

某船主锅炉的设计特点

陈 明, 马云翔, 薛光亚, 陈起铎

(哈尔滨·第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036)

摘 要: 我国自行设计的某船新型主锅炉, 研制成功并投入运行。锅炉的炉型结构新颖、独特, 并使用新型材料。文中介绍了该型锅炉的结构设计和性能特点。

关 键 词: 船舶主锅炉; 结构设计; 性能特点

中图分类号: TK222 文献标识码: B

1 前言

为提高我国船舶锅炉的研制水平, 我们一直对 KBF76 主锅炉跟踪研究, 并设计新炉型, 研制新管材, 自行研制成功了本型船舶主锅炉。锅炉型式有创新, 技术上有继承和发展。锅炉型式, 锅筒与过热器的材料选择, 过热器的布置与设计, 经济器的设计, 无一不是现代船舶锅炉技术的首创。锅炉在可靠性、重量尺寸、机动性、锅炉效率和过热蒸汽温度变化特性等诸方面的技术性能指标均达到当代船舶主锅炉国际先进水平。此型锅炉的研制成功, 对我国船舶动力型式的发展, 具有重大的战略意义。

2 锅炉型式

图 1 所示为本型主锅炉总图。

锅炉型式为圆形炉膛高热负荷立式水管单烟道自然循环燃油船舶主锅炉。锅炉具有内置式立式环管过热器和小弯头螺旋翅片盘管经济器, 双面燃烧, 燃烧系统和给水系统全部自动化。

在高热负荷圆形炉膛锅炉中采用内置式过热器, 是对船舶主锅炉选型的重大创新。内置式过热器此前只有 D 形炉膛锅炉采用, 圆形炉膛仅在低热负荷锅炉采用。俄罗斯对高热负荷常压锅炉内置式过热器只是停留在理论探讨和方案设计上, 并未付诸工程实践。30 年来, 我国工程技术人员一直致力于它的设计研究, 以及主要技术支撑 GH984 船用管材的试验研究。在有关各方的共同努力下, 此型锅炉终于成功问世。

3 锅炉主要技术规范

本型锅炉主要技术规范见表 1。

由表 1 可知, 与我国原主锅炉相比, 本型主锅炉除继承其重量轻、尺寸小、机动性好的固有特点外, 额定工况下锅炉效率提高 10.48%, 常用工况下过热蒸汽温度提高 100 °C。如此大幅度的性能提高, 显示本型锅炉的先进性和优越性。

表 1 锅炉主要技术规范

| 名 称 | 最大工况 | 额定工况 | 常用工况 |
|----------------------------|-------------------|--------|--------|
| 锅筒蒸汽压力/MPa | 6.28 | 6.28 | 5.64 |
| 过热蒸汽压力/MPa | 5.79 | 5.89 | 5.59 |
| 过热蒸汽温度/°C | 450±20 | 450±20 | 435±20 |
| 蒸汽总产量/t·h ⁻¹ | 83 | 78 | 28 |
| 过热蒸汽产量/t·h ⁻¹ | 79 | 74 | 24 |
| 饱和蒸汽产量/t·h ⁻¹ | 4 | 4 | 4 |
| 锅炉效率/% | 82.48 | 83.38 | 87.23 |
| 给水温度/°C | 104 | 104 | 104 |
| 空气温度/°C | 30 | 30 | 30 |
| 燃油种类 | GB2021-10 号柴油 | | |
| 燃油低发热值/kJ·kg ⁻¹ | 43 271 | | |
| 燃油温度/°C | 20(不预热) | | |
| 燃油消耗量/kg·h ⁻¹ | 6 637 | 6 125 | 2 054 |
| 炉膛容积热负荷/kW·m ⁻³ | 6 106 | 5 641 | 1 896 |
| 锅炉内烟气阻力/Pa | 8 515 | 7 632 | 2 825 |
| 锅炉干重/t | 46 | | |
| 锅炉湿重/t | 52 | | |
| 外形尺寸(长×宽×高)/mm | 5 335×5 415×5 922 | | |

