

深井CO₂爆破致裂干热岩系统综合效应预评价

夏杰勤¹, 窦斌¹, 谷俊廷², Muhammad Kashif³,
崔国栋¹, 陈劲^{1,4}

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430073; 2. 河北省地矿局第一地质大队, 邯郸 056001;

3. Department of Earth Sciences, University of Sargodha, Sargodha 40100; 4. 岩土钻掘与防护教育部工程研究中心, 武汉 430073)

摘要: CO₂爆破致裂工艺为建造商业化EGS储层提供了新方案,有望突破深层地热能行业发展的技术瓶颈,但目前未见CO₂致裂技术用于干热岩系统的综合性能评价研究。基于此研究不足,借助数学建模定量科学评价其综合性能,解决此技术效果的不确定性和模糊性,填补深井地热系统综合评价体系的空白。考虑到深井CO₂爆破干热岩系统是一个多变、模糊、复杂的非线性系统,该文选取AHP-FCE优化数学模型,AHP对深井爆破干热岩系统复杂问题分层,构建递阶层次结构,通过Matlab将专家的定性判断量化,进而确定FCE中各层评价指标权重大小,再通过FCE模糊关系合成原理,对多因素影响下的深井CO₂爆破致裂干热岩系统综合评分为83.36,预评价结果为较好,可考虑将CO₂爆破致裂器用于干热岩开采。评定结果可作为深井CO₂爆破致裂干热岩建设过程中的数据支撑,为地热开采工程提供一定的理论依据。

关键词: 地热能;CO₂爆破;干热岩系统;数学模型;评价

中图分类号: P62

文献标志码: A

0 引言

以开采和利用地下3~10 km低渗透干热岩(hot dry rock, HDR)地热热能为目标的增强型地热系统(enhanced geothermal systems, EGS)正逐渐引起世界各国的广泛重视^[1-5],研究表明储层建造是EGS商业化的关键技术之一。目前EGS储层建造基本沿用油气行业水力压裂技术,大多形成了形状简单的单一裂缝,难以形成较大体积的换热通道^[6]。

有学者提出地热开发与CO₂资源化利用相结合的地热开发技术^[7],并就CO₂-EGS展开了一系列研究。文献[8]以CO₂为工质,开展了其在干热岩中的流动换热和固化的数值模拟,结果表明CO₂具有更好的换热和固化效果;文献[9]模拟了CO₂与H₂O的EGS,发现CO₂-EGS比H₂O-EGS具有更高的热采收率;文献[10-11]评估了超临界CO₂热物理性质,并进行了相关数值模拟,以探索在工程地热储层中CO₂流体动力学和传热问题;文献[12]进行了以CO₂为工质在地热系统中的流动和传热数值模拟研究;文献[13]首次提出了“利用CO₂爆破致裂建造EGS热储层”,为商业化开发干热岩提供了新方案。液态CO₂爆破技术具有爆破压力大且可控、适用性强、经济环保等优势。因此,CO₂爆破致裂技术有望用于干热岩系统,形成复杂体积裂隙网络,提高地热开采换热效率。

为定量科学评价CO₂致裂技术用于干热岩系统的综合性能,解决此技术效果的不确定性和模糊性,填补中国深井地热系统综合评价体系的空白,本文提出一种层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)-模糊综合评价法(fuzzy comprehensive evaluation, FCE)相结合的多因素、多层次综合评价方法,对CO₂致裂器用于干热岩系统综合效应预评价,评价结果可为CO₂致裂器用于深井爆破致裂提供数据支撑,也可作为地热工程建设和发展的参考依据之一,还可作为同类综合系统工程横向借鉴学习的评价标准之一。

1 AHP-FCE综合预评价模型

FCE是基于模糊数学隶属度理论,将受到多因素影响的复杂对象的定性评价,运用模糊合成运算定量化处理,进而对其综合评价^[14-16]。结果清晰、系统性强,适合解决各种模糊的,且难以量化的非确定性问题。AHP是将复杂问题分解,通过构建递阶层次结构,将专家的定性判断定量化处理,从而对其综合分析^[17]。

深井CO₂爆破致裂干热岩系统是一个多变、模糊、复杂的非线性系统^[18],本文全面考虑了影响深井CO₂爆破致裂干热岩系统综合效应的各种因素,建立AHP-FCE综合数学分析模型,将人为定性评价定量化处理、评价过程的模糊性数学

化展示,减少人为主观性的影响,使评价结果具有逻辑性、可靠性、实用性和系统性。借鉴综合能源系统(智慧电网、微电网)多指标评价分析方法,对 CO₂致裂器用于干热岩系统综合效应预评价,分别从经济效应、技术效果、环境效应、安全效应和社会效应 5 个维度全方位综合打分,利用 AHP 将专家定性描述数学化,得到各指标权重结果;最后,基于 FCE 将量化后的专家评价结果进行模糊变换处理,结合所建立的评价标准,综合评价多因素影响下的深井 CO₂爆破致裂干热岩系统。

2 基于 CO₂致裂器的深井爆破致裂干热岩系统 AHP-FCE 模型

应用 AHP-FCE 优化数学模型,AHP 对深井 CO₂爆破致裂干热岩系统复杂问题分层,构建递阶层次结构,将专家的定性判断转换为各因素之间可操作的重要度的比较上,通过 Matlab 将定性指标量化,进而确定 FCE 中各层评价指标权重大小,再通过 FCE 中模糊变换、模糊关系合成原理,对 CO₂致裂器用于深井爆破致裂干热岩综合效应进行综合预评价,最终得到定量的系统综合效应评价等级。具体路线如图 1 所示。

