

基于实测边界条件的小型增压锅炉锅筒应力三维有限元分析

邵亚西¹, 徐玮祎¹, 李彦军¹, 王坤峰²

(1. 哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 中国船舶重工集团公司七〇三研究所 黑龙江 哈尔滨 150078)

摘要: 建立了小型增压锅炉锅筒的三维实体模型, 确定了锅筒各个区域的机械和热载荷, 对锅炉稳定运行时锅筒的应力场进行了数值计算, 并根据计算结果对锅筒进行了强度评定。研究表明: 锅筒总应力最大值为 106.6 MPa, 该值远小于材料在此工作温度下的许用应力, 锅筒具有较大的安全裕度。

关键词: 增压锅炉; 锅筒; 应力场; 有限元分析; 强度评定
中图分类号: TK229; TH123 文献标识码: A
DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.05.037

引言

锅筒是增压锅炉的关键部件之一, 其性能优劣将直接影响人员及设备的安全。因此, 研究锅筒的温度场和应力场, 找出最大应力点的位置并对其进行强度分析, 对于锅筒的合理设计以及锅炉安全可靠运行是十分必要的。

针对电站锅炉锅筒温度及应力场的研究^[1-3]开展较早, 并取得了丰富的研究成果。但由于增压锅炉锅筒的结构形式和换热方式与电站锅炉存在较大差异, 因此这些研究成果所能提供的参考有限。近年来, 针对增压锅炉锅筒安全性的相关研究逐渐增多。文献[4]采用有限元分析软件对增压锅炉锅筒进行了应力分析, 并利用计算结果对锅筒进行了强度评定。但由于锅筒受热方式的复杂性及缺少实验数据的积累, 计算载荷的合理给定成为增压锅炉锅筒应力有限元计算的难点之一。

为解决上述问题, 本研究建立了小型增压锅炉锅筒的实体模型, 基于锅筒结构及换热方式, 详细划分了计算区域, 并利用实测内外壁温度数据及理论计算, 提供了一种增压锅炉锅筒应力计算载荷的合理给定方法。进而利用 ANSYS 三维有限元计算软

件, 对小型增压锅炉额定工况下锅筒的应力进行了计算、分析与强度评定。

1 锅筒三维实体模型建立

小型增压锅炉主要由锅筒、水冷壁、下降管、对流蒸发管束、过热器、经济器、燃烧器、炉墙、左右空气夹层和保温层等部件组成, 其结构如图 1 所示。

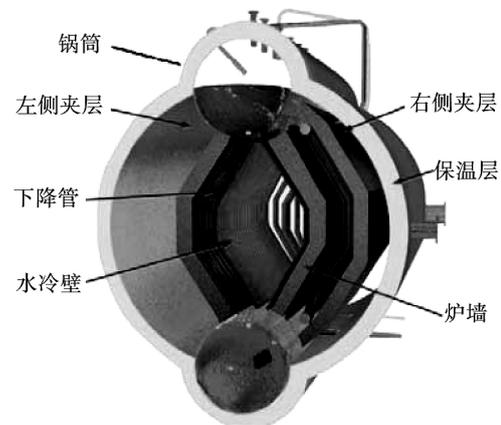


图 1 增压锅炉结构图

Fig. 1 Structural drawing of the supercharged boiler

增压锅炉锅筒在结构形式和换热方式的特点导致其计算模型和热载荷具有较高的复杂性。在结构形式上, 大量的水冷壁、下降管、对流蒸发管束与锅筒胀接而形成密排管束, 导致管板相邻管孔之间的距离小于不考虑孔排减弱的最小距离, 从而使孔桥区域的应力叠加。因此, 为了保证计算的正确性, 不能采用简单的锅筒-单管模型, 而必须建立完整的实体模型。在换热方式方面, 锅筒外下壁部分区域

收稿日期: 2014-08-29; 修订日期: 2014-10-11

作者简介: 邵亚西(1986-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 哈尔滨工程大学博士研究生。

