

基于 WBS - RBS - BN 的蓄电池充电区域 氢气火灾爆炸事故研究

王延瞳, 许开立, 李 力, 张津嘉

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 通过现场测试,明确了蓄电池充电区域氢气浓度分布规律. 通过 WBS - RBS 分析方法,得出蓄电池充电区域氢气火灾爆炸事故风险事件耦合矩阵,以此为依据得到氢气火灾爆炸事故故障树,将故障树转化为贝叶斯网络,使用 GeNIe 软件计算蓄电池充电区域氢气爆炸事故发生概率为 $2.688e-4$. 通过贝叶斯网络双向推导功能,计算氢气火灾爆炸事故发生条件下基本事件的后验概率,从而分析出导致事故发生的安全技术或管理的薄弱环节为人体静电、操作工人抽烟、金属部件碰撞、蓄电池过充、蓄电池破裂和机械排风装置故障,并提出了相应的对策措施,降低了蓄电池充电区域发生氢气火灾爆炸事故的风险.

关 键 词: 蓄电池充电区域;爆炸事故;WBS - RBS;贝叶斯网络;后验概率

中图分类号: X 913.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005 - 3026(2018)06 - 0886 - 06

Study on Hydrogen Fire and Explosion Accident in Battery Charging Area Based on WBS-RBS-BN

WANG Yan-tong, XU Kai-li, LI Li, ZHANG Jin-jia

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: XU Kai-li, E-mail: kaili_xu65@126.com)

Abstract: Through field tests, the distribution of hydrogen concentration in the battery charging area was clarified. Based on the WBS-RBS analysis method, the coupling matrices of the risk events of the hydrogen fire and explosion accident in the battery charging area were obtained. Then, the fault tree of hydrogen fire and explosion accident was obtained. After then the fault tree was transformed into a Bayesian network. Thus the probability of the hydrogen fire or explosion accident in the battery charging area calculated by the GeNIe is $2.688e-4$. Through the bidirectional reasoning function of the Bayesian network, the posterior probability of the basic events under the condition of hydrogen fire and explosion accident was calculated. The safety technology or management weaknesses leading to the occurrence of the accident are: electrostatic discharge, operator smoking, metal collision, battery overcharging, battery rupture and mechanical exhaust system failure. The corresponding countermeasures are clarified to reduce the hydrogen fire and explosion accident risk of the battery charging area.

Key words: battery charging area; explosion accident; WBS-RBS; Bayesian network; posterior probability

工业生产中,铅酸蓄电池得到了广泛应用. 铅酸蓄电池在充电过程中会释放氢气,如氢气在充电区域内积聚且浓度达到爆炸极限范围,遇到火源就会发生蓄电池充电区域氢气火灾爆炸事故.

曹喆等分析了潜艇用蓄电池充电过程中的氢气释放规律^[1]. 李发荣对铅酸蓄电池室燃爆事故进行分析,明确了导致事故发生的基本事件,并提出了相关安全技术或管理措施^[2]. 杨振华、王健等研

究了铅酸蓄电池爆炸的原因,明确了使用过程中的注意事项^[3-4].以往研究对蓄电池氢气释放规律进行了探索研究,并定性分析了蓄电池爆炸事故的原因,对于预防蓄电池充电区域氢气火灾爆炸事故有指导意义,但是没有能够将蓄电池充电区域氢气火灾爆炸事故风险值进行量化计算,同时定性分析出的风险因素也存在分析研究人员经验差异所带来的不全面和不准确的缺点.

本文对蓄电池充电区域氢气浓度分布进行现场测试后,明确了蓄电池充电区域氢气浓度分布规律.并提出一种将 WBS - RBS 分析与 BN 网络相结合的定量风险分析方法.通过将蓄电池充电过程进行工作分解 WBS (work breakdown structure),将充电过程发生爆炸事故进行风险分解 RBS (risk breakdown structure),形成 WBS - RBS 耦合矩阵,得到导致蓄电池充电区域发生爆炸事故的风险事件,以风险事件作为基本事件,构建蓄电池充电区域氢气爆炸事故故障树,将故障树转化为贝叶斯网络后,利用美国匹兹堡大学开发的 GeNIe 软件对蓄电池充电区域氢气火灾爆炸事故发生概率和基本事件后验概率进行计算,明确导致事故发生的薄弱环节,提出措施以降低蓄电池充电区域氢气火灾爆炸事故风险.

