

# 北方岩溶陷落柱的充水特征及水文地质模型

尹尚先<sup>1</sup>, 武 强<sup>2</sup>, 王尚旭<sup>3</sup>

(1. 华北科技学院 安全科学技术研究所, 北京 101601; 2. 中国矿业大学(北京校区) 资源系, 北京 100083;

3. 石油大学 中国石油天然气集团公司(CNPC)物探重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 岩溶陷落柱是中国北方型石炭二迭纪煤田的一种特殊隐伏垂向构造, 广泛分布于 20 个煤田 45 个煤矿区, 对煤矿安全生产危害极大。为实现岩溶陷落柱的数学模拟并准确预测其涌(突)水量, 进行了其充水特征及受控机制的研究, 并建立了水文地质模型。研究表明, 陷落柱的充水受地质构造运动、地下水径流条件、柱体内物质组成、压实和胶结情况以及承受水压大小等多种条件与因素的控制和影响, 而各种因素又彼此促进和相互制约, 只有处在现代岩溶水强径流带和集中排泄带并隐伏埋藏在地下水水位以下者, 才能构成突水的潜在威胁。真正造成突水危害的还需要其他条件的配合, 这就决定了绝大部分北方岩溶陷落柱并不充水也不导水。若岩溶陷落柱一旦突水, 水量大且迅猛, 预测及防治难度极大。按照系统论的观点, 灰岩地下水是其补给源, 柱体本身是充水通道, 井巷或采煤工作面是其排泄点, 岩溶陷落柱作为矿井地下水广义三重介质渗流系统的一类介质, 自身又构成了独特的岩溶陷落柱水文地质子系统。对于子系统内部特征的详细深入研究, 可将陷落柱划分为全充水强导水型、边缘充水导水型和不导水或微弱导水疏干型等 3 种类型, 在地下水系统中相应地概化为垂向管道、主干裂隙或垂向越流介质、隔水体或无影响介质, 通过数学模型的解算实现矿井涌(突)水量的准确预测预报。

**关键词:** 采矿工程; 岩溶陷落柱; 充水特征; 水文地质模型; 矿井地下水系统; 突水

**中图分类号:** P 624.8; TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2005)01-0077-06

## WATER-BEARING CHARACTERISTICS AND HYDRO-GEOLOGICAL MODELS OF KARSTIC COLLAPSE COLUMNS IN NORTH CHINA

YIN Shang-xian<sup>1</sup>, WU Qiang<sup>2</sup>, WANG Shang-xu<sup>3</sup>

(1. Facility of Safety Science and Technology, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China;

2. Department of Resources Exploration Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

3. Key Lab of Geophysical Exploration, CNPC, Petroleum University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Karstic collapse column is a kind of vertical structure typically formed at Carboniferous-Permian coalfields of north China, and widely distributed in 45 coal mine areas of 20 coalfields. Water inrush from the karstic collapse columns is harmful to mining safety. For simulating them and forecasting water volume with mathematic models, their properties and controlling mechanisms of water-bearing are studied, and hydro-geological models are set up. The study shows that the water-bearing properties of karstic collapse columns are controlled and influenced by several conditions and factors, such as tectonic movements, groundwater flow conditions, substance, solid and cementation in the columns, as well as confining pressure. All factors promote and

**收稿日期:** 2003-03-08; **修回日期:** 2003-05-16

**基金项目:** 中国博士后科学基金资助项目(2003033204); 教育部新世纪优秀人才支持计划和华北科技学院科学基金

**作者简介:** 尹尚先(1965-), 男, 博士, 1984年毕业于太原工业大学水利系水资源专业, 现为博士后, 主要从事岩土工程与地质工程方面的教学与研究工作。E-mail: Yinshx@21cn.com。

restrict each other, so that only in karstic runoff or discharged zones or under water table, there could be danger of water inrush. But if water inrush from them happens unexpectedly, water volume will be destructive, and it is difficult to forecast and prevent. According to viewpoint of systems, karstic collapse column is one kind of media in a mine groundwater system with generalized multiple porous media seepage, and are also special hydro-geological subsystems where karstic groundwater is recharge source, columns are flow pathways, and roadways or working faces are their discharge points. Three kinds of patterns can be classified by interior properties, complete strong water bearing pattern, brim water bearing pattern, and weakly penetrated and runoff pattern. Accordingly, karstic collapse columns are generalized as vertical pipelines, main fractures or vertical cross-stream media, and water barrier or media of aquifer uninfluenced. The mining water volume can be accurately forecast with mathematic models of mine groundwater systems.

