

基于 DEMATEL/ISM 的“三高”油气井井喷事故致因模型研究*

吴德松

(中国石化青岛安全工程研究院, 山东青岛 266071)

摘要: 针对“三高”油气井井喷事故危害的严重性, 基于集成的 DEMATEL/ISM 算法建立“三高”油气井井喷事故致因模型。通过提取事故一般性致因因素, 利用专家知识确定因素间的关联矩阵, 基于集成的 DEMATEL/ISM 算法, 采用定性与定量相结合的方法对致因因素进行结构化处理, 并运用到实际案例中, 确立了影响川东地区高含硫油气田井喷事故的关键致因因素, 形成具有层级关系的事故致因网络。结果表明, 钻井现场施工过程中需要加强对节流压井管汇失效、井筒完整性失效等直接致因以及信息传递不畅、人员技能不足等过渡致因的控制, 同时加强井队的安全文化教育, 提高工人的安全意识, 改善地质勘探技术, 提高对井下地质环境的认识, 是预防井喷事故的长久之计。

关键词: “三高”油气井; 井喷事故; 致因因素; DEMATEL/ISM; 致因网络

DOI: 10.3969/j.issn.1672-7932.2020.03.002

0 前言

我国高含硫油气资源大多处于地质条件较为复杂的环境中, 普遍具有埋藏深、高温、高压、地层信息难以预知的特点, 在钻井期间面临“喷、漏、塌、卡、断、毒”等诸多风险事故^[1-3]。井喷是“三高”油气井钻井过程中最为严重的钻井事故, 往往伴随着 H₂S 等有毒气体的泄漏, 极易造成人员伤亡和巨大的经济环境损失。近些年来, 我国高含硫油气资源勘探开发过程中相继发生了几起重大井喷失控、硫化氢中毒事故, 给社会造成了严重的

不良影响, 这直接反映出施工过程中安全监管不足和井控措施不到位。

在“三高”油气井复杂的地质环境中, 钻井井下工具和密封套管容易受到高压挤毁和酸性流体腐蚀, 针对该问题王春江^[4]、郑有成^[5]和邹灵战^[6]等人分别对井身结构设计和套管选材进行了深入研究, 同时管志川^[7]对压力不确定条件下的套管层次及下深确定方法进行了探讨。针对高温高压井安全钻井液密度窗口窄, 易发生喷漏同存, 蔚宝华^[8]和艾池^[9]等人建立了考虑温差和空隙压力的安全钻井液密度窗口计算模型。溢流是井喷的先兆, 实时准确的监测溢流可以有效防止井喷的发生, 为此戴永寿^[10]建立了“三高”油气井早期溢流监测系统。在井控应急预案方面, 为有效降低事故损失, 金业权^[11]和吴庆善^[12]、杜高举^[13]等人分别对事故诱因和区域安全规划进行了深入分析。

然而, 针对“三高”油气井井喷事故的研究主要围绕钻前设计、过程监测和风险控制而展开, 对钻井过程系统性的宏观安全研究不足, 缺乏对风险致因因素的分析。本文以决策实验与评价实验室(DEMATEL, Decision Making Trial and Evalua-

收稿日期: 2019-12-28

作者简介: 吴德松, 工程师, 2015年毕业于中国石油大学(华东)油气井工程专业, 现主要研究方向为油气井工程安全技术、油气井作业安全信息化。

* **基金项目:** 国家重点研发计划(2018YFC0809300); 中国石化科技部项目(317019-2)。

tion Laboratory) 算法^[14-15] 和解释结构模型 (ISM, Interpretive Structural Modeling) 算法为基础, 综合利用专家经验知识, 提取事故致因因素, 利用定性定量相结合的手段分析因素间的关联性, 同时对致因因素进行层次划分, 建立事故致因模型, 为“三高”油气井井喷事故的预防与控制提供决策依据。

