

# 核电厂用超高分子量聚乙烯喷嘴研发与应用

陈树山<sup>1,✉</sup>, 张廷晟<sup>2</sup>, 肖三平<sup>1</sup>, 李强涛<sup>1</sup>, 樊敏江<sup>3</sup>, 李志<sup>4</sup>, 何军山<sup>1</sup>

(1. 深圳中广核工程设计有限公司, 广东 深圳 518172; 2. 广西防城港核电有限公司, 广西 防城港 538000;  
3. 大亚湾核电运营管理责任有限公司, 广东 深圳 518124; 4. 聚烯烃催化技术与高性能材料国家重点实验室, 上海 200062)

**摘要:** [目的]为解决核电厂核安全3级循环水过滤系统(CFI)喷嘴冲刷磨蚀及腐蚀问题,采用超高分子量聚乙烯(UHMWPE)开发了一种耐腐蚀、耐磨的喷嘴。[方法]通过对重要加工工艺参数测试,固化了喷嘴制造加工工艺,为验证所开发的喷嘴耐磨性及水力性能,进行材料本体耐磨试验,并模拟核电厂运行条件开展基于研发产品的冲刷和水力试验。[结果]试验结果表明:UHMWPE喷嘴的耐磨性能优异,高于传统材料;可以适应核电厂高速冲刷的需求,水力性能亦可满足核电厂的要求。[结论]UHMWPE喷嘴投入运行一年半,经持续运行,喷嘴未发现冲刷变形和腐蚀现象,运行效果优异。因此,采用超高分子量聚乙烯材料制备核电厂CFI系统喷嘴是可行的,可替代原有的进口尼龙喷嘴。

**关键词:** 循环水过滤系统; 喷嘴; 超高分子量聚乙烯; 耐磨试验; 产品制备; 水力试验

中图分类号: TL4; TQ325.1+2 文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)02-0131-06

开放科学(资源服务)二维码:



## Development and Application of UHMWPE Nozzle for Nuclear Power Plant

CHEN Shushan<sup>1,✉</sup>, ZHANG Tingshen<sup>2</sup>, XIAO Sanping<sup>1</sup>, LI Qiangtao<sup>1</sup>, FAN Minjiang<sup>3</sup>, LI Zhi<sup>4</sup>, HE Junshan<sup>1</sup>

(1. China Nuclear Power Design Co., Ltd., Shenzhen 518172, Guangdong, China;  
2. Guangxi Fangchenggang Nuclear Power Co., Ltd., Fangchenggang 538000, Guangxi, China;  
3. Daya Bay Nuclear Power Operations and Management Co., Ltd., Shenzhen 518124, Guangdong, China;  
4. State Key Laboratory of Polyolefins Catalysis and High Performance Materials, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** [Introduction] The paper aims to develop a corrosion resistant and wearable ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE) nozzle in order to solve the nozzle erosion and corrosion problems of circulating water filtration system(CFI) which is nuclear safety grade 3 system in nuclear power plant. [Method] Through the test of important processing parameters, the nozzle manufacturing process was confirmed. In order to verify the wear resistance and hydraulic performance of the developed nozzle, the wear resistance test of the material was carried out and the scour test and hydraulic test using developed nozzles also have been done. [Result] Test results demonstrate that the UHMWPE nozzle has excellent wear resistance, which is much better than traditional materials. The UHMWPE nozzle can meet the needs of high-speed erosion of nuclear power plants, and its hydraulic performance can also meet the requirements of nuclear power plants. [Conclusion] The test results show that the performance of the UHMWPE nozzle is excellent. It has been used in the nuclear power plant for one and a half years, after continuous operation, no scour deformation and corrosion phenomena were found. Therefore, it is feasible to use it in the CFI system of nuclear power plant, which can replace the original imported nylon nozzle.

