

# 陶庄煤矿272水采区冲击地压 的发生原因和条件的探讨

枣庄矿务局陶庄煤矿  
枣庄矿务局科技处  
山东矿院矿压研究室

一九八三年十二月

# 前 言

枣庄矿务局陶庄煤矿一九六六年开始发生冲击地压，到八三年十月共发生破坏性的冲击地压（造成人员伤亡和巷道毁坏）134次，其中水采发生113次。事实说明，陶矿水采区是冲击地压发生频度高、强度大、严重威胁人身安全和生产的灾区。为了研究冲击地压发生的条件与规律，探索它与水采矿压显现和采场上覆岩层运动间的关系，以便有针对性地采取防治措施，实现安全生产。我们从一九八〇年二月起，重点在冲击地压频繁发生的272水采区进行了观测，共设动态仪188台次，获得四千余个数据。通过两年多的研究，得到如下初步认识：

（一）陶庄水采区冲击地压以顶板岩层的重力为主要力源，属重力型冲击地压，其发生的客观条件是：

1、煤层的煤质坚硬（普氏硬度系数 $f=1.5\sim 2.0$ ），含水率低（ $1.0\sim 2.3\%$ ），具有产生冲击的危险性；

2、顶板为厚20~40米的中粒石英砂岩，允许有较大的暴露面积，因而能够积聚重力向煤层传递；

3、底板强度较高，在薄层的砂质页岩下部是具有高强度的中粒石英砂岩，有利于煤层积聚能量；

4、开采深度较大，陶庄煤矿冲击地压是从开采-420水平开始的。其中，-420水平以上只是在两侧采空的上山煤柱中发生。-420水平以下（深度大于480米）正常开采过程中冲击地压才频繁起来。因此，开采深度较大是冲击地压发生的重要条件之一。

（二）开采活动引起冲击地压的原因，可大致归纳为以下两种情况：

1、在支承压力的峰值区开掘回采巷道（包括沿着高应力区开掘或者局部通过高应力区间），造成煤体极限平衡状态的破坏和支撑约束条件的改变，从而引起冲击地压。轻者出现在掘进头附近，重则可波及到临近已开出的巷道。

2、老顶暴露到一定的面积，特别是岩梁裂隙等显著运动发生时，在煤层上形成新的应力高峰，从而在处于该部位的巷道（特别是巷道交岔口等支承能力薄弱的部分）中发生冲击地压。显然，这类冲击地压有明显的周期性，在既定的开采程序下有既定的规律性。

（三）多数冲击地压的发生与开采程序的选择有关。因此，只要搞清应力集中的原因，找到高应力区所在的位置及其转移的条件，在此基础上采用合理的开采程序，大幅度降低冲击地压的频度（万吨煤发生的次数）和强度（破坏严重程度）是可能的。研究实践证明比较合理的开采程序设计应当是：

1、能够避免相向采煤；

2、保证顶板活动的规律性，把老顶暴露面积引起又水压力集中的情况减少到最低限度；

3、在正常开采过程中，特别是老顶来压时刻，避免在支承压力的高峰区（高应力区间）掘进枪眼等回采巷道。

（四）研究实践证明，支承压力高峰位置的转移是以煤层的压缩和破坏也就是老顶岩梁的沉降为条件的。支承压力高峰区应力的再次集中则直接与岩梁的裂断等显著运动有关。因此，采用井下岩层动态观测研究方法，通过观测老顶岩梁运动的压力显现，予测和推断支承压力高峰区的位置、予测和推断岩梁裂断的时间和应力集中的部位是有可能办到的。

（五）通过选择合理的开采程序来减少煤层上压力集中的部位，并实现在支承压力降低区开掘回采巷道，加上通过岩层动态予测老顶来压所引起的冲击地压位置和时间，并采取相应的措施，实现水采区安全生产也是有可能的。

# 目 录

- 一、272观测区的概况
- 二、冲击地压发生的情况
- 三、关于冲击地压发生的原因及其防治措施
- 四、关于支承压力的分布问题
- 五、关于支承压力和冲击地压的预测问题

## 一、272水采区的位置和范围

### 1、272水采区的位置和范围

272水采区位于陶庄井田的东北部。东邻本区三号上山已采区老塘，西及西北与2518、2519、2520、271老塘相接，南为2701早采工作面老塘。可见，本区为一、三面采空的大煤柱。走向长800米，倾斜宽为400米，垂深为496~644米。（见图一）

### 2、煤层赋存状况

该区可采煤层为二层煤，倾角 $6^{\circ}\sim 18^{\circ}$ ，厚度2~5.5米，局部冲刷地区厚度为1.2米左右。煤质中硬， $f=1.5\sim 2.0$ ，单向抗压强度为 $156\sim 203\text{kg}/\text{cm}^2$ ，煤层的自然含水率为1.0~2.3%，煤层顶板为中粒石英砂岩，厚度为20~40米，钙质或砂质胶结，岩性坚硬，不易冒落，其单向抗压强度为 $1300\text{kg}/\text{cm}^2$ 。底板中，直接底为0.4米左右的粘土页岩，其下为厚2~3米的灰黑色砂质页岩，单向抗压强度为 $294\text{kg}/\text{cm}^2$ ，再下为石英砂岩。

### 3、采煤方法与巷道布置

本区为270下山的一翼。在本区西翼边界附近，伪斜布置两下山，即270下山。两下山均沿顶掘进，间距25米左右。在采区底部按流水坡度掘进了270总水道。然后由总水道每隔130~180米左右，布置一对间距为10~30米的上山，其后以斜长50米划分小阶段，在小阶段内布置水道，并沿水道每隔15米仰斜掘进枪眼。水道、枪眼均沿底板掘进，一梁三柱木棚子支护，棚距0.6米。

本区均采用双面漏斗式采煤。采煤程序：四号上山是一、二号水道两个小阶段联合采煤，三号水道小阶段单采，四号与五号、六号与七号单采交替；五号上山基本上为单采交替；六号上山部分地采用了走向短壁，从上至下顺序开采。