1 现场测试

以某合资汽车公司某铅酸蓄电池充电区域为调研对象,进行现场测试.该充电区域中,蓄电池容量及数量如表 1 所示.测试过程中使用株洲市拓达电子有限公司生产的 S10 - H2 - A 型电化学式氢气浓度变送器.3 个变送器最大量程分别为 $(500, 2\,000 \text{ 和 } 10\,000) \times 10^{-6}$,分别放置在充电区域底部、中部和顶部.记录主机型号为 TX2100 - 04 型,测量中每 5 s 记录一个数据,测试结果如图 1 所示.

表 1 某充电区域蓄电池容量及数目		
Table 1 Number and content of batteries in the charging area		
电池容量/Ah	电池数目	总容量/Ah
330	7	2 310
345	8	2 760
465	16	7 440
475	40	19 000
500	9	4 500
550	21	11 550
620	1	620
700	39	27 300
930	4	3 720

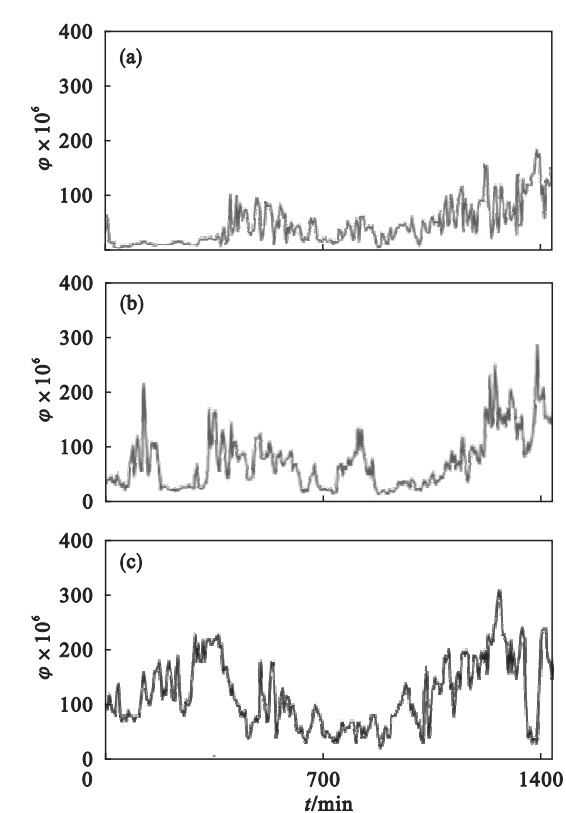


图 1 蓄电池充电间氢气浓度分布规律
Fig. 1 Distribution of hydrogen concentration in the battery charging area
(a) —底部; (b) —中部; (c) —顶部.

测试结果表明,氢气由于扩散作用而存在于整个充电区域内.在同一时刻随着充电区域垂直高度的增加,氢气浓度呈现出增长趋势.且区域内不同高度处氢气浓度大体表现出同时增加或减少的规律.充电区域地面处、中部以及顶部氢气体积分数最大值分别为 $(185, 285, 311) \times 10^{-6}$,存在发生氢气积聚而导致火灾爆炸事故的风险.

2 WBS - RBS - BN 定量风险分析模型

2.1 WBS - RBS

WBS - RBS 分析是由 Hillson 提出的风险分析方法^[5-6],该方法最早应用于软件开发领域的风险分析.该方法通过得到工作分解和风险分解的耦合矩阵,可以系统全面分析各类风险因素. WBS - RBS 分析分为以下三个步骤:①构建工作分解 WBS 结构;②构建风险分解 RBS 结构;③以 WBS 结构作为矩阵的行,以 RBS 结构作为矩阵的列,建立耦合矩阵.

如图 2 所示,耦合矩阵中 1 代表该事件具有一定的风险;0 代表该事件不具有风险.采用此方

法来分析风险事件,可以减少由于人员经验不同及主观影响带来的分析差异,最大限度地保证分析结果的全面准确.

2.2 BN 及 FTA

贝叶斯网络(Bayesian network, BN),又称贝叶斯置信度网络(Bayesian belief network, BBN)^[7-8],通过网络图结合概率论,建立推理模型,使不确定推理变得更加直观和清晰.其本质就是计算条件频率分布,如式(1)所示.

$$P(B|A) = \frac{P(A|B) \times P(B)}{P(A)}.$$
 (1)

式中: $P(B|A)$ 为事件 A 发生时事件 B 发生的概率; $P(A)$, $P(B)$ 分别为事件 A,B 发生的概率; $P(A|B)$ 为事件 B 发生时事件 A 发生的概率.

