

煤层注水技术

编 著
张永吉
李占德
秦伟瀚
李琮祥
秦书玉
海国治
王金力
鹿志发

中国工业出版社

567.13
Z 321

煤层注水技术

编著 张永吉 李占德 秦伟瀚 李琮祥
秦书玉 海国治 王金力 鹿志发

煤炭工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

煤层注水技术/张永吉等编著. 北京: 煤炭工业出版社,
2000

ISBN 7-5020-1953-7

I. 煤… II. 张… III. 煤层注水 IV. TD713.33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 57107 号

煤 层 注 水 技 术

编著 张永吉 李占德 秦伟瀚 李琰祥
秦书玉 海国治 王金力 鹿志发
责任编辑: 黄朝阳 顾建中

*

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
煤炭工业出版社印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*

开本 $787 \times 1092 \text{mm}^1/32$ 印张 5 $\frac{3}{4}$
字数 114 千字 印数 1—400
2001 年 3 月第 1 版 2001 年 3 月第 1 次印刷
社内编号 4724 定价 10.80 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

内 容 提 要

本书系统地介绍了我国煤矿井下煤层注水基本理论及其技术，重点阐述了煤层注水参数的优化、煤层注水效果分析及煤层注水工艺方法，为促进学术研究，同时介绍了有关有争议和应进一步探讨的问题。

本书可供煤矿工程技术人员和管理人员使用，也可供煤矿科研单位和设计部门的工程技术人员参考及作为煤炭系统大中专院校师生的教学参考书。

前 言

煤层注水是煤矿防治煤尘、煤与瓦斯突出及冲击地压等灾害的一项积极措施，在这方面我国广大工程技术人员及科研工作者在实践及理论方面做了大量工作，本书根据我国煤炭工业近30年来取得的科研成果和生产实践经验，系统地从理论和工艺两个方面论述了煤层注水参数的优化，煤层注水效果分析和注水工艺方法；以及我国近10余年来在理论研究方面取得的新成果，工程技术方面取得的新技术，生产实践中获得的新经验。为了展开学术讨论，本书作者将多年科研中遇到的问题及其他科研工作者遇到的有关理论与工艺难点进行了介绍，以便促进该领域研究探讨。

本书在撰写过程中，得到了双鸭山矿务局副局长赵书田、吉林煤炭工业局副局长王国军、辽宁工程技术大学孙宝铮教授的关怀和支持，并提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有不妥之处，我们殷切希望读者不吝赐教，批评指正。

作 者

2000年5月25日

目 录

第一章 煤层地质结构及其物理力学性质	1
第一节 煤层地质结构	1
第二节 煤层赋存状态	4
第三节 煤层的物理力学性质	5
第二章 煤层注水难易程度的分类	14
第一节 煤层注水难易程度的指标	14
第二节 影响煤层注水难易程度的因素	17
第三节 煤层注水难易程度的分类及其方法	29
第三章 煤层注水参数的优化	38
第一节 煤层注水参数及技术要求	38
第二节 煤层注水参数的正交试验优化方法	56
第三节 煤层注水参数的数量化理论正交设计 优化方法	62
第四节 煤层注水效果模糊控制方法	72
第四章 煤层注水方法与注水工艺	79
第一节 煤层注水方法及其特点	79
第二节 短孔煤层注水	83
第三节 长孔煤层注水	87

第四节	煤层注水设备	109
第五节	煤层注水施工管理	116
第五章	煤层注水效果分析	120
第一节	水在煤层中的运动规律	120
第二节	煤层注水湿润状态的数值模拟分析	124
第三节	多元回归分析方法	137
第四节	数量化理论分析方法	141
第六章	煤层注水“三防”原理及其效果	149
第一节	煤层注水防尘原理与效果	149
第二节	煤层注水防治煤与瓦斯突出的原理与效果	152
第三节	煤层注水防治冲击地压的原理与效果	156
第四节	提高煤层注水效果的措施	158
参考文献	162

第一章 煤层地质结构及其物理力学性质

第一节 煤层地质结构

煤体生成以后，在以百万年计的地质年代里，由于各种地质构造的发生，使煤体发生变形和破坏。因此，煤体在形成和地质构造发生和发展的过程中，煤体内形成无数的裂隙、孔隙。按其成因、存在状态和分布情况划分有以下几种：

一、层理

煤层的层理面是在成煤过程中形成的各种煤岩成分的分界面。层理虽然没有直接使煤体（或使煤体和围岩间）断裂开来，但使煤体沿层理方向产生一个弱面，注水后，水容易从其压入通过。所以，在研究煤层注水时，将层理纳入裂隙讨论。

层理由于形成环境不同，其形态各异，大致分成三类，即水平层理、波状层理和斜层理。水平层理层的形状为直线状，互相平行，并且平行层面；波状层理层面成对称或不对称，规则或不规则的波状曲状曲线，其总的方向平行于层面；斜层理是由一个或一个以上的斜层系所组成，其特征是层系中的细层均以一定的角度与层系界面相交。层理有连续性与非连续性之分。当煤层属均匀一致密的块状构造时（如某些暗淡

型煤或腐泥煤)，层理则不明显。当煤层注水时，层理面常可成为一个连续通道，使水到达整个煤层的待湿润范围。

二、内生裂隙

煤体的内生裂隙是煤层在成煤和变质过程中，受上覆岩层压力和湿度作用，使煤炭中凝胶化物质的分子结构压紧并重新排列，体积收缩产生内张力，而形成的裂隙。它的形成与地质构造运动和采动影响等外界动力无关，因此称为内生裂隙。在各种煤岩成分中，以镜煤和亮煤中的内生裂隙最为发育。它通常垂直于层理面，裂隙面平坦而光滑，往往呈两组互相垂直的裂隙组，其中裂隙密度较大的一组称为主裂隙组，另一组称为次裂隙组（图 1—1）。内生裂隙的发育程度，是用煤体某一断面上沿层理方向每 5cm 长度内肉眼观察的

裂隙数目来表示的。它和煤的变质程度紧密相关（详见第二章第二节），常常用以判别煤的变质程度，同时也是影响煤层注水难易的一个因素。

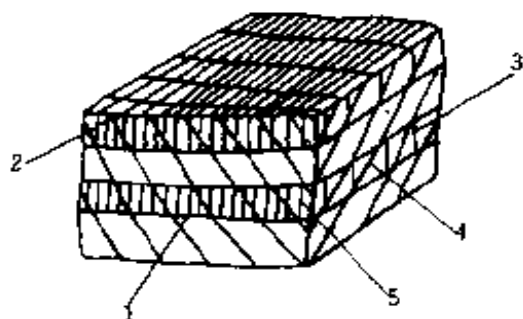


图 1—1 内生与外生裂隙

- 1—层理面；2—主内生裂隙组；
3—次内生裂隙组；4—外生裂隙；
5—镜煤或亮煤

三、外生裂隙

煤层形成后，受地质构造运动的剪切作用，按受力方向和强烈程度不同，产生了与层理面斜交的外生裂隙。它能产生于各种煤岩成分或各种煤岩类型的煤体中（图 1—1）。外生裂隙与层理面斜交成不同的交角，可分为几组，常见的有 45° 的斜交外生裂隙。裂隙

面上由于在挤压过程中产生剪切滑动，常呈擦痕而凸凹不平。主要的外生裂隙组方向常与附近的断层方向一致。外生裂隙内常有次生矿物或破碎的煤粉（原生煤尘）充填。外生、内生裂隙和层理面相互交错，使煤体沿这些裂隙破裂时，构成一定的几何形状，这就是常称的“节理”。常见的节理有板状、立方体、平行六面体等。节理发育则有利于注水工程。

四、次生裂隙

煤体在采落之前，受本层或上邻近层开采的超前支承压力的作用，或受邻近分层爆破作业的影响所形成的裂隙称为次生裂隙。它是由于人的开采活动造成的煤体裂隙，因此，与次生裂隙相对应，内生及外生裂隙是在煤体未受开采影响之前形成的，可统称为原生裂隙。次生裂隙内也伴生着原生煤尘。

五、煤体内的细微孔隙

在煤层的生成及其后的变质过程中，由于挥发物质、瓦斯和水分的不断泄出，煤体中自然形成了各类细微孔隙。这些细微孔隙大多是互相连通的，只有个别的孔隙系统处于封闭状态。煤体中孔隙的直径有的小于液体分子直径，但大于瓦斯分子直径。

煤层在透水性质上可以看成是具有两类孔隙的介质。一类是裂隙系统，它具有使水通过并储存一些水的作用；另一类是被这些裂隙所分割的煤块孔隙。显然，裂隙系统起了一种渠道作用，水由它进入各种煤块孔隙。按照煤体中各类孔隙的直径大小可以将孔隙分为五类，即

大微孔隙	直径	$>10^{-4}\text{m}$
微孔隙	直径	$10^{-4}\sim 10^{-6}\text{m}$
半微孔隙	直径	$10^{-6}\sim 10^{-7}\text{m}$
中微孔隙	直径	$10^{-7}\sim 10^{-8}\text{m}$
细微孔隙	直径	$10^{-8}\sim 10^{-9}\text{m}$

煤体中各类裂隙都属于可见的大微孔隙。孔径小于 10^{-9}m 的超细微孔，因水分子难以进入而不应包括在煤层注水的讨论范围之内（水分子直径 $d=2.6\times 10^{-10}\text{m}$ ）。在使用液体法测定煤的比重时，液体分子不能进入这些超细微孔隙，因此测得的比重和孔隙率只反映了那些水分子能够进入的孔隙的存在。

煤体的各类裂隙的发育程度，一般用单位长度或单位面积内所存在的裂隙条数来表示，而煤的孔隙发育程度（包括全裂隙的体积在内）则以孔隙率表示。

第二节 煤层赋存状态

煤层厚度是煤层赋存状态的重要特征，其差异很大，有的煤层厚度只有几厘米，而有的厚度可达几十米，甚至百米。根据开采技术的特点，煤层按厚度可划分为三类：

厚煤层	煤层厚度 3.5m 以上
中厚煤层	煤层厚度 1.3m 至 3.5m
薄煤层	煤层厚度从最小可采厚度至 1.3m

根据煤层中是否有较稳定的夹石层，煤层可分为两类，即简单结构煤层和复杂结构煤层。煤层中没有呈层状出现的较稳定的夹石层，但仍可能夹一些矿物质透镜体或结核，称为简单结构煤层，如图 1—2 所示。常含有较稳定的夹石层的

煤层称为复杂结构煤层，如图 1—3 所示。

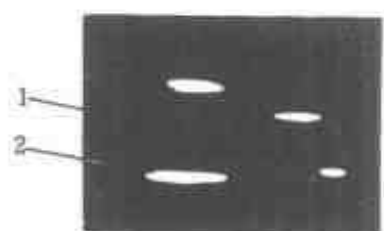


图 1 - 2 简单结构煤层

1—煤层；2—透镜体矿物质

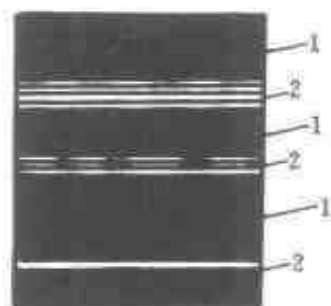


图 1—3 复杂结构煤层

1 分煤层；2 夹石层

煤层一般成群埋藏，各煤田的含煤层数多少不一。有的煤田只有几层煤，而有的多至数十层。当煤层成群埋藏时，相邻煤层间的法线距离称为煤层的层间距。当相邻煤层的间距很小或为复杂结构的煤层时，在开采中往往可以把相邻煤层视为一层，煤层间的薄层岩石即成为夹石层。反之，原来为复杂结构的煤层，由于夹石厚度增大，可能分离为若干独立的分煤层。这种煤层结构的变化，在实际生产中是经常可见的。

煤层中如果含有较多的矿物质结核或煤层结构很复杂，含有较多的夹石，这会影响煤层的注水效果。

第三节 煤层的物理力学性质

煤的强度、硬度及煤的内在水分和外在水分等物理力学性质对煤层注水难易程度有一定的影响，现分别进行介绍。

一、煤的强度

煤的力学强度是指煤受外力作用时抵抗破坏的能力，是煤的一种力学特性。当外力增加时，煤的内应力也相应地增大，直至煤破坏。此时煤内的应力称为煤的强度。由于煤受外部载荷的性质不同，如单向受力或多向受力、拉伸或压缩，以及外部载荷作用时间的长短不同，煤岩的强度也各不相同。从煤的受力状态来区分煤的强度，可有以下几种类型。

（一）单向抗压强度

煤在一个方向受压而破坏时的应力称为煤的单向抗压强度。单向抗压强度在煤矿中常用普氏坚固系数(f)作为表示煤岩破碎难易程度的综合性指标。煤的坚固性系数一般在1~2之间。普氏坚固系数(f)即为单向抗压强度被100除。它由于层理、节理、孔隙的多少及其分布情况的不均匀性，在煤层各个方向上存在着较大的差异。表1-1是辽宁省几个煤矿煤的普氏系数。

（二）单向抗拉强度

煤属于所谓脆性材料。它与金属材料不同，普通煤的单向抗压强度要比抗拉强度大几倍、十几倍，甚至几十倍。由于煤的抗拉强度很小，一般为每平方厘米几公斤到几十公斤。

表1-1 辽宁省几个煤矿煤的普氏系数

序 号	矿 名	普 氏 系 数
1	本溪暖河子矿	7#煤层, 0.2~1.19 12#煤层, 0.6~1.78
2	朝阳煤矿	1.8~2.0
3	沈阳林盛矿	平均 0.7

（三）抗剪断强度

抗剪断强度是煤在双向或三向应力状态作用下的破坏强度。由不同应力状态下煤的抗剪断强度的试验结果，可以求出煤或某一指定弱面的两个重要力学指标，即

煤的粘结力 C ，它表示统计的分子之间的凝聚力，以 kg/cm^2 表示。

煤的内摩擦角 ϕ ，它表示煤颗粒之间的摩擦特征，以度表示。

（四）体积变形

各种煤的内部，总是存在一些微小的裂隙和孔隙。在煤受单向或多向压缩应力作用时，煤的体积就会缩小一些，这种变形称为体积变形。在很大的全向压应力作用之下，煤的矿物结晶可能重新排列，也导致体积变形的发生。

二（五）煤的硬度

煤的硬度是指抵抗外力侵入的能力，用摩氏硬度系数表示。它是用标准矿物（摩氏硬度计）刻划煤样测得的相对硬度。煤的摩氏硬度一般在 1~2 之间。

三（六）煤的水分

煤中水分，按其在煤中的存在状态，可分为两类：一类是游离水，一类是结晶水。

1. 游离水

游离水是煤的内部小毛细管和煤的外表面的大毛细管所吸附的水。当温度大于 100°C ，煤中游离水就会逸出。

（1）外在水分（ W_{wz} ）。它是指煤炭表面和大毛细管里的水分。它在常温下不断蒸发于周围空气中，但是只能蒸发到它的表面水蒸气压和它所在的空气中的相对湿度平衡时为止。外在水分是随空气温度的变化而变化，它与水文地质条

件和开采以及洗选等因素均密切相关。煤层注水后的水分增加的部分多属于这类水分。

(2) 内在水分 (W_{nz})。内在水分是吸附和凝聚在煤体内的小毛细管吸附的水分。这部分水的蒸发气压较同温度的纯水蒸发气压略小，因而内在水分的失去较外在水分难，只有加热高于纯水沸点，内在水分才能全部逸出。煤的表面积愈大，小毛细管愈多，内在水分吸附的量也愈高。内在水分与煤质有关，煤的变质程度愈高，内在水分愈低。褐煤的内在水分为 10%~30%，从褐煤、长焰煤、气煤到肥煤、焦煤，内在水分依次显著降低，但到贫煤，无烟煤内在水分又略有增加。当煤的内部小毛细管吸附水分达到饱和状态，这时的内在水分叫做最高内在水分。

(3) 煤的全水分。煤体的内在水分和外在水分之和称为煤的全水分。注水后外在水分和内在水分增量之和称为注水后的水分增值。

2. 结晶水

煤中的结晶水是煤中无机矿物质所含的结晶水，如 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。这种水在 110℃ 下是不会逸出的，只有当温度高于 200℃，结晶水才能逸出。

(七) 煤的比重

煤的比重是指一定体积的煤和同体积的水的质量之比。煤是多孔物质，它的体积有两种表示方式。一种是包括煤的内部孔隙在内的煤之体积。这种体积叫做表观体积或视体积；另一种是除去孔隙后煤的体积，这种体积叫做煤的真体积。由煤的视体积测得的比重，叫做煤的视比重。由煤的真体积测得的比重，叫做煤的真比重。显然，煤的真比重比煤的视比重略大一些。

1. 煤的真比重

煤的真比重是在 20℃ 时，一定体积的煤（不包括煤的孔隙）对同温度、同体积水的重量之比。用 d_{20}^{20} 来表示。右下角的 20 是水的温度为 20℃，右上角的数字 20 是煤的温度为 20℃。

煤的真比重在我国目前是用比重瓶来测定，这个方法是用一定体积的比重瓶，加水，称出其重量 G_1 ，然后倾去水，在瓶里放入准确称量的干燥煤样，加水，在水浴上煮沸，冷却至 20℃ 后，称重 G_2 ，这样煤的真比重为

$$(d_{20}^{20})^F = \frac{G}{G_1 - (G_2 - G)} \quad (1-1)$$

式中 G ——干燥基煤样的重量。

在用比重瓶测定煤的真比重时，首先假定：

- (1) 煤用水煮沸后，全部孔隙都充满水；
- (2) 煤和水不会因为混合后的表面作用产生任何效应。

但是，实际并不如此，因为煤中有些微孔是封闭的，有些微孔直径小于水分子，所以水无法进入。这样测定的真比重也只是近似的。在科学研究上常用氮作为介质来测定煤的真比重。因为氮原子直径小，再加上氮不与煤发生表面作用，测定的结果就较精确些。

煤的真比重用来研究煤的性质，煤的真比重又是煤层平均重量的计算时的重要数据。

2. 煤的视比重

煤的视比重是 20℃ 时，一定体积的煤（包括煤的孔隙在内的体积）和同体积水之重量比。

因为煤的体积包括煤的孔隙，所以在测定时，要把这些孔隙“保护”起来使水不能进入。为此，可以用蜡把煤块包

住，然后放入水中，称出煤在水中重量，然后根据阿基米德定律计算煤的视比重 $(d_{20}^{20})_a$ 。

煤样重 G ，涂蜡后总重 G_1 ，比重瓶加水重 G_2 ，将涂蜡的煤放到比重瓶中，并加入水，总重为 G_3 ，则

$$(d_{20}^{20})_a = \frac{G}{[G + G_2 + (G_3 - G) - G_2 - \text{蜡所占的体积}]} \quad (1-2)$$

式中 蜡所占的体积 = $(G_1 - G) / \text{蜡的比重}$ 。

除用石蜡来封住块煤来测定煤的视比重外，也可用水银法来测定 $(d_{20}^{20})_a$ 。水银法是利用水银对煤不浸润，更不和煤发生表面作用，把一定重量的块煤放入水银，排出水银体积，即为煤的体积，从而可以计算煤的视比重。

(八) 煤的孔隙度

煤的真比重和视比重之间的不同就在于前者的体积不包括煤的孔隙，后者的体积包括煤的孔隙。两者之差和煤的真比重的比值就是煤的孔隙率 (p) ：

$$p = \frac{(d_{20}^{20})^s - (d_{20}^{20})_a}{(d_{20}^{20})^s} \quad (1-3)$$

(九) 煤的吸水性

煤的吸水性取决于煤的裂隙、孔隙的体积、大小及敞开或封闭的程度等。煤吸水性指标有吸水率、饱水率，二者之比称为饱水系数。

煤的吸水率 (W_1) 定义为在大气压力下吸入水的重量 (G_{w_1}) 与煤干重量 (G_s) 之比，即

$$W_1 = G_{w_1} / G_s \quad (1-4)$$

煤的饱水率 (W_2) 定义为煤在高压（150 个大气压力）或真空条件下吸入水的重量 (G_{w_2}) 与煤干重量 (G_s) 之

比，即

$$W_2 = G_{w_2} / G_s \quad (1-5)$$

煤的饱水系数 (k_s) 为

$$k_s = w_1 / w_2 \quad (1-6)$$

一般岩石的吸水率、饱水率与饱水系数请参考刘宝琛编著的《矿山岩体力学概论》一书。因为注水时要考虑煤层的顶、底板的岩性。

(十) 煤的透水性

不论何种煤总是存在裂隙和孔隙，因此，绝对不透水的煤是不存在的，由于煤种不同，其透水性也不一致。通常用渗透系数表示透水性的大小。表 1-2 是辽宁省某些矿的透水性，岩石的透水性见参考文献 [9]。煤层渗透性系数用下式计算：

$$K_T = \mu \cdot V \cdot L / p = \mu \cdot Q \cdot L / F \cdot p \quad (1-7)$$

式中 K_T ——煤层的透水性系数，达西；

μ ——流体的粘度，厘泊 (1 厘泊 = 0.01 dyn · s/cm)；

V ——水的渗透速度，cm/s；

L ——渗流长度，cm；

p ——作用在 L 长度两端的压差， 10^5 Pa；

Q ——流过 L 长度的流体流量，cm³/s；

F —— L 长度内的渗透断面，cm²。

表 1-2 辽宁某煤矿煤的透水性

序 号	矿 名	煤的透水性 (cm/s)	煤层湿润边角 (°)
1	本溪暖河子煤矿	7 [#] 煤层 2.0×10^{-6}	7 [#] 煤层 49.8
		12 [#] 煤层 3.5×10^{-6}	12 [#] 煤层 52.1

续表

序 号	矿 名	煤的渗水性 (cm/s)	煤层湿润边角 (°)
2	朝阳煤矿	$(1.16 \sim 12.88) \times 10^{-6}$	56~75
3	沈阳煤矿	3.0×10^{-6}	平均 85

由于有些煤层透水性系数很小，为使用方便，用毫达西表示，1 毫达西 = 10^{-3} 达西。

(十一) 水对煤的湿润边角与煤层的湿润能力

水对煤的湿润边角是反映水分子与煤分子之间吸引力大小的物理力。根据湿润边角可以确定煤体表面湿润的难易和毛细作用的大小。水分子与煤炭分子间的吸引力愈大，湿润边角愈小，愈易于湿润。相反，如水分子之间的吸引力增大，即水的表面张力系数增大，则湿润边角变大，使煤层难于湿润。目前由于对影响煤体湿润边角的煤层自身因素还缺乏系统的试验资料，煤层的成煤物质、煤岩成分、变质程度以及容重等物理性质对湿润边角有什么影响还有待进一步研究。

煤层的湿润能力是指煤体与水接触时是否容易被水所湿润。它表现在煤体孔隙对水的毛细作用大小和水对细粒煤尘的粘合能力强弱，这都决定于水与煤的湿润边角和水的表面张力系数。在相同的表面张力系数条件下，不同的煤层有不同的湿润边角；在相同的煤层条件下，由于水的表面张力系数不同，也有不同的湿润边角。因此，可以用湿润边角作为表征煤层湿润能力的指标。由图 1—4 可知，湿润边角 $\theta < 90^\circ$ 属可湿润煤体， θ 角愈小，湿润能力愈大；湿润边角 $\theta \geq 90^\circ$ 属于不可湿润煤体， θ 角愈大，湿润能力愈小。在相同的水表面张力系数条件下、如果煤层的湿润边角 θ 较小，毛细作用力则

较大，增强了注水动力，使煤层易于注水湿润；相反则难于注水湿润。当水进入煤体裂隙以后，在湿润边角较小的煤层中，水易于湿润裂隙中的原生煤尘；相反难于湿润。

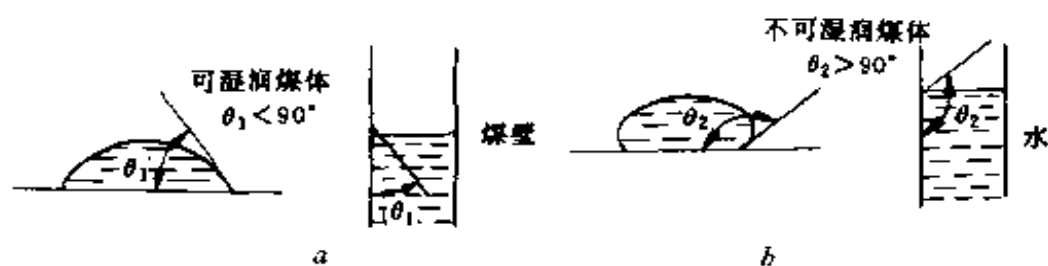


图 1-4 水对煤的湿润边角

a 可湿润煤体；*b* 不可湿润煤体

937506

第二章 煤层注水难易程度的分类

第一节 煤层注水难易程度的指标

煤层注水的难易程度也就是煤体湿润的难易程度，其主要含义是指水是否容易进入煤体的裂隙、孔隙；在某些情况下，还应包括水是否容易从煤体的部分裂隙中泄漏流失的内容。在煤层注水时，如果水很难进入煤体的裂隙、孔隙，或者水很容易从煤体的大裂隙中泄漏流失，都将给注水造成困难，甚至使注水无法进行或者得不到任何效果。因此，掌握了解表征煤层注水难易程度的指标十分重要。但是，迄今为止，这一指标我国尚没有统一规定，其测定、计算和使用方法都还有待于研究。目前通常所见的指标是采用煤层透水性系数。它反映了当注水时进入煤体裂隙、孔隙的难易程度。由于煤层的裂隙组成情况很复杂，使煤层的透水性在各个局部及各个方向上有很大差别，只有采用反映某一区域的综合平均的透水性系数值，才能比较真实地表示煤层透水性能。因此用实验室对煤样透水性系数的测定结果往往与实际出入很大，远远不能反映大范围内煤层的透水性。实验室测定数值仅能说明小块煤样的细小裂隙、孔隙情况，而不能概括整个煤层的裂隙系统的数量和组合情况。所以，煤层透水性系数 K_T 常用现场测定方法确定。

抚顺煤炭科学研究分院采用径向稳定流计算公式，在注

水现场进行了测算煤层的透水性系数。即

$$K_T = \frac{m}{T} \cdot \frac{\mu}{p_{\text{注}} - p_{\text{瓦}}} \cdot \frac{1}{4} \left(2\gamma^2 \ln \frac{\gamma}{\gamma_0} - \gamma^2 + \gamma_0^2 \right) \quad (2-1)$$

式中 m ——注水后煤体增加的水分值，%；

μ ——水的粘性系数， $0.001\text{Pa} \cdot \text{s}$ （水在 20°C 时，动力粘性系数为 1.005 ，运动粘度系数为 1.007 ，其单位换算见表 2-1 和表 2-2）；

$p_{\text{注}}$ ——注水孔口有效压力， Pa ；

γ ——煤体的湿润半径， cm ；

$p_{\text{瓦}}$ ——煤层瓦斯压力， Pa ；

γ_0 ——注水孔半径， cm ；

T ——注水时间， s 。

表 2-1 动力粘度单位换算表

泊 P ($\text{dn} \cdot \text{s}/\text{cm}^2 = \text{g}/\text{cm} \cdot \text{s}$)	厘泊 cP ($\text{dn} \cdot \text{s}/100\text{cm}^2 = \text{g}/100\text{cm} \cdot \text{s}$)	公斤(质)/米秒 ($\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$)	公斤(力)秒/米 ² ($\text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}^2$)	磅(质)/英尺·秒 ($\text{lb}/\text{ft} \cdot \text{s}$)
1	1×10^2	0.1	1.02×10^{-2}	6.72×10^{-2}
1×10^{-2}	1	1×10^{-3}	1.02×10^{-4}	6.72×10^{-4}
10	1×10^3	1	0.102	0.672
98	9800	9.8	1	6.59

表 2-2 运动粘度单位换算表

施 St (cm^2/s)	厘施 cSt ($\text{cm}^2/100\text{s}$)	米 ² /秒 (m^2/s)	英尺 ² /秒 (ft^2/s)
1	1×10^2	1×10^{-4}	1.076×10^{-3}
1×10^{-2}	1	1×10^{-6}	1.076×10^{-5}
1×10^4	1×10^6	1	10.76
0.26	25.81	2.58×10^{-5}	1

在注水现场测定透水性系数时，距注水孔不同的距离和不同的位置钻若干个观测孔，记录在各观测孔的取样时间及孔的距离，测定注水压力与瓦斯压力，从观测孔中取出煤样测定水分、算出增加值，最后将测定数据代入上式计算透水性系数。

开滦赵各庄矿采用上述方法在 4 层煤的卸压带测得的煤层透水性系数见表 2—3。

表 2—3 赵各庄矿四层煤卸压带煤层透水性系数表

注水孔号	试验孔数	注水压力 (大气压)	注水时间 (min)	最大湿润半径 (m)	水分增值 (%)	透水性系数 (达西)	注
1	3	3~4.9	10	1.9	2.5	0.122	曾泄水
3	3	3~3.8	8	2.5	0.6	0.559	
5	6	7~9.2	21	2.6	4.8	0.016	

煤层存在的两类孔隙中，大裂隙系统的透水性系数比煤块孔隙高 1~2 个数量级。国外某矿区的实测资料表明，煤层大裂隙系统的透水性系数 $K_L=50\sim100$ 毫达西；而煤块孔隙的透水性系数 $K_K=1\sim2$ 毫达西。由此可见，煤层的透水性主要决定于裂隙系统的透水性能。

不同煤层或同一煤层的不同地压区域其透水性系数差别很大。据已有的测定资料，煤层的透水性系数变化在几个毫达西至数百个毫达西之间；在地压集中区和卸压区，其透水性系数可相差 1~2 个数量级。

应当指出，煤层透水性系数随注压力的升高和注水时间的延续可能出现变化，注水压力可使煤层改变裂隙结构和透水性能；水的流动会使裂隙内的原生煤尘和瓦斯等重新分布，也将影响透水性系数的变化。因此，对某一煤层而言透水性

系数可能随注水时间的延长呈现一定的变化。

第二节 影响煤层注水难易程度的因素

一、煤层裂隙、孔隙的发育程度

煤层裂隙、孔隙的发育程度是影响煤体注水难易的首要因素。在一般情况下，裂隙发育、孔隙率高的煤层透水性强，水易于注入，注水压力较低。实践证明，裂隙发育而质地疏松的煤层多数采用低压注水就能取得良好的湿润效果。煤层的裂隙、孔隙的发育情况又是和煤层的各种条件相联系的，而它们对注水难易的影响程度又有较大区别，下面分别叙述。

1. 决定煤层裂隙、孔隙发育程度的因素

煤层裂隙、孔隙是否发育和煤层的成因类型、煤岩类型、变质程度和煤层所受动力作用等因素有密切关系。因此，根据煤层的这些因素，结合现场实际观测，初步判断煤层裂隙的发育程度，从而对注水的难易可做出估价。

1) 煤层的成因类型和煤岩类型的影响。

煤层由于成煤的原始植物物质及成煤堆积条件的不同，形成不同的物理性质和裂隙、孔隙。不同的成因类型（如腐植煤、残植煤、腐泥煤）和不同的煤岩类型（如光亮型、暗淡型等）的煤层，其裂隙、孔隙多于残植煤或腐泥煤，而光亮型煤、半亮型煤的裂隙、孔隙多于暗淡煤或半暗淡煤。

在各个煤岩成分中，镜煤和亮煤比重小，性脆易碎，内生裂隙大多产生在这里，外生及次生裂隙也易于发生；暗煤比重较大，质地致密，坚硬而具韧性，一般内生和外生裂隙不发育；丝炭则疏松多孔，性脆易碎能染指。由上述四种煤

岩成分所构成的四种煤炭类型，即光亮型、半光亮型、半暗型及暗淡型煤由于煤岩成分组分比例的不同而具有各自的裂隙、孔隙情况；其中光亮型煤和半亮型煤以镜煤或亮煤为主，凝胶化物质占大多数，内生与外生裂隙比较发育；而半暗型和暗淡型煤，主要由暗煤组成，以不透明基质为主，裂隙、孔隙较不发育，层理也不明显，呈块状结构。

在各个成因类型中，由高级植物生成的腐植煤、残植煤和由中、低级植物生成的腐泥煤等均有着显然不同的裂隙情况。腐泥煤（包括藻煤，半藻煤或烛煤等）通常为均一或块状构造，无明显层理，韧性大、硬度大、脆性小，裂隙、孔隙不发育；而在残植煤，腐植煤中其裂隙依次增多。表 2—4 列出了不同成因类型和煤岩类型的裂隙情况，可作为分析注水难易的一个因素予以考虑。

表 2—4 不同成因及煤岩类型煤层裂隙发育情况

成因类型	煤岩类型	主要煤岩成分	光 泽	物理力学性质	裂隙情况
腐植煤	光亮型	镜、亮为主	强光泽	性脆易碎	发 育
	半光亮型	亮煤为主	稍 弱	性较脆	较发育
	半暗淡型	暗为主、夹亮	较暗淡	硬度韧性较大	较不发育
	暗淡型	暗煤为主	暗 淡	坚硬致密	不发育
残植煤	半暗淡型 暗淡型	暗为主、夹亮 暗煤为主	较暗淡 暗 淡	韧性较大 韧性大	较不发育 不发育
腐泥煤	暗淡型	暗煤为主	暗 淡	贝壳状断口韧性大	不发育

2) 煤层的变质程度的影响。

在同一成因类型和煤岩类型的条件下，煤的变质程度则是影响裂隙和孔隙情况的重要因素。

由于煤的变质程度不同，煤层的物理力学性质有较大差别，其裂隙、孔隙有一定规律的变化。据某些资料统计，随着变质程度的增高，内生裂隙的数量呈规律性的变化，其中以中等变质程度的煤层最为发育。腐植煤中的焦煤内生裂隙最多，每 5cm 中有 30~40 条，有的可达 50~60 条。低变质和高变质的煤种内生裂隙则较少。煤的变质程度与内生裂隙条数之间的变化规律如图 2—1 所示。

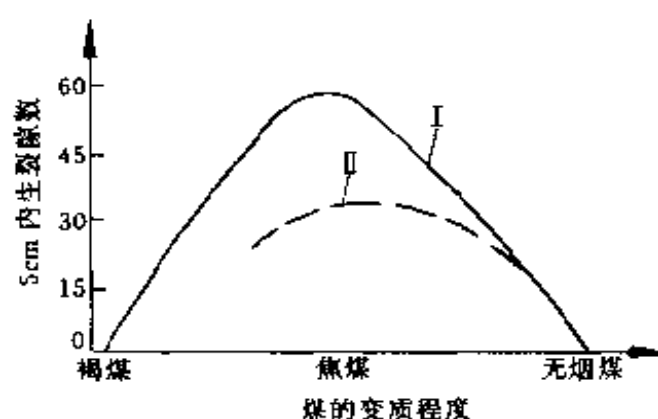


图 2—1 内生裂隙，与变质程度的关系

I—前苏联顿巴斯矿区光亮型煤；II—我国峰峰矿区光亮型煤

从图可见，顿巴斯煤田的焦煤内生裂隙每 5cm 内高达 50~60 条；峰峰煤田最高 30~40 条，随着变质程度的增大或减小，内生裂隙条数急剧减少。

不同变质程度的煤层具有不同的物理力学性质，因而外生裂隙和次生裂隙的状况也很不一致。一般说来，在脆性较大的中等变质程度的煤层中（如焦、肥煤等），外生及次生裂隙可能较发育，而在坚硬而韧性较大的长焰煤或无烟煤中则较小。

随变质程度的增加，煤体内的挥发物质、水分和瓦斯的

泄出量逐渐增多，所形成的孔隙也增多，孔隙率随之提高。但在低变质的煤层中，由于存在大量的挥发性物质，使煤体结构疏松，孔隙率反而增大。我国煤层的孔隙率大致变化在30%~20%之间，和煤的变质程度呈一U型曲线的变化关系。当挥发分高时，孔隙率也高，然后随挥发分的降低而降低，当挥发分为20%~30%时最低，最后随挥发分的降低又逐渐升高。如图2-2所示。

