

基于 FTA 和 ISM 的氯化反应失控火灾爆炸 危险性分析*

李晨阳 王静虹 尹浪

(南京工业大学安全科学与工程学院 南京 210009)

摘要 为加强甲烷热氯化工艺过程的安全管理,对氯化反应过程进行危险性分析。本研究介绍了氯甲烷的危害特性以及反应釜失控造成火灾爆炸的危险性,借助事故树分析法中结构重要度的排序获取基本原因事件,在此基础上运用解释结构模型(ISM)对氯化反应过程进行火灾爆炸危险性分析,根据所得基本原因事件的层级划分可得到造成事故发生的直接、间接以及根本原因,最终由ISM分析结果提出针对甲烷热氯化工艺火灾爆炸事故的安全对策措施。

关键词 氯化过程 火灾爆炸 事故树 解释结构模型 安全对策

Risk Analysis of Fire and Explosion Accident of Chlorination Reaction Runaway Based on FTA and ISM

LI Chenyang WANG Jinghong YIN Lang

(College of Safety Science and Engineering, Nanjing Tech University Nanjing 210009)

Abstract To strengthen the safety management of methane heat chlorination process, risk analysis is regularly carried out on the chlorination process for the majority of chlor-alkali enterprises. Firstly, this study introduces the harm of methyl chloride features as well as the danger of fire and explosion caused by a uncontrolled reaction kettle and the basic reason events of fire and explosion risk of the chlorination process are obtained by fault tree analysis. Then on this basis, the explanation structure model (ISM) is applied to dissect fire and explosion risk of the chlorination process and the direct, indirect and basic reasons brought about can be got according to the level division of the basic reason events. Finally the corresponding safety measures for thermal chlorination process of the fire and explosion accident are put forward based on ISM analysis results.

Key Words chlorination process fire and explosion fault tree interpretative structural modeling safety precautions

0 引言

世界上第一座甲烷热氯化物工业生产装置是由西德赫希斯特公司于1923年建成的,之后美国和日本也相继建有热氯化装置。而我国热氯化工艺的发展相对较晚,直到60年代末我国第一座氯化反应装置才投入运转^[1]。

近年来,随着化工行业的飞速发展,甲烷氯化物不仅可用来生产硅油、硅橡胶、硅树脂等多种有机硅产品,而且还是军用与民用新型材料不可缺少的原料之一。由于甲烷热氯化工艺存在诸多潜在危险因素,加上与日俱增的需求量,导致氯化反应失控,火灾爆炸事故频频发生。事故频发、后果惨重使得我们必须重视甲烷热氯化工艺过程的危险性。目前,

关于化工工艺过程危险性分析的方法和模型主要有事故树(FTA)、保护层分析(LOPA)、层次分析法(AHP)、预先危险性分析(PHA)、危险与可操作性分析(HAZOP)等^[2-7]。虽然研究有着丰富的成果,但是仍有不足之处。多数方法只是孤立地分析危险因素,未从系统、动态的角度寻找因素间相互制约、影响的关系,且针对众多危险因素的层级划分,往往是根据实际生产过程中的经验知识进行判断,存在一定程度的主观臆断,没有理论支撑。而用于分析变量众多、关系复杂对象的解释结构模型可以很好地解决这些问题。ISM是由美国Warfield^[8]于1973年提出的,此方法广泛应用于电力、航空、建筑、轨道交通、油气开发等领域^[9-13],可以把模糊不清

* 基金项目:国家自然科学基金(21406115),江苏省自然科学基金(BK20140950),中国博士后科学基金(2014M551580)。

的思想转化为清晰直观的结构关系模型。因此本文基于现有研究,从氯化反应失控火灾爆炸事故着手,将事故树与解释结构模型相结合,构建一个多级递阶的结构模型,并根据模型中主要影响因素的层级划分,提出切实可行的安全对策措施。

1 甲烷热氯化工艺过程火灾爆炸危险性分析

1.1 氯甲烷特性

氯甲烷,无色易液化气体,闪点为 $-46\text{ }^{\circ}\text{C}$,自燃点为 $632.22\text{ }^{\circ}\text{C}$,具有易燃特性,只需很少的点火能就可点燃。氯甲烷的爆炸极限为 $8.1\% \sim 17.2\%$,一旦遇到点火源即产生爆炸。除此以外,氯甲烷还具有毒性、腐蚀性、易集聚等特性。

