

地下开采 对地表的影响

波兰 A. 薩武斯托維奇著

煤炭工业出版社

內 容 提 要

本書从岩石力学的观点扼要地叙述了波兰科学工作者研究地下开采对地表影响理論上的成就，同时也总结了他們在实际工作中的經驗。为研究在城市和工业建筑物的地下采煤的科学工作者和工程师提供了重要的理論根据和实际資料。

本書是从波兰 A. 薩武斯托維奇所著的“岩石力学”第一册中节譯的。

ANTONI SAŁUSTOWICZ

WPŁYW ROBÓT GÓRNICZYCH NA
POWIERZCHNIĘ TERENU

Wydawnictwo górniczo-hutnicze 斯大林諾勒得 1955

波兰矿冶出版社1955年版譯

1124

地下开采對地表的影响

林 国 厦 譯

*

煤炭工业出版社出版(社址: 北京东长安街煤炭工业部)

北京市書刊出版业营业許可証出字第 084 号

煤炭工业出版社印刷厂排印 新华書店发行

*

开本 787×1092 公厘 $\frac{1}{32}$ 印张 $2\frac{3}{16}$ 字数42,000

1959年5月北京第1版 1959年5月北京第1次印刷

統一書号: 15035·820 印数: 0,001—4,000 册 定价: 0.30 元

目 录

第一章 岩石移动的微分方程.....	3
第1节 地下开采对地表影响的一般特征.....	3
第2节 岩石垂直移动的微分方程.....	6
第3节 岩石移动的积分方程.....	10
第二章 最后形成的下沉盆地的剖面方程.....	14
第1节 影响曲线.....	14
第2节 影响曲线与盆地剖面的关系.....	16
第3节 影响曲线与嘎烏斯曲线的相似性.....	18
第4节 主要影响与次要影响.....	19
第5节 主要影响范围.....	21
第6节 最后形成的盆地的剖面方程.....	23
第7节 下沉盆地的地面曲率.....	24
第8节 在任意范围内开采煤层所引起的最终下沉.....	26
第三章 下沉盆地表面作为弹性基座上的弯曲岩层.....	29
第1节 采空区边棱上部岩层的弯曲.....	29
第2节 下沉绝对值.....	32
第3节 下沉盆地的表面曲率.....	34
第4节 下沉盆地边部的斜率.....	37
第5节 水平变形.....	39
第6节 实际应用.....	39
第四章 时间对下沉盆地形成的影响.....	43
第1节 随时间而变化的地表点的下沉过程.....	43
第2节 下沉速度系数值的决定.....	46
第3节 等速推进的开采工作面上部的下沉盆地剖面.....	47

第4节	在被保护建筑物的地下从中央向二侧开采煤层时的地面曲率.....	54
第五章	决定地面的水平变形值	55
第1节	地面变形的諸指数.....	55
第2节	水平变形的系数.....	58
第3节	岩石内部水平移动量的分布	62
第4节	岩石内部的影响范围.....	64
第5节	水平变形系数的一般值.....	65
第6节	开采影响的分类.....	66

第一章 岩石移动的微分方程

第1节 地下开采对地表影响的一般特征

研究地下开采对地表影响的问题，目前不仅在波兰，而且在其他国家中也有其特殊意义。没有建筑物的地区的地下有用矿物被逐渐地开采完了，因此产生了开采住宅区和城市的地下矿床的必要性，在开采这些矿床时还要保护地面建筑物，至少是要保护其中的一部分或有价值的建筑物。因此许多国家的学者和工程师都从事研究与其有关的一切理论和实际问题。在波兰从事于这方面科学研究的有：W. 布得雷克(W. Budryk)、St. 克诺特(St. Knothe)、T. 柯赫曼斯基(T. Kochmański)、Z. 柯伐尔契克(Z. Kowalczyk)、J. 里特威尼兴(J. Litwiniszyn)和A. 萨武斯托维奇(A. Sałustowicz)等。

矿床中的某部分规定地区采完后，引起采空区冒落。随着采空面积的愈益扩大，也扩大了冒落的高度，然而仅限于某种程度。因为岩石破碎后扩大了自己的体积；因此当冒落达到某种高度时，冒落高度的增长即开采有用矿物后形成的空间被全部充填了。