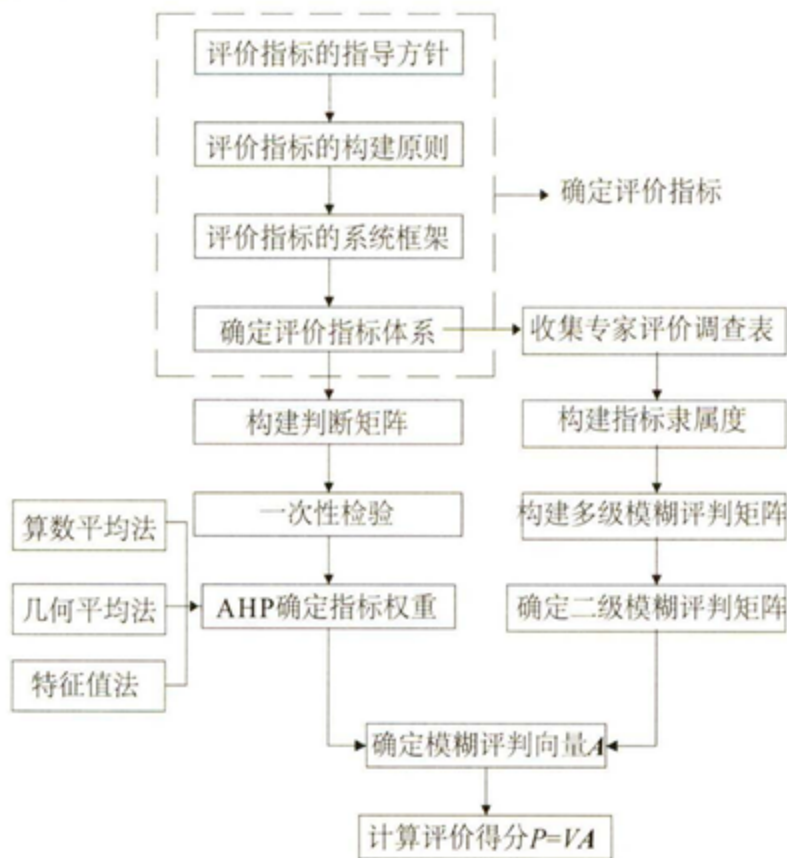


图1 技术路线

Fig. 1 Technology roadmap

2.1 AHP 模型

AHP 首先需要在全面调研、剖析问题的基础上,构建合适的层次指标评价体系,然后利用专家对两两指标重要性比较结果,结合判断矩阵得到各层指标对总目标的权重大小^[19]。AHP 模型主要分为构建层次指标评价体系、构造判断矩阵、一致性检验、层次指标计算和排序,如图 2 所示。

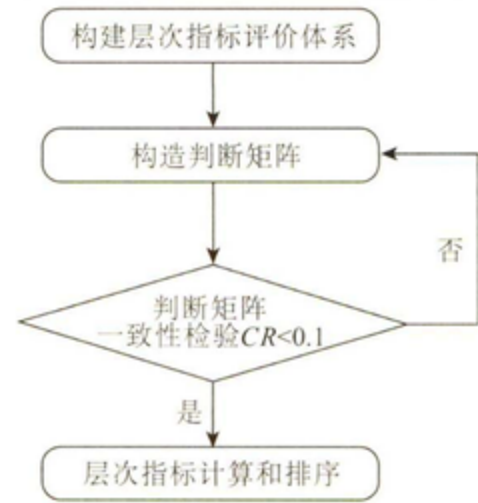


图2 层次分析法流程

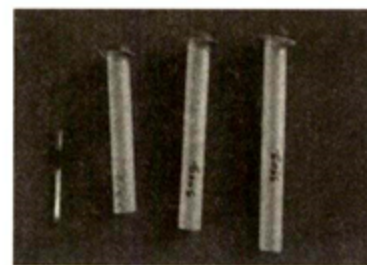
Fig. 2 AHP flow chart

2.1.1 构建层次指标评价体系

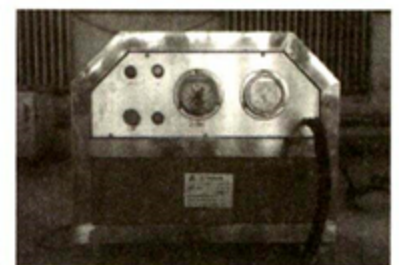
深井 CO₂爆破致裂干热岩系统综合效应评价指标体系构建过程中,把握全面合理、与时俱进的指导方针,遵循科学、全面、实用的指导原则,通过大量国内外综合评价类文献调研、CO₂爆破性能研究现场实验(见图 3)和中国地质大学(武汉)地热和爆破工程研究领域相关专家经验,依据评价指标意义和各指标之间的隶属关系,选定经济、技术、环境、安全、社会 5 个维度对该系统综合效应进行预评价。



a. CO₂致裂器实物



b. 活化器实物



c. CO₂充装机

图3 CO₂爆破性能研究现场实验照片

Fig. 3 Field experiment photos of CO₂ blasting performance research

系统预评价指标体系如图 4 所示。一级指标共有 5 个,分别为:经济效应(A1)、技术效果(A2)、环境效应(A3)、安全效应(A4)、社会效应(A5);二级指标共有 14 个,其中技术效果选取 5 个二级指标:致裂器致裂压力(B3)、储层岩性(B4)、致裂器作用方向(B5)、储层天然结构面(B6)、致裂裂缝情况(B7);三级指标共有 6 个,其中 CO₂致裂器是利用 CO₂相变致裂技术达到爆破致裂的一种手段,爆破致裂性能主要取决于定压片厚度、CO₂充装量以及活化器用量,故致裂器致裂压力共选取 3 个三级指标:定压片厚度(C1)、CO₂充装量(C2)、活化器用量(C3)。

