

突水系数法分析预测煤层底板突水危险性的探讨

王计堂, 王秀兰

(山西煤炭职业技术学院, 山西 太原 030031)

摘要: 为了预测煤矿深部带压开采奥灰突水危险性, 合理划分危安区。研究了华北型煤田特征、模拟试验及相关资料, 对以往突水系数公式进行了综合分析对比, 在此基础上, 提出突水系数修正公式, 并对高家塔煤矿 9 号煤层带压开采奥灰突水危险性及其危安区进行了预测、划分。结果表明: 突水系数可由 0.043 ~ 0.091 MPa/m 修正为 0.067 ~ 0.127 MPa/m, 突水性分区可由相对安全区 - 相对危险区修正为相对危险区 - 危险区。实际生产矿井带压开采突水事故证明了突水系数修正公式的合理性。

关键词: 带压开采; 底板突水; 突水系数; 突水危险性; 突水性分区

中图分类号: P641.72 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2011)07-0106-06

Discussion on Water Inrush Coefficient Method Applied to Predict Water Inrush Danger of Seam Floor Based on Gaojiata Mine as Example

WANG Ji-tang, WANG Xiu-lan

(Shanxi Vocational and Technology College of Coal, Taiyuan 030031, China)

Abstract: In order to predict the water inrush danger from Ordovician limestone during the coal mining under the pressurized aquifer in deep mine and to rationally divide the dangerous zones, a study was conducted on the North China type coalfield features, simulation test and related information and the comprehensive analysis and comparison was conducted on the previous water inrush coefficient formulas. Based on the circumstances, a revised formula of the water inrush was provided and the water inrush danger and risk zone of the Ordovician limestone during the pressurized mining in No. 9 seam of Gaojiata Mine was predicted and divided. The results showed that the water inrush coefficient could be revised from 0.043 ~ 0.091 MPa/m to 0.067 ~ 0.127 MPa/m and the water inrush subarea could be revised from the relative safety area - the relative danger area to the relative danger area - danger area. The water inrush accident occurred from pressurized mining in the actual production mine verified the rationality of the water inrush coefficient revised formula.

Key words: mining under pressurized aquifer; water inrush from floor; water inrush coefficient; water inrush danger; division of water inrush zone

煤层底板奥灰突水是困扰华北型煤田煤炭工业可持续发展的主要水患问题。华北型煤田由于煤系地层底部奥灰含水层厚度大, 岩溶裂隙发育, 富水性强, 随着开采煤层深度的不断增加, 深部开采的奥灰水害问题日益严重, 高压奥灰水的危害造成 40% 左右的煤炭不能正常开采^[1-2]。

煤层底板突水的机制非常复杂, 预测预报困难。为了预测煤层底板突水, 我国矿山科技人员进行了大量的试验和研究, 提出了很多理论和学说^[3-7], 其中突水系数理论在分析预测煤层底板突水方面得到了广泛应用, 在评价煤层底板突水危险性中发挥了重要作用。从 20 世纪 60 年代起, 我国矿山科技人员在科研和生产实践中, 以大水矿区矿

井实际突水资料为基础, 综合分析研究煤层底板突水状况, 提出了突水系数公式, 并在实践中不断深入研究探讨, 使突水系数公式不断得以改进, 每一次的改进都基于模拟试验结果和实际开采资料、并逐渐克服之前公式的不足。突水系数公式历经了近 50 年的探讨研究和改进, 所考虑的引发底板突水的各项影响因素逐渐接近客观实际。采用改进的突水系数公式进行突水系数计算并用其进行带压开采预测及分区, 分区的安全性均高于初期突水系数公式。但在 2009 年 9 月 21 日颁布、从 12 月 1 日实施的《煤矿防治水规定》中, 突水系数公式采用了初期公式, 而不是采用历经几代矿山科技人员多年的探索和研究所得出的不断成熟的突水系数改进

