

凝汽器铜管的联合保护研究

朱志平, 杨道武

(长沙电力学院 化学系, 湖南 长沙 410077)

摘 要:凝汽器铜管的腐蚀与防护一直是令人关心但又未解决好的问题, 由于凝汽器运行条件复杂、材质众多及冷却水质的不断恶化, 导致其腐蚀形式多种多样。为此, 这里探讨了一种凝汽器铜管的联合保护方式, 即铜管管端与管板采用涂刷 XZ-A 增韧防腐胶与阴极保护的方式联合保护, 铜管其它部位采用 FeSO₄ 镀膜(包括定期补膜)与胶球清洗的方式联合保护。实践证实了这种联合保护能够有效防止凝汽器铜管的腐蚀。

关 键 词:凝汽器铜管; 腐蚀; 联合保护

中图分类号: TM621.3 文献标识码: A

1 概 述

凝汽器是热力发电机组中的重要辅机, 是确保热力循环顺利进行不可缺少的设备, 它与整台机组的经济性和安全性密切相关, 是热力发电厂倍受关注的设备之一。下面一些因素确定了凝汽器在火电厂中的特殊地位: 其一, 凝汽器设备投资高, 消耗金属材料多, 如一台国产 600 MW 机组的凝汽器在安装好后其质量达 1 343 t (指未装水时), 其中铜管质量为 421.2 t, 共装有 $\Phi 25 \times 1 \times 14\ 792$ 规格的铜管 30 300 根, 铜管的总延伸长达到 448.2 km^[1]。其二, 由于凝汽器结构复杂、材质多(通常而言, 凝汽器铜管、管板、水室由不同材料组成)、运行介质多(铜管水侧是含盐量高的冷却水, 如江、河、湖、海水; 铜管汽侧则是低压蒸汽与高纯的凝结水)而引起严重的腐蚀问题。据资料表明: 国外大型锅炉的腐蚀损坏事故中, 大约有 30% 是由于凝汽器铜管的腐蚀损坏引起的。在我国这个比例更高一些。凝汽器铜管损坏的直接危害是管材本身的损失, 但更重要的是由于大型锅炉给水品质高, 水质缓冲性小, 一旦铜管泄漏, 冷却水漏入凝结水中会引起锅水水质恶化, 造成省煤器管、水冷壁管、过热器管、再热器管的腐蚀爆破事故, 而引起更大损失; 尤其是海水冷却的凝汽

器, 在泄漏严重时会使炉管在不长的时间, 甚至在几小时内腐蚀穿孔^[2]。锅炉炉管爆破与穿孔的结果是迫使机组降负荷运行, 甚至被迫停机。其三, 凝汽器真空度的下降, 会导致机组热效率的下降, 从而导致燃煤量增加, 机组经济性降低; 凝汽器铜管在管板胀口处的渗漏与铜管管端的冲击腐蚀穿孔是其真空度下降的主要原因之一。

1.1 凝汽器常用管材

为了提高凝汽器铜管的防腐蚀能力, 各种不同成分的铜管相继问世, 但是得到广泛应用的只有海军黄铜、铝黄铜、白铜(镍铜)等; 在一些海滨电厂, 采用了防腐性能优异的钛管, 但其价格是铝黄铜的 10 倍左右, 难以在以淡水为冷却水的电厂推广; 此外, 不锈钢管也被一些电厂采用过, 但目前国内外电厂的凝汽器管材大多数仍以价格低廉的铝黄铜为主。表 1~表 3 给出了我国生产与使用的三种黄铜管、两种白铜管、两种钛管的牌号与主要化学成分^[2~3]。

表 1 国产凝汽器黄铜管的牌号与化学成分

	主要成分/ %				杂质(总和)/ %		标准
	Cu	Al	Sn	As	Zn		
H68A	67.0-70.0	—	—	0.03-0.06	余量	0.3	
HSn70-1A	69.0-71.0	—	0.8-1.3	0.03-0.06	余量	0.3	YB 716-78
HA177-2A	76.0-79.0	1.8-2.3	—	0.03-0.06	余量	0.3	

表 2 国产凝汽器白铜管的牌号与化学成分

	Ni	Fe	Mn	Cu	标准
BF30-1-1	29.0-33.0	0.5-1.0	0.5-1.0	余量	GB 1135-85
BF10-1-1	9.0-11.0	1.0-1.5	0.5-1.0	余量	

