

反射型金属保温结构热性能试验及数值分析

毛飞¹, 周肖佳¹, 龚碧颖¹
(上海核工程研究设计院, 上海 200233)

摘要: 本研究应用防护热箱法原理的金属保温层热性能试验, 并且基于传热学理论和数值分析方法, 建立了保温层结构传热分析模型, 并使用 MATLAB 软件编写计算程序求解模型方程组, 将计算结果与试验数据进行对比, 误差大都在 10% 以内。利用该传热模型进行敏感性分析, 结果表明: 金属箔层数并不是越多越好, 应该合理考虑经济性及其它限制条件; 热损失和导热系数随箔层间距的增加而增大, 但箔层间距并非越小越好; 应选择低法向反射率的金属箔, 降低辐射产生的热损; 热损失和导热系数随着热面温度增加而增大, 基本呈线性变化。

关键词: 反射型金属保温结构; 防护热箱法; 数值分析
中图分类号: TL353.9 文献标识码: A
DOI:10.16146/j.cnki.mdlgc.2015.05.038

引言

反射型金属保温块结构是由不锈钢外壳内部填充多层不锈钢箔组成的光亮镜面体。它具有耐高温、耐辐照、抗震、无粉尘、机械性能好、使用寿命长、对硼酸溶液具有良好的耐蚀性、表面易去污和结构易拆装等优点。金属保温层由多个保温块通过搭扣连接组成, 已经应用于国内外压水堆和沸水堆核电站中设备和管道的保温^[1-2]。

多层反射型金属保温结构由多层金属箔保持一定的间距重叠组合而成, 具有良好的保温隔热性能, 如图 1 所示: 薄层气隙结构能有效的阻碍空气对流作用, 低法向反射率的金属箔可以减少其辐射换热。影响多层反射型金属保温结构散热损失及导热系数的因素主要包括: 金属箔的层数、保温材料的法向反射率、层间间距以及保温结构内外表面的温差。层数越多、法向反射率越小、温差越小, 其散热损失越小, 而间距对于散热损失的影响是复杂的。

美、日等国早在 70 年代就开始了反射型金属保温材料的研究, 并完成了大量的热性能试验。目前, 国内已有研究^[3-4]。根据一系列的假定给出了圆管

式多层反射型保温结构的理论计算模型^[3-4], 但并未考虑搭扣连接而形成的接缝和环境温度对保温块热性能的影响, 缺乏相应的热性能试验数据。

本研究首次进行平板式反射型金属保温结构的热性能试验及理论分析。并研究了接缝及环境温度对保温结构热性能的影响。

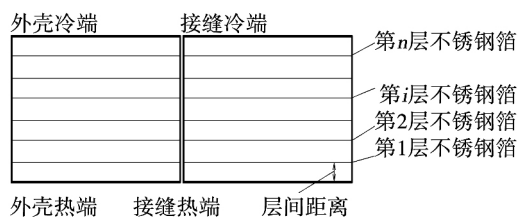


图1 带接缝的保温块示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the insulation block with a seam

1 热性能试验及理论模型

1.1 热性能试验方法

试验装置采用防护热箱法原理, 由试验件、保护箱、计量箱、测温仪表和其它辅助设备组成(如图 2 所示)。测试方法按照 GB/T 13475-2008 的要求进行^[5]。试验件为两块 1 600 mm × 800 mm 的保温块通过搭扣连接而成, 试验件放置在保护箱上, 其中心 1 m × 1 m 的区域由计量箱内的加热板加热。保护箱设有足够加热板, 确保空气能够被均匀加热。

利用多组热电偶监测计量箱壁和试验件内侧面与外侧的温度, 计算边缘热损 Q_2 和流过计量箱壁的热流量 Q_3 。调节保护箱和计量箱中电加热板的温度, 当试验件在保护箱区域和计量箱区域的温差接近为零时, 同时保持计量箱内测与外侧的温差接近

收稿日期: 2014-08-27; 修订日期: 2014-09-25

基金项目: 大型先进压水堆核电站重大专项(2010ZX06002)