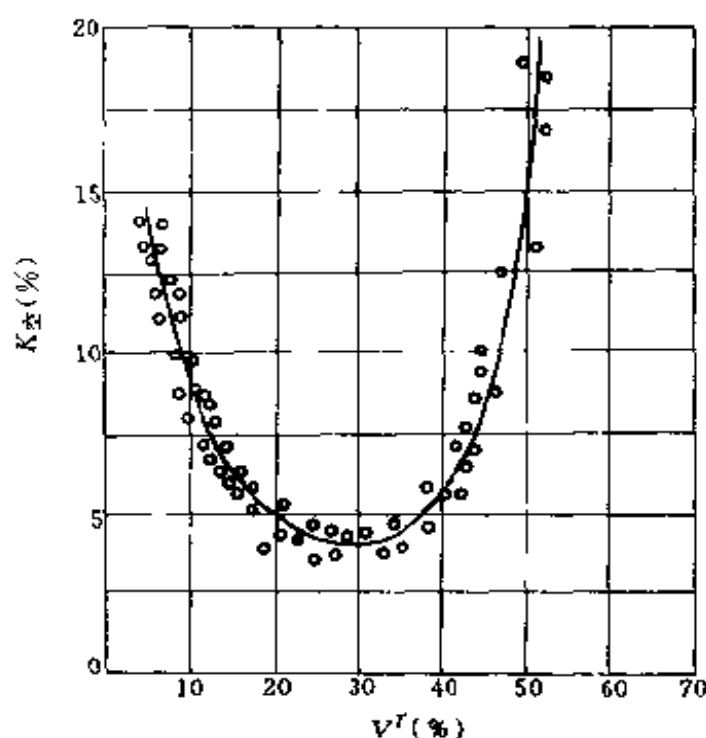


图 2-2 变质程度和孔隙率的关系

综合变质程度对裂隙、孔隙的变化影响可以归纳为表 2-5。

3) 地质构造运动与开采集集地压的影响。

煤层在地质构造运动或集中地压的作用下，将发生程度不同的破裂。煤层（及其围岩）沿破裂面两侧发生较大错动

则形成了断层，而没有发生显著错动和位移的破裂面则形成了构造节理。煤体中细微、密集、呈平行排列的构造节理就是煤体的外生裂隙。外生裂隙的发育程度决定于煤层的物理性质和构造运动的强烈程度。

表 2—5 变质程度对煤层裂隙、孔隙的影响

	褐 煤	长 焰	气 煤	肥 煤	焦 煤	瘦 煤	贫 煤	无烟煤
光 泽	暗淡	光泽较弱		玻璃光泽			金剛 光泽	似金属 光泽
力学性质	硬度最小	较硬、韧性强		硬度小、 脆性大		硬度较大		坚韧
内生裂隙	干缩裂纹	变少 ←————— 最发育 —————→ 变少						
外生裂隙	变少 ←————— 最易发生 —————→ 变少							
孔隙率	变高 ←————— 最 低 —————→ 变高							

在褶曲构造的翼部，大量存在着两种外生裂隙，一种是与层理面斜交的裂隙，它是由于褶曲各地层间的剪应力形成的，在脆性较强的煤层中尤为发育；另一种是平行于褶曲轴走向的裂隙，它是由于煤体受褶曲翼部岩体的挤压力发生塑性流动而形成平行排列的密集裂隙面，常见于塑性及韧性较大的煤层中。

在断层的上、下两盘由于两盘间剪切应力的作用，也形成外生裂隙。外生裂隙也有两组，一组呈与断层面斜交的方向，与断层的锐角夹角指向相邻盘的错动方向，这是主要裂隙组；另一组平行于断层面，往往不发育。断层对两盘煤体的影响范围大小不一，最大可达数公里，对煤层的注水难易

影响范围很大。

在壁式采煤工作面，煤体在采落前要经受超前集中压力的作用，使煤体在集中地压区附近靠近工作面煤壁一侧的卸压带出现大量次生裂隙，并使煤体发生塑性变形。卸压带的走向宽度和次生裂隙发育程度取决于地压集中程度及煤体力学性质。通常所见的卸压带走向宽度为 2~3m，集中地压带可达十余米甚至数十米。如前所述，在次生裂隙发育的煤体卸压区，煤层透水性系数 K 常常可增大 1 个数量级。

2. 煤层裂隙，孔隙发育程度对注水难易的影响

煤层内裂隙系统的透水性系数比煤块孔隙高出 1~2 个数量级，煤层的透水性主要决定于裂隙系统的透水性能，因此，裂隙发育程度是煤层透水性的主要因素。注水实践证实，裂隙发育的煤层透水性好，易于注水，所需注水压力较低；而在煤体致密，节理不发育的煤层透水性差，即使在较高的注水压力下也不一定取得预期的效果。但是在有些地质构造运动强烈或受开采集中压力破坏的煤层区段，由于外生及次生裂隙大量形成而使煤层透水性急速增加，这对均匀湿润煤体反而造成了不利因素。实践证明，凡是在壁式工作面的卸压区内，在经支承压力破坏的煤柱区内，或在那些地质构造复杂区域内进行注水，水往往易从发达的裂隙中迅速流动而散失于远~~外~~或煤体之外，对均匀渗入孔隙是极为不利的；如注水区域内具有一些较大的裂隙（如断层、破裂面等），预湿煤体的工作反而变得更为困难。

孔隙率对注水的难易有直接影响。根据国外的研究证实，煤层的孔隙率是确定注水难易程度的可靠的一般标准，这是因为孔隙率与煤层天然充水程度，煤层裂隙透水性都具有一定的函数关系，而煤层充水程度和煤层裂隙透水都直接决定了

注水的难易和湿润的效果。原苏联在若干煤田对孔隙率、透水性系数、天然充水程度进行了实测和统计，表明了煤层的透水性系数和煤层的天然充水程度随煤层孔隙率的变化而呈一定规律的变化。随着孔隙率的提高，透水性系数逐渐增加，当孔隙率为1%~4%时，透水性系数几乎为零（不可注水）；当孔隙率为15%时，透水性系数有最高值（约为50~60毫达西）；当孔隙率继续升高，透水性系数又逐渐降低，孔隙率为40%~50%时，煤层的裂隙透水性系数为零（多孔无裂隙均质体），此时整个煤层的透水性系数极小（约为0.2~0.5毫达西），仅仅是极微弱的煤块孔隙透水性的反映，为不可注水煤层，其变化情况见表2-6。随着孔隙率的提高，煤层孔隙天然充水程度的变化恰恰和透水性相反，由高逐渐变低，在煤层孔隙率为12%左右时有最低值，随着孔隙率的继续提高又迅速回升至原有数值。天然含水程度用含水系数表示，它指单位孔隙容积中被天然水充填的那部分容积的占有比例（从0到1）。孔隙率与含水系数的函数关系如图2-3所示。

由上可知，煤层注水难易规律是：煤层的孔隙率小于4%

表2-6 前苏联若干煤田烟煤煤层的注水难易程度

煤层 孔隙率	裂隙透水性 系数	孔隙透水性 系数	天然充水 系数	注水后充 水系数	注水效果
1%~4%	≈0	—	0.2~0.8	0.2~0.8	不可注，无效
5%~15%	1~10	0.3~0.4	0.15~0.35	0.8~1.0	一般有效果
15%	5~60	1~2	0.5	0.85~1.0	有效果
40%~50%	≈0	0.2~0.5	≈1.0	1.0	发生水力压裂， 无效

注：表中透水性系数单位均为毫达西。

时，透水性系数接近于零，注水无效果；当孔隙率为 15% 时，煤层透水性及注水后充水程度最高，注水效果最佳；而当孔隙率达到 40% 时，煤层成为均质体，天然含水系数已达 1，不能注水，也没有必要注水，多属褐煤煤层。

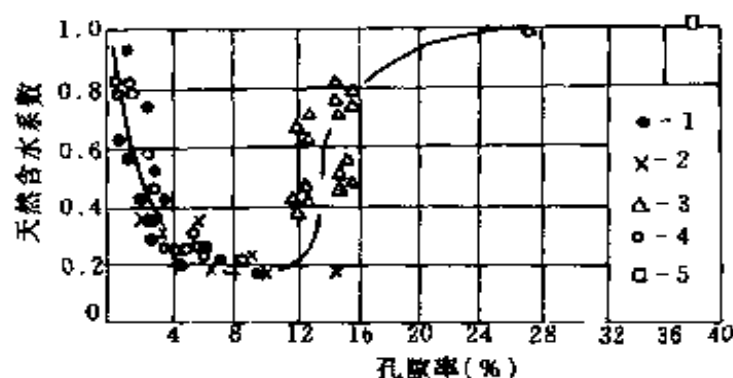


图 2-3 孔隙率与天然含水系数的关系

1—基谢洛夫煤田；2—顿巴斯中央区；3—特基布里—耶尔煤田；4—苏留村金煤田；5—舒拉波煤田

在透水性不好的煤层中注水时，水只沿少量裂隙流动，或者在水力压裂的煤层新裂隙中流动，并不均匀湿润煤体的孔隙。水沿裂隙缝流动的范围，并不是钻孔的真实湿润范围，注水实质上无效的。

二、煤层的埋藏深度与地压的集中程度

煤层由于埋藏深度不同所承受的地层压力也不同，从而使煤层内各类裂隙的严密程度及微孔隙容积的压缩程度有很大的差异。因此，埋藏深度或在开采时地压的集中程度成为影响煤层注水难易的主要因素之一。

煤层承受的地层压力一般用上覆岩层的静水压力计算。

它和埋藏深度成正比，即

$$P_{\text{地}} = \sum (\gamma_{\text{岩}} \cdot h_{\text{岩}}) \times 10^{-4} = \gamma_{\text{均}} \cdot H \cdot 10^{-4} \quad (2-2)$$

式中 $P_{\text{地}}$ ——煤层承受的地层压力， kg/cm^2 ；

$\gamma_{\text{岩}}$ ——某一岩层的容重， kg/m^3 ；

$h_{\text{岩}}$ ——同一岩层的垂厚， m ；

$\gamma_{\text{均}}$ ——上覆岩层的平均容重， kg/m^3 ；

H ——煤层埋藏深度， m 。

为计算方便，上式可以简化为：

$$\overline{P}_{\text{地}} = (0.25 \sim 0.3) H \quad (2-3)$$

在实验室对不同压应力下煤样的渗透性进行了试验，结果表明，煤样的渗透性随压应力的增加急剧降低，直至压应力超过 40 个大气压以后，渗透性下降的趋势才逐渐变得平缓；到压应力超过 80 个大气压以后，渗透性趋于稳定而不再变化。

注水的实际资料同样证实，地层压力是注水难易程度的重要影响因素。

(1) 随着埋藏深度的增加，煤层承受地层压力也随之增加。煤层裂隙和微孔隙受煤压缩变形的影响，裂隙压紧，孔隙容积降低，透水性系数随之降低，注水压力相应提高。因此，在一般情况下，埋藏深度愈大，注水压力愈高。但在地压大的煤层中注水时，湿润均匀，不易泄漏流失。在长壁采煤工作面的超前支承压力带，或其它大而积采空区附近的采场，煤层承受地压是正常地压的 1~2.5 倍。如在地压集中区内注水，也同样引起注水压力的升高。表 2—7 列出了我国部分矿井的开采深度及注水压力值。从表可以看出注水压力随开采深度的增加而增加的一般性规律。当然，现有的资料还不能从实践上完整地描述开采深度与注水压力之间的全部规

律，例如，开采深度增加到什么程度后，注水压力的变化趋于平缓或稳定等。

表 2-7 煤层开采深度及注水压力

局、矿名	煤 层	开采深度 (m)	地层压力 (atm)	注水压力 (atm)
石炭井三矿	二、五、九层	20~190	5~57	3.5~10
轩岗六亩地矿		120~150	36~45	27~30
重庆中梁山矿	南井二号层	171	42.9	56
重庆中梁山矿	南井二号层	187	46.9	63
重庆中梁山矿	南井二号层	216	54.1	73.5
重庆中梁山矿	南井二号层	233	58.3	77.4
京西门头沟矿	八 层	375~550	94~165	30~100
枣庄陶庄矿	二 层	390~450	97~135	80~120

(2) 实践证明，在一般情况下，无论开采深度的大小，只要注水压力不超过地层压力，都不致发生泄水跑水现象。但如果煤层内存在较大断层面或较大裂隙面时，则应充分估计泄水的可能，从而选择合理的注水压力。表 2-7 的数据大体也可反映这一规律。

(3) 在开采深度较大的矿井里，如地层压力达到或超过煤层破裂压力，则当注水压力增至地层压力时，将会在煤体中造成破裂面时，产生新的通道，即在阻力较小、强度较低的弱面上打开水流渠道，使水流失到很远的地方或煤体之外。例如京西门头沟矿龙门第三试验工作 1 号注水孔，当注水压力达到地层的压力 $140\text{kg}/\text{cm}^2$ 时，仅数分钟内就将煤层裂隙击穿，在距钻孔倾斜向上 8m 的上山煤壁处大量泄水，而使注水中止。

在开采深度较小，地层压力小于煤层破裂压力的那些注水地点，不能从注水压力和地层压力的关系判断是否将发生压裂泄水，它们之间并无明显的影响关系。注水压力即使高于地层压力，但没有达到煤层破裂压力时，注水仍可正常进行；只有当注水压力超过煤层破裂压力后，才有可能压裂煤层发生泄水漏水。例如重庆中梁山煤矿南井2号煤层注水压力均超过地层压力，但其数值只达5.6~7.7MPa，因而远不能使煤层破裂，实现了正常注水。

根据一些煤田的统计数据整理出一个开采深度与注水压力的经验公式，即

$$P_0 = 156 - 78 / (0.001H + 0.5) \quad (2-4)$$

式中 P_0 ——煤层注水的最小压力；大气压；

H ——开采深度，m。

上述函数关系只适合于资料范围以内的各煤层的具体条件。不同的煤层其函数关系各自具有不同的形式，应从实测资料中进行统计分析。

三、煤层的物理力学性质

从实验中可知，煤的硬度、强度、韧性和脆性等物理力学性质对注水均有影响。

1) 由于坚固性系数综合反映了煤岩在各种方式下破碎的难易程度，它既概括了煤的裂隙孔隙情况，又概括了煤块本身的韧性、脆性等物理性质，所以煤层的普氏坚固性系数可以作为影响程度的参考指标。实践证明，如果其它条件相似，坚固性系数较小的煤层较易注水，而坚固性系数较大的煤层较难注水。应当指出，我们已知道的坚固性系数通常是在煤层中取煤样测定的，它对整个煤层的层理、裂隙系统情况的

反映是有局限性的，因此，按照煤样测得的坚固性系数判别煤层的注水难易程度可能出现例外情况，这需要将坚固性系数和煤层的层理、节理以及结构情况加以综合分析，得出正确的结论。

2) 在裂隙、孔隙发育的煤层中，摩氏硬度系数对注水的影响很小。一些矿井煤层的硬度达到 3 以上，但仍用低压或中压注水取得良好效果。在那些裂隙不发育的致密块结构的煤层中，硬度才会对注水产生较大的影响。在这类煤层中注水，压力水必须不断撑开或扩大裂隙进入煤体深部，煤体愈硬注水压力则愈高。

3) 在质地非常松软易破碎或粉末的煤层，虽然其坚固性系数及硬度系数都较小，但注水时常常会出现困难，这是因为注水中细末状的煤泥可能堵塞孔壁，造成水的渗流所致，除了采取钻孔内煤泥的清洗措施外，一般注水压力可能高于其他煤层。

国外用统计方法得出某矿区关于工作固深孔注水的经验公式：

$$P = (6.75f - 3)V + P_0 \quad (2-5)$$

式中 P ——初始最大注水压力，大气压；

P_0 ——最小注水压力，大气压；

f ——煤层的普氏坚固性系数；

V ——注水速度，L/min·m。

从式中可知，欲取得 0.3L/min·m 的注水速度，在 $f=2$ 的煤层中采用的初始最大注水压力应比 $f=1$ 的煤层高出 20 个大气压左右。但此式只适用于该矿区的煤层深孔注水条件，不同矿区可以统计整理得出适合本矿区煤层条件的经验公式。

四、煤层内的瓦斯压力

煤层内的瓦斯压力是注水的附加阻力，水克服了瓦斯压力的阻力后所剩余的压力才是注水的有效压力。显然，在瓦斯压力较大的煤层，为了取得相同的注水流量，需要提高注水压力，从而增加了注水的困难。在低瓦斯矿井，瓦斯含量和瓦斯压力都很小，瓦斯压力的影响可以不予考虑；而在高瓦斯矿井，瓦斯压力往往高达数十个大气压，这就成为注水的主要影响因素之一。在我国许多矿井中，煤层透气性差，瓦斯压力大，在这些难以抽放瓦斯的煤层中进行注水时，通常都实行中、高压注水。

五、煤的湿润边角

一般实验证明，煤的湿润边角小，毛细作用力较大，增强了注水的动力，使煤层易于注水，煤愈于湿润。煤的湿润边角较大，难于注水，当煤的湿润边角大于 90° 时，煤层属于不可湿润煤体。

第三节 煤层注水难易程度的 分类及其方法

煤层注水的难易程度不仅是评价煤层能否注水及注水效果好坏的重要指标，而且也是确定注水方式及注水工艺参数的重要依据。在这一节里，我们介绍用模糊数学方法确定煤层注水的难易程度。

一、基本原理与方法

用模糊数学方法确定煤层注水的难易程度，就是对已注水的大量煤层进行模糊聚类分析，找出各类煤层在注水过程中所具有的透水性及湿润能力等特征，建立煤层可注性的预测模式，然后通过模式识别方法预测待注水煤层的可注及注水中可能出现的主要问题，从而为充分利用已注水煤层的注水经验及有关信息，进行合理地确定注水工艺参数和安排注水工作提供科学依据。

1. 建立母体样本及其指标向量

选取 n 个具有代表性的已注水煤层为母体样本，则母体样本向量为

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\} \quad (2-6)$$

每个母体样本用影响煤层注水难易程度的主要因素做为母体样本指标描述，则样本指标向量为

$$u_i = \{c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{im}\} \quad (2-7)$$

式中的 c_{ij} 代表第 i 个样本 j 个因素指标 ($i=1, 2, 3, \dots, n$; $j=1, 2, \dots, m$)。

2. 计算样本间的相似系数，建立 U 上的模糊关系矩阵 \tilde{R}

$$\hat{R} = [\gamma_{ij}]_{n \times n} \quad (2-8)$$

在这里采用夹角余弦法计算相似系数，即

$$r_{ij} = [\sum_{k=1}^m c_{ik} c_{jk}] / [\sqrt{\sum_{k=1}^m (c_{ik})^2 \sum_{k=1}^m (c_{jk})^2}] \quad (2-9)$$

由于 \tilde{R} 一般只满足自反性，不满足传递性，需将 R 通过自乘方式改造为等价关系 \tilde{R}^* ，用 \tilde{R} 的传递闭包代替进行聚

类分析。这方面数学已证明，一个模糊相容关系一般经过小于 $n-1$ 次，即可使其改造成模糊等价关系（传递闭包）。

自乘公式为

$$\gamma_{ij} = \bigvee_{k=1}^n (\gamma_{ik} \wedge \gamma_{kj}) \quad (2-10)$$

3. 模糊分类

其方法是通过求与 \tilde{R}^* 对应的人截集 \tilde{R}_λ 进行聚类分析，即

$$\tilde{R}_\lambda = \{ (u_i, u_j) / \mu_{\tilde{R}}(u_i, u_j) \geq \lambda, u_i, u_j \in u \} \quad (2-11)$$

式中 $\lambda \in [0, 1]$ 。

λ 取值从 1 开始按 \tilde{R}^* 中的元素值，由大到小进行分类，直至分到所要求的能反映实际问题的分类数为止。

4. 模式识别（预测待注水煤层的可注水性）

母体分类后，将划分的各类作为预测样本，以各类各因素指标的平均数作为预测样本指标的数据，同待测煤层样本及样本指标数据分别组成样本向量和样本指标数据表。然后按上述 2 至 3 步骤进行分类，待测煤层样本与母体哪一类划分为同类，待测煤层就属于哪一类。

二、样本指标的确定

样本指标选择的是否合理，是准确地预测煤层注水难易程度的关键。因此，母体样本指标的选择一是要与现场具体情况相吻合，具有较强的代表性；二是得出的母体样本分类对整个矿井或一定范围的矿区具有普遍意义。我们知道，煤层注水的难易程度是指煤体湿润的难易程度，即水是否容易

进入煤体的裂隙孔隙，以及在某些情况下，水是否容易从煤体的部分裂隙中泄漏流失等。显然，影响煤层注水难易程度的主要是地质条件及煤层的物理力学性质，即煤层的埋藏深度、煤层的裂隙和孔隙的发育程度、煤层的湿润边角、煤的坚固性系数、煤层的自然含水率和饱和含水率、煤层的瓦斯压力和煤层开采时形成的地压集中程度、煤的摩氏硬度系数以及煤的韧性、脆性等。当然注水工艺参数、注水方式和水的粘性系数也直接影响煤层注水的难易，但这些因素不是反映煤层自身注水的难易，因此，评价煤层注水难易程度主要应当根据地质因素和煤层的物理力学性质考虑。所以，选取下列影响煤层注水难易程度的因素做为母体样本指标。

1. 煤层裂隙的发育程度

煤层裂隙是压力水流动的主要通道，因此它直接影响水在煤体中流动的难易。

煤层裂隙分为原生裂隙和新生裂隙，所以它不仅与煤岩成因类型、变质程度及地质作用有着密切的关系，而且与开采时形成的地压集中程度有关。因此，煤层裂隙指标具有较强的代表性。

2. 煤层孔隙率

由于孔隙率与煤层自然充水程度及煤层裂隙透水性有一定函数关系，而煤层自然充水程度与煤层裂隙透水性又直接决定注水难易和湿润效果。所以，该因素是确定注水难易程度的重要指标。

3. 煤体湿润边角

湿润边角是煤体表面与水面垂直接触时浸没边缘处所成的液相夹角。它是反映煤体亲水性强弱的指标。湿润边角越小，湿润能力越大。湿润边角大于等于 90° 的煤层，为不可湿

润煤层。

4. 煤坚固性系数 f 值

煤的坚固性系数是反映煤层破碎难易程度的综合性指标。实践证明，若其它条件相似，坚固性系数较小的煤层较易注水，坚固性系数较大的煤层难注水，其数值一般在 1~2.5 范围之内。

5. 饱和水分增值

它是直接反映煤层吸水能力的指标。

6. 应力状态

煤层的埋藏深度不同，其地层压力也不同，煤体内裂隙严密程度及微孔隙容积的压缩程度也有很大差异。一般压力大，裂隙压紧，孔隙容积减小，透水性差。因此，它也是影响煤层注水难易的主要指标。在这里以煤层埋藏深度代表应力状态指标。

由上可知，母体样本指标向量为

$u = \{\text{裂隙发育程度, 孔隙率, 煤层湿润边角, 饱和水分增值, 坚固性系数, 埋藏深度}\}.$

三、样本指标分析

在上述样本指标中煤层裂隙发育程度和饱和水分增值两项是数值越大，煤层注水越容易；而煤层湿润边角、煤的坚固性系数和煤层埋藏深度则是本身数值越大，注水越难，它们的物理趋势的数字表示是相反的。为使各指标都表现为数值越大，注水越容易，取湿润边角、坚固性系数和埋藏深度的值均为倒数。

从实践中可知，煤层孔隙率在 1%~4% 时，透水性系数几乎为零，为不可注水；在 16% 时，透水性系数为最高，注

水效果最好；当孔隙率继续升高，透水性系数又逐渐降低，当达到 40%~50% 时，煤层裂隙透水性系数为零，为多孔无裂隙均质体，不可注水。为使该样本与其它样本物理变化趋势一致，即都使样本指标数据逐渐增大，煤层注水逐渐容易，使孔隙率大于 16% 的各值按下式计算后做为指标数据，即

$$u'_i = \frac{1}{100} [(40 - u_i) / 2 + 4] \quad (2-12)$$

式中的 u_i 为样本原始数据 ($i=1, 2, \dots, n$)。

四、例题

表 2-8 样本是从部分矿煤层注水资料筛选出来的。这些样本属于不同矿区的不同煤层或同一煤层的不同采区。经计算数据处理后的样本数据见表 2-9 和表 2-10，样本间相似系数求出后建立的矩阵 \tilde{R} 经 4 次自乘得相应的矩阵 \tilde{R}^4 。取阈值 $\lambda=0.88168$ ，分成以下 5 类。

表 2-8 样 本

1	21	9.5	88	1.8	3.7	420	x_1
2	31	12.2	28	1.2	6.4	350	x_2
3	51	15.7	40	1.0	8.5	300	x_3
4	24	38.2	30	0.8	1.7	385	x_4
5	35	23.3	38	0.9	5.4	265	x_5
6	18	7.5	65	1.9	1.9	625	x_6
7	44	8.8	53	1.1	5.3	470	x_7
8	38	16.1	73	1.0	4.7	360	x_8
9	23	4.8	60	2.3	1.1	480	x_9
10	24	13.1	49	1.4	2.8	285	x_{10}
11	55	10.3	55	1.2	3.6	340	x_{11}

表 2—9 整理后的样本数据表

指 标 样 本 号	裂隙发育 (条/5cm)	孔隙率 (%)	湿润边角 (°)	硬度 (F)	饱和水增 (%)	深度 $\left(\frac{1}{100}\text{m}\right)$	备 注
1	21	9.5	0.0114	0.56	3.7	0.2381	x_1
2	31	12.2	0.0357	0.83	6.4	0.2857	x_2
3	51	15.7	0.0250	1.0	8.5	0.3333	x_3
4	24	5.0	0.0333	1.25	1.7	0.2597	x_4
5	35	12.5	0.0263	1.1	5.4	0.3774	x_5
6	18	7.5	0.0152	0.53	1.9	0.1600	x_6
7	44	8.8	0.0187	0.91	5.3	0.2128	x_7
8	38	16.1	0.0137	1.0	4.7	0.2778	x_8
9	23	4.8	0.0167	0.44	1.1	0.2083	x_9
10	24	13.1	0.0204	0.75	2.8	0.3509	x_{10}
11	55	10.3	0.0182	0.85	3.6	0.2941	x_{11}

表 2—10 标准化样本数据表

指 标 样 本 号	裂隙发育 (条/5cm)	孔隙率 (%)	湿润边角 (°)	硬度 (F)	饱和水增 (%)	深度 $\left(\frac{1}{100}\text{m}\right)$	备注
1	-0.7639	-0.2841	-0.00063	-0.01768	-0.02525	-0.0019	x_1
2	-0.1326	-0.1136	-0.00091	-0.00063	0.14520	0.0013	x_2
3	1.1301	0.1073	0.00023	0.01010	0.27778	0.0039	x_3
4	-0.5745	-0.34722	0.00075	0.02588	-0.15152	-0.0006	x_4
5	0.1200	0.1263	0.00031	0.01642	0.08207	0.0068	x_5
6	-0.9533	-0.4104	-0.00039	-0.01957	-0.13889	-0.0069	x_6
7	0.6881	-0.3283	0.00016	-0.00442	0.07576	-0.0038	x_7
8	0.3094	0.1327	-0.00049	0.01010	0.03789	0.0006	x_8
9	-0.6375	-0.5870	-0.00029	-0.02525	-0.18939	-0.0039	x_9
10	-0.5745	-0.0568	-0.00006	-0.00568	-0.08207	0.0050	x_{10}
11	1.3826	-0.2339	-0.00020	0.00063	-0.03157	0.0019	x_{11}

第一类： $\{x_3, x_5, x_{11}\}$

x_3 、 x_5 和 x_{11} 三个样本的各指标平均值为：裂隙发育 39 条/5cm；孔隙率 17.1%；湿润边角 35.3° ；硬度为 1.03；饱和水分增值 6.77%；深度 305m。在这种条件下，当时不论是低压注水，还是静压注水，效果均比较好，水分增值平均为 2.1%。所以，第一类为容易注水煤层。

第二类： $\{x_2, x_7, x_8\}$

x_2 、 x_7 和 x_8 三个样本的各指标平均值为 4.5 条/cm；11.73%； 60.3° ；1.13；4.53%；437m。当时在这种条件下，采用低中压或延长注水时间注水，取得了较好的效果，水分增值平均为 1.67%。故第二类为较易注水煤层。

第三类： $\{x_1, x_{10}\}$

x_1 和 x_{10} 两个样本的各指标平均值分别为：22 条/5cm；9.9%； 71.5° ；1.5；3.65%；380m。当时在这种条件下采用中压间歇注水，其注水效果也比较好，水分增值为 1.45%。所以，第三类为可注水煤层。

第四类： $\{x_6, x_9\}$

x_6 和 x_9 两个样本的各指标平均值分别为：21 条/5cm；6.15%； 58° ；2.1；1.5%；455m。在这种条件下，当时采用的是高压注水，最高注水压力达 $110 \times 98 \text{ kPa}$ ，此时发生严重泄水现象，注水效果较差，水分增值平均为 0.71%。故第四类为难注水煤层。

第五类： $\{x_4\}$

样本 x_4 各指标数据为：24 条/5cm；38.2%； 30° ；0.8；1.7%；385m。在这种情况下注水无有效果，原因是煤层已成为多孔均质。故第五类为不可注水煤层。

上述母体样本分为 5 类，是否可作为评价煤层注水难易

程度的模糊模式，这里选用朝阳煤矿区注水的两个煤层样本进行检验，其方法如下：

已知两个待预测的注水煤层样本指标数据为：

$$m_1 = (22, 12.1, 70, 2.10, 2.7, 370)$$

$$m_2 = (33, 16.5, 60, 1.04, 5.1, 230)$$

由模式识别方法可知，要预测 m_1 和 m_2 两个煤层注水难易程度，须首先计算上述各类各指标综合平均数，并将各类作为待测样本，预测 m_1 和 m_2 两个样本分别编作第六和第七类，如见表 2-11。

按上述分类步骤由微机计算， m_2 与第一类划为一类，属于容易注水煤层； m_2 与第三类划为一类，属于可注水煤层。划分结果与实际情况一致，上述聚类结果作为该矿煤层注水难易程度评价模式可行。本节所使用的程序作者在参考文献 [2] ~ [9] 中均有附注。

表 2-11 待测样本数据

指 标 样 本 号	裂隙发育 (条/5cm)	孔隙率 (%)	湿润边角 (°)	硬度 (F)	饱和水增 (%)	深度 (m)
1	39	27.2	48.3	1.05	5.92	286
2	45	11.73	60.3	1.13	4.53	437
3	22	9.9	71.5	1.5	3.65	380
4	21	6.15	58	2.1	1.5	455
5	24	38.2	30	0.8	1.7	385
6	22	12.1	70	2.10	2.7	370
7	33	16.5	60	1.04	5.1	230

第三章 煤层注水参数的优化

第一节 煤层注水参数及技术要求

一、几何参数

(一) 注水孔长度与注水孔间距

1. 短钻孔注水

短钻孔注水，其孔长应根据工作面日进度，使之满足尽快湿润一个循环进度煤体的要求，一般孔长应超过湿润范围0.2m为宜。

孔距决定于每孔的湿润半径，但应注意各自然小分层及夹石的不同透水性能，必须使孔间的煤体在任一分层都得到湿润。在实际工作中，注水孔的间距应在注水作业中按煤层变化情况进行及时调整，一般为2~8m。

2. 长钻孔注水

1) 基本要求。

(1) 所选择的孔长、孔距能够使煤体普遍湿润，不出现大的无水区；

(2) 尽量减少钻孔工程，但又要注意不能因钻孔过短或间距过大，而使注水持续时间拖得太长；

(3) 煤层沿走向和沿倾斜方向上大致同时被普遍湿润；

(4) 钻孔力求穿过煤层的夹石层，而不穿到顶、底板，以

增加各自然小分层的湿润均匀性。

2) 影响孔长、孔距的主要因素。

(1) 煤层的透水性。煤层的透水性决定了水在煤体中的运动速度，因而对孔长和孔距有直接影响。在工作面倾斜长度相等的条件下，透水性强、倾角较大的煤层下向孔的长度可选取较小值，其孔间距可选取较大值；反之则应加大孔深和缩小孔距。

(2) 煤层倾角。倾角愈大，水的自重因素影响愈显著，在透水性强的煤层中可以适当缩短下向孔的长度，以防止水很快渗入机巷，使机巷煤壁过早泄水，影响走向方向上煤体的湿润。

(3) 工作面斜长。一般情况下，倾斜孔的长度随工作面斜长的加大而增加，以保证在预定的注水时间里湿润工作面全长。但应当注意要使孔底与下机巷煤壁保持足够的距离，防止在煤体尚未湿润前，从机巷煤壁泄水。

(4) 煤层的厚度和地质构造情况。在薄煤层中，为避免钻孔穿入顶底板，可以缩短钻孔长度，适当加长注水时间，以期全部湿润煤体。在地质构造复杂，倾角变化较大，褶曲、断层较密时，应当按照避开地质构造为原则确定每个孔的具体长度，力求有较好的钻孔质量和注水效果。

(5) 注水压力和注水时间。注水压力和注水时间与钻孔长度和孔距具有较强的相关性。当注水压力较高，注水流量较大，钻孔湿润范面较大时，可以适当减少孔的长度和增加孔间距；当注水压力一定，如果容许每孔有较长的注水时间，则可适当减少孔的长度和增加孔的间距。

3) 钻孔长度和间距数值的一般统计规律。

我国各注水矿井多为倾斜长钻孔，注水孔长度与工作面

倾斜长度的比例大致在 $\frac{1}{3} \sim \frac{2}{3}$ 之间,最短不得少于 20~30m,最长不超过 100m。倾斜钻孔的走向距离大致在 10~20m 之间。表 3—1 列出了我国主要注水矿井在不同条件下选用的孔长和孔距数值。

了解各种钻机的排粉能力。

从表 3—1 可知,在低压注水的易透水煤层中,注水孔与工作面长度的比例小,其中缓倾斜煤层大致在 $\frac{1}{3}$ 左右,而近水平煤层则在 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$ 之间。在中、高压注水的难透水煤层中,注水孔长度与工作面长度的比较大,普遍在 $\frac{1}{2} \sim \frac{2}{3}$ 之间。在薄煤层中,长钻孔施工较困难。因此,在煤层透水性较好时,如孔深超过 20m,即可用以进行注水。

各注水矿井采用表 3—1 所列钻孔特征进行注水,均取得了显著的效果,因此,可以参照该表选择注水孔的长度和间距。但是,必须指出,尽管按该表选择参数能获得较好的注水效果,但不一定是最优参数,仍要结合本矿实际确定。国内外一些研究部门认为,倾斜注水孔的长度应按 $l = L_1 - 20$ 计算较为最合理(式中 l ——倾斜注水孔的长度; L_1 ——工作面倾斜长度)。

(二) 钻孔倾角

1. 短钻孔注水

为使水较快地进入各个小分层之中,应使钻孔尽可能穿过其各个小分层。开滦赵各庄矿在九号层注水时,煤厚度在 1.8m 以下,采用单排注水孔,钻孔俯斜穿过四个自然分层;煤层厚度大于 1.8m 时,采用双排注水孔,上排平行于顶板,下排俯斜穿过三个自然分层。

表 3-1 国内部分矿井注水钻孔特征表

局矿层别	注水压力	钻孔方式	煤层倾角 (°)	工作面斜长 (m)	钻孔长度 (m)	孔长与工 作面长之比	孔距 (m)	封孔深度 (m)	钻孔机械
新汶孙村矿 2409 面	中压	下向孔	12~17	80~130	30~90	1/2~2/3	15~20	6~9	YZ2S 电钻
新汶良庄矿 1407 面	中压	下向孔	15~18	60~150	40~90	1/2~2/3	15~20	5~6	YZ2S 电钻
枣庄陶庄矿 二煤层	中压	下向孔	5~10	130~150	80	1/2~2/3	10	5~6	TXU-75 钻机, YZ2S 电钻
重庆松藻矿 大连子层	中压	下向孔	24~30	75	26~42	1/3~2/3	25~50	8~16	TXU-75 钻机
重庆中梁山矿 二煤层	中压	上向孔	60~70	70~180	30~55	1/2~2/3	20	3	红旗-150 钻机
京西门头沟矿 八层煤	中、高压	下向孔	13~20	130	17~37	上向+下向 =1/2	20~30	8~10	TXU-75 钻机
		上向孔			24~40		20~30	8~10	
石炭井各矿 上下组煤	低压	下向孔	20~25	70~180	25~90	1/3	10~15	3~5	TXU-75 钻机,红旗 -150 钻机,煤电钻
莱芜洋西矿	低压	下向孔	20~35	60~90	20~35	1/3	15~20	4~5	TXU-75 钻机
阳泉二矿 西四尺 7 号层	低压	下向孔	近水平	89	40~66	1/2~2/3	3~7	3	100m 钻机
大同同家梁矿 11 层	低压	下向孔	4~5	130~150	90~100	≈2/3	15	2~3.5	TXU-75 钻机, YZ2S 电钻
本溪彩电矿 二接层	低压	下向孔	20~24	108	37~50	1/2~1/3	8	3	仿苏 50m 钻机
抚顺龙凤矿	低压	穿层孔	40	V 型面	26~144	—	—	4~5	

2. 长钻孔注水

采用长钻孔注水时,钻孔的角度一般与煤层倾角一致,不能使终孔位置穿入顶、底板。在具体确定倾斜钻孔的角度时,应考虑以下要求:

(1) 钻杆和钻具因自重影响要沿铅垂方向下沉,从而使钻孔下弯,为此在确定钻孔倾角时,应按煤层倾角作出相应调整。

(2) 如若欲穿透煤层中的夹矸层,应选择合理的孔口位置,调整钻孔的倾角,尽可能不要穿顶、底板。

(3) 如果在煤层中布置的倾斜的上向孔时,其伪倾斜方位角可按中梁山矿所用方法计算:

首先在工作面钻孔处实测煤层倾角和走向方位角等数据,然后根据注水的要求确定钻孔沿层而的伪倾角,最后按下述计算式求出钻孔的仰角和钻孔方位角,如图 3-1 所示。

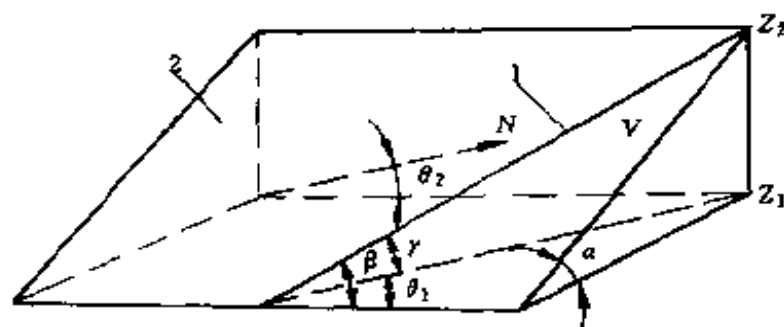


图 3-1 钻孔的伪倾斜方位角计算图

1—钻孔; 2—煤层

$$\begin{cases} \sin \gamma = \sin \alpha \cdot \sin \beta \\ \sin \theta_1 = \operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{ctg} \alpha \end{cases} \quad (3-1)$$

式中 γ —— 钻孔仰角；

α —— 煤层倾角；

β —— 钻孔在层面上的伪倾角；

θ_1 —— 钻孔偏角（与煤层走向的夹角）；

θ_2 —— 煤层走向方位角。

（三）钻孔位置

1. 短孔注水

由于在采高范围内的煤体一般情况均不是一个均质体，是由若干不同煤岩类型的自然小分层所组成，它们的裂隙率与孔隙率各自不同，因此，孔口位置应布置在较硬而致密的小分层理，这样在注水时就不会过早地破坏孔口发生泄水。在保证这种情况下，孔口位置距顶板近些。

2. 长孔注水

采用长孔注水时，孔口位置也应布置在煤层中比较坚硬的小分层理。这样不仅封孔容易，面且还可以防止返水。在缓倾斜煤层中孔口一般位于煤层采高的 $\frac{1}{2}$ 处。在急倾斜煤层中，采用上向孔注水时，孔口布置在距顶板较近的地方。中梁山矿经验是距顶板较近，即采高的 $\frac{1}{3}$ 处。

（四）钻孔直径

短孔注水时，一般与炮眼直径相同，以使工作面炮眼与注水孔的机具同一化。注水孔经注水后孔内存有积水并有变形坍塌时，一般不能再作炮眼用。

长孔注水时，孔径视其封孔方式方法及钻具而定。

（五）封孔长度

短孔注水时，封孔长度和煤壁所承受的注水压力有关，合理的封孔长度应满足下列要求：

(1) 注水孔口及其附近的煤壁不发生泄水现象。对应于某一注水压力有一个相应的封孔深度。

(2) 使煤壁的深部和浅部湿润均匀。封孔过深则煤体水分集中于深部，而煤壁处仍较干燥。赵各庄矿的试验表明，在孔深 2.5m 时，封孔深度 2m，经 30min 注水后，煤体内部水分增至 9.5%，而煤壁附近却是干燥的。如果要使干燥的煤壁也达到湿润，则将加长注水时间，这是工作条件所不允许的。因此，封孔深度既要保证不泄水，又要避免出现里湿外干的“葫芦形”，以达到均匀湿润煤体的目的。

(3) 使注水孔有较好的利用率。封孔太深减少了孔壁渗水面积，影响湿润煤体面积。

(4) 当封孔较浅时，压力水压开的新裂隙与爆壁沟通，导致煤壁泄水。泄水的临界压力不仅与煤的物理力学性质有关，还与封孔深度有关。图 3-2 中的点划线是赵各庄矿短孔注水，即孔深 2.0m，封孔深度为 0.4m 时，中途跑水过程。图

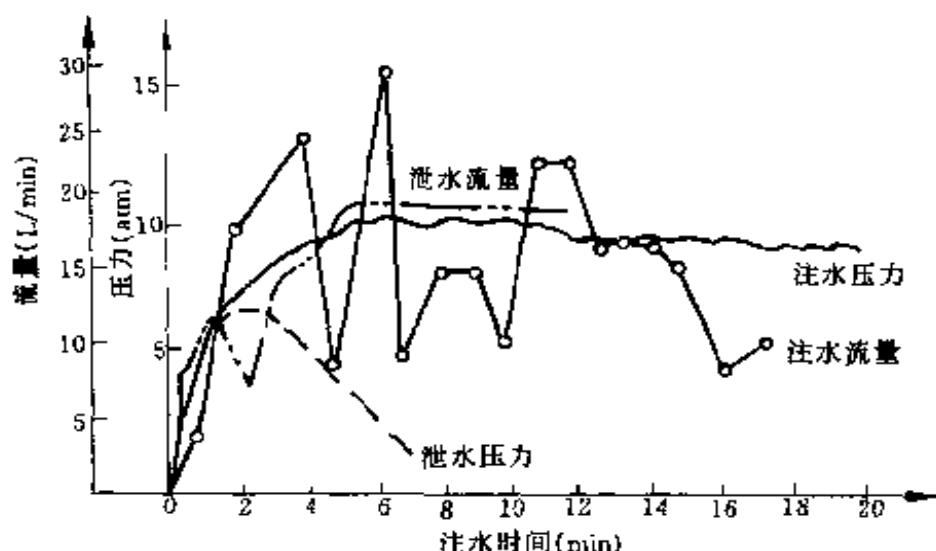


图 3-2 压力、流量与时间的变化规律

中粗实线表示的注水孔深为 2.0m, 封孔深度为 1.0m 时的正常注水过程。显然封孔深度最佳值为孔深的 $\frac{1}{2}$ 左右。

长钻孔注水封孔深度一般要求要超过煤壁的破碎裂隙带, 以防止返水。在煤体较软、裂隙发育; 或煤体较硬、高压注水的情况下均要深封。一般为 10m 左右, 其余一般封孔深度为 3~5m。

二、物理参数

1. 注水压力

短孔注水的合理注水压力应有它的上限和下限。上限值应使煤体不发生泄水为原则, 也不应使顶底板受高压水而被破坏; 下限值应保证在规定的时间内注入规定的水量。一般不超过 20 个大气压。

长孔注水一般说来, 在裂隙发育, 开采深度, 湿润边角、煤的强度和瓦斯压力均较小的煤层中, 采用低压注水。在有管网静压供水的采区, 在不增加设备和人员的条件下, 能长时间连续注水, 可以静压注水。一般压力在 1.2~2.0 个大气压下, 最低流量不足 10L/m·h, 连续 3 个月注水, 也可以达到注水效果。当可供利用的管网静压低于煤层注水的临界压力时, 可以用水泵加压注水。

选取的注水压力应尽量保证使用那些比较简单的设备、器材和工艺过程, 简化注水施工, 注重技术和经济效果, 为长期推广使用创造条件。

注水压力实际与流量、时间存在互相联系、互相制约的关系。因此, 在确定注水压力时, 必须同时考虑流量, 注水时间这两个物理量。另外还要考虑煤层的透水性、煤的湿润

能力、煤层泄水的可能性及压力——流量曲线。在经过计算的基础上，按照煤层自然特点通过试验因地制宜地确定合理的注水压力范围。但必须注意，注水压力的最低值一般不应使注水时间延得过长，以保证注水作业在采煤之前完成。

各矿区不同煤层注水压力的合理范围是不同的，它们不仅受煤层自然条件的影响，而且还受设备条件、采掘关系等主观因素的影响，具体的情况，具体考虑。在难透水煤层中、采掘关系紧张的工作面，应适当提高注水压力，在不发生泄水的条件下，尽快在采煤之前完成注水任务。我国一般采用中压长时间注水的方法，均取得了明显的经济效益和注水效果。表 3—2 与表 3—3 是我国部分矿井水泵注水参数和管网静压注水参数。大多数煤层使用中、低压注水均能满足湿润要求，无需要选取高压注水。

表 3—2 部分矿井注水压力与流量表

局 矿	注水压力 (atm)	注水流量 (L/h·m)	每孔注入 水量 (m ³)	注水时间 (h)	注水泵型号
石炭井各矿	7~20	14~87	30~80	30~80	TBW—50/15、200/40
阳泉二矿	5~20	14.9~35.4	4.6~24	25	100m 钻机配套泵
本溪彩电矿	6~12	2.1~20.5	4.6~21	120	机组洒水泵
新汶良庄矿	50~60	7~14	21~61	96	3DS—1.8/200
新汶孙村矿	50~120	12.5~22.5	30~45		3DS—1.8/200
枣庄陶庄矿	60~80	11.1~16.6	30~40	72	ESB ₂ 油压泵
焦作李封矿	50~80	6~14.7	85.9	429	苏制 35H 泵
重庆松藻矿	35~65	15~62	20~60	16~32	5D—2/150
重庆中梁山矿	56~77		4.8~17.9		英制 V 型泵
抚顺胜利矿	60~100	35~57	280~500	30 天	千米钻机泵
京西门头沟矿	80~130	37~114	36~102	94~150	3DS—1.8/200

表 3-3 管网静压注水参数

局 矿	静压注 水压力 (大气压)	注水流量 (L/m·h)	最长注 水时间 (d)	平均每孔 注入水量 (m ³)	注
抚顺龙凤矿	10~20	2~15.7	>100	30~1600	综合钻孔
石炭井各矿	2~12	6~15	30~40	30~80	倾斜钻孔
大同同家梁矿	1.2~8.5	16.4	>7	170	倾斜钻孔
莱芜潘西矿	15~22		>5	(降尘 3~6 倍)	倾斜钻孔
轩岗六亩地矿	≈20			>100	倾斜钻孔

2. 注水流量

短孔注水每个钻孔的注水量按下述要求确定：

(1) 使湿润范围内煤体水分平均增值达到 1%~2%，计算注水量。

(2) 湿润后的煤炭水分要考虑到自滑运输、地面防冻及商品煤质量等要求，一般以 5% 以下为宜。

(3) 在实际工作中，注水量以煤壁“出汗”为标志，煤壁见水后即行停注。我国部分矿短孔注水的参数见表 3-4。

在长孔注水中，根据水分增值的合理范围及钻孔承担的湿润煤体，则每孔注水量的计算式为：

$$M_k = K \cdot T (W_1 - W_0) \% \quad (3-2)$$

式中 M_k ——每个钻孔的注水量，t；

T ——钻孔担负的湿润煤量，t；

W_1 ——根据调查资料确定的煤层水分上限值，%；

W_0 ——煤层注水前的采水分值，%；

K ——水量不均衡系数，取 1.5~2.0。

在倾斜长钻孔注水时，每孔担负的湿润煤量按下式计算（图 3-3）。

表 3-4 工作面短钻孔注水情况表

局 矿 名	煤 层 名 称	煤 层 特 征					注 水 钻 孔					封 孔		注 水 参 数							注水后煤的水 分增值 (%)	
		煤 种 类	煤 岩 类 型	煤 质 结 构	采 高 (m)	工 作 面 长 度 (m)	孔 深 (m)	孔 径 (mm)	孔 口 位 置	孔 斜 度	孔 距 (m)	排 数 与 孔 数	封 孔 器 型 式	封 孔 深 度 (m)	注 水 压 力		注 水 流 量		同 时 注 水 孔 数	每 孔 注 水 时 间 (min)		每 孔 注 入 水 量 (m ³)
															起 始 压 力 (大 气 压)	正 常 压 力 (大 气 压)	供 水 方 式	流 量 (L/ min)				
本溪彩屯矿	下一层群层	焦煤	光亮型煤	节理发育脆	1.2~1.8	100	2.0	51	采高1/2处	垂直煤壁	6.0	单排150个	螺旋式		2~3	5~7	TBW-15/15泵供水	20	多孔同注	10	0.2	
本溪彩屯矿	二下层群层	焦煤	光亮型煤	节理发育脆	2.5	130	1.8	51	采高1/2处	仰斜穿层理	4~5	单排	仿英螺旋式	0.8~1.0	—	5~6	苏OH-2型泵供水	10~22	单孔注水	10~15	0.1~0.15	3.52
开赵各庄矿 滦	四层煤	焦煤	光亮型煤	发育软煤	1.9	125	2.0	42或52	坚硬分层	俯斜穿层理	2~2.5	单双排	仿苏螺旋式	0.6~1.0	渐增	8~12	静压供水	12~20	单孔多孔	9~12	0.15~0.25	1.6
萍乡乡矿	大槽煤			煤质中微	2.0	水平工作面	1.5~3.0		中部	水平	3~4	单排	自制螺旋式	1.6~1.9	—	12	往复供水	13~15				1.28

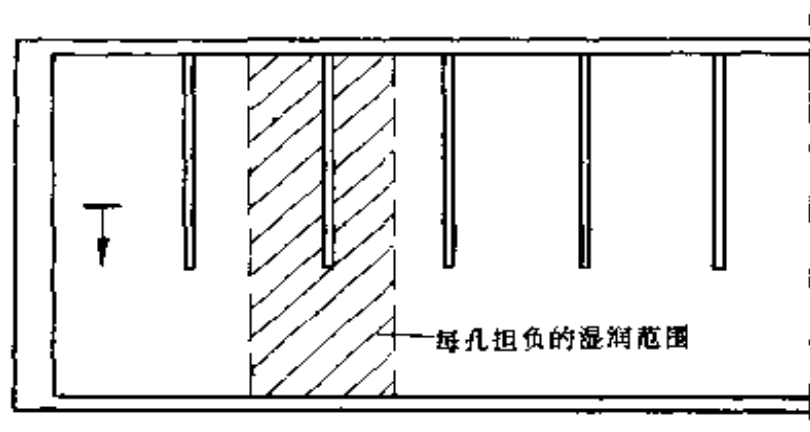


图 3—3 每孔注水量计算图

$$T = l \cdot S \cdot h \cdot \gamma \quad (3-3)$$

式中 l ——工作面倾斜长度, m;

S ——钻孔两侧待湿润范围 (一般情况下等于钻孔间距, m);

h ——煤层厚度, m;

γ ——煤的容重, t/m^3 。

在矿井供水设计中, 湖北煤矿设计院提出可按照采煤和注水相平衡的要求, 粗略地估算全矿煤层注水需水量, 即每日采出多少吨就必须预先湿润多少吨。其计算式为

$$M = K \cdot T_0 \cdot (W_1 - W_c) \% \quad (3-4)$$

式中 M ——全矿每日注水需水量, t;

K 、 W_1 、 W_c ——均与 (3-2) 式意义相同;

T_0 ——全矿计划日产量, t。

钻孔注水量通常在实践中通过观察予以确定。许多矿井在下向孔注水时, 如果机巷煤壁“出汗”、挂水珠时就停止注

水。用这种观察方法确定钻孔注水量有时与计算值较接近（发生泄水时除外）。长钻孔每孔注水量一般在 $30\sim 100\text{m}^3$ 之间；特厚煤层的穿层钻孔注水量可达到数百乃至 1000m^3 以上；在中厚煤层中，每米钻孔注水量大致在 1m^3 左右。一些矿井的注水量数值参见表 3-2、表 3-3。从这两个表中可以看出，如果将注水流量控制在 $20\text{L}/\text{m}\cdot\text{h}$ 左右，一般可以获得较好的注水效果。

3. 注水时间

注水时间与注水压力，注水流量密切相关，一般情况注水时间是注水压力与注水流量的反函数，煤层注水压力愈高，注水流量愈大，注水时间越短。短孔注水每孔十几分钟到几小时，最长 3h。长孔注水每孔几十小时到十几天，最高达 30 天之久，一般在 $70\sim 80\text{h}$ 。以上（见表 3-2，表 3-3，表 3-4）。

三、物理参数的互相关系

（一）注水压力与注水流量关系

煤体注水的流量是随着注水压力的升高而增大，压力愈高，每增加单位压力所增加的流量的值愈大。大量的低、中、高压注水的实测资料表明，随着注水压力的升高，注水流量大致呈一个抛物线型增加。原抚顺煤研所根据彩屯矿长孔注水的实测数据给出压力——流量关系式，即

$$q=kP^2 \quad (3-5)$$

式中 q ——每米钻孔的注水流量， $\text{L}/\text{m}\cdot\text{h}$ ；

k ——煤层注水的系数， $\text{L}\cdot\text{cm}^4/\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{h}$ ；

P ——注水压力， kPa 。

该矿下二接层 1~4 号钻孔的压力——流曲线函数分别

为：

$$q_1 = 0.098P^2 \quad (1 \text{ 号孔})；$$

$$q_2 = 0.047P^2 \quad (2 \text{ 号孔})；$$

$$q_3 = 0.066P^2 \quad (3 \text{ 号孔})；$$

$$q_4 = 0.14P^2 \quad (4 \text{ 号孔})。$$

它们的曲线如图 3—4 所示。图 3—5 是阳泉二矿、石炭井、大同同家梁和本溪等矿实测的注水压力与注水流量关系曲线。这说明低、高压注水均遵循类似规律。

在透水性较差的煤层，注水压力往往在超过一定数值后，才开始进水，并随着压力增高流量明显增大，这个压力值称为注水临界压力，该压力因煤层条件不同而异。良庄、孙村等矿测定，临界压力值大致在 40~60 个大气压之间。在透水性较好的煤层注水，压力很小时，即开始进水，无明显的临

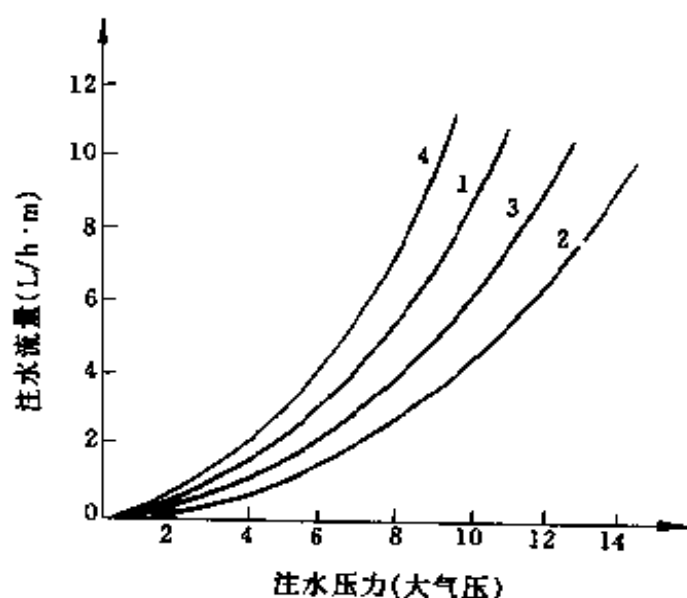


图 3—4 彩屯矿下二接煤层注水压力与流量的关系

1、2、3、4—与其孔号分别对应的注水压力—流量关系曲线

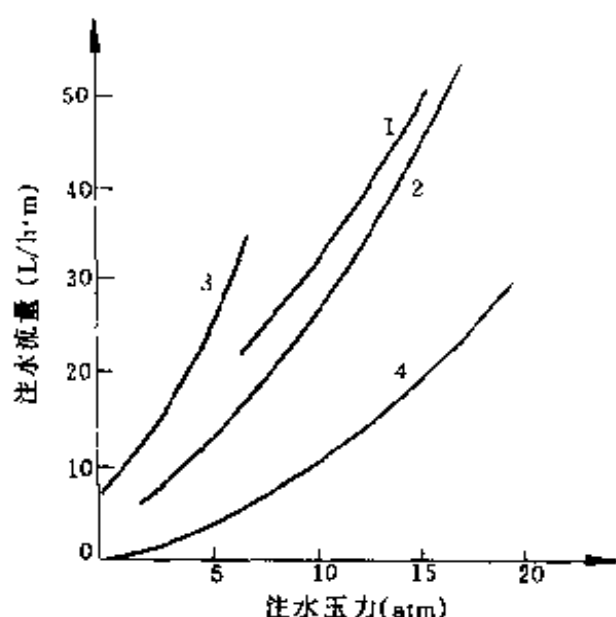


图 3-5 低压注水的压力—流量实测曲线

1—阳泉二矿 7 号层；2—石炭井四矿十层煤；
3—大同同家梁矿十一层；4—本溪彩屯矿下二接层

界压力。在不适当地增大注水压力，甚至超过煤体的破坏强度或地层压力时（煤层埋藏很深时），煤体将会出现新的破裂面，此时流量将大幅度增加，易于溢出。

（二）注水压力与注水时间关系

钻孔开始注水后，压力逐渐升高，达到某一数值时，注水压力与钻孔内注水阻力相平衡而渐趋于稳定。由于水在煤体裂隙中运动的阻力是变化的，因而随着流程的增大，阻力也有所增加，因此随时间的延长，注水压力将在一定范围内波动，并有缓慢升高的趋势。图 3-6 是中梁山矿二号层注水时实测的注水压力与时间的曲线。

有的煤层，开始注水时有一个较高的起始注水压力，使

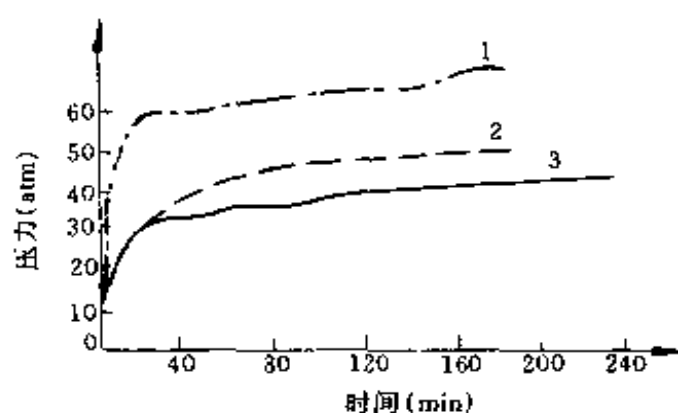


图 3—6 压力与时间的关系

1—3223 工作面 3 号孔；2—3125 工作面 2 号孔；3—3222 工作面 1 号孔

水张开裂隙进入煤体，然后注水压力才降至一个比较稳定的水平。枣庄矿务局陶庄矿在二层煤注水时，起始注水压力为 80~120 大气压，正常注水压力为 60~80 大气压。形成起始压力的实际原因，以及影响起始压力大小和持续时间的因素尚需研究。在注水过程中，如果发现注水压力突然下降，随时间的延长而注水压力不再恢复，说明出现泄水，这时要查明，采取措施。

(三) 注水流量与注水时间的关系

在等压注水的条件下，每米钻孔的注水流量随时间的延长而逐渐降低，这是因为随时间的延长，水在煤体内流动距离加长，运动阻力增大，使流量有降低的趋势。阳泉二矿在 9 号层注水时，一昼夜，每米钻孔流量降低 60%。在 7 号煤层连续注水 17h 后，每米钻孔流量降低 68% 左右，如图 3—7 所示。

同家梁矿在 11 层煤 8305 工作面低压注水，测得三天的

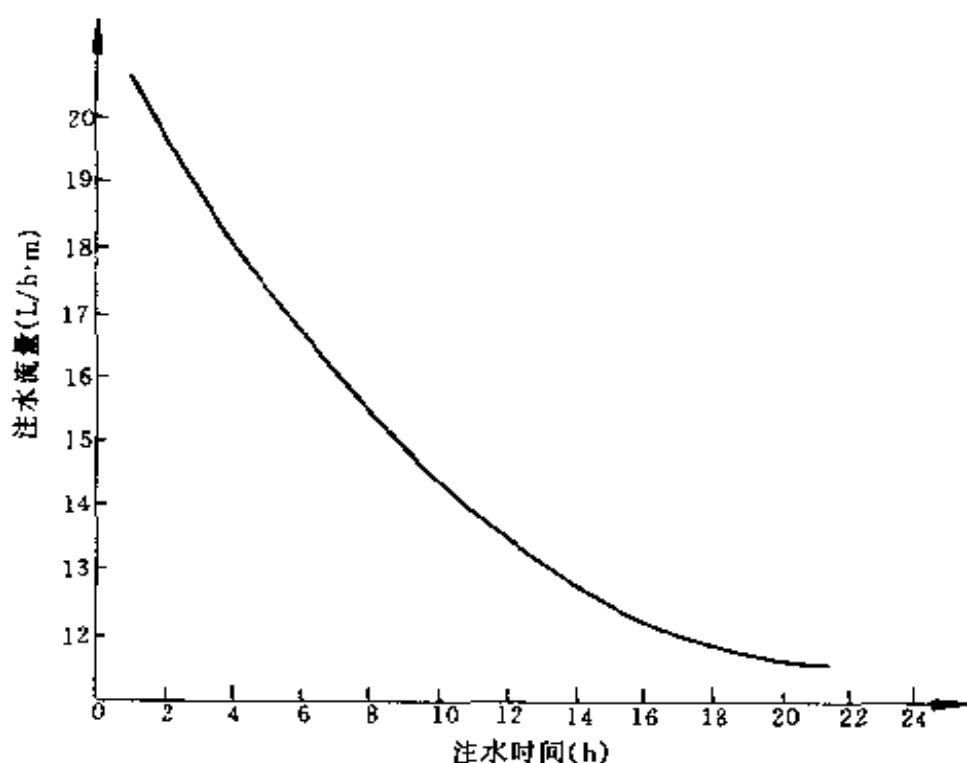


图 3-7 阳泉二矿 7 号层等压注水流量、时间变化曲线

流量—压力曲线如图 3-8。从图可知,在同一注水压力下,第三天的注水流量比第一天降低 $5 \sim 10 \text{ L/h} \cdot \text{m}$ 左右。三条曲线的位置逐日降低,这说明注水流量随时间的积累而降低。

应当指出,在某些裂隙发育的透水性较强的煤层,水沿煤层倾斜向下渗流过程中,注水流量变化不是明显的。如石炭井各矿在倾角为 $20^\circ \sim 25^\circ$ 的煤层,采用 $5 \sim 10$ 大气压力注水,注水流量随时间降低均不明显。这是因为水愈向下渗流,其静水压头愈大,即注水是逐渐增压情况进行的。煤层透水性强,注水压力本来就很小,因此静水压头的增加是一个很

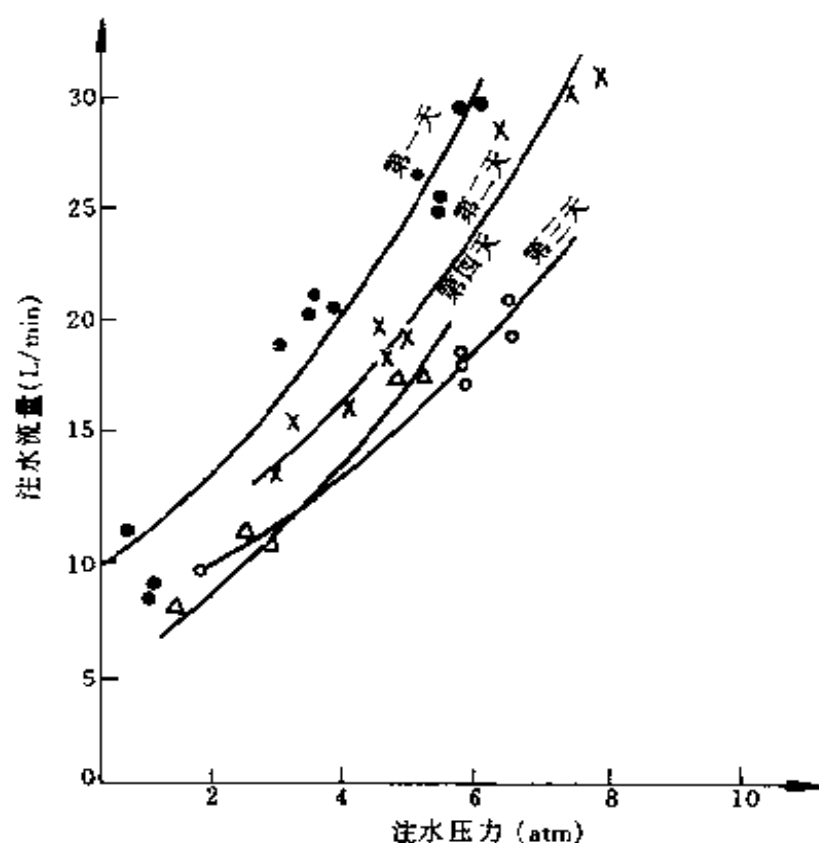


图 3-8 同家梁矿 8305 工作面 14 号孔的流量变化曲线

有影响的因素，导致注水流量平稳不变。

在裂隙不发育的坚硬煤层中进行中、高压注水，流量随时间下降也不十分明显，呈频繁的波动，其平均值变化不大。图 3-9 表示焦作李封矿天官区三号孔中压注水时的流量变化情况。该号注水 50 次，历时 429h，流量波动在 4~8L/min，平均值稳定在 5~6L/min。流量的波动是因为压力水在煤层断续地无开裂缝、破碎煤体、沟通裂隙所造成的。平均流量保持稳定说明无泄水现象发生。

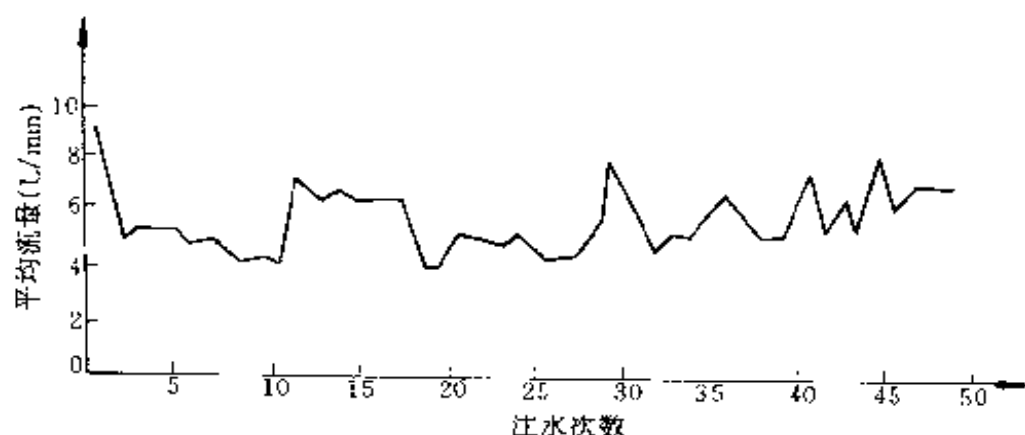


图 3-9 李封矿中压注水流量变化曲线

第二节 煤层注水参数的正交 试验优化方法

正交试验方法是统计学的一个重要分支，是一种研究多因素试验问题的重要数学方法。采用这种方法，对于多因素复杂的试验，如果试验安排得好，用较少的试验次数，就可得最佳的结果。在这一节里，我们介绍用正交试验方法确定煤层注水参数的最优组合。

一、确定试验目标

采用正交试验优化法，首先要确定试验目标。优化煤层注水参数的最终目的，对井下防尘方面的工作来说，是使井下回采工作面粉尘浓度降低到《煤矿安全规程》规定的指标。反映这一目标，通常可间接地采用煤层注水后，煤层的湿润分布状态，即煤层注水后各处的含水率来描述。从观测资料可知，不论注水前煤层水分的基数如何，只要水分增值达到

1%，即能达到比较显著的降尘效果，降尘率可达到60%以上，该值是煤层注水质量要求的最低标准，也是评定煤层注水后是否达到湿润的最低标准。当煤层注水后，水分增值达到4%、降尘效果达到最佳。因此，可以用煤层注水后水分增值做为衡量煤层注水质量的好坏的目标。

二、确定因素与因素水平

影响煤层注水的因素主要有两类，一是地质因素，二是开采技术及注水工艺参数。在指定的采区内注水，可只考虑注水诸参数及其组合对注水质量的影响关系。

在生产实践中，对注水质量影响大的参数主要有注水压力、孔深、单位时间注水量、注水时间、孔距等。根据我国多年来煤层注水经验，各因素水平可按下述公式确定。

1. 煤层注水压力

$$P_c = P_F - P_w = \sqrt{\frac{q}{k}} \quad (3-6)$$

式中 P_c ——注水有效压力，kPa；

P_F ——钻孔内水的压力，kPa；

P_w ——煤层的瓦斯压力，kPa；

k ——单位长度钻孔的渗透系数（经验公式修正系数）， $L \cdot cm^4 / kg \cdot m \cdot h$ ；

q ——单位长度钻孔的注水流量， $L/m \cdot h$ 。

2. 注水时间

$$t = \frac{Q}{v} = \frac{10^3 B L_1 M \gamma (W_1 - W_2) k}{v} \quad (3-7)$$

式中 t ——注水时间，h；

Q ——单孔总注水量， m^3 （或L）；

v ——注水流速, m^3/h (或 L/min);

B ——钻孔间距, m ;

L_1 ——工作面长度, m ;

M ——煤层厚度, m ;

γ ——煤的视密度, t/m^3 ;

W_1 ——注水后要求达到的水分, %;

W_2 ——煤层原有含水率, %;

k ——考虑围岩吸收水分, 水的漏失和注水不均匀系数, 一般取值为 $1.5 \sim 2.0$ 。

3. 单位时间每米注水量

$$q = \frac{Q}{L_e t} \quad (3-8)$$

式中 q ——单位时间每米水量, $\text{L}/\text{m} \cdot \text{h}$;

Q 、 t ——同 (3-7) 式;

L_e ——钻孔注水有效长度, m 。

4. 钻孔深度

$$L = L_1 - M \quad (3-9)$$

式中 L ——钻孔长度, m ;

L_1 ——工作面长度, m ;

M ——与煤层透水性和钻孔方向有关的系数。透水性弱的煤层上、下向孔, M 均取 20m ; 对透水性强的煤层, 上向孔取 $M > 20\text{m}$, 下向孔 $M =$

$$\left(\frac{1}{3} \sim \frac{2}{3} \right) L_1。$$

5. 钻孔距

$$B = (2 \sim 3) R \quad (3-10)$$

式中 B ——钻孔间距, m ;

R ——湿润半径, $R=2h$, m;

h ——巷道的高度, m。

三、选择正交试验表

根据选择正交表的原则, 考察的因子及交互作用的自由度总和必须小于所选择正交表的总自由度。

为说明给定因素水平及正交表的选择, 以本溪暖河子煤矿为例。

暖河子煤矿年设计能力 15 万 t, 片盘斜井开拓。该矿所采煤层小构造发育, 破碎松软。煤层倾角在 40° 左右, 厚 2m, 自然含水率为 2.01%, 煤层孔隙率为 12%~16%, 透水性系数为 $2.0 \times 10^{-6} \text{cm/s}$, 煤层湿润边角 50° , 瓦斯压力为 $(25 \sim 30) \times 98 \text{kPa}$; 顶板孔隙率为 0.8%~1.2%, 透水性系数为 $1.15 \times 10^{-5} \sim 2.80 \times 10^{-6} \text{cm/s}$, 湿润边角为 $25^{\circ} \sim 46^{\circ}$, 开采深度 300m, 工作面倾斜长 90m, 走向长 500m, 采用水平巷柱式放炮采煤法。

根据暖河子煤矿实际条件和上述确定因素水平公式, 注水压力选择 4 个因素水平, 即 $36 \times 98 \text{kPa}$ 、 $45 \times 98 \text{kPa}$ 、 $60 \times 98 \text{kPa}$ 、 $80 \times 98 \text{kPa}$; 注水时间选取 24、36、48、60h 等 4 个值; 注水量选择了 6、12、20、25L/m·h; 钻孔深度选 4 种, 即 50、55、60、70m; 钻孔间距选择了 10、13、16、20m 等 4 个水平。综合上述, 试验的因素及因素水平见表 3—5。

本试验选用 $L_{16}(4^5)$ 正交试验表, 为了说明问题方便, 在选表时没有考虑交互性。由此编制的试验方案设计表见表 3—6 前 6 列。按此试验方案, 在同一煤层, 地质条件变化不大的条件下, 进行了 16 个钻孔注水试验。试验后, 取样分析见表 3—6 最后一列 (测样平均值)。

表 3-5 因 素 水 平 表

因 素 水 平	A	B	C	D	E
	注水压力 (kPa)	注水流量 (L/m·h)	注水时间 (h)	孔深 (m)	孔距 (m)
1	36×98	6	24	50	10
2	45×98	12	36	55	13
3	60×98	20	48	60	16
4	80×98	25	60	70	20

