

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.04.011

硝铵炸药真空干燥工艺燃爆事故致灾因素的研究^{*}

王 浩 何中其 朱 益

南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

[摘 要] 真空干燥是硝铵炸药生产过程中一道容易发生燃爆事故的重要工序。为研究硝铵炸药真空干燥过程中发生燃爆事故的原因及机理,通过事故案例分析和现场调研,确定了导致燃爆事故的各个基本事件及其逻辑关系,并由此构建以燃爆事故作为顶事件的事故树。采用布尔代数化简事故树,得到 87 个最小割集和 9 个最小径集,结果显示每个最小径集包含的基本事件都较多,说明真空干燥工艺安全性较低。通过计算各基本事件的结构重要度并排序,得到结构重要度较大的基本事件,由此推断出导致燃爆事故的主要基本事件,并有针对性地提出相应的改进措施与建议,为企业的安全生产提供参考。

[关键词] 硝铵炸药;真空干燥;燃爆事故;事故树;最小径集;结构重要度

[分类号] X928.7; TQ560.6

Study on the Blast Accident Causing Factors in Vacuum Drying Process of Ammonium Nitrate Explosives

WANG Hao, HE Zhongqi, ZHU Yi

School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] The vacuum drying is an important process in the production of ammonium nitrate explosives, while it is prone to blast during process. In order to study the causes and mechanisms of the blast accident in the vacuum drying process, this paper determines the basic events and their logical relationships through past cases analysis and onsite investigation, then a fault tree with the blast accident as the top event was developed. Via simplifying the fault tree by Boolean algebra, and 87 minimal cut sets and 9 minimal path sets are obtained. The results show that each minimal path set contains a relatively large number of basic events, indicating its inherent safety the vacuum drying process. Calculating the structure importance of each basic event and sorting to obtain the basic events with large structural importance, which represent the main events leading to the blast accident, and the corresponding rectification measures are proposed in a targeted manner to provide reference for the safe production of enterprises.

[KEYWORDS] ammonium nitrate explosives; vacuum drying process; blast accident; fault tree; minimal path sets; structure importance

引言

硝铵炸药作为一类高能猛炸药,广泛应用于民用爆破、军事武器及相关工程领域。其原料感度高、能量密度大,生产区域常被视为整个厂区的重大危险源,往往容易发生各类意外燃烧爆炸事故并导致灾难性后果^[1]。1995 年 7 月 8 日,某厂为了干燥从硝化工房沉淀池取出的 26 袋废药,将 26 袋废药运至干燥工房进行干燥;约 2 h 后,干燥工房发生爆

炸,造成干燥工房建筑和设备全部被摧毁,所幸无人伤亡。分析事故原因,是由于废药中含有的不安定副产物(如甲二醇二硝酸脂等)干燥时加速分解,形成热点,导致爆炸^[2]。

目前,对硝铵炸药真空干燥过程的研究主要集中在影响因素分析、工艺改进和重大危险源辨识上^[3-7]。张玄玄等^[3]通过正交试验法,对黑索今真空干燥过程中的主要影响因素(含水量、真空度、温度等)进行显著性分析,从而得到最佳的干燥工艺参数。刘晓静^[7]使用改进前、后危险源危险性分

^{*} 收稿日期:2018-09-12
第一作者:王浩(1994-),男,硕士研究生,主要从事化工工艺安全技术等方面的研究。E-mail: whhongdue@163.com
通信作者:何中其(1978-),男,博士,讲师,主要从事安全技术与安全工程方面的研究。E-mail: hzq555@163.com

析评估方法 BZA-1 和 BZA-2,对某厂的黑索今真空干燥工艺进行危险性定量研究,得出该工艺的危险等级为Ⅳ级,属严重危险,是集团公司级监督整改事故隐患类型。

在当前的诸多研究中,将事故树分析应用到危险化学品尤其是火炸药的真空干燥工序进行系统安全性分析的相关研究不多。本文中,基于事故树模型,对某厂硝铵炸药真空干燥工艺中导致燃爆事故的成因进行分析。通过求取事故树的最小割集、最小径集和各个基本事件的结构重要度,剖析致使该过程发生燃爆事故的主要因素,并提出相应的改进意见,为提升其工艺的本质安全性提供参考。

