煤层底板陷落柱突水模拟及机理分析*

尹尚先[1] 武 强[2]

([1]华北科技学院安全科学技术研究所 北京 100083) ([2]中国矿业大学资源系 北京 100083)

摘要 岩溶陷落柱是中国北方型石炭二迭系煤田的一种特殊塌陷，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、突发性且与岩溶水有天然联系等特点，对煤矿安全生产危害极大。为研究煤层底板陷落柱破坏特征及突水机理，采用 FLAC^{3D} 模拟分析了陷落柱影响下采面推进过程的不同阶段。数值模拟及实验显示，由于陷落柱的面积有限，矿压和水压力联合作用下使其发生弯曲并形成拉张破坏的可能性较小，一般产生剪切破坏，虽然升、降错动产生的剪应力、上凸弯曲产生的拉应力和压应力的三重作用导致煤层底板岩层失稳破坏，但以剪应力作用为主；同时，陷落柱的存在改变了煤层底板的地质环境和岩体结构，底板有效隔水层厚度减小，岩体强度降低，应力-应变分布不均，局部应力集中系数增大，使关键层的最小主应力进一步降低，一旦承压水压力大于关键层的最小主应力，承压水的渗水软化和压裂扩容即起作用，使底板岩层破坏裂隙沿最薄弱方向进一步扩展，导致裂隙贯通，最终形成管涌，发生突水。特别是，陷落柱的边壁、工作面底板压缩区与膨胀区的分界线重合在一条线上时，是底板岩层发生剪切破坏的最佳状态，最容易发生底臌突水。

关键词 采矿工程，突水机理，FLAC^{3D} 模拟，陷落柱，岩石破坏，煤层底板

分类号 TD 82 **文献标识码** A **文章编号** 1000-6915(2004)15-2551-06

SIMULATION AND MECHANISM ANALYSIS OF WATER INRUSH FROM KARSTIC COLLAPSE COLUMNS IN COAL FLOOR

Yin Shangxian[1], Wu Qiang[2]

([1]*Facility of Safe Sciences and Technology, North China Institute of Sciences and Technology, Beijing* 100083 *China*)

([2]*Dept. of Res. Expl. Eng., China Univ. of Mining and Tech., Beijing* 100083 *China*)

Abstract Karstic collapse columns are a kind of vertical structures typically found in Carboniferous-Permian coalfields in north China, and are widely distributed in 45 coal mine areas of 20 coalfields. Because of its hidden characteristics of the outburst and natural relationship with karstic groundwater, the water inrush caused by karstic collapse columns is more harmful to mining safety. In order to study the failure characteristics of surrounding rock masses and mechanism of water inrush caused by karstic collapse columns in coal seam floor, several situations of movements of mining work face are simulated with FLAC^{3D} when a collapse column exists in the coal floor. Numerical simulations and experiments show that the rock failure mechanism under hydraulic pressure is of a shear-tension-pressure complex with shear as the control factor. Because of the karstic collapse column, the geological environment and rock structure in the coal floor will change, and the effective thickness of the protective layers as well as the strength of rock mass will be reduced. In addition, the stress and strain distributions are asymmetrical, and local stress concentration coefficients become larger, so that minor principal stresses of key stratum decrease further. When hydraulic pressure is larger than that of the minor principal stress of the key stratum, mining pressure and seepage as well as dilation will cause fractures to expand along the weaker directions. Fractures eventually transfix and water inrush takes place. When the border cliff of the collapse column and

2003 年 1 月 20 日收到初稿，2003 年 3 月 3 日收到修改稿。

* 中国博士后基金(2003033204)资助项目。

作者 尹尚先 简介：男，38 岁，博士后，主要从事地质资源与地质工程等方面的教学与研究工作。E-mail：yinshx@21cn.com。

division line of compressive and expansive section of coal floor are coincident on the same line，the shear yield and water inrush from coal floor are most likely to take place.

