

建下散体材料充填开采方法实践研究

李 宁¹, 武丹宁^{2*}

¹国家能源集团宁夏煤业羊场湾煤矿, 宁夏 银川

²安徽理工大学安全科学与工程学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2025年8月22日; 录用日期: 2025年9月22日; 发布日期: 2025年10月13日

摘 要

为了安全经济的回收建下遗留条带煤柱, 结合当地资源赋存状态, 采用矸石、建筑垃圾、粉煤灰为主要材料进行无胶结散体材料充填。通过散体充填材料压实试验获得了不同配比条件下力学特性及最优配比: 设计矸石、建筑垃圾与粉煤灰的质量之比为1:1:0.4。进一步地, 设计了一种以矸石、建筑垃圾、粉煤灰为主要材料的充填系统及充填步骤。采用试验获得的优化后的散体充填材料进行工业性试验, 实测地表累计最大下沉量为20 mm、最大水平变形为1.3 mm/m, 地表沉陷得到有效控制。

关键词

建下采煤, 散体材料充填, 压实试验, 充填方法设计

Practical Study on Backfilling Mining Method with Granular Materials under Buildings

Ning Li¹, Danning Wu^{2*}

¹Yangchangwan Coal Mine, Ningxia Coal Industry Co., Ltd., National Energy Group, Yinchuan Ningxia

²School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: August 22, 2025; accepted: September 22, 2025; published: October 13, 2025

Abstract

To safely and economically recover the residual strip coal pillars under buildings, combined with

*通讯作者。

文章引用: 李宁, 武丹宁. 建下散体材料充填开采方法实践研究[J]. 矿山工程, 2025, 13(6): 1159-1165.

DOI: 10.12677/me.2025.136130

the local resource occurrence status, uncemented granular materials (mainly composed of gangue, construction waste, and fly ash) were used for backfilling. Through compaction tests on the granular backfilling materials, the mechanical properties under different mix ratios and the optimal mix ratio were obtained: the mass ratio of gangue, construction waste, and fly ash was designed as 1:1:0.4. Furthermore, a backfilling system and corresponding backfilling procedures using the above three materials as the main components were designed. Industrial tests were conducted with the optimized granular backfilling materials obtained from the tests. The measured results show that the maximum cumulative surface subsidence is 20 mm and the maximum horizontal deformation is 1.3 mm/m, indicating that surface subsidence has been effectively controlled.

Keywords

Mining under Buildings, Granular Material Backfilling, Compaction Test, Backfilling Method Design

Copyright © 2025 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. 综述

随着我国经济的高速发展, 对煤炭资源的开发利用越来越高, 建筑物下、铁路下、水体下和承压水上(“三下一上”)压煤开采成为我国尤其是中东部煤矿开采面临的主要问题[1]-[3]。特别在一些开采较早的老矿区, 随着可采资源的枯竭, 村庄下压煤问题尤为突出, 目前济宁、菏泽及枣庄西部部分矿井已经到了不搬迁就被迫停产的境地[4]-[6]。因此, 为延长矿井服务年限, 在保证地表建(构)筑物安全的前提下, 采取有效的技术途径最大限度的采出建(构)筑物下压煤已势在必行。

长期以来, 我国建下压煤主要采用村庄搬迁、条带开采、膏体充填和覆岩离层注浆等几种方式。目前, 继续采用村庄搬迁的办法越来越困难: 一方面村庄搬迁土地征用困难、费用大, 给煤矿企业带来了沉重的经济负担; 另一方面由于搬迁距离过大, 给农民带来了许多生产和生活上的不便。条带开采是减小地表变形的有效方法之一, 但条带开采采出率低, 生产管理复杂。膏体充填可以有效提高村庄下压煤的采出率, 充填成本越来越大。覆岩离层注浆方法充填效果存在争议, 一般认为覆岩离层注浆地表减沉量不超过 40%, 基本达不到控制地表变形的目的[7]-[12]。

人类在享受煤炭资源带来的工业革命的同时, 也受到煤矸石自燃、堆放、溃塌等带来空气污染、水体污染、占用耕地等一系列问题的困扰。煤矸石长期堆存, 占用大量土地, 污染水源, 且自燃后生成 H_2S 、 SO_2 等有害气体, 对生态环境构成巨大危害[12]-[14]。

