



移动阅读

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. doi:10.13225/j.cnki.jccs. KJ19. 0563

LI Wenping, QIAO Wei, LI Xiaolin, 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. doi:10.13225/j.cnki.jccs. KJ19. 0563

深部矿井水害特征、评价方法与治水勘探方向

李文平, 乔伟, 李小琴, 孙如华

(中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:煤矿区深部含水层具有大埋深、高水压等特点,是深部煤层开采水害防范的主要对象。在分析深部矿井水害特征基础上,探讨了深部矿井地应力对裂隙水介质的力学作用机制,阐述了深部矿井裂隙水介质呈现“高承压、弱富水”的力学原因;基于古岩溶成因演化理论,结合水文地质勘探和野外调查,分析探讨了华北型煤田奥陶纪石灰岩顶部“古风化壳”的岩溶充填结构特征,并将奥陶纪石灰岩顶部“古风化壳”划分为“隔水充填带、弱隔(透)水充填带、富(透)水带”3种岩溶充填结构类型,给出了各类型确定的关键指标和阈值,明确了奥陶纪灰岩顶部存在隔水层的理论依据。将深部矿井煤层开采底板突水划分为“完整底板突水模式”和“集中破碎带底板突水模式”,分析了深部煤层开采底板含水层高水压作用下沿用传统的突水系数法(T_s 法)评价底板突水危险性的局限性,引入隔水层厚度(M)和含水层钻孔单位涌水量(q)2个指标,结合突水实例分析,提出了“修正的突水系数法”(T_s - M - q 法,适用于完整底板突水模式);在实验和实例分析基础上,提出“渗-流转换”突水评价法(适用于集中破碎带底板突水模式)。最后,基于深部矿井水害特征及突水模式,结合深部含水介质赋存、构造发育特征和地应力场方向,阐述了深部矿井水害精准查治一体化勘探关键技术。

关键词:深部矿井;高承压弱富水;奥灰顶部充填带;渗-流转换; T_s - M - q 法;突水模式

中图分类号:TD745

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2019)08-2437-12

Characteristics of water disaster, evaluation methods and exploration direction for controlling groundwater in deep mining

LI Wenping, QIAO Wei, LI Xiaolin, SUN Ruhua

(School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The water source of deep mine water inrush mainly comes from two kinds of water-bearing medium: fissure water medium and karst water medium. Based on the mechanical effect of the deep mine stress on the fractured rock mass, it reveals that the fractured water medium in the deep mine exhibits the characteristics of “high confined and weak water yield property”. Based on the evolutionary theory of paleo-karst genesis, the karst filling structure of the “archaic crust” on the top of the Ordovician limestone in the North China coalfield is analyzed. The water-proof filling belt, the weak water-proof filling belt (weak water permeable belt) and the water-rich belt (water permeable belt) were divided. With three types of karst filling structures, key indicators and thresholds for type determination were obtained. The water inrush from the mining floor of deep coal seam is condensed into “complete floor water inrush mode”

收稿日期:2019-05-03 修回日期:2019-05-17 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41772302, 41302248, 41602309)

作者简介:李文平(1965—),男,湖南常德人,教授,博士生导师。Tel:0516-83590289, E-mail: wpli@cumt.edu.cn

and “concentration fracture zone floor water inrush mode”. The water inrush coefficient method (Ts method) under deep high water pressure is relatively limited. This paper proposed a “corrected water inrush coefficient method” (Ts-M-q method, suitable for complete floor water inrush mode) and a “infiltrating-seepage conversion” water inrush evaluation method (applicable to concentrated fractured zone floor water inrush mode). Based on the characteristics of groundwater in the deep mine and the water inrush mode, the key technology for the integrated exploration of deep mine water damage was described for the purpose of groundwater management.

Key words: deep mine; high water pressure and weak water yield property; top filling zone of Ordovician; T_s -M-q method; exploration of water controlling

煤炭是我国的主体和基础能源,多年来年产量保持世界第1,目前产量约为世界总产量的一半。随着浅部煤炭资源的长期开采、消耗殆尽;一批矿井、特别是东部及华北地区的矿井,已逐渐进入了深部开采。

水害是影响矿井安全生产的主要灾害之一,深部矿井开采实践表明,与浅部开采水害相比,深部开采呈现“高水压弱富水”和“滞后大型突水”两大特征;突水系数法用于深部矿井底板突水预测评价,存在局限性。研究深部矿井水赋存特征、深化水害预测评价技术方法,在此基础上明确深部矿井水害勘探的重点方向、实施水害精准查治一体化勘探技术,具有重要的理论和实际意义。

1 深部矿井水害特征

1.1 深部地下水赋存特征

研究分析典型矿井水文地质勘探资料,发现深部矿井水赋存有两个明显的特征:一是裂隙水介质呈“高承压弱富水”特征。图1为淮北闸河矿区、临涣矿区及兖州矿区薄灰岩(总体为岩溶裂隙水介质)富水性(钻孔单位涌水量)随深度的变化情况,当深度达到一定值后(不同地点有差异,3者的大致深度分别为500,750和850 m),富水性明显减弱,但深部水压高(三矿区的水压约为5.0,7.5和8.5 MPa),深部地下水赋存呈现“高承压弱富水”特征。二是奥陶纪灰岩顶部存在无水或弱富水带。深部开采矿井水害最大威胁是来自煤系地层基底的巨厚奥陶纪灰岩岩溶水,华北型煤田开采的灾害型突水事故,大都是基底的奥陶纪灰岩古岩溶水涌(突)造成的^[1]。目前关于奥灰突水危险性评价,是将奥灰顶界面以下整体作为强含水层,计算突水系数,看是否超过临界值来作出评价。但是,根据笔者在兖州矿区进行的奥灰水文地质勘探和收集的部分矿区勘探资料,发现进入奥灰顶界面的钻孔,部分存在一定深度内无水或极弱富水的情况(表1)。因此,详细研究奥陶纪灰岩顶部岩溶介质赋水状况,进行赋水性类型划分,对深部开采矿井奥灰水害防治意义重大。

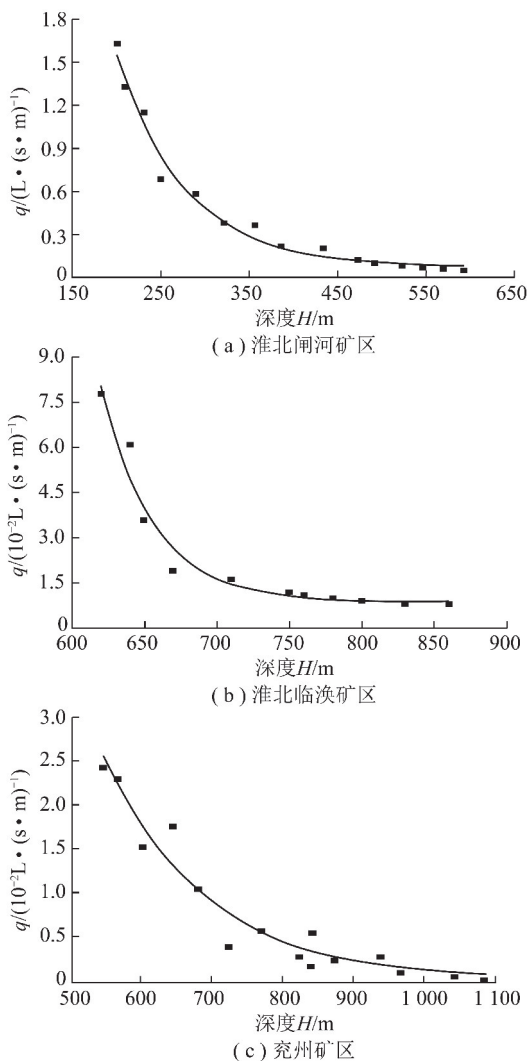


图1 东部典型矿区裂隙水介质富水性随深度变化

Fig. 1 Relation between drilling units-inflow and depth in fractured groundwater at typical mining area of East China