**Key words:** circulation water filter system; nozzle; ultra high molecular weight polyethylene; wear resistance test; product manufacturing; hydraulic test

2095-8676 © 2022 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2022-03-08 修回日期: 2022-05-29

基金项目: 中广核工程有限公司科技项目“核级 HDPE 应用关键技术及专用产品研发”(K-A2016.079)

## 0 引言

沿海核电厂的运行需要大量的海水进行冷却,核电厂设置旋转滤网过滤海水保持其洁净,并配置循环水过滤系统(CFI)通过喷嘴向旋转滤网持续喷射高速水流,清洁滤网<sup>[1]</sup>。目前国内核电厂采用不锈钢喷嘴或进口尼龙喷嘴,而核电厂均位于海边<sup>[2]</sup>,不锈钢喷嘴耐海水腐蚀能力不足<sup>[3]</sup>,尼龙喷嘴耐腐蚀性能虽好,但耐高速水流冲刷的性能有限,需经常更换。图1为喷嘴与管道组合安装图,每台机组约200个喷嘴。图2是使用过的尼龙喷嘴图片,表1为使用前后的喷嘴孔口测量数据,可以看出,运行一段时间以后,喷嘴由于磨损,初始的扇形流道磨损严重,出现不同程度的扩孔,从现场情况来看,磨蚀严重的喷嘴喷射出的水流不再呈现扇形分布,冲洗范围不能覆盖滤网的完整截面,不利于鼓网冲洗,使滤网堵塞的可能性增大。此外,目前核电厂所采用的尼龙喷嘴为进口产品,价格昂贵,供货周期长。



图1 喷嘴与管道安装图

Fig. 1 Nozzle and pipe installation picture



图2 使用后的尼龙喷嘴

Fig. 2 Used nylon nozzle

表1 喷嘴喉部尺寸对比

Tab. 1 Nozzle laryngeal size comparison mm

编号	旧1	旧2	旧3	旧4	旧5	旧6	旧7	旧8	旧9	旧10	新喷嘴
短轴	5.7	5.0	4.2	5.9	4.2	5.3	5.6	5.2	5.3	5.3	3.8
长轴	8.9	8.6	8.0	8.8	7.9	8.3	8.9	8.3	8.4	8.6	7.5

通过调研,UHMWPE材料是一种线性结构的具有优异综合性能的热塑性工程塑料,具有优异的耐磨损、耐化学腐蚀等性能<sup>[4]</sup>。UHMWPE的耐磨性为塑料之冠,对比几类材料的砂浆磨损指数,UHMWPE的砂浆磨损指数最小<sup>[5]</sup>,其耐磨性是尼龙66的4倍,是碳钢、不锈钢的7~10倍,能抵抗固体颗粒、粉体及固液混合高速摩擦磨损<sup>[6]</sup>。在加工性方面,UHMWPE加工各种制品的能力不断改进、创新,应用领域和数量逐年提高,国内已经具备较强的加工制造能力<sup>[7]</sup>。

基于此,本文利用国产UHMWPE材料开发一种既耐海水腐蚀,又耐水流冲刷的喷嘴以满足核电工程需求。本文从材料性能测试、产品制备及性能试验进行描述。

## 1 材料选择及性能测试

### 1.1 UHMWPE树脂材料选择

上海化工研究院有限公司的UHMWPE材料制造技术国内领先,基于应用需求,本项目选用了上海化工研究院有限公司聚合制备的UHMWPE Z-300树脂,其力学性能与国际品牌对比见表2。

表2 国产UHMWPE树脂与国外品牌树脂性能对比  
Tab. 2 Comparison of domestic UHMWPE resin and foreign famous brand resin performance

检验项目	样品名			检验方法
	Z-300	Ticona GUR 5 129	三井化学 L4000	
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	0.945 8	0.940	0.968	GB/T 1033.1
表观密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	0.45	0.50	—	GB/T 1638
熔融指数/[g·(10 min) <sup>-1</sup> ]	2.0	<0.10	—	GB/T 3682
特性粘数/(mL·g <sup>-1</sup> )	1736	1600	—	
分子量/ (×10 <sup>4</sup> , Mr)	330	340	35~65	GB/T 1632.3
屈服强度/MPa	26.9	20.0	—	
断裂强度/MPa	33.1	34.0	41.0	GB/T 1040.1
断裂伸长率/%	465	420.0	12	

