

# 基于古构造应力场的井田小构造预测研究

孟达<sup>1</sup>, 张梅<sup>2</sup>

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2. 河北农业大学城乡建设学院, 河北保定 071000)

**摘要:** 本文首先收集并综合华北平原的区域地质纲要资料, 其次对邢台地区显德汪矿区古构造应力场进行了分析, 确定了历次构造运动对本矿区构造产生的影响, 基于构造应力演化规律, 通过建立了矿区的三维数字地质构造模型, 结合岩石力学, 弹塑性力学, 断裂力学, 进行数值计算。通过理论分析、数值模拟以及现场实验相结合, 预测了该井田小构造分布区域和分布规律。得到矿区的断层分布区域图。该研究结果可为矿田现在采区及未开采区采掘设计提供最优方案, 最大限度避免经济损失, 也可为瓦斯地质分布、奥灰水赋存提供帮助。

**关键词:** 古构造应力场; 井田小构造; 数字高程模型 (DEM); 数值模拟; 区域预测

**中图分类号:** TD-0 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4051(2015)06-0071-05

## The regional forecast of the coal mine structure based on the paleotectonic stress field

MENG Da<sup>1</sup>, ZHANG Mei<sup>2</sup>

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Agricultural University of Hebei, College of Urban and Rural Construction, Baoding 071000, China)

**Abstract:** The paper collected and synthesized the regional geological outline information of the North China Plain, and analyzed the paleotectonic stress field of Xiandewang Coal Mine area in Xingtai, determined the effects on the mine structure produced by the previous tectonic movement. Based on the evolution of tectonic stress, combined with rock mechanics, elastic-plastic mechanics and fracture mechanics to proceed the numerical calculation, established a three-dimensional digital geological structure model of the mine. Through theoretical analysis, numerical simulation and field experiments, predicted the small structures distribution area and the distribution law of the mine field, got the mine fault distribution area map. Not only the research results can provide the optimal mining design solution for the mining area and no mining area, but also help for the gas geology distribution and the Ordovician limestone water occurrence.

**Key words:** paleotectonic stress field; coal mine structure; DEM (Digital Elevation Model); numerical simulation; regional forecast

### 1 背景介绍

地质构造复杂程度中等及以下的矿区勘察孔间距一般在 300~500m, 中大型构造可以普遍探测到, 但是对于工程尺度的小构造很难在勘察阶段查明。小构造是普遍存在的, 其密度不同, 分布具有

不均匀性。小构造的存在, 使得瓦斯和承压水赋存具有空间, 顶板冒顶大多也是小构造造成的。因此小构造会直接影响煤矿生产的安全和工作效率。例如, 对于断距较大的断层, 会影响综采机的寿命, 断层破碎带大的煤层开采时会直接影响原煤的生产质量, 由于导水性增强会引起矿井水害, 或者引起煤与瓦斯的突出等问题<sup>[1-4]</sup>。

目前的科技发展水平, 小构造的预测只靠任何一种方法都很难预测准确, 因此, 需要多种方法的综合预测, 相互校正, 得到较为准确的结果。显德汪矿位于河北省邢台地区, 矿区地质构造、水文地质条件较为复杂。为了确保煤矿安全生产, 对煤矿井田范围内的地质小构造进行预测是尤为重要的。

收稿日期: 2014-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(编号: 51274185); 国家重点基础研究发展计划(973)项目资助(编号: 2010CB731500)

作者简介: 孟达(1969-), 女, 辽宁盖州人, 副教授, 博士, 主要从事岩土工程和采矿工程方面的研究。E-mail: mengfanda@126.com。

通讯作者: 张梅(1973-), 河北保定人, 副教授, 主要从事岩土工程及采矿工程方面的研究。E-mail: zhangmei@hebau.edu.cn。

首先要按地学的方法研究煤矿构造发育特征和构造区域分类,并对构造进行分期,根据已探明的中大型构造的分布特点及规律,根据构造地质学原理,可能产生的同期构造、伴生构造以及混合构造等小构造进行预测;其次根据历次构造在该矿区产生的构造力进行数值模拟,最后根据现场的抽水试验验证以及以揭露的小构造台账数据,综合三种方法相互验证得到的小构造的预测区域和分布范围。

