

山体地貌下急倾斜煤层原岩应力分布规律研究*

孙彦明

(贵阳生产力促进中心, 贵州 贵阳 550000)

摘要:为掌握山体地貌下急倾斜煤层原岩应力分布规律,采用理论分析和数值模拟方法研究了山体对煤岩层的附加应力分布规律与山体下急倾斜煤层原岩应力的分布规律。研究表明:随着深度的增加,山体中部的煤岩层垂直应力按与埋深的平方成反比的规律而递减;在山体外的煤岩层垂直应力从零逐渐增大,至一定深度后又随着埋深的增加逐渐减小。山体下急倾斜煤岩层同一水平和同一煤岩层的原岩应力分布规律在深部与非山体下的一样,呈线性分布,而在浅部受山体集中应力的影响较大,呈与山体地貌相似的非线性分布。

关键词:山体地貌;急倾斜煤层;原岩应力;数值模拟

我国西南地区山峦重叠,煤层具有倾角大、薄及中厚、层数多的特殊赋存特征。此类煤层储量大,以急倾斜煤层为主采煤层的矿井比例在50%以上^[1-2];且煤种齐全、煤质优良,是国家和地方工业发展不可或缺的动力燃料和工业原材料^[3-4]。西南地区煤层埋深较浅,受山体起伏影响大,在矿井设计与生产、工作面顶板状态参数及支护参数确定时都要考虑山体的影响^[5-6]。

由于岩层的原岩应力场是分析开采空间周围应力重新分布的基础^[7-9],本文通过理论分析和数值模拟研究方法对山体下急倾斜煤层原岩应力分布规律进行了深入研究。

1 山体附加应力计算

1.1 附加应力理论计算

山体对地表以下煤岩层的影响主要是其自重应力,受影响的煤岩层除自身和覆岩的自重应力外,还受到山体自重应力对其应力叠加的影响。单个山体从整体上看近似圆锥形和圆台形,其载荷分布如图1所示。

图1中, P_0 为圆锥形、圆台形山体最高处 H_0 对应的重力,kN; r_0 为圆锥形山体底部半径,m; r_1 、 r_2 分别为圆台形山体顶部与底部半径,m。山体的断面分别为图2所示的三角形和梯形。根据其断面载荷分布求出其合力 P ,计算式分别为式(1)和式

(2)。

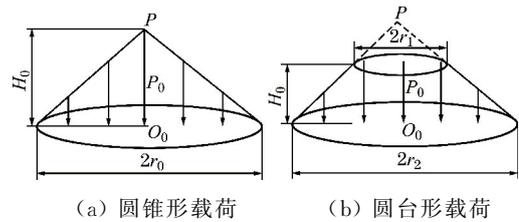


图1 山体典型载荷示意

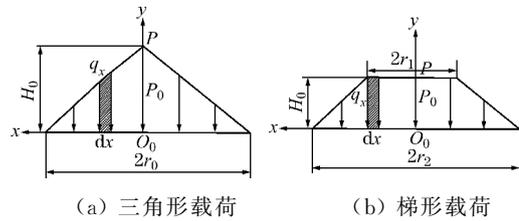


图2 山体典型断面载荷示意

$$\begin{cases} P_{\text{三角形}} = P_0 r_0, P_0 = \gamma H_0 \\ P_{\text{三角形}} = \gamma H_0 r_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} P_{\text{梯形}} = \frac{(r_1 + r_2) P_0}{2}, P_0 = \gamma H_0 \\ P_{\text{梯形}} = \frac{(r_1 + r_2)}{2} \gamma H_0 \end{cases} \quad (2)$$

合力 P 的作用线分别位于三角形、梯形中心。因此,单个山体对地下煤岩层的作用可看成山体分布载荷合力(集中载荷)对煤岩层施加的附加应力。关于集中载荷作用下附加应力的计算,法国数学家布辛内斯克于1885年用弹性理论推出了在半无限