### 4、观测目的和方法

#### （1）观测目的

①探索水采区在不同程序采煤时上覆岩层的运动和矿压显现规律，研究不同开采程序条件下冲击地压发生情况的差异，寻求合理的开采程序方案。

②研究冲击地压发生前后矿压显现的规律，寻求预测预报的方法，为安全生产服务。

#### （2）观测方法：

本区采用动态观测研究方法，做法是：在每一条阶段水道设置一条动态仪观测线，为了少占用仪器，一般每条线先设三台，每台间距15米左右。当工作面推至距动态仪测点5米左右撤点，依次在前方设点。在阶段水道与上山水道相接处，设固定观测点、观测沿走向方向支承压力影响范围。动态仪设置后，每天定时下井观测，记录24小时内顶底板移近量，观测并记录发生冲击地压前后及其发生时刻的顶底板移近量，冲击地压发生地点、时间，巷道毁坏情况、顶板冒落或悬顶面积、巷道中矿压显现情况。按点填好图，以便综合分析。

## 二、冲击地压发生的情况

### 1、冲击地压发生的位置

水采冲击地压多发生在临近老塘的第二个枪眼（走向距老塘22米）的中上部（距上方老塘10~25米），除老顶来压引起支承压力突然变化造成的冲击地压外，大部分冲击地压发生在处于高应力区的掘进头附近。从272水采区四、五号上山冲击地压发生情况表中可以清楚地看到每一次冲击地压发生地点到两侧老塘的距离。（见表一）

图二为发生冲击地压的两个实例。图二（a）中冲击地压发生地点沿走向距老塘22米，距上方老塘18米。图二（b）中冲击地压发生地点沿走向距老塘22米，距上方老塘20米。

图三为270煤柱西翼新掘上山水道（距老塘15~18米）发生冲击地压的情况。由图可知，随着上山水边掘进，在上山水道和与其相距25米的270正巷中多次发生冲击地压，造成巷道严重破坏。这是因为新掘上山水道处于高峰压力区内。

实践证明：在低应力区无论是沿走向还是沿倾向掘靠近老塘的第一个枪眼（距老塘约7米）都没有发生过冲击地压。图四（a）为沿倾向掘第一个枪眼，图四（b）为沿走向掘第一个枪眼。

## 2、冲击地压发生的时间

观测证明，很大一部分的冲击地压是在老顶来压时发生的。表二为272水采区四、五号上山老顶来压与冲击地压发生的情况，对照表一可知：四、五号上山开采过程中发生的38次冲击地压，就有18次是来压期间（按三天计）发生的，占47%。其中来压当天发生的冲击地压有10次，来压后一天发生的有6次，来压前一天发生的有2次。图五为八〇年七月七日老顶来压时发生冲击地压的情况，破坏地点距煤壁8~20米，坏棚19架，底板鼓裂。此时并没有在附近开掘巷道，因此这是一次来压造成冲击地压的典型实例。

除了老顶来压时发生冲击地压外，当掘进头进入高应力区时也经常发生冲击地压，特别是在掘进放炮后或放水冲煤时更容易发生，这是因为此时处于高应力区的煤体的受力状态突然变化（放水冲煤使巷道附近的煤体内摩擦角及煤体与顶底板间的摩擦系数突然减小），支承能力突然降低的缘故。

## 3、冲击地压与开采程序的关系

开采程序不合理，留下高应力的孤立煤柱，回收时就难免发生冲击地压，例如在270煤柱中就发生了18次冲击地压，造成破坏地点25处。

除了上述孤立煤柱中易发生冲击地压外，相向采煤也经常发生冲击地压，如六号上山开采中发生的16次冲击地压大部分是在这种情况下产生的，如图七所示。这种向采空区方向开采的方式使煤体实际上处于三侧老塘的支承压力作用下，图八是最典型的实例。

开采顺序不同，冲击地压的发生情况也不同，如272水采区四号上山曾进行过三种开采顺序的试验：

①单一水道回采的三号水道发生过8次冲击地压，如图九所示。该采场尺寸小，走向长160米，倾斜长50米，大部分煤体处于上方老塘的支承压力作用下，并且采煤、掘进必须平行作业、相互干扰大。

②两个水道交替采煤的四、五号水道与六、七号水道各发生过两次冲击地压，如图十所示。该采场尺寸较大，走向长160米，倾斜长100米，五号水道和七号水道不受上方老塘支承压力的影响，并且采煤与掘进不在同一水道，相互干扰小。

③两个水道同时推进联合采煤的二号水道只发生过一次冲击地压（因一号水道处于上阶

段的支承压力带内，其煤体受力与此开采顺序无关，固未计算在内），如图十一所示。该采场尺寸较大，走向长160米，倾斜长100米，二号水道避开了上方老塘形成的支承压力。但采煤与掘进有时仍有干扰。

通过比较上述三种不同的开采顺序时冲击地压的发生情况可以清楚地看到：单一水道回采最容易发生冲击地压。

### 三、关于冲击地压发生的原因及其防治措施

冲击地压可以简单看成是承受高压的脆性煤体极限平衡状态破坏而向自由空间突然释放能量的动力现象。煤体达到极限平衡状态以及极限平衡状态的破坏有两种情况：一种是在既定（原有）约束条件下承受的压力大幅度增加（即应力增加），另一种则是在煤体承受的压力并没有大幅度增加的情况下，支撑约束条件发生了重大的变化。陶庄272水采区的实践说明上述两种情况是同时存在的。其中：