作者简介: 毛飞(1986-), 男, 上海人, 上海核工程研究设计院工程师。

为零,可将 Q_2 和 Q_3 减至最小,此时可认为穿过试验件的总热流量等于计量箱内加热器产生的热量。通过计量箱体内加热器的功率来计算反射型金属保温结构的热损失及导热系数,导热系数 λ 可按式(1)计算^[6]。

$$\lambda = \frac{Q \cdot h}{(T_h - T_c) \cdot A} \quad (1)$$

式中: Q —计量箱内电加热器的功率, $W/(m \cdot K)$;
 h —金属保温结构厚度, m ; T_h —试验件热面温度, K ;
 T_c —试验件冷面温度, K ; A —计量箱区域面积, m^2 。

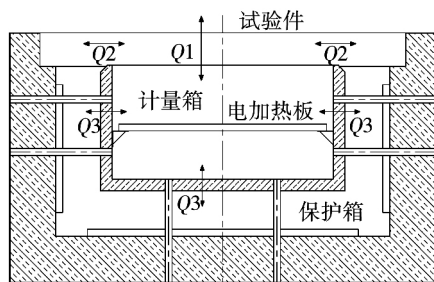


图2 试验装置结构

Fig. 2 The experiment equipment structure

1.2 理论计算模型

金属保温结构的传热计算既要考虑到金属箔层间复杂的导热、对流、辐射的复合热传递过程,也要考虑环境温度和接缝对金属保温结构热损失的影响。

按照水平热面向上的大空间自然对流传热式和有限空间自然对流传热式构造理论计算模型,如图3所示。

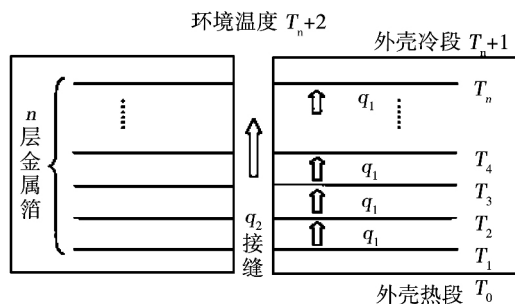


图3 传热模型

Fig. 3 The heat transfer model

作如下假定:

- (1) 通过多层反射型保温结构的热传递仅在竖向进行,用金属薄板模拟金属箔;
- (2) 金属保温结构的金属箔和外壳表面均为漫

灰表面,空气运动受到金属箔层间有限空间的限制;

- (3) 金属箔层间的气体介质为非吸收性、非辐射性介质。

根据传热学基础理论建立多层反射型金属保温结构的传热计算模型如下^[6-7]:

$$q_1 = \frac{A_1 \sigma (T_i^4 - T_{i+1}^4)}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{\varepsilon} - 1} + A_1 k_{eq} (T_i - T_{i+1}) \quad (2)$$

$$q_1 = \frac{\lambda_1 A_1}{L} Nu (T_{n+1} - T_{n+2}) \quad (3)$$

$$q_2 = A_2 \frac{\lambda_2 (T_0 - T_{n+1})}{h} \quad (4)$$

$$Q = q_1 + q_2 \quad (5)$$

$$L = \frac{A_p}{P} \quad (A_p、P \text{ 分别为平板的换热面积及其周界长度}) \quad (6)$$

$$\frac{k_{eq}}{k} = \begin{cases} 1 & Gr \leq 2430 \\ 0.212 (GrPr)^{1/4} & Gr > 2430 \end{cases} \quad (7)$$

$$Nu = \begin{cases} 0.54 (GrPr)^{1/4} & 10^4 \leq GrPr \leq 10^7 \\ 0.15 (GrPr)^{1/3} & 10^7 \leq GrPr \leq 10^{11} \end{cases} \quad (8)$$

式中: n —金属箔层数; T_i —第 i 层不锈钢箔温度, $(i = 0, 1, 2, \dots, n)$; K ; A_1 —金属箔层间热传导面积, m^2 ;
 q_1 —金属箔层间热损失, W/m^2 ; A_2 —接缝处外壳热传导面积, m^2 ; q_2 —接缝热损失, W/m^2 ; Q —总热损失, W/m^2 ; L —外壳特征长度, m ; h —保温块厚度, m ;
 δ —箔层间距, m ; λ_1 —空气导热系数, $W/(m \cdot K)$;
 λ_2 —不锈钢导热系数, $W/(m \cdot K)$; ε —金属箔法向发射率; k —空气传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; Gr —格拉晓夫数; Pr —普朗特数。

