

船用MSB主锅炉改进的方案设计

陈起铎

[提要] 本文分析了船用MSB主锅炉存在的问题,提出了相应的改进方案。对各方案都做了详细的结构设计和性能特点的比较论证。各方案均可供采纳或参考。在当前条件下,作者推荐采用现有锅炉适当加长加高的改进方案,认为该方案具有改动小、收效大的优点,比较现实可行。

关键词: 船用锅炉 方案设计

一、引言

研制工作和运行实践表明,船用MSB主锅炉具有功率大、重量尺寸小、机动性好、运行可靠和制造工艺成熟等一系列显著特点。但也存在很多不足:经济性差,参数偏低,影响装置效率的提高。故作进一步改进提高是很有必要的。改进的途径很多,既可彻底改变炉型,重新设计先进锅炉,从根本上全面提高主锅炉的各项技术指标,赶超世界先进水平;也可以在现有炉型基础上进行较小的改进。在外形尺寸和制造工设备没有多大改变的情况下,使蒸汽产量、过热蒸汽温度和锅炉效率都有所提高。

二、船用MSB主锅炉存在的问题

船用MSB主锅炉具有许多良好的特点。但也存在一些弱点:

1. 过热汽温度偏低,而且很难进一步提高。因为过热器是兼用烟道式的,置于平均烟温较低的对流烟道区。提高过热蒸汽温度将使受热面明显增加。根据改进设计的布

置计算,过热蒸汽温度只能提高到 470°C 。再高,蒸发管束和过热器受热面都难于布置。兼用烟道两种受热面的比例将变得很不相称。上锅筒将出现过多的无开孔区。

2. 过热蒸汽温度随负荷波动很大。从最高工况到最低工况温度下降 85°C ,变压运行下降更多,达 109°C 。这对低工况下的装置效率极为不利。该船动力装置经济性为什么比较差,锅炉的这个特性,应该说是个原因。

3. 锅炉效率不高,也很难进一步提高。超负荷下主锅炉排烟温度高达 570°C ,效率仅为72.9%。即使大量增加锅炉受热面,排烟温度也只能降到 450°C 。锅炉效率充其量只能提高到78%左右。

以上是由炉型决定的锅炉内在性能弱点。根据该船十多年来的运行使用实践,尚发现如下问题:

过热器管子严重腐蚀,造成烧坏事故。其原因争论不一。但不外乎是:锅炉经常处于高水位运行,蒸汽品质不佳,造成积盐腐蚀;停炉未按规程保护,造成氧化腐蚀;蒸汽湿度偏高,特别是 $25\text{kgf}/\text{cm}^2$ 汽压高工况运行时,蒸汽湿度过高。近年来,由于加强

运行管理, 巡航工况升压至 30kgf/cm^2 , 情况已有好转。此其一。

其二, 省煤器漏水。原因是该型省煤器鳍片和裤叉管弯头焊缝既多且长, 焊接工艺质量难于百分之百保证, 以致运行中屡有发现烧坏漏水现象。

其三, 锅炉炉前风压严重不足。设计要求 870mm 水柱, 实际上只达到 700mm 水柱, 相差甚大。原因在于风道的设计布置不合理。有一种观点将航速上不去, 归咎于主锅炉出力不足, 机炉不匹配。这是不对的。东海和北海某船风道改进后, 锅炉出力都超过设计指标便是例证。当然, 锅炉的改进也是一个因素。但无论如何, 改进风道要比改进锅炉更加迫切, 更加重要。这是船用MSB主锅炉改进的先决条件。

三、锅炉改进设计的依据

某船动力装置的改进要求是:

1. 以现有动力装置为基础进行改进设计;
2. 保证可靠性;
3. 提高经济性;
4. 实现隔舱自动控制;
5. 解决完善原有遗留问题。

对主锅炉, 动力装置设计单位提出两种不同的改进要求。一种要求是:

1. 设计工况下的过热蒸汽温度, 提高到 470°C ;
2. 过热蒸汽温度从设计工况到巡航工况的波动值, 不超过 30°C ;
3. 设计工况下锅炉效率达到 82% ;
4. 仍然具有较小的重量尺寸指标。

