

矿山地下水三维空间流场模型构建及应用*

李贵仁^{1,2,3,4}, 刘大金^{1,2,4}, 赵珍^{1,2,3,4}, 折书群^{1,2,3,4}

(1. 华北有色工程勘察院有限公司, 河北 石家庄 050021;

2. 自然资源部金属矿山地下水灾害防治工程技术创新中心, 河北 石家庄 050021;

3. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉 430074;

4. 河北省矿山地下水安全技术创新中心, 河北 石家庄 050021)

摘要:在以往的矿区水文地质勘探工作中,鉴于矿山开采深度一般较浅,同时为了简化计算,大多将地下水的运动纳入二维平面流范畴。随着矿产资源开发规模、开采强度及开采深度的不断增大,地下水垂向运动特征越发显著,尤其是在大降深条件下,地下水流场呈现出典型的三维空间流场特征,若忽略地下水的垂向运动,将地下水流系统三维模型简化为二维模型,将使模型偏差较大,导致矿坑涌水量预测结果严重失真,因此,地下水运动的垂向速度分量不可忽略。在开展矿山地下水三维空间观测系统建设研究的基础上,构建了矿山地下水三维空间流场模型,提出了“海绵体”型、“蘑菇”型地下水系统理论,明确了地下水系统的运动规律、特点及防治水的关键技术,相关技术体系原理、技术方法对同类型矿山尤其是深部开采矿山水文地质勘探及防治水工作起到了积极的指导作用。通过在北洛河铁矿、司家营铁矿进行实践应用,深化了对矿区水文地质条件的认识,大幅度提高了矿坑涌水量的预测精度,提出了适合矿山的防治水措施,保证了采矿安全。

关键词:地下水系统;三维空间流场;矿坑涌水量;矿山防治水

中图分类号:TD12;P641.4

文献标识码:A

文章编号:1005-2763(2024)03-0152-07

矿产资源开发过程中,矿区水患引发的安全事故会给人民生命和国家财产造成较大损失。对矿区地下水系统进行深入研究,把握矿区地下水的运动规律以及地下水的补径排条件,明确矿坑涌水的来源与原因,并进行准确的预测,对保证矿区的安全生产具有积极的作用^[1-3]。我国在矿山防治水领域已进行了大量的研究^[4-5],以往在矿区水文地质勘探中,在不影响预测精度的情况下,大多将地下水流纳入二维平面流范畴。随着矿产资源的开发,特别是随着开发规模、开采强度及开采深度不断增加,地下水垂向运动特征越发显著,地下水流场呈现三维空

间流场特征^[6-9],在这种条件下,如忽略地下水的垂向运动,将地下水流系统三维模型简化为二维模型,会使模型偏差较大,导致矿坑涌水量预测结果严重失真。

基于以上背景,笔者在地下水三维空间观测系统建设、黏性土释水及越流理论等关键技术应用的基础上^[10-11],构建了矿山地下水三维空间流场模型,提出了“海绵体”型、“蘑菇”型地下水系统理论,总结了该系统的运动规律、特点及防治水的关键技术,通过在北洛河铁矿、司家营铁矿进行应用,深化了对矿区水文地质条件的认识,提高了矿坑涌水量的预测精度,可以对同类型矿山尤其是深部开采矿山水文地质勘探及防治水工作起到积极的指导作用。

1 不同含水介质中地下水流场特征分析

1.1 潜水强含水层地下水流场特征分析

假设在均质、各向同性、隔水底边水平的无限边界潜水强含水层中抽水前的地下水水位近似水平,中心一口非完整井抽水,地下水流场如图1所示。

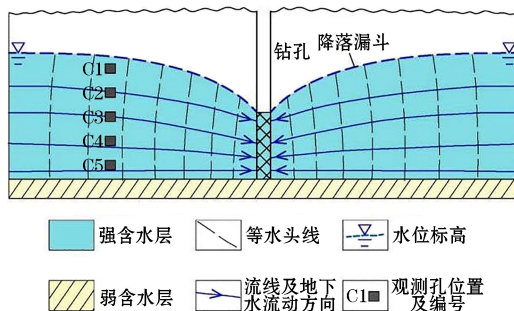


图1 潜水强含水层钻孔抽水水文地质剖面示意

从剖面上看,地下水等水头线是一系列弯曲程度不等的曲线,垂向上水流速度较小,潜水面由原来

* 收稿日期:2023-05-09

作者简介:李贵仁(1984—),男,山东费县人,硕士,高级工程师,主要从事矿区水文地质方面的研究工作,E-mail:466618607@qq.com。

的水平状态变成漏斗状,即水位降落漏斗。观测点的水头从 C1 到 C5 逐渐降低^[12]。但在实际应用中,由于各点水头相差不大,为了简化问题,一般将该类等水头线近似视为铅直线,从而忽略流速的垂向分量,把三维渗流问题简化为二维渗流问题解决。

