

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.11.017

核电能源领域用原位发泡硬质聚氨酯制备及工程化

苏有学,冯洪福

(陕西特种橡胶制品有限公司,西安 710311)

摘要: 为了保障国内核电稳健发展,核电装备自主化制造比例大幅提高,反应堆用新燃料组件及其原材料的安全运输均须通过专用容器保证,各型容器均由薄壁不锈钢与聚氨酯硬质泡沫复合而成,长寿命服役对泡沫材料提出了极端苛刻的低氯元素(Cl)要求。通过工况分析、原材料控Cl处理、科学配方配伍及迭代调试,确定了材料配方;通过调控充填质量、水添加量、催化剂配比及添加量、黑白料比例、原料温度、工装预热温度、工装倾斜角度、充填流量大小等进行从制样模具、1/4、1/2、3/4及全长模拟体到样机工程化工艺试验。结果表明,研制的泡沫材料Cl含量为179 mg/kg,可析出 $\text{Cl}^- < 1 \text{ mg/kg}$,达到核级装备的设计要求;0.16 g/cm³的泡沫,常温压缩强度为2.24 MPa,在70 °C、-40 °C恒温30 min后压缩强度分别为1.20、3.23 MPa,材料力学性能达到设计要求;均匀性评价证明样机内充泡沫性能达标;泡沫寿命预测可超30年。该研究探索开发了满足核级要求的全水体系原位发泡聚氨酯材料和工程化成型工艺,宽域式工艺保证了工程化的全时实现,为超大型、高难度制品的研制提供了有益参考。

关键词: 核电能源;硬质聚氨酯;全水体系;原位发泡;工程化

中图分类号: TQ328.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)11-0125-06

Preparation and engineering of in situ foamed rigid polyurethane for nuclear energy

SU Youxue, FENG Hongfu

(Shaanxi special rubber products Co., Ltd., Xi'an 710311, China)

Abstract : In order to ensure the robust development of domestic nuclear power, the proportion of domestic manufacturing of nuclear power equipment has been significantly increased. Safe transport of reactor core fuel assemblies and their raw materials must be ensured by special containers. All types of containers are made of thin-walled stainless steel and polyurethane rigid foam, long-term service puts forward extremely harsh low chlorine element(Cl) requirements for foam materials. The material formula was determined through working condition analysis, raw material Cl content control, scientific formula compatibility and iterative debugging; Engineering process trials were conducted from a sample preparation mold to 1/4, 1/2, 3/4, and full length simulation body, to container model, by regulating parameters including filling quality, water addition, catalyst ratio and addition amount, black and white material ratio, raw material temperature, fixture preheating temperature, angle of the fixture tilt, filling flow and so on. The results show that the Cl content of the prepared foam material is 179 mg/kg, and can precipitate no more than 1 mg/kg of Cl^- , which meets the design requirements of nuclear-level equipment; foam with a density of 0.16 g/cm³ has the compressive strength of 2.24 MPa at room temperature, and 1.20 MPa and 3.23 MPa after being kept at 70 °C and -40 °C for 30 min, respectively, has meeting the design requirements; Uniformity evaluation proves that the foam performance in the model meets the standard; The predicted life of the foam can exceed 30 years. The site-foaming polyurethane material and engineering molding process that meet the nuclear-grade requirements have been explored, and the process has extensive flexibility, the all-weather implementation of the engineering process, and provides useful references for ultra-large and ultra-high-difficulty research.

Keywords : nuclear power energy field ; rigid polyurethane ; fully water-blown system ; in-situ foaming ; engineering oriented

基金项目: 陕西省创新能力支撑计划-中青年科技创新领军人才项目(S2024-ZC-LJRC-0015)

通信作者: 冯洪福, 硕士, 正高级工程师, 研究方向为高分子复合材料结构与性能

收稿日期: 2025-08-24

引用格式: 苏有学,冯洪福. 核电能源领域用原位发泡硬质聚氨酯制备及工程化[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(11): 125-130.

