

放射性废物桶内干燥整备研究进展

贾梅兰, 梁栋, 程伟, 安鸿翔, 高超, 柳兆峰, 孙庆红, 范智文

(中国辐射防护研究院, 太原 030006)

摘要: 桶内干燥具有很高的减容比, 已经逐渐被国外核电站用来处理放射性废液, 为我国核电废物贮存和处理提供了一条新的途径。详细介绍了电加热、热风加热和微波加热3种桶内干燥装置的研究应用实例, 主要内容包括干燥装置的过程控制、干燥产量(蒸发速率和进料速率)、干燥产物的含水率和减容比。通过分析对比得出, 电加热和热空气加热型装置投入产出高, 但仅适合流动和传热好的废物整备; 微波加热型装置前期投入大, 适用却更广, 尤其适合底泥等一类含有有机物质的废物。

关键词: 桶内干燥; 放射性; 废物处理

中图分类号: TL942 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2012)05-0056-06

Research Progress of Radioactive Waste In-drum Drying

JIA Mei-lan, LIANG Dong, CHENG Wei, AN Hong-xiang, GAO Chao,

LIU Zhao-feng, SUN Qing-hong, FAN Zhi-wen

(China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China)

Abstract: In-drum drying technology, as a volume reduction technology, has been used for conditioning radioactivity wastes in NPPs abroad. Research and application practice of in-drum drying equipments, including electrical heating, hot air heating, and microwave heating devices, were introduced from the aspects of process control, drying output, water content, and volume reduction rate. It was concluded from analysis that electrical heating and hot air heating devices has higher input-output ratio, which is only suitable for flowing and thermal conductive waste equipment; although microwave heating device has higher initial investment, it has wide application range, especially applicable for organic containing waste such as base mud.

Key words: in-drum drying; radioactivity; waste treatment

水泥固化放射性废液, 因其操作简单、价格低廉以及安全可靠等优点, 被世界各国的核电站广泛采用。我国除台湾地区外, 已运行的及在建的压水堆核电站大部分都采用了水泥固化技术处理放射性废

液^[1], 但是, 水泥固化增容大, 增容比通常在2~3之间, 既不符合放射性废物最小化的原则, 也使处置费用增加。很多国家已经开始寻求一些能减容的处理手段, 诸如焚烧、玻璃固化、热压、造粒和浓缩蒸发

收稿日期: 2012-05-16

基金项目: 中核集团优先发展项目(中核发[2010]262号)

作者简介: 贾梅兰(1988—), 女, 山西运城人, 硕士研究生, 主要研究方向为放射性废物处理处置。

等。其中,桶内干燥将废物处理的单元最大限度地简化,最大程度地减少了放射性核素的外扩散。同时,它减小了废物的体积,缓解核电产业中湿废物贮存的空间压力。

1 桶内干燥技术

1.1 原理与工艺

桶内干燥的原理简单,就是湿物料在桶内受热升温,将其中含有的水分转化为蒸汽排放,干燥后的固体废物则留在桶内。

就目前的研究进展而言,放射性废液桶内干燥采用的大部分都是成熟的技术,在技术上不存在问题。但是桶内干燥的传热特点决定了这种干燥方法的传热效率不会太高,虽然可以通过配备真空设备等方法提高其干燥速率,但是干燥时间还是会比较长。所以如何提高桶内干燥的干燥速率就成为目前研究的重点,而加热方式则是提高干燥速率的关键。

桶内干燥的加热方式可以是循环的热空气、布置在桶外的电加热带或者是微波加热装置等。目前采用较多的工艺是将放射性废液装入桶内,然后将桶运入干燥室内进行加热,去除物料中的水分,以达到减小废物体积的目的。加热产生的水蒸气经冷凝后,通过监测确定排放或再处理;留在桶内的干燥产物与桶一起经过整备后贮存或处置^[2]。

