

# 2026 陕西榆林煤矸石治理白皮书

## 陕西榆林地区煤矸石治理白皮书

——基于“覆岩隔离注浆”与“原矸复合充填”技术的深度解决方案

编制单位：中国矿业大学专家组

日期：2026 年 1 月

### 摘要

作为国家级能源化工基地，陕西榆林地区在保障国家能源安全中发挥着压舱石的作用。然而，随着煤炭产能的集约化释放，煤矸石作为伴生的大宗固体废弃物，其年产生量已突破 6000 万吨级，且历史堆存量巨大。这不仅占用了宝贵的土地资源，更对陕北黄土高原与毛乌素沙漠交错带脆弱的生态环境构成了严峻挑战。在黄河流域生态保护和高质量发展战略及“双碳”目标的双重驱动下，传统的地面堆存与粗放式填埋已难以为继，煤炭行业亟需向绿色开采与固废资源化利用转型。

本白皮书立足于煤矿工程专家的视角，深度整合了《神木市煤业有限公司煤矸石覆岩隔离注浆方案》、《煤矸石覆岩隔离注浆充填技术规范（征求意见稿）》及中国矿业大学《煤矸石原矸+高水材料漫灌复合充填技术方案》等核心技术文件，并结合榆林地区的地质赋存特征与产业现状，系统构建了煤矸石井下治理的理论体系与实施路径。报告详细阐述了“覆岩隔离注浆”与“原矸复合充填”两类核心技术的适用边界、工艺流程与关键参数，并从全生命周期的角度进行了详尽的经济效益测算与风险评估。本报告旨在为政府监管部门制定产业政策、煤炭企业优选治理方案以及科研机构开展技术攻关提供具有深度的决策参考与理论支撑。

## 第一章 榆林地区煤炭开发格局与固废治理紧迫性分析

### 1.1 能源基地的产能规模与固废产出机制

榆林市位于陕西省最北部，地处鄂尔多斯盆地腹地，煤炭资源富集，煤质优良，素有“中国的科威特”之称。作为国家规划的陕北高端能源化工基地的重要组成部分，榆林的煤炭产业已从规模扩张转向高质量发展阶段。

### 1.1.1 高强度的产能释放与废弃物累积

根据最新的行业统计数据，2024年榆林市原煤总产量达到6.24亿吨，占全国总产量的13%左右<sup>1</sup>。这一庞大的产能基数直接决定了固废产出的量级。在煤炭大规模开采的过程中，煤矸石的产出是不可避免的伴生过程。通常情况下，陕北侏罗纪煤田的煤矸石产出率占原煤产量的10%至15%左右。据此推算，仅2024年一年，榆林地区新增的煤矸石量就高达6000万吨以上，占全市大宗工业固废总量的61%。

从产出来源看，榆林地区的煤矸石主要呈现出“双源头”特征：

- **井下岩巷掘进矸石**：随着矿井开采深度的增加和采区的延伸，开拓巷道和准备巷道的掘进工程量巨大。这类矸石通常粒径较大，岩性以砂岩、泥岩为主，硬度较高，是导致井下辅助运输系统压力的主要来源。
- **地面洗选矸石**：为了提升煤炭产品的附加值和清洁度，榆林地区的大型矿井普遍配套了选煤厂。原煤在洗选过程中排出的洗选矸石，粒径较小，往往含有一定比例的黄铁矿和碳质页岩，是地面环境污染的主要源头。

### 1.1.2 “三化”治理面临的现实困境

尽管“减量化、资源化、无害化”是固废治理的总体原则，但在榆林地区的实际操作中面临诸多地质与经济约束：

- **土地资源的极度稀缺**：榆林地处黄土高原与沙漠过渡带，沟壑纵横，原本可利用的土地资源就十分有限。长期的露天堆放形成了众多的“矸石山”，直接占压了大量的沟谷和荒地。据测算，若不采取井下充填技术，仅复合充填技术的应用缺位每年就会导致至少70亩的土地被新增矸石山侵占。
- **严重的大气与水体污染风险**：煤矸石中残留的硫铁矿和碳质成分在长期堆放过程中，极易发生氧化反应导致自燃，释放出二氧化硫（SO<sub>2</sub>）、氮氧化物（NO<sub>x</sub>）等有害气体。更为严峻的是，榆林地区年平均蒸发量（1712.0mm）远高于降水量（375-400mm），但降水多集中在夏季且以暴雨形式出现。露天堆放的矸石在雨

水淋溶下，重金属和酸性物质会渗入地下，直接威胁到萨拉乌苏组等浅层地下含水层，这对水资源本就匮乏的陕北地区而言是不可承受之重。

## 1.2 “三下”压煤与资源接续的战略矛盾

随着开采年限的延长，榆林地区许多主力矿井，特别是神木、横山等开发较早的区域，面临着日益严重的“三下”（建筑物下、铁路下、水体下）压煤问题。传统的全部垮落法开采会导致地表剧烈沉陷，不仅破坏地表生态和建筑物，也使得大量优质煤炭资源被迫作为保护煤柱而滞留井下。