另一种要求是: 在适当增加重量尺寸的情况下, 做到尽可能地提高蒸汽产量、锅炉效率和过热蒸汽温度。巡航工况下可使锅炉单台运行, 以利提高巡航工况的过热蒸汽温

度。

这是两种大不相同的要求。前者要求锅炉大改, 尤其是现有的过热器型式必须彻底改变, 采用全新的结构型式, 否则不能满足要求; 后者只要求锅炉作较小的改进, 在完全保持现有炉型的基础上, 尽量挖掘潜力。

我们以动力装置的上述两种不同要求, 作为锅炉改进设计的依据, 完成多种设计方案。

四、船用内置式过热器锅炉

动力装置为提高其蒸汽参数, 改善效率, 降低油耗, 增加续航力, 使整个装置的经济性大幅度提高, 接近或达到世界先进水平, 要求锅炉重新设计, 采用先进的锅炉型式。而现代船用锅炉中, 具有辐射-对流传热的内置式过热器高热负荷锅炉, 以其先进的技术指标而受到广泛应用, 被公认为代表当代船用锅炉的先进水平。

这种锅炉具有如下特点:

1. 过热器布置于近炉膛的高烟温区, 吸收有一定量的炉膛辐射热, 传热好, 重量轻, 尺寸小, 改善了锅炉的各项技术特性。
2. 易于取得较高的过热蒸汽温度。只要过热器材料许可, 过热蒸汽温度可以设计为 470°C 、 490°C 或者 510°C 。
3. 过热蒸汽温度随工况的变化波动不大。从设计工况到巡航工况, 过热蒸汽温度的波动范围一般在 $30\sim 40^\circ\text{C}$ 以内。
4. 易于取得较高的锅炉效率。设计工况锅炉效率可达 82% , 巡航工况可达 88% 。

其炉型可以是D形炉膛炉型, 也可以是D形炉膛炉型。我们选用如图1所示的圆形炉膛炉型。这种炉型的过热蒸汽温度和锅炉效率变化曲线如图2所示。

之所以选择这种炉型, 其理由还在于:

其一, 符合以现有动力装置为基础的设

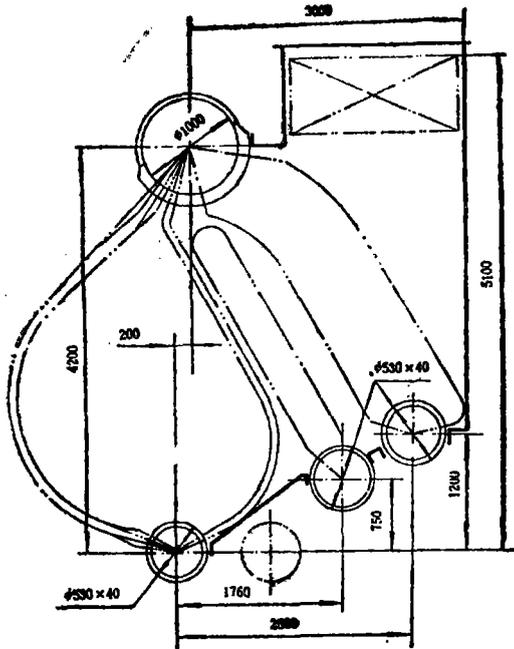


图1 具内置式过热器的圆形炉膛锅炉设计原则, 锅炉炉型与现有炉型相对来说较为接近, 便于在机炉舱内布置, 主轴纵向穿过锅炉底部的问题较易解决;

其二, 锅炉本体燃烧设备的布置设计, 都与现有锅炉差别不大, 现有锅炉设计制造的成功经验可以作为借鉴;