公式, 值得商榷。

1 突水系数公式的演变发展

20 世纪 60 年代, 我国矿山科技人员分析研究了大量的生产煤矿突水案例, 从中筛选出含水层水压和隔水层厚度 2 个主要因子, 提出了突水系数的概念, 并建立了最初的突水系数 T 公式 (以下简称初期公式):

$$T = P/M \quad (1)$$

式中: P 为煤层底板隔水层承受的水压力, MPa; M 为煤层底板隔水层厚度, m。

初期公式考虑了水压与隔水层厚度对底板突水的影响, 但没有考虑在煤层开采条件下矿山压力对底板扰动破坏的影响问题。

20 世纪 70—80 年代, 我国矿山科技人员根据实际突水资料及模拟试验资料研究分析, 对初期公式进行了改进, 提出了以下突水系数改进公式:

$$T = P/(M - C_p) \quad (2)$$

式中, C_p 为采矿对底板扰动的破坏深度, m。

式 (2) 中, 考虑了开采条件下矿山压力对底板扰动破坏的深度, 体现和反映了矿压对底板隔水层的影响。式 (2) 较初期公式符合客观实际情况。式 (2) 在 1984 年原煤炭工业部颁发的《矿井水文地质规定》(试行)、1986 年颁发的《煤矿防治水工作条例》(试行) 和 1991 年颁发的《矿区水文地质工程地质勘探规范》中都推荐了这个公式, 这也说明式 (2) 优于初期公式。

虽然式 (2) 优于初期公式, 但式 (2) 没有考虑隔水底板在高水压作用下, 高承压水对隔水层潜裂隙的劈裂作用所造成的承压水导升现象。实际上, 当有承压水导升高度存在时, 隔水层中的导升部分就已经失去了其本身的隔水作用, 成为含水层的一部分^[8-10]。考虑矿压、水压对底板隔水层的破坏以及承压水导升高度的影响, 20 世纪 80—90 年代, 我国矿山科技人员又对式 (2) 进行了改进, 提出了以下突水系数改进公式:

$$T = P/(M - C_p - h_d) \quad (3)$$

式中, h_d 为承压水导升高度, m。

根据邯郸王凤矿氡测量值分析, 承压水导升高度在水压为 1.2 MPa 时为 1~6 m^[11]。

式 (3) 中, 考虑了矿压、水压对底板隔水层的破坏和影响, 较式 (2) 符合实际情况。但式

(3) 中未考虑煤系地层的特点, 没有体现和反映开采煤层与高承压含水层之间的隔水层通常是由各种不同强度、不同隔水性能的岩石组成的复合层问题。不同岩石有不同的力学性质和抗水压能力, 不应单纯以隔水层的实际厚度计算突水系数, 而应考虑有效隔水层厚度问题。认识到隔水层的有效隔水能力, 文献 [11-12] 中对式 (3) 又进行了改进, 提出了以下突水系数改进公式:

$$T = P/(\sum M_i \xi_i - C_p - h_d) \quad (4)$$

式中: M_i 为底板隔水层中第 i 层岩层厚度, m; ξ_i 为底板隔水层中第 i 层岩层等效隔水系数 (无岩溶化灰岩、泥灰岩为 1.3, 泥岩、泥灰岩、黏土、页岩为 1.0, 砂质页岩为 0.8, 褐煤为 0.7, 砂岩为 0.4, 砂、砾石、碎石、岩溶化灰岩、冒落裂隙带为 0^[12])。

式 (4) 除考虑了煤层开采时矿压对底板的破坏深度 C_p 以及天然条件下隔水岩层底部的承压水沿隔水层中的断层或裂隙上升的导升高度 h_d 外, 还考虑了底板隔水层中不同岩石等效隔水能力问题。煤层底板隔水层隔水能力与岩层组合有关, 不同岩石抗压强度及隔水能力的测试结果表明, 刚性岩石隔水性差但其抗压强度大, 柔性岩石则相反。一般刚性岩石的等效隔水系数约为泥岩的 0.4 倍^[13]。式 (4) 反映的客观实际条件较式 (3) 更全面、客观, 因此优于式 (3), 但式 (4) 没有考虑煤系地层基底奥陶系石灰岩顶部可能存在相对隔水层的问题。

事实上, 在对奥灰突水危险性分析时, 还应考虑奥灰岩顶部的隔水性问题。上述突水系数公式中, 视整个奥灰层为含水层, 未考虑其可能存在的隔水层 (段) 问题。可以说, 这在某些情况下是不符合客观实际, 这也许就是用突水系数法预测突水性时预测有失准确的原因之一, 已有学者^[13-14] 提出“奥陶系顶部隔水层”的观点。

