

深部矿区巷道围岩力学参数测试及反演研究*

许波, 杨鹏军

(陕西延长石油榆林可可盖煤业有限公司, 陕西 榆林市 719000)

摘要:掌握深部矿区围岩力学参数是矿井巷道设计、布置、煤层气抽采的必要条件。以深部矿区某矿为地质条件,现场测试了全矿区自13-1煤顶板到1煤底板共计8层地层的围岩力学参数,研究了围岩力学参数反演计算模型,设计了围岩力学参数反演流程。针对岩石强度、地应力等巷道变形影响因素,具体地分析了不同因素对巷道变形的影响,得出抗拉强度对巷道变形的影响最大的结论。根据地质条件和巷道设计,分别对东区北翼11-2轨道大巷和11-2回风大巷进行反演,将变形量反演值与变形量实测值进行对比分析,实测值与反演值基本保持一致,误差在10%以内,说明围岩力学参数反演值具有很高的可靠度。

关键词:深部矿区;围岩性质;力学测试;参数反演

我国是煤炭消耗大国,随着浅部煤炭资源的日益枯竭,中东部主要矿井大多进入了千米开采范围^[1-6],深部开采扰动大,地应力较高,极易引起动力冲击等灾害。传统的监测主要是针对灾害发生前引起的各类延伸指标,对其本质问题没有进一步分析解决。

现有围岩力学测试研究主要针对特定单一地点的某一范围进行测试,代表性不强,没有得到研究区域内全域的相关岩石参数。一般地,使用这一方法会导致区域地应力场的反演结果普适性不强,且难于被现场工程技术人员所使用^[7-10]。此外,由于岩体力学性质与岩体中的结构面、结构体及其赋存环境密切相关,因此很难通过室内试验或原位试验获取准确且大范围内的岩体力学性质参数,而位移反分析则是解决这一问题的有效手段^[11-16]。

本文通过理论分析、现场实测、数值反演等手段探究深部矿区围岩力学测试及反演研究规律,研究结果可为深部矿区地应力测量及反演提供参考。

1 矿区地层岩石力学参数测试及反演研究

东部某矿区平均总厚度为21.14 m,各煤层赋存稳定,倾角一般为 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 。矿井属高瓦斯矿井,

随着矿井开采深度的增加,局部可能出现煤与瓦斯突出现象。本井田平均地温梯度为 $3.08^{\circ}\text{C}/100\text{m}$;预计-780 m水平地温为 $37.7\sim 43.7^{\circ}\text{C}$,平均 40.1°C ,属地温异常区。可采煤层除6-2和1煤层不自燃至很易自燃以外,其余均很易自燃。煤尘均具有强爆炸性。

1.1 岩石取样

获取了全矿区自13-1煤顶板到1煤底板共计8层地层的围岩力学参数,具体取样地点见表1。

表1 岩石力学测试岩样取样地点

岩性	巷道	埋深/m
0403 中细砂岩	北二13-1煤层回风大巷(岩石段)	-710
0404 砂质泥岩	北二13-1煤层回风大巷(岩石段)	-729
0502 砂质泥岩	北二13-1底板回风大巷	-742
0503 细砂岩	北二13-1底板矸石胶带机巷	-761
0504 泥岩	南区11-2胶带机大巷	-771
0602 泥岩	南区11-2轨道大巷	-773
0603 粉砂岩	-850 m瓦斯治理排矸斜巷	-856
0702 细砂岩	-850 m瓦斯治理排矸斜巷	-878

1.2 测试结果

获取了自13-1煤顶板中细砂岩(标准地层序号

* 收稿日期:2023-06-19

基金项目:安徽省重点研究和开发计划项目(201904a07020011);安徽省自然科学基金项目(2108085ME155);淮南市重点研究与开发计划项目(2021A05)。