在实际的矿区水文地质勘探中,钻孔一般进行单点或者一段混合的地下水位观测,在本模型中单点水位可以近似代表其他点水位。

1.2 潜水弱含水层地下水流场特征分析

假设在均质、各向同性、无限边界厚大弱含水层中抽水前的地下水水位近似水平,中心一口非完整井,地下水流场如图 2 所示。

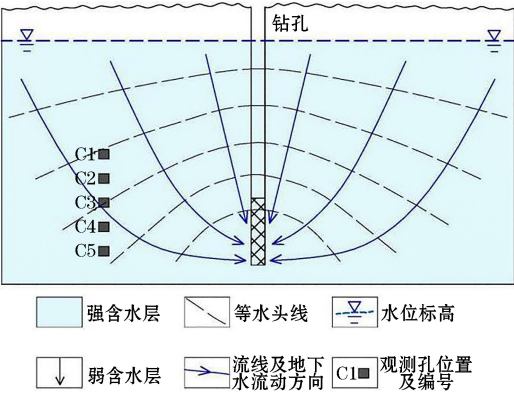


图 2 潜水弱含水层钻孔抽水水文地质剖面示意

从剖面上看,等水头线是一系列向上弯曲程度不等的曲线,垂向上水流速度较大,地下水以垂向运动为主,由于地下水水平运动较弱及侧向的补给,在抽水过程中潜水面保持原来的水平状态。观测点的水头从 C1 到 C5 逐渐降低,水头相差较大^[13]。在实际应用中,不能把剖面上的等水头线近似地视为铅直线,不能忽略流速的垂向分量,因此,该模型应处理为一个三维地下水流场。

在弱含水层抽水过程中,垂向上水流速度较大,不能进行简化处理,必须以三维流场来研究,在矿山勘探过程中传统的平面观测网络不能满足要求,需建立地下水三维观测系统,以获取同一含水层不同深度的地下水头,刻画地下水三维流场。

1.3 强弱相间含水层地下水流场特征分析

地下水含水系统由多个含水层组成,假设从上到下由含水层、弱透水层、含水层、隔水层组成,其中含水层、弱透水层均为等厚、均质、各向同性、隔水底边水平的无限边界含水层、抽水前地下水近似水位水平,中心一口非完整井抽水,地下水流场如图 3

所示。

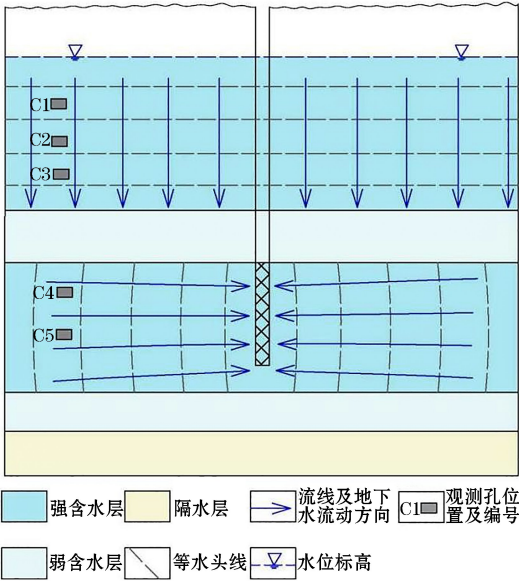


图 3 多含水层钻孔抽水水文地质剖面示意

从剖面上看,上部潜水含水层的等水头线是一系列垂直线,地下水垂向运动;上部含水层的地下水以越流的形式补给到下部含水层;下部含水层的等水头线是一系列弯曲程度不同的曲线,垂向上水流速度较小。观测点的水头从 C1 到 C4 逐渐降低,C4 与 C5 近似相等,水头相差较大。

在多个含水层组成的地下水含水系统中,在下部强含水层抽水过程中,上下含水层相互连通,上部含水层的地下水垂向运动,下部含水层的地下水主要为水平流动,地下水流动系统概化时不能进行简化处理,必须以三维流场来研究,传统的平面观测网络不能满足要求,需建立地下水三维观测系统,以获取不同含水层的地下水头,刻画地下水三维流场。

