

美国换热器协会《电厂换热器标准》分析与讨论

陈红生,应秉斌,巢孟科,李 煜
(上海核工程研究设计院,上海 200233)

摘 要: 介绍了美国换热器协会(HEI)《电厂换热器标准》的主要内容,对比其与 GB 151 和 TEMA 换热器标准的差异,并讨论了采用该标准进行核电厂换热器设计需注意的事项。

关键词: 美国换热器协会; 电厂换热器标准; 核电厂

中图分类号: TE965; T-651 **文献标识码:** B **文章编号:** 1001-4837(2011)10-0027-06

doi: 10.3969/j.issn.1001-4837.2011.10.005

Analysis and Discussion of Heat Exchange Institute Standards for Power Plant Heat Exchangers

CHEN Hong-sheng, YING Bing-bin, CHAO Meng-ke, LI Yu
(Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute, Shanghai 200233, China)

Abstract: The detail requirements of Heat Exchange Institute(HEI) Standards for Power Plant Heat Exchangers (PPHX) were introduced and discussed in order that more designer would pay attention to the standard. The similarities and differences between PPHX, TEMA and GB 151 were compared. Moreover, some items to be noticed in PPHX were pointed out in nuclear power plant heat exchanger design.

Key words: Heat Exchange Institute; power plant heat exchangers; nuclear power plant

0 引言

美国换热器协会(HEI) 成立于 1933 年,是知名的换热和真空设备标准的开发组织,目前共发布 7 份标准,见表 1。《电厂换热器标准》(PPHX) ^[1] 是其中之一,我国引进的三门和海阳 AP1000 核电项目的一些换热器就是采用该标准进行设计的。《电厂换热器标准》反映了当前工程设计标准、采购要求以及制造经验。标准中规定电厂换热器重要的设计准则,得到各国电力行业包括核电行业的普遍重视和应用。最新修订的第 4 版代表了换热设备领域内的最新成果,文中将对其进行简单的介绍和对比分析。

表 1 美国换热器协会标准

标准名称	版本
《封闭给水加热器》	第 8 版, 2009
《蒸汽表面冷凝器》	第 10 版, 2006
《液环真空泵性能标准》	第 4 版, 2011
《蒸汽喷射真空系统标准》	第 6 版, 2007
《盘式除氧器的典型标准和规格》	第 8 版, 2008
《电厂换热器标准》	第 4 版, 2004
《直接接触气压和低级冷凝器标准》	第 8 版, 2010

1 标准范围、目的

《电厂换热器标准》适用于核电厂中换热管

为光管和翅片管的管壳式换热器。标准规定了核电厂换热器在热工、水力和机械设计方面的要求,并强调在遵循本标准的同时还应该符合相应设计规范的要求,比如 ASME 第Ⅲ卷^[4]和Ⅷ卷^[5]。

核电厂管壳式换热器介质、运行工况等和石化行业换热器差别较大。首先是介质单一,核电厂管壳式换热器管、壳侧的介质主要是水(海水)或水蒸气,虽然核电厂一回路冷却剂会加入控制反应性的 5% 硼酸,但这无法与石化行业复杂工质相比。其次,核电厂有大量换热器运行在 25 MPa, 350 ℃ 以下,运行工况复杂。《电厂换热器标准》针对核电厂换热器的上述特点,总结并给出了相应的规定。

2 标准术语定义

《电厂换热器标准》给出本标准术语的定义,包括清洁系数、污垢热阻等。清洁系数、换热器趋近温度和设计点是此标准特有的概念(见表 2)。清洁系数和运行后某一时刻的污垢热阻有关,指换热器运行后某一时刻总传热系数与换热器完全清洁时传热系数的比值。换热器趋近温度是指热流体出口温度和冷流体进口温度差。其他定义如设计温度、设计压力、压力降等和 TEMA^[6], GB 151^[7] 相同。

表 2 电厂换热器术语定义

术语	定义
清洁系数	换热器运行后某一时刻总传热系数与换热器完全清洁时传热系数的比值
换热器趋近温度	热流体出口温度和冷流体进口温度差
设计点	换热器需要满足的一系列设计工况的组合

