

# Methods on Upstream Analysis of Sump Strainer in Nuclear Power Station

Zejun Liu, Yu Liu, Peng Yang, Juan Li

Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing  
Email: liuzejun@chinansc.cn

Received: Dec. 21<sup>st</sup>, 2016; accepted: Jan. 6<sup>th</sup>, 2017; published: Jan. 12<sup>th</sup>, 2017

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

---

## Abstract

In this paper, the common sequence of the nuclear power station sump filter analysis is introduced. Some specific contents and specification requirements about site walkdown, debris production, debris transmission, pressure drop calculation and tests on the filter are proposed. It will provide specific guidance to the nuclear power plant in this practice.

## Keywords

Nuclear Power Station, ECCS, Sump Strainer, Pressure Drop, Upstream Analysis

---

# 核电厂地坑滤网上游效应分析方法

刘泽军, 刘宇, 杨鹏, 李娟

环境保护部核与辐射安全中心, 北京

Email: liuzejun@chinansc.cn

收稿日期: 2016年12月21日; 录用日期: 2017年1月6日; 发布日期: 2017年1月12日

---

## 摘要

本文介绍了核电厂地坑滤网上游效应分析的一般流程, 详细叙述了在核电厂地坑滤网设计中关于电厂踏勘、碎片产生、碎片传输以及碎片在滤网上的压降计算和试验等多方面的具体内容和规范性要求, 对核

电厂在这方面的实践提供了具体指导。

## 关键词

核电厂, 应急冷却, 地坑滤网, 压降, 上游分析

## 1. 引言

地坑滤网堵塞问题是起源于上个世纪九十年代, 在那一阶段核电界先后发生了三次较严重的碎片堵塞应急堆芯冷却(ECCS)地坑滤网的事件。为此, 美国核管会(NRC)发布了数个公告, 要求沸水堆核电厂(BWR)实施适当的程序措施、维修实践和电厂修改以降低由于失水事故后碎片堆积而导致 ECCS 吸入口滤网堵塞的可能性。研究解决 BWR 滤网堵塞问题的成果使人们对压水堆核电厂(PWR)地坑滤网设计的合理性提出了疑问, 并促使 NRC 发布了通用安全问题[1] (GSI) 191 “碎片堆积对于 PWR 地坑性能影响的评估”, 该 GSI 的发布是为了确保 PWR 在需要地坑再循环的失水事故或其他高能管道断裂事故过程中, 事故后的碎片堵塞不会妨碍或阻止 ECCS 和 CSS 在再循环模式下的运行。2004 年 9 月 13 日, NRC 发布 GL-2004-02 [2] “PWR 设计基准事故过程中碎片堵塞对于应急再循环的潜在影响”, 其中要求: 使用 NRC 批准的方法, 在需要 ECCS 和 CSS 系统再循环的所有假想事故后对事故后碎片堵塞以及流体中夹带碎片状态下的运行妨碍或阻止再循环功能的不利影响进行机理性评估, 并要求在规定的期限内完成所有纠正行动。

根据美国 NRC 的 GL-2004-02 的要求, 美国所有 PWR 运行核电厂安全壳地坑滤网的改造工作已于 2008 年年底全部完成, 同时 NRC 也提出了对化学效应分析和下游分析等方面继续进行研究的要求, 以进一步论证其纠正行动。有关该问题的最新进展情况表明, NRC 审评人员认为, 对于 PWR 地坑滤网的上游分析、下游效应, 包括化学效应等问题, 都基本上得到有效的解决。同时, 与压水堆地坑滤网改进问题有关的试验、分析方法以及得到的成果, 可以给其他类型的反应堆以及新堆的设计借鉴使用。其他国家, 包括: 瑞典、加拿大、德国、法国、日本、韩国等国, 也紧随美国 NRC 解决地坑滤网问题的进展状况, 在美国核电厂解决该问题之后的几年内解决本国核电厂地坑滤网堵塞问题。