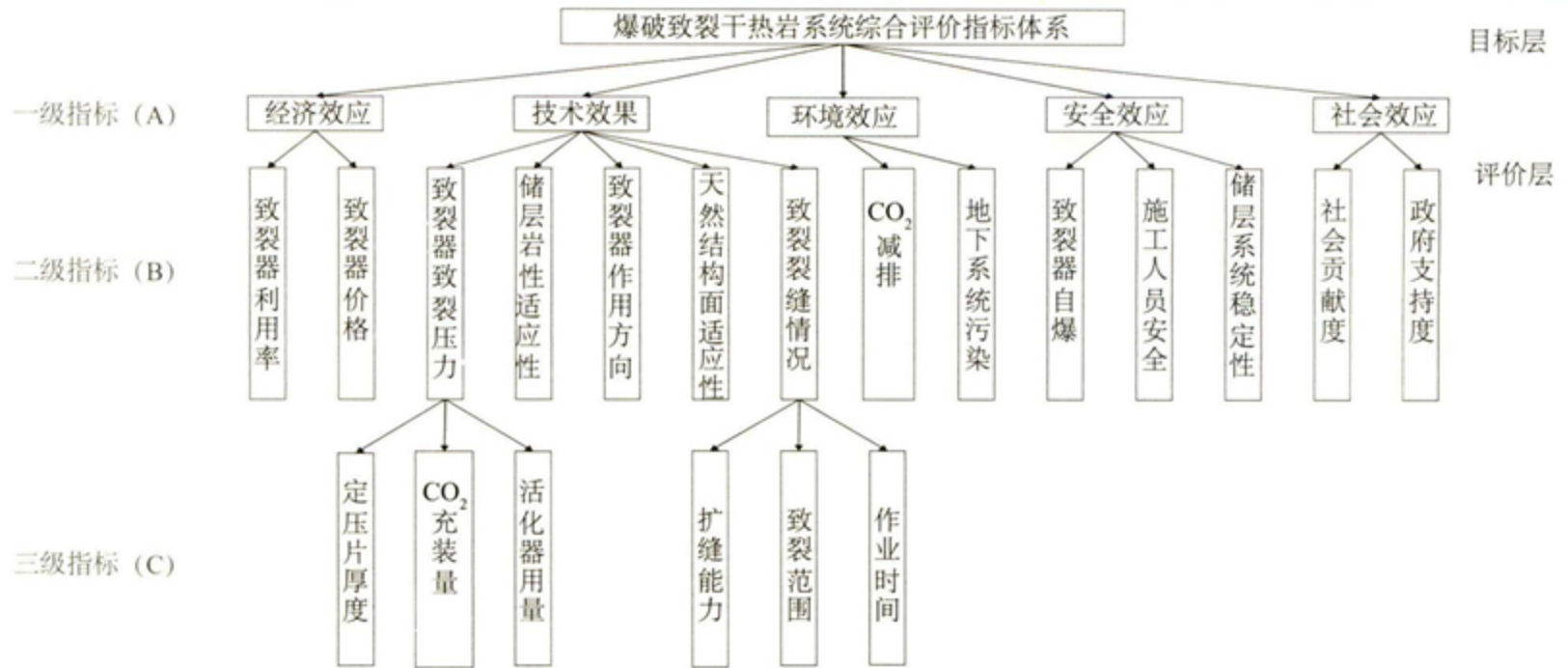


图4 系统预评价指标体系

Fig. 4 System pre-evaluation index system diagram

2.1.2 构造判断矩阵

构造判断矩阵,即两两比较所构建的每层(目标层除外)评价指标,按表1所示的度量方法,对每层(目标层除外)的每个元素进行重要程度的判定。

表1 判断矩阵标度

Table 1 Judgment matrix scale

| 标度 | 含义 |
|---------|--------------------------|
| 1 | 表示2个因素相比,具有同样重要性 |
| 3 | 表示2个因素相比,一个因素比另一个因素稍微重要 |
| 5 | 表示2个因素相比,一个因素比另一个因素明显重要 |
| 7 | 表示2个因素相比,一个因素比另一个因素强烈重要 |
| 9 | 表示2个因素相比,一个因素比另一个因素极端重要 |
| 2,4,6,8 | 上述两相邻判断的中值 |
| 倒数 | A和B相比如果标度为3,那么B和A相比就是1/3 |

由上述判断矩阵原理和相关准则,得到深井CO₂爆破致裂干热岩系统各层判断矩阵,为避免评价结果出现前后矛盾,需要利用判断矩阵的特征根变化对其进行一致性检验。

2.1.3 判断矩阵的一次性检验

假定判断矩阵A的特征向量W及特征值λ_{max},检验过程如下。

1)计算判断矩阵每一行元素的乘积:

$$M_i = \prod_{j=1}^n a_{ij}, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式中: M_i ——判断矩阵每i行元素的乘积; a_{ij} ——判断矩阵中的元素。

2)计算每一行元素乘积的n次方根:

$$\bar{W}_i = \sqrt[n]{M_i} \quad (2)$$

3)对向量W_i归一化处理:

$$W_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{j=1}^n \bar{W}_j} \quad (3)$$

式中: W ——判断矩阵的特征向量, W = [W₁, W₂, ..., W_n]^T。

4)计算判断矩阵的最大特征值:

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i} \quad (4)$$

式中: λ_{max} ——判断矩阵的最大特征根; (AW)_i ——向量AW的第i个元素。

5)求出判断矩阵的一致性指标CI:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

式中: CI值越小,表示构造矩阵一致性程度高,CI值越大,表示构造矩阵一致性程度低。

6)随机一致性比率CR确定判断矩阵是否满足一致性检验:

$$CR = \frac{CI}{RI} < 0.1 \quad (6)$$

RI的取值^[17]详见表2,且当CR计算结果满足式(6),判断矩阵一致性通过;反之,则需调整之前的判断矩阵,直到满足式(6)。

基于以上构建和检验判断矩阵的方法,利用Matlab得到深井CO₂爆破致裂干热岩系统各层次判断矩阵如表3所示。

因此,得出该系统评价指标体系中各层次判断矩阵均CR < 0.1,通过一致性检验。

7)计算各层次指标权重。

①算术平均法求权重:

表2 平均随机一致性指标

Table 2 Average random consistency index

| n | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| RI | 0.00 | 0.00 | 0.52 | 0.89 | 1.12 | 1.26 | 1.36 | 1.41 | 1.46 | 1.49 |

表3 判断矩阵
Table 3 Judgment matrix

| 层次 | 指标 | | | | | | CI、CR |
|------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----------|-----------|
| 一 级 指 标 | A | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | |
| | A1 | 1 | 1/5 | 1/3 | 1/5 | 1/3 | |
| | A2 | 5 | 1 | 1/2 | 1/5 | 1 | CI=0.0787 |
| | A3 | 3 | 2 | 1 | 1/3 | 3 | CR=0.0703 |
| | A4 | 5 | 5 | 3 | 1 | 5 | |
| | A5 | 3 | 1 | 1/3 | 1/5 | 1 | |
| 二 级 指 标 | A1-B | B1 | B2 | | | | CI=0.0000 |
| | B1 | 1 | 1/5 | | | | CR=0.0000 |
| | B2 | 5 | 1 | | | | |
| | A2-B | B3 | B4 | B5 | B6 | B7 | CI=0.0599 |
| | B3 | 1 | 7 | 9 | 7 | 1 | CR=0.0534 |
| | B4 | 1/7 | 1 | 3 | 1/2 | 1/5 | |
| | B5 | 1/9 | 1/3 | 1 | 1/3 | 1/5 | |
| | B6 | 1/7 | 2 | 3 | 1 | 1/5 | |
| | B7 | 1 | 5 | 5 | 5 | 1 | |
| | A3-B | B8 | B9 | | | | CI=0.0000 |
| | B8 | 1 | 1/7 | | | | CR=0.0000 |
| | B9 | 7 | 1 | | | | |
| | A4-B | B10 | B11 | B12 | | | CI=0.0193 |
| | B10 | 1 | 1/5 | 1/3 | | | CR=0.0370 |
| B11 | 5 | 1 | 3 | | | | |
| B12 | 3 | 1/3 | 1 | | | | |
| A5-B | B13 | B14 | | | | CI=0.0000 | |
| B13 | 1 | 1/2 | | | | CR=0.0000 | |
| B14 | 2 | 1 | | | | | |
| 三 级 指 标 | B3-C | C1 | C2 | C3 | | | CI=0.0018 |
| | C1 | 1 | 3 | 5 | | | CR=0.0036 |
| | C2 | 1/3 | 1 | 2 | | | |
| | C3 | 1/5 | 1/2 | 1 | | | |
| | B7-C | C4 | C5 | C6 | | | CI=0.0046 |
| | C4 | 1 | 1/2 | 2 | | | CR=0.0088 |
| | C5 | 2 | 1 | 3 | | | |
| | C6 | 1/2 | 1/3 | 1 | | | |

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (7)$$

②几何平均法求权重:

$$W_i = \frac{\left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{k=1}^n \left(\prod_{j=1}^n a_{kj} \right)^{\frac{1}{n}}}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (8)$$

③特征值法求权重:

利用判断矩阵一致性检验式(2)~式(4)计算得到最大特征值和其对应的特征向量,然后将特征向量进行归一化。

综上,本文利用 Matlab 对该系统各层次评价指标计算结果如表 4 所示。

表4 各层次指标计算结果
Table 4 Calculation results of indexes at each level

| 层次 | 指标 | 算术平均法 | 几何平均法 | 特征值法 | 平均值 |
|------------------|-----|--------|--------|--------|--------|
| 一 级 指 标 | A1 | 0.0562 | 0.0510 | 0.0538 | 0.0537 |
| | A2 | 0.1400 | 0.1312 | 0.1347 | 0.1353 |
| | A3 | 0.2100 | 0.2156 | 0.2127 | 0.2128 |
| | A4 | 0.4839 | 0.4930 | 0.4911 | 0.4893 |
| | A5 | 0.1100 | 0.1092 | 0.1078 | 0.1090 |
| 二 级 指 标 | B1 | 0.1667 | 0.1667 | 0.1667 | 0.1667 |
| | B2 | 0.8333 | 0.8333 | 0.8333 | 0.8333 |
| | B3 | 0.4386 | 0.4481 | 0.4438 | 0.4435 |
| | B4 | 0.0761 | 0.0706 | 0.0717 | 0.0728 |
| | B5 | 0.0433 | 0.0399 | 0.0412 | 0.0415 |
| | B6 | 0.0964 | 0.0932 | 0.0944 | 0.0947 |
| | B7 | 0.3455 | 0.3482 | 0.3490 | 0.3476 |
| | B8 | 0.1250 | 0.1250 | 0.1250 | 0.1250 |
| | B9 | 0.8750 | 0.8750 | 0.8750 | 0.8750 |
| | B10 | 0.1062 | 0.1047 | 0.1047 | 0.1052 |
| | B11 | 0.6333 | 0.6370 | 0.6370 | 0.6358 |
| | B12 | 0.2605 | 0.2583 | 0.2583 | 0.2590 |
| | B13 | 0.3333 | 0.3333 | 0.3333 | 0.3333 |
| | B14 | 0.6667 | 0.6667 | 0.6667 | 0.6667 |
| 三 级 指 标 | C1 | 0.6479 | 0.6483 | 0.6483 | 0.6482 |
| | C2 | 0.2299 | 0.2297 | 0.2297 | 0.2298 |
| | C3 | 0.1222 | 0.1220 | 0.1220 | 0.1221 |
| | C4 | 0.2973 | 0.2970 | 0.2970 | 0.2971 |
| | C5 | 0.5390 | 0.5396 | 0.5396 | 0.5394 |
| | C6 | 0.1638 | 0.1634 | 0.1634 | 0.1635 |

