

## 井下裂缝连通技术在安棚碱矿的应用

齐铁新<sup>1</sup>, 刘建中<sup>2</sup>, 秦桂林<sup>1</sup>, 董峰<sup>1</sup>

(1. 桐柏安棚碱矿有限责任公司, 河南桐柏县 474775;

2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

**[摘要]** 介绍了在桐柏安棚碱矿, 用微地震监测结合水准测量监测与注水井连通的原生裂隙带的理论、技术、方法和监测结果, 并据此部署开采井位, 把采液井打在与注水井连通的裂隙带上, 实现了2条注、采井1 000 m井下裂隙带连通, 使安棚碱矿可以连续注水、采出碱液, 从而获得较高的生产水平和经济效益。

**[关键词]** 安棚碱矿; 湿法采碱; 井底裂缝连通; 水准测量; 微地震监测

**[中图分类号]** TQ114 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)07-0063-05

安棚碱矿是集开采、加工于一体的较大型制碱企业, 设计日产碱 800 t。采用湿法采碱, 即把清水注入地下, 溶碱后汲出, 经蒸发浓缩处理提取出碱 ( $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )。初期曾试用单井对流技术, 自中管注入清水, 从环套空间汲取碱液; 由于注入的清水在地下停留时间过短, 虽经二次循环, 碱液仍低于合格质量浓度 (73.5 g/L), 该技术被放弃。以后曾试用单井吞吐技术, 注入清水后, 焖井, 再把碱液汲出; 采用注水 5 h, 焖井 4 h, 返卤 3 h 的工作制度, 碱液质量浓度可以满足生产需要 (110~120 g/L), 但生产过程间断。由于注入清水接触面积小, 碱液含碱浓度递减快, 也很难完成设计产量。如何连续、高效地汲出合格碱液, 成为安棚碱矿的生产瓶颈。因此, 实现注入井与采出井长距离井底裂缝连通是解决这一问题的关键技术。为此, 安棚碱矿与中国石油勘探开发研究院合作, 由中国石油勘探开发研究院做基本应力场研究, 并提出井底裂缝连通理论及方案, 请多年从事油田人工裂缝监测工作的北京科若思技术开发有限公司负责现场监测。由监测确定与注水井连通的裂缝, 把采液井打在裂缝上, 以实现井底裂缝连通<sup>[1]</sup>。

设计井底距离 1 000 m, 分二段进行连通。即在 S31 井注水, 用微地震监测方法测定裂缝后打出

S32 井; 再在 S32 井注水, 检测出裂缝后打出 S33 井; S31 井与 S33 井间的井底距离大于 1 000 m。目前已实现 2 条 1 000 m 裂缝带连通, 一条自 S31 井经 S32 井到 S33 井, 另一条自 S41 井经 S42 井到 S43 井。井底裂缝连通的实现, 使碱矿日产碱达 900 t, 已超额完成设计产量, 经济效益也大幅提高。

### 1 井底裂缝连通理论及监测技术

鉴于人工压裂裂缝展宽很小, 通常在毫米量级; 目前的裂缝方位监测精度在  $\pm 15^\circ$ , 钻井水平中靶偏差 30 m; 实现人工压裂裂缝连通的可能性很小。矿区岩性为泥质白云岩, 岩心观测表明, 矿区存在有规律的原生裂隙条带, 原生裂隙条带展宽较大, 可达数米到数十米, 由裂隙带实现井底连通的可能性较大, 笔者把裂隙带井底连通称为亚连通, 采用了井底亚连通理论; 不监测压裂过程, 而是监测高压注水过程。

监测使用由北京科若思技术开发有限公司开发并拥有独立知识产权的微地震裂缝监测系统。该系统有 6 个分站, 无线传输, 自动识别微地震信号, 实时处理监测结果。前端检波器是由哈尔滨工程力学所专门为此项目研制的单分向微地震仪, 微地震仪垂直放置在监测区周围的地面上, 保证其连线把

监测区包围起来,且只记录P波。系统前端检测灵敏度为 $1\mu\text{V}$ ,频响范围为 $50\sim 200\text{Hz}$ 。

微地震信号自动识别采用:幅度、频率、前包络、后包络、信号升起特征、拐点特征及其导波的上述特征计12个判别标准<sup>[2]</sup>。在任意道上识别出可用信号后,在台站分布范围所限定的时段内,与其他道做互相关,只有4个以上台站记到的信号才作为信号进行处理,这排除了一些固定干扰,如过车,它不可能在千分之一秒的时段内穿过4个以上台站。