中国国家核安全局在对巴基斯坦的恰希玛(CHASHMA)核电厂 1 号机组进行安全评估时, 就已经开始关注有关地坑滤网堵塞问题; 并在岭澳二期(3&4 号机组)和秦山二期扩建项目(3&4 号机组)两个新建核电厂的安全审评过程中提出了对安全壳地坑滤网进行设计改进的要求, 在这两个电厂采用了新设计的滤网, 后续所有新建 M310 改进型核电厂都采用了类似于这两个电厂的方案。在此基础上, 国家核安全局于 2012 年 4 月发布了“关于开展运行核电厂安全壳地坑滤网改造的通知[3]”, 要求运行核电厂对安全壳地坑滤网进行改造, 以保证应急堆芯冷却和安全壳喷淋功能的可靠执行。截止到现在, 各运行核电厂按通知要求, 先后已经完成了地坑滤网的上游分析, 并实施了安全壳地坑滤网改造, 但相关的化学及下游效应评价尚在进行中。

## 2. 上游分析的一般流程及其主要目的

地坑滤网的上游分析是滤网设计的基础, 也是滤网相关工作的重点, 它是一项复杂的系统工程, 包括碎渣源项分析、破口位置选择、影响区划分、碎渣生成计算和传递分析等, 从产生的总碎渣分析到传递到地坑滤网上碎渣的尺寸和质量范围, 主要是为了使滤网的设计满足在最大碎片负荷下安全级的下游泵的静正吸入压头要求。

地坑滤网的上游分析一般按图 1 所示流程进行。

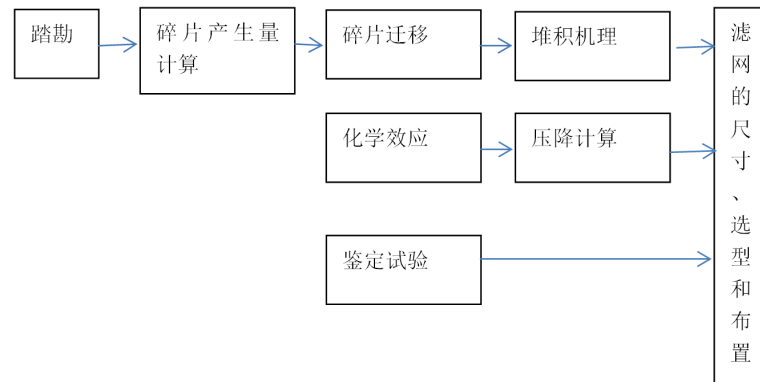


Figure 1. Flow chart of upstream analysis  
图 1. 上游分析的一般流程图

### 3. 电厂踏勘

踏勘就是根据 NEI02-01/04-07 规定的方法[4], 获取评价影响 LOCA 事故后地坑滤网运行性能的潜在碎片源、碎片种类和碎片位置, 同时包括安全壳内流道和地坑滤网布置区域的相关信息。上游分析首先就是确定碎片量和特征, 一般需要考虑如下碎片源:

- (A) 影响区(ZOI)中的保温材料;
- (B) ZOI 中经认证的涂料和安全壳内未经认证的所有涂料;
- (C) 估计安全壳内所有标签、灰尘等潜在碎片。

踏勘应该包括以下区域: DBA 假想破口区, 碎片传输通道所在区域, 地坑滤网安装区域, 主设备(反应堆、蒸发器、PRHR 热交换器、安注箱、主阀门等)安装区, 通风管、通风设备安装区, 在各区域内还需注意防火屏的封堵。

踏勘时间, 现场勘查时间窗口由电厂安排, 对于在建电厂, 一般安排在安全壳内主要设备安装并且已经清洁完毕进行; 对于在运电厂, 一般在大修后期反应堆换料结束机组启动前进行。保温、涂层、外来物和流道、地坑布置等各类勘查可以分开进行或同时进行。

踏勘的主要内容包括: 设备管道保温检查、土建防腐涂物、设备防腐涂物以及潜在碎片的调查, 潜在碎片(或称为潜在的外来物)包括以下几个方面:

- A. 标记带: 包括电器设备标带、管道标带、遮蔽胶带, 这些所有频繁用于安全壳墙壁上以标明设备位置的标带, 也包括梯子上用的防滑带(尽管在正常的磨损情况下不会消失, 这些东西可能溶解于水或随水迁移);
- B. 设备标牌: 这里所指包括纸质和塑料标牌、粘接物或指示物, 这些东西可能溶解或传输于水中, 除此之外, 还包括不正确安装的操作标签;
- C. 建造和维修垃圾: 抹布、瓦片、破布、塑料隔板、塑料袋、包装材料、篮子、通道密封、泡沫耳塞、脚手架搭建造成的锯屑等等;
- D. 临时设备: 包括脚手架、梯子、保温或绝缘材料、铅屏、Herculite 和工具箱等等。这些临时设施可能成为标带、非质保的涂层和标牌等碎片的来源, 并且可能改变流体到达地坑的通道;
- E. 尘埃、污垢和抹布, 包括竖直墙面上的尘埃。