1.2 反应釜失控火灾爆炸危险性分析

(1) 物理模式火灾爆炸

① 反应温度、压力异常引起火灾爆炸

氯化反应为放热反应,释放热量的集聚导致温度升高,进一步加快氯化反应进程。因此,为了使反应釜内部保持一定温度,需要严格控制氯化反应进程^[14]。

② 冷却系统故障引起火灾爆炸

在生产过程中,反应释放的热量需要快速扩散,因此制冷系统以及冷却水流量控制对反应釜散热有着至关重要的作用^[15]。

③ 搅拌及供电系统失控引起火灾爆炸

氯化反应过程需要借助电机搅拌使其发生充分反应,其搅拌速率与反应进程息息相关。与此同时,若温度连锁报警系统遇到供电系统故障,无法及时报警,最终也可能会发展为火灾爆炸事故。

(2) 化学模式火灾爆炸

反应釜内部可燃物质泄漏,遇空气形成爆炸性混合气体,一旦遇到火源则发生火灾爆炸事故。

2 建立甲烷热氯化工艺过程火灾爆炸事故树

事故树分析是系统安全分析方法中一种广泛应用的方法。详细介绍可参见文献[16],本文不再赘述。

根据前文分析甲烷热氯化工艺过程的危险性可知,甲烷热氯化工艺过程发生火灾爆炸事故分物理和化学模式两类。现以“氯化反应失控火灾爆炸”为顶事件,编制事故树,如图1,代码含义如表1所示。

导致顶事件发生的必要且充分的底事件集合即为最小割集。结合图1,利用布尔代数化简法计算该事件树的最小割集共48个,以此如下: $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_8X_{14}X_7, X_8X_{15}X_7, X_8X_{16}X_7, X_8X_{17}X_7, X_8X_{18}X_7, X_8X_{19}X_7, X_8X_{20}X_7, X_9X_{14}X_7, X_9X_{15}X_7, X_9X_{16}X_7, X_9X_{17}X_7, X_9X_{18}X_7, X_9X_{19}X_7, X_9X_{20}X_7, X_{10}X_{14}X_7, X_{10}X_{15}X_7, X_{10}X_{16}X_7, X_{10}X_{17}X_7, X_{10}X_{18}X_7, X_{10}X_{19}X_7, X_{10}$

$X_{20}X_7, X_{11}X_{14}X_7, X_{11}X_{15}X_7, X_{11}X_{16}X_7, X_{11}X_{17}X_7, X_{11}X_{18}X_7, X_{11}X_{19}X_7, X_{11}X_{20}X_7, X_{12}X_{14}X_7, X_{12}X_{15}X_7, X_{12}X_{16}X_7, X_{12}X_{17}X_7, X_{12}X_{18}X_7, X_{12}X_{19}X_7, X_{12}X_{20}X_7, X_{13}X_{14}X_7, X_{13}X_{15}X_7, X_{13}X_{16}X_7, X_{13}X_{17}X_7, X_{13}X_{18}X_7, X_{13}X_{19}X_7, X_{13}X_{20}X_7$ 。