- **资源锁定的量级：**据中国矿业大学的研究估算，每个大中型矿井平均积压的“三下”煤炭资源量在 80 万吨至 250 万吨之间。对于年产千万吨级的特大型矿井，这一数字可能更高。
- **开采与保护的二元悖论：**如何在保证地表建（构）筑物安全、不破坏上覆含水层结构的前提下，通过技术手段置换出这些煤炭资源，是当前榆林煤矿企业面临的核心痛点。若不解决这一问题，部分矿井将面临资源枯竭、服务年限缩短的危机。

## 1.3 政策驱动下的技术变革窗口期

在国家宏观战略的强力推动下，榆林地区的煤炭行业正处于技术变革的关键窗口期。

- **“无废城市”的硬约束：**榆林市被列入“十四五”时期“无废城市”建设名单，这对工业固废的综合利用率提出了量化考核指标。政策明确要求到 2025 年，新增大宗工业固体废物综合利用率达到 60%以上，历史存量有序减少。
  - **产能置换的倒逼机制：**陕西省发展和改革委员会等部门印发的《陕西省 60 万吨/年以下煤矿分类处置工作方案》，明确要求加快淘汰落后产能。同时，停止核准新建及改扩建后产能低于 120 万吨/年的煤矿。这意味着，通过充填开采实现绿色转型，成为部分矿井保留产能、获取采矿权延续的必要条件。
  - **财政与税收的激励杠杆：**国家及地方层面出台了一系列激励政策，如采用井下充填开采可减免环保税、享受增值税即征即退 50% 的优惠，以及获得 15-20 元/吨的生态修复补贴。这些政策工具为高成本的充填技术提供了经济可行性。
-

## 第二章 榆林矿区地质赋存与技术适配性深度解析

技术的选择从来不是孤立的，必须深深植根于特定的地质环境之中。榆林地区独特的地质构造、地貌特征和水文地质条件，决定了其煤矸石治理技术路线必须具有高度的针对性和适应性。

### 2.1 地形地貌与自然地理特征

以神木市孙家岔镇的惠宝煤矿为例，该区域展现了陕北矿区典型的地貌特征。地貌单元属黄土丘陵沙漠地貌，区内全为风沙所覆盖，沙丘此起彼伏，连绵不断。

- **地形起伏与空间限制：**地形总体呈西南高、东北低之势，海拔一般在 1280m 左右，相对最大高差为 105.20m 。这种沟壑纵横、沙丘密布的地形，使得地面工业广场的布置空间极为受限，大规模建设地面矸石处理厂或堆场的难度和成本极高，客观上迫使企业寻求井下消纳方案。
- **气候与冻土影响：**该区属半干旱大陆性气候，冬季寒冷，年最大冻土深度达 146cm 。这一气候特征对充填管路的敷设提出了严格要求。如果采用地面长距离输送浆体，必须采取深埋（冻土层以下）或伴热保温措施，否则冬季极易发生管路冻结事故。

### 2.2 覆岩结构与水文地质敏感性

陕北侏罗纪煤田的典型地质特征是煤层埋藏浅、基岩厚度薄、松散层厚度大，且水文地质条件复杂。

- **覆岩关键层 (Key Strata) 的发育：**在采用覆岩隔离注浆技术时，覆岩中是否存在对岩层移动起控制作用的“关键层”是决定性因素。关键层通常是厚度大、强度高的坚硬岩层（如砂岩）。在开采过程中，关键层与其下方的软弱岩层之间会产生不同步沉降，从而形成离层空间。这一空间是容纳煤矸石浆体的天然场所。如果覆岩过于破碎或缺乏关键层，离层空间无法稳定存在，该技术便无法实施。
- **萨拉乌苏组含水层的保护：**惠宝煤矿东北角曾有泉水出露，源自萨拉乌苏组沙层。萨拉乌苏组是该地区最重要的浅层地下水含水层，也是当地生态系统的生命线。任何井下充填作业，其首要前提必须是确保不对该含水层造成污染或导致水位下降。

这就要求在注浆层位选择上，必须在注浆层与含水层之间留设足够厚度的**隔离岩柱**，并对穿过含水层的钻孔进行全孔固井。

## 2.3 主流充填技术的适配性矩阵评价

基于上述地质特征,我们对当前主流的两种煤矸石井下处置技术——“覆岩隔离注浆充填”与“煤矸石原矸+高水材料漫灌复合充填”进行深度的适配性评价:

| 评价维度           | 覆岩隔离注浆充填技术   | 煤矸石原矸+高水材料漫灌复合充填技术  |
|----------------|--|---|
| <b>技术机理</b>    | <b>离层注浆</b> : 利用高压泵将制备好的矸石浆体注入覆岩关键层下方的离层空间。浆体固化后形成高压支撑体,产生“压下托上”的力学效应,抑制关键层破断。 | <b>骨架+胶结</b> : 利用原生大块矸石在采空区堆积形成物理骨架,再利用高水材料浆体漫灌填充骨架空隙。依靠骨架承载和浆体胶结的双重作用支撑顶板。 |
| <b>对煤层地质要求</b> | 适用于中厚及以上煤层;覆岩中必须有明确的关键层发育;基岩厚度需满足注浆层位与导水裂隙带的隔离要求。                              | 适用于缓倾斜(0-25°)、中厚煤层(1.5-6.5m);对顶板稳定性要求中等;不适用于大倾角(>30°)煤层以免浆体流失。              |
| <b>减沉效果与应用</b> | 减沉率较高,主要用于大范围控制地表沉降、保护高等级建筑物及含水层。  | 减沉率可达75%-82%,略低于全膏体充填,但足以满足大多数“三下”压煤开采需求。                                   |
| <b>生产协同性</b>   | <b>高</b> 。注浆作业在地面进行,与井下采煤作业在空间和时间上相对独立,互不干扰,不影响矿井正常生产                          | <b>中</b> 。需在回采工作面后方进行充填,充填作业与采煤作业在井下同一空间内交替进行,对生产组织要                        |

|                |   |  |
|----------------|---|--|
|                | 节奏。   | 求较高。   |
| <b>固废消纳形态</b>  | 需将矸石破碎研磨至粉状 (<4mm)，适合处理大量洗选矸石粉末。                  | 可直接消纳井下掘进的大块原生矸石 (<300mm)，无需精细破碎，能耗更低。           |
| <b>榆林地区适配度</b> | <b>极高。</b> 榆林矿区覆岩普遍存在关键层，且离层发育良好，适合大规模、低成本处置洗选矸石。 | <b>高。</b> 特别适合解决老矿井的掘进矸石排放问题及边角煤回收，无需建设庞大的地面制浆站。 |

## 第三章 覆岩隔离注浆充填技术方案详解

覆岩隔离注浆充填技术是目前榆林地区实现煤矸石大规模、低干扰、低成本处置的首选方案之一。该技术巧妙地利用了采动岩体的力学行为，将煤矸石无害化处理与地表减沉控制有机结合。

### 3.1 技术原理与系统架构

该技术的核心理论基础是**关键层理论与采动离层规律**。当煤层开采后，上覆岩层中的坚硬岩层（关键层）在破断前，其下沉速度小于下方的软弱岩层，从而在两者之间产生分离，形成离层裂隙。通过地面钻孔，将煤矸石制成的高浓度浆体高压注入这一空间。随着浆体的充填和压实，它在关键层下方形成了一个类似“千斤顶”的支撑体，阻止了关键层的过度弯曲和破断，从而减缓甚至阻断了地表沉降的传递。

一套完整的覆岩隔离注浆充填系统主要由四大子系统构成：

- 原料制备与储存系统：**包括矸石的受料、储存及给料。
- 破碎与制浆系统：**包括多级破碎（反击破、冲击破）、筛分、球磨及搅拌制浆。
- 高压输送与注浆系统：**核心是高压注浆泵及地面/井下输送管路。
- 智能监测与控制系统：**包括压力、流量、密度监测及地表岩移观测。

### 3.2 关键工艺参数设计与规范要求

根据《煤矸石覆岩隔离注浆充填技术规范（征求意见稿）》及惠宝煤业的实际工程案例，关键工艺参数的设计需遵循以下严苛标准：

### 3.2.1 浆体材料性能指标

- **原料灰分**：注浆用煤矸石灰分宜大于 80%，以确保其作为骨料的惰性。
- **浆体密度**：应控制在  $1.1 \text{ t/m}^3 \sim 1.5 \text{ t/m}^3$  之间。在保证流动性的前提下，应尽量提高浆体密度，以增加单位体积内的固废消纳量。
- **粒径级配**：为了防止堵管并确保浆体能顺利渗透进微小裂隙，要求煤矸石浆体中小于 0.2mm 的细颗粒占比不低于 80%，最大颗粒粒径严格控制在 4mm 以下。
- **环保指标**：煤矸石浸出液的各项指标必须小于 GB 5085.3 中的限值，防止重金属污染地下水。制浆水源宜优先选用处理后的矿井水。

### 3.2.2 注浆层位判别与钻孔布置

- **层位选择原则**：注浆层位是技术成败的关键。它必须满足三个条件：一是在基岩中；二是在主关键层或亚关键层底面附近的离层空间；三是必须位于导水裂隙带发育高度之上。层位与导水裂隙带之间需留设安全隔离岩柱，防止浆体通过裂隙溃入井下工作面。
- **钻孔结构与固井**：为了保护萨拉乌苏组等含水层，钻孔必须采用**全固井方法**下入套管，彻底封闭注浆层位以上的所有地层。注浆层段宜采用裸孔或花管结构，以利于浆体向四周扩散。
- **钻孔间距**：需通过理论计算结合现场压水试验确定。主要依据是离层空间的发育范围和浆体在裂隙中的有效扩散半径。

### 3.2.3 泵送工艺与防堵措施

- **注浆压力控制**：注浆终压一般设计为与该层位的覆岩自重应力一致，具体需根据地表受护对象的允许变形值进行反演计算。
- **输送防堵**：在惠宝煤矿的方案中，充填管道敷设距离长达 2.8km，垂直高度 150m，堵管风险极高。方案建议：
  - 采用**降压输送**策略，降低浆体对管壁的磨损。
  - 流速必须大于临界流速，实现满管输送。