受到火焰辐射和烟气对流的作用,导致该区域外壁温度高于内壁温度,形成了径向温差。而在空气夹层和保温层区域,金属筒壁被锅筒内的水或水蒸气加热,热量由内向外传递。因此,稳态时锅筒除内外壁温差外,在圆周方向上也存在温差。

考虑到上述锅筒结构及换热两方面的特点,根据表 1 中小型增压锅炉锅筒的结构尺寸建立了如图 2 所示实体模型。建模时进行了一定程度上的简化处理:(1) 锅筒筒体两端与球形封头连接处的应力水平比开孔接管区域要小很多,所以锅筒模型中不考虑封头;(2) 不考虑管束在锅筒内部的伸出部分,选取两倍管束外径的外部伸出长度;(3) 将筒体与管束看做一个整体进行建模,并忽略两者胀接后产生的残余接触应力;(4) 忽略锅筒自身及内部工质的重量。

表 1 锅筒及管束尺寸

Tab. 1 Dimensions of the drum and tubes

部件	外径/mm	壁厚/mm	数量	材料
锅筒	852	26	1	Q245R
水冷壁	38	3	126	20 g
对流蒸发管束	38	3	15	20 g
下降管	57	3.5	29	20 g



图 2 锅筒实体模型

Fig. 2 The solid model of the boiler drum

2 计算载荷确定方法

锅炉稳态运行时锅筒及与其连接的管束均受到内部介质和外部环境作用的机械载荷和热载荷。本研究以实测数据为依据,确定了额定工况下锅筒不

同区域的计算载荷。此时锅筒内饱和压力为 0.993 MPa(绝压),饱和温度为 179.5 °C。

2.1 机械载荷

锅筒受到的机械载荷分为 3 个部分,即锅筒和管束内壁受到的工质压力,锅筒和管束外壁受到的环境压力,锅筒两端端面及接管管束端面的等效载荷。

对于筒壁和管壁受到的内外压力,根据实际工况即可确定其数值大小。与内壁压力相比,锅筒和管束外壁受到的环境压力的数值虽然偏小,但会对数值模拟的计算结果产生影响,因此不能忽略,而文献 [4] 中并没有考虑这部分压力,会导致应力计算结果偏大。

对于端部的等效载荷可采用文献 [5] 中的公式计算,本研究仅给出计算结果。详细的机械载荷数值及确定依据如表 2 所示,表中载荷位置对应图 3 中所划分的区域。

表 2 机械载荷数值及确定依据

Tab. 2 The values and determination methods of mechanical load

载荷位置	载荷数值/MPa(绝压)	确定依据
锅筒及管束内壁	0.993	饱和压力
外壁 AB、IJ 段	0.301	送风压力
外壁 JA 段	0.101	大气压力
外壁 BI 段	0.206	炉膛压力
锅筒端部	7.400	计算公式
水冷壁及蒸发	2.420	计算公式
对流管束端部		
下降管端部	3.310	计算公式

2.2 热载荷

热载荷作用在锅筒与管束的内壁和外壁上。为了得到准确的壁温数据,在锅筒内壁及外壁保温层区域分别安装了 10 支和 12 支热电偶,热电偶的位置如图 3 所示。

对于安装热电偶的区域,可以根据实测数据确定其热载荷数值。其它区域热载荷的确定方式则需要根据其所处的物理环境和换热方式综合考虑。锅筒内壁各区域按照实测数据加载第一类边界条件。外壁 AB、IJ 段与在夹层内流动的空气进行对流换热。根据空气在夹层中的流动与换热特点,可以按照公式(1)计算空气与壁面的对流换热系数。

$$h \frac{d_\theta}{\lambda} = Nu_f$$

$$= 0.023 Re_f^{0.8} Pr_f^{0.4} = 0.023 \left(\frac{u_\infty d_\theta}{\nu} \right)^{0.8} Pr_f^{0.4} \quad [6]$$

(1)