其三, 既具有较好的经济性, 又保持现有锅炉热负荷高、结构紧凑、重量尺寸小的固有特性。

基于上述原因, 我们屡次进行的方案设计都没有采用日欧和美日等国广为应用的D形炉膛炉型。

过热器是此型锅炉的关键性部件。因表1

管排数Z = 2		管排数Z = 3		过热器辐射热 角系数1-x	高低工况下过热蒸汽温度变化
$\frac{S_1}{d}$	$S_1(d=38)$	$\frac{S_1}{d}$	$S_1(d=38)$		
2~2.6	76~99	2.85~3.7	108~140	0.15~0.25	20~40℃

于管子支撑结构的装设。还要考虑有检查维修的可能。

本设计的具体改进设计方案如下:

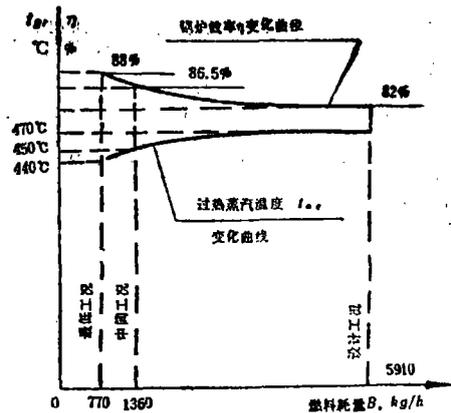


图2 过热蒸汽温度和锅炉效率随燃料消耗量变化曲线

此, 与过热器密切相关的炉膛和第I管束的设计, 以及过热器本身的设计, 都必须围绕进证过热器工作特性和解决过热器技术问题保行。

1. 炉膛: 应当力求增加辐射受热面, 提高炉膛水冷度, 降低炉膛出口温度, 从而降低过热器管壁温度。

2. 第I管束: 横向节距要取得恰到好处, 既要保证第I管束有较多的吸热量, 降低过热器进口烟温, 又要保证过热器吸收一定数量的炉膛辐射热, 具有良好的工作特性。表1列出此型锅炉第I管束横向节距 S_1 、管径d和过热器角系数 $1-x$ 通常采用的结构数据, 设计时可资参考。

3. 过热器: 横向节距 S_1 不宜过小, 一般以 $S_1 \approx 2d$ 为宜, 以便减小受热面热负荷, 降低壁温。管束宜采用并列排列, 以便

锅炉炉膛水集箱位置不变。上锅筒向右(省煤器侧)偏移940mm。原锅炉汽水集箱位置由过热器集箱取而代之, 炉膛水集箱

和过热器集箱之间的距离，与原锅炉的炉膛水集箱和汽水集箱之间的距离一样，均为1760mm。主轴的布置位置不变，仍然可从炉底穿过。但锅炉第Ⅱ管束水集箱要相应向船舶中线外移，整个锅炉加宽800mm。锅炉长度和高度基本上不变。

设计工况下，锅炉产量70t/h。过热蒸汽温度470℃。锅炉效率82%；最低工况下，过热蒸汽温度440℃，锅炉效率88%。

锅炉采用双面燃烧。炉膛近似园形，充满度好，有利强化燃烧。使锅炉具有较高的炉膛容积热负荷。燃油消耗量6t/h，烟风阻力780mm水柱，风量风压均与原锅炉相近。可以沿用原来风机。

上锅筒内径1000mm。由于蒸汽参数提高，蒸汽产量减小，蒸汽品质有所改善。炉膛水集箱、过热器集箱和第Ⅱ管束水集箱的内径均为450mm。第Ⅰ管束为两排 $\phi 38 \times 3$ 中的错列管子， $S_1 = 86\text{mm}$ ， $S_2 = 60\text{mm}$ 。过热器型式为单集箱立式环管式，采用 $\phi 29 \times 25$ 管子，并列排列， $S_1 = 61\text{mm}$ ， $S_2 = 45\text{mm}$ ，共八排，吸收炉膛辐射热角系数为0.19，管材选用Cr3M₀W V Si B (Π11)、Cr2M₀W Si B (钢102) 或J84高温合金钢管。过热器的支撑固定装置采用梳形板或波形板焊于纵向穿过锅炉前后墙的水冷管或空冷管结构型式。板材采用3Cr18Ni25Si2。第Ⅱ管束由19排 $\phi 25 \times 2$ 管子组成， $S_1 = 40\text{mm}$ ， $S_2 = 43\text{mm}$ 是降低锅炉排烟温度、提高锅炉效率的主要受热面。

