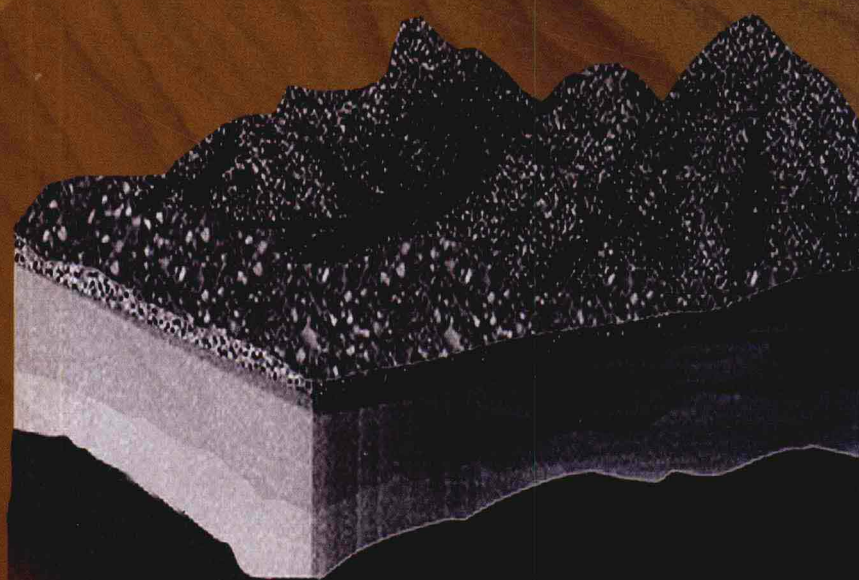


国家自然科学基金资助项目(编号:50709030)

# 高煤级煤储层渗透率的 构造—采动控制效应 与作用机理

陈金刚 著



黄河水利出版社

国家自然科学基金资助项目(编号:50709030)

# 高煤级煤储层渗透率的构造—采动 控制效应与作用机理

陈金刚 著

祝各位读者取得更大成就

陈金刚

2012.12.10

黄河水利出版社

· 郑州 ·

## 内 容 提 要

本书基于煤层气试井资料、天然裂隙发育特征以及研究区所处的构造地质背景,系统探讨了构造对高煤级煤原始渗透率的控制作用;运用现代岩石力学理论和方法,探讨了构造对高煤级煤力学性质的控制规律,发现不同构造环境对高煤级煤力学性质会产生显著影响,并且是控制煤储层吸附—解吸变形的重要原因;采用现代物理模拟技术及测试方法,构建了煤基质自调节效应模型,研究了构造—采动耦合作用对高煤级煤储层渗透率的影响;根据煤基质自调节效应模式,首次运用数值模拟技术,系统探讨了煤储层渗透率在排采过程中的动态变化规律,得出煤储层渗透率呈指数形式衰减的重要结论。

## 图书在版编目(CIP)数据

高煤级煤储层渗透率的构造—采动控制效应与作用  
机理/陈金刚著. —郑州:黄河水利出版社,2011.9  
ISBN 978 - 7 - 5509 - 0099 - 8

I. ①高… II. ①陈… III. ①地质构造—影响—地下  
气化煤气—渗透率—研究 IV. ①P618.110.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 167905 号

---

出 版 社:黄河水利出版社

• 地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail: hhsclbbs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:7.5

字数:173 千字

版次:2011 年 9 月第 1 版

印数:1—1 000

印次:2011 年 9 月第 1 次印刷

---

定价:25.00 元



# 前言

我国埋深 2 000 m 以浅、含气量  $4 \text{ m}^3/\text{t}$  以上的煤层气资源总量为 14.3 万亿  $\text{m}^3$ , 是 21 世纪我国重要的新型洁净能源和战略资源。煤层气资源的有效勘探与开发, 在改善我国目前不尽合理的能源结构、从根本上防治瓦斯事故以改善煤矿安全生产条件、降低因大量甲烷排放而导致的温室效应等方面具有重大意义。美国 2002 年煤层气产量达到 420 亿  $\text{m}^3$  左右, 约为我国同期天然气总产量的 1.4 倍, 而我国迄今尚未实现煤层气地面规模性开发。

美国通过近 30 年的勘探开发实践, 建立了中煤级和低煤级煤层气成藏勘探与开发的系统理论, 但长期将高煤级煤层气藏视为煤层气勘探开发的“禁区”。迄今为止, 世界上尚无成功开发高煤级煤储层中煤层气的先例。我国高煤级煤地区煤层气资源量巨大, 约占全国煤层气资源总量的  $1/3$ , 具有极大的资源价值和开发潜力。我国近年来在沁水盆地的勘探与开发试验成果, 不仅预示出我国高煤级煤地区良好的煤层气开发前景, 也对传统煤层气勘探开发理论构成了极大挑战, 为我国煤层气工业界和学术界提出了重大研究课题。

煤储层渗透率是决定煤层气资源开发成败的关键参数之一。先期研究表明, 高煤级煤储层渗透率显著地受控于构造作用, 并在开采过程中不断发生变化。然而, 国内外迄今对高煤级煤储层渗透率的受控规律与机理知之甚少, 在构造—采动耦合过程中对煤储层渗透率动态作用机制方面几乎没有开展专门的研究工作。第一, 我国在高煤级煤地区打出了煤层气井, 但对其机理在理论上还未形成深刻认识, 对地面开采的可持续特性也缺乏有效的预测理论与方法。第二, 对煤储层渗透率动态变化规律和机制尚缺乏科学的试验依据, 难以构建煤储层精细数值模拟的模型与方法。第三, 关于不同构造环境对煤储层原始渗透率以及动态变化控制规律的差异性, 目前基本上仅停留在概念或总体认识阶段, 构造与采动因素耦合效应对煤储层渗透率动态变化规律控制特征的研究成果目前尚未见报道。

鉴于此, 本书以试井和生产排采资料为基础, 以多相介质煤岩体力学的物理模拟、煤储层数值模拟等为主要手段, 采用煤层气地质理论与生产实际相结合、物理模拟与储层模拟相结合、静态模拟与动态模拟相结合等多方位的研究方法, 针对上述问题较为系统地开展了分析与探讨。通过研究, 力图在高煤级煤储层地质理论研究方面有所进展, 并期望研究成果能对我国高煤级煤层气藏的经济高效开采有所贡献。