**Key words:** mining engineering; karstic collapse columns; water-bearing characteristics; hydro-geological models; mine groundwater systems; water inrush

## 1 引言

煤矿突水被认为是安全生产的重大灾害之一,也是世界产煤国家面对的一大安全开采难题。我国煤田地质条件十分复杂,受水威胁的煤炭储量占探明储量的 27%,采矿中频繁发生的突水事故严重威胁着煤矿的安全生产。中奥陶统灰岩层是北方煤田主要的充水含水层,具有很高的承压水头,岩溶陷落柱的基底一般又均发育其中,若柱体充填物的压密、胶结程度较差,在采动等外部因素的影响下,陷落柱很可能成为奥灰含水岩层的导水通道,危及矿井安全。开滦范各庄矿 2171 综采面因揭露陷落柱,发生了世界采矿史上罕见的特大型突水,最大涌水量达  $2\,053\text{ m}^3/\text{min}$ ,历时 20 小时 55 分便淹没了一个开采近 20 a、年产  $3.1 \times 10^6\text{ t}$  的大型机械化矿井,3 个临近矿井被淹<sup>[1]</sup>。随着开采深度和强度的增加,开采环境日趋复杂,水压、地应力和瓦斯不断增大,水害问题更加突出。

我国从“六五”计划将煤矿防治水列入国家重点攻关项目,到“七五”、“八五”煤矿防治水一期和二期工业性试验的完成,许多专家学者在煤矿涌(突)水量预测研究方面进行了不懈的探索,取得了丰硕成果,为防治水工程的设计提供了科学依据。早期矿井突水量预测以解析和统计预测方法为主,此后数值模型、地下水系统及管理在矿井涌水量预测中被广泛应用,文[2]提出了华北型煤田矿井防治水决策系统。近年来,广义双重或三重介质渗流模型<sup>[3,4]</sup>、广义双重介质渗流场与应力场耦合模型<sup>[5]</sup>

已经被应用于矿井涌水量预测中。尽管理论方法及数学模型取得了较大进展,但矿井涌(突)水量预测的准确性仍然不尽人意,其中原因不是方法和模型不足以满足预测的需要,而是基础地质背景信息不能满足模型的要求,地质条件的复杂性以及由于认识不清而导致人为模拟简化的不合理性,是其主要原因。因此,对地质条件的深刻认识以及含水介质特征的掌握,是矿井涌(突)水量准确预测的关键。本文仅以岩溶陷落柱为例,用系统论的方法,将其作为独特的水文地质子系统,同时又是矿井地下水系统中的一种特殊介质,以矿井充水特征及规律的研究和建立模型为目标,深入探讨其水文地质背景、类型及控制因素等,以期探索水文地质模型刻画、逼近地质原型的思路和方法。

## 2 岩溶陷落柱的水文地质特征

### 2.1 北方煤田陷落柱的水文地质背景

在北方煤田中,陷落柱基底发育于奥陶系灰岩中,向上塌陷穿过煤层或接近煤层底板,常成为奥陶系灰岩强含水层地下水和煤系地层之间的联系通道。这样,灰岩地下水是其补给源,柱体本身是径流通道,井巷或采煤工作面是其排泄点,构成独特的岩溶陷落柱水文地质子系统。陷落柱导水性主要取决于柱体内物质组成、压实和胶结情况以及承受水压大小。一般形成比较早的陷落柱,压实胶结比较好,导水性弱;而形成较新或正在形成中的陷落柱,胶结不好,导水性强。