2 “海绵体”型地下水系统构建及应用

2.1 模型构建

矿山主要充水含水层为分布广、厚度大的弱含水层时,由于深部排水,矿床地段中下部含水层为主要径流通道,控制着中上部含水层地下水流场分布,中下部含水层压力释放并向上传导,形成了以疏干巷道为中心的从源到汇的三维空间流场分布,垂向存在水头梯度,可概化为“海绵体”型地下水系统。

“海绵体”型地下水系统的特点是:等水头线是一系列向上弯曲程度不同的曲线,垂向上水流速度较大,地下水运动以垂向为主,由于地下水水平运动较弱及侧向补给,在抽水过程中潜水面保持原来的水

平状态,同一观测点垂向上水头相差较大(见图4)。

在该类系统中,巷道排水使深部地下水压力释放,地下水从势能最高处(即自由水面)向下渗流运动到出水口,在地下水运动过程中,随着渗流途径增加,水头损失也随之增大,压能水头则要降低(即水位降低),其出水口处附近的水头损失值可根据出水口处附近的压力值来反映。水头损失大小与渗流途径长短和岩层介质渗透性强弱有关。渗透途径越长及渗透介质越弱,水头损失越大;反之,水头损失越小。这表现为垂向上存在很大的水头梯度,即深部压力降低大,浅部压力降低小^[14]。

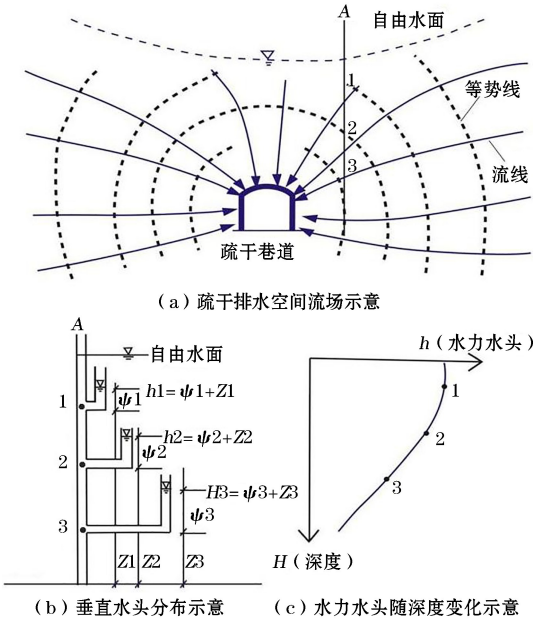


图4 “海绵体”型地下水系统空间流场示意

排水点控制范围同一位置不同深度存在着水头压力差,垂向上的水头压力差大小与含水层透水性强弱的关系密切,透水性弱,地下水水头损失大,则垂向水头压力差大;反之,地下水水头损失小,垂向水头压力差小。

在该类地下水系统的含水层抽水过程中,垂向上速度较大,不能进行简化处理,必须以三维流场来研究,在矿山勘探过程中,传统的平面观测网络不能满足要求,需建立地下水三维观测系统,以获取同一含水层不同深度的地下水头,刻画地下水三维流场。

2.2 模型应用

河北省武安市北洛河铁矿床水文地质勘探及防治水是“海绵体”型地下水系统的典型应用案例。

2.2.1 矿山基本情况

北洛河铁矿直接充水含水层为奥陶系中统石灰岩含水层,水文地质条件复杂。矿床背斜轴部石灰

岩含水层较薄,南北两翼较厚,且越往外越厚(见图5)。由于矿区位于百泉岩溶水系统南部边界一带,地下水补给区透水性较弱,矿床处在矿山岩体与武安岩体之间,火成岩侵入穿插频繁,使区域地下水径流受阻,运动缓慢,地下水对灰岩裂隙的溶蚀和开拓作用减弱,同时矿床地段相当范围内的第四纪松散堆积物直接覆盖于奥陶系中统灰岩之上,使下伏灰岩裂隙溶洞多被其全充填或半充填,导致矿区灰岩总体透水性较弱^[15]。

矿山于1960年代开展了水文地质勘探,按照二维平面流的理论及相关方法预测了矿坑涌水量。根据预测结果,开拓中段为+100 m时,相较于天然状态,水位下降深度达300 m,预测涌水量为 $(5\sim6)\times 10^5\text{ m}^3/\text{d}$;开拓中段为-40 m时,相较于天然状态,水位下降深度达440 m,预测涌水量为 $(8\sim9)\times 10^5\text{ m}^3/\text{d}$;开拓中段为-230 m时,预测涌水量可达 $2\times 10^6\text{ m}^3/\text{d}$ 。

