

煤矿沉陷区煤岩样品的采集、试件制备与力学参数测定方法研究

——以后安煤矿110203综采工作面为例

赵 峰¹, 周连春², 赵 文¹, 谭 诗², 赵 成¹, 古 娜², 赵 雄², 赵 津²

¹山西朔州平鲁区后安煤矿后安煤炭有限公司, 山西 朔州

²西昌学院土木与水利工程学院, 四川 西昌

收稿日期: 2025年12月14日; 录用日期: 2026年1月19日; 发布日期: 2026年1月26日

摘 要

采煤沉陷区的稳定性评估与生态复垦设计高度依赖于煤岩体的力学参数准确性。本研究以山西省朔州市平鲁区后安煤矿110203综采工作面为对象, 系统开展了煤岩样品的采集、试件制备与力学参数测定工作。采用“捡冒落岩块法”进行现场采样, 结合实验室标准制备流程, 完成了干密度、含水率、单轴抗压强度、弹性模量、泊松比、内聚力与内摩擦角等关键参数的测定。试验结果表明: 11#煤层力学性质较弱, 密度为 1.23 g/cm^3 , 单轴抗压强度为 4.83 MPa , 弹性模量为 0.76 GPa , 内聚力为 1.54 MPa , 内摩擦角为 24° ; 而其直接顶板(页岩)力学性能显著优于煤层, 密度为 2.63 g/cm^3 , 单轴抗压强度为 40.78 MPa , 弹性模量为 5.43 GPa , 内聚力为 6.39 MPa , 内摩擦角为 36° 。研究成果提供了可靠的数据支撑, 具有重要的工程应用与推广价值。

关键词

采样方法, 试件制备, 单轴抗压强度, 弹性模量, 内摩擦角, 后安煤矿, 沉陷区

Study on the Methods of Sampling, Specimen Preparation and Mechanical Parameter Determination of Coal and Rock Samples in Coal Mine Subsidence Areas

—A Case Study of the 110203 Fully Mechanized Mining Face in Hou'an Coal Mine

Feng Zhao¹, Lianchun Zhou², Wen Zhao¹, Shi Tan², Cheng Zhao¹, Na Gu²,
Xiong Zhao², Jin Zhao²

文章引用: 赵峰, 周连春, 赵文, 谭诗, 赵成, 古娜, 赵雄, 赵津. 煤矿沉陷区煤岩样品的采集、试件制备与力学参数测定方法研究[J]. 矿山工程, 2026, 14(1): 215-221. DOI: 10.12677/me.2026.141023

¹Hou'an Coal C., Ltd., Hou'an Mine, Shuozhou Shanxi²School of Civil Engineering and Water Conservancy, Xichang University, Xichang Sichuan

Received: December 14, 2025; accepted: January 19, 2026; published: January 26, 2026

Abstract

The stability evaluation and ecological reclamation design of coal mining subsidence areas are highly dependent on the accuracy of mechanical parameters of coal and rock masses. Taking the 110203 fully-mechanized mining face of Hou'an Coal Mine in Pinglu District, Shuozhou City, Shanxi Province as the research object, this study systematically carried out the collection of coal and rock samples, preparation of test pieces and determination of mechanical parameters. The caving rock picking method was adopted for field sampling, and combined with the laboratory standard preparation procedures, the key parameters such as dry density, water content, uniaxial compressive strength, elastic modulus, poisson's ratio, cohesion and internal friction angle were measured. The test results show that the 11# coal seam has weak mechanical properties with a density of 1.23 g/cm^3 , uniaxial compressive strength of 4.83 MPa, elastic modulus of 0.76 GPa, cohesion of 1.54 MPa and internal friction angle of 24° . In contrast, its immediate roof (shale) has significantly better mechanical properties than the coal seam, with a density of 2.63 g/cm^3 , uniaxial compressive strength of 40.78 MPa, elastic modulus of 5.43 GPa, cohesion of 6.39 MPa and internal friction angle of 36° . The research results provide reliable data support and have important engineering applications and popularization value.