1.2 现状概述

20世纪80年代早期,一些国家就已经开始进行桶内干燥装置的研究。1996年,德国研究人员将放射性液体注入容器加热,然后利用排风系统将容器中的蒸发气体排出,以进行放射性废液的减容处理^[3]。2003年,德国 Gesellschaft für Nuklear Service mbH 公司继桶内真空干燥工艺之后又开发了一套小型桶内干燥装置。该装置采用最大功率为10 kW的加热装置对废料桶加热,利用射流产生的负压将干燥过程中产生的水蒸气带走,并冷凝成液体^[4]。美国橡树岭国家实验室、德国 Linn High Therm 公司进一步改进了装置,引入微波进行加热,并成功开展了多种模拟放射性废液和贮存罐中淤泥的桶内干燥试验,试验结果也取得了良好的效果^[6]。近十年来,国外已经开

发出几套工程装置,并进行了实践。

一般来讲,桶内干燥装置由进料系统、干燥系统和尾气处理系统3部分组成。其中进料系统和尾气处理系统都有成熟的技术及工业应用,目前比较成熟的桶内干燥装置,这两部分的结构大体类似,主要的不同点集中在加热方式和桶的布置方面。下面按照不同加热方式对桶内干燥实例的工艺流程和干燥效果进行介绍。

1.2.1 电加热干燥

电加热桶内干燥的实例主要有法国阿海法(AREVA)和巴西 Krsko 核电站的桶内干燥装置。

1.2.1.1 AREVA 桶内干燥装置

AREVA 在美国建造的 EPR 核电站中,采用电加热桶内干燥装置处理蒸残液、放射性淤泥和废树脂^[7]。装置采用电加热方式干燥,具体工艺流程如图1所示。

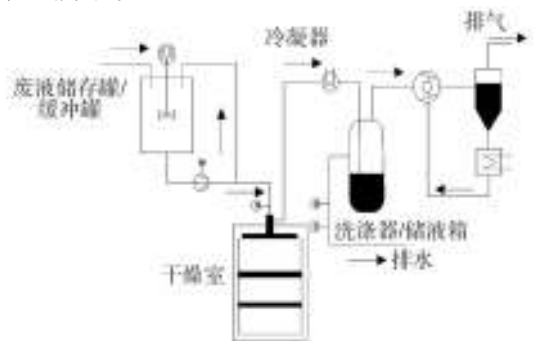


图1 法国阿海法集团放射性废液桶内干燥工艺流程

Fig. 1 In-drum drying process flow for radioactive waste (AREVA)

废液在缓冲罐内混合均匀,泵入干燥桶内;在输入阶段采取旁路循环模式,保证少量的废液进入桶内;干燥后的蒸汽经过洗涤冷凝后排放。干燥产物(如图2所示),放置在120 L的桶内,再放在200 L的桶内;两桶之间填充混凝土材料,满足贮存要求。

1.2.1.2 巴西 Krsko 核电站桶内干燥装置

Krsko 核电站引进了桶内干燥技术^[8],用于放射性含硼废液的处理,工艺流程与AREVA类似。

首先,将添加剂和浓缩液在缓冲罐内混合均匀后,采用旁路循环输入干燥桶内,并在旁路上留有取样口;采用批次干燥方式,冷凝后的水进入电站排污系统。此外,为了保证输入管路的盐垢尽可能少,电站在干燥过程中定期使用去离子水冲洗输入管路。干燥系统采取分段加热模式,节省电能。至2006



图2 干燥产物

Fig. 2 Drying products

年,该装置生产了102个废物包,总体积约为 21 m^3 。干燥产物结果分析表明,电加热桶内干燥放射性废液得到的产物含水率(质量分数,全文同)可达到5%(无游离水),减容比可达20,放射性分布更均匀。 β/γ 放射性浓度范围是 $5.58 \times 10^2 \sim 3.56 \times 10^4 \text{ Bq/g}$; α 放射性浓度范围在 $4.09 \times 10^{-2} \sim 4.16 \text{ Bq/g}$ 。废物包的表面剂量率在 $4.50 \times 10^2 \sim 2.50 \times 10^5 \mu \text{ Sv/h}^{[8]}$ 。

1.2.2 热风干燥

德国汉莎公司研制了采用热风加热方式的桶内干燥不同废物的单桶和多桶干燥设备^[9-11]。

1.2.2.1 单桶干燥装置

单桶桶内干燥的工艺流程如下(如图3所示):空桶通过传送辊道进入干燥室;当进料至设定值后将热空气引入开始加热,排除的蒸汽经冷凝后被收集在贮液槽内,桶内干燥产物至预设体积后停止加热并冷却至 50°C 时,干燥过程停止,从加热室移出装有干燥产物的废物桶进行封装后再行贮存或处置^[9]。