本书共分 6 章, 各章撰写人员为: 前言, 陈金刚; 第 1 章, 陈金刚、杨俊丽; 第 2 章, 陈金刚; 第 3 章, 陈金刚、杨俊丽; 第 4 章, 陈金刚; 第 5 章, 陈金刚、杨俊丽; 第 6 章, 陈金刚。

书中疏漏和不妥之处, 敬请读者批评指正。

作者

2011 年 7 月

# 目 录

## 前 言

|                               |       |
|-------------------------------|-------|
| 第1章 绪 论 .....                 | (1)   |
| 1.1 研究背景及意义 .....             | (1)   |
| 1.2 研究现状 .....                | (2)   |
| 1.3 研究方案 .....                | (8)   |
| 1.4 研究区煤层气地质背景 .....          | (10)  |
| 第2章 高煤级煤储层原始渗透率的构造控制效应 .....  | (17)  |
| 2.1 沁水盆地构造应力场分析 .....         | (17)  |
| 2.2 沁水盆地主煤层天然裂隙和孔隙发育特征 .....  | (20)  |
| 2.3 沁水盆地主煤储层试井渗透率分析 .....     | (24)  |
| 2.4 构造作用与煤储层渗透率之间的耦合关系 .....  | (30)  |
| 第3章 高煤级煤力学性质的构造控制 .....       | (38)  |
| 3.1 模拟实验基础 .....              | (38)  |
| 3.2 煤样的三轴力学性质及其构造控制规律 .....   | (40)  |
| 3.3 煤样的吸附膨胀性质及其构造控制规律 .....   | (46)  |
| 第4章 高煤级煤储层渗透率的采动影响 .....      | (52)  |
| 4.1 采动过程中煤储层渗透率变化的影响因素 .....  | (52)  |
| 4.2 采动影响的物理模拟实验 .....         | (53)  |
| 4.3 物理模拟实验结果及影响因素分析 .....     | (57)  |
| 4.4 煤储层渗透率变化的煤基质自调节效应模式 ..... | (70)  |
| 第5章 煤储层渗透率动态变化数值模拟 .....      | (75)  |
| 5.1 数值模拟方案 .....              | (75)  |
| 5.2 数值模拟结果及动态变化规律 .....       | (84)  |
| 5.3 相关问题的讨论 .....             | (97)  |
| 第6章 结 论 .....                 | (101) |
| 参考文献 .....                    | (104) |

# 第1章 绪论

## 1.1 研究背景及意义

美国是目前世界上唯一成功地实现了煤层气商业化开发的国家,形成了关于煤层气产出过程认识的突破,建立了中煤级煤煤层气成藏与开发的系统理论;为美国煤层气成功开发提供了理论基础。但是,高煤级煤储层长期被视为煤层气勘探开发的“禁区”,而我国在煤层气勘探开发实践中却在高煤级煤地区打出了高产煤层气井,并显示出良好的煤层气勘探开发前景,对传统煤层气理论提出了极大挑战。

我国高煤级煤资源量巨大,占全国煤炭资源总量的 27.60% (孙万禄,1999)。同时,高煤级煤储层中煤层气资源量约占全国煤层气资源总量的 1/3,资源潜力巨大。我国高煤级煤地区存在诸多有利区块,例如以高煤级煤为主的沁水盆地是我国近年来煤层气勘探开发活动最为活跃的地区,极具勘探开发价值。但是,高煤级煤储层渗透率普遍较低,气产量衰减较快,严重影响了我国煤层气工业形成的步伐。针对我国煤储层特有的地质背景条件,建立和发展适合我国的高煤级煤层气地质与勘探开发理论,是我国煤层气地质工作者面临的重大课题。在煤储层的诸多物性参数中,渗透率是决定煤层气勘探开发成败的关键参数,显著受控于构造作用,并在煤层气开采过程中不断发生变化。但是,国内外迄今对煤储层渗透性特征和机理仍不完全明了,尤其是对其随开采过程的动态变化规律及其原因极少开展研究工作。

沁水盆地是我国高煤级煤贮藏量最大的盆地,高煤级煤储量达  $1\,885.66 \times 10^8 \text{ t}$ ,占整个盆地煤炭资源量的 96.48%。沁水盆地煤层气资源量巨大,埋深 2 000 m 以浅、风化带以深、含气量在  $4 \text{ m}^3/\text{t}$  以上资源量达 3.28 万亿  $\text{m}^3$ ,占全国同样标准评价煤层气资源总量的 22.87% (叶建平等,1998)。沁水盆地是我国目前煤层气研究与勘探开发试验程度最高的盆地,国内有关单位和个人在此实施了大量基础或应用研究课题,中联煤层气有限责任公司、中国石油天然气总公司、晋城矿务局等单位先后施工各类煤层气井 62 口,其中晋试 1 井、屯留 3 井、屯留 6 井、屯留 7 井等获得日产 10 000  $\text{m}^3$  以上的高产气流,在此基础上探明我国首批煤层气探明储量为 754 亿  $\text{m}^3$ 。目前,中联煤层气有限责任公司已完成枣园示范区共 40 口煤层气开发井的设计,并相继投入施工,有望在我国建成第一个大规模煤层气商业化开发基地。

为此,选择沁水盆地为主要研究对象,致力于探讨相关理论和实践问题,期望通过研究揭示高煤级煤储层渗透性分布与变化规律的内在原因,为我国极具潜力的高煤级煤层气资源勘探开发提供科学依据和可行途径。

## 1.2 研究现状

### 1.2.1 煤储层渗透率研究现状

#### 1.2.1.1 地质背景条件与煤储层渗透率

煤储层渗透率对应力最为敏感,中国煤储层渗透性的决定性因素是原地应力状况(叶建平等,1998)。地应力由大地静应力场和构造应力场叠加而成,因而地应力对渗透率的影响,既反映上覆岩体对煤层的垂向作用力,也反映水平构造应力的作用。Somerton等(1975)发现,有效应力与渗透率之间存在幂函数关系,渗透率随有效应力的增大而减小。Harpalani(1993)、Carman(1997)等对应力作用下煤体瓦斯流动特征进行了一定程度的研究,邓广哲(2000)开展过煤层裂隙应力场控制渗流特性的模拟研究。