基于式(2) - 式(5)建立 $n+4$ 个方程,共有 $n+1$ 个温度未知量 $T_1, T_2, \dots, T_n, T_{n+1}$,以及3个热损失量 q_1, q_2, Q 。在热端温度和环境温度 T_0, T_{n+2} 、模型几何尺寸均已知的情况下,上述方程组可求得收敛的解。利用MATLAB软件编写程序,通过迭代计算求解上述方程组。同时,可调整输入参数,计算分析金属箔层数 n 、金属箔间距 δ 、金属箔的法向反射率 ε 和保温结构的热面温度 T_0 对多层反射型金属保温结构热性能的影响。

2 金属保温结构热性能计算与分析

2.1 试验值与理论计算值对比分析

试验件包括102 mm厚度保温块内填充20层5 mm波纹型不锈钢箔(试验件1)和112 mm厚度保

温块内填充 22 层 5 mm 波纹型不锈钢箔(试验件 2)。表 1 给出了上述 2 组试验件在 220、270 和

320 °C 下通过热性能试验和上述理论计算模型得到导热系数和热损失。

表 1 试验值与计算值比较

Tab. 1 Comparison between tested values and calculated values

试验件	温度/°C	热损失 Q/W			导热系数 $\lambda/W \cdot (m \cdot K)^{-1}$		
		试验值	计算值	误差	试验值	计算值	误差
1	220	110.74	115.10	3.94%	0.0608	0.0607	0.16%
	270	145.60	148.19	1.78%	0.0644	0.0631	2.02%
	320	201.97	183.56	9.12%	0.0746	0.0656	12.06%
2	220	97.06	105.97	9.18%	0.0595	0.0611	2.69%
	270	129.85	135.43	4.30%	0.0639	0.0630	1.41%
	320	179.18	169.30	5.51%	0.0734	0.0661	9.95%

由表 1 可知,计算值和试验值的趋势一致,低温阶段匹配性良好,误差在 10% 之内,证明所建立的分析模型能够正确模拟影响金属保温结构热性能的关键因素,可用来预测不同因素对于金属保温结构热性能的影响。

试验值与计算值之间存在偏差的几点原因:

(1) 热电偶温度及电加热板功率测量偏差;
(2) 试验中的边缘热损 Q_2 和流过计量箱壁的热流量 Q_3 并非严格为零;(3) 不锈钢箔并非平板,箔层间距不恒定于 δ ;(4) 金属保温结构外壳温度 T_{n+1} 并非均温,接缝处温度高于中心温度;(5) 未考虑箔层间点接触导热对金属保温结构热性能的影响。

2.2 金属保温结构热性能敏感性分析

图 4 为保温结构热面温度 270 °C、箔层间距 5 mm,环境条件和金属材料相同时,金属箔层数 n 对热损失和导热系数的影响;图 5 为保温结构热面温度 270 °C、厚度 102 mm,环境条件和金属材料相同时,金属箔层间距 δ 对热损失和导热系数的影响;图 6 为保温结构热面温度 270 °C、厚度 102 mm,环境条件相同时,金属箔的法向反射率 ε 对热损失和导热系数的影响;图 7 为保温结构厚度 102 mm,环境条件、金属材料相同时,热面温度 T_0 对于热损失和导热系数的影响。

2.3 结果分析

由图 4 可知,在一定的热面温度和环境温度下,热损失随着金属箔层数 n 增加而减少,而导热系数随着金属箔层数增加无明显变化(0.628~0.636),同表 1 中热性能试验数据的变化趋势。金属箔层数 n 增加时,金属保温块厚度 h 增加而热损失 Q 减小。当 Q 与 h 的乘积变化不大时,根据式(1)可知导热

系数无明显变化。图中热损失曲线的斜率随金属箔层数增加而减小,表明单层金属箔的平均隔热效率(Q/n)不断降低,因此金属箔层数并非越多越好,应该充分考虑金属保温结构的经济性以及厚度限制。