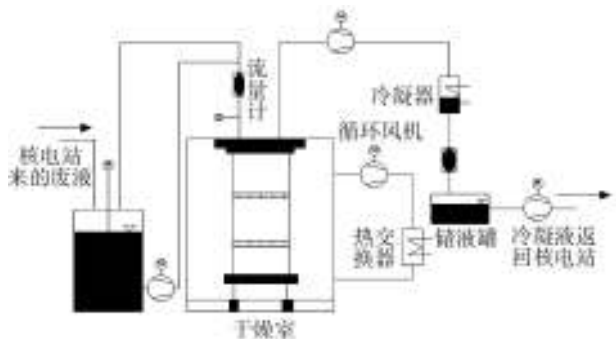


图3 德国汉莎放射性废液单桶桶内干燥工艺流程

Fig. 3 Single barrel in-drum drying process flow for radioactive waste, Hansa

单桶干燥系统技术参数如下:加热器 5 kW ,热交换器 10 kW ,冷凝器 10 kW ,循环风机 2.3 kW ,干燥

室操作压力 $5 \sim 7 \text{ kPa}$,平均蒸发速率 $3 \sim 4 \text{ L/h}$ 。

1.2.2.2 多桶干燥装置

德国汉莎公司放射性废液多桶桶内干燥的工艺流程如下:首先,干燥桶通过输送装置进入干燥室,按照一定摆放方式(如对于 200 L 的桶,平面按 3×5 矩阵形式摆放,共2层,如图4所示);然后,采用与单桶干燥一致的操作流程进行干燥^[10]。



图4 干燥室内容器布置

Fig. 4 Drum positioning inside the drying chamber

多桶干燥的技术参数如下:干燥器内部尺寸是长 $\times$ 宽 $\times$ 高= $6.1 \text{ m} \times 2.5 \text{ m} \times 2.6 \text{ m}$;能容纳48个 180 L 桶或30个 200 L 桶;运行电压: 380 V ,总功率: 70 kW 。

1.2.3 微波干燥

微波加热与常规加热不同,产热源位于物料内部。当微波射入放射性废液内部时,使水等极性分子随微波的频率作同步高速旋转,产生摩擦,导致物料表面和内部同时升温,使大量的水分子从物料逸出,达到物料干燥的目的^[12]。微波干燥^[13]具有如下特点:1)干燥速率大,缩短了干燥周期;2)加热均匀;3)热能利用率高;4)无惯性热,过程控制迅速;5)有一定的电磁辐射,需要防护。

1.2.3.1 德国Linn High Therm公司桶内干燥装置

Linn High Therm公司开发了利用微波加热进行桶内干燥的技术,并建立了试验工厂,通过监测进出容器的质量流量,容器内的温度、压力及液位,控制微波的能量、进料量,成功进行了模拟废液($w(\text{H}_2\text{O})=82\%$, $w(\text{Na}_2\text{SO}_4)=16\%$, $w(\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3)=1\%$, $w(\text{其他添加剂})=1\%$)的干燥处理^[14],装置如图5所示。

试验过程中,首先启动底部辅助系统预热,向桶内泵入一定量的放射性废液,然后启动微波加热,蒸汽温度稳定时再次进料;最后一次进料后,继续干燥至容器内剩余的液体结晶。干燥过程中测量进入物