Key words　mining engineering，mechanism of water inrush，FLAC^{3D} simulation，karstic collapse columns，rock failure，coal floor

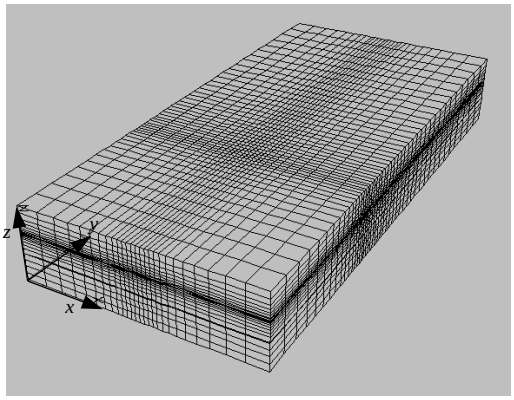
1　引　言

岩溶陷落柱是中国北方型石炭二迭系煤田的一种特殊岩溶塌陷，广泛分布于我国北方山西高原、太行山、吕梁山以及晋陕蒙、冀、鲁、豫、苏、皖等地近 20 个煤田 45 个煤矿区，总数超过 3 000 个(Li Jinkai 等 1988 年统计为 2 875 个)，其中，尤以山西太原西山及汾河沿岸煤田、太行山中段更为普遍。岩溶陷落柱属于隐伏垂向构造，其导致的突水具有隐蔽性、突发性且与岩溶水有天然联系等特点[1]，对煤矿安全生产及当地人民生活危害极大。1984 年 6 月 2 日，开滦范各庄矿 2171 综采工作面发生世界采矿史上罕见的岩溶陷落柱透水灾害，最大涌水量达 2 053 m^3/min，该矿及 3 个临近矿井被淹，直接经济损失数亿元[2]；徐州张集煤矿和青山泉一号井、安阳铜冶一矿、皖北任楼矿等也发生过较大陷落柱突水事故，均造成巨大经济损失和不良后果。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。

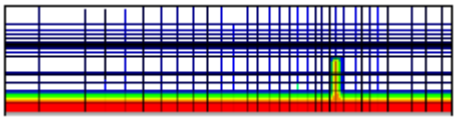
国内外学者对突水机理这一难题进行了大量研究，原苏联学者 A. A. ВОРИСОВ 最早采用相似材料立体模型研究了采空区底板岩层的变形；文[3]从岩石力学的角度研究底板破坏机理；文[4～6]则采用数值模拟研究突水问题。我国 20 世纪 50 年代煤矿突水研究开始起步，文[7]在国内率先提出煤层采空区岩层破坏的“三带”理论；其他学者则对矿山压力[8]、突水机理[9]进行了大量研究；文[10]提出了底板岩层中起关键阻水作用的关键层理论。上述研究深刻揭示了突水规律及机制，但其着眼点集中在底板为完整岩层或存在断裂构造的情形上。本文运用数值模拟方法，分析陷落柱存在时煤层底板围岩应力-应变及其破坏特征，并总结底板突水机理。

2　模型及计算结果分析

开滦范各庄矿一采面概化数值模型如图 1 所示，其长(y 方向)宽(x 方向)高(z 方向)分别为 2 400，1 120，350 m。其中，设计采面总长度 800 m，宽度分别为 80，100，120，140，160 m，开切眼处剖分单元密度较大。主采煤层高 3.5 m(图 1 网格密集黑色条)，一次采全高。存在陷落柱时，其顶面距煤层底板 50 m(图 1(b))，陷落柱横截面为 20 m×20 m 的正方形，用 FLAC^{3D} 模拟了采面推进过程，计算采用莫尔-库仑材料本构模型，求解过程参见文[11，12]。



(a) 立体剖分图



(b) 剖面图(x = 570 m)

图 1　数值模型

Fig.1　A numerical model

2.1　初始边界条件和岩层力学参数

岩层近似水平。模型顶部施加上覆岩层自重应力，底部边界延伸到奥灰顶面下 20 m，设计垂向变形为零的简支边界，奥灰岩溶水位高于煤层底板 604 m，即岩层受 6.04 MPa 孔隙水压力。原岩初始应力采用该区−490 m 六石门实测数据[2]。

14 煤层～奥灰含水层可划分为厚度、岩性和力学性质不同的 29 层并测定了岩石力学参数。为了简化网格剖分的工作量，同时，充分体现各层之间的力学性质的差异，将岩性、力学性质和分布厚度相近或相同的岩层划归为一个层组，合并后为 5 个层组，其力学参数见表 1。