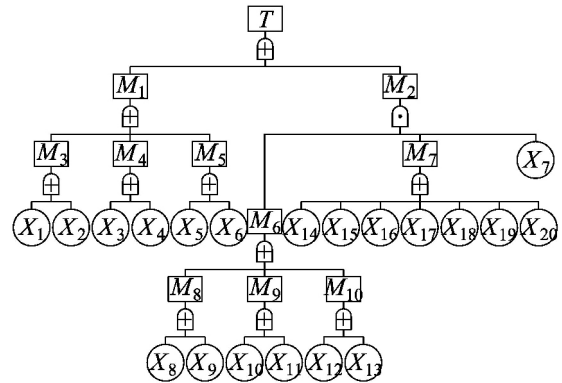


图1 甲烷热氯化工艺过程火灾爆炸事故树

表1 故障树基本事件表

代码	事件	代码	事件
T	氯化反应失控火灾爆炸	X6	紧急停电
M1	物理模式火灾爆炸	X7	到达爆炸极限
M2	化学模式火灾爆炸	X8	管道材质选择错误
M3	反应温度、压力失控	X9	管道检维修不到位
M4	制冷系统失控	X10	控制阀密封失控
M5	搅拌及供电系统失控	X11	控制阀检修不到位
M6	可燃物泄漏	X12	搅拌机转速不稳定
M7	火源	X13	原料配比不合理
M8	进出料管老化	X14	自燃
M9	控制阀门失控	X15	撞击火花
M10	进出料流量控制失误	X16	明火
X1	电动调节阀故障	X17	高温
X2	滴加氧化剂速率过快	X18	静电火花
X3	制冷系统故障	X19	电器火花
X4	冷却水流量过低	X20	雷击火花
X5	电动搅拌速率过慢		

根据结构重要度的判断原则^[17],对20个底事件的结构重要度大小进行排序,结果为: $I(X_1) = I(X_2) = I(X_3) = I(X_4) = I(X_5) = I(X_6) > I(X_7) > I(X_8) = I(X_9) = I(X_{10}) = I(X_{11}) = I(X_{12}) = I(X_{13}) > I(X_{14}) = I(X_{15}) = I(X_{16}) = I(X_{17}) = I(X_{18}) = I(X_{19}) = I(X_{20})$ 。

从事故树的结构重要度可得,预防氯化反应引发火灾爆炸事故应从化学反应失控及反应釜物料泄漏两方面入手,控制各底事件的发生,特别是结构重要度系数大的底事件,如“电动调节阀故障”、“滴加氯化剂速率过快”、“制冷系统故障”、“冷却水流量过低”、“电动搅拌速率过慢”、“紧急停电”等。

3 甲烷热氯化工艺过程的 ISM 分析

3.1 ISM 的分析程序

ISM 的分析程序主要包括: 设定问题, 选择要素, 矩阵层次化处理以及解释所得结构模型等。具体流程如图 2 所示。

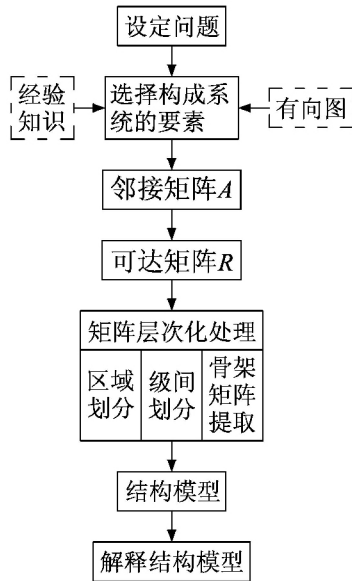


图 2 ISM 流程

3.2 建立甲烷热氯化工艺过程安全风险因素 ISM

(1) 甲烷热氯化工艺十分复杂, 且引发甲烷热氯化工艺过程发生火灾爆炸事故的因素很多, 结合前文事故树的分析结果可知, 主要影响因素有: S_1 电动调节阀故障; S_2 滴加氯化剂速率过快; S_3 制冷系统故障; S_4 冷却水流量过低; S_5 搅拌机转速不稳定; S_6 紧急停电; S_7 到达爆炸极限; S_8 材质选择错误; S_9 人员维护不到位; S_{10} 控制阀密封失效; S_{11} 原料配比不合理。

(2) 根据实际生产经验知识以及文献调研, 可得出因素之间的关系图, 如图 3 所示。

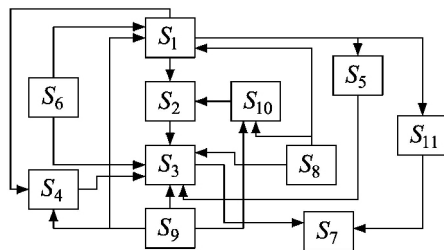


图 3 甲烷热氯化工艺因素关系

(3) 建立邻接矩阵

邻接矩阵是表示因素之间是否存在直接关系的矩阵。根据以上因素关系图, 可以得到每两个因素之间是否存在直接关系, 从而构建邻接矩阵 A 。邻接矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 表示所有因素之间的关系, 其中 a_{ij} 可定义如下:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & i \neq j \text{ 时 } S_i \text{ 与 } S_j \text{ 存在直接关系} \\ 0, & i = j; i \neq j \text{ 时 } S_i \text{ 对 } S_j \text{ 不存在直接关系} \end{cases} \quad (1)$$

