

文章编号: 1001-1986(2006)03-0031-05

煤层气开发井网优化设计——以新集矿区为例

张培河¹, 张群¹, 王晓梅², 陈鸿春³, 马贵才³

(1. 煤炭科学研究院西安分院, 陕西 西安 710054; 2. 西安石油大学, 陕西 西安 710069;
3. 国投新集能源股份有限公司, 安徽 新集 232024)

摘要: 以新集矿区为例, 系统地研究了煤层气开发井网设计的具体内容及工作程序。根据对新集矿区煤储层地质条件分析, 确定了煤层气开发的目标煤层以及布井间距设计原则; 通过煤储层数值模拟的产能预测, 确定了煤层气开发的井网布置样式; 在产能预测的基础上, 结合经济分析, 优化了煤层气开发的布井间距, 进而提出了新集矿区首期煤层气开发布井方案, 并进行了产能预测。指出新集矿区煤层气开发应采用地面垂直井、采动区煤层气开发以及井下瓦斯抽放等多种开发方式综合并举的形式。

关键词: 煤层气; 井网优化; 开发方案; 新集矿区

中图分类号: P618.11 **文献标识码:** A

Optimized design of coalbed methane development with reference to Xinji mine

ZHANG Pei-he¹, ZHANG Qun¹, WANG Xiao-mei², CHEN Hong-chun³, MA Gui-cai³

(1. Xi'an Branch, China Coal Research Institute, Xi'an 710054, China; 2. Xi'an University of Petroleum, Xi'an 710069, China; 3. Sdic Xinji Energy Co., Ltd., Xinji 232024, China)

Abstract: Base on the research of geological condition in Xinji mine, the content and procedure of well pattern design in CBM development are provided in the paper. Firstly, according to the analysis of coal reservoir geological condition in Xinji mine, the target coal seams for CBM development and the principle of well spacing design are defined. Secondly, by the production prediction of reservoir simulation, the well pattern distribution is established. Thirdly, based on production prediction and economic analysis, the well spacing for CBM development is optimized. In the end, the demonstration development plan in Xinji mine is given, and the production prediction is performed. The constructional proposal for coalbed methane development is presented.

Key words: CBM (coalbed methane); optimization of well pattern; development design; Xinji mine

1 引言

煤层气开发是集多种技术于一体的复杂的系统工程, 具有高投资、高风险、高难度的特点。因此, 煤层气开发的各个环节都必须慎重进行。井网优化设计是煤层气开发的一项关键技术, 也是煤层气开发规划的重要组成部分。早期的煤层气开发井网设计

多是在煤层气地质条件综合研究的基础上, 根据经验或通过与其他已开发地区类比进行。随着煤层气研究的深入和计算机技术的发展, 应用储层数值模拟技术进行井网优化已被越来越多的人接受。

煤储层数值模拟是煤层气勘探和开发的关键技术, 通过储层数值模拟, 可以了解煤层气开发的动态, 展现煤层气产出过程, 为煤层气开发规划提供科

收稿日期: 2005-06-25

基金项目: “973”国家重点基础研究发展计划项目“中国煤层气成藏机制及经济开采基础研究”(2002CB11700)和国家“九五”重点科技攻关项目“新集浅层煤层气示范开发成套工艺技术及专用装备研究”(97-224)资助

作者简介: 张培河(1969—), 男, 山东胶南人, 煤炭科学研究院西安分院高级工程师, 从事煤层气资源评价及开发技术研究。

- [3] 叶建平, 秦勇, 林大扬. 中国煤层气资源 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998.
- [4] 杨起. 煤地质学进展 [M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [5] Bustin R M, Clarkson C R. Free gas storage in matrix porosity: a potentially significant coalbed resource in low rank coals [C] // Proceedings of the 1999 International Coalbed Methane Symposium. Tuscaloosa, U. S. A.: The University of Alabama, 1999. 197—214.
- [6] 张慧, 李小彦, 郝琪, 等. 中国煤的扫描电子显微镜研究 [M]. 北京: 地质出版社, 2003.
- [7] 崔永君, 张群, 张泓, 等. 不同煤级煤对 CH_4 、 N_2 和 CO_2 单组

