

西部软岩大硐室围岩变形机理模拟及现场监测研究

马灵姬

北京中煤矿山工程有限公司，北京

收稿日期：2021年11月27日；录用日期：2021年12月30日；发布日期：2022年1月10日

摘要

为了推进西部软岩大硐室围岩变形机理的研究，以鄂尔多斯地区红庆梁煤矿为背景，集中开展了室内岩石力学实验和数值模拟及现场监测研究，通过对数据的分析揭示了红庆梁煤矿大硐室开挖及施工期间围岩变形机理，提出了大硐室支护参数优化的建议。该研究成果为红庆梁矿后期建设的大硐室和巷道围岩控制提供了技术支持和借鉴。

关键词

软岩，大硐室，围岩变形机理，数值模拟，现场监测

Study on Deformation Mechanism and Field Monitoring of Large Cavern Surrounding Soft Rock in Western China

Lingji Ma

Beijing China Coal Mine Construction Engineering Company Ltd., Beijing

Received: Nov. 27th, 2021; accepted: Dec. 30th, 2021; published: Jan. 10th, 2022

Abstract

In order to improve the study on the deformation mechanism of surrounding rock of underground chamber in soft rock area in the west of China, we carried out indoor rock mechanics experiment numerical simulation and field monitoring in Ordos Hong Qing Liang coal mine. Through the analysis of the data, we revealed that the large chamber excavation and deformation mechanism of

surrounding rock during the construction. Some suggestions of the large chamber support parameter optimization have been given. The research results can provide technical support and reference for the cavern or roadway surrounding rock control in the later construction of the red Qing Liang mine.

Keywords

Soft Rock, Large Chamber, Deformation Mechanism of Surrounding Rock, Numerical Simulation, Field Monitoring

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国煤炭行业的发展，煤炭的开采逐渐由浅部到深部，由小断面到大断面，由东部地区向西部地区过渡。一般矿山巷道硐室，断面面积大于 15 m² 时，即可称为大硐室。动载扰动下深部大断面硐室围岩结构性破坏与失稳是大型现代化煤矿面临的突出问题。目前，国外鲜少有关于大硐室围岩变形机理的报道。伴随着我国煤炭行业机械化水平的不断提高，大型及超大型煤矿不断出现，使得对井筒和主要硐室的要求逐渐增大。断面面积越大，尺寸效应越明显，支护的难度越高[1]。因此对大断面硐室变形机理和控制技术的研究就显得尤为重要。

2. 工程背景

红庆梁煤矿位于鄂尔多斯高原北部，设计生产能力 600 万吨/年。该矿井内地形总体趋势为南高北低，且又表现为西部高东部低的变化趋势。大硐室周围涉及地质岩石组有砂岩岩组，煤岩组，粉砂岩泥岩砂质泥岩岩组，其中粉砂岩泥岩砂质泥岩岩组广泛分布于侏罗系中统延安组及安定组，是与煤层开采有直接关系的岩组之一，是含煤地层的主要岩组，由粉砂岩、泥岩及砂质泥岩等组成。以水平层理、波状层理、节理裂隙和滑面等结构面为特征，其饱和抗压强度为 3.87 MPa，若浸水或长时间暴露于空气中，岩石将沿层理方向离析成薄片，其软化系数为 0.37，属于极软弱类易软化岩石[2]-[7]。

3. 围岩力学性能测试与分析

许多研究人员通过理论分析、数值模拟以及室内相似材料模拟等方式，探索出了深部大断面硐室围岩变形规律，发现了不同应力条件下的深部大断面硐室围岩的变形机制。本文在借鉴以往研究成果的基础上，有针对性的对红庆梁煤矿大硐室的围岩机理进行了研究和探讨。试验采集了多组现场岩样，分别进行了室内物理力学试验，试验过程与结果如下：