煤层的渗透率随埋藏深度的增加呈指数降低(McKee,1987,1998;张彦平,1996)。最新资料表明,深度—渗透率关系实际上要复杂得多,局部应力以及渗透率的增高都将对它产生重大的影响。我国煤储层渗透率随埋深的增大表现出减小的总体趋势,但渗透率的分布比较离散,随深度的增加,渗透率表现为减小、增大和不随深度变化等三种情形(叶建平,1999)。

构造应力场对煤层渗透率的作用十分显著。当构造应力场最大主应力方向与储层的优势裂隙组发育方向一致时,裂隙受到张应力的作用,裂隙的宽度增大,渗透率增高;当构造应力场最大主应力方向与储层的优势裂隙组发育方向垂直时,裂隙受到压应力的作用,裂隙的宽度减小,渗透率减小。秦勇(1999)通过对现代构造应力场主应力方向与煤储层天然裂隙优势发育方向之间相互关系的研究,提出了现代构造应力场对煤储层渗透性的控制机理,并预测了可能具有较高渗透率的煤储层分布区带。

构造挤压区、逆冲推覆带、不同方向断裂结合部位,是构造应力集中的地区,往往也是低渗透率分布的地区;构造应力松弛,转折端是低应力的分布区,往往也是煤层高渗透率的分布区。Decker等(1989)指出:应力松弛地区渗透率高,深度增加,渗透率变化幅度不大;正常应力地区渗透率中等,深度增加,渗透率减小;高应力区渗透率较低,深度增加,渗透率急剧减小。

构造活动是产生煤储层次生裂隙的主要因素,对煤层气的高产富集既有建设性的作用,也有破坏性的作用。适度的断裂和褶皱可以增加煤层的裂隙密度,提高渗透率,次生裂缝发育带也就是高渗透煤储层发育地带。地质构造也是增大渗透率的主要因素,构造裂缝带的煤层渗透率大。如美国圣胡安盆地裂缝渗透率增大主要发生在紧密褶皱区和众多的小褶皱中。煤系地层的差异压实同样可以增大渗透率,差异压实高角度切割面裂隙,连通了面裂隙并形成了裂缝,增大了渗透率(钱凯等,1996)。

关于煤样渗透率与应力状态的关系,国内外学者已作过不同程度的研究(Harpalani,1985;Karn,1975;林柏泉,1987)。余楚新(1994)对同一向斜不同部位的煤样进行了渗透性实验,发现在卸载过程中煤样渗透率大部分得以恢复,但有一滞后值;煤样渗透率随空间和时间的变化而存在差异,这种差异与地质构造部位有密切关系。但关于不同构造形

态、不同应力场环境下煤岩渗透特性的研究,目前还未见报道。至于不同区域应力环境下,煤岩表现出的力学特性对煤岩渗透性能的影响,更未见及报道。

### 1.2.1.2 煤储层自身特征与煤储层渗透率

煤层天然裂隙系统是控制煤储层渗透率的直接因素,渗透率的增加主要来自煤中天然裂隙的贡献。但是,裂隙空间分布的不均一性,造成不同地区裂隙对煤储层渗透率的贡献程度有所不同。美国矿业局发现,面裂隙方向与端裂隙方向的渗透率之比高达 17:1,垂直面裂隙方向钻孔的产气率是平行面裂隙方向的 3~10 倍(Laubach,1998),反映出渗透率具有的强烈取向性或各向异性。煤层渗透率与裂隙宽度的三次方成正比,与裂隙间距成反比,天然裂隙宽度对渗透率起着关键性的控制作用(Levine,1996)。陈金刚等(2002)基于煤层裂隙渗透率的各向异性,在现场利用垂直和平行面裂隙两个方向钻孔抽放煤层气,结果表明,两个方向钻孔的初始瓦斯抽放百米流量的比值为 1.2,垂直方向的衰减系数比平行方向减少了 53.7%,且抽放量在任何时期垂直方向都大于平行方向。Scott(1996)开展了利用微生物技术沿着裂隙把煤转化为气体的实验,认为去除孔隙填充物、增加裂隙孔径的方法,是提高煤储层渗透率、增加煤层气产量的可行途径。

大量研究表明,不同结构类型的煤体,其渗透性各不相同。原生结构和碎裂结构的煤层,遭受构造破坏轻微,裂隙连通性好,具有较好的渗透性。适度的构造破坏,有益于煤层裂隙的发育,使渗透性变好。而煤体原生结构遭受严重破坏的以碎粒结构、糜棱结构为主的煤层,其渗透性显著变差(王生全,1997;吴频,1997;盛建海,1997;池卫国,1999;雷崇利,2001)。煤体结构特征是影响煤层渗透率的重要因素,构造裂隙的发育和适度的煤体破碎能大大改善煤层的渗透性能,从而提高煤层气的产出能力(赵明鹏,1996)。

煤储层渗透率与煤化作用程度有密切关系。关于煤级与煤储层渗透率的关系,目前已形成了较为一致的认识。概括来说,低煤级煤(褐煤、长焰煤)孔隙度大,孔隙喉道半径较大,煤层渗透率最高,中煤级煤次之,高煤级煤渗透性较差(关德师等,1995)。杨起院士等(2000)基于华北煤变质的特点,指出区域岩浆热变质作用有利于提高煤储层的渗透率,并对其作用机理进行了较为深入的探讨。

Symth 等(1993)通过对澳大利亚悉尼盆地南部布里煤层的研究发现:富镜质组(光亮)煤的渗透率是富惰质组(暗煤)煤的 10 倍;镜质组含量与裂隙发育程度之间的正相关关系十分显著,镜质组含量越高,内生裂隙就越发育,煤层渗透性就越高;显微煤岩类型在煤层中的分布规律有可能被用来预测煤层的渗透率,不同煤岩类型在垂向上的交替是造成煤层渗透性垂向分布非均质性的重要原因。Clarkson 等(1997)研究加拿大白垩系烟煤时认为,煤的渗透率随煤岩类型的递减顺序为光亮煤、条带状煤、丝炭、条带状暗煤、暗淡煤。