1.2 水害特征

分析矿井进入深部开采后实际涌(突)水实例,发现矿井进入深部后突水有两个明显的特征。一是裂隙介质涌(突)水量有明显减少的趋势,这主要是由于其深部呈现“高承压弱富水”赋存状态所致(图2);二是高水压下集中导水通道滞后大型突水(表2、图3),这类突水主要发生在有明显集中导水通道(如

陷落柱、断层及其他构造破碎带)、突水水源为高压奥陶纪灰岩水。

表 1 部分矿区(井)奥灰顶部井下水孔出水情况
Table 1 Situation of water outlet from underground drainage hole in Top Ordovician at mining areas

矿区	孔号	O ₂ 顶界面标高/m	进入奥灰深度/m	出水量/(m ³ ·h ⁻¹)
新汶协庄	奥灰孔-1	-644.10	62.60	无水
		-374.30	68.80	0.1~0.5
兖矿兴隆庄	FO ₂ -S2	-440.82	15.50	<0.1
	FO ₂ -7	-693.46	9.01	<0.1
	FO ₂ -14	-654.71	657.29	0.1~0.5
兖矿东滩	2O ₂ DX1	-916.46	101.43~	<0.1
	2O ₂ DX5	-788.86	28.31	0.1~0.5
	2O ₂ DX6	-740.69	13.30	0.1~0.5
			13.30~62.15	>0.5
兖矿鲍店	O ₂ X-1	-595.26	10.01	<0.1
	O ₂ X-6	-561.17	10.01~-91.85	0.1~0.5
			103.10	<0.1

表 2 部分集中导水通道滞后大型突水案例

Table 2 Large-scale lags water intrushes from natural channel with high water pressure

序号	矿井	突水通道	突水日期	水压/MPa	水源	最大突水量/(m ³ ·h ⁻¹)	滞后突水时间/h
1	开滦范各庄煤矿	陷落柱	1984-06-02	6.04	奥灰	123 180	960.0
2	焦作王封煤矿	断层	1973-04-15	3.30	奥灰	1 020	48.0
3	井陘临城煤矿	断层	1995-11-29	2.00	太灰、奥灰	2 520	36.0
4	济宁霄云煤矿	陷落柱	2018-09-10	6.57	奥灰	3 673	22.0
5	徐州张集煤矿	陷落柱	1997-02-18	4.50	奥灰	24 098	10.5
6	淮北桃园煤矿	陷落柱	2013-02-02	6.35	奥灰	29 000	10.5
7	皖北任楼煤矿	陷落柱	1996-03-04	5.00	奥灰	34 570	8.5
8	徐州三河尖煤矿	断层	2002-10-26	7.50	奥灰	2 170	6.5

注:滞后突水时间指从开始突水到最大突水量的持续时间。

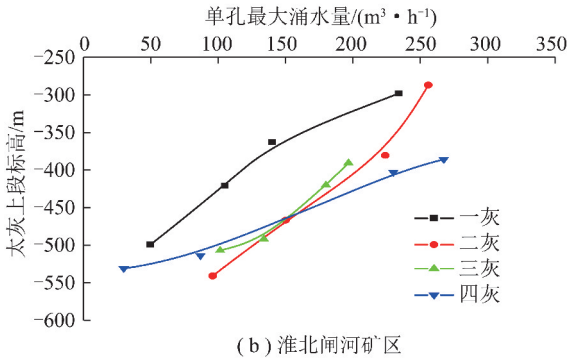
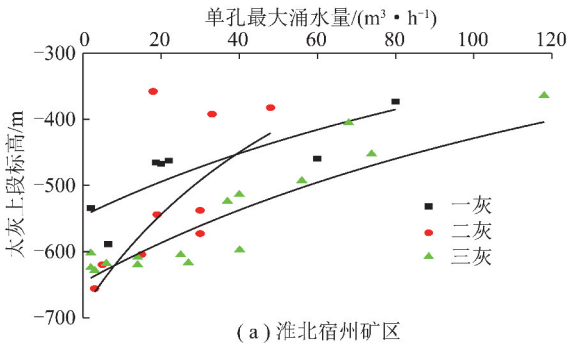


图 2 裂隙介质含水层涌(突)水随深度变化特征
Fig. 2 Water intrush characteristics vs. depth of fractured media aquifer

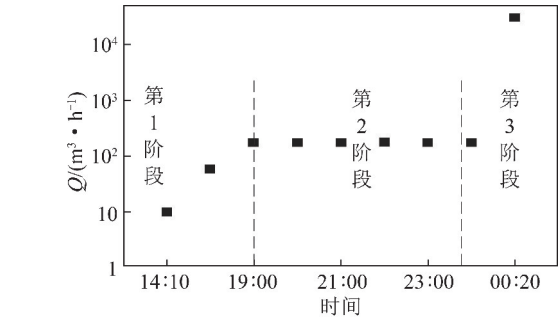


图 3 淮北桃园矿 2013-02-02 陷落柱突水水量随时间变化
Fig. 3 Large-scale lags water intrush from natural channel with high water pressure (Taoyuan Mine, 2013-02-02)

2 深部矿井水赋存特征理论分析

2.1 裂隙水介质高地应力作用分析

《中国固体矿床水文地质分类》(1959 年)提出裂隙含水层(带)充水为主矿床的概念,并被称为“在我国分布最为广泛的类型”^[2]。我国深部开采煤层主要为埋深较大的石炭系煤层和侏罗纪煤层,其充水含水层主要为石炭纪薄层石灰岩含水层、奥陶纪厚层石灰岩含水层、石炭纪砂岩孔隙裂隙含水层和侏罗纪砂岩孔隙裂隙含水层。大埋深导致深部裂隙水与其补给源的距离过长,更主要的是在高地应力作用下裂隙的开度较浅部明显减小,甚至高地应力突破裂隙面

的强度(图4),裂隙进入“潜塑状态”^[3],导致深部裂隙介质(含水层)透水性降低(非构造破碎地段)、渗透性减小(小于0.001 m/d)。

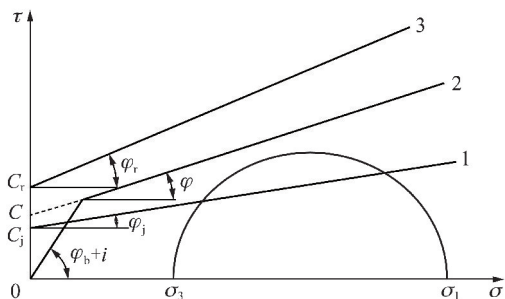


图4 岩体裂隙面“潜塑状态”莫尔强度示意

Fig. 4 Mohr strength criteria of rock and structural plane

1—平直无充填的结构面(j); 2—粗糙起伏无充填结构面(b); 3—完整岩石(r); σ 为正应力; τ 为剪应力; C 和 φ 分别为对应类型的黏聚力和内摩擦角; i 为爬坡角