1 “三高”油气井井喷事故致因因素提取

事故统计发现, 钻井阶段是“三高”油气井全生命周期中事故最为多发的环节, 同时高含硫油气藏易引起钻井工具发生氢脆, 导致套管和防喷

器组失效, 最终造成井喷事故的发生和大量硫化氢的泄漏, 导致人员被迫撤离。因此, 井喷风险是“三高”油气井开采过程中必须严加控制的重大风险, 也是“三高”井与常规井在风险识别、管控中最为不同的环节。从整体来看, 整个钻井过程是一个“人-机-环-管”相互依存、相互制约的动态复杂系统, 为了从多个角度反映影响井喷事故发生的实际情况, 将“三高”油气井井喷事故致因因素分为人因失误、设备缺陷、环境缺陷和管理缺陷 4 个一级致因类。通过细分, 可得到图 1 所示的井喷事故一般性致因因素。

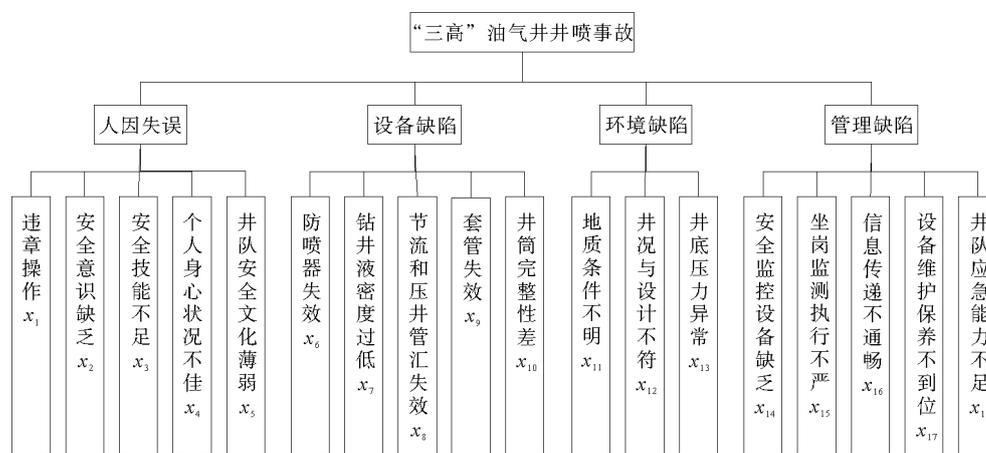


图 1 “三高”油气井井喷事故致因因素

2 致因模型构建

井喷事故致因模型研究的目的是根据专家经验分析并确定影响井喷事故的关键因素, 尔后确定各因素间的关系。因此, 引入集成 DEMATEL/ISM 方法对“三高”油气井井喷事故致因因素进行层次划分, 识别关键影响因素并建立致因网络图。

DEMATEL 算法是一种运用图论和矩阵论原理进行因素分析的方法, 它可以改进对相互关联的问题群和复杂簇的理解, 不同于层次分析法, 该方法不需要因素间独立, 并且关注的不仅是因素间的两两直接影响关系还考虑了所有因素间的间接影响关系, 最终通过因果关系图得出各因素的重要性排序。DEMATEL 算法自提出即被国内外学者广泛应用, 并且与其他研究方法相结合, 增强了其研究的科学性。例如, Yang Jian Liang 等^[15] 人将 DEMATEL 算法与 ANP 算法相结合提出了一

种集群加权的多元标准决策技术, 强化了重要度评估过程的合理性。针对影响因素评价过程中存在的模糊性以及专家经验水平存在的差异性, Bhatia Manjot Singh^[16] 与 Wu Wei-Wen^[17] 等人将灰数、模糊数引入 DEMATEL 算法, 崔强等^[18] 人采用 BP 神经网络代替专家打分求解各因素间的直接关联矩阵。基于传统 DEMATEL 算法, 本文引入 ISM 算法^[19] 通过分析影响井喷事故的关键致因以及各因素间的内在联系, 为建立系统化防控策略提供基础, 其基本步骤如图 2 所示。

