

引文：杨永国,李映洁,秦勇.煤层气项目经济评价理论与方法研究进展[J].天然气工业,2022,42(6):186-192.

YANG Yongguo, LI Yingjie, QIN Yong. Research progress in economic evaluation theories and methods of CBM projects[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(6): 186-192.

煤层气项目经济评价理论与方法研究进展

杨永国^{1,2} 李映洁^{1,2} 秦 勇^{1,2}

1. 中国矿业大学煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室 2. 中国矿业大学资源与地球科学学院

摘要：加大煤层气资源的勘探开发，在缓解我国清洁能源短缺困境、控制碳排放、加强煤矿生产安全等多个方面都具有重要的意义。然而我国煤层气项目的经济效益普遍不理想，合理地开展相关项目的经济评价是保障煤层气产业下一步快速发展的重要前提。为此，在系统梳理国内外煤层气项目经济评价研究历程的基础上，基于中国知网（CNKI）期刊库数据，探讨了煤层气项目经济评价领域知识图谱的结构与演进趋势，并提出了深化研究建议。研究结果表明：①随着煤层气资源评价的广泛开展以及煤层气产业的形成，煤层气项目经济评价理论与方法研究相继开展：从煤层气项目投入产出角度出发，到定量与定性相结合方法应用到煤层气项目的经济评价，为投资决策提供可靠的科学依据；②煤层气项目经济评价方法主要有贴现现金流法、实物期权法、定量与定性相结合方法等，各个方法在不同场景下的应用均有其自身的特点和局限性；③煤层气项目经济评价目前面临 4 个方面的新需求：加强跨界合作、完善评价方法、综合考虑评价动态性、提高产能预测可靠性等，这是本领域深化研究的重要方向。结论认为，我国煤层气产业的进一步发展，对煤层气项目经济评价提出了更高的要求，基于煤层气资源特点与开发规律开展煤层气项目经济评价，可以减少或规避投资风险，提高开发经济效益。

关键词：煤层气开发；经济评价方法；文献计量学；可视化分析；发展趋势；对策建议

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2022.06.017

Research progress in economic evaluation theories and methods of CBM projects

YANG Yongguo^{1,2}, LI Yingjie^{1,2}, QIN Yong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Coalbed Methane Resources and Reservoir Formation Process of Ministry of Education//China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China; 2. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Natural Gas Industry, Vol.42, No.6, p.186-192, 6/25/2022. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: Enhancing the exploration and development of coalbed methane (CBM) resources is of great significance to alleviating the shortage of clean energy, control carbon emission and strengthen coal mine production safety in China. However, the economic benefit of CBM industry in China is generally not satisfying, so reasonable economic evaluation of relevant projects is the important precondition to guarantee the rapid development of CBM industry in the following step. After systematically reviewing domestic and foreign research progress in CBM project economic evaluation, this paper discusses the structure and evolution trend of knowledge graph in the field of CBM project economic evaluation based on the journal database of China National Knowledge Internet (CNKI) and then makes suggestions for further research. And the following research results are obtained. First, with the extensive implementation of CBM resource evaluation and the formation of CBM industry, investment decision making is supplied with a reliable scientific basis in terms of CBM input and output, combined quantitative and qualitative method and CBM project economic evaluation. Second, the economic evaluation methods of CBM project mainly include discounted cash flow approach, real option method and combined quantitative and qualitative method, each of which has its own advantages and disadvantages during its application in different scenarios. Third, CBM project economic evaluation currently faces four new needs, including improving the reliability of productivity prediction, considering the dynamic nature of evaluation comprehensively, completing evaluation methods and strengthening cross-border cooperation, which are the main direction of further research in this field. In conclusion, further development of CBM industry in China has put forward higher requirements for CBM project economic evaluation. What's more, CBM project economic evaluation based on the characteristics and development laws of CBM resources can reduce or avoid investment risks and improve development economic benefits.