因此, 科学合理地解决“三下一上”压煤、固体废弃物处理和开采损害等问题, 减轻采矿业对自然、社会和生活环境的影响和破坏, 最大限度利用有限的资源, 实现煤炭资源的“绿色开采”, 是当前我国矿业领域急需解决的一项重大课题。本文基于老区矿井现状, 设计矸石充填开采技术, 充填方式确定应用比较简单的机械输送方式, 采用皮带机、刮板机、管道等运输矸石; 同时利用当地的建筑垃圾、粉煤灰可与矸石混装同时进行充填, 从而实现减少地面的环境污染, 实现绿色矿山开采的目的。

2. 工程背景

山东能源集团某矿立井暗斜井开拓, 一水平标高为-405 m, 井筒深度 460 m, 第二水平为-750 m, 现正在生产的为第三水平, 水平标高为-930 m。矿井采用中央并列式通风方式, 开采方式初期为综采。

矿井前期采用条带方案开采了 30 余个工作面, 共采出煤量约 2800 万 t。条带开采效果良好, 有效地保护了地表村庄建筑物。目前, 为了延长矿井寿命, 开始计划开采遗留条带煤柱, 研究计划开采主采煤层为 3 煤, 其结构简单, 赋存稳定, 全区可采。3 煤平均厚度 3.5 m, 平均倾角 10°。

目前, 井下矸石提升占用了矿井的部分生产能力, 影响了矿井生产效率, 也提高了吨煤成本, 通过矸石不升井直接充填到井下工作面, 可以有效解决这一问题。在工业广场煤柱内布置非充分采动矸石置换工作面, 在保证地表建筑物安全使用的前提下, 消纳矿井矸石, 提高矿井提升及运输能力, 可有效提高矿井的生产效率。从投产至今, 该矿几乎全部为建筑物下压煤开采, 设计的开采方案均能保证建筑物均安全正常使用。另外还设立了地表移动观测站, 取得了大量实测资料。基于以上分析, 在工业广场煤柱内布置非充分采动矸石置换工作面处理矸石是可行的。