可溶岩层中是存在隔水层的, 只是有些隔水层是原生的, 有些是后生的。华北地台奥陶系中统顶界面以下的岩溶型风化壳形成后, 在长期 (约 84 万年) 的夷平面风化过程中, 岩溶溶洞 (孔) 被成熟的风化产物沉积充填、压实胶结而形成相对隔水层。后期的构造运动又可能对相对隔水层进行破坏和改造, 从而形成相对隔水层中的隔水缺陷区, 这些隔水缺陷区主要发育在陷落柱、断层及构造裂

隙集中带及其附近。相对隔水层的存在可用以解释为何预测的突水危险区但未发生突水,隔水缺陷区可用以解释为什么预测的安全区却发生了突水的现象。将奥陶系顶部相对隔水层作为整个煤层底板隔水层的一部分进行底板突水危险性评价,可以使分析预测结果更准确。

综合前人研究结果,并考虑奥灰顶面存在相对隔水层的情况,本文提出以下突水系数修正公式:

$$T = P / (\sum M_i \xi_i - C_p - h_d + M_0) \quad (5)$$

式中, M_0 为奥灰顶部相对隔水层厚度, m 。

M_0 可采用矿区钻探、测井等水文地质资料确定,在隔水缺陷区 $M_0 = 0$ 。

突水系数修正式(5)(以下简称修正公式)综合考虑了矿压及水压对底板的破坏、有效隔水层及奥灰岩层顶面相对隔水层等因素。根据修正式(5)进行突水系数计算,更接近客观实际,所计算的突水系数也具有较高的参考价值。

煤层底板突水系数公式历经我国矿山科技人员近50年的探讨、改进,每一次的改进修正都克服了之前公式的不足,所考虑的引发煤层底板突水的各项影响因素也更加全面,可为华北型煤田下组煤开采的底板突水危险性分析预测、危险区划分提供较可靠的依据。

2 《煤矿防治水规定》中突水系数公式

2009年9月21日,国家安全生产监督管理总局、国家煤矿安全监察局颁布《煤矿防治水规定》(2009年12月1日施行)。在《煤矿防治水规定》(以下简称《规定》)之附录四中,给出的突水系数计算公式为

$$T = P / M \quad (6)$$

《规定》明确该公式“适用于回采和掘进工作面”。式(6)的形式与涵义与20世纪60年代提出的初期式(1)完全相同,没有推荐历经我国几代矿山科技人员多年探索研究所得出的、不断成熟的突水系数改进公式,值得商榷。

根据笔者的调查资料,在采用《规定》给出的突水系数式(6)(以下简称《规定》公式)进行突水系数计算时,计算者对公式中 M 的理解及取值通常是隔水层厚度,即“煤层底板至承压含水层顶面之间隔水层的实际量测厚度”,并以此进行突水系数计算,而不是采用有效隔水层厚度进行

计算。

必须强调的是,隔水层厚度与有效隔水层厚度是两个完全不同的概念。华北型煤田石炭系上统太原组下组煤与奥陶系中统石灰岩含水层间的岩层,不是单一岩性、隔水性良好的泥岩层,而是不同岩性的岩石组合层。如果按一般性理解,计算者在使用《规定》公式计算突水系数时, M 值通常取用煤层底板至奥灰含水层顶面之间岩层的实际量测厚度,在这种情况下,计算出的突水系数值是偏小的,对带压开采突水危险性分析预测是不利的,这无疑降低了带压开采危险区划分的安全度。以下实例可以说明这点。

3 高家塔煤矿煤层底板突水危险性分析

采用突水系数修正公式及《规定》公式,对河东煤田高家塔煤矿井田9号煤层带压开采突水危险性进行预测及危险区划分,对比不同突水系数公式得出的不同分析预测结果。

3.1 矿井概况

高家塔煤矿为拟建矿井,设计规模150万t/a。井田位于河东煤田中段离柳矿区西北部、柳林水文地质单元径流区,井田面积16.44 km²。井田地层为倾向NW的缓倾斜单斜构造,在此基础上发育有次一级的宽缓波状褶曲。井田北部发育3条倾向NW,地面断距2~3 m的阶梯状断层。