表 3-6 钻 孔 因 素 表

因 素 试 验 钻 孔 号	A	B	C	D	E	δ (%)
	注水压力 (kPa)	注水流量 (L/m·h)	注水时间 (h)	孔深 (m)	孔距 (m)	水分增值
1	36×98	6	24	50	0	0.80
2	36×98	12	36	55	13	0.80
3	36×98	20	48	60	16	0.81
4	36×98	25	60	70	20	0.84
5	45×98	6	36	60	20	0.86
6	45×98	12	24	70	16	0.91
7	45×98	20	60	50	13	0.95
8	45×98	25	48	55	10	1.10
9	60×98	6	48	70	13	1.06
10	60×98	12	60	60	10	1.10
11	60×98	20	24	55	20	1.21
12	60×98	25	36	50	16	1.23
13	80×98	6	60	55	16	1.20
14	80×98	12	48	50	20	1.22
15	80×98	20	36	70	10	1.57
16	80×98	25	24	60	13	1.56

根据试验结果（表 3—6），用综合比较的直观法，分别计算出指标中各个因素的各个水平的和 I 、 II 、 III 、 IV 各个水平的平均效果 \bar{I} 、 \bar{II} 、 \bar{III} 、 \bar{IV} 及极差 R ，从计算结果确定较优水平以及因素的主次顺序，见表 3—7。

表 3—7 工 艺 考 核 表

考核指标 \ 因素	A	B	C	D	E
	注水压力 (kPa)	注水强度 (L/m·h)	注水时间 (h)	孔深 (m)	孔距 (m)
I	11.102	7.1619	7.8973	7.5470	7.8773
II	5.7644	7.6493	8.1534	8.0435	7.5443
III	6.9110	8.5177	7.3818	8.0850	7.9234
IV	8.3622	8.8933	8.8403	8.5470	8.7334
\bar{I}	2.7755	1.7905	1.9743	1.8868	1.9693
\bar{II}	1.4411	1.9123	2.0383	2.0109	1.8861
\bar{III}	1.7476	2.1294	1.8330	2.0213	1.9809
\bar{IV}	2.0906	2.2233	2.2101	2.1368	2.1834
\bar{V}	1.3344	0.4328	0.3771	0.2500	0.2973
较优水平	A ₁	B ₄	C ₄	D ₄	E ₄
因素主次	1	2	3	5	6

从表 3—7 可以看出，注水压力和注水流量对煤层注水后的水分增值影响较大，其次是注水时间、孔距和孔深。从表 3—7 可知，注水压力、注水流量、注水时间、孔深、孔距依次是第 4 水平、第 4 水平、第 3 水平、第 4 水平和第 1 水平好。即 $80 \times 98 \text{ kPa}$ ， $25 \text{ L/m} \cdot \text{h}$ ， 48 h ， 70 m 和 10 m 搭配时，煤层注水效果好。显然，要获得较大的水分增值，注水最佳组

合参数为：注水压力： $80 \times 98 \text{ kPa}$ ；注水流量： $25 \text{ L/m} \cdot \text{h}$ ；注水时间：48h；孔深：70m；孔距：10m。

这组参数虽然在试验表中没有出现，但它确是 1024 种工艺里面的一种。由此可见，用 L_{16} 正交表安排的试验确实有很好的“代表性”。虽然只进行 16 次试验，但是对这 16 次试验结果进行计算分析后，即可找到全部试验条件里最好的一种方案（注水效果好），简化了注水参数优化试验。这种方法优化注水参数是一种较好的科学方法。

第三节 煤层注水参数的数量化 理论正交设计优化方法

在第二节中给出了利用正交试验方法确定煤层注水工艺参数的最佳组合。此方法仅适用于确定煤层地质条件为稳定状态下的注水。随着注水工艺的进展，如果注水煤层的某一地质面素发生了变化，仍采用原组合参数注水，其效果不一定满足注水工程要求。面此，为保证煤层效果，必须重新确定最优组合参数。显然，对于地质因素不断变化的煤层，如果仍采用正交试验的方法确定组合参数，那么注水将永远处于试验状态，所以这种优化方法不适应地质因素不断变化的煤层注水需要。为确定煤层地质因素不稳定状态下的注水参数的最优组合，这一节介绍用数量化理论正交设计优化方法。

一、基本原理

研究地质因素不断变化的煤层注水参数的最优组合，实质是研究地质因素和注水工艺参数两类因素共同对煤层注水效果的影响。这种情况，不仅有定量变量，还有定性变量。例

如，裂隙、孔隙、层理、节理、地质构造等的定性变量；湿润边角、煤的硬度、地压、瓦斯压力、煤层埋藏深度和注水工艺参数即为定量变量。处理即有定性变量，又有定量变量关系的问题，一般常用数量化理论。用这一理论建立的具有多个（随机）定量变量兼有定性变量的数学模型，能充分利用可能搜集到的一切信息，全面揭示煤层注水的影响因素之间与煤层注水效果的内在相关关系。因此，将正交设计与数量化理论两种数学方法结合起来确定注水工艺参数组合，更能满足注水工程要求。

采用正交设计与数量化理论确定地质因素为不稳定状态的煤层注水工艺参数的最优组合，实质是利用正交实验方案所做的注水试验工程所获得的定量及定性的各种信息量，运用数量化理论〔1〕建立煤层注水效果预测数学模型，然后将正交设计确定的方案（数据）及预注水的煤层地质因素代入预测数学模型，得到一组注水预测水分增值（相当于按正交设计确定的方案进行注水试验所得到的注水效果），再应用正交试验分析的方法确定注水工艺参数的最佳组合。

根据数量化理论〔1〕，设描述注水效果的水分增值为基准变量 y ，影响注水效果的因素为说明变量 x ，称为项目。用若干等分方法将注水参数及湿润边角和煤的硬度等定量变量因素转化为定性变量，把裂隙等定性变量的各种不同取“值”设为类目 b ，对于第 j 项目的 k 类目在第 i 的基准变量的反应，用下式确定

$$\delta_i(j, k) = \begin{cases} 1 & \text{当第 } i \text{ 基准变量中 } j \text{ 项目的定性数据为 } k \text{ 类目时;} \\ 0 & \text{否则。} \end{cases}$$

(3—11)

根据正交试验设计确定的注水方案所获得的全部注水试验工程信息，依据（3-11）式的原则，记入所列项目表中构成的反应矩阵（3-12）式中，即

$$x = \left\{ \begin{array}{l} \delta_1(1,1) \cdots \delta_1(1,\gamma_1), \delta_1(2,\gamma_2) \cdots \delta_1(2,\gamma_2) \cdots \delta_1(m,1) \cdots \delta_1(m,\gamma_m) \\ \delta_2(1,1) \cdots \delta_2(1,\gamma_1), \delta_2(2,\gamma_2) \cdots \delta_2(2,\gamma_2) \cdots \delta_2(m,1) \cdots \delta_2(m,\gamma_m) \\ \delta_n(1,1) \cdots \delta_n(1,\gamma_1), \delta_n(2,\gamma_2) \cdots \delta_n(2,\gamma_2) \cdots \delta_n(m,1) \cdots \delta_n(m,\gamma_m) \end{array} \right\} \quad (3-12)$$

在数量化理论 [1] 中，假定基准变量与各项目，类目的反应之间遵循下列线性模型

$$y_i = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{r_j} \delta_i(j, k) b_{jk} + \epsilon_i \quad (i=1, 2, \cdots, n) \quad (3-13)$$

式中 b_{jk} 仅是依赖于 j 项目的 k 类目的常数系数， ϵ_i 是第 i 次抽样中的随机误差。根据最小二乘法原理，求出 b_{jk} 的估计值，即得煤层注水效果预测方程，即

$$q = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n \left[y_i - \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{r_j} \delta_i(j, k) b_{jk} \right]^2 \rightarrow \text{最小}$$

求偏导，则有

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial b_{jk}} &= -2 \sum_{i=1}^n \left[y_i - \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{r_j} \delta_i(j, k) b_{jk} \right] \delta_i(j, k) \\ &= 0 \quad (j=1, 2, \cdots, m; k=1, 2, \cdots, r_j) \end{aligned}$$

得线性方程组

$$\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{r_j} \left[\sum_{i=1}^n \delta_i(j, k) \delta_i(u, v) \right] \hat{b}_{jk} = \sum_{i=1}^n \delta_i(u, v) y_i \quad (3-14)$$

将 (3-14) 式写成矩阵形式, 则有

$$x' x \hat{b} = x' y \quad (3-15)$$

其中, $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$;

$$\hat{b} = (\hat{b}_{11}, \hat{b}_{12}, \dots, \hat{b}_{1r_1}; \hat{b}_{21}, \hat{b}_{22}, \dots, \hat{b}_{2r_2}; \dots, \hat{b}_{m1}, \hat{b}_{m2}, \dots, \hat{b}_{mr_m})。$$

将 x 及 x' 用 (3-12) 式取代, 解线性方程组 (3-15), 得 \hat{b}_{jk} 。于是预测数学模型为

$$\hat{y} = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{r_j} \delta_j(j, k) b_{jk} \quad (3-16)$$

二、基本方法

为说明用数量化理论正交设计优化注水参数方法, 以本溪暖河子煤矿为例。

1. 项目与类目的确定

由文献 [11] 可知, 影响煤层注水效果的注水工艺参数主要为注水压力、注水时间、注水强度、孔距、孔深; 地质因素为湿润边角、孔隙率、煤的硬度、层理、节理、地质构造等。地压、瓦斯压力, 煤层埋藏深度等地质因素, 注水压力已经将其考虑在内, 故不单列, 所以项目为:

x_1 : 注水压力, kPa;

x_2 : 注水强度, L/m · h;

x_3 : 注水时间, h;

x_4 : 钻孔深度, m;

x_5 : 孔距, m;

x_6 : 湿润边角, (°);

x_7 : 孔隙率, %;

x_8 : 煤的硬度;

x_9 : 层理;

x_{10} : 节理;

x_{11} : 地质构造 (落差 1m 以下的小断层)。

根据暖河子矿煤层注水试验方案, 实际注水工程要求及煤层注水难易程度的分类, 类目划分如下:

x_1 : $30 \times 98.1 \leq b_{11} < 45 \times 98.1$;

$45 \times 98.1 \leq b_{12} < 60 \times 98.1$;

$60 \times 98.1 \leq b_{13} < 75 \times 98.1$;

$75 \times 98.1 \leq b_{14}$ 。

x_2 : $6 \leq b_{21} < 12$; $12 \leq b_{22} < 18$;

$18 \leq b_{23} < 24$; $24 \leq b_{24}$ 。

x_3 : $24 \leq b_{31} < 36$; $36 \leq b_{32} < 48$;

$48 \leq b_{33} < 60$; $60 \leq b_{34}$ 。

x_4 : $50 \leq b_{41} < 55$; $55 \leq b_{42} < 60$;

$60 \leq b_{43} < 65$; $65 \leq b_{44} < 100$ 。

x_5 : $10 \leq b_{51} < 15$; $15 \leq b_{52} < 19$;

$19 \leq b_{53} < 30$ 。

x_6 : $0^\circ \leq b_{61} < 45^\circ$; $45^\circ \leq b_{62} < 90^\circ$; $90^\circ \leq b_{63}$ 。

x_7 : $b_{71} < 4\%$; $4\% \leq b_{72} < 20\%$; $20\% \leq b_{73}$ 。

x_8 : $1 \leq b_{81} \leq 3$; $3 < b_{82}$ 。

x_9 : b_{91} 为层理, 节理发育; b_{92} 为层理, 节理不发育。

2. 建立反应矩阵特征表求反应矩阵

为表示方便, 用反应矩阵特征表代替反应矩阵。根据第二节中的表 3-6 及该矿注水煤层地质因素实际考察数据, 反应矩阵特征见表 3-8。

表 3-8 反应矩阵特征表

项 目		x ₁				x ₂				x ₃				x ₄				x ₅				x ₆				x ₇				x ₈		x ₉	
		b ₁₁	b ₁₂	b ₁₃	b ₁₄	b ₂₁	b ₂₂	b ₂₃	b ₂₄	b ₃₁	b ₃₂	b ₃₃	b ₃₄	b ₄₁	b ₄₂	b ₄₃	b ₄₄	b ₅₁	b ₅₂	b ₅₃	b ₅₄	b ₆₁	b ₆₂	b ₆₃	b ₇₁	b ₇₂	b ₇₃	b ₈₁	b ₈₂	b ₉₁	b ₉₂		
0.800		1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	
0.815		1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	
0.820		1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	
0.819		1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
0.810		1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	
0.835		1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	
0.840		1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	
0.830		0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	
0.837		1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	
0.889		0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	
0.910		0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	
0.945		0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	
0.950		0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
0.957		0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	
1.10		0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	
1.11		0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	

续表

项 目 y_i	x_1				x_2				x_3				x_4				x_5				x_6				x_7				x_8		x_9
	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{21}	b_{22}	b_{23}	b_{24}	b_{31}	b_{32}	b_{33}	b_{34}	b_{41}	b_{42}	b_{43}	b_{44}	b_{51}	b_{52}	b_{53}	b_{54}	b_{61}	b_{62}	b_{63}	b_{71}	b_{72}	b_{73}	b_{81}	b_{82}	b_{91}	b_{92}	
1.06	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
1.10	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0
1.20	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.21	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0
1.23	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0
1.17	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0
1.22	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
1.37	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1
1.56	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0
1.70	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0
1.80	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
1.90	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1
1.95	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.97	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
1.99	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
2.81	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1

3. 解线方程 (3-15), 建预测方程

经计算机计算, 暖河子矿煤层注水效果预测方程为:

$$\begin{aligned}\hat{y} = & 1.343379x_{11} + 0.097425x_{12} + 0.4624601x_{13} + \\ & 0.7114253x_{14} + 0.0000001x_{21} + 0.043026x_{22} + \\ & 0.2310719x_{23} + 0.2310436x_{24} + 0.0000002x_{31} + \\ & 0.1327366x_{32} + 0.0004278x_{33} + 0.205870x_{34} + \\ & 0.0000001x_{41} + 0.2011304x_{42} + 0.0936604x_{43} + \\ & 0.2325604x_{44} + 0.0000001x_{51} + 0.042088x_{52} + \\ & 0.0954972x_{53} + 0.0000008x_{61} + 0.44009x_{62} + \\ & 0.1161472x_{63} + 0.00007x_{71} + 0.3577774x_{72} + \\ & 0.120249x_{73} + 0.000009x_{81} + 0.2594537x_{82} + \\ & 0.2014007x_{91} + 0.1963663x_{92} \quad (3-17)\end{aligned}$$

4. 检验预测方程预测结果的精度

检验预测方程预测结果的精度, 采用剩余均方, 即

$$f = \sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2 / (n - m - 1) \quad (3-18)$$

由计算机计算, 剩余均方 $f=0.0259$ 。这说明预测方程所得的预测效果精度比较高, 故可用该方程估计由正交设计确定的注水工艺参数在不同地质条件下的煤层注水效果。

5. 根据正交设计确定的方案及考察的煤层地质因素求得煤层预注的水分增值

根据本章第二节确定的注水试验方程, 在煤层湿润边角为 49.8° , 煤层硬度平均为 0.7 ($0.2 \sim 1.9$), 煤层的孔隙率为 $12\% \sim 16\%$, 煤的自然含水率为 2.01% , 饱和含水率为 24.45% , 小构造及层理, 节理均比较发育的条件下, $7^\#$ 层注水, 由 (3-17) 式计算, 其各种组合参数试验注水的水分增值见表 3-9。

表 3-9 工艺因素分析结果表

因 素 试 验 号	A	B	C	D	E	y (%)
	注水压力 (kPa)	注水流量 (L/m·h)	注水时间 (h)	孔深 (m)	孔距 (m)	水分增值
1	30×98	6	24	50	10	2.4310
2	30×98	12	36	55	13	2.6037
3	30×98	20	48	60	16	2.6845
4	30×98	25	60	70	20	3.4737
5	45×98	6	36	60	20	1.4193
6	45×98	12	24	70	16	1.3902
7	45×98	20	60	50	13	1.5343
8	45×98	25	48	55	10	1.4225
9	60×98	6	48	70	13	1.3744
10	60×98	12	60	60	10	1.8051
11	60×98	20	24	55	20	1.9901
12	60×98	25	36	50	16	1.8214
13	80×98	6	60	55	16	2.0272
14	80×98	12	48	50	20	1.8503
15	80×98	20	36	70	10	2.3087
16	80×98	25	24	60	13	2.1760

6. 预测结果分析

根据试验(预测)结果(表 3-9),用综合比较的直观法,分别计算出指标中各个因素的各个水平的和: I 、 II 、 III 、 IV ,各个水平的平均效果 \bar{I} 、 \bar{II} 、 \bar{III} 、 \bar{IV} 及极差 R ,从计算结果确定较优水平及因素的主次顺序,见表 3-10。

从表 3-10 可知,在暖河子矿 7[#]层注水最佳组参数为:

$A=30 \times 98 \text{ kPa}$; $B=25 \text{ L/m} \cdot \text{h}$; $C=60 \text{ h}$; $D=70 \text{ m}$; $E=20 \text{ m}$ 。

表 3-10 最佳工艺表

因素 考核指标	A	B	C	D	E
	注水压力 (kPa)	注水流量 (L/m · h)	注水时间 (h)	孔深 (m)	孔距 (m)
I	3.27	3.89	4.48	4.20	4.57
II	3.79	4.05	4.45	4.33	4.39
III	4.60	4.54	4.73	4.30	4.15
IV	5.55	4.73	4.10	4.37	4.10
$\overline{\text{I}}$	0.8175	0.9725	1.1200	1.0500	1.1425
$\overline{\text{II}}$	0.9475	1.0125	1.1125	1.0825	1.0975
$\overline{\text{III}}$	1.1500	1.13500	1.1825	1.075	1.0375
$\overline{\text{IV}}$	1.3875	1.1825	1.0250	1.0925	1.0250
R	0.5700001	0.2100	0.1575	0.0425	0.1175
较优水平	$<A_4$	B_1	C_3	D_4	E_1
因素主次	1	2	3	5	4

采用这组参数注水，水分增值为 2.9870。效果较好。

用正交设计和数量化理论两种数学方法确定煤层最佳组合注水参数，适用于地质因素不稳定的任何煤层。这种方法不仅考虑了影响煤层注水效果的工艺参数，还考虑了地质因素；不仅考虑了定量变量，还考虑了定性变量，节省了大量的注水试验工程，是一种更接近于注水工程的实际优化方法。

第四节 煤层注水效果模糊控制方法

一、模糊控制的基本原理

客观的存在，实际上是精确的量。但是，通过感觉器官到达人的大脑，形成的是一个模糊概念和模糊信息。将其对照自己已有的经验，进行分析判断，判定控制措施，输入调整，再应用模糊数学的理论进行处理，就是模糊控制规划。依据推理法则，作出模糊决策。最后，根据这个模糊决策执行具体动作，其结果又是一个精确量。因此，模糊控制是一个由模糊量转化精确的过程。模糊控制框图如图 3—10 所示。

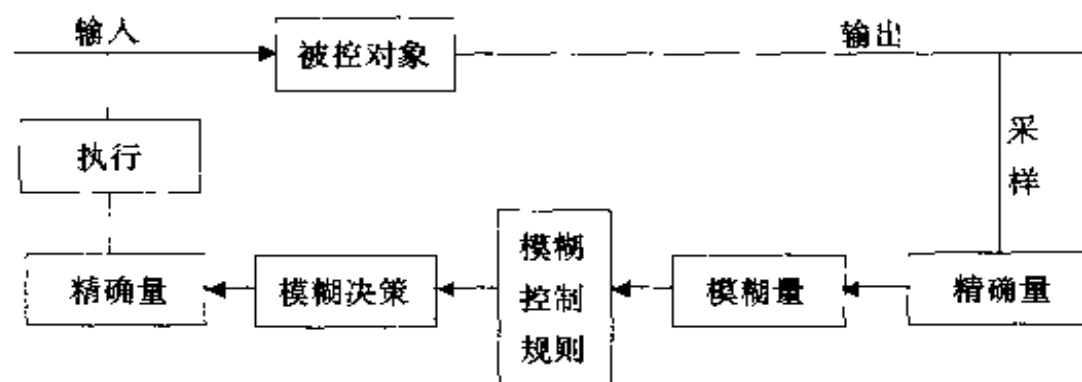


图 3—10 模糊控制框图

二、煤层注水最佳效果的模糊控制

在煤层注水过程中，如何将煤层的地质因素参数与工艺因素参数最佳组合，达到一个最佳的注水效果，这是煤层注水模糊控制系统的优化目标。煤层注水的主要地质参数为煤层的导水性，其影响因素为裂隙、透水性、坚固系数和应力

状态等。工艺参数为注水压力、流量、孔深、孔距等。在注水过程中，根据煤层的导水特性，调整注水工艺参数，即可达到最佳的注水效果。注水压力是对注水效果影响最大的工艺参数。压力过小，达不到预期注水效果；压力过大，对煤层顶、底板将产生破坏或出现泄漏现象。如流量过小，或为0、产生溢出，则煤层的导水速度小于注水速度等，都需要在注水压力、时间上调整。注水时间长有利于提高注水效果，但会影响煤层的开采工艺。适当调解注水压力，会增加注水速度，缩短注水时间。

1. 煤层注水模糊控制系统构成

在钻孔中设置流量观测计，在泵上设置压力调解装置，由煤体、注水工艺系统及观、控装置构成了一个注水模糊控制系统，如图 3—11 所示。

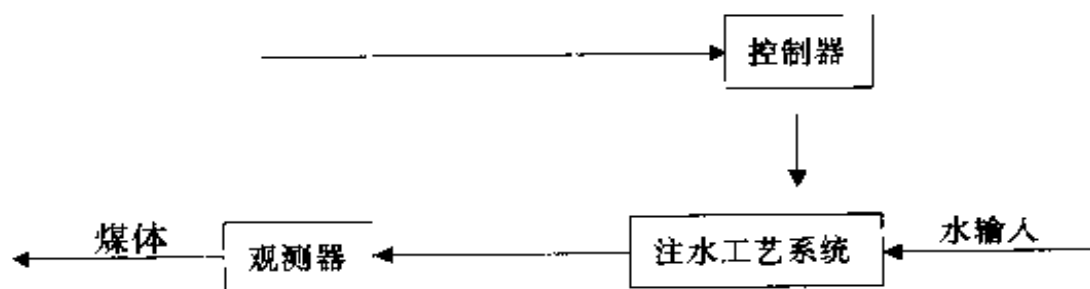


图 3—11 注水模糊控制系统图

2. 观测与控制

观测量是流量对于 0 点的偏差 E 。流量变化为 $10\text{L}/\text{m} \cdot \text{h}$ ，以 $1\text{L}/\text{m} \cdot \text{h}$ 计，划分为 11 个误差等级；误差变化也以 $1\text{L}/\text{m} \cdot \text{h}$ 计，分为 11 个等级； XY 的论域为 11 个点构成。误差 E 和误差变化 EC 的等级划分见表 3—11 与表 3—12。

表 3-11 误差 E 的等级划分

流量差 (L/m·h)	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5
误差等级	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5

注：误差论域 $X = \{x_i\} = \{-5, -4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5\}$ 。

表 3-12 误差变化 EC 的等级划分

误差变化 (L/m·h)	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5
误差变化等级	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5

注：误差论域 $X = \{x_i\} = \{-5, -4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5\}$ 。

3. 误差与误差变化的模糊化

把观测到的误差 E 模糊成为模糊变量：负大 (NB)，负中 (NM)，负小 (NS)，0，正小 (PS)，正中 (PM)，正大 (PB)，构成模糊集类

$$j(A_i) = \{PB, PM, PS, 0, NB, NM, NS\}$$

误差变化 EC 也模糊化，构成模糊集类

$$j(B_i) = \{PB, PM, PS, 0, NB, NM, NS\}$$

对应于表 3-11 与表 3-12 分别给模糊子集 A 和 B 的隶属函数 $\mu_{A_i}(X)$ 和 $\mu_{B_i}(Y)$ 赋值，成为表 3-13，表 3-14。

控制量 U 是注水压力调解控制开关的离散化分档，也要模糊化，建立模糊子集。

$$j(C_i) = \{PB, PM, PS, 0, NB, NM, NS\}$$

压力在选定值为 0 点，以 4kPa 为一个档次，正、负各 5 个档，

计 11 个档。控制变量论域 $Z = \{Z_k\} = \{-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5\}$, 隶属度为表 3-15。

表 3-13 误差模糊集的隶属函数赋值表

	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5
<i>PB</i>	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.8	1
<i>PM</i>	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.7	1	0.7	0
<i>PS</i>	0	0	0	0	0.4	0.7	1	0.7	0.4	0	0
0	0	0	0.1	0.4	0.7	1	0.7	0.4	0	0	0
<i>NS</i>	0	0.1	0.4	0.8	1	0.8	0.4	0.1	0	0	0
<i>NM</i>	0	0.8	1	0.8	0.4	0.1	0	0	0	0	0
<i>NB</i>	1	0.8	0.4	0.1	0	0	0	0	0	0	0

表 3-14 误差变化模糊集的隶属函数赋值表

	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5
<i>PB</i>	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.8	1
<i>PM</i>	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.7	1	0.7	0
<i>PS</i>	0	0	0	0	0.4	0.7	1	0.7	0.4	0	0
0	0	0	0.1	0.4	0.7	1	0.7	0.4	0	0	0
<i>NS</i>	0	0.1	0.4	0.8	1	0.8	0.4	0.1	0	0	0
<i>NM</i>	0	0.8	1	0.8	0.4	0.1	0	0	0	0	0
<i>NB</i>	1	0.8	0.4	0.1	0	0	0	0	0	0	0

表 3—15 控制变量模糊集隶属函数 $u_{eij}(Z)$ 赋值表

	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5
<i>PB</i>	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.8	1
<i>PM</i>	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.7	1	0.7	0
<i>PS</i>	0	0	0	0	0.4	0.7	1	0.7	0.4	0	0
<i>C</i>	0	0	0.1	0.4	0.7	1	0.7	0.4	0	0	0
<i>NS</i>	0	0.1	0.4	0.8	1	0.8	0.4	0.1	0	0	0
<i>NM</i>	0	0.8	1	0.8	0.4	0.1	0	0	0	0	0
<i>NB</i>	1	0.8	0.4	0.1	0	0	0	0	0	0	0

4. 控制规则的确定

此系统为双输入单输出的模糊控制系统,按照实际经验,根据系统输出误差和误差变化来消除误差,有以下一些模糊控制规则:

- 1) 若 $E=NB$ 或 NM 且 $EC=NB$ 或 NM , 则 $U=PB$;
- 2) 若 $E=NB$ 或 NM 且 $EC=NS$ 或 0 , 则 $U=PB$;
- 3) 若 $E=NB$ 或 NM 且 $EC=PS$ 或 0 , 则 $U=PM$;
- 4) 若 $E=NB$ 或 NM 且 $EC=PM$ 或 PB , 则 $U=0$;
- 5) 若 $E=NS$ 或 0 且 $EC=NB$ 或 NM , 则 $U=PM$;
- 6) 若 $E=NS$ 或 0 且 $EC=NM$ 或 NS , 则 $U=PM$;
- 7) 若 $E=NS$ 或 0 且 $EC=NS$ 或 0 , 则 $U=0$;
- 8) 若 $E=NS$ 或 0 且 $EC=PS$ 或 0 , 则 $U=0$;
- 9) 若 $E=0$ 或 PS 且 $EC=NB$ 或 NM , 则 $U=PM$;
- 10) 若 $E=0$ 或 PS 且 $EC=NS$ 或 0 , 则 $U=PS$;
- 11) 若 $E=0$ 或 PS 且 $EC=PM$ 或 PB , 则 $U=NS$;
- 12) 若 $E=PS$ 且 $EC=NB$ 或 NM , 则 $U=PS$;

- 13) 若 $E=PS$ 且 $EC=0$, 则 $U=0$;
- 14) 若 $E=PS$ 且 $EC=0$ 或 PS , 则 $U=NS$;
- 15) 若 $E=PS$ 且 $EC=PM$ 或 PB , 则 $U=NS$;
- 16) 若 $E=PM$ 且 $EC=NS$, 则 $U=NM$;
- 17) 若 $E=PM$ 或 PB 且 $EC=0$ 或 PS , 则 $U=NM$;
- 18) 若 $E=PM$ 或 PB 且 $EC=PM$ 或 PB , 则 $U=NM$ 。

根据以上控制规则, 应用表 3-13、表 3-14、表 3-15 的赋值, 按模糊推理合成规则求出隶属函数: $u(x, y, z)$, 构成模糊关系矩阵 R 。

$$R = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.4 & 0.8 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.4 & 0.8 & 0.8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.4 & 0.8 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0.6 & 0.7 & 1 & 0.7 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.3 & 0.5 & 0.8 & 1 & 0.5 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.5 & 1 & 0.5 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.5 & 0.7 & 0.8 & 1 & 0.7 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.7 & 0.8 & 1 & 0.7 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.6 & 0.8 & 0.5 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.7 & 0.8 & 1 & 0.7 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8 & 1 & 0.7 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

5. 模糊响应表的制定

依据模糊关系 R , 任给一个观测结果 A 和 B , 按照二输入单输出的模糊控制器模型, 由模糊推理合成规则

$$U = (A \times B) \circ R$$

即其隶属函数

$$u_v(z) = v_{UR}(x, y, z) \wedge u_A(x) \wedge u_B(y)$$

求出模糊响应 $u_u(z)$ 。

如观测结果为 $E=PB$, $EC=PM$ 时, 由表 3-13、表 3-14 查出隶属函数分别为 $(00000000 \cdot 10 \cdot 40 \cdot 81)$ 和 $(000000 \cdot 10 \cdot 40 \cdot 810 \cdot 70)$ 则

$$\begin{aligned} u_{PB}(y) \circ u_R(x, y, z) &= (00000000 \cdot 10 \cdot 40 \cdot 81) \circ R \\ &= (0 \cdot 810 \cdot 80 \cdot 70 \cdot 2000000) \\ u_{PM}(y) \circ u_R(x, y, z) &= (000000 \cdot 10 \cdot 40 \cdot 810 \cdot 70) \circ R \\ &= (0 \cdot 70 \cdot 70 \cdot 80 \cdot 70 \cdot 70 \cdot 40 \cdot 1000) \end{aligned}$$

得模糊响应

$$\begin{aligned} u_u(z) &= (0 \cdot 810 \cdot 80 \cdot 70 \cdot 2000000) \wedge (0 \cdot 70 \cdot 70 \\ &\quad \cdot 80 \cdot 70 \cdot 40 \cdot 1000) \\ &= (0 \cdot 70 \cdot 70 \cdot 80 \cdot 70 \cdot 2000000) \end{aligned}$$

峰值对应的等级为 -3, 按最大隶属原则, 则控制等级为 -3。

这样, 针对不同的等级指标 i, j 的误差 E 和误差变化 EC , 可事先计算出一个确切响应控制表。若用计算机作为控制器的功能可把其贮存在计算机中每当观测到一个误差等级时, 计算机只计算误差变化 EC 的等级然后查找控制表, 使控制迅速简便可行。无此条件, 在压力调节阀上安一个刻度盘预先计算出系统的控制表采用人工控制, 也能达到预期效果。

为实现煤层注水的最佳效果, 采用模糊控制, 是提高现代化矿井管理水平有效技术途径。目前尚需进一步从实践中探求。

第四章 煤层注水方法与注水工艺

第一节 煤层注水方法及其特点

在煤层注水工程中，由于注水方式，注水压力和供水方式不同，煤层注水方法有以下几种。

按照水进入煤体的形式，即注水方式分为长钻孔注水、短钻孔注水和深孔注水等三种。

1. 长钻孔注水

在工作面前方的煤层正常地压区内，沿煤层倾斜的上向、下向钻孔，或沿煤层走向钻孔，孔长一般为 $30\sim 100\text{m}$ 。钻孔由回风巷俯斜向下钻进，称为下行孔；由运输机巷仰斜向上钻进的，称为上行孔；在工作面较长时，可采用上、下行孔同时注水；沿煤层走向的钻孔称为走向孔；在特厚煤层中，长钻孔可以穿层钻进。

长钻孔注水特点及适用条件：

1) 由于长钻孔注水作业超前于工作面，使注水有充足的时间，给水在煤体孔隙中的毛细渗透创造了条件，水可以长时期地缓慢地进入煤体的细微孔隙，湿润的效采较好。

2) 长钻孔注水使煤体能得到大面积的预先湿润，一个钻孔一次湿润的采煤面积可达数百平方米以上，一次湿润的煤量可达数千吨。湿润范围较大，提高了注水效率。

3) 注水施工远离采煤工作面，大大减少了采煤和注水作

业的相互干扰和影响，使注水能正常地持续进行。

4) 长钻孔注水的湿润范围处于工作面前方的煤层原始压力带中，煤层尚未受到支承压力的影响和破坏，因此水进入煤体裂隙、孔隙后不易泄水流失，对顶底板的影响也较小。原始压力带注水压力一般也比支承压力带注水低。

5) 长钻孔注水施工比较集中，易于管理和检查，节约大量的人力和时间，为实现全矿井注水施工专业化创造了条件，便于普遍推广和长期坚持。

6) 长钻孔注水的钻孔比较长，这就要求煤层的赋存情况比较稳定，构造比较简单，以利于钻孔施工。在那些煤层层厚及倾角变化很大、断层褶曲较多的煤层中，钻孔施工困难较大。因此，长钻孔注水一般适用于地质条件较好的中厚及厚煤层。在薄煤层条件较好时也可以使用。在透水性较好的煤层里，长钻孔的长度不能太长，因此对薄煤层及构造比较复杂的煤层适应性就更广泛一些。

2. 短钻孔注水

短钻孔注水一般均在煤层的卸压区（塑性变形区）内进行，钻孔垂直于工作面煤壁，孔长为采煤工作面一个循环的进度，一般为 2m 左右，采用低压注水。一次注水湿润一个循环进度的煤体范围。

短钻孔注水特点及适用条件：

1) 由于短孔注水是在煤层的卸压带内进行，所以被湿润的煤体经支承压力的作用产生了大量的次生裂隙，它和煤体的原始生成的裂隙沟通交织在一起，形成较发育的裂隙网，使煤体透水性增强，注水压力一般不需要大。由于湿润区紧靠煤壁，注水中常易泄水返出煤壁之外，因此，在注水时，必须采用技术措施以保证既能均匀湿润又不发生泄漏。

2) 注水作业在工作面内进行,与采煤工序互相交叉,因此,注水作业必须在较短时间内完成,这必然影响煤体内细微孔隙的均匀湿润,降低了注水效果。

3) 由于注水时间受到限制,要求注水工序必须紧凑,作业必须迅速,按采煤的循环每天重复进行。

4) 短孔注水由于注水压力不高,注水孔短,又不需用大型设备和较长的管路,在不同的地质构造和各种赋存条件下均可施工,具有较大的适应性和灵活性。

这一注水方法,从 50 年代起,我国本溪、开滦、萍乡、辽源等局、矿先后进行了试验、应用,均取得了较好效果。

3. 深孔注水

深孔注水是在工作面前方煤层的支承压力区内进行注水,钻孔垂直于工作面煤壁进入集中压力区,孔长为采煤工作面数个循环进度,一般在 10m 左右。

由于地压比原始压力高出 1~2.5 倍,原生裂隙处于压紧状态,而次生裂隙尚未大量形成,因此,通常注水压力较高,但水进入煤体裂隙后不易流失,能够比较均匀地进入煤体的微孔隙中,湿润效果较好,不易发生泄水跑水,对顶底板的影响也小。工作面内注水一次可湿润 n 个循环的煤体范围。图 4-1 表示果场 n 个不同的压力区域所采用的注水方法。

按照供水方式,煤层注水方法又分为静压注水和动压注水二种。

4. 静压注水

静压注水是利用地面水源至井下用水地点的静水压力,通过矿井防尘管网直接将水引入钻孔向煤体注水。

5. 动压注水

动压注水是利用水泵向煤体注水。这种注水方法又分为:

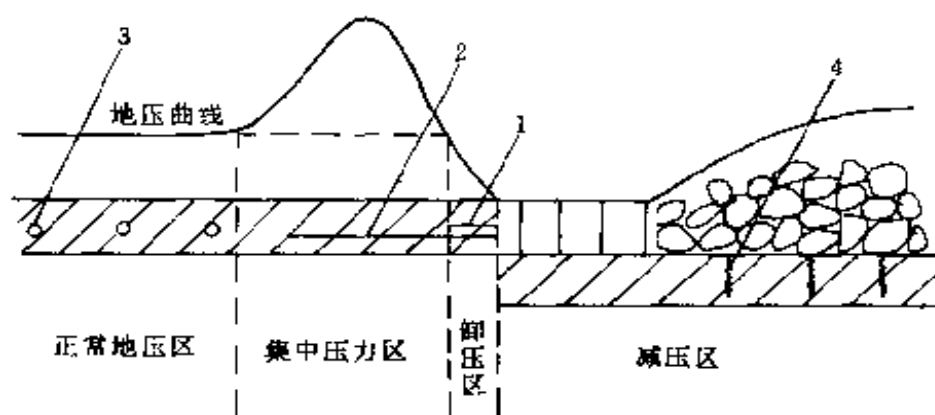


图 4-1

1—短钻孔注水；2—深钻孔注水；

3—长钻孔注水；4—采空区灌水预湿下层煤体

1) 固定泵（泵站）注水。水泵固定在井上或井下某地点，由固定管路将压力水送到注水地点。

2) 移动泵注水。水泵设在注水工程地点，随注水工作的移动而移动。

3) 注水器注水。注水方式是使用专用的注水器直接在孔口注水。注水器是一种包括水的加压、水的传送和自动封孔装置的联合机具。国外多为短孔或深孔注水而专门设计制造的。

在煤层注水工程中，根据注水压力数值的高低又分为低压注水、中压注水和高压注水。这种分法目前尚无统一规定，目前习惯上认为小于 $(25\text{kg}/\text{cm}^2)$ 2.45MPa 为低压注水；大于 2.45MPa ，小于 7.84MPa 为中压注水；大于 7.84MPa 为高压注水。我国目前煤层注水实际使用的水压最高不超过 $(150\text{kg}/\text{cm}^2)$ 14.7MPa ，其中大多属于中、低压注水。

根据上述各种注水方法的特点，在选择注水方法时一定

要考虑下列因素：

(1) 煤体的透水性及泄水的可能性，这主要决定注水压力的大小及供水方式；

(2) 采煤作业和注水作业相互的干扰程度，它决定采用短孔或长孔；

(3) 采煤方法和井巷布置条件，决定钻孔的布置形式；

(4) 煤层地质构造条件、产状要素及埋藏深度；

(5) 水对顶底板的影响程度；

(6) 注水作业的人力、设备、器材等主观条件。

合理的注水方法应使注水工艺尽可能简单、使用设备人力尽可能减少、湿润效果要求要达到预期目的，而且还必须考虑在本矿有条件长期推广使用。我国矿井目前大多数采用低压或中压长钻孔注水湿润煤层，一般情况均能取得预期效果。

第二节 短孔煤层注水

一、钻孔布置与施工

短孔煤层注水钻孔垂直于煤壁，采用单排孔或双排孔两种方法布置。采高小于 2m 时，采用单排孔布置。孔深按照循环进度而定，比循环进度大 0.2m 即可，一般为 1.8~2.2m；孔间距一般为 2~8m，根据煤层透水性确定；孔径 45~52mm；钻孔倾角应以穿透各个自然小分层为准。

钻孔一般采用煤电钻，钻孔一般在准备班进行，由下而上超前于放顶工作，以避免在放顶后因顶板压力变化而引起钻孔变形。在工作面上下口各留适应距离不打眼，以防止片

帮冒顶。

二、封孔方法

短钻孔普遍采用螺旋封孔器封孔。封孔器可根据各地注水的具体要求设计成不同的规格型号，但其基本原理和结构形式均大体相同。其结构如图 4—2 所示。

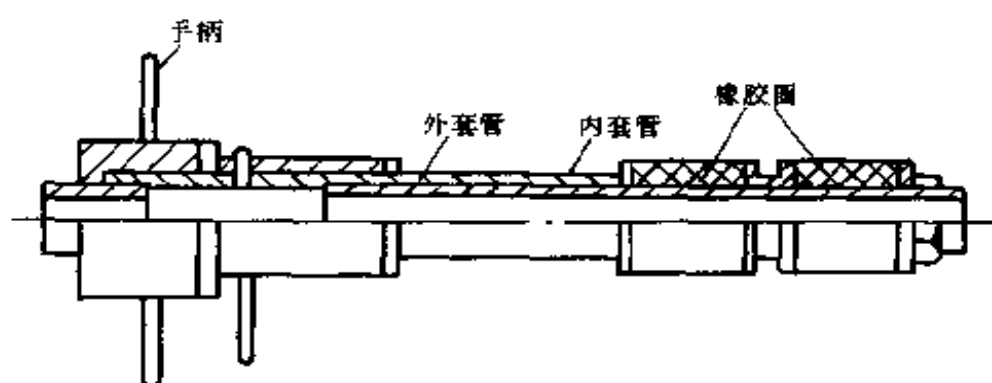


图 4—2 螺旋式封孔器

使用螺旋封孔器时，摇动手柄使内外套管相向运动，通过压板将两个橡胶圈压成鼓形而将钻孔封严。水经过阀门从内套管中进入钻孔。螺旋封孔器在正常情况下是完全能满足低、中压注水的封孔要求。

在注水结束后，反摇手柄使外套管向外退出，内外套管反向运动，压板松开橡胶圈，胶圈以本身的弹性恢复原形，可将封孔器取出。封孔器长度可根据封孔深度自行设计。

在封孔之前应预先将孔内煤末清除干净，以免影响堵孔的严密程度。一般封孔深度为 0.8~1.0m。合理的封孔深度应满足下列要求：

- 1) 注水孔口及其附近的煤壁不发生泄水现象。对应于某

--注水压力有一个相应的封孔深度。

2) 使煤壁的深部和浅部湿润均匀。封孔过深则煤体水分集中于深部,而煤壁处仍较干燥。赵各庄矿注水经验表明,在孔深为 2.5m 时,堵孔深度为 2m,注水 30min 后,煤体内部水分增至 9.5%,而煤壁附近却是干燥的。如果要使干燥的煤壁也达到湿润,则必须增加注水时间,一般来说这是工作条件所不允许的。因此,封孔深度既要保证不泄水,又要避免出现里湿外干的“葫芦形”,以达到均匀湿润煤体的目的。

3) 使注水孔有较好的利用率。封孔太深则减少了孔壁渗水面积。

三、注水方式与注水方法

我国短孔注水一般采用小于 19600Pa 压力,所以常采用有管网静压注水和专用泵加压注水两种方式。

1) 管网静压注水。

这种注水方式是利用地面或上一水平的水池通过固定供水管网向钻孔注水,水依靠管网水的静压力注入煤体。赵各庄矿是利用上一水平蓄水池的静压水,通过直径为 50mm 钢管的供水管网和采区铠装移动水管直接接至注水孔口,注水压力达到 19kPa 左右。

2) 专用泵加压注水。

这种注水方式是在注水工作面风巷里设注水专用泵向各钻孔供水。注水泵可采用各种类型的低压往复泵,如 TBW—50/15 型泥泵等,水压力一般可达到 5000~12000Pa。图 4—3 为彩屯矿短孔注水系统。

除了专用泵注水以外,国外还设计制造了注水器进行短孔注水。注水器供给的压力水系由压风水泵产生的,压风水

泵利用梯形压差活塞的往复运动以压风为动力将低压水升高至数十乃至上百个大气压直接注入孔口。

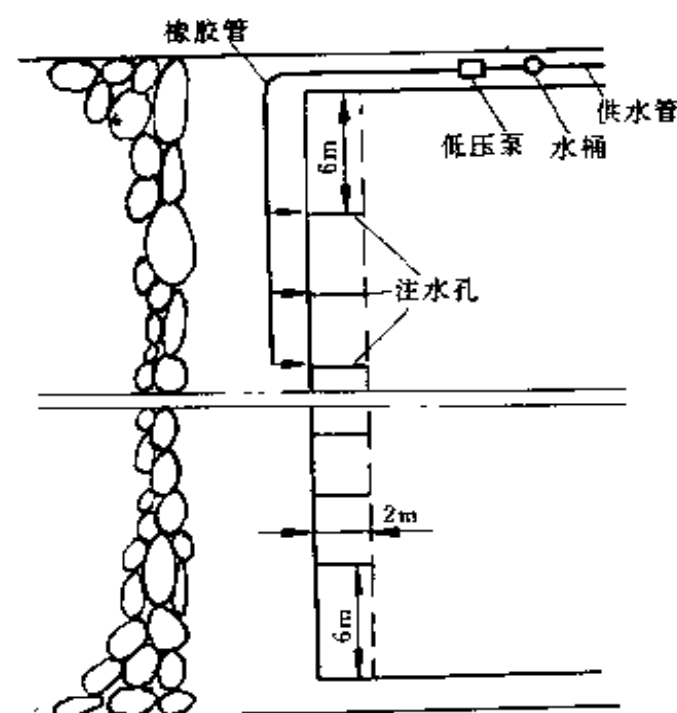


图 4-3 本溪彩屯矿短孔注水系统布置

在注水开始时，不论采用何种注水方式，最初几分钟用略低的压力注水，然后恢复正常注水压力进行注水。一般每孔注水流量为 $10 \sim 20\text{L/min}$ 左右，每孔注水量为 $0.1 \sim 0.25\text{m}^3$ ，每组孔注水时间约为 $10 \sim 15\text{min}$ 左右，使注水后的煤体水分增加 1% 以上，至止煤壁出汗。我国各矿井短孔注水情况见表 3-4。

四、注水施工作业形式

短孔注水是在准备班内进行，1~2 人打眼，2 人注水，1 人司泵兼电钳工，全部注水工作 4~5 人即能满足。采用静压

注水时 3 人即可完成全部工程。全工作面注水作业总时间一般在 2h 左右。打眼和注水平行作业，超前于放顶作业，由下向上顺序进行，避免两者交叉，造成钻孔变形。如果注水作业由上向下进行，即当注水和放顶交叉时，应在放顶作业距注水地点前后 15m 范围内停止打眼和注水。

第三节 长孔煤层注水

一、钻孔布置形式

1. 沿倾斜下行注水钻孔

在走向长壁采煤工作面的风巷中沿煤层向下打俯斜孔，钻孔平行于工作面或成伪斜布置，孔的长度根据煤层透水性和工作面斜长而定，通常为 30~100m 之间；孔的走向间距一般为 10~20m；钻孔倾角大体与煤层一致。下行孔在钻孔时排粉较困难，但易于封孔。这种钻孔的布置方式多用于无走向断层、沿倾斜方向煤层的倾角变化不大的稳定煤层。这种布置形式，注水作用全部在回风巷内进行，前注后泵，钻孔和注水均超前工作面 30~100m，即在原始压力带内作业。注水时，水在外加压力和自重的作用下易于向下渗透，有利于湿润煤体。由于以上优点，多数矿均选用该种布置形式，如图 4—4a 所示。

2. 沿倾斜上行注水钻孔

在走向长壁采煤工作面的运输机巷中沿煤层向上打仰斜孔，钻孔平行于工作面或成伪斜布置，孔长和间距均根据煤层透水性及工作面斜长决定，我国目前采用钻孔长度为 30~60m，孔距为 15~20m，超前工作面的距离与下行孔相同。上

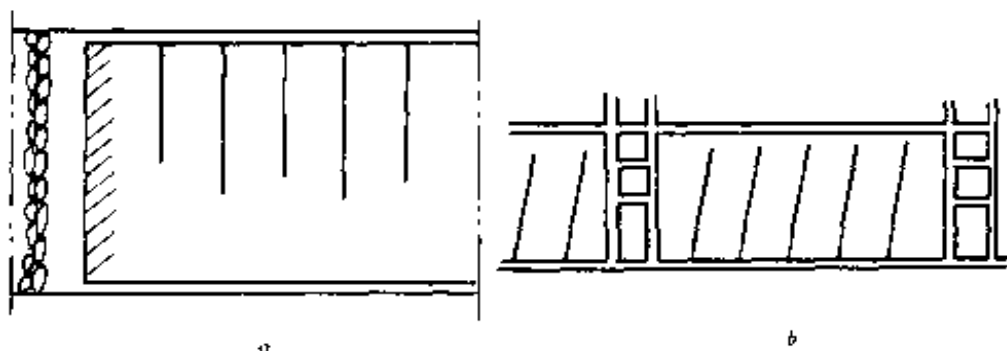


图 4-4 沿倾斜布置的上、下行钻孔

a—下行钻孔（石炭井、陶庄矿等）；b 上行钻孔（重庆中梁山矿等）

行钻孔容易排除孔中的煤粉，但封孔较困难。注水作业全部在机巷内进行，前注后采。这种布置方式多用于无走向断层、倾角变化不大的稳定煤层。钻孔布置如图 4-4b 所示。

3. 沿倾斜上、下行同时注水钻孔

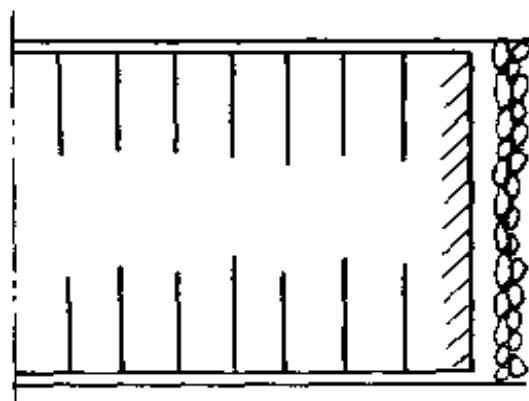


图 4-5 沿倾斜的上、下行钻孔
（门头沟矿）

当走向长壁工作面的倾斜长度较大或沿倾斜方向煤层倾角变化较大时，采用上、下行同时注水钻孔；在工作面中都有走向断层时，也可采用这种布置形式。孔长与孔距根据工作面的具体条件面定。其布置形式如图 4-5 所示。

4. 沿走向水平钻孔

在倾斜长壁工作面或刀柱式采煤工作面，从上山或斜巷中沿煤层走向打水平钻孔（或略带角度）进行注水。这种布

置方式对具有走向断层或沿倾斜方向上倾角变化较大的煤层适应性较强，但在钻孔作业时，钻机需要设在采区上山或斜巷内工作，稳钻及移钻比较困难，往往还要开设钻场，工作量较大。钻孔布置如图 4-6 所示。

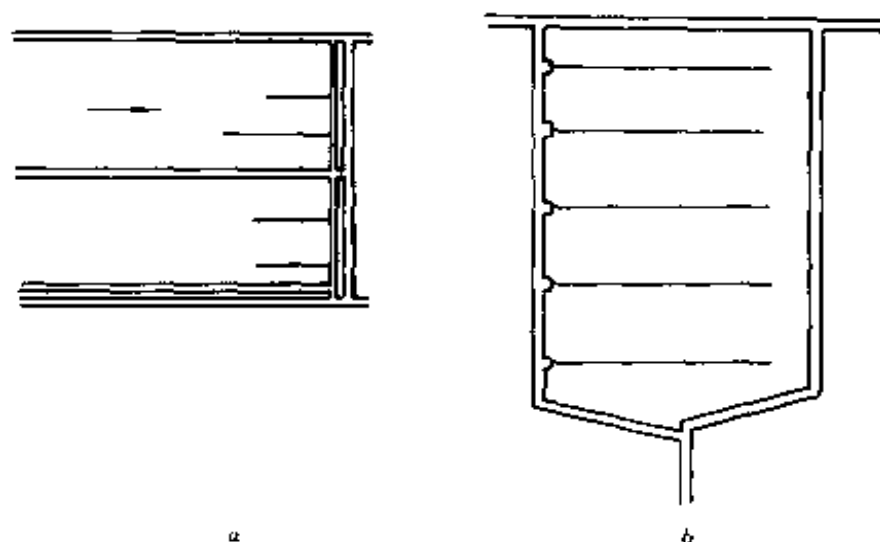


图 4-6 沿走向的水平钻孔

a—刀柱工作面的水平钻孔（门头沟矿）

b—倾斜长壁工作面水平钻孔（龙凤矿）

5. 特厚煤层的综合长钻孔

这种方式是采用多种布置钻孔形式同时进行注水，即采用上、下行穿层钻，沿走向水平钻孔、沿倾斜钻孔等联合布置，专用于特厚煤层注水。

穿层孔是从围岩集中巷或采区煤门中向顶板方向上行或下行布置打钻。在围岩集中巷打穿层孔时，可以利用原有瓦斯抽放钻场，开口孔位于岩层中有利于提高封孔质量；在回风道和采区石门中打穿层孔则无需另开钻场。沿走向的水平钻孔是从采区两侧的管子道设钻顺煤层向钻孔，移钻比较困

难。各种钻孔的深度及几何位置根据煤层厚度而定。布置形式如图 4-7 所示。

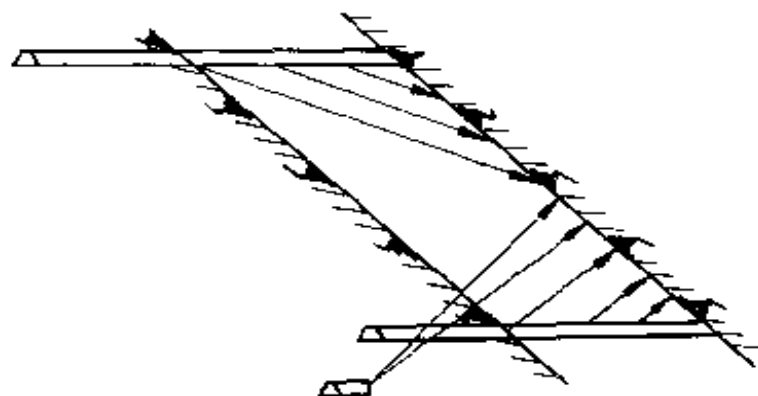


图 4-7 抚顺特厚煤层综合钻孔注水
(龙凤矿)

二、钻孔施工

(一) 用钻机施工

进行钻孔时，若采用 TXU-75 型油压钻机或红旗-150 型探水钻机，按下述方法施工。

1. 钻机的移设和固定

沿煤层倾斜打上、下行钻孔时，可把钻机固定在矿用平板车上，组装成为注水的专用钻车，沿巷道中的轻便轨道移动选择孔位。在钻孔时，钻车可用两种方法固定，一是用轨道卡子固定，即在平板车两端架子上安装 4 个轨道卡子，固定钻车时用螺钉将卡子卡紧在轨道上，固定方法如图 4-8 所示。二是将钻车撬下轨道，置于所需要的固定位置，上打撑木，下垫方木，钻机固定好即可开钻。

2. 无钻场打钻法

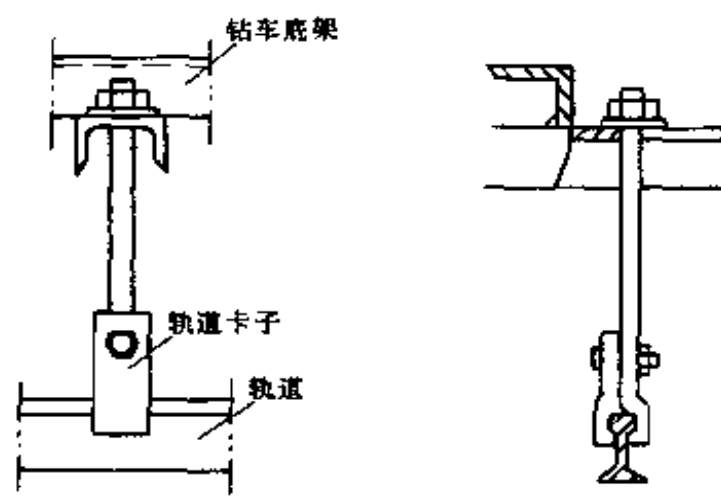


图 4—8 轨道卡子固定钻机

为节省开设钻场的工程量，可采用下述方法施工。

1) 使用“水便窝”钻孔。这种施工方法是在巷道上帮（打下行孔时）挖一个深度为 0.3~1.0m 的窝子，打钻时可使钻杆尾部供水，“水便”伸进窝里，以便接钻杆或拔出钻杆，如图 4—9a 所示。采用此法施工，使用的钻杆长度一般限定为 0.8~1.2m，此法接钻杆较频繁。

2) 使用反向大钻孔代替钻场。这种方法是在确定好注水孔的方位和倾角后，在注水孔的同一轴线上，先用钻机向相反方向的巷道上帮打一直径为 150mm 的大直径钻孔，孔深 3~4m，用以容纳钻杆和供水软管。钻孔时，钻杆尾部及供水“水便”等均置于反向孔内运转。此法因反向孔较深，可用 3m 长的钻杆，因而此法比“水便窝”钻进法接钻杆次数少，但反向大钻孔的施工须占用一个小时左右。其形式如图 4—9b 所示。

3. 预防卡钻方法

在煤层中打下行孔应特别注意防止卡钻。造成煤孔卡钻

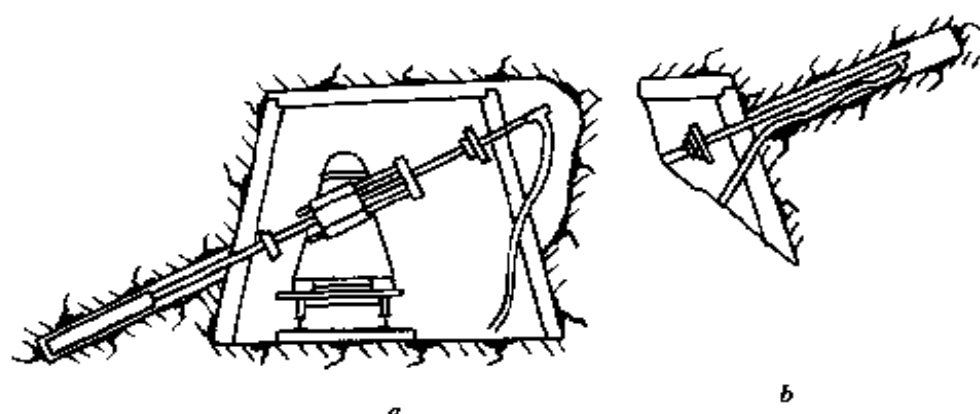


图 4—9 无钻场打钻法

a—挖“水窝”钻进；*b*—大直径反向钻孔钻进

主要是冲孔水的流量过小，排粉力不强。因此在施工中常用“小钻大泵”的方法消除下行孔的卡钻现象。“小钻大泵”就是用流量较大的泥浆泵和钻机配套使用，增加冲孔水的流量，使孔内岩粉迅速排出孔外。另外也可使用管网静压水接入钻杆冲孔，或换用直径较大的钻头，控制钻进速度均能减少，消除卡钻事故。

4. 预防钻孔偏斜方法

为了防止钻孔在终孔时穿入顶底板，可采取以下措施：

1) 在钻杆及钻具自重的影响下，钻孔随深度的加大而发生向底板方向的偏移。钻孔愈深，钻杆下垂愈大，钻孔向下偏斜也愈大。因此，在确定钻孔角度时，应根据调查资料适当调整钻孔开口的角度，而使终孔位置不接触底板。

2) 在松软煤层中钻孔时，宜用长度 2~3m 的岩芯管钻头钻进。长岩芯管还可起一个导向作用，这样也能避免因钻杆自重或煤层内部硬度的变化所造成的钻孔偏移现象。

3) 增强钻机安设的稳固性，防止打钻时钻机震动、抖动，

提高钻杆连接的牢固程度，减少钻孔的大量偏移。

（二）使用架式岩石电钻施工

在煤层中使用架式岩石电钻打下行孔时，其深度可达 70～100m。由于该机重量轻，安设方便，适合在那些断面小而过车行人频繁的巷道中施工。

为使岩石电钻更好地适应打煤层孔、打下行孔、打长孔的需要，可将电钻轴向的水眼直径由原来的 4mm 扩大为 11mm，同时使水直接从电钻前部进入钻杆，用以加大冲孔的水量，预防卡钻。在使用电钻时，也可设置支撑架用以固定电钻的滑道架，支撑架要做成能上下调节，用以调整滑道的工作位置和倾角。

（三）使用煤电钻施工

在煤层较软，注水孔深度较小的条件下，可以采用侧式供水的湿式煤电钻打孔。这种方法适应于较狭窄的巷道施工。由于此法灵活，操作简便，一般在静压供水、人抱钻的条件下在软煤层中 2h 即可打完一个长度为 35m 的下行孔。另外，在那些注水效果较差、需补钻注水的地点，也可用煤电钻打补孔。

三、封孔工艺

注水孔孔口部分必须封闭，以保证压力水不从孔口及其附近的煤壁泄漏。封孔方法主要有水泥封孔、螺旋封孔器封孔和自动封孔器封孔等三种方法，它们有各自适用条件和优缺点。

（一）水泥封孔

这种封孔一般在封孔长度内用较大直径的钻头钻出开口孔，开口孔内插注水管，然后在开口孔孔壁与注水管之间灌

满水泥砂浆，将孔口封严。具体施工方法有以下四种：

1) 先插入注水管，然后灌入水泥砂浆。这种施工方法是事先在注水管的一个端头外绑上棉纱或紧套两层橡胶堵圈，然后送入孔内，使堵塞物封严开口孔的孔底，以防封孔的水泥砂浆流入注水孔中。再用压风送浆器（图 4—10c）或人工将水泥砂浆送入孔壁与注水管之间的空隙内，经 24~36h 后即可开始注水。

一般用于封孔的水泥砂浆的灰砂比为 1 : 2.5~1 : 3.0。注水管用 1 吋钢管或塑料管，选择何种材质视注水压力而定。在低压注水时，当注水压力不超过 980kPa 时，可采用软塑料管。若封孔深度超过 2~3m 时，注水管用接头连接，分段送入孔中；为了节省钢材，封孔孔内部分可用硬塑料管代替。有开口孔的水泥砂浆封孔方法如图 4—10a 所示。

2) 先封泥后插管。这种方法是先用黄泥堵住开口孔底，待灌满水泥砂浆后，再将注水管（管口用木塞堵紧，当压力水送入注水管时，木塞即被顶出）从砂浆中插入孔内，并穿透黄泥进入注水孔，水泥凝固后即可注水。

3) 预先固定套管的封孔方法。这种封孔是当开口孔打好后，先将一段大直径套管置入开口孔内，用一橡胶活塞将水泥砂浆从套管中挤入开口孔内，待孔口见水泥砂浆挤出时，则证明套管与开口孔壁之间已填满砂浆。砂浆凝固后，再用小套管内径的钻头穿过套管钻进注水孔，注水孔打完后，套管即可用作注水管。

4) 深封孔法。在封孔深度超过 10m 时，使用一般的封孔方法已无法进行，可使用送泥器封孔，如图 4—11 所示。这种封孔方法是將一种送泥器连接在钻杆的端部，用钻杆将盛有水泥砂浆的送泥器推至封孔的预定深度，开动与钻杆输水

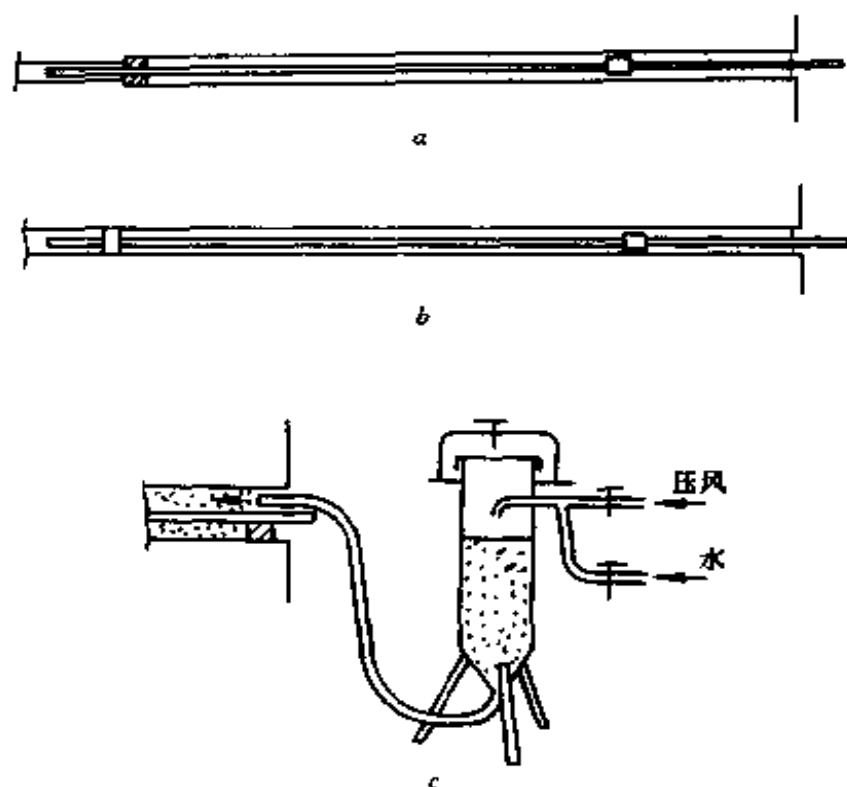


图 4—10 水泥封孔示意图

a—有开口孔的水泥封孔；*b*—无开口孔的水泥封孔；

c—压风送浆器示意图

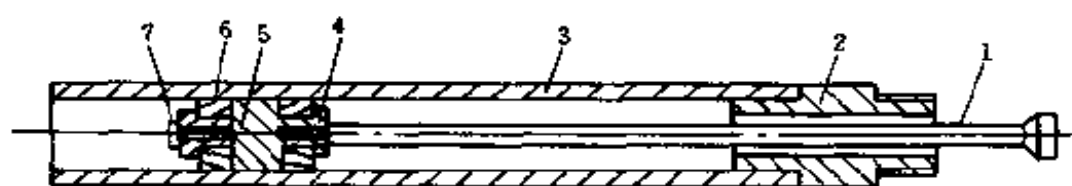


图 4—11 送泥器构造图

1—拉杆；2—接头；3—套筒；4—压垫；5—活塞；6—密封圈；7—轴钉

孔相连的高压泵，用钻杆内的压力水将送泥器内的活塞推向
前方，把水泥砂浆送入孔内。由于送泥器可随钻杆伸缩于钻

孔内，这样往复进行多次，即可封至所需要的长度。实践证明，一般填水泥的长度只需 4~5m 即可，水泥段以外的部分可不必充填。

除了上述封孔方式外，还有无开口孔的封孔方式。即在钻孔时不打开口孔，全钻孔采用同一孔径钻进。封孔时，在注水管前端套好丝扣，将废皮带做成堵垫，堵垫的外径和孔径一致，中间圆孔和注水管丝扣的直径一致，将堵垫顺丝扣紧紧套在注水管上，使之不能沿注水管轴向滑动，然后将注水管推入孔内至所需位置，再填入水泥砂浆将孔口封住。这种封孔方法如图 4-10b 所示。

实践表明，水泥封孔效果可靠，孔口严密不易漏水，对于孔口煤体松软孔壁成型不规整等情况有较强的适应性。如果采用膨胀性水泥则效果更好。但封孔操作较复杂，当封孔深度较大或封上行孔时尤为困难，材料消耗较多。

（二）螺旋封孔器封孔

螺旋封孔器的构造及封孔原理见本章第二节，不再赘述。长孔注水封孔用的螺旋封孔器与短孔注水一样。

在长钻孔注水需要深封孔时，可采用接长内外套管的方法将螺旋封孔器送入需要的封孔深度进行封孔。注水结束后，如因注水时间长，孔壁发生坍塌，螺旋封孔器难以取出时，可采用钻机扩孔取出。

螺旋封孔器可以在长钻孔注水的低压、中压甚至高压注水中使用。要求钻孔直径比胶圈外径大 5~10mm 为宜。其间隙太小，放置与取出较困难；间隙过大则不能有效地封好孔口。同时还要求孔口煤体较硬、孔壁完整形状规则、封孔段内无碎碴浮煤。在用于中、高压注水时，应将封孔器加以固定，防止它向外滑动冲出造成事故。

螺旋封孔器使用方便、经济、迅速，在孔壁煤体较硬时，对封孔深度及注水压力的适应性较强。但在孔径变化、孔壁不规则时，胶圈不易将孔口封严。当封孔深度超过 3~4m 时，操作较复杂。

（三）水力压缩自动封孔器封孔

这种自动封孔器是以注水压力为动力，使胶筒作径向膨胀而达到封孔的目的。国内外有许多不同规格型号自动封孔器，可适用于各种类型的注水要求。我国有 ZYY-501 型封孔器，其构造如图 4-12 所示。

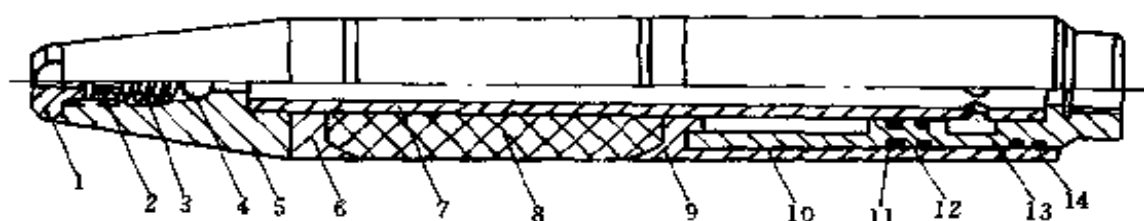


图 4-12 ZYY-501 型水力压缩式自动封孔器

- 1—喷嘴；2—调压螺母；3—弹簧；4—钢球；
5—头部；6—张紧螺母；7—内管；8—胶筒；
9—承体；10—缸；11—O 型密封；12—单向活塞；
13—下接头；14—O 型密封

1. ZYY-501 型封孔器结构和作用原理

封孔器由密封部分和传压部分组成，通过内管 7 连结在一起。密封部分由胶筒 8 组成。传压部分由球阀 4、单向活塞 12 等组成。封孔器开始工作后，压力水由下接头 13 进入内管 7，并经过内管的侧孔进入传压室而作用于单向活塞 12 上，此时，球阀 4 受同样压力，由于球阀 4 被弹簧 3 压紧，此时水的压力不足以把球阀打开。活塞 12 在水压作用下向前运动通过承体 9 而逐步压缩胶筒 8，胶筒轴向受力而产生径向膨胀，

当直径胀大到封严孔壁，胶筒逐渐压实，水的压力升高到可以克服弹簧 3 的压紧力而将球阀打开，水流经球阀进入头部通道，由喷嘴注入钻孔内，这样既实现了封孔目的，又将水注入煤体。注水结束停泵时，无水继续供入封孔器，胶筒靠本身弹性恢复原状，把活塞推回原位，封孔器复原，从孔中取出再用。

2. ZYY—501 型封孔器的技术性能

1) 胶筒与注水孔壁的间隙要求。一般情况，封孔器胶筒直径为 51mm 时，与孔径的差值在 5~12mm 为宜。孔径过大，则因胶筒达最大变形时，与孔壁的接触面积仍较小，其间的摩擦力不能承受钻孔内水的压力而使注水器自动退出孔外。孔径过小，则封孔器进出钻孔均有困难。当然，合理的间隙和许多因素有关，例如胶筒材料的性能、煤的硬度及其它物理性质、水的压力、孔壁的情况等。因此，在某一煤层使用某一直径的胶筒时，其合理的间隙均应通过试验来确定。

2) 封孔器的最低有效水压。在实验室条件下采用模拟法测定封孔器在不同水压下胶筒径向变形值及考察封孔器的合理注水压力值。图 4—13 是三种不同胶种的胶筒在不同水压下的径向变形值。表 4—1 列出了三种胶种的不同配方。

表 4—1 胶筒的胶种

序号	硬度	胶 种
1	R55	杂胶（胎面、侧面胶）
2	R63	纯胎面胶
3	R80	特种胎面胶+炭黑+催进剂

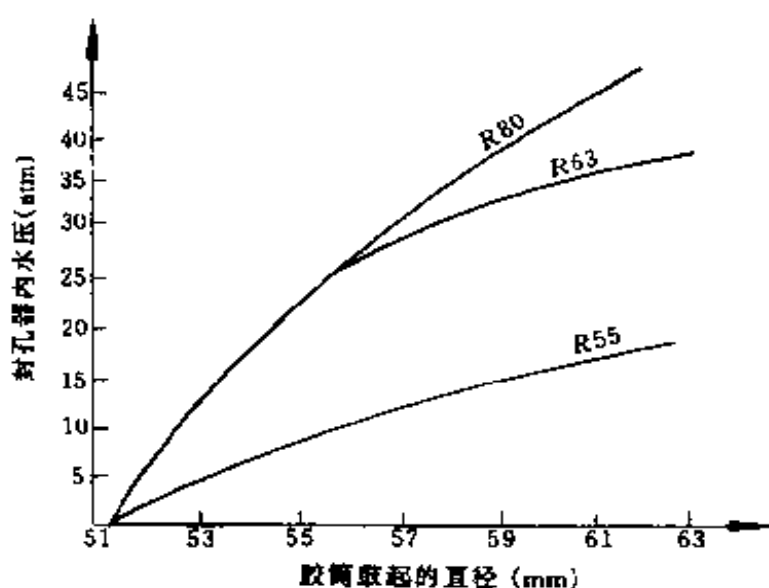


图 4—13 水压与胶筒变形的关系

从图 4—13 中可以看出，水压越大，胶筒径向变形越大，在相同水压下，软胶的变形较大，反之则较小。

通过测定，当封孔器胶筒直径为 51mm、注水孔孔径为 56.5mm 时，R55 的胶筒最低有效压力为 10.78kPa；R68 的胶筒为 26.46kPa；R80 的胶筒为 29×980Pa。图 4—13 中的曲线可大体确定不同孔径下的最低有效压力值。