1) 含水量测定

取一定质量的较小破碎岩样，用烘干箱对其进行烘干处理，计算干岩样与湿岩样的质量变化差值，得出含水量，计算得含水率，最终实验结果如表 1 所示。

2) 单轴抗压强度测定

利用长春朝阳岩石三轴试验机，对岩样的天然状态、饱和状态进行单轴抗压强度的测定。主要技术参数包括样本的截面积和岩石破坏荷载，最终实验结果如表 2 所示。

Table 1. Test results of sample moisture content
表 1. 试样含水量试验结果

试样编号	盒质量 (m_1)/g	盒 + 湿样质量 (m_2)/g	盒 + 干样质量 (m_3)/g	含水率 w ($m_2 - m_3$)/($m_3 - m_1$) × 100%
1	14.98	25.01	23.34	19.97
2	15.21	31.69	29.19	17.88
3	15.05	30.18	27.77	18.94

Table 2. One-way compressive strength of rock
表 2. 岩石单向抗压强度

试件编号	岩石名称	直径 (mm)	高度 (mm)	试件面积 $A/(\text{mm}^2)$	天然状态 破坏载荷 P_1/kN	饱和状态 破坏载荷 P_2/kN	天然状态 抗压强度 P_1/A σ_c/MPa	饱和状态 抗压强度 P_2/A σ_c/MPa
1	泥岩	50.10	100.03	1971.357	12.54	3.65	6.36	1.85
2	泥岩	50.02	99.98	1965.066	12.59	4.17	6.41	2.12
3	泥岩	50.04	100.02	1966.638	12.76	4.96	6.49	2.52

3) 黏聚力与内摩擦角

利用长春朝阳岩石三轴试验机，采用直径 $\Phi = 50 \text{ mm}$ 圆柱体试件，进行三组侧向等压三轴压缩试验（常规三轴， $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ ）。试验中围压分别为 2 MPa、3 MPa 和 5 MPa，轴向施加 0.75 MPa/s 的应力，速度 0.1 mm/min，直至岩样破坏。由 σ_1 ， σ_2 ， σ_3 具体值找出摩尔应力圆，然后绘制包络线，从中获得岩石试样的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 。最终黏聚力 $c = 0.693 \text{ MPa}$ ，内摩擦角 $\varphi = 27.32^\circ$ 。

4. 主井装载硐室数值模拟监测点布置与结果分析

1) 围岩断面监测

为研究硐室支护后应力、变形分布与变化规律，在顶板、底板、左右两帮处，设置 5 个监测断面，如图 1 所示，T 表示顶板，B 表示底板，R 表示右帮，L 表示左帮。提取模拟计算结果对围岩横向、竖向的应力、变形着重分析。