SU Youxue, FENG Hongfu. Preparation and engineering of in situ foamed rigid polyurethane for nuclear energy[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(11): 125-130.

核电能源领域的装备不能随意停机检修,因此核级装备要求能够经受设备寿期内各种正常和事故工况累积考验,这就对所使用的材料提出了更高的要求,特别是F,Cl,Br,S等元素的含量须在极端苛刻的限值以下^[1-2]。作为反应堆心脏的核燃料及其组成二氧化铀粉末和芯块均须通过各型核级容器运输,以保证各形态货包在转运过程中都处于次临界状态^[3]。各型核级运输容器整体为大型减振器^[4-5],各方向外壁均由“薄壁不锈钢板-泡沫材料-薄壁不锈钢板”三明治结构组成,性能主要取决于内充的多功能聚氨酯硬质泡沫材料及成型工艺。为了在30年正常运输工况和事故工况下均能保障可靠性,容器壁内充聚氨酯硬质泡沫材料只能选用全水原位发泡体系^[6],但由于该体系为多种反应共存、强放热化学体系,反应爆聚是成型工艺控制最大难点,再加上容器壁腔体为焊装密闭腔体,仅有多个直径较小的螺孔可导入料液,现有装备工况使得内充成型工艺难度瞬间飙升。对于超大填充质量需求,国外采用多次分段内充工艺,这将会在分界面产生开裂缺陷,影响容器整体力学性能^[7],进而制约装备的服役寿期;国内多采用预成型绝热瓦安装成型工艺,先采用模塑法制成泡沫绝热瓦,后装入开口容器再焊封开口成型,成型难度很低,但无法保证事故工况极端冲击的刚度需求^[8]。因此,笔者对原位发泡聚氨酯材料配方体系和超大填充质量工程化进行研究,重点解决兼具极低氯量、无卤阻燃、多反应平衡的科学配方和施工工艺,进而,通过可拆卸模拟体试验总结形成宽域式工艺,保障工程化的全天候实现,探索一条行之有效的路径,为核能装备自主化提供技术支持。

1 实验部分

材料是基础,工艺是保证。核级材料有极端苛刻的限值要求,为保证生成的泡沫达标,须先通过自主控氯技术、配方设计和试验验证筛选确定。

试验分阶段进行,依次经历配方试验、可拆卸模拟体探索、样机填充确认。

1.1 主要原材料

聚醚多元醇:Multranol 4030,370~390 mgKOH/g,官能度为5.8,德国Bayer MaterialScience公司;

多苯基多次甲基多异氰酸酯(PAPI):LUPRANATE M20S,官能度为2.7,美国巴斯夫聚氨酯有限公司;

三亚乙基二胺溶液:DABCO 33-LV,主要成分质量分数33%的三亚乙基二胺和质量分数67%的二丙二醇,美国空气化工产品公司;

四甲基乙二胺溶液:Toyocat TEW,主要成分质量分数65%的四甲基乙二胺和质量分数35%的水,日本东曹株式会社;

1,3,5-三(二甲氨基丙基)-六氢化三嗪:Toyocat TRC,日本东曹株式会社;

三乙胺:Dabco TETN,美国空气化工产品有限公司;

三乙烯四胺:工业级,南通润丰石油化工有限公司;

乙基膦酸二乙酯(DEEP):工业优级品,德国朗盛公司;

三聚氰胺:川化集团有限公司;

三(一缩二丙二醇)亚磷酸酯:P430,河北省沧海东塑集团威达化工有限公司;

聚磷酸铵:上海新华阻燃剂总厂;

Al(OH)₃:山东亿来新材料科技发展有限公司;

去离子水:市售。

1.2 主要仪器及设备

聚氨酯发泡机:PU20F-Y7,温州飞龙聚氨酯设备工程有限公司;

配套高低温箱的电子万能试验机:20 N~50 kN,美特斯工业系统(中国)有限公司;

X射线荧光光谱(XRF)仪:S8 TIGER,德国布鲁克公司;

电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)仪:7850 ICP-MS,安捷伦科技(中国)有限公司;

