

防城港核电厂CPR1000机型氢气火灾 风险研究

周学进¹, 何乐², 祝赫², 涂然³

¹华侨大学机电及自动化学院, 福建 厦门

²中广核工程有限公司, 广东 深圳

³中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽 合肥
Email: zhouxj@hqu.edu.cn

收稿日期: 2020年12月6日; 录用日期: 2020年12月19日; 发布日期: 2021年1月12日

摘要

新世纪以来核力发电得到越来越广泛的使用, 核电站在运行过程中会产生和应用到大量氢气, 一旦发生氢气火灾极易导致爆炸, 将具有极大破坏性。本文通过对中广核防城港核电厂的CPR1000机型进行实地调研分析, 运用事故树方法对核电站的危险源特性及危险度层级进行了系统研究。核电厂内部的危险源相对复杂, 导致事故树顶上事件发生的最小割集达到945个, 最小径集则有4个。进一步利用事故树-层次分析法分析, 计算各危险因素权重, 发现通风装置和氢气处理系统发生故障对于事故发生概率的影响最大(~10%)。本项工作可望为核电厂的氢气事故防治提供工程参考。

关键词

安全工程, 氢气事故, 燃烧爆炸, 事故树-层次分析, 核电安全

Hydrogen Fire Risk Analysis on CPR1000 System of Fangchenggang Nuclear Power Plant

Xuejin Zhou¹, Le He², He Zhu², Ran Tu³

¹College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen Fujian

²China Nuclear Power Engineering Co., Shenzhen Guangdong

³State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei Anhui
Email: zhouxj@hqu.edu.cn

Received: Dec. 6th, 2020; accepted: Dec. 19th, 2020; published: Jan. 12th, 2021

Abstract

Hydrogen is widely used or generated during the nuclear power generation operation, which may bring high damage by hydrogen combustion and explosion. For the purpose of nuclear safety involved with hydrogen, the CPR1000 system of CGNPC (China General Nuclear Power Corporation) was investigated, and a fault tree analysis was performed. The results show that there are 945 minimum and 4 minimum path cut sets that cause events on the top of the hydrogen accident tree. With application of the accident tree-analytic hierarchy process, numerical methods were used to calculate the weight of each factor. The results show that the failure of the ventilation device and the hydrogen treatment system had a greater impact on the accident.

Keywords

Safety Engineering, Hydrogen Accident, Combustion and Explosion, Accident Tree-Analytic Hierarchy, Nuclear Safety

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着人类能源需求的提升和对环境问题越来越重视,近年来核力发电愈发重要。核电厂发电量庞大,技术成熟,可满足社会的电力需求。然而,核力发电伴随着一定的风险,2011年日本福岛核事故,堆芯熔化,锆包壳与高温水蒸气发生反应,产生大量的氢气,并引发爆炸,损坏安全壳并释放大量的放射性裂变产物,对环境造成了巨大的污染[1]。因此,提高核力发电的安全性越来越迫切,在一系列安全问题中,氢气安全是非常重要的问题[2]。核力发电过程中会产生大量的氢气,氢气会与水蒸气、空气混合,在一定温度和浓度(4%~75%)条件下会迅速发生湍流燃烧甚至爆炸[3]。因此需要解决氢气安全问题,找到核电厂氢气燃烧爆炸的重要引发因素,并采取相应的对策,避免该类事故的再次发生。

本研究将采用事故树结合层次分析法对核电厂氢气火灾风险进行研究。该方法可以对事故进行定量分析,从中找出引发的原因或者危险因素,从而进行优化设计,达到功能和安全性的最大化[4]。1992年,英国学者 James 等[5]考察了 Sizewell 核电站,对安全壳内氢气聚集直至爆炸失效过程进行了风险评估模型,并对比了结果,认为事故树方法更高效。2011年,张村峰等[6]最先引入该方法研究了复杂建筑火灾中各风险因素的影响,对火场中消防设施、火灾荷载等给出定量对比。近年来,由于福岛事故的影响,对核电厂氢气风险评估的研究不断涌现,然而多数学者[7][8]侧重反应堆或安全壳内的失效过程,导致该方法很少被用到整体的核电厂氢气系统火灾风险分析中。本文将对中广核防城港核电厂某发电机型进行实地考察,兼顾所有氢气相关系统,运用“事故树-层次分析法”研究各因素对于氢气火灾事故的影响,并确定其权重,为以后核电厂氢气火灾安全防治工作提供科学参考。