井田奥灰含水层富水性中等至强,奥灰水位平均约804 m。井田内各可采煤层底板均在奥灰水位以下,其中9号煤层是井田内埋藏最深的可采煤层。奥灰含水层为9号煤层的间接充水含水层,煤层底板潜在奥灰突水危险。

3.2 突水影响因素分析

1) 煤层底板隔水层承压压力 P 。井田内9号煤层底板标高320~580 m,按奥灰水位804 m考虑,则奥灰水位较9号煤层底板高出484~224 m,奥灰承压水头544~284 m。

有学者^[11]曾提出承压水上升过程中存在沿程“水头损失”和劈裂岩体裂隙的“能量损耗”,认为真正作用于有效隔水层底部的水压力是导升水的残余压力,而非原始压力,因此,突水系数公式中的水压力应采用残余压力而非原始压力。但根据流体力学、流体静力学原理,高承压水经过蓄势后,静水压力是不会减小的,对煤层底板的作用也不会减

弱, 只能减小底板突水量及突水冲击力 (突水水流速度)。因此, 作用于隔水层底板的水压力仍应采用天然原始水压力。9 号煤层底板隔水层承受的奥灰水压力 $P = 2.84 \sim 5.44$ MPa。

2) 煤层底板隔水层厚度与等效隔水层厚度 $\sum M_i \xi_i$ 。据井田内钻孔资料, 9 号煤层底板至奥灰层之间由本溪组、太原组 9 号煤层下部岩层组成, 岩性主要为泥岩、砂质泥岩、细砂岩、石灰岩等互层组合。隔水层实际量测厚度平均 60 m。根据井田钻孔资料统计分析 & 等效隔水系数换算, 9 号煤层底板等效隔水层厚度 $\sum M_i \xi_i = 46$ m。

3) 采矿对底板扰动的破坏深度 C_p 。该矿井为拟建矿井, 无煤层底板破坏深度的实测资料。据模拟试验, 煤层开采导致工作面底板一定深度范围岩体的应力状态发生变化, 随着采煤工作面的推进, 底板遭受重复破坏, 使底板破坏深度不断加大, 一般经过几次重复后逐渐趋于稳定, 最终在底板形成一个大包络线^[15] (图 1)。模拟试验结果表明, 采动形成的最大破坏带深度 26 m。

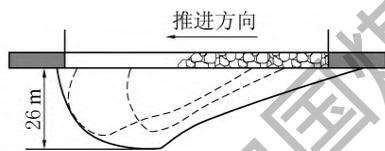


图 1 采动对底板重复破坏示意

又据底板扰动破坏深度经验公式:

$$C_p = 1.86 + 0.11L \quad (7)$$

式中, L 为采煤工作面斜长。

高家塔矿井可研设计综采放顶煤工作面长度为 200 m。如果底板没有遭受构造破坏, 则根据式 (7) 计算出的底板正常破坏深度为 24 m。

综合模拟试验成果及经验公式计算结果, 9 号煤层底板扰动破坏深度 $C_p = 25$ m。

4) 承压水导升带高度 h_d 。井田内本溪组下部为铁铝岩段, 厚度 1.6 ~ 12.5 m, 平均 7.96 m。呈鸡窝状分布的山西式铁矿之上为成层性较好但厚度变化较大的铝土泥岩。在正常地段稳定存在的铝土泥岩具有较强的隔水作用, 因此在完整岩层地段一般不会发生奥灰水导升, 即 $h_d = 0$; 但在有隐伏层间断裂构造等破坏地段 (即峰峰组顶部隔水缺陷区), 高压奥灰水将会向上导升。9 号煤层底板隔水层承受的奥灰水压为 2.84 ~ 5.44 MPa, 按平均