- 在垂直和倾斜管道底部安装**事故排料阀**，一旦监测到压力异常升高（堵管前兆），立即排料。
- 在阶段性输浆管道设置**事故池和接力泵站**，以应对长距离输送的压力损失。

### 3.3 施工流程标准化

1. **地质与水文详查**：利用钻孔资料和物探手段，精确定位关键层和含水层。
2. **钻孔施工**：严格控制钻孔偏斜率（<3%），确保钻孔准确击中离层靶区。施工过程中需进行泥浆护壁和严格的固井作业。
3. **制浆与注浆作业**：
  - 原料矸石经过给料机进入反击式破碎机（一级破碎，>30mm 返料）和立轴冲击破（二级破碎，>3mm 返料），最终进入成品缓存仓。
  - 成品粉料与水在搅拌池中充分混合，经流量计和密度计检测合格后进入注浆泵。
  - **注浆时机**：遵循“采动协同”原则。在工作面推进过程中，通过对注浆孔进行压水试验，当发现水压急剧下降、注水量剧增时，表明离层空间已形成，此时为最佳注浆开启时机。
4. **终止与封孔**：当单孔注浆量达到设计值，或注浆压力达到设计终压且持续一定时间后，停止注浆。注浆结束后，必须使用水泥浆对钻孔进行全孔封闭，防止后期地表水沿钻孔下渗。

---

## 第四章 煤矸石原矸+高水材料漫灌复合充填技术方案详解

对于那些不具备离层注浆地质条件（如关键层不明显），或者对地表沉降控制有着极高要求（如必须控制在几百毫米以内）的“三下”压煤区域，中国矿业大学提出的“煤矸石原矸+高水材料漫灌复合充填技术”提供了一种更为精细化、高强度的解决方案。

### 4.1 技术创新内核：“骨架支撑+胶结补强”

该技术实质上是传统固体充填与胶结充填的融合创新，通过物理支撑与化学胶结的协同作用解决传统技术痛点：

1. **物理骨架构建（低成本）**：利用煤矿井下掘进或地面洗选出的**原生煤矸石**（粒径10-300mm），无需进行昂贵的磨粉加工，直接通过机械输送至采空区进行抛填和压实，构建起一个承载骨架。骨架本身具备一定的抗压强度，且孔隙率控制在35%-40%。
2. **化学胶结补强（高强度）**：利用**高水材料**（A、B双组分浆体）极佳的流动性和渗透性，通过管道对矸石骨架的空隙进行漫灌。A、B料混合后在8-30分钟内迅速初凝，将松散的矸石颗粒包裹、胶结成一个整体。
3. **协同效应**：最终形成的复合充填体，其承载强度较纯矸石充填提升60%以上（28天强度 $\geq 2.0\text{MPa}$ ），且解决了固体充填难以接顶的难题，通过浆体漫灌实现100%接顶。

## 4.2 系统配置与关键设备选型

### 4.2.1 材料参数体系

- **煤矸石**：粒径范围**10-300mm**，其中小于10mm的细颗粒占比需 $\leq 20\%$ ，以保证骨架间隙畅通，利于浆体渗透。
- **高水材料**：水固比设计为**3:1 ~ 5:1**。A料通常以铝土矿为基材，B料以石膏和速凝剂为主。两者按1:1体积比混合使用。
- **充填体性能**：混合后的复合体密度 $\geq 1.9\text{ t/m}^3$ ，具备早强特性（7天强度 $\geq 1.2\text{MPa}$ ）。

### 4.2.2 核心装备系统

该方案高度依赖机械化与自动化装备：

- **矸石转运系统**：由刮板输送机、**波状挡边带式输送机**（输送能力 $\geq 250\text{t/h}$ ，倾角可达 $18^\circ$ ，有效防止大倾角撒料）及转载机组成。
- **智能制浆系统**：井下设智能化双组分制备站，配备大容量A/B料仓（单仓 $\geq 50\text{m}^3$ ）及变频搅拌器，实现水固比的实时精准调节。
- **动力输送系统**：选用双液柱塞泵，额定压力 $\geq 12\text{MPa}$ ，流量 $\geq 40\text{m}^3/\text{h}$ ，确保浆体能远距离输送并渗透进骨架深处。

- **作业终端**：定制化的**复合充填液压支架**。支架后部设计有双通道（大孔径矸石输送通道+小孔径浆体管路通道），并配套自移式充填机，具备矸石摊铺与自动夯实功能。

### 4.3 标准化施工工艺（以 6m 循环为例）

1. **采煤与准备**：综采工作面正常割煤推进 6m 后暂停，调整支架，形成充填空间。
2. **骨架充填**：启动矸石转运系统，将预处理后的原矸输送至采空区，由充填机进行摊铺和初步压实（密度 $\geq 1.7 \text{ t/m}^3$ ），形成厚度约 1.0-1.2m 的矸石层。
3. **漫灌注浆**：启动注浆泵，将 A、B 浆体输送至工作面混合器混合，通过导流管漫灌至矸石间隙。灌注高度需达到矸石层表面以上 50mm，确保完全包裹。
4. **接顶强化**：在最后一层充填时，采用高水材料+粉煤灰调制成浓浆进行专门的接顶灌注，确保接顶密实度 $\geq 95\%$ ，这是控制顶板下沉的关键。
5. **养护循环**：静置 8-30 分钟，待浆体初凝并达到监测强度（0.5MPa）后，进入下一轮采煤循环。