2. 核电厂氢气相关系统

本文分析对象是 CPR1000 机型内的氢气相关设施,其为中国自主研发的百万千瓦级水堆核电技术机型。通过厂区核岛内外实地调研分析,发现涉及到大量氢气的主要子系统包括:

1) 反应堆冷却剂系统。该系统由反应堆压力容器、主管道、蒸汽发生器、反应堆冷却泵、稳压器、波动管组成。正常运行期间,为了控制水中含氧量,反应堆及反应堆冷却剂系统由化学和容积控制系统加入适量氢气。此外,反应堆冷却剂系统发生失水事故时,高温下燃料元件锆合金包壳与水蒸气进行化学反应,释放出大量的氢气[1],在安全壳内金属(铝和锌)被安全壳喷淋液腐蚀也会释放出大量的氢气。

2) 化学容积控制系统与废气废液处理系统。化学容积控制系统是核岛主要的氢气用户,化学容积控制系统的容控箱在运行过程中通过加氢装置补充氢气,因此与之连接各类管线具有爆炸风险。废气废液处理系统收集的废气中含有氢气,如果含氢子系统中漏入了空气,就可能产生爆炸性混合气体;同时从液相的反应堆冷却剂中逸出的氢气和氧气混合则可能形成爆炸性气体。

3) 硼回收系统与发电机氢冷系统。前者从前贮槽到除气装置的流体是含氢的反应堆冷却剂,氢气从液相溢出进入气相,可能形成爆炸性混合气体,也可能存在泄漏到环境中去的危险。后者配置有发电机氢气控制装置,该装置可以在发电机充、排氢期间监测发电机内二氧化碳中空气纯度,二氧化碳中氢气纯度。在发电机运行期间监测发电机内部的氢气纯度,即空气中氢气的纯度,并对发电机内的氢气纯度超出高低纯度设定值时进行报警。另外,在电厂发生火灾的情况下,利用防火电磁阀实现远程紧急排氢。

4) 氢气生产与分配系统。氢气生产与分配系统分为生产子系统和分配子系统,氢气生产系统是生产核电站所需要的全部氢气,并存储在制氢站的存储装置中,以确保核电厂的运行需求。氢气分配系统通过其管网将氢气供应至核岛和常规岛的用户,主要供气对象为核岛化学和容积控制系统(RCV)和常规岛发电机氢气供应系统(GRV),其中 RCV 系统主要用于核岛反应堆冷却剂系统的加氢,而 GRV 系统是用于对常规岛汽轮机发电机组进行冷却并充灌发电机,且两者都兼具补充系统氢气泄漏的任务。

5) 制氢站与制氯站。制氢站是电厂氢气的生产、贮存、分配的场所,为一独立建筑物,该子项实际属于氢气生产与分配系统的一部分。制氢站的火灾危险属于甲类,有火灾、爆炸危险的区域为电解间和贮氢区。通常情况下,制氢站属于电厂中氢气存储量最大的区域。对于制氯站,电解海水生成的次氯酸钠溶液贮存在贮存罐,然后利用重力自流或采取加药泵投加至泵房的各个加药点。在制氯工艺过程中,同样会产生氢气释放,因此制氯站存在氢气泄漏风险。