踏勘除检查碎片源外, 还应检查碎片传输的流道。流道具体决定了碎片的传输情况, 从而确定最终到达滤网上的碎片量。在流道的分布情况检查方面, 主要关注以下物项:

- A. 专用流道

- B. 积水坑
- C. 层间设备贯穿口
- D. 栅格板
- E. 栅栏
- F. 地坎
- G. 地坑滤网周围情况：管道支架及管道、消防设施、电缆及电缆桥架、阀门等其他设备。

相同类型的机组可以不做完整的踏勘，但需要对比相关设计，对于不同设计的部分需要仔细重新踏勘和要求，即使相同的部分也需要选择部分内容进行复核。

总之，踏勘是上游分析的基础，是开展下一步工作的前提条件。

#### 4. 碎片产生分析

碎片产生分析就是根据踏勘的结果以及破口的位置、破口影响区大小来计算产生的碎渣量和碎渣特征。踏勘结果所包括的源项一般有涂漆、保温材料(包括玻璃纤维、超细玻璃纤维、硅酸钙、硅酸铝、硅酸盐等多种复合材料)、潜在碎片和外来异物。

##### 4.1. 破口位置的选择

破口位置的选择，需要参照美国核管会(NRC)批准的 NEI 04-07 SER [4]中破口位置选择所遵循的原则，分析各个破口位置所产生的碎片量，以获得最大碎片产生量的破口位置、碎片最容易迁移到滤网的破口位置，以及产生最多碎片种类的破口位置。根据产生碎片的情况不同，选取多个破口位置(一般最少 5 个)，以代表不同事故工况的特征。然后再根据选定破口位置的周围布置情况，根据影响区(ZOI)模型，确定所能产生碎片量及碎片特征。一般应考虑包括一回路(RCS)主管道及其连接管道的破口如仅考虑管道焊缝处作为假想破口的位置，与 NEI 04-07 中推荐的破口选择方法并不一致，具有一定的不保守性；另外，有的电厂要求在非 LOCA 的管道破裂事故下启动安全壳地坑再循环，例如给水管道和蒸汽管道破口事故，如果在执照申请中有要求，则这些破口也必须考虑和评价。因而进一步增加了破口位置选择的复杂性。

选择生成碎片的破口位置一般考虑以下原则：

- A. 执照申请要求的安全壳内需要地坑再循环运行的破口；
- B. 能够产生特定种类碎片的破口；
- C. 其碎片对滤网压损有贡献而又集中布置的材料所对应的破口(例如纤维保温、多孔保温、硅酸钙类土建材料、防火材料等)；
- D. 产生的碎片符合“数量最多、组合最恶劣”原则的破口；
- E. 与 RCS 连接的直径小于等于 2”的小管道可以不考虑；
- F. 与 RCS 连接直到第一个隔离阀位置的管道可以假设有破口。

根据以上的一般原则，以下管道上的破口必须给予考虑：

- A. RCS 冷热腿、波动管、跨越 RCS 的管道；
- B. 与 RCS 连接的管道，例如 RHR、RCV、RIS 等管道；
- C. 二次侧破口必须考虑主蒸汽管道。