1、在高应力区（支承压力的高峰区）开掘回采巷道（枪眼）改变了煤体的约束条件（层面方向约束力消失）造成煤体极限平衡状态的破坏引起冲击地压。

从前述272水采区发生冲击地压的情况可以明显看出，绝大部分冲击地压都是在距煤壁10米以外的位置开掘枪眼发生的。相反，在距煤壁10米以内的地方开掘枪眼都没有出现过冲击地压。此外，在老顶来压所引起的冲击地压中，也没有一次发生在这种部位。这一情况充分说明，在272水采区无论是沿倾斜或是沿走向方向的支承压力分布都存在着两个区域。即煤体已经进入塑性破坏状态的低应力区和煤体保持原支承能力在高压作用下的压力高峰区。从理论和实践上可以证明，在272水采区的条件下，低应力区的范围从煤壁算起8~10米以内。由于这个区域煤层的支承能力已经削弱，不能再积聚应力（或能量），因此即使在其中开掘巷道引起煤体支撑约束条件的改变（显然这个改变幅度也是不大的）也不会出现突然破坏的动力现象。相反在高应力区也就是距煤壁10~30米左右的部位掘进巷道，由于煤体承受的压力很高，约束条件一旦改变（层面方向约束消失，煤体由原三向受力状态变为双向或单向受力状态）冲击地压就不可避免。

2、由于老顶暴露到一定面积，特别是产生裂断等显著运动在煤体上造成新的应力集中从而引起冲击地压。

从272水采区正常推进过程中发生冲击地压的情况可以看出，老顶来压期间在高应力区掘进枪眼极易发生冲击地压，在已存在的巷道中也可造成冲击地压。如80年7月7日在老材料道中发生的冲击地压就是一个具体的事例。这种老顶来压在现有巷道中造成冲击地压的原因就是在该部位的煤体上形成新的应力集中的结果。尽管此时煤体的约束条件并没有产生变化，但增加的应力破坏了已存在的应力释放空间煤壁的极限平衡条件。

针对上述情况，解决陶庄水采冲击地压必须研究的问题包括以下四个方面：

1、在理论上和实践上搞清支承压力分布规律问题，包括支承压力形成的原因，支承压力高峰的位置，可供开掘巷道的低应力区的界线以及应力高峰区转移的条件。

2、采取正确的措施，实现在低应力区开掘回采巷道，并力争把必须通过高应力区的巷道减少到最低限度。

3、对可能发生冲击地压的地点和时间进行预测，包括根据理论研究和实践经验对可能发生冲击地压的地点进行预测，以及采用顶板动态观测方法对老顶来压过程中可能出现冲击地压的地点和时间进行预测等。

4、在预计可能发生冲击地压的地点提前采取措施，避免损失。

通过两年多来对上述问题的研究和实践，我们认为下列措施对于防治水采冲击地压是有效的。

1、坚决避免相向采煤和出现被迫用水采回收煤柱的局面。在这种情况下，由于煤柱中应力很高，积聚了大量的弹性潜能，深入煤柱中的任何巷道都有可能发生冲击地压（陶矿在煤柱中发生冲击地压40次，占134次的30%）。

2、采取多水道联合推进、交替采煤的程序，必要时采取煤层注水扩大低应力区的范围等辅助措施，力争实现在低应力区掘进回采巷道。272采区四号上山不同的开采程序的不同效果充分说明了这一点，如果这个措施能够完全实现，冲击地压可减少40~50%。

3、在预计可能发生冲击地压的部位（通过倾斜支承压力高峰带和老顶来压可能发生冲击地压的部位）采用空邦掩护支架等特殊支护方式，避免出现伤人事故。

上述措施中，开采程序是关键，只要开采程序合理，70~80%的冲击地压是可以避免的。我们提倡三个水道联合推进、交替采煤，如图十二所示。（a）→（b）→（c）

这样掘进与回采就可以分别在三个阶段内进行、相互干扰小，更重要的是可以实现在低应力区掘进枪眼（掘距壁约7米的第一个枪眼），理论计算表明该处为塑性区，实践证明也是如此，在该处掘进时没有发生过冲击地压，且支架受力较小。

#### 四、关于支承压力的分布问题

从冲击地压的发生原因及其在原因分析的基础上提出的防治水采冲击地压的措施说明，防治水采冲击地压关键是从理论和实践上解决支承压力分布问题（包括高峰区位置、可供掘进巷道的低应力区界线以及压力转移的规律和条件）。

由于采动空间的存在，上覆岩层就要将其重力向煤体上传递，使煤体压缩。传递来的力越大，煤体的压缩量就越大，支承压力的影响范围也就越大。根据实测资料，煤体的压缩量（顶底板移近量）大致服从抛物线：

$$K_x = \frac{K_0}{S_A^2} (S_A - x)^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中： $K_x$ ——距煤壁 $x$ 米处煤体的压缩量（米）；

$K_0$ ——煤壁处煤体的压缩量（米）；

$S_A$ ——支承压力的影响范围（米）；

$x$ ——到煤壁的距离（米）。

由于煤体的压缩量与支承压力有必然的联系，因此我们以煤体的压缩量作为联系的条件，利用弹塑性力学推导出支承压力的近似计算公式，并计算出塑性区范围和高峰压力区范围。



(一) 沿走向支承压力的分布

1. 煤壁前方没有枪眼时

煤体的支撑能力随着到煤壁的距离不同而异, 处于煤壁附近的煤体为塑性状态, 而远离煤壁的煤体为弹性状态。

在塑性区 ( $x \leq x_0$ ):

$$\sigma_y = \left( \sigma_0 + \frac{c}{f} \right) \left( 1 + \frac{\alpha x}{m - k_0} \right)^{\frac{2fg}{\alpha}} - \frac{c}{f} \dots \dots \dots (2)$$

- 式中:  $\sigma_y$ ——铅垂方向压应力 ( $\text{kg/cm}^2$ );
- $\sigma_0$ ——煤体的残余抗压强度 ( $\text{kg/cm}^2$ );
- $c$ ——煤层与顶、底板的粘结力 ( $\text{kg/cm}^2$ );
- $f$ ——煤层与顶、底板的摩擦系数;
- $\alpha$ ——煤壁处的顶板下沉角, 因 $\alpha$ 很小,