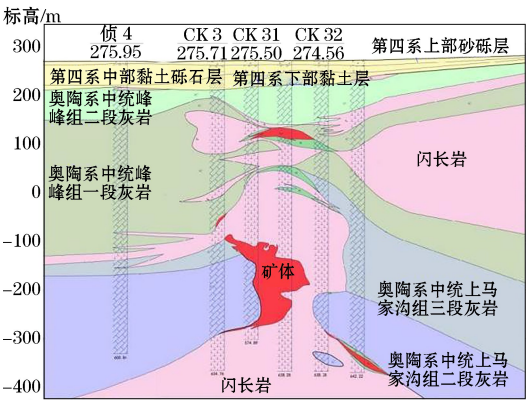


图5 北洛河铁矿3号勘探线地质剖面略图

2.2.2 北洛河铁矿地下水三维空间流场模型构建

北洛河铁矿井下开拓系统初步形成时,进行了地下水三维空间观测系统的建设,从不同深度、不同层位对矿区地下水开展了系统的观测。排水系统设置于-122 m水平,其上方自由水面(潜水面)在70~80 m左右,-50 m水平放水孔口水头压力为0.23~0.28 MPa,垂向水头差为103~107 m;-122 m水平疏干巷放水孔孔口水头压力为0.15~0.39 MPa,垂向水头差为165~187 m。排水疏干条件下,有很大的垂向水头压力差,一般大于100 m^[16]。

基于矿区三维空间观测成果及对矿区水文地质条件的进一步认识,初步构建了“海绵体”型地下水系统,对矿区地下水尤其是深部地下水形成了以下认识:矿坑深部排水时,矿床地段中下部灰岩含水层为主要径流通道,由于矿区灰岩含水层厚度大、透水

性弱,矿床地下水接受区域地下水侧向补给水量有限,以垂向补给为主,控制着中上部灰岩和第四系地下水流场分布,中下部灰岩含水层压力释放并向上传导,形成了以疏干巷道为中心的从源到汇的三维空间流场,垂向存在水头梯度。

以“海绵体”型地下水系统理论为基础,结合矿坑排水及水文动态观测成果,采用数值法预测了深部矿坑涌水量。结果表明:矿坑涌水量随开采深度的增大变化不明显,矿山深部开拓时矿坑总排水量与上部开采时水量相近,涌水量为 $(2\sim 2.5)\times 10^5\text{ m}^3/\text{d}$ ^[17]。根据对矿山的回访,矿山目前已开采至-245 m水平,近5 a的矿坑涌水量相对稳定,基本保持在 $2.4\times 10^5\text{ m}^3/\text{d}$,与预测结果相吻合。

3 “蘑菇”型地下水系统的构建及应用

3.1 模型构建

“蘑菇”型地下水系统简化为:上部分布广、近似水平的厚大含水层为“蘑菇头”;中部弱透水路为“枢纽”;下部是带状分布的强含水层为“蘑菇茎”(见图6)。

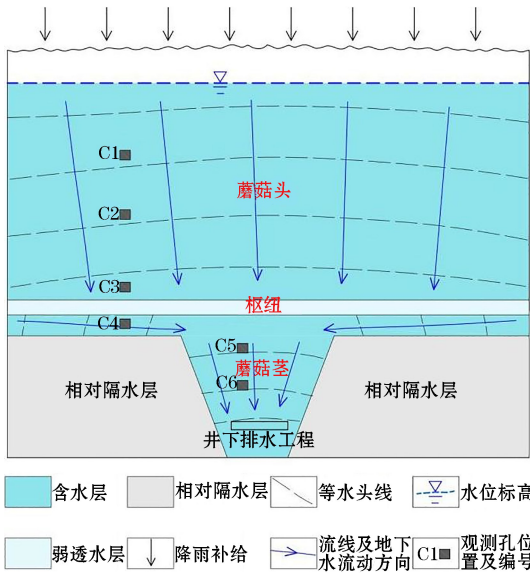


图6 “蘑菇”型地下水系统示意

“蘑菇”型地下水系统组成要素:一是上覆厚大含水层,形似“蘑菇头”,是矿区统一的矿坑充水水源;二是矿区基岩构造裂隙含水层(带),形似数个“蘑菇茎”,是矿坑充水通道^[18];三是借鉴钱鸣高院士的关键层理论^[19]将“蘑菇头”底部透水性不强、厚度不大的弱透水路作为关键层,是控制上覆水体进入矿坑的关键层位,联系矿区充水水源与基岩构造裂隙带充水通道间的“枢纽”。