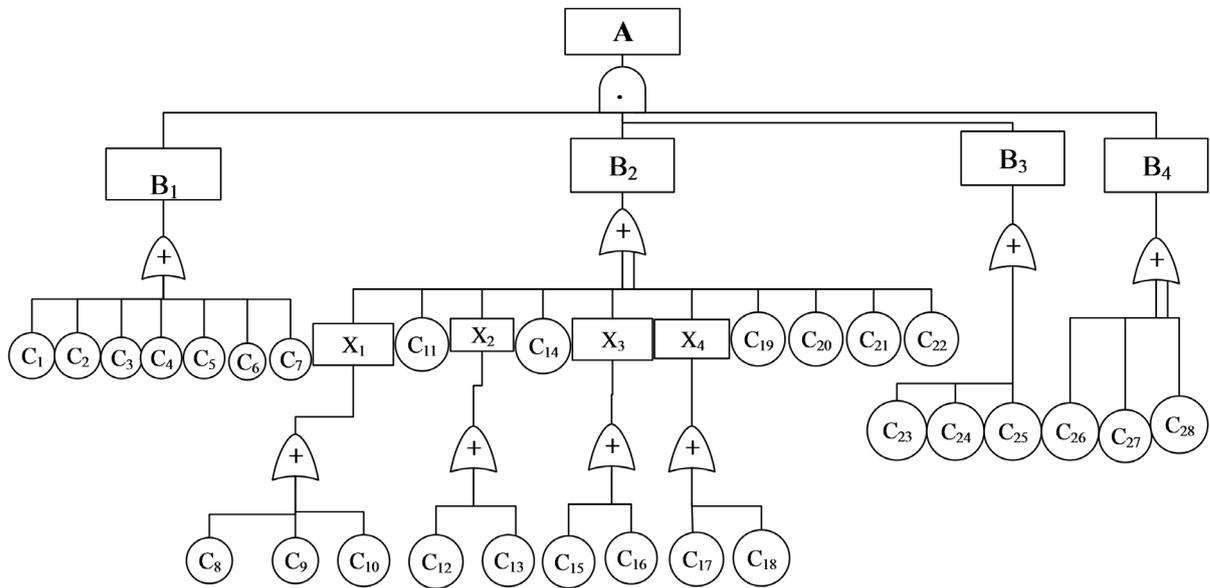
此外,厂区蓄电池间和部分实验室在电池充放电时也可能溢出一部分氢气。

3. 核电火灾安全的事故树 - 层次分析

3.1. CPR1000 机型事故树 - 层次分析法

氢气具有化学活性强,导热性系数高,强扩散性,因而在生产、储存和使用过程中都可能产生泄漏进而爆炸。事故树分析(FTA)是一种演绎推理法,为确定安全对策提供可靠依据。防城港核电厂 CPR1000 机型系统与氢气相关子系统主要包括上述 10 处。在编制时首先需要确定顶上事件。由于只能选定一个顶上事件,因此我们把最严重的状况,即氢气燃烧爆炸发生作为事故树的顶上事件。

图 1 为核电厂 CPR1000 机型系统事故树图,其中 $C_1 \sim C_{28}$ 为各种事故因素,由研究者分析多年事故数据[7][8][9][10]及与工程师现场分析讨论得出,事故图中符号及其含义可见表 1。可以看出,该事故树有 9 个逻辑门链接,其中逻辑与门(AND) 1 个,逻辑或门(OR) 8 个,与门增加最小割集的大小(割集内包括的基本事件的数量),而不增加最小割集的数量;或门增加最小割集的数量,而不增加最小割集的大小。经计算,系统有 4 个最小径集和 945 个最小割集,表明能够引起核电厂 CPR1000 系统的氢气燃烧爆炸有 945 种途径。



A: 氢气燃烧爆炸; B₁: 火源; B₂: CPR1000 氢气危险源; B₃: 通风装置失效; B₄: 氢气处理系统失效; X₁: 反应堆冷却剂系统氢气危险源; X₂: 废气、废液处理系统氢气危险源; X₃: 发电机氢冷系统氢气危险源; X₄: 氢气生产与分配系统氢气危险源; C₁: 明火; C₂: 静电火花; C₃: 撞击火花; C₄: 电火花; C₅: 雷击火花; C₆: 光照; C₇: 生物热; C₈: 系统加入的氢气; C₉: 燃料元件锆合金包壳与水蒸气化学反应产生的氢气; C₁₀: 安全壳金属(铝和锌)被喷淋液腐蚀产生的氢气; C₁₁: 化学与容积系统容控箱补充的氢气; C₁₂: 收集废气的氢气; C₁₃: 液相反应堆逸出的氢气; C₁₄: 硼回收系统逸出的氢气; C₁₅: 废电机氢冷系统的氢气; C₁₆: 发电机氢气输送管道的氢气; C₁₇: 氢气生产系统的氢气; C₁₈: 氢气分配系统的氢气; C₁₉: 制氢站的氢气; C₂₀: 现场实验室的氢气; C₂₁: 蓄电池逸出的氢气; C₂₂: 制氯站泄漏的氢气(注明以上都是指氢气含量超标的情况); C₂₃: 通风系统发生故障; C₂₄: 通风系统设计缺陷; C₂₅: 通风系统其他因素; C₂₆: 氢气处理系统发生故障; C₂₇: 氢气处理系统设计缺陷; C₂₈: 氢气处理系统其他因素

Figure 1. Fault tree of CPR1000 model system in Fangchenggang Nuclear Power Plant

图 1. 防城港核电站 CPR1000 机型系统的事故树

Table 1. The symbols and their contents in hydrogen explosion Fault tree of Nuclear Power Plant