步骤 1: 基于因素间的影响关系设定相应的标准, 依托专家经验构建因素间的直接关联矩阵 B :

$$B = (b_{ij})_{n \times n} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

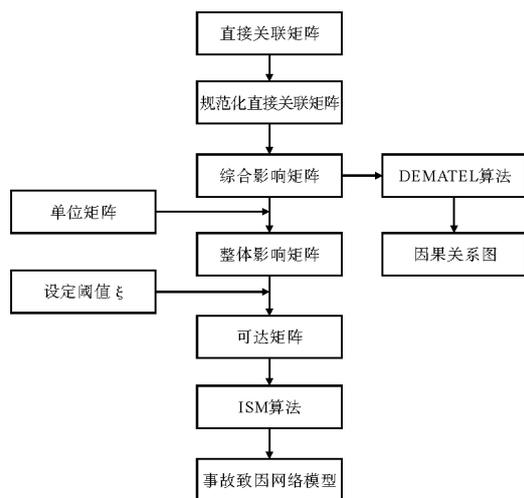


图 2 集成 DEMATEL/ISM 方法

式中: n ——因素个数;

b_{ij} ——因素 x_i 相对于因素 x_j 的直接影响程度,其中 $b_{ii}=0$ 。

步骤 2: 规范化直接关联矩阵 C :

$$C = (c_{ij})_{n \times n} = \frac{1}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n b_{ij}} \cdot B \quad (2)$$

步骤 3: 为了消除因素变化所引起的波及效应,需要考虑因素间的间接影响。通过计算综合影响矩阵 T 对因素间的直接影响和间接影响关系进行综合累加,以确定每一个因素相对于系统中最高水平因素的最后影响。

$$T = (t_{ij})_{n \times n} = C + C^2 + \dots + C^n = C(I - C)^{-1} \quad (3)$$

式中: I ——单位矩阵;

$(I - C)^{-1}$ —— $I - C$ 的逆。

步骤 4: 分别对综合影响矩阵 T 中的元素按行和按列相加得到相应因素的影响度 D_i 和被影响度 R_i ,其中影响度 D_i 表示因素 x_i 对其他所有因素的综合影响,被影响度 R_i 表示因素 x_i 受其他所有因素的综合影响。

$$D_i = \sum_{j=1}^n t_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$R_i = \sum_{j=1}^n t_{ji} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

步骤 5: 绘制因果关系图,其中横坐标为 $D_i + R_i$,纵坐标为 $D_i - R_i$ 。 $D_i + R_i$ 为因素的中心度,表示因素 x_i 在所有因素中的重要程度,其值越大表示重要性越高; $D_i - R_i$ 为因素的原因度,表示因素 x_i 与其他所有因素的因果逻辑关联程度,若为正,表

明该因素对其他因素的影响大,称为原因因素,若为负,则表明该因素受其他因素的影响大,称为结果因素。

步骤 6: 考虑致因因素对自身的影响,计算整体影响矩阵 H 。

$$H = I + T \quad (6)$$

步骤 7: DEMATEL 算法的整体影响矩阵 H 与 ISM 算法的可达矩阵 K 存在单映射关系^[22],为了划分致因因素的层次结构并识别因素间复杂的关联关系,依据整体影响矩阵 H 通过设定阈值 ξ 建立可达矩阵 K 。

$$K_{ij} = \begin{cases} 0 & h_{ij} \geq \xi \\ 1 & h_{ij} < \xi \end{cases} \quad (7)$$

步骤 8: 确定各因素的可达集合以及前项集合,如致因因素 x_i 的可达集合 M_i 与前项集合 N_i 的计算公式为:

$$M_i = \{x_j | x_j \in X, k_{ij} \neq 0\} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (8)$$

$$N_i = \{x_j | x_j \in X, k_{ji} \neq 0\} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (9)$$

式中: X ——致因因素集合。

步骤 9: 验证公式 $M_i = M_i \cap N_i$ ($i = 1, \dots, n$) 是否成立,若成立则说明因素 x_i 为顶层因素,并在矩阵 K 中划除第 i 行和第 i 列。

步骤 10: 重复步骤 8 和步骤 9,直到所有因素均被划除。

步骤 11: 按照因素被划去的顺序,建立致因因素层次结构,并将可达矩阵 K 中各因素所在行对应列为 1 的视为该因素出度方向,因素所在列对应行为 1 的视为该因素的入度方向,建立井喷事故致因网络模型。