Keywords: Coalbed methane development; Economic evaluation method; Bibliometric analysis; Visual analysis; Development trend; Countermeasure and suggestion

基金项目：国家自然科学基金项目“煤系‘三气’共采经济性组合优化模型及决策支持系统研究”（编号：41872248）、“煤层气项目全生命周期风险动态演变机理及控制方法研究”（编号：41672324）。

作者简介：杨永国，1962 年生，教授，博士；主要从事 GIS 应用以及矿产资源经济评价等方面的研究工作。地址：（221008）江苏省徐州市金山东路 1 号。ORCID: 0000-0003-4290-7383. E-mail: ygyang88@cumt.edu.cn

通信作者：李映洁，1993 年生，博士研究生；主要从事经济地质方面的研究工作。地址：（221008）江苏省徐州市金山东路 1 号。ORCID: 0000-0003-2518-1242. E-mail: liyjcbm@cumt.edu.cn

0 引言

加大煤层气资源的勘探开发,在缓解我国清洁能源短缺困境、控制碳排放、加强煤矿生产安全等多个方面都具有重要的意义,对中国经济社会可持续发展尤为重要^[1]。然而,我国煤层地质条件复杂,煤层气开发具有周期长、风险高、不确定性大等特点^[2]。为了进一步提高煤层气资源开发的综合效益、降低项目投资风险,有必要开展煤层气项目经济评价,协助项目投资方实现科学决策。煤层气项目经济评价,是指在煤层气资源禀赋状况、勘探开发技术、煤层气资源产业政策和区块社会环境约束下,从经济角度对煤层气项目效益进行的分析,目的是评价项目各方案的可行性,根据评价结果选取合适的项目实施方案,根据敏感性分析缩减成本、降低风险、优化经营体系。合理选择经济评价方法是保证煤层气项目经济评价客观性的前提。关于煤层气项目的开发和经济分析工作,最早在美国圣胡安盆地和黑勇士盆地展开^[3],并随着煤层气产业的发展形成多种方法。近年来,相关研究从产能预测、评价指标、市场需求等不同角度建立了预测模型,但缺乏相应的研究脉络分析。随着我国煤层气产业发展进入新阶段,对煤层气项目经济评价工作也提出更高的要求。为此回顾了煤层气项目经济评价研究的发展进程,基于文献计量学方法探讨了煤层气项目经济评价领域知识图谱的结构与演进趋势;对比分析了评价方法应用场景及优缺点,进而提出了深化研究的建议。

1 煤层气项目经济评价研究进程

煤层气项目的经济评价工作是煤层气大规模开发项目取得重大进展的产物。20世纪70年代,美国为了成功进行煤层气资源的商业开发,在煤层气产能分析与开发工艺等方面进行了大量的研究。与此同时,煤层气项目的经济评价工作也受到了高度重视并迅速发展,从技术发展的角度来看可以大致分为3个阶段:探索阶段、突破阶段、深化阶段。

1.1 探索阶段

从20世纪80年代到21世纪初期,煤层气项目的经济评价工作研究主要是进行方法的探索,评价方法也主要借助于财务评价方法。1980年,随着美国黑勇士盆地地区煤层气开发区的建成投产,煤层气资源进入商业开发利用阶段^[4],煤层气项目经济评价的理论与方法的研究文献相继出现^[5],推动了煤层气

项目经济评价研究工作的规模展开。该时期美国分别在地质勘探阶段和开发阶段对项目进行经济评价,根据传统的投资评价方法确定最佳开发方案,煤层气项目的经济评价模型开始建立。例如,Kuuskraa^[3]结合美国圣胡安盆地和黑勇士盆地讨论了煤层气项目经济评价技术;Dickehuth等^[6]基于阿巴拉契亚地区煤层气资源量潜力的评估,在研究考察该地区煤层气开采经济效益的基础上,确定了项目到管道的经济连接距离。Dhir等^[7]基于贴现现金流法,建立了在煤层气储量评价基础上的煤层气项目经济分析方法,对煤层气潜在投资项目预期收益风险的下行概率度量进行了排序。随后,借鉴美国煤层气开发项目的经济评价方法,澳大利亚学者对鲍恩盆地和悉尼盆地分别进行煤层气开发试验经济评价,指出了煤层气开发项目需要关注的优势因素^[8]。我国研究人员根据煤层气开发的实际情况,结合国外煤层气项目经济评价有效性的启发,对煤层气项目经济评价的意义与特殊性、评价指标和评价模型等进行了探讨。

1.2 突破阶段

进入21世纪,煤层气项目经济评价方法的研究工作获得了突破性进展。相关研究打破了财务分析的局限,通过多学科的方法和手段,系统研究了影响因子与评价模型的关系,实现了综合评价。Bank等^[9]的研究显示,煤层气采出水管理对波德河盆地煤层气的经济产量有显著的影响。我国煤层气的产业化开发也在21世纪初取得了实质性进展,相关研究人员针对煤层气地质条件复杂、开发周期长、项目投资回收慢、投资风险大的特点,总结了煤层气项目经济评价工作的特殊性^[10],建立了煤层气项目风险评价模型^[11],并从项目投资、采气成本、产能预测和财务评价等方面建立了煤层气开发项目的经济评价方法和预测模型^[12]。

