

网络出版时间与地址: 2011-11-15 15:07; www.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20111115.1507.015.html

构造破碎带滞后突水渗流转换理论与试验研究

李文平¹, 刘启蒙², 孙如华¹

(1. 中国矿业大学, 江苏 徐州 221008; 2. 安徽理工大学, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 为了揭示煤矿构造破碎带易发生滞后大型突水内在机理, 寻求其治理理论和试验依据, 在收集我国煤矿典型断层和陷落柱滞后型突水实例并分析其特征的基础上, 设计进行了高水压下构造破碎带突水模拟试验, 得到了不同充填物类型构造破碎带, 在1~5 MPa的水压下, 充填物冲出量、突水量随时间的变化曲线; 发现水压小时构造破碎带突水量随时间变化不大、高水压下由小到大变化过程特征。据此进行理论分析认为, 高水压条件下构造破碎带突水是一伴随内部组成结构变化的“孔隙流—裂隙流—管道流”渗流类型转换过程, 渗流转换是构造破碎带滞后型突水的内在机理; 治理构造破碎带大型突水就是改造其管道、裂隙状结构成孔隙介质直至不透水带的过程。

关键词: 构造破碎带; 水压; 突泥(砂); 突水; 渗流转换

中图分类号: TD742.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2011)11-0010-04

Theoretical and Experiment Study on Vadose Conversion of Water Inrush Later Occurred from Structure Broken Zone

LI Wen-ping¹, LIU Qi-meng², SUN Ru-hua¹

(1. China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: In order to reveal the inherent mechanism of a large water inrush later occurred from the structure broken zone in a mine and to seek the control theory and the experiment bases, based on the collection of the mine typical fault and sink hole late type water inrush cases and the analysis of the features, a water inrush simulation experiment from structure broken zone under a high water pressure was designed and conducted. The variation curves of the filling material inrush quantity and the water inrush quantity with the time were obtained from the different filling material type structure broken zone under the water pressure of 1~5 MPa. It was found that when the water pressure was low, the water inrush quantity from the structure broken zone would be no big variation with the time passed and when the water pressure was high, the water inrush quantity would have a feature of small quantity to high quantity process. The theoretical analysis showed that the water inrush from the structure broken zone under the high water pressure condition would be a conversion process of the "pore flow to crack flow to pipeline flow" with the inner composition structure variation. The vadose conversion would be the inherent mechanism of the late type water inrush from the structure broken zone. The treatment and control of the large water inrush from structure broken zone would be a process to reform the pipeline and crack structure to the pore medium and till no permeability zone.

Key words: structure broken zone; water pressure; mud (sand) inrush; water inrush; vadose conversion

突水事故是我国煤矿的主要事故之一, 随着煤矿采深增大, 充水含水层水压增高, 重大突水事故有增大的趋势。据统计, 我国煤矿80%的重大突水事故与构造破碎带(断层及陷落柱)导水有关^[1-4]。事故调查显示, 在煤矿井下许多构造破碎带突水事故有滞后型特点^[5-9]; 即采掘刚揭露破碎

带时, 不突水或出水较小; 随着时间的增长, 突水量不断增大, 最后发展成为大型、特大型涌突水事故。目前已有研究主要是针对断层及陷落柱发育的空间位置和天然状态下导水性探查、陷落柱形成条件及类型划分、突水后堵水工程设计及施工技术和工艺等研究^[10-12], 类似本文从水渗流动力学、水

收稿日期: 2011-08-18; 责任编辑: 曾康生

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41172290, 40572160)

作者简介: 李文平(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事煤矿工程地质与水文地质科研与教学工作。Tel: 13852438788,