3 实例分析

近几年在川东地区三叠系先后发现的渡口河、罗家寨、普光等大、中型油气藏均为高温、高压和高含硫化氢的油气田,硫化氢含量多在 10% 以上,硫化氢的剧毒和强腐蚀性、异常高的气藏压力以及复杂的地质环境,使得该类油气田的勘探开发较常规油气田具有更高的风险。为了获得“三高”油气井井喷事故致因模型,提取了如图 1 所示的 18 个致因因素,邀请某石油公司安全环保处处长、安全科长、井控中心主任以及钻井队长 4 位专家根据强、较强、一般、弱、无 5 个等级分别赋值 4, 3, 2, 1, 0 来对致因因素间的相互影响关系进行

评判,得到 4 个初始直接关联矩阵。4 位专家既有管理人员,也有专业操作人员,因此可以从不同的角度对井喷事故做出客观评价。通过对 4 个初始直接关联矩阵取平均并进行步骤 2、3 规范化和消除波及效应处理得到如表 1 所示的综合影响矩阵。

在综合影响矩阵的基础上,通过步骤 4 和步

骤 5 求得如表 2 所示的井喷事故致因因素 DEMATEL 算法计算结果。表 2 中中心度较大的 6 个关键因素为井队安全文化薄弱(x_5)、安全意识缺乏(x_2)、违章操作(x_1)、信息传递不畅通(x_{16})、安全技能不足(x_3)和井队应急能力不足(x_{18})。这些因素是影响“三高”油气井井喷事故发生的关键因素,也是现场施工关注的重点。

表 1 综合影响矩阵

T	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}
x_1	0.037	0.067	0.061	0.043	0.116	0.115	0.092	0.125	0.093	0.096	0.025	0.033	0.031	0.047	0.112	0.087	0.105	0.127
x_2	0.132	0.054	0.121	0.051	0.145	0.123	0.087	0.114	0.099	0.102	0.041	0.071	0.040	0.096	0.130	0.132	0.131	0.151
x_3	0.093	0.091	0.029	0.039	0.083	0.101	0.057	0.113	0.083	0.086	0.036	0.064	0.069	0.045	0.073	0.076	0.056	0.123
x_4	0.102	0.100	0.056	0.025	0.132	0.085	0.031	0.046	0.036	0.038	0.012	0.018	0.019	0.051	0.100	0.102	0.102	0.115
x_5	0.137	0.134	0.123	0.109	0.074	0.126	0.089	0.117	0.101	0.104	0.041	0.054	0.077	0.107	0.126	0.128	0.126	0.147
x_6	0	0	0	0	0	0.003	0.023	0.047	0.026	0.045	0.002	0.003	0.006	0	0	0	0	0
x_7	0	0	0	0	0	0.046	0.012	0.080	0.076	0.060	0.027	0.032	0.075	0	0	0	0	0
x_8	0	0	0	0	0	0.021	0	0.001	0.001	0.001	0	0	0	0	0	0	0	0
x_9	0	0	0	0	0	0.007	0.016	0.060	0.019	0.098	0.028	0.071	0.078	0	0	0	0	0
x_{10}	0	0	0	0	0	0.026	0.051	0.059	0.076	0.019	0.027	0.032	0.075	0	0	0	0	0
x_{11}	0	0	0	0	0	0.033	0.090	0.101	0.098	0.100	0.012	0.097	0.088	0	0	0	0	0
x_{12}	0	0	0	0	0	0.051	0.089	0.100	0.096	0.098	0.050	0.018	0.105	0	0	0	0	0
x_{13}	0	0	0	0	0	0.009	0.073	0.091	0.079	0.089	0.028	0.053	0.021	0	0	0	0	0
x_{14}	0.113	0.102	0.058	0.045	0.117	0.068	0.054	0.071	0.060	0.062	0.014	0.021	0.023	0.033	0.122	0.124	0.104	0.138
x_{15}	0.042	0.041	0.038	0.033	0.083	0.022	0.016	0.063	0.038	0.039	0.007	0.011	0.013	0.036	0.021	0.042	0.021	0.047
x_{16}	0.076	0.092	0.069	0.021	0.102	0.080	0.072	0.069	0.060	0.061	0.034	0.042	0.046	0.066	0.074	0.038	0.056	0.124
x_{17}	0.043	0.061	0.040	0.035	0.085	0.108	0.040	0.092	0.065	0.068	0.009	0.015	0.018	0.017	0.021	0.024	0.024	0.087
x_{18}	0.063	0.063	0.056	0.048	0.098	0.035	0.023	0.032	0.026	0.027	0.009	0.013	0.015	0.062	0.031	0.091	0.091	0.044