1.3 深化阶段

2010年至今,是煤层气项目经济评价方法研究工作的深化阶段。和传统确定性的经济评价工作相比,这一阶段的理论与方法进一步面向煤层气产业发展的新需求,尝试为模型提供关于结果可能性的信息。煤层气项目经济评价工作从对特定井分析拓展到不同维度的经济性分析,相关研究在探讨煤层气开发特点的基础上,结合不同阶段煤层气开发项目的系统特征,探讨和发展了煤层气项目经济评价理论与方法。同时,煤层气项目经济评价也逐渐深入产业过程的具体环节,如在给定生产时间框架下

通过计算净现值评估煤层气压裂活动对经济可行性的影响^[13]。Sander 等^[14]将油藏模拟器与技术经济模型耦合,提出将储层性质和经济参数的不确定性风险纳入煤矿瓦斯强化抽采技术的经济评价方法中。

2 煤层气项目经济评价文献计量分析

通过对煤层气项目经济评价研究工作的发展进程分析可以看出,随着煤层气产业的发展,项目经济评价工作的地位与意义逐步获得认可。随着我国煤层气产业发展迈入新阶段,考虑到我国煤层气开发条件的特殊性,有必要对相关领域的研究进行系统的梳理。为此,对相关文献开展量化统计分析,以对我国煤层气项目经济评价研究知识结构形成更全面、客观的认识。经过前期数据库调研可知,中国知网(CNKI)较为全面地收录了我国煤层气项目经济评价研究领域的期刊论文。借助 CNKI 数据库,梳理我国煤层气项目经济评价研究的发展历程和文献分布特点,分析研究现状,对研究热点与合作情况进行总结。

2.1 文献分析

为确保文献学术性,对检索到的文献中删除卷首语、会议通知、政府文件等无关条目,精确检索到 88 篇相关论文,发表于 43 种期刊。其中,载文量为 10 篇的期刊仅有《天然气工业》与《中国煤层气》,其次为《煤田地质与勘探》发表 5 篇,《煤炭学报》及《能源技术与管理》分别发表 4 篇(表 1)。总体而言,煤层气项目经济评价研究成果主要刊登在工程科技、经济与管理科学类期刊,期刊来源分布较为分散,稳定的核心期刊群尚未形成,还需继续提升对该领域研究的质量。

表 1 煤层气项目经济评价研究期刊论文统计表

期 刊	发文量
《天然气工业》	10
《中国煤层气》	10
《煤田地质与勘探》	5
《能源技术与管理》	4
《煤炭学报》	4
其他	55

分析上述 88 篇文献,煤层气项目经济评价方法的研究主要包括贴现现金流法(频次 56)、定量与定性相结合方法(频次 7,如模糊综合评价、层次分析、灰色关联法等)、实物期权法(频次 3)、数据包络分析(频次 1)等。由此可见,建立在现代经济学效用

价值理论之上的贴现现金流法虽然在评价中忽略了不确定性,但仍是动态评价煤层气项目投资决策的重要方法之一^[15]。71 篇文献进行了方法阐述与实例应用;14 篇文献进行了方法的理论探讨;3 篇文献进行了评价方法的对比。进一步分析表明,相关研究的要素主要包括煤层气项目经济评价的指标体系、研究区块、风险分析、优惠政策等。从 20 世纪 80 年代的模式初探开始,学者们从煤层气项目投入产出角度,建立和验证了不同区块经济评价模型。21 世纪初,除贴现现金流法外,定量与定性相结合方法也开始应用到煤层气项目的经济评价研究中,通过实例研究证明了模型在定量评价中的可靠性,为投资决策提供了可靠依据。随后,实物期权法、数据包络分析法等考虑不确定性因素的投资决策方法逐渐被引进到煤层气项目经济评价的研究中,开展了不同方案的优化井网部署与开发方案对比,完善了煤层气项目经济评价内涵,煤层气项目经济评价研究进入了深入阶段。

2.2 作者分析

发文量反映了学者对该领域的关注度。统计分析的 88 篇论文里共有 189 位作者,发文量排名前 3 的作者为杨永国、罗东坤和代由进,分别发表了 8 篇、7 篇、5 篇论文;发表 4 篇论文的作者 3 位;3 篇论文的作者 5 位;2 篇论文的作者 18 位;仅发表 1 篇的作者有 160 位。这一现象说明目前该领域具有影响力和代表性的学者较少,大部分作者的研究不具有持续性。