1 真空干燥工艺概述

真空干燥工艺利用低气压和高温,使得炸药水洗产物中的水分快速汽化,从而得到干燥的产物。真空干燥工艺流程见图 1。

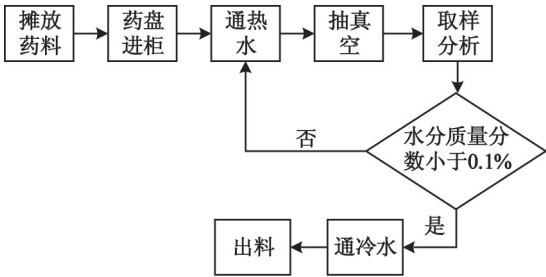


图 1 真空干燥工艺流程图

Fig.1 Flow chart of the vacuum drying process

为了提高系统的本质安全程度,将循环热水通入隔板管道的方式作为干燥柜的热源。正常抽真空干燥时,干燥柜内负压一般不低于 53.3 kPa。以黑索今为例,干燥一段时间后取样分析含水量,物料需

要干燥 7 ~ 8 h,而钝化黑索今则需要干燥 18 ~ 20 h^[8],这两种物料的工艺参数见表 1。

表 1 黑索今和钝化黑索今真空干燥工艺参数

Tab.1 Process parameters for vacuum drying of RDX and passivated RDX

物料	热水温度/ ℃	柜内温度/ ℃	水分质量 分数/%
黑索今	90 ~ 100	70 ~ 80	<0.1
钝化黑索今	70 ~ 80	50 ~ 65	<0.1

2 真空干燥工艺燃爆事故树分析

2.1 事故树的创建

硝铵炸药是一类高能猛炸药,其燃烧、爆炸可产生大量的热量,并可能转化为爆轰^[9-10]。一旦发生燃爆事故,将造成大量人员伤亡和巨大的财产损失,故将真空干燥工艺事故树分析的顶事件定为燃爆事故。结合以往事故案例分析、现有的 HAZOP (Hazard and operability) 分析和安全检查表,编制出真空干燥工艺的事故树,见图 2。图 2 中各字母的意义见表 2。

2.2 事故树定性分析

在事故树的定性分析中,可用最小割集直观地描述系统的危险性大小,用最小径集描述系统安全程度的特征。最小割集和最小径集也可以用来定量分析和计算顶事件的发生概率、基本事件的结构重要度等^[11]。借助计算机,使用布尔代数化简该事故树后发现,最小割集共有 87 个,而最小径集只有 9 个,最小径集的个数较少,因此对该事故树采用最小径集进行分析。

最小径集为:

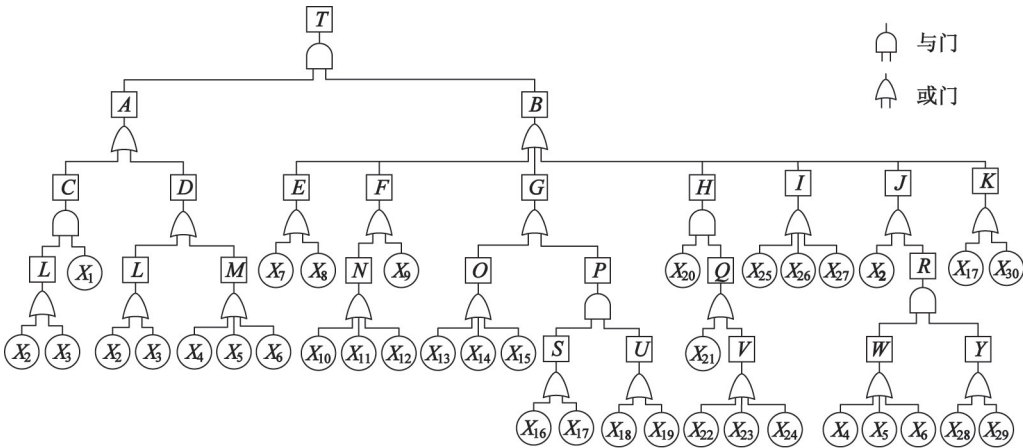


图 2 真空干燥工艺燃爆事故树

Fig.2 Fault tree of blast accidents in vacuum drying process

表 2 真空干燥工艺燃爆事故树符号及其代表的事件

Tab.2 Symbols of the fault tree of blast accidents in vacuum drying process and their representative events