式中, a_{ij} 表示 S_i 与 S_j 之间的结构关系; $i, j = 1, 2, 3, \dots, n; n$ 为所研究的要素个数。

因此, 可得到邻接矩阵 A , 如下所示:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(4) 建立可达矩阵

可达矩阵是指两因素通过一定长度的路径可达的程度, 表示两因素间是否存在间接关系。可达矩阵 R 的元素 m_{ij} 可定义如下:

$$m_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{存在 } S_i \text{ 到 } S_j \text{ 的路径} \\ 0, & \text{不存在 } S_i \text{ 到 } S_j \text{ 的路径} \end{cases} \quad (2)$$

式中, m_{ij} 表示 S_i 与 S_j 之间的结构关系; $i, j = 1, 2, 3, \dots, n; n$ 为所研究的要素个数。

结合推移规律特性, 由邻接矩阵 A 可计算得到可达矩阵 R , 计算公式如下:

$$(A + I) \neq (A + I)^2 \neq \dots \neq (A + I)^k = (A + I)^{k+1} \quad (k \leq n - 1) \quad (3)$$

$$R = (A + I)^k \quad (4)$$

式中, I 是与 A 同阶的单位矩阵。

借助 Matlab 进行计算, 运算过程遵循布尔规则^[18], 则所得可达矩阵 R , 如下所示:

$$R = (A + I)^3 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(5) 级间划分

所谓级间划分, 即将系统中的所有因素, 以可达

矩阵为准则,划分成不同的级次。划分过程中,受因素 S_i 影响的因素集合定义为因素 S_i 的可达集 $R(S_i)$,影响因素 S_i 的因素集合定义为因素 S_i 的先行集 $A(S_i)$,如果 $R(S_i) \cap A(S_i) = R(S_i)$,则 S_i 为最高级因素。

根据上文所得可达矩阵 R ,寻找其可达集与先行集,可列表 2,根据 $R(S_i) \cap A(S_i) = R(S_i)$ 寻找最高级因素 L_1 ,之后将 L_1 中因素从可达矩阵中划去,得到新的矩阵,同理可列表 3 寻找最高级因素 L_2 ,以此类推可得 L_3, L_4, \dots, L_n ,由此将因素划分出层次。具体过程如下所示。

表 2 第 1 级间划分计算

要素	可达集 $R(S_i)$	先行集 $A(S_i)$	$R(S_i) \cap A(S_i)$
S_1	1,2,3,4,5,7	1,6,8,9	1
S_2	2,3,7	1,2,6,8,9,10	2
S_3	3,7	1,2,3,4,5,6,8,9,10	3
S_4	3,4,7	1,4,6,8,9	4
S_5	3,5,7	1,5,6,8,9	5
S_6	1,2,3,4,5,6,7	6	6
S_7	7	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11	7
S_8	1,2,3,4,5,7,8,10	8	8
S_9	1,2,3,4,5,7,9,10	9	9
S_{10}	2,3,7,10	8,9,10	10
S_{11}	7,11	11	11

由表 2 可得,最上一级节点: $L_1 = [7]$ 。在 R 中划去第七行与第七列,对新得到的矩阵进行划分,如表 3 所示。

表 3 第 2 级间划分计算

要素	可达集 $R(S_i)$	先行集 $A(S_i)$	$R(S_i) \cap A(S_i)$
S_1	1,2,3,4,5	1,6,8,9	1
S_2	2,3	1,2,6,8,9,10	2
S_3	3	1,2,3,4,5,6,8,9,10	3
S_4	3,4	1,4,6,8,9	4
S_5	3,5	1,5,6,8,9	5
S_6	1,2,3,4,5,6	6	6
S_8	1,2,3,4,5,8,10	8	8
S_9	1,2,3,4,5,9,10	9	9
S_{10}	2,3,10	8,9,10	10
S_{11}	11	11	11

