

# Summary of “Three Under” Mining Technology

Yongsun Jiang Wei Zhao\* Yaping Zhou Xianze Meng

Guizhou Shuicheng Mining Co., Ltd., Wangjiazhai Coal Mine, Liupanshui, Guizhou, 553009, China

## Abstract

With the rapid advancement of modern coal mining technology, coal mining under buildings, railways and water-bodies has achieved leapfrog development. This paper systematically summarizes the research status of “Three Under” mining at home and abroad from three dimensions: mining subsidence mechanism, mining subsidence prediction and subsidence reduction mining technology. It briefly traces the evolutionary context of mining subsidence mechanism, including normal theory, probability integral method, surface subsidence formula and key stratum theory; details the mining subsidence prediction technologies such as field measurement method, theoretical analysis method, physical and numerical simulation method and visualization method; focuses on the core subsidence reduction technologies including strip mining, backfill mining and separated-bed grouting, analyzes the limitations of various technologies, and clearly points out that comprehensive subsidence reduction mining technology is the core development direction of “Three Under” mining.

## Keywords

“Three under” mining; Mining technique of reducing subsidence; Mechanism of subsidence; Mining subsidence prediction

## “三下” 开采技术综述

姜永顺 赵威\* 周亚平 蒙显泽

贵州水城矿业股份有限公司汪家寨煤矿, 中国·贵州 六盘水 553009

## 摘要

随着煤炭开采工艺的日益成熟, “三下”(建筑物下、铁路下、水体下)压煤资源的回收利用取得了突破性进展。本文立足于开采沉陷机理、沉陷预测技术及减沉控制措施三个维度, 对国内外相关研究成果进行了系统梳理。文章首先追溯了从法线理论、概率积分法到关键层理论的沉陷机理演进历程; 随后详细探讨了实测法、理论分析法、物理与数值模拟法及可视化技术在沉陷预测中的应用现状; 最后重点评述了条带开采、充填开采及离层注浆等主流减沉技术的优缺点。研究表明, 单一技术往往难以兼顾安全性与经济性, 多手段融合的综合减沉技术将是未来“三下”开采的主导发展方向。

## 关键词

“三下”开采; 减沉开采技术; 沉陷机理; 开采沉陷预测

## 1 引言

在国民经济持续发展的背景下, 浅部及易采煤炭资源日益枯竭, 矿井开采重心逐渐向深部、边角残煤及复杂条件区域转移。在此形势下, “三下”压煤的开采成为缓解资源供需矛盾的关键途径。据统计, 我国部分矿区仅工业广场压煤量即高达数千万吨, 相当于一座中型矿井的保有储量[1]。依据《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》, 在确保安全与环保的前提下, 应积极推进技术可行的压煤资源开采[2]。然而, 地下采掘活动不可避免地破坏原岩应力平衡, 导致覆岩移动与地表沉陷, 严重威胁地面建

(构)筑物、交通干线及水体安全, 甚至引发突水灾害[3]。经过数十年的科研攻关, 我国“三下”开采技术已从早期的小规模试探, 发展为如今可实现大面积、多方法协同的成熟体系, 开采对象也从单一建筑物拓展至复杂建筑群及大型水体[4-5]。

## 2 “三下” 开采研究现状

“三下”开采技术的研究始于19世纪国外对地面古迹保护的需求。20世纪80年代以来, 受资源需求与技术革新的双重推动, 该领域进入快速发展期。目前, 基于沉积岩层特性, 国内外已形成较为完善的理论与技术体系[6]。