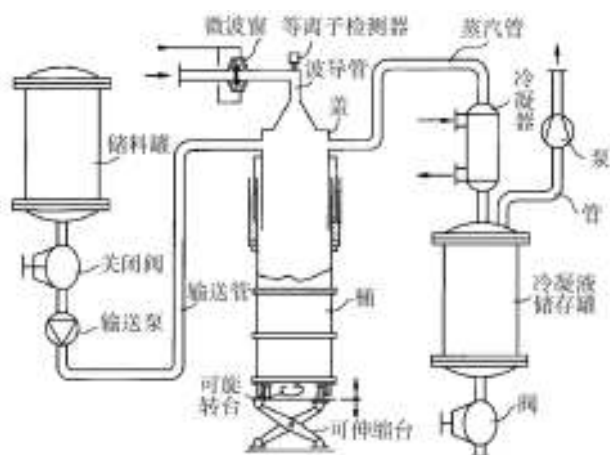


图5 Linn High Therm公司桶内微波干燥装置

Fig. 5 Microwave in-drum drying device of Linn High Therm Company

料量和排出物料量、容器内液位和温度、干燥盐层上

的液层厚度等参数。整个干燥过程中,桶内和微波发生器都处于负压状态,其绝对压力为90~100 kPa。蒸汽由风机抽出后通过气溶胶去除器,冷凝排放^[6]。

干燥模拟废液的试验结果见表1。其蒸发速率为7.0~7.5 kg/h,处理能力为8.8~10.4 kg/h。

多次试验发现,该装置对于不同组分和浓度的溶液干燥效果都很明显,同时还能降解部分有机组分。所得干燥产物的含水率都不超过1%,密度在2.3 g/cm³以上,蒸发速率达到7 L/h以上,单桶干燥周期只是电加热的1/10。

1.2.3.2 美国能源部桶内干燥装置

美国能源部利用微波在空腔内分布均匀的特性,成功实现了含超铀核素底泥的桶内干燥^[14],装置如图6所示。

表1 微波桶内干燥模拟废液试验结果

Table 1 Results of microwave drying simulant liquid

试验	干燥液体量/kg	微波能量/kW	干燥时间/h	获得干盐粉/kg	产生冷凝液/kg
1	1750	6	200	345	1405
2	1280	20	123	363	917

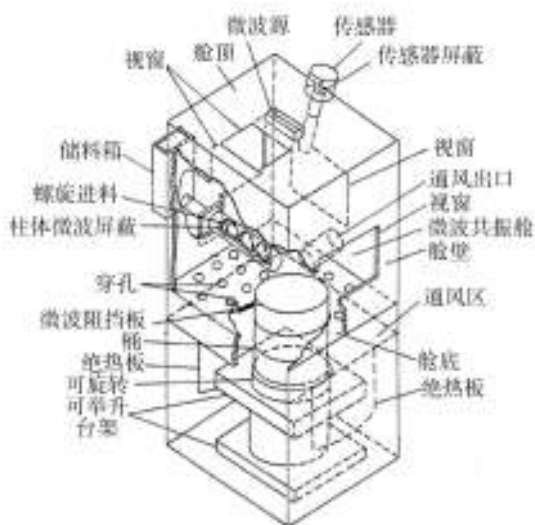


图6 美国DOE试验装置

Fig. 6 Test device of DOE, USA

1989年,在Rocky Flats采用上述装置多次处理了含有超铀核素的底泥。具体操作过程如下:首先,通过备料系统(磨料机、造粒机、多转盘直接干燥器等)预处理后放入储料器内,将120 L的废物桶放置

到绝缘材料制成的舱内并通过底台定位到共振舱底部的中心开口。然后,通过螺杆进料器从储料罐向桶内加入少量的废物料,启动微波源。待首次进料熔化后,连续进料,直到进入320 kg废物料并熔化后,停止微波加热。此时,将桶转移到冷却和监测台架上。趁物料还是熔融态时,取样分析物料特性并鉴定。桶内物料冷却固定后再通过定位系统移出手套箱操作系统。气态排除物由后端气体处理系统收集,采用傅立叶传感红外谱仪监测气体成分。悬浮颗粒由高效旋风器和高效过滤器去除;废物热解产生的NO_x和SO_x通过活性炭过滤塔除去。清洁处理后的气体才排入厂房内的多级高效过滤器。对尾气连续取样检测可知,铯系挥发性核素随尾气排到环境中的量很小,可以忽略不计^[15]。

小型冷试验中,使用8 L不锈钢容器,首次进料2 kg熔融后再进料2.5 kg,熔融态温度范围在1000~1300 ℃^[16],产物的平均密度为1.21 g/cm³,减容比为3.97。9次连续进料试验得到的产物密度为1.92 g/cm³,减容比为5.29。由此可以推断,连续进料热试验,减容比可以更高,废物密度可以更大^[17]。

中试规模中,在首次加料熔化后(约30 min后物料熔化),通过调整再次加料速率进行试验。试验发现,21 kW微波功率下平均进料速率为24.5 kg/h,产物平均密度为1.85 g/cm³,减容比为4.49^[17]。

