文章编号：1673-3363-(2016)01-0140-06

复杂地质条件下的突水疏放试验及水文地质意义

齐跃明[1]，李民族[2]，许进鹏[1]

(1．中国矿业大学资源与地球科学学院，深部岩土力学与地下工程国家重点实验室，江苏 徐州 221116；
2．霍州煤电集团有限责任公司，山西 霍州 031400)

摘要 为了克服以往对突水过程认识和利用上的不足，通过综合分析突水点附近背景场及风险评估，利用山西某矿井巷道突水在复杂地质条件下的流场进行了疏放实验。结果显示，矿井突水在一定条件下可作为疏放试验来加以利用，可用来确定补给水源、记录突水量变化过程、获取含水层水文地质参数、揭示岩溶介质条件及突水原因等。该方法的实施，获取了常规方法难以获取的水文地质信息，为进一步分析突水原因、合理高效处置突水灾害提供了重要的科学数据。

关键词 突水；疏放试验；水文地质意义；背景场
中图分类号 TD 74 **文献标志码** A **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2016.01.022

Draining test of mine water inrush under complex geological conditions and its hydrogeological significance

QI Yueming[1]，LI Minzu[2]，XU Jinpeng[1]

(1．School of Resources and Geosciences，State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering，China University of Mining & Technology，Xuzhou，Jiangsu 221116，China；
2．Huozhou Coal Electricity Group Co Ltd，Huozhou，Shanxi 031400，China)

Abstracts In order to avoid lacking of awareness and usage of the process of water inrush, drainage test of mining water inrush on site were studied under complex geological condition on the base of a comprehensive analysis of the background field near the water inrush point and risk assessments. Results show that the process of mine inrush water under certain conditions can be successfully used as drainage test, and some following roles can be gained such as determining the water source, revealing hydrodynamic process, calculating hydrogeological parameters, and revealing the Karst medium conditions and reasons for water inrush, and so on. The new method has been carried out to get access to hydrogeological information which was difficult to get using routine methods, providing important scientific data for analyzing water inrush reasons, and dealing with efficiently water inrush disaster.

Key words water inrush；draining test；hydrogeological meaning；background fields

我国许多煤田水文地质条件十分复杂，矿井水害已成为煤矿安全生产的主要灾害之一。而水害中危害最大的又是矿井突水，这是一种在井巷工程开拓过程或矿床开采时，一种或多种充水水源突然大量进入矿井空间的现象。突水的发生轻则造成生产条件恶化，重则淹没巷道与矿井，造成人身伤亡及巨大财产损失。经国家煤矿安全监察局等发布的资料统计，从 2001 到 2013 年期间，全国共发生重特

收稿日期：2015-01-29 **责任编辑**：王喆
基金项目：国家自然科学基金项目(41002087，51374203)；中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014QNB51)
作者简介：齐跃明(1977—)，男，湖南省长沙市人，博士，副教授，从事水文地质与水灾害防治方面的研究。
E-mail：ym_qi @126.com **Tel**：13914880319