3 换热器性能

《电厂换热器标准》规定了换热器性能要求,并讨论了和性能密切相关的诸方面。换热器应满足采购方确定的设计要求,即设计要求中给出的一系列设计工况均要满足。标准规定采购方应提供的设计参数,如换热器类型、换热量、空间限制、

清洁系数、管壳侧工艺参数、过载或异常工况的参数。这些参数在附录 F 中以表格的形式给出,使用这些数据可以采用 HTRI 等设计软件进行热工计算。以下对性能密切相关的几方面进行说明。

3.1 污垢热阻和清洁系数

污垢热阻和换热器的性能密切相关。换热器采购方有责任确定换热器的污垢热阻或清洁系数。正确的污垢热阻和污垢产物有助于设计人员设计满足工艺要求的换热器,并确定合适材料以避免侵蚀、应力腐蚀等。

《电厂换热器标准》讨论了污垢热阻产生的原因以及减少污垢的措施。产生污垢热阻的原因很多,核电厂换热器常见污垢主要有 5 类,如表 3 所示。

表 3 电厂换热器常见污垢

污垢种类	成因
腐蚀	通常以氧化层的形式发生,常见于碳钢换热管
结晶	通常是盐的结晶,特别是水中的矿物质超过溶解度后在换热管表面形成的碳酸钙化合物
固体	通常是泥沙、悬浮颗粒、腐蚀颗粒等
有机生物	有机生物附着在换热管上,如藻类和贝类,能够减少传热速率并堵塞换热管
碳氢化合物沉积	高温下的碳氢化合物会在换热管上形成碳化物的外壳

大多数情况下,定期清洗可以显著地减少污垢。清洗方法主要有物理清洗和化学清洗,不同的清洗方法适用于不同的场合^[8]。例如,可采用清洗球、清洗刷等进行机械方式清洗;高压水冲洗可以冲掉松动的颗粒;热冲击可以使矿物沉积破裂并去除。在管侧和壳侧添加化学清洗剂可以加速污垢的脱落和去除。

一般提高含污垢较多的流体流速可以避免颗粒状污垢在停滞区沉积,应避免管侧流速小于 0.6 m/s,最好应高于 0.9 m/s。同样也应避免过低的壳侧流速。

如果采购方给出的是清洁系数,换热器运行后某一时刻总传热系数应为完全清洁状态下的初始总传热系数乘以清洁系数。图 1 示出污垢热

阻、清洁系数和总传热系数的关系^[1]。换热器刚投入运行时的污垢最小,如果在此时进行性能试验,将会得到初始总换热系数。如果发现换热器性能恶化的情况,通过对比换热系数,即可得出污垢热阻数值。这有助于确定合适的换热器清洗周期。

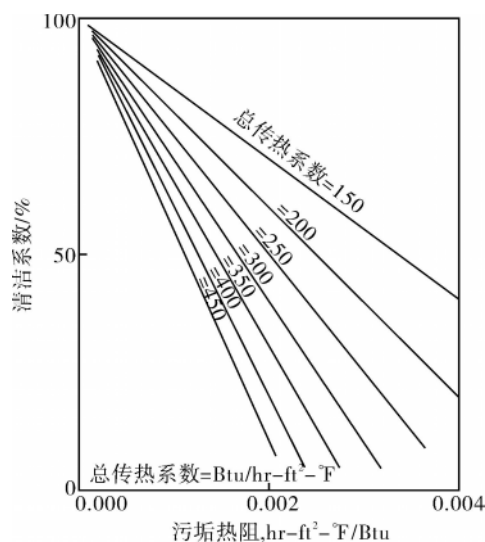


图1 污垢热阻和清洁系数与总传热系数的对应关系

3.2 换热器趋近温度

换热器趋近温度是指热流体出口温度和冷流体进口温度之差。采购方通过规定设计工况来指定换热器趋近温度。一般随着换热器趋近温度的降低,换热器所需的换热能力升高。所选择的趋近温度会影响冷热流体温度,也会影响核电厂的运行成本。因此,确定趋近温度时应综合考虑换热器制造和运行成本。

换热器采用多程结构时,应避免换热器在热不稳定区操作,即入口参数的微小改变不会导致对数平均温差校正因数的较大波动。此处规定和TEMA T-3.2 多程流动校正相同。

