



移动阅读

尹尚先, 连会青, 徐斌, 等. 深部带压开采: 传承与创新[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(1): 170–181. doi: 10.3969/j.issn.1001-1986.2021.01.018
YIN Shangxian, LIAN Huiqing, XU Bin, et al. Deep mining under safe water pressure of aquifer: Inheritance and innovation[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(1): 170–181. doi: 10.3969/j.issn.1001-1986.2021.01.018

深部带压开采: 传承与创新

尹尚先¹, 连会青¹, 徐斌¹, 田午子¹, 曹敏², 姚辉¹, 孟浩鹏¹

(1. 华北科技大学 河北省矿井灾害防治重点实验室, 北京 101601;
2. 中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083)

摘要: 回顾了带压开采的传承与创新发展历程。阐述带压开采的概念及充要条件, 以带压开采的内涵为基础, 定义侵蚀基准面为浅部和深部带压开采的分界线(面), 明确承压水上采煤为带压开采, 而含水层“下”采煤不属于带压开采范畴, 纠正《煤矿安全规程》中有关“顶、底板带压”的不妥表述。梳理了直接为带压开采服务的理论和技术, 探(探查)、治(防治)、保(保障)3项技术, 机理(致灾机理)、评价(危险性评价)、预测(灾变预测)3项理论, 即构成带压开采理论技术体系; 华北煤田奥陶系岩溶随深度增加发育减弱, 由此推断, 空间上深部岩溶径流带多形成在古岩溶系统中, 而现代岩溶径流带则发育于现代岩溶中。深部隔水层损伤裂隙增多, 为采后承压水导升奠定物质基础。总结对比了浅部和深部底板岩溶水害特征, 阐明深部奥陶纪灰岩(简称奥灰)水突水机理, 沿裂隙渗透、扩容、压裂, 薄层灰岩中转, 不断向上导升, 形成大面积散流突水。从理论上说明突水系数已不适用隔水层厚度超出 80 m 的情形, 提出厚、巨厚隔水层带压开采评价方法: $p_0 > 3\sigma_3 - \sigma_1 - p_p + \sigma_T$; 依据隔水层厚度、底板破坏带、奥灰导升带、突水系数等因素将底板类型划分为 5 类隔水层, 提出相应 5 级带压开采条件以及 5 种治理模式; 针对深部带压开采复杂条件, 倡导应用“全时空”水害综合防治思想理念及技术。面向未来, 地质体+水流的本构模型仍是学术界需攻克的最大难题, 现实的“卡脖子”难题, 如深部岩溶发育规律、精细探查技术、水害机理及评价预测、综合治理技术等, 是实现安全带压开采的关键。

关 键 词: 带压开采; 深部; 奥陶纪灰岩; 突水机理; 评价方法

中图分类号: TD745 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2021)01-0170-12 **语音讲解**



Deep mining under safe water pressure of aquifer: Inheritance and innovation

YIN Shangxian¹, LIAN Huiqing¹, XU Bin¹, TIAN Wuqi¹, CAO Min², YAO Hui¹, MENG Haopeng¹

(1. Hebei State Key Laboratory of Mine Disaster Prevention, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China; 2. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The paper reviews the development course of inheritance and innovation of mining under pressure, expounds the concept and the necessary and sufficient conditions of mining under pressure, and on the basis of the connotation of mining under pressure, the base level of erosion is defined as the boundary(interface) of shallow and deep mining under pressure. The paper clarified that mining above confined water is mining under pressure, while mining under aquifer does not belong to the category, and corrects the improper expression of roof and floor pressure in “Coal Mine Safety Regulations”. This paper summarizes the theory and technology directly serving the mining under pressure, the three technologies of exploration, prevention and protection, the three theories of mechanism(disaster mechanism), evaluation(risk evaluation) and prediction(disaster prediction), which constitute the theoretical and technical system of mining under pressure. The development of Ordovician karst in North China coalfield weakens with the increase of depth. It can be inferred that the deep karst runoff belt in space is mostly

formed in the palaeo-karst system, while the modern karst runoff belt is developed in the modern karst. The damage fractures in the deep aquifuge increase, which lays a material foundation for the rise of confined water after mining. This paper summarizes and compares the characteristics of karst water damage in shallow and deep floor, and clarifies the mechanism of deep Ordovician limestone inrush, the permeability, dilatancy, fracturing along the fracture, and continuously rise through the transfer of thin limestone, thus forming a large area of divergent flow. It is theoretically explained that the water inrush coefficient is no longer applicable to the case that the thickness of the aquifuge exceeds 80 m, and an evaluation method of mining under pressure of thick and extremely thick aquifuge is proposed: $p_0 > 3\sigma_3 - \sigma_1 - p_p + \sigma_T$. According to the thickness of the aquifuge, the height of the floor damage zone as well as the height of fracturing belt of the Ordovician limestone, and the water inrush coefficient, the floor is divided into five types of aquifuge, and the corresponding five levels of mining under pressure conditions and five treatment modes are put forward. Aiming at the complex conditions of deep mining under pressure, the paper advocates the application of "whole time-space" comprehensive water damage prevention ideas and technologies. Facing the future, the constitutive model of geological body + water flow is still the biggest problem to be overcome by the academic circle. Realistic problems of stranglehold, such as the development of deep karst, fine exploration technology, water damage mechanism and evaluation prediction, and comprehensive treatment technology, are the keys to realize the safe mining under pressure.

Keywords: mining under pressure; deep; the Ordovician limestone; water inrush mechanism; evaluation method

华北石炭—二叠纪煤田受底板奥陶纪灰岩(简称奥灰)水威胁^[1]。中华人民共和国成立以来,应用带(水)压开采(简称带压开采)理论及技术解放了大量受水威胁的煤炭资源。随着采深不断增加,大部分矿井转入深部开采,奥灰水突水威胁日趋加大,已达到突水系数允许开采上限,传统的防治水技术和经验已不能满足安全开采要求。浅部带压开采理论及技术的传承,以及深部带压开采的创新,逐步提上议事日程。

1 带压开采发展历程

我国华北聚煤盆地含煤地层底部沉积巨厚灰岩基底(图1),该承压含水层水头高于煤层底板,形成区域性特有的带压开采情形。华北煤田奥陶纪灰岩具有厚度大、富水性强、高承压和不均一等特点^[2],

而煤层与奥灰之间隔水层厚度有限,且往往受到构造破坏,部分地区虽隔水层厚度较大,但中间又包含层数不等的薄层灰岩含水层,使带压开采条件复杂化,煤层受水威胁严重。

1.1 带压开采概念

带压开采的概念由来已久^[3],是指在具有承压水压力的含水层上进行的采煤。因此,带压开采的必要条件是“含水层‘上’的采煤”,即底板水害;含水层‘下’的采煤为水体下采煤,即顶板水害不属于带压开采范畴。带压开采的充分条件是“具有承压水压力”,也就是底板含水层水头高于煤层底板。如此来看,底板承压含水层与其压力水头之间(图1中红色线条圈定区域)进行的煤层开采均为带压开采,顶板水(包括离层水)不属于带压开采范畴。