表 1. 核电站氢气爆炸事故树中符号及含义

符号及含义	符号及含义	符号及含义	符号及含义
B ₁ 火源	C ₂ 静电火花	C ₁₁ 化学与容积系统容控箱补充的氢气	C ₂₀ 现场实验室的氢气
B ₂ CPR1000 氢气危险源	C ₃ 撞击火花	C ₁₂ 收集废气的氢气	C ₂₁ 蓄电池逸出的氢气
B ₃ 通风装置没有起到作用	C ₄ 电火花	C ₁₃ 液相反应堆逸出的氢气	C ₂₂ 制氯站泄漏的氢气
B ₄ 氢气处理系统没有起到作用	C ₅ 雷击火花	C ₁₄ 硼回收系统逸出的氢气	C ₂₃ 通风系统发生故障
X ₁ 反应堆冷却剂系统氢气危险源	C ₆ 光热能	C ₁₅ 废电机氢冷系统的氢气	C ₂₄ 通风系统设计缺陷
X ₂ 废气、废液处理系统氢气危险源	C ₇ 生物热	C ₁₆ 发电机氢气输送管道的氢气	C ₂₅ 通风系统其他因素
X ₃ 发电机氢冷系统氢气危险源	C ₈ 系统加入的氢气	C ₁₇ 氢气生产系统的氢气	C ₂₆ 氢气处理系统发生故障
X ₄ 氢气生产与分配系统氢气危险源	C ₉ 锆合金包壳与水蒸气化学反应产生的氢气	C ₁₈ 氢气分配系统的氢气	C ₂₇ 氢气处理系统设计缺陷
C ₁ 明火	C ₁₀ 安全壳金属(铝和锌)被喷淋液腐蚀产生的氢气	C ₁₉ 制氢站的氢气	C ₂₈ 氢气处理系统其他因素

单一事故树的分析，其结果往往偏差较大。将事故树分析与层次分析法相结合，用于确定事故中各危险因素的权重系数，既能够保证评价因素全面有条理，又能够使定性分析定量化，有效地提高事故树分析的质量和效率[6]。层次分析法将一个评价对象划分为几个层次，选择合适的定量指标模糊量化方法计算出其权重值，进而得到层次单排序和总排序，作出优化决策方案的安全评价方法。可按如下4个基本步骤进行：

1) 构建事故树模型，类似如图1。

2) 构建层析分析模型。通过分析事故树的各基本事件，依照事故树的逻辑顺序，将事故树的事件按照目标层、准则层、指标层划分归类，建立层析分析模型。

3) 影响因素权重计算。影响因素权重计算过程如下：a) 构建判断矩阵要从上到下，选定上一层次的某一因素，将本层次各因素关于这个指定因素进行两两比较，根据评价对象实际情况以及评价目的和要求，选用合适的标度对判断矩阵因素给出合理的赋值，从而构造出一个由重要性比值构成的正互反判断矩阵，本文采用1~9标度[10]。b) 计算因素的相对权重。仅仅得到判断矩阵，并不能反映出本层次各因素的重要程度，所以还需要计算本层次所有因素的相对权重，求出特征向量，进而得到各因素的相对权重值。c) 一致性检验。在构造正反判断矩阵时，由于评价系统的复杂性，加上对因素进行两两比较时由于受到主观意识的影响，构造的判断矩阵往往与实际情况有差异，因此要判断不一致程度是否在可容许的范围内，就需要对判断矩阵进行一致性检验。首先计算一致性指标CI，

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

式中： n 为判断矩阵的阶数， λ_{\max} 为最大特征根；当判断矩阵具有完全一致性时， $CI = 0$ 。然后判断计算出的一致性指标CI是否有偏差，且偏差是否在容许的一致性范围内，这些问题就需要引入平均随机一致性指标RI来衡量。文献[11]得出的1~15阶重复计算1000次的平均随机一致性指标RI如见表2所示。

Table 2. RI value table

表 2. RI 取值表

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.24	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58	1.59

最后计算一致性比例CR： $CR = CI/RI$ 。当 $CR < 0.1$ 时，认为判断矩阵与实际情况保持一致，则一致性检验通过，说明特征向量能够表示权重向量；反之，说明判断矩阵与实际情况存在较大偏差，需要对正互反判断矩阵做适量修正。