E-mail: wpli@cumt.edu.cn

岩相互作用，试验和理论研究矿井高水压下构造破碎带结构及渗流类型变化过程，产生滞后突水的内在机理，则少有研究报道。表 1 给出了高水压下构

造破碎带突水典型事例 12 例，可发现随着水压增高，滞后型突水愈明显、最大突水量总体呈增大的特征。

表 1 煤矿典型构造破碎带突水事故

序号	地点	日期	突水量 / (m ³ · h ⁻¹)		最大突水滞后时间 / h	水源	水压 / MPa	通道
			初始	最大				
1	开滦范各庄煤矿	1984 - 06 - 02	365	123 180	960.0	奥灰	6.04	陷落柱
2	皖北任楼煤矿	1996 - 03 - 04	60	34 570	8.5	奥灰	5.00	陷落柱
3	徐州张集矿	1997 - 02 - 18	65	24 098	10.5	奥灰	4.50	陷落柱
4	肥城陶阳矿	1985 - 08 - 06	276	6 420	120.0	奥灰	1.14	断层
5	滕州金庄矿	2004 - 06 - 10	8	3 000	48.0	侏罗系砾岩	3.80	断层
6	徐州三河尖矿	2002 - 10 - 26	20	2 170	6.5	奥灰	7.50	断层
7	郑州卢沟煤矿	1997 - 05 - 04	5	2 650	96.0	奥灰	1.80	断层
8	井陘临城矿	1995 - 11 - 29	450	2 520	36.0	太灰	2.00	断层
9	皖北祁东煤矿	2001 - 11 - 24	10	1 670	22.0	松散层底砾层	3.60	断层或采动破裂岩体
10	焦作冯营矿	1973 - 11 - 26	54	1 620	48.0	底板八灰	1.90	断层
11	焦作王封矿	1973 - 04	12	1 020	48.0	奥灰	3.30	断层
12	淮北朱仙庄煤矿	2010 - 10 - 02	0	6	>1.0 a	太灰上段 (1 - 2 灰)	6.50	逆断层

1 高水压下构造破碎带突水渗流转换试验

1.1 试验设计及设备

依据部分相似条件（几何尺寸、物理性质），用实际水压设计构造破碎带突水试验模型（图 1），试验过程中保持水压不变，充填物配置成分原型来自对兖州东滩矿四采区 1 号断层的井下调查和取样分析（图 2），用石子、粗砂、黏土的不同配比，模拟不同性质构造破碎带充填物的情况（表 2）。

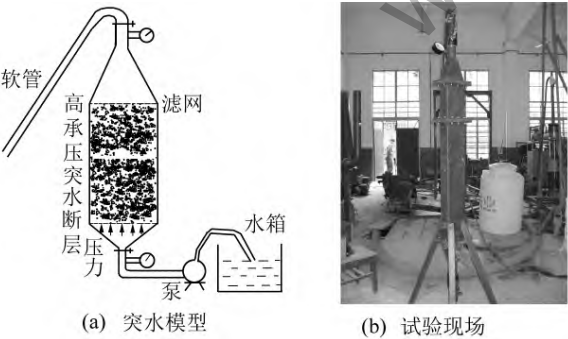


图 1 高水压下构造破碎带突水模型示意

1.2 试验数据处理

试验测试了 3 种类型构造破碎带不同水压下（1、3、5 MPa）的突水量、泥砂突出量随时间的变化，泥砂突出量 Q 按 20 s 间隔内累计，变化曲线如图 3、图 4 所示。

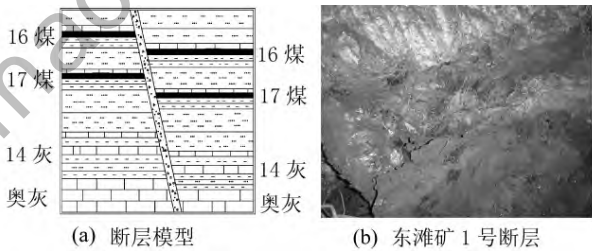


图 2 模型试验的原型断层与东滩矿四采区 1 号断层
表 2 模拟不同类型构造带充填物质配比

编号	体积 / m ³			石子: 粗砂: 黏土 (体积比)	模拟构造破碎带类型
	石子	粗砂	黏土		
1	0.010 2	0.003 4	0.003 4	3: 1: 1	A
2	0.006 8	0.003 4	0.006 8	2: 1: 2	B
3	0.001 7	0.003 4	0.011 9	1: 2: 7	C