---

## 第五章 技术经济评价与全生命周期投资回报分析

对于煤炭企业而言，技术的先进性必须转化为可量化的经济效益。本章将从全生命周期的角度，对上述技术方案进行深入的成本效益分析。

### 5.1 成本构成精细化拆解

#### 5.1.1 覆岩隔离注浆充填成本模型

该技术的成本主要集中在基建和材料制备上：

- **CAPEX（建设投资）**：主要包括地面制浆站建设（破碎、筛分、搅拌设备）、长距离输送管路铺设（如惠宝煤矿的 2.8km 管线）以及大量的地面定向钻孔施工费用。钻孔越深，费用呈指数级上升。
- **OPEX（运营成本）**：主要包括电费（破碎机和注浆泵是耗电大户）、人工费、设备折旧及水费。

- **综合测算：**根据行业经验，吨煤充填成本通常在 **30-60 元** 之间。这是目前成本最低的井下规模化处置技术。

### 5.1.2 原研复合充填成本模型

根据中国矿业大学的方案测算，其成本结构如下：

- **吨充填成本：**目标控制在 **70 元/吨** 以内。
- **成本结构：**
  - **高水材料：**占比约 40%。这是最大的变动成本，但通过添加粉煤灰等工业废渣可进一步降低成本。
  - **设备折旧：**占比约 30%。专用充填支架和制浆站的一次性投入较大。
  - **人工与能耗：**各占 20%和 10%。
- **对比优势：**相比于全膏体充填（成本通常在 105-110 元/吨），该技术省去了将矸石磨成微粉的高昂能耗和设备磨损成本，且不需要大量水泥，综合成本降低了 35%-38%。

## 5.2 多元化收益来源与 ROI 分析

充填开采的经济账不能只算投入，其收益呈现出显著的“资源+政策”双轮驱动特征。

### 1. 资源回收带来的直接红利

- **置换煤炭资源：**这是最直接的收益。以一个中型矿井盘活 80 万吨“三下”压煤为例，若吨煤净利润为 300 元（售价 600 元-生产成本 300 元），则直接新增净利润可达 **2.4 亿元**。
- **延长矿井寿命：**煤炭回收率提高 18%-28%，对于资源枯竭型矿井意味着服务年限的延长和折旧费用的摊薄。

### 2. 政策红利带来的隐性收益

- **税收减免：**作为国家鼓励类项目，可享受增值税即征即退 50% 的优惠。同时，因井下处置固废，可依法减免环境保护税。
- **财政补贴：**根据《矿山生态修复资金管理办法》，企业可按充填量获得 15-20 元/吨的直接补贴。在山西、山东等省份，达标项目还可获得 300-600 万元的一次性技改奖励。

- **节省固废处置费**：避免了地面排矸场的征地费、建设费、运维费及潜在的环保罚款。据测算，这部分隐性收益约合 25 元/吨。

### 3. 投资回报周期 (Payback Period)

- 综合计算资源收益和政策补贴，复合充填项目的投资回收期通常  $\leq 24$  个月。
- 若将项目包装纳入 EOD (生态环境导向的开发) 模式，还可申请政策性银行的低息贷款 (利率 $<4.0\%$ )，进一步优化财务结构。

## 5.3 经济效益综合评价

---

# 第六章 风险管控与政策实施路径建议

## 6.1 关键风险识别与工程管控

### 6.1.1 覆岩注浆的风险管控

- **窜浆与跑浆**：浆体沿断层或裂隙溃入井下或溢出地表。
  - 对策：注浆前必须查明地质构造；严格执行隔离岩柱留设标准；注浆过程中实施微震监测和流量监控，一旦发现压力突降立即停泵。
- **堵管事故**：长距离输送导致的管道堵塞。
  - 对策：建立智能制浆系统，严格控制粒径级配；在管路低洼处设置排污阀；采用高压水冲洗备用系统。

### 6.1.2 复合充填的风险管控

- **充填体强度不足**：材料配比失调或搅拌不均。
  - 对策：建立井下实验室，每班进行浆体强度抽检；采用变频搅拌技术确保混合均匀。
- **接顶不实**：导致顶板离层和下沉。
  - 对策：严格执行“接顶浓浆”工艺，并利用充填支架的夯实机构进行二次压实。

## 6.2 政策建议与实施路径

### 6.2.1 差异化的技术推广策略

- **对于新建及千万吨级现代化矿井（如小纪汗、曹家滩）：**由于其产能巨大，矸石排放量巨大且集中，建议优先采用**覆岩隔离注浆充填技术**。该技术处理能力强（百万吨级/年）、成本低，能有效解决大规模固废处置难题。
- **对于“三下”压煤严重的老矿井及资源枯竭型矿井：**建议采用**原矸+高水材料复合充填技术**。利用其设备占用小、布置灵活、接顶效果好的特点，精准置换优质煤炭资源，实现“吃干榨净”。