通过文献计量软件分析,煤层气项目经济评价领域以罗东坤、代由进、杨永国等 3 名学者为中心的合作团队规模最大。除此之外,绝大多数的作者之间不存在或存在较弱的合作关系,多以小规模合作或独立研究为主。表 2 展示了在该领域发文频次前 10 的作者发文情况分析,其中,“度中心性”用来刻画节点的中心性,即与作者接相连的相关程度,节

表 2 煤层气项目经济评价研究作者发文情况分析表

频次	度中心性	作者	首次在该领域发文时间
8	10	杨永国	2000
7	13	罗东坤	2008
5	13	代由进	2015
4	8	夏良玉	2009
4	1	刘娜娜	2015
4	4	秦勇	2001
3	4	张冬明	2001
3	10	翟雨阳	2017
3	7	汪志明	2013
3	7	杨刚	2013

点的度中心性越高,该节点在网络中越重要。由表2可知,主要的合作网络围绕高产作者展开,多为师生合作模式或同一研究机构的同时合作模式,也包括一些跨地区单位合作模式。

2.3 机构分析

机构发文量反映研究机构在煤层气项目经济评价领域的学术影响力。分析结果显示,我国煤层气项目经济评价的研究机构之间仅有小范围合作,总体研究较为分散。高产机构主要集中在中国石油大学(北京)、中石油煤层气有限责任公司、中煤科工集团西安研究院有限公司和中国矿业大学。大量机构的发文率较低,反映科研产出不平衡。此外,多数发文机构为单一机构,其余研究机构可以划分为5个合作群。第一个合作群为中国石油大学(北京)、中石油煤层气有限责任公司、中联煤层气国家工程研究中心有限责任公司等在内的15个机构;第二个合作群包括中国矿业大学、煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室、江苏建筑职业技术学院等6个合作机构;第三个合作群包括中国石油青海油田公司、中国石油大学(北京)、中石油西部钻探工程有限公司等机构;第四个合作群为中煤科工集团西安研究院有限公司、河南理工大学、山西蓝焰煤层气集团有限责任公司;第五个合作群包括中国石油大学(北京)、中国石化胜利油田和中国石油华北油田公司。其中,第一个合作群和第二个合作群具有明显的地域相关性。

3 煤层气项目经济评价方法分析与对比

3.1 贴现现金流法

国内外煤层气项目经济评价目前应用最广泛的是投资评价方法,即贴现现金流法。该方法基于货币的时间价值,通过项目实施后的预测产品价格、投资、生产成本费用等按设定的贴现率,计算和分析项目的盈利能力。净现值法、现值指数法、内含报酬率法等方法都是贴现现金流法计算项目投资收益的常用方法,考虑了货币的时间价值以及项目的现金流量。目前贴现现金流法是煤层气项目经济评价的主要方法。

3.2 实物期权法

与贴现现金流法不同,实物期权法将未来发展的不确定性视为机会,根据煤层气项目不确定性对项目随时调整决策,将不确定性转化为收益。20世纪90年代,国外石油天然气领域开始采用实物期权理论对项目进行风险和经济评价,例如美孚公司“石

油公司的天然气开发”项目、雪佛龙公司的投资决策、BP石油公司的风险评价^[16]等。在煤层气项目经济评价中,实物期权法首先考虑了煤层气地质条件、市场环境、经济前景等方面的不确定性,依据对经济效益产生的风险评估,实现对传统经济评价方法无法明确的项目价值的修正补充^[17]。例如,计晓东等^[18]探讨实物期权中不确定性影响,识别并量化煤层气项目的不确定因素,提出实物期权法在煤层气项目经济评价应用中需要把握的问题,为煤层气项目的经济评价提供了新的思考。刘清志等^[19]研究实物期权法的布莱克-舒尔斯定价模型与二叉树模型,得出二叉树模型限制条件相对较少、对不确定性因素的考虑更为全面,因此更适合煤层气项目的经济评价。

3.3 数据包络分析法

数据包络分析是一种数据驱动的非参数数学规划方法,用于评价多投入与多产出的同质决策单元之间的效率,不需要进行生产函数及相关参数假设估计。数据包络分析方法已经成功运用到煤层气经济评价的不确定性分析中,例如,陈玉华^[20]将数据包络分析方法与煤层气项目经济评价有效结合,在经济评价指标体系的基础上,建立了有界数据包络分析煤层气项目经济评价模型,通过分析不同产出效益与不同地区的煤层气开发方案,评价了沁水盆地潘庄区块4种煤层气井型的产出效率。