煤储层厚度同样与裂隙发育的间距和高度具有一定关系(Close,1993;张胜利等,1995),而天然裂隙极度发育的构造煤发育程度却随煤储层厚度的增大而增强(叶建平,1998),由此影响到煤储层渗透率的高低。秦勇等(2000)分析华北晚古生代 47 层煤的试井资料发现,煤储层厚度与渗透率的关系明显分布在两个区域,或呈现出两种截然相反的分布趋势,进而提出了原始渗透率  $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  (而不是国外的  $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ) 可能是我国煤储层渗透性重要商业评价标准的新观点。就构造煤发育的煤储层而言,煤厚与渗透率之间表现出负相关趋势。但从构造煤不发育的煤储层来看,当渗透率小于 0.5

$\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  时,煤层厚度增大,渗透率总体上有增大的趋势;在渗透率大于  $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  时,渗透率随煤厚的增大却反而降低。由此指出:构造煤发育的煤储层,渗透率受沉积作用与沉积期后构造作用的综合影响;对于渗透率小于  $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的构造煤不发育煤储层,沉积作用通过煤厚对天然裂隙发育程度的控制而影响到渗透率的高低。然而,对于渗透率大于  $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的煤储层,上述负相关趋势仅用沉积作用显然无法解释,表明地应力控制之下的裂隙闭合度、煤级和煤岩组成控制之下的裂隙发育密度等因素可能起着更为重要的控制作用。

对于煤层气开发过程中煤储层渗透性的变化规律和原因,不同学者认识不一。于不凡(1985)指出,煤层瓦斯排放后,在三维应力作用下,能够产生煤基质收缩变形的说法尚缺乏足够的证据。周世宁(1978)、李瑞群(1978)在解释中梁山煤矿长时间预抽瓦斯后煤层透气性和抽出量不断增加这一现象时,推测煤基质收缩会引起地应力降低,但对于预抽瓦斯后应力降低值在地应力中所占比重及所带来的影响还不能搞清楚。刘玄恭(1989)在研究中梁山、北票、六枝等矿井瓦斯抽放效果时,认为瓦斯抽放后煤分子直径缩小,煤体产生收缩变形(1.6‰~2.5‰),煤体中裂隙、孔隙相对增大,煤层透气性显著提高(4.9~124.3倍)。屠锡根(1981)在研究阳泉煤层瓦斯抽放参数时,将卸压区渗透系数平均值大小确定为初始渗透系数的3倍。余申翰(1981)则认为煤体收缩使煤体中裂隙增加和扩大,或者产生新的裂隙,使煤的透气性提高,或重烃因压力降低由液态转为气态,导致抽放量增加。

#### 1.2.1.3 煤储层渗透率物理模拟实验

日本学者大冢一雄(1982)、氏平增之(1985)利用毛细管模型研究了成型煤样渗透率随荷载和煤粒大小的变化关系,并就孔隙压缩系数对渗透率的影响进行了研究。Harpalani等(1985)研究了含瓦斯煤样在受载状态下的渗透特征。某些研究者发现:煤样在加载过程中,渗透率与有效压力的关系符合负指数方程,而在卸载的过程中符合负幂函数方程(Somerton, 1975; 林柏泉等, 1987; 罗新荣, 1991; 赵阳升, 1994);煤样渗透率在加载时随压力的增大而减小,在卸载时随压力的降低而增大,渗透率不能够全部恢复,存在滞后现象(罗新荣, 1992; 余楚新, 1994)。李树刚(2001)的实验表明,煤样渗透系数随应力增加并非一直呈负指数规律降低,渗透系数在应力进入弹塑性阶段后趋于增长,接近峰值应力时急剧增长,至峰值强度后仍继续增长,但增长速度减缓。

鲜学福等(1993)探讨了煤样渗透率与地应力、孔隙压力、温度、地电场等参数的关系。段康廉(1993)、赵阳升等(1994)发现,在三轴应力下,煤体渗透系数随体积应力的增加而减少,随孔隙水压力的增加而增大,呈现出指数规律。Gash等(1991)、Puri等(1993)、Harpalani(1993)分别研究了煤储层裂隙孔隙率、绝对渗透率及相对渗透率等参数特征、相互关系及与围压的关系,探讨了储层压力、裂隙频率、煤基质收缩率等对渗透率的影响。傅雪海等(2001, 2002)基于多相介质力学试验,建立了应力与裂隙宽度之间的数学模型和数值模拟方法,借鉴裂隙岩体渗透率张量公式,结合浅部煤裂隙观测资料,对沁水盆地深部煤储层渗透率进行了预测;采用了控制有效应力的方法消除了因流体压力降低和气体解吸引起的渗透率变低问题,利用克林伯格公式校正了气体滑移的影响。结果表明,渗透率增量随绝对渗透率的增加而增大,随流体压力的减少呈对数形式减少;在有效应力不变的情况下,流体压力越小,滑脱效应越明显,所引起的渗透率增量越大,氮气的滑脱效应大于甲烷的滑脱效应。

关于含气煤样力学性质,包括应力—应变特性,前人已做过大量卓有成效的研究工作。氏平增之(1986)在围压不变的情况下,进行了不同氮气孔隙压力的三轴压缩试验,研究了孔隙压力与煤强度的关系。周世宁等(1988)通过对原煤样及模拟煤样进行三轴压缩试验,得到煤体强度与孔隙压力和侧向压力间关系的回归方程。赵阳升(1992)研究了不同围压、不同孔隙瓦斯压力对煤体的强度及弹性模量的影响。林柏泉等(1986, 1987)、Sun(1990)、梁冰等(1995)、金法礼等(1999)、申卫兵等(2001)、孟召平等(2002)对自然煤样的力学性质作过不同程度的研究。傅雪海(2001)分别对自然煤样、饱和水煤样、气水饱和煤样的力学性质进行了对比分析。余楚新(1994)对同一向斜不同部位煤样进行了力学特性实验,结果表明,含瓦斯煤样的弹性模量和泊松比随取样点构造部位的不同而有所变化,但规律不是十分明显。

#### 1.2.1.4 煤储层渗透率数值模拟

关于储层压力对渗透率的影响,不同学者得出了不同的结论。林柏泉(1987)认为,围压小时,在同样的孔隙压力下,变形值大的煤样,渗透率也大;当围压大时,变形值愈大,其渗透率愈小。Patching(1991)的进一步实验指出,克林伯格效应只有当储层压力低于60Psi(约0.4MPa)时才比较吻合。Puri(1993)实验表明,渗透率随储层压力衰减而减小。克林伯格实验表明,随着储层气体压力的降低,产生气体滑脱效应,即气体分子与流动路径上的壁面相互作用引起克林伯格效应,渗透率逐渐增大。