导升系数 2.5 m/MPa 估算, 在峰峰顶部隔水缺陷区导升高度为 7.1 ~ 13.6 m, 取平均值 10 m, 即 $h_d = 10$ m。

5) 奥陶系顶部相对隔水层厚度 M_0 。据井田钻孔资料, 奥陶系中统峰峰组岩性以石灰岩夹泥灰岩、角砾状泥灰岩、石膏为主, 上马家沟组岩性以石灰岩、泥灰岩为主。峰峰组顶部岩溶裂隙不发育, 岩溶形态以蜂窝状溶孔为主, 且被方解石、泥质物充填, 钻探未见漏水、测井未见出水层段, 形成相对隔水层 (段)。钻孔在揭露峰峰组 16 ~ 54 m 时开始出现涌水或漏水。峰峰组与上马家沟组顶部混合抽水试验资料表明, 含水层单位涌水量 0.11 ~ 1.94 L/(s · m), 混合水位标高平均 804 m, 上马家沟组富水性强于峰峰组。

综合钻孔资料, 峰峰组顶部岩溶溶孔被方解石、泥质物充填, 分析确定峰峰组顶部有效隔水层 (段) 平均厚度 22 m, 即 $M_0 = 22$ m; 在存在隐伏层间断裂构造等破坏地段, 为峰峰组顶部隔水缺陷区, 即 $M_0 = 0$ 。

3.3 底板突水危险性分析

由于全井田 9 号煤层均为带压状态, 当煤层底板与奥灰含水层间存在隐伏贯穿型导水构造时, 采掘工作面一旦接近或揭露, 就会引发矿井突水事故, 贯穿型隐伏导水构造 (断层、陷落柱) 及其附近为突水高危区。

当不存在隐伏贯穿型导水构造时, 则在井田不同标高段突水危险性不同。

根据《规定》公式 $T = P/M$ 及修正公式 $T = P / (\sum M_i \xi_i - C_p - h_1 + M_0)$, 对井田 9 号煤层底板突水系数进行计算, 并采用《规定》中“一般情况下, 在具有构造破坏的地段按 0.06 MPa/m 计算, 隔水层完整无断裂构造破坏地段按 0.1 MPa/m 计算”, 对开采 9 号煤层时的突水危险性进行分析。

井田内地质构造简单。在没有隐伏层间断裂构造的前提下, 奥灰峰峰组顶部有效隔水层之上的本溪组铝土泥岩层是完整连续的, 一般不会发生岩溶水导升 (即 $h_d = 0$)。在这种条件下, 采用不同突水系数公式计算结果见表 1。当峰峰组顶部存在由于隐伏层间断裂构造破坏造成的局部隔水缺陷区时, 其上部本溪组的铝土岩段一般也会出现断裂破坏, 从而造成高压奥灰水沿断裂裂隙向上导升, 此时 $M_0 = 0$, $h_d = 10$ m。在这种情况下, 煤层与奥灰

含水层间的有效隔水层厚度减小,突水系数将增大为0.26~0.49 MPa/m。即在峰峰组顶部至本溪组

底部存在隐伏层间断裂构造时,断裂构造破坏段均为突水高危区。

表1 9号煤层底板不同标高区段突水危险性预测及分区

突水系数公式	标高段/m	$T/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1})$	突水危险性预测	突水性分区
$T = \frac{P}{M}$	+580—+504	$0.043 \leq T < 0.060$	无突水危险	相对安全区
	+504—+320	$0.060 \leq T < 0.091$	完整岩层带无突水危险,井田断裂构造段有突水危险	相对危险区
$T = \frac{P}{\sum M_i \xi_i - C_p - h_1 + M_0}$	+580—+434	$0.067 \leq T < 0.100$	完整岩层带无突水危险,井田断裂构造段有突水危险	相对危险区
	+434—+320	$0.100 \leq T < 0.127$	完整岩层带也有突水危险	危险区

3.4 计算结果对比

由表1可以看出,采用《规定》公式计算,则井田内9号煤层底板突水系数为0.043~0.091 MPa/m,突水危险性分区为相对安全区至相对危险区;而采用修正公式计算,则井田内9号煤层底板突水系数为0.067~0.127 MPa/m,突水危险性分区为相对危险区至危险区。