3.4 定量与定性相结合方法

煤层气项目经济评价领域常用的定量与定性相结合方法包括层次分析法和模糊综合评价法。其中,层次分析法模仿人类解决复杂决策问题时的思维判断过程,将决策问题分解为多个层次,通过两两比较的方式确定各因素的重要性,再结合专家打分实现相对重要性排序,因此经常被用来计算权重;模糊综合评价法基于模糊集理论,以隶属度函数为桥梁,将定性评价指标转化为定量指标^[21],因此用来对项目进行综合性评价。进行模糊综合评价时,可先使用层次分析法对各个因素进行权重赋值。不同研究者基于煤层气项目的层次系统性,运用矩阵合成原理,将定性因素定量化,构建经济评价指标体系,对煤层气项目进行经济评价。例如,杨永国等^[22]利用层次分析法确定了评价矩阵的指标权重,运用模糊综合评价构造了评判矩阵,对晋城矿区煤层气项目进行了经济性综合评价,根据最大隶属原则,确定研究区煤层气项目具有较好的经济效益和乐观的开发前景。

3.5 不同方法对比

贴现现金流法、实物期权法、数据包络分析法、定量与定性相结合方法是目前煤层气项目经济评价

常用的 4 种方法,也是油气项目战略投资评价的常用方法。这些方法因其自身的特点有各自的应用场景,具体优缺点对比分析如表 3 所示。

表 3 不同经济评价方法主要优缺点对比表

	贴现现金流法	实物期权法	数据包络分析法	定量与定性相结合方法
优点	以现金流为基础,充分考虑项目未来创造现金流量能力对其价值的影响,融合历史情况和未来预测,能够较为全面地对煤层气项目进行经济评价	客观评价煤层气项目的价值,合理利用煤层气项目的不确定性,有效降低风险	不需要假设相关权重和参数,避免了决策主观性适用于多输入与多输出的有效性综合评价问题	综合考虑所有因素的影响程度,并通过权重的设置区分各因素的影响程度
缺点	对决策条件与能力的要求较高,且易受预测人员主观意识的影响 只对资产价值进行估计,忽略不确定性,没有考虑项目的灵活性	定价模型缺少足够的金融市场客观信息支持,结果与实际经济情况可能存在差异 ^[23] 定价模型的参数与分布无法反映现实	只能对决策单元评价为有效单元或无效单元,无法对评价单元进行排序	对于因素及其相应权重的确定依赖于行业专家的经验,主观性较强 无法准确评估项目的价值

4 新发展阶段下对项目经济评价的建议

经过多年的科技攻关与探索实践,我国煤层气产业的技术理论与工程研究取得诸多成果,煤层气产业迅速发展,进入新的发展阶段^[24]。然而,与之相适应的煤层气项目经济评价研究还有很大的提升空间,例如对不同方法的适用场景探讨、新的评价方法引入等。分析煤层气项目经济评价领域学术论文发表的情况,基于煤层气项目经济评价研究热点与煤层气产业发展的联系,结合当前煤层气项目经济评价常用方法,建议从 4 个方面加强煤层气项目经济评价研究工作。

1) 加强跨界合作。从文献层面分析的合作关系情况来看,煤层气项目经济评价研究机构的合作呈现很大的地域局限性。建议各个机构、学者加强合作,破除学术壁垒,优化资源配置,引导更多机构、学者参与研究,改善科研产出不均衡性的状况。考虑到煤层气项目最终需要产业化的技术革命和政策支持来实现,应增强研究者之间的合作,加强高校、科研院所、生产单位之间的交流,促进产学研结合,将理论与经验相结合,使得理论研究在解决实际问题中落地。

2) 完善评价方法。当前的煤层气项目经济评价方法还存在一些不足,例如评价指标体系不统一、评论方法老旧、评价模型粗糙等。在实际应用中,应建立合理的评价指标体系。对于评价模型的选择,考虑到煤层气项目的投资风险高、周期长、不确定性大等特点,避免项目评价方法单独使用时出现高估或低估价值,应多角度、多方法考虑项目的实施条件,根据不同的评价对象采用合适的方法,组合优化多

