

急倾斜矿体开采地表沉陷与概化地应力研究

贺跃光¹, 颜荣贵², 曾卓乔¹

(1. 中南大学 资源环境与建筑工程学院, 湖南 长沙 410083;

2. 长沙矿冶研究院, 湖南 长沙 410012)

摘要: 急倾斜矿体开采地表沉陷规律不同于自重应力作用下的煤矿地表移动规律的特点, 研究结果表明急倾斜矿体开采地表沉陷的主控因素为: 残余构造应力场与成矿应力场、急倾斜矿体的产状、覆岩体结构与节理裂隙的空间展布规律、开采放矿与顶板管理方法。此外, 提出了研究急倾斜矿体开采的地表移动规律时必须从煤矿地表移动规律基础上, 引入以残余构造应力为主要影响因素, 同时包含倾角、岩体结构、放矿规律的 4 大主控因素; 在此基础上, 推导了急倾斜崩落法开采矿山地表移动与概化地应力的关系式, 并通过实例加以验证, 为多主控因素综合机理研究奠定了基础。

关键词: 构造应力; 自重应力; 急倾斜矿体; 沉陷; 概化地应力

中图分类号: TD1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9792(2001)02-0122-05

对水平缓斜煤层开采地表沉陷及移动规律, 国内外已进行了众多研究, 建立了各种开采地表移动预计方法, 有效地指导了建筑物、水体、铁路下的压煤开采。“三下开采”实践又使地表移动规律研究取得了长足的发展, 我国已建立了以概率积分法、负指数函数法、典型曲线法为基础的地表移动预计体系^[1~4]。

“三下开采”实践也暴露了我国开采地表移动规律与地表预计方法研究急待解决的问题^[5,6]: 金属及其它非煤矿山“三下采矿”急需深入开展地表移动规律及地表变形预计方法研究。金属矿山具有与沉积煤矿不同的岩体、地质、开采条件与采矿方法, 使对急倾斜崩落法开采冶金矿山地表开采沉陷规律的研究更显突出。如武钢矿业公司开采的鄂东接触交代矽卡岩型磁铁矿床, 无论是金山店铁矿 I 区、II 区、IV 区, 还是程潮铁矿东区、西区, 由于其产状急倾斜, 残余构造应力较大, 因而无法获得与地表沉陷规律相适应的采矿设计所需地表移动角。其它条件与其类似的铁矿山, 如镜铁山铁矿、弓长岭地下矿、玉石洼铁矿、张家洼铁矿也都属于此列^[5]。而对于沉积锰矿, 随着开采由浅部向深部转移, 一些主要锰矿山都存在倾角变陡, 残余构造应力显现, 大规模破坏性地压前兆和地表沉陷变异渐趋显著的现象; 倾角大于 55°的急倾煤层开采地表移动预计方法, 在我国

“三下采煤”规程中还没有得到应用。乌鲁木齐、南票、辽源、北票、淮南、北京等 20 多个矿务局所开采的煤层中, 急倾斜煤层占较大比率, 其“三下采煤”实践有待于地表移动规律研究的发展而发展。因此, 需对开采引起的覆岩破坏、岩体内部移动、地表移动进行系统研究。

综上所述, 急倾斜矿体开采沉陷规律的研究, 是当前国内外开采沉陷学机理研究的难题。为此, 应了解国际岩土力学与工程的前沿学科及最新技术和方法。研究结果表明, 主控因素、研究方法、处理技巧是开采沉陷学机理研究的主要内容。现引入概化地应力关系式, 作为进一步研究的基础。

1 急倾斜开采地表沉陷的主控因素

矿山地压控制、露天边坡工程、稳坡对策以及开采沉陷控制, 均属于矿山岩土工程范畴, 其发展具有如下共性: 从简单到复杂, 主控因素不断扩大, 促成学科发展及工程使用范围不断扩大; 主控因素及其作用机制研究不断深入, 并创造经济效益或环境效益; 开展新方法、多因素间交叉、耦合作用的科研工程化研究; 机制研究扩展到控制技术研究, 从而具有转化为可操作的常规技术; 通过学科间渗透、交叉研究, 扩展为新领域。