采用前包络反向延伸技术提高时间服务精度,在采样率 $1000\text{次/s}$ 时,时间服务精度优于 $0.0002\text{s}$ 。前包络反向延伸技术如图1所示,做一包络线,包络线与横轴的交点 $q$ 是微地震波到时。

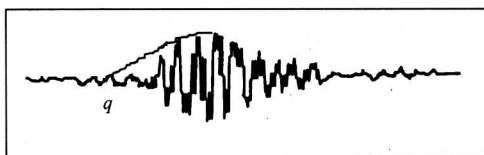


图1 微地震波到时确定方法示意图

Fig.1 Schematics for specifying the moment when the micro-seismic signal arrives

包络反向延伸法提高到时精度的理论依据如图1所示:提取出包络的各个极大值点,用一个高次方程拟合包络,再给定包络反向延伸线与时间轴的交点,该交点就是微地震波的初至时刻。该交点是个数学点,有足够的分辨精度,可以分辨出万分之一的到时,考虑到微地震信号的噪音背景和失真,实际上认定的微地震到时的分辨率为 $0.2\text{ms}$ 。到时的具体计算过程如下:

采用线性方程拟合地震波的到时,在有些条件下难以满足精度要求,故采用二次曲线拟合微地震波到时:

$$t = ay^2 + by + c \quad (1)$$

在微地震波形上选出三组 $(t, y)$ 值,代入式(1)中,有:

$$\left. \begin{aligned} t_1 &= ay_1^2 + by_1 + c \\ t_2 &= ay_2^2 + by_2 + c \\ t_3 &= ay_3^2 + by_3 + c \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(2)中: $y_1, y_2, y_3$ 是微地震波的极大值点, $t_1, t_2, t_3$ 是相应的到时, $a, b, c$ 是待求的系数, $c$ 就是微地震波到时。

## 2 监测过程

以往在油田监测高压注水裂缝是以注水井为监测目标,监测自注水井出发的裂缝,以给出裂缝方位、长度及注水前缘。安棚碱矿监测的目的是精确给出裂缝经过的位置,给出可以打在裂缝上的井位。监测注水井,给出离注水井 $500\text{m}$ 外的裂缝位置是很难办到的。实际监测过程是根据应力与裂缝的有关理论,认为在 $2000\text{m}$ 深度,有效原生裂缝的走向与最大水平主应力方向的夹角不大于 $45^\circ$ 。在与最大水平主应力走向垂直的方向布置了一条高精度水准测线,测点按顺序由西北向东南排列,测试使用德国产NI-002型水准仪,测试精度为 $0.05\text{mm}$ ,水准测线如图2所示。期待给出裂缝过测线的大体位置,以便使用微地震技术直接监测裂缝到达的位置,提高给出井位的可靠性。

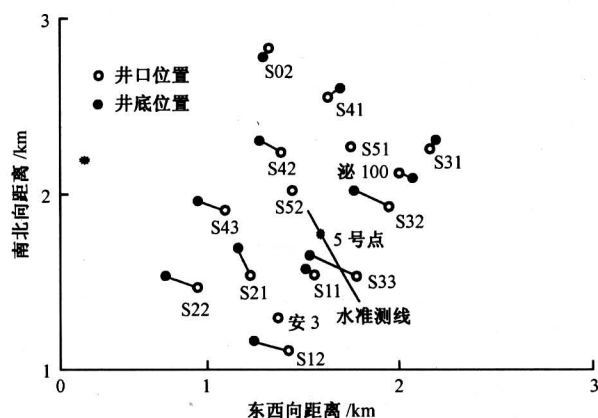


图2 矿区井位与水准测线分布

Fig.2 Well locations and the datum line

图2中,横坐标沿东西向,向东为正;纵坐标轴沿南北向,向北为正;格值长度 $1\text{km}$ 。

用水准测试方法监测注水裂缝前缘,可以按弹性半空间理论分析裂缝内表面的液压作用引起的地面变形。模型假设如图3所示: $y_1$ 是裂缝面的顶部深度, $y_2$ 是裂缝面的底部深度,向下为正; $x$ 方向沿裂缝面法向;采用直立裂缝面假设。

分析过程可以写为:

在图3的模型假设下,由弹性半空间理论分析地面形变:

点力作用下的径向位移可以写为

$$U = \frac{p}{4\pi\mu} \left[ \frac{rx}{R^3} - \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{r}{R + (R + x)} \right] \quad (3)$$

