

国家自然科学基金资助项目 (41330638, 41402135) 资助

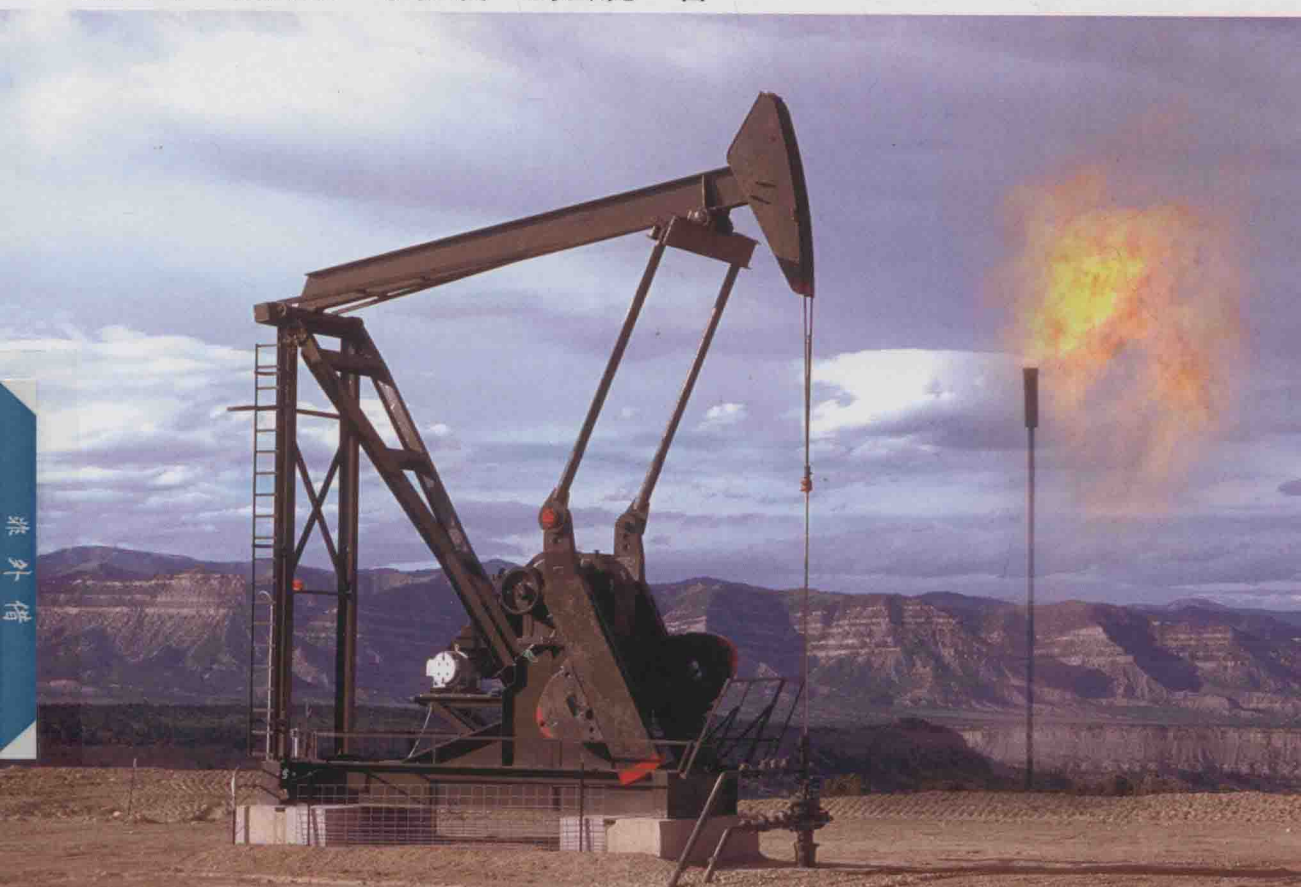
江苏省煤基CO₂捕集与地质储存重点实验室 (中国矿业大学) 开放基金项目 (2015A04) 资助

江苏高校优势学科建设工程资助项目资助

沁水盆地南部煤层气直井产能的控制因素及预测

Prediction and Controlling factors of the
Productivity of CBM Vertical Wells in Southern Qinshui Basin

刘世奇 桑树勋 李梦溪 刘会虎 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家自然科学基金资助项目(41330638,41402135)资助

江苏省煤基 CO₂ 捕集与地质储存重点实验室(中国矿业大学)开放基金项目(2015A04)资助

江苏高校优势学科建设工程资助项目资助

沁水盆地南部煤层气直井 产能的控制因素及预测

刘世奇 桑树勋 李梦溪 刘会虎 著

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书以煤层气地质学、煤层气藏工程、油气藏数值模拟等学科的理论和方法为基础,论述了地质与工程因素对煤层气直井产能的协同控制理论,并按照“地质描述(地质模型)—物理模型—数学模型—数值模型—计算机模型—模型应用”的数值模拟方法,系统阐述了煤层气直井产能预测的方法与实现过程,并结合现场实例介绍了工程应用。主要包括煤层气直井产能的地质与工程协同控制理论;沁水盆地南部典型煤层气开发地质—工程模型,包括沁水盆地南部煤储层原位地质模型,压裂强化改造的煤储层地质模型和排采动态地质模型;煤储层与煤层气生产动态过程数学模型;数学模型的求解与产能预测实例等。

本书可供煤层气地质及勘探开发领域的专业技术人员参考,也可作为高等院校相关专业研究生或本科生的教学参考书目。

图书在版编目(CIP)数据

沁水盆地南部煤层气直井产能的控制因素及预测/

刘世奇等著. —徐州:中国矿业大学出版社,2017.10

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3415 - 5

I. ①沁… II. ①刘… III. ①煤层—地下气化煤气—直井—产能预测 IV. ①P618.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 008800 号

书 名 沁水盆地南部煤层气直井产能的控制因素及预测

著 者 刘世奇 桑树勋 李梦溪 刘会虎

责任编辑 潘俊成 孙建波

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 9.5 字数 243 千字

版次印次 2017 年 10 月第 1 版 2017 年 10 月第 1 次印刷

定 价 36.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前言

煤层气是一种高效洁净能源。煤层气的开发对于缓解我国油气资源紧张现状、减轻矿井灾害程度、减少温室气体排放等具有重要意义,是我国增强能源自主保障能力与调整优化能源结构的重要途径。我国煤层气资源非常丰富,2 000 m 以浅的储量达到 $36.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 开发潜力巨大。高阶煤层气资源约占全国煤层气资源总量的三分之一。与美国以中阶煤储层作为煤层气开发的主要目的层不同,我国煤层气开发首先在以沁水盆地为代表的高阶煤储层实现突破。中国高阶煤储层构造条件复杂,渗透率总体偏低,增加了煤层气开发的难度。