从主控因素看,目前国际上矿山岩土工程已扩展到8大类:地层与岩体特征、地质与构造、原岩应力场、地下水、岩石工程环境、岩石工程结构、开采方法与工艺、支护体系与顶板管理方法。对于近水平的煤矿地表移动,沉积煤系地层、近水平沉积岩体、自重应力、薄至近中厚煤层、长壁工作面、冒落法管理顶板,是我国常见煤矿开采形式,也是开采沉陷的主控因素,由此得出相应地表移动规律,并以移动变形等几何场形式为主进行研究。分别由沉积岩体岩性差别、开采块体不同空间组合形式、不同开采深度、冒落与充填的不同顶板管理形式等衍生出各类移动特征、规律及参量。对于急倾斜煤层,往往以上山与下山方向2个水平块体开采叠加,或在实测基础上引入与倾角有关的参量来修改等方法来达到满足工程精度要求的实用目的^[4,6]。事实上,这往往在急倾斜条件下无效,因而总是表现为“规律性”很差,难以满足工程要求。

现代矿山岩土工程与岩石力学的发展,使人们认识到对急倾斜矿体开采沉陷问题的研究,必须在煤矿地表移动规律研究基础上,引入下列主控因素:

a. 急倾斜矿体开采总与残余构造应力场、成矿应力场相联系。所有急倾斜矿体的形成总是与构造应力场、成矿应力场相联系,又受各种条件的影响而变迁,最常见的是离地表浅处逐渐松弛,深部则残余构造应力显现,并以应力场的形式存在于矿区。

b. 即使在自重应力作用下,急倾斜产状也会使层状岩体的上山与下山方向岩块出现不同的沉陷概率与机制。

c. 岩体结构与节理裂隙的空间展布规律,决定了采空区上覆岩体破坏与运动形式。只有层状沉积煤系地层和锰系地层才有采空区上方煤系(或锰系)地层的破坏移动规律,并由此决定其岩体内部移动规律;急倾斜的铁、铜等金属矿体,用崩落法开采时,多为可崩性节理、裂隙发育的块状岩体,因此其节理、裂隙的展布形状和空间位置,决定岩体内部移动规律。

d. 开采及顶板管理方法。急倾斜煤矿,尤其是厚层煤矿,其顶板管理方法及放顶次序共同影响地

表移动;急倾斜金属矿体,用崩落法开采时,放矿规律起决定性影响;当矿体顶板呈现不规则时,从贫化损失角度出发,为获得最佳经济效益而采取不均匀放矿,改变放矿配置,导致截然不同的地表沉陷。此时,用数值分析法研究地压规律时得到的结果却会相同。

对岩层移动进行观测、研究,结果表明,残余构造应力开挖卸载、层状岩体、急倾斜等因素总是相互联系,共同对急倾斜地表移动规律起作用。在不同矿区,残余构造应力释放程度不一样,倾角也不一样;同一矿区,其关联程度从浅部到深部也不一样,故以往的方法(即定性描述采空区中心到岩体中心的传播路径,在岩体内部为沿层面法线方向,而沿表土层为铅垂方向并向上,综合为 $\theta=90^\circ-k\alpha$,再以实测来确定经验系数 k),急需改进,其中残余构造应力的开挖卸载是关键。

2 概化地应力

研究急倾斜矿体开采的地表移动规律时,必须在煤矿地表移动规律基础上再引入残余构造应力、倾角、岩体结构、放矿规律等4大主控因素。现场实测表明,残余构造应力影响是最主要的。在岩体绝对应力量测中,取实测值与理论自重应力场之差,相对于地表某一沉陷分布的综合效应为概化地应力,建立特定沉陷与特定概化地应力的对应联系。概化地应力概念最早是于40年代由前苏联的布克林斯基提出来的^[4]。概括来说,概化地应力具有如下特点:

a. 概化地应力总与特定的工程及范畴相对应。20世纪70年代以来,随着岩体绝对应力量测的进行,矿山现场开始用原岩应力量测值及地应力场作为岩石工程体边界条件。对于地应力场的确定,在方法和概念上有待完善与深化,以建立与所对应的工程相适应的范畴。如地震部门进行震源机制研究,所求应力场为大区域应力场;开发矿区的规划,所求应力均为矿区范畴地应力场;而在某一矿块或采区开采,在地表形成塌陷坑,对此地表沉陷影响者应为相