随着深度增加,地应力值增大,其对裂隙介质赋水性影响讨论如下:位于一定深埋的层状岩层,天然弹性状态时岩层中的地应力分量^[3]可以简化为

$$\begin{aligned} \sigma_v &= \gamma h \\ \sigma_H &= \lambda \sigma_v + \sigma_T = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_v + \sigma_T \\ \sigma_h &= \lambda \sigma_v + \lambda \sigma_T = \lambda (\sigma_v + \sigma_T) \end{aligned} \quad (1)$$

式中, σ_v 为垂直方向应力; γ 为上覆岩体的容重; h 为岩体的埋藏深度; σ_H, σ_h 为分别为水平方向最大、最小主应力; λ 为侧压系数; σ_T 为水平构造应力; ν 为泊松比。

σ_T 值一般由对硬岩层进行地应力原位实测获取。同一场地其他相邻岩层(特别是软岩层),在没有地应力实测值时,可以按如下理论方法简化计算得到^[3]。

处于同一工程小区的岩层(位于同一区域运动地块内),其边界处岩层1的应变 ε_1 与岩层2的应变 ε_2 近似相等,于是有

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\sigma_{H1} - \nu_1(\sigma_{h1} + \sigma_{v1})}{\sigma_{H2} - \nu_2(\sigma_{h2} + \sigma_{v2})} \quad (2)$$

同时可有

$$\begin{aligned} \sigma_{v2} &= \gamma_2 h_2, \sigma_{H2} = \sigma_{T2} + \frac{\nu_2}{1-\nu_2} \sigma_{v2}, \\ \sigma_{h2} &= \frac{\nu_2}{1-\nu_2} (\sigma_{v2} + \sigma_{T2}) \end{aligned} \quad (3)$$

根据式(2), (3)可以求得相对软弱岩层的地应力值。根据岩层中原始地应力分量值,可以对其裂隙面所处受力状态进行分析。

根据式(1),岩层中的平均主应力 σ_{av} 为一随深度增加而增加的值。刘继山^[4-5]认为结构面渗透系

数与渗流量主要取决于裂隙开度,而裂隙开度对正应力非常敏感;根据已有的法向变形经验关系,建立了隙宽随应力的变化关系式,结合水力隙宽和力学隙宽的关系,获得了渗透性与应力的关系,有

$$K_f = \frac{\delta^2}{12\mu} e^{-\frac{2\sigma_{av}}{K_n}} \quad (4)$$

式中, K_f 为裂隙的渗透系数; μ 为水的黏滞系数; K_n 为裂隙法向刚度系数; δ 为一个表达裂隙面变形和水力特性的综合参数。

TSANG 和 WITHERSPOON 也认为裂隙的水力学特征受控于其应力环境^[6]。笔者统计裂隙含水层钻孔抽水试验得到的渗透系数与其埋深处地应力平均主应力值,得到渗透系数 K (m/d) 与平均主应力 σ_{av} (MPa) 之间呈负指数关系(式(5)、图5)^[7],而式(4)也是呈现负指数关系。

$$K = y_0 + A e^{-t\sigma_{av}} \quad (5)$$

式中, $y_0 = -0.0029$; $A = 12.3437$; $t = 0.3774$ 。

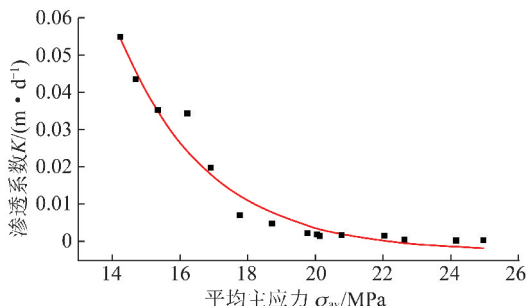


图5 渗透系数与平均主应力的关系曲线

Fig. 5 Curve of permeability coefficient and average level principal stress

高地应力作用下、裂隙介质渗透性明显减小,也进一步说明了深部裂隙水具有高承压、弱富水的属性特性。

2.2 深部岩溶水介质成因演化分析

华北煤矿区深部奥陶纪石灰岩岩溶有多期性和反复性。华北地区自古生代以来约有6亿a时间,大致上可以分为4个地质时期,包括2个主要沉积期和2个主要剥蚀期,每个时期大约经历1.5亿a时间^[8],在这4个时期,奥陶纪马家沟灰岩先后经历了沉积成岩、溶蚀破坏、充填胶结和再度溶蚀破坏的过程,现今的奥陶系岩溶结果是历史岩溶作用和岩溶叠加的结果^[9]。

碳酸盐岩沉积过程中,因局部短暂暴露地表,伴随淡水成岩过程发育的岩溶成为沉积岩溶^[10]。沉积期形成的古岩溶,大多为层间岩溶,这些层间岩溶发育时间短暂,由于很快被海侵所替代,所以溶蚀孔洞或裂隙被生物碎屑和方解石充填,被沉积、压实、固结和成岩的过程而消亡。

奥陶系顶部普遍发育的充填带(古风化壳)即指碳酸盐岩岩溶风化带,且岩溶裂隙被同期或后期的细颗粒或化学沉淀物所充填形成的层段,并具有一定的隔水或相对隔水性,在华北型煤田中广泛分布。形成于加里东运动的古岩溶风化壳,主要形成于淋滤作用水文期及埋藏封闭岩溶期,其发育过程受构造作用、古气候及古地貌的作用。根据黏土质对裂隙的充填程度,充填带可分为完全充填、部分充填、无充填 3 种

结构(图 6),完全充填结构可以当做隔水层直接利用,部分充填结构注浆改造后可做隔水层利用,无充填结构(常有导升带发育)涌水特征与奥灰强含水层无异,是影响下组煤开采的重点防治水部位。结合渗透试验、钻孔单位涌水量和现场井下钻孔涌水量较为容易获取的指标对充填带结构类型进行确定,并可划分充填带厚度(其中井下钻孔涌水量指标,是兖州矿区 3 煤开采巷道奥灰探放水钻孔涌水量,见表 3)。

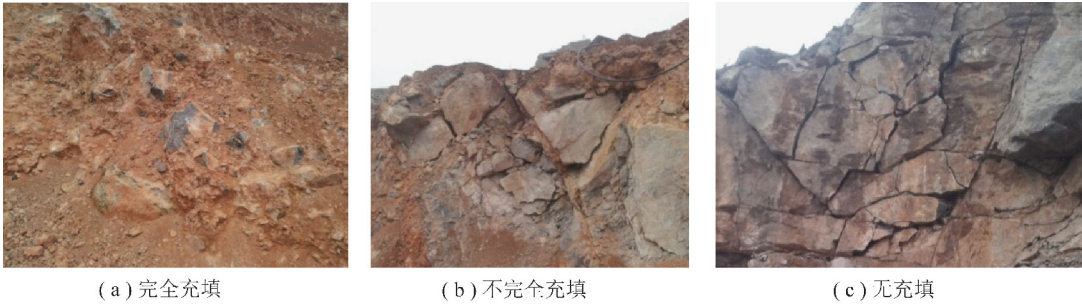


图 6 奥灰顶部充填带类型

Fig. 6 Top filling zone type of Ordovician

表 3 奥灰顶部充填带类型确定指标

Table 3 Determination index of the thickness of filling zone of Ordovician

充填带类型	判别指标			
	渗透系数 K / ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	钻孔单位涌水量 q / ($\text{L} \cdot (\text{s} \cdot \text{m})^{-1}$)	井下放水利涌水 量 Q /($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	
完全充填(隔水层)型	$K<10^{-5}$	$q<0.001$	兴隆庄	2.0
			鲍店	2.3
			东滩	3.0
			南屯	2.0
			杨村	1.1
部分充填(弱透水)型	$10^{-5}<K<10^{-4}$	$0.001<q<0.01$	兴隆庄	20
			鲍店	23
			东滩	30
			南屯	20
			杨村	11