### 2.1 建筑物及铁路下采煤技术研究现状

该领域的研究核心在于揭示覆岩与地表的移动变形规律, 并据此制定防护措施。

#### 2.1.1 开采沉陷机理研究

采地下矿体采出后形成的空洞会打破原有的力学平衡, 导致上覆岩层发生冒落、裂隙扩展直至地表下沉, 形成“三

【作者简介】姜永顺(1979—), 男, 中国贵州六盘水人, 助理工程师, 从事矿井采掘技术研究。

【通讯作者】赵威(1998—), 男, 彝族, 中国贵州六盘水人, 硕士, 工程师, 从事矿井采掘技术研究。

带”（冒落带、裂隙带、弯曲下沉带）。

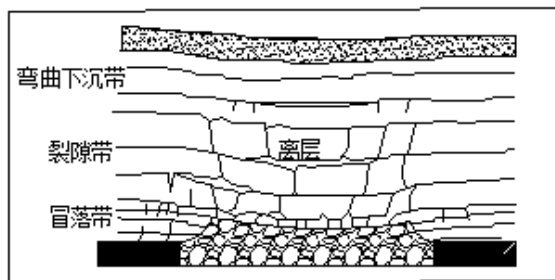


图 2.1 采空区对地表变形的影响

早期的沉陷机理研究主要侧重于经验总结与几何描述。1858 年比利时学者哥诺提出“法线理论”，1882 年西哈教授提出“自然斜面理论”。随后，波兰学者克诺特、李特维尼申与我国刘宝琛院士基于随机介质理论，创立了著名的概率积分法 [7]。该方法在工程中应用广泛，但主要关注最终沉陷结果，对岩层内部的动态破坏过程解释不足。

为深入探究力学本质，学者们建立了多种力学模型。前苏联学者阿维尔申（1947 年）利用塑性理论分析岩层移动；波兰学者萨武维奇（1953 年）基于弹性基础梁理论推导出下沉方程 [8]；英国学者 Berry 和 Walse（60 年代初）利用弹性理论求解了均质岩体的位移场 [9]。我国学者亦贡献卓著：刘宝琛（1983 年）采用粘弹性模型计算岩层位移；麻凤海基于复合介质力学推导了下沉公式 [10]；李增琪将覆岩视为层梁结构，运用直积定理揭示移动规律 [11]。这些模型虽经过简化，但在特定条件下有效揭示了沉陷的力学机制。

近年来，钱鸣高等人提出的“关键层理论”成为该领域的里程碑 [12-15]。该理论指出，覆岩中存在对岩体活动起控制作用的关键层（主关键层与亚关键层）。许家林等研究发现，主关键层的破断是引发地表剧烈下沉的主控因素，其周期性破断会导致地表下沉速度呈跳跃式变化，且移动边界会随之向外扩展。

此外，Whittaker B N 和 Reddish D J 通过总结多国实测数据，发现地表下沉系数（ $W/m$ ）与采动程度（ $D/H$ ）之间存在显著的相关性，为工程预测提供了重要参考。

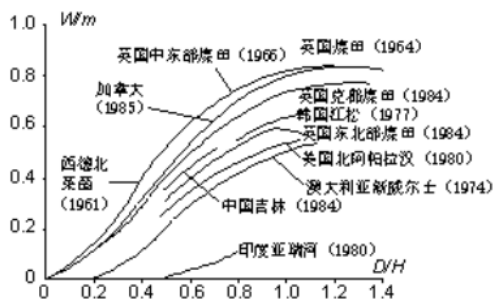


图 2.2 地表下沉系数与采动程度的关系曲线

### 2.1.2 开采沉陷预测研究

准确预测沉陷是保障地表安全的前提。目前的预测技

术主要包括以下几类 [16-18]：

#### 实测研究方法

作为最基础的手段，通过经纬仪、全站仪、GPS 及 D-InSAR 等技术，获取岩层移动、应力分布及变形数据。该方法不仅提供基础参数，也是验证其他方法的金标准。

#### 理论分析方法

通过建立经验公式或数学模型，量化最大下沉量与水平位移等指标，结合连续介质力学阐释移动机理，适用于条件相对简单的预测场景。

#### 物理模拟和数值模拟方法

针对复杂地质条件，室内相似材料模拟（物理模拟）能直观展示岩层运动特征，但成本较高。数值模拟（如有限元法 FLAC、离散元法 UDEC 等）则凭借低成本、高效率的优势得到广泛应用，可灵活调整参数进行多方案对比。

