

# 硬石膏矿层底板突水预测和评价

李志杰

(安徽煤田地质局第二勘探队,安徽 芜湖 241006)

**摘要:**基于硬石膏矿层底板灰岩水文地质和工程地质条件计算的矿层开采后导水裂隙带的高度为16m,原位张裂隙带高度为5m。为防止采矿时底板突水,设计预留隔水石膏矿柱80m,其有效隔水层厚度为59m。运用突水系数法和阻水强度法计算的有效隔水层厚度分别为61、50和36m。根据技术、经济和安全的原则,分析认为有效隔水层厚度取50m就能达到安全开采的目的。

**关键词:**有效隔水层;突水预测;突水系数;阻水强度;硬石膏矿层

**中图分类号:**TD745;P641.4

**文献标识码:**A

## Anhydrite Ore Bed Floor Water Bursting Prediction and Appraisal

Li Zhijie

(The Second Exploration Team, Anhui Bureau of Coal Geological Exploration, Wuhu, Anhui 241006)

**Abstract:** Estimated height of water conducted fracture zone is 16m, and height of in-situ tension fracture zone is 5m after the ore bed was mined; the estimation is based on anhydrite ore bed floor limestone hydrogeological and engineering geological conditions. To prevent floor water bursting during mining, 80m safety anhydrite pillar is designed, its effective confining bed thickness 59m. The effective confining bed thicknesses estimated through water bursting coefficient method and water-stop strength method are 61m, 50m and 36m respectively. Based on technological, economic and safety principles, the analysis has figured out that to take 50m as the effective confining bed thickness can come up to the target of safety mining.

**Keywords:** effective confining bed; water bursting prediction; water bursting coefficient; water-stop strength; anhydrite ore bed

硬石膏矿多产于长江中下游的三叠系东马鞍山组中段,顶、底板均为灰岩,含水丰富,为一强含水层,矿床水文地质条件复杂。

留作安全矿柱的硬石膏矿未经开挖采动之前,其初始应力场处于相对稳定的自然平衡状态,一经开采扰动,就破坏初始应力场的平衡,而产生新的诱生应力场,矿柱的底部矿层受到破坏,产生导水裂隙带、原位张裂带。三叠系东马鞍山组下段承压岩溶水活动积极,使底部矿层的阻水能力减弱,当有效阻隔水矿层小于临界隔水层厚度时,矿坑就有突水的可能。

## 1 地质、水文地质及工程地质特征

### 1.1 地质及水文地质特征

#### 1.1.1 第四系(Q)

岩性为黄色、黄褐色粘土,亚粘土,底部夹有砂砾石,厚度0~92m。根据民井简易抽水试验 $q=$

0.089L/(s·m),为孔隙水。本层直接覆盖在各类地层之上、与各地层之间有水力联系。

#### 1.1.2 白垩系上统(K<sub>2</sub>)

上部为暗紫红色细砂岩,局部地段裂隙发育;中部为砂质粗砾岩,砾石呈棱角状,厚度为81.17~87.82m;下部为紫红色砂岩,局部裂隙发育,厚度大于200m,据99-3孔抽水资料 $q=0.1389$ L/(s·m),水质类型为HCO<sub>3</sub>-Ca·Mg型,为裂隙水。本组位于三叠系之上,与三叠系有水力联系,主要补给来源大气降雨。

#### 1.1.3 三叠系中统东马鞍山组(T<sub>2d</sub>)

顶部为灰白色蜂窝状角砾状深灰色灰岩,厚度0~148m,岩溶裂隙发育,具有一定的储水空间,含水丰富,据99-1孔抽水试验资料: $q=1.684$ L/(s·m),水质类型为SO<sub>4</sub>-Ca型,为岩溶裂隙水。

中部为硬石膏层,含水极其微弱,视为隔水层。

下部为深灰色灰岩,局部有少量白云岩,厚度大于157m,岩溶裂隙较发育,钻进中有全漏水现象。据7-6孔抽水资料: $q=0.512$ L/(s·m),水质较好,矿化度为0.42g/L,pH=7.1,为岩溶裂隙水,是矿井的直接充水含水层,具有水量大,来势猛的特点。例如,陶厂石

作者简介:李志杰(1961—),男,江苏丹阳人,1985年毕业于常州煤田地质学校,工程师,长期从事水工环地质工作。

收稿日期:2008-12-10

责任编辑:樊小舟

膏矿井下打钻,由于钻穿底板灰岩,造成矿井淹井事故。

#### 1.1.4 三叠系下统南陵湖组

为灰—灰白色厚层状灰岩,岩溶裂隙发育,厚度大于 200m。据 99-3 抽水资料  $q=0.049\text{ L/(s}\cdot\text{m)}$ ,总硬度为 19.36 德国度,pH 值为 7.3,水质为  $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$  型。