3) 封孔器的最高使用水压。当水压过高时，不仅不能提高封孔的承压能力，相反会使胶筒“脱皮”损坏。在某一煤层使用某一胶种的胶筒封孔时，应通过试验确定最高使用压力。它和胶的性能、胶筒直径、煤的物理性质和孔壁情况等因素有关。中梁山矿现场试验表明，R55、直径为 70mm 的胶筒最大承受压力为 150×980kPa；R76、直径为 70mm 的胶筒可以承受 200×980kPa 而无损坏现象。一般认为 R55 及 R68 的胶筒适应于 70×980kPa 的中压注水，而 R88 胶筒可适应

于高压注水。

4) 弹簧压缩量的确定。弹簧的压缩量决定于注水压力，因此，必须按需要的注水压力确定弹簧的预定压缩量。封孔器的水压应大于最低有效水压值，以保证封严不漏水，但不能选择过高的压力值，这是因为封孔器内水压越高，水通过球形阀的压力损失越大，既不经济，又降低了注水效果。

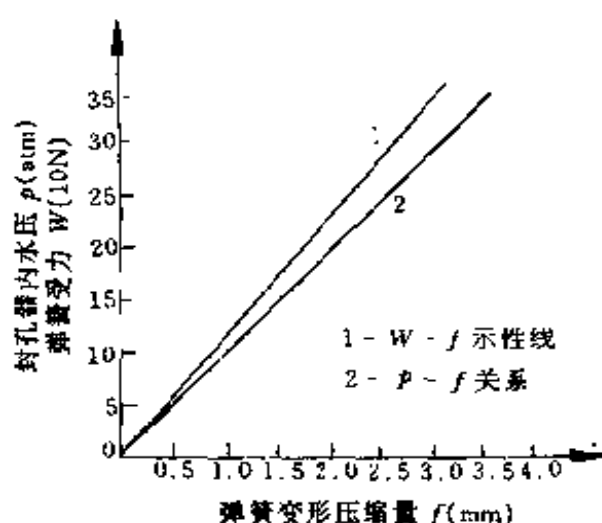


图 4-14 注水压力与弹簧
预定压缩量的关系

在选取弹簧压缩量时，首先根据选用的胶种及钻孔实际尺寸，在图 4-13 中查出最低有效压力值；然后按此值或稍大于此值在图 4-14 中查得应有的弹簧预定压缩值。调节弹簧的压缩值是由调压螺母来完成的。

3. ZYY-501 型封孔器 器的使用

我国部分矿井实际使用表明，用这种封孔器可以把封孔深度加大到 10m 以上，且操作比其它封孔方法简便可靠。用 ZYY-501 型封孔器深封孔，应先清除孔内的煤屑，将钻杆或输水管与封孔器的下接头相连，再使其送入注水孔所需要的深度，然后开泵向水管或钻杆供高压水，即可封孔注水。注水完毕停泵后，封孔器靠胶筒弹性卸压恢复原状，同时单向球形阀闭合，使孔内压力高于孔外，压力差使封孔器退出。为避免封孔器卸压时在孔内水压下冲出孔外，应增加安全设施。

(四) 水力膨胀式自动封孔器封孔

水力膨胀式自动封孔器是以水压为动力，使胶筒作径向的膨胀而封住孔口。图 4—15 是阳泉矿使用的膨胀式自动封孔器。

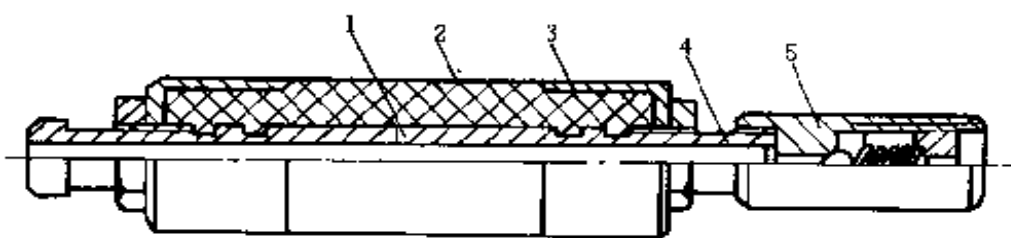


图 4—15 水力膨胀式自动封孔器

1—孔眼；2—胶筒；3—端帽；4 芯管；5—逆止阀

封孔器前端装有定压逆止阀 5，水进入封孔器的芯管 4 后，在水压未超过逆止阀的预定弹簧压力（ $10\sim 15\times 980\text{Pa}$ ）时，通过芯管的孔眼 1 进入胶皮筒 2，使其膨胀变形密封钻孔；待胶筒封住孔口后，水压上升，当超过逆止阀预定弹簧压力时，便打开逆止阀向钻孔供水。胶筒采用硬度为 68 的合成胶夹尼龙层制成。封孔器由无缝钢管送至孔内所需封孔位置，由高压泵供水。注水时，如孔径和胶筒直径相差较大，在膨胀时易于被水压击穿。在较软的煤层中封孔时，可预先在孔壁上涂一层稠的水泥浆，以提高孔壁强度和密封性能。

四、注水方法与注水施工

(一) 注水方法

1. 低压注水

采用小于 $25\times 980\text{kPa}$ 的注水压力进行注水，有以下几种供水方式：

(1) 管网静压注水。利用地面或上一水平的水源至注水地点的高差所形成的静水压力，通过矿井固定防尘管路将水注入孔内。根据各矿自然条件的不同，实际可利用的静水压力由 $(2\sim3\times 980\text{Pa})$ 至 $(20\sim25\times 980\text{Pa})$ 之间。在深度很大的矿井，如果要充分利用较高的静水压力，矿井供水管必须采用无缝钢管，有时还要采取降压措施，以便于管路维护。在多水平生产矿井，可以利用上一水平水流向下水平管网供水。在一般情况下，管网静压注水均为低压注水。图 4—16 表示一般静压注水的系统布置。部分矿井的静压注水实际注水压力见表 4—2。

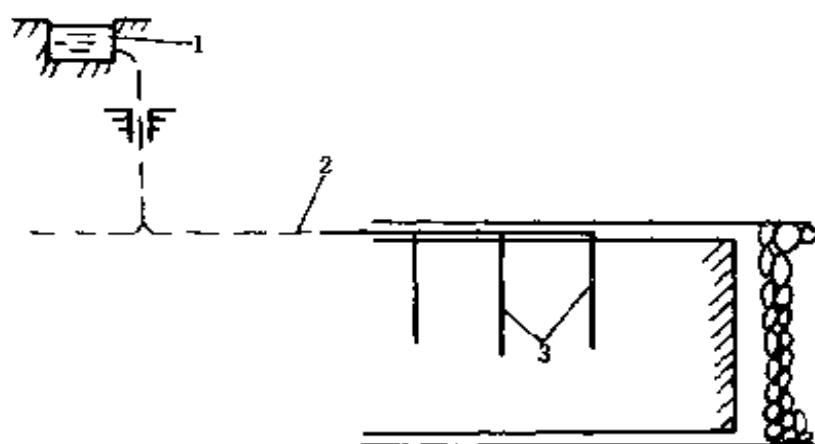


图 4—16 管网静压注水系统

1 水池；2—管网；3—注水钻孔

管网静压注水具有许多优点，它充分利用了自然条件，不用加压设备，节约注水电耗和注水施工人员，可连续长时间注水，能实现缓慢的毛细渗透，取得良好的湿润效果。由于注水工艺简单，管理方便，效果好，使注水三防工作易于推

表 4-2 部分矿井管网静压注水的压力

矿 名	实际利用的静水压力 (atm)
龙凤矿	10~20
石炭井各矿	2~12
潘西矿	15~22
同家梁矿	1.2~8.5
六亩地矿	20

广，故在技术、经济、管理上均是合理的。

(2) 泵站集中加压注水。在开采深度较小、静水压力不能满足注水需要时，可采用在地面（或矿井的上一水平）设水源泵站对井下管网集中加压，提高整个管网的水压，实现正常注水。它仍然具有管理集中、占用设备少的优点，一个泵站可以满足若干个工作面管网注水的需要。一般用于低压或中压注水。在实际应用中，泵站也可以对井下某一水平的专用注水管网集中加压注水。泵站对井下注水专用管网集中加压注水布置图如图 4-17 所示。

(3) 低压水泵注水。当管网压力不足的情况下，可在注水地点设注水专用泵加压注水。注水泵可根据需要和可能采

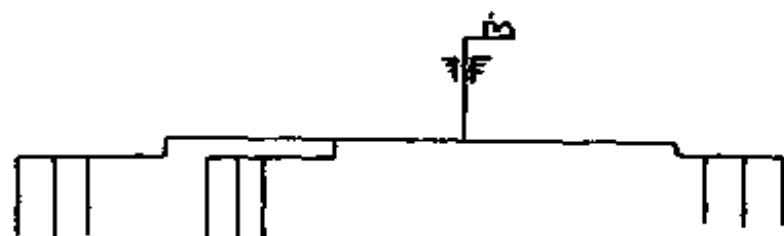


图 4-17 泵站对井下注水专用管网集中加压注水
(石炭井三矿)

用各种低流量高扬程的往复或离心泵，也可选用国内外注水专用泵。

低压注水泵可用多种水泵代用，设备来源广泛，在注水地点移设灵活方便，压力可调范围大，对煤层注水压力的适应性较强，能够加快注水速度。注水泵注水可在水中添加湿润剂、防火阻化剂或有毒气体的吸收剂等，用于预防各种自然灾害。

水泵注水一般需设专人司泵，每天注水 2~3 小班。泥浆泵注水及离心泵注水系统布置形式如图 4—18 所示。

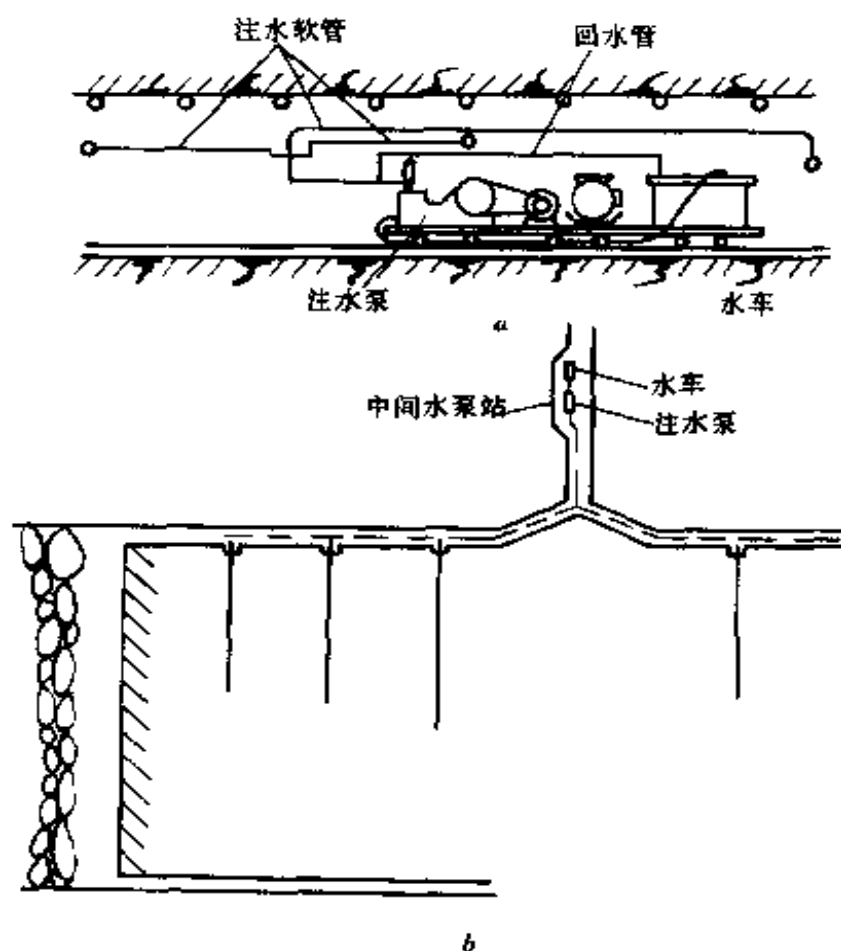


图 4—18 低压水泵注水系统布置

a—石炭井各矿泥浆泵注水系统 *b*—本溪彩屯矿离心泵注水系统

(4) 压风注水。这种注水是将压风送入密闭的水箱中，使水通过注水管压入钻孔之中。水压一般可达到 ($3.5 \sim 4 \times 980\text{Pa}$)。在透水性好的煤层中可采用此方法注水。

2. 中、高压注水

当注水压力超过 $25 \times 980\text{Pa}$ 时，一般均用高压水泵注水。我国各注水矿井选用的主要有：注水专用柱塞泵、水压机械供水泵、油压泵以及其它进口泵等，具体型号及性能见本章第四节。

中、高压注水系统一般的布置方式是：井下水管将水送至储水桶或储水矿车内，水经高压泵吸水管进入泵内，加压后的高压水经高压胶管送至注水孔内。为测定压力及流量，在高压泵出水端安装高压水表及高压流量计。高压注水系统布置如图 4-19 所示。在中、高压注水时，使用低压流量计安装在水泵的吸水管上，也可以测定水泵的注水流量。

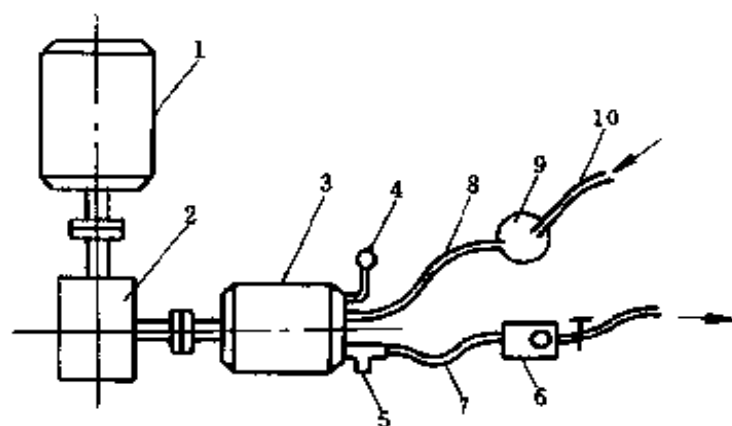


图 4-19 中、高压注水系统

- 1—电机；2—减速器；3—高压泵；4—压力表；
5—安全阀；6 高压水表；7—铠装高压胶管；8—普通胶管；
9—水桶或水车；10—井下供水管网

(二) 注水施工

注水施工主要是指在注水过程中对压力和流量调节，以便提高注水效果。

1. 注水压力和流量的调节方法

由于煤层的透水性和泄水的可能性不同，为了要取得较好的注水效果，对注水压力和流量必须进行合理的调节，以实现正常注水。

管网静压注水的调节主要是依靠阀门的节流来实现的，易于掌握，调节幅度较大。当采用注水泵注水时，其调节方法有以下几种：

1) 增减同时注水的孔数。当注水泵的排水量大于单孔的吸水量时，为了避免泵压过高或“憋泵”现象，最简便的方法是并联多孔同时注水。这种方法是在泵的出水管上接一个分水器，由分水器分别供给各钻孔进行同时注水；或将出水管接在一根主管上，各孔可分别用短胶管和主管连接注水，如图4-20所示。并联的孔数根据泵的排水量和钻孔正常注水量确定，各钻孔流量之和即为泵的总排量。

在多孔并联注水时，因各钻孔至水泵出口处的距离差别

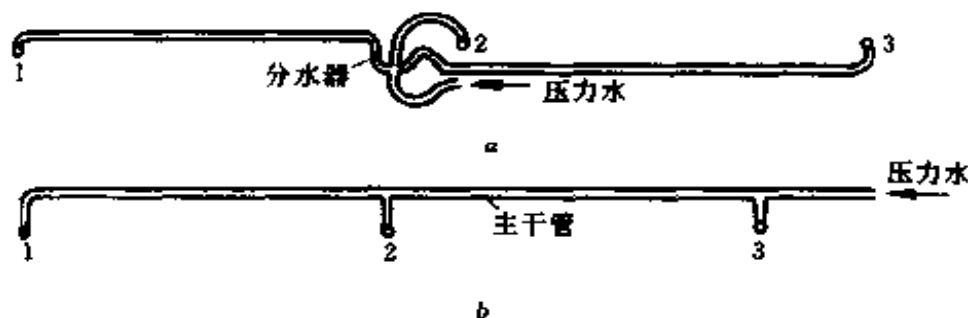


图4-20 多孔并联注水

a—分水器连接注水；b—主管连接注水；

1、2、3—注水孔

较大，故使各钻孔注水压力也有差别，造成各钻孔注入水量不均。在高压注水中，多孔并联注水必须维护和使用较长的高压水管，使操作复杂化。因此一般多在低压或中压注水时采用此法。在并联同时注水的各钻孔中，如果其中某一钻孔发生泄水，则将对其它各钻孔产生很大的影响，降低这一组钻孔的整个湿润效果。因此在多孔并联注水时，必须加强观测，如发现某一钻孔注水流量急剧增大，应及时停止这一钻孔的注水，以保证其它钻孔注水的正常进行。如果采用自动控制流量的分水器对各孔注水量实行自动控制，则多并联注水还可以扩大其适用范围。

目前，我国一些矿并在静压注水、低压或中压水泵注水中，同时并联注水的钻孔数一般不超过 5 个。低压注水中孔数稍多，而中压注水为 2~3 个。为使并联各孔注水量趋于均匀，注水中可逐孔向前推移，如第一次同时注 1、2、3 号孔，第二次则同时注 2、3、4 号孔，依此类推向前注水。

2) 泵体外部回水调节压力流量。当注水泵压力和排水量高于注水的实际需要时，可使水泵的部分排水量从泵体外部回水管返回水源，以调节泵和钻孔的压力流量平衡。调节方法可用调压阀调节和安全阀调节。

(1) 调压阀调节泵的压力和排量。在泵的出水口处安装三通，使出水管分别连接到注水管和回水管上，在回水管上安装调压阀门，用以调节注水管的压力和流量。在调压阀前高压侧安装压力表观测供水压力的变化，在调压阀门的低压侧安装水表观测回水量，回水管将水导至水源。有些泥浆泵在出口处原装有三通阀门，调整阀门即可调整供水量和压力。图 4-21 为调压阀与回水管安装示意图。

目前采用调压阀调节比较普遍，它具有简便灵活、操作

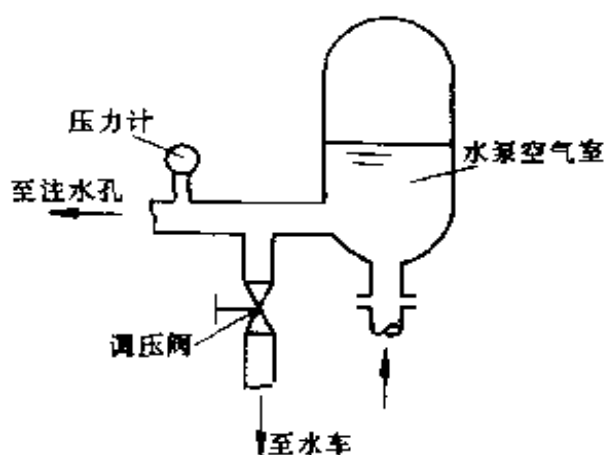


图 4-21 调压阀与回水管的安装使用

容易、调节幅度大等优点，使水泵可以适应各种注水的要求，在低、中压注水中均可使用。

(2) 用水泵的安全阀调节。往复式水泵均有安全阀装置，它可以在泵压超过额定压力时自动打开阀门卸压，以保护泵体不受损坏。如

果调节安全阀的开启压力，则可以调整泵的工作压力，使泵压始终在调整额定工作压力下运转。采用安全阀调节是在给定的压力下注水，只有泵压超过给定压力时，才开始回水，减少供水量，保证注水压力不超过给定的压力。调节安全阀的开启压力应根据煤层渗水性决定，通过试验获取合理数值。

3) 改变水泵转速调整流量。当水泵排水量大于煤层钻孔的吸水量时，可以用降低水泵转速，减少往复泵活塞的频率来达到调节排水量的目的。降低水泵转数可以采用改换变速装置的方法实现，使水泵在原有压力下减少排水量，以适应注水的需要。

2. 确定合理的注水超前时间

煤层注水施工应当有足够的超前于回采的时间，以便注水能顺利进行。当注水结束，还应当有一定时间让进入裂隙的水继续在毛细作用下均匀渗入到更细小的孔隙中去，以提高湿润的均匀性。

在管网静压注水时，因多孔并联长时注水，可以获得更多的超前时间，一般为超前 1~3 个月。在水泵注水时，采掘

关系将成为超前时间的主要影响因素，在一般情况下，只要风巷掘出，即可安排打下向孔开始注水。

第四节 煤层注水设备

煤层注水所用的设备主要有钻机和水泵。

一、钻机

钻机是打注水孔的主要设备。适合于井下使用的注水孔钻进机械有红旗—150型探水钻、TXU—75型油压钻和各种类型的架式自动推进岩石电钻等。

1) 红旗—150型探水钻。这种钻是用于井下探放水的小型钻机，在抽放瓦斯、小型钻探及煤层注水等施工中均可使用。钻机结构简单，移设方便，其技术特征见表4—3。

表4—3 红旗—150型钻机技术特征表

部分	项目	单位	参数
基本规格	钻进深度	m	150
	开孔直径	mm	66
	终孔直径	mm	46
	钻杆直径	mm	42
	立轴孔径	mm	44
	立轴行程	mm	380
	立轴转速	r/min	85
	钻孔角度	(°)	-90°~+30°
升降机	提升能力	kg	750
	卷筒直径	mm	125
	提升速度	m/s	0.27
	钢丝绳直径	mm	12
	卷筒绕绳量	m	20

续表

部分	项目	单位	参数
配套水泵	型 式		卧式单缸双作用
	最大排水量	L/min	60
	最大压力	$9.8 \times 10^4 \text{ Pa}$	15
	缸套内径	mm	75
	往复次数	次/min	95
钻机总重量		kg	731
配套电动机		kW	BJO ₂ 52—6 型, 7.5kW, 960r/min
外形尺寸		mm	1600×900×1250
参考价格		元	6332
生产厂			鸡西煤矿工具厂

2)TXU—75 型油压钻机。该钻机主要用于钻探各种角度的探放水孔、地质构造孔, 灭火孔、瓦斯抽放孔和煤层注水孔。钻机由两部分组成, 即 TXU—75 型钻机和 TBW—50/15 型泥浆泵。体积小、重量轻、使用可靠、操作简便, 在井下移设方便, 使用灵活, 技术特征见表 4—4。

型号意义:

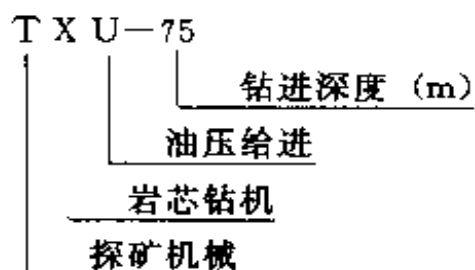


表 4-4 TXU-75 型钻机技术特征表

部分	项目	单位	参 数
基本规格	钻进深度	m	75
	开孔直径	mm	89
	终孔直径	mm	>50
	钻杆直径	mm	42
	钻孔倾斜度	(°)	0~360
回转器	立轴转数	r/min	112, 192, 340
	立轴内孔直径	mm	44
液压系统	给进行程	mm	400
	给进油缸压力	$\times 9.8\text{N}$	800
	齿轮油泵型号		YBC-12/80
	给进油缸数量	个	2
升降机	最大提升能力	$\times 9.8\text{N}$	750
	提升速度	m/s	0.22, 0.37, 0.67
	卷筒直径	mm	110
	使用钢丝绳直径	mm	8.8
	卷筒卷绕长度	m	27
	钻机重量	kg	515
	外形尺寸	mm	1150 \times 600 \times 1080
	配套电机	kW	BJO ₂ 41-4 型、4kW1500r/min
	参考价格	元	6500
	生产厂		石家庄煤矿机械厂、鸡西煤矿学校工厂

3) 架式自动推进岩石电钻。原设计用于岩石钻孔的回转式湿式凿岩钻机, 可钻硬度为 10 的岩石, 具有防爆性能, 可用于瓦斯和煤尘爆炸危险矿井。电钻在推进架上以链条或钢丝绳自动推进。在煤层注水施工中, 可俯斜沿煤层钻孔 70~100m。井下使用的防爆岩石电钻有 EZ-20 和 YZ-2S 两种型号, 技术性能见表 4-5。

表 4-5 岩石电钻技术特征表

项 目	单 位	型 号	
		EZ-2.0	YZ-2S
重 量	kg	45	35
功 率	kW	2.0	2.0
额定电压	V	127/380	380
电机转数	r/min	2790	2820
电钻转数	r/min	240/360	240/380
推进速度	mm/min	单绳 384/576 双绳 192/288	264/468
最大推力	×9.8N	700	700
冷却方式		风 冷	水 冷
供水方式		侧 式	侧 式
推进方式		钢 绳	链 条
防爆性能		防 爆	防 爆
钻头直径	mm	36~45	35~45
适用范围		$f \leq 10$	$f \leq 10$
外形尺寸		662×410×260	645×300×260
(长×宽×高)	mm		
主要制造厂		抚顺煤矿电机厂	天津煤矿专用设备厂

二、注水泵

煤层注水泵大多属于高压力、低流量的往复泵类型。国内各矿区所用的注水泵多为地质钻机的配套泥浆泵或水压机上的高压泵等。常见的注水泵有以下几种：

1) 5D-2/150 型煤层注水泵。该泵是我国煤层注水专用设备，体积小、重量轻、移动方便、工作可靠。其压力和流量适合煤层注水要求，性能稳定、结构简单、易于维修，泵的温升高，声响大，适于煤矿井下使用。该泵为五缸柱塞泵，柱塞借助于和主轴相连的摆动盘与回程盘的摆动而实现往复

运动，达到吸、排水的目的。每小时流量为 2m^3 ，工作压力可达到 $150 \times 980\text{Pa}$ 。其技术特征见表 4—6。

表 4—6 5D—2/150 型煤层注水泵技术特征

部分	项 目	单位	参 数	备 注
泵头部分	压 力	MPa	15.0	
	流 量	m^3/h	2	
	柱塞直径	mm	25	
	缸 数	个	5	
	行 程	mm	15.4	
	往复次数	次/min	960	
	吸水管直径	m	$0.032 \left(1 \frac{1}{4} \text{in} \right)$	
动力部分	排水管直径	m	$0.019 \left(\frac{3}{4} \text{in} \right)$	
	电机型号		BJO ₂ —62—6KB	
	电机转数	r/min	960	
	电机功率	kW	13	
冷却润滑	传动系统冷却		螺旋管水冷	
	传动系统润滑		30 号工业机油浸浴	
	外形尺寸 (直径×长度)	mm	250×510	
	泵的重量	kg	110	不包括电机与底座

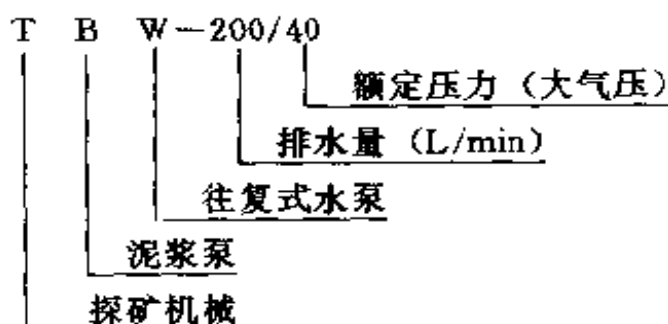
2) TBW 型地质钻机配套泥浆泵。该类型泵原设计供地质钻机配套使用，煤矿可用于进行煤层注水。最大的可供使用的注水压力为 $40 \times 980\text{Pa}$ ，超过该压力值的钻机配套泵由于体积大不便于入井使用。其技术特征见表 4—7。

3) 水压机械泵类。水压机械所配套的高压泵可作为矿井中、高压煤层注水设备。3DS—1.8/200 型往复水泵为各类水

表 4-7 TBW 型泥浆泵技术特征表

项 目	TBW-250 /40	TBW-200 /40	TBW-50 /15	BW-250 /50
	卧式双缸 双作用	卧式双缸 双作用	立式双缸 单作用	卧式三缸 单作用
排水量(L/min)	250	200	50	一档 250 二档 60
最大压力(MPa)	4.0	4.0	1.6	一档 25 二档 50
缸套内径(mm)	90	85	60	85
活塞往复次数(次/min)	70	81	190	一档 200 二档 130
行 程(mm)	150	140	50	85
吸水管径(mm)	89	76	27	63.5
排水管径(mm)	52		23	38
电机功率(kW)	32	25	3	20
电机转速(r/min)	1470		1000	
应带轮直径(mm)	608	600	400	485
皮带轮转速(r/min)	420	300	190	450
外形尺寸(mm)	2170×820 ×1770	1670×890 ×1600	1050×353 ×645	1100×810 ×690
重 量(kg)	1120	680	192	400
生产厂地	石家庄、 兰州、郑州	镇江	石家庄、 宝鸡	郑州

型号意义:



压机械供水用泵，常温下可输送各种无腐蚀性液体（清水、油或乳化液等），国内许多矿井注水均使用此泵。其技术特征见表 4—8。

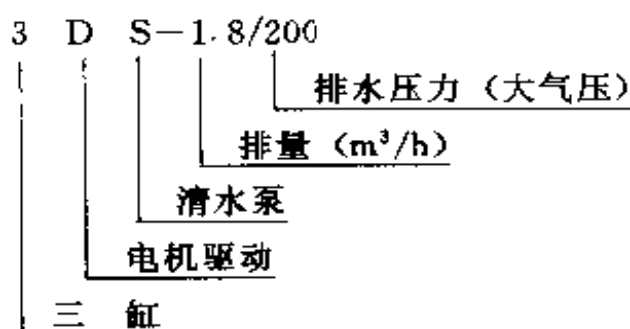
此泵压力、流量均能满足注水要求，但泵与电机安装后，在井下占用面积大，移设不方便。

4) 其它泵类。除上述几种主要的泵类外，还有农用三联泵（流量为 $5\text{m}^3/\text{h}$ ，压力为 $20 \times 980\text{Pa}$ ）、3D—5/40 型清水往复泵（三缸单作用泵、压力 $40 \times 980\text{Pa}$ ，流量为 $5\text{m}^3/\text{h}$ ）、 $1\frac{1}{2}\text{GC}$ 型锅炉用泵（流量为 $6\text{m}^3/\text{h}$ ，扬程为 $180 \sim 300\text{m}$ ）等水泵均可用于低压注水；3DT—1/150 型水泵（压力为 $150 \times 980\text{Pa}$ ，流量为 $1\text{m}^3/\text{h}$ ）及一些油泵可试用于中、高压注水。

表 4—8 3DS—1.8/200 水泵技术特征表

项 目	参 数
流 量 (m^3/h)	1.8
排水压力 (大气压)	200
往复次数 (次/min)	720
缸 数 (个)	3
泵吸入口径 (mm)	40
泵排出口径 (mm)	20
外 形 (mm)	$935 \times 670 \times 590$
泵重量 (kg)	440
电 机 (kW)	JO ₂ —72—8 17kW
生产厂家	

型号意义:



第五节 煤层注水施工管理

一、施工前的准备

1) 建立专业施工队伍。注水专业队伍以矿井煤层注水为本职工作, 负责本矿井注水的钻孔、封孔、注水、效果检查、设备检修及管线敷设等工作, 同时记录整理各工作面注水的原始测定数据, 积累资料。注水专业队伍通常设在通风区队内, 人数可根据矿井注水工作面个数予以确定。当采用长钻孔注水时, 如全矿采煤工作面总个数不超过 8 个, 则注水专业班组一般在 10~15 人即可。

2) 准备必要的注水装备和设施。为施工正常进行, 地面应有永久水源池或水源泵, 井下防尘管网系统要求健全。要备有一定数量的小型钻机、小型水泵及注水用泵和注水设备, 以便检修。

3) 创造提前施工条件。采煤工作面的上、下巷道至少在开采前 1 个月左右竣工, 形成通风系统, 为提前打眼、超前注水创造条件。

4) 用下行孔注水时,当风巷竣工后,要保持风巷中轨道、电缆、水管等设施完整,以便为立即进行打钻注水施工创造条件。

5) 在厚煤层分层开采确定各分层采高时,应考虑预湿煤体的需要,不要把夹石层设计在各分层的上半部,以避免夹矸层阻隔水的渗透,降低预湿效果。

二、施工管理

注水施工管理主要抓以下三个环节:

1) 按注水接续计划施工。根据全矿年度采煤工作面的接续计划相应地制订全矿年度注水接续计划,安排各工作面打眼、封孔、注水等作业时间及顺序,按照计划确定注水专业班组的全年工作内容及进度。

2) 进行注水情况及其效果的巡回检查。在静压注水的矿井里,注水专业班组应有专人对全矿各注水工作面逐日进行巡回检查,及时处理静压注水中的问题,记录注水数据,及时观察各工作面的注水效果,负责收集对注水工作的意见。

3) 建立注水台帐、牌板和定期报表。在通风区队应建立各种台帐(表4—9)和牌板、反映各工作面的注水钻孔的几何参数、注水压力、注水时间、注水流量、注入水量,记录各钻孔的施工状况、封孔质量、地质状况及泄水现象,记载历次质量检查情况。牌板和台帐由注水专业班组负责填写和管理。

通风区队应定期(旬报或月报)将全矿各工作面注水进展情况填写注水专业报表,报送矿总工程师和矿务局主管部门审阅备查。

表 4-9 煤层注水施工台帐

采煤工作面名称		工作面斜长(m)			工作面走向长(m)		采高(m)		倾角(°)			
注水孔号	孔长(m)	间距(m)	封孔方式	封深(m)	钻孔封孔起止日期(月、日)	注水起止日期(月、日)	注水方式	总注水时数(h)	累计注水量(m³)	最大与最小注水压力(大气压)	最大与最小注水流量(L/h·m)	施工问题及注水后防尘效果

填写人:

三、应执行的几项制度

1) 将煤层注水预湿煤体列入矿井通风管理制度,以保证长期推行。各矿井在制定部颁布的《煤矿安全规程》的实施细则时,可根据本矿的实际需要,将注水纳入防尘等制度的有关章节内容之中,使之成为必行的防尘等措施。

2) 制定注水专业班组的工种岗位责任制,明确专业班组及各个岗位的职责。

3) 制定煤层注水各工序的操作规程,保证施工质量及施工中的安全。

4) 制定煤层注水的质量标准。为保证注水的质量,应根据本矿具体情况因地制宜地制定注水的质量标准。在质量标准的检查项目中,应包括注水孔的长度间距要求,封孔深度及质量要求,每孔注水量或吨煤平均注入水量的最低要求,工作面全长湿润带的分布要求等内容。各项目均应规定具体数据要求及检查评分办法,按主要项目及一般项目逐项检查评定注水工作面的质量等级。不合格的注水工作面不应算作注水工作面的个数,必要时应进行返工补注。

注水质量标准可以单独制定,也可纳入部颁布的《矿井通风质量标准》等中有关项目具体规定之,按月、季进行检查评定。

第五章 煤层注水效果分析

第一节 水在煤层中的运动规律

一、水在煤层内运动的动力

煤层是以极为发育的裂隙、孔隙为主的多孔介质，为此在这一节中我们引用地下水动力学和分子物理学等基本定律陈述水在煤层裂隙、孔隙中的运动规律。

水在煤层裂隙、孔隙中运动的动力有两种，一种是孔口的注水压力，是外在动力；另一种是煤层中裂隙、孔隙对水的毛细作用力，是内在动力，两种动力之和即为注水的动力。在瓦斯压力较大的煤层中，瓦斯压力阻止水的运动，是不可忽略的注水阻力。因此，煤层注水时水的运动动力实际上是孔口施加的注水压力、煤层孔隙的毛细作用力和煤层瓦斯压力的代数和。对于某一煤层孔隙而言，作用于孔隙两端的总压力差为：

$$\Delta h = P_z + P_m - P_w \quad (5-1)$$

式中 Δh ——作用于煤层孔隙的总压力差，kPa；

P_z ——注水压力造成的孔隙两端的压力差，kPa；

P_m ——孔隙的毛细作用力，kPa；

P_w ——孔隙内的瓦斯压力，kPa。

上式中注水压力决定于水泵或管网的压力，瓦斯压力决

定于瓦斯赋存情况，而煤层孔隙的毛细作用力则决定于孔隙的直径、水的表面张力、水对煤的湿润边角。若把孔隙看作为圆形微管，根据分子物理学，毛细作用力为：

$$P_m = 4.08\sigma \cdot \cos\theta d^{-1} \quad (5-2)$$

式中 P_m ——孔隙毛细作用力，kPa；

σ ——水的表面张力系数；

θ ——水对煤的湿润边角，(°)；

d ——孔隙直径，cm。

水的表面张力系数数值上等于沿着水表面作用在单位长度上的力或是增加单位的水表面积所需作的功。表面张力系数因液体的种类和温度的变化而不同（表 5—1）。

表 5—1 液体表面张力系数及粘度系数

液 体	温 度 (°C)	表面张力系数 σ (Pa)	粘度系数 μ ($\times 10^{-3}$ Pa·s)
水	0	7.564	1.792
水	20	7.275	1.005
肥皂溶液	20	4.0	
酒 精	20	2.0	