显然,采用修正公式计算结果对井田进行突水危险区划分,其安全度高于《规定》公式。

在煤层带压开采过程中,一旦发生奥水突水,其结果将是灾难性的,因此,在煤层底板承受高压奥灰水的条件下,对煤层底板突水危险性分析预测及井田危险区划分为极为重要。如2004年9月21日河北省邯郸市峰峰矿区永顺煤矿开采有突水危险的9号煤层,在掘进过程中发生底板奥灰突水,造成该矿被淹。矿井突水通过采空区又溃入相邻矿井,造成相邻矿井被淹^[16];2010年3月1日内蒙古神华集团骆驼山煤矿在16号煤层回风大巷掘进中,遇煤层下方隐伏陷落柱,在水压和采动应力作用下,诱发该掘进工作面底板底鼓,承压水突破有限隔水层形成集中过水通道,导致奥灰水从煤层底板大量涌出,造成淹井^[17]。

笔者认为,对于无相邻矿井突水资料的拟建矿井,从安全角度出发,在同等条件下,采用安全度较高的分析预测结论作为煤层底板突水的预测预报结论,对矿井采掘安全是非常重要的,也是矿井防治水工作中需要特别注意的。采用突水系数修正公式对煤层底板突水性进行分析预测,更有利于矿井带压开采安全。

4 实际突水案例

以杨村煤矿为例。杨村井田位于兖州煤田的西

北部,井田含煤地层为石炭—二叠系。杨村煤矿开采太原组下组煤已多年,发生底板突水事故多起。杨村矿井实际突水资料可以佐证采用修正公式进行突水危险性预测及危险区划分更接近客观实际。

分别采用《规定》公式和修正公式对杨村井田16号煤层(局部)突水性进行预测并划分危险区(表2)。计算结果表明,采用《规定》公式计算结果划分4个分区(局部)均为相对危险区,而采用修正公式计算结果划分则为危险区。在矿井实际生产中,XT-13、XT-23、MT-9、MT-12点都是实际的突水点。由此可见,利用修正公式进行煤层底板突水危险性预测,其结果与实际情况更为接近,用以指导矿井安全生产其安全度更高、相应的防治水措施也会更有针对性。

表2 杨村井田不同突水系数公式计算结果对比

突水系数公式	16号煤层分区	$T/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1})$	完整岩层突水性	突水性分区
$T = \frac{P}{M}$	MT-1点	0.067	无	相对危险区
	MT-5点	0.061	无	相对危险区
	MT-11点	0.079	无	相对危险区
	MT-13点	0.076	无	相对危险区
$T = P/(\sum M_i \xi_i - C_d - h_1 + M_0)$	MT-1点	0.108	有	危险区
	MT-5点	0.100	有	危险区
	MT-11点	0.118	有	危险区
	MT-13点	0.110	有	危险区

5 结 论

1) 煤层底板突水系数公式历经我国矿山科技人员近50年的探讨、改进修正,每一次的改进修正都克服了之前公式的不足,所考虑的引发底板突水的各项影响因子也更加全面。

2) 采用《规定》公式及修正公式分别对高家

塔矿井 9 号煤层底板突水性进行分析, 分析结果表明: 采用《规定》公式计算的底板突水系数为 0.043 ~ 0.091 MPa/m, 突水危险性分区为相对安全区 - 相对危险区; 采用修正公式计算的底板突水系数为 0.067 ~ 0.127 MPa/m, 井田危安区划分为相对危险区 ~ 危险区。

3) 实际矿井突水资料表明, 若采用修正公式进行煤层底板突水危险性预测, 其结果与实际情况更接近, 用以指导矿井安全生产其安全度也更高。

4) 从预防底板突水、提高矿井生产安全的角度出发, 本文作者认为, 采用修正公式预测底板突水较《规定》公式更有利于指导矿井采掘安全。

参考文献:

- [1] 刘其声. 关于突水系数的讨论 [J]. 煤田地质与勘探, 2009, 37 (4): 34 - 37.
- [2] 刘玉德, 尹尚先, 顾秀根. 高突危险水体上煤层开采下限及带压开采分区研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2010, 6 (3): 54 - 59.
- [3] 马培智. 华北型煤田下组煤带压开采突水判别模型与防治水对策 [J]. 煤炭学报, 2005, 30 (5): 608 - 609.
- [4] 缪协兴, 陈荣华, 白海波. 保水开采隔水关键层的基本概念及力学分析 [J]. 煤炭学报, 2007, 32 (6): 561 - 564.
- [5] 孔海陵, 陈占清, 卜万奎. 承载关键层、隔水关键层和渗流关键层关系初探 [J]. 煤炭学报, 2008, 33 (5): 485 - 488.
- [6] 缪协兴, 浦海, 白海波. 隔水关键层原理及其在保水采煤中的应用研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37 (1): 1 - 4.