通过表2可以看出国产树脂在力学性能方面与Ticona公司产品相近,优于日本三井化学产品;在可加工性能方面日本三井化学产品最优,但是由于日本三井化学制品分子量仅为35~65×10<sup>4</sup> g/mol左右,力学性能一般;国产注塑级树脂粘均分子量达到

$330 \times 10^4$  g/mol, 仍然具备 2.0 g/10 min 的熔融指数 (MFR), 因此选用 Z-300 作为本项目的喷嘴制作树脂, 兼顾成型性能及力学性能。

## 1.2 材料性能测试

喷嘴在使用过程中, 需连续运行 18 个月, 为确保产品的可靠性, 针对 UHMWPE 材料的耐磨性能分别开展滚动磨损试验、砂浆磨损试验。另外, 考虑高分子材料老化的影响, 开展老化试验, 测试其强度变化, 相关试验的情况介绍如下。

### 1) 滚动磨损试验

为横向比较材料的耐磨特性, 委托国家能源核电非金属材料实验室对尼龙材料、高密度聚乙烯 (HDPE) 材料、以及 UHMWPE 材料开展滚动磨损试验<sup>[8]</sup>, 试验数据见表 3。在滚动磨损试验下, UHMWPE 的磨损体积小于 HDPE 和尼龙, 耐磨性最好。

表 3 滚动磨损试验测试数据

Tab. 3 Roll abrasion test result

项目	HDPE	尼龙	UHMWPE	检测标准
磨损质量/g	0.040 7	0.071 2	0.036	ISO 5470
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	0.949	1.301	0.944	GB/T 1033.1
磨损体积/cm <sup>3</sup>	0.042 9	0.054 7	0.038 1	—

### 2) 砂浆磨损试验

由聚烯烃催化技术与高性能材料国家重点实验室对尼龙材料、UHMWPE 材料开展砂浆磨损试验, 采用水和砂子混合物, 对材料开展高速砂浆磨蚀<sup>[9]</sup>, 试验数据见表 4, 表中磨损指数越小, 耐磨性越好。砂浆磨损试验中, UHMWPE 材料耐磨性大大优于尼龙材料。此试验采用砂、水配比作为试验介质, 能够很好的反应现场运行工况。

表 4 砂浆磨损测试数据

Tab. 4 Slurry abrasion test result

测试项目	UHMWPE	尼龙	测试标准
磨损指数	238	548	ISO 15527

### 3) 老化性能试验

UHMWPE 材料具有良好的耐冲击性和拉伸强度。冲击强度约为聚碳酸酯的 2 倍, 丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物 (ABS) 的 5 倍, 尼龙的 10 余倍<sup>[10]</sup>。考虑老化对材料的影响, 在 -25 ℃ ~ 80 ℃ 进行热循环 250 次, 历时 250 h, 得出热老化试验数据见表 5。由

表 5 可知, 老化前后材料的性能基本没有变化, 具有优良得耐老化性能。

表 5 超高分子量聚乙烯老化前后性能对比

Tab. 5 UHMWPE aging test data comparison

性能参数	老化前	老化后	检测标准
屈服强度 / MPa	27.30	27.06	
拉伸强度 / MPa	31.36	31.22	GB/T 1040
断裂伸长率 / %	578.5	553.8	

同时, UHMWPE 材料的拉伸强度达到 30 MPa 左右, 断裂伸长率大于 300%, 具有良好的韧性<sup>[11]</sup>, 核电厂冲洗喷嘴的使用压力一般小于 1 MPa, 其强度可满足喷嘴的使用要求。