沁水盆地南部作为典型的高阶煤层气藏,煤层气储量丰富,地质特色鲜明,是我国原位煤层气开发最为活跃的地区,也是中国实现煤层气商业性开发的最主要地区,在我国煤层气开发中具有代表性。最新一轮的资源评价结果表明,沁水盆地埋深 2 000 m 以浅的煤层气地质资源量可达 $3.98 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。中石油华北油田分公司拥有沁水盆地南部郑庄、樊庄、沁南东-夏店(长治)、沁南西(安泽)等 7 个矿权区,面积 $5\,169 \text{ km}^2$,资源量 $1.08 \times 10^{12} \text{ m}^3$,累计探明煤层气储量 $2.413 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。其中,晋城地区的樊庄区块是中国煤层气开发最早、技术最成熟的区块之一,已探明含气面积 398.23 km^2 ,煤层气资源量 $1\,043.30 \times 10^8 \text{ m}^3$,建成了我国重要的煤层气开发基地。截至 2013 年年底,华北油田已完钻各类井 2 000 余口,合计建成产能 $21.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,2013 年实现商品气量 $8.05 \times 10^8 \text{ m}^3$,煤层气生产形势良好。沁水盆地南部以直井作为煤层气生产的主要方式,同时,作为典型的高阶煤层气藏,煤储层具有“低渗”、“低压”、“欠饱和”的特点,煤层气开发难度大,如何进一步提高煤层气直井产能成为该地区煤层气开发亟待解决的关键问题。

煤层气生产的目的是最大程度地获取煤层中赋存的煤层气资源,提高煤层气井产能。煤层气井产能的控制因素繁多、控制机理复杂,且地质与工程因素之间存在着复杂的关系,并在整个煤层气勘探开发过程中相互影响。目前,以单一因素分析为主的产能主控因素研究,很少涉及各控制因素之间的协同控制作用,受到工程实践的挑战,难以有效指导煤层气井高效生产。研究地质因素与工程因素对煤层气井产能的协同控制作用,对提高煤层气井的产能具有更加现实的指导意义。

煤层气藏的研究和开发是一个复杂的综合性科技问题,新老区块开发方案设计、历史拟合、动态预测等方面的研究,采用地质理论及相关工程技术都难以实现,而煤储层数学建模技术在开发方案优选、经济评价、机理研究等方面具有较大优势,利用煤储层建模技术可再现生产历史,定量分析煤层气藏开发潜力。目前,煤层气井产能预测研究的重点集中在数学模型的建立和求解方面,注重参数的选取及各参数与煤层气井产能之间的关系,忽略了煤储层地质模型及物理模型的建立,数学模型的建立往往缺少地质模型、物理模型的指导,与储层实际差别较大,适用性低。特别是不同煤阶的煤储层物性特征、孔裂隙发育特征等各不相同,具有其独特的发育特点。因此,在煤层气井产能预测研究中,建立典型的生产地质模型并指导物理模型和数学模型的建立对于提高数学模型的适用性至关重要。

为解决上述问题,本书在与中国石油股份有限公司华北油田长期合作的基础上,以国家自然科学基金资助项目(41330638,41402135)、江苏省煤基 CO_2 捕集与地质储存重点实验室(中国矿业大学)开放基金项目(2015A04)以及江苏高校优势学科建设工程资助项目为依托,以煤层气开发程度最高、资料最为丰富的沁水盆地南部樊庄区块为示范研究区,开展煤层气直井产能的地质与工程协同控制机理及产能预测方法的研究。本书的研究内容深化了对煤层气直井产能控制机理的认识,进一步完善了煤层气直井产能的预测方法和理论,为该地区煤层气直井的勘探开发方案设计以及生产调整提供依据,也为我国高阶煤层气井的生产以及产能提高提供借鉴。

本书内容分为煤层气开发地质条件与生产特征、煤层气直井产能的地质与工程协同控制理论、沁水盆地南部典型煤层气开发地质—工程模型、煤储层与煤层气生产动态过程数学模型、数学模型的求解与产能预测实例五大部分。全书由刘世奇副研究员、桑树勋教授主持撰稿,各章节撰稿分工为:前言由刘世奇完成;第一章第一节由刘会虎、李梦溪完成,第二节由刘世奇、李梦溪完成;第二章第一节和第二节由刘世奇完成,第三节由刘世奇、桑树勋完成;第三章第一节由桑树勋、刘世奇、刘会虎完成,第二节由刘世奇、桑树勋完成,第三节由刘世奇完成;第四章和第五章由刘世奇完成。全书稿件由桑树勋教授、李梦溪高工审校,插图由刘世奇副研究员审校。本书中涉及的煤层气井产能数值模拟工作由刘世奇完成,刘会虎、徐宏杰、朱启朋、张杰芳参与完成了资料统计、图件编制和计算机清绘等工作。

在撰写过程中,参考了大量学术专著、科技论文、科研报告、软件说明书及网络文献等,引用了中国石油股份有限公司华北油田煤层气勘探开发分公司近年来所立科研课题成果,如“樊庄区块南部直井增产技术研究”、“煤层气流体化学生产监测与测试”、“樊庄区块南部煤层气群井排采井间干扰与增产效果研究”、“樊庄区块南部煤层气井流体化学场监测”和“煤层气勘探开发关键技术研究示范工程”课题八——煤层气井流体化学场监测”。

中国石油股份有限公司华北油田煤层气勘探开发分公司总地质师李梦溪高工、煤层气地质研究所所长王立龙工程师及公司的各位同仁在煤层气勘探开发资料收集与样品采集等诸多方面给予了大力支持和无私帮助!中国矿业大学资源学院黄华州讲师、王冉副教授、周效志副教授和姜立君讲师,安徽理工大学地球与环境学院刘会虎副教授、徐宏杰讲师在写作思路提供了建设性意见。中国矿业大学资源学院高贺凤实验员、张井实验员、唐家祥实验员,中科院广州地化所陈华山副研究员,中国矿业大学资源学院 2012、2013、2014 届部分硕士研究生参加相关的实验测试。

在此,谨向上述单位、个人表示诚挚的谢意!