取平行于裂缝面法向的直立截面,在平面应变

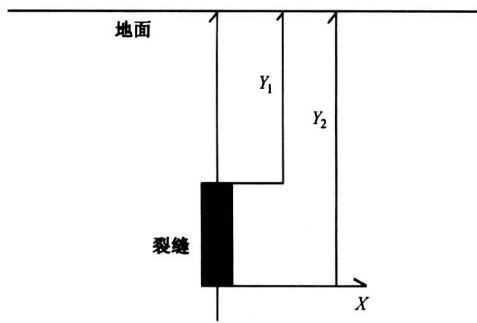


图 3 水准测试采用的分析模型

Fig.3 The mechanics model used in datum line measurement

假设下：

式 (3) 中的  $r = x; R = \text{sqr}(x^2 + y^2)$

实际水准测试时是监测地面形变，把式 (3) 的径向位移写成沿  $y$  轴的形变，式 (3) 改写为

$$U_y = \frac{p}{4\pi\mu} \left[ \frac{x^2}{r^3} - \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{x}{r + (r + x)} \right] \frac{y}{r} \quad (4)$$

面力作用时，应该把式 (4) 积分：

$$U_y = \int_{y_1}^{y_2} \frac{p}{4\pi\mu} \left[ \frac{x^2}{r^3} - \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{x}{r + (r + x)} \right] \frac{y}{r} dy \quad (5)$$

实际用来计算直立裂缝面受液体压力形成的地面垂直形变公式为：

$$U_y = \frac{p}{4\pi\mu} \left\{ -\frac{y_2 |x|}{2r^2} + \frac{3\mu + \lambda}{2(\mu + \lambda)} \text{arctg} \frac{y_2}{|x|} - \frac{\mu}{\lambda + \mu} [\ln(y_2 + r)] + \frac{y_1 |x|}{2r^2} - \frac{3\mu + \lambda}{2(\mu + \lambda)} \text{arctg} \frac{y_1}{|x|} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} [\ln(y_1 + r)] \right\} \quad (6)$$

式中， $p$  是注水时裂缝面增加的液压，安棚碱矿的实际地面注水泵压为 20 MPa， $\mu, \lambda$  是拉美常数，取为  $\mu = 1 \times 10^7 \text{ N/cm}^2; \lambda = 3 \times 10^7 \text{ N/cm}^2$ ，顶部深度 2 000 m，底部深度 2 100 m，液体压力 20 MPa，可计算出该参数下地面形变随距离的变化 (图 4)。由图 4 可以看出，在裂缝正上方，位移为负值，地面下沉；之后位移增大，至 200 m 以外，又转为下降，直至趋于零。

图中  $x$  轴沿人工裂缝面法向，单位为米； $y$  轴表示地面垂直位移，单位为 0.001 mm。

采用碱矿的实际生产和岩石实验数据，计算出的地面相对垂直位移近 0.10 mm。由于地表覆盖层存在明显的非弹性，变形应小于理论值；但由储层

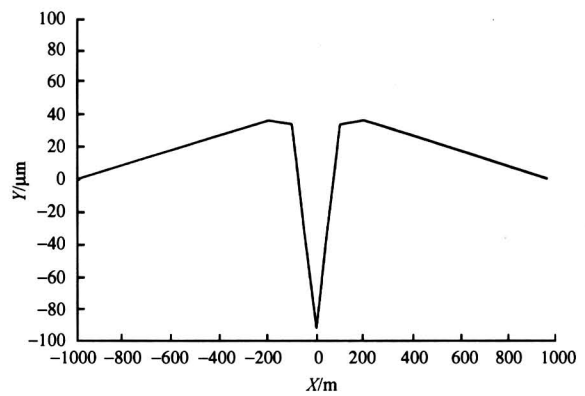


图 4 地面理论垂直形变分布

Fig.4 Vertical displacement distribution by theory

向上，岩石的拉美常数变小，有一个变形放大作用，实际测到的地面垂直位移比理论值约大 9 倍。

结果表明，使用高精度水准测量技术，测点足够密，判断裂缝走向、位置、形态是一种现实、可行的技术途径。采用标准安装的地倾斜仪，可能会有更好的效果。

依据上述理论并分析水准测试结果，在 5 号点，注水时与汲水时相比，地面降低 0.91 mm，其两侧均表现为升高 (表 1)，注水时地面注水泵压为 18.5 MPa。注水时的水准测试结果 (mm) 是注水时后一个测点相对前一个测点的地面高差；汲水时的水准测试结果 (mm) 是汲水时后一个测点相对前一个测点的地面高差；测线高差是注水时与汲水时的高差，累积高差是注水时与汲水时测点相对不动点 B00 的高差，相对高差是累积高差减去累积高差的平均值。不动点 B00 选在矿区以外，相对高差凸显了地面的相对位移。由表 1 可以看出，5 号点沉降明显，大于水准测试精度，与其相邻的 6 号点也有沉降；若取 5 号点的地面形变为零，其两侧均表现为隆升，判断受注水影响的裂缝经过 5 号点附近。