大水害事故 496 起，死亡 3 155 人。即使在美国，煤矿工作也成为了最危险的职业[1]。

鉴于突水危害巨大且具有突发性和难以预测性，目前，国内外许多学者从不同的角度对突水的类型、机理、影响因素、防治方法、突水的相关判据及预测预报方法等进行了大量的实验及理论研究[2-6]。以往研究表明，在顶板水害、底板水害、老空水害、地表水害及构造带水害等各种突水类型中，突水与水文地质条件、地质构造、人为采动等因素密切相关。其中，水源、导水通道、水压(形成驱动水流运动的水力梯度)及水量(通常超过正常排水能力)常常构成突水的 4 个必要条件。而诸多因素中，除人为采动外，其他因素均可归属于水文地质条件。大量突水案例表明，突水的一个最主要的原因是矿山或隧道的水文地质条件没有被正确识别和掌握[7-9]。在采掘活动中，人们按有关规范的要求遵循“先探后掘、先治后采”的方针，探放水成了煤层开采前的一项基本工作[10]。然而，由于断层、陷落柱等构造不明，巷道穿越区水文地质条件复杂，开挖带来一定的围岩破坏或工程扰动，在产生各种各样的水文地质问题[11]的同时，受物探、钻探、化探等手段自身技术的局限，对充水水源探测不够准确[12]，主动疏放有时效果不佳，导致突水事故时有发生[13]。为了避免突水之后所带来的严重政治影响及生产快速恢复的需要，矿方通常是选择一条“快速救援、快速治理”的办法进行处理。这种处理方法对于矿井生产的及时恢复及消除政治影响是非常必要的，但对于矿井突水的科学研究来说，则未必是最佳选择。因为，突水后没过多久，通常就采用注浆等方法加以封堵，突水的过程很快就遭受人为控制，矿井水文地质条件很难得到充分暴露与识别。在后续的生产活动中，仍然需要花很大力气进行识别。这无形中增加了成本，减少了水文地质信息量，增加了突水机理的认识难度，尤其是突水通道的认识。在本文中，作者提出突水后，尽可能综合分析矿井所处的各种背景场(水动力场、采动应力场及介质场等)，在风险可控且经济能力能够承受的条件下，适当延长一下出水时间，在巷道内利用突水点进行适应各种场的突水疏放试验，获取大量实际数据，充分揭示矿井的水文地质条件。这对于准确识别矿井水文地质条件，节省安全生产成本，帮助实施高效的防治水技术决策来说也许具有更加独特而重要的实际意义。

1　事发矿井概况

山西某煤矿位于山西省中南部，井田形态呈北东-南西向长条形分布，北东-南西长约 9 km，北西-南东宽约 4 km，面积约 35.6 km^2。

矿井设计生产能力 210 万 t/a，地质储量 3.13 亿 t，可采储量 1.71 亿 t。主要可采煤层有 4 层，分别为 1$^{\#}$，2$^{\#}$，10$^{\#}$和 11$^{\#}$。分 2 个水平开采：一水平为+80 水平，开采上组煤 1$^{\#}$，2$^{\#}$煤层，二水平为-15 水平，开采下组煤 10$^{\#}$，11$^{\#}$煤层，目前仅开采上组煤，生产服务年限 58.3 a，为立井开拓方式。

该矿属于全带压开采矿井，奥陶系地层静水位标高 520 m，2$^{\#}$煤开采最低标高-70 m，2$^{\#}$煤最大承压约 5.9 MPa。主要含水层有石炭系下石盒子组 K8，K9 砂岩含水层；太原组 K2(其中的水简称 K2 灰岩水)、K3 灰岩岩溶裂隙含水层；奥陶系峰峰组上段碳酸盐岩岩溶裂隙含水层；奥陶系上马家沟组上段碳酸盐岩岩溶裂隙含水层(其中的水简称为奥灰水)。其中，K2 灰岩平均厚度 9 m，峰峰组上段平均厚度 30 m，上马家沟组上段平均厚度 60 m，是本井田煤系地层下伏的主要含水层。含水层水位采用 10 个水文观测孔进行自动观测(图 1)，但因各种原因，待疏放试验时，已失效 4 个，可用的有 6 个。