所有锅炉管束和过热器管束，其用连接方式同锅筒或集箱连接。

省煤器同原锅炉相比较，由于取消了过热器上集箱，布置地位较为充裕。本方案省煤器采用 $\phi 32 \times 3$ 的鳍片管子，并采用小弯头的弯管结构，受热面布置较多，出口水温接近230℃。如果研制周期允许，尚可考虑采用先进的螺旋圈片式结构。

锅炉大直径不受热下降管，同原锅炉比较，除布置于后墙夹层外，尚应对称布置于前墙夹层。这样一来，上锅筒尺寸将比原锅炉的上锅筒，向炉前多伸出约300mm。

锅炉的主要特性数据如表2所示。

锅炉过热器及其邻近烟道的烟气温度分布情况如图3所示。

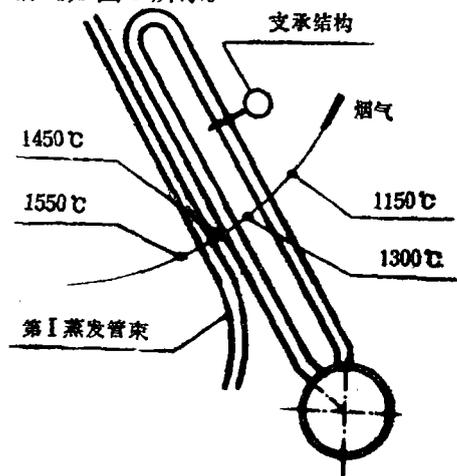


图3 过热器及其邻近烟道的烟气温度分布

由于此型过热器工作于高烟温区，吸收有炉膛辐射热，加之烟速高，温压大，受热面热负荷比现有锅炉高得多，因此，在其研制中，应当着重解决如下技术难题：

1. 确定过热器管材和管子支撑结构材料的工作可靠性；
2. 确定管子支撑结构的具体型式；
3. 确定过热器生火启动的保护措施，以能适应船舶对主锅炉的机动性要求。

上述设计方案，所谓的改进，实际上是重新设计高水平的锅炉。问题多，难度大，需要较多的研制经费，较长的研制周期。但作为近代比较先进的一种锅炉型式，其研制意义绝不限于某一船舶的改进上，其应用前景极为广阔，无论是军船民船，还是大型军舰，都有推广价值，应当从长计议，及早着手研制。至少在近期内，就应当把解决关键技术问题的各种单项试验科研课题，列入议事日程。

表 2

序号	名 称	单 位	设计工况 100% B	中间工况 ~23% B	最工况单 ~13% B
1	单机马力	PS	36000		
2	上锅筒蒸汽压力	kgf/cm ²	64	64	64
3	蒸汽总产量	t/h	70	17.5	10.27
4	过热蒸汽产量	t/h	68	16	8.77
5	饱和蒸汽产量	t/h	2	1.5	1.5
6	过热蒸汽温度	℃	470	450	440
7	锅炉效率	%	82	86.5	88
8	给水温度	℃	100	100	100
9	省煤器出口水温	℃	230	200	190
10	空气温度	℃	30	30	30
11	燃料低发热值	kcal/kg	10059	10059	10059
12	燃料消耗量	kg/h	5910	1360	770
13	炉膛容积	M ³	13.5	13.5	13.5
14	炉膛容积热负荷	kcal/m ³ h	4.4 × 10 ⁶	1.01 × 10 ⁶	0.57 × 10 ⁶
15	锅炉内烟风阻力	mmH ₂ O	780	220	180