* 收稿日期: 2023-03-21

作者简介: 孙彦明(1989—),男,安徽萧县人,硕士,工程师,主要从事矿业工程方面的工作,E-mail:549962207@qq.com。

空间弹性体表面上作用有竖直集中力 P 时,在弹性体内任一点 M 所引起的应力解析解^[10]。这是一个轴对称的空间问题,对称轴就是集中力 P 的作用线,以 P 作用点 O 为原点,则 M 点坐标为 (x, y, z) ,如图 3 所示, M' 点为 M 点在弹性体表面上的投影。由辛内斯克得出的 M 点的主应力分量见式(3)至式(5)。

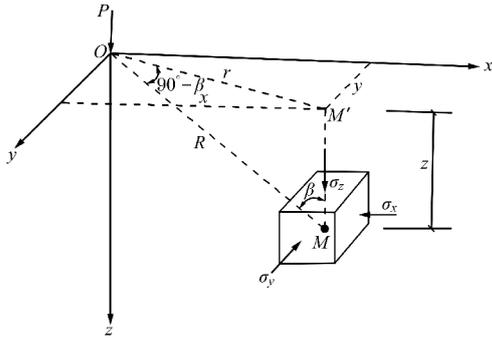


图 3 集中载荷下的应力

$$\sigma_z = \frac{3Pz^3}{2\pi R^5} = \frac{3P}{2\pi R^2} \cos^3 \beta \quad (3)$$

$$\sigma_y = \frac{3P}{2\pi} \cdot \left\{ \frac{y^2 z}{R^5} + \frac{1-2\nu}{3} \cdot \left[\frac{1}{R(R+z)} - \frac{(2R+z)y^2}{(R+z)^2 R^3} - \frac{z}{R^3} \right] \right\} \quad (4)$$

$$\sigma_x = \frac{3P}{2\pi} \cdot \left\{ \frac{x^2 z}{R^5} + \frac{1-2\nu}{3} \cdot \left[\frac{1}{R(R+z)} - \frac{(2R+z)x^2}{(R+z)^2 R^3} - \frac{z}{R^3} \right] \right\} \quad (5)$$

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = \sqrt{r^2 + z^2} \quad (6)$$

式中, R 为 M 点至坐标原点 O 的距离; β 为三角形 $OM'M$ 中 \overline{OM} 和 $\overline{OM'}$ 的夹角; ν 为泊松比。

将 $R^2 = r^2 + z^2$ 代入式(3)整理得:

$$\sigma_z = \frac{3Pz^3}{2\pi R^5} = \frac{3}{2\pi} \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{r}{z}\right)^2\right]^{\frac{5}{2}}} \frac{P}{z^2} = K \frac{P}{z^2} \quad (7)$$

$$K = \frac{3}{2\pi} \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{r}{z}\right)^2\right]^{\frac{5}{2}}} \quad (8)$$

式中, K 为集中力作用下的应力分布系数。

地表下煤岩体初始应力状态为侧限应力状态,主要应力为垂直应力 σ_z ,重点对 σ_z 的分布特征进行讨论。

(1) 在集中力 P 作用线上的 σ_z 分布。在 P 作用线上, $r=0$,由式(7)和式(8)可知, $K=3/2\pi$, $\sigma_z=3P/2\pi z^2$ 。由此可见,沿 P 作用线上 σ_z 的分布是随

深度增加按与 z^2 成反比的规律而递减,如图 4 所示。

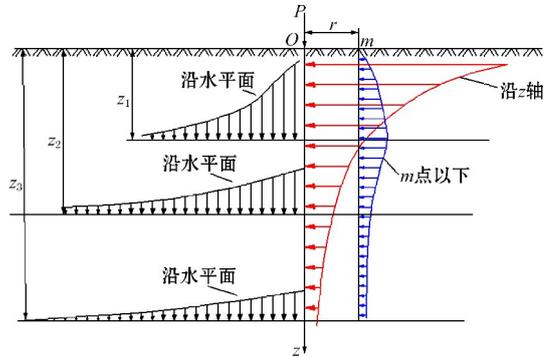


图 4 集中力在地表下岩层中应力 σ_z 的分布

(2) 在 $r>0$ 的垂线上的 σ_z 分布。由式(3)可知, $z=0$ 时, $R>0$, $\sigma_z=0$;随着 z 的增加, σ_z 从零逐渐增大,至一定深度后, σ_z 又随着 z 的增加逐渐减小。