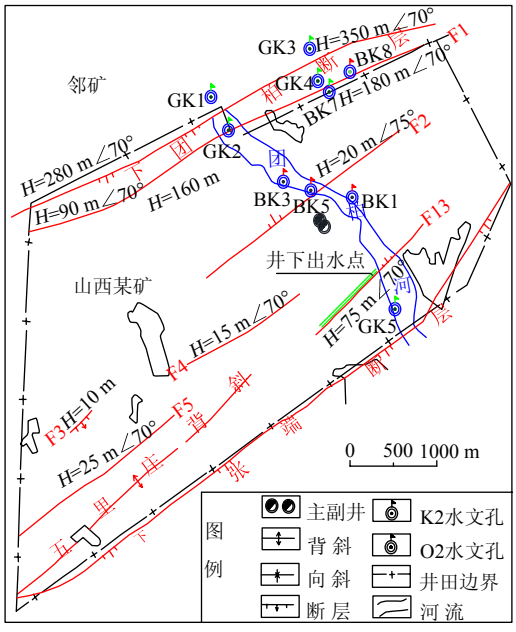


图 1　水文观测孔及主要构造情况

Fig.1　Structures and observation boreholes in study area

矿井内地质条件复杂，断层、陷落柱发育，断层走向多为北东、北北东向，其中，F13 断层位于矿井的中部，倾角 70°，倾向北，落差 55~80 m。

南北 2 条规模较大正断层为矿井自然边界，其构造形迹展布服从于区域构造规律。

2 突水经过

2012 年 11 月 1 日，井下 2-1081 反掘工作面在掘进 260 m 长度时，巷道两帮、底板矿压显现明显，两帮回缩量约 0.5~0.6 m，底鼓量约 0.8 m。12 月 3 日，巷道右帮压力增大、3 根帮锚索拉断(帮锚索 6 m 长)、帮部开裂。12 月 4 号 0 点班 2 时 53 分，距离工作面迎头 20 m 处滞后出水，右帮顶上第 1 根锚杆处有少量涌水，刚开始约 3~5 m^3/h，3 时 55 分涌水量约 30 m^3/h 左右，4 时 03 分后涌水量又减小至 20 m^3/h，5 时 23 分涌水量迅速增大，6 时 30 分涌水量大约 730 m^3/h，至 4 日 13 时将 2-1081 反掘巷 300 m 淹没，水进入 2-108 联巷，至 19 时淹没联巷 100 m。随着紧急排水的顺利进行，水位控制在距 2-1081 联巷口前 90 m 处，参见图 2。

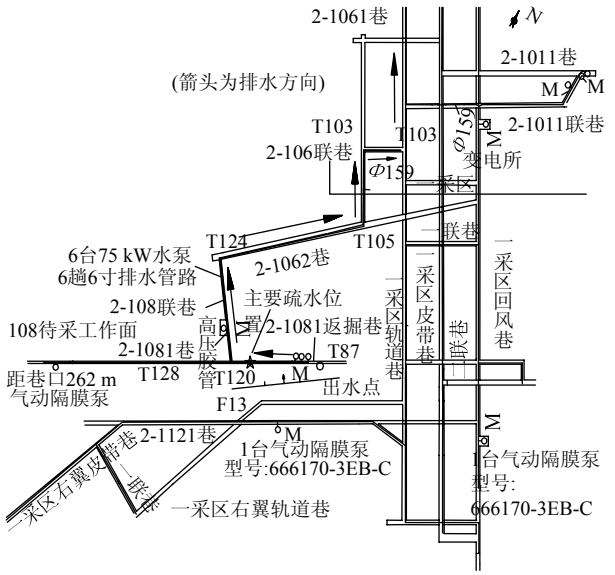


图 2 出水点、主要疏水点及附近巷道分布

Fig.2 Underground working face arrangement surrounding the water inrush point

3 突水疏放试验设计

3.1 疏放水工艺概述

一般的探放水工艺通过钻孔往潜在水源区域钻进，揭穿水源而疏放出水，通常只为疏放当前工作面潜在充水水源，为当前工作面煤层开采服务，是一种短期水害防治目标；而本文的突水疏放工艺，是在一定条件下，直接利用矿井井下突水点对潜在充水水源(构造带水、含水层水等)进行疏放。由于突水点水源往往是从构造带或含水层中来，具有较强的连通性，它可以做到既为当前工作面又为全矿井生产服务，达到既注重短期更着眼于长期的水害防治目标。