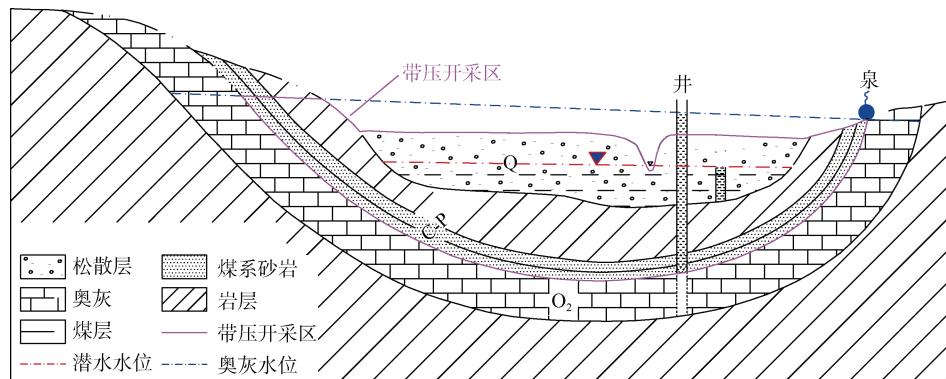


图1 华北煤田煤岩层结构及带压开采条件

Fig.1 Coal stratum structure and mining under water pressure in North China coalfield

依据带压开采定义,《煤矿安全规程》^[3]第三百零三条关于带压开采的表述不妥:对于煤层顶、底板带压的采掘工作面,应当提前编制防治水设计,制定并落实水害防治措施。前已述及,顶板水害不

属于带压开采范畴,而本条款“煤层顶、底板带压”明显在概念上就存有疑义,另外,本条款原意是针对带压开采的约束,加“顶”字后,所有顶板水均适用于本条款,显然限制对象“扩大化”了。查阅2001

版《煤矿安全规程》相应条款，第二百八十七条是这样表述的：煤系底部有强承压含水层并有突水危险的工作面，在开采前，必须编制探放水设计，明确安全措施。很明显，原条款就是针对底板水而言，“顶”字是后来《煤矿安全规程》修订过程中增加的，一字之差改变了条款指向和带压开采的意义，应该予以更正。

1.2 带压开采理论技术体系

除开采技术本身外，为消除水害威胁，3项技术和3项理论直接为带压开采服务，探(探查)、治(防治)、保(保障)，即构成带压开采技术体系；机理(致灾机理)、评价(危险性评价)、预测(灾变预测)，构成带压开采理论体系。

1.2.1 技术体系

① 探查技术 包括水文地质条件勘察和采场条件探查(探放水)^[4]。水文地质条件勘察应查明系统(单元)条件并建立水文地质概念模型；采场条件探查，即探放水，包括掘进阶段的探放水及回采阶段的探查，达成查“疑”明晰隐患之目标。

② 防治技术 包括预防和治理，无论是疏水降压还是注浆加固或注浆改造^[2,5]，均应达成消“疑”解除后患之目标。

③ 保障技术 即回采过程的安全保障，包括技术保障和管理保障。技术保障如防排水系统、监测预警系统等；管理保障如机构、人员、设备、物资等条件，责任制等规章制度，应急预案和逃生路线及演练等^[6]。

1.2.2 理论体系

① 致灾机理 即描述突水灾害形成原因。由于地质构造的复杂性，用一种机理解释不同地质采矿条件下的突水过程，是不现实的。但不论何种情形，基本力学机制只有压裂导升和整体断裂破坏2种^[7]。

② 安全评价 即突水危险性评价^[8]，一般依据力学机制，即可给定突水与否的判别临界值，但由于影响突水的因素太多，而地质体又非均质，导致得到评价结果绝非易事。目前定量评价方法较少，多数为半定量的统计方法。

③ 灾变预测 包括突水位置、时间及突水量的预测，回答在哪里、何时突水，突水量大小。就目前的理论技术水平，实现精确预测尚不太可能^[9]，理论上，复杂介质地质体和水流尚无精确本构模型，加之众多不确定因素，需持之以恒追求卓越。

1.3 带压开采技术发展历程

带压开采是在与底板奥灰水斗争中以生产实践为基础逐步完善的一门学问，其成长历史大致可分

为3个阶段。

1.3.1 理论技术体系的形成阶段

此阶段，带压开采的提出；浅部上组煤突水系数 $T \leq 0.06 \text{ MPa/m}$ ，自然状态下带压开采。

中华人民共和国成立之前及初期，煤炭开发绝大部分在浅部露头区域，有顶板水和采空区水问题，基本不涉及底板水。北京煤田地质科学研究所整体搬迁至西安后^[10]，从1957年开始着手研究矿井防治水方法，初步涉及底板水问题，以峰峰矿区为基地，扩展到太行山东南麓；1959年地质部水文工程地质局及研究所提出了中国固体矿床水文地质分类，明确为孔隙水、基岩裂隙水和岩溶水^[1]。1959年后，煤炭工业部北京科学研究院煤田地质研究所(中煤科工集团西安研究院有限公司前身)完成山东省淄博矿区煤田水文地质条件及夏庄煤矿一立井的徐家庄灰岩疏干研究^[10]，迈出底板灰岩水采用疏干降压方法防治的第一步。1964年焦作矿区水文地质会战，提出了底板突水危险性评价的“突水系数”法，水化学和水文物探方法为岩溶水探测提供有力支撑^[10]。1972—1974年，山东省淄博矿区的北大井注浆堵水工程，被淹40 a的矿井实现复产，标志着底板灰岩水堵水方法成功应用^[10]。1974年以后，以峰峰、邯郸矿区经验为基础，逐步向华北扩展^[2]，1975—1979年，煤炭工业部地质勘探研究所开展了“带(水)压开采综合防治水解放下三层煤”研究，引入突水系数，利用底板隔水层带(水)压开采受水威胁煤炭资源^[11]；“六五”期间，国家科技攻关专题“华北典型煤矿奥陶纪灰岩水上开采(防治水)技术”^[5]，采用多种手段对区域岩溶发育规律及底板隔水性能进行了系统研究，1984年《矿井水文地质规程》^[12]将突水系数作为带压开采的评价方法；到1986年《煤矿防治水条例》^[13]出台，从开采方法到探查、防治及保障的防治水技术体系基本形成，突水机理、安全评价及突水预测的带压开采理论也初具雏形。

1.3.2 理论技术体系的推广应用阶段

此阶段，浅部下组煤和中深部上组煤带压开采：突水系数 $T > 0.06 \text{ MPa/m}$ ，20世纪80年代后期以井下底板隔水层注浆加固或薄层灰岩(简称薄灰)改造为主的工程实践。

改革开放以来，特别是煤炭十年黄金期，理论蓬勃发展。突水机理方面，以分类探讨为主，如底板岩层为断层破坏、陷落柱破坏、完整底板^[7]，又如工作面和巷道等，提出了相应突水机理；评价方法由突水系数，扩展到带压系数、阻水系数^[14]，以及五图双系数、脆弱性指数法^[15-16]；突水预测预报

方面, 有3类代表性成果, 岩体结构方法、非线性动力学方法、决策分析方法^[17]。2009年《煤矿防治水规定》^[18]出台, 标志着带压开采理论技术基本成型。