在矿山“蘑菇”型地下水系统的水文地质勘探

中,传统的平面观测网络不能满足要求,需建立地下水头三维观测系统,以获取不同含水层、同一含水层不同深度的地下水头,刻画地下水三维流场^[20]。

3.2 模型应用

河北省滦县司家营铁矿床的水文地质勘探及防治水是“蘑菇”型地下水系统的典型应用案例。

3.2.1 矿山基本情况

司家营铁矿床为第四系水间接充水、基岩裂隙水直接充水的裂隙充水矿床,水文地质条件复杂。矿床位于滦河冲洪积扇中上部,矿体赋存于太古界滦县群司家营组古老变质岩中,位于当地最低侵蚀基准面之下。

矿床上覆第四系松散岩类孔隙含水层,该含水层自上而下又可依次分为上部砂砾卵石强含水层、中部淤泥质粉质黏土主隔层、下部中细砂中等含水层、底部粉质黏土相对隔水层。

第四系下部为基岩风化裂隙含水层,该含水层(组)位于第四系底板以下,分布全区,厚度较稳定,连续性较好,依据风化程度在垂向上划分为强风化带和弱风化带。强风化带风化裂隙多被泥质充填,透水性、富水性差;弱风化带在风化与构造共同作用下,透水性、富水性较强,为风化裂隙水的主要赋存部位。

基岩构造裂隙含水带下伏于风化带之下,呈南北向带状分布,由断层及其影响带构成,含水较强,特别是多条断层组成的复合影响带透水性、富水性普遍较好;两翼构造裂隙不发育,含水微弱^[21-22]。

由于矿床上覆分布广、厚度大的第四系砂砾卵石强含水层,前期采用“大井法”预测矿坑涌水量为 $146\times 10^5\text{ m}^3/\text{d}$,自1970年代一直被限制开采,成为大水呆滞矿。

3.2.2 司家营铁矿地下水三维空间流场模型构建

在对矿区开展水文地质补充勘探及研究工作过程中,基于地下水三维空间观测系统建设、黏性土释水及越流理论等,采用“蘑菇”型地下水系统理论对矿区地下水系统进行了构建(见图7)。

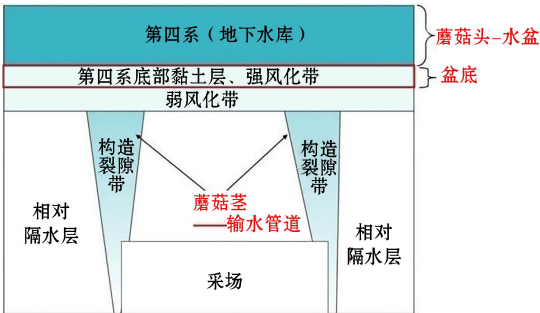


图7 司家营铁矿“蘑菇”型地下水系统示意

“蘑菇头”(充水水源)是广泛分布全区的第四系松散岩类孔隙含水层和基岩风化裂隙含水层;“蘑菇茎”(充水通道)是呈南北向带状展布的基岩构造裂隙含水带;“枢纽”(关键层位)是基岩构造裂隙带之上的强风化带和第四系底部黏性土构成的弱透土层,消弱了第四系水与基岩裂隙水的水力联系。

巷道置于基岩深部,矿坑排水使深部基岩构造

裂隙水压力释放,风化裂隙水以空间渗流形式向排水点汇聚,形成一定范围的压力释放空间场,垂向上形成水头梯度。在垂向压力差作用下,强风化带与第四系底部黏性土压密释水,待黏性土中水头降低波及到整个黏性土厚度时,压密释水减小,水流量增加。当基岩水位降至强风化带底板时,由于黏性土顶底板水头差恒定,矿坑水以第四系水越流为主(见图8)。

