

乏燃料后处理厂抗震类管道包络性 计算分析审评实践

丁子星¹, 黄兴蓉¹, 李高彦², 杜唱白³

¹国防科工局核技术支持中心, 北京

²中核404有限公司, 甘肃 兰州

³中核四川环保工程有限责任公司, 四川 广元

Email: dingzixing110@163.com

收稿日期: 2020年10月7日; 录用日期: 2020年10月22日; 发布日期: 2020年10月29日

摘 要

乏燃料后处理厂存在大量抗震类管道, 若全部进行详细力学计算, 将耗费大量人力物力且无法满足工程进度要求。审评单位认为通过对安全分级、抗震要求、运行工况、管道规格、布置形式等方面进行分析, 筛选出部分管道进行反应谱分析, 另外采用确定性方法对执行安全功能或具有特殊要求的管道进行反应谱分析, 其他管道进行简化计算的方法, 是可行的, 能够较好的解决计算效率问题、包络全部抗震类管道且保证管道地震工况下安全性。

关键词

乏燃料后处理厂, 抗震类管道, 筛选法, 确定性法, 简化计算法

The Selection Principle for Calculating the Envelopment of Aseismatic Pipeline in Spent Fuel Reprocessing Plant

Zixing Ding¹, Xingrong Huang¹, Gaoyan Li², Changbai Du³

¹Nuclear Technology Support Center of SASTIND, Beijing

²The 404 Company Limited, China National Nuclear Corporation, Lanzhou Gansu

³The Eco-Friendly Company Limited, China National Nuclear Corporation, Guangyuan Sichuan

Email: dingzixing110@163.com

Abstract

Spent fuel reprocessing plant exists plots of aseismatic pipeline. If all the aseismatic pipelines are calculated detailed, it will cost many human and object resources. And it is unable to meet the project schedule requirements. In view of this, a method is provided that analysis through safety classification, seismic requirement, operating condition, pipeline specification and pipeline layout. Then some pipelines are selected for response spectrum analysis, other pipelines are calculated simplified. The evaluation units think the method is reasonable and feasible. In addition, the deterministic method is used for the detailed calculation of pipelines executing safety functions or with special requirements. This can better solve the problem of computational efficiency and ensure the safety of pipeline under seismic condition.

Keywords

Spent Fuel Reprocessing Plant, Aseismatic Pipeline, Screening Method, Deterministic Method, Simplify Calculation

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

当前国际上对核电管道系统的试验研究和理论分析工作开展得十分活跃, 美国电力研究院(EPRI)、美国核管会(NRC)、日本核能安全组织(JNES)、美国机械工程学会(ASME)等主要围绕 ASME、RCC-M 规范进行研究[1] [2]。通常, 乏燃料后处理厂的管道抗震设计参考核电相关规范, 基于此审管部门针对乏燃料后处理厂出台《技术政策》, 其中规定“抗震 I 类物项在抗震设计和计算时, 在对物项规格、尺寸、形状、位置、安装方式、楼层谱、运行工况等充分论证的基础上, 可合理选择典型物项在恶劣条件下的抗震分析以包络具有相似性的其他物项, 并提供相应的包络性分析支持材料”。在保证安全的前提下, 如何科学合理的对抗震类管道开展力学分析计算是一件非常有意义的事。

2. 审评思路

由于乏燃料后处理厂具有大量管道布置形式、布置位置及管道规格相似的特点, 因此审评单位认为可以对所有抗震类管道梳理包络分析关键参数, 如输入参数(包括直径、介质放射性水平、温度、压力、标高、长度和有无阀门管道复杂性方面)、建模方面(管道自重、阀门质量、约束条件)、阻尼比选取、解耦原则等, 进而制定相应的筛选原则, 挑选典型且具有代表性的管道进行反应谱分析, 另外, 对于执行安全功能的管道(如应急压空、应急冷却水)和具有特殊要求的管道(如 Ti-35 特殊材质)进行反应谱分析。

经与设计单位讨论, 审评单位分阶段提出如下要求: 建造许可阶段确定需反应谱法详细计算的管道筛选原则, 进入冷试阶段以前梳理出反应谱法计算管道清单以及可以包络哪些管道, 最后挑选典型管道详细审查计算报告。本文将重点讨论需反应谱法计算的管道筛选法、确定性法以及简化算法。

3. 审评实践

3.1. 总体原则

设计单位提出乏燃料后处理厂所有抗震类管道均进行分析计算。经设计单位与审评单位多次交流讨论,共同提出了一种通过对安全分级、抗震要求、运行工况、管道规格、布置形式等方面进行分析,筛选出部分典型管道进行反应谱法计算,另外采用确定性方法对执行安全功能或具有特殊要求的管道进行详细力学计算,其他抗震管道参考《核电厂抗震设计规范》(GB50267-97)进行简化计算(采用静力法)。

进行反应谱法计算的抗震管道,根据《技术政策》,应力评定和许用限值选取遵照 RCC-M 规范(2007版),放化 1 级相当于核安全 2 级,放化 2 级相当于核安全 3 级,放化 1、2 级管道均按照 RCC-M2、3 级评定。