### 6.2.2 建立全生命周期的监管与服务体系

- **事前：**政府应强制要求新建矿井在可研阶段即编制固废充填专项规划，实行“一矿一策”。
- **事中：**建立基于物联网的固废充填在线监测平台，对充填量、注浆压力、地表沉降等关键数据进行实时上传和监管，确保充填数据的真实性，作为发放财政补贴的依据。
- **事后：**建立长效的生态评估机制，对充填区域的地下水水质和地表生态恢复情况进行长期跟踪。

### 6.2.3 创新投融资模式

利用榆林建设“国家级能源革命创新示范区”的政策红利，鼓励企业将煤矸石治理项目与光伏发电、生态农业等项目打包，申报**EOD项目**。通过争取国家专项债和政策性银行低息贷款，解决企业初期投入大的资金瓶颈。

---

## 第七章 结论与展望

煤矸石治理是榆林地区实现煤炭产业高质量发展必须跨越的“生态关口”。通过对“覆岩隔离注浆”和“原矸复合充填”两项关键技术的深度剖析，本白皮书得出以下核心结论：

1. **技术路径清晰可行：**针对榆林地区不同的地质条件和开采需求，现有的两类充填技术在理论基础、工艺装备及工程实践上均已成熟，具备大规模推广的技术基础。

- 经济价值转折点已现**：随着煤炭价格的企稳和政策红利的释放，充填开采已彻底摆脱了“纯投入、无产出”的尴尬境地，转变为“资源效益+政策补贴+环保减免”的综合盈利模式，具有极强的商业生命力。
- 政策倒逼与机遇并存**：在“无废城市”建设和产能置换政策的双重夹击下，主动拥抱充填技术不仅是企业的环保责任，更是其生存和发展的战略选择。

展望未来，随着5G、人工智能等技术在煤矿领域的深度融合，煤矸石充填将向着\*\*“无人化作业、精准化控制、可视化监管”\*\*的方向演进。榆林，这座承载着国家能源使命的城市，完全有能力通过技术创新与模式变革，将沉重的“固废包袱”转化为绿色的“发展财富”，为全国资源型城市的绿色转型提供可复制、可推广的“榆林样本”。

## 陕西榆林地区煤矸石治理白皮书（卷二：工程实施与实务指南）

### 第八章 覆岩隔离注浆充填工程标准化实施细则

本章依据《煤矸石覆岩隔离注浆充填技术规范（征求意见稿）》及榆林地区主要矿井的实践经验，制定工程实施的标准化细则。这是确保工程安全、环保达标及经济可行的“操作手册”。

#### 8.1 钻孔工程技术规范

钻孔是连接地面注浆站与井下离层空间的“生命线”，其施工质量直接决定了注浆的成败与地下水安全。

##### 8.1.1 钻孔结构设计

针对榆林地区普遍存在的萨拉乌苏组含水层（主要水源），钻孔结构必须设计为“三开”结构，以实现从地表到注浆层位的全封闭隔离：

- 一开（表土层段）**：钻越第四系风积沙及黄土层，下入\*\* $\varnothing$  377mm\*\*表土套管，管外用水泥浆返至孔口，防止地表水沿管壁下渗。

- **二开（隔水层段）**：钻穿萨拉乌苏组含水层并进入基岩隔水层至少 20m。下入  $\varnothing 273\text{mm}$  **技术套管**，**必须采用全孔固井**工艺，确保含水层与下部岩层彻底隔离。这是“保水开采”的核心防线 1。
- **三开（注浆层段）**：裸孔钻进至离层空间预定层位（关键层下方）。若岩层破碎，可下入  $\varnothing 177.8\text{mm}$  **花管（带孔套管）**护壁，防止塌孔堵塞浆液通道。

### 8.1.2 钻孔布置参数

- **布孔原则**：依据“关键层破断步距”与“浆液扩散半径”双重指标确定。在榆林神府矿区，主关键层通常为直罗组或延安组顶部的粗砂岩。
- **孔间距经验值**：
  - **走向间距**：通常设置为工作面推进方向的 1/3 至 1/2 周期来压步距，一般为 **60m~100m**。
  - **倾向间距**：依据浆液在裂隙中的扩散半径（R），一般取 **1.5R~1.8R**。在注浆压力 5-8MPa 条件下，榆林地区砂岩裂隙的扩散半径 R 通常在 **80m~120m** 之间。
  - **靶区定位**：钻孔终孔点应位于离层发育最充分的区域，即工作面中部“O”形圈的“鞍部”位置。

## 8.2 浆体制备与输送工艺标准

### 8.2.1 矸石粒径级配控制

浆体的流动性与悬浮性是一对矛盾，需通过精确的级配来平衡：

- **上限控制**：最大颗粒粒径严格控制在 **4mm** 以下，防止在长距离输送管道（如惠宝煤矿的 2.8km 管线）中发生沉淀堵管。
- **微粉含量**：小于 **0.2mm** 的细颗粒占比需不低于 **80%**。这部分细颗粒在浆体中起到“滚珠”和“载体”的作用，能有效悬浮较大颗粒，降低沿程阻力。