符号	代表的事件	符号	代表的事件	符号	代表的事件
<i>T</i>	干燥工序燃爆事故	<i>R</i>	热分解造成局部高温	<i>X</i> ₁₃	进车间前未有效导除静电
<i>A</i>	药料潜在危险状态	<i>S</i>	静电积累	<i>X</i> ₁₄	未穿防静电服
<i>B</i>	点火源	<i>U</i>	静电接地	<i>X</i> ₁₅	未穿导静电鞋
<i>C</i>	潜在的粉尘爆炸	<i>V</i>	避雷设施故障	<i>X</i> ₁₆	药料导电率过低
<i>D</i>	潜在的自身燃烧、爆炸	<i>W</i>	不稳定杂质分解	<i>X</i> ₁₇	人员移出药盘时用力过猛
<i>E</i>	明火	<i>Y</i>	热量积累	<i>X</i> ₁₈	未设置接地设施
<i>F</i>	电气火花	<i>X</i> ₁	抽真空气流快	<i>X</i> ₁₉	接地端损坏
<i>G</i>	静电火花	<i>X</i> ₂	热水温度过高	<i>X</i> ₂₀	雷击
<i>H</i>	雷击火花	<i>X</i> ₃	干燥时间过长	<i>X</i> ₂₁	未安装避雷设施
<i>I</i>	撞击	<i>X</i> ₄	前次干燥的残留药料	<i>X</i> ₂₂	接地电阻超标
<i>J</i>	高温	<i>X</i> ₅	不稳定副产物,如奥克托今等	<i>X</i> ₂₃	引下线断裂
<i>K</i>	摩擦	<i>X</i> ₆	操作不当而掺入杂质	<i>X</i> ₂₄	接地设备损坏
<i>L</i>	过于燥	<i>X</i> ₇	车间内吸烟	<i>X</i> ₂₅	使用铁质工具作业
<i>M</i>	掺杂不稳定杂质	<i>X</i> ₈	车间内违章动火作业	<i>X</i> ₂₆	穿带铁钉的鞋作业
<i>N</i>	电气防爆失效	<i>X</i> ₉	临时使用不防爆电气	<i>X</i> ₂₇	物品跌落砸到干燥柜
<i>O</i>	人体静电	<i>X</i> ₁₀	线路短路	<i>X</i> ₂₈	药料过量,无法有效散热
<i>P</i>	机体静电	<i>X</i> ₁₁	防爆措施老化失效	<i>X</i> ₂₉	托盘导热系数过小
<i>Q</i>	避雷失效	<i>X</i> ₁₂	真空泵抑制电火花措施失效	<i>X</i> ₃₀	移动药盘时,药盘与隔板之间有药料残留

$$P_1 = \{X_2, X_3, X_4, X_5, X_6\};$$
$$P_2 = \{X_2, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}, X_{16}, X_{17}, X_{20}, X_{25}, X_{26}, X_{27}, X_{30}\};$$
$$P_3 = \{X_2, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}, X_{16}, X_{17}, X_{21}, X_{22}, X_{23}, X_{24}, X_{25}, X_{26}, X_{27}, X_{30}\};$$
$$P_4 = \{X_2, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}, X_{17}, X_{18}, X_{19}, X_{20}, X_{25}, X_{26}, X_{27}, X_{30}\};$$
$$P_5 = \{X_2, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}, X_{17}, X_{18}, X_{19}, X_{21}, X_{22}, X_{23}, X_{24}, X_{25}, X_{26}, X_{27}, X_{30}\};$$
$$P_6 = \{X_2, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}, X_{16}, X_{17}, X_{20}, X_{25}, X_{26}, X_{27}, X_{28}, X_{29}, X_{30}\};$$
$$P_7 = \{X_2, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}, X_{16}, X_{17}, X_{21}, X_{22}, X_{23}, X_{24}, X_{25}, X_{26}, X_{27}, X_{28}, X_{29}, X_{30}\};$$
$$P_8 = \{X_2, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}, X_{17}, X_{18}, X_{19}, X_{20}, X_{25}, X_{26}, X_{27}, X_{28}, X_{29}, X_{30}\};$$
$$P_9 = \{X_2, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}, X_{17}, X_{18}, X_{19}, X_{21}, X_{22}, X_{23}, X_{24}, X_{25}, X_{26}, X_{27}, X_{28}, X_{29}, X_{30}\}。$$