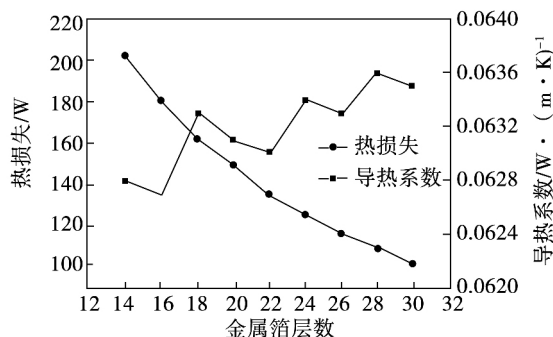


图 4 金属箔层数与热性能

Fig. 4 The numbers of the piles of the tinsel and the thermal performance

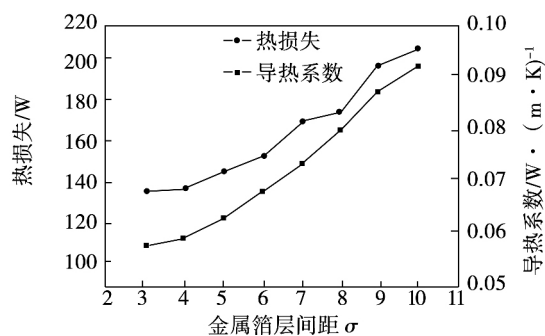


图 5 金属箔层间距与热性能

Fig. 5 The space between the piles of the tinsel and the thermal performance

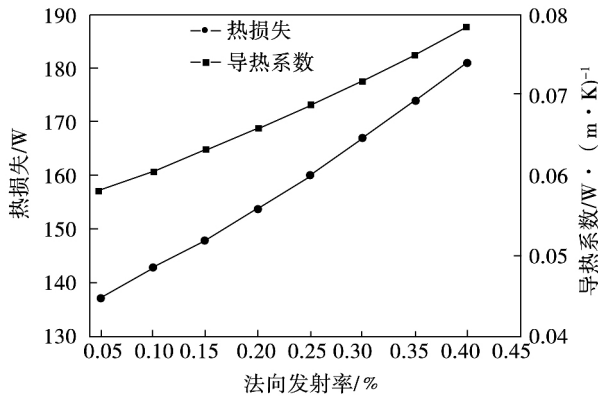


图6 法向发射率与热性能

Fig. 6 The normal thermal emittance and the thermal performance

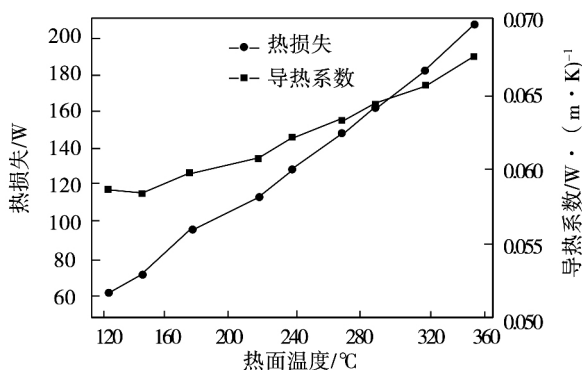


图7 热面温度与热性能

Fig. 7 The hot surface temperature and the thermal performance

由图5可知,在一定的保温层厚度下,热损失和导热系数随着箔层间距 δ 的增大而增加。过大的箔层间距会导致金属箔间的气体传导、对流传热增强;其次,过大箔层间距间接将减少保温结构内金属箔层数量,辐射传热增强。但是,金属箔层间距并非越小越好,间距过小有可能增加不锈钢箔之间的点接触、增大热损失。

由图6可知,热损失和导热系数随着金属箔法向反射率 ε 的增加而增大,基本呈线性变化。金属箔法向反射率 ε 主要影响保温结构的辐射传热,选择低法向发射率的金属箔对于金属保温结构十分重要。

由图7可知,随着热面温度 T_0 的增加,金属保温结构的热损失和导热系数也随着增大,基本呈线性变化。

3 结 论

采用防护热箱法完成的反射型金属保温层热性能试验,同时基于传热学理论建立了数值分析模型。通过自编的 Matlab 软件程序求解数值模型,并对比试验结果,证明所建立的分析模型能够正确模拟金属保温结构热损失的关键因素。最后利用计算模型对反射型金属保温结构展开分析,得出结论:

(1) 金属箔层数并不是越多越好,应该合理考虑经济性及其他限制条件;

(2) 热损失和导热系数随箔层间距的增加而增大,但箔层间距并非越小越好;

(3) 应选择低法向发射率的金属箔,降低辐射产生的热损;