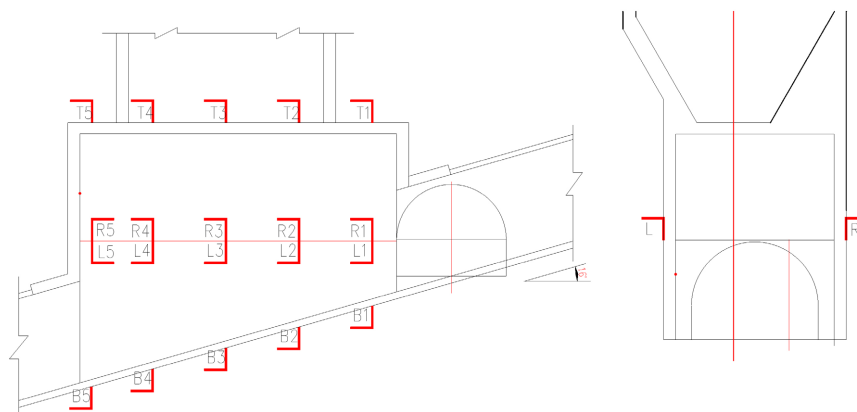


Figure 1. The monitoring position of the chamber section
图 1. 硐室断面监测位置图

2) 特殊点监测

结合井底装载硐室支护施工设计，对硐室稳定性进行分析。在井底装载硐室四周设置监测点，包括上部连接煤仓硐室，下部驱动硐室设置监测点监测围岩位移量，如图 2 所示。

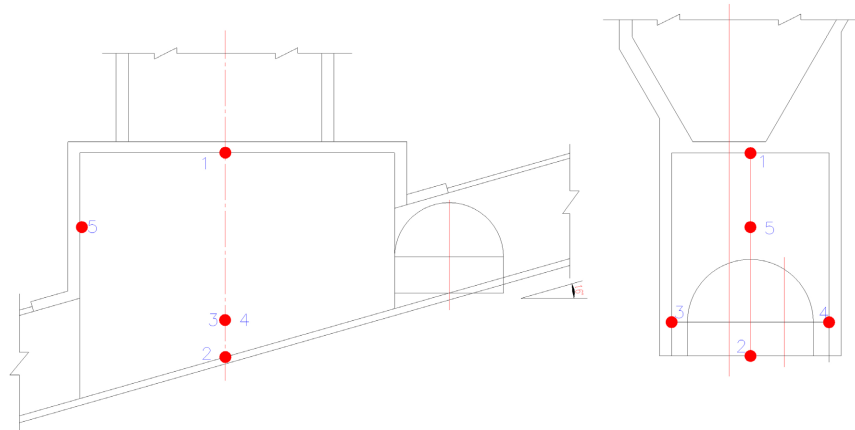


Figure 2. Location map of special point displacement monitoring
图 2. 特殊点位移监测位置图

装载硐室根据数值模拟和监测断面的设置，开挖的顺序也依次分三层进行。每层开挖之后，运算 200 步，模拟变形能的释放，在施加支护完成之后，才进行下一步开挖。开挖完成后，计算至稳定。挖后硐室表面变形破坏，应力集中区向围岩深处转移，围岩表面位移量呈线性增加，施加支护后围岩变形量明显降低，逐渐趋于水平。硐室监测点位移曲线如图 3 所示。

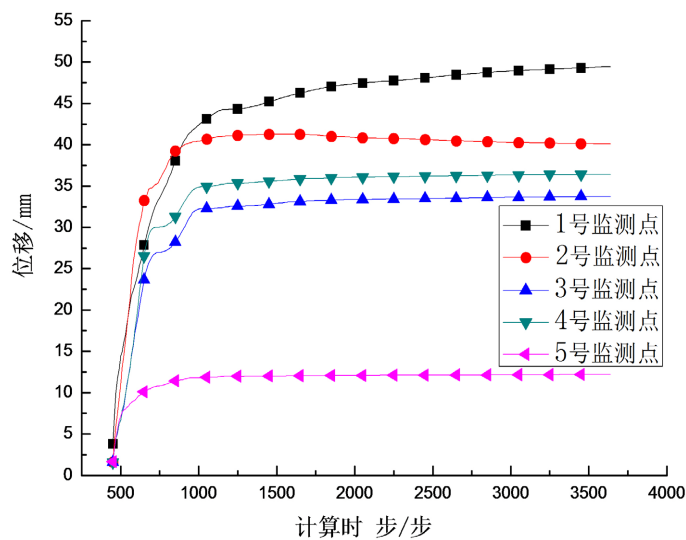


Figure 3. Chamber displacement monitoring curve
图 3. 硐室位移监测曲线

通过数值模拟研究分析可知，支护后井底装载硐室顶底板、两帮和前侧壁的变形量较大，特别是两帮塑性区面积较大，需要施加锚索加强支护。而且硐室边角和主斜井交叉口处顶角混凝土喷层法向应力和切向应力均较为明显，需要设置监测点监测围岩变形和锚杆锚索受力。

5. 井底装载硐室现场监测成果

混凝土监测曲线各测点变化规律不同, 综合考虑各测点监测数据的典型性, 本文主要介绍了右帮(断面 1 测点)与中部部位混(断面 2 测点)凝土断面应变监测结果。为更好地对监测结果进行分析, 规定应变计测点 N-y 沿硐室轴向埋设、N-z 沿竖直方向布置, N-x 沿水平方向埋设, 且保证 XY 面与 Z 轴垂直布置, 符合右手螺旋法则。根据监测结果绘制应变计监测得到的频率模数、温度和应变曲线。