作者简介:许波(1988—),男,四川江油人,工程师,主要从事煤炭开采技术及矿山安全管理工作,E-mail:361613604@qq.com。

通信作者:杨鹏军(1990—),男,陕西神木人,工程师,主要从事采掘顶板控制等采矿技术工作,E-mail:875804274@qq.com。

0403)到1煤底板粉砂岩(标准地层序号1003)内所有围岩典型标准岩块试样的单轴抗压强度、抗拉强度、弹性模量、泊松比、孔隙率、容重、软化系数、黏聚力及内摩擦角等参数。限于取样条件,新生界黏土(标准地层序号0101)到16-2煤底板砂质泥岩(标准地层序号0402)以及煤样的岩石力学参数无法测定。根据上述试验,获得的结果见表2。

1.3 围岩力学参数反演计算模型

埋深较大的巷道在高地应力作用下,围岩由弹性状态逐渐转变为塑性状态,出现一定范围的塑性形变。为了便于模拟计算,假设围岩为各向同性的均质连续体,在弹性形变阶段,围岩符合线弹性模型,影响围岩变形量的因素主要有弹性模量 E 和泊松比 μ 。在塑性形变阶段,采用目前最常用的摩尔-

库伦破坏准则,影响围岩变形量的因素有内摩擦角 φ 、剪胀角 ψ 、黏聚力 C 和塑性应变 ϵ^p ,如图1所示。

由于矿区不同巷道支护方式不同,在进行有限元数值模拟时难以对其精确模拟,有必要对支护进行一定的简化。采用等效强度法将支护强度均匀等效到模拟范围内的围岩上,围岩力学参数在开挖前后保持不变。围岩变形量用巷道两帮、顶底板收敛量表示。考虑到巷道开挖影响范围和边界效应,建立的数值模型边界距巷道边界应大于巷道宽度三倍以上距离。影响巷道围岩变形的另一主要因素是地应力,尤其对于深部巷道,高地应力对围岩变形量起着主导控制作用。根据矿区地应力反演结论,提取出巷道所在位置的地应力施加到模型上,即为巷道围岩的初始应力状态。

表2 煤岩物理力学参数

岩层编号	岩石名称	单轴抗压强度/ MPa	单轴抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松比	孔隙率	容重/ (g/cm ³)	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)
0403	中细砂岩	61.64	3.09	13.98	0.280	0.0314	2.58	7.83	37.25
0404	砂质泥岩	31.31	2.19	7.78	0.271	0.0225	2.57	3.43	34.79
0502	砂质泥岩	32.25	2.11	8.37	0.232	0.0147	2.56	3.07	35.58
0503	细砂岩	73.60	6.57	23.48	0.219	0.0376	2.73	11.36	39.85
0504	泥岩	16.08	2.78	3.40	0.239	0.0222	2.52	3.03	35.09
0602	泥岩	16.19	2.18	3.44	0.273	0.0225	2.56	3.17	36.46
0603	砂岩	71.88	7.17	21.35	0.200	0.1183	2.54	13.67	38.28
0702	细砂岩	70.20	6.55	21.27	0.213	0.0570	2.70	13.57	40.92

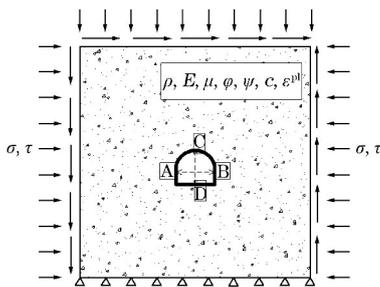


图1 巷道围岩变形有限元计算模型

围岩力学参数反演流程主要包括:巷道围岩变形监测,建立二维平面模型,根据待反演围岩力学参数取值范围设置若干组参数组合赋予到模型材料中,从地应力反演模型中提取巷道位置地应力值施加到模型边界上,有限元软件进行巷道围岩变形解算创建学习样本,对支持向量回归模型进行训练并进行参数调优,然后预测待反演围岩力学参数,将预测值带入模型中进行巷道围岩变形解算,检验反演值的可靠度,反演流程如图2所示。