Keywords

Sampling Method, Specimen Preparation, Uniaxial Compressive Strength, Elastic Modulus, Internal Friction Angle, Hou'an Coal Mine, Subsidence Area

Copyright © 2026 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

我国作为矿产资源开发与消费大国，煤炭资源的长期大规模开采在支撑国民经济发展的同时，也引发了严重的矿区生态环境问题，其中采煤沉陷已成为最主要的灾害形式之一。采空区上覆岩层的移动与破坏会导致地表产生大范围的沉陷、地裂缝及边坡失稳，不仅破坏土地资源与农业生产条件，也对当地居民生命财产安全构成潜在威胁。为了科学预测沉陷范围、评估边坡稳定性并制定有效的复垦治理方案，获取采场覆岩，尤其是煤层及其直接顶底板的关键力学参数，成为进行精准数值模拟与工程设计不可或缺的基础性工作[1]。

山西省朔州市平鲁区后安煤炭有限公司后安煤矿(以下简称“后安煤矿”)在 110203 综采工作面回采过程中，井田范围内已形成显著的采空区。为实现煤矿安全开采与生态环境协同治理的目标，开展针对性的沉陷区治理研究工作迫在眉睫[2][3]。然而，国内外对于沉陷区煤岩力学特性的研究，常因采样方法、试件制备标准化不足以及原位应力状态难以准确模拟等因素，导致获取的参数与实际工程应用存在偏差[4][5]。特别是在类似于后安煤矿的干旱半干旱地区，岩石的力学行为受风化、含水率变化的影响更为显

著, 现有研究对此类条件下参数的系统性测定与修正尚显不足。

鉴于此, 本研究以后安煤矿 110203 综采工作面为工程背景, 旨在建立一套适用于采煤沉陷区的“现场采样-标准化制样-实验室精确测试-数据处理与分析”一体化技术体系。通过系统测定 11#煤层及其直接顶板(页岩)的密度、单轴抗压强度、弹性模量、泊松比、内聚力及内摩擦角等核心力学参数, 旨在为后续数值模拟分析、矿压分布规律研究以及边坡稳定性计算提供可靠的数据支撑。本研究成果不仅对后安煤矿的生态修复工程具有直接的指导价值, 也为我国类似地质与开采条件下的矿区沉陷治理工作提供了可借鉴的技术路径与参数依据。

2. 区域概况与研究对象

山西朔州平鲁区后安煤炭有限公司后安煤矿(以下简称“后安煤矿”)位于山西省朔州市平鲁区东南部, 直距平鲁区约 14.5 公里, 行政隶属平鲁区陶村乡管辖。该矿地处晋北黄土高原, 地貌类型以黄土丘陵为主, 沟壑纵横, 地表植被覆盖度较低, 属典型的温带大陆性季风气候, 干旱少雨, 生态环境较为脆弱。井田周边矿业活动活跃, 北邻山西平朔东露天煤炭有限公司, 南与东南邻山西朔州平鲁区茂华白芦煤业有限公司, 东邻山西朔州平鲁区华美奥冯西煤业有限公司和山西朔州平鲁区国兴煤业有限公司, 西邻山西平朔安家岭露天煤炭有限公司。相邻矿井均为低瓦斯矿井, 其开采活动构成了本区域复杂的工程地质背景。

后安煤矿井田内含煤地层主要为二叠系山西组(P_2s)和石炭系太原组(C_{3t})。本次研究的对象集中于太原组底部的 11#煤层及其直接顶板。

太原组平均厚度达 105.07 m, 是井田内主要的含煤地层, 含煤系数高达 29.8%。11#煤层为太原组底部的主要可采煤层, 上距 9#煤层 2.80~7.42 m, 平均间距 4.91 m。煤层厚度在 2.15~8.13 m 之间, 平均厚度为 4.90 m。煤层结构简单至较简单, 含夹矸 0~4 层。其直接顶板以灰岩为主, 常伴有泥岩伪顶, 底板为泥岩和细砂岩。11#煤层属全井田稳定可采煤层。研究针对的 110203 综采工作面位于 11#煤层中, 采用一次采全高综采法, 全部垮落法管理顶板。工作面设计采高为 4.0 m, 与煤层平均厚度基本一致, 可采走向长度达 1080 m, 其开采活动是诱发上覆岩层移动和地表沉陷的直接原因。