为更准确地量化各指标对深井爆破致裂干热岩系统综合效应预评价的重要程度,将所有二级、三级指标加权处理,最终得各指标相对权重大小,如图5~图7所示。

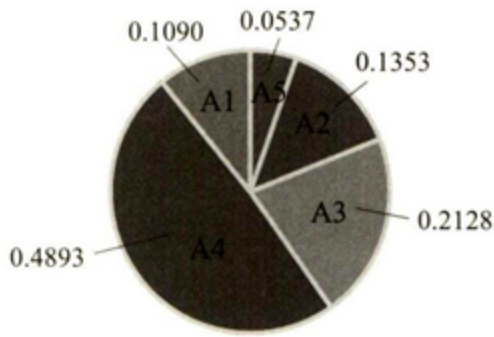


图5 各一级指标权重

Fig. 5 Weight of each level of indicators

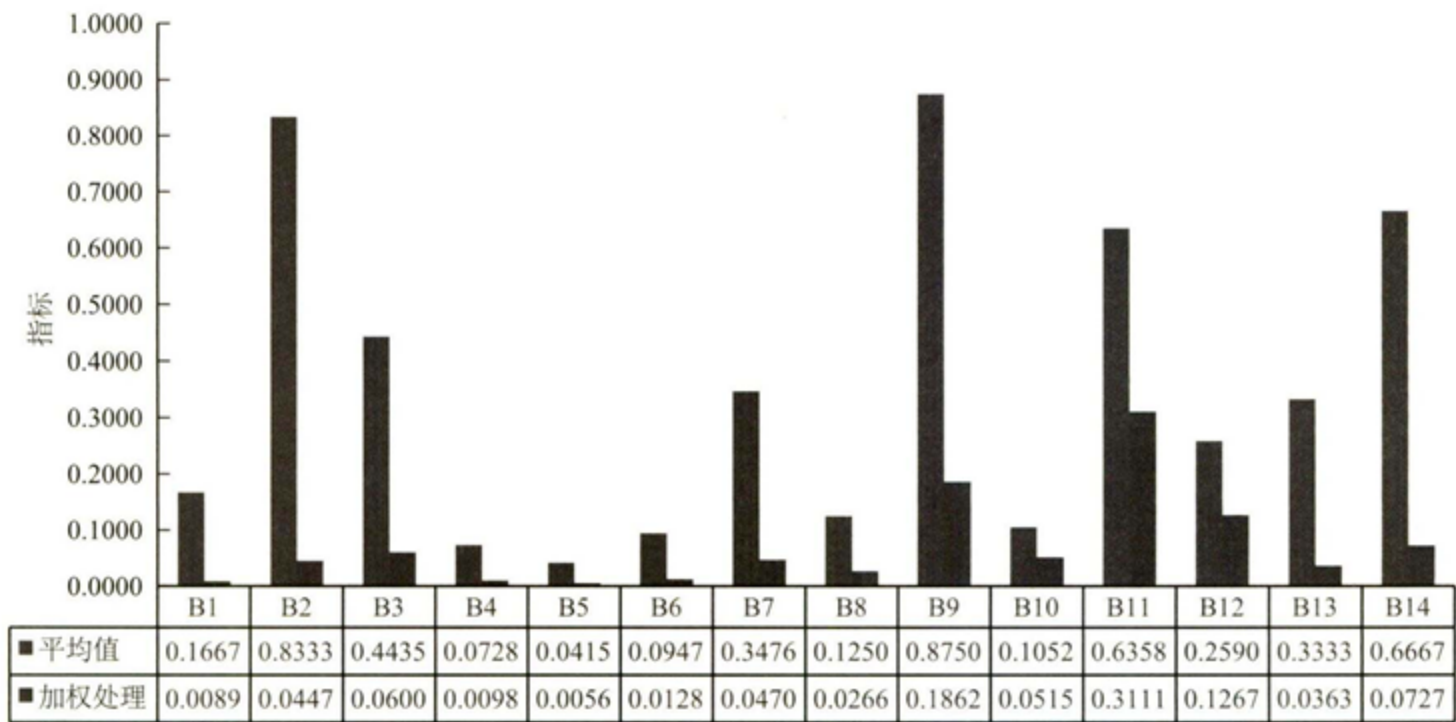


图6 各二级指标权重

Fig. 6 Weight of each secondary indicator

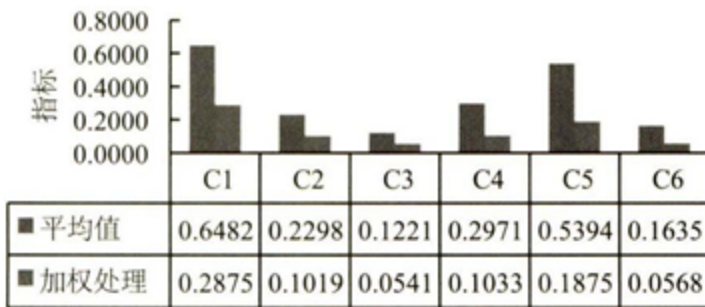


图7 各三级指标权重

Fig. 7 Weight of each three-level indicator

如图7所示,三级指标加权处理结果表明:定压片厚度(C1)、致裂范围(C5)分别对致裂压力和致裂裂缝情况影响较大,但运算结果存在一定争议,主要表现为致裂器致裂压力,其受控于定压片厚度、CO₂充装量以及活化器用量共同影响,具有较大的相关性,文献[13]对致裂器致裂压力影响因素做了较为全面的探究分析,本文运算并未考虑各因素间的相关性,故不再深述。

图5表明:安全效应>环境效应>技术效果>社会效应>经济效应,符合中国重大项目工程倡导的基本原则:满足安全第一的前提下,加强环保意识,最后实现技术可行、社会贡献。另外,对二级指标加权处理后的权重分析:位于前三的指标分别为施工人员安全(B11)、地下系统污染(B9)、储层系统稳定性(B12),详见图6。

