

# 某线煤矿采空区工程地质分析

陈则连,曹虎,刘振田

(铁道部第三勘测设计院 天津 300142)

**摘 要:**通过对煤层特点、埋藏深度、顶板条件及采空现状等方面的分析、计算,对沿线各矿采空区进行了工程地质评价。

**关键词:**采空区 工程地质 稳定性

拟建的某地方铁路位于毛乌素沙漠东南端。该地区蕴藏着丰富的优质精煤资源,部分地区形成露天煤矿。但是交通的不便不仅制约了煤炭资源的开采运输,也阻碍了经济的发展。由于铁路主要为运煤而建,这就不可避免地遇到煤矿采空区问题,因此分析研究煤矿及采空区的工程地质情况,合理评价并提出适宜的处理方法,选择既经济又合理的线位,具有非常重要的意义。

## 1 自然地理及沿线地质环境

该段铁路位于高原丘陵区,沿线沟谷纵横交错,断面多呈“V”字型,部分地区受沙漠影响,地表多为半固定沙丘或被流动性风沙所覆盖。本区基本构造形态为一简单的单斜构造,断层及褶皱等构造很少,岩层产状变化很小,沿线出露地层为三叠系中统、上统,侏罗系下统、中统,以及第三系上新统、第四系上更新统和全新统地层。主要含煤地层为侏罗系下统延安组,其中具有开采价值的煤层共 2—7 个煤组约 27 层煤。

## 2 煤层分布及特征

煤层产状与区域岩层产状基本一致,俗有“西埋东翘”之说,倾角一般 1°~3°,沿线路煤矿主要开采煤层 7 层,依次为 1—2<sup>上</sup>, 2—2, 2—3, 3—2, 4—2, 6—1, 6—2, 从目前开采资料看,煤层厚度一般为 1.98~6.5m,各煤层大多赋存比较稳定,厚度变化小、结构简单,各煤层情况见表 1 所示:

表 1 主要煤层分布情况

煤层编号	煤层厚度(m)	分布特点	层间距(m)
1—2 <sup>上</sup>	2.48~6.9	不稳定,主要分布在西线,埋藏浅	
2—2	1.82~9.8	稳定,结构简单,主要分布在中西线	27.0~36.5
2—3	1.34~4.1	较稳定,中部厚、南北薄,分布西线	15.0~30.0
3—2	4.8~7.8	较稳定,结构简单,主要分布在中西线	24.7~40.0
4—2	2.6~4.1	稳定,结构简单,全区均有分布	18.2~35.8
6—1	1.2~4.0	较稳定,东线埋藏浅,均有开采	21.0~35.0
6—2	2.53~6.0	较稳定,东线埋藏浅,均有开采	16.0~18.5

## 3 各煤层顶板岩性及物理力学特征

沿线含煤地层大部分被第四系风积沙、黄土及第三系泥质粉砂岩、砂质泥岩和钙质胶结疏松的含砾砂岩所覆盖,一般风积沙厚 0.0~35.0m,新黄土厚约 0.0~25.0m,第三系基岩厚 1.0~28.0m。各煤层顶板岩性以砂质泥岩、粉砂岩为主,次之为泥

岩、中细粒砂岩等,各主要煤层的顶板性质见表 2:

表 2 煤层顶板岩性及主要物理力学指标

煤层号	1—2 <sup>上</sup>	2—2	2—3	3—2	4—2	6—1	6—2
顶板岩性	粉砂岩 砂质泥岩	砂质泥岩	细砂岩 砂质泥岩	砂质泥岩 砂质泥岩	砂质泥岩 泥岩粉砂岩	砂质泥岩	泥岩 粉砂岩
抗压强度 (MPa)	8.58~52.8	39.0~47.6	23.5~42.5	29.6~45.0	16.6~42.4	57.0	18.54~75.6
比重 kN/m <sup>3</sup>	24.5~26.2	25.8~26.3	26.4~26.7	26.3~26.7	26.3~26.7	26.7	26.3~26.8
容重 kN/m <sup>3</sup>	23.1~23.6	21.3~23.1	24.2~24.0	21.4~23.1	23.4~24.0	24.3	23.1~26.0
孔隙率 (%)	5.84~12.27	11.15~19.35	10.09~12.12	11.59~15.73	9.47~11.34	9.32	2.94~13.35
吸水率 (%)	1.03~5.52	4.48~5.08	2.06~4.87	5.13~7.27	2.88~5.87	3.19	4.99
软化系数	0.59	0.34~0.80	0.24~0.88	0.72	0.69	0.38~0.98	0.66
正应力 (MPa)	4.18	2.06	4.18~5.20	4.01~6.12			
剪应力 (MPa)	8.36	6.12	8.06~11.22	8.16~13.15			
内摩擦角 (°)	34.67	36.62	32.08~34.67	32.2~37.8		35.6	35.6
凝聚力 (kPa)	6335	4529	6395~7466	5100~10510		7038	7040