带压开采的工程实践为建立理论技术体系奠定了坚实的基础。随着生产技术水平的提高, 煤层开采向深部拓展的脚步不断加快, 为应对浅部下组煤和中深部上组煤带压开采底板频繁出水, 华北各煤田结合自身条件, 探索发展物探、钻探、化探及水文地质试验等先进勘察技术, 邯郸、淄博、肥城等矿区^[19-21]率先开展井下底板隔水层注浆加固或薄灰改造为主的治理工程实践, 得到大面积推广应用, 监测预警技术等保障技术初露锋芒^[22], 形成了解放下组煤的综合技术储备。

1.3.3 深部带压开采的传承和创新阶段

此阶段, 深部上、下组煤带压开采: 突水系数 $T > 0.1 \text{ MPa/m}$, 21世纪初超前区域治理。

我国东部浅部煤炭资源枯竭, 不得不转向深部资源开采。“十一五”期间, 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目查明了深部资源现状及开采条件, 建立深部勘探与评价的技术体系^[23]; 实际观测表明^[24], 深部大面积分散出水, 采用传统井下底板注浆技术封堵治理, 已经不完全适用: 一是出水点多面广, 底板钻孔注浆就需要将工作面底板全部加固改造, 甚至要扩展到工作面外侧, 工程量巨大, 且不能封堵水源; 二是只针对出水区域注浆, 会出现“摁下葫芦起了瓢”这种局面, 由于源头并未切断, 注浆区域封堵了出水, 但注浆点周围又会突破形成新的出水点, 水量从一个点转移到另一个点, 为水源源头未切断的后果, 不能解决根本问题。

新情况促使超前区域治理方法的形成与应用。随着定向钻进技术的发展和国产化, 到2010年, 超前区域治理技术基本成形^[25]。之后, 超前区域治理又出现新问题, 即便是将防治区域从工作面扩大到采区甚至更大范围, 实施超前区域治理, 也不能保证不再出水, 梧桐庄和邢东等煤矿都已经发生过类似情况, 在完成奥灰定向分支水平钻孔注浆治理后, 工作面回采过程中仍然出现底板突水事故^[26]。工程问题反过来推动技术的进步, 全时域与全空域四维度(时间维度+空间三维度)水害“全时空”综合防治技术应运而生^[26]。

2 深部及深部带压开采

2.1 深部概念

深部是由地应力水平、采动应力状态和围岩属

性共同决定的力学状态, 目前, 国内外关于“深部开采”概念说法不一。例如南非、加拿大等国家, 开采深度为800~1 000 m的地下开采即为深井开采^[27]; 英国、波兰等国家的专家定义750 m开采深度即为深井开采^[27]; 部分其他国家定义开采深度600 m即为深部开采^[28]; 我国学者将煤矿深部资源开采的深度定为700~1 500 m^[28]。

“深部”以具体工程深度为指标定义, 具有很大的局限性。何满潮院士认为深部是出现非线性力学现象的深度^[29]; 谢和平院士认为原岩应力趋于静水应力状态是深部的典型和共同特征, 并因此划分深部开采为亚临界深度、临界深度和超深部临界深度^[30]。

关于深部开采, 除上述岩体力学方面的定义外, 归纳起来还有绝对深度、煤岩体赋存环境、灾害程度和方式、巷道变形和维护方式4种观点^[29-30]。上述观点从工程环境、灾害程度或者维护成本等不同视角定义深部。

2.2 深部带压开采

从岩体力学角度来定义深部, 分界为“非线性力学现象”的拐点; 但从水害形成机制分析, 不论在线性力学行为区(浅部)还是非线性力学行为区(深部), 承压水的压裂导升均有可能发生, 只不过在深部导升更容易发生而已。如此看来, 依据水压裂原理, 深部水害形成与力学定义的深部有关, 但不是因果关系, 也就是说, 谈深部带压开采, 力学界定义的深部仅可作为参考。

奥灰含水层富水、承压水压力与隔水层阻水能力, 是带压开采能否正常开展的决定性因素。奥灰岩溶发育与深度有直接关系, 笔者认为, 划分岩溶的深部与浅部是侵蚀基准面, 一般在当地侵蚀基准面以下, 地下水进入深循环且循环不畅, 岩溶发育明显减弱, 在侵蚀基准面上、下, 地下水循环和岩溶发育均有显著变化, 因此, 从带压开采的角度来定义, 侵蚀基准面可为带压开采的分界线(面), 其下为深部, 其上为浅部。

2.3 深部岩溶发育规律

华北石炭-二叠纪煤田主要可采煤层赋存于海陆交互相的太原组和陆相的山西组中, 其基底为中奥陶统石灰岩。

早期笼统认为华北奥陶系灰岩为强富水含水层。实际上, 中奥陶统沉积时经历了3次海进和海退, 沉积旋回明显, 岩溶发育具有多期性和反复性的特点, 垂直及水平方向上其富水性不均一的特征得到广泛认同。1975年在河北省峰峰矿区举行的华

北奥陶系专题地层会议, 将华北地台的中奥陶统分为 3 组 8 段^[31], 西山、潞安、峰峰等华北矿区水文钻孔及物探资料证明, 奥灰含水层存在 3 个强含水层段(峰峰组上段、上马家沟组上中段、下马家沟组上中段)和 3 个弱富水段(峰峰组下段、上马家沟组下段、下马家沟组下段); 峰峰组下段的富水性较上段差, 上马家沟组上中段为区域主要含水层; 奥灰顶部的充填带为相对隔水层段。

除自身的沉积旋回和物性控制外, 奥灰岩溶发育还受到其埋藏深度的制约, 一般情况下, 在灰岩露头区岩溶发育, 随埋藏深度加大, 岩溶发育越来越弱。

在小构造单元内, 可溶性岩层中的地下水在重力作用下, 沿岩层中的 X 节理及倾向流动, 构成立体框架状溶蚀裂隙, 这是岩溶储水的基本单元; 在横向, 岩溶水的横向流动则是受补给区与排泄区的相对位置控制, 形成顺层溶蚀带, 是岩溶水沟通的主要通道; 而沿大型构造地下水集中运移, 往往形成区域岩溶集中发育的径流带。

奥灰岩溶发育常受当地侵蚀基准面的制约, 而构造运动则控制着侵蚀基准面的高低, 不同高程的侵蚀基准面, 地下水交替循环的深度不同, 其岩溶

发育程度和深度也不同。在侵蚀基准面以下的地段, 地下水排泄相对困难, 水力交替缓慢, 岩溶一般发育较差; 在侵蚀基准面缓慢波动的地段, 由于岩溶承压水的弹性储存和释放, 径流及排泄通畅, 有利于岩溶的发育。

在加里东运动时期, 我国北方地面上升, 形成大面积的剥蚀-溶蚀区, 中奥陶世以后的晚奥陶世、志留纪、泥盆纪 130~150 Ma 无地层沉积, 吉陆地长期处于剥蚀、溶蚀状态, 形成喀斯特(Karst)准平原^[32]。石炭纪中晚期, 华北地壳快速下降, 含煤地层在大多数向斜盆地覆盖喀斯特平原, 奠定了华北煤田的雏形。如图 2 所示, 燕山运动晚期, 太行山褶皱隆起, 使华北平原奥灰自西向东逐渐深埋, 太行山裸露以及东麓浅埋区域, 岩溶继承古岩溶继续改造发展, 而深埋区域则基本保持了古岩溶的原貌, 不再发展^[33]。山西高原^[34]整体抬升, 侵蚀基准面下移, 灰岩中的喀斯特继续深切发展, 古岩溶位于上一侵蚀基准面, 由于在奥灰岩溶水位以上, 基本也保持不再继续发展; 而现代岩溶发育较深, 因大部分煤层高于现代岩溶水位而不带压或者压力较小, 因此, 山西高原煤层带压开采形势相对并不严重。

