

高放废液玻璃固化设备抗震分析

王晓荣, 赵昱龙, 张小伟, 孙德泉, 黄兴蓉

国防科工局核技术支持中心, 北京, 100080

摘要:介绍了中国和德国双方供货的高放射性废液玻璃固化工程典型设备抗震分析的计算输入、计算模型、计算程序、计算方法、载荷组合、应力评定准则、评定项目及评定规范,同时对双方的抗震分析的相同之处和差异性进行了分析。结果表明中德两国抗震分析虽采用不同的规范标准体系进行设计和抗震分析,计算程序也不相同,但两者在安全上均有一定裕度。

关键词:玻璃固化工程;典型设备;抗震分析与评定;差异性

中图分类号: TL941 **文献标志码:** A

Seismic Analysis of Typical Equipments in High Level Radioactive Vitrification

Wang Xiaorong, Zhao Yulong, Zhang Xiaowei, Sun Dequan, Huang Xingrong

Nuclear Technology Support Center, State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense, Beijing, 100080, China

Abstract: This paper elaborates respectively the computation input, numerical models, software, methods, load combination, stress evaluation criteria, items and codes between China and Germany about typical equipments of the high level radioactive vitrification projects, and analyzes the coherences and differences at the same time. Results indicate that both have some safety margin, although they use different codes and softwares.

Key words: Vitrification, Typical equipments, Seismic analysis and evaluation, Differences

0 引言

高放射性(简称高放)废液玻璃固化工程是一项技术复杂、潜在安全风险大的放射性废液处理工程。高放废液中间槽和陶瓷熔炉是高放废液玻璃固化工程中的重要设备,由德方设计和供货,其中设备的抗震设计要根据中方提供的楼层反应谱进行抗震分析;该工程中其他设备如接收槽 II、中放射性(简称中放)废液收集槽、蒸残液槽等设备由中方负责设计和抗震分析。

我国高放废液玻璃固化技术基础比较薄弱,无热试验实践及相关核安全审评监管经验。为保证该工程核安全审评工作顺利开展,从 2006 年开始,审评者即开展了相关前期准备工作,针对高放废液玻璃固化工程所采用的标准规范、审评程序、安全分级、事故分析、玻璃固化产品接收要求、安全分

析报告编制要求,以及安全监管政策等进行了专题研究。

1 德方供货典型设备抗震分析

高放废液中间槽和熔炉由德国联合体供货,设计和抗震分析由 KAH 公司负责。德方供货设备的抗震分析依据 KTA3211.2、KTA3205.2 标准;KTA 标准的许用应力取值、载荷组合及应力限值与 ASME-III 和 RCC-M 规范相近。抗震分析方法采用的是反应谱法和等效静力法。德方的抗震分析依据及分析方法得到德国审管部门认可。

1.1 高放废液中间槽

中间槽为抗震 I 类设备,总容积 7 m^3 ,总重量为 9.9 t (含介质)。设备材料为 1.4307(304L),支撑件材料为 1.4571(316Ti)。安装型式为 4 个支腿

底板与设备基础预埋板焊接。德方共提供了3份关于此设备的报告：尺寸计算书、管口局部应力计算报告以及稳定性和完整性计算报告。

设备设计及常规计算采用德国的压力容器标准《AD2000》，中间槽筒体和封头应力按《KTA3211.2》评定，支撑件（支腿）以及与支撑件相关的焊缝应力按《KTA3205.2》评定。

中间槽计算采用德国有限元分析软件RFEM 5.01，采用壳单元建立模型。地震载荷采用等效静力法进行计算，最大加速度根据第一阶固有频率取值（阻尼比按4%取）。

计算载荷考虑了自重（永久载荷）、接管载荷和安全停堆地震（SSE）载荷。抗震分析按正常工况和事故工况进行评定：正常工况（A级）载荷组合为自重（含介质）+接管载荷；事故工况（C级）载荷组合为自重（含介质）+接管载荷+SSE。中间槽上部接管载荷共考虑了10根接管。接管载荷采用德国后处理厂中试厂的内部文件《管道布置导则》，该文件得到德国审管部门批准用于玻璃固化厂VEK。与国内常用核二、三级设备接管载荷相比，略为偏小，但根据本项目的具体情况审评者认为接管载荷的计算输入是可以接受的。