3.3 换热管内流速

流体流速的选择,对换热器的设计和运行维护均有重大影响。高流速可以降低结垢、减小热阻、增大传热系数,进而可以降低设备制造成本。但是,过高的流速会显著增大压力降和冲刷腐蚀,提高运行成本。《电厂换热器标准》规定设计点各工况下不同材质换热管内流速不应超过表4中的流速,这些流速限制适用于锅炉给水。

表4 最大换热管内流速

换热管材料	流速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
不锈钢、镍基合金、钛	3.0
铜镍合金	2.7
铜、铝铜合金	2.6
碳钢	2.4

部分文献中常用管内流速为 $0.8 \sim 2 \text{ m/s}$ ^[4]; TEMA RCB-4.63 规定管侧介质为液体时,介质的 ρV^2 不超过 $8928 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$, ρ 为密度 (kg/m^3), V 为介质线速度 (m/s),如果介质为水, V 不超过 3 m/s 。上述文献和标准并未区分换热管为不同材料的情况,《电厂换热器标准》区分不同材料给出允许最大管内流速对设计有很强的指导意义。一般而言,随着壳侧或管侧速度的增加,换热面积和污垢沉积的可能性将减小。

3.4 压力降

《电厂换热器标准》指出壳程和管程的允许压降应由采购方确定。允许压降较高,设计者可以采用较小的折流板间距。这不但可以减小换热管无支撑长度降低换热管振动的可能性,还可提高壳侧流速和换热系数。

管程压力损失有换热管内损失、管箱接管进口、出口损失和换热管入口、出口及回弯处损失组成。《电厂换热器标准》给出的管侧压力损失计算方法适用于光管、雷诺数 ≥ 3000 且无相变的情况。

对于更详细的壳程、管程压力降的计算方法在很多换热器设计的文献中均有阐述^[7-8]。

3.5 接管尺寸和流通面积

标准推荐接管尺寸的选取应能保证设计工况下不要超过表5所列的数值。进入接管的流体应是均匀分布的,避免管道上游节流器、弯头、阀门等引起的局部高流速区损伤换热器内件。

《电厂换热器标准》未具体规定设置防冲挡板的条件,只是说明这取决于换热器设计、介质进口速度以及介质特性,并强调腐蚀性介质必须设定防冲挡板。

壳程和管束进出口的流通面积应不小于接管截面积。《电厂换热器标准》流通面积的计算和TEMA,GB 151 虽然表述不同,实质上没有区别。

表 5 接管尺寸标准

流体介质	接管内 G^2/ρ 最大值 [*]						
	PPHX				TEMA		GB 151 [§]
	管侧接管		壳侧接管		管侧	壳侧	管侧、壳侧
	进口	出口	进口	出口	进口	进、出口	进、出口
过冷液体	9227	9227	5953	5953	8929 (未区分介质)	5953 (未区分介质)	5950 (未区分介质)
进饱和点液体	1488	373	1488	373			
气体、干蒸汽	2976	2976	2976	2976			

注: G 为质量流量, $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$; ρ 为密度, kg/m^3 。当介质中存在液滴、气泡或异物时,设计者应考虑比表中所列值更低的数值。

4 换热器材料

换热器承压件和支撑的材料应符合设计规范书中指定的规范要求。采购方有责任根据使用环境确定适当的材料,使材料能承受规定的辐射剂量、避免冲刷腐蚀以及应力腐蚀等情况。

还应特别注意,ASME 第Ⅷ卷[§]允许的有些材料,在 ASME 第Ⅲ卷[§]中并不允许采用。ASME 第Ⅲ卷 ND 中允许的材料在 NC,NB 中不允许使用。而且,不同规范所需的试验和检查也不同,例如考核材料冲击韧性的冲击试验等。奥氏体不锈钢材料广泛应用于核电厂中,应特别注