应的概化地应力;在某一井筒开凿,原岩应力则为对此井筒开凿有影响的概化地应力。

b. 概化地应力是随工程变化而变化的动态概念。在浅部开采条件下,沉陷问题的概化地应力是某个值;随采深增加,塌陷坑的形态与规模发生变化,对此有影响的概化地应力有可能随残余构造应力的显现而增大。沉陷的变化也是概化地应力变化的一种反应。

c. 概化地应力受控于地质岩体。现场岩体应力绝对值量测结果表明,在相同地应力场中,变质岩体、侵入岩体、沉积岩体中的实测应力值不同,并随其岩性不同而保持相应比值,即使均在沉积岩体中,灰岩与砂岩体中所测值也保持一定比值,这为处理概化地应力提供了依据。

3 急倾矿体开采地表塌陷坑中的应力与位移

3.1 基本假设

急倾崩落法开采矿体的实践表明:当开采到一定深度时,在地表会形成近乎圆形塌陷坑,地表及塌陷坑中为冒落破碎岩块;对金属矿山来说,当表土厚度为坚硬基岩厚度的 5% 以下时,可等效视为岩石工程;当开采到一定深度时,可不计采区下端部力学效应,即采深大于采空区较大方向长度的 1.4 倍或塌陷坑直径的 2 倍时,可按平面问题来处理。这是弹性体与散体的复合问题,概化地应力为其边界条件,地表位移与变形只出现在受力体表面——地表部位。

3.2 地表塌陷坑与冒落带

地表塌陷坑是一个充满破碎岩块的空洞半空间。开采前,地表面铅垂方向应力 $\sigma_z = 0$, 形成塌陷坑以后,离地表面 h 处的铅垂向应力 σ'_z 发生了变化,此时为

$$\sigma'_z = h(\gamma_0 - \gamma_1) \quad (1)$$

式中: γ_0 为原始岩石密度; γ_1 为冒落带破碎岩石密度。

由于出现内含破碎岩体的空洞半空间,其周围岩体中应力发生了变化。开挖前,原始地应力中的水

平应力分量 σ_1, σ_2 可用概化地应力分量 σ_{1k}, σ_{2k} 及自重引起的水平分量 $k\gamma_0 h$ 来表示:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_1^k + \sigma_H = \sigma_1^k + k\gamma_0 h = \sigma_1^k + \frac{\mu}{1-\mu}\gamma_0 h \\ \sigma_2 &= \sigma_2^k + \sigma_H = \sigma_2^k + k\gamma_0 h = \sigma_2^k + \frac{\mu}{1-\mu}\gamma_0 h \end{aligned} \quad (2)$$

式中: k 为侧压系数; μ 为泊松比; σ_H 为自重引起的水平应力分量; σ_1^k, σ_2^k 为残余构造应力决定的水平方向主应力值,即概化地应力值。

由于形成塌陷坑,产生的向塌陷坑壁的作用力 σ_0 为

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= \gamma_1 [h \cos^2 \alpha + k_0(h - h_{90}) \sin^2 \alpha] = \\ &\gamma_1 [h \cos^2 \alpha + \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} (h - h_{90}) \sin^2 \alpha] \end{aligned} \quad (3)$$

式中: h_{90} 为冒落坑自由垂直壁高度; α 为塌陷坑壁倾角; k_0 为冒落岩石侧压系数; φ 为冒落岩石的内摩擦角。

由于其空洞内充满破碎岩石组成冒落带,围岩中的水平应力发生变化,分别为

$$\begin{aligned} \sigma_1' &= \sigma_1 - \sigma_0 = \sigma_1^k + \frac{\mu}{1-\mu}\gamma_0 h - \\ &\gamma_1 [h \cos^2 \alpha + \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} (h - h_{90}) \sin^2 \alpha] \\ \sigma_2' &= \sigma_2 - \sigma_0 = \sigma_2^k + \frac{\mu}{1-\mu}\gamma_0 h - \\ &\gamma_1 [h \cos^2 \alpha + \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} (h - h_{90}) \sin^2 \alpha] \end{aligned} \quad (4)$$

3.3 对应于塌陷坑的概化地应力

冒落带为近乎圆柱形或椭圆形的充满冒落岩石的空穴。在塌陷坑上部,由 $\sigma_0 = 0, \sigma_H = 0$, 有

$$\sigma_1' = \sigma_1 = \sigma_1^k, \sigma_2' = \sigma_2 = \sigma_2^k \quad (5)$$