### 3 微地震监测结果

为了进一步判断注液裂缝经过的位置，我们以 5 号点为中心，布置了微地震台网，进行微地震监测，监测时的地面注水压力是 18.5 MPa。用微地震震源分布表示的实时监测结果如图 5 所示，图中原点即是 5 号点。以微地震点分布为唯一依据给出的监测拟合结果如图 6 所示。由图 5、图 6 可以看

出, 有一条裂缝带自 S32 井经过 5 号点东侧, 这与水准测量结果一致, 5 号点及东侧的 6 号点均表现为沉降。笔者选择了沿裂缝与 S32 井相距约 500 m 的位置部署了 S33 井井位, 由图 6 可以看出, S33 井在与 S32 井相连的水流区上。由此方法, 我们提供了两口井的井底坐标 (表 2)。碱矿据此打了 S33, S43 两口井。

表 1 水准测试结果

Table 1 Measurement results of datum lin

测点	注水时的测试结果/mm	汲水时的测试结果/mm	注水与汲水时的高差/mm		
			测线	累积	相对
B00 - B01	-1 165.20	-1 165.05	-0.15	-0.15	0.169
B01 - B02	-1 002.88	-1 002.80	-0.08	-0.23	0.089
B02 - B03	-395.35	-395.32	-0.03	-0.26	0.059
B03 - B04	-334.42	-334.55	0.13	-0.13	0.189
B04 - B05	-563.78	-563.00	-0.78	-0.91	-0.591
B05 - B06	507.85	507.28	0.57	-0.34	-0.021
B06 - B07	-1 958.22	-1 958.30	0.08	-0.26	0.059
B07 - B08	-1 837.20	-1 837.05	-0.15	-0.41	-0.091
B08 - B09	-897.75	-897.98	0.23	-0.18	0.139

S33 和 S43 井于 2002 年 8 月投产。S43 井投产 2 个月后, 即达到月产液近 20 000 m<sup>3</sup>, 卤水浓度为 141.20 g/L, 但在 11 月份, 因井底塌陷而停产。井底塌陷也从反面证实了该井确实打在裂隙带上, 该矿区为强度较大的泥质白云岩, 通常是不会垮塌的。S31 井、S32 井、S33 井正常生产, S31 井注水, S32 井、S33 井采液, S31 井长期注水压力不升高, S33、S32 井长期连续采液压力不降低, 表明 3 井确实已经连通。生产状况如表 3 所示。

表 2 建议的新井井底坐标

Table 2 Suggested bottom coordinates of new wells

	x/mm	y/mm
S33	3 606 676.29	19 704 481.29
S43	3 606 967.70	19 703 990.20

由表 3 可以看出, S33 井、S32 井产液量大, 浓度高, 体现出井底裂缝连通生产的优越性。井底裂缝连通生产, 初期产量会随投产时间变长而增大, 2004 年产量又上了一个新台阶, 目前碱矿月产量为 30 kt。