作者谨识

2017 年 1 月

目 录

第一章 煤层气开发地质条件与生产特征.....	1
第一节 煤层气开发地质条件.....	1
第二节 煤层气井生产特征.....	6
第二章 煤层气直井产能的地质与工程协同控制理论	11
第一节 煤层气直井产能的地质控制	11
第二节 煤层气直井产能的工程控制	24
第三节 煤层气直井产能的地质与工程协同控制机理	43
第三章 沁水盆地南部典型煤层气开发地质—工程模型	58
第一节 沁水盆地南部煤储层原位地质模型	58
第二节 压裂强化改造的煤储层地质模型	71
第三节 排采动态地质模型	76
第四章 煤储层与煤层气生产动态过程数学模型	87
第一节 基于压裂强化改造的典型煤储层物理模型	87
第二节 地质与工程参数的选择	91
第三节 数学模型的建立	92
第五章 数学模型的求解与产能预测实例.....	106
第一节 数学模型的离散化.....	106
第二节 数值方程组的求解.....	125
第三节 煤层气生产数值模拟软件.....	133
第四节 煤层气直井产能预测实例.....	136
参考文献.....	140

第一章 煤层气开发地质条件与生产特征

沁水盆地位于山西省东南部(图 1-1),含煤面积 29 500 km²,煤炭储量 5 100 亿 t,是我国主要的特大型含煤盆地,也是世界储量最大的高煤阶煤层气田之一^[1,2]。沁水盆地南部作为典型的高阶煤层气藏,是中国实现煤层气商业性开发的最主要地区。

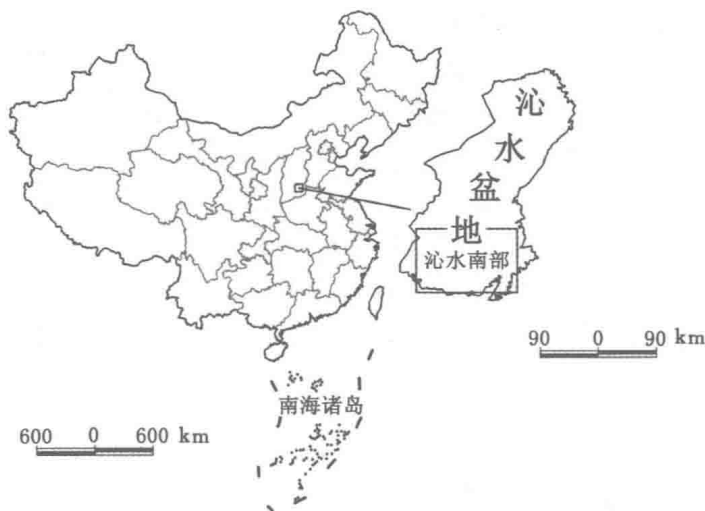


图 1-1 研究区地理位置

第一节 煤层气开发地质条件

一、沉积背景与含煤特征

沁水盆地南部含煤地层为石炭—二叠系,自下而上包括本溪组、太原组、山西组、下石盒子组、上石盒子组及石千峰组,其中以太原组和山西组为主要含煤地层^[3,4]。山西组地层厚度一般为 41~83 m,平均约为 70 m 左右(图 1-2),为发育于陆表海沉积背景之上的三角洲沉积,一般从三角洲河口沙坝、支流间湾过渡到三角洲平原相^[4,5],并在三角洲沉积基础上发育了一套以细、粉砂岩及泥岩为主的含煤岩系^[4,5]。

研究区山西组共有 4 个煤层,自上而下编号为 1[#]~4[#]。其中 3[#]煤层是全区分布最稳定、单层厚度最大的煤层,为煤层气勘探开发的主要目的煤层,也是本书研究的目的煤层。研究区山西组 3[#]煤层厚度介于 3.25~8.85 m 之间,主要变化于 6.00~7.00 m;3[#]煤层埋深介于 409.70~808.70 m 之间,大部分地区埋深介于 500~700 m 之间;3[#]煤层显微组分以镜质组为主,含量介于 53.90%~92.7%,惰质组含量介于 7.0%~46.1%;3[#]煤层原煤灰分(A_d)含量变化较大,主要介于 3.54%~19.42%之间,平均约为 7.62%,个别区域的原煤灰分含量极低(低至 0.18%)或极高(高至 50.76%);3[#]煤层原煤挥发分(V_{daf})含量主要介于 3.09%~6.78%之间,平均约为 5.59%,个别区域的原煤挥发分含量极低(1.40%)或极高

(22.08%);3#煤层原煤水分(M_{ad})含量一般较低,介于0.61%~1.83%之间,平均约为1.11%;最大反射率值介于3.24%~3.98%之间;空气干燥基含气量介于8.03~31.44 cm³/g之间。

二、构造特征

(一) 区域构造特征与演化

沁水盆地为华北地台山西隆起上的构造型复式盆地,形成于中生代末期^[4,6,7]。含煤层系共经历四个构造演化期:海西期、印支期、燕山期和喜马拉雅期^[8]。海西期—印支期为沉降深埋时期;印支—燕山早期为稳定和波动时期,地壳整体抬升,广泛遭受剥蚀;燕山中期—晚期为构造抬升期,此时的地壳快速抬升和强烈的岩浆活动,造成该区煤层埋深的进一步减小;喜马拉雅期为埋深持续减小与构造分异时期,含煤层系发生了严重的调整与改造,最终形成了现今的格局^[9,10]。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,倾角为4°左右,次级褶皱发育。

沁水盆地南部主要煤层气开发区块(樊庄区块与郑庄区块)位于晋城地区,主体部分位于山西省沁水县境内,以寺头断层为界,西侧为郑庄区块,东侧为樊庄区块。樊庄区块与郑庄区块处于沁水盆地南部晋城马蹄形斜坡带,东为太行山复式背斜隆起,南为中条山隆起,西为霍山凸起,北部与盆地腹部相接(以北纬36°线为界)。樊庄区块3#煤层主要构造形态(断层走向与褶曲轴向)呈NNE向展布,次一级褶曲发育且方向多变,明显表现出受多期构造作用的影响,断层不发育(图1-2)。