游标卡尺:0.02 mm,哈尔滨量具刃具集团有限责任公司;

电子分析天平:XB-220A,高铁检测仪器有限公司;

数码显微镜:500倍,深圳市优视宏图科技有限公司;

自主控氯处理反应釜:Φ500 mm×3000 mm,带密封盖、双放料口、抽真空、搅拌器、排空阀等,自制;

自由泡模具:Φ200 mm×350 mm,自制;

性能试样模具:200 mm×200 mm×100 mm,自制;

可拆卸模拟体:5950 mm×1150 mm×950 mm,

与样机等尺寸,自制;

内外支撑工装:尺寸贴合,自制。

1.3 试样制备

1.3.1 原材料配方及预处理

(1)原材料配方。聚氨酯发泡材料的配方以质量份为计量基准,将聚醚多元醇100份,PAPI 137份作为主要反应体系。催化体系由三亚乙基二胺溶液0.09份,四甲基乙二胺溶液0.15份,1,3,5-三(二甲氨基丙基)-六氢化三嗪0.81份,三乙胺0.1份,三乙烯四胺0.3份组成。复合无卤阻燃剂^[9]包括乙基膦酸二乙酯10份,三聚氰胺3份,三(一缩二丙二醇)亚磷酸酯5份,聚磷酸铵8份, $Al(OH)_3$ 9份。去离子水的添加量为体系总质量的1%~1%(根据密度大小匹配添加)。

(2)原材料预处理。将聚醚多元醇、三亚乙基二胺溶液、四甲基乙二胺溶液、1,3,5-三(二甲氨基丙基)-六氢化三嗪、三乙胺、三乙烯四胺、乙基膦酸二乙酯、三聚氰胺、三(一缩二丙二醇)亚磷酸酯、聚磷酸铵、 $Al(OH)_3$ 、去离子水依次加入预混釜中,搅拌6~8 h制得白料,待用;将优选的PAPI导入自主控氯处理反应釜,再将经120℃,4 h烘干冷却后的超细硝酸银粉末加入反应釜,其添加量为PAPI质量的3%,盖盖锁紧,转速180 r/min下搅拌2 h,抽真空0.5 h,静置20 h,取上层液体定为黑料,待用。

1.3.2 试样制备流程

试样制备包括性能试验样品、可拆卸模拟体、样机填充3个质量由小到大的阶段。

(1)性能试验样品制备。根据泡沫密度要求,采用对应的白料,将白料和黑料通过手打或机打按比例混匀后导入试样模具,盖盖锁紧,经80℃,6 h熟化后制得样品。

(2)可拆卸模拟体制备。鉴于样机一体式结构特点和工程化工艺探索试验研究对泡沫体多次查验的需求,设计了可拆卸模拟体工装。模拟体的断面尺寸与样机一致,长度分为1/4,1/2,3/4和全长,各型模拟体分为上、下配伍两部分,分离部位采用螺栓锁紧,中间夹橡胶垫条密封。模拟体除可被拆开外,其他工装配置与结构和样机相同。通过调整模拟体姿态、内充导流管线数量、模拟体温度、物料温度、物料配伍比例、内充工艺总时间等因素探索找寻所有显著影响因素和泡沫体结构与性能的大数据配套关联,并通过对泡沫体分段性能测试确

认,筛选可行路线。

(3)样机填充确认:样机与可拆卸模拟体最大的区别在于密封程度,可拆卸模拟体工艺探索的优选方案不能直接应用于样机,要充分考虑工艺探索方案实施中通过橡胶密封垫处逃逸的气体量,通过评估,设计梯度跳跃方案,采用3台样机填充确认,筛选泡沫充满且变形量符合要求的最终方案。随着春、夏、秋、冬季节变化,通过调控人、机、法、料、环、测因素,研制了宽域式工艺,保证了工程化的全时施工性。