##### 4.2. 破口影响区

关于影响区域(见图 2)的选取，需要建立在大量实验和分析的基础上。为此国外一些机构已经开展

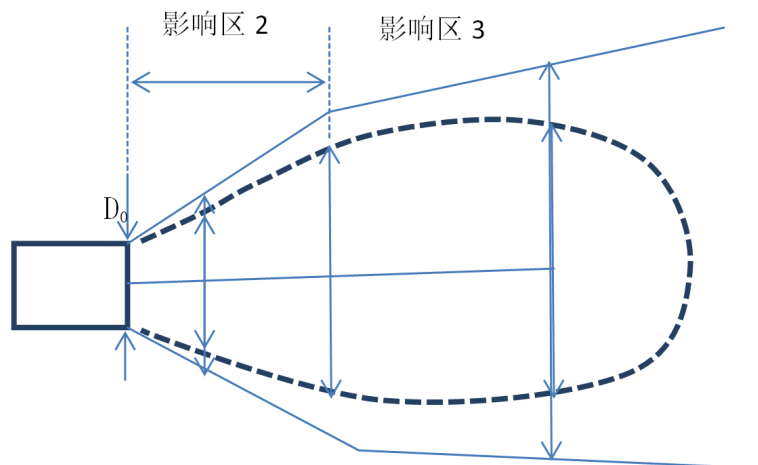


Figure 2. Zone of influence  
图 2. 破口影响区示意图

了大量空气喷嘴冲击试验, 获得了一系列安全壳保温层破坏压力、影响区域的实验数据和碎片大小份额的分布数据。国内核电站可以参考国外的研究成果, 部分核电站如果得不到相关保温层结构材料的数据, 需要开展破坏特性的实验研究, 为上游分析的碎片假设提供依据。

鉴定合格的涂漆的 ZOI 按 GL2004-02 的推荐取  $4D$  ( $D$ -破口直径) (未鉴定涂漆一般需要全部作为潜在碎片), 一般的保温材料, 包括玻璃纤维、硅酸铝和硅酸钙等类型, 根据 NEI 04-07, r0, Vol2 中 3.4.2.2 节的保守假设 (NEI04-07 中假设的 Jacketed Nukon with standard bands) ZOI 取  $17D$  (俄罗斯对田湾 34 号机组的滤网设计中分别采用了低破坏压力  $21.6D$  和高破坏压力  $13D$ )。部分绑扎结实的保温层的 ZOI 可以适当减小 (有些还可能将影响区半径取  $2.4D$ , 如 NEI 04-07 中的 “Jacketed Nukon with Sure-Hold bands” 类似), 但具体 ZOI 值还可能需冲击实验的支持。在碎片生成量的计算过程中, 对于保温材料和外来异物, 申请者依据 CAD 工程图纸设计和现场踏勘核实结果, 并根据工程判断, 增加了一定的保守裕量; 对于潜在碎片, 采用了 NEI 04-07 的保守推荐值。

影响区 (ZOI) 模型如图 2 所示。

破口位置和破口影响区确定后, 可以具体分析产生的碎片量。一般需要统计破口周围影响区半径球形区域的碎片量。当然, 在充分论证 (包括冲击试验) 的基础上, 可以考虑破口影响区半径减小, 或者因保温层的结构改进以及其他一些因素而降低碎片量, 例如, 易拆卸保温 (模块化) 的影响区半径可以适当减小。

根据 NEI 04-07 SER 建议, 潜在碎片特性为 15% 纤维和 85% 颗粒, 可以通过对电厂的踏勘适当调整这一比例。

## 5. 碎片传输分析

碎片传输分析就是确定 LOCA 后产生的碎片, 随冷却剂在流道中迁移, 能够到达地坑滤网的碎片量。

碎片在安全壳内最初的迁移是受管道破裂的影响而产生的飞溅, 即安全壳内部高能管道发生破口或破裂, 在产生碎片的同时, 也把一些碎片输运到安全壳内各处。接下来碎片将由流体 (泄漏冷却剂或喷淋液) 冲洗向安全壳地坑迁移, 一般认为, 较大的碎片不会随流体向地坑迁移, 而较小的碎片 (油漆涂料产生的较小碎片) 绝大部分会迁移到安全壳地坑。迁移过程中碎片会遇到流道中障碍物的影响而部分沉淀滞留, 碎片沉淀或滞留的份额与碎片自身特性和流体流动速率有关。试验研究发现其特点包括: 把碎片扬起越过障碍物所需的流体速率比推动碎片迁移和维持碎片迁移的速率一般都要大; 碎片的沉淀速率, 对于形状匀称的碎片 (如纤维簇或团等) 来说, 不受横向速率的影响, 且对于形状不均匀的碎片 (如金属反射保

温——RMI 金属小薄片和油漆涂料碎片等), 虽有类似的结果, 但若引入较大的扰动, 则形状不匀称的碎片的沉淀速率会有很快的降低。也就是说, 碎片的传输与碎片类型、流道特性和冷却剂流量等多种因素有关。

部分核电厂在流道中设置障碍物, 以抑制大而重的碎片流向安全壳地坑滤网, 而且绝大部分核电厂都在安全壳地坑滤网之前加装拦污栅以拦截大块的碎片物质。但是, 一个应该引起关注的问题是碎片在流道中迁移过程, 在较窄的流道或设置障碍物处, 一些碎片会堆积在那里造成流道拥堵, 使泄漏的冷却剂或喷淋液偏离流道而回不到安全壳地坑, 这样就会对安全壳地坑内水位造成影响, 从而影响到 ECCS 和 CSS 再循环运行的压头。