式中: λ — 空气的导热系数, $W/(m \cdot K)$; d_θ — 当量直径, m ; ν — 空气的运动粘度, m^2/s ; u_∞ — 空气流速, m/s ; Pr — 空气的普朗特数。

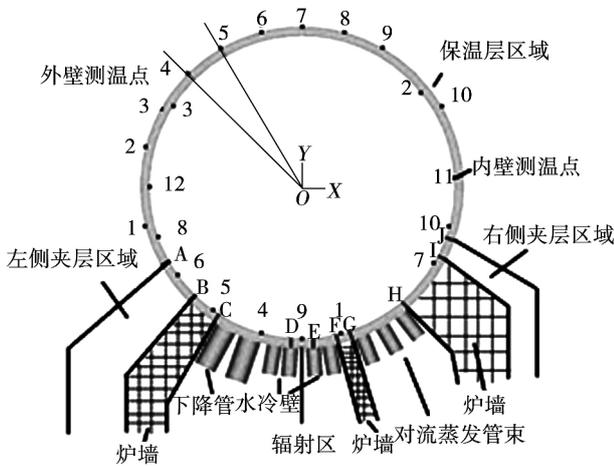


图 3 锅筒热电偶位置及区域示意图

Fig. 3 The schematic diagram of the locations of thermocouples and sections on the boiler drum

外壁 BC、FG、HI 段对应炉墙, 可以认为此类区域近似绝热。GH 段对应区域沿锅筒长度方向一小部分布置对流管束, 大部分区域布置列管式过热器和经济器, 且锅筒下部敷设保温材料, 因此该区域热边界可简化为绝热。

外壁 CD 和 EF 段与炉膛烟气进行对流换热, 该区域热边界层的发展不受干扰和阻碍, 因此可采用大空间自然对流传热关联式计算烟气与壁面的对流换热系数。位于 DE 段的锅筒外壁主要受到炉膛火焰辐射, 参考测试数据, 假定此处内外壁温度相差 $20^\circ C$ 。考虑到温度的连续性, 将计算出的 CD、DE、EF 各段温度数值拟合随坐标变化的函数。对管束内壁施加工质的饱和温度, 对管束外壁按其所在的区域施加温度载荷。详细的载荷数值如表 3 所示。

2.3 约束条件

为了保证模型中 X 向和 Y 向力的自平衡, 并且不会对应力最大值的位置产生影响, 在远离管板区域的锅筒上壁选择 6 个点, 分别施加 X 向和 Y 向

约束。

表 3 热载荷数值

Tab. 3 The values of thermal load

载荷位置	锅筒内壁	锅筒外壁
AB 段	$T = 177.5^\circ C$	$h = 4.1 W/(m^2 \cdot K)$
BC 段	$T = 179.5^\circ C$	$q = 0$
CD 段	$T = 179.0^\circ C$	$T = 185.5 + 11x^\circ C$
DE 段	$T = 181.6^\circ C$	$T = 201.6 - 6400x^2^\circ C$
EF 段	$T = 178.7^\circ C$	$T = 187.2 - 43.5x^\circ C$
FG GH HI 段	$T = 178.7^\circ C$	$q = 0$
IJ 段	$T = 177.0^\circ C$	$h = 4.4 W/(m^2 \cdot K)$
JA 段	$T = 179.3^\circ C$	$T = 178.3^\circ C$
载荷位置	管束内壁	管束外壁
管束	$T = 179.5^\circ C$	与所在区域中的锅筒外壁热载荷一致

3 计算结果及分析

3.1 网格及无关性验证

采用间接耦合的方法计算锅筒总应力场。首先采用 8 节点六面体 SOLID70 单元计算温度场, 然后把温度场的计算结果和机械载荷加载在 SOLID185 单元上计算锅筒的总应力。

按照先管束后管板的顺序对锅筒各部分进行网格划分, 对管束和管板区域的网格进行了加密处理。不同单元尺寸下的网格精度与管板应力状态之间的关系如表 4 所示。选择单元边长为 4 mm 的网格精度, 此时既保证了计算结果的合理性, 又可以减少计算时间。此精度下锅筒单元总数为 1 699 515 个。