注: A 为张性正断层, 松散充填陷落柱; B 为张或压扭性断层, 较密实充填陷落柱; C 为压性逆断层, 密实充填陷落柱。

1.2.1 突水量变化分析

1) 突水的初始阶段, 水量较小, 随着承压水对构造破碎带的不断冲刷和扩径作用, 突水量开始增大, 当破碎带中的泥、砂等细粒被冲刷掉以后, 由于突水通道不再变化, 突水量增幅趋于稳定。

2) 突水量与时间变化曲线中, 每条曲线都有水量增幅的跳跃, 对应的时间段, 就是渗流方式 (类型) 变化导致水量的变化。

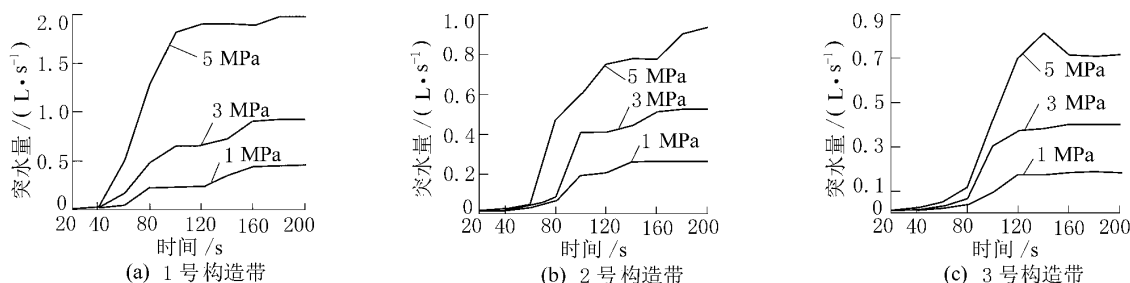
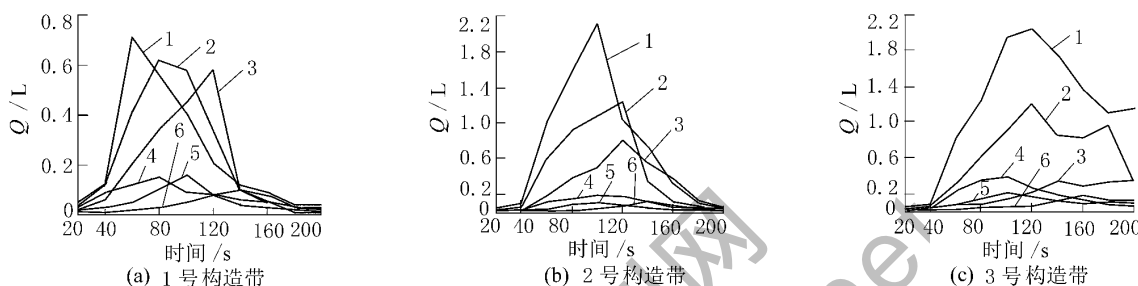