3.2 风险评估

试验的风险评估是非常必要的，它是后续疏放试验能否进行及是否合理的前提与基础。主要在 2 个方面进行评估：1) 背景场及其影响评估；2) 经济性评估。背景场及其影响评估主要包括试验周边巷道及工作面的岩体介质场、水动力场及应力场，根据现场实地观察、应力测试及数值模拟来判断各种背景场的稳定性。实际分析表明，由于出水点相邻的 108 工作面为待产工作面，疏水实验的周边还仅仅只是几条简单的巷道，周边留设有足够的安全保护煤柱，岩体介质场和应力场的扰动相对变化不大。其次，1081 等各种巷道支护较好，具有较好的工程稳定性。拟实施疏放任务的 1081 反掘巷长达 300 m，围岩支护较好，有进行疏放试验的操作空间，选定疏放的地点是巷道内最稳定的地段，能保证疏放时水动力场不会对巷道围岩的稳定性产生影响。综合分析得出疏放水试验对 108 反掘巷周边的背景场影响有限。经济性评估方面，由于论证突水防治采用具体的工程措施与方案还需要较长时间，此时，如果拖延排水势必造成淹井，带来更大损失。因此决定，在论证期间准备充足的排水设备，首先在 1081 反掘巷中进行突水疏放试验，获取更多的试验资料，赢得时间，为后续制订措施与方案论证提供更多的科学依据。

3.3 疏放目的

1) 控制井下排水，尽量把突水控制到 1081 反掘巷内，不让其再流入到其他巷道或工作面而影响生产；2) 观察突水疏放量变化特征，了解突水规律；3) 观察分析突水后的主要含水层石炭系太原组 K2 灰岩及中奥陶系 O_2 灰岩的地下水流场特征，分析补给通道发育情况、影响半径与补给速度，计算水文地质参数，揭示水文地质条件，为正确实施后续防治水工程提供科学依据。

3.4 疏放工艺及数据采集

为保障突水能及时排出，采用 3 台大流量(2 台 450 m^3/h 和 1 台 300 m^3/h)排水泵排水，二用一备，通过潜水泵排水能力、流量计及巷道容积法综合测算突水疏放量。含水层水位通过 6 个有效的水文观测孔进行自动观测(图 1)。突水点水质变化情况通过在突水巷道内采取水样进行化验来获得。

3.5　数据整理

突水后，进行突水疏放试验得到的水质变化情况、水量变化曲线及水位动态曲线分别如表 1 和图 3，4 所示。

表 1　突水水质-时间变化表

Table 1　Change of water quality of water inrush　　mg/L

采样日期	颜色	pH	K^++Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	M	总硬度
2012-11-27	微黑	8.20	206.9	21.2	18.3	367.3	208.3	46.3	894.9	128.1
2012-12-04	黑	7.71	79.8	73.2	39.8	385.4	159.8	51.5	795.8	346.0
2012-12-05	无色透明	8.15	81.9	74.9	44.2	309.7	220.0	41.6	783.7	368.9
2012-12-06	无色透明	7.61	90.3	93.2	48.4	314.5	262.7	46.4	865.8	431.7
2012-12-07	无色透明	7.45	78.5	95.6	54.6	318.0	255.7	44.5	857.4	463.4
2012-12-01	无色透明	7.51	90.0	105.9	60.6	301.3	334.0	63.6	960.4	513.8
2012-12-11	无色透明	7.51	71.5	110.2	47.5	309.3	328.8	49.1	921.0	470.6
2012-12-15	无色透明	7.44	64.5	108.2	53.5	298.4	277.5	48.0	859.2	490.6
2012-12-17	无色透明	7.58	75.0	99.1	60.5	296.5	342.0	48.0	928.9	496.6
2012-12-19	无色透明	7.78	62.9	113.4	59.1	318.0	311.8	51.3	925.2	526.4
2012-12-21	无色透明	7.69	82.3	106.1	64.0	300.4	391.6	46.7	1000.3	528.2