3 深部矿井水害评价

3.1 修正突水系数法

针对底板水危险性评价,大多使用突水系数法,此方法是从长期的、大量的突水实际资料的统计分析中得出的一种经验规律性认识,并列入规程规范中。

突水系数法公式中 2 个重要指标为水压和隔水层厚度,公式简单实用,但是缺乏含水层赋水性信息以及隔水层厚度变化对突水和涌水量的控制作用。在深部开采中,一些矿区(井)的底板水突水系数已经远远超出现行《煤矿安全规程》中所规定的临界值

指标,在突水系数超过 0.1 MPa/m 甚至 0.15 MPa/m 的一些开采工作面,确实发生了突水,但因实际涌水量并未引发水害事故(表 4)。因此,部分深部开采地段突水系数超过 0.15 MPa/m 也并非带压开采的禁区,应结合深部具体水文地质条件进行分析。

同时,多年来煤矿开采实践表明,大量底板隔水层厚度较大的工作面(一般>50 m),突水系数超过突水临界值仍未突水;而底板隔水层厚度较小的工作面(一般<30 m),突水系数即使远低于突水临界值却产生了底板突水现象。尤其当工作面底板隔水层厚度较薄(10~30 m)时,突水系数低于临界值仍然会产生底板突水现象,见表 5。

表 4 国内部分底板高突水系数工作面开采情况

Table 4 Mining condition of some working faces with high water inrush coefficient in China

序号	矿名	地点	水压 P/MPa	突水系数 $T_s/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1})$	突水量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	水源层
1	肥城大封煤矿	10313 工作面	2.21	0.17	85	五灰、奥灰
2	肥城杨庄煤矿	10706 工作面	2.49	0.15	50	五灰、奥灰
3	肥城查庄煤矿	91002 工作面	3.25	0.16	65	五灰、奥灰、断层回采
4	肥城白庄煤矿	10404 工作面	3.10	0.17	128	五灰、奥灰、断层
5	肥城国庄煤矿	N7107 工作面	1.68	0.31	125	四灰、断层
6	肥城国庄煤矿	N7109 工作面	1.81	0.48	114	四灰、断层
7	淮北朱庄煤矿	III628 工作面	4.22	0.14	未出水	1,2,3 灰
8	淮北桃园煤矿	1023 工作面	5.16	0.12	81	1,2,3 灰、断层
9	淮北杨庄煤矿	III616 工作面	5.50	0.11	未出水	1,2,3 灰
10	淄博黑山煤矿	1088 工作面	6.23	0.13	未出水	奥灰

表 5 部分矿区薄隔水层突水工作面

Table 5 Water-inrush working faces with thin water-proof layers

序号	工作面名称	隔水层厚度 M/m	突水系数 $T_s/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1})$
1	淄博矿区夏庄矿 1005	29.03	0.051 0
2	焦作矿区中马村 21031	20.50	0.039 5
3	肥城矿区大封矿 9317	23.70	0.046 7
4	肥城矿区相庄矿 9507	24.10	0.038 0
5	焦作矿区焦西矿 42013	20.00	0.040 0
6	焦作矿区演马庄 1231	20.00	0.037 0
7	焦作矿区九里山 25011	21.00	0.031 0

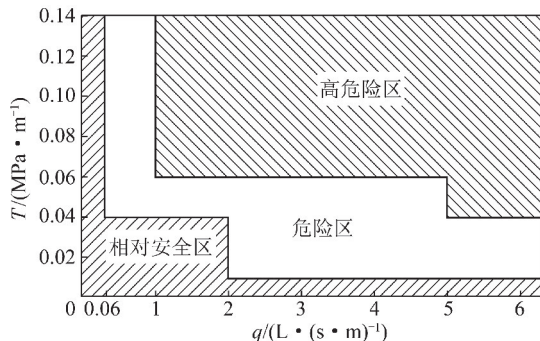
淮北矿区杨庄矿、朱庄矿、桃园矿、祁南矿部分工作面开采实践表明,当煤层底板隔水层厚度 $\geq 50 \text{ m}$ 时,即使在构造破坏块段,工作面突水系数超过临界值 0.06 MPa/m ,仍可以实现安全开采,见表 6。

表 6 淮北矿区未突水工作面隔水层厚度与突水系数

Table 6 Safe working faces in Huaibei coal mine area

序号	工作面名称	隔水层厚度/ m	突水系数 $T_s/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1})$	构造情况
1	桃园矿 1045-1	50.0	0.077	断层 6 条, $H=1.1 \sim 2.2 \text{ m}$
2	祁南矿 1021	55.0	0.085	断层 9 条, $H=0.6 \sim 5.2 \text{ m}$
3	祁南矿 1023	56.0	0.086	断层 12 条, $H=0.6 \sim 4.0 \text{ m}$
4	朱庄矿 3625	52.5	0.084	断层 7 条, $H=1.6 \sim 2.0 \text{ m}$
5	朱庄矿 3624	51.2	0.074	断层 3 条, 最大落差 8 m
6	杨庄矿 3633	55.5	0.077	断层 3 条, $H=0.6 \sim 1.7 \text{ m}$
7	杨庄矿 N3632	53.7	0.082	断层 3 条, $H=0.8 \sim 1.8 \text{ m}$

笔者收集了肥城矿区、焦作矿区和淄博矿区的 216 个突水点资料,包括突水点水压,相对隔水层厚度和 q 值,使用以上资料,建立底板突水危险性评价新方法 T_s-q 法(图 7)和 T_s-M 法。 T_s-q 法横坐标为钻孔单位涌水量,纵坐标为突水系数。

图 7 T_s-q 法示意^[11]Fig. 7 Schematic diagram of the method of T_s-q ^[11]

针对突水系数的改进,要考虑隔水层厚度变化对临界突水系数的影响。比如 1 MPa 水压作用在 10 m 厚的隔水层上,与 10 MPa 水压作用在 100 m 厚的隔水层上,突水系数同时为 0.1 MPa/m ,显然前者的突水危险性远大于后者,隔水层越薄突水危险性越大。实践与测试资料表明煤层开采造成的底板破坏,严重削弱了底板隔水层的隔水能力^[12]。笔者再结合突水实例,提出 T_s-M 法,焦作、淄博、峰峰和淮北矿区的 T_s-M 突水点散点图如图 8 所示。所以临界突水系数与隔水层厚度 M 的关系^[12]可以表示为

$$T_s = \frac{1}{6\,000}M + 0.02, 0 < M \leq 30 \text{ m} \quad (6)$$

$$T_s = 0.002\,5M - 0.05, 30 < M \leq 80 \text{ m}$$

综合 T_s-M 法和 T_s-q 法绘制图 9,提出 T_s-M-q 方法。如图 9 所示,由 T_s-M 法和 T_s-q 法联合确定的区域有 A ~ F 共 6 个区域,A 区、B 区、C 区和 D 区