(3) 在 $z=$ 常数的水平面上的 σ_z 分布。随着深度 z 增加,集中力作用线上的 σ_z 值减小,而水平面上应力的分布趋于均匀,如图 4 所示。

将式(1)和式(2)分别代入式(7)可得圆锥形、圆台形山体断面集中载荷对地下煤岩层某单元产生的附加垂直应力的表达式:

$$\sigma_{z, \text{圆锥断面}} = \frac{3Pz^3}{2\pi R^5} = \frac{3}{2\pi} \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{r}{z}\right)^2\right]^{\frac{5}{2}}} \frac{\gamma H_0 r_0}{z^2} \quad (9)$$

$$\sigma_{z, \text{圆台断面}} = \frac{3Pz^3}{2\pi R^5} = \frac{3}{2\pi} \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{r}{z}\right)^2\right]^{\frac{5}{2}}} \frac{\gamma H_0 (r_1 + r_2)}{2z^2} \quad (10)$$

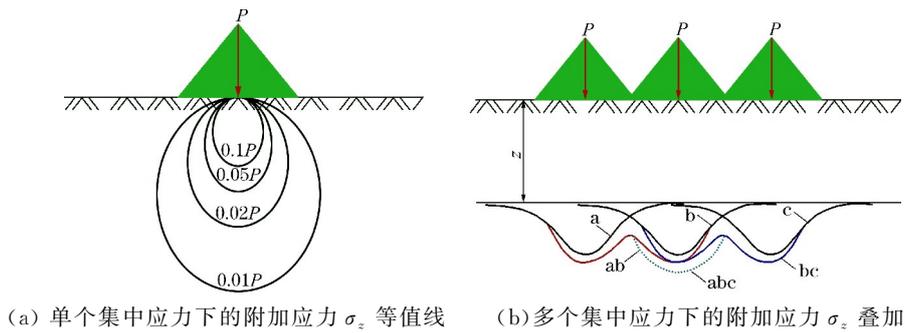
考虑多个山体时,可简化为多个集中应力相互叠加对地下岩层的作用。对于单个或多个集中应力叠加的垂直应力等值线如图 5 所示。

2 山体下应力分布数值计算

基于以上理论分析,对单个及多个山体下岩层的应力分布规律进行数值模拟研究。根据实际山体赋存情况,模拟的山体直径为 100 m,高度为 60 m,坡度约为 50° 。模拟结果如图 6 和图 7 所示。

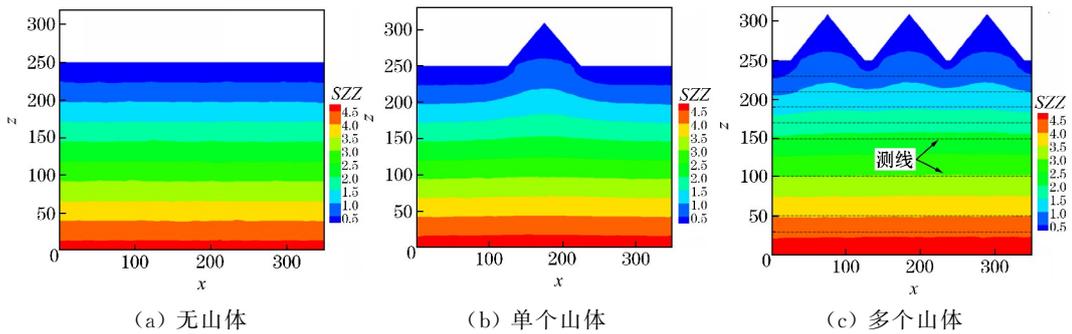
利用 Tecplot 数据处理软件对不同埋深的煤岩层布置测线,如图 6(c)所示,整理后得出如图 7 所示的应力曲线。