- [7] 冯利军, 郭晓山. 神经网络在矿井突水预报中的应用 [J]. 西安科技学院学报, 2003, 23 (4): 369 - 371.
- [8] 李白英. 预防矿井底板突水的“下三带”理论及其发展与应用 [J]. 山东矿业学院学报, 1999, 8 (4): 11 - 18.
- [9] 王经明. 承压水沿煤层底板递进导升突水机理的物理法研究 [J]. 煤田地质与勘探, 1999, 27 (6): 40 - 43.
- [10] 马培智. 原始导高垂直分带及其防治水意义探讨 [J]. 矿业安全与环保, 2005, 32 (6): 40 - 42.
- [11] 虎维岳. 矿山水害防治理论与方法 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2005.
- [12] 葛亮涛, 叶贵钧, 高洪烈. 中国煤田水文地质学 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000.
- [13] 白喜庆, 白海波, 沈智慧. 新驿煤田奥灰顶部相对隔水性及底板突水危险性评价 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (2): 273 - 280.
- [14] 董书宁, 刘其声. 华北型煤田中奥陶系灰岩顶部相对隔水段研究 [J]. 煤炭学报, 2009, 34 (3): 289 - 292.
- [15] 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): 31 - 35.
- [16] 赵苏启. 煤矿水害事故多发的原因 [J]. 劳动保护, 2006 (2): 90 - 92.
- [17] 国务院安全生产委员会办公室. 国务院安委会办公室关于两起煤矿特别重大生产安全事故调查处理结果的通报 [Z]. 北京: 国务院安全生产委员会, 2011 - 01 - 21.

作者简介: 王计堂 (1963—), 男, 山西原平人, 副教授, 硕士, 从事水文地质、煤矿地质方面的教学与研究。Tel: 13834581719, E-mail: wjt1963@126.com

收稿日期: 2011 - 02 - 19; 责任编辑: 曾康生

(上接第 123 页)

陷水域水质, 水质演变总体趋势向好的方向发展。

参考文献:

- [1] 徐良骥, 严家平, 高永梅. 煤矿塌陷水域环境现状分析及综合利用: 淮南矿区潘一煤矿塌陷水域为例 [J]. 煤炭学报, 2009, 34 (7): 933 - 937.
- [2] 刘劲松, 严家平, 徐良骥, 等. 淮南矿区不同塌陷年龄积水区环境效应分析 [J]. 环境科学与技术, 2009, 32 (9): 140 - 143.
- [3] 淮南市环境保护局. 淮南市生态环境现状调查 [R]. 淮南: 淮南市环境保护局, 2001.
- [4] 魏文礼. 计算水力学理论及应用 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2001.
- [5] 杨志峰. 环境水力学原理 [M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2006.

- [6] Reid R O, Bodine B R. Numerical Model for Storm Surges in Galveston Bay [J]. Journal of the Waterways and Harbors Division, ASCE, 1968, 94 (1): 33 - 58.
- [7] Sleigh P A, Gaskell P H, et al. An Unstructured Finite - Volume Algorithm for Predicting Flow in Rivers and Estuaries [J]. Computers and Fluids, 1998, 27 (4): 479 - 508.
- [8] 田向东. 安徽省蒸发量时空分布及变化趋势分析 [J]. 安徽水利水电职业技术学院学报, 2006, 6 (1): 52 - 54.
- [9] GB3838—2002, 地表水环境质量标准 [S].

作者简介: 李守勤 (1959—), 男, 安徽凤台人, 高级工程师, 现任煤矿生态环境保护国家工程实验室副主任, 长期从事矿山工程技术技术和管理的工作。Tel: 0554 - 7623620, E-mail: hkhj001@163.com

收稿日期: 2011 - 02 - 06; 责任编辑: 曾康生