碎片迁移份额的定量分析, 通常对迁移过程作适当的假设, 并根据破口失水事故的发展过程对碎片迁移的影响而分成喷放、冲洗和随水迁移三个阶段, 利用试验得到的各种碎片迁移特性数据, 采用碎片迁移量化逻辑树(图 3)的方法, 对各种类型的碎片向安全壳地坑迁移的份额进行定量计算。

具体而言, 对不同碎片以及不同的产生隔间, 有不同的处理办法。纤维碎片的传输份额需要针对碎片的大小以及其他特征在保守的基础上进行具体分析。例如对于隔间内部碎片, 建议 25%排放至隔间上部, 75%排放至隔间下部[5]; 对于大的碎片, 建议考虑 100%落到安全壳的下部; 颗粒碎片的传输份额假定为 100%, 潜在碎片沿用 NEI 04-07 的推荐值。

纤维碎片迁移的量化方法如图 3。

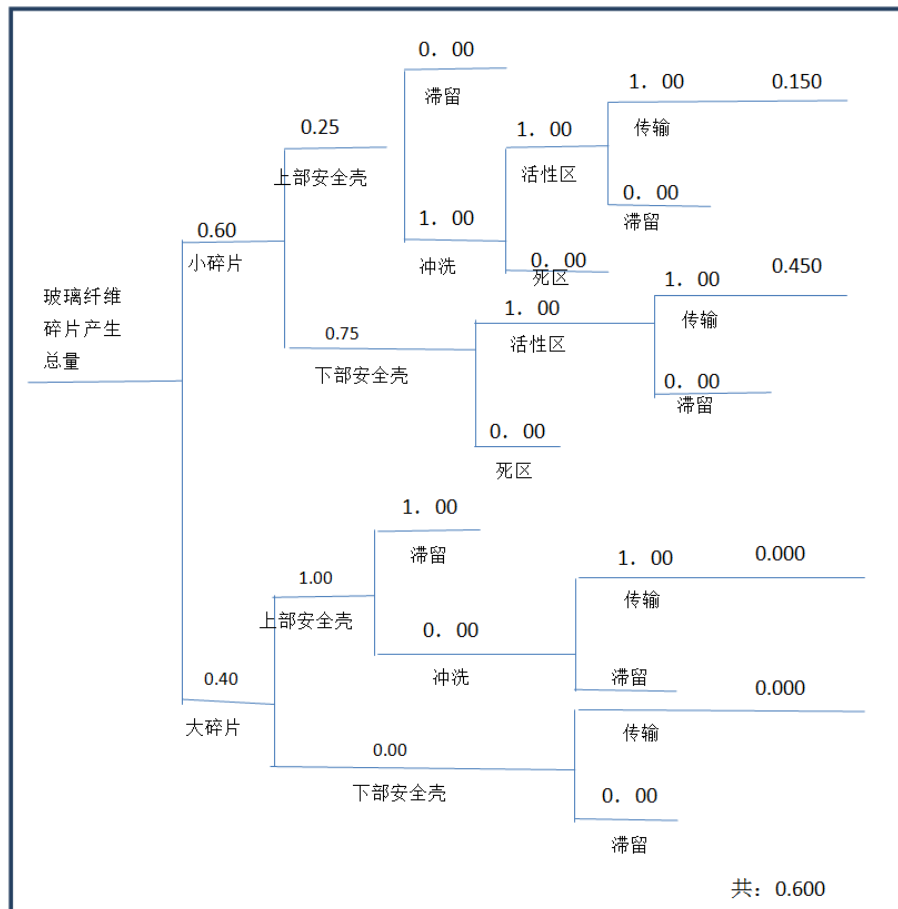


Figure 3. Logic trees about ration of debris transport  
图 3. 碎片迁移量化的逻辑树

## 6. 滤网压降分析、计算、试验及判定

### 6.1. 碎片床的不同类型

在碎片产生量和传输分析后，需要对碎片在滤网上产生的压降进行计算分析以及试验。碎片在滤网上形成碎片床，按照其组成可以分成不同的类型：纤维型、微粒与纤维混合型、金属反射保温(RMI)型、纤维与 RMI 碎片混合型[6]，这些不同的组成和结构影响其可能造成的压降损失。