各煤层底板岩性多以粉细砂岩、砂质泥岩及泥岩为主,抗压强度 28.4~50.0MPa,比重 24.8~26.9kN/m<sup>3</sup>,容重 23.1~26.0kN/m<sup>3</sup>,软化系数 0.36~0.92,为硬岩类。

## 4 煤层其它特点

### 4.1 瓦斯

从煤矿普查试验资料及开采情况看,沿线煤层瓦斯含量很低,瓦斯成分中可燃气体都<52%,均在二氧化碳—氮气带及氮气—沼气带,矿井开采过程中,井下照明多用电石灯,并以机采、炮采为主,自然通风和机器换风两种通风方式,从未发生瓦斯爆炸事故,属低沼气煤层。

### 4.2 煤尘

影响煤尘爆炸的主要因素是煤中挥发分,煤的挥发分含量越高,煤尘爆炸性危险也越大,从收集试验资料看,井田内各煤层

可燃基挥发分产率(煤尘爆炸指数)均在 30% 以上,因此煤尘有爆炸的可能。

#### 4.3 煤的自然

井田内各煤层变质程度低,挥发分产率及丝炭含量较高,且含有黄铁矿结核,给煤的自然提供了条件。从取芯测定结果看,煤的自然倾向等级为易自然~很易自然,根据经验资料,开采出的煤堆放厚度约 2.5m 以上,在夏季堆放时间 30 天之久便有自然现象。从沿线部分地区煤层自然露头多有自然现象就证明了这一特征。

#### 5 沿线主要采空区情况

贯通方案和比较方案影响线路的主要采空区分别见表 3、表 4:

表 3 贯通方案采空区现状及主要特点

序号	开采煤层	煤层厚 (m)	开采形式	回采率 (%)	目前状况	顶板岩性	工程种类	埋深 (m)
1#	1-2 <sup>上</sup>	3.0	长壁式	70	正在开采	砂质泥岩	路基	73~80
2#	2-3	3.3	长壁式	65	正在开采	砂质泥岩	路基	82
3#	4-2	3.5	巷道	3×3m	三条	砂质泥岩	路基	32~62
4#	5-1	4.0	残柱式	45	已采空	泥岩	隧道	0~30

表 4 比较方案采空区现状及主要特点

序号	开采煤层	煤层厚 (m)	开采形式	回采率 (%)	目前状况	顶板岩性	工程种类	埋深 (m)
5#	1-2 <sup>上</sup>	2.8	残柱式	30	已采空	砂岩	桥梁	18
6#	2-2	2.5	残柱式	35	正开采	砂质泥岩	路基	35
7#	2-2	5.9	残柱式	40	正在开采	砂岩	路基	53~65
8#	2-2	5.6	残柱式	35	正在开采	砂岩	桥梁	57~75
9#	2-2	5.5	残柱式	45	已报废	砂岩	桥梁	30~76
10#	2-2	5.6	残柱式	50	已报废	砂岩	路基	35~62
11#	2-2	5.6	房柱式	40	正在开采	砂岩	路基	102
12#	2-2	5.4	房柱式	35	正在开采	砂岩	路基	88~103
13#	6-2	5.6	残柱式	40	正在开采	砂岩	路基	7~35
14#	6-2	5.1	残柱式	40	正在开采	砂岩	路基	28~47
15#	6-2	5.6	残柱式	35	正在开采	砂岩	路基	21~45
16#	6-2	4.5	残柱式	40	正在开采	砂岩	路基	11~63
17#	3-2	5.6	残柱式	40	已报废	砂质泥岩	桥梁	60~105
18#	3-2	6.5	残柱式	40	正在开采	砂质泥岩	桥梁	35~40

#### 6 稳定性分析

首先粗略估算一下安全开采深度。已知煤层倾角为  $1^\circ \sim 3^\circ$  度,开采厚度 2.0~4.5m,建筑物安全系数按  $K=75$ ,则安全开采深度为 150~337.5m。从表 3、表 4 所列采空区埋深看,均小于安全开采深度,采空区可能引起地表建筑物变形,这就需要对采空区顶板稳定性、建筑物基底稳定性、以及地表的沉降情况进行进一步的分析。

我们知道,矿层未开采前岩体内部的应力是平衡的,一般情况下只存在垂直压应力和水平压应力,矿层开采后,采空区周围岩体失去平衡,围岩应力发生变化。顶板的塌落一般是受拉应力作用,采空区侧壁主要受压应力作用,四角受剪应力作用。如图