大量岩石力学实验证实，岩石破坏后强度有所降低，产生弱化，故本文对岩石和煤采用 Hoek-Brown 强度准则，即

$$\sigma_{1s}=\sigma_3+(m\sigma_c\sigma_3+s\sigma_c^2)^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

表 1　南四背斜轴部层组力学参数表

Table 1　Rock mechanics parameters at Nansi anticline

层组	弹性模量/GPa	泊松比	粘聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
1	27.5	0.25	8.7	35	1.5
2	50.0	0.30	36	40	5.3
3	31.0	0.28	8.2	36	2.1
4	26.0	0.24	8.5	32	1.4
5	52.1	0.33	35	41	5.8

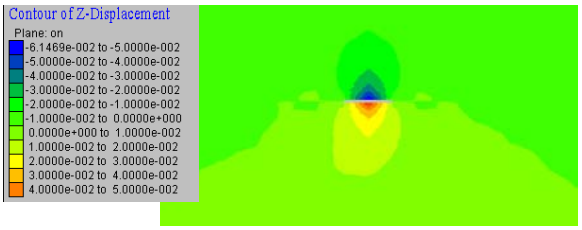
式中：σ_{1s} 为岩石峰值强度时的最大主应力；σ_3 为最小主应力；m，s 为材料常数，取决于岩石性质和原始破裂状况；σ_c 为岩石单轴抗压强度。此外，当拉应力超过材料的抗拉强度时，材料将发生拉破坏。陷落柱的参数取岩石参数的 10%。

2.2　模拟结果分析

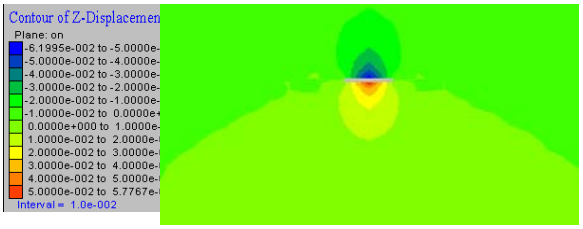
(1) 工作面宽 80～160 m，采面推进 20 m 左右，无论陷落柱存在与否，底板位移较小，底板的上鼓量不到 1 cm，顶底板还没有破坏。

(2) 有陷落柱时，采面推进 40 m 左右，底鼓位移 1 cm 达到底板下 60 m，位移 2 cm 达底板下 28 m；无陷落柱，采面推进 40 m 左右，此时顶板初次夸落，顶底板都有破坏，底板 22 m 处的位移达到 2 cm。由图 2，3 可以看出，陷落柱显著影响底板破坏深度，而工作面长度变化对其影响较小。

(3) 无陷落柱时，随着工作面的推进，顶底板的移近量不断加大，当推进到 300 m 以后趋于稳定(表 2)；不同工作面长度的初次垮落距不同，但相差



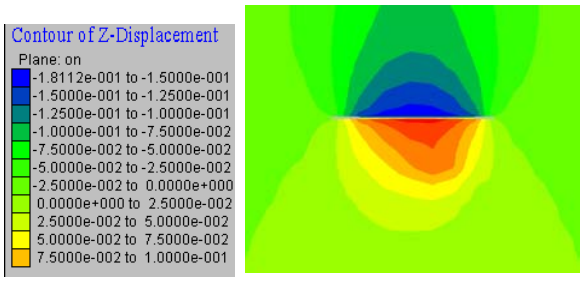
(a) 有陷落柱



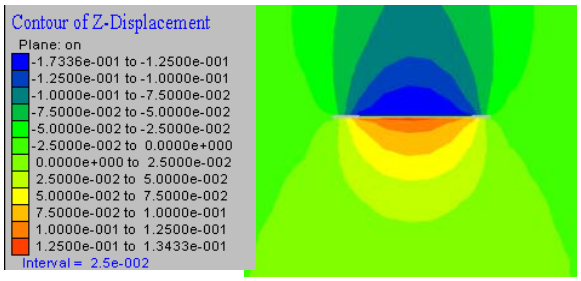
(b) 无陷落柱

图 2　工作面长 160 m，顶板初次跨落，有、无陷落柱时位移

Fig.2　z-displacement with or without a collapse column at first roof collapsing with working face length of 160 m



(a) 有陷落柱



(b) 无陷落柱

图 3　工作面长 160 m，采面推进 160 m，有、无陷落柱时位移

Fig.3　z-displacement with or without a collapse column at first roof collapsing with working face length of 160 m and advance of 160 m