从北方矿区目前揭露的众多陷落柱资料分析,

多数矿区或井田的陷落柱都不导水,只有少数导水。例如:山西阳泉矿区发现的450个陷落柱一般都干燥无水;太原西山矿区的杜儿坪矿近年强行通过的400余个陷落柱无一例出水事故发生;河北峰峰矿区鼓山两侧十几个矿井所揭露的陷落柱均不导水;河北井陘矿区的120余个陷落柱中有2/3不导水,其余皆为弱导水或中等导水;鲁西煤田目前揭露的陷落柱基本为干燥或少量淋水、滴水<sup>[6]</sup>。但是,开滦范各庄矿2171综采工作面发生的世界采矿史上罕见的岩溶陷落柱透水灾害,皖北任楼矿、安阳铜冶一矿、徐州张集煤矿和青山泉1<sup>#</sup>井等发生的陷落柱重大突水事故,不仅造成了巨大的经济财产损失和不良的社会影响,而且改变了过去陷落柱不突水的观念。

## 2.2 北方煤田陷落柱的水文地质类型

综合分析北方矿区揭露或陷落柱探测资料,按照柱体充填物质特征、压实胶结程度以及其充水和导水特征,可将陷落柱划分为:全充水强导水型、边缘充水导水型和不导水或微弱导水疏干型3种类型<sup>[1]</sup>。

(1) 全充水强导水型。陷落柱内充填物尚未胶结,岩块棱角显著、杂乱无章,存在大量空洞,或者是正在发育的陷落柱,其导水性极强,一旦与强含水层或含水带有水力联系,在高压水头作用下,地下水极易突入井巷工程或采掘工作面,发生突水,且水量大而稳定,危害较大。如:开滦范各庄矿2<sup>#</sup>陷落柱被揭露时涌水量曾达7.8 m<sup>3</sup>/min,水压达1.756 MPa,连续5 a水量保持在3 m<sup>3</sup>/min以上,现已基本疏干。2171综采面9<sup>#</sup>陷落柱1984年6月2日发生突水,高峰期突水量达2 053 m<sup>3</sup>/min,4个大型矿井被淹,并使东矿区大部分抽取奥陶系灰岩溶洞裂隙水的供水井失去供水能力,相继在距突水点3.5 km处发生地面塌陷。经大量勘探钻孔控制,陷落柱规模和形态已查明为一高约280 m(从奥陶系顶面算起)的弯曲柱体。陷落柱总体积为8.16×10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>,其中在其顶部有8.7~32.1 m的空洞,空洞体积为3.97×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,占总体积的4.5%,其上为二煤顶板砂岩,表明它是一个正在发育着的陷落柱。柱体内为煤系地层的破碎岩块,十分松散且有大量的空洞,导水性良好。奥陶系马家沟组灰岩中的岩溶水,通过陷落柱上升至工作面附近,突破煤壁而造成特大突水,现已被注浆堵截。钻孔揭露10<sup>#</sup>

陷落柱最大涌水量达26.68 m<sup>3</sup>/min,水压为4.7 MPa,稳定涌水量为19 m<sup>3</sup>/min。又如,安阳铜冶煤矿由于井下超前钻孔打到富水的陷落柱而突水,涌水量由24 80 860 1 500 m<sup>3</sup>/h递增,导致矿井淹没。经查明:铜冶煤矿突水陷落柱在±0 m标高以上的空隙率为11.6%~27.45%,±0~-50 m标高段的空隙率为2.3%~15.8%, -50~-100 m标高段的空隙率为2.9%, -100 m标高以下的空隙率为14.15%~17.87%。说明陷落柱内岩块不仅没有固结,反而存在大量的空洞,富含地下水。