基于表 2 数据绘制如图 3 所示的致因因素因果关系图。由表 2 和图 3 可知,处于图中上部分的属于原因因素,下部分的属于结果因素。原因因素为 $x_1 \sim x_5, x_9, x_{11}, x_{14}, x_{16}, x_{17}$,其余 8 项则为结果因素。说明这 8 个结果因素是 10 个原因因素的影响结果,所以对“三高”油气井井喷事故进行有效防控,要从这 10 个原因因素入手。另外,表 2 中心度最大的原因因素为 x_5 ,该因素对井喷事故的发

生影响最大,对其他影响因素的驱动力最强,是“三高”油气井井喷事故的本质根源。

为了识别各因素间的关联关系并对其进行层级划分,依据步骤 6 建立致因因素整体影响矩阵,考虑到影响因素度数取值范围和分析便利性,取 $\xi = 0.095$ 建立可达矩阵,基于可达矩阵通过步骤 8 ~ 步骤 11 绘制如图 4 所示的“三高”油气井井喷事故致因网络图。

表2 DEMATEL 算法计算结果

致因因素	影响度	被影响度	中心度	原因度	中心度排序	因素属性
x_1	1.411	0.837	2.248	0.574	3	原因因素
x_2	1.820	0.804	2.624	1.016	2	原因因素
x_3	1.318	0.651	1.969	0.667	5	原因因素
x_4	1.170	0.449	1.619	0.721	9	原因因素
x_5	1.920	1.034	2.954	0.886	1	原因因素
x_6	0.156	1.060	1.216	-0.904	17	结果因素
x_7	0.408	0.916	1.324	-0.508	14	结果因素
x_8	0.024	1.382	1.406	-1.358	13	结果因素
x_9	0.377	1.132	1.509	-0.755	11	原因因素
x_{10}	0.365	1.193	1.558	-0.828	10	结果因素
x_{11}	0.619	0.404	1.023	0.215	18	原因因素
x_{12}	0.607	0.648	1.255	-0.041	15	结果因素
x_{13}	0.444	0.799	1.243	-0.355	16	结果因素
x_{14}	1.330	0.560	1.890	0.770	7	原因因素
x_{15}	0.610	0.809	1.419	-0.199	12	结果因素
x_{16}	1.181	0.844	2.025	0.337	4	原因因素
x_{17}	0.853	0.816	1.669	0.037	8	原因因素
x_{18}	0.827	1.103	1.930	-0.276	6	结果因素

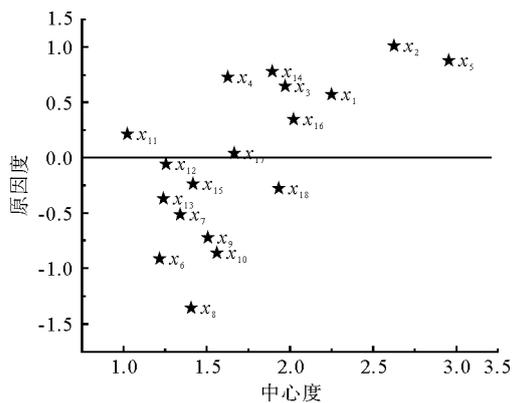


图3 致因因素因果关系

从图4可知,川东地区“三高”油气田钻井施工井队安全文化薄弱与安全意识缺乏是大多数井喷事故的根源,处于致因网络的底部层级(层级1-2)即本质致因。而违章操作、安全监控设备缺乏、安全技能不足、信息传递不畅通、设备维护保养不到位等中间层级因素是关联本质致因和直接致因