图 3 构造破碎带不同水压下突水量变化



1、2、3—黏土构造带水压分别为 5、3、1 MPa; 4、5、6—砂土构造带水压分别为 5、3、1 MPa

图 4 构造破碎带不同水压下泥砂突出量变化

3) 突水量随突水压力的增大而增大, 随着水压的增大, 渗流类型转换的时间明显缩短。

4) 由于充填物中组成不同, 相同水压下, 1 号、2 号、3 号破碎带突水量依次减小。

1.2.2 泥砂突出量变化分析

1) 在一定的时间段内, 突出量都有一个由小变大, 又由大变小的过程, 存在一个突出量的峰值。原因是在突水的过程中的持续冲刷作用使得黏土和砂的含量在不断减小。

2) 黏土和砂量突出随着突水压力的增大而增大, 一般突出黏土量大于突出砂量, 这是由于黏土的颗粒较小, 较容易受到冲刷作用的影响。

3) 随着突水压力的增大, 黏土和砂量的突出量不断增大, 到达峰值的时间在缩短, 这是因为压力越大冲刷能力越强, 冲刷的速度越快。

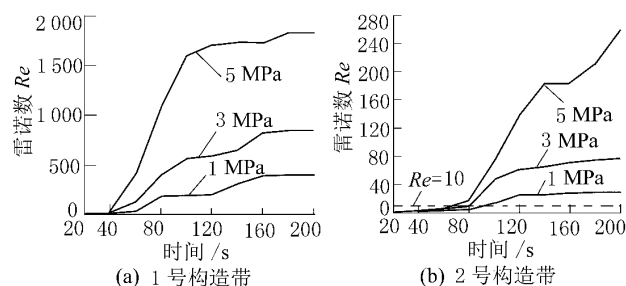
4) 由于黏土和砂不断被冲刷出断层破碎带, 断层带突水通道和断层破碎带充填物的空隙度发生变化, 使得渗透系数发生变化, 最终影响流态和渗流方式发生变化。由此可见, 断层破碎带中充填物成分的变化是突水量和渗流方式发生变化的基础。

2 高水压下构造破碎带突水渗流转换分析

根据地下水在地下岩体不同空隙中的流速不同, 可将地下水流动类型分为 3 类: 孔隙流、裂隙流、管道流。可用雷诺数 Re 大致判断, $Re \leq 1 \sim 10$

时, 流体的流态为层流且渗流符合 Darcy 定律; 雷诺数 Re 再大则会由层流转入紊流, 有些学者根据试验求得层流转换至紊流的临界 Re 为 $100 \sim 300$, 巴甫洛夫斯基求得临界 Re 为 $7 \sim 9$ 。

根据试验所用充填物的平均粒径、不同突水量时的渗流速度计算值、水流的动力粘滞系数等, 可以计算得到对应不同突水量、不同突泥突砂量时的水流雷诺数 Re , 这里给出 1 号、3 号断层模拟试验雷诺数 Re 历时变化, 如图 5 所示。

图 5 断层不同突水压力下的雷诺数 Re 变化曲线

基于上述试验结果, 结合煤矿大量断层和陷落住突水实际特征, 综合分析提出高水压下构造破碎带突水渗流转换理论观点: 构造破碎带在突水开始时, 充填物 (泥、细砂等) 未被冲出, 空隙以孔隙为主, 可近似为孔隙流, 符合达西定律, 突水量小。当充水水源水压较大时, 破碎带中的泥、砂被逐渐冲出, 孔隙不断增大, 形成连通性增强的裂

隙，水流由孔隙流转入裂隙流，突水量呈不断增大变化过程。对应一定水压值，相应粒径的泥砂突出量会经历由小到大，再到小的过程如图 3 和 4 所示，最终停止泥砂突出而只有水突出，此时突水量趋于稳定；当水压足够大或充填的泥砂较松散时，大量的泥砂被高压冲出，最后构造破碎带会形成类似岩溶管道的通道，形成管道流，产生特大突水。由于各种构造破碎带充填程度差异大，其充填物组成、粒径、密实程度等不同，发生由“孔隙流—裂隙流—管道流”的渗流转换类型、最终能形成管道流突水的临界水压值是不同的；结合本试验和大量煤矿突水实例，可将煤矿突水的这一临界值初步定为 2~5 MPa。

3 渗流转换理论在水害防治方面的应用

1) 构造破碎带突水量预计。根据渗流转换理论观点，可以分别用孔隙流、裂隙流、管道流的相关基本理论公式，如 Darcy 定律（孔隙流）、Ломмзе 与 Louis 公式（裂隙流）、Hazen - Williams 公式（管道流），得到预计构造破碎带（断层、陷落柱）的初始和最大突水量预计公式。这给出表 1 中部分实例不同计算方法结果与实际突水量的对比结果（表 3）。