当各层次因素权重计算完成后汇成总层表，按权重值从高到低排序，重点分析权重值较高的因素，并从重点关注因素出发，提出控制和改进的措施。

3.2. CPR1000 机型元素危险权重分析

根据对防城港核电厂CPR1000机型的调研，本文建立了图1中事故树。因此目标层对应A，准则层为 $B_1 \sim B_4$ ，指标层为 $C_1 \sim C_{28}$ 。通过1~9标度法，对危险因素 $B_1 \sim B_4$ 和危险部位 $C_1 \sim C_{28}$ 危险性权重进行定量判定，构造目标层A层和 $B_1 \sim B_4$ 各层判断矩阵[5]。此过程无法通过严格理论得出，只能由现场经验丰富的工程师根据风险评估一般方法给出。本文通过中广核10位专家的调查问卷及火灾科学领域专家综合调研判断给出，表3为建立的各层判断矩阵和计算结果。

Table 3. Comparison of the importance of the influence factors of the target A layer
表 3. 目标层 A 层的影响因素重要度比较表

A	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	W
B ₁	1	1	2	2	0.3333
B ₂	1	1	2	2	0.3333
B ₃	1/2	1/2	1	1	0.1667
B ₄	1/2	1/2	1	1	0.1667

带入计算一致性比例, 有 $CI = 0$, $CR = 0$, 因为 CR 小于 0.1, 所以一致性检验通过。

可用类似方法, 通过危险部位 $C_1 \sim C_7$ 、 $C_8 \sim C_{22}$ 、 $C_{23} \sim C_{25}$ 、 $C_{26} \sim C_{28}$ 分布对 $B_1 \sim B_4$ 层的影响因素进行重要度建表。由于篇幅所限, 这里仅给出最终权重结果, 即表 3 中 $B_1 \sim B_4$ 列, 且所有分层 CR 均小于 0.1, 满足一致性检验。利用上层层次单排序的结果, 以上层元素的组合权重为权数, 计算对应本层各元素的加权, 所得结果即为该层元素的组合权重[12]。进行层次总排序, 结果如表 4 中“权重总排序”列所示。由此可得到 CPR1000 型机组所有危险因素的权重, 进一步可即可按照权重对危险性进行排序、分类, 以便进一步措施的指定。

Table 4. Total ranking list of hazardous parts weighting
表 4. 危险部位权重总排序表

A	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	权重总排序	危险性总排序
	0.3333	0.3333	0.1667	0.1667		
C ₁	0.2775	—	—	—	0.092491	3
C ₂	0.2775	—	—	—	0.092491	3
C ₃	0.1764	—	—	—	0.058794	6
C ₄	0.1136	—	—	—	0.037863	10
C ₅	0.0734	—	—	—	0.024464	17
C ₆	0.0482	—	—	—	0.016065	20
C ₇	0.0334	—	—	—	0.011132	24
C ₈	—	0.1835	—	—	0.061161	5
C ₉	—	0.1247	—	—	0.041562	7
C ₁₀	—	0.1247	—	—	0.041562	7
C ₁₁	—	0.0821	—	—	0.027364	15
C ₁₂	—	0.0821	—	—	0.027364	15
C ₁₃	—	0.0538	—	—	0.017931	18
C ₁₄	—	0.0538	—	—	0.017931	18
C ₁₅	—	0.0350	—	—	0.011666	21
C ₁₆	—	0.0350	—	—	0.011666	21
C ₁₇	—	0.1247	—	—	0.041563	7
C ₁₈	—	0.0237	—	—	0.007899	25
C ₁₉	—	0.0350	—	—	0.011666	21
C ₂₀	—	0.0169	—	—	0.005633	26
C ₂₁	—	0.0125	—	—	0.004166	27
C ₂₂	—	0.0125	—	—	0.004166	27
C ₂₃	—	—	0.6000	—	0.100020	1
C ₂₄	—	—	0.2000	—	0.033340	11

Continued

C ₂₅	—	—	0.2000	—	0.033340	11
C ₂₆	—	—	—	0.6000	0.100020	1
C ₂₇	—	—	—	0.2000	0.033340	11
C ₂₈	—	—	—	0.2000	0.033340	11

通过分析发现最重要的因素是 C₂₃ (通风系统发生故障)和 C₂₆ (氢气处理装置发生故障), 所以要经常排查设备和装置是否能正常运行。其次 C₁ (明火)与 C₂ (静电火花)也是造成氢气火灾发生的重要因素, 这其中静电往往容易被忽视。同时也表明, 尽管生产过程中产生或逸出的氢气(C₁₂~C₁₆、C₁₈~C₂₂)很难完全避免, 但在装置正常运行时其引发燃爆的可能性较低。