的过渡致因(层级3-6),其中影响最为突出的是安全设备监控缺乏、设备维护保养不到位以及信息传递不畅通,分析认为,这是由于三高井多处于山区,环境、气候较为复杂,致使现场监控、设备维保等难度显著增大。直接致因处于致因网络的顶部层级(层级7-8),是引起井喷事故发生的直接导火索,其中影响最为突出的是节流压井管汇失效、井筒完整性失效,分析认为,这是由于三高油气井地质条件较为复杂,存在“高-低-高”的压力梯度分布情况,对于井筒完整性影响明显,同时井筒内流体压力较高,高压流体对于节流压井管汇冲蚀十分明显,常常造成管汇刺漏,进而引发事故。因此,对于施工现场而言,短期内需要加强对节流压井管汇失效、井筒完整性失效等直接致因以及信息传递不畅、人员技能不足等过渡致因的防范控制,而要从根本上预防井喷事故,需要从培养井队安全文化、提高安全意识等方面入手。

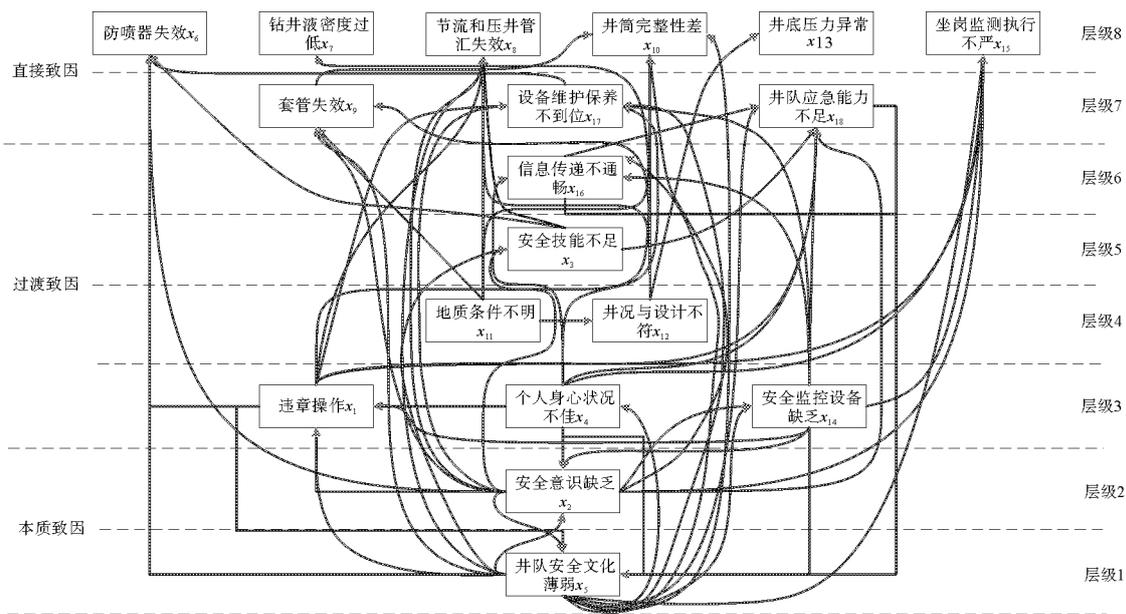


图4 “三高”油气井井喷事故致因网络

通过建立井喷事故致因网络,可以识别各致因因素间存在的关联关系,这种关系既可能出现在同一层级内,也可能跨越层级。由图4可知,井队安全文化薄弱与绝大多数因素存在直接或间接的关联关系;而处于层级4的节点 x_{11} 无入度方向,即地质条件不明不受其他致因因素的影响,这是因为地质条件不明属于技术缺陷并不受人的主观左右。

4 结论

a) 根据“三高”油气井井喷事故致因因素间的影响关系,可将其分为原因因素和结果因素。加强对中心度较大的原因因素的控制,能够从源头上防范事故的发生。

b) 致因因素间有着递进的层级结构和复杂的关联关系,底部层级因素是事故发生的本质致因,顶部层级是直接致因,中间部分层级是关联本质致因和直接致因的过渡致因。在现场施工过程中短期内需要加强对直接致因、过渡致因的防范控制,而要从根本上预防井喷事故的发生,对本质致因的约束控制才是长远之计。

c) 采用所建立的模型对川东地区“三高”油气田进行实例分析,发现加强井队的安全文化教育,提高工人的安全意识,同时改善地质勘探技术,提高对井下地质环境的认识,可以有效预防井喷事故的发生。