4 锅炉结构

锅炉各受热面的结构特性见表 2。

由表 2 不难看出, 船舶锅炉与陆用锅炉的总体布置和结构特性差别很大。船舶锅炉热负荷高, 烟速大, 管径小, 管间节距紧密, 均与陆用锅炉有很大不同。对于蒸汽压力低于 9.81 MPa 的船舶锅炉或其它锅炉, 不能遵循高参数电站锅炉的设计原理, 否则非但浪费钢材, 而且设计出的锅炉船舱也容纳不

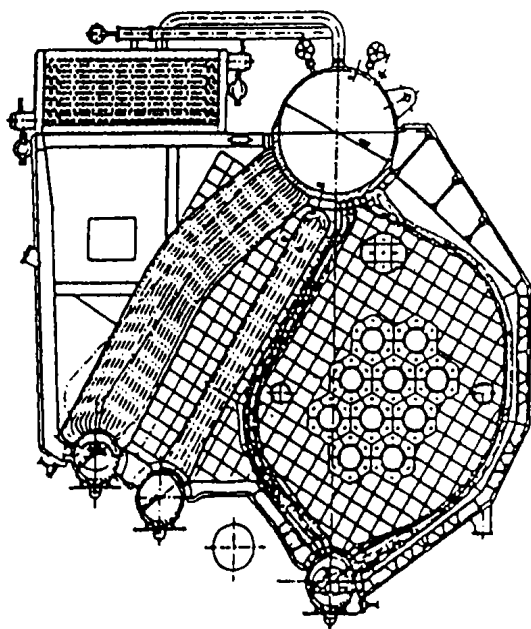


图 1 某船主锅炉总图

下。反之，运用船舶锅炉原理，设计低于 9.81 MPa 的陆用锅炉，可以在技术指标上，取得意想不到的良好效果。

表 2 锅炉各受热面结构特性

| 名 称 | 炉膛与水冷壁 | 管束 I | 管束 II | 过热器 | 管束 III | 经济器 |
|------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 管子规格/mm | 38×3 | 38×3 | 25×2 | 25×2.5 | 25×2 | 32×3 |
| 管束排列型式 | 密排 | 错列 | 错列 | 顺列 | 错列 | 错列 |
| 受热面型式 | 光管 | 光管 | 光管 | 光管 | 光管 | 翅片管 |
| 横向节距/mm | 38.8 | 61.3 | 40 | 46 | 40 | 70 |
| 纵向节距/mm | / | 50 | 40 | 56 | 43 | 53.6 |
| 管子排数 | 1 | 2 | 2 | 6 | 17 | 12 |
| 每排管数 | 65 | 41 | 63 | 54 | 63 | 26 |
| 边管中心距/mm | 2 483.2 | 2 482.3 | 2 500 | 2 450 | 2 500 | 1 785 |
| 烟道宽度/mm | 2 530 | 2 530 | 2 530 | 2 530 | 2 530 | 2 530 |
| 管束计算长度/m | / | 4.0 | 4.0 | 2.9 | 3.1 | 2.508 |
| 冲刷完全性系数 | / | 0.82 | 0.82 | 0.90 | 0.88 | / |
| 烟气流通过截面/m ² | / | 3.188 2 | 3.132 4 | 3.079 8 | 2.605 2 | 2.302 2 |
| 管束受热面/m ² | / | 39.16 | 39.58 | 73.80 | 260.76 | 531.16 |
| 炉膛容积/m ³ | 13.16 | / | / | / | / | 翅片尺寸: |
| 辐射受热面/m ² | 22.10 | / | / | / | / | h=12.7 |
| 炉膛总面积/m ² | 32.70 | / | / | / | / | δ=1 |
| 炉膛水冷度 | 0.675 8 | / | / | / | / | S=6 |

5 锅筒的设计与材料选择

船舶锅炉一般按表 3 的允许值设计锅筒内径。符合表 3 技术数据的锅筒内径，锅内汽水分离设备设计适当，饱和蒸汽湿度可以降至 0.1% 以内。

表 3 蒸汽容积负荷与自蒸发表面逸出速度允许值

| 锅筒蒸汽压力 P_v /MPa | 蒸汽容积负荷 | | 蒸汽自蒸发表面逸出速度 | |
|----------------------|--------|---|-------------|--|
| | 允许值 | R_v /m ³ ·m ⁻³ ·h ⁻¹ | 允许值 | W_n /m ³ ·s ⁻¹ |
| 2.75 | | 1 850 | | 0.36~0.33 |
| 3.92 | | 1 700~1 750 | | 0.32~0.34 |
| 5.89 | | 1 400~1 450 | | 0.24~0.26 |
| 7.85 | | 1 200~1 250 | | 0.20~0.22 |