对于每一个最小径集,只有包含的所有基本事件都不发生,顶事件才不会发生。在真空干燥工艺燃爆事故树中,每个最小径集包含的基本事件均较多,由此可知该工艺安全程度较低,很容易导致顶事

件发生^[12-16]。

2.3 结构重要度分析

在事故树分析中,基本事件的发生概率往往很难获取,获取的概率值也不一定准确,故一般可以从事故树结构上分析各个基本事件发生时对顶事件的影响程度,即求取结构重要度。基本事件的结构重要度越大,则该事件对顶事件发生的影响越大,反之亦然^[17-18]。结构重要度计算公式如下^[19]:

$$I_{\Phi(i)} = 1 - \prod_{X_i \in K_j} \left(1 - \frac{1}{2^{n_j-1}}\right)。 \tag{1}$$

式中: $I_{\Phi(i)}$ 为基本事件 X_i 的结构重要度; K_j 为基本事件 X_i 所在的最小割集总数; n_j 为基本事件 X_i 所在的最小割集 K_j 的底事件总数。

在 2.1 的事故树中,由布尔代数的吸收律可消除基本事件 X_1 ,故 X_1 在最小割集和最小径集中均未出现,即 $I_{\Phi(1)} = 0$ 。其余基本事件的结构重要度如下:

$$I_{\Phi(2)} = 6.251\ 0 \times 10^{-2};$$
$$I_{\Phi(3)} = 6.250\ 0 \times 10^{-2};$$
$$I_{\Phi(4)} = I_{\Phi(5)} = I_{\Phi(6)} = 6.250\ 3 \times 10^{-2};$$
$$I_{\Phi(7)} = I_{\Phi(8)} = I_{\Phi(9)} = I_{\Phi(10)} = I_{\Phi(11)} = I_{\Phi(12)} =$$
$$I_{\Phi(13)} = I_{\Phi(14)} = I_{\Phi(15)} = I_{\Phi(17)} = I_{\Phi(25)} = I_{\Phi(26)} =$$
$$I_{\Phi(27)} = I_{\Phi(30)} = 9.655\ 9 \times 10^{-6};$$
$$I_{\Phi(16)} = I_{\Phi(28)} = I_{\Phi(29)} = 6.437\ 3 \times 10^{-6};$$
$$I_{\Phi(18)} = I_{\Phi(19)} = 3.218\ 6 \times 10^{-6};$$

$I_{\Phi(20)} = 8.583\ 0 \times 10^{-6}$;
 $I_{\Phi(21)} = I_{\Phi(22)} = I_{\Phi(23)} = I_{\Phi(24)} = 1.072\ 9 \times 10^{-6}$ 。
各基本事件的结构重要度排序为:
 $I_{\Phi(2)} > I_{\Phi(4)} = I_{\Phi(5)} = I_{\Phi(6)} > I_{\Phi(3)} > I_{\Phi(7)} =$
 $I_{\Phi(8)} = I_{\Phi(9)} = I_{\Phi(10)} = I_{\Phi(11)} = I_{\Phi(12)} = I_{\Phi(13)} = I_{\Phi(14)} =$
 $I_{\Phi(15)} = I_{\Phi(17)} = I_{\Phi(25)} = I_{\Phi(26)} = I_{\Phi(27)} = I_{\Phi(30)} >$
 $I_{\Phi(20)} > I_{\Phi(16)} = I_{\Phi(28)} = I_{\Phi(29)} > I_{\Phi(18)} = I_{\Phi(19)} >$
 $I_{\Phi(21)} = I_{\Phi(22)} = I_{\Phi(23)} = I_{\Phi(24)} > I_{\Phi(1)}。$