该层段顶部岩溶含水层是矿井的直接充水含水层,与中部的硬石膏层有直接水力联系,通过上覆地层白垩系裂隙含水层的渗透补给,以及露头带直接得到大气降雨的补给。下部的岩溶裂隙含水层为矿层底板,同样也是矿井的直接充水含水层,其含水量仅次于顶板,与矿层有直接的水力联系,补给来源是基岩出露处接受大气降雨的补给并与下伏南陵湖灰岩有互补关系。

#### 1.2 顶、底板的工程地质特征

矿层上覆地层为白垩系上统,岩性以泥质粉砂岩及砂质砾岩为主,岩性较软,易变形,裂隙发育,含水率为 0.6%,抗压强度为 16.3MPa,抗拉强度 1.49MPa。

矿层下部为三叠系中统东马鞍山组,该组分为上、中、下三段。上段为矿层顶板,岩性为灰岩,灰黄色、性脆,裂隙溶洞发育。中段为含矿地层,以硬石膏层为主,浅灰色,较硬,遇水膨胀,变形,局部节理发育;下段为矿层的直接底板,主要为深灰色灰岩、硅质灰岩和白云质灰岩,坚硬而脆,节理裂隙发育中等。矿层顶底板性质如表 1 所示。

表 1 矿层及顶、底板物理力学性质表

Table 1 Physical and mechanical properties of ore bed, roof and floor

层位	岩性	真密度 /g·cm <sup>-3</sup>	视密度 /g·cm <sup>-3</sup>	含水 率/%	抗压强 度/MPa	内摩擦 角/(°)	凝聚 力/MPa	单轴抗拉 强度/MPa
顶板	灰岩	2.76	2.65	0.62	15.8	37.8	2.4	2.49
矿层	硬石膏	2.765	2.67	0.43	22.48	36.6	5.4	3.22
底板	灰岩	2.91	2.79	51	25.33	36.9	5.9	3.59

## 2 采动导水裂隙带高度( $h_1$ )的确定

采动导水裂隙带高度和矿层开采时工作面的斜长、开采深度和矿层倾角有关。工作面斜长愈大,开采愈深,倾角愈大,导水裂隙带高度愈大。含山县陶厂石膏矿是采用房柱洞室开采,其洞室宽长一般不会出现太大。为方便和保险起见,工作面斜长取 100m,开采深度标高取-600m,矿层倾角取 15°。

根据下列经验公式:

$$① h_1 = 0.7007 + 0.1079L;$$

$$② h_1 = 0.303L^{0.8};$$

$$③ h_1 = 0.0085H + 0.1665\alpha + 0.1079L - 4.3579;$$

$$④ h_1 = 7.5 + (L - 30)/20 + 0.0085H。$$

式中: $h_1$ ——底板采动导水破坏带高度,m;

$L$ ——开采工作面斜长,m;

$H$ ——开采深度,m;

$\alpha$ ——矿层倾角,(°)。

这些公式是根据淮北杨庄煤矿的地质及开采条件提出的经验公式,具有一定的实用性。计算结果分别为:①11.49m;②12.06m;③14.03m;④15.25m。结果相差甚小,取 16m。

## 3 原位张裂带高度( $h_2$ )的确定

据<sup>[1]</sup>论述,在岩体自重应力和底板承压水压力的联合作用下,使其超前压力压缩段岩体整个结构呈现上半部受水平挤压,下半部受水平引张的作用,在应力集中带中部的底界面上岩体产生张裂隙,并沿着原岩节理、裂隙发展扩大,但不引起岩体之间较大的位移,只在原位形成张裂隙,即原位张裂隙,其张裂高度上与水压的大小关系密切。由杨庄煤矿井下压水试验可知,当水压达到  $P=3.925\text{ MPa}$  时,岩石开始破坏,此时泥岩厚度为 2m,根据公式: $K_p = P - rM$ , $r$  泥岩石的平均容重  $25.39\text{ kN/m}^3$ ,可求出泥岩的抗张强度  $K_p=3.954\text{ MPa}$ ,当水压为 4MPa 时,根据以下公式

$$\text{可求出原位张裂带的高度为 } M = \frac{P - K_p}{r} = 5\text{m}。 \text{ 以}$$

上是指开采煤层的泥岩、粉砂岩底板而言,而矿床开采的底板预留的硬石膏矿柱,它们的物理力学性质和泥岩、粉砂岩相近,该处的压力、承压水和诱生应力场,与煤层开采条件基本相似,因此,石膏层的原位张裂带厚度大致采用泥岩、粉砂岩的计算结果,确定为 5m 左右。