由图6可知,基于CO₂致裂器用于深井爆破致裂干热岩系统综合预评价过程中,安全效应占比最大,其次为环境效应,而CO₂致裂器深井爆破作业采用PLC智能远程控制,可及时有效地避免和处理井上和井下不安全状况;同时CO₂爆破生成的CO₂属于非极性惰性气体,高温高压条件下较难与岩石、矿物反应,爆破后滞留在裂缝中的高压气体一定程度上还能抑制岩体裂缝的缓慢闭合^[20]。

为更直观、科学、准确地得到该系统综合效应评价结果,解决评价时“亦此亦彼”的模糊问题,基于AHP量化后的指标权重,采用FCE进行综合评分。

2.2 FCE模型

FCE首先确定待评价对象的影响因素论域和评价等级论域;其次,结合各指标权重以及隶属度向量构建模糊评判矩阵;然后,基于模糊合成运算得到该评价对象的模糊评判向量;最后,根据评分集得到最终的评价分数。

根据上文构建的指标评价体系,选取AHP加权处理后各指标权重值;通过专家问卷模糊统计形式确定各指标模糊评判向量,评判问卷17份。为保证问卷质量,对问卷数据的稳定性和一致性进行SPASS分析验证,信度系数,即克朗巴哈系数 Cronbach's α 的值为0.896。一般来说 α 系数界于0.8~1.0之间,说明问卷的信度相当好;鉴于该系统综合效应影响因素较多,拟采取二级模糊综合评价。

1) 确定影响因素论域 U 。影响因素论域 U 选取 AHP 中构建的各层次指标, $U = \{U_1, U_2, U_3, \dots, U_k\}$ 且 $U = \{U_{11}, U_{12}, \dots, U_{kn}\}$, 且 $U = \bigcup_{i=1}^k U_i$ and $U_i \cap U_j = \emptyset (i \neq j)$, 其中 U_i 为第一级因素集; U_{kn} 为第二级因素集。

2) 确定评价等级论域 V 。拟定 CO₂ 爆破致裂系统综合效应评价体系各指标等级评分标准, 并按优劣程度将其分为 5 个评价等级: $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\}$, 分别表示 {好, 较好, 一般, 差, 较差}, 其各评分等级见表 5。

3) 对第二级因素集 $U = \{U_{11}, U_{12}, \dots, U_{kn}\}$ 进行评判(正向化、归一化后)得到综合评判矩阵; 邀请相关研究领域的专家参与评判, 对第二级因素集 $U = \{U_{11}, U_{12}, \dots, U_{kn}\}$ 按照评价集 $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\}$ 进行评价, 模糊统计法得到第二级因素集隶属度, 见表 6。再将 AHP 确定的各二级指标权重值 W_i 和对应的模糊评判矩阵 $B_i = \{B_{11}, B_{12}, \dots, B_{kn}\}$ 按式(9)进行单因素评判, 得到第二级因素集总的模糊综合评判矩阵 B :

$$B = W_i B_i \quad (9)$$

其中,

$$B = \begin{bmatrix} 0.0686 & 0.0883 & 0.0588 & 0.0980 & 0.2451 \\ 0.2530 & 0.4608 & 0.1680 & 0.0882 & 0.0762 \\ 0.2500 & 0.3162 & 0.1690 & 0.0073 & 0.0514 \\ 0.1951 & 0.6412 & 0.1205 & 0.0248 & 0.0248 \\ 0.2549 & 0.4706 & 0.2353 & 0.0392 & 0.0000 \end{bmatrix}$$

4) 对第一级因素集 $U = \{U_1, U_2, U_3, \dots, U_k\}$ 和所对应的权重子集 $W = \{W_1, W_2, W_3, W_4, W_5\}$ 按式(10)进行模糊评判得该评价对象的模糊评判向量 A :

$$\begin{cases} A = WB \\ A = [0.2144 \quad 0.4994 \quad 0.1465 \quad 0.0352 \quad 0.0465] \end{cases} \quad (10)$$

5) 计算综合评价值。将得出的模糊评判向量 A 和评价集 V 对应的评分值按式(11)计算出最终评价对象的评分结果 P 。运算结果见表 7。

$$P = VA \quad (11)$$

隶属度结果分析: 经济、技术、环境、社会效应中的极大型指标评判结果均落在好—较好范围; 极小型指标 U12 致裂器价格评判结果较差, 相对于水力压裂, CO₂ 爆破致裂需额外爆破作业相关费用, 但实际爆破作业过程中致裂器可重复使用, 故可省去一部分费用; U22 储层岩性适应性、U24 天然结构面适应性较差, 符合深层地热能储层岩石坚硬、致密、低渗透性质; U41 致裂器自爆评判结果一般, 故后期应改进用于干热岩系统的 CO₂ 致裂器防爆性能; 系统整体性能评判结果较好。