为相对安全区,E 区为危险区,F 区为高危险区。图 9 所示的 T_s-M-q 法为 T_s-M 法和 T_s-q 法的合并图,进行底板突水危险性评价时,应在图 9 中确定两点,并分别用 T_s-M 法和 T_s-q 法综合确定其突水危险性。此方法适合深部完整底板(非构造破碎带)的突水危险性评价。

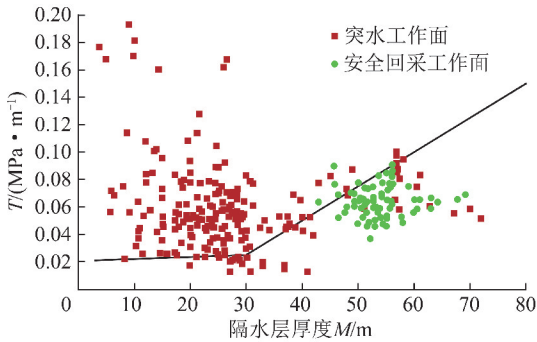


图 8 焦作、淄博、肥城、淮北矿区突水工作面 T_s-M ^[12]
Fig. 8 T_s-M characteristic scatter plot of inrush points in the Jiaozuo, Zibo, Feicheng and Huaibei mining areas^[12]

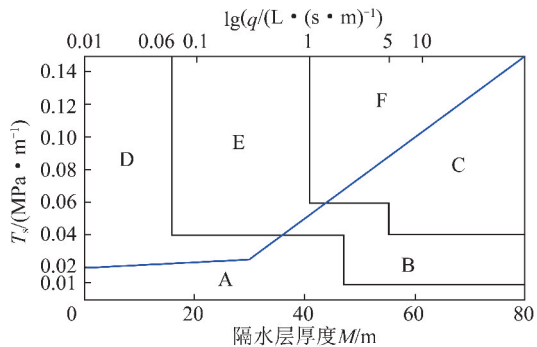


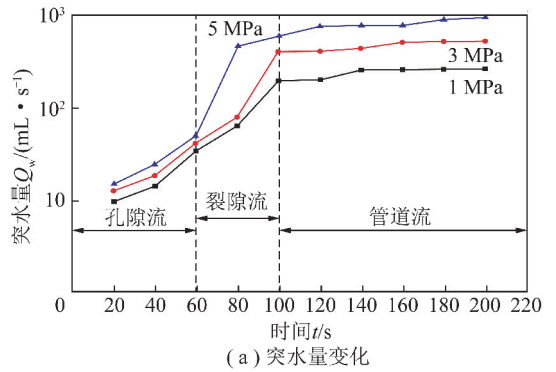
图 9 T_s-M-q 方法
Fig. 9 T_s-M-q method

3.2 “渗-流转换”突水评价法

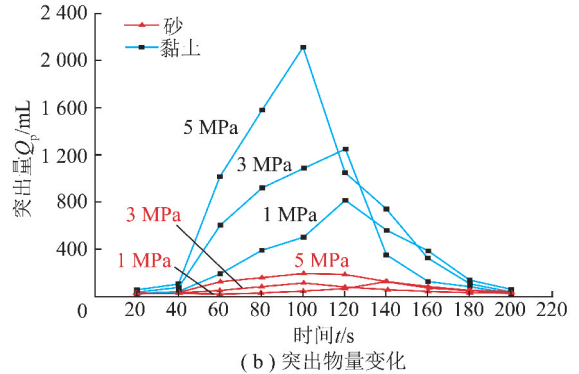
根据深部矿井煤层底板集中导水通道(构造破碎带,主要为陷落柱、断层等)典型突水实例存在明显滞后性突水特征,笔者设计了破碎带底板高水压奥灰水突水模拟试验装置,进行了不同充填结构破碎带、高水压下突水过程模拟试验(图 10),并由此提出了高水压下构造破碎带滞后突水“渗-流转换”理论解释(图 11)^[13]。

近几年来,用“渗-流转换”理论观点研究分析几例大型突水事故,特别是在 2013 年淮北桃园煤矿陷落柱突水预警识别及快速治理的成功应用,继续深化了“渗-流转换”的理论认识(图 11)。

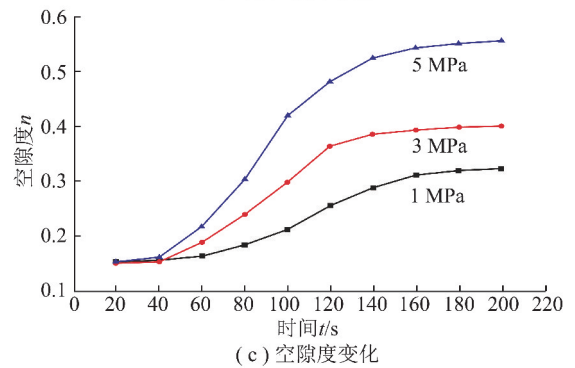
(1) 给出了“渗-流转换”突水的科学定义:具有一定充填结构的导水构造破碎带(陷落柱、断层等),在足够的突水水压作用下,伴随突水过程中水-土-



(a) 突水量变化



(b) 突出物量变化



(c) 空隙度变化

图 10 不同水压下破碎带突水过程模拟试验^[13]

Fig. 10 Simulation test of water inrush process in crushed zone under different water pressures^[13]

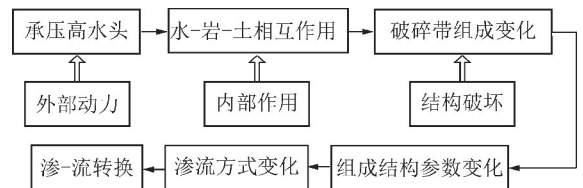


图 11 构造破碎带突水“渗-流转换”理论示意

Fig. 11 Schematic diagram of Infiltrating-Seepage conversion of water inrush in structural fractured zones

岩相互作用,充填物由小到大的冲出,导水构造内部组成空隙发生由孔隙-裂隙-管道的变化,渗流类型发生由孔隙流-裂隙流-管道流的转换,致使突水量发生由小到大的阶段变化;其本质是渗流类型的转变,简称“渗-流转换”。

(2) 基于“渗-流转换”理论的基本观点,将煤层底板集中突水通道突水类型可分为“孔隙流”型

突水、“孔隙流-裂隙流”型突水、“孔隙流-裂隙流-管道流”型突水;突水过程中能否发生渗流类型转换,主要取决于破碎带组成结构(破碎程度、充填物类型等)和突水水压大小两个方面;只有结构较松散、水压较高的破碎带导水通道,突水才会

经历“孔隙流-裂隙流-管道流”全部 3 个阶段,经过一定滞后时间后发生大型突水(进入管道流阶段)。表 7 初步总结的构造破碎带突水类型分类指标,可以用于构造破碎带底板突水类型评价及预警识别。

表 7 构造破碎带突水类型分类
Table 7 Classification of water inrush types in structural fractured zones