表 2　无陷落柱时底板不同深度位移

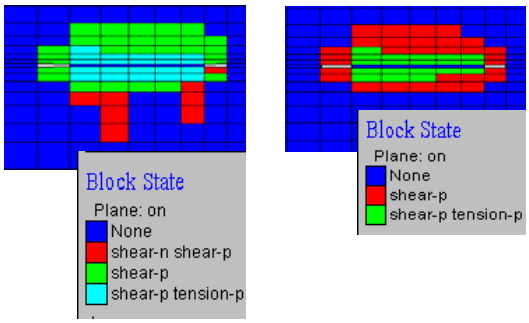
Table 2　Displacement and its depth without collapse column in floor

工作面长度/m	底板深度/m	底板位移量/cm
20	5.0	1.0
40	22.0	2.0
80	55.0	2.5
160	110.0	2.5
300	130.0	2.5
500	130.0	2.5
800	130.0	2.5

不多，约 40 m。

采面推进模拟[13]显示，在陷落柱附近位移变化明显，远离陷落柱，其影响逐渐减小，200 m 后基本无影响。同时，有、无陷落柱对底板岩层的破坏状态影响较小(图 4)。

(4) 以工作面长 160 m 为例(表 2)，无陷落柱不同推进长度，采面底板下 5 m 处岩石破坏状态(图 4)显示：推进 40 m，底板破坏深度为 5 m 左右，且为剪切破坏；推进 80 m，破坏深度扩展至底板 22 m 处，顶底板靠近工作面中心处为剪切、拉伸破坏，四周为剪切破坏(这与实验或其他模拟技术所得的结论相同)；推进 160 m，走向方向破坏范围继续发展，垂直方向没有明显的增加，但剪切、拉伸破坏



(a) 有陷落柱　　(b) 无陷落柱

图 4　工作面长 160 m，采面推进 160 m，有、无陷落柱时，煤层底面下 5 m 破坏状态

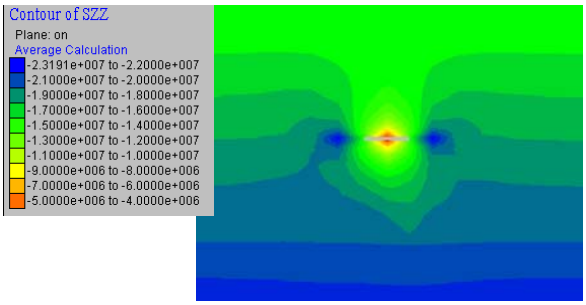
Fig.4　Yield state at 5 m depth with or without a collapse column with working face length of 160 m and advance of 160 m

的范围向顶底板深部发展；推进 200 m，走向方向破坏范围继续发展，垂直方向没有明显的增加，工作面底板由原先的剪切破坏变为剪切、拉伸破坏；推进 230 m，走向方向破坏范围继续发展，垂直方向底板破坏区局部扩展至底板 34 m 处；推进 266 m，底板破坏深度由局部逐步发展扩大；推进 300 m，底板破坏深度进一步发展；推进 500 m～800 m，底板破坏深度基本趋于稳定，但顶板破坏继续发展。可以看出，底板的破坏深度在工作面推进到 500 m 以后，就趋于稳定，不再发展了。

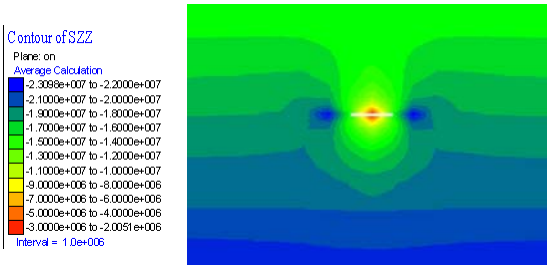
工作面采宽由 80～160 m 变化时，在顶板初次跨落情况下，其顶底板破坏的状态和深度没有明显区别，仅在采宽为 100 m 时顶板拉伸与剪切同时出现，其他都是由剪切导致岩石破坏，且破坏深度大体相同。这一点是‘底板破坏以剪切为主’结论的基础；当采空区的面积较小时，底板的破坏形式为剪切破坏，只有当采面推进较长即采空区面积较大时，才同时出现张拉和剪切并存的破坏形式，但保持采面中心地带为剪切、拉伸破坏而四周为剪切破坏形式不变。所以，数值分析也有力地支持了‘采掘工程底板岩层破坏拉剪复合以剪为主的力学机理’这一结论[13, 14]。