可按下列式计算:

$$\alpha = - \left. \frac{dk_x}{dx} \right|_{x=0} = \frac{2k_0}{S_A} \dots \dots \dots (3)$$

- $m$ ——煤层厚度 (米);
- $g$ ——系数, 按下式计算:

$$g = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \dots \dots \dots (4)$$

$\varphi$ ——煤层内摩擦角, 其余符号意义同前。

研究支承压力分布规律的目的, 在于确定低应力区及其压力高峰区。塑性区的范围 $x_0$ 由下式确定:

$$\left[ \left( \sigma_0 + \frac{c}{f} \right) \left( 1 + \frac{\alpha x_0}{m - k_0} \right)^{\frac{2fg}{\alpha}} - \frac{c}{f} \right] \left[ 1 - \mu^2 - \frac{\mu + \mu^2}{g} \right] + \frac{\sigma_0 (\mu + \mu^2)}{g}$$

$$= \frac{Ek_0}{mS_A^2} (S_A - x_0)^2 + \frac{\gamma H (1 - \mu - 2\mu^2)}{1 - \mu} \dots \dots \dots (5)$$

- 式中:  $\mu$ ——煤体的泊松比;
- $E$ ——煤体的弹性模量 ( $\text{kg/cm}^2$ );
- $\gamma$ ——上覆岩层的平均容重 ( $\text{T/m}^3$ );
- $H$ ——开采深度 (米);
- $x_0$ ——塑性区范围 (米), 其余符号意义同前。

将实测值 $k_0 = 0.1$ 米,  $S_A = 50$ 米 (前方无枪眼时) 及有关试验数据 ( $E = 56000 \text{kg/cm}^2$ ,  $\mu = 0.35$ ,  $m = 4$ 米,  $\varphi = 10^\circ$ ,  $c = 10 \text{kg/cm}^2$ ,  $f = 0.3$ ,  $H = 550$ 米,  $\gamma = 2.5 \text{T/m}^3$ ,  $\sigma_0 = 50 \text{kg/cm}^2$ ) 代入 (5) 式, 计算出塑性区的范围为13.5米。

在弹性区 ( $x_0 \leq x \leq S_A$ ):

$$\sigma_y = \frac{\mu}{1-\mu-2\mu^2} \left[ \left( \frac{1-\mu^2}{g} - \mu - \mu^2 \right) \sigma_{y_0} \times \frac{1-\mu^2}{g} \sigma_0 \right] \left( 1 - \frac{x-x_0}{S_A-x_0} \right) + \frac{E(1-\mu)}{1-\mu-2\mu^2} \left[ \frac{k_0}{mS_A^2} (S_A-x)^2 \right] + \gamma H \dots \dots \dots (6)$$

其中:

$$\sigma_{y_0} = \sigma_{y_{max}} = \left( \sigma_0 + \frac{c}{f} \right) \left( 1 + \frac{\alpha x_0}{m-k_0} \right)^{\frac{2fg}{\alpha}} - \frac{c}{f} \dots \dots \dots (7)$$

$\sigma_{y_0}$ ——弹塑性区交界处铅垂方向的压应力 (kg/cm<sup>2</sup>), 其余符号意义同前。

把支承压力大于  $0.5\sigma_{y_{max}}$  的区域叫做压力高峰区, 则按公式计算的压力高峰区距煤壁 10~26 米。如图十三所示。

## 2、煤壁前方有一条回采巷道(枪眼)时

上述公式是在煤壁前方未受切割时推导出来的, 当煤壁前方存在回采巷道(枪眼)时, 情况就不一样, 而在水采的特定条件下, 煤壁前方必须要开掘枪眼, 因此必须研究煤壁前方有一条回采巷道(枪眼)时的支承压力分布。水采冲击地压多发生在距煤壁 22 米的第二个枪眼的掘进过程中, 根据实际情况, 掘第二个枪眼时第一个枪眼已经形成, 也就是说, 第二个枪眼是在已经存在第一个枪眼的应力场中掘进的。只有搞清了煤壁前方有一条回采巷道(枪眼)时支承压力的分布规律, 才能知道第二个枪眼是否处在高应力区内掘进, 才能明白该枪眼的掘进时间和空间是否合理, 才能进一步理解为什么要提倡三个水道同时联合推进交替采煤。现将研究得出的支承压力表达式介绍如下:

$$\sigma_y = \begin{cases} \left( \sigma_0 + \frac{c}{f} \right) \left( 1 + \frac{\alpha x}{m-k_0} \right)^{\frac{2fg}{\alpha}} - \frac{c}{f} & (0 \leq x \leq x') \\ \left( \sigma_0 + gP_i + \frac{c}{f} \right) \left( \frac{\alpha l + 2m - 2k_0}{2\alpha x + 2m - 2k_0} \right)^{\frac{2fg}{\alpha}} - \frac{c}{f} & (x' \leq x \leq \frac{1}{2}) \\ \left( \sigma_0 + gP_i + \frac{c}{f} \right) \left( \frac{2\alpha x + 2m - 2k_0}{1\alpha + 2b\alpha + 2m - 2k_0} \right)^{\frac{2fg}{\alpha}} - \frac{c}{f} & (b + \frac{1}{2} \leq x \leq x^1) \\ \gamma H + \frac{\mu}{1-\mu-2\mu^2} \left[ \left( \frac{1-\mu^2}{g} - \mu - \mu^2 \right) \sigma_{y_1} - \frac{1-\mu^2}{g} \sigma_0 \right] \cdot \left( 1 - \frac{x-x_1}{S_A-x_1} \right) + \frac{E(1-\mu)}{1-\mu-2\mu^2} \left[ \frac{k_0}{mS_A^2} (S_A-x)^2 \right] & (x_1 \leq x \leq S_A) \\ \gamma H & (x \geq S_A) \end{cases} \dots \dots \dots (8)$$