表 3 中锅筒蒸汽容积负荷 R_v 计算公式为：

$$R_v = \frac{DV}{\frac{\pi D_n^2}{8} \pm BL} \quad \text{m}^3/(\text{m}^3\text{h})$$

式中： D ——锅炉蒸汽产量，kg/h； V ——锅筒蒸汽压力下的干饱和蒸汽比容，m³/kg； D_n ——锅筒内径，m； L ——锅筒上升管边管中心距，m； B ——锅筒水平中心线与正常水位之间距离，m。

蒸汽自蒸发表面逸出速度 W_n 计算公式为：

$$W_n = \frac{DV}{3 600 D_n L} \quad \text{m/s}$$

本型锅炉锅筒按上述规定设计。锅筒内径为 1 200 mm，锅筒材料选用 BHW35 (13MnNiMo54)，管板厚度为 80 mm，包板厚度为 40 mm。锅筒内部设备设置有水下孔板和水上孔板等汽水分离设备。锅筒还设置给水管装置、给水旁通管装置和上部排污装置。上部排污装置由吹洗内管和排污斗连接而成。

本型锅炉锅筒的设计与材料选择，与我国原主锅炉有很大不同。原主锅炉过于追求重量尺寸指标，锅筒内径仅为 1 000 mm，蒸汽空间容积负荷 R_v 高达 2 250 m³/(m³h)，超标严重，导致饱和蒸汽湿度过高，蒸汽严重带盐，过热器严重腐蚀，工作寿命下降。本型锅炉锅筒直径增大， R_v 为 1 510 m³/(m³h)，常用工况 R_v 则更下降为 610 m³/(m³h)，明显地提高了锅炉工作的安全可靠。

锅筒选用 BHW35 材料，也是本型锅炉的一个特色。此前我国主锅炉锅筒材料为中锰钢 (25MnMo)，供货渠道困难，材料强度也不高。由于 BHW35 材料胀管性能良好，适于作为船用，且其强度较高，可使锅筒厚度减薄，重量减轻。BHW35 的应用成功，拓宽船舶锅炉材料品种，为设计容量更大、参数更高的船舶锅炉创造了条件。

6 过热器的设计与材料选择

本型锅炉过热器为单集箱立式环管式。集箱直径为 $\Phi 530 \times 40$ ，材料为 12Cr1MoVG；环管直径为

$\Phi 25 \times 2.5$, 管束顺列布置, 材料为 GH984 高温合金。过热器支撑装置由两根 $\Phi 57 \times 5$ 支撑管和厚度为 5 mm 的若干管间梳形板组焊而成, 支撑管和梳形板的材料均为 1Cr25Ni20Si2。过热器集箱内部装置由三块半圆形横向隔板和一块矩形纵向隔板组成, 由此将集箱分隔成前、中、后三个空间, 形成蒸汽的两个流程。所有隔板均可拆卸, 以方便检查和维修。

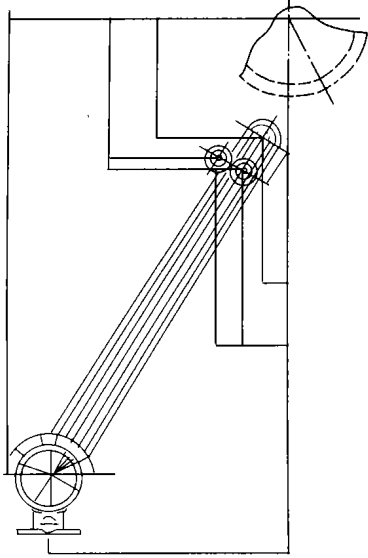


图 2 某船主锅炉过热器

图 2 所示为本型锅炉过热器。

我国原主锅炉采用兼用烟道式过热器, 工作特性差, 过热蒸汽温度随工况变化大, 常用工况过热蒸汽温度低, 动力装置经济性差, 油耗率高, 续航力小。为克服其弊端, 本型过热器布置于蒸发管束内部, 称为内置式