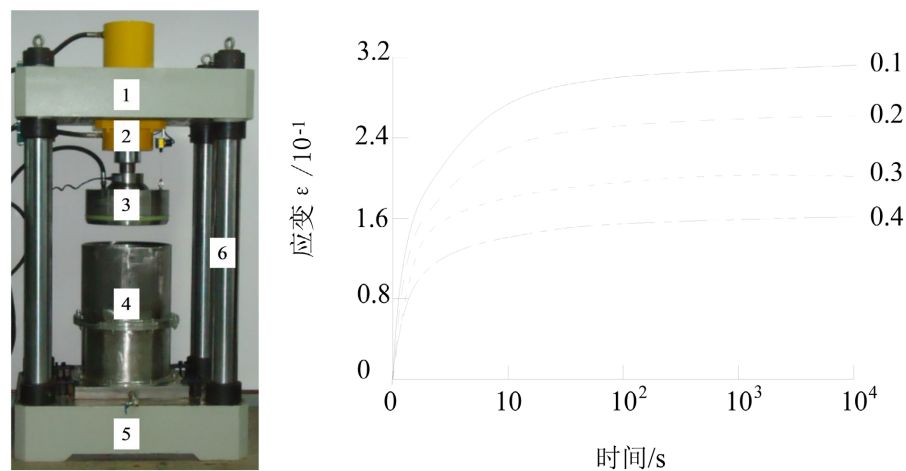
3. 散体充填材料压实力学特性

为了获得更优的充填效果以及进一步降低成本, 结合当地建筑垃圾、粉煤灰较多的现状, 充填材料确定为矸石、建筑垃圾、粉煤灰, 其中, 粉煤灰可以充填矸石、建筑垃圾等散体之间的空隙, 降低初始空隙率。因为矿井自身产出的矸石与当地大量堆存的建筑垃圾数量大致匹配, 便于规模化应用; 且矸石颗粒棱角分明, 建筑垃圾中含有的砖块、混凝土块等经破碎后颗粒形态各异, 二者混合有助于优化级配, 提高堆积密度; 因此选择矸石与建筑垃圾质量比为 1:1 作为基础配比。为了方便运输充填, 需要对较大的矸石、建筑垃圾充填进行破碎, 控制粒径不大于 60 mm。根据煤矿矸石现存量, 当地建筑垃圾与粉煤灰的资源赋存, 大体设计矸石、建筑垃圾与粉煤灰的质量之比为 1:1:(0.1~0.4)。然而上述分析只得到 3 种散体充填材料的配比范围, 为了获取控制沉陷最优级配需要进行不同配比的压实试验, 设计表 1 所示 4 种试验方案。

Table 1. Mix ratios of granular materials
表 1. 散体材料配比

试验方案	矸石: 建筑垃圾: 粉煤灰
方案 I	1:1:0.1
方案 II	1:1:0.2
方案 III	1:1:0.3
方案 IV	1:1:0.4

试验系统如图 1 所示, 系统参数如表 2 所示, 其中, 加载设备试验仓直径为 400 mm, 加载油缸极值为 500 kN, 转换为应力为 3.9 MPa。根据开采沉陷理论, 3 煤平均采厚 3.5 m, 垮落带与裂隙带发育高度最大约为采厚的 20 倍, 核算两带自重应力 1.75 MPa, 考虑安全冗余系数, 设置加载应力为 4 MPa, 加载速率为 0.5 kN/s, 采用线性加载方式, 加载时间为 10,000 s。实验中发现, 在承压过程中, 压缩变形主要包括两个方面: 散体中较大颗粒位置调整及小颗粒滑动填充空隙; 较大颗粒压碎产生的小颗粒滑入岩块空隙。轴向载荷较小时, 轴向变形主要由较大颗粒位置调整及小颗粒滑动填充空隙引起; 轴向载荷较大时, 轴向变形除由较大颗粒位置调整及小颗粒滑动填充空隙引起外, 还包括破碎岩石压碎产生的小颗粒滑入岩块空隙。如图 1 所示, 通过不同配比散体压缩试验看出, 应变随时间的流逝呈现对数增长的趋势, 并且, 粉煤灰含量越大, 应变越小。这是因为粉煤灰的增加既降低了散体材料之间的空隙, 也增加了散体材料之间的摩擦系数。故现场选用矸石、建筑垃圾与粉煤灰的质量之比为 1:1:0.4。



1-试验系统横梁；2-加载油缸；3-加载压头兼承压水仓；4-试验舱；5-试验系统底座；6-立柱。

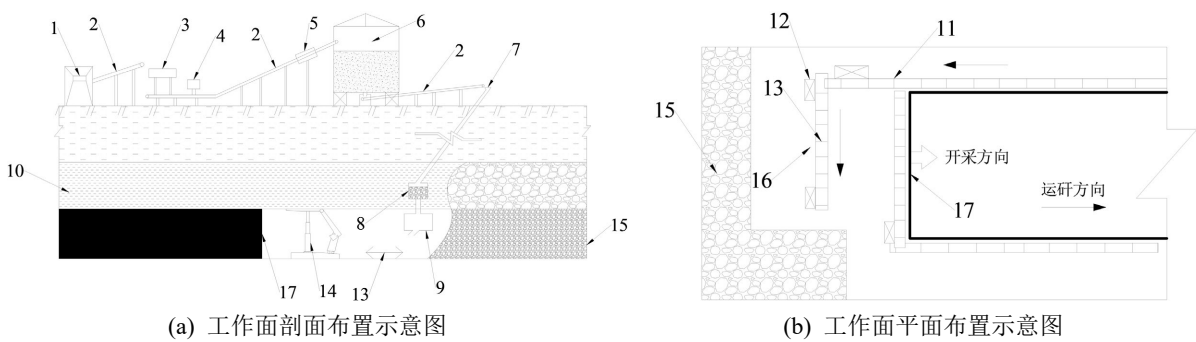
Figure 1. Test system and strain-time relationship of granular compression test
图 1. 试验系统及散体压缩试验应变 - 时间关系