以上研究表明,不同围压下储层压力对渗透率的影响不同。很多学者在研究裂隙岩体时借用太沙基(1923)在研究松散结构体时提出的有效应力概念和形式,Robinson(1959)、Skempton(1960)、Handin(1963)对这个形式作了修正,即: $\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \alpha P \delta_{ij}$ 。式中: $\sigma'_{ij}$ 为有效应力张量; $\sigma_{ij}$ 为总应力张量; $P$ 为孔隙压力; $\delta_{ij}$ 为Kroneker符号; $0 \leq \alpha \leq 1$ 称为等效孔隙压缩系数,它取决于岩石孔隙、裂隙发育程度。大多数学者(如Levine, 1996; 张遂安, 1997)将 $\alpha$ 取为1,段康廉(1993)、赵阳升(1994)认为 $\alpha$ 是作用于煤体上的体积应力与孔隙压力的双线性函数,是在轴压和侧压条件下,将孔隙压力稳定在某一确定数值(即流体不发生流动),测量孔隙压引起的变形,通过反演而得到的,其值变化于0.078 ~ 0.88之间。

Durucan等(1996)引用Kozeny(1996)的经验应力—应变关系式,即 $K = K_0 \exp(-3C_p \Delta\sigma_e)$ ( $K$ 为渗透率, $K_0$ 为初始渗透率, $C_p$ 为孔隙压缩系数, $\Delta\sigma_e$ 为从初始应力状态到给定应力状态应力的变化量),发现煤的渗透率随有效应力的增加而呈指数降低。段康廉(1993)、赵阳升等(1994)指出,有效应力对煤岩体渗透率的影响随体积应力和孔隙压力的变化而变化。其实他们是以瓦斯介质进行试验的, $\alpha$ 值或多或少包含有吸附介质的成分,即煤基质收缩与膨胀的影响,只是没有注意到而已。

从以上可以看出,引用有效应力仍然难以模拟渗透率的变化,还必须考虑煤基质收缩效应的影响。Levine(1996)认为,煤基质收缩量大的煤储层,其渗透率有增加的趋势;煤基质收缩量小的煤储层,渗透率增加与煤裂隙压缩渗透率减少正好相互补充。Schranfnaged等(1989)认为,煤层气产气高峰期,孔隙压力降低、有效应力增大、孔隙体积压缩的负效应,使煤的渗透率降低了15%,而同期气体脱附和基质收缩的正效应所导致的渗透率却增加了60%。

在煤层气储层模拟方面,中国新星石油公司华北石油局(1996)在联合国资助下,利

用柳林地区的资料开发研制了储层模拟软件;骆祖江(1998)开展了煤储层两相流的研究,建立了煤层甲烷生成模型、煤层甲烷赋存运移模型和散失模型,并用建立的模型评价预测了煤层气井产量。煤层甲烷动力学模型的研究始于20世纪80年代末,当时的动力学模型为平衡吸附模型,忽略了煤层甲烷的解吸过程,不能客观反映解吸时间,造成煤层甲烷产量预测值高于实际产量。进入20世纪90年代,随着对煤层甲烷赋存运移机理研究的不断深入,又提出了非平衡吸附动力学模型,认为煤层为双重孔隙介质,煤基质中发育有丰富的微孔隙,煤层甲烷主要以物理吸附形式赋存在煤基质内表面上,面裂隙和端裂隙构成了煤层甲烷运移的基础,考虑了煤层甲烷的吸附作用及由微孔隙到裂隙的扩散过程,较好地反映了煤层甲烷在煤层中的赋存及运移机理,因而得到了普遍关注。此类模型,以目前的COMET模型和COALGAS模型为代表。1995年,经过改进后的COMET2出台,它采用全隐式求解方法,提高了模型的稳定性和运行速度,属于三维、两相、双孔隙的储层模拟器,用以模拟煤层或者常规储层的气、水产能。

关于储层模拟参数的研究,目前多侧重于参数敏感性分析,即通过对各个参数的不同取值,输入储层模拟器中,考察不同参数取值对气水产量的影响程度或幅度。对于历史拟合,现有研究思路或方法是根据煤层气井排采资料数据,由气水量、动液面高度、套压等参数建立工作制度,在模拟器中输入储层原始数据,不断调整较为敏感和排采中易变的参数值,直到使气水产量、累计气水产量达到较好的拟合效果,这时的储层各个参数值作为储层模拟的参数值,目的是对试井及实验室等方法测得的参数值进行校正。

目前研究认为,在煤层甲烷开采过程中,煤储层渗透率一方面随储层压力降低、有效应力增加、裂隙孔隙度降低而变小,另一方面由于煤基质内部气体解吸释放、煤基质收缩、裂隙孔隙度增加而增加。根据美国有关资料,后者的作用比前者大得多(王洪林等,2000)。关于渗透率动态变化分析,多从实验室角度进行研究,至于利用数学语言、数学模型等数学工具对储层参数动态变化规律的研究探索,尤其对渗透率这个对气水产量具有关键控制因素的动态变化情况以及不同构造环境下渗透率动态变化规律的研究,国内外尚未见报道。

### 1.2.2 高煤级煤层气地质研究进展及趋势

高煤级煤(high-rank coal)也称作高煤阶煤,处于煤热演化系列中的高级阶段。高煤级煤系指镜质组最大反射率大于2.0%的煤(秦勇,1994;韩德馨等,1996),包括目前我国惯称的贫煤、无烟煤和超无烟煤。在国际标准化组织标准草案(ISO/DIS 7401/1)中,将高煤级煤定义为无烟煤(anthracite),镜质组反射率大于2.0%。

美国在先期煤层气勘探开发进程中,无论是在基础研究还是生产实践方面都付出了极大的代价,在中煤级煤储层中实现了煤层气的成功开发,建立了中煤级煤层气成藏与开发的系统理论,为世界上其他主要产煤国煤层气开发奠定了理论和工艺技术基础。但是,美国煤层气地质背景条件相对简单,高煤级煤储层裂隙不甚发育,渗透率相对较低,因而长期视高煤级煤为煤层气勘探开发的“禁区”。20世纪90年代以来,随着煤层气工业的迅猛发展,美国煤层气资源的评价和开发活动不再局限于中煤级煤,逐渐扩展到低煤级煤和高煤级煤。