3.2. 筛选法

设计单位提出从力学分析重点关注的原则和系统设计重点关注的原则两方面分别确定需开展反应谱法计算管道的筛选原则。

3.2.1. 力学分析角度

设计单位经分析抗震类管道包络计算各关键参数,提出重点关注以下六个方面:1) 管道尺寸:管径越大管道刚度越大,越不容易满足管道柔性分析要求,因此优先选择管径大的管道进行反应谱法计算;2) 管道运行温度:因为管道应力与管道运行温度成正比,因此重点选择高温管道进行反应谱法计算;3) 管道压力:乏燃料处理厂项目中介质压力较低,管壁应力通常较小,因此介质压力的影响基本可以忽略。4) 管道的布置位置:对于具有类似布置的关系,通常选取楼层较高,即所处位置楼层反应谱较大的管道;5) 管道的布置形式:由于长直管道的地震应力和温度应力难以同时满足规范要求,需进行反应谱法计算分析。6) 管道壁厚:后处理厂介质种类繁多,包括水、酸、碱、有机相、压空、蒸汽、氮气等,对管道力学计算有影响的主要是酸,易造成管壁腐蚀。管道在设计过程中都会考虑足够的腐蚀裕量,壁厚的加大,增加了管道截面,热胀载荷相应变大。因此如果其他情况相似,应优先选择壁厚大的管道进行详细力学计算。

3.2.2. 系统设计角度

从系统安全方面的要求和单元流程布置形式两方面分别进行考虑。

1) 系统安全的要求方面

从维持系统安全功能角度考虑,应选取安全分级更高、影响系统安全、失效后难以处理或恢复的管道进行反应谱法计算。

2) 单元流程布置形式

后处理厂系统复杂,管线多,但是各单元流程相对比较统一,布置形式也十分类似,比如料液输送用的空气提升单元等。对于相同单元流程的管道,优先选择楼层反应谱大、管径大、温度高、壁厚等级大的管道进行反应谱法计算。

审评单位认为以上分别从力学和系统设计两个方面对反应谱法分析计算管道筛选原则进行了分析,分类梳理后汇总如下:1) 安全功能:优先选择执行安全功能的管道;优先选择安全分级高的管道;重点关注高放射性水平设备室内管道及与贮槽连通的下出料管道。2) 管道规格:优先选择管径大的管道;优先选择壁厚等级大的管道。3) 管道工况:优先考虑介质温度高的的管道;后处理厂管道压力较低,对整

体力学评估影响基本可以忽略。4) 布置形式：相同单元流程的管道，挑选最不利工况的管道进行详细力学计算；优先选择布置标高、楼层反应谱大的长直管道进行计算。5) 失效后难以处理或恢复的管道：如高放废液储罐的高放干管，萃取纯化设备室高放管道。

3.3. 确定性法

对于执行安全功能的管道以及具有特殊要求的管道，需进行反应谱法分析计算。

3.3.1. 执行安全功能

审评单位提出对于执行安全功能的管道，考虑到失效后可能导致放射性泄漏，因此在地震工况下仍需保证功能性，主要包括应急压空吹扫系统、应急冷却水系统、高放厂房的呼排系统、高放设备室的地坑返液系统，以上这些系统均应进行反应谱法计算。

3.3.2. 具有特殊要求

1) 对于带有阀门的抗震管道，需对管道进行详细评价，以便为阀门抗震计算提供输入；2) 对于承受循环热荷载的管道，需要考虑疲劳失效问题，进行反应谱法计算；3) 对于特殊材质管道，如 Ti-35，力学性能与常规奥氏体不锈钢有差异，需进行反应谱法计算。

3.4. 简化算法

对于不进行反应谱法计算的管道，设计单位采用简化算法对管道进行计算，即按照 $F = \gamma ma$ 公式进行简化计算。上式符号具体含义为，F：节点力； γ ：安全系数；m：支撑点承担的管道与介质质量总和；a：地震加速度。对于安全系数 γ ，参考 GB50267-97 静力法管道计算公式 $F = 1.5 G/g S_a$ ，由于计算中未考虑弯矩的影响，保守取 γ 为 2.0。另外设计单位从反应谱法计算管道中抽取部分管道，同时采用简化法进行计算，并将两种方法的计算结果进行对比，验证简化计算方法的适用性，结果表明简化法基本可以涵盖反应谱法计算结果；设计单位同时表示，后续将对简化分析法进行持续验证、对比分析，对类似的设计进行优化调整。

4. 结论

本文提出通过对安全分级、抗震要求、运行工况、管道规格、布置形式等方面进行分析，筛选出部分典型管道进行反应谱法计算，另外采用确定性方法对执行安全功能或具有特殊要求的管道进行反应谱法计算，其他管道进行简化计算的方法。

审评单位认为设计单位给出的筛选法选取原则和确定性法选取的典型管道及简化计算方法是可行的，同时要求设计单位在冷试前，提供典型管道的力学分析覆盖性说明，并要求提供典型管道力学计算报告。

审评单位持续关注简化计算方法的包容性，对于不能覆盖反应谱计算结果的管道将进行重点关注。

参考文献

- [1] Sato, K. and Monde, M. (2009) Study on Seismic Safety of the Small-Bore Piping and Support System. *Mitsubishi Heavy Industries Review*, **46**, 23-28.
- [2] Stevenson, J.D. (2007) A Review of the Seismic Design and Analysis of Piping Ranging from Conventional Building Code Static Analysis of Time-History. *Dynamic Analysis Transactions, AMiRT19*, Toronto, August 2007, 1-8.