5.1. 右帮部位应变监测结果分析

右帮监测结果曲线如图 4 所示。

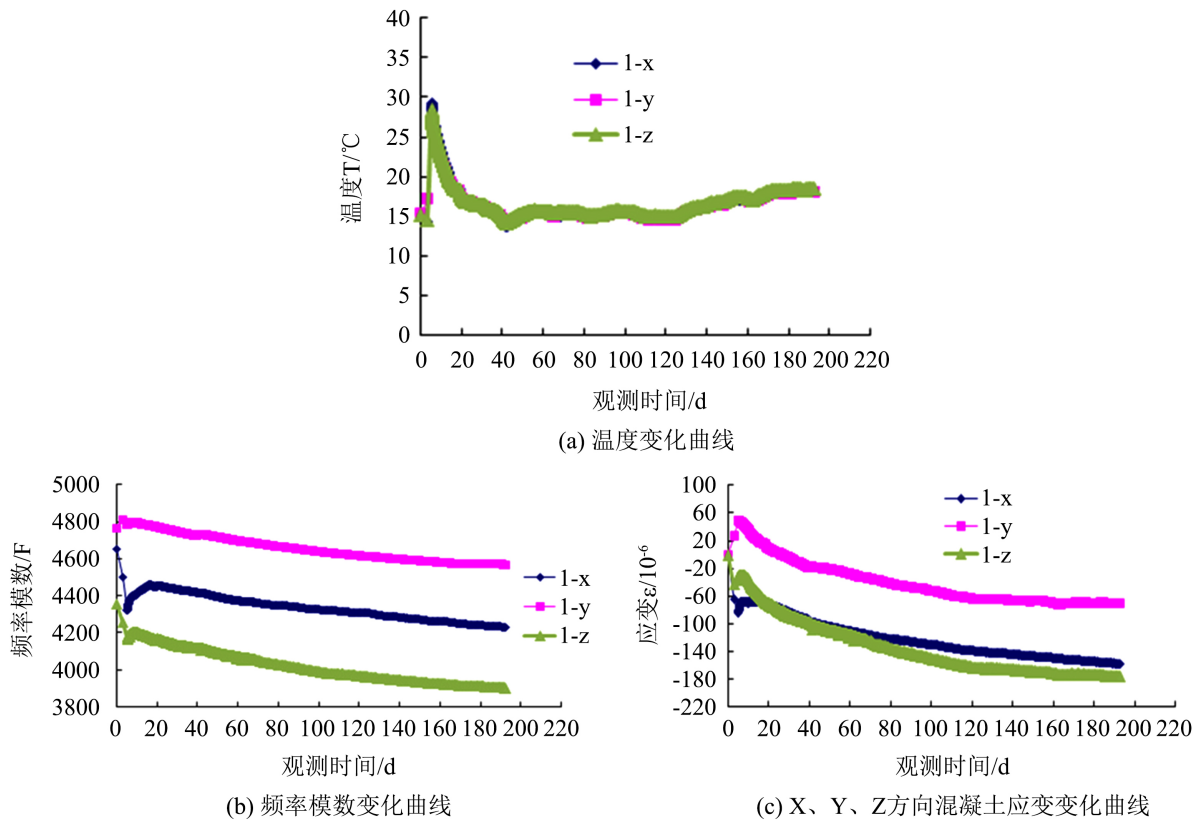


Figure 4. The cross-section test result curve
图 4. 断面测试结果曲线

由图 4(a)可知, 混凝土应变计埋设后, 三者温度变化趋势基本一致, 先是受混凝土水化热的影响急剧增长, 在 6 d 时达到顶点 30℃, 随后急剧下降, 并在 15℃时趋于稳定状态, 监测后期温度有一定的回升, 但升温非常缓慢。

图 4(b)表明监测 192 d 左右时, 混凝土应变计 1-x、1-z 频率模数变化基本一致, 前期与 1-y 变化不同, 后期三者变化规律基本一致, 由曲线图可知, 变化规律主要经历了 3 个阶段, 分别为:

1) 截至 5 d 左右时, 1-x、1-z 应变计频率模数迅速下降至最小值, 规律变化基本一致, 安装后 5 d 时, 均下降了约 200 以上, 而 1-y 应变计模数则是先增长至最大值, 随后有所下降。

2) 监测 5 d 后 1-x、1-z 应变计频率模数开始急速回升, 在 7 d 左右时缓慢上升, 随后上升到极大值, 而 1-y 应变计模数在 5 d 时开始缓慢下降。

3) 频率模数后期处于缓慢下降态势, 三者基本一致, 在监测后期, 模数有趋于稳定的态势。

图 4(c)表明监测 192 d 过程中, 测点 1-x、1-z 混凝土应变计变化趋势基本一致, 而 1-y 曲线则有所差异, 同样地, x、y、z 三个方向混凝土应变曲线也可分为 3 个主要阶段: 1) 混凝土压应变急剧增大阶段; 2) 混凝土压应力迅速减小阶段; 3) 混凝土压应力持续缓慢增大阶段。

三个测点监测后期变化趋势一致, 只是开始增大的时间节点不同, 但后期变化规律基本相同, 并逐渐趋于稳定的态势, 反映了砌碛支护结构的受力状况, 由于上部仍然在浇筑混凝土, 导致上部混凝土自重会不断增大, 监测数据应是两次支护共同作用的结果, 但围岩作用力应是压应力持续增大的主要影响因素。