五、船用过热器兼用烟道式锅炉

某船主锅炉具有较大的改进潜力。锅炉在外形尺寸稍有增加的情况下,即可使锅炉蒸汽产量、过热蒸汽温度和锅炉效率都有明显的提高。为此,我们在现有的兼用烟道式锅炉基础上,进行结构上的调整、布置和设计,做过许多改进方案。这里介绍其中的一个较佳的改进方案。所采用的主要结构措施是:

1. 炉膛长度增加320mm,

2. 增加过热器管排数和每排管子数;
3. 省煤器处加高200mm,重新设计省煤器,大量增加省煤器受热面;

4. 增加过热器流程数,调整过热器隔板位置,使过热器管束的壁温分布更趋合理。

锅炉型式与原锅炉一样,仍为立式水管、单烟道、自然循环高热负荷燃油锅炉。采用双面燃烧,过热器与蒸发管束兼用同一烟道,燃烧系统和给水系统全部自动化。

改进后的锅炉具有如下特点:

1. 保持了原锅炉固有的良好性能。

2. 提高了锅炉效率。在最大工况和设计工况下, 锅炉效率分别达到78%和79%, 比原锅炉提高5%, 而在巡航工况下, 锅炉效率仍然可以保持在86%至87%的水平。

3. 提高了过热蒸汽温度。在最大工况和设计工况下过热蒸汽温度提高25℃, 而在巡航工况下, 则提高达50℃之多。

4. 锅炉所用材料基本不变。

5. 锅炉制造工艺基本不变, 省煤器制造工艺甚至有所简化。

6. 设计方案对提高蒸汽品质、减少烟风阻力、合理设计过热器和省煤器, 对解决完善原锅炉遗留问题, 都作了统一的考虑。

改进设计的炉膛长度增加不多, 但收效却很显著。由于炉膛长度的增加, 使整个锅炉的技术特性带来了一系列有利的变化, 锅炉的经济性和安全可靠性能明显改善。炉膛体积的增大, 改善了燃油燃烧的条件; 上锅筒容积的增加, 提高了蒸汽品质; 各烟道的受热面有所增加, 受热面热负荷有所缓和; 过热器在过热蒸汽温度比原锅炉提高25℃的情况下, 最大工况和设计工况的管壁温度并无显著增加, 而仅约增高10℃而已; 烟风阻力在最大工况和设计工况下都比原锅炉减少, 原锅炉风压不足的尖锐矛盾可望得到缓和。

上锅筒、水集箱、水冷壁及各蒸发管束均无甚变化, 对其强度性能也无新的要求。唯上锅筒和各集箱在长度上增加320mm, 过热器管子和过热器集箱需改用成熟的12Cr1MoV材料。

为解决主锅炉过热器长期存在腐蚀烧损现象, 建议采用已研制成功的984高温合金钢管作为过热器管材, 以便从根本上解决工作可靠性问题。

本方案为提高过热蒸汽温度, 对过热器改动较大。管束排数由原有的18排增加到19排, 每排管子数由原有的28/25根增加到38/35根。管子总数由原有的477根, 增加到677

根。过热器集箱内部隔板结构相应作了改动。过热器流程数由原有的5个增加到7个, 以确保在过热器热受面增加较多的情况下, 仍然具有足够的蒸汽速度。

第Ⅲ蒸发管束的每排管子数, 则从原来的30根减少为28根, 以适应过热蒸汽温度提高的需要。

增加省煤器受热面是本方案提高锅炉效率的关键所在。本方案省煤器处要求加高200mm, 根据实船情况, 并不难实现。而这200mm对省煤器的改进设计, 却极为可贵。本方案为尽可能多地布置省煤器受热面, 采用 $\phi 32 \times 3$ 的鳍片管子, 并采用较小的节距 $S_1 = 54\text{mm}$, $S_2 = 46.77\text{mm}$, 使布置紧凑。管子弯头由原来的裤叉管结构改成小弯头结构, 以简化制造工艺。除此之外, 我们还考虑采用国外近年来广泛应用的螺旋圈片式省煤器, 以利强化传热, 进一步减少重量尺寸, 并从根本上消除因采用人工焊接鳍片而引起的烧坏漏水这一现存遗留问题。