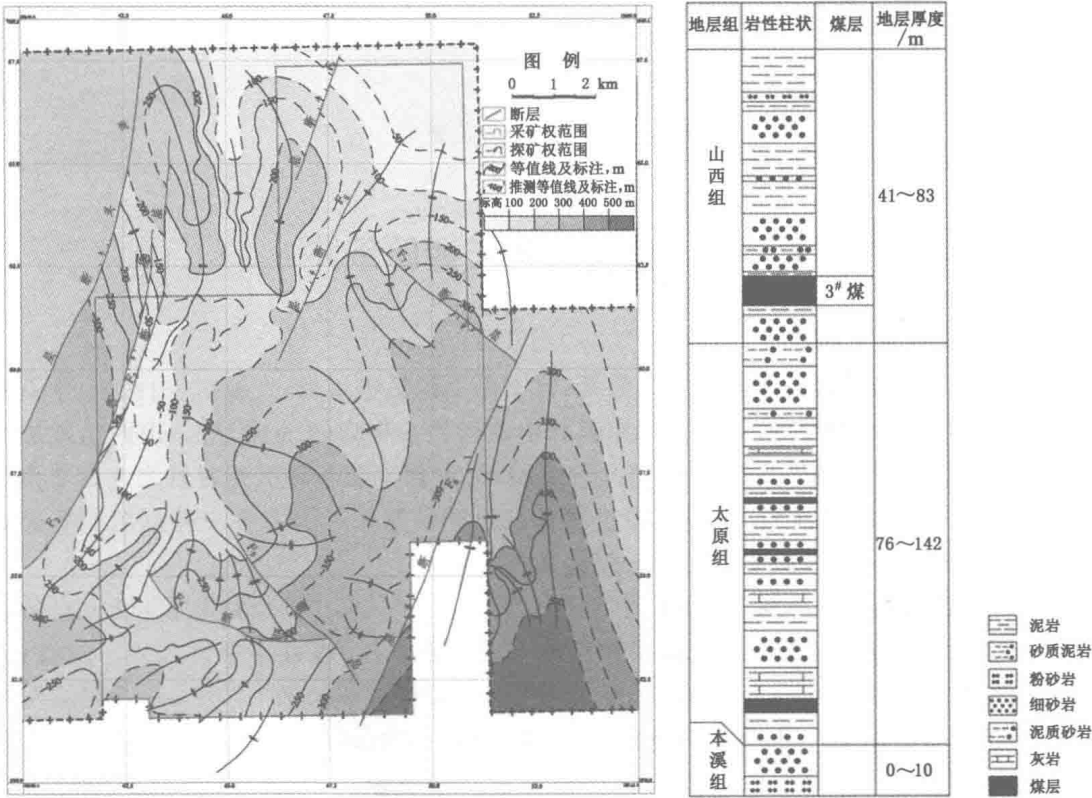


图 1-2 樊庄区块 3# 煤层构造图及山西组、太原组沉积序列

(二) 褶曲构造

樊庄区块向斜构造一般出露较好,易于观测,背斜构造的核部往往发育有冲沟,不利于观测,而背斜构造两侧的地层产状表明背斜核部岩层较破碎,易遭受侵蚀作用。樊庄区块主要发育 NE 与 NW 两个方向的褶曲。根据野外地质调查以及所收集的区域地质资料,研究区褶曲轴向主要集中在 $15^{\circ}\sim 54^{\circ}$ 和 $320^{\circ}\sim 338^{\circ}$, 主要发育两翼倾角较缓的宽缓褶曲(图 1-3)。例如,图 1-3 为野外观测到的一个樊庄区块向斜构造(核部观测点 $N35^{\circ}48'58.9''$, $E112^{\circ}37'31.3''$),该向斜构造的 NW 翼产状为 $118^{\circ}\angle 9^{\circ}$,SE 翼的产状为 $296^{\circ}\angle 14^{\circ}$,为一不对称向斜构造。

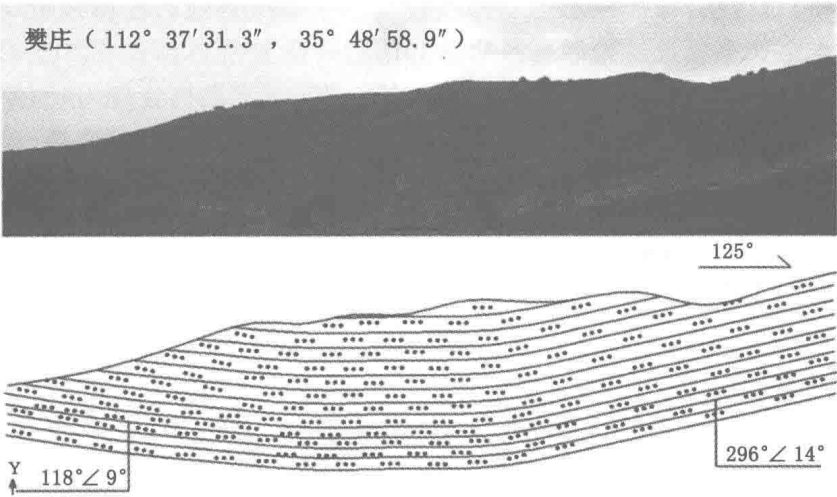


图 1-3 樊庄区块野外向斜素描图

(三) 断层构造

樊庄区块断裂构造不发育,野外实际观测中可见数条断层,多为正断层,断层规模相对较小(表 1-1)。寺头断层为区内主要断层,也是区内最大的断层构造。由于地面剥蚀与冲击层堆积较厚,区内无法观察到寺头断层,但其平面位置较清楚,在区块北侧的枣园地区该断层地表出露良好,并有多处出露,表现为正断层,断层带在刘家沟组的上石盒子组、下石盒子组中,宽度约为 3 m,总体呈 NNE 向延伸,平面上呈舒缓状,断层产状为 $110^{\circ}\angle 40^{\circ}$ 。

表 1-1 樊庄区块主要断层构造

断层编号	断层名称	断距	断层产状		
			走向	倾向	倾角/(°)
1	寺头正断层	最大 100 m,一般为 50~60 m	NE	NW	70~75
2	F1 正断层	4 m	NE	NW	65
3	F2 正断层	12 m	NE	SE	60
4	F3 正断层	1.5 m	NE	NW	51
5	F4 正断层	6 m	NW-EW	SW	60
6	F5 正断层	9 m	NW	SW	50
7	F6 正断层	8 m	NE	NW	65
8	F7 正断层	18 m	NW	SW	55

(四) 节理构造

樊庄区块属于暴露或半暴露区,基岩出露相对较好,虽然断裂构造并不发育,但野外露头的节理构造现象特别丰富。由于受到近 SN 向褶曲与 NW 向褶曲的联合控制,研究区节理发育方位明显多变。野外节理点的实地观测结果表明,区内节理共有四组优势发育方位:NE30°~40°、NE65°~85°、NW20°~50°、NW60°~85°,其中以 NE65°~85°、NW20°~50°最为发育。受多期构造运动的影响,靠近构造转折端的部位,节理密度加大,且延伸也较长。

(五) 构造应力场演化

自石炭一二叠纪以来,沁水盆地南部经历了多期构造运动,先后经历了印支运动、燕山运动和喜马拉雅运动,每次构造运动都相应地产生了一系列的地质构造,现存的地质构造形态、组合形式及分布规律都是各期构造作用的叠加^[11]。与之相对应的,沁水盆地南部晋城地区构造应力场可以分为 4 个时期:第一期,印支期构造应力场;第二期,燕山期构造应力场;第三期,喜马拉雅早期构造应力场;第四期,喜马拉雅晚期—现代构造应力场(表 1-2)^[12,13]。

表 1-2 晋城地区中生代以来构造应力场演化及主应力特征^[12,13]