- 分气体的吸附 [J]. 天然气工业, 2005, 25(1): 61—65.
- [8] Advanced Resources International(ARI). Powder River Basin Coalbed Methane Development and Produced Water Management Study [R]. Washington: U. S. Department of Energy, 2002.
- [9] Pratt T J, Mavor M J, DeBruyn R P. Coal gas resource and production potential of subbituminous coal in the Powder River Basin [C] // Proceedings of the 1999 International Coalbed Methane Symposium. Tuscaloosa, U. S. A.: The University of Alabama, 1999. 23—34.
- [10] 崔永君. 煤对 CH_4 、 N_2 、 CO_2 及多组分气体吸附的研究 [D]. 西安: 煤炭科学研究院总院西安分院, 2003.

学的决策依据。以下以安徽新集矿区为例, 对煤层气开发井网优化设计的具体内容、工作方法以及工作步骤进行研究, 供煤层气开发规划单位或相关研究人员参考。

2 矿区概况

新集矿区位于安徽省淮南煤田南部, 北以谢桥向斜轴线为界, 南以寿县—老人仓断层为界, 面积约 60 km^2 。总体上呈一向北倾斜的单斜构造, 地层产状较平缓, 倾角一般在 $5\text{--}20^\circ$, 断裂发育(图 1)。

新集矿区主要含煤地层为二叠系的山西组、下石盒子组和上石盒子组, 含煤 25 层, 煤层总厚度平均为 37.18 m , 稳定发育的有 13—1、11—2、8、6 和 1 号煤层。

国家“九五”重点科技攻关项目“新集浅层煤层气示范开发成套工艺技术及专用装备研究”(97—224), 在新集矿区进行煤层气示范开发, 实施了 XS—01、XS—02 和 XS—03 井的煤层气勘探试验。这 3 口井全部进行了气含量测试及注入/压降试井测试, 并进行了压裂排采试验, 其中 XS—03、XS—02 井产气效果较好, XS—03 井最高产气量达 $3280 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

3 煤层气开发的目标煤层选择

目标煤层选择是进行井网优化的前提, 是煤层气开发规划的重要内容, 直接关系到未来气井产能以及煤层气开发的经济性。选择目标煤层的原则是: a. 具有适宜的厚度和稳定性; b. 具有较高的气含量; c. 煤储层具有良好的渗透性; d. 埋藏深度适中; e. 水文地质条件比较有利。

3.1 煤层厚度及稳定性

新集矿区稳定发育的煤层有 5 层, 厚度和稳定性均满足煤层气开发目标煤层的选择要求。13—1 煤层厚度为 $1.51\text{--}12.79 \text{ m}$, 平均 5.53 m ; 11—2 煤层为 $1.95\text{--}5.67 \text{ m}$, 平均 3.52 m ; 8 煤层为 $1.59\text{--}6.95 \text{ m}$, 平均 3.37 m ; 6 煤层为 $0.67\text{--}8.19 \text{ m}$, 平均 3.17 m ; 1 煤层为 $1.90\text{--}16.25 \text{ m}$, 平均 7.23 m 。