表 4 网格精度与应力状态的关系

Tab. 4 The relationship between mesh precision and stress states

管板及管束单元边长/mm	沿锅筒壁厚方向的单元份数	管板最大应力点位置是否改变	最大应力值/MPa
3.5	8	否	106.6
4	7	否	106
5	6	否	103
6	5	否	97.6
7.5	4	是	97
9	3	是	97

3.2 应力计算结果及分析

由图 4 的管板机械应力计算结果可以看出,管板无孔区域应力数值一致,管孔各方向应力分布不均匀。应力水平沿各管孔纵截面到横截面呈由大到小的趋势,且由内壁至外壁方向逐渐降低。 $\varphi 57$ 下降管管孔的各个纵截面附近的应力水平均很高,发展的范围也比水冷壁及对流蒸发管束的 $\varphi 38$ 管孔要大。管板机械应力最大值为 45.68 MPa,位于炉后第 2 列第 3 根管孔壁面上。

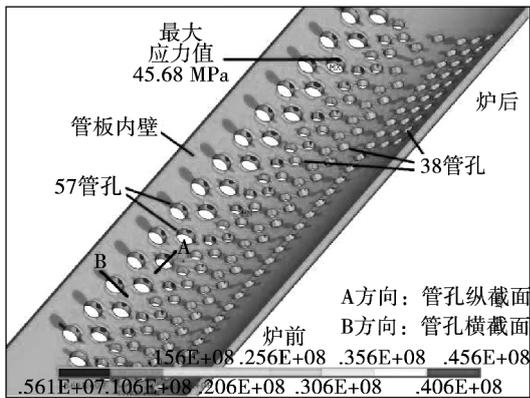


图 4 管板机械应力分布

Fig. 4 Mechanical stress distribution of the tube sheet

如图 5 所示,除外壁辐射区 DE 段外,管板内外壁及管孔的热应力水平较低且分布均匀。外壁 DE 段周向及该区域内两列管孔的径向应力梯度较大,并在外壁孔边出现了小范围的应力集中,这是由于该区域较大的周向温差和径向温差所导致的。管板最大热应力点位于炉后第 5 列第 1 根管束管孔外壁,最大值为 89.5 MPa。

如图 6 所示,管板内外壁总应力水平不高且分布均匀,除辐射区 DE 段外各管孔横截面应力水平较低,纵截面应力水平较高,但沿管孔轴向应力水平变化不明显。DE 段外壁周向及管孔轴向应力梯度较大,并在外壁孔边出现了应力集中,高应力区出现在斜向孔桥上。

总应力最大值点出现在炉后第 5 列第 2 根管孔边缘上,最大值为 106.6 MPa。该点的机械应力和热应力分别为 29.4 和 82.5 MPa。两者之和 111.9 MPa 稍大于总应力最大值,可见由压力和温差引起的两部分应力在该点处相互叠加,均对总应力的数