所示采空区,其顶板岩块 ABDC 在重力  $G$  作用下将会下沉,两边的楔形体 ABM 和 CDN 也对其施以水平压力  $P$ ,因此 AB 和 CD 两个面上存在着因  $P$  的作用而产生的摩擦力  $F$ (以下我们把煤矿各工作面视为小采空区进行计算)。

##### 6.1 顶板稳定性分析

假设以采空区单元长度为计算单元体,则作用在顶板上的压力为:

$$Q = G - 2F$$

$Q$ —采空区单位长度顶板上所受的压力 ( $\text{kN/m}^2/\text{m}$ )

$G$ —采空区单位长度顶板上岩层的总重力。设采空宽度为  $2a$ ,则

$$G = \gamma \cdot H \cdot 2a (\text{kN/m}^2/\text{m})$$

其中  $\gamma$ —上覆岩层密度, ( $\text{kN/m}^3$ ) (沿线平均为  $\gamma=25.5$ )

$H$ —采空区顶板埋藏深度 (m)

$F$ —采空区单位长度侧壁摩擦力 ( $\text{kN/m}^2/\text{m}$ ),  $F = P \tan \varphi$ , 其中  $\varphi$  为岩层的内摩擦角,沿线平均为  $35^\circ$ 。

$P$  为楔形体 ABM 和 CDN 作用在 AB 或 CD 面上的主应力,当  $P$  取最大值时,

$$P = \frac{1}{2} \gamma H^2 \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2})$$

则:

$$Q = \gamma H [2a - H \tan \varphi \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2})]$$

当  $H$  大到某一深度时,顶板上方岩层的自拱力恰好能保持自然平衡(即  $Q=0$ )而不塌陷,这时的  $H$  称为临界深度  $H_0$ ,则

$$H_0 = \frac{2a}{\tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \tan \varphi}$$

将各矿采空区宽度及各煤层顶板岩层的内摩擦角(分别代入公式就得到各矿的  $H_0$ )。从表 3、表 4 看,临界深度  $H_0$  可按三种类型开采方式计算:长壁式开采,工作面宽度 150m,则  $H_0 = 789\text{m}$ ;残柱式和房柱式开采工作面宽 16m,留煤柱 6m,则  $H_0 = 84.2\text{m}$ ;单独巷道宽 3m,则  $H_0 = 15.8\text{m}$ 。

##### 6.2 采空区地基稳定性分析

由于表 3、表 4 中各矿采空区范围较大,线路均位于影响范围内,我们只对建筑物地基稳定性做进一步的近似计算。

设建筑物基底的单位压力为  $R$  ( $\text{kN/m}^2$ ),则作用在采空区顶板上的压力  $Q$  为:

$$Q = G + 2aR - 2F$$

$$= \gamma H [2a - H \tan \varphi \cdot \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2})] + 2aR$$

当  $H$  大到某一深度时,即  $Q=0$ ,则:

$$H_0 = \frac{2a\gamma + \sqrt{4a^2\gamma^2 + 8a\gamma R \tan \varphi \cdot \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2})}}{2\gamma \tan \varphi \cdot \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2})}$$

位于采空区上建筑物类型的不同,单位的基底压力  $R$  也不一样,本线主要有桥梁和一般路基(路堑)工程。桥梁按 32m 预应力混凝土梁,17m 高重力式圆端板式墩三层基础(基础底宽  $555 \times 732\text{cm}$ ),则墩台基础作用在采空区顶板上的单位压力  $R=497 \text{ kN/m}^2$ ;一般路基(路堑)工程基础单位压力按  $R=100 \text{ kN/m}^2$ 。根

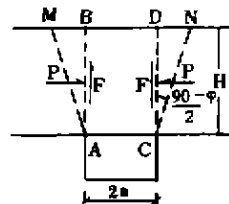


图 1 某采区受力分析图

据三种不同类型采空区分别计算(已知取  $\gamma=25.5$ ,  $\varphi=35^\circ$ )。长壁式开采段均为一般路基工点,则  $H_0=794\text{m}$ ;房柱式和残柱式开采对于路基工程  $H_0=84.8\text{m}$ ,对于桥梁工程  $H_0=101\text{m}$ ;对于巷道上方的路基工程  $H_0=19\text{m}$ 。

### 6.3 对比分析

当采空区埋深  $H < H_0$  时,顶板及地基不稳定;当  $H_0 < H < 1.5H_0$  时顶板及地基稳定性差;当  $H > H_0$  时,顶板及地基稳定。上述稳定性的计算结果,是把采空区单独工作面视为小型采空区计算的,各采空区埋深就已小于或接近临界值,而沿线各矿采空范围均大于计算采用面积。由此可判断其顶板及地基均不稳定,对铁路工程有影响。而3#矿的巷道对于路基工程来说,埋深大于临界值,可判断其顶板及地基基本稳定。从沿线调查访问结果也可以了解到,已回采废弃的煤矿采空区顶板多不稳定,地表均有变形现象,而巷道一般无塌陷现象,仅在井口部分支护,从而验证了这一结论。