Table 2. Main parameters of the broken rock deformation test system
表 2. 破碎岩石变形试验系统主要参数

轴压	≤600 kN	轴压精度	0.01 kN
水压	≤2 MPa	水压精度	0.01 MPa
液压缸位移	≤500 mm	位移精度	0.01 mm
试验舱直径	400 mm	试验舱高度	680 mm

4. 充填系统及充填步骤

为了使充填方法更清楚明确的表达出来，以下将结合附图进行详细说明。其中图 2(a)是充填系统的整体工作剖面布置示意图，图 2(b)是充填系统的充填采煤工作面平面布置示意图。



图中：1-料斗；2-运输皮带；3-筛分机；4-破碎机；5-皮带秤；6-储料仓；7-投料井；8-研石仓；9-给料机；10-顶板；11-区段上巷运研皮带机；12-转载机；13-充填刮板运输机；14-液压支架；15-研石充填区；16-充填工作面；17-采煤工作面。

Figure 2. Schematic diagram of the layout of backfilling coal mining face
图 2. 充填采煤工作面布置示意图

如图 2 所示，充填系统主要包括井上钻孔送料系统、井下混合运输系统、充填工作面运输系统。所

述井上钻孔送料系统主要包括料斗 1、运输皮带 2、筛分机 3 和破碎机 4，还包括用于将粉煤灰和建筑垃圾进行均匀混合的混合储料仓 5，储料仓底部的出料口通过运输皮带 2 与投料井井口相连，运输皮带 2 分为粉煤灰运输皮带和建筑垃圾运输皮带，运输皮带 2 上布置有皮带秤 5，可向混合储料仓 6 中投入一定质量的粉煤灰和建筑垃圾，使二者按照一定比例混合。

所述井下混合运输系统主要包括矸石仓 8、给料机 9、刮板运输机和区段上巷运矸皮带 11 等，所述矸石仓中 8 储存有来自井下原煤系统所筛选矸石、掘进产生矸石。所述充填工作面运输系统包括转载机 12 和充填刮板输送机 13，转载机 12 布置在充填工作面 16 上出口，工作面液压支架 14 后部布置独立、端部可以一定角度转动的充填刮板输送机 13。

如图 3 是本充填系统具体操作流程示意图所示，充填步骤主要包括：

a) 井上收集一定质量的粉煤灰，利用破碎机 4 对大块建筑垃圾进行破碎，并通过筛分机 3 筛选粒径 50 mm 以下的建筑垃圾，利用运输皮带 2 将二者投入到混合料仓 6，进行搅拌使其均匀混合，然后运到投料井 7 垂直送料至矸石储存仓 8；

b) 投放进井下矸石储存仓 8 的粉煤灰、破碎建筑垃圾，混合一定比例的井下原煤系统所筛选矸石、掘进产生矸石，特别大的矸石需要经过锤式破碎机破碎，充填材料混合完成后经过给料机 9、刮板运输机、区段上巷运矸皮带机 11 运输到充填工作面 16；

c) 采煤工作面 17 割煤两刀后，整个工作面自下向上推移溜子至煤壁，当煤层顶板破碎时，应先打锚杆支护顶板，然后进行移架和组装充填工作面运输系统，移液压充填支架 14 时根据充填需要，每次移四个，充填四个，依次循环往复；

d) 当首次四个液压支架 14 移到位，即充填步距达到 1.2 m，工作上的充填工作面运输系统也组装完善时，发出充填信号，准备充填；

e) 实施向采空区充填，充填材料经转载机 12、充填刮板输送机 13 充至采空区。随机组下行前移支架，并将后部延长架探出，在延长架下安装充填刮板输送机 13，充填时，随充填接实顶板，随缩充填刮板输送机 13、收回延长架。并根据充填状况，对充填材料实施推压，达到充填密实的效果；