计算结果给出了下封头和壳体连接处在A级和C级准则下的薄膜加弯曲应力评定结果、支腿在H级和HS级准则下所受的弯曲应力评定、支腿与预埋板之间焊缝的应力评定，均满足应力限值要求。同时给出了H级和HS级准则下4个支腿的设备基础载荷（支座反力）。

1.2 陶瓷熔炉

陶瓷熔炉为抗震I类设备，长方形外形，总重约28t（熔炉+玻璃熔融体）。安装型式：熔炉安放在熔炉支架上，熔炉支架底部2个支腿与热室地面预埋板焊接，支架上部2个支耳与热室墙面预埋板焊接。钢外壳及支架均为1.4571(316Ti)材料。

钢外壳应力按KTA3211.2规范进行了评定；支撑件（支架）应力按《KTA3205.2》规范进行了评定。熔炉计算采用ANSYS有限元分析软件。钢外壳和加强筋采用SHELL93单元建模；填充物采用SOLID45单元建模；支架采用BEAM189单元建模；钢壳与填充物之间采用LINK10单元建模。计算方法采用反应谱法和等效静力法。对于地震载荷的处理，在动态分析后，对于剩余质量采用刚性频率对应的加速度进行了静力修正。

计算载荷考虑了自重（熔炉和玻璃熔融体）、接管载荷和SSE。熔炉抗震分析分正常工况和事故工况进行评定，正常工况（A级）载荷组合为自重（熔炉和玻璃熔融体）；事故工况（C级）载荷组合为自重（熔炉和玻璃熔融体）+SSE。

抗震计算结果：3个方向的模态分析的参与质量与总质量的比达到91%~95%。报告给出了熔炉钢外壳、加强筋和支架在A级准则和C级准则下的应力评定结果，均满足应力限值要求。审评者在土建阶段重点关注的土建接口载荷报告中给出了熔炉支架与预埋板4个支撑点处的接口载荷（支座反力），即在H级及HS级工况下4个支撑点的X、Y、Z三个方向的力和力矩。

2 中方供货典型设备的抗震分析

中方供货典型设备接收槽II为放化1级设备视同核全2级设备，设备本体按《RCC-MC3300》评定，中放废液收集槽为放化2级设备视同核全级3级设备，按《RCC-MD3300》评定，支撑件均按《RCC-MHS2级支承》评定。

计算程序采用大型商业通用结构分析ANSYS软件，抗震分析方法采用了谱分析法和等效静力法。典型设备计算载荷考虑了自重（设备和液体的重量）、接管载荷和地震载荷（考虑设备内的液体晃动）。接管载荷参照德方相关文件选取。

2.1 接收槽II

接收槽II为抗震I类设备，总容积7m³。安装型式：容器通过4个支耳及螺栓固定在设备室的方钢支架上；方钢支架由2根长方钢+2根短方钢焊接而成；2根长方钢与墙上的预埋板焊接固定。容器材料022Cr19Ni10(304L)，支撑件方钢06Cr17Ni12Mo2Ti(316Ti)，连接螺栓A2-70。

在地震计算中，建立了容器与管道的三维实体有限元的模型、连接板的壳体模型、液固耦合Housner模型。地震作用的计算采用线性谱法计算结构地震响应，用分组法（GRP）组合各阶模态，用平方和平方根法（SRSS）组合三向地震作用。通过模态分析和谱分析，分别给出了在设计工况（O级）、正常工况（A级）、异常工况（B级）和事故工况（D级）下对容器应力评定、支撑件应力评定、螺栓应力评定及方钢焊缝应力评定、轴向失稳分析与评定，评定结果满足应力限值要求。同时还给出2根长方钢与预埋板连接处在设计工况（O级）和

事故工况(D级)下的最大支反力(X、Y、Z三个方向的力和力矩)。

通过应力分析与评定可以得出:各工况载荷作用下,接收槽II壳体满足稳定性和完整性要求;各部件连接处的焊缝强度和螺栓满足规范对核全2级设备结构完整性和稳定性要求。支反力是分别采用等效静力法和反应谱法计算结果中较大值,因此,给出的支反力计算结果具有较大的保守性。