1.4 测试与表征

XRF分析:Cl含量采用XRF仪测定,采用无标样方法检测。

ICP-MS分析:可析出 Cl^- 采用ICP-MS仪测定,取一立方体泡沫,将泡沫完全浸入10倍体积的去离子水中并搅动10 min,取经滤纸过滤的水样参照US EPA 9056A:2007检测。

压缩强度测试:泡沫材料为各向异性的,压缩强度按照GB/T 8813测试,试样规格为50 mm×50 mm×25 mm,其中,25 mm边平行于泡沫生长方向。检测设备为可装配高温烘箱和低温箱体的电子拉力试验机。室温(RT)条件下直接开展测试;-40℃条件通过向低温箱导入液氮并恒温保持30 min后测试;70℃条件通过高温烘箱恒温保持30 min后测试。

工艺参数测定:采用机打自由泡,将混合均匀的料液一次性导入洁净的自由泡模具,用秒表计时、钢板尺测量。料液入模后立即用钢板尺测量料液液面至模具上沿的距离,每30 s采集一次;待泡沫高度变化不显著时,延长测量的时间间隔。用模具内腔高度减去每次测量值得到对应采集点的泡沫生长高度变化值,计算泡沫生长率。1/4模拟体、1/2模拟体、3/4模拟体、全长模拟体到样机,均采用此法采集工艺参数,只是泡沫生长高度直接用卷尺量得。虽然模拟体和样机封闭,但是原位发泡体系生成巨量热量会使泡沫生长高度以冷热分界线的方式表现。

2 结果与讨论

2.1 控氯预处理

Cl是具有强集聚效应的元素^[10-11], Cl^- 能穿透不锈钢表面的钝化膜到达金属基体表面,与金属离子形成可溶性产物,进而形成电化学腐蚀,致使不锈

钢壁轻则形成坑洞,重则产生孔洞,导致装备性能不合格。为保证长寿命服役,核电系统用装备及材料有严格限额要求,需采用合适的控氯技术。经过大量的实验筛选,优选的PAPI所制泡沫的Cl含量为2 789 mg/kg,严重超标。通过自主控氯技术进行PAPI预处理,使得生成泡沫的Cl含量低于核极限值,Cl含量为179 mg/kg,可析出Cl⁻小于1 mg/kg。

2.2 原位发泡

聚氨酯泡沫采用聚醚多元醇和异氰酸酯混合制备,两大主要化学反应构成了原位发泡体系,一为聚醚多元醇与多异氰酸酯的凝胶反应,主要用来束缚反应生成的二氧化碳气体,保证泡孔结构的均匀实现和力学性能;二为多异氰酸酯与水的产气反应,生成的二氧化碳气体作为发泡剂的来源,形成泡沫材料生长的驱动力。产气反应为强放热反应,热量是体系化学反应加速进行和动态交互影响的强力助推,因生成物为隔热材料,故产生的绝大部分巨量热量都作用于整个反应体系,产生化学爆聚,经测量泡沫体中心位置温度可达170℃,极易出现烧芯现象^[12]。出现烧芯,材料力学性能急剧下降,因此必须通过合理的催化剂配伍调控反应释热速率。化学原位发泡,形成的泡孔均匀^[13],平均孔径约为125 μm,属于细孔闭孔型泡沫材料^[14]。

研制初,因未检索到类似参考方案,只能进行原创设计、试验、总结、验证迭代,从制备样品的模具、1/4模拟体、1/2模拟体、3/4模拟体、全长模拟体到样机,依次经历由小到大质量的原位发泡体系的配方调整、工艺优化探索,最终实现达标产品研制,图1所示泡沫取自全长模拟体制泡沫,泡孔均匀,结构优异。

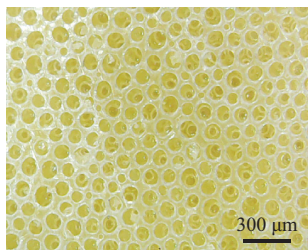


图1 泡沫结构

Fig. 1 Foam structure

通过去离子水和催化剂添加量及配比变化进行工艺需求的配方调整,通过调控充填质量、黑白料比例、原料温度、工装预热温度、工装倾斜角度、充填流量大小等进行工艺优化并最终确定宽域式