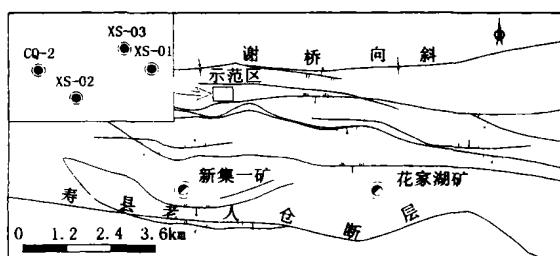


图 1 新集矿区构造纲要图

Fig. 1 The structure outline of Xinji mine

3.2 煤层气含量

煤层的平均气含量为 $2.05\text{--}12.46 \text{ m}^3/\text{t}$, 其中, 1 号煤层最高, 为 $5.90 \text{ m}^3/\text{t}$; 13—1 号煤层次之, 为 $4.69 \text{ m}^3/\text{t}$; 11—2 煤层最低, 为 $3.86 \text{ m}^3/\text{t}$ 。除 11—2 号煤层气含量相对较低外, 其余煤层平均气含量差别不大。

3.3 煤层渗透率

注入/压降试井实测煤层渗透率为 $0.038\text{--}0.388 \text{ md}$ 。由于实测渗透率资料少, 且集中在很小的范围, 因此, 试井数据不足以反映各煤层的实际渗透性状况。从影响煤层渗透率的主要地质因素: 煤体结构、煤中裂隙的发育状况以及煤层埋藏深度等方面分析, 8、6、1 号煤层的渗透率相对较好。

3.4 煤层埋藏深度

新集矿区煤层埋藏深度呈现自南向北、自西向东逐渐加深趋势, 大部分地区煤层埋深小于 1200 m , 煤层气开发的深度条件比较优越。煤层埋藏深度不是制约该区煤层气开发目标煤层选择的主要因素。

3.5 水文地质条件

新集矿区水文地质条件简单。二叠纪煤系发育有多个砂岩裂隙含水层, 在 13—1、11—2、8、6、1 煤层间均有含水层发育, 但各含水层富水弱, 单位涌水量多小于 0.1 L/s/m 。在主要含水层间发育有厚度较大的泥岩隔水层, 阻断了含水层间的水力联系。通常情况下, 水文地质条件不会对煤层气开发造成影响。

通过上述分析看出, 煤层厚度及稳定性、煤层埋深、水文地质条件等都不是影响该区目标煤层选择的主要因素, 对该区目标煤层选择的主要影响因素为煤层渗透率和气含量。根据煤层渗透率和气含量分布状况, 确定该区煤层气开发的目标层为 8、6、1 号煤层。

4 煤层气开发井网优化

4.1 技术方法

煤储层数值模拟是煤层气开发规划设计实用、经济、具说服力的方法。对新集矿区的煤层气开发井网优化采用美国 ARI 公司研制开发的 COME2 煤层气模拟软件, 通过产能模拟预测完成。

4.2 煤层气开发方式

目前煤层气开发的方式有: 地面垂直井、地面采动区井、井下瓦斯抽放以及地面羽状井开发方式, 比较常用的是地面垂直井方式。因此, 设计新集矿区的煤层气开发为地面垂直井方式, 其他方面的设计

也按地面垂直井方式进行。

4.3 数据准备

进行煤储层数值模拟, 需要准备的地质资料非常多。模拟数据文件需要的参数可归纳为: 静态参数、可调整参数以及常规参数。不同种类的参数, 其确定的方式也不相同。

静态参数 目标煤层的厚度、标高、气含量、气体组分、储层压力、等温吸附常数、吸附时间、煤的密度以及储层温度等为静态参数。模拟预测时, 均采用实际测试资料。

可调整参数 煤层渗透率和裂隙、孔隙度等是可调整参数。这些参数对气井产能影响较大, 通常需要通过历史拟合修正后才能使用。对示范区 XS-02、XS-03 井进行历史拟合, 修正 8、6、1 煤层的渗透率分别为 0.85 md、0.602 md 和 0.706 md, 孔隙度分别为 1.3%、1.3% 和 1.2%。