地质年代		构造期	应力场主应力特征
新生代	第四纪	喜马拉雅晚期—现代	NE-SW 向挤压,NW-SE 向伸展
	新近纪		
	古近纪	喜马拉雅早期	NWW-SEE 向伸展作用
中生代	白垩纪	燕山期	NW-SE 向挤压作用
	侏罗纪		
	三叠纪	印支期	SN 向的挤压作用

印支期构造运动从中三叠世之后开始影响沁水盆地,主要活动期为晚三叠世末,使沁水盆地主体遭受近 SN 方向的水平构造挤压应力,产生逆掩断层和一系列 EW 走向舒缓次级褶曲。在野外调查中,由于印支期的构造相对较弱,没有明显的构造特征,樊庄区块内该期节理不发育。总体上看,印支期近 SN 向的水平挤压应力场对沁水盆地的影响并不大,没有留下明显的构造形迹,仅使盆地南部产生了一定程度的隆起抬升。

燕山期构造运动是沁水盆地中生代以来最强烈的一次构造变形,也是区内地质构造形成的关键时期。该期构造运动表现为强烈的 NW-SE 向近水平挤压构造应力场,在盆地南部晋城一带主应力迹线略有偏转呈近 EW 向,产生了一系列 NNE 向为主的高角度正断层,并广泛发育有 NNE-NE 向次级褶曲构造。事实上,在研究寺头断层的岩石组构时,也明显发现其存在一期近 EW 向的挤压应力场,主应力呈 15°向 SEE 倾向(如主压应力方向为 100°∠15°)。另外,樊庄区块也发育了一系列 NNE-NE 轴向的褶曲,南部与北部发育较明显,中部相对较弱,且往往受后期的构造改造较大。

喜马拉雅早期构造运动使华北地区北部受到 NW-SE 方向的拉张构造应力作用,在区内形成大规模伸展构造,即进入全面裂陷阶段,形成了贯穿山西南北的断陷盆地,长治段及晋城段高角度正断层发育,部分地段密集分布,同时伴生剪、张节理。区内喜马拉雅早期最

明显的构造是分隔郑庄区块与樊庄区块的寺头断层,对该断裂带的岩组与擦痕研究表明,虽然明显可以区分出存在三期构造应力场(三期构造应力场的主压应力产状分别为: NW 向 $300^{\circ}\angle 20^{\circ}$; 近 EW 向 $100^{\circ}\angle 15^{\circ}$; NNE 向约 $10^{\circ}\angle 16^{\circ}$),而根据断层延展性质及与构造应力场的关系分析,特别是就断层面的擦痕研究,断层形成时其三轴应力方向分别为:最大主应力 $10^{\circ}\angle 16^{\circ}$,最小主应力 $290^{\circ}\angle 16^{\circ}$,中间主应力 $100^{\circ}\angle 74^{\circ}$ 。因此,该断层发育主要与 NNE 向挤压和 NWW 向伸展有关,应该是喜马拉雅早期的产物。而樊庄区块本期构造较为明显,特别是褶皱构造,在先前的 NNE-NE 向褶曲上,明显叠加了 NW 向褶曲,导致褶曲轴延伸复杂化,这种构造形迹在樊庄区块中北部尤为明显。

进入新近纪以来,山西地区的构造应力场由早期的 NNE-SSW 向挤压应力逐渐转变为 NE-SW 向挤压应力。喜马拉雅晚期—现代构造应力场对樊庄区块的构造改造性相对大些,它导致地壳进一步被抬升,接受剥蚀,加强了前期构造特征,特别是中部的轴向 NW 的褶曲构造,产生了一系列 NW 向次级褶曲及配套的构造裂隙,并在燕山期构造产物之上,最终奠定了研究区的现代分布格局^[14,15]。此外,区内常存在一些褶曲轴弯曲的现象,也可能是本期应力场影响的表现,使得原先的构造复杂化。受该期 NE-SW 向的区域挤压应力场作用,寺头断层可能在该期应力场下,兼具右行走滑作用,导致该断裂在喜马拉雅晚期—现代处于相对紧闭状态而有利于煤层气的保存。

三、岩浆活动

山西南部岩浆岩地表露头主要见于襄汾—翼城—浮山之间的塔尔山—二封山一带,在其他地区,如太岳山西部、临汾西佐、侯马紫金山等地,岩浆岩则沿一些较深的断裂断续分布。岩浆岩种类多样,主要见有花岗岩类、脉岩类、超基性岩类和基性岩类,岩体出露规模一般不大,产状有岩枝、岩墙、岩脉等^[4]。

沁水盆地南部岩浆活动主要集中于太古代—元古代和中生代两个地质阶段。太古代和元古代岩浆岩存在于前寒武系地层中,其岩体小,多以脉状产出,岩性以超基性岩、基性岩和酸性岩为主,主要分布在太岳山区。中生代(特别是燕山期)是华北地区岩浆活动的鼎盛时期,在山西南部也有清楚的显示。岩浆岩体分布于研究区南部,多呈 NEE 向断续分布,其展布方向和形式受隐伏的基底断裂带控制,各侵入体在地表以近等轴状形态出露,多沿短轴背斜的轴部侵入,其围岩主要是奥陶系、石炭—二叠系和三叠系^[4]。

沁水盆地南部最大的出露岩体(塔尔山—二峰山)呈枝状产出,分布面积大于 100 km^2 ,与其呈侵入接触的最近地层是三叠系二马营组。根据同位素年龄测定结果,岩体的侵入时代为白垩纪早中期。该岩体对附近石炭—二叠系煤的煤化作用具有一定影响,从而造成侵入体附近煤阶呈环带状分布^[4]。

除暴露于地表或侵入煤系及其以上层位的岩体之外,盆地内存在隐伏岩浆岩体的可能性不容忽视。根据已有资料和区内岩浆活动规律分析,区内翼城、安泽、阳城、晋城范围内可能存在较大规模的燕山期隐伏岩浆岩体,侵入较深。其主要证据有:① 晋城—阳城一带可见零星出露的燕山期岩浆岩热液岩脉,属于岩浆后期产物,其下必有较大母体存在;② 航测资料显示阳城—晋城—高平一带为正磁异常区,异常强度可达 $+100\gamma\sim +250\gamma$;③ 浮山—翼城为断裂与岩浆活动强烈的块段隆起构造区,有燕山期岩体分布,其磁异常局部可达 $+700\gamma$,向东至阳城、晋城岩浆岩体呈 EW 向带状分布;④ 周边地区燕山期岩浆侵入到奥陶系—寒武系或下部层位的现象较为常见^[4]。