后续的13组验证试验采用30~40 kW微波功率,60%废物装载质量。第1—6组不断调整操作参数,保证物料熔融。第7—8组采用碳钢桶,保持初始参数不变。第11—13组固定某一参数,调节其他参数,保证物料熔融。试验5得到的产物密度最大,为3.0 g/cm³,微波功率为30 kW,进料速率为23 kg/h。以上试验得到的产物密度在1.7~3 g/cm³之间,减容比应在4以上^[17]。

2 综合分析

3种加热方式桶内干燥的干燥效能以及优缺点见表2。

通过对3种加热方式桶内干燥装置的介绍和对比,桶内干燥整备技术主要优点有:

1) 桶内干燥整备技术是一种简化的干燥单元,桶内外没有物质交换,大大减少了对工作人员和公众的辐照影响,工艺运行对人员和公众是安全的。

2) 处理含超铀核素的底泥,操作温度达到1000~1300 ℃,尾气经过高效过滤器后仅有氮氧化物、硫氧化物和微量的可挥发性锕系核素。由Lawrence Livermore Laboratory连续监测报告可知可挥发性锕系核素可忽略,不会对环境和公众造成影响。

3) 桶内干燥整备技术应用范围广泛,可以处理放射性废液、泥浆、废树脂和其他未压实的湿固体废物。

4) 桶内干燥整备技术减容效果很好,对于不同的废物减容比不同。处理放射性废液减容比最高可达到20,处理废树脂减容比最高可达到5。

表2 不同热源的桶内干燥装置对比

Table 2 Comparison of different drying facilities

热源	处理对象	平均蒸发速率	能量利用率	产物含水率	优点	缺点
电加热	含硼放射性废液	单桶,3~4 L/h*	工业上一般为50%	残液中5%; 树脂中小于30%	技术成熟;结构简单; 过程简单	能耗高;干燥不均匀,易产生粘壁;干燥周期长
热风	含硼放射性废液	单桶,5 kW时3~4 L/h	工业上一般为40%		结构简单,易于维护; 可采用多桶布置,提高干燥产量	干燥不均匀,易粘壁;干燥周期长
微波	含硼含硫盐溶液	6 kW时7~8 L/h	平均70%, 最高可达77.3%	小于1%	干燥速度快;加热均匀;热能利用率高	装置成本高;靠桶壁处含水率偏高,需要采取特殊的密封方式防止微波泄漏
	含超铀核素底泥	20 kW时24.5 L/h		2%~5%		

注:*表示与热空气加热传热传质理论相似,类比而得。

5) 桶内干燥整备技术与其他处理方式相比,费用低^[18]。微波桶内干燥费用和波兰特水泥固化、波兰特水泥/硅藻土混合固化、聚乙烯固化相比分别减少10.61,5.43,3.6 \$/kg。

6) 桶内干燥整备技术可实现手套箱内或远程操作,改善了工作环境。

7) 微波桶内干燥整备技术桶内不需要转动的机械部件、耐高温材料或电极,简化了维修操作;微波加热机理可以缩短干燥周期,并提高能量利用率,改善最终产物的性状。

桶内干燥整备技术还存在一些局限性:

1) 桶内干燥整备技术处理对象有限,主要是含水率高的放射性污染物。

2) 电加热或热风加热桶内干燥整备技术在处理某些传质效率低的废物时,需要增加扰动设施。

3) 热风加热桶内干燥整备技术需要热风供应系统,占用的空间大,在土地资源受限的厂区利用受限。

4) 微波桶内干燥整备技术的操作控制复杂,需要投入的成本较大。

由此可见,桶内干燥整备技术在处理放射性废液方面利大于弊,建成场址以外的废物集中处

理设施或是移动处理装置可以满足大多数用户的要求^[2]。桶内干燥整备技术虽然也存在一些限制,但是确实能有效降低废物体积,优化废物后续贮存和处置方案。就产物的干燥效果而言,微波桶内整备技术具有很强的优势,研究成功后效益也很明显,整备难处理的储罐底泥等切实可行。然而研究过程需要的诊断技术和获取数据的技术要求高,研究成本较电加热桶内干燥高。