(5) 不同采面宽度走向垂直应力 S_{zz} 和水平应力 S_{yy} 分布图(图 5～7)说明，随着采面的加长，在顶板初次夸落时，S_{zz} 和 S_{yy} 有逐步增大的趋势；陷落柱存在对应力集中有一定影响，工作面长度越大，有陷落柱的应力集中系数变化越大；陷落柱存在导致其周围应力场紊乱、应力分布极不均匀。

(6) 数值模拟结果表明：无陷落柱水平集中应力和采面宽度的关系不是很明显；而随着采宽的增大，S_{zz} 有先变大后又变小的趋势。其中，当采面为 100 m 时，应力集中最大；而应力集中的中心距采场边界随采宽增大而减小，并趋于稳定。有陷落柱的不同工作面长度垂直应力 S_{zz} 集中统计数据(表 3)说明，应力集中明显随推进距离增加而增大。



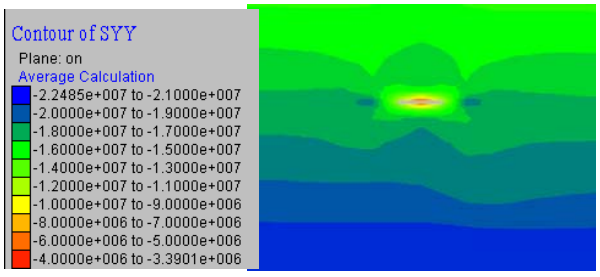
(a) 有陷落柱



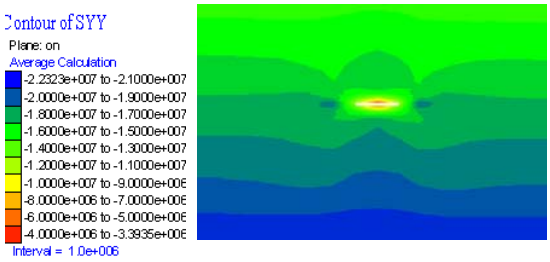
(b) 无陷落柱

图 5　采面长 80 m，顶板初次跨落，有、无陷落柱时的应力 S_{zz}

Fig.5　Vertical stress with or without a collapse column at first roof collapsing with working face length of 80 m



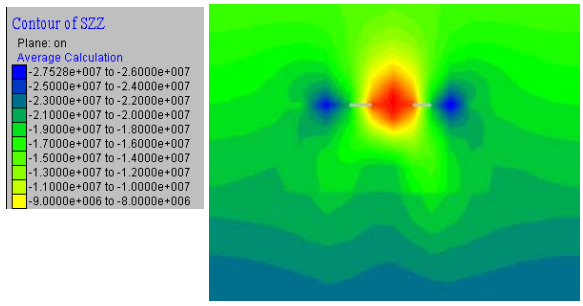
(a) 有陷落柱



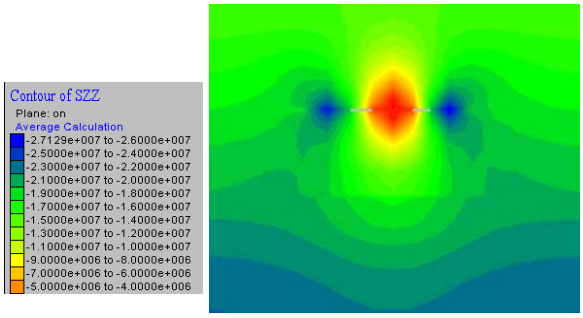
(b) 无陷落柱

图 6　采面长 80 m，顶板初次跨落，有、无陷落柱时的应力 S_{yy}

Fig.6　Horizontal stress with or without a collapse column at first roof collapsing with working face length of 80 m



(a) 有陷落柱



(b) 无陷落柱

图 7　工作面长 160 m，推进 80 m 时，有、无陷落柱时应力 S_{zz}

Fig.7　Vertical stress with or without a collapse column with working face length of 160 m and advance of 80 m)