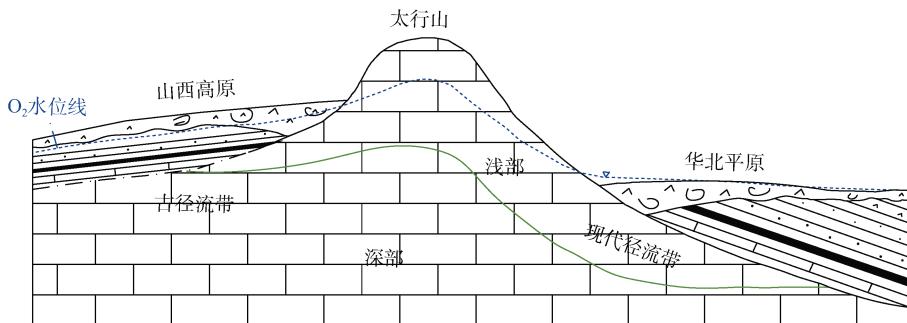


图 2 华北煤田岩溶发育
Fig.2 Schematic diagram of karst development in North China coalfield

岩溶陷落柱是岩溶发育与径流带的产物^[35]。由于深部岩溶发育弱, 地下水循环交替弱, 基本不具备陷落柱形成的条件, 因此, 深部的陷落柱应为古岩溶陷落柱随构造变动而深埋形成, 古岩溶陷落柱预示古径流带的存在; 现代岩溶陷落柱则发育在现代径流带上。陷落柱发育始于印支运动及燕山运动早期的中生代早期, 即形成于含煤地层沉积结束, 基底开始隆起沉积间断时期, 结束于燕山运动晚期的中生代晚期; 喜马拉雅运动的新近纪以来, 有些陷落柱重新复活。南方晚二叠世煤田煤层底板二叠系茅口灰岩与上覆地层连续沉积, 因此, 极少发育有古岩溶陷落柱。

2.4 深部隔水层特征

带压开采是奥灰水与隔水层之间矛与盾的关系, 除了奥灰岩溶水, 隔水层的性状以及深部与浅部特征(自身特征、环境特征)同样重要。

一般认为, 二叠系山西组赋存煤层为上组煤, 石炭系太原组为下组煤。山西组含煤地层由煤层和砂岩类、页岩类及泥岩类岩层组成, 局部夹杂薄层灰岩; 太原组由煤层及薄层灰岩、泥岩页岩互层组成; 在太原组与奥灰之间还有本溪组地层, 该组地层在华北煤田大部分区域极薄或者缺失。在正常沉积环境下, 上组煤开采有太原组和本溪组地层阻隔, 一般不会形成奥灰突水; 而下组煤, 特别是下组煤

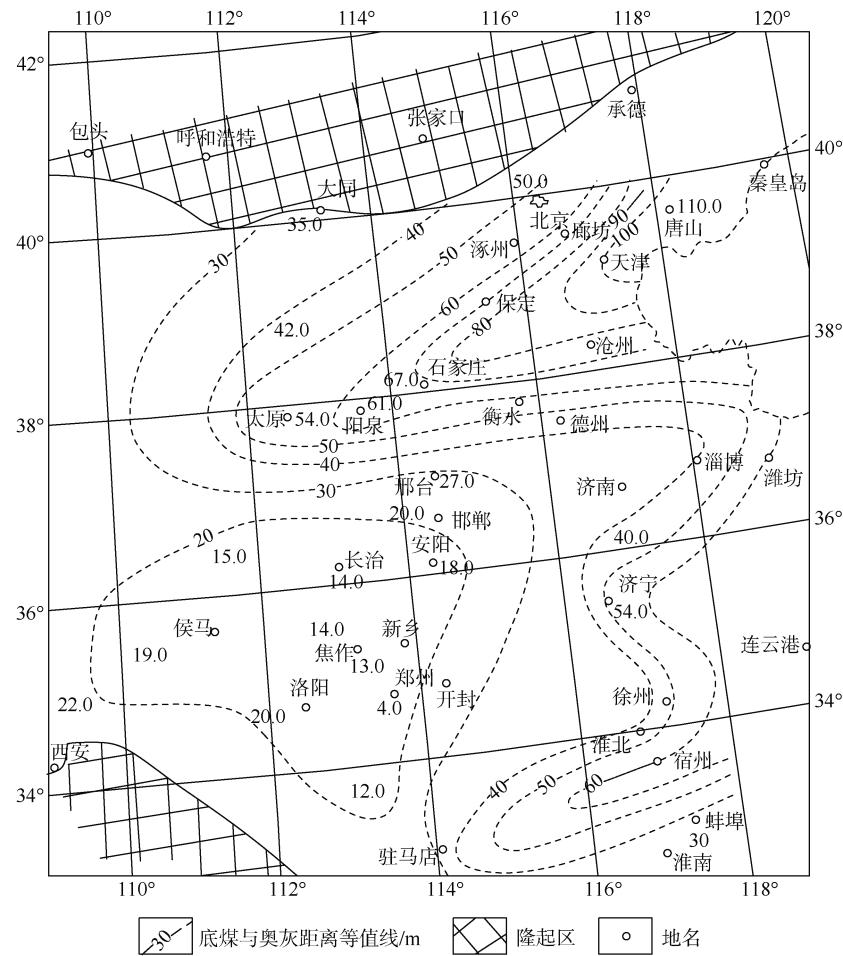
下部煤层, 由于距离奥灰近(图3), 加之局部薄层灰岩的中转传导, 奥灰水容易突破隔水层形成突水。

从岩性组合结构分析, 如果把煤层到奥灰之间的岩层均视为隔水层, 那么, 隔水层中的泥质岩层和粉砂岩、页岩等岩性柔软、透水性较弱, 砂岩、石灰岩硬脆且透水性较好, 它们相互叠置组合, 有利于缓解岩层变形, 增强隔水性能; 如果发育本溪组岩层, 其底部的铝土质页岩、泥岩是性能良好的隔水层。

由此看来, 一般情况下, 不论是开采上组煤还是解放下组煤, 突水发生的情况为极少数, 不涌水是常态, 也正是基于此, 充分利用自然隔水层阻水能力而进行的带压开采才有其存在的价值, 否则, 一旦开采

便到处涌水, 带压开采就失去了意义。而突水的情况绝大部分是由于底板隔水层受到构造破坏所致。

在浅部, 地应力小于围岩强度, 除构造地段, 岩体致密完整, 能够抵抗围压的岩层, 自然可以抵御浅部较小的水头压力, 因此, 浅部突水基本上发生在构造破坏地段, 以集中过水通道形式呈现。在深部, 地应力不断加大, 一旦大于围岩强度, 则岩层发生形变产生裂隙, 上覆煤层开采后, 底板岩层垂向应力解除, 原有裂隙张开, 在一定水压力作用下, 裂隙压裂连通, 形成承压水的导升, 微细裂隙导升汇集, 在合适的位置和适当时机, 即可形成深部散面状涌水, 进而形成集中通道突水。