由图 7 可知,地表无山体时,垂直地应力分布曲线近似为水平线;当出现单个山体时,在浅部 100 m



(a) 单个集中应力下的附加应力 σ_z 等值线 (b) 多个集中应力下的附加应力 σ_z 叠加

图5 单个或多个集中应力下的附加应力 σ_z 分布

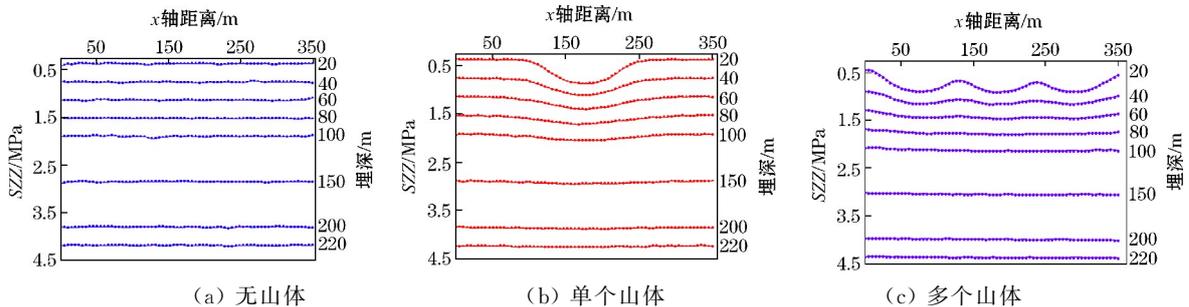


(a) 无山体

(b) 单个山体

(c) 多个山体

图6 单个或多个山体下的附加应力 σ_z 分布



(a) 无山体

(b) 单个山体

(c) 多个山体

图7 单个或多个山体下的 σ_z 分布曲线

以内的垂直应力由山体顶部向两坡逐渐降低,在浅部60 m以内受山体附加应力作用更加明显,超过山体底部直径范围后,应力分布曲线逐渐趋于水平。当出现多个山体时,垂直应力曲线随山体起伏而起伏,在浅部100 m以内,山体对地下煤岩层的原岩应力分布影响相对较大;在多个山体作用下,对地下煤岩体产生应力叠加作用,其影响要大于单个山体的作用,应力在垂直和水平方向上的分布规律与理论分析相对应。

3 山体下急倾斜煤岩层原岩应力理论分析

根据西南地区某矿山体下急倾斜煤层赋存条件建立山体下急倾斜煤岩层分布模型,并以模型左下端为原点建立坐标系,如图8所示。

图8中: α 为煤岩层倾角, $^{\circ}$; $H z_0$ 为 z 水平的

煤层埋深,m; ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 分别为岩层-1、岩层-2、岩层-3的密度, kg/m^3 。

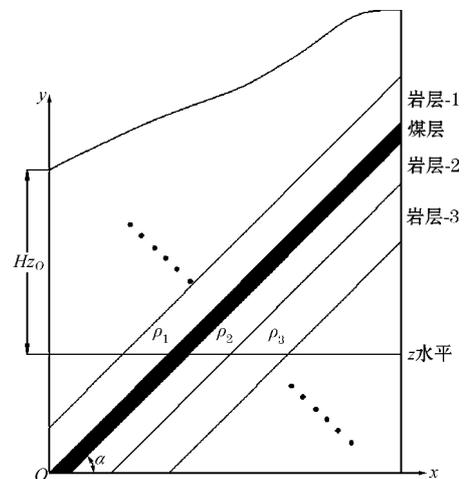


图8 山体下急倾斜煤岩层分布模型

由图 8 可知,在同一水平上,急倾斜煤岩层分布不同于水平煤岩层,急倾斜煤岩层在同一水平方向上岩性不同,密度不一样,导致同一水平垂直原岩应力分布不均匀,根据图 8 中的坐标系,σ_z 的表达式如下:

$$\sigma_z = \rho_x g H_z \quad (11)$$

式中,ρ_x 为水平距离 x 处煤(岩)层密度,kg/m³;g 为重力加速度,9.8 m/s²;H_z 为某水平对应埋深,m。

对于山体地貌下急倾斜煤岩层而言,除岩性不同导致密度不同外,受山体影响,同一埋深的煤层其垂直原岩应力也不同,表达式如下:

$$\sigma_z = \rho_x g H_{zx} \quad (12)$$

式中,H_{zx} 为 z 水平上距离坐标原点 x 处煤岩层对应埋深,m。

对于山体下急倾斜同一煤岩层而言,虽然岩性相同,但在不同水平距离下埋深不同,其垂直原岩应力表达式如下:

$$\sigma_z = \rho_m g H_x \quad (13)$$

式中,ρ_m 为某一煤岩层的密度,kg/m³;H_x 为距离坐标原点 x 处煤岩层对应埋深,m。

由式(12)和式(13)可知,山体下急倾斜煤岩层垂直原岩应力受岩性和埋深影响,在同一水平上,不同岩性区垂直原岩应力不同,有起伏,分布不均匀。同一煤岩层的密度相同,原岩应力主要受埋深影响,下面将通过数值模拟对其进行研究。

4 山体下急倾斜煤岩层原岩应力数值模拟

4.1 工程背景

西南地区某矿的煤层厚为 3 m,煤层倾角为 55°,某工作面的综合柱状图如图 9 所示。

4.2 数值模拟

4.2.1 模型建立

根据该矿地质条件和综合柱状图建立 FLAC3D

三维数值模型,如图 10 所示。煤岩力学参数见表 1。

柱状	序号	岩石名称	平均厚度/m
	1	泥灰岩	8.12
	2	砂岩泥岩	2.87
	3	泥岩	0.92
	4	M6-3煤	0.99
	5	砂岩泥岩	6.10
	6	M7-2煤	1.00
	7	细砂岩	5.00
	8	泥岩	4.92
	9	砂质泥岩	2.65
	10	M8煤	3.00
	11	砂质泥岩	2.60
	12	泥灰岩	12.50

图 9 综合柱状图

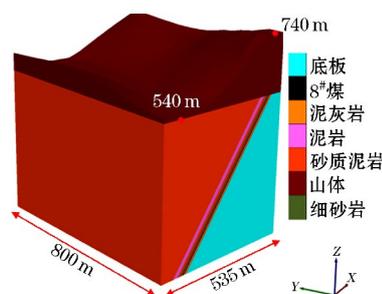


图 10 数值模型

4.2.2 模拟结果分析

非山体下急倾斜煤岩层在同一水平上的垂直应力分布主要受岩层密度影响,但一般岩层间的密度相差不大,应力分布变化很小,水平应力变化更小,如图 11(a)、图 12(a)所示。然而,山体地貌急倾斜煤岩层在同一水平上的应力分布除受岩层密度影响,还受到山体起伏影响,由于不同岩层位于山体不同部位下方,导致同一水平的埋深不同,在埋深和密度的双重影响下,山体地貌下急倾斜煤层原岩

表 1 煤岩样力学参数

岩层名称	密度/(kg/m ³)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
泥灰岩	2460	1.12	0.62	1.15	40	0.75
砂质泥岩	2560	0.75	0.45	1.12	40	0.74
细砂岩	2691	1.3	0.75	1.45	42	0.85
泥岩	2580	1.2	0.65	1.3	41	0.77
砂质泥岩	2567	1.3	0.75	1.13	40	0.76
M8煤	1380	0.61	0.33	1.2	38	0.6
砂质泥岩	2567	1.3	0.75	1.13	41	0.78

应力分布相对非山体下的变化较大,如图 11(b)、图 12(b)所示。山体下急倾斜煤岩层原岩的水平应力分布如图 13 所示。

由图 13 中水平应力分布曲线可知,该矿山体地貌对急倾斜煤岩层垂直应力的影响深度在地表下 150 m 左右,在地表下 50 m 深度以浅,属于较高影响区,应力分布形态与山体地貌一致;在地表 50~

150 m 深度,属于影响降低区,应力分布形态逐渐趋于水平;在地表下 200 m 深度时,应力分布形态几乎水平。水平应力分布受山体地貌影响的深度相对较大,在地表下 200 m 深度时仍处于影响降低区。在不同岩层区,应力变化幅度约为 0.6 MPa。