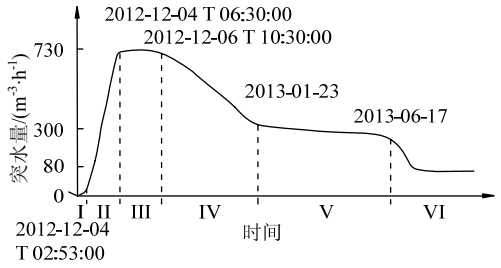


图 3　突水疏放量随时间变化曲线

Fig.3　Changing curve of water inrush flow rate with time

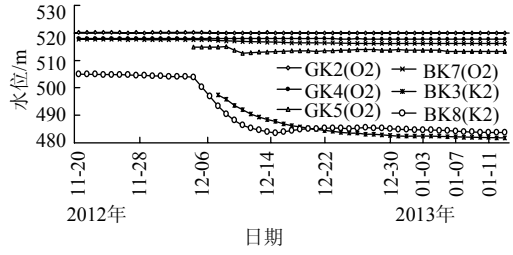


图 4　观测孔水位-时间动态变化曲线

Fig.4　Changing curve of groundwater table with time in observation boreholes

4　水文地质意义

4.1　确定补给水源及水质

水样化验分析(表 1)表明，2012 年 11 月 27 日突水前，Na^+含量高，Ca^{2+}、Mg^{2+}离子小，矿化度低，成分为巷道顶板砂岩渗水。12 月 4 日突水后，Ca^{2+}、Mg^{2+}离子显著增加，Na^+含量剧减，矿化度 M 逐渐增大，水质为 SO_4HCO_3-CaMg(Na)型水，与石炭系太原组 K2 灰岩水水质相近。12 月 21 日之后，M 增加很快，超过了 1 000 mg/L，由 K2 灰岩水质逐渐掺杂奥陶系灰岩水成分。图 1，4 也表明，突水后，出水点以北距离分别为 1 600，2 500 m 的 K2 灰岩观测孔 BK3 和 BK8 水位发生了明显的变化；而奥灰水位除 GK5 稍有变化外，其他观测孔水位变化不大。说明矿井突水直接补给水源是 K2 灰岩水，间接补给水源为奥灰水。

4.2　揭示突水量变化过程

图 3 表明，矿井突水疏放量总体上呈先快速增加后减小的一个多阶段动态过程，该过程可分为 6 个子阶段，分别为：I-水能蓄势阶段，此阶段突水呈现渗水状态；II-水量快速增加段，此阶段涌水量快速增大；III-最大水量维持段，此阶段突水量一定时间和幅度范围内保持峰值状态；IV-水量衰减段，此阶段由于补给量衰减或通道堵塞等原因，使得水量衰减；V-水量稳定段，此阶段突水量呈一个稳定状态；VI-水量衰减与稳定段，该阶段的出现主要是南面又有一个相邻工作面出水了，分流了补给水量，使得当前突水点水量衰减了，经过一段时间后水量又趋于稳定。

4.3　获取水文地质参数

从图 4 可看出，BK3，BK8 相较其他观测孔，其水位变化的响应速度要快得多，说明从 BK3，BK8 到突水点之间存在有强径流通道，应该是导水性非常好的岩溶裂隙通道，该通道甚至可能与隐伏断层叠加。这也就直接导致了突水前期，地下水流场并不符合类似孔隙介质中水头近低远高的特征，而是

呈现导水通道通畅的附近水头下降快、导水通道不通畅的地方水头下降慢的非稳定紊流特征。所以，突水前期的数据不太适合直接运用地下水动力学公式来求取水文地质参数。

进一步分析图 3，4 的水量水位变化特征，可看出，2013 年 1 月 9 日后突水量及观测孔水位均基本趋于稳定，此时 BK3 与 BK8 水位体现为近突水点低而远突水点高的稳定流特征，此时，即可把矿井近似看成是一个统一的流场来对水文地质参数进行平均估算，因而可采用 BK3，BK8 这 2 个观测孔后面稳定段流量降深数据，依据水动力学 Dupuit 稳定流公式，有