中生代(特别是燕山期)的岩浆活动对沁水盆地南部石炭—二叠系煤层的煤化作用有深

刻的影响。

四、水文地质条件

沁水盆地南部存在奥陶系、石炭—二叠系和第四系 3 套主要含水层系,石炭—二叠系的含水性较弱,含水层主要为碳酸盐岩、砂岩和松散沉积层^[16],山西组的主要含水层是上主煤层间接顶板砂岩。主要隔水层为上石炭统隔水层、太原组和山西组泥岩和砂质泥岩隔水层、上石盒子组中下部及下石盒子组隔水层组,太原组和山西组所含的泥岩和砂质泥岩,裂隙不甚发育,为山西组顶部的相对隔水层组,造成山西组与上部太原组没有水力联系^[16,17]。盆地南部水文地质单元由 3 个泉域组成,西北部为洪洞广胜寺泉域,东北部为辛安泉域,南部为延河泉域。各泉域地层构成南部向北、北部向南、东西两侧向中间的复式向斜储水构造。

沁水盆地南部存在 4 条重要的水文地质边界,包括近 EW 向 2 条和 NNE-NE 向 2 条。其中 3 条边界是由次级隆起形成的地下分水岭,1 条为对南部煤层气富集高产具有明显影响的寺头断裂^[16]。抽水试验、水化学、煤层含气性等方面的证据表明,寺头断层是一条封闭性的断裂,导水导气能力极差。但是,该断层断距较大,延伸较长,与其他断层相连,故不能排除局部导水、导气的可能性^[16]。

樊庄区块为典型的等势面“洼地”滞流型,水等势面具有北高南低的总体态势,东南部最低,地下水补给主要来自西北部地区,区内地下水动力条件复杂,发育了若干个相对“低洼”的汇水中心^[18,19]。因水力封闭导致研究区煤层气富集;郑庄区块为典型的等势面扇状缓流型,一方面因为区块东侧的寺头断层的阻水作用,另一方面因为露头地带的地表水补给对地下水径流造成了封阻,有利于区内煤层气的富集。

第二节 煤层气井生产特征

沁水盆地南部是我国煤层气开发最早的地区之一,也是我国最重要的煤层气商业化开发区块之一。樊庄区块作为沁水盆地南部开发较早、开发程度较高的区块,是沁水盆地南部煤层气开发的典型区块。

一、煤层气生产背景

沁水盆地南部为原位煤层气地面井开采,多采用水力压裂直井。自 2006 年以来,樊庄区块煤层气直井陆续投入生产。从 2007 年开始,华北油田山西煤层气分公司加大樊庄区块的煤层气开发力度,至 2014 年,共开发了 500 多口煤层气直井。樊庄区块煤层气直井井网部署多采用 $300\text{ m}\times 300\text{ m}\sim 400\text{ m}\times 400\text{ m}$ 的矩形井网,井距变化较大,为 $200\sim 500\text{ m}$,大部分井与临井的井距在 300 m 左右。

樊庄区块煤层气直井多采用平衡钻井技术,以清水或低密度、低黏度钻井液为主。近两年随着钻井技术的发展,开始尝试对储层污染更小的欠平衡钻井技术,以空气泡沫钻井技术为主。区内煤层气直井一般为二开井身结构,一开采用 311 mm 钻头钻进,钻遇二叠系上统上石盒子组后停钻,停钻深度一般在 $40\sim 100\text{ m}$ 左右,下入外径 244.5 mm 、壁厚 8.94 mm 、内径 226.62 mm 、钢级 J55 的表层套管并固井。一开固井水泥浆密度为 $1.83\sim 1.87\text{ g/cm}^3$,固井水泥用量一般为 $5\sim 8\text{ t}$,水泥用量主要由一开钻进深度所决定,替清水 $1.5\sim 2.0\text{ m}^3$,使水泥浆返至地面。二开采用直径 215.9 mm 的三牙轮钻头钻进,钻至石炭系上统太原组完钻。钻井完成后进行完井综合测井,包括双侧向、自然伽马、补偿声波、井径及连斜等。测井

完成后,下入外径 139.7 mm、壁厚 7.72 mm、内径 124.26 mm 的生产套管,并进行固井。二开固井水泥浆密度平均约为 1.84 g/cm^3 ,固井水泥用量一般为 $10.2 \sim 20.3 \text{ t}$,水泥用量主要由钻遇深度决定,替清水 $2.05 \sim 22.00 \text{ m}^3$ 。固井完成后再次进行测井,主要测试人工井底和水泥返高,最后进行试压,检验固井质量。平均钻井周期为 $13 \sim 25 \text{ d}$,建井周期为 30 d 左右。测井结果表明,煤层气直井井斜不超过 3° 。

樊庄区块煤层气直井基本采用套管射孔完井,射孔井段和射孔厚度受煤储层埋深和厚度控制。射孔枪一般采用 SYD-102 型,射孔弹一般采用 127 型,射孔密度为 16 个/m。

樊庄区块煤层气直井在开发前基本实现目的层的水力压裂,采用的压裂液类型为清洁压裂液(活性水)。压裂施工的一般步骤是:先进行循环试压,试压合格后开始注入前置液,并按照设计泵注程序开始加砂,加砂完毕开始注入携砂液及支撑剂,携砂液注入完毕后开始注入顶替液,最后测降压,施工完成。使用的前置液量变化于 $75.95 \sim 240.00 \text{ m}^3$,携砂液量介于 $127.95 \sim 362.06 \text{ m}^3$,顶替液量变化于 $6.30 \sim 9.40 \text{ m}^3$,前置液排量、携砂液排量、顶替液排量分别为 $5.47 \sim 8.20 \text{ m}^3/\text{min}$ 、 $5.55 \sim 7.95 \text{ m}^3/\text{min}$ 、 $3.65 \sim 7.85 \text{ m}^3/\text{min}$,前置液砂比为 $0 \sim 7.80\%$,携砂液砂比为 $7.80\% \sim 29.00\%$,注砂量为 $30.00 \sim 50.41 \text{ m}^3$,破裂压力为 $9.60 \sim 34.40 \text{ MPa}$,停泵压力为 $5 \sim 40 \text{ MPa}$,前置液注入压力为 $10 \sim 35 \text{ MPa}$,携砂液注入压力为 $10 \sim 30 \text{ MPa}$,顶替液注入压力为 $5 \sim 30 \text{ MPa}$ 。前置液注入阶段一般加粉砂或细砂,主要目的是防止滤失;携砂液一般加 $0.425 \sim 0.85 \text{ mm}$ 及 $0.85 \sim 1.18 \text{ mm}$ 石英砂作为支撑剂;顶替液一般不加砂。压裂施工之后,进行下泵、试压、下抽油杆等下泵施工,并最终启动排采。