通过以上分析可以看出,基本事件 X_2 的结构重要度最大,即“热水温度过高”事件对硝铵炸药真空干燥工艺燃爆事故的发生影响最大。同时,基本事件 X_3 (干燥时间过长)、 X_4 (前次干燥的残留药料)、 X_5 (不稳定副产物,如奥克托今等)和 X_6 (操作不当而掺入杂质)的结构重要度仅次于 X_2 ,可看出它们对顶事件的发生影响也很大。因此,应加强通入干燥柜热水的温度控制,切勿出现温度过高或异常波动。同时,要确保干燥时间不要过长;干燥完成后及时清理干净药盘、隔板等;严控产物合成工艺,尽量减少不稳定副产物的产生;工作人员操作过程中注意卫生,避免掺入其他杂质。当然,为了提高系统安全,其他因素也不可忽视^[20]。

3 工艺安全措施

通过真空干燥工艺的事故树分析可看出,要防止燃烧、爆炸事故的发生,应杜绝点火源,同时控制好硝铵炸药药料的状态,特别是要防止结构重要度较大的基本事件的发生,如 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 和 X_6 等。根据以上分析,提出如下建议:

- 1)在热水循环系统中设置温度反馈控制,保证干燥柜内部管道中的热水温度保持在工艺温度范围之内。
- 2)堆放湿药料前,要清理干净药盘、柜内隔板等,切勿残留前次干燥的药料;操作过程中要保持干燥间洁净,员工要戴手套操作。
- 3)定期检查真空干燥柜体是否有裂缝,连接处是否密封,防止抽真空过程中由于负压而产生急速气流,导致炸药颗粒飞散,引起粉尘爆炸。
- 4)抽真空前须关好防爆门,并检查防爆门的密封性,若有异常声响,应立即停止干燥,并及时检修。
- 5)定期检测避雷和防静电设施是否符合标准,督促作业人员穿防静电服和防静电鞋作业。
- 6)定期组织员工参加业务和安全培训,增强员工的操作技能和安全意识;要求员工操作时严格遵循操作规程和规章制度,严禁携带明火、电子通讯设

备进入操作间,严禁在有药料的情况下进行焊接等动火作业。

4 结论

通过分析硝铵炸药真空干燥工艺中燃爆事故发生的逻辑关系,构建了燃爆事故树,并对事故树求取最小割集、最小径集和基本事件的结构重要度,进行定性、定量分析,得出导致干燥工艺燃爆事故发生的主要原因。同时,根据事故成因分析结果,提出了有针对性的整改意见,为企业的安全生产提供参考。

真空干燥工艺具有较低的系统安全性,事故类型主要有粉尘爆炸和药料自身燃爆等,引发事故的原因多种多样,通过事故树分析可确定主要的引发原因,从而有针对性地对该工艺进行改进。为了预防燃爆事故的发生,应加强对干燥药料状态的检测,避免温度过高和掺杂不稳定的杂质。同时,应采取相应措施,避免干燥柜内部空间散布过多炸药粉尘。

参 考 文 献

[1] 张燕,李婷婷,张振中,等.黑索今制备过滤过程中的特性与安全性[J].爆破器材,2016,45(6):16-20.
ZHANG Y,LI T T,ZHANG Z Z, et al. Characteristics and safety of RDX in filtering process in RDX preparation [J]. Explosive Materials, 2016,45(6):16-20.

[2] 陈耀坤,李亮.黑索今生产线两次爆炸事故的教训[J].兵工安全技术,1996(5):40-42.

[3] 张么玄,张秋杰,胡秀娟,等.RDX干燥过程影响因素的综合分析[J].爆破器材,2011,40(5):15-17,21.
ZHANG Y X,ZHANG Q J,HU X J, et al. Optimization of drying technological conditions of RDX[J]. Explosive Materials, 2011,40(5):15-17,21.