#### 可视化方法

随着计算机技术发展，可视化技术逐渐应用于沉陷描述。然而，目前的研究多局限于二维展示，对下沉值等三维信息的表达仍不够直观，有待进一步提升。

### 2.1.3 开采沉陷控制技术研究

通过优化采矿方法来限制岩层移动，是沉陷控制的关键 [19-23]。

#### 条带开采

将煤层划分为采条与煤柱交替布置，利用煤柱支撑上覆岩层。该方法能有效控制地表变形（下沉系数通常  $<0.3$ ），在峰峰、鹤壁等矿区应用广泛。其优点是工艺简单、保护效果好；缺点是资源回收率低（40%~68%）、掘进率高、生产效率受限。



图 2.3 条带开采布置方式

房柱式开采的作业方式为在煤层中掘进若干宽度 5~7m 的煤房，煤房间以联络巷相互连通，形成长条状保护煤柱；煤柱可结合实际开采条件留设不采，也可在煤房开采完毕后按规范部分回采，剩余煤柱承担顶板支撑的作用。

条带开采法具备显著技术优势：采后围岩移动幅度小，地表沉陷程度轻微，对地面建（构）筑物的保护效果理想，对地表生态环境的影响较小，适配各类生产矿井的开采需求；该方法无需进行一次性大额资金投入，前期资金压力较小。同时该开采方法也存在一定局限性，具体表现为巷道掘进率偏高，生产作业效率较低，单工作面产量受限，煤炭资源回收率偏低，且采煤工作面需要频繁搬家倒面，增加现场作业工序。

条带开采法的适用场景主要包含以下几类：

矿粮复合区域、村庄城镇密集区域，以及重要建筑物、纪念性建筑物下压煤的开采作业；

b. 铁路干线、重要公路干线及沿线桥梁、隧道下压煤的开采作业；

c. 采用常规全部垮落法开采时地表变形量过大，且现场不具备实施其他开采技术条件的区域；

d. 水体上方及水体下方煤层的开采作业；

e. 地表潜水位较高，地面排水作业难度大或排水经济成本过高的煤层开采区域；

f. 煤层厚度稳定、赋存层数少，且井田范围内断层构造不发育的区域；

g. 已完成开拓准备的永久性建（构）筑物下压煤柱，以及从矿井生产布局规划或市场煤炭需求角度，必须进行开采的建（构）筑物下压煤柱。

#### 充填开采法

利用矸石、水砂或膏体等材料填充采空区，减小覆岩自由空间。与条带开采相比，其资源回收率更高，且能实现废物利用。但该方法一次性投资大、工艺复杂、吨煤成本增加10%~20%。实测表明，水砂充填下沉系数为0.1~0.3，矸石充填为0.3~0.4。

依据地表移动变形的规律，其移动变形量与地表下沉量呈正相关，因此缩减开采煤层的厚度，能有效降低地下开采对地面建（构）筑物的损害程度。充填法沉陷控制技术，是在开采后利用矸石、高水材料等填充采空空间，等效缩减实际采厚，以此实现对地表沉陷的有效管控。

充填开采可按不同维度划分类型：按充填料种类，分为水砂充填、矸石充填、膏体（似膏体）充填和高水充填；按充填作业位置，分为采空区充填、冒落区充填与离层区充填；按充填量占比，分为部分充填和全部充填；按充填动力方式，分为水力充填、风力充填、机械充填及自溜充填。