表 5 影响因素及评价等级

Table 5 List of influencing factors and evaluation levels

| 指标项 | 100~90好 | 80~90较好 | 70~80一般 | 60~70 | 60以下 | 指标性质 |
|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|------|
| U1 经济效应 | | | | | | |
| U11 致裂器利用率 | 高 | 较高 | 一般 | 低 | 较低 | 极大型 |
| U12 致裂器价格 | 高 | 较高 | 一般 | 低 | 较低 | 极小型 |
| U21 致裂器致裂压力 | 完全满足要求 | 基本满足要求 | 刚好满足要求 | 基本不满足要求 | 完全不满足要求 | 极大型 |
| U2 技术效果 | | | | | | |
| U22 储层岩石力学性能 | 极好 | 较好 | 一般 | 较差 | 极差 | 极小型 |
| U23 致裂器作用方向 | 好 | 较好 | 一般 | 差 | 较差 | 极大型 |
| U24 天然结构面适应性 | 好 | 较好 | 一般 | 差 | 较差 | 极小型 |
| U25 致裂裂缝情况 | 好 | 较好 | 一般 | 差 | 较差 | 极大型 |
| U3 环境效应 | | | | | | |
| U31 二氧化碳减排 | 好 | 较好 | 一般 | 差 | 较差 | 极大型 |
| U32 地下系统污染 | 大 | 较大 | 一般 | 小 | 较小 | 极小型 |
| U4 安全效应 | | | | | | |
| U41 致裂器自爆 | 大 | 较大 | 一般 | 小 | 较小 | 极小型 |
| U42 施工人员安全 | 特安全 | 较安全 | 一般安全 | 不太安全 | 特别不安全 | 极大型 |
| U43 储层系统稳定性 | 特稳定 | 较稳定 | 一般稳定 | 不太稳定 | 特别不稳定 | 极大型 |
| U5 社会效应 | | | | | | |
| U51 社会贡献度 | 高 | 较高 | 一般 | 低 | 较低 | 极大型 |
| U52 政府支持度 | 高 | 较高 | 一般 | 低 | 较低 | 极大型 |

表6 第二级因素集隶属度(正向化后)

Table 6 Degree of membership of second-level factor set (after normalization)

| | 指标项 | 好 | 较好 | 一般 | 差 | 较差 |
|------------|--------------|--------|---------|--------|--------|--------|
| U1 经济效应 | U11 致裂器利用率 | 0.4118 | 0.5294 | 0.0588 | 0.0000 | 0.0000 |
| | U12 致裂器价格 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0588 | 0.1176 | 0.2941 |
| U2 技术效果 | U21 致裂器致裂压力 | 0.1765 | 0.7059 | 0.0588 | 0.0588 | 0.0000 |
| | U22 储层岩性适应性 | 0.4706 | 0.0000 | 0.4117 | 0.4706 | 0.5882 |
| | U23 致裂器作用方向 | 0.2941 | 0.4706 | 0.2353 | 0.0000 | 0.0000 |
| | U24 天然结构面适应性 | 0.0588 | 0.05881 | 0.0000 | 0.2941 | 0.3529 |
| | U25 致裂裂缝情况 | 0.3529 | 0.3529 | 0.2941 | 0.0000 | 0.0000 |
| U3 环境效应 | U31 二氧化碳减排 | 0.3529 | 0.4706 | 0.1176 | 0.0588 | 0.0000 |
| | U32 地下系统污染 | 0.2353 | 0.2941 | 0.1764 | 0.0000 | 0.0588 |
| U4 安全效应 | U41 致裂器自爆 | 0.3530 | 0.2353 | 0.0000 | 0.2353 | 0.2353 |
| | U42 施工人员安全 | 0.1765 | 0.7059 | 0.1176 | 0.0000 | 0.0000 |
| | U43 储层系统稳定性 | 0.1765 | 0.6471 | 0.1765 | 0.0000 | 0.0000 |
| U5 社会效应 | U51 社会贡献度 | 0.4118 | 0.4706 | 0.1176 | 0.0000 | 0.0000 |
| | U52 政府支持度 | 0.1765 | 0.4706 | 0.2941 | 0.0588 | 0.0000 |

表7 系统各维度评分表

Table 7 Scoring table of each dimension of system

| 指标 | 经济 效应 | 技术 效果 | 环境 效应 | 安全 效应 | 社会 效应 | 综合 效应 |
|----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 评分 | 41.08 | 90.96 | 70.57 | 90.08 | 89.41 | 83.36 |

综上,本文利用 Matlab 对深井 CO₂爆破致裂干热岩系统综合效应预评价,选取 AHP-FCE 结合的数学建模方法,最终计算该系统综合得分:83.36,系统综合效应预评价结果为:较好;可考虑将二氧化碳爆破致裂器用于干热岩开采。其中经济效应最不理想,其次为环境效应,技术效果、安全效应以及社会效应都较理想;预评价结果可作为深井 CO₂爆破致裂干热岩系统建设过程中的数据支撑,可为我国地热开采工程提供一定的理论依据。

3 结论

基于 AHP-FCE 的多因素、多层次综合评价方法,选定经济效应、技术效果、环境效应、安全效应和社会效应 5 个维度,AHP 运算结果:安全效应>环境效应>技术效果>社会效应>经济效应;FCE 对 CO₂致裂器用于 EGS 地热储层爆破致裂综合效应进行预评价,最终计算该系统综合得分为 83.36,系统综合效应预评价结果为较好,可考虑将 CO₂爆破致裂器用于干热岩开采。

[参考文献]

[1] 陈继良,蒋方明.增强型地热系统热开采性能的数值模

拟分析[J].可再生能源,2013,31(12):111-117,121.

CHEN J L, JIANG F M. Numerical simulation analysis of thermal exploitation performance of enhanced geothermal system[J]. Renewable energy, 2013, 31(12): 111-117, 121.

[2] TESTER J W, ANDERSON B J, BATCHELOR A S, et al. The future of geothermal energy [M]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2006.

[3] BERTANI R. Geothermal power generation in the world 2005-2010 update report [J]. Geothermics, 2012, 41: 1-29.

[4] 许天福,张彦军,曾昭发,等.增强型地热系统(干热岩)开发技术进展[J].科技导报,2012,30(32):42-45.
XU T F, ZHANG Y J, ZENG Z F, et al. Technology progress in an enhanced geothermal system (hot dry rock) [J]. Science & technology review, 2012, 30(32): 42-45.

[5] 王帅.干热岩储层化学激发机理及其物理力学演变规律研究[D].太原:太原理工大学,2019.
WANG S. Study on chemical excitation mechanism and physical and mechanical evolution rule of dry hot rock reservoirs [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019.

[6] 罗天雨,刘全稳,刘元爽.干热岩压裂开发技术现状及展望[J].中外能源,2017,22(10):23-27.