## 2 UHMWPE 喷嘴制备

UHMWPE 材料线性长分子链结构赋予其优异的综合性能, 但长分子链结构也导致其熔体粘度极高, 其加工成型难度大<sup>[12]</sup>, 一般加工方式有模压、机加工、注塑等。UHMWPE 精密零部件仅仅依靠模压成型或者机械加工实现, 效率低、成本高昂, 且尺寸精确度无法达到应用需求, 考虑本项目研制喷嘴对精度要求高, 本项目选择了注塑成型工艺用于制备核电用喷嘴。

注塑成型的工艺参数直接影响成品的质量, 工艺探索过程中主要针对注塑速率、模具温度、冷却时间进行多轮次试验。首先优化选择本项目注射速率, 研究发现随着注射速率提升, UHMWPE 熔体的剪切速率逐渐升高, 在注塑机提供强剪切的情况下, 高分子趋向于在流动方向取向, 这种在流动方向发生取向的现象的外在宏观表现就是熔体黏度下降, 注射时间降低, 在本项目中注射速率超过 60% 之后, 注射时间下降趋于平缓, 从表 6 也可以看出, 注射时间基本稳定在 2.0 s 左右, 因此选择最佳注射速率为额定注射速率的 60% 为最大注射速率。

其次, 分析模具温度对成型制品的影响。试验各种模具温度对注塑成型制品表面质量的影响见表 7, 可以看出, 随着模具温度的增加, 注塑成型制品表面光滑度增加, 在模具温度增加到 60 ℃ 之后, 注塑制品的外观合格率达到 40%, 在模具温度增加到 80 ℃ 之后, 注塑制品的外观合格率达到 100%, 因此本项目模具温度选定为 80 ℃。

表6 注射速率对制品的影响

Tab. 6 Effects of injection rate on products

注射速率	填充时间/s	峰值压力/MPa	熔料压力/MPa	剪切速率/ $10^5 \text{s}^{-1}$
5%	19.39	60.8	80.8	0.101
10%	9.8	62.6	83.4	0.202
15%	6.68	66.8	88.4	0.305
20%	5.06	70.9	93.3	0.408
25%	4.08	74.5	97.7	0.495
30%	3.39	78.8	102.8	0.881
35%	2.93	82.6	107.4	1.698
40%	2.59	85.9	111.5	2.745
45%	2.29	88.3	114.7	3.893
50%	2.09	93.5	120.7	5.926
60%	1.98	98.5	126.5	6.238
70%	1.85	105.6	134.4	6.182
80%	1.83	110.5	140.1	6.158
90%	1.80	119.5	149.9	6.100

表7 模具温度对制品表面质量的影响

Tab. 7 Effect of mold temperature on product surface quality

模具温度	第一模次	第二模次	第三模次	第四模次	第五模次	综合
20	NO	NO	NO	NO	NO	NO
30	NO	NO	NO	NO	NO	NO
40	NO	NO	NO	NO	NO	NO
50	NO	NO	NO	NO	NO	NO
60	NO	NO	OK	NO	OK	NO
70	OK	OK	NO	OK	NO	NO
80	OK	OK	OK	OK	OK	OK
90	OK	OK	OK	OK	OK	OK
100	OK	OK	OK	OK	OK	OK

最后,分析冷却时间对制品的影响,试验不同冷却时间制品尺寸的变化,数据见表8。由表8可见,随着冷却时间的增加,注塑成型制品尺寸逐渐下降,这主要是由于随着冷却结晶的进行,注塑制品尺寸逐渐收缩,在冷却时间达到150 s之后,注塑制品的尺寸趋于平稳,因此本项目冷却时间选定为150 s。