注: 底煤为石炭-二叠纪煤田下组煤最下层煤
图3 华北煤田底煤与奥灰距离等值线(据王梦玉^[36], 修改)

Fig.3 Contours of distance between coal seam and Ordovician limestone in North China Coalfield(revised according to Wang Mengyu^[36])

3 深部带压开采突水特征、机理及评价

3.1 浅部及深部底板突水特征

3.1.1 浅部底板突水特征

传统意义上的浅部, 仍然以底板隔水层厚度一

般在 60~80 m 以内、底板承压水压力在 3.0~4.0 MPa 以下为主; 此时, 突水系数法评价带压开采危险性的适用性很好。

浅部底板突水以现代岩溶径流带或富水带为水源, 水量丰富, 水质为以 Ca-HCO₃ 或 Ca-Mg-HCO₃

为主的低矿化度水；突水通道以陷落柱、断层等大中型构造的集中过水通道为主，突水量大。

3.1.2 深部底板突水特征

大量深部底板突水案例表明，突水量呈阶梯递增，但峰值远小于浅部，突水通道以点状分散为主，水质高矿化度且阳离子以 Na^+ 或 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 为主，绝大多数为滞后突水^[26]。

① 充水水源 奥灰为总的策源地，奥灰水是总驱动发动机，薄灰既储能又积势，起到承上启下的作用。

② 充水通道 以大型构造叠加裂隙带出水为主要模式，压裂分散出水为主要特征^[26]。

③ 充水强度 涌水一般由小到大经历几个甚至几十个台阶达到峰值(图 4)^[26,37]，随后视补给情况稳定或下降。

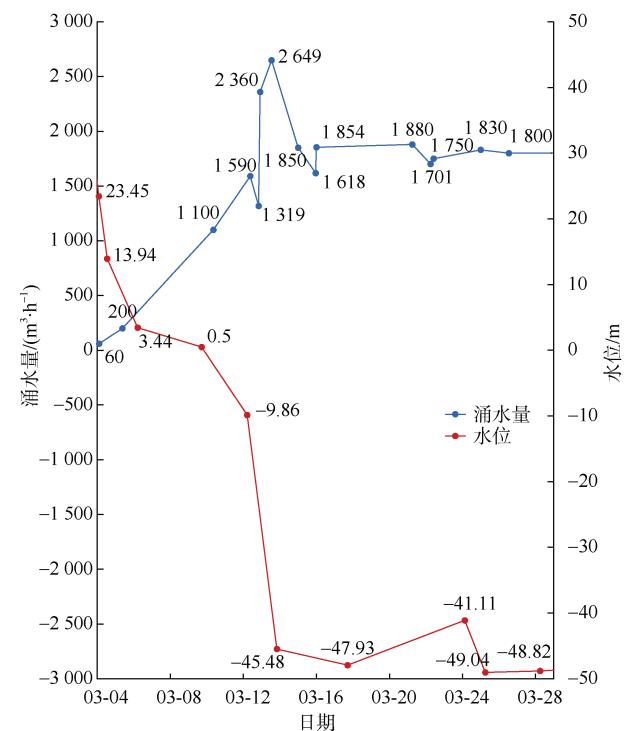


图 4 河北省峰峰矿区九龙矿突水水位和水量动态
Fig.4 Dynamic diagram of water level and quantity of water inrush in Jiulong Mine, Fengfeng group

④ 充水时间 伴随回采初次或周期来压出现涌水，由于压裂过程或者观测迟滞，出现“滞后”现象。

⑤ 充水水质 深部奥灰高矿化度水由出水初期 Na^+ 或 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 逐渐转变为 Ca^{2+} 或 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ ， $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 或 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 逐渐转变为 HCO_3^- ，与正常灰岩水有所区别。

3.2 深部带压开采突水机理

正常岩层底板突水有 2 种模式：① 薄板的整体

破坏模式；② 厚板的水压裂导升破坏模式。从微观角度看，水压力、最小主应力、裂缝的类型、尺寸及岩层的性质等决定裂缝扩展与否，整体表现为隔水层的阻水能力。但宏观看，煤层底板阻水能力首先取决于隔水层的完整程度和厚度。

开采前，由于隐伏构造或裂隙集中带岩溶水导升一定高度后处于平衡静止状态；当开采后，作用于底板的垂向地应力解除，在高承压水压力作用下，奥灰水开始克服岩层阻力向上导升，经过薄层灰岩中转站，继续向上压裂导升，直至与煤层底板扰动带及破坏带沟通，形成面状散流突水(图 5)^[26,37]。

3.3 深部带压开采评价

对于厚、巨厚隔水层，从理论上讲，厚板整体破断方式不可能发生，在无直通式构造通道的前提下，奥灰水向上运移的方式只有沿裂隙水力压裂导升。

针对华北典型奥灰-厚隔水层夹薄层灰岩-煤层的三元煤岩层结构模式，隔水层厚度远超出 80 m，突水系数已不适用于此模式底板突水危险性评价^[38]。

依据薄板理论^[38]，突水临界线为 $p=0.0011M^2+0.0019M+0.1$ ；按照统计规律，突水临界线为 $p=0.1409e^{0.0583M}$ ；突水系数 $T=p/M$ (图 6)。据突水点统计(图 6 中黄色线条^[39])，当 $0 < M \leq 30 \text{ m}$ ， $p=0.0256M-0.0118$ 为突水临界；当 $30 \text{ m} < M \leq 80 \text{ m}$ ， $p=0.1368M-3.3474$ 为突水临界。

进入深部以后，由于地应力增大，岩层损伤加重，即岩层自身裂隙发育，但在高应力围岩环境下裂隙闭合，因此，承压水导升高度有限。一旦采动影响，围岩应力释放，承压水使裂隙张开并可能造成微裂隙的破裂延展，呈现承压水的导升。实际观测发现^[24]，深部突水都以散点大面积涌水为特征，基于薄板关键层宏观整体破断机制将不再成立，厚板微观压裂导升机制控制了突水的发生发展。此时，水压力与围岩之间的平衡关系如下：

$$p_0 = 3\sigma_3 - \sigma_1 - p_p + \sigma_T \quad (1)$$

式中： p_0 为岩层水力压裂时的起裂压力； σ_3 、 σ_1 分别为围岩最小和最大主应力(地应力)； p_p 为孔隙水压力； σ_T 为岩石抗拉强度。

由于开采后垂向应力解除形成二维状态，深部平衡关系变为： $p_0 \geq (\sigma_3 + \sigma_T)$ 。依据点状分散涌水特征，深部底板治理技术，将由构造治理转向底板大面积改造，如超前区域治理。