贝叶斯网络中的结点与故障树中的事件是一一对应的,故障树中的事件也正是建立贝叶斯网络所需结点的完整集合.将故障树中的事件(顶事件、中间事件和底事件)映射为贝叶斯网络中的节点,重复事件只保留一个节点^[9-10].相应基本事件的发生概率映射为贝叶斯网络中父节点的先验概率^[11].结合故障树中各事件的关系,来明确贝叶斯网络中各节点之间的连接^[12].

2.3 WBS – RBS – BN 定量风险分析模型

WBS – RBS – BN 定量风险分析模型的分析步骤如下:

- 1) 将蓄电池充电间所进行的工作按照层级分解为作业包,形成 WBS 分解结构;
- 2) 将蓄电池充电间氢气爆炸事故风险因素按照层级分解为风险因素集,形成 RBS 分解结构;
- 3) 以 WBS 分解出的作业包为行向量,以 RBS 分解出的风险因素集为列向量,构建 WBS – RBS 耦合矩阵(图 2),并判断风险事件;
- 4) 将分析出的风险事件进行划分,作为蓄电池充电间氢气爆炸事故故障树的基本事件,得到故障树;
- 5) 将故障树转化为贝叶斯网络,利用贝叶斯网络双向推理功能,进行事故发生概率和基本事件后验概率的计算;
- 6) 根据后验概率值大小得出导致事故发生的事件排序;
- 7) 有针对性地提出相应的安全技术或管理措施,降低事故风险.

3 实例应用

针对某合资汽车有限公司蓄电池充电区域,

构建 WBS – RBS – BN 定量风险分析模型.

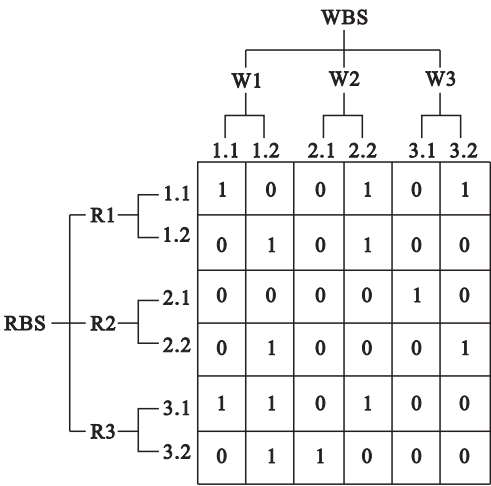


图 2 WBS – RBS 耦合矩阵
Fig. 2 Coupling matrix of WBS-RBS

3.1 构建 WBS – RBS 耦合矩阵

蓄电池充电区域内完成的主要工作有蓄电池装运、蓄电池充电、蓄电池检查、通风换气和维护保养五个方面.将其进一步划分,可得到蓄电池充电间工作分解结构 WBS,如图 3 所示.

蓄电池充电间氢气火灾爆炸事故主要风险因素为静电火花、明火、电气火花、撞击火花、排风系统故障、氢气积聚六个方面.蓄电池充电间风险因素分解结构 RBS,如图 4 所示.

根据以上分析,可以得到蓄电池充电间氢气爆炸事故的 WBS – RBS 耦合矩阵,如表 2 所示,矩阵中标注 1 的代表一个具体风险事件,标注 0 的代表没有风险.

从 WBS – RBS 耦合矩阵中可以看出,可以导致蓄电池充电区域静电火花产生的基本事件有:W11R1、W12R1、W13R1、W14R1、W33R1、W53R1 和 W54R1,在装卸、运输蓄电池和清理蓄电池极柱锈蚀工作时,各部件之间的摩擦或操作工人体所带静电,均可能产生静电火花,消静电装置失效也可导致产生静电火花.可以导致明火产生的基本事件有:W14R2,即焊接等动火作业以及工人在充电区域内抽烟等均可能产生明火.可以导致电气火花产生的基本事件有:W11R3、W12R3、W13R3、W21R3、W22R3、W33R3、W34R3、W42R3、W52R3 和 W53R3,在拆装蓄电池、连接蓄电池和充电装置、维修金属工具与电极接触时,由于操作不当、充电极硫化锈蚀或电极短路等情况,均可产生电气火花,同时氢气探测器或其他电器设备防爆性能失效也可产生电气火花.可以导致撞击火花的基本事件有:W11R4、W12R4、W13R4 和 W34R4,在蓄电池装卸运输过

程中,金属部件的碰撞,铁制工具的相互碰撞等均可以产生碰撞火花. 可以导致氢气积聚的基本事件有:W22R6、W33R6,由于充电电流电压过大或充电极锈蚀,造成过充,蓄电池产气量增大;W32R6 排气孔堵塞造成氢气在蓄电池中无法排

出,气压不断增大使电池破裂,氢气逸出;W41R6、W42R6 是因为自然通风和机械通风不良,造成区域内氢气积聚;由于排风风机无法运转,造成 W42R5 排风故障.