### 6.4 地表最大下沉值的预测

从上述分析结果看,采空区顶板及该范围内的地基不稳定,在一定时间内会发生沉降,采空区地表移动停止时的最大下沉值就是一个重要参数,因各类建筑物对沉降量的要求不同,最大沉降量的大小也就关系到各类建筑物基底下采空区是否需要处理或处理多少的问题,所以有必要再对各采空区的最大下沉值进行预测。

沿线各矿煤层倾角  $1^\circ \sim 3^\circ$ ,一般为首次采动非充分式采动,可根据公式分别计算。

首次采动时非充分采动公式如下:

$$\eta_0 = q_0 m \cos \alpha \sqrt{n_1 \cdot n_2}$$

$$n_1 = 0.9 \frac{D_1}{H_0}$$

$$n_2 = 0.9 \frac{D_2}{H_0}$$

$q_0$ —下沉系数,根据经验值,长壁式开采全面陷落,初次采动

$q_0=0.7$ ,条带式开采  $q_0=0.1$

$m$ —矿层的法线厚度(m)

$\alpha$ —矿层倾角

$D_1, D_2$ —采空区沿倾斜方向与走向方向的实际尺寸(m)

$H_0$ —平均开采深度(m)

根据各矿参数分别计算  $\eta_0$ (mm),结果见表5。

表5 各采空区地表最大下沉预测值

矿号	1#	5#	6#	7#	8#	9#	12#	13#	14#	15#	16#	17#
$\eta_0$	39	11	6.3	4.6	10	10.1	16	12	9.1	13.6	7.5	14.3

按照表5结果,根据建筑物种类和等级墩沉降要求的不同,可对采空区采取相应对策。

## 7 采空区的处理

### 7.1 处理范围

一般包括路基(路堑)本体或桥基础宽度、维护带及保护矿柱三部分。建筑物基础以外保护矿柱宽度  $L$  按下列公式计算:

$$L = H_1 \cdot \cot \beta' + H_2 \cdot \cot \varphi$$

$$= H_1 \cdot \sqrt{\cot^2 \beta \cdot \cos^2 \theta + \cot^2 \delta \cdot \sin^2 \theta} + H_2 \cdot \cot \varphi$$

$H_1$ —顶板岩石厚度

$H_2$ —第四系覆盖层厚度

$\beta'$ —岩石移动角

$\varphi$ —第四系移动角

$\beta$ —下山移动角

$\delta$ —上山移动角

$\theta$ —保护建筑物边界与矿层走向线构成的锐角

因煤层近于水平,保护建筑物边界与矿层走向线构成的锐角  $\theta$  取  $90^\circ$ ;岩石上下山移动角只取一个,根据地方经验为  $\beta = \delta = 70^\circ$ ,第四系覆盖层移动角  $\varphi = 45^\circ$ 。则

$$L = H_1 \cdot \cot \beta + H_2 \cdot \cot \varphi$$

根据已知的各矿  $H_1$  和  $H_2$  值,就可算得各矿的保护矿柱宽度,根据开采方式和采空现状的不同,维护带可选择 15m 或 30m。其中 1# 和 2# 矿采用长壁式开采,回采率较高,应采用 30m 维护带;其它矿中已经采空废弃的 8#、9#、16# 矿可采用 15m 维护带;其它采用残柱式开采方式正在开采的各矿可下加维护带,只处理建筑物基础宽度和保护带宽度。

### 7.2 处理方法

根据各矿现状及开采方式的不同,可采用不同的处理方法。其中 5# 矿埋藏浅井有两层采空区,需注浆处理;8#、9#、16# 矿均已回采报废,井下情况复杂,也需采用注浆处理的方法,其中 8# 矿井下残留煤柱着火,灭火时已采用钻孔灌沙的方法填充部分采空区,灭火钻孔可以用来注浆;4# 矿采空区位于隧道洞顶之上,可不处理,但在隧道开挖时注意及时防护;隧道洞身位置的 6—2 层煤,在开挖时应注意煤尘的爆炸性和煤层的自燃性;其它正在开采阶段的煤矿,井下巷道及采空区尚未破坏,可以采用井下回填块石的方法处理,这样可以充分利用本地石料及劳动力资源。对于桥梁工程,在采空区较浅时可采用桩基础,将桩尖置于采空区底板之下。

**办好《西刊》为西部大开发服务!**