表 3　垂直应力 S_{zz} 集中统计

Table 3　Vertical stress with influence of a collapse column

工作面宽度/m	应力集中值/MPa	应力集中系数
40	23.4	1.31
80	27.5	1.54
160	31.1	1.74
300	33.3	1.86
500	34.0	1.90
800	34.1	1.91

3　围岩应力-应变及破坏特征

通过数值模拟分析，结合前人在相似材料模拟实验[9]、软材料光弹模拟实验[15]、薄板理论[7]和数值分析[16]等方面的部分实验数据和结论，总结围岩应力-应变及破坏(图 8)有如下特征：

(1) 陷落柱扰乱了底板原岩应力-应变的均匀分布，采动过程中，其围岩位移梯度明显大于正常岩层地段，变形与周围不协调，容易产生局部剪切变形；采面扩大、水压增大、柱体内岩层强度变小等都将加强应力-应变的不均匀程度。

(2) 虽然陷落柱的存在对底板应力-应变分布有较大影响，但基本不影响采前应力(位移)升高(减小)，采后应力(位移) 降低 (增大)及恢复 3 个阶段的整体规律；而顶、底板岩层变形的相似性却遭到破坏。

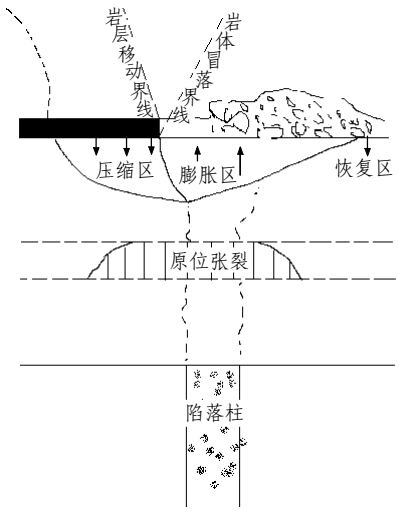


图 8　陷落柱影响及采动破坏示意图

Fig.8　Sketch of influence of a karstic collapse column on yield of coal floor at working face

(3) 陷落柱与采面边缘线距离越小，岩层破坏的危险性就越大；陷落柱的边壁、压缩区与膨胀区的分界线重合在一条线上时(图 8)，是剪切破坏的最佳状态，最容易发生底臌突水。

4　突水机理分析

在总结采场围岩应力-应变及破坏特征的基础上，分析突水机理(图 8)如下：

煤壁前方底板岩层在超前支承压力的作用下向下移动，而在矿压和承压水压力作用下，工作面后方采空区的底板向上移动，在压缩区与膨胀区的交界处，底板岩体容易受升、降错动产生的剪应力作用，导致剪切变形而发生剪切破坏。同时，由于采空区下部矿压及承压水向上施压，使底板岩层整体向采空区一侧上凸，采空区下方岩层顶界面受上升弯曲产生的拉应力作用而产生张裂隙，底界面受上升弯曲产生的压应力作用而形成挤压裂隙。因此，底板岩层在煤壁边缘线内外受升、降错动产生的剪应力、上凸弯曲产生的拉应力和压应力的三重作用，并且以剪应力作用为主，当三重作用超过岩体强度极限时岩体即破坏。

除了采动在煤层底板形成直接破坏带外，由于底板整体受到下部承压水的作用，在采空区底板以下一定距离，由下向上出现若干垂直原位张裂隙。

当陷落柱存在并将地下水导通到一定高度时，在水压力的作用下，渗水软化作用降低岩体有效应力和粘聚力，根据水力压裂的力学原理，当裂缝形成后，只要有足够的压裂液及能使裂缝张开并延伸的压力，那么裂缝就会沿着阻力最小的方向延伸，地下水沿裂隙软弱带总体向上发展。同时，在承压水的压裂扩容作用下小裂隙不断扩大，在主要裂隙周围出现翼状裂隙，裂隙组数逐渐增多，形成局部化剪切裂隙带。在底板存在陷落柱的条件下，底板有效隔水层厚度减小，局部应力集中加强，关键层的最小主应力进一步降低，这样的地质环境更有利于承压水的渗水软化和压裂扩容二者间相互作用、互相促进，使底板岩层破坏裂隙沿最薄弱方向进一步扩展，形成剪切面，一旦承压水压力大于关键层的最小主应力时，根据 Waprinski-Clark(1982 年)和文[17]的研究，当外力(地下水压力 P_w)大于初始水压裂压力 P_{hf}时，围岩发生水压裂现象，而初始水压裂压力取决于围岩最小主应力σ_{min}，即 $P_w \geqslant P_{hf} \geqslant \sigma_{min}$。这就是在承压水作用下有陷落柱存在时底板破断导致突水事故的力学机理。其力学机制以剪应力为主的原因如下：