为进一步分析同一煤层不同水平距离的原岩应力分布,在急倾斜煤层底板布置测线,对得到的

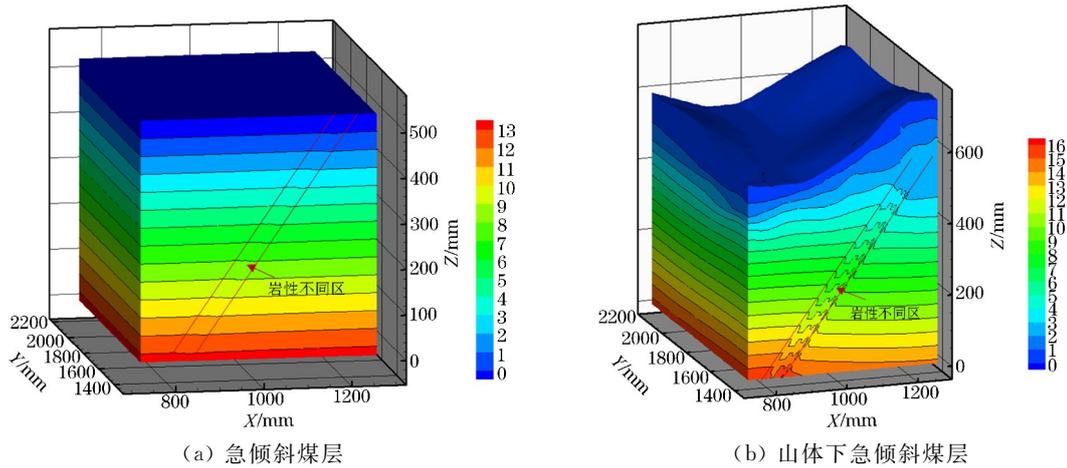


图 11 山体与非山体下急倾斜煤层的垂直应力分布

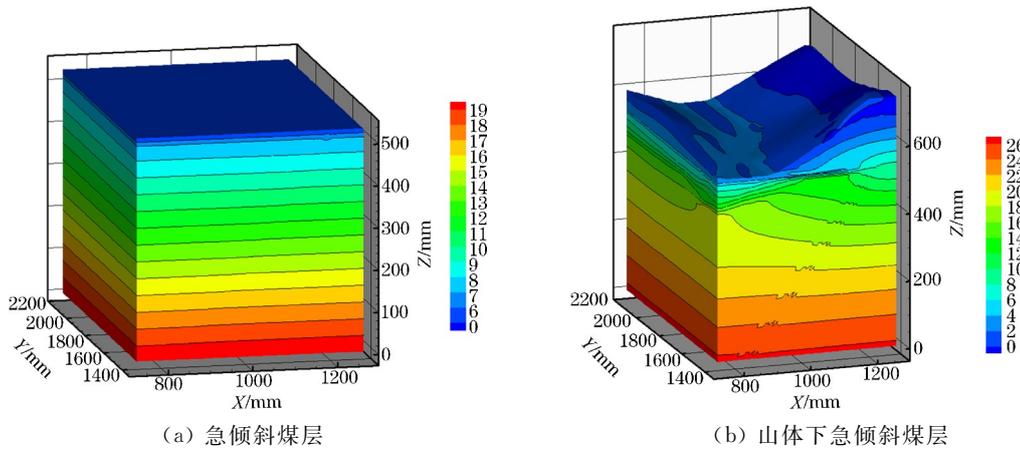


图 12 山体与非山体下急倾斜煤层水平应力分布

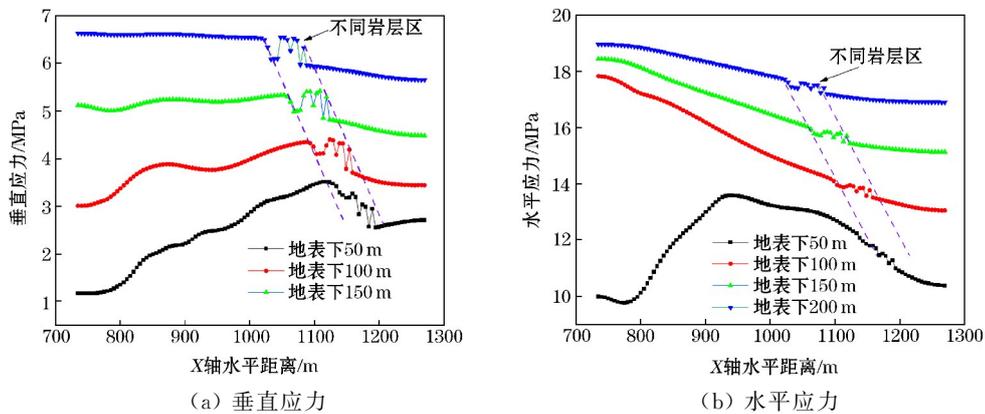


图 13 山体下不同距离急倾斜煤层原岩应力分布曲线

数据进行拟合,拟合结果如图 14 所示。

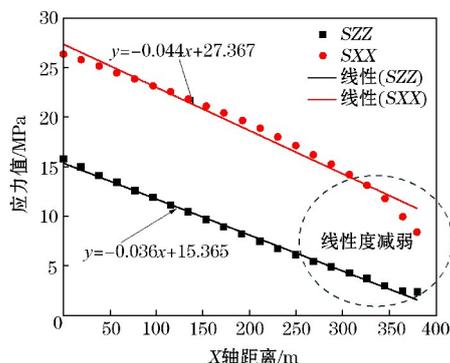


图 14 急倾斜同一煤层原岩应力线性拟合

由图 14 可知,山体地貌下急倾斜同一煤(岩)层的原岩应力在不同水平距离下(X 轴距离 325 m 以内,对应埋深 200 m 以深)呈线性分布,随着水平距离的增加,原岩应力逐渐降低。垂直应力与水平应力的斜率相近,但截距相差很大,水平应力值为垂直应力值的 1.78 倍。但随着距 X 轴距离的增加,煤层逐渐靠近山体,受山体附加应力影响较明显,应力点也逐渐偏离线性直线,呈非线性分布,与上述理论分析相互印证。

5 结论

(1) 山体中部 σ_z 的分布是随深度增加,按与埋深的平方成反比的规律而递减;在山体外的 σ_z 从零逐渐增大,至一定深度后又随着埋深的增加逐渐减小;在同一水平处, σ_z 值在山体中部最大,向山体两腰逐渐减小。

(2) 山体下急倾斜煤岩层的同一水平和同一煤岩层原岩应力分布规律在深部与非山体下的一样,呈线性分布,而在浅部受山体集中应力的影响较大,呈与山体地貌相似的非线性分布。

(3) 建立了山体地貌下急倾斜煤岩层数值模型。研究表明山体对浅部煤岩层的应力分布影响较大,在距地面前 50 m 以内,属于较高影响区;在离地面 50~150 m,属于影响降低区;离地面 200 m 以外,属于无影响区。浅埋煤岩层原岩应力分布形态通常和山体的赋存状态相似。