LUO T Y, LIU Q W, LIU Y S. Present situation and on

- hydraulic fracturing development technique of hot dry rock [J]. *China and foreign energy*, 2017, 22(10): 23-27.
- [7] WEI N, Li X C, Fang Z M, et al. Regional resource distribution of onshore carbon geological utilization in China[J]. *Journal of CO₂ utilization*, 2015, 11: 20-30.
- [8] 宋阳, 吴晓敏, 胡珊, 等. 二氧化碳在干热岩中换热及固化的数值模拟[J]. *工程热物理学报*, 2013, 34(10): 1902-1905.
- SONG Y, WU X M, HU S, et al. Numerical simulation of heat transfer and sequestration of CO₂ in hot-dry-rock [J]. *Journal of engineering thermophysics*, 2013, 34 (10) : 1902-1905.
- [9] WANG C L, CHENG W L, NIAN Y L, et al. Simulation of heat extraction from CO₂-based enhanced geothermal systems considering CO₂ sequestration [J]. *Energy*, 2018, 142: 157-167.
- [10] LUO F, XU R N, JIANG P X. Numerical investigation of fluid flow and heat transfer in a doublet enhanced geothermal system with CO₂ as the working fluid (CO₂-EGS)[J]. *Energy*, 2014, 64: 307-322.
- [11] PRUESS K. Enhanced geothermal systems (EGS) using CO₂ as working fluid- A novel approach for generating renewable energy with simultaneous sequestration of carbon [J]. *Geothermics*, 2006, 35(4) : 351-367.
- [12] ZHANG L, LUO F, XU R N, et al. Heat transfer and fluid transport of supercritical CO₂ in enhanced geothermal system with local thermal non- equilibrium model [J]. *Energy procedia*, 2014, 63: 7644-7650.
- [13] 徐超, 窦斌, 田红, 等. 二氧化碳爆破致裂建造增强型地热系统热储层工艺探讨[J]. *地质科技情报*, 2019, 38 (5): 247-252.
- XU C, DOU B, TIAN H, et al. Process of carbon dioxide blasting to build EGS thermal reservoir [J]. *Geological science and technology information*, 2019, 38(5) : 247-252.
- [14] 周磊. 台阶爆破效果评价及爆破参数优化研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- ZHOU L. Effect evaluation of step blasting and study on blasting parameter optimization [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [15] ZHANG J H. Combination evaluation method of Analytic Hierarchy Process and Fuzzy Comprehensive Evaluation based on yaahp[EB/OL]. Available: March 25, 2015.
- [16] 赵伏军, 谢世勇, 杨磊, 等. 基于层次分析法—模糊综合评价(AHP-FCE)模型优化矿井通风系统的研究[J]. *中国安全科学学报*, 2006, 16(4): 91-96.
- ZHAO F J, XIE S Y, YANG L, et al. Study on optimization of mine ventilation system based onAHP-FCE model [J]. *Chinese journal of safety sciences*, 2006, 16 (4): 91-96.
- [17] SAATY T L. The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation [M]. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [18] BROWN D W, DUCHANE D V, HEIKEN G, et al. Mining the earth's heat: Hot dry rock geothermal energy [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2012.
- [19] 周文骏, 谭凯旋, 寇子顺, 等. 基于AHP-Fuzzy法的井下采场深孔爆破落矿效果综合评价[J]. *铀矿冶*, 2016, 35 (3): 170-174.
- ZHOU W J, TAN K X, KOU Z S, et al. Comprehensive evaluation of ore break down in underground stope by deep-hole blasting effect based on AHP-fuzzy method [J]. *Uranium mining and metallurgy*, 2016, 35(3): 170-174.
- [20] 褚林配. 地热供能系统综合效益指标评价体系研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2015.
- CHU L P. Study on evaluation system of comprehensive benefit index of geothermal energy supply system [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015.
- [21] 刘骏锋. 基于实测数据的综合能源系统综合评价[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- LIU J F. Comprehensive evaluation of integrated energy system based on measured data [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.

PRE-EVALUATION OF COMPREHENSIVE EFFECT OF DEEP WELL CO₂ BLASTING AND FRACTURING HOT DRY ROCK SYSTEM

Xia Jieqin¹, Dou Bin¹, Gu Juntao², Muhammad Kashif³, Cui Guodong^{1,2}, Chen Jin^{1,4}

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430073, China;

2. The First Geology Brigade, Hebei Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Handan 056001, China;

3. Department of Earth Sciences, University of Sargodha, Sargodha 40100, Pakistan;

4. Engineering Research Center of Rock-Soil Drilling & Excavation and Protection, Wuhan 430074, China)

Abstract: The process of CO₂ blasting-cracking provides a new scheme for the construction of commercial EGS reservoir, which is expected to make a breakthrough in the deep geothermal energy development. However, the comprehensive performance of the system for cracking hot dry rock by CO₂ blasting technology in deep well (SCBH) has not been studied yet. Based on this research deficiency, its comprehensive performance was quantitatively and scientifically evaluated by mathematical modelling to solve the uncertainty and ambiguity of the effect of this technology and fill the gap in the comprehensive evaluation system of deep well geothermal system. Considering that the SCBH is a nonlinear system with variations, fuzzy and complex. In this paper, AHP-FCE optimization mathematical model was selected, AHP stratifies the complex problem of the SCBH and constructs a hierarchical structure. The qualitative judgment of experts was quantified through Matlab, and the weight of evaluation indexes of each layer in FCE was determined. Then based on the FCE fuzzy relation synthesis principle, the comprehensive score of the SCBH under the influence of multiple factors is 83.36. The pre-evaluation result is better. Therefore, CO₂ blasting crackers may be considered for hot dry rock mining. The evaluation results can be used as data support for the technology of CO₂ blasting-cracking to construct the hot dry rock reservoir, and provide theoretical basis for geothermal mining projects.

Keywords: geothermal energy; CO₂ blasting; hot dry rock systems; mathematical model; evaluation