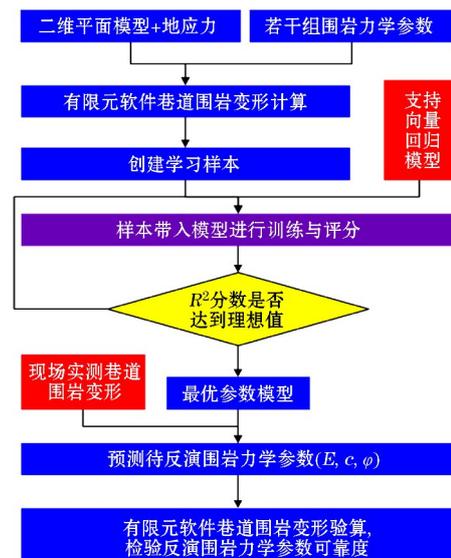


图2 围岩力学参数反演流程

1.4 巷道变形影响因素研究

(1) 岩石强度的影响。矿区不同开采工作面揭

露砂质泥岩、泥岩、细砂岩、13-2 煤层、砂质泥岩、细砂岩、13-1 煤层、砂质泥岩、泥岩、12 煤层、泥岩、中砂岩。围岩为粗砂岩、中砂岩的巷道施工至今仍保持稳定,而处在泥岩、砂质泥岩、细砂岩中的巷道受到不同程度破坏,不翻修不能投入使用。

(2) 地应力的影响。深部巷道开挖前,由于其高静载,原岩应力越高,开挖卸荷产生的偏应力就越大,应力一降一升导致围岩快速劣化,引起巷道失稳、变形破坏。

(3) 岩石物理力学性质的影响。矿区-780 m 水平巷道围岩以高岭石为主,为弱膨胀黏土矿物,遇水易泥化、产生膨胀,流变强烈。

1.5 参数影响规律

为具体地分析不同因素对巷道变形的影响,建立数值计算模型模拟计算巷道的变形量。为了便于分析计算,合理设计的模型尺寸为长 \times 宽=30 m \times 30 m,直墙半圆拱形巷道位于模型的中部,巷道宽 5.4 m,墙高 1.6 m,半圆拱形的半径为 2.7 m(见图 3)。固定巷道尺寸断面形式及支护结构,调整垂直应力、侧压系数以及岩石力学参数。为了便于计算,模型上表面施加围岩的垂直压应力,模型两侧面施加水平应力,模型下表面限制垂直移动,采用摩尔-库伦准则。

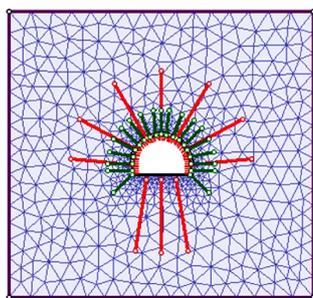


图 3 数值计算模型与支护方案

如图 4 所示为同一岩石力学与支护参数条件及变化垂直应力条件下,巷道不同应力下的围岩变形特征。随着垂直应力由 10 MPa 增加到 30 MPa,巷道两帮及顶底板收敛呈现增加趋势。当地应力增加到 30 MPa 时,两帮最大位移约为 180 mm,最大底臃量约为 228 mm,均已超过 150 mm 的标准,说明该支护结构已难以满足该工况的安全要求,应考虑支护补强。类似的,通过数值计算也获取了其他条件下巷道围岩的变形趋势。