充填开采方法的主要特点如下：

a. 一次性投资规模大，充填配套设备配置复杂，回采工艺流程繁琐；

b. 采场实际生产能力与生产效率均偏低；

c. 吨煤生产成本相较常规采煤方法高出10~20%；

d. 虽能有效减小地表下沉与变形量，但仍会对地表造成一定程度的破坏；

e. 开采过程中对充填材料的需求量较大；

f. 采场顶板仍存在大面积破坏的可能性。

#### 覆岩离层注浆法

利用覆岩移动过程中形成的离层空间，通过钻孔注入浆液进行充填，以抑制裂隙扩展。其机理基于空间守恒、关键层控制及平衡结构理论。该技术可作为辅助手段，实测下沉系数介于0.15~0.32之间。

煤层覆岩离层注浆减沉机理的研究主要集中在三个方面：①采场覆岩空间守恒理论，该理论认为，随着工作面推

进，采场空间逐步向覆岩层扩展，形成岩层碎胀、离层、裂隙及地表沉陷空间，但在此过程中采场覆岩空间的总体积始终保持不变；②主关键层理论，该理论指出，确定覆岩中主关键层的具体位置、掌握覆岩离层的详细参数是离层注浆的基础，只有当煤层覆岩中存在典型关键层并能形成可注浆离层空间区域时，才能取得显著的注浆减沉效果；③覆岩稳定平衡结构理论，在离层空间注浆过程中，注浆材料会在离层空间内形成一个或多个充填体，这些充填体能够对上覆岩层起到支撑作用，形成整体稳定的平衡结构体，从而抑制覆岩离层空间的持续扩展。

#### 协调开采方法

通过优化多煤层或多工作面的开采顺序与间距，利用采动影响的相互抵消作用来减小地表变形。虽然理论可行，但在实际生产组织中难度较大，应用范围有限。

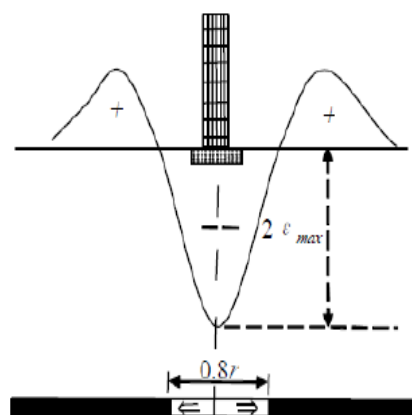


图 2.5 双工作面背向开采

实践证明，该技术对减小地表变形具有一定效果，但在生产管理中存在诸多困难，有时难以付诸实践，因此在我国应用范围有限。此外，在多个煤层或多个分层协调开采时，往往会加快地表下沉速度，不利于建筑物保护。

## 2.2 水体下采煤技术研究现状

水体下采煤是一项涉及采矿、地质、水文及力学等多学科的系统工程，核心在于确定导水裂隙带高度及留设合理的防水煤岩柱。

国外在该领域起步较早。英国（1968年）颁布了海下采煤条例；日本在11个矿井开展海下采煤并制定了严格的冲积层开采标准；俄罗斯（1973年、1981年）发布了确定导水裂隙带高度的指南与规程；匈牙利学者则提出了岩石隔水性能的等效系数换算方法。

我国水体下采煤始于20世纪60年代。早期通过观测孔监测水位变化，划分有效与无效导水裂隙。80年代以后，随着能源需求增长，我国在含水砂层下采煤方面积累了丰富的经验。《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》明确了各类条件下导水裂隙带的计算方法，为解放水体下压煤提供了技术依据，已成功解放储量超亿吨。

### 3 “三下”开采技术的发展方向

自20世纪50年代起,我国科研人员便致力于减沉技术研发,形成了条带开采、充填开采、离层注浆及协调开采等一系列技术体系。

然而,现有技术仍存在不足:条带开采资源浪费严重且煤柱长期稳定性存在隐患;充填开采成本高、工艺复杂,且面临充填材料短缺与深部开采的挑战;离层注浆效果受地

质条件限制较大。

展望未来,“三下”开采技术将朝着综合化、绿色化与智能化方向发展。单一技术难以满足日益严格的安全与环保要求,必须结合具体地质条件,采用“条带+充填”、“充填+注浆”等多技术协同的综合减沉模式。同时,开发低成本充填材料、提升充填体早期强度、利用智能化手段进行沉陷实时监测与预警,将是实现“三下”煤炭资源安全、高效、绿色开采的关键路径。