种模型,从而提高决策支持与投资评价的效果。例如,使用一种评价方法的预测结果作为基础,利用其他方法进行修正。此外,现有的主要研究方法——贴现现金流法进行煤层气项目的经济评价时更多的是从经济效益角度考虑,以财务评价为指标,评价项目的宏观经济效益目标。今后的煤层气项目经济评价,应多从经济效益、环境效益、技术分析角度进行综合分析研究。

3) 综合考虑评价的动态性。煤层气项目各项成本和经济指标始终处于动态变化状态,煤层气项目经济评价也应该是一个动态变化的过程。在实际评价中,需要根据项目的实际进展,紧密跟踪生产数据,动态调整评价体系。除了项目立项前的经济评价,也要在项目实施过程中进行中评价与后评价,分析变化原因,针对未达到预期目标的项目提出对策。鉴于煤层气资源非均质性强的特点,“甜点”预测是煤层气开采工作中的一项重要技术,因此对煤层气项目的经济评价宜根据甜点接续开发采用的经济评价流程^[25],在上一个甜点接续区布井生产的同时,进一步勘探和确定下一个甜点区,并进行经济评价。

4) 提高煤层气产能预测的可靠性。煤层气销售收入是煤层气开发项目的主要收入方式,因此煤层气井产能预测是开发项目经济评价的基础。限于动态排采资料的滞后性,产能预测需要通过数值模拟软件或经验曲线法进行,对输入参数的精度要求较高。然而由于精确的裂缝和储层参数难以获取,以及气体运移机理尚不完全清晰,导致产能模拟并非总是足够精确。因此,对煤层气产量和趋势进行准确预测并进行相应调整,以确保项目实施过程中的资源合理利用、风险