## 4 承压水导高带高度( $h_3$ )的确定

一般情况下,隔水层下部的承压水,要沿着隔水层下部导水裂隙上升,使隔水层的阻水能力减弱。这个导水裂隙带称导高带。导高裂隙与岩性有关。脆性岩层比塑性岩层发育好,砂岩比泥岩发育好。蒙脱石泥岩因遇水膨胀一般不发育。硬石膏和塑性泥岩相似,遇水体积膨胀 10% 以上,裂隙密实,其导高带不发育,应作 0 考虑。

## 5 硬石膏有效隔水层( $h$ )

根据<sup>[2]</sup>计算公式:

$$h_N = n_3 \left( C_3 \cdot \sqrt[4]{\frac{rb^3 LKM}{K_p \cos \alpha}} + \frac{P_w \cdot M}{K_p + rM} \right),$$

式中: $h_N$ ——隔水石膏矿柱的总厚度,m;

$n_3$ ——综合压力系数,按陶厂石膏矿的经验值

取2;

$C_3$ ——综合系数,按陶厂石膏矿经验取0.7;

$r$ ——隔水岩层的平均密度,  $\text{kg/m}^3$ ,取硬石膏取  $2.89 \times 10^3$ ;

$b$ ——走向宽度,  $\text{m}$ ,取3m,根据含山陶厂石膏矿观测矿山来压规律获得;

$L$ ——开采工作面斜长投影长度,  $\text{m}$ ,取100m;

$K$ ——碎胀系数,取1.3,由勘探时现场测定获得;

$K_p$ ——岩层的抗张强度,  $\text{MPa}$ ,由压水试验确定  $3.954 \text{ MPa}$ ;

$P_w$ ——隔水底板承受的静水压力,  $\text{MPa}$  石膏矿静止水位标高为+7m,开采深度为-600m,静水压力则为  $6.07 \text{ MPa}$ ;

$M$ ——开采矿层总厚度  $\text{m}$ ,取26m;

$\alpha$ ——矿层倾角,取  $15^\circ$ 。

根据以上参数,计算  $h_N = 74.25 \text{ m}$ ,取80m。

为防止采矿时底板突水,预留隔水石膏矿柱80m,实际有效隔水层厚度应从中扣除采动裂隙带、原位张裂隙带,即  $h = 80 - h_1 - h_2$ ,因此,有效隔水层厚度为59m。

## 6 硬石膏底板突水危险性预测

### 6.1 突水系数法

突水系数的计算公式:

$$T_s = \frac{P}{h},$$

式中:  $T_s$ ——突水系数,  $\text{MPa/m}$ ;

$P$ ——有效隔水层承受的水压,  $\text{MPa}$ ;

$h$ ——有效隔水层的厚度,  $\text{m}$ 。

硬石膏矿层将来开采深度标高最大按-600m考虑。有效隔水层为东马鞍山组中段底部硬石膏层。东马鞍山组下段( $T_2d$ 下)承压含水层的水位标高为+7m,其承压水的水压为  $(600+7) \times 0.0098 \text{ MPa}$ 。

$$T_s = \frac{(600+7) \times 0.0098}{59} = 0.101 \text{ MPa/m}。$$

根据淮北煤炭生产矿井实践和《矿井水文地质规程》得知,正常块段突水系数  $T_s$  不大于  $0.15 \text{ MPa/m}$  时,不会造成底板突水。煤层底板泥岩、粉砂岩和硬石膏基本相似,显然,陶厂石膏矿矿层底部预留的80m硬石膏隔水层,固然能够保护石膏矿层安全开采,但考虑将来资源利用问题预留那么厚矿层也没有必要。

按  $T_s \leq 0.15$  计算,有效隔水层厚度应为  $\leq 39.66 \text{ m}$ ,即底板预留的硬石膏矿柱应  $\leq 39.66 + 16 + 5 = 60.66 \text{ m}$ ,取值61m。

### 6.2 阻水强度法

硬石膏层遇水水化,体积膨胀,密实裂隙不能使裂隙继续延伸和扩展,石膏矿层内很少有界面,因此水力压裂的力学原理,不能完全适用硬石膏层。

隔水层的强度,是指阻抗承压水压裂岩层和沿裂隙扩展延伸的能力,若承压水压小于隔水层岩体抗拉强度,或者小于最小地应力与岩体抗拉强度之和,则承压水就不具备压裂岩体的条件。