常规参数 气体和水的密度、粘滞系数、体积系数等为常规参数。在模拟时, 参照常规数据或油气藏模拟资料取值。

4.4 井网样式优化

合理的井网布置样式, 不仅可以大幅度地提高煤层气井产量, 而且会降低开发成本。煤层气井井网布置样式通常有: 不规则井网、矩形井网和五点式井网等。

针对新集矿区地形条件以及具体的地质及煤储层条件, 选择矩形井网和五点式井网, 进行了储层数值模拟计算, 通过比较各自的产能变化, 确定合理的井网布置样式。为便于比较, 模拟是在同一地区、相同单井控制面积、相同布井数, 以及相同的工作制度条件下进行的。为使预测结果更具代表性, 模拟采用 10 口井的井组进行, 排采时间 15 a。模拟预测结果见图 2、图 3。

模拟结果显示, 排采 15 a, 矩形井网最高产气量为 $20130 \text{ m}^3/\text{d}$, 累计产气量为 $7210 \times 10^4 \text{ m}^3$; 五点式井网最高产气量为 $19177 \text{ m}^3/\text{d}$, 累计产气量为 $7693 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。与五点式井网比较, 矩形井网的初期产量高, 在前 5 a 的时间, 矩形井网产量一直高于五点式井网, 在前 10 a 的时间, 累计产量一直超过五点式井网, 在模拟排采的 15 a 中, 矩形井网仅比五点式井网少采 $480 \times 10^4 \text{ m}^3$, 平均每口井每天少采 88 m^3 。比较看出, 矩形井网布井具有一定优势。

4.5 布井间距优化

4.5.1 布井间距设计原则

为保证煤层气开发的经济性, 且最大限度地提高煤层气采收率, 布井设计要求沿煤层主渗透方向

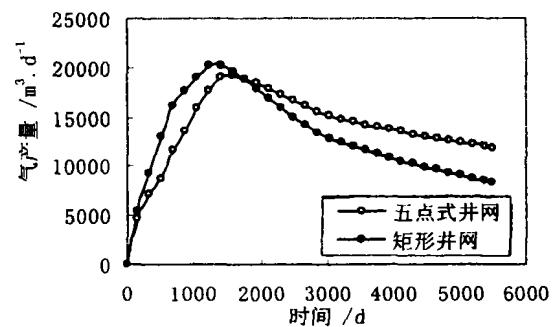


图 2 不同井网布置形式模拟预测日产气量曲线

Fig. 2 Comparison of gas production of different well pattern distribution

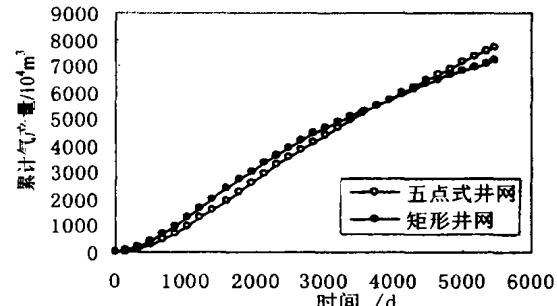


图 3 不同井网布置形式模拟预测累计产气量曲线

Fig. 3 Comparison of cumulative gas production of different well pattern distribution

井间距适当加大。主渗透方向通常通过煤层裂隙观测、压裂裂缝监测或地应力监测的方法确定。

a. 煤中裂隙的主要延伸方向往往控制着煤层的主渗透方向。对新集煤矿和花家湖煤矿井下 13-1、11-2 和 8 煤层测得的割理走向为 $75 \sim 100^\circ$, 大体为近东西向。

b. 煤层压裂时, 主裂缝多平行于最大主应力方向延伸, 主压裂缝的延伸方向反映了煤层的主渗透方向。对示范区 XS-01、XS-03 井压裂裂缝监测显示, 裂缝形态为对称不等长裂缝, 延伸方向为 $60 \sim 120^\circ$, 多为 $105 \sim 120^\circ$ 。