意避免奥氏体不锈钢的晶间腐蚀,一般不允许采用可导致奥氏体不锈钢晶间腐蚀的卤化物。

5 机械设计标准

对于换热器机械设计,《电厂换热器标准》首先强调换热器的设计、制造应符合采购方指定规范的要求,并对腐蚀裕量、换热管、管板、管束等内容进行了详细的规定。

5.1 腐蚀裕量

采购方应指定腐蚀裕量,所有与腐蚀性介质接触的承压零件应考虑腐蚀裕量。3 个标准对于腐蚀余量的规定对比如表 6 所示。

表 6 腐蚀裕量

项目	PPHX	TEMA	GB 151
法兰面、浮头背环、内部螺栓、换热管	不考虑腐蚀裕量	不考虑腐蚀裕量	不考虑腐蚀裕量
拉杆、定距管折流板等非受压元件	未规定	不考虑腐蚀裕量	不考虑腐蚀裕量
容器法兰、接管法兰内直径	未规定	考虑	考虑
管板或平盖开槽时,高出隔板槽底部的金属	考虑作为腐蚀裕量	未规定	考虑作为腐蚀裕量,腐蚀裕量大于槽深时加上两者的差

对于腐蚀余量,设计人员首先应按照设计标准要求。并应注意,由于固定管板换热器的管板、壳体、管束三者固定相连,任一者尺寸的改变会影响到其余二件的应力。ASME 第Ⅷ卷规定对各元件要按已腐蚀和未腐蚀两种情况进行计算,GB 151 对此的规定则是含糊的[§]。因此,标准未规定的情况,可以由设计人员从偏保守的角度考虑确定。

5.2 换热管

换热管寿命受介质、操作温度、介质流速等因

素的影响,设计中应予以考虑。换热管最小壁厚与换热管外径、材料、设计参数有关,3 个标准的对比情况如表 7,8 所示。

5.3 管板

《电厂换热器标准》并未给出管板的计算方法,但指出管板是换热器设计中最复杂的部件,受到管壳侧压力、法兰螺栓载荷、垫片载荷、温差应力等载荷的影响。《电厂换热器标准》对管孔直径、孔桥宽度的规定直接采用 TEMA 的规定,所以和 GB 151 差别也不大。

表 7 换热管厚度

项目	换热管厚度/mm	
PPHX	给出了不同材料换热管的最小壁厚。例如奥氏体不锈钢直管: 22 BWG,0.71 mm; U 形管: 20 BWG,0.89 mm; 碳钢 1.27 mm	U 形管弯管前最小厚度计算方法相同 $t = t_s (1 + \frac{d_o}{4R})$ t 为弯管前所需最小厚度,mm t_s 为直管段所需的最小厚度,mm d_o 为换热管外径,mm R 为弯管段弯曲半径
TEMA	给出不同材料不同外径的最小厚度。如外径 15.9 mm: 碳钢管 18 BWG,1.24 mm; 不锈钢管 20 BWG,0.89 mm	
GB 151	未规定最小厚度,给出常用规格和尺寸。例如,外径 $\geq 14 \sim 30$ mm: 碳钢 2 ~ 2.5 mm; 不锈钢 1 ~ 2 mm	

表 8 换热管中心距

项目	换热管中心距
PPHX	换热管中心距不小于换热管外径的 1.25 倍。如果管孔需要加工坡口,可以适当增大换热管中心距
TEMA	换热管中心距不小于换热管外径的 1.25 倍。当需要机械清洗时,净空距离应不小于: R 级 6.4 mm; B 级 4.8 mm(壳体直径不大于 305 mm) ,6.4 mm(壳体直径大于 305 mm)
GB 151	换热管中心距不小于换热管外径的 1.25 倍。并以表格形式给出常用的换热管中心距,与换热管外径的比值在 1.26 ~ 1.35 之间。机械清洗时采用正方形排列,净空距离不宜小于 6 mm

当可拆卸的管束采用法兰/管板/法兰的固定型式时,推荐采用管侧、壳侧能够单独拆卸的结构,管、壳侧可以互不影响。这种结构允许对管、壳侧分别进行检修。如管、壳侧压力差别较大,允许管侧和壳侧采用不同厚度的法兰,节省设备成本,而且有利于提高密封性能。此种结构在秦山核电厂等项目中均有应用。

如碳钢管板与换热管的连接仅采用胀接连接,其管板金属温度应符合表 9 的要求,超出表 9 温度范围的接头应采用焊接连接方式。

表 9 碳钢管板换热管胀接接头的最大推荐温度

换热管材料	ASME 规范 P 值	合金分类	接头温度/℃
奥氏体不锈钢	8	所有	260
镍铜合金 70 - 30	42	400	288
镍铬铁合金	43	600	260
Admiralty TYPE	32	443,444,445	177
铝黄铜合金	—	687	177
铜镍合金 90 - 10	34	706	204
铜镍合金 80 - 20	34	710	232
铜镍合金 70 - 30	34	715	260
钛	51,52	所有	204
碳钢	1	所有	343