指标	突水类型		
	孔隙流型	孔隙流-裂隙流型	孔隙流-裂隙流-管道流型
破碎带结构组成	破碎带一般压实紧密,呈半胶结状态的非均质体,且岩块间有方解石和泥质充填	破碎带岩石碎屑压实较紧密,带内水力联系不好,而带边次生裂隙较为发育且充水	破碎带胶结弱或基本未胶结、细粒充填不实、粗粒碎块岩石棱角显著、杂乱无章
完整性指数 ^[14] K_v	$0.35 < K_v \leq 0.55$	$0.15 < K_v \leq 0.35$	$K_v \leq 0.15$
突水情况	不突水或小型突水	前期突水量 $<10\text{ m}^3/\text{h}$ 最大突水量介于 $10\sim600\text{ m}^3/\text{h}$	前期突水量 $>10\sim60\text{ m}^3/\text{h}$ 最大突水量 $>600\text{ m}^3/\text{h}$
临界突水水压/MPa	2~3	2~5	$>2\sim5$

注:完整性指数 $K_v = (V_{\text{pt}}/V_{\text{pk}})^2$, V_{pt} 为破碎带岩体压缩波,可在井下或钻孔内测试, V_{pk} 为代表性完整岩块(破碎带外围)压缩波,可取样在室内测试得到。

(3)给出了“渗-流转换”突水水量预计方法。可以根据“渗-流转换”的不同类型阶段,分别选用孔隙流、裂隙流、管道流的相应基本理论公式,预计构造破碎带突水的初始、中间、最大涌水量(表 8)。应用表

明,基于“渗-流转换”理论观点的水量预计,特别是最大涌水量的预计基本符合实际(表 9),突破了长期以来陷落柱等集中导水通道最大涌水量预计缺乏理论依据、与实际相差甚远的瓶颈。

表 8 构造破碎带涌水量预计公式
Table 8 Prediction formula of water inflow in structural fractured zone

涌水状态	孔隙流	裂隙流	管道流
公式	$Q = \frac{a^2 b^2 \gamma n^2 P_w}{8 \pi \mu L}$	Louies 公式: $Q = 4 a n \sqrt{\frac{g a n P_w}{L}} \lg \left(1.9 \frac{a n}{2} \right)$	Hazen-Williams 公式: $Q = 102 a b n \left(\sqrt{\frac{a b n}{4 \pi}} \right)^{0.63} \left(\frac{P_w}{L} \right)^{0.54}$

注: Q 为涌水量; P_w 为构造破碎带底部突水水压; a, b 为构造破碎带(突水)截面长、宽; L 为突水点距底部突水水源的长度; γ_w 为突水水源的容重; μ 为突水水源的黏滞系数; n 为破碎带的空隙度; P_w, a, b 和 L 参数取值可综合水文地质钻孔、地球物理和地球化学综合探查结果确定;破碎带空隙度可根据突水案例进行反算作为矿区参考值或根据水文地质钻孔冲洗液漏失量进行反算;其他参数可以使用常规指标或室内测试结果。

表 9 构造破碎带突水水量预计值与实际值比较
Table 9 Actual values and predicted values of the amount of water inrush in the tectonic fractured zones

突水矿井	实际突水量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$		初始(孔隙流)		中间(裂隙流)	最大(管道流)	
	初始	最大	预计值/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	误差/%	预计值/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	预计值/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	误差/%
开滦范各庄煤矿	365	123 180	359.4	-1.5	106 350.1	123 516.6	0.3
皖北任楼煤矿	60	34 570	48.1	-19.8	16 301.0	35 180.6	1.8
淮北桃园煤矿	120	29 000	70.0	-41.7	162.0	30 400.0	4.8
徐州三河尖煤矿	20	2 170	5.3	-70.3	1 233.7	2 030.1	-6.4

4 深部矿井水害治理勘探方向

在以往矿井水文地质工作中主要是“井田勘

探”,以查清井田范围内水文地质条件、划分井田水文地质条件类型、预计矿井涌水量为目的,服务于矿井设计和建设;针对深部矿井水赋存特征及其突水模

式,笔者提出生产阶段应以水害治理为目的,实施“治水勘探”,形成深部矿井水害精准查治一体化勘探关键技术。

4.1 探查古岩溶及其充填情况

根据前文提出确定 3 种岩溶充填带类型的关键指标和阈值,查明矿井(煤田)古岩溶发育,划分岩溶充填带结构,识别隔水充填带,统计隔水充填带厚度。图 12 为兖州煤田奥陶纪灰岩顶部隔水充填带厚度等值线图,隔水充填带在东滩矿井厚度达到最大,最厚可达 60 m 以上;在兴隆庄、杨村矿井厚度渐小,均< 10 m。分别计算下组煤开采考虑充填带与不考虑充填带时的底板突水系数,划分矿区安全性面积(表 10)。考虑隔水充填带时,兖州煤田(鲍店、兴隆庄、东滩、南屯、杨村矿)16 煤开采绝大部分(约 93%)处于安全或相对安全区;17 煤安全区增加 3.70 km²,相对安全区大约增加 70.33 km²,约占矿区 35.09%,危险区减少。

4.2 探查强导水通道

华北型煤田深部矿井煤层底板集中导水通道(构造破碎带,主要为陷落柱、断层、褶曲轴部等)潜伏性强,横断面大小有限,分布具有随机性,用常规水文地质勘探方法难以查明其位置和富水规律。井下补充勘探是查导水通道的最直接方法,但井下钻孔施工困难,且导水通道横断面大小有限,易被井下钻

孔遗漏;地面三维地震勘探可较好用于查找强导水通道,但煤(岩)层埋深大,物探精度受到一定影响。

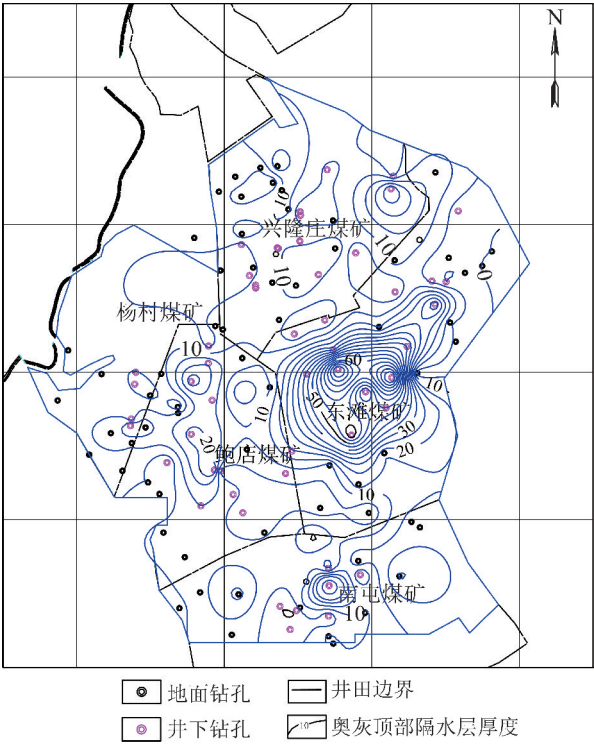


图 12 兖州矿区奥陶纪灰岩顶部隔水充填带厚度等值线
Fig. 12 Thickness contour map of the top water proof filling zone of Ordovician limestone in Yanzhou mining area

表 10 评价结果
Table 10 Evaluate results

煤层	条件	突水系数/(MPa·m ⁻¹)				矿区面积/km ²
		<0.06	0.06~0.10	0.10~0.15	>0.15	
16 _上 煤	不考虑充填带	18.70	130.40	51.3	0	200.4
	考虑充填带	30.00	157.70	12.7	0	
17 煤	不考虑充填带	8.30	71.77	116.8	3.6	
	考虑充填带	12.00	142.10	46.30	0	