3.3. 氢气风险与应急防控措施

根据以上事故树 - 层次方法分析结果, 归纳起来可采取如下措施降低氢气火灾发生。

1) 加强排风系统的维护, 包括排风设备定期的检查(每周的检查次数最好不要少于 1 次), 对氢气易聚集的区域加强通风。尽量使用防爆型机械通风方式, 预防一旦出现危险状况, 不能及时排除氢气, 氢气含量逐渐达到 4%, 达到燃烧爆炸的临界点。

2) 重点排查可能导致氢气燃烧爆炸的火源, 如雷击导致的火源。要对接地装备进行检查, 对系统附近的地阻进行定期测定, 一旦发现不符合标准, 一定要进行改进。避免发生氢气超标, 因为火源的因素而导致的氢气燃烧和爆炸。

3) 定期对于核电厂的各个系统进行排查, 对氢气含量要实时监测, 一旦发生氢气聚集接近安全临界值, 一定要及时处置; 对于没有条件进行实时监测的地方, 一定要经常定期测量。

4) 经常检查氢气处理设备, 一旦发生氢气超标, 设备能够及时减少氢气, 避免事故发生。

5) 使用计算模拟软件对于一旦发生的泄漏等危险条件进行模拟, 便于在紧急时刻, 控制危险和人员疏散, 把损失控制在最小范围内。

4. 结论

核电厂结构复杂, 危险源因素多, 本文在对核电厂生产条件调研基础上, 采用事故树 - 层次分析法, 可定量分析氢气爆炸事故中各因素的影响。首先建立氢气燃烧爆炸事故树, 对导致核电厂氢气燃烧爆炸的因素进行定性分析, 然后对核电厂设计氢气安全的相关工作进行一些建议, 并找出所有径集和割集。进一步, 结合层次分析法对可能导致核电厂氢气燃烧爆炸的因素进行权重排序, 定量分析后发现通风系统故障和氢气预处理装置故障对燃爆风险最高, 其次是可能出现的明火和静电火花。本文为氢气安全工作提供一定的科学依据, 以期减少氢气燃烧爆炸事故。

基金项目

华侨大学高层次人才启动项目(16BS506), 华侨大学青年教师科技创新资助计划(ZQN-PY403), 中国科技大学火灾科学国家重点实验室开放课题(HZ2018-KF09)。

参考文献

- [1] Holt, M., Campbell, R.J. and Nikitin, M.B. (2012) Fukushima Nuclear Disaster. Congressional Research Service Reports.
- [2] 牛东晓, 宋宗耘. 基于熵值法和物元可拓模型的核电站安全运行状态评价[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(5): 25-29.
- [3] 肖国华, 孙金华. 高压氢气泄漏自燃研究现状及展望[J]. 安全与环境学报, 2009, 9(4): 125-129.

- [4] 张洪江, 黄同林, 伍丽萍, 等. 化工园区火灾风险控制对策研究[J]. 消防科学与技术, 2015, 34(4): 533-535.
- [5] James, H., Harris, M.J. and Hall, S.F. (1992) Comparison of Event Tree, Fault Tree and Markov Methods for Probabilistic Safety Assessment and Application to Accident Mitigation. Institution of Chemical Engineers, United Kingdom.
- [6] 张村峰, 卞奇侃, 蒋军成. 基于“事故树-层次分析法”的高校学生宿舍火灾风险分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2011(10): 100-105.
- [7] Labib, A. and Harris, M.J. (2015) Learning How to Learn from Failures: The Fukushima Nuclear Disaster. *Engineering Failure Analysis*, **47**, 117-128. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.10.002>
- [8] Saghafi, M. and Ghofrani, M.B. (2016) Accident Management Support Tools in Nuclear Power Plants: A Post-Fukushima Review. *Progress in Nuclear Energy*, **92**, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2016.06.006>
- [9] Fesenko, S.V., Alexakhin, R.M., Balonov, M.I., et al. (2007) An Extended Critical Review of Twenty Years of Countermeasures Used in Agriculture after the Chernobyl Accident. *Science of the Total Environment*, **383**, 1-24. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.05.011>
- [10] 魏巍. 核电厂严重事故关键仿真模型及耦合技术研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [11] 吕跃进, 张维, 曾雪兰. 指数标度与 1~9 标度互不相容及其比较研究[J]. 工程数学学报, 2003(8): 77-81.
- [12] 洪志国, 李焱. 层次分析法中高阶平均随机一致性指标(RI)的计算[J]. 计算机工程与应用, 2002, 38(12): 45-47.