f) 当充填完成第一组 4 个支架后，应后退式缩减充填刮板输送机 13，同理实施第二组充填，直至完成该次循环。

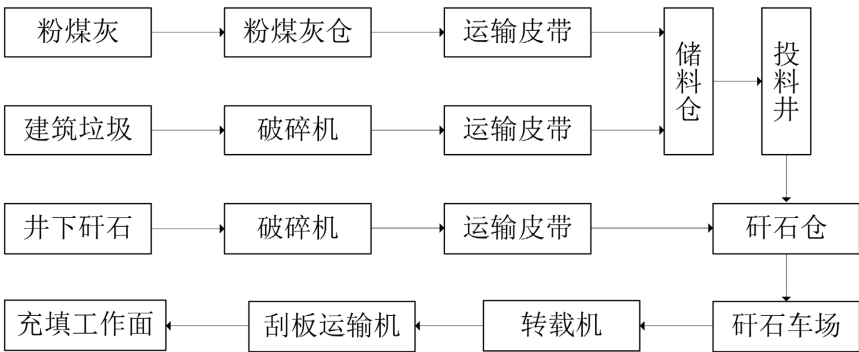


Figure 3. Schematic diagram of the specific operation process of the backfilling system
图 3. 充填系统具体操作流程示意图

5. 充填效果实测

为了获得散体材料充填置换后，地表沉陷情况，特在工作面走向中线布置地面沉陷监测站点，地表移动监测数据整理可得如图所示地表竖直下沉量与水平移动量，由图 4 可以看出，充填开采后，地表累

计最大下沉量为 20 mm、最大水平变形为 1.3 mm/m，均处于国家规定的 1 级变形之内，这说明工作面开采过后地表未发生明显变形，地表建筑物与生态环境得到了有效保护。

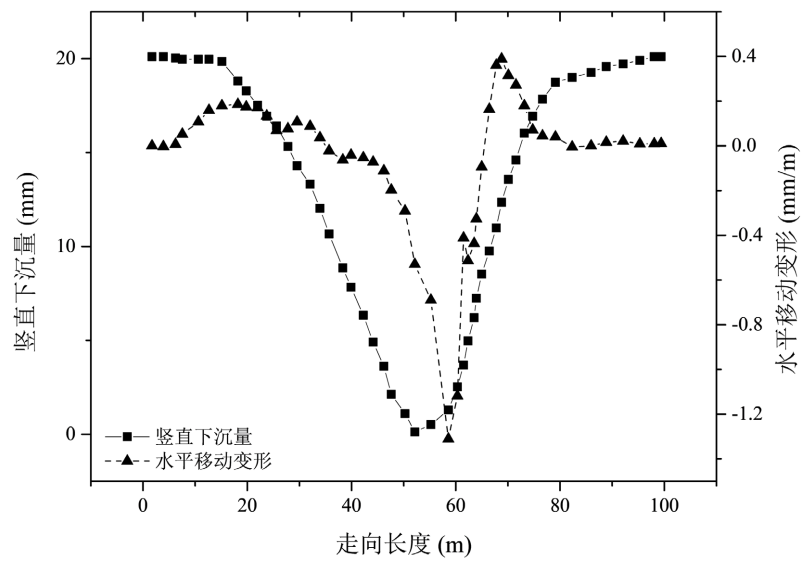


Figure 4. Surface movement and deformation status
图 4. 地表移动变形情况

6. 综合成本与经济效益分析

为评估本文所述散体充填方法的经济可行性，将其与当地常用的传统条带开采(含村庄搬迁补偿)以及膏体充填技术进行初步经济效益对比分析。

6.1. 成本构成分析

本文充填方法的主要成本包括：材料成本：按配比 1:1:0.4 计算，充填体材料成本约为 18.75 元/吨；系统投入与运维成本：包括井上预处理系统(破碎、筛分、混合)、投料井、井下运输系统(皮带、刮板机)的折旧、电耗、人工和维护费用。估算吨煤充填成本约为 25~30 元。

6.2. 与传统条带开采 + 搬迁对比

传统条带开采虽减少了搬迁，但采出率低，资源浪费严重。若涉及村庄搬迁，补偿费用高昂，吨煤摊销的搬迁成本常在 100~200 元甚至更高，且社会问题突出。本方法采出率可提高至 85%以上，虽增加了充填成本，但避免了巨额搬迁费用并提高了资源回收总量，经济效益显著优于搬迁条采。