表 3.1 各减沉技术特点

减沉技术	主要技术特点	地表下沉系数
条带开采	减沉效果好;工艺简单;资源回收率低	<0.3
充填开采	减沉效果较好;工艺复杂;工艺投入较大;资源回收率较高	水砂充填 0.1~0.3 矸石充填 0.3~0.4
离层注浆	减沉效果弱于条带开采和充填开采;工艺较复杂;工艺投入较大;资源回收率高	0.15~0.32
协调开采	减沉效果弱;工艺简单、投入小;资源回收率高	

### 参考文献

- [1] 连达军,汪云甲. “三下”开采综合评价体系研究[J]. 中国矿业大学学报,2005(01):100-104.
- [2] 国家安全监管总局,国家煤矿安监局等. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[M]. 煤炭工业出版社,2017.
- [3] 杜计平,孟宪锐. 采矿学[M]. 中国矿业大学出版社,2009.
- [4] 康永华,孔凡铭,张文. 试论水体下采煤的综合研究技术体系[J]. 煤矿开采,2001(01):9-11+35-4.
- [5] 冯鹏,关夏农. 浅议“三下”采煤技术体系[J]. 太原科技,2003(03):49-51.
- [6] 王喜兵. 复杂“三下”矿山建设及开采的实践与探讨[J]. 矿业工程,2004(05):12-14.
- [7] 刘宝琛,廖国华著. 煤矿地表移动的基本规律[M]. 北京:中国煤炭工业出版社,1965.
- [8] 萨武斯脱维奇A. 地下开采对地表的影响[M]. 北京:煤炭工业出版社,1955.
- [9] 周国栓,崔继宪. 建筑物下采煤[M]. 北京:煤炭工业出版社,1983.
- [10] 麻凤海,范学理,王泳嘉. 岩层移动动态过程的离散单元法分析[J]. 煤炭学报,1996(04):54-58.
- [11] 邓喀中,开采岩体中的结构效应[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1998.
- [12] 钱鸣高,缪协兴,许家林等. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2002.
- [13] 钱鸣高,石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2003.
- [14] 许家林,钱鸣高,朱卫兵. 覆岩主关键层对地表下沉动态的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005(05):787-791.
- [15] 钱鸣高. 对中国煤炭工业发展的思考[J]. 中国煤炭,2005(06):5-9+4.
- [16] 杨硕,张有祥. 水平移动曲面的力学预测法[J]. 煤炭学报,1995(02):214-217.
- [17] 蔡怀恩. 开采沉陷预计的方法及发展趋势[J]. 露天采矿技术,2007(04):43-44+76.
- [18] 杨逾,刘文生,缪协兴,冯国财. 我国采煤沉陷及其控制研究现状与展望[J]. 中国矿业,2007(07):43-46.
- [19] 吴立新,王金庄,刘延庆,等. 建(构)筑物下压煤条带开采理论与实践[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1994.
- [20] 宋宏. 我国条带开采的研究现状及发展趋势分析[J]. 技术与市场,2016,23(08):197-198.
- [21] 李兴尚. 建筑物下条带开采冒落区注浆充填减沉技术的理论研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2008.
- [22] 王凯. 我国煤矿覆岩离层注浆技术研究发展现状[J]. 煤炭技术,2016,35(03):42-44.
- [23] 冯涛,袁坚,刘金海,谢东海. 建筑物下采煤技术的研究现状与发展趋势[J]. 中国安全科学学报,2006(08):119-123+3.