过热器。由于布置于近炉膛 4 排蒸发管束之后, 且为高热负荷锅炉, 烟温很高, 额定工况过热器前烟温高达 $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上, 加之尚吸收 1% 的炉膛辐射热, 过热器工作特性优异, 过热蒸汽温度变化不大, 常用工况仅比额定工况下降 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, 主汽轮机因此大受其益, 动力装置也因之大获其利。这是本过热器设计成功之处, 也是本型蒸汽动力装置主要特点之一。

GH984 材料是本型锅炉的技术支撑。因为本内置式过热器管壁温度高达 $615\text{ }^{\circ}\text{C}$, 12Cr1MoVG 不能使用, 必须研制新的船用高温材料。为此, 我所与中科院金属研究所和上钢五厂, 共同研制成功 GH984 船用新管材, 并于 1992 年通过国家鉴定, 成果获部级科技进步一等奖。其主要特点是抗高温, 耐腐蚀, 胀管性能优越, 适于作为船用。GH984 工作温度 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, 不但高于 12Cr1MoV 的 $580\text{ }^{\circ}\text{C}$, 且高于任何陆用锅炉管材。

尤其难能可贵的是, GH984 比 12Cr1MoVG 具有更好的胀管性能, 应用于过热蒸汽温度为 $470\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的胀接式过热器非常可靠。如胀管试验往更高过热蒸汽温度进行, GH984 应用于 $490\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $510\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的胀接式过热器, 也并非没有可能。当然, 由于 GH984

具有可焊性, 同样可以应用于 $510\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的焊接式过热器。

7 蒸发受热面的设计

本型锅炉炉膛水冷壁和近炉膛的第 I 管束, 因热负荷高, 采用 $\Phi 38 \times 3$ 管径, 以利水循环。其余第 II、第 III 管束采用通常认为不可行的 $\Phi 25 \times 2$ 密集管束。这是我们对原主锅炉特点的继承, 但相比之下, 本型锅炉比原主锅炉蒸发受热面较为发达。这也是本型锅炉具有较高锅炉效率的原因之一。

我国原主锅炉采用兼用烟道式过热器, 俄罗斯增压锅炉采用外置式过热器, 两种锅炉型式为保证过热器传热, 过热器出口烟温不能过低, 因而其蒸发受热面不宜布置太多, 锅炉效率难以提高。

内置式过热器情况有所不同。过热器之后, 只要重量尺寸指标许可, 蒸发受热面可以随意布置。本锅炉蒸发受热面比原主锅炉增加 51.87%; 额定工况蒸发管束后面的烟温, 本型锅炉为 $652\text{ }^{\circ}\text{C}$, 比原主锅炉的 $741\text{ }^{\circ}\text{C}$, 下降 $89\text{ }^{\circ}\text{C}$, 再加上新型经济器的采用, 本型锅炉的排烟温度为 $364\text{ }^{\circ}\text{C}$, 比原主锅炉的 $570\text{ }^{\circ}\text{C}$, 下降 $206\text{ }^{\circ}\text{C}$; 锅炉效率也因此达到 83.38%, 比原主锅炉的 72.9%, 提高 10.48%。如果不是因受重量尺寸的限制, 蒸发受热面的布置地位有限, 本型锅炉还可将锅炉效率再提高。

8 经济器的设计

本型锅炉经济器为双集箱卧式翅片盘管式。翅片管管径为 $\Phi 32 \times 3$, 翅片高度 12.7 mm, 翅片厚度 1 mm, 翅片节距 6 mm。管间横向节距 70 mm, 纵向节距 53.6 mm。共 12 排, 每排 26 根。小弯头弯曲半径 $R=32\text{ mm}$ 。

采用翅片管经济器是本型锅炉的一大特色, 也是船舶锅炉设计技术的首创。本经济器研制工作的一举成功, 技术先进, 效果突出, 运行可靠。

表 4 是本型锅炉与原主锅炉经济器技术指标的比较。

由表 4 可知, 翅片管经济器与鳍片管经济器相比, 在相同的外形尺寸之下, 重量指标和烟气阻力增加不多, 而经济器传热面积增加为 5.68 倍, 传热效果因而增加近 1 倍。如果与光管式经济器相比, 本型经济器的优势就更加显而易见了。

(下转第 210 页)