6.3. 与膏体充填对比

膏体充填材料需添加胶结料，吨煤充填成本通常在 100 元以上。本方法采用无胶结散体材料，材料成本极低，系统相对简单，吨煤成本优势明显(低约 40~50 元)，在控制地表变形满足要求的前提下，经济性更优。

7. 结论与展望

7.1. 结论

- 1) 与现有充填方法相比，本文充分结合矿区煤层分布特点，因地制宜，就地取材，以破碎建筑垃圾

和井下矸石作为充填骨料, 以粉煤灰作为骨架间的充实体, 充分利用了矿区周边地区赋存丰富的建筑垃圾和粉煤灰, 材料费、运费都将大大降低。

2) 散体充填体各组分以一定质量比例混合, 并外加压实的过程, 能获得满意的充实率, 减轻煤矿经济压力, 消除了因大量矸石堆积而造成的生态环境污染, 该方法在基本不影响井下工作面正常生产的情况下完成充填采空区的工作, 可实现对矿区开采沉陷的有效控制。

3) 散体充填开采不仅能有效控制地表下沉, 而且可以提高资源回收率, 解放呆滞煤量, 避免资源浪费的同时延长自身矿井寿命, 产生较大的经济效益。同时可以消化矿井自身产生的矸石, 具有巨大的社会环境效益, 具有广阔的推广应用前景。

7.2. 展望

1) 布设全面的地表与井下一体化监测系统, 获取倾向监测线数据、盆地动态演化全过程, 并同步监测充填体应力-应变特性、顶板离层及支架工况, 构建完整的充填开采响应数据库。

2) 深入剖析地表移动盆地形态演化与井下采充工艺参数、充填体压缩特性及顶板运动之间的时空关联与力学机理。

3) 基于上述研究, 建立更为精准的散体充填开采沉陷预测与控制模型, 为该技术的优化设计与推广应用提供坚实的理论依据和数据支撑。

参考文献

- [1] 白二虎, 郭文兵, 谭毅, 杨达明. “条采留巷充填法”绿色协调开采技术[J]. 煤炭学报, 2018, 43(S1): 21-27.
- [2] 郝耐红. 浅谈煤炭工业的可持续发展[J]. 科技情报开发与研究, 2011, 21(19): 181-183.
- [3] 当代世界煤炭工业课题组. 当代世界煤矿工业发展趋势[J]. 中国煤炭, 2011, 37(3): 119-124.
- [4] 王显政. 中国煤炭工业发展面临的机遇与挑战[J]. 中国煤炭, 2010, 36(7): 5-8.
- [5] 王庆一. 中国煤炭工业的数字化解读[J]. 中国煤炭, 2012, 38(1): 18-22.
- [6] 康荣. 未来中国煤炭工业发展的关键制约因素[J]. 中国煤炭工业, 2011(4): 50-51.
- [7] 王文博, 孙传平, 胡大冲. 采动效应下条带煤柱动态受力变形特征模拟研究[J]. 煤矿安全, 2018, 49(8): 243-246.
- [8] 刘音, 路瑶, 郭亚兰, 崔博强, 郭皓. 条带充填法隔水层稳定性数值模拟分析[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(3): 119-122.
- [9] 杨俊鹏. 煤矿充填开采技术发展及实践应用研究[J]. 能源与节能, 2018(9): 185-186.
- [10] 董羽, 黄玉诚, 赵文平, 刘刚. 村庄下条带开采留设煤柱充填回采安全性研究[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(8): 117-122.
- [11] 骆祥均. 基于采动覆岩离层注浆技术的采煤塌陷控制方法[J]. 矿山测量, 2018, 46(2): 52-54, 60.
- [12] 徐芑. 生态文明建设中检察机关的主体地位探析——以燃烧煤矸石熏死大片森林跨区行政诉讼案为例[J]. 法制与社会, 2019(11): 62, 65.
- [13] 张鹏飞, 赵同彬, 傅知勇, 田秀国, 邱东卫. 矸石充填采空区顶板沉降规律及矸石承载特性分析[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(11): 50-56.
- [14] 蒋仕柱, 朱香辉, 杨麟, 侯李峰, 唐文章. 矿山矸石充填技术实践研究[J]. 世界有色金属, 2019(2): 277-278.