最小化以及效益最大化。此外,当前的研究多为针对特定研究区的分析与评价,缺乏不同地质条件、不同储层条件、不同地区煤层气项目经济评价对比。考虑不同因素下的煤层气开发效果,综合对比分析评价因素的敏感性以及最大化产能预测的可靠性,对深化煤层气项目经济评价研究具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 彭贤强, 张宝生, 储王涛, 等. 中国煤层气开发综合效益评价[J]. 天然气工业, 2008, 28(3): 124-126.
PENG Xianqiang, ZHANG Baosheng, CHU Wangtao, et al. Social benefit assessment on CBM development in China[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(3): 124-126.
- [2] 张勇昌. 煤层气开发风险形成机制与评价模型研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
ZHANG Yongchang. Study on the risk formation mechanism and assessment model of coalbed methane development[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [3] KUUSKRAAVA, 李红梅. 全球非常规天然气资源[J]. 国外油气勘探, 1995, 7(6): 778-781.
KUUSKRAAVA, LI Hongmei. Global unconventional natural gas resources[J]. Oil & Gas Prospecting Abroad, 1995, 7(6): 778-781.
- [4] 张卫东, 孟庆春, 魏韦. 煤层气勘探开发技术进展与展望[J]. 中国煤层气, 2009, 6(5): 11-13.
ZHANG Weidong, MENG Qingchun, WEI Wei. Prospect of technology for exploration and development of CBM[J]. China Coalbed Methane, 2009, 6(5): 11-13.
- [5] JONES A H, AHMED U, BUSH D D, et al. Methane production characteristics for a deeply buried coalbed reservoir in the San Juan Basin[C]//SPE Unconventional Gas Recovery Symposium. Pittsburgh: SPE-12876-MS, 1984.
- [6] DICKEHUTH D A, ADAMS M A, HAYOZ F P. Recovery economics of coalbed methane and cost implications of pipeline hookup[C]//SPE Eastern Regional Meeting. Washington, D.C.: SPE-11251-MS, 1982.
- [7] DHIR R, DERN R R, Jr, MAVOR M J. Economic and reserve evaluation of coalbed methane reservoirs[J]. Journal of Petroleum Technology, 1991, 43(12): 1424-1518.
- [8] REEVES S R. A technical and economic evaluation of coalbed methane production projects in the Bowen and Sydney Basins of Australia[C]//Symposium on Coal Bed Methane—Research and Development in Australia. Townsville: Advanced Resources International, Inc., 1992: 53.
- [9] BANK G C, KUUSKRAA V A. The economics of Powder River Basin coalbed methane development[R]. Arlington: Advanced Resources International, Inc., 2006.
- [10] 杨永国, 秦勇, 姜波. 煤层气项目经济评价理论与方法研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001.
YANG Yongguo, QIN Yong, JIANG Bo. Study on theory and method of coalbed methane project economy evaluation[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2001.
- [11] 杨永国, 秦勇, 张冬明. 层次分析法及其在煤层气项目经济评价中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2001, 29(4): 19-21.
YANG Yongguo, QIN Yong, ZHANG Dongming. Analytic hierarchy process and its application in economic evaluation of coalbed methane project[J]. Coal Geology & Exploration, 2001, 29(4): 19-21.
- [12] 张遂安, 王竹平, 李艳红. 煤层气开发项目经济评价方法与预测模型[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(3): 314-317.
ZHANG Suian, WANG Zhuping, LI Yanhong. Economic evaluation and prediction model for coalbed methane development[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(3): 314-317.
- [13] MARONGIU-PORCU M, AJAO O, DALAMARINIS P, et al. On the economic optimization of the fracturing of coal seam reservoirs[C]//SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. Jakarta: SPE-165804-MS, 2013.
- [14] SANDER R, CONNELL L D. A probabilistic assessment of enhanced coal mine methane drainage (ECMM) as a fugitive emission reduction strategy for open cut coal mines[J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 131: 288-303.
- [15] 柳兴邦. 油气勘探经济评价指标和评价方法初探[J]. 油气地质与采收率, 2002, 9(4): 89-91.
LIU Xingbang. Preliminary research on the index and method of economic evaluation for oil-gas exploration[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2002, 9(4): 89-91.
- [16] 李莉. 实物期权在鄂尔多斯盆地安塞—靖安区块石油经济评价中的应用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2005.
LI Li. Application of real option in petroleum economic evaluation of Ansai-Jing'an Block, Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2005.
- [17] 宋艺, 仇鑫华. 实物期权方法在海外海上油气资产并购决策中的应用[J]. 中国海上油气, 2014, 26(4): 46-49.
SONG Yi, QIU Xinhua. The decision analysis of overseas offshore petroleum M & A by real options theory[J]. China Offshore Oil and Gas, 2014, 26(4): 46-49.
- [18] 计晓东, 张丽英, 杨玉凤, 等. 实物期权模型在煤层气项目评价中的应用[J]. 中国煤炭, 2011, 37(6): 27-30.
JI Xiaodong, ZHANG Liying, YANG Yufeng, et al. The evaluation of real options model in coalbed methane project[J]. China Coal, 2011, 37(6): 27-30.
- [19] 刘清志, 刘小娇. 基于实物期权的煤层气项目经济评价[J]. 油气田地面工程, 2013, 32(5): 3-4.
LIU Qingzhi, LIU Xiaojiao. Economic evaluation of coalbed methane project based on real option[J]. Oil-GasField Surface Engineering, 2013, 32(5): 3-4.
- [20] 陈玉华. 基于DEA的煤层气经济评价模型研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010.
CHEN Yuhua. Study on the coalbed methane economic evaluation model based on DEA[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2010.
- [21] 张勇昌, 杨永国, 罗金辉. 基于优化组合赋权的煤层气开发风险评价研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(5): 91-97.
ZHANG Yongchang, YANG Yongguo, LUO Jinhui. Study on risk assessment of CBM development based on optimized combination weighting[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(5): 91-97.
- [22] 杨永国, 秦勇. 煤层气项目经济评价系统模型及应用研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(2): 254-256.
YANG Yongguo, QIN Yong. Study on system models of the coalbed methane project economy evaluation and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(2): 254-256.
- [23] 孙加森. 数据包络分析(DEA)的交叉效率理论方法与应用研

究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2014.

SUN Jiasen. Research on cross efficiency of data envelopment analysis(DEA): Theoretical method and application[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.

[24] 秦勇, 申建, 沈玉林. 叠置含气系统共采兼容性——煤系“三气”及深部煤层气开采中的共性地质问题[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 14-23.

QIN Yong, SHEN Jian, SHEN Yulin. Joint mining compatibility of superposed gas-bearing systems: A general geological problem for extraction of three natural gases and deep CBM in coal se-

ries[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 14-23.

[25] 苏佳纯, 张金川, 朱伟林. 非常规天然气经济评价对策思考[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(5): 743-753.

SU Jiachun, ZHANG Jinchuan, ZHU Weilin. Study on unconventional natural gas economic evaluation[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(5): 743-753.