参考文献:

- [1] 黄旭超. 急倾斜煤层开采应力及裂隙演化规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(增刊 1): 93-96.
- [2] 伍永平, 郎丁, 解盘石. 急倾斜软煤综放工作面煤壁片帮机理及致灾机制[J]. 煤炭学报, 2016, 41(8): 1878-1884.
- [3] 黄长国, 罗国辉, 康建宁, 等. 西南地区煤矿瓦斯灾害现状及防治对策研究[J]. 矿业安全与环保, 2015, 42(5): 112-115.
- [4] 李晋军. 山地下煤层开采地表移动变形规律分析[J]. 山西煤炭, 2017, 37(2): 32-35.
- [5] 朱恒忠. 西南山区浅埋煤层采动地裂缝发育规律及减损控制[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2019.
- [6] 张栋, 汪华君, 范育青. 山体浅埋煤层采动坡体的稳定性分析[J]. 煤矿安全, 2014, 45(4): 195-197.
- [7] 董洪生. 山体赋存煤层原岩应力分布规律[J]. 能源技术与管理, 2010(6): 14-16.
- [8] 韩谷雨, 钟新春, 范扩, 等. 山体浅埋煤层覆岩的应力分布规律[J]. 煤炭技术, 2011, 30(5): 77-80.
- [9] 周涛, 宁琛瑶, 王琛, 等. 地表山体对煤层原岩应力场分布规律的影响[J]. 煤炭技术, 2014, 33(5): 141-144.
- [10] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2013: 98-101.