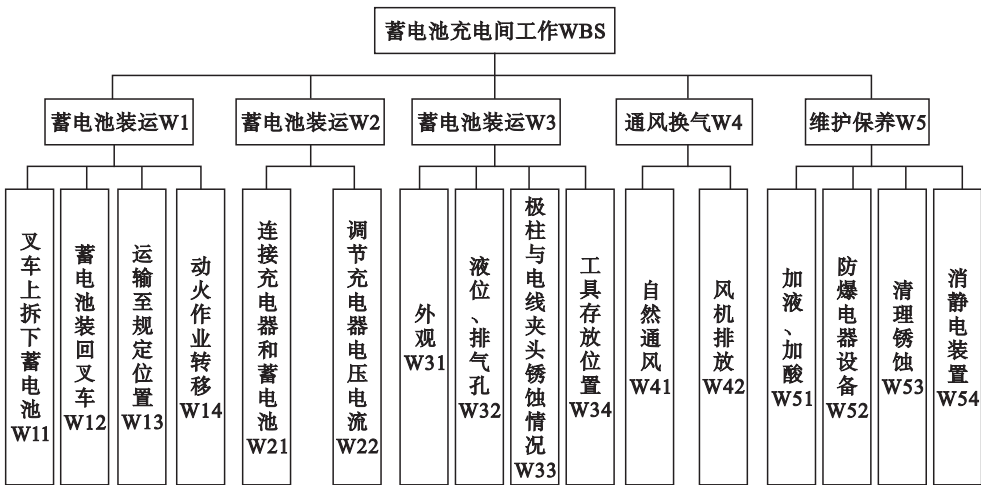


图 3 蓄电池充电间工作分解结构
Fig. 3 WBS of battery charging area

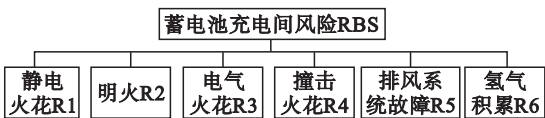


图 4 蓄电池充电间风险分解结构
Fig. 4 RBS of battery charging area

3. 2 BN - FTA 定量风险分析

对以上分析出的风险事件进行归类划分后,得到蓄电池充电区域氢气火灾爆炸事故故障树基本事件,画出蓄电池充电区域氢气爆炸事故故障树,如图 5 所示,将其转化为贝叶斯网络如图 6 所示,符号说明及事件概率值如表 3 所示.

表 2 蓄电池充电间氢气爆炸事故 WBS - RBS 耦合矩阵

Table 2 WBS-RBS coupling matrix of the hydrogen explosion accident in the battery charging area

		蓄电池充电间工作 WBS															
		W1				W2		W3				W4		W5			
		W11	W12	W13	W14	W21	W22	W31	W32	W33	W34	W41	W42	W51	W52	W53	W54
蓄电池充电间风险 RBS	R1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1
	R2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	R3	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0
	R4	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	R5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	R6	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0

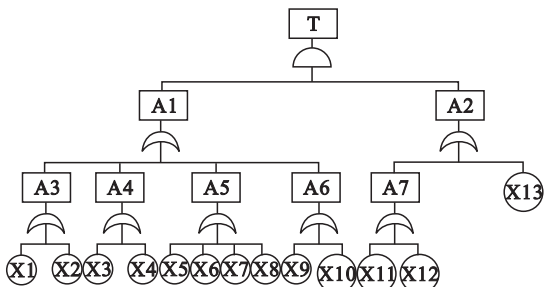


图 5 蓄电池充电区域氢气火灾爆炸事故故障树
Fig. 5 Fault tree of hydrogen explosion in the battery charging area

结合企业及相应设备供应商提供的故障数据,用美国匹兹堡大学开发的 BN 计算软件 GeNIe 进行定量风险分析. 蓄电池充电区域氢气爆炸事故发生概率为 $2.688e-4$. 氢气火灾爆炸事故发生情况下基本事件后验概率如表 3 所示,明确了蓄电池充电区域安全技术或管理上的薄弱环节为人体静电、操作工人抽烟、金属部件碰撞、蓄电池过充、蓄电池破裂和机械排风装置故障.