工艺。

对于超大内充质量目标,原位发泡的工艺时间要进行调控,当体系凝胶反应时间(即自由泡实验采集的不黏时间)等于1.2倍的泡沫内充总时间时,工程化控制和生成的泡沫质量均优。泡沫内充总时间小于凝胶反应时间,产生的气体有很大一部分要逃逸,故实际加水量大于理论计算量。

2.3 压缩强度

如图2所示,70℃,RT,-40℃条件下,密度为0.16 g/cm³的泡沫材料压缩强度分别为1.20,2.24,3.23 MPa,均达到容器对泡沫材料压缩强度>1.0 MPa的设计要求。

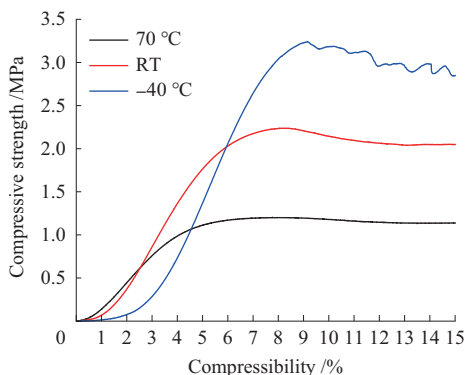


图2 泡沫的压缩强度

Fig. 2 Compressive strength of foam

恒温保持30 min,聚氨酯分子链运动活跃程度发生改变,-40℃降低了分子链运动活跃程度,表现反映刚度增大,压缩强度较室温提高了44%;70℃提高了分子链运动活跃程度,表现反映刚度减小,压缩强度较室温降低了46%。

2.4 工艺参数测定

建立泡沫生长率与时间的关系,如图3所示,泡沫体积是料液体积的10倍,即工艺过程中体积膨大9倍。

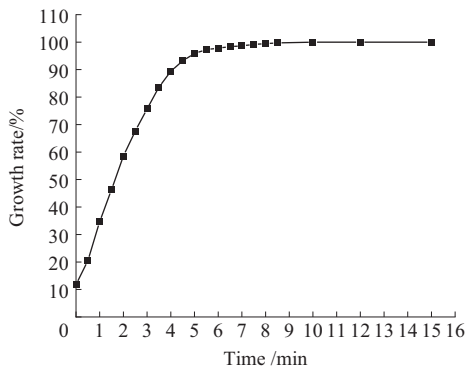


图3 泡沫生长率与时间的关系

Fig. 3 Relationship between foam growth rate and time

泡沫生长率与时间的关系对于模拟体和样机同样适用,充填时,模拟体和样机倾斜一定角度放置,充填过程中泡沫沿长度方向发生显著生长变化,内部泡沫的生长高度通过冷热分界线表现,泡沫生长率与时间的定量关系可作为工艺控制手段使用。

2.5 均匀性评价

将可拆卸模拟体试制的泡沫体沿其轴向均分为9段,对密度和压缩强度测试确认,结果如图4所示。其中,Y轴的上下限区间为对应指标的允许范围。泡沫密度和压缩强度表现出相关性,均在制品许可范围内。