(1) 随着工作面向前推进，在煤壁下方，底板岩层破坏沿深度方向斜向煤柱下方发展，这与最大剪切应力方向一致，剪应力起主导作用。

(2) 采空面积有限或岩体强度较大时，岩层的上凸弯曲有限，相应拉应力和压应力也有限，不能成为岩体破坏的主导应力。

综上所述，由于陷落柱的面积有限，矿压和水压力联合作用下发生弯曲并形成拉张破坏的可能性较小，一般产生剪切破坏。因此，认为陷落柱突水是岩层受剪、拉、压三重作用，并以剪切破坏为主引起的。

5 结　论

(1) 数值模拟及实验显示，在煤壁边缘线内外，底板岩层受升、降错动产生的剪应力、上凸弯曲产生的拉应力和压应力的三重作用，且以剪应力作用为主，导致岩体失稳破坏。因此，剪、拉、压三重作用以剪切破坏为主是底板岩层破坏的力学机制；

(2) 数值模拟分析显示，采动形成的垂直原位张裂隙带，陷落柱存在的底板有效隔水层厚度减小、岩体强度降低和局部应力集中，是承压水的渗水软化和压裂扩容起作用的基础，也是底板岩层破坏、裂隙进一步扩展的最薄弱方向，陷落柱的边壁、工作面底板压缩区与膨胀区的分界线重合在一条线上时，是剪切破坏的最佳状态，最容易发生底臌突水。剪切面形成后，承压水压力大于关键层的最小主应力才能最终发生突水。

参 考 文 献

1 尹尚先，武　强，王尚旭. 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

2 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

3 Faria Santos C，Bieniawski Z T. Floor design in underground mines[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，1989，22(4)：226～249

4 Argüello J G，Stone C M，Lorenz J C. Geomechanical numerical simulations of complex geologic structures[A]. In：Aubertin M ，Hassani F，ed. Rock Mechanics (Vol.2)[C]. Rotterdam：A A. Balkema，1996，1 841～1 848

5 Pariseau W G. Applications of finite element analysis to mining engineering[A]. In：Hudson J A ed. Comprehensive Rock Engineering[C]. Oxford：Pergamon Press，1993，491～522

6 Jorge M，Javier S，Ruben J. Numerical modeling of the transient hydrogeological response produced by tunnel construction in fractured bedrocks[J]. Eng. Geol.，2002，64(4)：369～386

7 张金才，张玉卓，刘天泉. 岩体渗流与煤层低板突水[M]. 北京：地质出版社，1997

8 马念杰，侯朝炯. 采准巷道矿压理论及应用[M]. 北京：煤炭工业出版社，1995

9 王作宇，刘鸿泉. 承压水上采煤[M]. 北京：煤炭工业出版社，1992

10 钱鸣高，缪协兴，许家林. 岩层控制中的关键层理论[J]. 煤炭学报，1996，21(3)：225～230

11 Itasca Consulting Group Inc. FLAC　User's Manual[M]. Minnesota：State University of Minnesota，USA，1997

12 Hatzor Y H，Talesnick M，Tsesarsky M. Continuous and discontinuous stability analysis of the bell-shaped caverns at Bet Guvrin，Israel[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci.，2002，39(7)：867～886

13 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，2002

14 尹尚先，王尚武，武　强. 陷落柱突水模式及理论判据[J]. 岩石力学与工程学报，2004，23(6)：964～968

15 邵爱军，刘唐生，邵太升等. 煤矿地下水与底板突水[M]. 北京：地震出版社，2001

16 朱泽虎. 高承压含水层上采煤突水机制及水害防治方法研究[博士学位论文][D]. 北京：煤炭科学研究总院，1994

17 李抗抗，王成绪. 用于煤层底板突水机理研究的岩体原位测试技术[J]. 煤田地质与勘探，1997，25(3)：31～34