发现裂纹, 则对裂纹进行打磨、补焊等处理。

(2) 检查并调整水冷壁管上集箱吊杆的受力。

(3) 加固钢性梁。

• 在锅炉前墙、左墙和右墙标高 9 050、12 600 及 16 100 三层钢性梁间用 20 b 工字钢加两道立柱, 各道立柱中间用 20 b 工字钢增加一道横梁 (见图 1), 横梁同水冷壁管采用原设计滑销连接, 后墙不加固;

• 考虑立柱与横梁热胀冷缩, 采用单边焊接 (死点), 另一边导向滑动 (活终点) 结构;

• 加固验收标准。

执行《电站锅炉钢性梁设计规程》及《电站锅炉防爆设计规定》, 其要求电站锅炉在额定设计工况运行时, 锅炉钢性梁振动值不宜超过钢性梁自由挠度值及炉墙振动值不能超过 10 mm。

(4) 做炉膛冷态动力场试验。

加固钢性梁后, 做炉膛冷态动力场试验, 重新调

整锅炉动力场, 使锅炉达到运行时着火迅速, 燃烧完全, 风量应用合理, 且不产生共振等要求。

表 2 改造后钢性梁振动情况 mm

| 标高 | 炉左墙 | 炉前墙 | 炉右墙 |
|--------|-----|-----|-----|
| 16 100 | 0.4 | 1.0 | 0.8 |
| 12 600 | 1.5 | 2.0 | 2.0 |
| 9 100 | 2.0 | 1.2 | 2.0 |

4 结束语

1999 年 6 月对锅炉钢性梁的振动进行改造, 改造后各钢性梁的振动值见表 2。根据上述验收标准, 改造后的振动是符合要求的。从改造后恢复运行一年多的情况看, 未发现振动超标等异常现象, 效果良好, 说明改造方案是可行的。

(何静芳 编辑)

(上接第 185 页)

表 4 翅片管经济器与鳍片管经济器技术指标比较

| 名 称 | 本型锅炉经济器 | 原主锅炉经济器 | 增加百分比/% |
|--|----------------|--------------------|---------|
| 经济器型式 | 翅片管经济器 | 鳍片管经济器 | / |
| 经济器外形尺寸/mm | 3 296×2040×800 | 3 176×2040×800 | / |
| 经济器重量/kg | 5 143 | 3 998 | 28.64 |
| 经济器烟气阻力/Pa | 额定工况 1 520 | 额定工况 1 080 | 47.57 |
| 经济器传热系数/W·m ⁻² ·℃ ⁻¹ | 额定工况 66 | 额定工况 227 | / |
| 经济器受热面/m ² | 531.16 | 79.5m ² | 568.13 |
| 经济器传热效果/W·℃ ⁻¹ (每℃温压传热量) | 额定工况 35 057 | 额定工况 18 047 | 94.25 |
| 锅炉排烟温度/℃ | 额定工况 364 | 额定工况 570 | / |

9 结论

综上所述, 本型锅炉具有如下设计特点和性能特点:

(1) 开创高热负荷圆形炉膛锅炉应用内置式过热器先河, 锅炉型式重大创新。

(2) 具有我国原船舶主锅炉重量轻、尺寸小、机动性好等固有特点; 与原主锅炉相比, 额定工况锅炉效率提高 10.48%, 常用工况过热蒸汽温度提高 100℃; 锅炉主要技术指标, 达到当代国际先进水平。

(3) 锅筒直径的增大和 BHW35 的成功应用, 提高锅炉工作可靠性, 并使锅炉重量不因锅筒直径增大而明显增加。

(4) 采用以 GH984 合金为技术支撑的内置式过

热器, 全面提高过热器的的工作特性, 进而提高主汽轮机和动力装置的经济性; GH984 合金的成功应用, 展示我国船舶锅炉广阔的发展前景。

(5) 采用翅片管经济器, 增加传热面积, 强化传热效果, 降低排烟温度, 提高锅炉效率, 从而提高动力装置经济性。

(6) 本型锅炉的研制成功, 为研制容量更大、参数更高的船舶主锅炉, 积累宝贵经验, 奠定了基础, 创造了条件。

参考文献:

[1] ПУШКИН Н.И. Судовые паровые КОТЛЫ [М]. Ленин Фад; Издательство Судостроение Ленин Фад, 1965.

