂技术新发展[M].北京:石油工业出版社,1995.

施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(5):4-7.  
[2] 陈剑垚,胡汉月.SmartMag定向钻进高精度中靶系统及其应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(4):10-12.  
[3] 隆东,张新刚,岳刚,等.H024U井施工工艺及精确中靶技术措施[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(3):5-8,12.  
[4] 胡汉月,向军文,刘海翔,等.SmartMag定向中靶系统工业试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(4):6-10.  
[5] 商敬秋,武程亮,刘汪威,等.无建槽直井的定向中靶作业[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(1):13-16.  
[6] 胡汉月,陈庆寿.RMRS在水平井钻井中靶中的应用[J].地质与勘探,2008,44(6):89-92.  
[7] 向军文,胡汉月.国产定向对接井精确中靶技术在盐矿中的应用[J].中国井矿盐,2010,41(5):16-18.  
[8] 胡汉月.对接井靶区建槽若干问题探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(7):20-23.