2.2 中放废液收集槽

中放废液收集槽为抗震I类设备,总容积 7 m^3 。安装型式:4根支腿与设备基础预埋板焊接连接固定。容器材料及支承件均为022Cr19Ni10(304L)。

计算模型及方法:在地震计算中,建立了容器与管道的三维实体有限元的模型、连接板的壳体模型、液固耦合Housner模型。地震作用的计算方法同接收槽II。通过模态分析和谱分析,在各工况下分别进行了容器应力评定、接管应力评定、支承件连接焊缝评定、轴向失稳分析与评定。评定结果满足应力限值要求。同时给出了每个支腿的在各工况下的最大支反力。

3 对比分析

3.1 相同或相似之处

中德双方接管载荷取值都来源于德国后处理厂中试厂文件《管道布置导则》,该文件得到德国审管部门批准用于玻璃固化厂VEK。另外,由于某些设备(如接收槽、中放收集槽等)的接管较多,最多有39根,若都考虑它们对支撑处的不利组合,显然是不现实的,因此,按德方文件要求,采用加载方法为:最大的2根接管载荷按100%施加;冷管($<70^\circ\text{C}$)按80%施加;热管($>70^\circ\text{C}$)按50%施加;加载的接管不超过10根。

在评定工况数目方面,德方只评定了正常工况和事故工况,而中方评定的工况包括设计工况、正常工况、异常工况和事故工况。事实上,中方评定的设计工况已经包络了正常工况和异常工况的内容,因此,双方在评定工况数目方面是一样的。

所有设备地震谱输入数据皆源于玻璃固化厂房工艺区楼层反应谱,应力分析皆采用谱分析方法,而设备基础载荷皆采用等效静力法。

3.2 不同之处

在评定规范方面,德方采用KTA3211.2和KTA3205.2;而中方采用RCC-M C篇、D篇、H

篇和Z篇;在载荷组合方面,德方并未考虑运行基准地震(OBE)载荷;而中方按规范要求将OBE载荷纳入到设计工况和异常工况里;在应力限值方面,德方在紧急工况里考虑了SSE载荷,并用对应的C级准则评定具有一定的保守性;而中方在设计工况里考虑OBE载荷并用O级准则评定相比德方而言要保守些;在有限元模型简化方面,德方将液体作为集中质量施加在筒体上;而中方按照《与核安全相关的结构的地震分析》建立液固耦合Housner模型来模拟液体晃动效应;在计算接管根部局部应力方面,德方采用的是比较经典的美国焊接学会WRC107公报的计算方法;而中方采用的是有限元方法。从计算结果来看,有限元计算结果偏大,但能满足规范要求;德方接收槽和中方接收槽II的支撑方式不一样,德方采用支腿式支撑,而中方的设计是通过4个支耳及螺栓固定在设备室的方钢支架上;在计算软件方面,德方采用有限元分析软件RFEM5.01,而中方采用大型通用有限元分析软件ANSYS。

4 结论

综上所述,中德两国供货的设备抗震分析的载荷输入条件基本一致,虽然采用不同的规范标准体系进行设计和抗震分析,计算程序也不尽相同,但双方抗震分析计算的规范、程序和方法都是经过双方国家审管当局认可的。通过对KTA、ASME-III和RCC-M规范在许用应力取值、应力评定准则(工况分类)、载荷组合及应力限值的对比分析,认为这3个规范非常相近。

德方按KTA标准只在A级和C级准则下进行了应力评定。在地震作用下,设备要保证完整性和稳定性,即设备在地震中和地震后不允许出现有限范围的塑性变形,为此,德方在设备的应力限制规范采用C级而非D级准则,即在自重+接管载荷+SSE地震作用下设备的应力仍满足C级准则,具有较大的安全裕度。因此,德方虽未进行OBE抗震计算,但结论仍然是可以接受的。而中方按RCC-M分别在O、A、B和D级准则下进行了应力评定,中方将OBE载荷与设计工况的其他载荷进行叠加并用O级准则评定同样具有一定的安全裕度。从某种意义上来说,中德双方对同一个设备进行抗震分析在保守性上具有一定的互补。

(责任编辑:王中强)