关于高煤级煤储层特性,国内外进行了长期的探索,分别在高煤级煤的物理性质、显

微组成特征、化学结构以及研究方法等方面取得了卓有成效的研究结果。秦勇(1994, 1995, 1996, 1998)首次提出了中国高煤级煤显微组分划分命名系统,建立了新的显微组分以及光性演化模式,探讨了高煤级煤大分子结构、孔隙等演化的阶段性和阶跃性,提出了高煤级煤孔径结构自然分类系统,为高煤级煤储层特征研究提供了一定基础。秦勇等(1998, 1999, 2000, 2002)探讨了沁水盆地石炭二叠系煤储层的物性特征及其分布规律,研究了盆地中、南部现代构造应力场特征与煤储层天然裂隙发育特征之间的相互关系,探讨了现代构造应力场最大主应力差对高煤级煤储层渗透性的控制机理,并预测了可能具有较高渗透率的煤储层在空间上的展布规律。傅雪海等(1999, 2000, 2001, 2002)通过多相介质力学模拟实验,研究了沁水盆地煤基质的自调节效应及对渗透率变化所可能造成的影响,基于弹塑性力学原理建立了煤储层渗透率的预测模型,并对盆地煤储层渗透率的三维空间分布特征进行了预测。

我国复杂的构造地质背景条件以及中—新生代的岩浆活动,使我国煤的演化呈现出多阶段、多热源叠加变质的特点(杨起等, 1996)。我国煤层气地质研究者通过不懈的探索,揭示出我国高煤级煤地区具有较高的煤层气资源潜力和开发潜势。中国矿业大学煤层气地质课题组自1994年以来的60余篇研究论文揭示了我国高煤级煤地区煤层气开发有利地带除具有煤储层含气量高、裂隙较为发育以及渗透率相对较高外,通常还具有含气饱和度极高、解吸压力高、采收潜势大、相渗透率高、孔容较大、过渡孔和微孔较为发育等有利条件。

在高煤级煤层气成藏作用方面,我国研究者近年来也开展了一定程度的研究工作,考虑特定的主控地质因素组合,在煤层气成藏类型、控制因素、与煤层气高产富集的关系等方面取得了一定认识。鉴于沁水盆地的具体条件和勘探成果,综合考虑主应力差、地下水动力场、埋深三个主控因素(秦勇等, 1999, 2002),提出了有利于煤层气富集高产的八种成藏模式,认为高主应力差—滞流封闭—浅埋类型对煤层气富集高产极为有利,中主应力差—缓流封闭—中埋类型较为有利,中主应力差—缓流封闭—深埋类型可能有利。

值得强调的是,我国率先在世界上开展了煤储层地质演化史数值模拟的研究,初步建立起适用于高煤级煤盆地煤层气地质条件的数学模型和模拟方法,并通过对沁水盆地的实例研究,获得了某些有意义的新发现或新认识(韦重韬, 1998, 2002)。例如,由于烃浓度封闭效应,多煤储层中煤层气扩散散失强度要低于单一煤储层,内部煤储层扩散强度低于边界煤储层;煤储层内游离甲烷在地质历史中可出现一个或多个峰值,峰态随含煤地层中煤储层组合不同而有差异;盖层突破散失作用具有突发性和脉动性的特点,通常出现在异常古地热场条件下的生气高峰时期;煤储层压力下降或构造应力场由张性转化为压性条件,会导致煤储层裂隙系统关闭并使煤层气渗流运移作用停止,渗流运移散失作用具有速度快、时间短的特点;在整个地质演化历史过程中,煤层气的渗流散失强度要低于扩散散失强度。基于这些认识,提出了煤层气地质历史复式演化模式。

高煤级煤储层中煤层气的开发,目前在世界上还没有成功的先例。高煤级煤储层中内生裂隙不发育或消失,导致煤储层渗透性变差。而与煤层气产出机理完全相同的美国密执安盆地页岩气的成功开发和我国高煤级煤储层中产气的突破,使人们逐渐认识到,高煤级煤储层中的煤层气能够凭借适当发育的天然裂隙和人造裂隙而大量产出,构造地质背景条件与高煤级煤储层裂隙发育特征的有利匹配,使得高煤级煤层气资源具有较高的

开发潜势。因此,高煤级煤层气地质研究近年来逐渐受到关注,研究工作目前已从基础地质、资源地质、地质选区、开发地质等角度在我国全面展开,相信在不远的将来会取得系统而深入的研究成果,形成适用于我国地质条件的煤层气地质理论体系,推动我国煤层气工业的尽快形成与发展。

### 1.2.3 存在的主要问题

发现问题是解决问题的基础,分析本研究方向存在的问题,有利于本书研究工作的科学定位和正确切入。总结目前研究现状可以看出,前人在地质背景条件、煤储层自身特征对渗透率的影响、煤储层渗透率物理模拟实验、煤储层渗透率数值模拟等方面进行了大量研究工作,取得了诸多卓有成效的研究成果,对煤层气资源勘探开发起到了巨大的指导作用。但是,先前对煤储层渗透性的研究多侧重于渗透性影响因素、渗透率经验计算或煤层渗透率与各单因素之间静态关系,对高煤级煤储层渗透率的受制规律与机理研究较少,在构造—采动过程中对煤储层渗透率动态作用机制等方面几乎未见成果报道。

第一,对高煤级煤储层物性及其控制因素和机理认识不够深入全面,导致形成了高煤级煤层气资源难以开发的传统观念。美国的高煤级煤层气资源难以开发,主要是因为受深成变质作用的高煤级煤储层遭受强烈压实,裂隙不甚发育,渗透率较低。我国沁水盆地高煤级煤储层渗透率相对较高,某些煤层气井打出了工业性煤层气流,预示着我国高煤级煤储层具有良好的煤层气开发前景,但对于这种现象目前在理论上还未形成深刻认识,缺乏有效预测渗透率及其分布的理论模型和数值方法,无法指导具体的煤层气勘探实践。