特别值得注意的是微粒与纤维混合型碎片床，这是一种由纤维型碎片床过滤微粒而形成一种比较密实的碎片床，这种碎片床可以造成很高的压头损失。形成该混合型碎片床的微粒包括油漆碎片、有机油脂粒以及混凝土尘粒等。试验表明，造成很高的压头损失仅与该碎片床的结构有关，在研究中，通常把这种效应叫做“薄床效应(thin-bed effect)”，是安全壳地坑滤网堵塞研究中重点关注的一个问题。

RMI 碎渣床引起的压头降低与碎渣的形状、尺寸和类型密切相关，RMI 碎渣床引起的压头减少依赖于碎渣产生的环境及碎渣迁移。纤维和 RMI 碎渣混合床，试验表明，在大多数情况下褶皱的 RMI 碎渣与纤维和淤泥混合，跟只有纤维与淤泥混合一样，并不会导致较大的压头损失，但 NRC 通过试验发现并不完全符合这样的说法，在一些情况会出现例外的情况，因此认为这种类型的碎渣床所导致的压头损失需视实际情形而定。

### 6.2. 薄床效应

一般可以选择下面两种极端的情况进行：

- (1) 到达滤网的碎片数量(体积的数量)最多；
- (2) 到达滤网的碎片类型组合(纤维、片状、颗粒、金属类型)最不利。

滤网的设计必须保证在以上两种情况下都具有足够的保守性，即碎片负荷的保守性。碎片的数量和种类的组合是多种多样的，但对于特定的滤网和流量而言，只有一个恶劣的碎片组合使滤网的压损最大，这个组合对应的破口就是所选择的破口。

碎片的数量和种类的组合是多种多样的，存在以上所提到的四种类型，但是金属反射保温因为其本身密度大于水，因此传输到滤网的份额很少，所以一般来说，对滤网压降构成威胁主要还是纤维碎片和颗粒碎片。

前面已经提到，对地坑滤网而言，最大碎片量不一定是滤网最大负荷(导致最大压降)的情况，存在一种可能导致“薄床效应”的碎片组合[7]，也就是可能产生并输运至滤网的碎片最坏组合的情况(不一定是产生碎片越多滤网压降就一定越大)。当纤维型碎片和微粒达到一定比例时，形成密实、稳定的混合型碎片床，可能造成很高的压头损失。形成混合型碎片床的微粒包括油漆碎片、有机油脂粒以及混凝土尘粒等。试验表明，造成很高的压头损失仅与该碎渣床的结构有关，通常把这种效应叫做“薄床效应(thin-bed effect)”，这是安全壳地坑滤网堵塞研究中需要重点关注的一个问题。具体薄床的形成与多种因素有关，包括滤网结构、碎片种类及其分布，碎片添加次序等，有些结构形式的滤网可能不存在严格意义上的完整薄床，但也需要相关的最大粒径比试验进行验证。一般需要通过先实验得到能够覆盖整个滤网的细纤维碎片量，然后添加满负荷的颗粒碎片，通过改变添加次序来观察滤网上压降的变化。还可能添加二分之一最大粒径比试验等，以多种可能验证压降评估的保守性。

### 6.3. 滤网压降的定量计算

安全壳地坑滤网堵塞引起压头损失的定量计算问题，根据核电厂的具体情况，结合安全壳内使用保温材料 and 油漆涂料等产生的碎片量，和碎片在安全壳内迁移到地坑滤网处的份额，以及地坑滤网的结构

特点与面积特征，然后根据试验得到的数据，使用恰当的模型进行定量化计算。

参考文献 NUREG/CR-6224 [8]中提供了滤网压损的计算公式 5.3-1:

$$\frac{\Delta H}{\Delta L_0} = \text{Unit} \left[ 3.5 S_v^2 (1 - \varepsilon_m)^{1.5} \left[ 1 + 57 (1 - \varepsilon_m)^2 \right] \mu U + 0.66 S_v \frac{1 - \varepsilon_m}{\varepsilon_m} \rho_w U^2 \right] \left( \frac{\Delta L_m}{\Delta L_0} \right) \quad (5.3-1)$$

其中:

$S_v$  ——颗粒比表面,

$U$  ——速度,

$\Delta H$  ——压降

$\rho_w$  ——水密度

$\Delta L_0$  ——碎片层理论厚度

$\Delta L_m$  ——碎片层实际厚度

Unit ——因次系数:

$$\text{Unit} = 4.1528 \times 10^{-5} \frac{\text{ft-water/in}}{\text{lbm/ft}^2 \text{s}^2} \quad (5.3-2)$$

$\varepsilon_m$  ——纤维和颗粒混合物的多孔性:

$$\varepsilon_m = 1 - \left( 1 + \frac{\rho_f}{\rho_p} \eta \right) (1 - \varepsilon_0) \frac{\Delta L_0}{\Delta L_m} \quad (5.3-3)$$

$\rho_f$  ——纤维密度(175 lbm/ft<sup>3</sup> 或 2083 公斤/立方米)

$\rho_p$  ——颗粒密度(324 lbm/ft<sup>3</sup> 或 5129 公斤/立方米)

$\eta$  ——颗粒重量与纤维重量之比

$\varepsilon_0$  ——原始状态下纤维的多孔性:

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{c_0}{\rho_f} \quad (5.3-4)$$

$c_0$  ——制造时纤维的密度

$c$  ——过滤器上的纤维实际密度

$$c = \alpha c_0 \left( \frac{\Delta H}{\Delta L_0} \right)^\gamma \quad (5.3-5)$$

对于 NUKONTM,

$$c = 1.3 c_0 \left( \frac{\Delta H}{\Delta L_0} \right)^{0.38} \quad (5.3-6)$$

针对含垃圾和颗粒混合物的碎片,实际确定增加的限值可能性,滤网上纤维的实际密度为 65 lbm/ft<sup>3</sup>。

对于颗粒和纤维混合物,比表面:

$$S_v = \sqrt{\frac{S_{vf}^2 V_f + S_{vp}^2 V_p}{V_f + V_p}} = \sqrt{\frac{S_{vf}^2 \Delta L_f + S_{vp}^2 \Delta L_p}{\Delta L_f + \Delta L_p}} \quad (5.3-7)$$

其中:

$S_{vf}$ : 纤维比表面积,  $S_{vp}$ : 颗粒比表面积,  $V_f, \Delta L_f$ : 纤维体积, 厚度,  $V_p, \Delta L_p$ : 颗粒体积, 厚度。



其中纤维层厚度:

$$\Delta L_f = \frac{\Delta L_0}{1 + \frac{\eta c_0}{\rho_p}} \quad (5.3-8)$$

颗粒层厚度:

$$\Delta L_p = \Delta L_0 - \Delta L_f \quad (5.3-9)$$

NUREG/CR-6224 中计算的精确度估计为 20%，为保守起见，计算结果一般需要乘上因子 1.2 作为实际的评估数值。

在滤网压降计算(或试验)的基础上，需要进一步给出安注泵以及喷淋泵的 NPSH 计算分析报告，计算需要结合流道压损，根据泵的净正吸入压头进行裕量分析。

#### 6.4. 杂质鉴定试验

滤网压损由清洁滤筒压损、滤床压损和滤网汇流槽压损三部分组成。其中清洁滤筒压损和滤网压损因为计算有较大的不确定性，主要还是由杂质鉴定试验确定，汇流槽压损通过 NUREG/CR-6224 和 NEI 04-07 规范经过计算得到。

杂质鉴定试验就是在实验室条件下，采用一定过滤面积的地坑滤网样机，模拟测量一定温度下不同流速、不同碎片负荷下的压损，其中流速保持与地坑滤网设计平均流速，碎片负荷可以分为薄床负荷(通过试验得出)和满负荷(对应于滤网最大负荷)。试验不能完全采用上游分析确定的碎片，特别是运行电厂，一般根据 NUREG/CR-6224 采用替代碎片来进行样机鉴定试验。通过分析各尺寸碎片的分布，选用处理后的一定尺寸范围的替代碎片，替代碎片的数量通过利用实体体积法计算得到。

完整的杂质鉴定试验一共分为清水试验、薄床试验和满负荷试验[9]，薄床试验也按颗粒碎片和纤维碎片的添加次序分三种情况进行试验，试验中还应考虑最大粒径比(或者还可以包括二分之一最大粒径比以及环路最大粒径比)试验。在薄床试验中通过逐渐添加细纤维碎片直至完全覆盖滤网表面，试验时以设计试验流量运行，压损稳定后经过一定流量台阶的扫流，最终又恢复到设计试验流量。最大粒径比试验就是将最大的颗粒碎片量和形成薄床的纤维量混合均匀后添加。