二、煤层气直井产能特征

(一) 煤层气井生产阶段

樊庄区块煤层气井水力压裂施工完成即放喷,正式投产后无放喷阶段。根据煤层气井生产特征,可将其排采过程划分为 5 个阶段:排水降液面阶段、憋压阶段、产气量上升阶段、稳产阶段以及产气量衰减阶段。各阶段煤层气井的产气量与产水量不同,相应的煤储层含水饱和度和含气饱和度、流体渗流规律也不相同^[19,20]。图 1-4 为樊庄区块 2 口典型煤层气井的排采曲线。

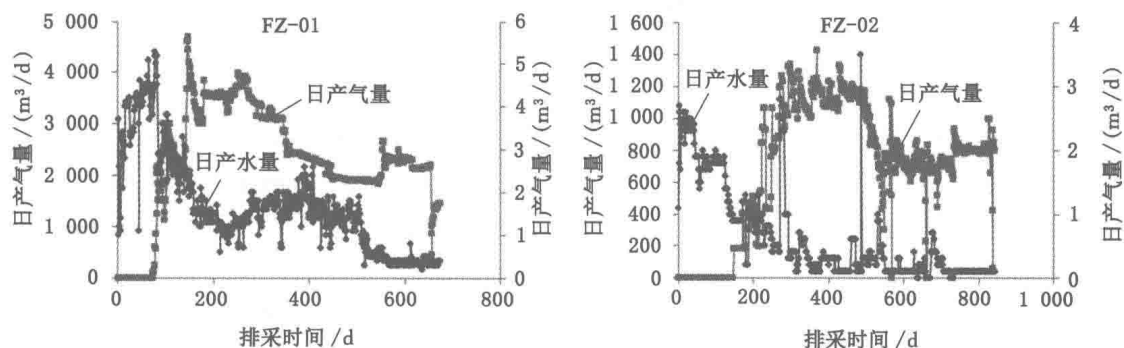


图 1-4 樊庄区块 2 口典型煤层气井的生产曲线

排水降液面阶段煤层气井产水量较大,且处于上升期,一般持续 $50 \sim 300 \text{ d}$,个别井持续时间更长,随煤层水的产出,动液面持续下降;煤储层压力普遍高于临界解吸压力,产气量、套压一般为零。排水一段时间后,井筒附近煤层压力降至临界解吸压力以下,开始有少量气体解吸,为避免井底流压下降过快所造成的储层伤害,开始憋压。憋压一般持续十几天至几

十天,以产水为主,产水量开始下降,产气量一般为零;伴随煤层气的解吸,套压迅速上升,动液面则降至较低水平。憋压一段时间后,较大范围内煤储层压力下降至煤层气的临界解吸压力之下,开始有大量气体解吸,进入产气量上升阶段。该阶段以产气为主,产水量迅速下降,产气量迅速上升,排采制度不变的情况下,产水量、动液面维持在较低水平,伴随煤层气的产出,套压亦降至较低水平。经过 50~600 d 的产气量上升期后,产气量逐渐趋于稳定,煤层气井进入稳产阶段。该阶段以产气为主,并伴有煤层水的产出,产水量、套压、动液面均维持在较低水平。稳产阶段持续一段时间,日产气量出现缓慢下降趋势,即进入产气量衰减阶段,这一阶段煤层气井仍以产气为主,并伴有煤层水的产出;该阶段一般持续时间最长,可达 10 年以上^[21]。

排水降液面阶段、憋压阶段一般无气体产出,可统称为产水阶段;产气量上升阶段、稳产阶段以及产气量衰减阶段均以产气为主,同时伴随煤层水的产出,这三个阶段可统称为煤层气井的产气阶段。由于五个阶段煤层气井的产气量、产水量特点不同,煤储层裂缝中流体的宏观渗流规律也不相同。

排水降液面阶段,泄流半径范围内煤层压力高于气体的临界解吸压力,尚无气体解吸,仅有少量游离气以小气泡状分散在水中参与流动,煤层中为水的饱和单相流动。憋压阶段,井底流压降至煤层临界解吸压力以下,井筒附近煤层中气相饱和度升高,气体汇聚为大气泡分散在煤层水中参与流动,井筒附近煤层中为水的非饱和单相流动;远离井筒的区域尚未有气体解吸,仍为水的饱和单相流动。产气量上升阶段,泄流半径和解吸半径进一步扩大,煤层气大量解吸,井筒附近煤层中气相饱和度升至可流动饱和度,流体流动状态转变为以水为主的气、水两相流动;远离井筒的区域,随气相饱和度的降低,逐渐过渡为水的非饱和单相流与饱和单相流动。稳产阶段,解吸半径进一步扩展,气相饱和度进一步上升,井筒附近煤层中为以气为主的气、水两相流动;远离井筒的区域,以水为主的气、水两相流动和非饱和的单相流范围向边界稳定扩展。产气量衰减阶段,解吸半径扩展至边界,以气为主的气、水两相流动区域逐渐扩大至边界。

(二) 研究区煤层气井产水量、产气量特征

根据樊庄区块 114 口煤层气井的排采资料,截至 2015 年 1 月 1 日,除 8 口煤层气井已关井外,106 口井排采时间介于 1 800~3 000 d,产气量均出现衰减。

(1) 产水量统计特征

投产之日至 2015 年 1 月 1 日,114 口煤层气井平均产水量介于 0.4~15.9 m³/d,以小于 2.0 m³/d 为主,约占总井数的 59.65%(图 1-5)。产水阶段煤层气井的平均产水量介于 0.20~15.86 m³/d,普遍小于 5.0 m³/d,约占总井数的 87.72%;产气阶段煤层气井的平均产水量介于 0~12.47 m³/d,以小于 3.0 m³/d 为主,约占总井数的 78.07%。

煤层气井的高峰产水量介于 2.20~43.70 m³/d,以 3.0~10.0 m³/d 为主,占煤层气总井数的 66.67%;累计产水量介于 126.80~12 551.90 m³,以小于 1 000 m³ 为主,占总井数的 57.89%。煤层气井一般要经历一个较长的产水阶段,从目前所掌握的排采资料看,樊庄区块煤层气井的疏水降压一般持续 27~203 d,平均为 114 d,部分井疏水降压时间超过 300 d。

(2) 产气量统计特征

投产之日至 2015 年 1 月 1 日,樊庄区块 114 口煤层气井平均产气量介于 5.1~5 264.5 m³/d,普遍小于 2 000 m³/d(图 1-5)。其中,平均产气量大于 2 000 m³/d 的井数仅占 14.91%。煤层气井的高峰产气量介于 50.00~11 877.60 m³/d,普遍大于 1 000 m³/d;累计

产气量介于 5 294~7 380 231 m³;高峰产气($\geq 1\,000\text{ m}^3/\text{d}$)累计时间 0~996 d,平均为 181 d(图 1-6)。