塌陷坑的出现使水平应力产生明显变化,圆形塌陷坑的径向应力由远离塌陷坑的岩体内部的原始地应力变到冒落带边界上的冒落岩石侧压力,且在冒落边界上,法向剪切应力集中达最大值。冒落带中岩石水平分层处于一种概化平面应力状态。又由于受采空区端面影响,限制了应用水平断面的可能性与采用弹性理论平面介质的合理性。但经现场大量实测与实验研究确定,当采空区深度大于塌陷坑直径时,冒落带底部靠近地表断面的应力状态影响可以忽略,满足弹性理论平面解。按 Kirsch 解可得塌陷坑地表点径向位移 U 及切向位移 V 为^[7]:

$$U = \frac{1+\mu}{2E} [(\sigma_2^k + \sigma_1^k)(r + \frac{a^2}{r} - 2h) + (\sigma_2^k - \sigma_1^k) \cdot$$

$$\begin{aligned}
 & (r+4\frac{a^2}{r}-4\mu\frac{a^2}{r}-\frac{a^4}{r^3})\cos 2\theta] \\
 V = & \frac{1+\mu}{2E} [(\sigma_2^k - \sigma_1^k)(r + \frac{2a^2}{r} - \\
 & 8\mu\frac{a^2}{r} + \frac{a^4}{r^3})] \sin 2\theta \quad (6)
 \end{aligned}$$

式中: a 为塌陷坑半径; r, θ 为点的极坐标(θ 为自 σ_2^k 开始逆时针的夹角); E, μ 分别为弹模量与泊松比。

开挖前围岩位移分量 U_0, V_0 为

$$\begin{aligned}
 U_0 = & \frac{1+\mu}{2E} r [(\sigma_2 + \sigma_1)(1-2\mu) + (\sigma_2 - \sigma_1)\cos 2\theta] \\
 V_0 = & \frac{1+\mu}{2E} r (\sigma_1 - \sigma_2)\sin 2\theta \quad (7)
 \end{aligned}$$

由(6)式与(7)式之差可得塌陷坑地表各点位移的表达式:

$$\begin{aligned}
 U_r = U - U_0 = & \frac{1+\mu}{2E} [(\sigma_2^k + \sigma_1^k)\frac{a^2}{r} + \\
 & (\sigma_1^k - \sigma_2^k)(\frac{4a^2}{r} - \frac{4\mu a^2}{r} - \frac{a^4}{r^3})\cos 2\theta] \\
 V_\theta = V - V_0 = & \frac{\sigma_1^k - \sigma_2^k}{2E} (1+\mu) \cdot \\
 & [\frac{a^4}{r^3} - \frac{2(1-\mu)a^2}{1+\mu}]\sin 2\theta \quad (8)
 \end{aligned}$$

由(8)式可得急倾崩落法开采矿体时,其地表沉降坑的位移 U_r, V_θ 与由残余构造应力决定的概化地应力 σ_1^k, σ_2^k 间的对应关系。

4 概化地应力 σ_1^k, σ_2^k 的反分析确定

对于大多数急倾矿山,由于开采时间相当长,地表各种干扰因素多,因而要长时间保存地表观测站极不容易。可取的方法是对应于某一中段开采,对沉降坑的位移与变形进行观测(称相对位移观测)。对

于此中段,其概化地应力 σ_1^k, σ_2^k 具均值含义。地表点位移变化 $r_1 - r_0$, 相对于塌陷坑半径 a 可视为无穷小,故 r 可按 2 次均值即 r_{cp} 来考虑。此时,

$$\begin{aligned}
 \Delta U_r = U_{r_1} - U_{r_0} = & \frac{1+\mu}{2E} [(\sigma_2^k + \sigma_1^k)\frac{a_1^2 - a_0^2}{r_{cp}} + \\
 & (\sigma_1^k - \sigma_2^k)(\frac{4a_1^2 - 4a_0^2}{r_{cp}} + \frac{4\mu a_1^2 - 4\mu a_0^2}{r_{cp}} - \frac{a_1^4 - a_0^4}{r_{cp}^3})\cos 2\theta] \\
 \Delta U_\theta = U_{\theta_1} - U_{\theta_0} = & \frac{\sigma_1^k - \sigma_2^k}{2E} (1+\mu) \cdot \\
 & [\frac{a_1^4 - a_0^4}{r_{cp}^3} - \frac{2(1-\mu)a_1^2 - a_0^2}{1+\mu}]\sin 2\theta \quad (9)
 \end{aligned}$$