本方案的燃烧设备将适当提高单个喷燃器的喷油量, 以减少燃烧器数量, 从而减少巡航工况因关闭油头而引起的漏风量, 提高巡航工况锅炉效率。

锅炉的主要特性数据如表3所示。

这里再介绍另一个改进方案。这个方案只是在锅炉内部改动, 而锅炉外形尺寸完全不变。

具体改进方案如下:

1. 过热器由18排增加到19排, 每排管子数由28/25根增加到30/27根, 管子总数由477根增加到543根;

2. 调整过热器集箱内部隔板位置, 使各流程的管子数分别为105、105、124、99、110根;

3. 重新设计省煤器: 采用 $\phi 32 \times 3$ 鳍片管子, 并采用较小的节距 $S_1 = 54\text{mm}$, $S_2 = 46.77\text{mm}$, 使布置紧凑; 在总体布置允许

表3

序号	名称	单位	最高工况 113% B	设计工况 100% B	巡航工况 28.9% B
1	上锅筒蒸汽压力	kgf/cm ²	64	64	30
2	蒸汽总产量	t/h	84.3	76.2	25.1
3	过热蒸汽产量	t/h	81.3	73.7	23.6
4	饱和蒸汽产量	t/h	3	2.5	1.5
5	过热蒸汽温度	℃	470±20	470±20	398
6	锅炉效率	%	78.47	79.89	87
7	给水温度	℃	100	100	100
8	省煤器出口水温	℃	230	225	180
9	空气温度	℃	20	20	20
10	燃烧低发热值	kcal/kg	10059	10059	10059
11	燃料消耗量	kg/h	7350	6500	1880
12	锅炉总受热面	m ²	528.36	528.36	528.36
13	炉膛容积	m ³	14.13	14.13	14.13
14	炉膛容积热负荷	kcal/m ³ h	5.27×10 ⁶	4.66×10 ⁶	1.35×10 ⁶
15	锅炉内烟风阻力	mmH ₂ O	805	693	246

下,省煤器处高度增加98mm,沿高度方向布置14排,每排34根,以便大量增加省煤器受热面;管子弯头由原来焊制的裤叉管结构,改成压制的小弯头结构,可以简化制造工艺。

此一方案的优点是不涉及锅炉外部的尺寸联系,改法简单,容易实现;缺点是没有前述方案效果显著。

值得强调的是,原主锅炉在运行中,某些热工特性之所以未达到设计要求,主要是炉前风压未达到规定值。锅炉改进方案能否得以实现,炉前风压乃是应予首先解决的重

要条件。故总体设计部门必须对锅炉风道作相应改进,以便确保炉前风压达到870mm水柱的设计要求。

六、结 论

本文着重介绍了采用圆形炉膛内置式过热器的锅炉改进方案,也介绍了仍然采用兼用烟道式过热器的锅炉改进方案。这些方案各有优劣。但在当前条件下,考虑到现实性、可能性和改进效果,本人推荐采用现有的兼用烟道锅炉适当加长加高的改进方案。

(下转第19页)

Abstract

The existing problems of the MSB marine main boiler have been analysed in this paper and relevant improved versions presented. Detailed structural designs have been performed for various versions and their characteristic features compared and discussed on the basis of weighing the pros and cons. All the proposed versions are available for practical use or for reference. Under the present conditions, the author has recommended the use of an improved version consisting of the original boiler design with its length and height being moderately increased. This improved version is relatively practical and realistic and has the advantages of introducing only a small amount of modifications with greater benefits being attained.

3. Refuse and garbage-firing boilers - I. fuel
..... Translated by *Li Junshao* (27)

POWER TRANSMISSION DEVICES

6. Rigidity calculation of diaphragm coupling flexible elements
..... *Hong chengwen* (32)

Abstract

A method for calculating the rigidity of diaphragm coupling flexible elements is presented in this paper. The method described here has been successfully used for design and manufacturing purposes.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION

7. The strength and service life verification tests of a newly designed third stage turbine rotor and disc of Type A and Type A-1 engine
..... *Sun Guowei, Jin Shumin, Liu Lianyuan* (40)

Abstract

This paper describes a series of overtemperature, overspeed, fracture speed and low-cycle fatigue tests conducted on the newly designed third stage turbine rotor and disc in connection with the engine design, modification, finalization and service life assessment. The test results have already been put into use as major reference data during the engine design, finalization and determination of turbine disc guaranteed life.