5.4 折流板和支撑板

《电厂换热器标准》对折流板和支撑板的管孔直径、厚度、最大无支撑跨距的要求都严于 TEMA 和 GB 151。

5.5 管束振动分析

管壳式换热器当壳程流体横向流过管束时,流体诱发振动主要有卡门漩涡、紊流抖动、流体弹性不稳定。

《电厂换热器标准》对此处理得比较简单,仅考虑了流体弹性不稳定。当管束实际横流速度小于管束临界横流速度时,管束不会发生流体诱导振动。管束换热管中存在轴向应力时,对固有频率进行修正。

TEMA 和 GB 151 对此管束振动分析更加全面,除流体弹性不稳定外,还考虑了卡门漩涡、紊流抖动等引起的振动。分析计算的方法、公式等也更为全面。同时必须指出,国内学者深入研究了 TEMA 标准流体诱导振动分析中多跨直管子固有频率、U 形管固有频率、对数衰减率等方面,并指出需要注意的问题^[10-11]。文献 [2] 详细说明了 GB 151 非等跨直管固有频率的计算,并给出简便计算方法。

6 其他内容

除上述内容外,《电厂换热器标准》还规定了超压保护、现场安装、检查维护等方面。标准的 14 项附录包含传热计算、外形尺寸允差等内容,在设计制造过程中具有较大的参考意义。

7 结语

(1) 美国换热器协会发布的《电厂换热器标准》反映了当前工程设计、采购要求以及制造经验,并规定电厂换热器重要的设计准则,得到各国电力行业的普遍重视和应用;

(2) 该标准可以看作是电厂换热器的设计规范书,包含了性能、材料、设计、制造等方面要求,使用范围仅限电厂管壳式换热器;

(3) 《电厂换热器标准》部分规定对换热器设

计有很大参考意义,如最大换热管内流速、材料选择、胀接接头最大允许温度等。《电厂换热器标准》可以作为 TEMA,GB 151 通用换热器设计制造标准的完善和补充;

(4) 该标准在流体诱导振动分析、强度计算方面不够深入,还需参考其他标准。

参考文献:

- [1] Standards for Power Plant Heat Exchangers [S]. 4th Edition, 2004.
- [2] ASME 锅炉与压力容器规范,第Ⅲ卷 核设施部件建造规则 [S]. 2004.
- [3] ASME 锅炉与压力容器规范,第Ⅷ卷第 1 册,压力容器建造规则 [S]. 2004.
- [4] Standards of TEMA [S]. 9th Edition, 2007.
- [5] GB 151—1999,管壳式换热器 [S].
- [6] Wayne W. Frenier, et al, Choose the Best Heat Exchanger Cleaning Method [J]. Chemical Engineering Progress, 1998, (7): 37-44.
- [7] 董其伍,张焱,等. 换热器 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [8] 秦叔经,叶文邦. 化工设备设计全书——换热器 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [9] 丁伯民. 对我国压力容器和换热器标准的一些想法 [J]. 压力容器, 2009, 26(11): 50-53.
- [10] 聂清德,段振亚,谭蔚,等. 关于 TEMA 标准《流体诱发振动》若干问题的讨论(一) [J]. 压力容器, 2004, 21(11): 1-4.
- [11] 聂清德,段振亚,谭蔚,等. 关于 TEMA 标准《流体诱发振动》若干问题的讨论(二) [J]. 压力容器, 2004, 21(12): 1-5.
- [12] 段振亚,谭蔚,聂清德. 按 GB 151—1999 计算多跨管的固有频率 [J]. 压力容器, 2003, 20(2): 17-19.

收稿日期: 2011-09-19 修稿日期: 2011-10-04

作者简介: 陈红生(1977-),男,工程师,主要从事核电厂换热器等核电设备设计工作,通信地址: 200233 上海市徐汇区虹漕路 29 号上海核工程研究设计院, E-mail: chenhs@snerdi.com.cn.

欢迎订阅

欢迎投稿

欢迎刊登广告