小构造预测可以对矿区的赋水分布和瓦斯地质区域进行分析,对不同构造区域进行回采巷道支护参数进行优化,对于保证回采巷道的正常使用,降低巷道的维护费用,满足综采面快速推进的要求,实现矿井的安全高效生产等具有重要现实意义和理论价值。

## 2 工程概况

### 2.1 井田位置

邢台地区显德汪矿位于武安断陷北部,太行山隆起带东侧,为新生代华北盆地的西部边缘,隆尧南正断层上盘(南侧)至名河一线,与隆尧南正断层平行展布的向斜、背斜的褶皱构造位置。该矿井开采山西组的1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>煤层。

### 2.2 邢台地区的古构造应力场分析

对邢台地区造成显著影响的构造运动可综合归纳为三次:第一次是燕山晚期,在邢台地区的SWW向产生板块压缩,板内变形速度是5.2cm/a,在邢台地区广泛产生的走向接近SW-SWW的褶皱,并在太行山东部产生逆断层带。第二次是四川晚期的构造运动,在邢台地区NNE向产生板块压缩,板内变形速度为2.7cm/a,在邢台地区广泛产生走向为NNE向、角度较缓的褶皱,与燕山期产生的SW-SWW的褶皱进行了重合,形成复合构造,并在太行山东侧右行走滑—正断层带。第三次是中国大陆华北期和喜马拉雅构造运动(因存在某些共同特征,这里将两期合并),其特点是南北向的断层发生张裂,许多地方出现近南北延伸的追踪张节理,太行山东侧的正断层,沿着这些规模较大的断层明显地表现出东西向伸展的特征,控制了新近纪近南北向延展的张裂盆地。

## 3 地学分析小构造的分布规律

### 3.1 显德汪矿井田的构造分析

该矿区井田的构造较为复杂,属于典型的伸展构造发育区。矿区内小断层分布比较集中地分布在井田东部和南部。根据矿井地质资料显示的小构造资料,采用模糊数学的聚类分析法可以得到。

大中型断层结构面优势产状的聚类分析见图1,小断层的结果如图2所示。

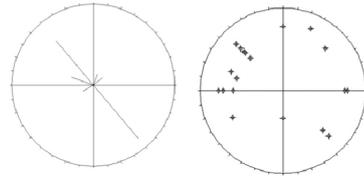


图1 大中型断层结构面倾向玫瑰图及极点图

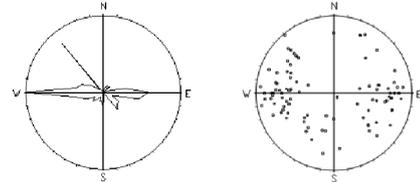


图2 结构面倾向玫瑰图及极点图

分析模糊熵指标  $H_c$ 、分类系数  $F_c$ 、模糊超体积  $F_{hv}$  和平均划分密度  $P_{da}$  等四个聚类效果检验指标,均可发现岩体中的结构面划分为两组较为合理。第一组结构面优势方位为倾向  $98.4^\circ$ , 倾角  $55.5^\circ$ ; 第二组结构面优势方位为倾向  $277.1^\circ$ , 倾角  $59.5^\circ$ 。

### 3.2 构造地质学原理分析

华北地区在印支运动之前为水平沉积层。印支期产生了近南北向板内压缩变形速度是1.6cm/a,在同地区同时代沉积岩层呈水平状态时,都有一对普遍发育的直立或近直立的共扼剪节理,说明是在成岩时期至变形前构造成因的。基本有四组节理:两个正向系列和两个斜向系列:①EW向节理;②NNE向节理;③NE向节理;④NW向节理。还有一套“X”型节理,两组呈菱形的节理,可以从中大类型聚类分析看到两组优势节理面的情况。

邢台地区共产生两期的褶皱变形作用,即NNE向和近EW向的褶皱,可能在褶皱的核部产生小裂纹,因此在这两期复合褶皱的背斜和向斜核部会有正扇形的张节理,可能是一组也可能是多组。还有的就是褶皱复合部位,产生压或张的裂纹。同时也可能产生层间错动所产生的破劈理,从小构造聚类分析图可以看到。