式中:  $P_i$ ——巷道中煤壁受到的侧向压力 (kg/cm<sup>2</sup>);

1——枪眼间距，因采用双面漏斗，第一条回采巷道（枪眼）至煤壁为 $\frac{1}{2}$ （约7米）；

b——回采巷道宽，取2米；

$\sigma_{y1}$ ——x等于 $x_1$ 处的压力（kg/cm<sup>2</sup>）；

$x'$ ——小煤柱中压力高峰点到煤壁的距离（米），可联立（8）式中的前两式解求。

$x_1$ ——弹、塑性区交界处至老塘的距离（米），由下式确定：

$$\frac{\sigma_o (\mu + \mu^2)}{g} + (1 - \mu^2 - \frac{\mu + \mu^2}{g}) \left[ (\sigma_o + \frac{c}{f} + gP_i) \left( \frac{2\alpha x_1 + 2m - 2k_o}{2\alpha b + 1\alpha + 2m - 2k_o} \right)^{2fg/\alpha} - \frac{c}{f} \right] = \frac{Ek_o}{mS_A^2} (S_A - x_1)^2 + \frac{\gamma H (1 - \mu - 2\mu^2)}{1 - \mu} \dots \dots \dots (9)$$

因掘进后，支承压力向煤体深部转移，实测此时支承压力的影响范围大致为60米，若取 $P_i = 5 \text{ kg/cm}^2$ ，其余参数同前，代入（9）式求得弹塑性的交界点距老塘煤壁21米，压力高峰区（大于 $0.5\sigma_{y\max}$ 的区域）距老塘煤壁18~35米，小煤柱中压力高峰点至老塘煤壁的距离 $x'$ 为3.7米，压力分布曲线如图十四所示。

### （二）支承压力沿倾向的分布规律

设煤层的倾角为 $\beta$ ，到煤壁的倾斜距离用 $Z'$ 表示，其余符号意义同前，得支承压力表达式：

$$\sigma_y = \begin{cases} \frac{D}{A} + (\sigma_o - \frac{D}{A}) \left( 1 + \frac{K \cdot Z' \cdot \cos\beta}{B} \right)^{-A/K} & (Z' \leq Z'_o) \\ \frac{\mu}{1 - \mu - 2\mu^2} \left[ \left( \frac{1 - \mu^2}{g} - \mu - \mu^2 \right) \sigma_{yo}' - \frac{1 - \mu^2}{g} - \sigma_o \right] \left( 1 - \frac{Z' - Z'_o}{S_A - Z'_o} \right) & \\ + \frac{E(1 - \mu)}{1 - \mu - 2\mu^2} \left[ \frac{K_o \cdot \cos\beta}{m \cdot S_A^2} (S_A - Z')^2 \right] + \gamma H & (Z'_o \leq Z' \leq S_A) \\ \gamma H & (Z' \geq S_A) \end{cases} \dots \dots \dots (10)$$

式中：

$$D = 2 \cdot c \cdot g - \frac{2 \cdot c \cdot g \cdot f \cdot \sin\beta}{1 + f \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta} + \frac{\sigma_o \alpha}{\cos^2\beta}$$

$$A = \frac{\alpha}{\cos^2\beta} - \left[ \frac{1 - f \cdot \text{tg}\beta}{1 + f \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta} \cdot \cos\beta + \frac{1}{\cos\beta} \right] \cdot g \cdot f - \frac{g \cdot \text{tg}\beta}{\cos\beta}$$

$$K = \frac{\alpha}{\cos^2\beta}$$

$$B = \frac{m}{\cos\beta} - K_0$$

$\sigma'_{y_0}$ —— $Z'$  等于  $Z_0'$  时的应力 (kg/cm<sup>2</sup>) ;

$Z_0'$ ——塑性区的范围, 由下式确定:

$$\left( 1 - \mu^2 - \frac{\mu + \mu^2}{g} \right) \left[ \frac{D}{A} + \sigma_0 - \frac{D}{A} \right] \left( 1 + \frac{K \cdot Z_0' \cdot \cos\beta}{B} \right)^{-A/K} + \frac{(\mu + \mu^2) \sigma_0}{g} = \frac{E \cdot K \cdot \cos\beta}{m \cdot S_A^2} (S_A - Z')^2 + \frac{\gamma H (1 - \mu - 2\mu^2)}{1 - \mu} \dots \dots \dots (11)$$

根据开采煤层的实际情况, 取  $\beta = 15^\circ$ ,  $S_A = 50$  米, 其余参数取值同前, 代入 (11) 式, 求得塑性区的范围为 11 米, 压力高峰区 (大于  $0.5\sigma_{y_{max}}$  的区域) 距上方老塘煤壁 8.5~25.5 米, 压力分布曲线如图十五所示。

总括起来, 支承压力的计算结果见表三。

表三

| 压力传递方向 |          | 支承压力的影响范围 (米) | 弹塑性区交界至煤壁的距离 (米) | 高峰压力区至煤壁距离 (米) |
|--------|----------|---------------|------------------|----------------|
| 沿走向    | 煤壁前方无枪眼  | 50            | 13.5             | 10~26          |
|        | 煤壁前方有一枪眼 | 60            | 21               | 18~35          |
| 沿倾向    |          | 50            | 11               | 8.5~25.5       |

前面已经介绍了支承压力的分布规律的研究结果, 由于水采采场受两侧老塘的影响 (早采有时也出现这样的情况), 走向支承压力的叠加地段是应力最集中的地方, 如图十六所示。A、B 分别表示沿走向和沿倾向的支承压力的叠加区, 其公共部分 C 为叠加后支承压力的最集中地段。