在波兰煤田冒落高度约等于矿床厚度的四至六倍。在这个高度以上的所有岩层已不再冒落，仅发生破裂而已，这叫做破裂区。它的高度与冒落区高度相等。在破裂区以上的地带是直达地表的弯曲区。因此在一定深度下用冒落法管理顶板的采空区上部形成了三种区域即：冒落区、破

裂区和弯曲区。在破裂区較浅部分則波及地表，因而浅部开采的地面往往形成坍陷坑。从而得出重要結論：浅部开采对地面房屋及其他建筑物的危害性最大，因为地面出現坍陷坑和岩石的破裂。在較深的地下开采时，仅是地面下沉却不出現坍陷坑和岩石的破裂。

地面坍陷坑的产生与所采矿床頂板岩石的性質及种类有关。

根据 Z. 克伦查尔 (Z. Klenczar) 的理論：波兰上西里西亞煤田的煤层埋藏深度如果在 50 公尺以上，且頂板为頁岩时則不产生下沉盆地；如果頂板岩石为砂岩时，那末它的临界深度較大为 100 公尺。

破裂、裂縫和位移强烈地出現在开采的下部边界的部分地区。Z. 克伦查尔認為这时甚至开采深度达 300 公尺时也能出現上述現象。但是在相反方向，当煤层走向方向开采深度达 150 公尺时也會出現上述現象。

开采埋藏深度大于 150 公尺的水平煤层时，煤层部分采空区上部地面出現所謂“下沉盆地”（图 1）。它們所波及的面积大于被采空部分 AB 。理論上認為开采影响波及无止境，实际上它的影响范围是有限的，即所謂“影响范围角 β ”。欲求开采影响波及的范围，則从 A 和 B 点的边緣作一 β 角，引二直綫 AH 和 BF ； F 和 H 二点之間所包括的地区即为开采煤层 AB 部分的影响范围。在波兰上西里西亞煤田中煤层影响角 β 一般在 55° 到 70° 之間，或更大些。其下限大都适用于頂板为砂岩的煤层中，而上限則适用于頁岩，在較新煤层中 β 角近于 45° 。

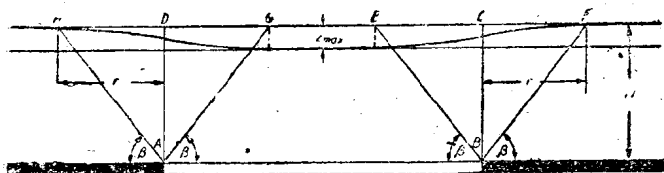


图 1 下沉盆地

我們可以将下沉盆地分为三个部分：

一、中部：即下沉盆地内部 $E G$ 二点之間。在这一地区中，地面下沉最大值 z_{max} ，然而却是平坦的，因此对地面建筑物沒有危害性。在这一范围内位于地面上的建筑物不受破坏。

二、内部边缘地区：即沿回采工作綫内侧方向 (EC 、 GD 带状地区)，这里的地面下沉較小

$$\frac{1}{2} z_{max} < z < z_{max}.$$

然而却不是平坦的，因此产生对建筑物的破坏性。这一地区的地面被弯曲成凹形，因此这里的建筑物受挤压力量的作用，尤其是对下列建筑物的危害性更大，如：管道、铁路等，引起它們的压杆受力作用。

三、外部边缘地区：沿回采工作綫的外侧方向 (CF 和 DH 带状地区)。这里的地面下沉不显著，然而是不平坦的。

$$0 < z < \frac{1}{2} z_{max}.$$

这一地区的地面受弯曲后向上鼓起。因此使建筑物受

拉力作用,对建筑物同样有严重影响,象对铁路、管道一样。

关于地面变形的大小、形状、种类及其对建筑物的危害程度由下列数值决定:

1. 地面最大下沉值;
2. 地面最大斜率(傾斜);
3. 最大水平相对移动量;
4. 最大曲率。

要計算这些数值及找出其出現地点,则需要下沉盆地剖面的曲綫形状,亦即求出这一曲綫方程。

这一問題最先在 W. 布得雷克教授指导下由 St. 克諾特在自己的博士論文中,根据所謂影响曲綫的理論,用几何方法解决了(1950年)。以后(1952年)这一問題由 J. 里特威尼兴和 A. 薩武斯托維奇用不同的方法解决了。与 St. 克諾特的方法不同, J. 里特威尼兴在求得岩石移动的微分方程时根据連續介質力学的理論,一方面利用了物質不灭的理論,另一方面則根据水平移动量与垂直移动量的一次导数成正比的假說。而 A. 薩武斯托維奇則从弹性理論出发,他假設了在弹性基座上的下沉盆地表面与自己层面的弯曲形状相适应。

下面将按次序介紹 J. 里特威尼兴、St. 克諾特和 A. 薩武斯托維奇等所求出的下沉盆地方程,然后介紹确定水平移动量的方法和按 W. 布得雷克理論所求得的实际效果。

第 2 节 岩石垂直移动的微分方程

J. 里特威尼兴于1952年发表了解决岩石垂直移动量的

方法。由于开采了煤层的某一部分，引起了地面的变形，这是岩石的每一个质点移动的结果。本节将研究就已知点所在位置和时间所产生的移动现象。为此目的我们假设使用直角坐标系，其 z 轴为向上垂直的轴，而 x 和 y 轴则在水平煤层的上部表面。我们将移动的已知点分别地分为平行于 $x y z$ 各坐标轴的分量：

$$u(x, y, z, t)$$

$$v(x, y, z, t)$$

$$w(x, y, z, t)$$

其中每一坐标值都为该已知点坐标 x, y, z 及 t 时间的函数。

在变形后每一点的坐标也都改变了，它们的分量将为：

$$x + u(x, y, z, t)$$

$$y + v(x, y, z, t)$$

$$z + w(x, y, z, t)$$

变化了的分量值为各点位置及时间 t 的函数。

设移动前的这一部分岩石体积为 V ，移动后这部分岩石体积的增量为 ΔV 。

对于这一部分岩石我们利用物质不灭理论，即假设由于移动的结果它们的物质不因而不发生变化，这时得出 V 近于零时的下列关系：

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = f(x, y, z, t)$$

数值 $f = \frac{\Delta V}{V}$ 是真正的体积膨胀值，它是分量值及时

間的函数。解以下問題時，我們將認為岩石是不可壓縮的介質，為此假設

$$f(x, y, z, t) = 0$$

也就是說物質不滅方程將具有以下形式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

除或然率理論外，J. 里特威尼興還假設了水平移動量與垂直移動的導數關係，將其概括於阿維爾申所建議的經驗方程，其方程為：

$$\begin{aligned} u + B(x, y, z, t) \frac{\partial w}{\partial x} &= 0 \\ v + D(x, y, z, t) \frac{\partial w}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

式中係數 B 和 D 為坐標 x, y, z 及時間 t 的函数，除此外它們還依介質的性質而變。然後再設水平方向的岩石為單質的，且不隨時間的變化而變化。為此係數 B 和 D 將相等，僅依 z 而變。

$$B(z) = D(z) \quad (3)$$

自 (2) 式得

$$\begin{aligned} u &= -B(z) \frac{\partial w}{\partial x} \\ v &= -B(z) \frac{\partial w}{\partial y} \end{aligned} \quad (4)$$

將上述關係代入 (1) 式得

$$B(z) \cdot \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (5)$$

該微分方程是二次方拋物綫型方程，与导热曲綫相似。故此現象和由矿山开采所引起的岩石分子移动的現象之間有极相似之处。由上述方程的共同性得出这样的結論。

$$\text{令} \quad \frac{1}{B} = A$$

則(5)式將为

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = A(z) \frac{\partial w}{\partial z} \quad (6)$$

于上式中用复变数代之則得

$$z = \varphi(\zeta) \quad (7)$$

設函数 φ 是可逆的，則

$$\zeta = \Psi(z) \quad (8)$$

因此得

$$w(x, y, z) = w[x, y, \varphi(\zeta)] = \bar{w}(x, y, \zeta)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} \quad \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2}$$

$$\frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\partial \bar{w}}{\partial \zeta} \cdot \frac{d\Psi}{dz}$$

將已計算数值代入(6)式

$$\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} = A(z) \cdot \frac{d\Psi}{dz} \cdot \frac{\partial \bar{w}}{\partial \zeta} \quad (9)$$