(修改回稿日期 2022-06-07 编辑 陈 嵩)



本文互动

页岩气水平井压后返排动态调整技术

1. 目的

页岩气水平井压后返排作为压裂施工作业中的重要一环, 对于整体的压裂和生产效果都有着重要的影响。但在目前的现场实际施工中, 压后返排的工作制度往往由现场技术人员依据其自身经验来确定, 难以满足页岩气开发上产愈发精细的要求。若返排时所用油嘴过大, 有可能导致大量支撑剂回流, 压裂后形成的裂缝无法得到较好的支撑; 采用大油嘴返排还有可能增大支撑剂破碎率和嵌入率, 增加裂缝的应力敏感伤害, 直接影响裂缝的有效导流能力, 并且大量支撑剂的高速喷出还有可能导致地面测试流程的损坏。反之, 若返排时所用油嘴过小, 则有可能增大水相圈闭伤害, 并且返排初期裂缝中的悬浮物、残渣、岩屑、微粒、结晶盐等不能及时返排出来, 容易造成堵塞, 严重影响页岩气井产量; 此外, 小油嘴返排也不能满足现场生产单位快速上产的需求。为此, 亟须找到一种适合页岩气水平井压后返排的油嘴调整方法, 以此来减轻返排过程中对基质(堵塞、蠕变及水相圈闭等)和裂缝(喉道堵塞、支撑剂回流、破碎嵌入及应力敏感等)的伤害, 减轻出砂造成的井筒、地面设备伤害, 最大限度的维持缝网的复杂程度、维持压后较高的导流能力, 实现页岩气井单井产能提升的目标。

2. 方法

基于返排设计, 根据非常规试油气录井采集的实时数据, 对现场油嘴程序进行监控和调整(图1), 以达到提高页岩气井产能和单井最终可采储量(EUR)之目的。

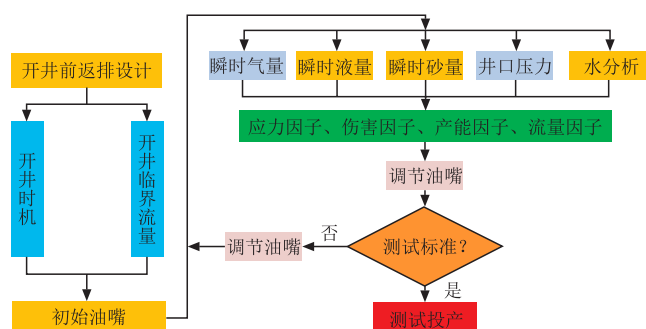


图1 返排油嘴动态调整流程示意图

具体步骤如下: ①确定合理的焖井时间及开井油嘴, 首先根据储层岩石力学参数确定裂缝起裂阈值下限, 然后根据焖井过程中井口压力计算裂缝内压力, 当裂缝内流体压力等于或略小于裂

缝起裂阈值下限时即可以开井, 此时裂缝已经闭合并且焖井期间的缝网扩展程度趋于最大化; ②建立裂缝闭合后的气水两相支撑剂回流模型(砂拱模型)、孔眼节流模型、井筒压降模型、井口油嘴节流模型及返排优化模型, 以砂拱破坏准则为基础求取返排临界流速, 从而确定开井油嘴与返排过程中的临界油嘴尺寸; ③开井之后根据非常规试油气录井采集实时高频数据, 采集回来的数据通过运算处理之后分析“流量因子、伤害因子、应力因子、产能因子”的动态特征, 根据4项因子综合动态表现实时判断地层裂缝真实情况, 判断当前油嘴制度是否造成超临界流量从而导致支撑剂回流, 判断当前油嘴制度是否造成了地层伤害加剧, 判断当前油嘴制度是否加剧了储层应力敏感伤害, 判断当前油嘴制度是否达到了理论模型的流体产能, 并据此判断当前是否需要油嘴进行调节, 调节之后是否能够达到测试标准; ④如此循环反复, 直到气井达到测试标准。

3. 作用和效果

在四川盆地威远页岩气区块开展多次应用的结果表明: 较之于同平台的邻井, 采用上述页岩气压后返排动态调整技术的井折算成同一工程改造条件之后, 后者测试产量更高, 测试压力更高, 页岩气无阻流量较同平台邻井提高20%~40%, 初期生产指标更优, 预测的阶段EUR更高。结论认为, 该项技术能够满足现场生产单位快速上产的需求, 在四川盆地具有良好的应用前景, 并已获得国家发明专利(图2)。



图2 发明专利证书

(余杨康: 成都创源油气技术开发有限公司, E-mail: 1430355892@qq.com 特约栏目主编 李玉飞 编辑 居维清)