若在 C 区掘进枪眼, 就难免发生冲击地压。如 272 水采区四号上山开采过程中发生 21 次冲击地压就有 17 次是在此区域发生的, 占百分之八十一。

从表三可见, 在煤壁前方掘进枪眼后, 高峰压力区会向煤体深部转移。因此, 在煤壁前方提前掘出 2~3 个枪眼后仍然难以避开高峰压力。如图十七所示, 在掘靠煤壁的第三个枪眼 (6 号枪眼) 时, 十一月九日发生冲击地压, 在掘靠煤壁的第四个枪眼 (7 号枪眼) 时, 十一月十日发生冲击地压。

支承压力的转移过程如图十八所示。曲线①为煤壁前方没有枪眼时的支承压力分布曲线，曲线②为煤壁前方掘一枪眼后的支承压力分布曲线。

从支承压力的表达式可见，支承压力的大小与采深 $H$ 有关，与开采面积 $F$ 有关。当采深 $H$ 增大时，支承压力增加；当开采面积增加（在一定的范围内）时，支承压力增加，其显现特征是煤壁压缩量 $K_0$ 。与支承压力的影响范围 $S_A$ 增大。因此，冲击压力的发生是一定的开采深度与一定的开采面积结合的产物。如271水采区开采面积约6万米<sup>2</sup>（采深600米），没有发生冲击地压，该采区周围均为实体煤。

### （三）支承压力发展变化的规律

采场支承压力发展变化的根本原因是由于采场推进过程中煤体支承能力的改变和上覆岩层运动状态的不断变化的结果。在采场来压前，老顶岩梁随暴露面积的增大和煤体的破坏而沉降，支承压力峰值部位由工作面煤壁附近向前方转移，煤体压酥和岩梁悬空的范围愈大，压力峰值向前方扩展的范围也愈大。当老顶岩梁在端部断裂时刻，支承压力发生突变，压力在岩梁断裂线两侧高度集中，同时以断裂线为界形成内应力场（断裂线与煤壁之间）和外应力场（断裂线以远），其中内、外应力场中的压力分布和显现分别由运动岩梁、运动岩梁上部大范围岩层的重力作用所决定。随断裂岩梁显著运动的发展，由该岩梁运动所决定的内应力场中的压力峰值自断裂线附近逐渐向工作面煤壁方向的转移（收缩）变化是十分明显的，直至岩梁在老塘触研（运动完成），压力转移过程才会完成，同时在内应力场中形成稳定的低应力区。与此相反，由大范围整体岩层重力作用所决定的外应力场中的压力分布，随岩梁断裂处附近煤体破坏向深部发展，压力高峰部位将自断裂线附近再次向远处转移，直至煤体的支承能力与新的压力高峰作用相抗衡，压力转移过程才会行止。

显然，在上述过程中压力高峰的转移（包括压力扩展，高度集中，压力收缩和压力再扩展的变化）是有条件的，即：

1、老顶岩梁显著运动之前，支承压力向煤壁前方的扩展变化是以岩梁暴露状况发展和沉降以及煤体的破坏（支承能力的降低）为前提的；

2、老顶岩梁断裂时刻所形成的压力在断裂线两侧高度集中以及形成内、外应力场的变化，是以岩梁端部的断裂为条件的；

3、内应力场中压力的收缩变化及稳定的低应力区的形成是以岩梁显著运动的发展及岩梁的触研为条件的；

4、外应力场中压力高峰部位再次向煤壁前方扩展是以岩梁的断裂，存在集中应力的作用及煤体约束条件的改变，加速其破坏为前提的。

### 五、关于支承压力和冲击地压的预测问题

上面对冲击地压发生的情况、原因，防治措施及支承压力分布变化的规律作了分析研究。无论是采用正确的开采程序，避开高应力区，保证低应力区掘进巷道，避免或减少冲击地压或者是预先要了解由老顶岩梁活动造成的不可避免的冲击地压行将发生的时间和地点，做到心中有数，避免损失等，其关键就是要有一定的方法在实践中定出支承压力的分布范围和高峰区的位置，找到可以开掘巷道的低应力区的界线和该区域所形成的时间。

由于压力转移是以岩梁运动状态发展（下沉或断裂）以及煤体支承能力的降低为条件的，因此岩梁运动状态及煤体支承能力改变前后的压力显现的变化及其规律性是预测压力峰

值转移和冲击地压发生的依据。水采区所采用的动态观测研究方法的大量实践说明是有规律可循的。观测实践表明，多次冲击地压集中发生在采场来压前后，仅据272水采区四、五号水道发生的38次冲击地压统计，其中来压前一天至后一天占47%（详见表2）。因此，可以通过对顶板显著运动和煤体承载能力显著降低所导致的压力显现的变化（如巷道顶底板移近速度等）的观测研究，来总结预测压力转移和冲击地压可能发生的时间和位置的规律性，进而达到预测的目的。

### （一）冲击地压发生前后动态显现的分析

#### 1、老顶第一岩梁断裂时刻，断裂线附近压力高度集中所引起的冲击地压

##### 实例（1）在掘进枪眼时发生冲击地压

图十九(b)为采场平面图，(a)为发生冲击地压前后采场动态变化曲线图。由图可知3号和4号测点移近速度变化较大，两测点处于支承压力峰值区。相反，固7测点动态变化很小，该测点处于压力峰值区前方的低应力区。

11月29日起3号，4号测点移近速度明显增大，直至12月2日达到峰值。这说明老顶岩梁达到极限悬顶面积，在断裂前夕压力向断裂线两侧集中，断裂线位于两测点之间。12月2日岩梁发生断裂，两测点间形成支承压力的高度集中，于是在该部位掘进的13号枪眼中发生冲击地压。冲击地压发生后，由于应力释放的结果，3日两测点移近速度都有明显下降。4日两测点移近速度再次回升是压力转移作用的结果，其中3号测点的回升是由于第一岩梁断裂后显著沉降，支承压力向工作面方向转移（即压力收缩）的结果，而4号测点的回升则是由于第一岩梁上部岩层的重力作用所决定的支承压力向煤体深部转移所致。显然，此时高应力区的部位已转移至4号测点以远。