再者就是伴生构造,断裂的一侧往往有共生的节理,其力学解释同上述的分析。对于张节理与主干断裂的关系如图3(a)、图3(b)所示相交的锐角指向本盘的滑动方向;而节理则有直线与弧形的区别,它们与主干断裂的方位关系如图3(c)、图3(d)、图3(e)所示,与主干断裂相交成大锐角的锐角指向

对面盘滑动的方向,成小锐角的指向本盘滑动方向,特别注意的是,不论哪一种节理都只是与主干相交为止,绝不穿过,这是由它们的从属关系和力学成因决定的。

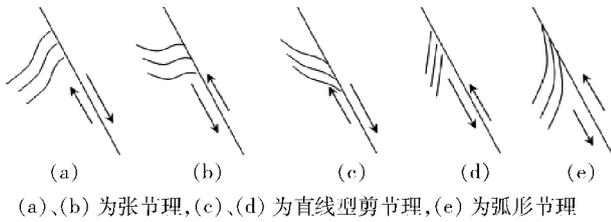


图 3 伴生构造

4 三维数值模拟预测小构造区域

为了直观地、准确地分析显德汪井田在这几次构造运动下产生的地质变形和地质构造,根据该煤

矿提供的实际钻孔资料,建立三维地质模型,三维地质建模是实现数字矿山的重要环节之一。本文利用显德汪矿上提供的钻孔资料先建立矿区的多层 DEM 模型<sup>[3-12]</sup>,然后通过获得不同位置的剖面数据建立三维的有限元计算模型,对矿区内井田小构造区域进行预测。

4.1 建立三维的有限元地质模型

有了剖面的数据和断层的位置,即可利用自底向上的建模方式建立三维的有限元地质模型。建立起来的三维有限元模型不仅可以计算各种地质构造运动产生的影响,还可以通过给定相关的外载荷和边界条件模拟开采引起的破坏区域及其扩展演化,并给出合理的保安煤柱预留距离。建立的三维地质模型如图 4 所示。

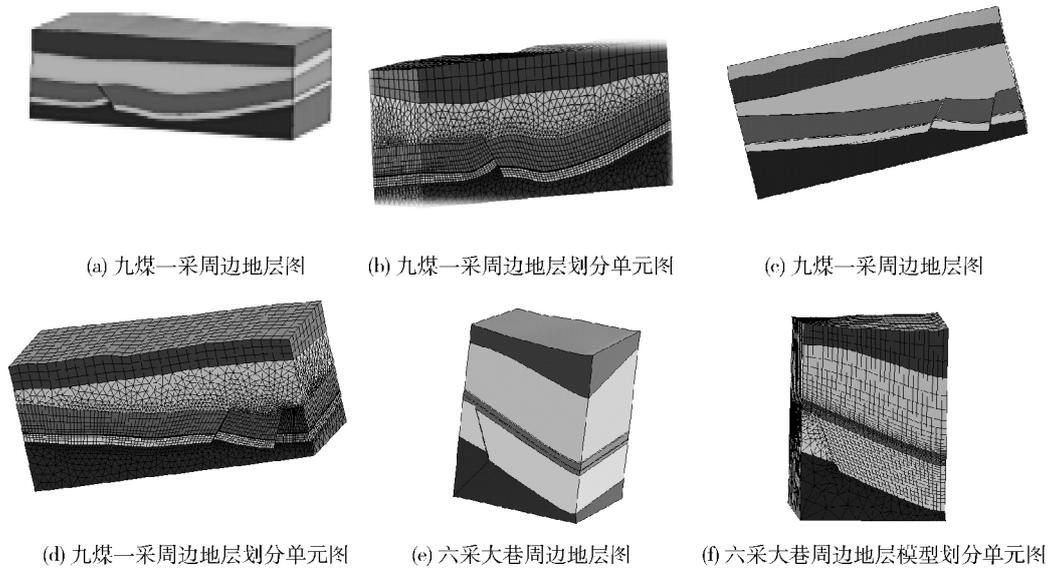


图 4 三维地质模型图

4.2 小构造区域预测

4.2.1 数值模型的建立

模拟显德汪矿区在这几次构造运动下,产生的地质变形和地质构造时,分别取矿区的燕山期 W-E 向和华北期的 W-E 向的缩短挤压运动,取四川期的 N-S 缩短和挤压运动进行数值模拟。由于喜马拉雅期的沉积运动对东部地区影响不大可以近似忽略这个时期对小构造产生的影响。