试验中还对滤网下游的水进行浑浊度测量，一般说来，在样机表面滤网完全被覆盖的情况下，滤网下游的水浑浊度将大为降低并稳定。试验时还需要注意保持水箱的水位高于滤网，避免空气吸入滤网。

试验一般在常温下进行，通过温度修正方法转化成设计的事后运行条件温度 120℃ 下的压损数据，该数据的最大值结果汇流槽流道压损分析结果的最大值，两者之和应不能超过压降限值。

#### 7. 化学效应的考虑

在发生大破口失水事故(LOCA)或主蒸汽管道破裂(MSLB)时，安全壳内的结构材料和保温材料在冷却剂和喷淋液的冲刷和浸泡下，可能腐蚀溶解，这些溶解的物质由于温度、压力及化学条件的变化，或者与其他物质反应，可能会生成某些化学产物并析出。这些化学产物可能堵塞碎片床的空隙，从而影响压降，由这些化学产物对地坑滤网性能产生的影响称为化学效应[10]。详细的影响评价见专门的审评见解。总之地坑滤网的设计也因为需要考虑这一因素也设计较大的裕度，在滤网杂质鉴定试验中需要添加化学碎片或者长时间的模拟化学环境。

#### 8. 结构鉴定及其他

地坑滤网虽然是一项结构上较为简单的设备，但因其重要性，生产商应具备一定的资质，有核电生

产的实际工程经验。

地坑滤网承担着设计基准事故下对安全壳内流体的过滤功能，因此要求满足相关的抗震要求。新设计的滤网应进行相关力学和抗震分析，并完成抗震鉴定试验，以保证其在地震时及地震后的结构完整性及功能性。除地坑滤网本身外，电厂改造涉及的相关管线也应完成相关的力学评价。

## 9. 结论

上游分析是地坑滤网的基础性工作，不管是在运行还是在建的核电厂，当前在我国许多核电厂采用在整个地坑环廊布置双层过滤器的办法，从结构上基本最大化过滤面积(单列大概有 200 m<sup>2</sup> 以上)。对于大部分电厂而言，在压降计算以及杂质鉴定试验上满足要求，并且滤网面积可能还有较大的裕量。

但是正因如此，在滤网面积过大而初期碎片量不多的情况下，滤网上不易生成滤床，有可能更多的碎片进入下游，带来相应的下游效应问题。因此从根本上要完全解决地坑滤网问题，需要从上游减少源项，采用合适的保温材料是一个重点努力的方向。

## 参考文献 (References)

- [1] US.NRC (2002) GSI-191 Technical Assessment; Parametric Evaluations for Pressurized Water Reactor Recirculation Sump Performance. NRC, Washington DC.
- [2] NRC (2004) Generic Letter 04-02, Potential Impact of Debris Blockage on Emergency Recirculation during Design Basis Accidents at Pressurized Water Reactors. NRC, Washington DC.
- [3] 国家核安全局. 关于开展运行核电厂安全壳地坑滤网改造的通知[Z]. 2012.
- [4] NEI (2004) Pressurized Water Reactor Sump Performance Evaluation Mechodology. NEI, Washington DC.
- [5] 中广核. 安全壳地坑过滤器上游分析报告[Z]. 2012.
- [6] 刘宇, 张庆华, 李春. 核电厂安全壳地坑滤网堵塞问题的机理分析[J]. 核安全, 2008(3): 52-56.
- [7] 李春, 张庆华, 刘宇. 核电厂地坑滤网堵塞问题研究进展与现状[J]. 核安全, 2008(4): 37-41.
- [8] NUREG/CR-6224 (1995) Parametric Study of the Potential for BWR ECCS Strainer Blockage Due to LOCA Generated Debris, Final Reports, U.S. Nuclear Regulatory Commission, October.
- [9] NUREG/CR-6808 (2003) Knowledge Base for the Effect of Debris on Pressurized Water Reactor Emergency Core Cooling Sump Performance, U.S. Nuclear Regulatory Commission, February.
- [10] WCAP-16793-NP (2007) Evaluation of Long-Term Cooling Considering Particulate, Fibris and Chemical Debris in the Recirculating Fluid, Revision 0, June.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [nst@hanspub.org](mailto:nst@hanspub.org)