不同影响因素下的巷道变形特征如图 5 所示。由图 5 可知,抗拉强度对巷道变形的影响最大,内摩

擦角次之,侧压系数、黏聚力、垂直压力对巷道破坏的影响相对较小。

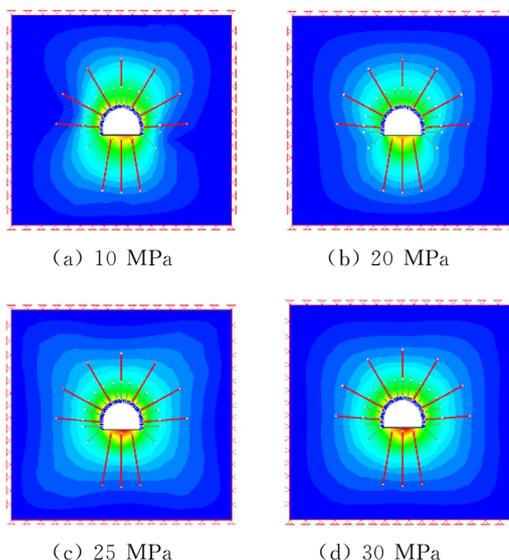


图 4 不同垂直应力条件下巷道变形收敛计算结果

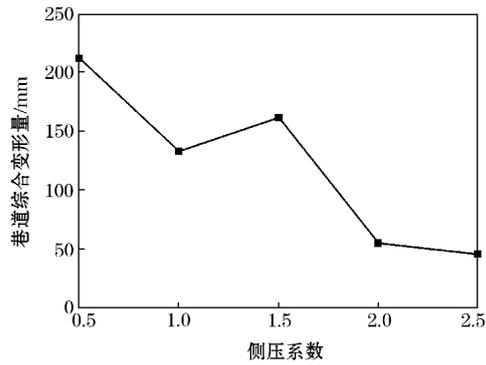
2 围岩力学参数反演

根据地质条件和巷道设计分别对东区北翼 11-2 轨道大巷和 11-2 回风大巷建立二维平面模型,如图 6 所示。

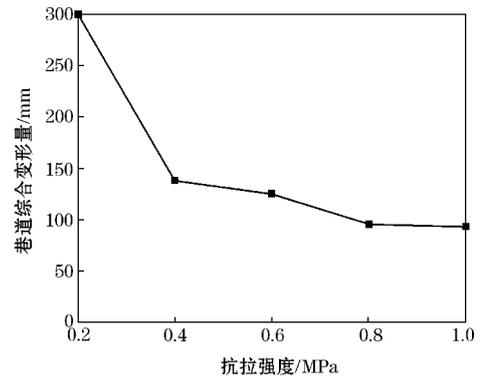
由于两条巷道的测点位置较近,地应力在局部地区变化不大,因此地应力相同。通过查询矿区地应力反演结果可知,在大地坐标系下地应力分别为: $\sigma_x = 30.81$ MPa, $\sigma_y = 28.78$ MPa, $\sigma_z = 27.04$ MPa, $\tau_{xy} = 1.50$ MPa, $\tau_{xz} = 0.03$ MPa, $\tau_{yz} = 0.27$ MPa。结合巷道方位角和倾角得到截面的应力状态为: $\sigma_x = 29.72$ MPa, $\sigma_y = 27.11$ MPa, $\tau_{xy} = 0.50$ MPa。

采用均匀设计表设计 5 组不同水平的参数条件,将 5 组参数分别赋予两条巷道模型中进行变形计算,提取围岩在不同参数条件下的变形量(见表 3),由此可分别得到 5 组学习样本。把围岩变形量作为输入变量,围岩力学参数作为输出变量,分别将 5 组学习样本带入到支持向量回归模型中进行训练,然后对训练过的模型进行评分,根据评分结果对模型参数调优,最终获得最优模型。将每个断面围岩变形量作为输入变量带入到最优模型中,输出的围岩力学参数即为该断面围岩力学参数反演值(见表 4)。