阻水强度,是指底板隔水层的阻水能力,这是底板隔水岩层的强度、结构和水压共同作用的结果。

根据现场钻孔水压裂试验数据,提出底板岩体阻水强度的计算公式:

$$\sigma = \frac{P_b}{R},$$

$\sigma$ ——平均阻水强度,  $\text{MPa/m}$ ;

$P_b$ ——岩体破裂压力,  $\text{MPa}$ ,与地层应力和岩体抗拉强度有关,由现场测定;

$R$ ——压水孔与现测孔间距,  $\text{m}$ 。

利用平均阻水强度来评价矿层底板安全性的原则是用水压( $P_w$ )和有效隔水层的总阻水能力( $Z_{\text{总}} = \sigma h$ )比较,若  $Z_{\text{总}} > P_w$  则安全,若  $Z_{\text{总}} < P_w$  则不安全。

由杨庄煤矿6煤底板泥岩压水试验现场测定  $P_b = 5.5 \text{ MPa}$ ,  $R = 13 \text{ m}$ ,代入公式  $\sigma = \frac{P_b}{R}$  得泥岩的平均

阻水强度为  $0.42 \text{ MPa/m}$ ; 又根据含山县陶厂石膏矿勘探资料  $P_b = 4.1 \text{ MPa}$ ,  $R = 19 \text{ m}$ ,代入上式得硬石膏矿的平均阻水强度为  $0.22 \text{ MPa}$ ,按阻水强度法分别计算出它们的总隔水层厚度:

①阻水强度按石膏矿层的平均阻水强度  $0.22 \text{ MPa/m}$  时,隔水层总阻水能力应大于水压,即  $Z_{\text{总}} = \sigma h$ ,  $Z_{\text{总}} > P_w$ , 则  $\sigma h > P_w$ ,  $h > \frac{P_w}{\sigma}$ ,  $P_w = 5.95 \text{ MPa}$ ,  $\sigma =$

$0.22 \text{ MPa}$ ,因此有效隔水层厚度  $h > \frac{5.95}{0.22}$ ,  $h > 27.05 \text{ m}$ ,

底板隔水层总厚度:  $h + h_1 + h_2 = 27.05 + 16 + 5 = 48.05 \text{ m}$ ,取50m。

②阻水强度按泥岩的平均阻水强度  $0.42 \text{ MPa/m}$  时。同理,  $P_w = 5.95 \text{ MPa}$ ,  $\sigma = 0.42$ ,  $h = \frac{5.95}{0.42}$  泥岩的有效

隔水层厚度  $h > 14.16 \text{ m}$ ,底板隔水层总厚度  $h + h_1 + h_2 = 14.6 + 16 + 5 = 35.16 \text{ m}$ ,取36m。

按突水系数法计算出的底板有效隔水层—硬石膏矿柱总阻水能力  $Z_{\text{总}}$  为  $0.22 \times 39.66 = 8.73 \text{ MPa}$ 。而-600m水平采矿时矿层底板东马鞍山组下段灰岩的水头高度为607m,水压  $P_w$  为  $5.95 \text{ MPa}$ 。  $Z_{\text{总}} > P_w$ ,很明显-600m水平的石膏层矿柱的总阻水能力,明显大于东马鞍山组下段岩溶灰岩的水压值,说明石膏矿底部预留61m矿柱是没有突水危险的。(下转第41页)

表 3 回灌试验成果表  
Table 3 Recharging test results

井号	回灌试验时间	稳定 时间/h	静止水位(回灌 试验之前)/m	动水 位/m	水位降深 (上升)/m	涌水量 /m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	回水量 /m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	含水层 厚度/m	影响半径/m	井径 r/m
井 6			25.90	28	下降 2.1			19.0	166	0.265
井 5	9.23.8~9.26.8	48	24.56	23.45	上升-1.11		16		100(试算假定)	0.265
井 4	72h		24.60	23.00	上升-1.60		18		100(试算假定)	0.265

平均回灌渗透系数: $K_{cp}'=\frac{11.78+16.98}{2}=14.38\text{m/d}$  ;