[4] 胡永胜,张么玄,周述文,等.黑索今连续干燥试验及其动力学研究[J].推进技术,2015,36(7):1110-1115.
HU Y S,ZHANG Y X,ZHOU S W, et al. Drying experiment and kinetics of RDX in a continuous dryer [J]. Journal of Propulsion Technology, 2015,36(7):1110-1115.

[5] 张南江.钝化黑索今干燥工艺的改善与控制[J].火炸药学报,1994(1):39-41.

[6] 陈腾.RDX、TNT干燥特性实验与数学模拟[D].南京:南京理工大学,2010.

[7] 刘晓静.火炸药典型生产过程安全性分析与评价[D].南京:南京理工大学,2004.

- [8] 舒银克. 黑索金[M]. 北京:兵器工业出版社, 1974: 90-92.
- [9] MCAFEE J M. The deflagration-to-detonation transition [J]. Journal of Japan Society of Fluid Mechanics, 2007, 26(6):1057-1058.
- [10] ZHANG T H, BAI Y L, WANG S Y, et al. Damage of a high-energy solid propellant and its effects on combustion[J]. Acta Mechanica Sinica, 2001, 17(4):348-353.
- [11] 胡毅亭, 陈网桦. 安全系统工程[M]. 南京:南京大学出版社, 2009.
- [12] 袁智, 汪海阁, 王海强, 等. 基于事故树分析的钻井井漏事故危险评价研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(3):107-112.
- YUAN Z, WANG H G, WANG H Q, et al. Application of fault tree analysis to risk assessment of lost circulation hazards in drilling[J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(3):107-112.
- [13] 易静知. FTA 在保险粉干燥锅爆炸事故分析中的应用[J]. 化工安全与环境, 2005(22):11-12.
- [14] 王勇, 陈全, 黄文栋. 环氧乙烷储罐区火灾爆炸事故树分析[J]. 天津理工大学学报, 2010, 26(1):75-77.
- WANG Y, CHEN Q, HUANG W D. Fault tree analysis of fire and explosion accidents caused by EO tank[J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2010, 26(1):75-77.
- [15] 郝彩霞, 许彦, 龚声武. 事故树分析法在 LPG 储罐火灾爆炸事故中的应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(1):154-159.
- HAO C X, XU Y, GONG S W. Application of fault tree analysis on fire and blast accidents of LPG tank[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2012, 8(1):154-159.
- [16] 尹航. 石油储罐爆炸的事故树分析方法[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(20):4913-4917, 4929.
- YIN H. Fault tree analysis of explosion for oil storage tank[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(20):4913-4917, 4929.
- [17] 彭琪琪, 何中其, 陈网桦, 等. 基于事故树分析的固体推进剂捏合工序燃爆事故成因研究[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(1):137-141, 157.
- PENG Q Q, HE Z Q, CHEN W H, et al. Genesis study on blast accident in kneading process of solid propellant based on fault tree analysis [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(1):137-141, 157.
- [18] 刘明明, 胡甚平, 郭云龙, 等. 集装箱化危险品船载运输风险因子辨识[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(10):168-174.
- LIU M M, HU S P, GUO Y L, et al. Risk factors identification of containerization dangerous goods on board [J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(10):168-174.
- [19] 魏春荣, 孙建华, 张锦鹏. 事故树定性分析法及其在矿井安全评价中的应用[J]. 工业安全与环保, 2009, 35(9):39-41.
- WEI C R, SUN J H, ZHANG J P. Qualitative fault tree analysis and it's application in safety assessment of mines[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2009, 35(9):39-41.
- [20] 高震, 陈保东, 晏永飞, 等. 模糊事故树法对注汽锅炉的爆管分析[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2014, 34(6):63-66.
- GAO Z, CHEN B D, YAN Y F, et al. The fuzzy fault tree analysis of pipe burst of steam injection boiler[J]. Journal of Liaoning Shihua University, 2014, 34(6):63-66.