[2] 陈起铎. 船用 MSB 主锅炉改进的方案设计 [J]. 热能动力工程, 1986, 1(6): 20—26.

[3] 陈起铎. 航空母舰主锅炉的方案设计探讨 [J]. 舰船科学技术, 1990(2): 15—19.

[4] 陈起铎. 舰船主锅炉选型和提高锅炉效率 [J]. 舰船科学技术, 1995(4): 23—25.

[5] 陈起铎. 舰船锅炉总体方案的经济性重量尺寸指标分析 [J]. 热能动力工程, 1997, 12(5): 358—360.

[6] 陈起铎. 大功率动力装置对主锅炉的技术要求 [J]. 热能动力工程, 1998, 13(2): 151—154.

[7] 陈起铎. 动力装置与主锅炉匹配的初步研究 [J]. 热能动力工程, 1998, 13(5): 317—318.

(渠 源 编辑)

ric Domain under an Adherent Body Coordinate System [刊, 汉] / CHEN Yong-jin, WU Wei-zhong (No. 711 Research Institute, Shanghai, China, Post Code: 200090), LU Wei-lin (Energy Source College under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 176 ~ 179

In conjunction with an adherent body coordinate system generated by a partial differential equation method and a SIMPLEC algorithm (a half-hidden algorithm for a coordinated solution of pressure coupling) a flow problem with a complicated geometric shape is converted to a calculation plane. For the latter a numerical simulation can be conducted by the use of a finite difference method. Furthermore, the flow in a flow duct with a curved boundary is forecast along with a discussion of the effect of flow duct shape on flow conditions. **Key words:** adherent body coordinate system, SIMPLEC algorithm, dual equation turbulent flow model

电站锅炉天然气点火装置的设计与研究 = Design and Study of the Natural Gas Ignition Device of a Utility Boiler [刊, 汉] / LIU Sheng-yong, ZHANG Bai-liang (Key Lab of Renewable Energy Under the Ministry of Agriculture, Zhengzhou, China, Post Code: 450002), LIU Zhi-gang (Xi'an Jiaotong University Xi'an, China, Post Code: 710049), WANG Jin-tao (Dengfeng Power Plant, Zhengzhou, China, Post Code: 450000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 180 ~ 182

All utility boilers in China use oil for ignition and combustion-support with oil consumption in this regard hitting more than 400,000 tons each year. The substitution of oil by coal has become an issue demanding an urgent solution. Based on the characteristics of natural gas the authors have by adopting a forced pre-mix combustion mode designed for an ignition device spray nozzles and an ejector, and conducted a study on the method of achieving flame stabilization. Under the condition of a given air-fuel ratio a test was conducted to identify the relationship between natural gas flow rate and ignition parameters. As a result, the optimum flow rate of the natural gas has been found to be $0.00172 \text{ m}^3/\text{s}$ with the flame temperature being as high as 1820°C and flame length 1.11 m. The use of the ignition device shows that it has the following merits: a high flame temperature, strong adaptation ability and ease of operation, etc. As compared with the former oil-ignition device, the pre-burning time of the natural gas ignition device is 1/4 of that of the oil ignition one while the cost is only 1/800 of the latter. **Key words:** utility boiler, natural gas, ignition device

某船主锅炉的设计特点 = Design Features of a Marine Main Boiler [刊, 汉] / CHEN Ming, MA Yun-xiang, XUE Guang-ya, CHEN Qi-duo (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 183 ~ 185, 210

A new type of marine main boiler designed by Chinese engineers was put into operation. It features a new construction, new materials and technologies. The structural design of this type of boiler is presented along with a description of its performance characteristics. **Key words:** marine main boiler, structural design, performance features

湿法脱硫除尘一体化装置应用中的问题及解决措施 = Some Problems Concerning the Use of an Integrated Wet Desulfurization and Dust Separation Device as well as Measures Taken for their Resolution [刊, 汉] / ZHAO Xu-dong, WU Shao-hua (Energy Science and Engineering College under the Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), MA Chun-yuan, et al (Power Engineering Department, Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 186 ~ 188

From the aspects of the operating parameters of a wet desulfurization system and its system configuration expounded are the existing problems involved in the industrial operation of an integrated wet desulfurization and dust-separation device.