本研究的直接研究对象为从 110203 综采工作面采集的煤与岩石实体样品。为确保样品的代表性, 采样工作紧随工作面推进过程进行。考虑到现场安全性与可操作性, 采用“捡冒落岩块法”, 在 110203 工作面切眼的机头部、中部和尾部三个关键位置, 采集因矿压显现而片帮、冒落的煤块和顶板岩块。共计获取 23 块具有代表性的样本, 其中包括 16 块 11#煤层的煤样和 7 块 11#煤层直接顶板(页岩)的岩样。采样时优先选取尺寸完整(约 $300 \times 200 \times 200$ mm)、无明显后期风化迹象的块体, 以最大限度地保留其原位力学特性。为便于识别与管理, 对样品进行了系统编号。煤层样本以“M-11-序列号”标示(如 M-11-1-1), 直接顶板岩样以“Y-11-序列号”标示(如 Y-11-1-1)。

此区域地质条件与开采实践共同构成了本研究的基础, 所获取的煤岩样品是后续一切室内力学试验、参数测定以及数值模拟研究的物质前提。

3. 试样采集与保存方法

煤岩样品力学参数的准确性与可靠性, 根本上取决于从现场采集到实验室储存的全过程质量控制。在矿山岩石力学研究中, 常用的采样方法主要包括钻芯法、爆破法和捡冒落岩块法[6]。鉴于本项目的研究对象是已形成采空区的沉陷范围, 且需在活跃的回采工作面作业, 捡冒落岩块法被确立为本研究的主要采样方法。

选择该方法主要基于以下考量:

(1) 安全性: 在综采工作面, 利用矿压自然作用下从煤壁和顶板垮落的块体进行采集, 避免了钻探或

爆破作业带来的安全风险和生产干扰，特别适合生产矿井的同步研究。

(2) 代表性：对于研究采动影响下的围岩力学行为，从采场应力扰动区(卸压区、塑性区)脱落的煤岩块体，其力学状态更能真实反映工作面推进过程中围岩的实际破坏特征，相较于未受扰动的原位岩芯，其参数对于沉陷模拟与边坡稳定性分析更具指导意义。

(3) 可行性与经济性：该方法操作简便，无需复杂的专用设备，成本低廉，且能快速获取足量的试验样品，满足项目研究的时效性要求。

为确保样品的原始性和可比性，本次采样执行了标准化的现场操作流程。

(1) 采样前准备：准备工作包括：样品袋(防水、防潮)、专用标签、数码相机、GPS 定位仪、采样记录单、记号笔以及必要的个人防护装备。

(2) 现场取样操作：

① 位置选择：在 110203 工作面切眼的机头部、中部和尾部三个具有代表性的地段，选择新鲜、未受二次破坏的片帮煤块和冒落顶板岩块。

② 完整性检查：目视检查并手动剔除有明显裂隙、风化迹象或机械损伤的块体，优先选取棱角分明、结构致密的块体。

③ 尺寸要求：目标采样尺寸约为 $300\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ ，以确保后续实验室有足够材料加工成标准试件。

④ 清洁与标注：用毛刷清除样品表面的浮煤和粉尘，随后立即用记号笔在样品上清晰标注采样点位(如“机头”、“中部”、“尾部”)和初步编号。

⑤ 信息记录：对每一个采样点进行 GPS 坐标记录，并拍摄采样位置的现场环境照片，填写采样单，详细记录采样时间、位置、岩性初步判断等信息。

4. 试件制备与试验设备

获取具有代表性和精确几何尺寸的标准试件，是确保岩石力学试验结果准确性与可比性的前提。本研究的目标是制备可用于单轴压缩试验的标准试件。为确保与国内外通用岩石力学试验标准接轨，并兼顾煤岩样本自身强度较低、易破碎的特性，制定了严格的制备流程。