3 我国研究现状

目前干燥和微波技术在放射性废液桶内干燥过程中的研究还没有报道。虽然中国辐射防护研究院已经开始进行放射性浓缩液和废树脂桶内干燥整备技术的研究,但处于起步阶段,与国外还存在着比较大的差距。浙江三门核电站引进了德国汉莎的桶内干燥装置和技术,但还未应用。

4 展望

综合考虑桶内干燥整备技术的特点和我国国情,同时考虑到我国核能利用的进一步深入,放射性废物的处理处置问题将会愈发突出。桶内干燥整备技术可以应用到放射性废液、废树脂和储存罐底泥的处理。因此,目前桶内干燥设备的研发对核电发展过程中三废治理有重要意义,能产生明显的经济效益和社会效益。限制桶内干燥整备技术的关键因素在于所处理物料的传热能力和控制桶内物料的加热程度及液面。改善传热能力有两条途径:1) 增加搅拌设备,此方法会带来搅拌器与桶的合理配合问题;2) 采用诸如微波等特殊的加热方式,此方法不需要转动部件,不涉及物料随搅拌器的移动造成放射性扩散问题,但是需要研究改善微波在桶内不同高度和不同径向的能量分布,减小微波的作用盲区。从技术实行来讲,增加搅拌器以及实现搅拌器和桶的合理配合在普通工业技术条件下应用成熟,只需要考虑如何实现桶内放射性物质不被载带或造成放射性扩散。微波需要将工业常用的 $TE_{1,0}$ 转化为 $TM_{1,0}$ ^[19]或者合理布置 $TE_{1,0}$ 的位置,还需要增加动态转动底台,防止微波在桶内径向或某高度上出现盲区;底台的转动需要程序控制,还需要增加诊断和数据获取

设备,便于过程参数控制优化。因此,从资金投入效益来讲,推荐优先研究电加热桶内干燥或热风桶内干燥装置,若研究经费充足,技术水平足够,可以进一步开展微波桶内整备技术研究解决处理周期长、粘壁等问题。为了保证桶内干燥技术的顺利实施,还需要展开相应接受和管理标准的研究工作。

致谢:本工作得到中国辐射防护研究院三废治理研究所废物处置技术研究室的同志大力支持,特此感谢!

参考文献:

- [1] 陈良,陈莉,李均华. 压水堆核电站放射性废液水泥固化技术分析[J]. 核动力工程,2009,30(2):113—116.
- [2] IAEA. Innovative Waste Treatment and Conditioning Technologies at Nuclear Power Plants[R]. IAEA-TECDOC-1504,2006:30—31.
- [3] ERBSE Dietmar, THIELE Reinhard, WALTER Helmut. Process and Filling Adapter for the In-drum Drying of Liquid Radioactive Waste:USP,5566727[P]. 1996—10—22.
- [4] OLDIGES Olaf, BLENSKI Hans-Jürgen. A New Small Drying Facility for Wet Radioactive Waste and Liquids[R]. WM'03 Conference,2003.
- [5] KANATA Dejan, KRO ELJ Vladislav, JANKOVI Milan, et al. Radioactive Waste Characteristics[R]. Proceedings of the International Conference Nuclear Energy for New Europe, 2007.
- [6] WETTEBORN K, GUTMANN A, LINN H, et al. Apparatus for Concentrating Salt-containing Solutions with Microwave Energy:USP,6080977[P]. 2000—06—27.
- [7] FRANK Richard. Radioactive Waste Management for US EPR[R]. WM Conference,2008.
- [8] KROSELJ V, JANKOVIC M. Characterization of In-drum Drying Products[R]. WM06 Conference,2006.
- [9] PROJEKT Hansa. Conditioning System for Concentrates[EB/OL]. <http://www.h-p-a.de/English/uploads/file/HPA10E-Tandem.pdf>. (余不详)
- [10] PROJEKT Hansa. Multi-drum Dryer[EB/OL]. <http://www.in-en.com/power/html/power-1036103662527383.html>. (余不详)
- [11] PROJEKT Hansa. Components and Installations for Conditioning of Radioactive Waste[EB/OL]. <http://www.h-p-a.de/english/uploads/file/HPA07E-Service.pdf>. (余不详)
- [12] 王进华. 聚四氟乙烯分散树脂的微波干燥研究[D]. 杭州:

(下转第97页)