(2) 边缘充水导水型。陷落柱充填的岩石碎屑压实较紧密,柱内水力联系不好,而柱边次生裂隙较为发育且充水,当柱体沟通奥灰含水层时,在较高的水压力下可发生渗透。采掘工程揭露时一般以滴、淋水为主,涌水量不大。开滦范各庄井田1<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup>, 5<sup>#</sup>, 6<sup>#</sup>, 8<sup>#</sup>和12<sup>#</sup>岩溶陷落柱属于此种类型。揭露时的涌水量:1<sup>#</sup>为0.54;3<sup>#</sup>为0.216;5<sup>#</sup>有少量涌水;6<sup>#</sup>为2.10 m<sup>3</sup>/min;8<sup>#</sup>周边裂隙有少量滴水,加之与该陷落柱有联系的小断层出水,涌水量为5.0 m<sup>3</sup>/min;12<sup>#</sup>涌水量为0.15 m<sup>3</sup>/min。又如峰峰三矿水源斜井施工中遇11<sup>#</sup>陷落柱后,从井下分别施工5个孔径为89 mm的奥灰钻孔,终孔于陷落柱内,5个孔的涌水量计1.5 m<sup>3</sup>/min。汾西三教矿9采区下山揭露的陷落柱涌水量达0.75 m<sup>3</sup>/min,淹没了部分巷道。徐州东城井756工作面揭露陷落柱时淋水不断,涌水量最大达0.8 m<sup>3</sup>/min。井陘矿区最大的2个导水陷落柱I<sub>J-1</sub>, I<sub>J-2</sub>,涌水量分别为0.7~1.2 m<sup>3</sup>/min, 0.7~1.9 m<sup>3</sup>/min。

(3) 不导水或微弱导水疏干型。较早时期形成的陷落柱,其充填物多以煤系地层的砂岩碎块为主,掺杂少量的分布不连续的碳酸盐碎块,在漫长的地质历史时期中,经过反复压实作用,一般压实紧密,呈半胶结状态的非均质柱体,且岩块间又有方解石和泥质充填,一般情况下是隔水的。采矿实践证明,大多数陷落柱属于此类,不具备突水条件。

开滦范各庄井田内的4<sup>#</sup>, 7<sup>#</sup>和11<sup>#</sup>陷落柱,唐家庄矿的1<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup>, 5<sup>#</sup>陷落柱,阳泉矿区揭露的大部分陷落柱均属此种类型。特点是陷落柱内充填物压实更加紧密,揭露时有少量滴水或无水,其边缘裂隙水已被疏干,采掘工程可以正常通过。例如:当范各庄2172工作面回采时遇到7<sup>#</sup>陷落柱,柱内无水,采面安全通过,但1984年突水淹井后,其边缘裂隙

又被充水,涌水量达  $0.3 \text{ m}^3/\text{min}$ 。据井陘矿区统计,不导水型陷落柱占该矿区 112 个陷落柱的 74.6%。又如峰峰矿区羊渠河矿揭露的 9 个陷落柱,鼓山两侧十几个生产矿井揭露的陷落柱,都属于不导水的干燥柱体;二矿揭露的 21 个陷落柱,不仅无地下水的痕迹,而且虽长期处于下部中奥陶统灰岩含水层地下水  $1.5 \sim 3.6 \text{ MPa}$  水压作用下,但从未发现潮湿和滴水现象。在陷落柱分布地段,当疏干山青含水层时,大青灰岩和中奥陶统灰岩含水层水位不变,这也说明陷落柱不导水。鲁西煤田目前揭露的陷落柱,均属不导水或弱导水型;新汶煤田协庄矿在 2 水平 9 采区 8 煤层揭露的 7 个陷落柱都未见滴、淋水,其余的仅有少量淋水;滕县煤田柴里矿揭露的 4 个陷落柱,仅见柱体边缘有少量滴、淋水;肥城煤田平阴矿先后在 4, 5, 6 煤层揭露的 1<sup>#</sup> 陷落柱,巷道穿过时基本上是干燥无水;杨庄矿的 1<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup> 陷落柱,经丁 42 孔沿 9 煤层钻进,穿过柱体 15 m,丁 43 孔斜穿柱体 20 m,都是干燥无水。