第二,对煤储层渗透率动态变化的研究成果尚不完善,在工程上尚没有投入具体应用,无论是瓦斯渗流还是煤层气开发数值模拟中均将其作为常数处理。这与煤层气地面开发过程中,随着地下水排出和气体解吸,煤基质发生收缩,煤储层内应力、压力、孔裂隙结构及渗透性等均发生相应变化的事实不符。究其根本原因,在于目前缺乏对影响煤储层渗透率内在因素的全面深入理解,尚未形成构建煤储层精细数值模拟的模型与方法的理论基础。

第三,高煤级煤层气的勘探开发在国内外都是一个极具探索性的新领域,我国高煤级煤地区不乏渗透率较高且打出了高产煤层气井的地段,但单井产量衰减较快,严重制约了我国煤层气开发产业化发展步伐。其中一个重要原因,在于目前尚未建立煤储层精细数值模拟的模型与方法,缺乏有效的数学模式来预测煤储层渗透率在煤层气开采过程中的动态变化,无法指导我国具体的高煤级煤地区的煤层气开发实践。

第四,不同构造环境下的煤储层,其渗透率在煤层气开采过程的变化规律存在差异,但这种看法目前基本上仅停留在概念或总体上的认识。关于构造与采动因素耦合效应对煤储层渗透率在采动过程中动态变化规律的影响与机理,目前尚未做过研究与探讨,导致科学、精确地指导高煤级煤层气资源开发的良好愿望无法实现。

## 1.3 研究方案

围绕高煤级煤储层长期被视为煤层气勘探开发“禁区”与我国实现高煤级煤层气井产气突破这一对矛盾,针对高煤级煤层气井初期产量高但衰减较快这一现象,基于侧重构

造控制的研究思路,以我国煤层气基础研究与勘探开发试验程度最高、开发前景较好的沁水盆地为依托,全面收集现有煤层气勘探和开发实验数据资料,选择具有代表性的构造部位采集煤样,采用实际资料分析、多相介质物理模拟、渗透率变化数值模拟的综合研究方法,重点探讨高煤级煤储层原始渗透率分布的控制因素、渗透率在煤层气采动过程中的动态变化模式和原因以及构造—采动—渗透率变化的耦合关系,期望通过研究深入揭示高煤级煤储层渗透性的控制机理,建立具有实用前景的预测模式和方法,为我国高煤级煤层气资源的高效经济勘探开发提供科学依据。

### 1.3.1 研究内容与研究目标

(1)高煤级煤储层渗透率的构造控制规律与机制。核心是现代构造应力场、构造形态、天然裂隙与试井渗透率之间的关系,查明这些构造因素对煤储层原始渗透率的控制规律,并从地质—力学原理上予以科学解释。

(2)高煤级煤储层渗透率的采动控制规律与机制。核心是储层压力、煤基质收缩膨胀速率与渗透率之间的关系,查明它们对煤储层渗透率控制的表现形式与规律,建立煤储层渗透率在采动过程中变化的数学模型。

(3)高煤级煤储层渗透率与构造、采动因素的耦合关系与机理。重点探讨不同构造环境下煤储层渗透率在采动过程中变化规律的差异性,寻求两者共同对渗透率的控制关系,并将这种关系引入上述数学模型,进而将其应用于煤储层数值模拟,得到修正的可用于煤储层精细数值模拟的模型与方法。

### 1.3.2 研究方法及技术流程

煤储层渗透性是影响煤层气井产能的关键因素之一,其在采动过程的变化规律也最难确定。为此,本书以试井和生产排采资料为基础,以多相介质煤岩体力学模拟、煤储层数值模拟反演为主要手段,采用煤层气地质理论与生产实际相结合,物理模拟与储层模拟相结合,静态模拟与动态模拟相结合等多方位的研究方法,分四个阶段完成本书研究工作。

第一阶段,调研、野外考察与资料初步分析。密切关注我国煤层气勘探开发试验及科学研究的前沿动态,全面收集研究区煤层气地质背景资料、煤层气试井及生产排采数据。在煤矿井下考察煤储层剖面,并统计天然裂隙发育状况。选择尽可能覆盖整个盆地高煤级煤区并具代表性的构造部位采集煤样。同时,研究消化前人关于研究区构造应力场等的研究成果,初步分析煤储层原始渗透率与构造作用之间的相关关系。

第二阶段,测试分析、实验模拟及数据处理。采用德国莱兹公司产 MPV-3 显微光度计测定煤样的镜质组反射率,并在光学显微镜下观测统计煤样中显微裂隙的发育特征。采用中国矿业大学电液伺服岩石力学实验系统测试煤岩的基本力学性质,采用石油勘探开发研究院廊坊分院三轴压缩岩石力学性质实验开展多相介质煤基质吸附膨胀效应和有效应力的物理模拟实验。采用美国 Terra Tek 公司生产的全直径岩芯流动仪进行煤岩大样的单相和气、水相对渗透率模拟实验。

第三阶段,煤储层渗透率数值模拟反演和渗透率动态预测模型构建。基于上述物理

模拟实验结果,分析渗透率与围压、流体压力、有效应力、煤基质收缩效应等之间的耦合关系,提炼煤基质自调节效应与渗透率变化关系的数学模型。结合试井渗透率数据和煤层构造发育特征,基于 J11 和 J32 两口不同构造部位煤层气井山西组煤储层的实际排采数据,借助中国煤田地质总局第一勘探局 COMET2 煤储层模拟软件开展煤层气排采过程中渗透率动态变化规律的模拟研究。结合上述两方面的研究成果,构建排采过程中煤储层渗透率变化的动态预测模型。

第四阶段,耦合机理分析和预测方法研究。综合分析上述研究成果,分析构造—排采—煤储层渗透率变化之间的耦合规律,探讨它们之间耦合的地质力学机理,建立排采过程中煤储层渗透率动态变化预测的模型和方法。

## 1.4 研究区煤层气地质背景

沁水盆地位于山西省东南部,处于北纬  $35^{\circ} \sim 38^{\circ}$ 、东经  $111^{\circ}00' \sim 113^{\circ}50'$ ,东西宽约 120 km,南北长约 330 km,总面积约  $3.96 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盆地介于太行山隆起和吕梁隆起之间,北部以五台山隆起为界,南部与中条山隆起相邻,西部紧邻晋中断陷和临汾—运城断陷,东部以晋获大断裂为界与太行山隆起相接,海拔多在 700 m 以上,地形起伏较大。