地面定向顺层钻进注浆既能根治直接充水水源,同时能查明并截断(阻塞)竖向突水通道、阻止间接突水水源。具体而言,在地面定向顺层钻进注浆工程中,每个注浆主孔有多个顺层分支孔,钻孔在进入目标层后以“带、羽、网状”钻孔轨迹探查所钻范围内目标层中隐伏陷落柱、断层和裂隙带等。根据钻孔浆液漏失量与注浆量推测判断钻孔附近是否存在如陷落柱、断层等隐伏构造,分析出可能存在的裂隙通道,冲洗液的消耗量越大,注浆量越大,说明该位置可能存在的裂隙通道越大,达到“探查强导水通道”目的;图 13 为通过冲洗液消耗量与注浆量查明的淮北朱庄矿Ⅲ63 采区导水通道情况。

4.3 查治一体化技术

中煤科工集团西安研究院、淮北矿业集团、淮南矿业集团、冀中能源集团等单位先后通过工程实践研究了地面定向钻进注浆的深部矿井水害查治一体化技术,取得了较为明显的效果;但是关于定向钻进注浆钻孔的方向布设与钻孔间距确定等方面还缺乏较为系统的研究成果。

(1) 钻孔方向设计原则。

钻孔方向设计时应考虑区域最大渗透性方向,采区、井田甚至一定区域范围内岩体的渗透性(可注浆性)呈现明显各向异性,平面上注浆钻孔迹线优势方位应尽可能与区域最大渗透性方

向垂直。

具体而言,一是考虑地质构造的影响,导水断层和褶皱轴部裂隙是深部水害防治的重点,是注浆钻孔布置的主控制因素;钻孔水平段轨迹的主优势方位应该大角度与断层和褶皱轴线相交,单个钻孔沟通较多的断层和褶皱轴线,从而获得更大的注浆范围,达到阻断导水通道、改造煤层底板的注浆目的(图 14(a))。二是考虑层理结构面的影响,褶皱两

翼层理面往往受层间剪切作用发生层间错动,在应力集中的区域会形成破碎夹层;注浆钻孔在封堵垂向导水断裂的前提下,次优势方位应该尽可能的沿注浆目的层倾向近水平钻进,单个钻孔能够穿插多个层理结构面,对层间裂隙达到较好的注浆加固效果(图 14(b))。三是考虑地应力场的影响,对近水平的注浆改造层,水平注浆钻孔沿垂直水平最大主应力方向布置,区域注浆效果会更好(图 14(c))。

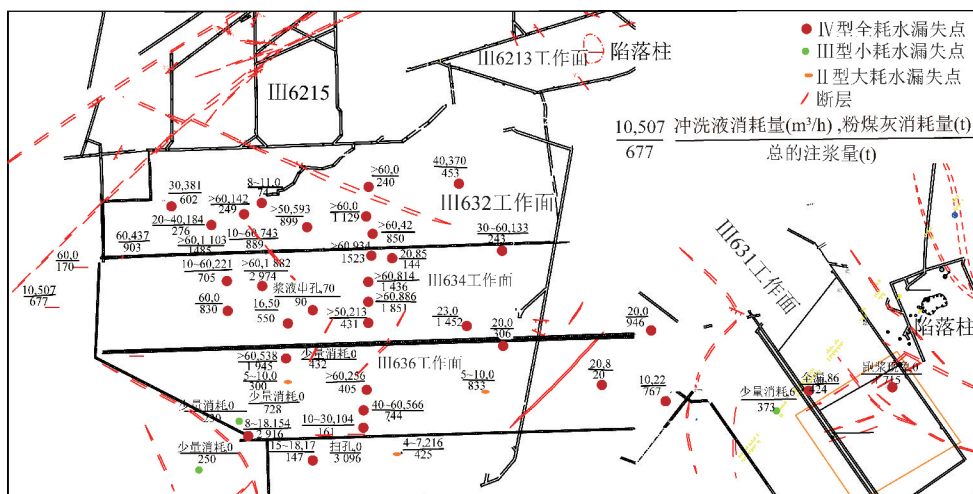


图 13 朱庄矿 III63 采区地面定向水平孔漏失点分布

Fig. 13 Leakage points in directional drilling in III63 mining area of Zhuzhuang Mine

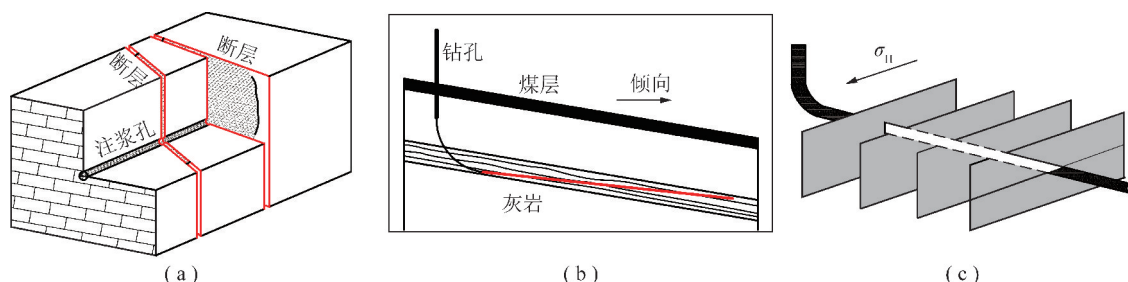


图 14 查治一体化定向钻进注浆孔方向设计原则示意

Fig. 14 Schematic diagram of the design principle of grouting hole direction in directional drilling

(2) 钻孔间距设计原则。

利用 RFPA2D-FLOW 软件建立巷道底板注浆模型,模拟巷道开挖卸荷作用下底板注浆加固浆液扩散情况,结果表明由于巷道开挖底板岩体卸荷产生裂隙,浆液主要向着底板破碎带(应力释放区)扩散,扩散形态大致呈扇形,且压力越大,扩散距离越大,压力过大可能引发巷道底臃、跑浆等事故。数值模拟结果见表 11。

对于弱透水岩体、较小的注浆终压下扩散距离相近,当注浆终压为 10 ~ 12 MPa 时,浆液的扩散距离变化较小为 50 ~ 55 m。浆液的扩散范围一方面与注浆压力有关,另一方面与裂隙的优势方向有关。浆液往往沿渗透性好的优势通道以及易劈裂的软弱结构面作为优势方向远距离扩散。浆液在强透水断层中的扩散半

径与注浆压力关系不大,主要取决于渗透系数。

表 11 浆液扩散范围数值模拟结果

Table 11 Numerical simulation results of slurry

项目	diffusion range					
	注浆压力/MPa					
	1	4	6	8	10	12
岩体	—	13	—	30	50	55
强透水	300	300	—	350	350	—
破碎带 中等透水	40	60	—	90	150	—
弱透水	—	—	—	30	50	—

以朱庄煤矿 III63 采区 D2 孔为例,主孔 D2 钻孔注浆结束后,紧接着施工 D2-1 钻孔,随着钻进,自 780 m 开始在岩屑中发现存在着水泥块,此时距主孔

的水平距离约 67.01 m,钻进至 1 000 m 左右仍有水泥块的存在,而此时距主孔的水平距离超过 120 m;另外,D2-6 孔在钻进至 607 ~ 880 m 段,也存在水泥