### 2.3 陷落柱水文地质特征的控制因素

(1) 地质构造运动控制陷落柱的宏观水文地质特征。比如,若新构造运动地壳上升速度比较快、幅度比较大,已形成的陷落柱所在地段被抬升到当地侵蚀基准面之上,则奥灰顶部含水层缺少应有的补给水源,陷落柱导水能力减弱甚至丧失;又如,陷落柱所在的井田或块段,其两侧如被后期落差较大且阻水的倾向断层切割破坏,奥灰顶部的补给源即被切断或阻隔,地下水活动受到限制,陷落柱导水能力也会减弱<sup>[7]</sup>。

(2) 地下水径流条件不仅影响陷落柱导水能力的强弱,而且直接控制强导水型陷落柱的分布。北方煤田多数陷落柱不导水,强导水者大多分布在现代地下水强径流带上,尤其是现代岩溶泉域的排泄区附近,它们多是正在发育或复活的陷落柱,导水能力极强,一旦被揭露常发生突水<sup>[8]</sup>。

(3) 柱体充填物的压实和胶结程度控制陷落柱的水文地质特征及导水能力。对于干燥无水的陷落柱,其充填物的压实胶结程度比较高,在碎块和角砾中间,多由较细至极细的岩屑、岩粉、粘粒组成基质,其含量常超过 60%,它们包裹着大大小小的岩块,大岩块似悬浮在基质中,胶结紧密。由于固体物质含量大,粘粒成分高,常堵塞岩体内的开启裂隙,因此不利于岩溶地下水渗出。最典型的例子

是峰峰二矿所揭露的 21 个陷落柱,长期处于下部奥灰  $1.5 \sim 3.6 \text{ MPa}$  水头压力下,却从未发现潮湿和渗水现象。当压实胶结紧密的柱体遭受风化程度较高且发育裂隙时,易出现滴、淋水现象,成为弱导水的陷落柱。揭露时明显涌水的陷落柱,一般胶结程度较差,柱体及围岩中裂隙发育。可见,柱体充填物的压实胶结程度是陷落柱导水的内在因素,是判别其充水与否及导水性强弱和划分陷落柱导水类型的重要指标<sup>[9]</sup>。

(4) 横截面上的环带构造导致陷落柱水文地质特征的内部差异。据现场观测资料,围岩可划分为 3 个带: 裂隙带,岩层产状基本保持不变但裂隙发育; 破碎带,岩层产状异常,岩石破碎; 泥化带,风化作用强烈,岩石松软,砂岩和粘土岩已风化成砂和粘土。泥化带宽为  $2 \sim 3 \text{ m}$ ,裂隙带和破碎带宽为  $10 \sim 30 \text{ m}$ 。相应地,其导水性具有外围环带相对比较强、中间部位差的环带分布特点。此外,还有人为因素的影响。比如,人工大量开发利用岩溶地下水源及矿区大量抽排放水和实施各种防治水工程,也会使地下水位降低,水头压力减弱,径流条件变差,往往造成陷落柱无水可导。

综上所述,岩溶陷落柱是华北地区石炭二叠纪煤田中底板岩溶裂隙水的重要充水通道,沟通各含水层造成极复杂的水文地质条件,并能直接将奥灰水导入煤系地层,给矿井安全造成极大的威胁。但是,陷落柱的导水性是受多种条件、因素控制和影响的,而各种因素又是彼此促进和相互制约的,并非所有岩溶陷落柱都可构成充水通道,只有处在现代岩溶水强径流带和集中排泄带并隐伏埋藏在地下水头面以下者,才能构成突水的潜在威胁,造成突水危害,而绝大部分北方岩溶陷落柱并不导水。因此,在分析陷落柱充水性时,应结合井田的实际情况,既要认真研究充水岩层岩溶发育特征、水头压力大小和柱体充填及压实胶结程度等基本条件,又要全面分析地质构造和地下水径流条件等影响因素,为准确模拟概化陷落柱提供可靠的地质基础信息。