使函数 $\zeta = \Psi(z)$ 适合以下条件

$$A(z) \cdot \frac{d\Psi}{dz} = 1 \quad (10)$$

除此外假设 当 $z=0$ 时 $\Psi(0)=0$

而

$$\Psi(z) = \int_0^z \frac{ds}{A(s)} \quad (11)$$

于是

$$\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} = \frac{\partial \bar{w}}{\partial \zeta} \quad (12)$$

在薄煤层的情况下, 岩石的质点在平行于某种已知平面的平面上移动, 而在垂直于这些平面上的诸点的移动是相同的。这种情况发生于很长的工作面上。这种情况下的移动是不受坐标轴 y 的影响, 比如說在平行于 y 轴的工作面上, 而方程 (12) 将有如下形式:

$$\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} = \frac{\partial \bar{w}}{\partial \zeta} \quad (13)$$

解 $\bar{w}(x, \zeta)$ 并代入 (2) 式得

$$\bar{w}(x, \zeta) = \bar{w}(x, \Psi(z)) = w(x, z).$$

方程 (12) 或 (13) 为由于开采煤层所引起岩石垂直移动的微分坐标方程。

第3节 岩石移动的积分方程

假设煤层已采至 $x=0$ 的边界。然后自零点向右 ($x \geq 0$) 为已采空区域, 自零点向左 ($x \leq 0$) 为未采煤层。从开采工作面在零点停止推进的瞬息起, 经过一定长的时间后, 则可以假设在整个岩石中的移动已经稳定了, 而当 $\zeta=0$ 时诸

垂直移动分量为常数并等于:

当 $x \geq 0$

$$\overline{w}(x, 0) = \overline{w}_0$$

而当 $x < 0$

$$\overline{w}(x, 0) = 0$$

在边部条件下将方程(13)用以下形式表示

$$\overline{w}(x, \zeta) = \frac{1}{2\sqrt{\pi\zeta}} \int_0^\infty \overline{w}_0 e^{-\frac{(s-x)^2}{4\zeta}} \cdot ds \quad (14)$$

引用新变数

$$\lambda = \frac{s-x}{2\sqrt{\zeta}}$$

此时

$$d\lambda = \frac{ds}{2\sqrt{\zeta}}$$

及

$$\overline{w}(x, \zeta) = \frac{\overline{w}_0}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty e^{-\lambda^2} d\lambda \quad (15)$$

$$-\frac{x}{2\sqrt{\zeta}}$$

将(11)式中 ζ 代入, 则得

$$\overline{w}(x, z) = \overline{w}(x, \Psi(z)) = \frac{\overline{w}_0}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty e^{-\lambda^2} d\lambda \quad (16)$$

$$-\frac{x}{2\sqrt{\int_0^z B(s)ds}}$$

最后的方程说明垂直移动分量 w 作为坐标值 $w(x, z)$ 的函数。图 2 表示了与 ζ 值相应的在各种深度下的岩石移动情况。

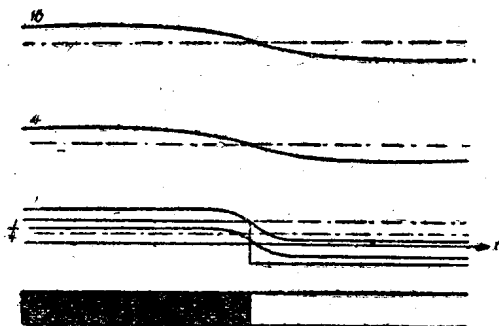


图 2 采空区上部岩石的移动

在方程(4)的基础上我们可以通过微分得到水平移动的各分量。在薄煤层时 $v=0$ 及

$$u = -B(z) \frac{\partial w}{\partial x}$$

相对 x 微分等式(15)则得水平移动的各分量:

$$u(x, z) = -B(z) \frac{\bar{w}_0}{2\sqrt{\pi}\zeta} \cdot e^{-\frac{x^2}{4\zeta}} \quad (17)$$

或

$$u(x, z) = -\frac{\bar{w}_0}{2\sqrt{\pi}} \cdot \frac{B(z)}{\sqrt{\int_0^z B(s) ds}} e^{-\frac{x^2}{4 \int_0^z B(s) ds}} \quad (18)$$