新集矿区压裂缝方向与矿井下观察到的煤层主要裂隙方向接近一致, 说明煤层主渗透方向为近 EW 向, 因此, 在煤层气开发布井时, 井间距可沿此方向适当加大。

4.5.2 井间距优化选择

a. 产能模拟预测

在充分分析新集矿区地质条件的基础上, 根据示范区压裂缝监测资料、储层条件等的分析研究, 选择 $450 \text{ m} \times 400 \text{ m}$ 、 $350 \text{ m} \times 300 \text{ m}$ 、 $250 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 和 $160 \text{ m} \times 160 \text{ m}$ 等 4 种井间距(单井控制面积分别为 0.18 km^2 、 0.105 km^2 、 0.05 km^2 和 0.0256 km^2), 按照

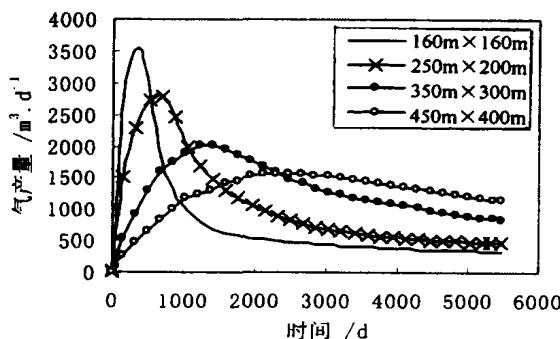


图 4 不同井间距布井模拟预测日产气量曲线

Fig. 4 Comparison of gas production at various well spacing

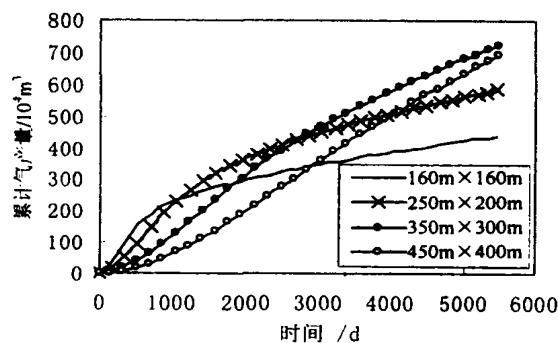


图 5 不同井间距布井模拟预测累计产气量曲线

Fig. 5 Comparison of cumulative gas production at various well spacing

10 口井、矩形井网样式、45 m 的压裂缝半长等条件，对气、水产量进行了模拟预测，结果见图 4 和图 5。

根据模拟预测结果：井间距小，排采初期产量高，达到高峰产量的时间短，产能稳定期维持时间也短；井间距大，排采后期的产量高，产能稳定期的维持时间长，累计产气量高。160 m×160 m 井间距布井初期产气量最高，但产气量下降非常快，而且累计产气量最低，远小于其他井间距的累计产气量，并且在不到 3 a 的时间，日产气量被其他井间距超过。250 m×200 m 的井间距布井，在 700 d 达到产气高峰，产能稳定期维持时间短，排采 10 a 后日产气量非常低，排采 15 a 累计产气量不高；350 m×300 m 的井间距布井，产能稳定期维持时间长，后期产量高，排采 15 a 累计产气量最高，而且在排采不到 3 a 的时间，日产气量超过 250 m×200 m 井间距；450 m×400 m 的井间距布井，后期产量高，但初期产量低，达到产气高峰的时间最长，在 15 a 的排采时间内，其累计产气量小于 350 m×300 m 井间距。

b. 经济分析

有效井间距的合理选择，通常需要在产能预测的基础上通过经济评价完成。但由于该区目前的煤层气市场不完善，煤层气的开发成本估算存在困难

等，因此不具备经济评价的条件。以下借助其他地区煤层气开发的实践进行简单的经济分析。

考虑该区的具体地质条件、市场状况以及国内煤层气开发的实际状况，设定经济分析的基本条件：项目实施的全部投资均由银行贷款，单井平均费用 165 万元，售气价格 1 元/m³，每年按产气收入的一半还款，人员工资、管理费用等按 2 万元/a 计算，不考虑税收、设备折旧以及开发过程中可能存在的失败情况等。根据产能模拟预测结果及其设定的条件，计算采用不同井间距进行煤层气开发的投资回收期，以及排采 15 a 平均单井累计收益。