这里对地质模型做了一定处理,认为基本的大褶皱先于断层产生,这样数值模拟所需的剖面模型是在基于形成基本褶皱的基础上建立的。建立的地质模型共分为五个地层,并且认为煤与覆土之间、煤与奥灰顶之间为均匀的细砂岩,奥灰岩用较硬的灰岩模拟。模拟的五层分别为新生界覆土、细

砂岩、煤、细砂岩、灰岩。其参数如表 1 所示。

表 1 各地层材料参数(仅供数值模拟用)

材料	弹性模量/ GPa	泊松比	屈服应力/ MPa	强化模量/ GPa
覆土	9	0.33	15	1
细砂岩	25	0.295	30	5
煤	2	0.35	10	0.2
灰岩	40	0.23	55	10

考虑到矿区成东西向窄南北向宽的矩形区域。从已建立的多层 DEM 模型中获取从左至右 9 个横向剖面和从上到下 5 个纵向剖面,剖面在矿区中的具体位置见图 5。

### 4.2.2 对横向挤压运动数值模拟与分析

以下为建立各横向剖面有限元模型、计算塑性破坏区云图、以及结果分析。由于篇幅所限，横剖面图选取 1、5、9，纵剖面图选取 1、3、5 进行分析，其余剖面图分析过程与此类似，这里不再赘述。横剖面 1、5、9 有限元网格及塑性应变云图见图 6。

在横剖面 1 中，出现塑性应变集中的区域位置主要在两端褶皱的两翼，这也是断层的高密度区。在第一个区域揭露的断层有 3 条断层。第二个区域中钻孔较为密集，揭露了大断层 2 条断层。其次在剖面的中间小褶皱区域是断层密度较高区域，在该区域揭露的断层为 2 条；横剖面 6 中，由塑性应变可以得到断层高密度区有 4 条。其次断层密度较高的区域有 3 条；横剖面 9 中，由塑性应变可得到断层高