图二十所示的冲击地压和采场动态变化与图十九的情况类似。其中在冲击地压发生前，支承压力高峰部位位于11号，12号测点间，老顶岩梁断裂线位于这两个测点之间。所不同的是10号测点移近速度最大，是该测点临近煤壁，在塑性破坏区的范围内，在2日发生冲击地压时11号，12号测点移近速度有所下降，则是资料按日整理所致，实际上是2日的平均值，它包括了冲击地压发生前夕的最大移近速度和冲击地压发生后的移近速度明显下降两种情况。

##### 实例2：在上山水道中发生冲击地压

图二十一一是老顶岩梁断裂时，在上山水道中发生冲击地压的实例。由图可知，15日起29号和固Ⅲ两测点移近速度明显增大，至17日达到峰值，第一岩梁在固Ⅲ测点的外侧断裂，上山水道正处于岩梁断裂时支承压力集中的部位而发生冲击地压。17日以后，固Ⅲ测点移近速度一直没有回升，这是该点位于岩梁断裂线内侧（临近断裂线），支承压力的高峰部位已向上山水道的外侧（即向材料道）转移。

##### 实例3：在枪眼和顺槽水道中同时发生冲击地压

图二十二是在枪眼和顺槽水道中同时发生冲击地压的实例。由采场动态变化曲线图可知，8日起3号测点移近速度明显增大，9日起2号测移近速度也明显增大，相反的是5号测点移近速度却明显下降，这说明老顶岩梁即将进入显著运动，支承压力向断裂线两侧集中。显然，2号、3号测点位于压力集中的高峰部位，而5号测点则在高峰部位的外侧。11日移近速度达到峰值，岩梁在4号枪眼附近断裂，在顺槽水道和4号枪眼中同时发生冲击

地压。冲击地压发生后应力释放的结果，3号测点12日有明显下降，此后，在13日该测点移近速度再次回升是支承压力峰值部位向煤体深部转移所致。

2、老顶第二岩梁显著运动过程中，支承压力的转移和集中所引起的冲击地压实例1：

图二十三是在一次与直接顶，老顶第一岩梁，第二岩梁运动有关的复杂的压力转移变化过程中发生冲击地压的实例，利用支承压力显现规律与上覆岩层运动的关系，我们仍然可以找到发生冲击地压的规律。

(1) 由动态曲线图可知，2日上午1号，2号，3号测点移近速度都明显上升，尤以1号测点最明显，当日下午达到峰值。此后1号测点下沉速度明显下降，说明直接顶在老顶岩梁的作用下于1号测点附近的A处断裂，压力高峰部位向深部转移。

(2) 3日上午1号，3号，2号测点移近速度同时下降，直至4日上午和下午分别达到最低值，其中2号测点出现反弹。这说明老顶第一岩梁在沉降，支承压力由A断裂线的外侧转向内侧（靠煤壁一侧）。当2号测点出现反弹极值时说明第一岩梁已在B处断裂。

(3) 4号下午起，3号测点移近速度明显下降，至5日上午反弹极值，相反1号，2号测点却上升达到峰值。这说明老顶第二岩梁开始沉降并在5日上午于C处断裂，支承压力将自B断裂线的外侧向内侧转移，并在A和B处形成新的应力集中，处于高峰压力部位的1号枪眼发生冲击地压。

(4) 6日上午和7日上午3号测点和2号测点又相继出现反弹，说明老顶岩梁断裂后在显著沉降，支承压力在B断裂线的两侧要作进一步的转移，新的压力峰值导致2号枪眼在7日发生冲击地压。

## (二) 预测的分析、研究方法

从对水采区冲击地压发生前后的实测资料分析研究中，我们知道冲击地压发生前后采场的动态变化是十分明显的，又是有规律的。尽管在发生冲击地压位置的顶板动态变化有时很小，但是由老顶岩梁运动状态改变所导致的塑性区（包括部分破坏区）及其邻域中的压力显现的动态变化却是十分明显的。因此，我们可以通过实测低应力区及其邻域内压力显现的变化来推断上覆岩层运动状态以及压力高峰部位的转移趋向，达到预测这类冲击地压的目的。针对水采区煤体支承能力降低区范围一般在10至20m以及采场老顶存在两个岩梁，其来压前后都有可能导致冲击地压的实况，动态实例分析、研究方法归纳如下。

### 1、测区布置

为了扩大观测范围，及时了解低应力区和高应力区内的动态变化，采用4台仪器，安设于顺槽水道中，间距15m，随采场推进临近煤壁5m回撤，依次向前排设。实测中每隔2小时取一次读数，平时按日整理测点移近速度，在来压期间按2小时整理、分析。

### 2、动态变化分析、研究方法

#### (1) 第一岩梁来压前后的动态显现

①来压前，位于塑性区与应力高峰区的压力显现都有明显增长，在移近速度有明显增大的测点范围内10m以远，至移近速度没有明显增大的测点之间的范围，定为高应力部位。愈是临近岩梁断裂前夕，测点移近速度上升愈快。

②在原来有明显显现的测点中，某一测点（该测点一般为有明显显现测点中的最远者）

的移近速度转而明显下降以至反弹，则第一岩梁断裂线就位于该测点附近，该测点在断裂线外侧。岩梁断裂线为内、外应力场的界线。

③岩梁断裂后，内应力场中的测点移近速度明显增大，并且显现峰值位置向工作面方向转移，与此同时，外应力场中的测点的移近速度没有明显回升，表明岩梁断裂后在显著沉降。直至岩梁触研，内应力场诸测点的显现下降到最低点，并趋于稳定，此时内应力场为稳定的低应力区范围。