$$S_1 - S_2 = \frac{Q}{2\pi\overline{T}}\ln\frac{r_2}{r_1} \tag{1}$$

这里，降深 S_1=23 m，S_2=21 m，涌水量 Q=300 m^3/h=7200 m^3/d，出水点距 BK3 距离 r_1 为 1 600 m，距 BK8 的距离 r_2 为 2 500 m。K_2 含水层厚度为 9.11 m，因此，可求得平均导水系数 $\overline{T}$ 为

$$\begin{aligned}\overline{T} &= \frac{Q}{2\pi(S_1 - S_2)}\ln\frac{r_2}{r_1}\\ &\approx \frac{7200}{2\pi(23-21)}\ln\frac{2500}{1600} \approx 255.83\ \mathrm{m^2/d}\end{aligned} \tag{2}$$

而平均渗透系数 $\overline{K}$ 为

$$\overline{K} = \frac{\overline{T}}{M} \approx \frac{255.83}{9.11} \approx 28.08\ \mathrm{m/d} \tag{3}$$

从上述求出的 K2 灰岩平均导水系数 $\overline{T}$ (约为 255.83 m^2/d)，平均渗透系数 $\overline{K}$ (约为 28.08 m/d)可看出，即使在平均意义上，该两数值也仍比通常的砂岩裂隙中的参数值偏大许多，仍体现出岩溶管道流的特征。

值得指出的是，尽管突水导水通道形状、大小及数目的多少不得而知，但是仍然可以通过疏放试验得到稳定流场，然后运用上述水动力学方法确定 K2 含水层在平均意义上的水文地质参数，这是传统物探、化探、钻探方法所不能做到的。

4.4 揭示岩溶介质条件及突水原因

根据突水疏放试验中水量、水位、水质变化等水文地质资料的综合分析可知，K2 灰岩和奥灰存在着密切的水力联系，K2 灰岩补给通道具有各向异性，存在有强径流通道，主导水方向为北东-南西方向，呈管道流状态，次导水方向为西北-东南方向，呈小型管流状态；其他方向虽存在水力梯度，但岩体较完整、裂隙不太发育，导水性不太好。F13 断层带较长且断距大(近 80 m)、突水点附近右帮距断层距离小(只有 13 m)，右帮煤壁在地应力作用下发生失稳破坏，原本不导水的 F13 断层在靠近突水点附近发生应力集中，断层开始活化，伴生裂隙扩展，最终沟通了 K2 灰岩水和奥灰水。通过学习前人文献[14-15]并结合自身成果，综合诊断此次突水原因为高承压水高地应力联合影响下的断层活化导水。

5 结 论

1) 突水是矿井生产中常见的危害性较大的一种灾害，具有复杂性及难预测性。人们通常采用“快速救援、快速治理”的方式来处理。这对于消除政治影响、尽快恢复生产是重要的。然而，从科学研究的角度来看，这种处理方式未必是最佳的，它有可能没有充分发掘突水所带来的水文地质信息及意义，可能造成后期生产的安全投入增大。

2) 笔者以山西某煤矿为例，在经过风险分析及准备了充足排水能力的条件下，根据综合目标需要进行了突水疏放试验，疏放试验揭示了突水疏放量变化呈一个多阶段动态过程，补给直接水源是 K2 灰岩水，间接水源为奥陶系灰岩水，K2 灰岩得到奥灰补给，具有强径流集中导水通道，K2 灰岩平均导水系数 $\overline{T}$ 约为 255.83 m^2/d，平均渗透系数 $\overline{K}$ 约为 28.08 m/d，和奥陶系灰岩均具有强烈的非均质各向异性等。

3) 实例研究表明，通过适应多重背景场的突水疏放试验可以较充分地挖掘突水过程的水文地质信息，揭示常规方法难以揭示的矿井水文地质条件，节约探放水成本，为分析突水原因及后续准确制定矿井防治水决策提供宝贵的水文地质数据和科学依据。

参考文献：

[1] ASFAW A，MARK C，PANA-CRYAN R．Profitability and occupational injuries in U S underground coal mines [J]．Accident Analysis and Prevention，2012，50(1)：778-786．