值产生较大影响。

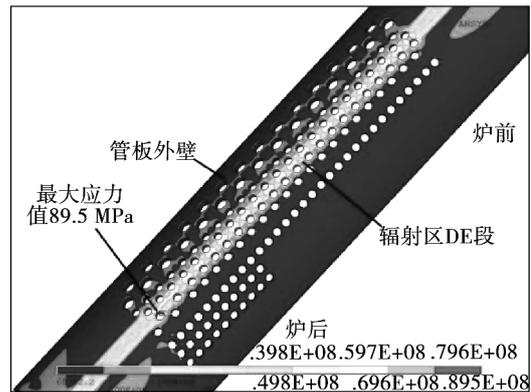
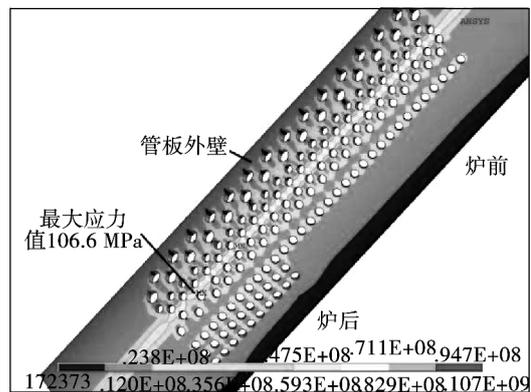
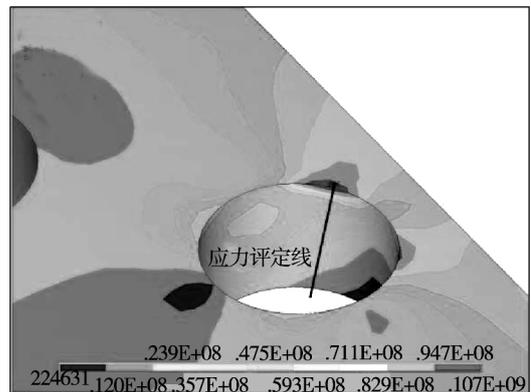


图 5 管板热应力分布

Fig. 5 Thermal stress distribution of the tube sheet



(a) 管板整体



(b) 管板局部

图 6 管板总应力分布

Fig. 6 Thermal-mechanical stress distribution of the tube sheet

3.3 强度评定

应力最大值点出现了局部应力集中,远高于筒

体的平均应力水平。此处为结构的不连续区域,应力梯度较高,应对该处进行强度校核。如图6(b)所示,因应力集中的范围很小,故只需选择经过最大应力值点,并且贯穿管孔方向的一条应力评定线即可。分类的线性化等效应力如图7所示,图中由上至下的3条曲线依次为应力评定路径上的总应力、薄膜加弯曲应力及薄膜应力。

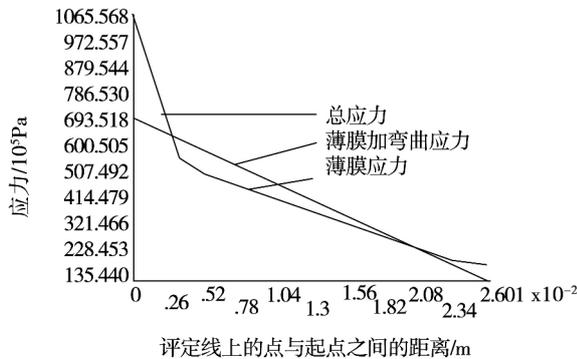


图7 评定线上的分类线性化应力图

Fig. 7 The graph of the linearized stress intensity distribution

依据 JB4732—1995《钢制压力容器分析设计标准》^[7]的强度安全判据对锅筒进行应力强度评定。最大线性化的薄膜加弯曲等效应力为 69.8 MPa,即一次与二次等效应力之和小于该温度下的 3 倍许用应力 372 MPa,表明锅筒满足强度要求,并且具有较大的安全裕度。

4 结 论

根据增压锅炉锅筒结构形式的特点建立了锅筒三维实体模型,结合换热方式对其划分了详细的计算区域,依据实测数据确定了锅筒稳态应力场的计算载荷,利用 ANSYS 软件对锅筒应力场进行了三维有限元分析,基于计算结果对锅筒进行了强度评定。

研究表明管板总应力最大值点位于炉后方向第 5 列第 2 根管孔边缘,机械应力和热应力在该点叠加,使得总应力数值达到 106.6 MPa。对该点处的应力进行分类和评定,结果表明该点的应力值远小于材料在工作温度下的许用应力,锅筒具有较大的安全裕度。

本文给出的基于实测数据的应力计算载荷确定方法解决了结构及换热复杂情况下锅筒应力计算的难题,可以应用到增压锅炉锅筒的应力计算与强度校核中。

参考文献:

- [1] 梁艳明,沈月芬. 锅炉锅筒在实测边界条件下的应力场三维有限元分析[J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(1): 73-76.
LIANG Yan-ming, SHEN Yue-fen. Fatigue life estimate of boiler drum based on actual boundary condition stress solution[J]. Journal of Xian Jiao Tong University, 1999, 33(1): 73-76.
- [2] 商福民,吕邦泰,庞立平. 锅炉汽包壁上下温差热应力有限元分析[J]. 华北电力大学学报, 1999, 26(1): 52-56.
SHANG Fu-min, LV Bang-tai, PANG Li-ping. The finite element study on heat stress by the temperature difference between drum's upper-lower walls of boilers[J]. Journal of North China Electric Power University, 1999, 26(1): 52-56.
- [3] 尹奇志,肖金生,江爱林,等. 300 MW 锅炉汽包的三维瞬态应力有限元分析[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 31(1): 60-62, 69.
YIN Zhi-qi, XIAO Jin-sheng, JIANG Ai-lin, et al. Finite element analysis of three dimensional transient stress in 300MW boiler drum[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 31(1): 60-62, 69.
- [4] 王坤锋. 小型增压锅炉锅筒热应力计算分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
WANG Kun-feng. Thermal Stress Calculation and Analysis of Small Supercharged Boiler Drum[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.
- [5] 王泽军. 锅炉结构有限元分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
WANG Ze-jun. Finite element analysis of boiler's structure[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [6] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
YANG Shi-ming, TAO Wen-quan. Heat transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [7] JB4732-1995 钢制压力容器—分析设计标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
JB4732-1995 Steel Pressure Vessels—Design by Analysis[S]. China Zhijian Publishing House, Beijing, 1995.

(陈滨 编辑)

stable ,transmitting from the chaotic movement to a single period movement ,the dynamic load coefficient gradually decreasing and the gear pair transmitting to a lateral impingement or no-impingement state ,the engagement phenomenon getting improved. **Key words:** gear transmission ,non-linear kinetics ,bifurcation ,chaos ,dynamic load coefficient

非等压力角节点外啮合齿轮油膜厚度的研究 = Study of the Oil Film Thickness on a Non-equal Pressure Angle Gear Engaged at a Place Beyond the Pitch Point [刊 汉] LI Xiu-lian ,LIU Wei ,ZHU Fu-xian (College of Mechanical Engineering ,Jiangsu University of Science and Technology ,Changzhou ,China ,Post Code: 23001) , ZHANG Jun (College of Mechanical Engineering ,Anhui University of Technology ,Ma'anshan ,China ,Post Code: 243002) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 ,30(5) . -781 -786

With a pair of involute straight tooth cylindrical non-equal pressure angle gear engaged at a place beyond the pitch point serving as the object of study ,on the basis of the structural characteristics of non-equal pressure angle gears engaged at a place beyond the pitch point being considered in a comprehensive way ,through an analysis of the engagement process of the gears ,a formulae for calculating the minimum oil film thickness on the surface of the gears was derived and relevant factors influencing the oil film thickness were analyzed. It has been found that compared with conventional gears ,non-equal pressure angle gears enjoy better lubrication performance. To take such measures as to increase the pressure angle ,modification coefficient ,gear ratio and modulus can increase the minimum oil film thickness by 6.09% ,5.46% ,9.63% and 66.63% respectively. **Key words:** gear transmission ,non-equal pressure angle ,engagement at a place beyond the pitch point ,oil film thickness ,simulation analysis

基于实测边界条件的小型增压锅炉锅筒应力三维有限元分析 = Three-dimensional Finite Element Analysis of the Stress of the Drum Shell of a Small-sized Supercharged Boiler Based on the Boundary Conditions Actually Measured [刊 汉] SHAO Ya-xi ,XU Wei-yi ,LI Yan-jun (College of Power and Energy Source Engineering , Harbin Engineering University ,Harbin ,China ,Post Code: 150001) ,WANG Kun-feng (CSIC No. 703 Research Institute ,Harbin ,Harbin ,China ,Post Code: 150078) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 , 30(5) . -787 -791

Established was a three-dimensional solid model for small-sized supercharged boilers and determined were the me-

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