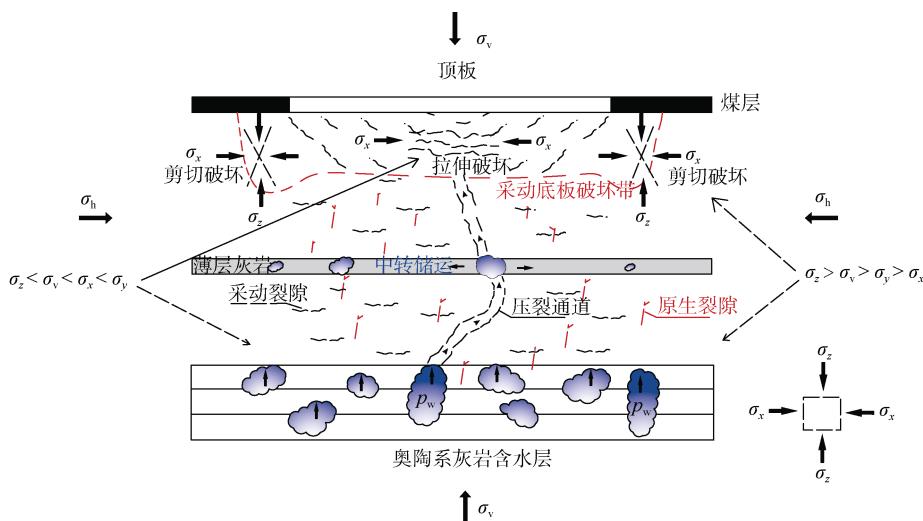


图 5 华北煤田三元煤岩层结构突水机理

Fig.5 Schematic diagram of water inrush mechanism of coal stratum structure in North China Coalfield

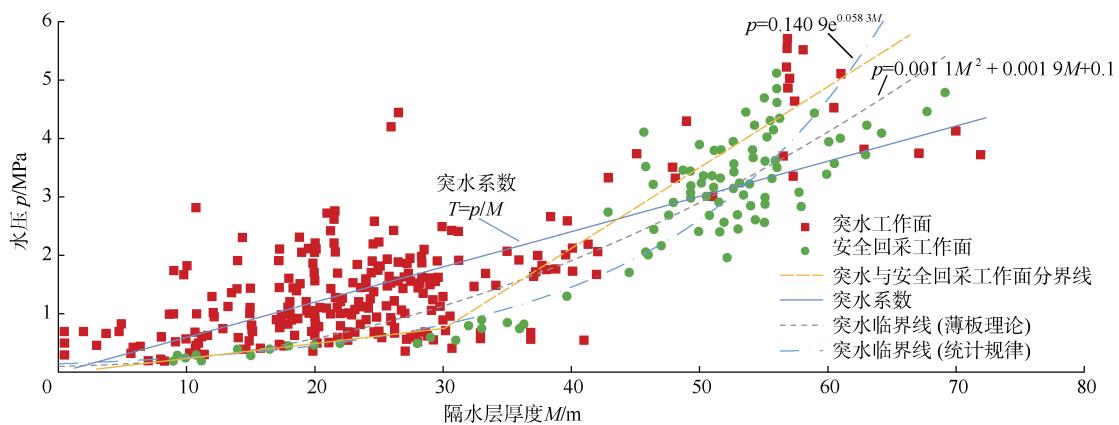


图 6 带压开采水压与隔水层厚度的理论及统计分析

Fig.6 Theoretical and statistical analysis of water pressure and thickness of aquiclude when mining under pressure

在新采区的首采工作面,仅针对该面的底板加固改造将起到一定作用,但经过几个工作面甚至上下多煤层的开采扰动卸压,该区域内原始的三维应力场转变为二维场(垂向应力解除),高承压水不再受围岩原始应力场束缚,沿原生裂隙及次生裂隙不断渗透扩张,在原有渗流场的基础上,改造成区域性四通八达的渗流网,此时,仍将单一工作面的底板改造成隔水底板已无法发挥作用,水的流动性和压力会使其绕过注浆封堵段,形成绕流补给,而非沿垂向通道的补给关系。

由于在深部不能直接封堵源头,可在水源与工作面之间进行水流拦截;而浅部集中通道的封堵相对容易;但面对分散裂隙渗透扩张再采用中间截流的办法,其作用无法保障。

4 深部带压开采模式及关键技术

带压开采是指在具有承压水压力的含水层上进

行的采煤。一般是指单纯利用自然条件下底板隔水层抵抗含水层水压,并不是采取疏水降压,或局部注浆加固改造的防治措施条件下实现安全目标的开采。目前,华北型煤田各矿区多数是在采取疏水降压或注浆加固改造措施后的“带压开采”,特别是深部开采,“自然带压开采”方法模式已不再适用。

4.1 开采模式

为应用方便,依据将底板隔水层分为 5 类^[26],对应将带压开采条件分为 5 级,相应提出 5 种带压开采治理模式,详见表 1。

4.2 开采关键技术

深部带压开采围岩条件复杂,宜贯彻“全时空”水害综合防治思想理念^[26],实施全时域与全空域四维度(时间维度+空间三维度)水害防治技术。

“全时域”,即贯穿采掘全过程,评估预测-探治验补-检验评价-监测保障全链条“四位一体”技术流程控制^[12]。

表 1 5 类深部带压开采治理模式
Table 1 Five treatment modes of mining with water pressure in deep coal seams

模式	隔水层判定	底板特征	带压开采条件	改造措施
模式1	当隔水层厚度在30 m 以内时, 满足 $0 < M \leq (h_p + h_d) < 30 \text{ m}$, $T > 0$, 划分为极薄隔水层	底板几乎不具有阻水能力, 只要带压, 即可发生底板涌(突)水	极差	应在奥灰含水层中进行注浆改造, 改造层位选择以满足 $T \leq 0.1 \text{ MPa/m}$ 为主, 兼顾奥灰富水性
模式2	当 $(h_p + h_d) < M \leq 80 \text{ m}$, 且 $T > 0.06 \text{ MPa/m}$, 划分为薄隔水层; 突水系数判定法适用性较好	隔水层厚度在60~80 m 范围以内, 此类型底板突水危险性高	差	应在奥灰含水层中进行注浆改造兼顾底板注浆加固, 改造层位选择以满足 $T \leq 0.1 \text{ MPa/m}$ 为主, 兼顾奥灰富水性; 加固层位应选择在底板破坏带以下
模式3	当 $(h_p + h_d) < M \leq 80 \text{ m}$, 且 $T \leq 0.06 \text{ MPa/m}$, 划分为中隔水层	底板突水危险性低	中等	应采用底板注浆加固, 加固层位应选择在底板破坏带以下
模式4	当 $M > 80 \text{ m}$ 且 $M > (h_p + h_d)$, 且 $T > 0.1 \text{ MPa/m}$, 划分为厚隔水层。	底板虽具有较高突水风险, 但实际突水的概率很小, 除非底板中有大型构造	良	应以奥灰含水层注浆改造为主兼顾底板注浆加固, 改造层位选择以满足 $T \leq 0.1 \text{ MPa/m}$ 为主, 兼顾奥灰富水性; 加固层位应选择在底板破坏带以下, 加固对象以大中型构造为主
模式5	当 $M > 80 \text{ m}$ 且 $M > (h_p + h_d)$, 且 $T \leq 0.1 \text{ MPa/m}$, 划分为巨厚隔水层	突水风险及实际突水的概率极低, 除非底板中有大型导水构造	优	以底板注浆加固为主, 加固层位应选择在底板破坏带以下, 加固对象以大中型构造为主

注: M 为隔水层厚度; h_p 为底板破坏带高度; h_d 为奥灰导升带高度; T 为突水系数; 模式 1 隔水层判定是据突水点统计^[39], 为图 6 中黄色实线; 模式 2 隔水层判定是依据统计规律, 图 6 中浅蓝色虚线。