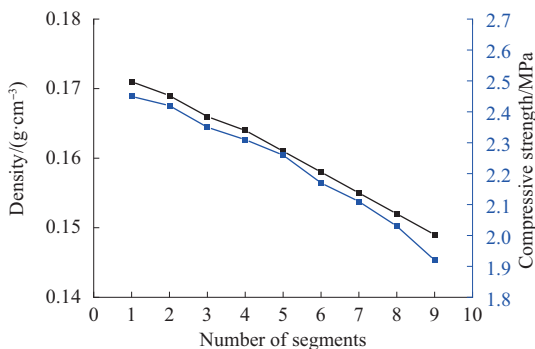


图4 均匀性检测

Fig. 4 Uniformity detection

采用相同工艺条件充填的全长模拟体泡沫作为样机内充泡沫的等效评价对象,表明样机内充泡沫的密度和压缩强度也符合图4所示趋势,样机内充泡沫性能达到标准要求。

2.6 工程化工况分析

各型核级运输容器结构特征和整体性能是内充工艺工程化的工况基础,以图5所示的“国和一号”配套双组件新燃料运输容器^[15]为例,分析如下。

(1)壳体为厚度 $<3\text{ mm}$ 的薄壁钢板,极易变形,且轻微的变形对内充质量影响很大,须做内、外贴合支撑。

(2)容器内充泡沫的部位为焊装密闭空腔,外侧仅有数个用于将火烧事故产生的分解物导出的小径传质螺孔,内充物料只能通过传质螺孔导入。

(3)填充量巨大,最大单腔填充质量 $>120\text{ kg}$,导致内充过程为动态注入。

(4)导入的物料体系包含多种化学反应^[16],影响因素众多且动态交互影响,内充入的物料要经历液流态、黏流态、固态泡沫生长移动等状态。

(5)工艺过程必须实施精准控压,过压,会导致容器发生变形严重,甚至爆炸;欠压,泡沫填充不满,形成空腔区域,产品不合格。

(6)为了保证减振器的刚度,内充工艺生成的泡沫须均匀。

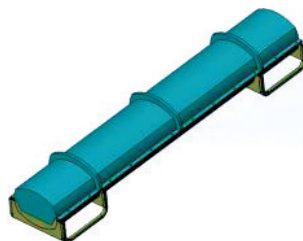


图5 双组件新燃料运输容器

Fig. 5 Dual component new fuel transport container

2.7 可行工艺对比分析

为有序实现工程化精控工艺,关键是确定众多动态因素的影响程度。在工况分析基础上,结合超大质量内充需求,对比分析工程化可行工艺。可实施的工艺包括预成型绝热瓦安装成型工艺、分段内充工艺、整体式内充工艺。

预成型绝热瓦安装成型工艺,先采用模塑法制成泡沫绝热瓦,后装入开口容器再焊封容器成型,此法工艺虽然成型难度和风险很低,但是由于安装间隙存在,绝热瓦间可随振动产生相互摩擦,随着服役期的延长,部分绝热瓦变成粉末,无法保障事故工况极端冲击的刚度需求。

分段内充工艺,分多次内充,前一次泡沫不再生长后进行下一次内充,此法工艺虽然成型难度和风险中等,但是在分段界面处存在显著的密度不均匀性和应力集中度,严重时会出现较大裂缝,随着服役期的延长,逐渐出现泡沫摩擦成粉末,长期积累后,无法保障事故工况极端冲击的刚度需求。

整体式内充工艺,将所需料液不间断整体内充,调控好反应时间和内充工艺总时间平衡性,以保证内充压力在各个方向的均匀,此法工艺须精确控制工艺参数,技术要求很高,生成的泡沫质地均匀,无应力集中,泡沫与不锈钢壳体实现优异的复合,在汽车等运输工具上下跳振、纵向摇振、横向摆振的多维耦合作用下始终保证内充泡沫与不锈钢壁的时刻同步性,可保证容器的长期服役可靠性,质优寿命长。此工艺中无须考虑泡沫与不锈钢壳体间的黏合问题,适度的内压保证了内充泡沫与不锈钢壁的时刻连接。

综上所述,优选按照可拆卸模拟体探索、等比例样机确认的系统化衔接路径稳步推进工程化迭代进度。可拆卸模拟体制泡沫体如图6所示,泡沫体分段性能结果表明,整体式内充工艺制泡沫性能均匀稳定,满足容器需求。