在各主要工艺参数确定的基础上,采用自主开发的动态锁模技术,通过注塑模具制作喷嘴样件。

### 3 综合性能测试

为验证成品的耐冲刷性能,开展高压冲刷试验。另外,为验证开发的喷嘴水力特性满足要求,进行综

表8 冷却时间对成型制品尺寸的影响

Tab. 8 Effect of cooling time on the size of products

冷却时间/s	第一模次/mm	第二模次/mm	第三模次/mm	平均尺寸/mm
10	24.98	24.88	24.86	24.91
40	24.45	24.45	24.5	24.47
70	24.15	24.18	24.18	24.17
100	24.02	24.08	24.06	24.05
130	23.86	23.90	23.69	23.82
150	23.68	23.70	23.70	23.69
170	23.59	23.70	23.59	23.63
190	23.55	23.70	23.70	23.65
180	23.58	23.58	23.70	23.62

合水力试验,获取流量压力性能参数。

#### 3.1 高压冲刷试验

试验采用6个喷嘴进行冲刷试验,其中包含了UHMWPE喷嘴和原进口尼龙喷嘴。试验在一段管道的侧面安装六个喷嘴,试验系统压力为1.3 MPa,远高于电厂正常运行压力0.5 MPa,累计冲刷600 h,进行极限试验,最后通过重量变化量对比磨损量,试验结果为超高分子量聚乙烯喷嘴的重量变化率为0.2%~0.267%,而尼龙的重量变化率为1.687%,验证了UHMWPE喷嘴优良的耐磨性能,优于原进口产品。

#### 3.2 水力性能试验

为验证喷嘴的水力特性参数,建造水力试验台架,开展了43个喷嘴的大型水力试验,用于测量喷嘴的流量压力数据<sup>[13]</sup>。试验台架如图3所示,通过测量得到各压力下的流量数据。结合某核电厂的系统配置数据,采用AFT Fathom软件对CFI系统进行水力学建模,详细模拟系统的泵、阀、喷嘴、管道管件等部件<sup>[14]</sup>,将喷嘴流量压力试验结果数据代入AFT水力学模型进行计算,结果表明,喷嘴的水力性能达到核电厂旋转滤网冲洗需求。



图3 整体水力学试验装置

Fig. 3 Overall hydraulic test equipment

通过各项试验及软件模拟计算,验证了所开发的喷嘴可以满足电站使用的需求。

## 4 讨论与分析

### 4.1 制备工艺

UHMWPE材料是优良的耐腐蚀、抗磨蚀材料,但其熔体低流动性对产品制造的影响很大,在产品制备工艺摸索过程中,需充分考虑产品的结构形状,设计合理的工艺参数以及模具流道。并在应用前设计合适的试验,验证试制产品的性能。

### 4.2 应用反馈

UHMWPE喷嘴研发成功以后,在国内某核电厂进行了应用,在运行过程中观察运行情况,喷射情况良好,如图4所示。运行一个换料周期(18个月)后<sup>[15]</sup>,拆卸部件进行检查,喷嘴无冲刷扩孔现象,完美达到了其功能要求。

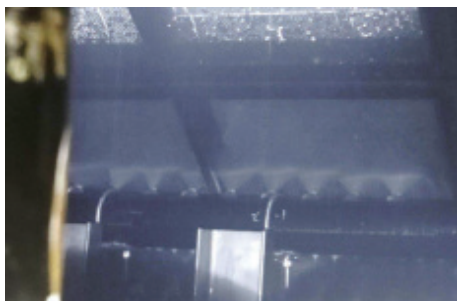


图4 某核电厂喷嘴运行情况

Fig. 4 Nozzle operation in nuclear power plant

## 5 结论

1) 本文研发的UHMWPE喷嘴使用效果良好,解决了数十年来该部件依赖国外进口的问题,成本和供货周期更加可控。

2) 通过滚动磨损试验,砂浆磨损试验以及水力冲刷试验充分论证了UHMWPE材料的耐磨性,在有冲刷、磨蚀的场合,此材料是很好的选择。

3) 在后续进一步的运行数据累积验证后,该产品具备各核电基地批量使用的条件。

4) 基于UHMWPE优良的材料性能,可结合本文思路,研发新产品,替代更多的传统材料,促进核电厂的技术革新。

### 参考文献:

[1] 林金旭,廖雪波,蒋林中,等.某核电厂鼓形滤网腐蚀原因分

析[J].全面腐蚀控制,2015,29(7):30-32+51. DOI: 10.13726/j.cnki.11-2706/tq.2015.07.030.03.