把最优围岩力学参数赋值到模型中再次进行变形计算,将变形量反演值与变形量实测值进行对

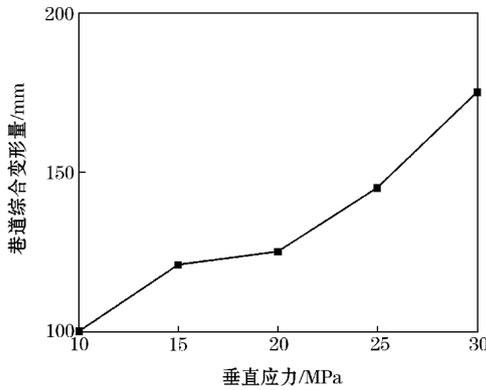


(a) 侧压系数



(e) 抗拉强度

图5 不同影响因素下的巷道变形特征



(b) 垂直应力

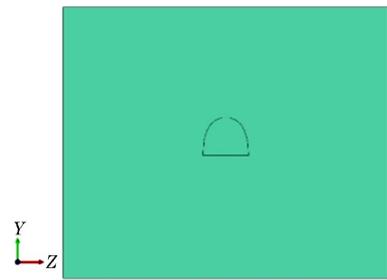
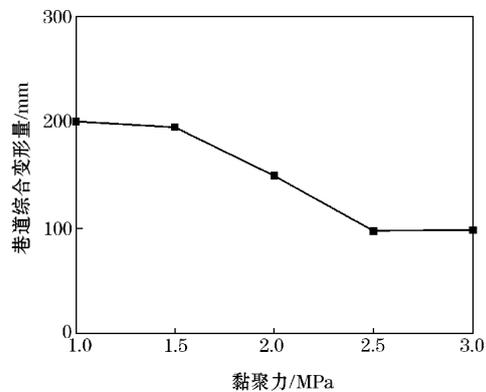
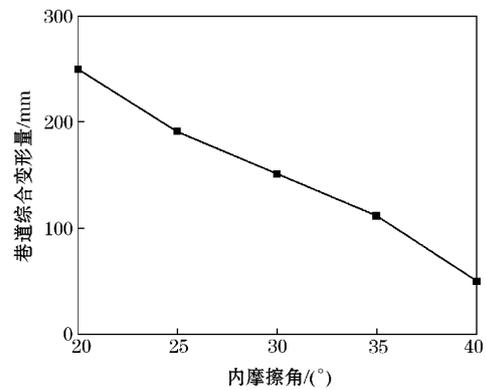


图6 东区巷道二维平面模型



(c) 黏聚力



(d) 内摩擦角

表3 东区巷道在模拟不同围岩力学参数条件下的变形量

试验序号	轨道大巷/cm		回风大巷/cm	
	ΔAB	ΔCD	ΔAB	ΔCD
1	56	61	50	52
2	45	48	40	42
3	38	42	38	39
4	33	36	32	34
5	28	30	25	26

表4 巷道围岩力学参数反演值

力学参数 反演测点位置	弹性模量 E/GPa	黏聚力 C/MPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$
轨道大巷 1 [#]	11.57	6.26	43
轨道大巷 2 [#]	13.25	6.45	37
轨道大巷 3 [#]	12.21	7.28	39
轨道大巷 4 [#]	11.55	6.82	40
回风大巷 1 [#]	15.81	10.02	56
回风大巷 2 [#]	16.64	11.34	49
回风大巷 3 [#]	14.16	9.87	42
回风大巷 4 [#]	15.62	10.05	45