计算结果显示，投资回收期随井间距的变化曲线呈“U”字形。160 m×160 m 井间距的投资回收期最长，450 m×400 m 井间距次之，250 m×200 m 井间距的投资回收期最短（图 6）；采气收益与投资回收期曲线相反，呈倒“U”字形，160 m×160 m 井间距收益最低，250 m×200 m 井间距次之，350 m×300 m 井间距收益最高（图 7）。

c. 井间距选择

从不同井间距煤层气开发的产能分布状况看，350 m×300 m 井间距布井，具有产气高峰到达时间早，日产气量比较稳定，产能稳定期维持时间长和后期产量高的特点。而且，排采 15 a，累计产气量最高，具有较大的产能优势。

从经济方面考虑，煤层气开发的资金多为银行贷款，因此，应最大限度地提高煤层气开发初期的气井产量，以提高经济效益，减小企业贷款偿还时间，

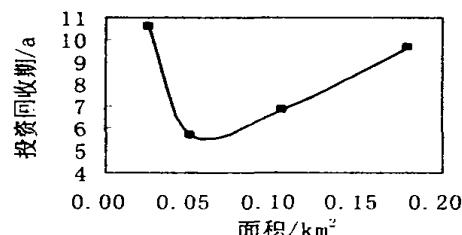


图 6 投资回收期与单井控制面积(井间距)关系曲线

Fig. 6 Graph of return-on-investment time vs. well spacing

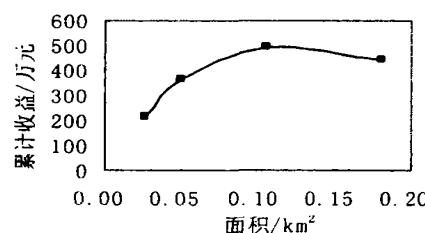


图 7 单井累计采气收益与控制面积(井间距)关系曲线

Fig. 7 Graph of cumulative production return by single well vs. well spacing

降低企业负担。 $350\text{ m} \times 300\text{ m}$ 井间距布井排采 15 a, 其累计收益最高, 而且投资回收期相对较短, 具有较大优势。

通过上述综合分析, 选择煤层气开发的井间距为 $350\text{ m} \times 300\text{ m}$ 。

5 煤层气开发方案

5.1 煤层气开发方案设计

煤层气开发应遵循先简单后复杂, 依资金、市场定规模, 边开发边研究边调整以及逐步增大规模的原则。因此, 根据新集矿区的具体情况, 确定首期布井 17 口, 与先前的 3 口煤层气试验井形成 20 口井的煤层气开发规模。布井区选择在构造简单、储层条件较好的示范区西北部进行。以现有的 XS-02 井为起点, 向北西方向按矩形井网、 $350\text{ m} \times 300\text{ m}$ 井间距布井(图 8), 目标煤层为 8、6、1 煤层。

鉴于煤层气开发的高投资、高风险的特点, 在其开发过程中, 应选择部分开发井兼作参数井, 进行煤层气含量、渗透率、储层压力、地应力以及压裂缝等项内容的测试。由于参数井的成本比较高, 对于某一区块, 在满足该地质条件认识的前提下, 应尽可能少布置参数井。设计这些参数井, 不仅可以为煤层气开发跟踪研究提供可靠地质资料, 而且可以为煤层气开发决策提供科学依据。根据新集矿区地质条件分析, 在首期布置的 17 口井中, 选择 2 口井作为参数井(图 8)。