试件类型与尺寸确定：本次试验主要将样本加工成长方体试件，其名义尺寸为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ (宽 \times 高 \times 长) [6]。选择长方体试件主要基于两点考虑：一是便于从层理发育的煤岩块体中定向截取，二是加工过程中相对于圆柱体试件材料损耗更少，成品率更高。

仪器校准：在试验开始前，对所有测量仪器，包括试验机的载荷传感器、位移传感器以及游标卡尺、电子天平等，均进行了计量校准，确保其处于有效和准确的状态。

环境控制：所有力学试验均在恒温恒湿实验室中进行，环境温度控制在 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，湿度控制在 $60\% \pm 5\%$ ，以消除环境波动对试验结果，特别是对变形测量带来的影响。

本研究的所有力学试验均在 RLJW-2000 型微机控制岩石伺服压力试验机上完成。该系统是进行岩石力学参数测定的关键平台，具备高精度、高稳定性和多功能的特点。

5. 试验方案与测试方法

为确保煤岩力学参数测定的科学性、准确性与可比性，本研究的试验方案围绕获取 Mohr-Coulomb 弹性模型所需的核心参数展开，主要包括物理性质参数、变形参数和强度参数。试验方案设计如下：

(1) 物理性质测定：对所有标准试件进行干密度和天然含水率的测定，为后续分析提供基础物理特性。

(2) 单轴压缩试验：作为核心试验，用于同步获取单轴抗压强度(σ_c)、弹性模量(E)和泊松比(ν)。

(3) 强度参数确定：结合单轴抗压强度试验结果，依据《工程岩体分级标准》和岩石力学经验关系，综合确定内聚力(c)与内摩擦角(φ)。

6. 数据处理与误差分析

岩石力学试验数据的处理与分析是连接原始测量值与最终工程参数的关键环节。为表征煤岩体固有的非均质性和离散性，并对总体参数进行估计，对每组(同一岩性、同一采样位置)的有效试件数据进行了统计分析。

描述性统计：对每个参数(如密度、弹性模量、单轴抗压强度)计算其算术平均值(μ)和标准差(σ)。

变异系数(CV)：计算变异系数 $CV = \sigma/\mu$ ，以无量纲的形式评价该组数据的离散程度。CV 值越大，表明煤岩体的非均质性越强。

在给定置信水平(本研究取 95%)下，计算参数平均值的置信区间，以表征样本均值对总体均值的估计范围。

采用箱线图(Box-Plot)法进行异常值的初步识别。对于落在上下须(通常为 1.5 倍四分位距)之外的数据点，结合试验记录(如试件是否存在隐蔽裂隙、端部是否提前破坏等)进行综合分析，审慎决定其取舍。

7. 试验结果与统计分析

通过对 16 块煤样和 7 块顶板岩样(页岩)的标准力学试验，获得了大量的原始数据。关键参数的初步统计结果如表 1 所示：

Table 1. Statistical summary of original data on mechanical parameters of coal and rock samples
表 1. 煤岩样本力学参数原始数据统计摘要

岩性	参数	样本数量	平均值	标准差	变异系数(CV)
11#煤	密度(g/cm ³)	16	1.23	0.03	2.4%
	单轴抗压强度(MPa)	10	4.83	1.56	32.3%
	弹性模量(GPa)	10	0.76	0.35	46.1%
	泊松比	8	0.24	0.03	12.5%
直接顶板(页岩)	密度(g/cm ³)	7	2.63	0.04	1.5%
	单轴抗压强度(MPa)	7	40.78	11.32	27.8%
	弹性模量(GPa)	7	5.43	1.41	26.0%
	泊松比	3	0.22	0.09	40.9%