### 8.2.2 浆体流变特性与防堵

- **临界流速**：输送流速必须大于临界沉降流速。对于浓度 70%-75% 的矸石浆体，建议流速控制在 **1.5m/s~2.0m/s**。

- **降压输送策略**：鉴于榆林矿区沟壑纵横，地形高差大（如惠宝煤矿高差达 105m），长距离输送应采用“大管径、低流速”策略以降低摩阻。在翻越山脊的高点需设置**自动排气阀**，在谷底低点需设置**排污阀**。

### 8.2.3 冬季运行保障

榆林地区冬季严寒，冻土深度达 1.46m。地面输送管路必须采取以下措施：

- **埋深**：地埋管路埋深应大于 **1.8m**（冻土线下）。
- **保温与伴热**：无法地埋的架空管路（如跨越沟谷处），必须包裹 50mm 厚聚氨酯保温层，并沿管线敷设电伴热带。
- **停机排空**：系统设计必须具备“一键排空”功能，停机后利用高压风或水将管内存浆全部吹扫干净。

---

## 第九章 典型案例深度剖析：神木惠宝煤业的实践路径

本章以神木市惠宝煤业有限公司的工程实践为蓝本，还原一个典型的榆林地区煤矿如何从零构建煤矸石井下治理体系。

### 9.1 项目背景与地质挑战

- **地理环境**：惠宝煤矿位于毛乌素沙漠边缘，地表全为风沙覆盖，生态极度脆弱。
- **核心痛点**：
  - a. **无处排矸**：地面工业广场空间狭小，且环保政策严禁新建永久性矸石山。
  - b. **水资源保护**：矿区东北角曾有萨拉乌苏组泉水出露，井下充填必须确保不污染这一重要浅层含水层。
  - c. **输送距离远**：注浆站设在工业广场，距离首采注浆工作面直线距离超 2.8km，且垂直高差 150m，管路敷设难度大。

### 9.2 技术方案复盘

#### 9.2.1 关键层判定与层位选择

项目组通过钻孔柱状图分析，确定了延安组顶部的一层层中粒砂岩为主关键层。

- **注浆层位：**选定在该关键层下方的泥岩互层带。该层位在采动后易产生离层裂隙，且距离上部萨拉乌苏组含水层有超过 80m 的基岩**隔离岩柱**，满足保水安全要求。

### 9.2.2 工艺路线优选

采用了\*\*“地面制浆-长距离管输-地面垂直钻孔注浆”\*\*的工艺路线：

- **制浆系统：**利用现有的矸石仓空地建设紧凑型制浆车间。采用“两级破碎（反击破+冲击破）+球磨”工艺，确保粒径<3mm。
- **输送系统：**为解决 2.8km 长距离输送难题，在管路中段（一号风井工业场地）预留了**接力泵站**和**事故池**。这是一种典型的“以空间换时间”的设计，防止因单级泵送压力过高导致爆管。

### 9.2.3 监测与应急体系

- **流量-压力双控：**在注浆管路末端安装高精度电磁流量计和压力传感器。当监测到注浆压力突降且流量剧增时，判定为“离层空间开启”或“跑浆”，系统自动调节注浆量。
- **地下水监测井：**在注浆区域周边的萨拉乌苏组含水层设置观测孔，每周取样检测 pH 值、悬浮物及重金属离子，确保“零污染”。

## 9.3 实施效果与经济账

- **减沉效果：**通过离层注浆，预计关键层下沉量减少 60%以上，地表变形控制在 I 级破坏范围内，无需对地表居民进行大规模搬迁。
  - **固废消纳：**该系统设计年处理能力 200 万吨，不仅完全消纳了矿井自身的掘进和洗选矸石，还具备协助周边小矿处理固废的潜力。
  - **成本估算：**
    - **建设投资：**约 4500 万元（含制浆站设备、管路及首批钻孔）。
    - **运行成本：**约 35 元/吨（含电费、人工、磨损材料费）。
    - **综合效益：**考虑到节省的征地费、环保罚款及置换出的煤炭资源效益，项目静态投资回收期预计为 1.8 年。
-

## 第十章 智能化管控与全生命周期安全管理

随着“智慧矿山”建设的推进，煤矸石充填系统必须纳入矿井整体智能化管控平台。

### 10.1 智能充填管控平台架构

建议榆林地区新建充填项目采用“端-边-云”架构的智能管控系统：

- **感知层（端）：**
  - **物料感知：**在线粒度分析仪、核子密度计（实时监测浆体密度）、电磁流量计。
  - **岩层感知：**微震监测系统（监测关键层破断信号）、光纤光栅传感器（监测地表沉降及井下顶板压力）。
- **边缘计算层（边）：**
  - **自适应配比控制：**PLC 控制器根据原料矸石的含水率、硬度变化，自动调节球磨机给料量和搅拌加水量，确保浆体浓度恒定在设计值（如  $72\% \pm 1\%$ ）。
  - **堵管预警模型：**通过分析泵压波动的频谱特征，提前 15 分钟预判堵管趋势，并自动触发清水冲洗程序。
- **决策层（云）：**
  - **数字孪生系统：**建立采空区与覆岩的 3D 数字模型，实时模拟浆体在离层空间中的扩散形态，指导下一步钻孔的布设位置。