## 3 陷落柱水文地质模型

能够充分体现煤系裂隙含水系统渗流场的空

间特征,特别是强径流带和局部非连续渗流特征,而且应用最广的,是矿井地下水系统广义三重介质渗流模型<sup>[3,4]</sup>。按上述理论,三重介质分别为主干裂隙、主干陷落柱和裂隙-孔隙岩块,耦合组成如下数学模型<sup>[10]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} & \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \sum_{j=1}^3 k_{ij} \frac{\partial H_s}{\partial x_j} \right) + w_s = \mu'_s \frac{\partial H_s}{\partial t} \\ & \frac{\gamma}{12\nu} \sum_{j=1}^m \frac{b_{ij}^3 h_{ij}}{l_{ij}} \Delta H_{f,ij} + \frac{\pi \gamma}{128\nu} \sum_{k=1}^n \frac{d_k^4}{l_k} \Delta H_T + \\ & \sum_{j=1}^n w_{f,j} + Q_{f,i} = \mu'_s \frac{\partial H_f}{\partial t} \\ & H_s|_{t=t_0} = H_{s,0} \\ & H_s|_{\Gamma_f} = H_f \\ & k_n \frac{\partial H_s}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = \beta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:  $k_{ij}$  为渗透系数张量;  $H_s$  为孔隙-裂隙介质中水头值;  $w_s$  为水量交换值;  $\mu'_s$  为孔隙-裂隙弹性给水度;  $b_{ij}$  为主干裂隙节点上的裂隙宽度;  $h_{ij}$  为节点上水头高度;  $\Delta H_f$  为主干裂隙中水头差;  $l_{ij}$  为水头差( $\Delta H_f$ )相应的距离;  $d_k$  为管状通道的直径;  $\Delta H_T$  为管状通道中的水头差;  $l_k$  为相应水头差( $\Delta H_T$ )的距离;  $\nu$ ,  $\gamma$  分别为运动粘滞系数及容重;  $w_f$  为主干裂隙中水量交换值;  $Q_f$  为排水量或补给量;  $k_n$  为法向渗透系数。

图1是概化的北方煤田矿井地质模型。其中,全充水强导水型的陷落柱,垂向上起着沟通各含水层垂向水力联系和突水通道的作用,将其概化为垂直管道。根据水力学中管道流的计算方法,假定水在管道中的运动服从管道流方程,突水量取决于管道直径、突水点与突水水源间的水头差和流经距离等<sup>[10]</sup>,其算式为

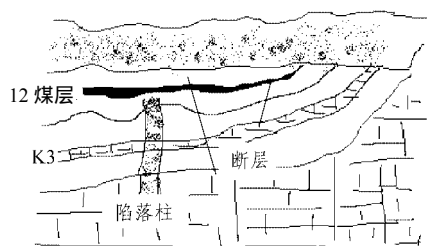


图1 地质模型

Fig.1 A geological model

$$Q = \frac{\pi d^4 \Delta H}{128\nu l} \quad (2)$$

式中:  $Q$  为突水量,  $d$  为陷落柱半径,  $\nu$  为运动粘滞系数,  $\Delta H$  为突水点与突水水源间的水头差,  $l$  为突水点与突水水源间的距离。

而边缘充水导水型陷落柱,按充水状况概化为等效主干裂隙或垂向越流介质;对不导水或微弱导水疏干型陷落柱,可以概化为隔水体或不考虑其存在的影响。具体实施过程中,应以地质条件及充水特征的研究为基础,合理选择参数,进行地下水水量研究与预测,实例见文<sup>[10]</sup>讨论。

## 4 结 论

岩溶陷落柱是中国北方型石炭二迭纪煤田的一种特殊隐伏垂向构造,广泛分布于20个煤田45个煤矿区,其导致的突水具有隐蔽性、突发性且与岩溶水的天然联系等特点,对煤矿安全生产危害极大。因此,探索岩溶陷落柱突水模拟及预测的理论方法,具有重大的理论意义和实用价值。研究认为:

(1) 按照系统论的观点,岩溶陷落柱作为矿井地下水广义三重介质渗流系统的一类介质,自身又构成了独特的岩溶陷落柱水文地质子系统,其中灰岩地下水是其补给源,柱体本身是径流通道,上覆煤系含水层、井巷或采煤工作面是其排泄点。子系统的介质特征、补径排条件及参数是系统数学模型的基础。