由表 3 可得,第二级节点: $L_2 = [3, 11]$ 。同理,由表 4~6 可得: $L_3 = [2, 4, 5], L_4 = [1, 10], L_5 = [6, 8, 9]$ 。

根据级位划分结果,连接具有相互影响关系的因素,即可得到氯化反应失控火灾爆炸影响因素的解释结构模型图,如图 4 所示。

表 4 第 3 级间划分计算

要素	可达集 $R(S_i)$	先行集 $A(S_i)$	$R(S_i) \cap A(S_i)$
S_1	1,2,4,5	1,6,8,9	1
S_2	2	1,2,6,8,9,10	2
S_4	4	1,4,6,8,9	4
S_5	5	1,5,6,8,9	5
S_6	1,2,4,5,6	6	6
S_8	1,2,4,5,8,10	8	8
S_9	1,2,4,5,9,10	9	9
S_{10}	2,10	8,9,10	10

表 5 第 4 级间划分计算

要素	可达集 $R(S_i)$	先行集 $A(S_i)$	$R(S_i) \cap A(S_i)$
S_1	1	1,6,8,9	1
S_6	1,6	6	6
S_8	1,8,10	8	8
S_9	1,9,10	9	9
S_{10}	10	8,9,10	10

表 6 第 5 级间划分计算

要素	可达集 $R(S_i)$	先行集 $A(S_i)$	$R(S_i) \cap A(S_i)$
S_6	6	6	6
S_8	8	8	8
S_9	9	9	9

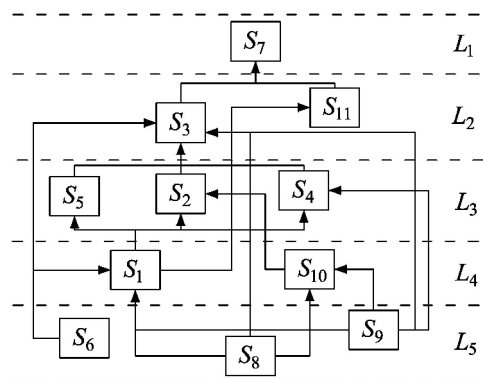


图 4 氯化反应失控火灾爆炸影响因素的解释结构模型

由图 4 可知,氯化反应失控火灾爆炸模型是一个 5 级的多级递阶系统。其中火灾爆炸的直接因素是冷却系统故障以及原料配比不合理,导致到达爆炸极限。为使冷却系统正常运行,需要确保冷却水流量、搅拌机转速、氯化剂滴加速率正常。原料配比受技术和生产条件的影响,在可控、可操作范围内改进技术从而提高原料配比的合理性。而造成事故的根本原因是紧急停电、材质选择错误、人员维护不到位,其中紧急停电是不可控因素,材质选择取决于设备设施的制造商,而人员维护则是可控人为因素。因此,为了避免事故发生,可通过加强安全教育培训、强化工人责任意识,对设备设施进行定期维护保养以及开展各类事故演练等方法降低火灾爆炸事故

发生的概率。

4 结语

甲烷热氯化工艺相对复杂,反应中存在诸多不确定因素,且反应的原料和中间产物存在一定的危害性,所以研究甲烷热氯化工艺失控问题具有重要的意义。本文以事故树的定性分析寻找造成事故的影响因素为基础,建立多级递阶的解释结构模型,抓住引起事故的基本事件,剖析造成事故的根本原因,揭示了导致事故发生的基本事件间的内在联系、层级关系以及事故作用路径,弥补了传统方法对事件之间运行规则的缺失以及未能实现危险因素与事故的有机结合的不足,有助于管理者从危险因素中找出影响氯化反应安全进行的关键,并制定具有针对性的有效措施。此外,将解释结构模型应用于化工领域,提出一种结合 ISM 与现有安全评价方法的新思路,丰富了化工工艺过程危险性分析的相关研究。