典型的应力 - 应变曲线清晰地揭示了煤与顶板岩石截然不同的力学行为，如图 1 所示。

11#煤：其应力 - 应变曲线表现出典型的脆性破坏特征。曲线在达到峰值强度前，非线性段较短，峰值后应力急剧跌落，残余强度很低。这表明煤体内部原生裂隙发育，在载荷作用下裂纹迅速扩展并贯通，导致突发性破坏。

直接顶板(页岩)：其应力 - 应变曲线则显示出延性(塑性)特征。曲线具有较长的近似线性段，峰值附近有明显的屈服平台，峰值后应力下降较为平缓。这反映了页岩结构相对致密，在破坏过程中能产生较大的塑性变形。

对试验数据进行统计分析，得出以下结论：

(1) 参数离散性分析：由变异系数(CV)可知，强度参数(σ_c)和变形参数(E)的离散性远大于密度参数。

这主要源于煤岩体天然的非均质性和内部微观缺陷(如裂隙、层理、包裹体)的随机分布。煤样的弹性模量变异系数高达 46.1%，充分说明了其力学性质的极度不均匀性。

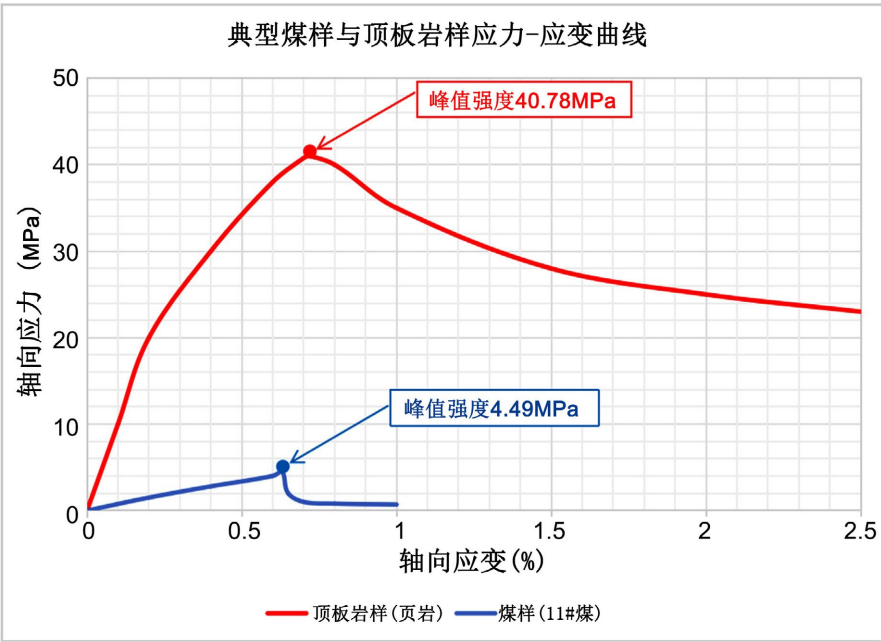


Figure 1. Comparison of stress-strain curves between a typical coal sample (M-11-2-3) and a roof rock sample (Y-11-1-3)
图 1. 典型煤样(M-11-2-3)与顶板岩样(Y-11-1-3)应力 - 应变曲线对比

(2) 煤与顶板力学性能对比: 顶板页岩的力学性能显著优于 11#煤层。其平均单轴抗压强度是煤的 8.4 倍, 平均弹性模量是煤的 7.1 倍。这种巨大的差异是导致采场围岩应力重新分布、顶板破坏和地表沉陷的根本原因。

(3) 采样位置影响分析: 对来自工作面机头、中部和尾部的煤样数据进行单因素方差分析(ANOVA), 结果表明, 在 0.05 的显著性水平下, 不同采样位置的煤样其力学参数无显著性差异($p > 0.05$)。这说明在 110203 工作面推进范围内, 11#煤层的力学性质在空间分布上相对稳定。

综合上述试验结果与统计分析, 提出用于后续数值模拟与工程设计的代表性力学参数, 如表 2 所示。其中, 强度参数(c, φ)主要依据标准并结合单轴抗压强度经验确定。

Table 2. Recommended table of representative mechanical parameters of coal and rock mass in working face 110203 of Hou'an coal mine