平均回灌影响半径: $R'=10s\sqrt{K}=10\times1.6\times\sqrt{14.38}=61\text{m/d}$ 。

4.3 干扰计算

4.3.1 干扰抽水单井抽水量计算

公式选择:承压水完整井公式:

$$Q=\frac{2.73\cdot K\cdot M\cdot S}{\lg\frac{R^3}{4\alpha^2r}}=\frac{2.73\times32.16\times19.0\times2.1}{3.79}$$
$$=38.51\text{m}^3/\text{h}$$

式中:2a——井间距,取井 3、井 6 抽水井间距 80m;  
R——影响半径,取计算值 166m;  
r——井径,取 0.265m;  
s——取井 6 降深值,取 2.1m。

4.3.2 干扰回水单井回水量计算

$$Q'=\frac{2.73\cdot K'\cdot M\cdot S'}{\lg\frac{R'^3}{4\alpha'^2r}}=\frac{2.73\times14.38\times19\times1.1}{\lg\frac{80^3}{4\times20^2\times0.265}}=\frac{820.48}{73.68}$$
$$=11.14\text{T/h}$$

式中:K'——平均回灌渗透值,取 14.38m/d;  
S'——单井回灌上升值,取 1.1m;  
R'——回灌影响半径,取计算值 61m,本区有观测孔实测资料,影响半径为 80m,计算值偏小,故取实测值。

2a'——回灌井间距,取 40m;  
r——井径,r=0.265m。

4.3.3 抽、灌井比例

抽灌井比例: $38.51\div11.14\approx4:1$   
即一眼抽水井设四眼回水井,二眼抽水井设八

眼回水井,另备用一眼,计九眼回水井,全区总井数十一眼(图 1)。

5 运行状况

本厂水源热泵系统

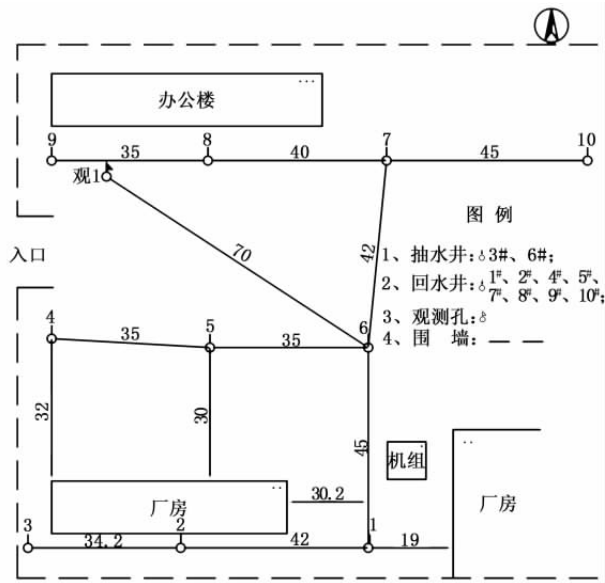


图 1 水源热泵井平面布置图

Figure 1 Planar layout of discharging and recharging wells

自 2007 年 11 月 10 日投入使用至 2009 年 2 月,已十五个月。使用井 3、井 6 两眼抽水井,单井出水量 40m<sup>3</sup>/h,水位降深值 5.0m,二眼抽水井水量已保证 80m<sup>3</sup>/h 的需要,全区先设回水井 6 眼,后增加 2 眼,计 8 眼回水井。平均单井回水量 10m<sup>3</sup>/h,所抽出之水已全部回于地下。自使用水源热泵系统以来,冬季供暖及夏季制冷运转正常,达到了预期效果。

参考文献:

[1] 中华人民共和国建设部.GB 50366-2005.地源热泵系统工程技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2005.  
[2] 中华人民共和国冶金工业部.GB 50296-99 供水管井技术规范[S].北京:中国计划出版社,1999.

(上接第 38 页)

7 结 论

根据上述计算结果,由于泥岩和硬石膏矿层的阻水强度不一样,算出的结果也不一样,分别为 61m、50m、36m,根据目前石膏矿井生产情况等综合分析,笔者认为硬石膏矿底板总隔水层厚度取 50m 为宜。

参考文献:

[1] 安徽恒源煤电股份有限公司.主采煤层顶、底板岩体工程地质特征及稳定性评价研究报告[R].安徽 芜湖:安徽煤田地质局第二勘探队,2003.  
[2] 雷化南.矿山岩体力学[M].北京:冶金工业出版社,1983.  
[3] 淮南煤炭学院.矿井地质及矿井水文地质[M].北京:煤炭工业出版社,1979.  
[4] 安徽煤田地质局第二勘探队.含山县陶厂石膏矿地质报告[R].安徽 芜湖:安徽煤田地质局第二勘探队,2005.