注：1厘泊 = 10^{-2} 泊 = 10^{-2} 达因·秒/厘米² = 1.02×10^{-4} 公斤·秒/米²

二、水在煤层中运动的状态

煤层注水湿润过程实际是典型的非饱和到饱和的渗流过程，以非饱和状态为主要，是压力渗流、毛细和扩散三种运动共同作用结果，但起的作用不同，其作用结果都有利于渗透的倾向。在细微孔裂隙中毛细扩散速度一般较慢，主要表现为横向运动上。注水压力对注水运动及湿润状态起决定性

作用。

一般认为，水在煤体中渗流最先沿着煤体较大的原生连通裂隙通道流动，处于封闭或压紧闭合状态的层理节理裂隙和孔隙随着注水压力增高或注水时间的延长，在注水动力和毛细作用力的作用下，不断开裂且互相沟通，形成随时间不断扩展的渗流通道，使这些裂隙孔隙趋向饱和状态，从而扩大煤体的湿润程度。注入煤体内的水的压力在煤体中很快衰减，相应对煤体的湿润作用也显著降低。实际测定，钻孔周围的煤体水分增值较高，一般煤体可达4%~7%以上，可近似认为是趋于饱和状态。其余煤体注水区域水分增值在1%~2%以下，呈非饱和状态，水分增饱的分布距注水钻孔其变化大致呈反比例减少。因此，在煤体注水湿润过程中，沿径向大致形成相对饱和区（钻孔周围）、非饱和区及非湿润区，如图5-1所示。其中非饱和带占煤体注水范围的绝大部分。

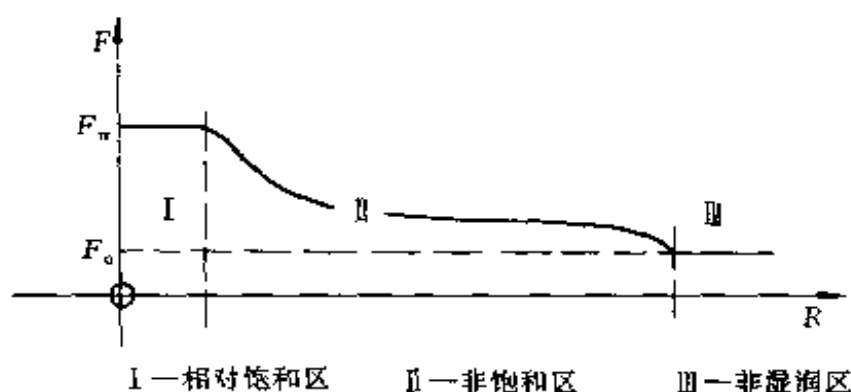


图 5-1 煤体湿润区带

注水过程中，水不断改变煤体自身的物理力学结构和性质，即水从大裂隙通道中不断压裂贯通封闭状态的孔隙进入煤体，直至渗入细微孔隙中，注水的这一扩大渗流通道提高

湿润程度的过程是煤体介质所特有的一种形式，其原理十分复杂。为便于研究，将压力注水的湿润过程大致分为三个过程：

1) 进水过程：压力水初始沿煤体原生连通裂隙通道（一般指空隙大于 10^{-8}m 的裂隙）进入煤体，是一个克服煤体内部阻力（如沼气压力、层流阻力等）的过程。处于原始状态的煤层，原生裂隙通道只占全部裂隙的极少部分，连通的通道更少。因此，初始注水时，煤层出现明显的不进水现象，注水存在一个临界压力值 PL 。

2) 贮水过程：进水的煤体随着注水压力的增高，煤体裂隙系统通道网在水的压力作用下，逐渐扩大丰富，压力水不断进入煤体，并在通道孔裂隙中形成滞留的过程，这是注水渗流湿润的主要过程，煤体最终达到均匀湿润所吸收的就是这部分水。可以认为，煤体大孔隙通道中的贮水即为煤体最终湿润所需要水分的主要部分。随着进水程度增大，煤层水分趋于饱和，进水程度大大减弱。据此，煤层的贮水过程包括两个阶段，即为非弹性贮水和弹性贮水阶段。

3) 吸附水过程：在水沿渗流系统通道流动的同时，各类细微孔裂隙（孔隙直径小于 10^{-8}m ）以较低的流速吸附渗流通道的水，形成吸附水过程，这一过程主要为毛细孔隙的作用。在细微孔隙中，注水压力在这些孔道中已消耗尽，毛细作用力相应增大。据测定，湿润边角为 65° 的煤体中，其各类毛细作用力达到 $2.2\sim 21\text{Pa}$ ，毛细速度在细微孔隙（ $10^{-9}\sim 10^{-8}\text{m}$ ）比半微孔隙（ $10^{-7}\sim 10^{-6}\text{m}$ ）约小 1700 倍，对通道水形成缓慢的吸附作用。原苏联矿业研究所的研究表明，所吸附的这部分水一般不能参与渗流和扩散（即束缚水），它相当于对裂隙通道水分的蒸发。可见吸附过程以时间影响为主要因素，

时间越长，吸附作用的影响越突出，吸附的水量越大。因此，对时间比较短（一般在十几小时至几天）的中、高压注水可以忽略这一过程。但是，对于注水时间长达十几天至几十天的低压注水必须加以考虑。所以，吸附作用是进一步改变煤体物理力学性质的又一个重要过程，是对注水效果影响较大的过程。强大的毛细作用力也是扩充和压裂闭合裂隙的主要作用因素之一。

煤层压力注水的全部过程一方面是扩充渗透通道空间及其广度，形成输水和贮水空间，把水输送到煤体内各处；另一方面靠煤体细微孔隙的毛细作用逐渐吸附这些水分，构成补给——湿润吸附的过程。显然贮水过程是压力注水的主要物理过程。

第二节 煤层注水湿润状态的数值模拟分析

煤层湿润状态是衡量注水效果的关键指标，是调整注水工艺参数的重要依据。目前，研究煤层注水湿润分布状态一种是采用工作面取样测定水分增值的分析方法；另一种是用计算机数值模拟分析方法，在这一节我们介绍用计算机数值模拟分析方法描述煤层压力注水的湿润分布状态。

一、煤层注水湿润分布状态的数学模型

煤层是一种极为发育的裂隙——孔隙的多孔介质。向煤层压力注水时，水在孔隙中即有压力层水流渗透运动，又有毛细运动和扩散运动，三种运动起主导作用的是压力水渗流运动。其注水煤层的湿润过程是由于干燥到进水湿润的过程，是

非饱和——饱和的渗流过程。实验研究表明，无论是饱和域，还是非饱和域，水的流动均要满足质量和能量守恒原理，其渗流过程符合达西定律。为便于描述注水过程和处理边界条件，将饱和域与非饱和域统筹考虑，建立统一的饱和——非饱和流动连续方程。

为建立满足上述注水过程的数学模型，假设：

1) 煤体是一种由发育裂隙孔隙构成的多孔介质，宏观上是均质的，水在煤体中的流动基本符合达西定律。

2) 煤体渗透能力是各向异性的，渗透主方向一般分别垂直和平行于煤层层面。

3) 钻孔长度远大于沿径向渗透范围，忽略水沿钻孔长度方向的分速度，在垂直于钻孔的各截面上煤体渗透特征和渗流规律是等效的。

4) 忽略水的重力影响和煤层倾角对注水渗流的影响。

5) 在注水过程中，水本身是不可压缩的，除必要的分析中涉及的密度存在变化外，水的密度作恒定不变的常数。

根据上述假设，沿钻孔取单位长度段作研究对象，可将其近似为二维对称性问题，则非饱和——饱和二维非稳定流的连续方程为：

$$T_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + T_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = \left(\frac{\theta}{n} S_s + C \right) \frac{\partial H}{\partial t} + W \quad (5-3)$$

式中 H ——煤层含水的压力水头；

T_x, T_y ——沿 x 轴、 y 轴主渗方向的导水渗透系数；

W ——源汇项，用以处理煤体毛细孔隙对水的吸收量的补充项；

n ——煤体有效孔隙度；

θ ——体积含水率，孔隙度中含水的百分比；

S_s ——饱和状态下贮水系数, $S_s = \rho_g (\alpha + \beta_n)$;

α ——煤体骨架的弹性压缩系数;

β_n ——水的弹性压缩系数;

C ——含水率相对于压力水头的变化率, $C = \frac{\partial \theta}{\partial H}$ 。

(5-3) 式是根据质量守恒和达西定律导出的连续方程, 是以压力水头为变量的水运移的基本微分方程。对于理想的饱和——非饱和渗流系统, 式中的 T_x 、 T_y 、 θ 、 C 均为未知压力水头 H 的函数, 因此 (5-3) 式是非弹性的。由于在湿润过程中存在滞后作用, 实际中 C 是多值函数, 注水过程是由干燥到进水湿润过程, 含水量逐渐增大, 因而是单向的吸吮过程。实际上对于煤体注水, 除钻孔附近外, 大部分渗流区域是非饱和状态, 呈非弹性贮水, 且煤体由非饱和到饱和湿润其贮水的弹性与非弹性的转化过程是连续的。

煤层注水对称二维水的运移定解数学模型:

$$T_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + T_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = S \frac{\partial H}{\partial t} + W \quad (x, y) \in D \quad (5-4)$$

$$\begin{cases} H = H_p & (x, y) \in L_1 \\ T_x \frac{\partial H}{\partial x} + T_y \frac{\partial H}{\partial y} = -q & (x, y) \in L_2 \\ H_{t=0} = H_0 & (x, y) \in D \end{cases}$$

其中

$$S = S_n \frac{\theta}{n} + \frac{\partial \theta}{\partial H};$$

L ——包围 D 区域的边界, $L = L_1 + L_2$;

L_1 ——第一类边界;

L_2 ——第二类边界。

二、数学模型的求解

(一) 计算区域及边界条件的确定

取垂直钻孔单位厚度的煤体作研究对象，每个钻孔注水的渗流区域一般包括煤层、顶板和底板岩石部分。由于对称性，计算区域只考虑注水区域本部分，如图 5-2 所示。对称中心线上采用对称边界条件形式，即沿 x 轴， y 轴确定边界为隔水边界（流量为 0）。

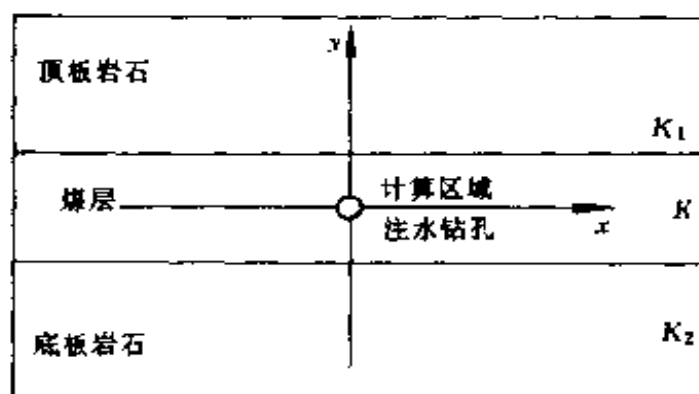


图 5-2 钻孔口的注水区域

钻孔边界为计算边界，为第一类边界（等压注水）或第二类边界（等流量注水）。外沿边界是动态边界，随着注水面不断扩大，采用无穷远边界，即在注水波及范围之外的钻孔无穷远处”设隔水边界第一类边界，相对压力水头为 0（设该处流量为 0）。部分采用轴向对称径向扩散三角网格形式，为三节点三角形单元。

(二) 伽辽金有限元数值解法

在注水计算区域 D 中试探解为：

$$H = \sum_{i=1}^n H_i(t) \Phi_i(x, y)$$

限定 H 必须满足边界条件, 其中 $\Phi_i(x, y)$ 为基函数组, 具有

$$\Phi_i(x_i, y_i) = \begin{cases} 1 & \text{当节点 } j=i \\ 0 & \text{当节点 } j \neq i \end{cases}$$

其中 $H_i(t)$ 为 t 时刻节点 i 上的压力水头值。令

$$L[H] = T_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + T_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} - S \frac{\partial H}{\partial t} - W = 0 \quad (5-5)$$

按伽辽金积分表达式, 对于固定的 t , $H_i(t)$ 可由下列方程组解出:

$$\begin{cases} \iint_{(D)} L[H] \Phi_i(x, y) dx dy = 0 \\ \iint_{(D)} \left[T_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + T_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} - S \frac{\partial H}{\partial t} - W \right] \Phi_i(x, y) dx dy = 0 \end{cases} \quad (5-6)$$

($i=1, 2, \dots, n$)

对上式左端第一、二项分别用格林公式, 得如下形式:

$$[T] H + [S] \frac{\partial H}{\partial t} + F = 0 \quad (5-7)$$

式中 $[T]$ 为总体导水矩阵, 其元素为

$$\begin{aligned} T_{ij} &= \iint_{(D)} \left[T_x \frac{\partial \Phi_i}{\partial x} \frac{\partial \Phi_j}{\partial x} + T_y \frac{\partial \Phi_i}{\partial y} \frac{\partial \Phi_j}{\partial y} \right] dx dy \\ &= \sum_{e=1}^{N_e} \iint_{(A)} \left[T_x \frac{\partial \Phi_i}{\partial x} \frac{\partial \Phi_j}{\partial x} + T_y \frac{\partial \Phi_i}{\partial y} \frac{\partial \Phi_j}{\partial y} \right] dx dy \end{aligned}$$

式中 $[S]$ 为总体贮水矩阵, 其元素为

$$S_{ij} = \iint_{(D)} W \Phi_i \Phi_j dx dy = \sum_{e=1}^{N_e} \iint_{(\Delta)} S \Phi_i \Phi_j dx dy$$

常数列向量 F 元素为

$$\begin{aligned} F_i &= \iint_{(D)} W \Phi_i dx dy - \int_{(L_e)} q \Phi_i dL \\ &= \sum_{e=1}^{N_e} \iint_{(\Delta)} W \Phi_i dx dy - \int_{(L_e)} q \Phi_i dL \end{aligned}$$

式中 i, j —— 区域 D 上的结点；

N_e —— 单元总数；

Δ —— 代表三角单元；

L_e —— 三角单元边界长度。

各式均为各个单元的迭加，其中区域 D 的基函数 Φ_i, Φ_j 等价于单元三个节点单元基函数。

(三) 三角形单元分析及线性插值

根据单元三角形内线性插值原理，如图 5-3 所示，得单元基函数：

$$N_i = \frac{1}{2\Delta} (a_i + b_i x + c_i y)$$

$$N_j = \frac{1}{2\Delta} (a_j + b_j x + c_j y)$$

$$N_k = \frac{1}{2\Delta} (a_k + b_k x + c_k y)$$

式中

$$a_i = x_j y_k - x_i y_j, \quad b_i = y_i -$$

$$y_k, \quad c_i = x_k - x_j;$$

$$a_j = x_k y_i - x_i y_k, \quad b_j = y_k - y_i, \quad c_j = x_i - x_k;$$

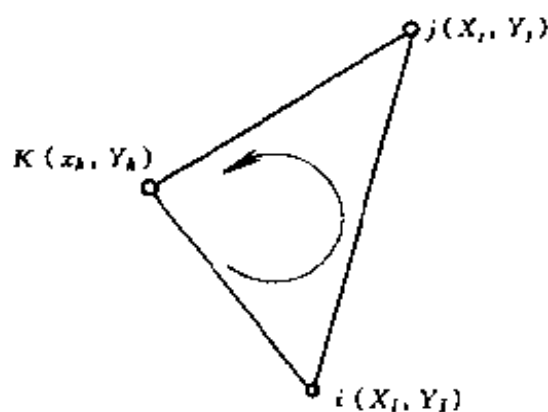


图 5-3 单元三角形

$$a_k = x_i y_j - x_j y_i, \quad b_k = y_i - y_j, \quad c_k = x_j - x_i.$$

单元压力水头近似表达式为

$$H_i(x, y) = N_i h_i + N_j h_j + N_k h_k, \quad (x, y) \in \Delta$$

以上 i, j, k 为三角形单元的顶点序号; h_i, h_j, h_k 分别为单元三角形三个顶点的未知水头。

对一个确定的单元 e , (5-7) 式可以写成下式:

$$[T]_e \begin{Bmatrix} H_i \\ H_j \\ H_k \end{Bmatrix} + [S]_e \begin{Bmatrix} \frac{\partial H_i}{\partial x} \\ \frac{\partial H_j}{\partial x} \\ \frac{\partial H_k}{\partial x} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} F_i \\ F_j \\ F_k \end{Bmatrix} = 0$$

单元导水矩阵

$$[T]_e = \frac{1}{4\Delta} \begin{bmatrix} T_x b_i^2 + T_y c_i^2 & T_x b_i b_j + T_y c_i c_j & T_x b_i b_k + T_y c_i c_k \\ & T_x b_j^2 + T_y c_j^2 & T_x b_j b_k + T_y c_j c_k \\ \text{对称} & & T_x b_k^2 + T_y c_k^2 \end{bmatrix}$$

单元贮水矩阵

$$[S]_e = \frac{S_\Delta}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ & 2 & 1 \\ \text{对称} & & 2 \end{bmatrix}$$

左端 F 列向量

$$\begin{Bmatrix} F_i \\ F_j \\ F_k \end{Bmatrix} = \left(\frac{W_e}{3} \Delta + \frac{1}{2} q_e L_e \right) \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix}$$

式中 Δ ——单元三角形面积;

e ——单元标记;

L_e ——单元在第二类边界的边长;

q_e ——单元边界流量；

W_e ——单元源汇项。

(四) 有限元方程组的解法

由于 (5-7) 式中 $[T]$ 、 $[S]$ 及 F 的元素均随未知压力水头 H 面变化，方程组是非线性的，采用直接解法和迭代解法联合求解。时间导数用向前差分（隐格式）近似代替，即

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{H_{t+1} - H_t}{\Delta t}$$

其中 H_t 和 H_{t+1} 分别表示 t 和 $t + \Delta t$ 时刻的水头分布。

将 (5-7) 式整理为下式线性代数方程组，即

$$\left([T]_{t+\frac{1}{2}} + \frac{[S]_{t+\frac{1}{2}}}{\Delta t} \right) H_{t+\frac{1}{2}} = \frac{[S]_{t+\frac{1}{2}}}{\Delta t} H_t - F_{t+\frac{1}{2}} \quad (5-8)$$

符号 $\frac{1}{2}(t+1)$ 表示元素由 $\frac{t+1}{2\Delta t}$ 时刻的水头分布 $H_{t+\frac{1}{2}}$ 来确定。

在每个时间步长 Δt 内计算时， $[T]$ 和 $[S]$ 按不变值处理。方程组迭代首先按给出的猜测值 $H'_{t+\frac{1}{2}}$ 确定 $[T]$ 、 $[S]$ 和 F 求解线性方程组，算出 $H_{t+\frac{1}{2}}$ ，再修正 $H'_{t+\frac{1}{2}}$ ，如此迭代到收敛。迭代收敛精度误差 ϵ 用水头绝对误差（该值一般不要求很高），取 $\epsilon = 10^{-3} \text{MPa}$ 。猜测值的确定按前一个时间步长水头作线性外推算：

$$H'_{t+\frac{1}{2}} = H_t + 0.5K_t (H_{t+1} - H_t^0)$$

式中 H_t^0 ——前一个时间步长的初始时刻水头分布；

H_t ——前一个步长末时刻（或本时间步长初始值时刻）的水头分布；

K_t ——时间步长递增比系数。

实例 阳泉二矿在 7[#]煤层 1043 工作面注水时，第一组的 I_2 和 I_6 两个注水孔在同一煤层条件下进行注水试验，采用

等压注水，均为下向钻孔。煤层处于卸压区，注水时无明显的临界压力，为容易注水煤层。煤层厚度 1.3m，倾角为 8° ，开采深度 160m，煤容重 1.34t/m^3 ，裂隙发育均匀，最大水分增值 2.6%，在湿润范围内无断层构造。工作面长度 85m。据测定，顶底板水分增值不超过煤层增值的 10%。煤层导水各向异性比取 1 : 0.31，注水参数与湿润分布数据见表 5—2 和表 5—3。

表 5—2 注水参数与湿润范围数据

孔号	钻孔有效长度 (m)	注水压力 (MPa)	注水时间 (min)	注水量 (L)	平均流量 (L/min)	煤层沿走向的湿润范围 (m)
I ₂	37.0	1.32	490	6157	20	9.5
I ₆	37.2	1.27	311	4641	25	6.3

表 5—3 煤体湿润分布测定结果

孔号	距钻孔距离 (m)	≤ 0.25	2	3	4	4.5
I ₃	左侧 (%)	2.6	1.28	1.07	0.78	0.41
	右侧 (%)	2.6	1.15	1.02	0.81	0.35
	平均 (%)	2.6	1.215	1.04	0.80	0.38
I ₂	钻孔 (%)	2.5	1.15	0.65	—	—

为进行模拟分析，首先区域离散化。以煤层为计算区域，将顶底板设为隔水边界走向范围为 8m，剖分节点 312 个，共 509 个单元。部分参数 $K_1=3$ ， $EPR=1.25$ ， $RO=0.5\text{cm}$ ，如图 5—4 所示，坐标原点 x_0 ， y_0 为钻孔位置。

采用 I₆ 号钻孔资料反求参数，煤层导水参数，煤层导水

参数作为待识别的参数,取初值 $T_{m0}=0.025$; $b_{t0}=0.8\times 10^4$; $b_{s0}=0.8\times 10^4$; 参数识别结果为: $T_m=0.03831\text{cm/h}$; $b_t=0.2688\times 10^4$; $b_s=1.2056\times 10^4$ 。煤层导水、贮水系数范围为: $T=0.001\sim 0.023116\text{cm/h}$, $s=5.5\times 10^{-7}\sim 3.86\times 10^{-10}1/\text{m}$ 。

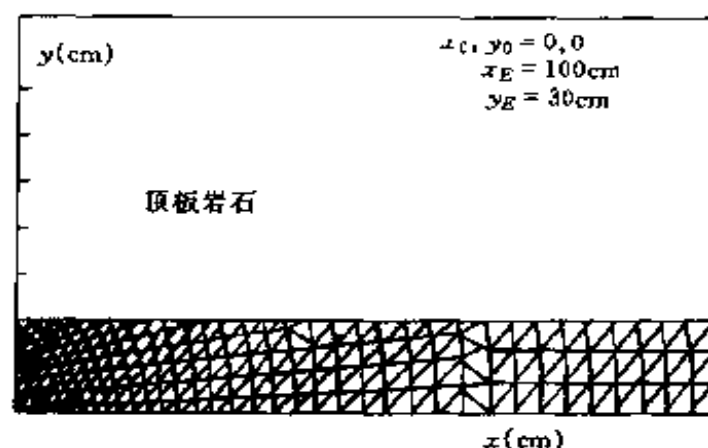


图 5—4 计算区域剖分网格

用以上参数结果模拟计算 7[#] 煤层的注水,其湿润分布结果见表 5—4,流量变化结果见表 5—5。湿润分布及分布随时间变化过程如图 5—5,图 5—6,图 5—7 和图 5—8 所示。

表 5—4 水分增值拟合结果

取样点 (m)	0.25	2.0	3.0	4.0	4.5
测定值 F_e	2.60	1.215	1.04	0.80	0.38
计算值 F_i	2.5985	1.1782	1.0485	0.8590	0.3650
剩余值 d_i	0.0019	0.0368	0.0085	0.0590	0.0150
误差 (%)	0.07	3.02	0.81	7.37	3.94

表 5—5 流量随时间变化比较

注水时间 (h)	2	4	6	8
测定流量 (L/min)	23.0	18.6	16.8	15.7
计算流量 (L/min)	24.8	18.9	16.7	14.8
绝对误差	-1.8	-0.3	0.1	0.9

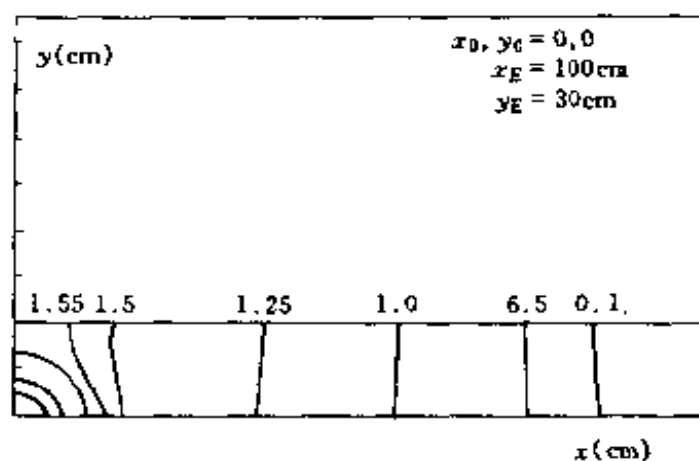


图 5—5 $t=8.16\text{h}$ 湿润分布等值线

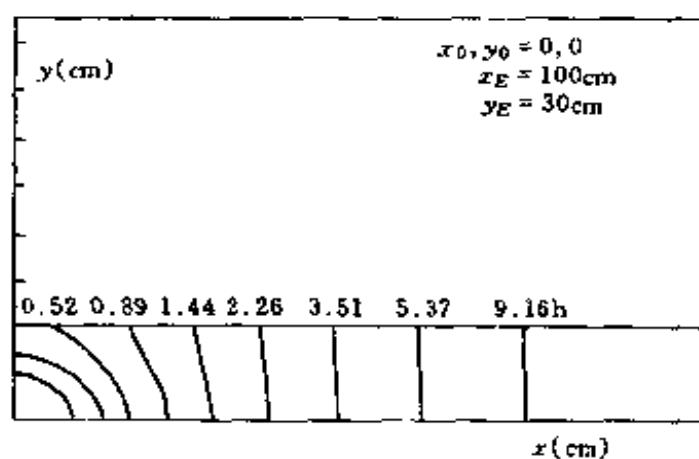


图 5—6 $F=0.5$ 等值线动态移动过程

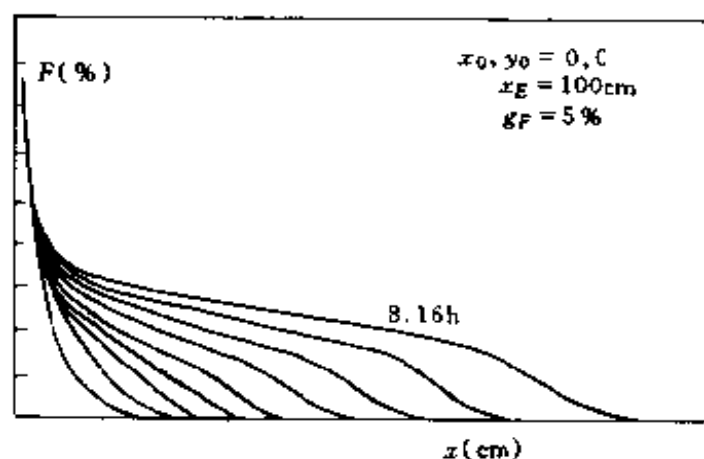


图 5-7 沿 x 轴湿润分布动态过程

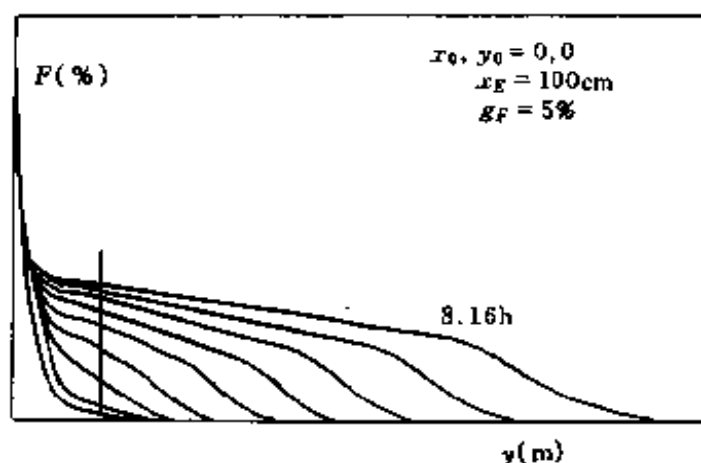


图 5-8 沿 y 轴湿润分布动态过程

拟合精度分析结果，均差 $S=0.0785$ ，理论误差 $E_F=8\%$ ，拟合的精度较高。用 I_2 钻孔资料比较验证，与 $P=1.27\text{MPa}$ 的模拟结果比较，其动态过程基本一致。

经过 8.16h 的注水，每孔总注水量为 6111~6378L，与实际总注水量 6157L 相符； I_2 钻孔在 5.18h 时的注水量为 4395~4853L，与实际的 4641L 接近。注水流量随时间的变化值略

高于实际值,如图 5-9 所示。这种情况是由于孔边界流量近似计算造成的,一般高于实际值 ($k_p > 1$)。模拟计算流量及流量平衡动态过程结果见表 5-6。其中 Q 为注水速度, Q_k 、 Q_D 分别为计算区域内孔边界注水总量和煤体水分增值总量, dQ_k 、 dQ_D 分别为在时间步长 dt 内相应增量。

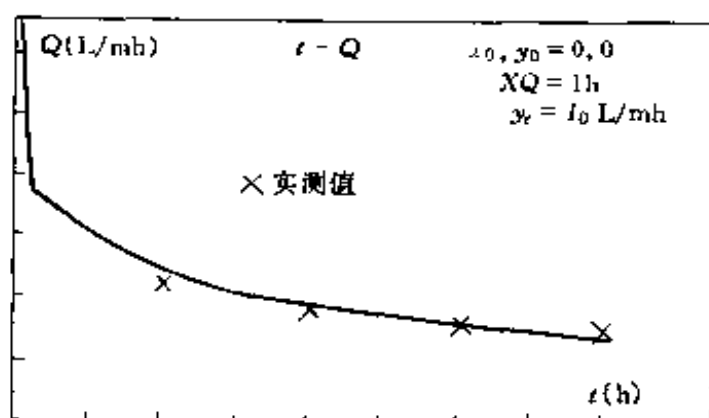


图 5-9 流量随时间变化曲线

表 5-6 模拟计算过程及流量变化

k	time (h)	dt (h)	Q (L/mh)	Q_k (cm^3)	dQ_k (cm^3)	Q_D (cm^3)	dQ_D (cm^3)	k_a
1	0.11	0.11	66.0	52.4	52.4	26.3	26.3	1.994
2	0.27	0.16	33.4	73.8	21.3	44.6	18.3	1.166
3	0.52	0.25	35.4	96.4	22.6	67.2	22.6	1.002
4	0.89	0.37	31.6	127.1	50.8	96.0	28.8	1.067
5	1.44	0.55	27.7	168.0	40.9	133.2	37.2	1.098
6	2.26	0.83	23.9	221.4	53.4	180.9	47.7	1.119
7	3.51	1.24	20.4	290.3	68.9	341.5	60.5	1.137
8	5.37	1.86	17.3	370.0	87.8	317.6	76.2	1.152
9	8.16	2.79	14.5	488.9	110.9	412.9	95.3	1.164

注: 5、6、7、8 栏数字为计算区域内 1cm 长钻孔煤体的水量。

其矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} N & \sum x_{1i} & \sum x_{2i} & \cdots & \sum x_{ni} \\ \sum x_{1i} & \sum x_{1i}^2 & \sum x_{1i}x_{2i} & \cdots & \sum x_{1i}x_{ni} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \sum x_{ni} & \sum x_{ni}x_{1i} & \sum x_{ni}x_{2i} & \cdots & \sum x_{ni}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_1 y_i \\ \vdots \\ \sum x_n^2 y_i \end{bmatrix} \quad (5-11)$$

二、组合参数的调整

用正交设计进行煤层注水试验时，由于划分水平的个数及各水平的取值不是唯一性，所以，选择的水平个数的多寡及各个水平取值的大小，对注水试验效果及所确定的参数组合都有较大的影响。对煤层注水工程来说，水平数划分的多，各水平值之差就小，试验后确定的组合参数就更加合理。但是，这样将要增加试验次数。为不增加试验次数，又能保证组合参数达到最优，用方程（5-9）中各自变量对预测因变量贡献大小，即方程中各个自变量对因变量的相关程度来修正组合参数。评价各自变量对因变量的贡献大小，用偏相关系数，即

$$\rho_{y,u,1,2,\cdots,u-1,u+1,\cdots,m} = -\gamma^{u,m+1} / (\gamma^{uu} \gamma^{m+1,m+1})^{\frac{1}{2}} \quad (5-12)$$

式中， $u=1, 2, \cdots, m$ 。

三、实例

为说明上述方法，以暖河子煤矿 2 盘区煤层注水为例。

1. 注水预测方程

根据第三章第二节中的表 3-6，由上述方程（5-10）或

(5-11) 计算, 暖河子矿 2 盘区煤层注水效果预测方程为

$$\begin{aligned}\hat{y} = & 0.4411 - 0.0116x_1 + 0.0115x_2 - 0.0032x_3 \\ & + 0.0024x_4 - 0.0118x_5\end{aligned}\quad (5-13)$$

复相关系数 $r = 0.9947$, 剩余平方和 $Q = 0.0097$, 回归平方和 $U = 0.9082$ 。显然, 预测方程不仅线性相关紧密程度很高, 而且效果也比较好。因此, 可用该方程估计由正交试验方法给出的最优参数组合的注水效果。

2. 注水效果的预测

将第三章第二节例中确定的组合参数 $A = 80 \times 98 \text{ kPa}$; $B = 25 \text{ L/m} \cdot \text{h}$; $C = 48 \text{ h}$; $D = 70 \text{ m}$; $E = 10 \text{ m}$ 代入 (5-13) 式中, 其预测效果为 $\hat{y} = 1.553$ 。很明显, 采用这组参数注水, 其效果比较好。但是, 这个水分增值距注水后煤层全水分的上限值是 (4%~5%, 我国经验推荐值), 还相差一定的数量。因此, 根据该矿欲注煤层的自然含水率 (2.01%), 饱和含水率 (24.45%), 湿润边角 (50°), 孔隙率 (8%~16%), 层理和节理发育情况及单孔的所需的注水量 (72m³), 有条件进一步提高煤层注水后的水分增值。所以, 在允许的范围内, 可以对第三章第二节中给的组合注水参数进行调整修正。

3. 组合参数的调整

根据 (5-12) 式, 各自变量的偏相关系数见表 5-7。由该表可知, 注水参数对煤层注水后的水分增值贡献较大的是注水压力和单位时间注水流量, 其偏相关系数明显高于其它工艺参数的相应值。所以, 在不存在泄水现象且地层应力较大的情况下, 提高注水压力对于提高注水效果最明显。因为注水压力的提高加快了在煤体裂隙中的渗流速度, 并能沟通潜在裂隙, 扩大渗流通道, 使水渗透范围增大。但是, 由于该矿 2 盘区煤层顶底板破碎, 煤层倾角较大 (平均为 40°), 且

煤层层理、节理较发育，为保证工作面落煤自滑，便于顶底板管理，注水压力不能再提高。实际试验注水工程也表明，采用 $80 \times 98 \text{ kPa}$ 压力注水，个别地点出现轻微顶板破坏现象。所以，该注水压力值已接近极限压力值。

表 5-7 偏相关系数表

自变量	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
内 容	注水压力	单位注水量	注水时间	孔 深	孔 距
偏相关系数	0.9934	0.9596	-0.8697	0.5875	-0.8681
t 检验值	27.4865	10.7808	-5.5713	2.2959	-5.5310
贡献次序	1	2	5	3	4