### 1.4.1 含煤地层、煤层与煤级

沁水盆地含煤地层为上古生界石炭系和二叠系,与下伏奥陶系呈平行不整合接触关系。石炭系由本溪组和太原组组成,本溪组底部为鸡窝状黄铁矿,灰白色铝土质岩,下部为含铁铝土岩和铝土质页岩。太原组主要岩性为砂岩、灰岩、泥岩、砂质泥岩夹煤层及石灰岩,含煤层 4~14 层,主要为 5、7、12、13、15 号煤层,地层厚度 50~135 m。二叠系在本区广泛出露,包括下统的山西组和下石盒子组,上统的上石盒子组和石千峰组,地层总厚度 470~1 065 m。其中,山西组含煤 2~7 层,主要煤层为 2 号和 3 号煤层。

全区煤层厚度变化总趋势是东南部厚而向西北部逐渐变薄。山西组 3 号煤层(上主煤层)和太原组 15 号煤层(下主煤层)全区稳定发育。上主煤层厚度变化于 0.53~7.84 m 之间,在盆地东南部厚度较大,武乡地区煤层结构简单,无夹矸或偶见一层夹矸,厚度小于 0.1 m,其他地区煤层结构相对复杂。下主煤层总体上南北较厚,中部、西部相对较薄,且西北部厚度大于东南部,一般厚 2.0~6.0 m,在北部寿阳—阳泉一带可达 7 m 以上,北部和南部煤层结构简单,中部煤层结构复杂,形成多个煤分层,可由 3~4 个分层组成。

沁水盆地煤级比较齐全,从气煤到无烟煤均有分布。盆地西部以焦煤和气煤为主,东部以瘦煤和贫煤为主,北部以瘦煤、贫煤和无烟煤为主,而南部基本上为无烟煤。

### 1.4.2 盆地构造

沁水盆地现今整体构造形态为一近 NE—NNE 向的大型复式向斜,轴线大致位于榆社—沁县—沁水一线,东西两翼基本对称,倾角  $4^{\circ}$  左右,次级褶皱发育。在北部和南部斜坡仰起端,以 SN 向和 NE 向褶皱为主,局部为近 EW 向和弧形走向的褶皱。断裂以 NE、NNE、NEE 向高角度正断层为主,主要分布于盆地的西部、西北部以及东南缘(见图 1-1)。



盆地的不同部位具有不同的构造特点。总体来看,西部以中生代褶曲和新生代正断层相叠加为特征,东北部和南部以中生代的 EW 向、NE 向褶皱为主,盆地中部 NNE—NE 向褶皱发育。断层主要发育于盆地东、西边部,在盆地中部有一组近 EW 向正断层,即双头—襄垣断裂构造带。

根据盆地内不同地区构造样式的差异,划分为 12 个构造带(张建博,王红岩,1999):

(1)寿阳—阳泉单斜带,即沁水复向斜的北部翘起端,也即阳泉复向斜。除盂县附近发育近东西向褶曲外,其他区均以 NNE、NE 向构造为主,NNW 向构造次之。主要断层有:郭家沟正断层,倾向 SE,断距为 250 m;杜庄断层,走向 NNE,倾向 NWW,断距达 200 m。此外,区内陷落柱也有发育,平昔矿区最甚,平均可达 3.5 个/km<sup>2</sup>,直径几十米到百余米不等,陷壁角在 70°~80°。

(2)天中山—仪城断裂构造带。位于沁水复背斜西北部,地表为一走向 NNE 的断裂鼻隆构造带。其内褶曲主体走向 NE70°~80°。背斜开阔,向斜紧闭,与其平行有断裂发育,组成地堑、地垒结构,地堑中有零星三叠系和侏罗系出露。上述地表结构特性,反映了它与下伏大型背斜隆起相一致,即代表该背斜隆起顶部的强烈构造区。

(3)聪子峪—古阳单斜带。位于沁水复向斜中部细腰处西侧,上倾方向即为万荣复背斜的霍山倾伏部分,两者在冯家集—苏堡断裂带相接。断层走向 NNE,正断层。单斜带上的褶曲表现为在近 SN 向左行剪切作用下形成的雁列构造。本带南部有古县背斜,东缘有赤石桥—坚友雁列背斜带。

(4)漳源—沁源带状构造带,即沁水复向斜中段的西翼部分。褶曲走向近 SN,与西侧单斜带上的褶曲平行排列。褶曲构造西有胡家沟—沁源背斜带、景风—鹿儿回背斜带,东有分水岭—柳湾雁列背斜带和漳源—王家庄背斜带。断裂走向多为 NNE,断距 50~250 m。王陶南部发育两条 NNE 向相向倾斜的正断层,断距达 200 m,构成狭长的地堑构造带。

(5)榆社—武乡构造带,即沁水复向斜中段的东翼。区内次级褶曲呈 NNE 向雁行排列,两翼倾角一般为 3°~10°。较大的褶曲有大佛头—李家窑向斜,长约 30 km,轴部地层为石千峰组,东翼倾角为 11°~17°、局部达 20°以上,西翼倾角为 19°~23°、局部达 25°以上;寺沟后扶峪背斜,长 30 km,东翼倾角为 8°~10°,西翼倾角为 10°~15°。区内断层走向 NNE,倾向 NWW,延伸长度较短,落差较小,且具有东弱西强的发育特点。

(6)娘子关—坪头单斜带。位于沁水向斜东翼北部边缘,东与赞皇复背斜相接,在构造上表现为较陡的挠曲带,边缘发育鼻状背斜构造。较大的褶曲有范家岭向斜、背斜,轴向 NEE,两翼倾角平缓。断层发育稀少,有洪水正断层,走向 NNE,断距为 55 m;李阳正断层,倾向 NWW,断距为 200 m。发育一条逆断层,走向 NEE,断距为 15 m。此外,还有少数陷落柱发育。

(7)双头—襄垣断层构造带。为一横切盆地中南部、走向 NEE 的左行走滑断裂带。东段形成文王山地垒,西段构造线断续出现,规模较小。

(8)古县—浇底断裂构造带。位于沁水复向斜南部西翼边缘,西以浮山正断层与万荣复背斜相接,由一系列纵向 NNE 及 NE 的断层构成,并发育少量褶曲构造。

(9)安泽—西坪背斜隆起带,位于沁水复向斜南段西翼。主体构造为由一系列排列