密度区有 6 条在该区。

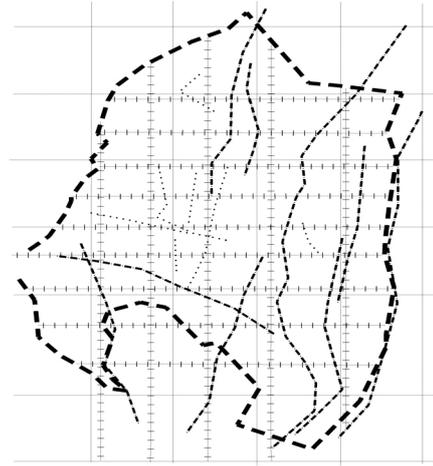


图 5 剖面位置在矿区的示意图

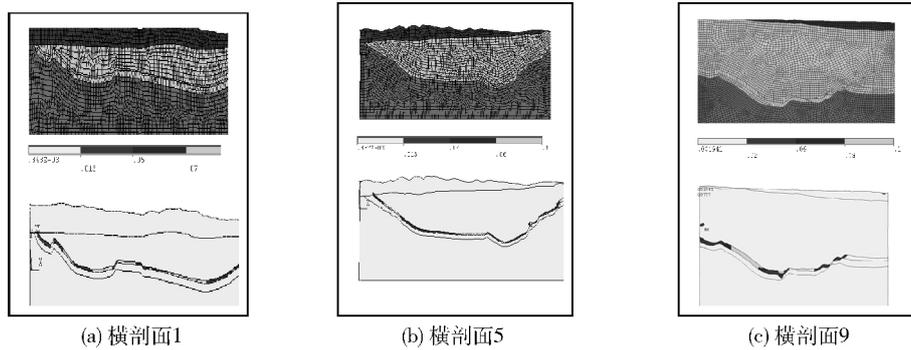


图 6 横剖面 1、5、9 有限元网格及塑性应变云图

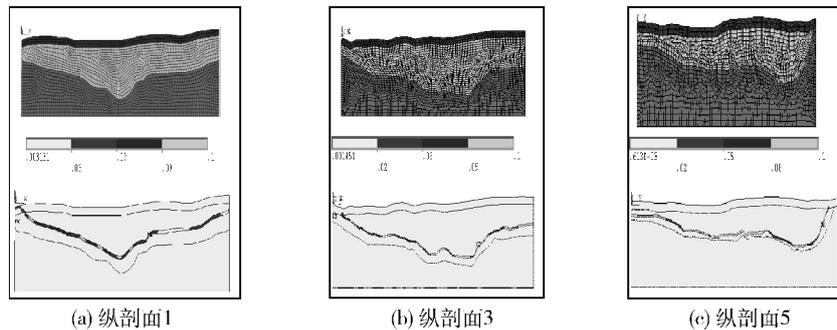


图 7 纵剖面 1、3、5 的有限元网格模型及其塑性应变云图

### 4.2.3 对纵向挤压运动数值模拟与分析

以下为建立各纵向剖面 1、3、5 的有限元模型、计算塑性破坏区云图、以及结果分析。

纵向剖面 1、3、5 的有限元模型、计算塑性破坏区云图见图 7。

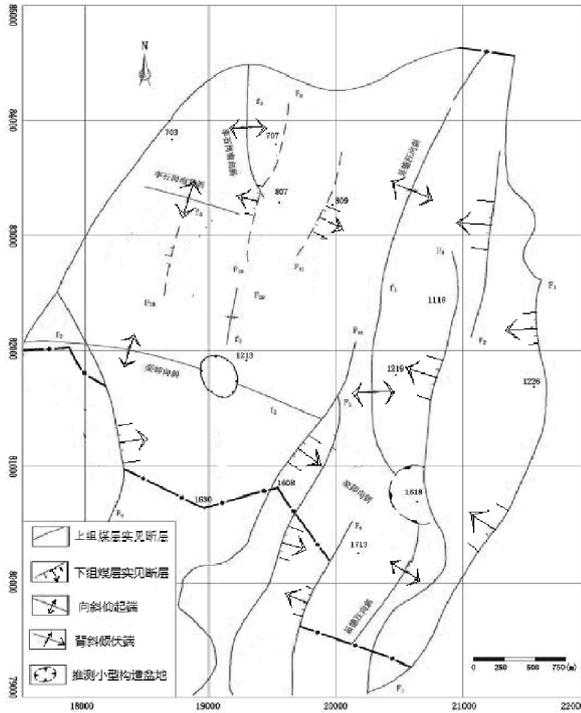
在纵剖面 1 中，由塑性应变云图可以看出，塑性应变集中在中间大褶皱（栾卸北向斜）的两翼，在该区域揭露的断层有 6 条及若干小断层。在该区域揭露的断层是 1 条；在纵剖面 3 中，由塑性应变云图可

以看出，断层高密度区域断层有 12 条；在纵剖面 6 中，有塑性应变云图可以看出，断层的高密度区域有 3 条断层被揭露。

根据计算结果，可以得出如下结论：N-S 向或近 N-S 向断层的高密度区集中在显德汪向斜的两侧；W-E 向或近 W-E 向断层集中在栾卸北向斜和李石岗向斜的两侧(图 8)。如果我们认为横向剖面和纵向剖面的断层高密度区域是相互贯通的，我们可以将这些区在矿区平面图上连接起来，作为矿区断层

高密度区, 见图 9。

在该项目完成五年了, 随着矿区生产的不断推进, 预测的四个小构造预测高密度区, 都得到了相应的验证, 有两个小构造高密度区还进行了抽水实验, 与预测区域结果相符。