块,此时距离主孔 D2 的水平距离约 50.16 m;由此可见,D2 钻孔注浆的影响范围可达 60 ~ 120 m,如图 15 所示。

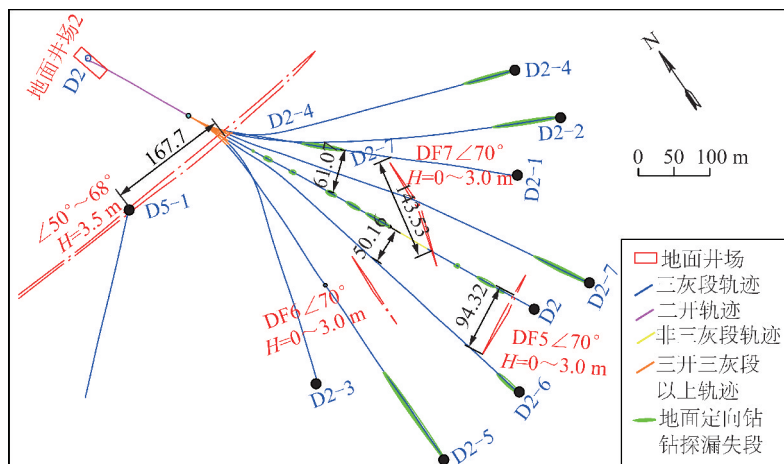


图 15 朱庄煤矿Ⅲ63 采区 D2 单元钻孔验证浆液扩散范围^[15]

Fig. 15 Drilling hole D2 verifies slurry diffusion range in Ⅲ63 mining area of Zhuzhuang mine^[15]

综上所述,为保证注浆能够全面的充填封堵含水层及断层破碎带,分支孔间距应小于 2 倍扩散半径、大于单孔注浆扩散范围,因此孔间距应在 30 ~ 60 m 为宜。地面定向钻进注浆的深部矿井水害查治一体化技术是深部煤层开采水害防治的有效关键技术,为保护深部地下水资源、避免人为过多扰动含水层补径排系统做出了积极的探索,同时也是我国东部深部矿井“保水采煤”^[16-17]的关键技术手段之一。

5 结 论

(1)随着深度增加,地应力值增大,最大剪应力值增大,岩体裂隙面进入“潜塑状态”,裂隙闭合,导致深部裂隙介质赋水性减弱,呈“高承压弱富水”赋存特征。

(2)华北型煤田奥陶纪灰岩顶部古风化壳可划分为完全充填(隔水层)型、部分充填(弱透水层)型、无充填型 3 种结构类型,并给出了类型划分的关键指标和阈值;完全充填带可以当做隔水层直接利用,部分充填带适宜注浆改造成隔水层利用,无充填带存在不同高度导升带,是影响下组煤开采的重点防治水部位。

(3)矿井进入深部后突水有两个明显的特征,一是裂隙介质涌(突)水量有明显减少的趋势,二是特大型(灾害型)突水有明显的滞后效应;深部矿井煤层开采底板突水有“完整底板突水模式”和“集中破碎带底板突水模式”。

(4)深部高压水作用下突水系数法(T_s 法)评价底板突水危险性有局限性,提出了“修正的突水系数

法” T_s-M-q 法,适用于深部完整底板突水模式水害预测评价。

(5)深部矿井灾害型突水主要为“集中破碎带底板突水模式”,给出了基于“渗-流转换”理论的突水评价方法和最大水量预计方法。

(6)针对深部矿井水赋存特征及其突水模式,提出深部矿井实施“治水勘探”的精准查治一体化勘探关键技术。

致谢 感谢刘启蒙博士、赵成喜博士、柴辉婵博士等相关试验工作的贡献,感谢兖矿集团有限公司、淮北矿业(集团)有限责任公司和中煤科工集团西安研究院对现场工作的支持。

参考文献(References):

- [1] 武强,金玉洁. 华北型煤田矿井防治水决策系统[M]. 北京:煤炭工业出版社,1995:144~160.
- [2] 地质部水文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.
- [3] 李文平. 煤及软岩层中地应力值的初步估算方法[J]. 岩石力学与工程学报,2000,19(2):234~237.
LI Wenping. A preliminary estimation method of geo-stresses in coal and soft rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2000,19(2):234~237.
- [4] 刘继山. 单裂隙受正应力作用时的渗流公式[J]. 水文地质工程地质,1987,14(2):28~32.
LIU Jishan. The seepage formula of single joint when acted with normal stress [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1987, 14(2):28~32.
- [5] 刘继山. 结构面力学参数与水力参数耦合关系及其应用[J]. 水

- 文地质工程地质,1988,15(2):7-12.
- LIU Jishan. The coupled relationships between mechanical and hydraulic parameters of a structural surface and their applications[J]. Hydrogeology and Engineering Geology,1988,15(2):7-12.
- [6] TSANG Y W, WITH Erspoon P A. Hydromechanical behavior of a deformable rock fracture subject to normal stress[J]. Journal of Geophysical Research,1981,86(B10):9287.
- [7] 乔伟,李文平. 地应力对岩溶裂隙含水介质渗透特性的影响[J]. 中国矿业大学学报,2011,40(1):73-79.
- QIAO Wei, LI Wenping. Effect of geo-stress on permeability of groundwater in karst-fractured rock mass[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2011,40(1):73-79.
- [8] 王梦玉. 中国北方岩溶分布及发育规律研究报告[R]. 西安:煤炭科学研究总院西安分院,1989.
- [9] 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.
- [10] 李定龙,贾疏源. 四川威远构造阳新灰岩岩溶隙洞系统发育演化特征[J]. 石油与天然气地质,1994,15(2):151-157.
- LI Dinglong, JIA Shuyuan. Development and evolution of karst fissure-cave in yangxin Series[J]. Oil & Gas Geology,1994,15(2):151-157.
- [11] 乔伟,李文平,赵成喜. 煤矿底板突水评价突水系数—单位涌水量法[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(12):2466-2474.
- QIAO Wei, LI Wenping, ZHAO Chengxi. Water inrush coefficient unit inflow method for water-inrush evaluation of coal mine floor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(12):2465-2473.
- [12] LI W P, LIU Y, QIAO W, et al. An improved vulnerability assessment model for floor water bursting from a confined aquifer based on the water inrush coefficient method[J]. Mine Water and the Environment,2018,37:196-204.
- [13] 李文平,刘启蒙,孙如华. 构造破碎带滞后突水渗-流转换理论与试验研究[J]. 煤炭科学技术,2011,39(11):10-13.
- LI Wenping, LIU Qimeng, SUN Ruhua. Theoretical and Experiment study on vadose conversion of water inrush later occurred from structure broken zone[J]. Coal Science and Technology,2011,39(11):10-13.
- [14] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册(第五版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2018:20.
- [15] 淮北矿业(集团)有限公司,中煤科工集团西安研究院有限公司,中国矿业大学. 煤矿深部保水采煤关键技术研究工程实践[R]. 淮北:淮北矿业(集团)有限公司,2015.
- [16] LI Wenping, WANG Qiqing, LIU Shiliang, et al. Study on the creep permeability of mining-cracked N_2 laterite as the key aquifuge for preserving water resources in Northwestern China[J]. International Journal of Coal Science & Technology,2018,5(3):315-327.
- [17] FAN Limin, MA Xiongde. A review on investigation of water-preserved coal mining in western China[J]. International Journal of Coal Science & Technology,2018,5(4):411-416.