(4) 热损失和导热系数随着热面温度增加而增大,基本呈线性变化。

参考文献:

- [1] 冉崇富. 反射型保温结构[J]. 核动力工程, 1982, 3(6): 705-711.
RAN Chong-fu. Reflective structure of thermal insulation[J]. Nuclear Power Engineering, 1982, 3(6): 705-711.
- [2] 李健芳, 何 飞, 赫晓东. 新型耐高温多层隔热结构研究[J]. 材料科学与工艺, 2009, 17(4): 531-534.
LI Jian-fang, HE Fei, HE Xiao-dong. New-type high-temperature multi layer insulation material[J]. Materials Science & Technology, 2009, 17(4): 531-534.
- [3] 熊扬恒. 多层反射型保温结构的传热性能分析[J]. 武汉水利电力大学学报, 1993, 26(6): 81-89.
XIONG Yan-heng. Analysis on heat transfer performance of reflective multiplate structure of thermal insulation[J]. J. of Wuhan Univ of Hydr. & Elec Eng., 1993, 26(6): 81-89.
- [4] 谭沧海, 熊扬恒, 闫桂焕. 多层反射型保温结构热经济性优化[J]. 锅炉技术, 2003, 34(2): 20-23.
TAN Cang-hai, XIONG Yang-heng, YAN Gui-huan. Optimal analysis of heat transfer and economics on spacing of reflective multiplate structure of thermal insulation[J]. Boiler Technology, 2003, 34(2): 20-23.
- [5] GB/T 13475-2008 绝热、稳态传热性质的测定、标定和防护热箱法[S].
GB/T 13475-2008. Thermal insulation-Determination of steady-state thermal transmission Properties-Calibrated and guard hot box[S].
- [6] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. 263-276.
YANG Shi-ming, Tao Wen-quan [M]. Bei-ijing: Higher Education Press, 2006. 263-276.
- [7] Incropera F P, DeWitt D P. Fundamentals of heat and mass transfer [M]. 5th ed. John Wiley & Sons, 2007. 608-610.

(陈 滨 编辑)

chanical and thermal loads in various zones in the drum. On this basis ,the stress field of the drum shell was numerically calculated during the stable operation of the boiler and a strength evaluation of the drum shell was performed according to the calculation results. It has been found that the total stress of the drum shell has a maximum value of 106.6 MPa ,which is far less than the stress permitted by the material used at the working temperature ,thus the drum shell having a relatively large safety allowance. **Key words:** supercharged boiler drum ,stress field ,finite element analysis ,strength evaluation

反射型金属保温结构热性能试验及数值分析 = **Thermal Performance Test and Numerical Analysis of a Reflective Type Metallic Isolation Structure** [刊 汉] MAO Fei ,ZHOU Qiao-jia ,GONG Bi-ying (Shanghai Nuclear Engineering Research and Designing Institute ,Shanghai ,China ,Post Code: 200233) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 ,30(5) . -792 -795

By making use of the metallic foil structures with a low normal reflectivity to reduce the heat losses ,the reflective type metallic isolation structures have been successfully used in the equipment items and pipelines in pressurized water and boiling water reactor nuclear power stations for the purpose of thermal isolation. The principles of the protective hot box method was applied to conduct a metallic isolation layer thermal performance test. Based on the heat transfer theory and numerical analytic methods ,a heat transfer analytic model for isolation layer structures was established and by using the software Matlab ,a calculation program was prepared to seek solutions to the equations of the model. The calculation results were compared with the test data. It has been proven that the analytic model thus established can correctly simulate the key parameters influencing the thermal performance of the isolation structures. Finally ,the analytic model thus established was used to obtain the relationship curves showing the influence of the number of the metallic foil layers ,metallic foil spacing ,normal reflectivity of the metallic foil and temperature on the hot surface of the isolation structure on the thermal performance. **Key words:** reflective type metallic isolation structure ,protective hot box method ,metallic isolation layer thermal performance test ,numerical analysis

循环流化床锅炉下排气分离装置的改造 = **Research and Application of Exhaust Pipe Separation Device** [刊 , 汉] YANG Qun-feng ,CAO Ying ,DONG Zhe (Jining Branch ,Shandong Provincial Special Equipment Inspection Research Institute ,Jining ,China ,Post Code: 272025) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 ,30(5) . -796 -801