LIN J X, LIAO X B, JIANG L Z, et al. Analysis on corrosion causes of drum strainer in a nuclear power plant [J]. Total Corrosion Control, 2015, 29(7): 30-32+51. DOI: 10.13726/j.cnki.11-2706/tq.2015.07.030.03.

[2] 黄海华.新形势下的沿海核电厂址选择[J].南方能源建设,2019,6(1):71-75. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.012.

HUANG H H. Selection of coastal nuclear power plants under current situation [J]. Southern Energy Construction, 2019, 6(1): 71-75. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.012.

[3] 贾有根,蒋晓红,张浩然,等.核电站海水蝶阀蝶阀板腐蚀原因分析及改进实践[J].南方能源建设,2017,4(4):108-112. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.04.020.

JIA Y G, JIANG X X, ZHANG H R, et al. Analysis and improvement of corrosion cause of seawater butterfly valve disc in nuclear power station [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(4): 108-112. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.04.020.

[4] 许睿,薛平,马海霞,等.尼龙6改性超高分子量聚乙烯[J].工程塑料应用,2017,45(8):29-33. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3539.2017.08.007.

XU R, XUE P, MA H X, et al. Ultra high molecular weight polyethylene modified by nylon 6 [J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(8): 29-33. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3539.2017.08.007.

[5] 何继敏,薛平,何亚东.超高分子量聚乙烯管材性能分析与比较[J].现代塑料加工应用,2000(1):58-60.

HE J M, XUE P, HE Y D. Performance analysis and comparison of ultra-high molecular weight polyethylene pipe [J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2000(1): 58-60.

[6] 孙振国.超高分子量聚乙烯塑料管道[J].新型建筑材料,2000(3):18-20. DOI: 10.3969/j.issn.1001-702X.2000.03.008.

SUN Z G. Ultra high molecular weight polyethylene plastic pipe [J]. Chemical Building Materials, 2000(3): 18-20. DOI: 10.3969/j.issn.1001-702X.2000.03.008.

[7] 王新威,张玉梅,孙勇飞,等.超高分子量聚乙烯材料的研究进展[J].化工进展,2020,39(9):3403-3420. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2020-0491.

WANG X W, ZHANG Y M, SUN Y F, et al. Research progress of ultra high molecular weight polyethylene [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(9): 3403-3420. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2020-0491.

[8] 范招军,陈晓萌,王文.复合材料摩擦磨损试验[J].计量与测试技术,2017,44(12):25-27+29. DOI: 10.15988/j.cnki.1004-6941.2017.12.011.