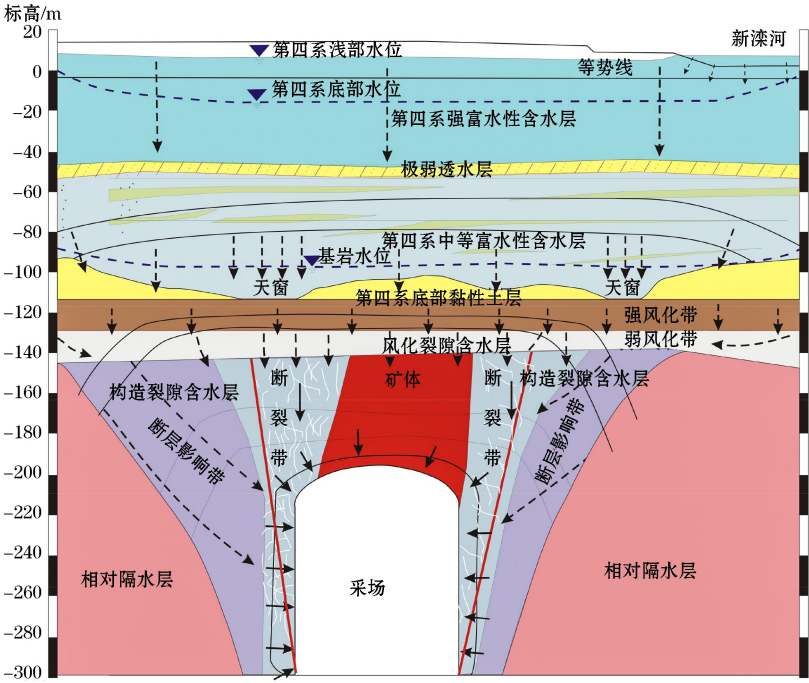


图8 司家营铁矿开采条件下地下水空间流场示意

以“蘑菇”型地下水系统理论为基础,结合矿坑排水及水文动态观测成果,采用数值法预测了矿坑涌水量,根据预测结果,矿山开采至-250 m水平时,正常涌水量为 $8.53 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$,最大涌水量为 $9.95 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[23-24]。根据对矿山的回访,矿山目前基建工作基本完成,地下水位处于下降状态,在疏排一部分储存量的情况下,近几年矿坑涌水量稳定在 $(8 \sim 9) \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$,与预测结果相吻合。

4 基于三维空间流场的矿山防治水思路

针对三维流场地下水系统的特点,矿坑涌水量不随开采深度的增大而增大、不随降水量的变化而变化,传统的矿山防治水或预先疏干或帷幕堵水^[23-24],对具有三维空间流场分布特征的矿山难以奏效,矿山防治水必须突破传统的“非排即堵”思维定式,可采用带压开采,边采矿边排水降压,力争工作面低压作业。同时,针对该类矿山矿坑涌水量不随深部变化的特点,主要排水设施不必置于最低开

采标高,可设置在上部,减少排水扬程,大幅度减少矿山排水费用。

对具有“海绵体”型地下水系统特点的矿山,由于含水层整体富水性较弱,坑下排水形成很大垂向梯度的空间流场。这样特定的疏干流场,一是预先疏干很难或正常疏干条件下进行预先疏干不大可能;二是坑下出水点附近的水压力降低很大,疏干工程或涌水点涌水量不大。区内没有大的导水构造和丰富的补给水源,也不会发生很大的突水量。因此,没有必要采用专门的降水疏干工程,可以采用并行疏干方法,即排水与采掘工作同时进行。直接利用坑下开拓、采准工程进行裸巷(直接揭露石灰岩含水层)排水疏干,同时在富水性相对较强的地段或水压力较高的地段,施工部分放水孔或超前探水钻孔放水降压,为生产或施工创造较好的作业条件。

对具有“蘑菇”型地下水系统特点的矿山,矿山基建期排水使很大部分基岩地下水静储量排出及黏性土压密释水,矿坑涌水量一般较大,生产期因基岩

地下水静储量消耗殆尽,同时黏性土压密释水基本结束,矿坑涌水量减小且趋于稳定。另外,由于矿坑水的最终来源为第四系水的垂向越流补给,矿山生产过程中,第四系水垂向越流补给基岩含水层一直存在,矿坑排水不可能预先疏干。因此,矿山生产只能带压作业,在确保矿坑顶板安全的前提下,矿山应排水降压,边采矿边排水,力争低压作业,降低临时突水的可能性。

5 推广应用分析

(1) 应用于同类型的大水呆滞矿山水文地质研究。随着现代开采工艺的发展,带压开采等新技术的出现,使得部分大水矿山的开采得以实现。以往误认为矿区基岩含水微弱,开拓系统置于基岩内部即可避开第四系水对采矿的影响,导致多个矿山基建工程进入基岩后出现突水,存在重大安全隐患。本成果先后在河北滦南马城铁矿、辽宁思山岭铁矿、安徽李楼铁矿等矿山得到成功应用,未来可进一步应用于同类型的大水呆滞矿山的水文地质研究。