表 2. 后安煤矿 110203 工作面煤岩体代表性力学参数推荐表

岩性	密度(g/cm ³)	单轴抗压强度(MPa)	弹性模量(GPa)	泊松比	内聚力(MPa)	内摩擦角(°)	膨胀角(°)
11#煤层	1.23	4.83	0.76	0.24	1.54	24	0
直接顶板(页岩)	2.63	40.78	5.43	0.22	6.39	36	0

8. 结论与建议

本研究围绕山西朔州平鲁区后安煤矿 110203 综采工作面沉陷区治理的工程需求, 系统开展了从煤岩样品现场采集、实验室标准化制备到力学参数精确测定的一系列研究工作。通过上述工作, 得出以下主要结论, 并据此提出相应的工程应用与后续研究建议。

(1) 本研究成功实践并验证了以“现场捡冒落岩块法采样 - 实验室长方体标准试件精密加工 - RLJW-2000 伺服试验机精确测试 - 基于 ISRM 标准与数理统计的数据处理”为核心的一体化技术流程。该流程兼顾了现场操作的安全性、样品的地质代表性以及实验室数据的准确性与可靠性, 为类似条件矿区的岩体力学特性研究提供了可复制的技术范式。

(2) 获得了后安煤矿 11#煤层及其直接顶板的关键力学参数, 揭示了其显著的力学性能差异。试验与统计分析结果表明:

① 11#煤层属于力学性质极弱的软煤, 其代表性参数为: 密度 1.23 g/cm^3 , 单轴抗压强度 4.83 MPa , 弹性模量 0.76 GPa , 内聚力 1.54 MPa , 内摩擦角 24° 。

② 11#煤层直接顶板(页岩)则表现为中硬岩特性, 其力学性能显著优于煤层, 代表性参数为: 密度 2.63 g/cm^3 , 单轴抗压强度 40.78 MPa , 弹性模量 5.43 GPa , 内聚力 6.39 MPa , 内摩擦角 36° 。

③ 顶板页岩的单轴抗压强度和弹性模量分别约为煤层的 8.4 倍和 7.1 倍, 这种巨大的“强 - 弱”组合是控制采空区覆岩破断、矿压显现及地表沉陷规律的内在机理。

明确了研究对象的力学行为特征与参数离散性。应力 - 应变曲线分析表明, 煤体表现为典型的脆性破坏, 而顶板页岩则显示出明显的塑性变形特征。统计分析中的高变异系数, 尤其是煤样的弹性模量 CV 高达 46.1%, 揭示了煤岩体强烈的非均质性和离散性, 这在工程设计与数值模拟中必须予以充分考虑。所获参数为沉陷区稳定性分析与治理设计提供了精准、可靠的数据支撑。

参考文献

- [1] 张佳男, 周帆, 王万禄, 等. 昆阳磷矿二矿扰动岩石物理力学参数测定试验研究[J]. 采矿技术, 2025, 25(1): 42-47.
- [2] 王月祥, 麻洁琼. 践行“两山”理论的生动样本——山西朔州平鲁区后安煤炭有限公司坚持绿色发展、积极履行社会责任纪实[J]. 中国煤炭工业, 2022(10): 30-33.
- [3] 王月祥, 曹俊. 绿色为基生态立企——山西朔州平鲁区后安煤炭有限公司忠实践行“两山”理论、积极履行社会责任纪实[J]. 中国煤炭工业, 2021(9): 40-43.
- [4] Hoek, E. and Brown, E.T. (1997) Practical Estimates of Rock Mass Strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **34**, 1165-1186. [https://doi.org/10.1016/s1365-1609\(97\)80069-x](https://doi.org/10.1016/s1365-1609(97)80069-x)
- [5] Brady, B.H.G. and Brown, E.T. (2004) *Rock Mechanics for Underground Mining*. 3rd Edition, Springer.
- [6] 中华人民共和国煤炭工业部. MT 38-1987 岩石样品采取方法[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 1987.