表 3 理论预计构造带滞后突水量与实际结果对比

突水矿	实际突水量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)		预计突水量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)		
	初始	最大	孔隙初始	裂隙中间	管道最大
开滦范各庄	365	123 180	359.4	106 350.1	123 516.6
皖北任楼	60	34 570	48.1	16 301.0	35 180.6
肥城陶阳	276	6 420	100.5	1 805.0	2 750.3
徐州三河尖	20	2 170	5.3	1 233.7	2 030.1
焦作冯营	54	1 620	10.7	1 033.1	2 611.8
焦作王封	12	1 020	50.1	1 630.7	3 058.2

注：开滦范各庄矿和皖北任楼矿突水通道为陷落柱，其他为断层。

2) 构造突水治理原则。构造破碎带发生滞后大型突水后，治理突水是如何尽快将其由管道状、裂隙状结构改造成孔隙介质直至不透水带的过程。以开滦范各庄矿陷落柱特大突水治理为例：发生特大突水后，突水通道已为管道流类型通道，治理时先将其改造成裂隙流（下大颗粒骨料充填），后逐渐改造成孔隙流直至不出水（高压注浆充填裂隙，然后充填全部孔隙）。

4 结 论

设计并模拟了高水压下构造破碎带突水、突泥（砂）试验，完成了模拟正断层（或松散充填陷落柱）、扭性断层（较密实充填陷落柱）、逆断层（密实充填陷落柱）不同充填物类型构造破碎带在 1、3、5 MPa 水压下的突水、突泥（砂）过程。基于试验结果分析，结合大量煤矿突水实例特征，提出了高水压下构造破碎带突水渗流转换理论观点，即发生“孔隙流—裂隙流—管道流”的渗流类型转换。能否最终形成管道流而发生特大突水，取决于构造破碎带充填物物质成分和密实程度、突水水源水压大小。随着煤矿采深不断加大，水压增高，发生构造破碎带渗流转换突水的可能性在增加。渗流转换理论对煤矿深部开采水害防治实践具有重要指导意义。

参考文献：

[1] 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，2001.

[2] 中国统配煤矿总公司生产局，煤炭科技情报研究所. 煤矿水害事故典型案例汇编 [M]. 北京：煤炭工业出版社，1992.

[3] 赵铁锤. 华北地区奥灰水综合防治技术 [M]. 北京：煤炭工业出版社，2006.

[4] 戚春前. 赵各庄矿水文地质分区及涌水特征分析 [J]. 煤炭科学技术，2010，38（10）：98-102.

[5] 刘国林，尹尚先，王延斌. 华北型煤田岩溶陷落柱顶部剪切破坏突水模式 [J]. 煤炭科学技术，2007，35（2）：55-58.

[6] 张永双，曲永新，刘国林，等. 华北型煤田岩溶陷落柱某些问题研究 [J]. 工程地质学报，2000，8（1）：35-39.

[7] 胡宝林，宋晓梅，车 遥，等. 刘桥矿区多期构造复合断层导水性分析 [J]. 煤炭科学技术，2002，30（8）：50-53.

[8] 李振华，徐高明，李见波. 我国陷落柱突水问题的研究现状与展望 [J]. 中国矿业，2009，18（4）：107-109.

[9] 丁德民，马凤山，王 成，等. 海底矿体开挖下的断裂带突水效应研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报，2010，21（1）：75-80.

[10] 钟亚平，田嘉兴，洪益清. 水文地质条件极复杂型矿井隐形垂直导水构造的探查与治理 [J]. 煤炭科学技术，1998，26（1）：13-17.

[11] 李贵山，李建军，田增旭. 晋城寺河矿区陷落柱及导水性探测研究 [J]. 煤炭科学技术，2001，29（S0）：72-74.

[12] 刘国林，潘 懋，尹尚先. 华北型煤田岩溶陷落柱导水性研究 [J]. 中国安全生产科学技术，2009，5（2）：154-159.