(2) 应用于矿山深部水文地质研究。随着国内矿山开发规模、开采强度及开采深度的不断增大,多数矿山现已进行深部开采。应用矿山地下水三维空间流场模型构建理论,可有效地界定深部矿床的充水水源和充水通道,有效地抓住影响矿床充水的主要因素,有针对性地提出矿山防治水措施。

(3) 应用于地热、矿泉水资源的水文地质勘探。笔者在承德地区矿泉水资源勘探中,运用矿山地下水三维空间流场模型构建理论,先后完成了河北省承德市滦平县、丰宁县多个矿泉水勘查项目。在这类矿泉水分布区,地下水系统形似“蘑菇”,广泛分布的基岩风化裂隙含水层提供矿泉水水源,带状分布的基岩构造裂隙含水带为矿泉水有益组分的溶滤、储存提供空间。

(4) 应用于海底矿山水文地质研究。“蘑菇”型地下水系统理论可应用于相似水文地质条件的海底矿山的水文地质条件研究,厘定矿床充水水源和充水通道及影响矿床充水的主要因素,提出矿山防治水措施。

6 结论

(1) 构建了矿山地下水三维空间流场模型。通过对典型矿山的分析与总结,对矿区的地下水含水系统、地下水流动系统、矿床充水因素形成了系统认

识,在地下水三维渗流、黏性土释水及越流理论的基础上构建了矿山地下水三维空间流场模型。

(2) 提出了“海绵体”型地下水系统理论。矿山主要充水含水层为分布广、厚度大的弱含水层时,由于深部排水,矿床地段中下部含水层为主要径流通道,地下水以垂向补给为主,控制着中上部含水层地下水流域分布,中下部含水层压力释放向上传导,形成以疏干巷道为中心的从源到汇的三维空间流场,垂向存在水头梯度。

(3) 提出了“蘑菇”型地下水系统理论。矿床上覆厚大含水层形似“蘑菇头”,是各个矿区统一的矿坑充水水源;基岩构造裂隙含水带形似数个“蘑菇茎”,是矿坑充水通道;“蘑菇头”底部透水性不强、厚度不大的弱透水层是控制上覆水体进入矿坑的关键层位,也是联系矿区充水水源与基岩构造裂隙带充水通道间的“枢纽”。

(4) 提出了带压开采,排水降压的防治水措施。传统的矿山防治水或预先疏干或帷幕堵水,对具有三维空间流场分布特征的矿山难以奏效,矿山防治水必须突破传统的“非排即堵”思维定式,可采用带压开采,边采矿边排水降压,力争低压作业。同时,鉴于该类矿山矿坑涌水量不随降水量的变化而变化,不随开采深度的增大而增大,主要排水设施不必置于最低开采标高,可设置在上部,以减少排水扬程,大幅度减少矿山排水费用。

参考文献(References):

- [1] 张发旺,陈立,王滨.矿区水文地质研究进展及中长期发展方向[J].地质学报,2016,90(9):2464-2475.
- [2] 曹剑峰,迟宝明,王文科.专门水文地质学[M].北京:科学出版社,2006.
- [3] 李贵仁,赵珍,陈植华.数值模拟在反演矿区水文地质条件中的应用[J].水文地质工程地质,2013,40(2):19-23.
- [4] YIN H, WEI J, LEFTICARIU L, et al. Numerical Simulation of Water Flow from the Coal Seam Floor in a Deep Longwall Mine in China[J]. Mine Water and the Environment,2016,35(2):1-10.
- [5] ZHANG K, CAO B, LIN G. Using Multiple Methods to Predict Mine Water Inflow in the Pingdingshan No.10 Coal Mine, China[J]. Mine Water and the Environment,2017,36:154-160.
- [6] ZHANG Y, GAO L F, YANG W B, et al. Hydrogeological Conditions and Mine Inflow Water Forecast of the Western Long Beach in Junggar Coalfield [J]. Energy Procedia,2012,16(Part B):915-920.
- [7] 李贵仁,赵珍,折书群.复式推覆体内矿坑涌水量预测的地下水数值模拟[J].地质科技情报,2019,38(6):212-220.

[8] 赵瑞珏,毛德强,刘再斌.基于水力层析法的某煤矿承压含水层叠加放水试验分析[J].水文地质工程地质,2021,48(1):1-9.

[9] MAO D Q, LIU Z B, WANG W K. An application of hydraulic tomography to a deep coal mine: Combining traditional pumping tests with water inrush incidents[J]. Journal of Hydrology,2018,567:1-11.