参考文献

- [1] 李锦春. 我国甲烷氯化物工业稳步发展[J]. 天然气化工(C1 化学与化工), 1990(6): 26 - 29.
- [2] 王纪洋, 张明广, 王雪栋. 基于 AHP - TOPSIS 模型的危险化工工艺风险等级评价研究[J]. 安全与环境工程, 2016, 23(6): 100 - 105.
- [3] 陈全, 张丽婷. HAZOP - FTA 综合分析方法在煤化工装置中的应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2013, 9(7): 134 - 138.
- [4] 胡盼, 靳江红, 王晓冬. 生产工艺过程危险、有害因素辨识方法[J]. 安全与环境学报, 2008, 8(1): 166 - 169.
- [5] 李畅, 王艳华, 陈宝智. 化工反应装置危险性分析模式的研究[J]. 工业安全与环保, 2008, 34(3): 43 - 45.
- [6] 佟淑娇. 典型化工过程安全控制模式研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.

- [7] 周荣义, 李石林, 刘何清. HAZOP 分析中 LOPA 的应用研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(7): 76 - 81.
- [8] WARFIELD J N. Participative methodology for public system planning [J]. Computers & electrical engineering, 1973, 1(1): 23 - 40.
- [9] 韩金山, 谭忠富, 刘严. 电力零售企业风险的解释结构模型研究[J]. 电网技术, 2005, 29(8): 14 - 19.
- [10] 王永刚, 王灿敏. 基于 ISM 和 ANP 的航空公司安全绩效影响因素研究[J]. 安全与环境学报, 2013(4): 221 - 226.
- [11] 叶贵, 段帅亮, 汪红霞. 建筑业安全投入行为决策影响因素研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(11): 23 - 29.
- [12] 姜林林, 左忠义. 基于 ISM 方法的城市轨道交通系统运营安全分析[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(6): 172 - 176.
- [13] 杨彬, 于渤, 孙倩. 基于解释结构模型的海外油气开发项目风险产生机理研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(9): 1259 - 1264.
- [14] 王辉, 陆萍. 氯化工艺过程危险性及安全检查要点[J]. 精细化工原料及中间体, 2012(8): 38 - 40.
- [15] 常力, 徐昕, 丁峰, 等. 制药企业氯化反应釜反应失控火灾爆炸事故风险分析[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2013(4): 23 - 28.
- [16] 汪元辉. 安全系统工程[M]. 天津: 天津大学出版社, 1999.
- [17] 邵辉. 系统安全工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 2016.
- [18] 韩立红, 孙建伟. 基于 ISM 模型的绿色建筑产业化影响因素分析[J]. 工程经济, 2016, 26(12): 73 - 76.

作者简介 李晨阳, 女, 1992 年生, 汉族, 河南南阳人, 硕士研究生。

(收稿日期: 2017 - 05 - 31)

(上接第 17 页)

- 特性的实验研究[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(5): 106 - 109.
- [5] TREVIÑO C, MÉNDEZ F. Reduced kinetic mechanism for methane ignition [J]. Symposium on combustion, 1992, 24(1): 121 - 127.
- [6] DROBYSHEVICH V I. Numerical study of combustion in a cylindrical porous burner [J]. Combustion, explosion and shock waves, 2008, 44(3): 262 - 265.
- [7] MINAEV S S, SERESHCHENKO E V, FURSENKO R V, et al. Splitting flames in a narrow channel with a temperature gradient in the walls [J]. Combustion, explosion and shock waves, 2009, 45(2): 119 - 125.

- [8] 罗振敏, 张群, 王华, 等. 基于 FLACS 的受限空间瓦斯爆炸数值模拟[J]. 煤炭学报, 2013, 38(8): 1381 - 1387.
- [9] 王涛. 管道内甲烷爆炸特性及 CO₂ 抑爆的实验与数值模拟研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2014.
- [10] 王华. 矿井多元可燃性气体爆炸特性试验数值模拟研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2009.

作者简介 罗振敏, 女, 1976 年生, 山东兖州人, 博士研究生, 教授, 西安科技大学安全科学与工程学院副院长, 主要从事可燃性气体爆炸防控理论及技术方面的研究。

毛文龙, 男, 1990 年生, 陕西周至人, 硕士研究生, 主要研究方向为瓦斯抑燃抑爆。

(收稿日期: 2016 - 10 - 11)