此外，岩梁断裂后，外应力场中临近岩梁断裂线的测点的移近速度出现回升时，表明压力高峰区自断裂线附近向煤体深部转移。

(2) 第一岩梁来压后，紧跟着第二岩梁来压的动态显现

当第一岩梁的显著运动牵连第二岩梁运动，并紧跟着来压时，则外应力场中临近第一岩梁断裂线位置的测点的移近速度有明显回升，远处测点的显现也相应增大。此时，高应力区部位自第一岩梁断裂线附近明显地向煤体深部转移。待诸测点的压力显现自煤壁远处向工作面方向的收缩显现过程完成后，说明老顶第二岩梁触研稳定，则在内应力场范围内形成稳定的低应力区域。

基于上述实测研究、分析的规律，第一、二岩梁来压前后支承压力分布及高峰转移的变化分别如图二十四和图二十五所示，对应的典型的压力显现的变化详见图二十六和表四。

表四

| A—B  | B—C          | C—D   | D—E  | E—F            | F—G   | G—H                      |
|--|--------------|---|--|----------------|---|--------------------------|
| 第一岩梁<br>断裂前夕                               | 第一岩梁<br>断裂时  | 第一岩梁断裂<br>后显著沉降                             | 第二岩梁断<br>裂前夕                                     | 第二岩梁<br>断裂时    | 第二岩梁<br>显著沉降                                  | 第二岩<br>梁触研               |
| 1#↑: 塑性区<br>2#↑ } 高峰区<br>3#↑ }<br>4→: 高峰区外 | 3#↓ 断线<br>外侧 | 2#↑ } 内应力场<br>1#↑ } 压力收缩<br>3#↑: 压力高峰<br>外移 | 3#↑ } 第二岩梁<br>4#↑ } 沉降<br>1#→ } 第一岩梁<br>2#→ } 触研 | 4#↓: 断裂线<br>外侧 | 3#↑ } 压力<br>2#↑ } 收缩<br>1#↑ }<br>4↑: 高峰<br>外移 | 1#→<br>2#→<br>3#→<br>4#→ |
| 说 明  | →无明显变化       |   | ↑明显上升  | ↓明显下降以至反弹      |   |                          |



272 水泵区四号上山、五号上山冲击地压发生情况表

表 1

| 水道名称          | 冲击地压<br>发生时间 | 编 号 |    | 震 级 | 冲击地压发生的位置    | 坏 破 情 况      | 到老塘距离 |       | 发生冲击地<br>压时下沉速<br>度 (mm/天) | 备 注                 |
|---------------|--------------|-----|----|-----|--------------|--------------|-------|-------|----------------------------|---------------------|
|               |              | 新   | 老  |     |              |              | 走向(米) | 倾向(米) |                            |                     |
| 四号上山<br>各阶段水道 | 1980年2月25日   | 1   | 49 |     | 2号枪眼内 20米以上  | 断棚 2架、折帮底鼓   | 22    | 15    | 12、24                      |                     |
|               | 2、27         | 2   | 50 | 1.3 | 2号枪眼内 14米    | 倒棚、坏棚 7架     | 22    | 22    | 10、75                      |                     |
|               | 3、13         | 3   | 51 | 1.0 | 3号枪眼内 20米    | 断棚 3架        | 22    | 16    | 20、65                      |                     |
|               | 3、23         | 4   | 52 |     | 6号枪眼内 25米    | 断棚 4架、折帮 10米 | 22    | 15    | 17、00                      |                     |
|               | 3、23         | 5   | 53 |     | 7号枪眼内 15米    | 断棚 4架、折帮 5米  | 22    | 27    | 7、54                       |                     |
|               | 3、25         | 6   | 54 |     | 8号枪眼内 28米    | 断棚 2架        | 22    | 17    | 24、79                      |                     |
|               | 3、26         | 7   | 55 | 1.3 | 8号枪眼内 35米以上  | 断棚 4架、折帮 10米 | 22    | 10    | 20、66                      |                     |
|               | 3、29         | 9   | 57 |     | 8号枪眼叉门处 10米  | 断棚 4架、底鼓     | 15    | 10    | 15、02                      |                     |
| 二号水道          | 3、27         | 8   | 56 |     | 7号枪眼内 45米    | 断棚 4架        | 22    | 15    | 63、77                      | 改变程序,采完<br>一号水道(来压) |
| 三号水道          | 4、1          | 10  | 58 |     | 2号枪眼内 32米    | 断棚 6架        | 22    | 15    | 21、75                      |                     |
|               | 4、1          | 11  | 59 |     | 3号枪眼内 30米    | 断棚 5架        | 37    | 17    | 21、75                      |                     |
|               | 4、2          | 12  | 60 |     | 4号枪眼内 25米    | 断棚 4架        | 52    | 23    | 5、50                       |                     |
|               | 4、3          | 13  | 61 |     | 4号枪眼内 32米以上  | 断棚 4架        | 22    | 15    | 5、21                       |                     |
|               | 4、8          | 14  | 62 |     | 5号枪眼 25米     | 断棚 3架        | 22    | 20    | 5、43                       |                     |
|               | 4、9          | 15  | 63 |     | 5号枪眼 34米     | 断棚 3架        | 22    | 11    | 8、86                       |                     |
|               | 4、9          | 16  | 64 |     | 6号枪眼 26米     | 断棚折帮         | 22    | 22    | 7、85                       |                     |
|               | 4、17         | 17  | 65 |     | 3号水道圆点 19.3米 | 折帮底鼓         | 20    | 60    | 6、04                       | 来压                  |
| 五号水道          | 5、15         | 18  | 66 |     | 7号眼 30米      | 折帮底鼓 坏棚 3架   | 22    | 18    | 6、39                       |                     |
| 七号水道          | 5、29         | 19  | 67 |     | 3号眼内 18米     | 折帮、坏柱 3根     | 10    | 14    | 18、83                      |                     |
|               | 5、31         | 20  | 68 |     | 材料道圆 5点      | 断棚 4架、折帮底鼓   | 16    | 250   | 10、42                      | 来压                  |
|               | 6、2          | 21  | 69 |     | 5号眼 20米      | 掉顶           | 22    | 15    | 48、87                      |                     |