“全空域”, 即三维立体空间上, 井上井下立体布局, 空间交叉网状地面超前区域治理, 井下多层段探、治、验、补管控制模式, 形成全空域布局时间维度全链条覆盖的综合防治模式^[26]。

所涉及的具体技术, 如方案选择、工艺配套、施工管理、材料配比、质量把控、评价验证等, 工程实践案例成果丰硕^[40-42], 在此不赘述。

5 展望

尽管带压开采的理论和技术取得了长足进步, 但面对复杂的地质与采矿条件, 特别是深部极复杂环境, 仍有大量科学技术难题等待攻关。

目前可以基本实现用科学语言来描述和刻画宏观突水过程, 尽管细节不尽相同、观点仍有分歧, 但突水机理远未达到可以用精确理论表达的程度, 触及本质的本构关系尚未建立; 突水影响因素基本可以罗列齐全, 但各因素与突水的关系、各因素之间的相互关系以及因素集对突水发生发展控制作用, 研究深度只涉及表象未深入本质, 表现在评价方法上, 统计方法和经验方法占据主导地位, 精确理论的数学或力学评价方法缺失; 由于地质体介质的不确定性和水流的复杂性, 加之流-固耦合的实时动态效应, 地质体本构模型尚无法建立, 导致时间空间四维度突水预测以及量的预测, 乃空中楼阁。

上述科学难题非几代人可以解决, 将随着科学

技术水平的整体进步, 得到逐步解决, 其历程将艰辛而漫长。

目前应重点关注制约现实安全带压开采的技术难题, 未来一段时间内带压开采“卡脖子”难题如下:

a. 岩溶发育规律。灰岩水源是带压开采的设防对象, 如果灰岩中无水, 理论上带压开采不用设防, 而灰岩确实存在岩溶发育强烈不均一性的特点, 大部分区域灰岩不富水, 只有径流带发育地带才需要做工作。因此, 应紧紧围绕岩溶及岩溶水赋存径流规律开展研究, 找到径流带, 明了危险所在, 保安全就相对简单。

b. 灰岩中有“水”, 也不一定就突水, 统计表明, 既富水又存在构造的地方才可能形成突水。为此, 需要发展精细勘探探查技术, 一要查清灰岩富水区域, 二应查明构造薄弱带。

c. 尽管不能达到完全认识事物本质的程度, 但探索的脚步永不停止。在现有岩体结构、泛决策、非线性等分析方法的基础上, 充分发挥交叉学科的优势, 宏观与微观相结合, 分散出击各个击破, 分类探索突水机理, 分条件提出评价方法, 分场景预测突水及突水量。

d. 最后一个难题就是“治”。目前, 在没有明确水源、通道等目标的情况下, 一般将开采区域作为靶区, 进行大面积超前区域治理; 但重点区域可能治理不到位而导致治理效果不明显或无效。因此,

明晰治理目标至关重要, 其次才是如何“治”, 方案选择、工艺配套、施工管理、材料配比、质量把控等, 治理技术已经从井下大面积注浆发展到目前超前治理的全时域与全空域四维度水害“全时空”综合防治技术, 但其治理效果还有待进一步研究和验证。

参考文献(References)

- [1] 地质部水文地质工程地质局及研究所. 中国固体矿床水文地质分类[M]. 北京: 地质出版社, 1959.
- Bureau and Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Ministry of Geology. Hydrogeological classification of solid deposits in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1959.
- [2] 煤炭科学研究院西安分院, 峰峰矿务局. 华北型煤矿奥灰水防治研究[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1990.
- Xi'an Branch of China Coal Research Institute, Fengfeng Mining Bureau. Research on prevention and control of Ordovician limestone water in North China type coal mine[M]. Xi'an: Shaanxi People's Publishing House, 1990.
- [3] 国家安全生产监督管理总局. 煤矿安全规程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2011.
- The State Administration of Work Safety. The safety regulation for coal mining[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2011.
- [4] 国家煤矿安全监察局. 煤矿防治水细则[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2018.
- The State Administration of Coal Mine Safety. Rules for water prevention and control in coal mines[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2018.
- [5] 宋景义, 刘志中, 李谢淮. 华北型煤田奥灰岩溶水综合防治工业性试验总报告[R]. 西安: 煤炭科学研究院西安分院, 1995.
- SONG Jingyi, LIU Zhizhong, LI Xiehuai. General industrial test report on integrated control of Ordovician limestone karst water in North China type coalfield[R]. Xi'an: Xi'an Branch of China Coal Research Institute, 1995.
- [6] 尹尚先. 新版《煤矿安全规程》(防治水部分)修订要点解读与讨论[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(7): 139–143.
- YIN Shangxian. Interpretation and discussion on revised key points of mine water prevention part from Coal Mine Safety Regulations[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(7): 139–143.
- [7] 尹尚先. 煤层底板突水模式及机理研究[J]. 西安科技大学学报, 2009, 29(6): 661–665.
- YIN Shangxian. Modes and mechanism for water intrusions from coal seam floor[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2009, 29(6): 661–665.
- [8] 靳德武, 董书宁, 刘其声. 带(水)压开采安全评价技术及其发展方向[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(增刊1): 21–24.
- JIN Dewu, DONG Shuning, LIU Qisheng. Safety evaluation technique and development tendency of safety mining above confined aquifer[J]. Coal Geology & Exploration, 2005, 33(Sup.1): 21–24.
- [9] 王梦玉. 煤层底板突水机理及预测方法探讨[J]. 煤炭科学技术, 1979(9): 34–39.
- WANG Mengyu. Discussion on water inrush mechanism and prediction method of coal seam floor[J]. Coal Science and Technology, 1979(9): 34–39.
- [10] 中煤科工集团西安研究院有限公司. 中煤科工集团西安研究院有限公司志[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2016.
- Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp. Annals of Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp.[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2016.
- [11] 李金凯. 略论华北煤矿奥陶系灰岩水突水特征及防治[J]. 煤田地质与勘探, 1981(5): 36–40.
- LI Jinkai. Characteristics and prevention of Ordovician limestone water inrush in North China coal deposit[J]. Coal Geology & Exploration, 1981(5): 36–40.
- [12] 中华人民共和国煤炭工业部. 矿井水文地质规程(试行)[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.
- Ministry of Coal Industry of the People's Republic of China. Mine hydrogeological regulations(trial version)[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1984.
- [13] 中华人民共和国煤炭工业部. 煤矿防治水工作条例(试行)[M]. 北京: 煤炭工业部, 1986.
- Ministry of Coal Industry of the People's Republic of China. Regulations on water prevention and control in coal mines(trial version)[M]. Beijing: Ministry of Coal Industry of the People's Republic of China, 1986.
- [14] 尹尚先, 虎维岳, 刘其声, 等. 承压含水层上采煤突水危险性评估研究[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(3): 311–315.
- YIN Shangxian, HU Weiyue, LIU Qisheng, et al. Risk assessment for water inrush from confined aquifers located under coal seams[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2008, 37(3): 311–315.
- [15] 武强, 张志龙, 张生元, 等. 煤层底板突水评价的新型实用方法II—脆弱性指数法[J]. 煤炭学报, 2007, 32(11): 1121–1126.
- WU Qiang, ZHANG Zhilong, ZHANG Shengyuan, et al. A new practical methodology of the coal floor water bursting evaluating II: The vulnerable index method[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(11): 1121–1126.
- [16] 武强, 董书宁, 赵苏启, 等. 《煤矿防治水规定释义》[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009.
- WU Qiang, DONG Shuning, ZHAO Suqi, et al. Interpretation of regulations on prevention and control of water in coal mines[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2009.
- [17] 靳德武. 我国煤层底板突水问题的研究现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2002, 30(6): 1–4.
- JIN Dewu. Research status and outlook of water outburst from seam floor in China coal mines[J]. Coal Science and Technol-