当工作面在平行于Y轴的某地停止时，则上式结果用于已知移动量。

现在我们研究这样的一种情况。工作面以等速向X轴方向推进。令工作面线为坐标原点。在这种情况下的下沉盆地边部条件将与上述情况不同，即当

$\zeta = 0$ 是

当 $x < 0$, $\bar{w}(x, 0) = 0$

当 $x \geq 0$, $\bar{w}(x, 0) = \bar{w}_0 (1 - e^{-\alpha x})$

式中 $\alpha > 0$ 是由工作面推进速度决定的常数。

积分方程(18)的现在形式为

$$\bar{w} = \frac{\bar{w}_0}{2\sqrt{\pi\zeta}} \int_0^{\infty} (1 - e^{-\alpha s}) e^{-\frac{(s-x)^2}{4\zeta}} \cdot ds \quad (19)$$

以此式代入

$$\frac{s-x}{2\sqrt{\zeta}} = \lambda$$

得

$$ds = 2\sqrt{\zeta} d\lambda$$

$$\bar{w} = \frac{\bar{w}_0}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \left[1 - e^{-\alpha(x+2\sqrt{\zeta}\lambda)} \right] e^{-\lambda^2} \cdot d\lambda$$

$$- \frac{x}{2\sqrt{\zeta}}$$

设

$$\lambda + \alpha\sqrt{\zeta} = v$$

将上式改变后得

$$\bar{w} = \frac{w_0}{\sqrt{\pi}} \left[\int_0^{\frac{x}{2\sqrt{\zeta}}} e^{-\lambda^2} \cdot d\lambda - e^{(2\zeta - \alpha x)} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{\zeta}} + \alpha\sqrt{\zeta}} e^{-\lambda^2} \cdot d\lambda \right]$$

开采时垂直移动分量由二部分组成：第一积分与停止推进工作面时的移动相应；而第二积分则说明了依参数 α 而决定的工作面推进速度的影响。

J. 里特威尼兴所得结论并不完全和 St. 克诺特的结论相一致，后者将在下章介绍，因其主要影响范围值 r 为

$$r = 2\sqrt{\pi\zeta}$$

上述二理论均已在实际观察中被完全证实了。

第二章 最后形成的下沉盆地的剖面方程

第1节 影响曲线

St. 克诺特在博士论文中解决矿山开采对地面影响这一问题时引用了影响曲线这一概念。

我们假设，地面一点 A 的下方 H 公尺深处有一水平煤层，其厚度为 m 。由于开采了面积为 S 的煤层的一部分，A 点有某种程度的下沉。为了求出这下沉值，我们用下列方法解决：

将面积为 S 的煤层分为许多小块，每一小块的面积为 ΔS_i 。由于开采这个小面积煤层的结果引起了 A 点的下沉，其值为

$$\Delta w_i = \Delta S_i \cdot g(x_i, y_i) \quad (20)$$

式中 $g(xy)$ 是 xy 平面上任意点的某种函数，其 x_i, y_i 为 Δs_i 面积上任意点的坐标值。

我们从求和法则知道点的完全下沉可作为开采各小面积 Δs_i 所引起的下沉的总和极限。

$$\sum_{i=1}^{i=n} g(x_i, y_i) \Delta s_i$$

式中 Δs_i 近于零。

双重积分是在面积 S 内的 $g(x, y)$ 函数的极限

$$w_k = \iint_S g(x, y) ds \quad (21)$$

从理论上说来点下沉的最后的最大值 w_{max} 是由于在从零到无限大的范围内开采了全部煤层经过相当时间后而引起的结果。

$$w_{max} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g(x, y) dx \cdot dy \quad (22)$$

最后的最大下沉值 w_{max} 与煤层厚度 m 及开采方法有关。

$$w_{max} = \eta \cdot m$$

式中 η 是小于一的系数。用冒落法管理顶板时其值最大，用充填法开采时其值较小，而用水砂充填法开采时和用带式部分开采法时其值最小。

只有在开采深度不大时，它才能对最大下沉值发生影响。在较大深度开采时，其冒落区和破裂区不波及地面，因而深度的影响很小，在实际上可略而不计。

解决这一问题的下一步骤是视其为薄煤层，设平行于