(粗断线为井田边界, 细断线为断层或向斜, 网格为剖面线, 虚线为已开采揭露的断层)

图 8 显德汪井田构造纲要图

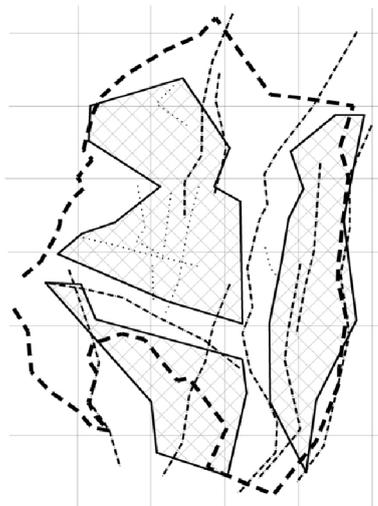


图 9 矿区断层高密度区位置预测结果

### 5 结 语

本文通过地学分析、数值模拟、现场小构造揭露、抽水实验相结合相互验证的综合方法。对矿区

井田范围内的小构造进行预测, 可以得到以下几点结论。

1) 首先对矿区的构造期进行确定, 并确定板内受力特点; 其次是地学小构造产生推测; 然后是数值分析, 这样就可以较为准确地确定小构造的分布范围和规律。将这些断层高密度区域在矿区平面图上连接起来, 作为矿区断层高密度区域。该研究可为矿田现在采区及未开采区采掘设计提供最优方案, 最大限度避免经济损失。

2) 可以从数值模拟的云图中看到应力、应变异常区图也是小构造分布密度密切有关, 可以相互对应。可以进一步的研究中可以建立精确的关系。小构造的预测为矿区开采影响、瓦斯突出、突水建立了可用的计算模型。但是我们仍然要看到, 该模型的准确程度依赖于钻孔的密集程度及数据的准确程度。当然在从剖面线得到断层位置时我们用到了些数值方法的模拟计算, 如何将这些数值结果所依赖的参数实际化, 还需要实际工程给出借鉴。

### 参考文献

- [1] 赵明鹏, 李永化. 遥感图像地质解译在煤矿小构造研究中的应用[J]. 阜新矿业学院学报: 自然科学版, 1995(14): 32-36.
- [2] 郭德勇, 韩德馨, 张建国. 平顶山矿区构造煤分布规律及成因研究[J]. 煤炭学报, 2002, 27(3): 249-253.
- [3] 张国成, 熊明富, 郭卫星, 等. 淮南矿区井田小构造对煤与瓦斯突出的控制作用[J]. 焦作工学院学报: 自然科学版, 2003, 22(5): 229-333.
- [4] 杨友长. 由离散高程点自动生成等高线的程序设计[J]. 矿业快报, 2003(6): 21-24.
- [5] 吴慧欣. 基于专家系统的二维剖面图的三维实体重建[J]. 计算机工程与应用, 2005 (28): 58-60.
- [6] 胡金星. 三维地学模拟体可视化技术的应用研究[J]. 煤炭学报. 1999(4): 345-349.
- [7] 贺怀建, 白世伟, 赵新华, 等. 三维模型中地层划分的探讨[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 637-639.
- [8] 朱合华, 郑国平, 吴江斌, 等. 基于钻孔信息的地层模型研究[J]. 同济大学学报, 2003, 31(5): 535-539.
- [9] 徐华, 武强. 基于层状结构的三维地质体可视化设计与实现[J]. 计算机应用, 2001, 21(12): 59-60.
- [10] 白世伟, 贺怀建, 王纯祥. 三维地层信息系统和岩土工程信息化[J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2002, 19(1): 23-26.
- [11] 张海荣, 许友志. 基于 TIN 不连续地质体的三维构模及动态显示[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(2): 143-145.
- [12] 朱良峰, 无信才, 刘修国, 等. 基于钻孔数据的三维地层模型的构建[J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20(3): 27-30.
- [13] 施木俊, 熊毅明, 甄云鹏. 基于工程勘察钻孔数据的三维地层模型的自动构建[J]. 城市勘察, 2006(5): 62-65.