5.2 产能预测

根据上述布井方案, 对形成的 20 口井产能进行模拟, 模拟预测结果见图 9。

预测结果显示, 排采的第 1 a、5 a、10 a、15 a, 日气产量分别为 $38\ 041\text{ m}^3$ 、 $54\ 283\text{ m}^3$ 、 $32\ 950\text{ m}^3$ 、 $21\ 737\text{ m}^3$, 累计气产量分别约为 630 万 m^3 、9 529 万 m^3 、17 221 万 m^3 、22 000 万 m^3 , 排采 15 a 平均单井日气产量为 $2\ 000\text{ m}^3$ 。

与实施的煤层气试验井相比, 20 口井同时生产的煤层气产量明显高得多, 说明随着井网中煤层气生产井数量的增加, 煤层气井的气产量增大, 生产效果越好。但是, 新集矿区煤层气含量低, 构造煤发育, 煤层渗透率低, 煤储层条件并不优越, 采用单一的垂直压裂井方式开发煤层气, 其经济效益不会太乐观。因此, 新集矿区的煤层气开发, 要紧密结合煤炭开采, 采取地面垂直压裂井、采动区井以及井下瓦斯抽放等综合开发方式, 实行煤、气并采, 实现煤层气开发的多种效益。

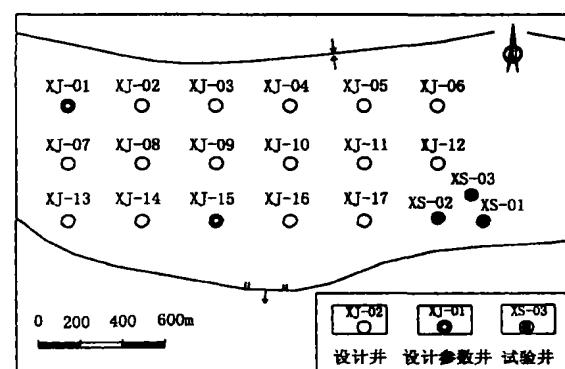


图 8 新集示范区首期煤层气开发方案

Fig. 8 The design of the demonstration CBM development in Xinji mine

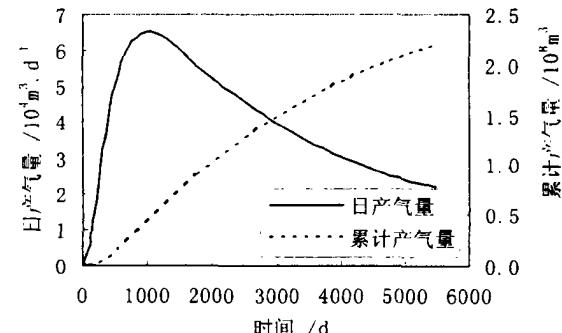


图 9 新集示范区 20 口煤层气井产能预测曲线

Fig. 9 Production prediction of 20 CBM wells in Xinji mine

6 结论

a. 以新集矿区为例, 从煤层气开发井网优化的各个方面进行了研究, 指出了煤层气井网优化的具体内容及工作步骤。根据对新集矿区煤层气地质条件的分析以及煤储层数值模拟预测结果, 优化确定了煤层气开发的目标煤层为 8、6、1 号煤层, 井网布置样式为矩形井网, 井间距为 $350\text{ m} \times 300\text{ m}$; 确定的首批煤层气布井区在目前示范区的西北部。

b. 为保证煤层气开发的最大经济效益, 新集矿区的煤层气开发, 要采取地面垂直井、采动区井以及井下瓦斯抽放等综合开发方式, 实行煤、气并采, 实现煤层气开发的综合效益。

参考文献

- [1] 王晓梅, 张群, 张培河, 等. 煤层气井历史拟合方法探讨[J]. 煤田地质与勘探, 2003, 31(1): 20—22.
- [2] 张遂安. 选区煤层气开发利用规划编制方法探讨[J]. 中国煤层气, 1996(1): 16—20.
- [3] 张群. 煤层气储层数值模拟模型及应用的研究[D]. 西安: 煤炭科学研究院西安分院, 2003.