FAN Z J, CHEN X M, WANG W. Friction and wear test of

- composite materials [J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2017, 44(12): 25-27+29. DOI: 10.15988/j.cnki.1004-6941.2017.12.011.
- [9] 夏晋程, 李志, 叶纯麟. 超高分子量聚乙烯树脂材料的砂浆磨损特性研究 [J]. *化学世界*, 2019, 60(1): 36-44. DOI: 10.19500/j.cnki.0367-6358.20180105.
- XIA J C, LI Z, YE C L. Studies on mortar abrasion properties of ultra-high molecular weight polyethylene resin [J]. *Chemical World*, 2019, 60(1): 36-44. DOI: 10.19500/j.cnki.0367-6358.20180105.
- [10] 卓昌明. 塑料应用技术手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- ZHUO C M. Application technology manual [M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [11] 樊新民, 车剑飞. 工程塑料及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- FAN X M, CHE J F. Engineering plastics and applications [M]. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [12] 李倩兮, 吴宏武. 超高分子量聚乙烯成型工艺及其加工设备研究进展 [J]. *机械工程材料*, 2007, 31(6): 1-5. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3738.2007.06.001.
- LI Q X, WU H W. Development of ultrahigh molecular weight polyethylene processing and its specialized equipment [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2007, 31(6): 1-5. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3738.2007.06.001.
- [13] 魏洋洋, 袁寿其, 李红, 等. 异形喷嘴变量喷头水力性能试验 [J]. *农业机械学报*, 2011, 42(7): 70-74. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1298.2011.07.014.
- WEI Y Y, YUAN S Q, LI H, et al. Hydraulic performance experiment of the variable-rate sprinkler with non-circle nozzle [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(7): 70-74. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1298.2011.07.014.
- [14] 武婕, 张荣勇, 白玮. 核电站循环冷却水系统的瞬态计算分析 [J]. *给水排水*, 2016, 52(增刊2): 17-19.
- WU J, ZHANG R Y, BAI W. Transient calculation analysis of cirde cooling water system in nuclear power plant [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2016, 52(supp. 2): 17-19.
- [15] 姚红, 刘国明. 秦山二期长循环堆芯燃料管理方案设计及其经济性分析 [J]. *南方能源建设*, 2016, 3(3): 23-26+15. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.03.004.
- YAO H, LIU G M. Fuel management study and economic analysis of long-term refueling for qinshan-II NPP [J]. *Southern Energy Construction*, 2016, 3(3): 23-26+15. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.03.004.

---

#### 作者简介:



陈树山

陈树山(第一作者, 通信作者)

1981-, 男, 江苏南通人, 高级工程师, 核能与核技术工程专业硕士, 主要从事核电厂工程设计, 高分子材料应用研究 (e-mail) chenshushan@cgnpc.com.cn。

#### 张廷晟

1989-, 男, 湖南长沙人, 工程师, 动力工程及工程热物理专业硕士, 主要从事核电冷源工作 (e-mail) 591721648@qq.com。

#### 肖三平

1982-, 男, 湖南益阳人, 高级工程师, 核工程与核技术专业学士, 主要从事核电工艺系统设计 (e-mail) xiaosanping@cgnpc.com.cn。

#### 李强涛

1987-, 男, 陕西渭南人, 高级工程师, 核工程与核技术专业学士, 主要从事核电工艺系统设计及调试 (e-mail) liqiangtao@cgnpc.com.cn。

#### 樊敏江

1976-, 男, 江西九江人, 高级工程师, 给水排水专业学士, 主要从事核电厂常规岛设备设计和改造 (e-mail) fanminjiang@cgnpc.com.cn。

#### 何军山

1968-, 男, 湖北天门人, 高级工程师, 核能科学与工程硕士, 主要从事核电厂核岛系统设计 (e-mail) hejunshan@cgnpc.com.cn。

---

#### 项目简介:

**项目名称** 核级 HDPE 应用关键技术及专用产品研发(K-A2016.079)

**承担单位** 中广核工程有限公司

**项目概述** 针对核电站海水腐蚀难题, 对核级 HDPE 材料关键技术和装备进行研究开发, 采用 HDPE 材料替换传统金属材料以彻底解决海水腐蚀问题, 主要包括材料性能研究、管道管件国产化、喷嘴管排及喷嘴组件研发、焊接技术和焊接装备研发、检测技术和检测装备开发, 通过本项目研究打通了核级 HDPE 应用关键技术, 形成了多项核级 HDPE 产品, 并实现工程应用。

**主要创新点** (1)国内首次开发出核级 HDPE 各类型管道管件, 打破国外垄断; (2)开发出核级 HDPE 喷嘴管排, 及配套承插焊接工艺和智能焊机, 为国内首创; (3)成功开发 UHMWPE 喷嘴, 耐磨性能优异, 为国内唯一; (4)结合研发和工程应用经验, 立项国家能源局《核安全 3 级高密度聚乙烯管道设计规范》行业标准编制, 填补此领域国内空白。

(责任编辑 李辉)