从表 5-6 中可知，增加单位注水流量，增加单位注水流量，也可以提高水分增值。但是从试验注水工程看到，在急倾斜煤层中注水，单位时间注水流量过大，且连续注水有效时间较长，易造成泄水现象。如 4[#] 注水试验工程，其注水时间为 60h；单位时间注水流量为 $25 \text{ L/m} \cdot \text{h}$ ；注水压力为 $30 \times 98 \text{ kPa}$ ；孔长 70m；孔间距 20m；封孔长度 5m。该孔在注水过程中，36h 后出现泄水现象，注水效果不好，水分增值仅为 0.84%。8[#] 钻孔注水工程，注水压力 $45 \times 98 \text{ kPa}$ ；注水流量 $25 \text{ L/m} \cdot \text{h}$ ；注水时间为 48h；孔长 55m；孔距 10m；封孔长度 42m。该孔在注水压力比 4[#] 孔大，孔距也小，单位注水量相同的条件下，注水过程中却没有发生泄水现象，其主要原因是采用间断注水，即每次连续注水 8h 后，停注 3 天。根据这一经验，为提高注水后的水分增值，可以增加单位时间注水流量。为避免单位注水量过大，造成泄水，减少连续注

水时间,可采用间断注水,即每隔4天连续注水8h。这样,可将单位注水流量由 $25\text{L}/\text{m}\cdot\text{h}$ 调整 $32\text{L}/\text{m}\cdot\text{h}$,将注水时间由48h降到40h。通过计算,预测水分增值为 $\hat{y}=1.6591$,增加了0.1061。根据我国的经验,急倾斜煤层注水在中压注水条件下,单位注水流量不宜过大,一般应小于 $35\text{L}/\text{m}\cdot\text{h}$ 。

根据表5—6,如果还要提高水分增值,鉴于暖河子矿的地质和开采技术条件,仅能增加孔长,或降低孔距。但按照注水技术要求,急倾斜煤层长钻孔下向注水,靠近风巷上帮必须保留20~30m煤柱。暖河子矿工作面倾斜长90m,因此,不能加长孔深。我国孔距的经验值为10~25m,显然也不能再减小了。故调整后的注水组合参数应为 $A=80\times 98\text{kPa}$; $B=32\text{L}/\text{m}\cdot\text{h}$; $C=40\text{h}$; $D=70\text{m}$; $E=10\text{m}$ 。实注 $\hat{y}=1.6101$ 。

采用多元回归分析由正交设计试验确定的注水组合参数的最佳性,以及组合参数的修正,是保证注水组合参数为最佳的一种有效方法。也是对正交试验方法优化注水参数的完善。

第四节 数量化理论分析方法

我们在煤层注水参数优化一章中叙述了应用正交试验方法确定煤层注水工艺参数最优组合方法。为在注水工程前就了解由这种方法给出的注水参数的注水效果,在这一节里,我们介绍用数量化理论(I)进行预测注水效果。

一、煤层注水效果的预测数学模型

利用数量化理论(I)预测煤层注水效果,是根据正交试验确定的方案所做的注水试验工程取得的定量和定性信息,

建立预测数学模型。

由数量化理论 (I) 及文献 [10], 设描述注水效果的水分增值为基准变量 y ; 影响注水效果的因素 (地质因素、注水工艺参数) 为说明变量 X , 称之为项目。用若干等分方法将注水参数等定量变量转变为定性变量, 把定性变量的各种不同的取“值”设为类目 b 。对于第 j 项目的 K 类目在第 i 的基准变量的反应, 可用下式给定

$$\delta_i(j, k) = \begin{cases} 1 & \text{当第 } i \text{ 基准变量中第 } j \text{ 项目的} \\ & \text{定性数据为 } k \text{ 类目时;} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (5-14)$$

根据正交试验设计确定的注水试验方案所获得的全部注水试验的工程信息, 依据 (5-14) 式的规定, 记入所列项目类目表中构成的反应矩阵 (5-15) 式中, 即

$$X = \begin{bmatrix} \delta_1(1, 1) & \cdots & \delta_1(1, r_1) & \delta_1(2, 1) & \cdots & \delta_1(2, r_2) & \cdots & \delta_1(m, 1) & \cdots & \delta_1(m, r_m) \\ \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \delta_i(1, j) & \cdots & \delta_i(1, r_1) & \delta_i(2, 1) & \cdots & \delta_i(2, r_2) & \cdots & \delta_i(m, 1) & \cdots & \delta_i(m, r_m) \\ \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \delta_n(1, 1) & \cdots & \delta_n(1, r_1) & \delta_n(2, 1) & \cdots & \delta_n(2, r_2) & \cdots & \delta_n(m, 1) & \cdots & \delta_n(m, r_m) \end{bmatrix}$$

在数量化理论 (I) 中, 假定基准变量与各项目、类目的反应之间遵循下列线性模型:

$$Y_i = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^J \delta_i(j, k) b_{jk} + \epsilon_i \quad (i=1, 2, \cdots, n) \quad (5-15)$$

其中 b_{jk} 仅是依赖于 i 项目的 K 类目的常数系数; ϵ_i 是第 j 次抽样中的随机误差。根据最小二乘原理, 求出 b_{jk} 的估计值, 即得煤层注水效果预测模型, 即

$$q = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{j=1}^m \left[y_i - \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{r_j} \delta_i(j, k) b_{jk} \right]^2 \rightarrow \min$$

求偏导

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial b(u, v)} = \\ -2 \sum_{j=1}^m \left[y_i - \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{r_j} \delta_i(j, k) b_{jk} \right] \delta_i(u, v) = 0 \\ (u=1, 2, \dots, m; v=1, 2, \dots, r_u) \end{aligned}$$

得线性方程组

$$\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{r_j} \left[\sum_{i=1}^n \delta_i(j, k) \delta_i(u, v) \right] \hat{b}_{jk} = \sum_{i=1}^n \delta_i(u, v) y_i \quad (5-16)$$

将 (5-17) 式写成矩阵形式, 则有

$$x' x \hat{b} = x' y \quad (5-17)$$

其中 $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$; $\hat{b} = (\hat{b}_{11}, \hat{b}_{21}, \dots, \hat{b}_{1r1}, \hat{b}_{21}, \hat{b}_{22}, \dots, \hat{b}_{2r2}, \dots, \hat{b}_{m1}, \hat{b}_{m2}, \dots, \hat{b}_{mr_m})$ 。

将 X 及 X' 用 (5-15) 式取代, 解线性方程组 (5-18) 得 \hat{b}_{jk} , 于是预测方程为

$$\hat{y} = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{r_j} \delta(j, k) \hat{b}_{jk} \quad (5-18)$$

二、模型预测精度的检测

对 (5-16) 式中假定 ε_i 相互独立, 且满足数学期 $E(\varepsilon_i) = 0$, 方差 $V_{ar}(\varepsilon_i) = \sigma^2$ 与多元回归一样, 在求得最小二乘估计 \hat{b}_{jk} 之后检验 \hat{y} 的预测精度, 用预测值 \hat{y} 与 y 的样本复相关系数 γ 确定, 即

$$r = \frac{\sigma_{\hat{y}y}}{\sigma_{\hat{y}}\sigma_y} = \frac{\sigma_{\hat{y}}}{\sigma_y} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5-19)$$

或用 \hat{y} 与 y 的剩余均方确定，即

$$f = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 / (n - m + 1) \quad (5-20)$$

三、调控参数的确定

各项目对预测基准变量贡献大小可分别用基准变量 y 与第 u 个项目间的样本方差比来衡量，即，方差比 $= \sigma_j^2 / \sigma_y^2 = \sum_{i=1}^n (x_j^{(i)} - \bar{x}^{(i)})^2 / \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ ，式中 $j=1, 2, \dots, m$ 。

四、预测方法

为说明这种方法，以本溪暖河子煤矿煤层注水为例。

1. 项目与类目的确定

为讨论方便，不考虑地质因素对注水效果的影响，仅考虑影响注水质量的注水工艺方面的主要参数，即注水压力、注水时间、单位时间每米注水量、孔距、孔深等五个因素。项目为： x_1 （注水压力，kPa）； x_2 （单位注水流量，L/m·h）， x_3 （注水时间，h）， x_4 （钻孔长度，m）， x_5 （孔距，m）。

根据暖河子矿煤层注水试验方案和实际注水工程要求，类目划分如下：

$$\begin{aligned} x_1: & 30 \times 98.1 \leq b_{11} < 45 \times 98.1; 45 \times 98.1 \leq b_{12} < 60 \times 98.1; 60 \times 98.1 \leq b_{13} < 75 \times 98.1; 75 \times 98.1 \leq b_{14} \\ x_2: & 6 \leq b_{21} < 12; 12 \leq b_{22} < 18; 18 \leq b_{23} < 24; 24 \leq b_{24} \\ x_3: & 24 \leq b_{31} < 36; 36 \leq b_{32} < 48; 48 \leq b_{33} < 60; 60 \leq b_{34} \end{aligned}$$

$x_4: 50 \leq b_{41} < 55; 55 \leq b_{42} < 60; 60 \leq b_{43} < 65; 65 \leq b_{44} < 100。$

$x_5: 10 \leq b_{51} < 13; 13 \leq b_{52} < 16; 16 \leq b_{53} < 19; 19 \leq b_{54} < 30。$

2. 建立反应矩阵特征表求反应矩阵

为表示方便，用反应矩阵特征表代替反应矩阵。根据第三章第二节中的表 3—5，反应矩阵特征表见表 5—8。

3. 解线性方程组

解线性方程组 (5—18)，建预测方程

经计算机计算，暖河煤矿煤层注水效果预测方程为

$$\begin{aligned} y = & 0.8000b_{12} + 0.1300b_{12} + 0.9325b_{13} + 0.576b_{14} \\ & + 0.04b_{22} + 0.1625b_{23} + 0.21b_{24} - 0.0075b_{32} \\ & - 0.0725b_{33} - 0.0975b_{34} + 0.0325b_{42} + 0.025b_{43} \\ & + 0.045b_{44} - 0.045b_{52} - 0.105b_{53} - 0.1175b_{54} \end{aligned}$$

4. 预测结果的精度及注水效果

由计算机计算，复相关系数 $r = 0.96618$ 。预测方程所得的效果精度比较高，可以用该方程估计由正交试验方法给出的最优参数组合的注水效果。

经计算 $\hat{y} = 1.63$ 。此值高于任何一种试验方案的注水效果。显然，采用正交试验的方法确定的参数组合进行注水，效果更好。

5. 调控参数的确定

各项目对水分增值的贡献见表 5—9。

由表 5—8 可以看出，注水参数对煤层注水后的水分增值的贡献大小依次是注水压力、单位注水流量、注水时间、孔距和孔深。其中对注水效果影响最大的，即贡献最大的就是

表 5-8 反应矩阵特征表

y	x ₁				x ₂				x ₃				x ₄				x ₅			
	b ₁₁	b ₁₂	b ₁₃	b ₁₄	b ₂₁	b ₂₂	b ₂₃	b ₂₄	b ₃₁	b ₃₂	b ₃₃	b ₃₄	b ₄₁	b ₄₂	b ₄₃	b ₄₄	b ₅₁	b ₅₂	b ₅₃	b ₅₄
0.80	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
0.82	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
0.81	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0
0.84	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1
0.83	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
0.91	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
0.95	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0
1.10	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0
1.06	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0
1.10	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0
1.21	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
1.23	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
1.20	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
1.22	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1
1.57	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
1.56	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0

表 5-9 各项目对水分增值的贡献

项 目	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
项目内容	注水压力	单位 注水容量	注水时间	孔 深	孔 距
范 围	0.72288	0.51227	0.18358	0.10035	0.14470
方 差 比	0.84023	0.31035	0.04705	0.06767	0.03415
偏相关系数	0.96224	0.76324	0.54314	0.44823	0.58050
贡献次序	1	2	3	4	5

注水压力和单位时间注水流量，它们的偏相关系数、方差比和范围都显著地高于其它参数的相应值。因此，可知对于一般煤层注水压力和流量是注水的关键指标，在不存在泄水现象且矿山压力较大的情况下，提高注水压力是提高注水效果的最有效途径。因为注水压力的提高加快了水在煤体裂隙中的渗透速度，并能沟通潜在裂隙扩大渗透通道，使水渗透范围扩大。若压力过大，出现破坏顶底板和泄水现象，由表 5-6 可以看出，可增长注水时间和缩短孔距来提高注水效果。因为注水时间和压力是对煤层注水两个方面的作用形式。在压力注水中，短期内（数小时至数天），水的渗透首先是通过较大的裂隙如煤体层理、节理及构造裂隙等渗透至远处并包围被裂隙所分割的煤块体，而使煤体达到较完全均匀湿润，水必须进入更多更细的裂隙和孔隙（直径在 $10^{-7} \sim 10^{-9} \text{m}$ 的细微裂隙和内生裂隙）中。水在这些孔隙中流动主要靠分子的毛吸作用力。因此，水进入细微孔隙，需要较长的时间。将注水时间由 48h 调整到 60h，由预测方程给出预测水分增值为 1.75，上升 0.12；由 60h 调整到 80h，预测水分增值为

1.75, 上升 0.01, 此时水分增值没有明显变化。所以, 注水时间不是越长, 注水效果就一定越好。时间增加到一定值后, 注水效果趋于一致。显然, 新的注水参数组合为: $p=80 \times 98.1 \text{ kPa}$; $Q=25 \text{ L/m} \cdot \text{h}$; $h_s=60 \text{ h}$; $L_k=70 \text{ m}$; $E=10 \text{ m}$ 。

第六章 煤层注水“三防” 原理及其效果

第一节 煤层注水防尘原理与效果

煤层注水防尘的实质是用水预先湿润尚未采落的煤体，使其在开采过程中大量减少或基本消除浮游煤尘的发生。煤体通过注水钻孔被压水，水均匀分布于煤层中无数细微的裂隙和孔隙之中，被湿润的煤体降低了产生浮游煤尘的能力。水的除尘作用有以下三个方面：

1. 湿润了煤体内的原生煤尘

从第一章可知，煤体内各类裂隙中都存在着原生煤尘，它们随煤体被破碎而飞扬于矿井空气中。水进入裂隙后，可将其中的原生煤尘在煤体破碎前预先湿润，使其失去飞扬的能力，从而有效地消除尘源。

2. 有效地包裹了煤体的每一个细小部分

水进入煤体各类裂隙、孔隙之中，不仅在较大的构造裂隙、层理、节理中有水存在，而且在极细微的孔隙中都有水注入，甚至在 $1\mu\text{m}$ 以下的微孔隙中也充满了毛细水，这样就使整个煤体有效地被水所包裹起来。当煤体在开采中受到破碎时，因为在绝大多数的破碎而均有水的存在，从而消除了细粒煤尘的飞扬，即使煤体破碎得极细，渗入细微孔隙的水也能使之都预先湿润，达到预防浮煤尘产生的目的。

3. 改变了煤体的物理力学性质

水进入煤体后，湿润的煤炭塑性增强，脆性减弱。当煤炭受外力作用时，许多脆性破碎变为塑性形变，因而大量减少了煤炭被破碎为尘粒的可能性，降低了煤尘的产生量。抚顺胜利矿对浸水后的煤炭试样做了物理力学性质的考察。实验表明，湿煤样试块水分增加值为 0.58%~0.75% 时，其垂直于层理面方向的单向压缩变形量比干煤样增加 13.4%~14.5%。对浸水后煤炭试样还作了落锤破碎试验。用 0.5mm 筛下的碎末重量与煤样总重量之比作为煤炭破碎性能的对比指标，其结果也证明了浸水后的湿煤塑性韧性增大，脆性减弱，受冲击时减少了煤炭破碎程度。其试验结果见表 6-1。从表中实验数据可知，煤炭浸湿后当水分增值达 1% 以上时，筛下煤百分比数值比干煤降低为 5.9%~12.24%。

表 6-1 胜利矿浸水煤样力学性质试验结果表

浸水湿润条件	水分增值	0.5mm 筛下煤占煤样总重量的百分比	筛下煤百分比的降低值 (比干煤)
无压浸泡 48h		1.6%~5.97%	5.7%~20.15%
40 大气压浸泡 1h	0.38%	1.85%	10.36%
80 大气压浸泡 1h	0.64%	0.45%	2.52%
120 大气压浸泡 1h		1.15%	6.44%
120 大气压浸泡 2h	1.03%	2.29%	11.47%
120 大气压浸泡 2h	0.36%	6.99%	27.2%
120 大气压浸泡 3h	1.59%	0.85%	5.9%
120 大气压浸泡 4h	1.27%	4.32%	12.24%

一些试验资料表明，正确地采用注水防尘，煤尘的产生量比综合采用其他多种防尘措施时低 3~4 倍，落煤效率可提高 25% 左右。在自然界里可以发现一些天然潮湿的煤层，开

采时一般都不会产生严重的煤尘问题；在有的自然含水达7%~8%的煤层中，甚至无须采用任何防尘措施，就很容易使工作面含尘量达到规定的卫生标准。而在那些干燥煤层中，即使在开采用洒水的方法使耗水量达到和自然含水量一样的标准，也决不可能达到同样的防尘效果。

经过注水而得到预先湿润的煤炭，在整个矿井生产流程中都具有连续防尘作用。它不仅在落煤破碎时可以防尘，而且在装载、运输、转载、提升直至地面筛选时，即一切再破碎过程中均具有防尘作用，而其他的防尘方法则多数为局部性措施，不具备这种连续防尘作用。采煤工作面的煤炭产量占全矿产量的90%以上，它是矿井煤尘产生量最高的地点，如果使90%的煤炭大部予以预先湿润，则在整个井巷系统中将大量减少煤尘的产生和飞扬，沉积和再飞扬，这就必然改变了整个矿井的防尘面貌。

一般情况，采煤工作面进行煤层注水后，粉尘浓度大幅度降低，劳动条件改善，表现在以下两方面。

1. 降低了工作面浮游煤尘浓度

在进行煤层注水降尘的工作面，一般都取得较好的降尘效果，降尘率在60%~90%之间。注水后浮游煤尘浓度最低可降至数毫克/立方米。如抚顺龙凤矿在注水后的27个煤尘测定数据中有12个达到 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 以下，占44.5%；门头沟矿注水后测定的浮游煤尘浓度有87.5%的数据在 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 以下，我国部分矿区煤层注水前后的降尘效果见表6-2。

随着工作浮游煤尘的大幅度下降，井巷系统的沉积煤尘也相应减少，冲洗和清扫工作量减轻，全矿井煤尘管理局面将得到根本改善。

表 6-2 煤层注水及采空区灌水降尘的一般效果

局、矿名	注水方法	注水前煤尘浓度 (mg/m ³)	注水后煤尘浓度 (mg/m ³)	降尘率 (%)
抚顺龙凤矿	长钻孔注水	762~640	61.5~8.0	60~87
石炭井各矿	长钻孔注水	800~150	100~3.5	60~95
京西门头沟矿	长钻孔注水	102~15	11.2~5.0	73
阳泉二矿	长钻孔注水	1829~132	661~30.4	63~91
新汶良庄矿	长钻孔注水	242~170	50~31	79~81
抚顺胜利矿	长钻孔注水	867~576	137~73.9	76~91
本溪彩屯矿	长钻孔注水	532~292	111~103	64~72
开滦赵各庄矿	短孔注水	59.4~17.5	9.4~7.2	43~88
萍乡青山矿	短孔注水	898	102	86
本溪彩屯矿	短孔注水	4380~254	661~52	42~90

2. 解决了采煤工作面前方某些临时性回采巷道的掘进防尘问题

在采煤生产中,由于地质构造或其它原因,常常在已准备好的煤体内需要掘进一些临时性的小断面巷道。这些巷道施工期短、断面小、质量较差、边探边掘,因面掘进头的通风防尘是全矿管理中最薄弱的环节之一,极易形成瓦斯煤尘的事故隐患。工作面实现超前注水后,这类巷道在预先湿润的煤体中进行掘进作业,掘进头的防尘问题得到解决。当煤体湿润很好时,掘进过程中甚至无须采用放炮出碴洒水喷雾等措施。

第二节 煤层注水防治煤与瓦斯 实出的原理与效果

瓦斯压力大而透气性又很小的煤层中,在地压和瓦斯压力共同作用下常发生煤和瓦斯突出。为此许多国家都在研究

采用煤层注水的方法预防煤和瓦斯突出，有的试验取得了一定效果。

采用煤层注水预防煤和瓦斯突出的依据是：在透气性小而瓦斯压力大的煤层中，游离瓦斯占瓦斯总含量的比例是很微小的，煤层注水后，水进入煤体裂隙，孔隙虽然驱为甚微的游离瓦斯，但不会引起瓦斯压力的升高，恰恰相反，由于水进入裂隙，孔隙封闭了吸附瓦斯解吸的通道，阻止了瓦斯的释放，使瓦斯不能显现其压能，所以就降低了瓦斯释放时产生的能量，减少了瓦斯破碎煤体的可能性。试验研究表明，水在细微孔隙中封闭着瓦斯解吸流动的通路，孔隙直径愈小，水愈能牢固地封闭瓦斯，愈能承受大的瓦斯压力。实验证明，经过注水的煤炭瓦斯放散速度降低了 90%，如要转变为如像干煤那样排放瓦斯，在实验室中需经 5~6 个月。由此可见，对突出煤层进行注水，煤壁瓦斯涌出量减少，瓦斯压力显著降低，减少了突出的危险性。

在欧洲、日本和俄罗斯等国采用煤层高压注水预防煤和瓦斯突出，收到了一定效果，其主要作法是：

(1) 煤巷掘进时，对煤壁进行高压注水，即在工作面煤壁上打 3~4m 的钻孔，注入 150~180 大气压的水。高压水进入煤体后使煤壁向空间位移 10~40cm，煤壁内形成 3m 以上的裂隙带既降低了瓦斯压力，又减轻了地压集中程度，起到了预防突出的作用；

(2) 采用高于瓦斯压力而低于地层压力的压力水，对煤体进行长时间注水。掘进工作面钻孔为 30~40m，采煤工作从下向上超前打眼进行长孔注水，孔底距风巷不超过 20m，注水量按煤体水分不超过 4% 确定。注水时间 20~30 天，使煤体瓦斯压力下降至安全值，有效地预防了煤和瓦斯的突出。

煤层注水不仅对预防煤和瓦斯突出有较好效果，对排放瓦斯也有很好效果。水进入煤后，对瓦斯的物理作用是很复杂的。由于煤层瓦斯含量、瓦斯压力及煤层透气性的不同，水对瓦斯的作用也不同。

1) 在透气性较好而瓦斯压力不大的煤层中，游离瓦斯是瓦斯存在的主要形式。水从煤体的裂隙、孔隙中驱赶自由状态的大量游离瓦斯，同时使吸附状态的瓦斯延迟了解吸释放的时间，使煤层的游离瓦斯在开采前提前泄出，而吸附瓦斯又推迟了释放，因而大大降低了落煤时瓦斯涌出的离峰值，从而避免了瓦斯超限。游离瓦斯被驱动表现于以下现象：

(1) 注水过程中瓦斯向排放钻孔的泄出速度加快了。阳泉二矿在西四尺 7[#]煤层注水时，在注水孔连续注水 4h 后，与注水孔相邻的瓦斯排放钻孔的自然瓦斯涌出量从原来的 6~24L/min 增加到 10~45L/min；当注水停止后，瓦斯的涌出量又回到或稍低于原来的数值；

(2) 用钻孔向煤体注水后，提高了邻近瓦斯抽放钻孔的抽放效率。抚顺龙凤矿在瓦斯预抽区内进行长孔注水时，邻近抽放孔抽出的混合瓦斯及纯瓦斯量都有显著上升，提高了瓦斯抽放效率。注水后抽出瓦斯量的变化见表 6-3。

(3) 注水结束后，开采中的瓦斯涌出量显著降低。龙凤矿注水后，湿润的工作面绝对瓦斯涌出量平均降低了 0.18~0.77m³/min；阳泉二矿注水后，落煤时瓦斯浓度普遍下降，基本消除了瓦斯超限现象。该矿四尺煤 1043 工作面注水前后瓦斯浓度降低 50%左右；本溪彩屯矿短孔注水后也取得相同效果，工作面回风流瓦斯浓度由 0.9%~1%降低为 0.5%~0.6%。表 6-4 是阳泉二矿 1043 工作面注水后前后瓦斯浓度测定数据。

表 6—3 注水对抽放瓦斯的影响

采 区	钻孔数	抽出混合瓦斯量 (m ³ /min)			抽出纯瓦斯量 (m ³ /min)			提高效率 (%)
		注水前	注水中	增加 (%)	注水前	注水中	增加 (%)	
龙凤 502 区	4	0.5~1.7	0.7~2.2	17~34	0.29~1.27	0.57~1.91	19~127	49.3
龙凤 507 区	5	1.3~3.1	1.7~3.8	21~23	0.88~2.04	1.1~2.55	25~26	25.5
老虎台 408 区		12.69	14.61	15.3	8.01	9.06	11.9	11.9

表 6—4 注水后瓦斯浓度的变化

	注 水 前			注 水 后			下降的幅度 (%)
	瓦斯浓度级 别 (%)	出现次数 (次)	瓦斯浓度平均值 (%)	瓦斯浓度级 别 (%)	出现次数 (次)	瓦斯浓度平均值 (%)	
煤 壁	≥1	10	1.01	≥1	0	0.48	52.8
	≥0.5	9		≥0.5	9		
	<0.5	0		<0.5	13		
回 风	≥0.5	9	0.59	≥0.5	0	0.25	57.6
	<0.5	0		<0.5	6		

落煤时工作面的瓦斯浓度与注水后煤层水分的增值有密切关系；注入水量多，煤层水分增值较大的地点，落煤时瓦斯浓度则较小，反之则较大。可见注水的水量直接影响瓦斯浓度的高低。图 6—1 是阳泉二矿注水试验工作面沿走向的煤层水分变化与落体煤后瓦斯浓度关系曲线。

应当指出，在煤层注水时，注水区附近有的煤巷掘进工作面涌出量可能大幅度增加，对此应给予高度重视，加强检

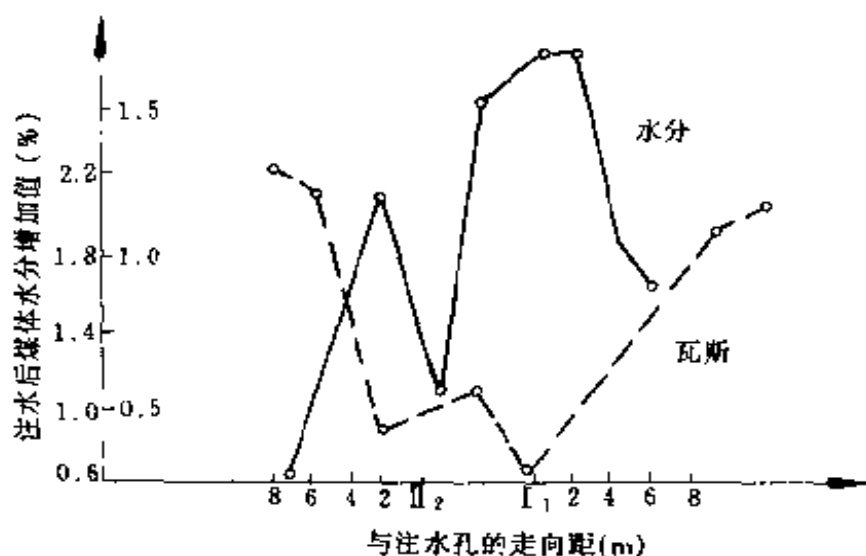


图 6—1 落煤时煤壁瓦斯浓度与煤体水分增值的关系

查和通风。如龙凤矿 601 面二水平注水区附近掘进工作面的瓦斯绝对涌出量，就由注水前的 0.55 增至注水中的 $2.75\text{m}^3/\text{min}$ ，工作面瓦斯浓度由 0.2% 增至 0.6%。

2) 在透气性较差的煤层中，中、高压注水可使煤体形成新的裂隙，增大了瓦斯运动的通道，提高了煤层的透气性，瓦斯的抽出量增加。焦作李封矿用 0.50~70 大气压的水注入煤体，每分钟注水量 5~9kg，当水注入邻近相距 15m 的钻孔后，用注水孔进行抽放，瓦斯抽出量比原来提高 15%。

第三节 煤层注水防治冲击地压的原理与效果

煤是弹性塑性物体，它的工作面前方支承压力的作用下产生应变并积蓄潜能。如果作用力超过了煤的破坏程度时，而且煤体的潜能又具备了迅速释放的条件，则会发生冲击地压，

表现为煤帮片落、煤壁响炮、围岩震动、压出煤炭等现象。大的冲击地压一次可压出 100~200t 煤炭，其能量相当于 2~2.7 级地震。

煤层注水预防冲击地压的作用是：煤体经高压注水改变了煤体的裂隙结构，使煤体脆性减弱，增强了塑性变形的性质，促使前方塑性变形区（卸压带）加宽，使集中压力区（弹塑性变形区）向煤壁深处移动并加宽，减弱了压力集中程度，缓和了煤体压力潜能的积聚，从而预防冲击地压的发生或使其强度减弱。注水前后工作面前方支承压力的变化如图 6-2 所示。

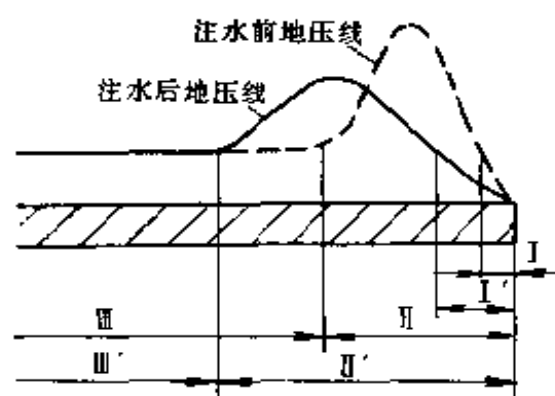


图 6-2 注水前后支承压力的变化情况

I—注水前卸压带距煤壁最大深度；Ⅰ—注水前工作面前方支承压力带距煤壁最大深度；Ⅱ—注水前工作面前方正常压力区；I'—注水后卸压带距煤壁最大深度；Ⅰ'—注水后支承压力带距煤壁最大深度；Ⅱ'—注水后的正常压力区

抚顺胜利矿采用 60~100 个大气压进行煤体注水预防冲击地压，收到较好效果。其对比情况见表 6-5。

表 6--5 胜利矿注水预防冲击地压效果

	最大支承压力 所处位置	应力集中系数	增压区边界与 煤壁的距离
干工作面	工作面前方 5m	2.5	<14m
湿工作面	工作面前方 10m	1.4	10~20m

第四节 提高煤层注水效果的措施

在煤层条件和注水设备确定后，提高煤层注水效果可以在注水工艺上采取一些措施。

一、间歇注水

煤层注水时，压力水快速流入煤体裂隙，裂隙表面往往为气泡所覆盖，因而可能阻碍水湿润作用。而当采用间歇反复注水时，则可消除这一缺点。另外间歇注水可以在两次注水之间空出一定时间，使进入裂隙系统的水在毛细作用下渗入孔隙。当注入结束时，煤体内产生的裂隙是可变的，第一次注水时发现泄水的地点，在第二次注水时不一定继续泄水，这说明在两次注水间歇时间里，煤体湿润膨胀变形使原有裂隙封闭，阻止继续泄水，所以间歇注水要比连续注水的湿润效果好。

二、孔内震动爆破提高透水性

在注水孔内装药进行注水前的震动爆破，可以有效地提高注水流量，降低注水压力。

石炭井矿务局在透水性较差的煤层中，采用孔内震动爆

破方法提高了注水流量。它是在钻孔中盛满水，将矿用安全炸药（4~5节）置于防水套中做成爆破筒送入钻孔内，爆破筒中放置2个起爆雷管引爆，在孔口敞开的情况下进行水封爆破。爆破时，孔内的水将爆炸压力均匀传递给孔壁，以很高的压力挤入煤体，形成或扩大了煤体裂隙，并使之与其他裂隙沟通，增加了煤体的透水性。爆破结束后，即可封孔注水。孔内爆破的作用是利用煤破产生的高压作为注水的初始压力，打开裂隙，同时在爆破震动下，煤体得到松动，为正常注水创造条件。经过孔内爆破的钻孔注水流量可以提高数倍至数十倍。表6-6为石炭井矿务局二、三矿孔内震动爆破的结果。

表 6-6 孔内震动爆破效果表

矿别 层别	工作 面 名称	孔深 (m)	孔距 (m)	爆破 次数	每次爆 破药量 (节)	炸药距 孔口深 度 (m)	注水压 力 (大 气压)	注水流量 (L/h)	
								不爆破	爆破后
二矿 五层 煤	2521	40	15	1	6	40	7~8	10~20	500
	(上)			2	6	40 20	7~8	10~20	800
三矿 五层 煤	3512 (上)	23~31	17	1	5	15	1.5 ~ 2.0	42	196
三矿 九层 煤	3914	21~23	12~20	1	5	15	4~5	67	162

湖南涟邵立新矿三井曾采用封口松动爆破提高了煤层的透气性。这一措施与上述孔内震动爆破相比，主要是在孔口

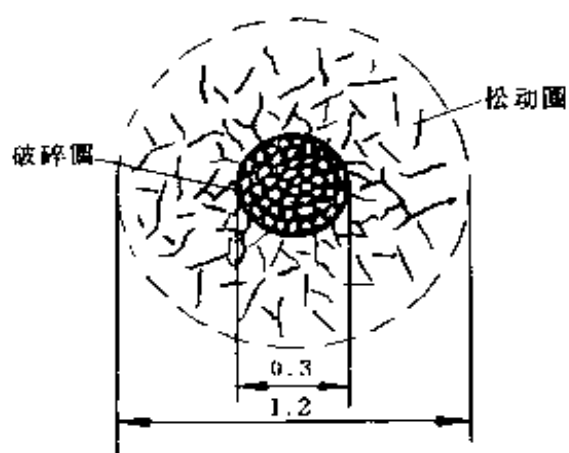


图 6—3 松动爆破后的钻孔断面

封严以后才进行爆破，使煤体沿钻孔得到局部破碎或松动，煤体内的裂隙结构发生变化。这一方法对于进一步提高煤层透水性也有参考价值。封口的松动爆破是在爆破前，首先对抽放钻孔用黄泥封孔，封孔长度为 3~4.5m，每孔装药量 3~6kg。爆破时孔内出现闷炮声，而孔口

封泥完整。钻孔周围的煤体在强大爆炸波压力下遭到破碎，充填了大部或全部钻孔空间，形成了破碎圈，该圈的煤体完全失去连结力，呈碎屑状。在破碎圈之外是松动圈，该圈内的煤体受爆炸波的强烈震动，形成裂隙带。此带内煤呈半破碎半连结状态。破碎圈与松动圈的范围与装药量、煤的力学性质等有关。立新矿三井在试验中，破碎圈直径为 0.1~0.15m，而松动圈的半径则在 0.6m 以上，如图 6—3 所示。

无论开口的水封震动爆破或封孔松动爆破都能够增加煤体裂隙，改变煤体裂隙结构，提高透水性或透气性，改善注水或抽放瓦斯的状况。

三、使用湿润剂提高湿润效果

湿润剂的作用在第二章中已有叙述。开滦赵各庄矿在短孔注水使用湿润剂时曾使注水后的煤尘浓度比注清水的煤尘浓度降低了 62%~85%，显著地改善了降尘效果。阳泉一矿在长孔注水时曾在水中加入 0.5%洗衣粉作为湿润剂，使注

水速度显著提高。当前，我国各注水矿井使用湿润剂的还不多，对湿润剂的种类、效果及其使用方法还有待试验总结。

参 考 文 献

- [1] 《煤层注水采空区灌水防尘》，李崇训编著，煤炭工业出版社，1981年。
- [2] 用模糊聚类分析方法确定煤层注水的难易程度，秦书玉等，《煤矿安全》，1992年 No12。
- [3] 煤层注水参数的正交试验优化法，秦书玉等，《煤炭工程师》，1992年 No3。
- [4] 煤层注水参数的数量化理论正交设计优化方法，秦书玉等，《煤矿安全》，1993年 No9。
- [5] 煤层注水效果的模糊控制方法研究，宋华岭等，《阜新矿业学院学报》，1995年 No1。
- [6] 煤层注水湿润状态的计算机数值模拟方法，秦书玉等，《煤矿安全》，1995年 No1。
- [7] 煤层注水的预测及参数调整，秦书玉等，《煤炭工程师》，1993年 No3。
- [8] 煤层注水效果的数量化理论预测与参数的修正，秦书玉等，《阜新矿业学院学报》，1994年 No1。
- [9] 《矿山岩体力学概论》，刘宝琛编著，湖南科学技术出版社，1982年。
- [10] 《数量化理论及其应用》，董文泉等著，吉林人民出版社，1979年。
- [11] 《正交试验设计法》，上海市科学技术交流站编，上海人民出版社，1975年。
- [12] 丹东顾家煤矿煤层注水设计 秦书玉等，1992年。