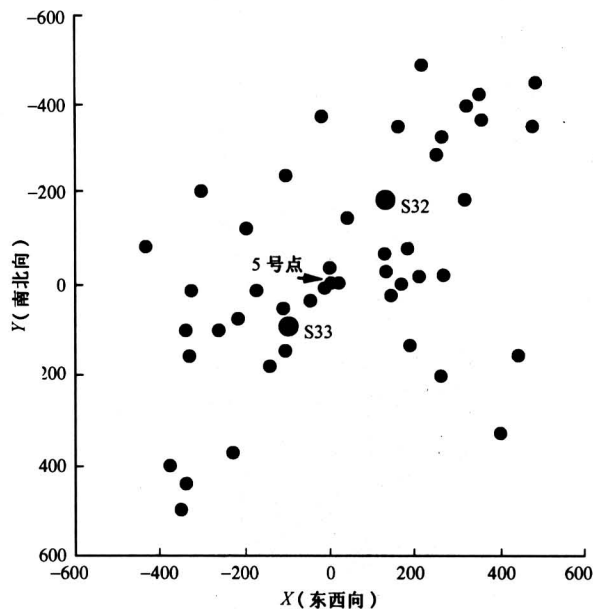


图 5 高压注水实时监测结果

Fig.5 Real-time monitoring results of fractures

表 3 S32 井及 S33 井生产状况

Table 3 Production of well S32 and S33

月份 年月	S32		S33	
	产量 /m <sup>3</sup>	浓度 /g·L <sup>-1</sup>	产量 /m <sup>3</sup>	浓度 /g·L <sup>-1</sup>
2002-08	28 423	155.66	330	—
2002-09	27 216	150.67	1 635	97.98
2002-10	29 929	155.51	350	131.79
2002-11	28 485	155.03	1 130	121.09
2002-12	32 945	159.09	10 005	140.77
2003-01	18 011	169.04	12 405	143.28
2003-02	10 632	167.14	3 930	150.13
2003-03	5 860	102.37	5 125	144.62
2003-04	27 332	175.70	17 595	147.40
2003-05	31 921	161.60	13 515	150.80
2003-06	34 250	168.00	19 615	148.10
2003-07	35 508	164.60	28 845	142.20
2003-08	31 838	165.40	24 240	145.90
2003-09	31 595	169.40	22 250	148.00
2003-10	34 790	177.50	22 350	146.80
2003-11	27 720	167.50	16 590	151.20
2003-12	31 270	162.50	22 350	146.80
2004-01	22 135	173.1	17 050	150.8
2004-02	33 350	173.8	23 400	154.21
2004-03	26 110	176.25	17 850	162.43
2004-04	31 250	175.68	14 130	163.43

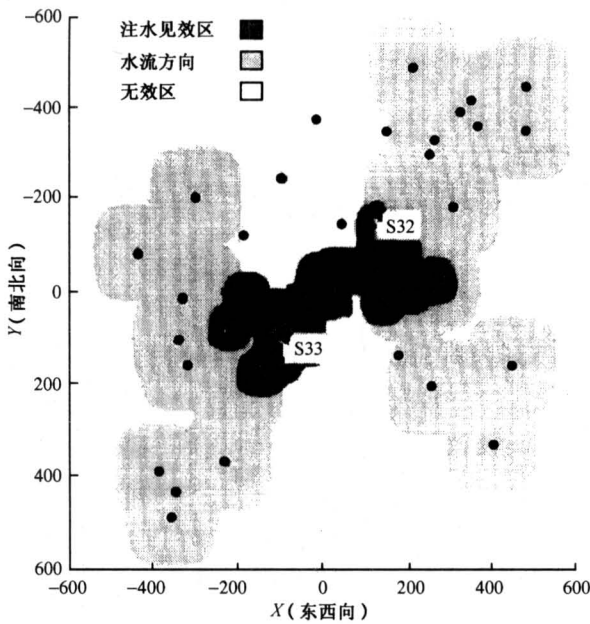


图 6 高压注水实时监测拟合结果

Fig.6 Fitting results of real-time monitoring results of fractures

### 4 结语

安棚碱矿用目前国际上广泛使用的微地震监测技术，结合水准测量方法，在高压注水的条件下，测试与注水井相连的原生裂隙带，以便把采液井打在裂隙带上，实现连续注、采。生产实践表明，监测理论、方法、技术是成功的，实现了二组井的井下千米裂隙带连通，极大地提高了碱矿生产水平及效益。预计该技术、配套方法在其它生产领域也会有广泛的应用。

#### 参考文献

[ 1 ] 刘建中, 等. 用微地震法监测油田生产动态[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(2):71 ~ 73.  
 [ 2 ] Philips W S, Rutledge J T, Faibanks T D, et al. Reservoir fracture mapping using microearthquakes: Two oilfield case studies [ J ] . Reservoir Evaluation & Engineering, 1998, 114 ~ 121

## Application of Underground Fracture Connection Monitoring in Anpeng Alkali Mine

Qi Tiexin<sup>1</sup>, Liu Jianzhong<sup>2</sup>, Qin Guilin<sup>1</sup>, Dong Feng<sup>1</sup>

(1. Anpeng Alkali Corp., Tongbo, Henan 474775, China;

2. CNPC Exploitation and Production Institute, Beijing 100083, China)

[Abstract] In this paper, the theories, techniques, methodologies, and results of monitoring primary fractures connecting to the injection well in Anpeng Alkali Mine are presented, which combines micro-seismic monitoring with leveling survey techniques. By these theories, techniques and methodologies, the production well was located within the fractured band connecting to the injection well at a depth of over 1 000 meters, which makes it possible for continuous water injection and alkali solution production in Anpeng Alkali Mine.

[Key words] Anpeng Alkali Mine; wet process for alkali extraction; underground fracture connection; leveling survey; micro-seismic monitoring .