- ogy, 2002, 30(6): 1–4.
- [18] 国家安全生产监督管理总局, 国家煤矿安全监察局. 煤矿防治水规定[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2009.
- State Administration of Work Safety, National Coal Mine Safety Supervision Bureau. Regulations on prevention and control of water in coal mines[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2009.
- [19] 刘刚峰. 峰峰王凤矿试验区带压开采解放下三层煤[J]. 煤炭科学技术, 1979, 7(11): 67–67.
- LIU Gangfeng. Mining the lower three coal seams under safe water pressure of aquifer in Wangfeng experimental area, Fengfeng[J]. Coal Science and Technology, 1979, 7(11): 67–67.
- [20] 煤炭部淄博工作组, 淄博矿务局. 淄博矿区采区底板突水规律及防治[J]. 煤田地质与勘探, 1977(4): 1–10.
- Zibo working group of Ministry of coal industry, Zibo Mining Bureau. Floor water inrush law and prevention in Zibo Mining Area[J]. Coal Geology & Exploration, 1977(4): 1–10.
- [21] 梁仕儒, 刘茂泉. 肥城矿区地下水综合防治[J]. 煤田地质与勘探, 1986(2): 43–48.
- LIANG Shiru, LIU Maoquan. Comprehensive prevention and control of groundwater in Feicheng mining area[J]. Coal Geology & Exploration, 1986(2): 43–48.
- [22] 李振栓, 尹尚先. 煤矿水情监测预警保障系统[M]. 太原: 山西人民出版社, 2014.
- LI Zhenshuan, YIN Shangxian. Coal mine hydrological monitoring and early warning guarantee system[M]. Taiyuan: Shanxi People's Publishing House, 2014.
- [23] 虎维岳. 华北东部深部岩溶及煤矿岩溶水害特征[J]. 煤田地质与勘探, 2010, 38(2): 23–27.
- HU Weiyue. The characteristics of karst and deep coal mine karst water hazards in eastern North China[J]. Coal Geology & Exploration, 2010, 38(2): 23–27.
- [24] 尹尚先. 煤矿水害防治基础科学发展思考[J]. 煤炭工程, 2016, 48(11): 96–100.
- YIN Shangxian. Thoughts of basic science development on mine water control and prevention[J]. Coal Engineering, 2016, 48(11): 96–100.
- [25] 赵庆彪. 华北型煤田深部煤层开采区域防治水理论与成套技术[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- ZHAO Qingbiao. Water prevention theory and complete set of technology in deep coal seam mining area of North China coalfield[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [26] 尹尚先, 王屹, 尹慧超, 等. 深部底板奥灰薄灰突水机理及全时空防治技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1855–1864.
- YIN Shangxian, WANG Yi, YIN Huichao, et al. Mechanism and full-time-space prevention and control technology of water inrush from Ordovician and thin limestone in deep mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1855–1864.
- [27] 张士成, 郑旺来. 煤矿深井开采面临的问题与对策[J]. 能源技术与管理, 2016, 41(5): 174–177.
- ZHANG Shicheng, ZHENG Wanglai. Problems and countermeasures of deep mining in coal mine[J]. Energy Technology and Management, 2016, 41(5): 174–177.
- [28] 李化敏, 付凯. 煤矿深部开采面临的主要技术问题及对策[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(4): 468–471.
- LI Huamin, FU Kai. Some major technical problems and countermeasures for deep mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(4): 468–471.
- [29] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803–2813.
- HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803–2813.
- [30] 谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究与探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2161–2178.
- XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2161–2178.
- [31] 河北省地质局第一区域地质测量大队. 华北奥陶系专题会议文献汇编[M]. 石家庄: 河北省地质局第一区域地质测量大队, 1975.
- The First Regional Geological Survey Team of Hebei Geological Bureau. Document collection of special conferences of Ordovician in North China[M]. Shijiazhuang: The First Regional Geological Survey Team of Hebei Geological Bureau, 1975.
- [32] 赵铁锤. 华北地区奥灰水综合防治技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2006.
- ZHAO Tiechui. Comprehensive prevention and control technology of Ordovician lime water in North China[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2006.
- [33] 李金凯. 矿井岩溶水防治[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1990.
- LI Jinkai. Karst water prevention and control in mines[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1990.
- [34] 李振栓. 中国北方喀斯特水源地勘探方法研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000.
- LI Zhenshuan. Research on exploration methods for karst water supply in northern China[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2000.
- [35] 尹尚先, 连会青, 刘德民, 等. 华北型煤田岩溶陷落柱研究 70 年: 成因·机理·防治[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(11): 1–29.
- YIN Shangxian, LIAN Huiqing, LIU Demin, et al. 70 years of investigation on karst collapse column in North China coalfield: Cause of origin, mechanism and prevention[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(11): 1–29.
- [36] 王梦玉. 矿井防治水和水资源管理研究论文选集[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2011.
- WANG Mengyu. Selection of research papers on mine water control and water resources management[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2011.
- [37] 关永强. 峰峰矿区深部矿井水文地质特征及水害防治技术[J]. 煤炭与化工, 2018, 41(10): 59–62.
- GUAN Yongqiang. Water pollution control technology and hy-

- drogeological characteristics of deep mine in Fengfeng Mine[J]. Coal and Chemical Industry, 2018, 41(10): 59–62.
- [38] 张金才, 张玉卓, 刘天泉. 岩体渗流与煤层底板突水[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- ZHANG Jincai, ZHANG Yuzhuo, LIU Tianquan. Seepage in rock mass and water inrush from coal seam floor[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997.
- [39] 李文平, 乔伟, 李小琴, 等. 深部矿井水害特征、评价方法与治水勘探方向[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2437–2448.
- LI Wenping, QIAO Wei, LI Xiaoqin, et al. Characteristics of water disaster, evaluation methods and exploration direction for controlling groundwater in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2437–2448.
- [40] 董书宁, 郭小铭, 刘其声, 等. 华北型煤田底板灰岩含水层超前区域治理模式与选择准则[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(4): 1–10.
- DONG Shuning, GUO Xiaoming, LIU Qisheng, et al. Model and selection criterion of zonal preact grouting to prevent mine water disasters of coal floor limestone aquifer in North China type coalfield[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(4): 1–10.
- [41] 赵庆彪. 奥灰岩溶水害区域超前治理技术研究及应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(6): 1112–1117.
- ZHAO Qingbiao. Ordovician limestone karst water disaster regional advanced governance technology study and application[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(6): 1112–1117.
- [42] 郑士田. 两淮煤田煤层底板灰岩水害区域超前探查治理技术[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(4): 142–146.
- ZHENG Shitian. Advanced exploration and control technology of limestone water hazard in coal seam floor in Huainan and Huabei Coalfields[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(4): 142–146.

(责任编辑 周建军)