[10] CHEN S L, XU K, YU S B, et al. Comparision study on two methods of water inflow prediction of coal mining[J]. Advanced Materials Research, 2015, 3848 (1092/1093): 1379-1382.

[11] 曹文炳,万力,龚斌.水位变化条件下粘性土渗流特征试验研究[J],水文地质工程地质,2006(2):118-122.

[12] 薛禹群,吴吉春.地下水水动力学[M].武汉:中国地质大学出版社,2007.

[13] 张人权,梁杏,靳孟贵.水文地质学基础[M].北京:地质出版社,2018.

[14] 李贵仁.基于放水试验的矿区水文地质条件重新认识及地下水数值模拟[J].工程勘察,2018,46(12):35-40.

[15] 黄天瑞,李贵仁,赵珍.北洛河铁矿深部开采放水试验及数值模拟分析[J].中国矿业,2015,24(11):107-112.

[16] 叶和良,郝美君,张永交.河北省武安市北洛河铁矿坑道降水疏干试验总结报告[R].石家庄:华北有色工程勘察院有限公司,2002.

[17] 李贵仁,折书群,赵珍,等.河北省武安市北洛河铁矿水文地质补充勘探报告[R].石家庄:华北有色工程勘察院有限公司,2014.

[18] 刘元喆,周乐,王新峰.北方岩溶区断裂带水文地质性质及结构模型[J].中国岩溶,2022,41(6):975-985.

[19] 钱鸣高,缪协兴,许家林.岩层控制的关键层理论[M].徐州:中国矿业大学出版社,2013.

[20] 折书群,宋峰,尚金森.安徽省霍邱县李楼铁矿水文地质研究报告[R].石家庄:华北有色工程勘察院有限公司,2007.

[21] 刘大金,折书群,李贵仁.司家营铁矿水文地质补充勘探报告[R].石家庄:华北有色工程勘察院有限公司,2013.

[22] 刘大金,折书群,李贵仁.马城铁矿水文地质工程地质勘探报告[R].石家庄:华北有色工程勘察院有限公司,2012.

[23] 崔国伟,王向峰,林以齐.凡口铅锌矿地下水害综合治理实践[J].采矿技术,2022,22(6):121-125.

[24] 陈菊艳.广西盘龙铅锌矿涌水量预测及矿山帷幕注浆设计研究[D].桂林:桂林理工大学,2022.

Construction and Application of Three Dimensional Spatial Flow Field Model of Mine Groundwater

LI Guiren^{1,2,3,4}, LIU Dajin^{1,2,4}, ZHAO Zhen^{1,2,3,4}, SHE Shuqun^{1,2,3,4}

(1.North China Engineering Investigation Institute Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei 050021, China;

2.Technical Innovation Center for Underground Water Disaster Prevention Engineering in Metal Mines, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang, Hebei 050021, China;

3.School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China;

4.Technological Innovation Center for Mine Groundwater Safety of Hebei Province, Shijiazhuang, Hebei 050021, China)

Abstract:In the past period of hydrogeological exploration work in mining areas, in view of the shallow mining depth, and in order to simplify the calculation, most of the groundwater movements were included in the two-dimensional plane flow category. With the continuous increase of the development scale, mining intensity and mining depth of mineral resources, the vertical movement characteristics of groundwater become more and more significant, especially under the condition of large drawdown, the groundwater flow field presents typical three-dimensional spatial flow field characteristics. If the vertical movement of groundwater is ignored and the three-dimensional model of groundwater flow system is simplified to a two-dimensional model, the model deviation will be large, resulting in serious distortion of the prediction results of mine water inflow. Therefore, The vertical velocity component of groundwater movement cannot be ignored. On the basis of conducting research on the construction of a three-dimensional spatial observation system for mine groundwater, a three-dimensional flow field model was constructed for mine groundwater, the theories of “sponge” and “mushroom” types groundwater systems were proposed, and the movement laws, characteristics, key technologies for water prevention and control as well as the principles of relevant technical systems were clarified. The technical methods play a positive guiding role in hydrogeological exploration and water prevention and control work in mines of the same type, especially in deep mining. Through practical application in Beiminghe Iron Mine and Sijiaying Iron Mine, the understanding of the hydrogeological conditions in the mining area was deepened, the prediction accuracy of mine pit water inflow was greatly improved, and suitable water prevention measures for the mine were proposed to ensure mining safety.

Key words: Groundwater system, Three dimensional spatial flow field, Mine pit water inflow, Mine water prevention and control