5 参考文献

- [1] 陈曦.高含硫气田井身结构可靠性及安全评价技术研究[D].北京:中国石油大学,2009.
- [2] 李文飞,周延军,陈明,等.四川地区高含硫化氢气田钻完井风险因素分析[J].安全、健康和环境,2009,9(08):5-9.
- [3] 郭建华.高温高压高含硫气井井筒完整性评价技术研究与应用[D].成都:西南石油大学,2013.
- [4] 王春江,杨玉坤,翟建明,普光“三高”气田安全钻井技术[J].石油钻探技术,2011,39(01):12-17.
- [5] 郑有成,钱浩东,常洪渠.关于采用非常规套管程序改进四川深井井身结构设计的探讨[J].钻采工艺,2008(01):7-11.
- [6] 邹灵战,葛云华,张军,等.龙岗地区复杂压力层系下非常规井身结构设计与应用[J].石油学报,2012,33(S2):189-196.
- [7] 管志川,柯珂,路保平.压力不确定条件下套管层次及下深确定方法[J].中国石油大学学报(自然科学版),2009,33(04):71-75.
- [8] 蔚宝华,王炳印,曲从锋,等.高温高压储层安全钻井液密度窗口确定技术[J].石油钻采工艺,2005(03):31-34.
- [9] 李玉伟,艾池,王志成,等.深井安全钻井液密度窗口影响因素[J].油气地质与采收率,2013,20(01):107-110.
- [10] 戴永寿,岳炜杰,孙伟峰,等.“三高”油气井早期溢流在线监测与预警系统[J].中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(03):188-194.

- [11] 金业权, 刘刚, 纪永强. 三高气井井控风险分析及控制措施研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2013, 9(02): 75-78.
- [12] 吴庆善, 钱新明, 郭再富. 含硫气井井喷事故受体致死概率分析[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(05): 641-645.
- [13] 杜高举. 基于层次分析法的钻井井塌卡钻事故分析研究[J]. 安全、健康和环境, 2011(01): 11-14.
- [14] 汪送. 复杂系统安全事故致因网络建模分析[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(02): 109-116.
- [15] Yang J L, Teng G H. An integrated MCDM technique combined with DEMATEL for a novel cluster-weighted with ANP method [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(3): 1417-1424.
- [16] Bhatia M S, Srivastava R K. Analysis of external barriers to remanufacturing using grey-DEMATEL approach: An Indian perspective [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 136: 79-87.
- [17] Wu W W, Lee Y T. Developing global managers' competencies using the fuzzy DEMATEL method [J]. Expert Systems with Applications, 2007, 32(2): 499-507.
- [18] 崔强, 武春友, 匡海波. BP-DEMATEL 在空港竞争力影响因素识别中的应用 [J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(06): 1471-1478.
- [19] 周德群, 章玲. 集成 DEMATEL/ISM 的复杂系统层次划分研究 [J]. 管理科学学报, 2008, 11(02): 20-26.

*Research on Causative Model of
“Three High” Oil and Gas Well
Blowout Accident Based on DEMATEL/ISM*

Wu Desong

(SINOPEC Qingdao Research Institute of Safety En-

gineering, Shandong, Qingdao, 266071)

Abstract: According to the severity of blowout accidents in “three high” oil and gas wells, a causative model of blowout accident in “three high” oil and gas wells based on the integrated DEMATEL/ISM algorithm was established. Firstly, the general causative factors of accidents were extracted based on accident statistics. Secondly, expert knowledge was used to determine the correlation matrix between factors. Finally, based on the integrated DEMATEL/ISM algorithm, the causative factors was structured by combining qualitative and quantitative methods. When this model was applied to actual cases, the key causative factors affecting blowout accidents in high sulfur oil and gas fields in eastern Sichuan were determined, forming a hierarchical accident causative network. The results show that the control of direct causes such as choke and kill manifolds failure, wellbore integrity failure and transitional causes such as poor information transmission and insufficient personnel skills during the drilling site construction process. However, only by strengthening the safety culture education of the drilling crew, improving the safety awareness of the workers, improving geological exploration technology and enhancing the understanding of the underground geological environment can the long-term solution to prevent blowout accidents be achieved.

Key words: “three-high” oil and gas wells; blowout accident; causative factors; DEMATEL/ISM; accident causative network