(2) 研究和实践表明:陷落柱的充水受地质构造运动、地下水径流条件、柱体内物质组成、压实和胶结情况以及承受水压大小等多种条件、因素的控制和影响,而各种因素又彼此促进和相互制约,只有处在现代岩溶水强径流带和集中排泄带并隐伏埋藏在地下水头面以下者,才能构成突水的潜在威胁,真正造成突水危害还需要其他条件的配合。这就决定了绝大部分北方岩溶陷落柱并不充水也不导水。但是,岩溶陷落柱一旦突水,水量大且迅猛,预测及防治难度极大。

(3) 通过子系统内部特征的详细深入研究,将陷落柱划分为全充水强导水型、边缘充水导水型和不导水或微弱导水疏干型等3种类型,在水文地质模型中相应地概化为垂向管道、主干裂隙或垂向越流介质、隔水体或对含水层无扰动介质,通过数学

模型的解算实现岩溶陷落柱特征的量化,进而准确预测预报矿井涌(突)水量。

## 参考文献(References):

- [1] 钟亚平. 开滦煤矿防治水综合技术研究[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2001.(Zhong Yaping. Studies on Integrate Technology of Water Prevention in Kailuan Mines[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2001.(in Chinese))
- [2] 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.(Wu Qiang, Jin Yujie. A Decision System to Mining Water Precaution and Protection in the Coal Basin of North China[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1995.(in Chinese))
- [3] 尹尚先. 煤矿区突(涌)水系统分析模拟及应用[博士学位论文][D]. 北京:中国矿业大学(北京校区), 2002.(Yin Shangxian. Analysis, simulation and application of water inrush system in coal mine areas[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2002.(in Chinese))
- [4] Oda M. An equivalent continuum model for coupled stress and fluid flow analysis in jointed rock masses[J]. Water Resources Research, 1986, 22(13): 1 854–1 865.
- [5] Bai M, Elsworth D. Modeling of subsidence and stress – dependent hydraulic conductivity for intact and fractured porous media[J]. Rock Mech. Rock Engng., 1994, 27(4): 209–234.
- [6] 吕朋菊, 张永双, 张明利等. 鲁西煤田岩溶陷落柱的发育特征[J]. 山东矿业学院学报, 1998, 17(3): 217–223.(Lu Pengju, Zhang Yongshuang, Zhang Mingli, et al. Discussion on development characteristics of Karstic collapse columns and their origin in coalfields in west Shandong province[J]. Journal of Shandong Mining Institute, 1998, 17(3): 217–223.(in Chinese))
- [7] 张宝柱, 陈振东. 华北型煤田岩溶陷落柱分布规律及其水文地质意义[J]. 阜新矿业学院学报(自然科学版), 1996, 15(3): 295–298.(Zhang Baozhu, Chen Zhengdong. Distribution of karstic collapse columns of North-China type coalfields and its hydrogeologic significance[J]. Journal of Fuxin Mining Institute (Natural Science), 1996, 15(3): 295–298.(in Chinese))
- [8] 刘国林, 黄万新. 华北型煤田岩溶陷落柱发育分布规律研究[J]. 河北建筑科技学院学报, 1997, 14(2): 29–32.(Liu Guolin, Huang Wanxin. On the development and distribution rules of the subsidence columns in coalfields of north-China[J]. Hebei Institute of Architectural Science and Technology, 1997, 14(2): 29–32.(in Chinese))
- [9] 尹尚先, 武强. 华北煤矿区岩溶陷落柱特征及成因探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(1): 120–123.(Yin Shangxian, Wu Qiang. Studies on properties and forming mechanism of Karstic collapse columns in north coalfields of China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, (1): 120–123.(in Chinese))
- [10] 尹尚先, 武强, 王尚旭. 范各庄矿井地下水系统广义多重介质渗流模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(14): 2 319–2 325.(Yin Shangxian, Wu Qiang, Wang Shangxu. A generalized multiple porous media seepage model of mine groundwater system, a case studies in Fangezhuang, China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(14): 2 319–2 325.(in Chinese))