图6 可拆卸模拟体制泡沫体

Fig. 6 Foams of detachable simulation body

2.8 泡沫寿命预测讨论

Shuai等^[17]通过随机振动试验对用于样机内充的聚氨酯泡沫进行了寿命预测,试验中样品采用规格为100 mm×100 mm×50 mm的泡沫块体进行试验,载荷为10 kg不锈钢质量块,试样被垂直压紧固定,预测寿命为30.5年。随机振动试验中,试样和不锈钢质量块被装入方管内,除垂直方向受压紧力外,其他4个方向处自由状态。样机内充泡沫体在整体式工程化成型工艺条件下,6个方向均匀的内压使得泡沫体与不锈钢空壳紧密接触,不论是长期小位移正常服役工况,还是短期事故工况,泡沫体与不锈钢空壳始终处于紧密复合,时刻保持同步性,振动试验中激励与响应保持一定比例,故其实际服役寿命远>30.5年。

内充并生成的泡沫为原位化学法发泡生成,闭孔率检测值>97%,泡孔内为100%的二氧化碳气体,工程化工艺使得泡沫始终具有一定内压,外部氧气无法梯度进入泡沫体,故泡沫体受到氧素老化的风险极小;另外,闭孔率性能检测试样为裁切后的块体,试样表面闭孔结构受到破坏,实际内充生成的泡沫闭孔率应为100%,因此,内充泡沫的样机服役寿命取决于不锈钢的寿命,服役寿命显著>30年。

3 结论

(1)通过自研控氯技术和科学配方技术实现极低限值、核级材料的研制,为装备的自主化奠定

基础。

(2)针对样机工况,选择合理的催化剂搭配体系,实现了对内充总时间与内充质量精准平衡调控。

(3)采用可拆卸模拟体系统研究了超大质量级别反应体系中关键参数的影响及相互间的交互作用,为样机内充进行了有效的工艺探索和验证。

(4)结合前期探索工作和样机具体工况综合确定工程化工艺方案,研制的宽域式工艺保证了工程化的全时施工性。

参考文献

- [1] GONG Y, DU M Y, HE G Q, et al. Failure analysis and prevention of corrosion occurring during storage on steam generator tube sheet for advanced PWR, Part II: Corrosion prevention design[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 115. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104710.
- [2] PARRY S J, BENNETT B A, BENZING R, et al. Radiochemical neutron activation analysis for trace chlorine in steels and alloys[J]. Analytical Chemistry, 1997, 69(15):3 049–3 052.
- [3] XING Y D, YANG S Y, LI Z F, et al. Simulation and application of bi-directional corrugated honeycomb aluminum as filling material for impact limiter of nuclear spent fuel transport cask[J]. Nuclear Engineering and Design, 2020, 361. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2019.110502.
- [4] EIDUKYNAS V, DUNDULIS G, BABILAS E. Numerical simulation of a shock absorber used for protecting of casks for spent nuclear fuel[J]. Nuclear Engineering and Design, 2023, 415. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112703.
- [5] HAO Y C, LI Y, WU B, et al. Optimization analysis of HTR-PM600 fresh fuel transport container under multiple impact loading conditions[J]. Annals of Nuclear Energy, 2022, 175. DOI: 10.1016/j.anucene.2022.109216.
- [6] 冯洪福, 苏有学, 李娜, 等. 无卤阻燃全水发泡聚氨酯硬质泡沫的研究进展[J]. 化工新型材料, 2024, 52(5):52–57.
FENG Hongfu, SU Youxue, LI Na, et al. Research progress of halogen-free flame-retardant water-blown polyurethane rigid foam [J]. New Chemical Materials, 2024, 52(5):52–57.
- [7] 徐学宏, 郑义珠, 陈吉平, 等. 缝合参数对泡沫夹层结构复合材料力学性能的影响[J]. 材料工程, 2022, 50(1):132–137.
XU Xuehong, ZHENG Yizhu, CHEN Jiping, et al. Effect of stitching parameters on mechanical properties of foam-core sandwich structure composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50 (1):132–137.
- [8] JONGPRADIST P, SAINGAM N, TANGTHAMSATHIT P, et al. Crashworthiness analysis and design of a sandwich composite electric bus structure under full frontal impact[J]. Heliyon, 2022, 8(12). DOI:10.1016/j.heliyon.2022.e11999.

(下转第137页)