MICROCOMPUTER APPLICATION TECHNIQUES

8. A microcomputer control system for the GZKL-10-3 boiler
..... *Lu Zhenlin, Ma Shaoliu, Chen Gang, Zhang Qian* (47)

Abstract

In this paper a description has been given of the components and functions of the GZKL-10-3 boiler microcomputer control system, its software as well as general monitoring and control-regulating principles. It has been

七、结束语

上面对在汽轮机通流部分内部除湿的各种方法进行了综述,并做了一定的分析。很多国家的高等院校、科研单位、制造厂对各种除湿方法进行了多年的研究,并已取得了重要的研究成果。有的成果已应用到核电站汽轮机上,有的准备进行工业性试验。而我国各有关单位在汽轮机通流部分内部的除湿研究工作做得很少。随着核电站开始在我国建造,特别是核电站的建造已列入国家重点建设工程,并且在2000年以前要建造一定数量的核电站,这就应该将汽轮机通流部分内部的除湿问题列入有关单位的重点研究项目,并应投入一定数量的科技人员和相应的科研经费。因为这项研究难度较大,周期较长,各种除湿方法都要进行各方面的试验,同时涉及的问题较多。如汽、水双相流动问题,专门的叶片造型,一些除湿结构的设计,工况参数的确定。特别是蒸汽湿度的测量和蒸汽中水滴尺寸的测量等测试手段和测试方法等多方面都存在相当大的难度。另外,要开展这方面的研究工作,必须要做相应的试验,而且是多方案的,以便进行比较,这就需要建造相应的试验台,并给以相应的投资和科研费用。这样经过多年的研究工作,一定能

取得相应的科研成果,为我国的核电建设和海军舰艇的发展做出相应的贡献。另外,在核动力汽轮机上采用通流部分内部的除湿方法还应与叶片的抗蚀措施相配合,这样对汽轮机的可靠性将更加有效。

参 考 文 献

1. Исследование внутрик анальной сепарации влаги в многоступенчатой турбине. Кирюхин В. И., Филиппов Г. А., Поваров О. А.等.《Теплоэнергетика》1975 Г. №8.
2. Исследование турбинной ступени с увеличенным осевым зазором. Филиппов Г. А., Поваров О. А.等.《Теплоэнергетика》1976 Г. №12.
3. Steam turbine for the 100 MW (e) prototype F. R. Harris. Nuclear Engineering. June 1967.
4. Проблемы сепарации влаги в турбоустановках АЭС. Поваров О. А.《Теплоэнергетика》1980.Г.№2.
5. Исследование методов повышения эффективности сепарации мелкодисперсной влаги в турбинах. Поваров О. А., Семенов А. В.等.《Теплоэнергетика》1984 Г. №8.
6. Благоулавливающее устройство паровой турбины. Кирюхин В. И., Демичева Д. И. 苏联专刊(11)802567.

(上接第26页)

其理由是同改变炉型、重新设计锅炉的大改方案比较,这一改法具有制造安装工艺成熟和可以不经试验而能直接装船使用的优点,改进周期短,投资少,符合当前建设方针。

参 考 文 献

- [1] Н.И.Пушкин《Судовые паровые котлы》(1965)。

- [2]《Naval Engineers Journal》(1962)。
- [3] J.H.Miton《Marine steam boilers》(1970)。
- [4] 龚三省《对某船动力装置的看法着一重在主锅炉方面》(1977年)。
- [5] 陈起铎《某船主锅炉改进的方案论证》第七〇三研究所,1980年。
- [6] 陈起铎《某船主锅炉改进的方案论证》第七〇三研究所,1984年。