模式对输出的影响,确定导致引信进入风险状态的失效模式,再根据表3分析相关的失效原因,分析结果见表4,判断第二环境力子程序与判断第一环境力子程序类似,故未给出。

通过分析发现读写EEPROM等几个影响非常严重的失效模式,但在引信设计中这些失效模式对应的风险都得到了较好的控制。在引信处理及使用的全过程中发现,该引信中没有设计绝火和泄能,其相应的风险未得到良好的控制。美国军用引信手册MIL-HDBK-757中提出能量泄漏的需求是存在的,以便在弹药瞎火时,爆炸物处理队能够在电发火电路安全有保障的条件下回收或移动弹药。故通过分析,应在该引信中增设绝火和泄能功能,以便在引信出现异常状态时,能使弹药进入安全状态。

4 总结

将软件失效模式影响分析技术用于对引信软件安全性的分析,总结了引信软件常见的失效模式,并在引信存储至清理的全过程中对某基于双微控制器的引信软件进行分析,发现了其中安全性设计中欠考虑的一个安全性问题。证明该方法的有效性,为引信软件安全性保证提供了一种可行的方法。

参考文献:

- [1] FORNOFF Jeffrey M. Scalable Software Evaluation Methodology and Tools[C]// UT: 55th Annual Fuze Conference. Salt Lake City, 2011. (余不详)
- [2] 杨辉,高敏. 引信软件安全性概念及分析方法[J]. 现代引信, 1998(4): 1—5.
- [3] 王卫民,陈亚旭,齐杏林. SFAT和PETRI网在引信软件安全性分析中的应用[C]// 第十三届引信学术年会. 重庆, 2003. (余不详)
- [4] 王卫民,陈亚旭,齐杏林. 基于PETRI网的引信软件安全性分析实例研究[C]// 第六届国际可靠性、维修性、安全性会议. 西安, 2004. (余不详)
- [5] 李世中,张亚,赵河明. 引信软件安全性分析方法初探[C]// 第六届国际可靠性、维修性、安全性会议. 西安, 2004. (余不详)
- [6] 崔俊杰,周春桂,张明荣. 环境对引信软件安全性接口影响研究[J]. 弹箭与制导学报, 2007, 27(2): 505—507.
- [7] 王静,齐杏林,吕静. 引信软件安全性仿真测试系统研究[J]. 军械工程学院学报, 2005, 17(3): 18—20.
- [8] PERRIN Max. New Safety Requirements Fuzing System Solutions[C]// MO: 54th Annual Fuze Conference. Kansas City, 2010. (余不详)
- [9] GODDARD P L. Validating the Safety of Embedded Real-Time Control Systems Using FMEA[C]// Reliability and Maintainability Symposium. Atlanta, 1993. (余不详)
- [10] 王丙磊. 系统级软件FMEA方法及辅助分析工具的研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2009.
- [11] GODDARD P L. Software FMEA Techniques[C]// Reliability and Maintainability Symposium. Los Angeles, California USA, 2000.
- [12] 浙江大学, 2006: 7—9.
- [13] 梁宝平. 干燥设备设计选型与应用实用手册[M]. 北京:北方工业出版社, 2006.
- [14] JOHNSON AJ, PETERSEN RD, SWANSON SD. Microwave Heating Apparatus and Method: USP, 4940865[P]. 1990-07-10.
- [15] DIXON D, ERLE R, ESCHEN V, et al. Microwave Solidification Development for Rocky Flats Waste[EB/OL]. [1994-04-01]. <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/120869-OncrNF/webviewable/120869.pdf>.
- [16] Sprenger G S, Petersen R D. Microwave Waste Processing Technology Overview[EB/OL]. [1995-04-01]. <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/120869-OncrNF/webviewable/120869.pdf>.
- [17] WHITE T L, BERRY J B. Microwave Processing of Radioactive Materials-1[R]. Dallas, Texas: American Chemical Society, 1989.
- [18] WHITE TL. Microwave Applicator for In-drum Processing of Radioactive Waste Slurry: USP, 5324485[P]. 1994-06-28.
- [19] ERLE R R, ESCHEN V G, SPRENGER G S. Optimization of Microwave Heating in an Existing Cubicle Cavity by Incorporating Additional Wave Guide and Control Components[R]. USDOE, 1995.

(上接第61页)