据(9)式,由 2 次量测点之位移 $\Delta V_r, \Delta V_\theta$ 可求 σ_1^k, σ_2^k 。

当条件许可时,可由绝对位移值 V_r, V_θ 来求 σ_1^k, σ_2^k , 此时相当于 $V_{r_0} - V_{\theta_0} = 0, a_0 = 0$, 由(9)式可得:

$$\begin{aligned}
 V_r = & \frac{1+\mu}{2E} [(\sigma_2^k + \sigma_1^k)\frac{a_1^2}{r_1} + (\sigma_1^k - \sigma_2^k) \cdot \\
 & (\frac{4a^2}{r_1} + \frac{4\mu a^2}{r_1} - \frac{a^4}{r_1^3})]\cos 2\theta \\
 V_\theta = & \frac{\sigma_1^k - \sigma_2^k}{2E} (1+\mu) \cdot \\
 & [\frac{a_1^4}{r_1^3} - \frac{2(1-\mu)a_1^2}{1+\mu}]\cos 2\theta \quad (10)
 \end{aligned}$$

(10) 式为相对位移求法(9)式之特例。在一般矿山条件下,很难建站实施。前苏联一些科技工作者曾用类似公式进行长期实测与试验研究^[6],其相应结果如表 1 所示(由方程组(10),经多次测量,平差后求出)。

表 1 表明:上述概化地力值与现场岩体绝对应力测量结果既有区别又有联系,其相互关系是用岩移随机介质理论改化处理的基础,实测沿经线、纬线的构造应力值,其结果如表 2 所示。

表 1 马 拉 尔 和 哈 萨 克 斯 坦 矿 区 概 化 地 应 力 值^[6]

地区	矿区	测量次数	σ_1^k /MPa	σ_2^k /MPa	$\alpha(\sigma_1^k)/(^{\circ})$
乌拉尔	波克罗夫铁矿区	45	- 5.0±2.0	- 30.4±6.8	140
	北彼斯强铁矿区	220	- 1.5±0.2	- 9.6±0.6	6
	红色近卫军铜矿	184	- 5.7±0.6	- 14.4±1.0	163
	戈罗布拉戈达铁矿区	85	- 5.3±0.7	- 17.9±2.3	34
	高山铁矿区	168	- 6.7±0.6	- 12.3±0.8	156
	卡契卡尔金矿区	6	- 8.0±3.6	- 34.0±6.9	54
哈萨克斯坦	西卡拉日阿里铁矿区	42	- 9.6±1.6	- 10.8±2.0	85
	索克洛夫铁矿区		- 0.7±0.2	- 3.7±1.4	87

表 2 改化构造应力值

矿区	σ_x/MPa	σ_y/MPa
此彼斯强铁矿	- 7.0	- 4.0
戈罗布拉戈达铁矿	- 15.0	- 22.0
高山铁矿	- 10.6	6.2
卡契卡尔金矿	- 28.0	- 22.0

参考文献:

[1] 刘宝琛, 廖国华. 煤矿地表移动的基本规律[M]. 北京: 中国工业

出版社, 1965.

- [2] 煤炭工业部. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1986.
- [3] 克拉茨 H. 采动损害及其防护[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1983.
- [4] 布克林斯基 B A. 矿山岩层与地表移动[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1989.
- [5] 李栖凤. 急倾斜煤层开采[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.
- [6] 贺跃光, 颜荣贵, 朱殿柱. 构造地应力作用下的地表移动规律研究[J]. 矿冶工程, 2000, 20(3): 12-14.
- [7] 萨文 T H. 孔附近的应力集中[M]. 卢鼎霍, 译. 北京: 科学出版社, 1958.

Study on the mining surface movement and general changed stress in the earth of rapid incline mining body

HE Yue-guang¹, YAN Rong-gui², ZEN Zhou-qiao¹

(1. College of Resources, Environment and Civil Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy, Changsha 410012, China)

Abstract: The rule of mining surface subsidence problem of the rapid incline avalanche is different from that of coal mine under initial stress. Its main controlling factors are remainder structural and mine-growing stress field, obliquity of mine body, cover rock structure, the distributing of section and crack, mine and discharge and peak manage method. Based on the rule of coal mine surface movement, remainder structural stress is the main factor, including obliquity, rock body structure, discharge mine rule. In this article, the relation of the rapid incline mining body avalanche mining surface movement and general changed stress and its examples are given, which has laid the foundation for the colligation mechanism study of more main controlling factors.

Key words: structural stress; initial stress; rapid incline mine body; subsidence; general changed stress