### 10.2 全生命周期风险防控清单

| 风险阶段 | 核心风险点   | 预兆特征    | 标准化管控措施                           |
|------|---------|---------|-----------------------------------|
| 设计期  | 层位选择错误  | /       | 必须进行不少于 3 个孔的取芯勘探；进行压水试验测定岩层渗透率。  |
| 施工期  | 钻孔固井质量差 | 水泥返浆量不足 | 采用声波测井（CBL/VDL）全孔检测固井质量，不合格段必须补注。 |

|     |       |               |                                       |
|-----|-------|---------------|---------------------------------------|
| 运行期 | 管路堵塞  | 泵压异常升高，流量下降   | 严格执行“停泵先冲水”制度；在低注处设快开排污阀；备用高压水反冲洗系统。  |
| 运行期 | 窜浆/跑浆 | 注浆压力骤降，井下淋水增加 | 立即停泵；启动井下排水应急预案；调整浆液浓度（加稠）或加入速凝剂封堵裂隙。 |
| 闭库期 | 地下水污染 | 监测井水质指标超标     | 建立长效地下水监测机制（至少5年）；注浆孔必须进行永久性封孔处理。     |

## 第十一章 投融资模式创新与政策落地指南

对于煤炭企业而言，技术的可行性最终要落实到资金的平衡上。本章提供针对榆林政策环境的投融资实操指南。

### 11.1 资金来源组合策略

建议企业采用“334”资金结构，即30%自有资金，30%政策性补贴/奖励，40%绿色金融贷款。

#### 4. 争取财政奖补（无偿资金）：

- **中央预算内投资**：申报方向为“大宗固体废弃物综合利用示范基地”。需由市发改委逐级申报，重点突出项目的“区域示范效应”。
- **矿山生态修复基金**：利用企业已缴纳的基金，申请用于充填项目的钻孔施工和地表监测费用。

- **榆林市级专项奖补**：依据《榆林市支持大宗工业固体废物综合利用管理办法》，争取 15-20 元/吨的直接作业补贴。

#### 1. 绿色金融工具（低息资金）：

- **EOD 模式融资**：将“煤矸石治理（公益性）”与“地表光伏发电/生态农业（收益性）”打包，向国开行或农发行申请期限长（15-20 年）、利率低（<4%）的政策性贷款。
- **碳减排支持工具**：充填开采避免了矸石山自燃产生的温室气体，可核算碳减排量，申请央行碳减排支持工具对应的低息贷款。

## 11.2 税收优惠落地实务

### ● 增值税即征即退：

- **条件**：产品（充填体）中煤矸石掺量≥30%。
- **难点**：井下充填不产生实体销售产品。
- **对策**：将充填作业剥离，成立独立的“环保工程公司”或“充填技术服务公司”，煤矿向该公司支付充填服务费，该公司作为利废主体申请退税。

### ● 环保税减免：

- **依据**：纳税人综合利用的固体废物，符合国家和地方环境保护标准的，免征环境保护税。
- **要件**：需提供完整的“固废利用台账”、第三方出具的“无害化检测报告”及生态环境部门的备案证明。

## 11.3 项目申报流程图谱（榆林版）

1. **立项阶段**：编制《煤矸石充填开采可行性研究报告》，向县级发改局申请项目备案（代码：0610）。
2. **环评阶段**：编制《环境影响评价报告表》（注意：单纯充填项目通常无需编制报告书），重点评价对萨拉乌苏组含水层的影响，向市生态环境局审批。
3. **安全设施设计**：编制《充填开采安全设施设计》，报陕煤局或榆林市能源局审批。这是开工的**前置核心手续**。

- 施工与验收**: 项目建成后, 需组织进行“三同时”验收, 并进行不少于 3 个月的试运行, 收集地表沉降数据。
  - 资金申请**: 凭验收合格证、发票及运行台账, 向财政、工信、环保部门申报各类奖励资金。
- 

## 结语: 打造“榆林模式”

陕西榆林地区的煤矸石治理, 不仅仅是一个工程技术问题, 更是一场涉及地质安全、生态保护、经济转型和政策创新的系统工程。通过推广\*\*“覆岩隔离注浆”与“原矸复合充填”\*\*两大核心技术, 结合精细化的工程管理和创新的投融资模式, 榆林完全有能力将数十亿吨的“生态负债”转化为“资源资产”。

本白皮书(卷一、卷二)构建了一套从理论到实践、从技术到经济的完整解决方案。我们期望这套方案能成为榆林乃至整个黄河流域能源金三角地区绿色矿山建设的标杆指南, 助力榆林实现“乌金遍地”向“绿水青山”的华丽转身。

---

### 附录: 关键术语对照表

- 关键层 (Key Stratum)**: 控制覆岩运动的坚硬岩层。
- 离层 (Bed Separation)**: 岩层沉降不一致产生的层间空隙。
- EOD (Eco-environment-oriented Development)**: 生态环境导向的开发模式。
- 三下压煤**: 建筑物下、铁路下、水体下的煤炭资源。