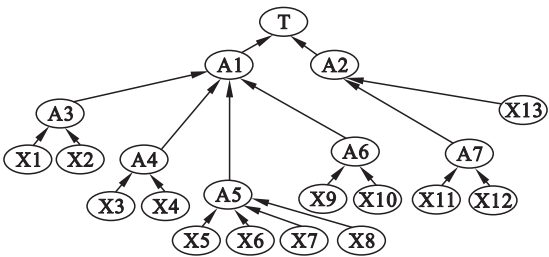


图6 蓄电池充电区域氢气爆炸事故贝叶斯网络
Fig. 6 Bayesian network of hydrogen explosion in the battery charging area

表 3 符号说明及事件概率值
Table 3 Symbol description and event probabilities

符号	事件	先验概率	后验概率
T	蓄电池充电间氢气爆炸事故	—	—
A1	火源	—	—
A2	氢气积聚	—	—
A3	静电火花	—	—
A4	明火	—	—
A5	电气火花	—	—
A6	撞击火花	—	—
A7	大量产氢	—	—
X1	防静电接地装置失效	6.85e-04	3.321e-03
X2	人体静电	2.495e-02	1.210e-01
X3	动火作业	1.644e-02	7.971e-02
X4	操作工人抽烟	1.165e-01	5.649e-01
X5	充电器电极和蓄电池电极连接不牢	3.56e-03	1.726e-02
X6	电极短路	5.95e-04	2.885e-03
X7	氢气探测器防爆性能失效	4.87e-04	2.361e-03
X8	防爆电器损坏	1.776e-02	8.611e-02
X9	金属部件碰撞	2.856e-02	1.385e-01
X10	铁质工具碰撞	1.296e-02	6.283e-02
X11	蓄电池过充	5.32e-04	4.081e-01
X12	蓄电池排气孔堵塞,内部气压增大,蓄电池破裂,氢气大量释放	2.85e-04	2.187e-01
X13	机械排风装置故障	4.87e-04	3.736e-01

4 结 论

- 1) 蓄电池充电区域垂直切面上均有氢气存在;随着垂直高度的增加,氢气浓度呈现增长趋势;同一时刻不同高度处,氢气浓度变化趋势一致。
- 2) 建立了 WBS-RBS-BN 定量风险分析模型。
- 3) 蓄电池充电区域发生氢气火灾爆炸事故的概率为 2.688e-4。

针对以上定量风险分析结果,提出相应的安全技术或管理措施.在蓄电池充电区域工作的操作人员应穿防静电工作服,并且设置人体消静电装置,防止产生静电火花.区域内禁止吸烟,工作过程中应使用不发火金属工具,在蓄电池吊装过程中应避免碰撞.蓄电池充电装置应定期检查,防止故障发生,严禁蓄电池出现过充电现象.定期检查蓄电池排气孔,确保蓄电池排气孔通畅,能及时排出蓄电池内产生的氢气.定期检查机械排风装置,确保区域内气体流动,防止氢气积聚。

4) 蓄电池充电区域安全技术或管理措施存在的薄弱环节为人体静电、操作工人抽烟、金属部件碰撞、蓄电池过充、蓄电池破裂和机械排风装置故障,并提出了相应措施,可有效降低发生氢气火灾爆炸事故的风险。

参考文献:

[1] 曹喆,张洪彬,韦桂欢. 潜艇蓄电池充放电过程释放氢气规律研究[J]. 舰船科学技术,2008,30(6):301-303.
(Cao Zhe,Zhang Hong-bin,Wei Gui-huan. The rule research of hydrogen released from lead-acid batteries during the charging and discharging process [J]. Ship Science and Technology,2008,30(6):301-303.)

-

microorganism activities in the subsurface wastewater infiltration system [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2016, 57 (12) : 5350 - 5357.

[10] Chang J, Fan X, Sun H Y, et al. Plant species richness enhances nitrous oxide emissions in microcosms of constructed wetlands [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 64 (3) : 108 - 115.

[11] 胡泓, 王东启, 李杨杰, 等. 崇明东滩芦苇湿地温室气体排放通量及其影响因素 [J]. 环境科学研究, 2014, 27 (1) : 43 - 50.

(Hu Hong, Wang Dong-qi, Li Yang-jie, et al. Greenhouse gases fluxes at Chongming Dongtan *Phragmites australis* wetland and the influencing factors [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27 (1) : 43 - 50.)

[12] Pan J, Fei H X, Song S Y, et al. Effects of intermittent aeration on pollutants removal in subsurface wastewater infiltration system [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 191 (9) : 327 - 331.