[2] 武强，崔芳鹏，赵苏启，等．矿井水害类型划分及主要特征分析[J]．煤炭学报，2013，38(4)：561-565．
WU Qiang，CUI Fangpeng，ZHAO Suqi，et al．Type classification and main characteristics of mine water disasters[J]．Journal of China Coal Society，2013，38(4)：561-565．

[3] 白海波，茅献彪，吴宇，等．高压奥灰水大型逆断层下盘煤层安全开采研究[J]．岩石力学与工程学报，2009，28(2)：246-252．
BAI Haibo，MAO Xianbiao，WU Yu，et al．Research on

water-reserved mining with high water pressure under large-scale thrust-fault in Ordovician Karst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2009，28(2)：246-252.

[4] 施龙青．底板突水机理研究综述[J]．山东科技大学学报，2009，28(3)：17-23.
SHI Longqing. Summary of research on mechanism of water inrush from seam floor[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology，2009，28(3)：17-23.

[5] 李连崇，唐春安，李根，等．含隐伏断层煤层底板损伤演化及滞后突水机理分析[J]．岩土工程学报，2009，31(12)：1838-1844.
LI Lianchong，TANG Chun'an，LI Gen，et al. Damage evolution and delayed groundwater inrush from micro faults in coal seam floor[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2009，31(12)：1838-1844.

[6] 靳德武，刘英锋，刘再斌，等．煤矿重大突水灾害防治技术研究新进展[J]．煤炭科学技术，2013，41(1)：25-29.
JIN Dewu，LIU Yingfeng，LIU Zaibin，et al. New progress of study on major water inrush disaster prevention and control technology in coal mine[J]. Coal Science and Technology，2013，41(1)：25-29.

[7] VALENTINA V，ALESSANDRO G，NICO G，et al. Differential hydrogeological effects of draining tunnels through the Northern Apennines，Italy[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering，2014，47(3)：947-965.

[8] 傅耀军，华解明，方向清．试论煤田(矿)水文地质问题及勘探技术方法[J]．华北科技学院学报，2009，6(4)：7-10.
FU Yaojun，HUA Jieming，FANG Xiangqing. The study on hydro-geological problems and technical methods of exploration[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology，2009，6(4)：7-10.

[9] WU Qiang，ZHOU Wanfang，GUAN Entai. Emergency responses to water disasters in coalmines，China[J]. Environmental Geology，2009，58(1)：95-100.

[10] 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，2009：1-50.

[11] GISBERT J，VALLEJOS A，GONZALEZ A，et al. Environmental and hydrogeological problems in Karstic terrains crossed by tunnels：a case study[J]. Environmental Geology，2009，58(2)：347-357.

[12] 刘盛东，刘静，岳建华．中国矿井物探技术发展现状和关键问题[J]．煤炭学报，2014，39(1)：19-25.
LIU Shengdong，LIU Jing，YUE Jianhua. Development status and key problems of Chinese mining geophysical technology[J]. Journal of China Coal Society，2014，39(1)：19-25.

[13] ZHU Bin，WU Qiang，YANG Jianwen，et al. Emergency responses to water disasters in coalmines，China[J]. Environmental Geology，2009，58(1)：95-100.

[14] 李凯，茅献彪，陈龙，等．采动对承压底板断层活化及突水危险性的影响分析[J]．力学季刊，2011，32(2):261-268.
LI Kai，MAO Xianbiao，CHEN Long，et al. Research on fault activation and risk analysis of water inrush in mining floor above confined aquifer[J]. Chinese Quarterly of Mechanics，2011，32(2)：261-268.

[15] 许进鹏，张福成，桂辉，等．采动断层活化导水特征分析与实验研究[J]．中国矿业大学学报，2012，41(3)：415-419.
XU Jinpeng，ZHANG Fucheng，GUI Hui，et al. Characteristics and experimental study of water conduction caused by fault activation due to mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology，2012，41(3)：415-419.