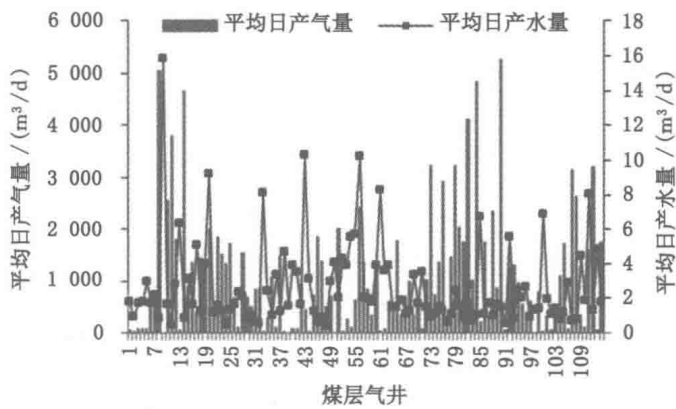


图 1-5 平均日产水量和平均日产气量分布

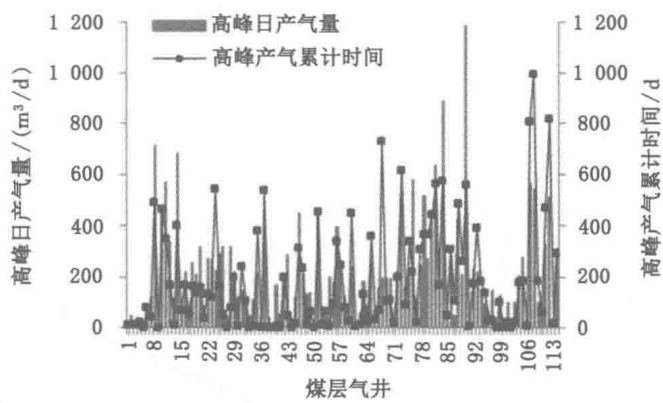


图 1-6 高峰日产气量和高峰产气累计时间分布

(三) 研究区煤层气井产能分类

根据研究区 114 口煤层气井排采资料,以平均日产气量、平均日产水量、高峰产气量、高峰产气累计时间、产气累积时间为参考因素,可将樊庄区块煤层气井划分高产气井、中产气井、低产气井和产水井四种类型(表 1-3)。

表 1-3 研究区煤层气井产能分类表

产能分类	平均日产气量/m ³	平均日产水量/m ³	d_{1000}	d_{1000}/d_t
高产气井	$\geq 1\,000$	<1.5	>100	>0.5
中产气井	500~1 000	<5	>50	—
低产气井	100~500	—	<50	—
产水井	<100	>1	0	0

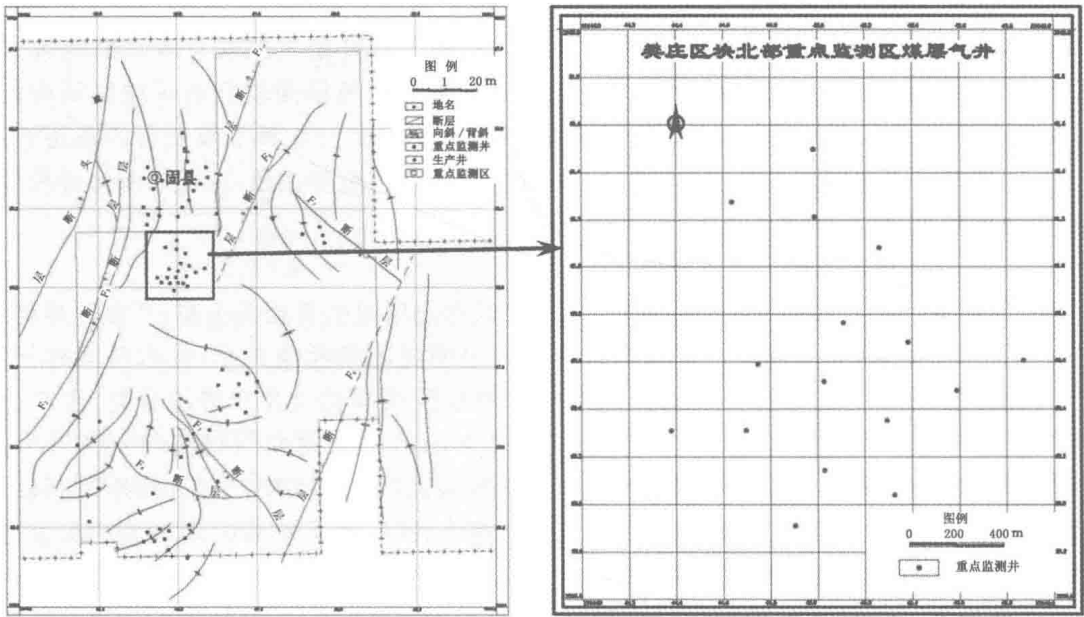
注: d_{1000} ——日产气量大于 1 000 m³ 以上的天数; d_{1000}/d_t ,日产气量大于 1 000 m³ 以上的天数与累计产气时间的比值。

根据表 1-3 所述产能分级标准,114 口煤层气井中高产气井共有 46 口,占总井数的 40.35%;中产气井 21 口,占总井数的 18.42%;低产气井 20 口,占总井数的 17.54%;另有 27 口煤层气井直至记录数据结束之日仍未产气,归为产水井,占总井数的 23.69%。

第二章 煤层气直井产能的地质与工程协同控制理论

提高煤层气直井的产能是沁水盆地南部煤层气生产的主要目标。由于煤储层非均质性和含气性差异、地质条件的复杂性以及煤层气井工程条件的不同,煤层气井产能的区域性差异较大。排除断层等特殊地质条件的影响,相邻煤层气井一般具有共同的水动力系统、重叠的井控区域,生产过程中,相互影响,对相邻煤层气井之间的产能差异产生影响。研究该地区地质因素与工程因素对煤层气直井产能的控制机理,特别是地质与工程对煤层气直井产能的协同控制理论,可以为煤层气直井产能预测方法的研究提供理论基础,不仅有助于深化对沁水盆地南部煤层气直井产能控制机理的认识,还可以为该地区煤层气直井的勘探开发方案设计以及生产调整提供依据,具有重要的现实意义。

由于资料的限制,主要根据樊庄区块 79 口煤层气直井(剔除资料缺失较多的 35 口煤层气井),特别是樊庄区块北部资料最丰富的 16 口煤层气井的排采资料、地质资料和工程资料,研究煤层气直井产能的地质与工程协同控制机理。图 2-1 为区内煤层气生产井的分布图。



第一节 煤层气直井产能的地质控制

煤层气直井产能的地质影响因素可大致分为两类:煤储层地质特征和煤储层物性条件。煤储层地质特征包括煤储层孔、裂隙发育特征、构造特征、岩浆活动、水文地质特征、构造应