比分析(见图7和图8),可以看到实测值与反演值基本保持一致,误差都在10%以内,说明围岩力学参数反演值具有很高的可靠度。

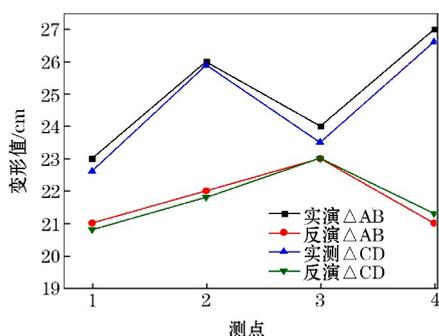


图7 轨道大巷各测点围岩变形量实测值与反演值

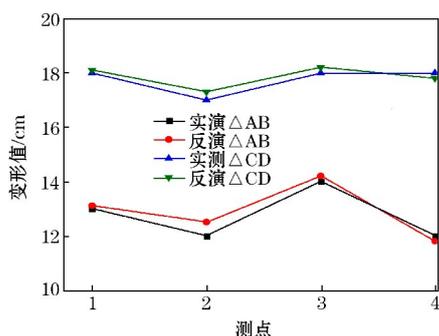


图8 回风大巷各测点围岩变形量实测值与反演值

3 结论

(1) 现场测试了全矿区自13-1煤顶板到1煤底板共计8层地层的围岩力学参数,研究了围岩力学参数反演计算模型,设计了围岩力学参数反演流程。

(2) 针对岩石强度、地应力等巷道变形影响因素,具体地分析了不同因素对巷道变形的影响,其中抗拉强度对巷道变形影响最大。

(3) 根据地质条件和巷道设计分别对东区北翼11-2轨道大巷和11-2回风大巷进行反演,将变形量反演值与变形量实测值进行对比分析,得出实测值与反演值基本保持一致的结论,误差在10%以内,

说明围岩力学参数反演值具有很高的可靠度。

参考文献:

- [1] 谢和平.“深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J].工程科学与技术,2017,49(2):1-16.
- [2] 王路军,周宏伟,荣腾龙,等.深部煤体非线性蠕变本构模型及实验研究[J].煤炭学报,2018,43(8):2196-2203.
- [3] 谢和平.深部岩体力学与开采理论研究进展[J].煤炭学报,2019,44(5):1283-1305.
- [4] 黄耀光,张天军.深部高地应力巷道塑性破坏特征及注浆支护[J].采矿与安全工程学报,2019,36(5):949-958.
- [5] 李夕兵,宫凤强,王少峰,等.深部硬岩矿山岩爆的动静组合加载力学机制与动力判据[J].岩石力学与工程学报,2019,38(4):708-723.
- [6] 任帅,王方田,李少涛,等.深部煤层智能化充填开采覆岩运移控制技术[J].矿业研究与开发,2022,42(3):163-167.
- [7] 刘高,聂德新,韩文峰.高应力软岩巷道围岩变形破坏研究[J].岩石力学与工程学报,2000(6):726-730.
- [8] 任帅,鲁德超,罗勇,等.综放工作面采空区瓦斯运移规律及钻孔布置优化[J].采矿技术,2023,23(3):121-125.
- [9] 梁沙平,陆银龙,郭鹏,等.特厚煤层坚硬顶板初次破断特征的力学分析[J].煤矿安全,2020,51(8):245-250.
- [10] 任帅,王方田,李少涛,等.深井超高压水充填工作面小煤柱稳定性规律及控制技术[J].煤矿安全,2021,52(6):243-249.
- [11] 曹耀华,李云婷.深部近距离下位煤层回采巷道围岩变形控制[J].煤炭科学技术,2021,49(9):76-81.
- [12] 常立宗,苏学贵,杜献杰,等.高应力区巷道支护结构采动破坏特征研究[J].工矿自动化,2021,47(3):20-26.
- [13] 王超,王益腾,韩增强,等.垂直孔应力解除法地应力测试技术及工程应用[J].岩土力学,2022,43(5):1412-1421.
- [14] 尚福华,王玮卿,曹茂俊.基于改进BP神经网络的页岩地应力预测模型[J].计算机技术与发展,2021,31(7):164-170.
- [15] 赵才顺,谭伟雄,石雪峰,等.鄂尔多斯盆地东缘井区现今地应力特征与主控因素分析[J].地球物理学进展,2021,36(2):716-722.
- [16] 周拿云.井底应力解除结合数字图像相关法测量水平地应力[J].天然气工业,2022,42(10):149.