5.2. 中部断面应变监测结果分析

中部监测结果曲线如图 5 所示。

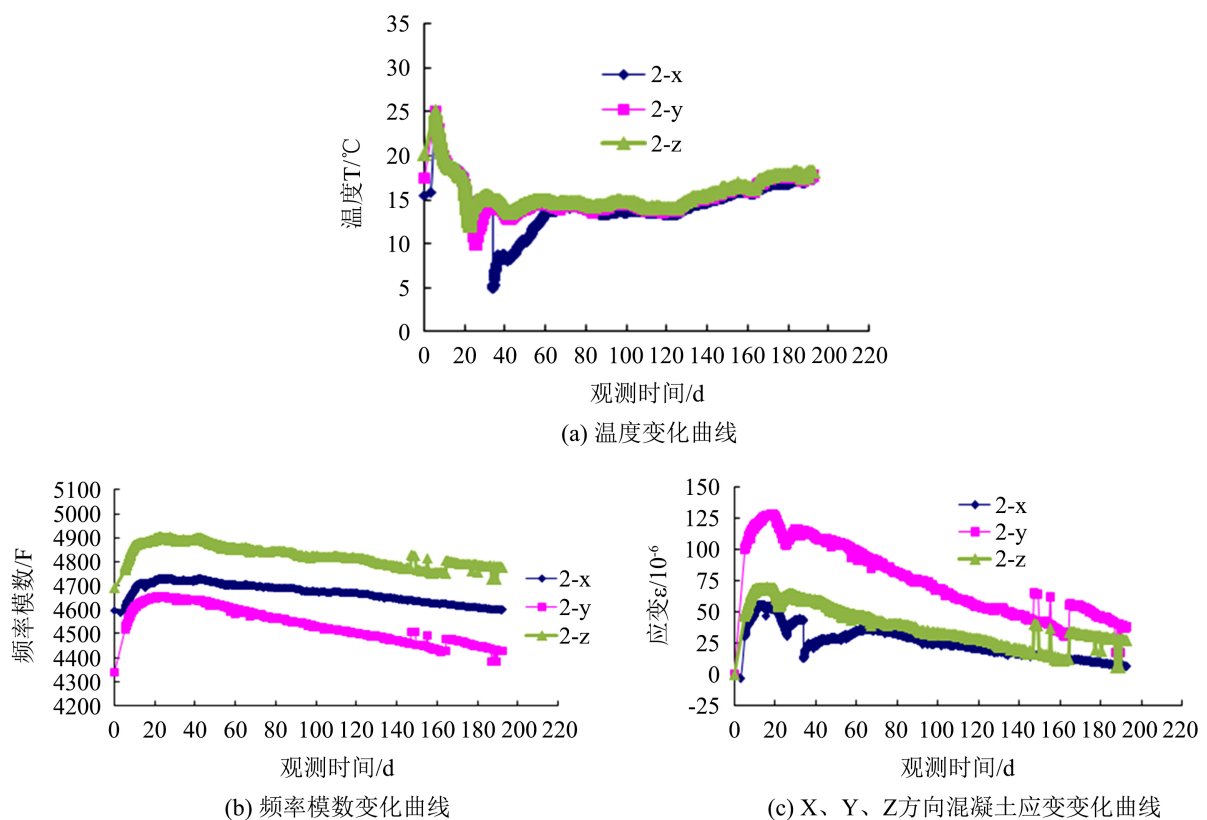


Figure 5. The cross-section test result curve

图 5. 断面测试结果曲线

由图 5(a)可知, 混凝土应变计埋设后, 除个别测点在某些时间节点时极值不用, 温度变化趋势基本一致, 先是受混凝土水化热的影响急剧增长, 在 6 d 时达到顶点 25℃, 随后急剧下降, 然后温度又有所回升, 并在 15℃时趋于缓慢回升状态。

图 5(b)表明监测 192 d 左右时, 混凝土应变计测点 2-x、2-y、2-z 频率模数变化基本一致, 主要经历了两个阶段分别为频率模数线性快速增加阶段和频率模数长期缓慢减小阶段。

图 5(c)表明整个监测期内, 与频率模数类似, 三个方向测点混凝土应变计变化趋势基本一致, 拉应

变先迅速增大到极值，而后缓慢减小，监测后期逐渐呈现出趋于稳定的态势。

由以上分析可知，装载硐室迎面山墙正中位置 3 个方向混凝土应变均为拉应变，且 y 方向应变值最大。根据以上检测结果可知右帮与中部山墙部位应变变化规律不同，且主要应变也不同，右帮以压应变为主，中部山墙以拉应变为主。从变化规律来看，右帮部测点主要经历 3 个变化阶段，即压应变先增大，而后减小，最后压应变处于缓慢增加态势。而对中部迎面山墙而言，应变数据则呈现先增大，而后拉应变缓慢减小的趋势。

6. 结论

1) 本文通过岩石力学试验得出红庆梁煤矿围岩性质为含水率较高，抗压强度低，黏聚力及内摩擦角偏小，具有较强的膨胀性。

2) 对比两个截面混凝土应变数据可知，中部迎面山墙部位砌碇结构受力要大于右两帮结构受力，推测这与矿井硐室空间布置直接相关。

3) 混凝土中部迎面山墙处应变三个方向均为拉应变，且轴向拉应变极大值为 $128.7 \mu\epsilon$ ，已超过 C30 混凝土极限拉应变 $81.4 \mu\epsilon$ (经计算得到)，局部可能会出现裂缝，建议后续施工煤仓时应重点加强监测，必要时应及时采取加固措施进行局部加固。

参考文献

- [1] 朱浮声. 关于软岩流变性与软岩工程支护的几点看法[J]. 岩石力学与工程学报, 1998(3): 346.
- [2] 任青文, 张宏朝. 关于芬纳公式的修正[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2001, 29(6): 109-111.
- [3] 赵鹏涛. 弱胶结软岩巷道支护技术及泥化矸石治理研究[D]: [硕士学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2014.
- [4] 柏建彪, 王襄禹, 贾明魁, 侯朝炯. 深部软岩巷道支护原理及应用[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(5): 632-635.
- [5] 程立朝, 陆庭侃. 膨胀特性对软岩巷道围岩变形规律的影响研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2006, 25(6):461-464.
- [6] 李国富. 膨胀型软岩变形机理与特种控制技术[J]. 金属矿山, 2006(9): 18-21+24.
- [7] 周翠英, 谭祥韶, 邓毅梅, 张乐民, 王建华. 特殊软岩软化的微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 394-400.