表 3 国产凝汽器钛管的牌号与化学成分

	Ti	Fe	Si	C	N	H	O	标准
TA1	基本含量	0.15	0.10	0.05	0.03	0.015	0.15	GB 3625
TA2	基本含量	0.30	0.15	0.10	0.05	0.015	0.20	-83

收稿日期: 2002-01-07

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(01JJY3027)

作者简介: 朱志平(1963-)男, 湖北天门人, 长沙电力学院副教授, 硕士

1.2 凝汽器管的腐蚀特征、特点

1.2.1 管端腐蚀

由于冷却水进入管端时出现涡流,使得管子入口端的水流速度要比其它部分大得多,于是水流在管端的流动剪切应力也就比管内其它部分大;试验表明:入口端的剪应力可高达 2 kPa 以上,已经超过了铝黄铜的临界剪应力;经验证明,当管内流速达 2 m/s 时,其管端的剪应力就足以使铝黄铜管的钝化膜破坏而产生管端腐蚀^[1]。

管端腐蚀也称为进水口冲击腐蚀,多发生在入水口管端。

1.2.2 磨蚀

当冷却水中含有固体颗粒(如沙砾等)或气泡时,水流不仅对管壁产生剪应力,而且其中的固形物还对管壁产生冲刷作用,两者共同作用的结果使得腐蚀加速进行,从而产生“磨蚀”。由于天然水中的固形物绝大多数是沙粒,也称其为沙蚀。其腐蚀形状的演变常常受到局部水流的影响,腐蚀的金属表面呈现出深谷或马蹄形凹槽。磨蚀通常出现在凝汽器铜管的入水口管端。

一般来说,水速越高(导致局部的紊流强度越大),固形物含量越高,粒径越大,都会使磨蚀加剧。试验表明,在相同的含沙量条件下,沙的平均粒径为 50 μm 时,水对铝黄铜的腐蚀速度比 30 μm 时高出一倍以上^[3]。

1.2.3 凝汽器管的其它腐蚀型式

点蚀—发生在铜管上一种局部腐蚀形式,其腐蚀部位的尺寸很小,腐蚀坑大小只有 1~2 mm,但它的腐蚀速度很快,可在短时间内使铜管穿孔损坏。

氢蚀—发生在凝汽器汽侧空冷区的一种腐蚀形式,主要是由于空冷区中凝结水滴内氨的浓度高度富集,加上氧的作用,而产生的一种环状或水滴状蚀坑^[4]。

选择性腐蚀—合金中电位较低,相对较具有活性的一种元素因电化学作用而被选择性地溶解到介质中,较贵的成分则富集在合金中;比如,黄铜管的脱锌腐蚀,白铜管的脱镍腐蚀等。

应力腐蚀破裂—由于铜管的残余应力或凝汽器运行中产生的内应力,在氨、胺类及氧存在下所导致的在铜管上产生的纵向或横向的裂纹,严重时甚至裂开或断裂。

硫化物腐蚀—用被硫化物污染的淡水或海水作冷却水时,会加速铜管的腐蚀;主要是硫化物破坏了铜管表面的氧化亚铜保护膜。

在凝汽器管的各种腐蚀形式中,以管端腐蚀、磨蚀最为突出,尤其是离管板 150~250 mm 距离内的铜管管端;据资料统计:在日本凝汽器铜管的各种腐蚀事故中,管端腐蚀(磨蚀)所占比例为 57%,而在前苏联为 30%,都是比例最大的腐蚀形式。其次,是点蚀对凝汽器管的危害,因为它导致整根铜管报废,这在冷却水受到污染时尤其严重。

1.3 凝汽器铜管的防护

凝汽器管在长期使用中,人们获得了一些成功的保护经验:比如,阴极保护对管板、铜管管端具有良好的保护作用; FeSO_4 镀膜对提高整个铜管的耐蚀性与减少其泄漏性作用明显;胶球清洗(及投加杀菌剂)对减少铜管沉积物下腐蚀效果显著;而管板与铜管管端涂刷耐磨增韧防腐胶既完全阻止了铜管胀口处的渗漏,又能消除管板、铜管管端的冲击腐蚀与磨蚀。上述这些方法在电厂都有使用,但基本上局限于采用一到两种方法,如果能将上述方法联合起来使用,则不仅能大大减少因凝汽器管泄漏而引发的各种腐蚀问题,而且能延长铜管服役年限,起码可以达到铜管的设计寿命。

事实上,上述这些凝汽器管的防腐方法不仅不冲突,且是互补的。由于屏蔽效应,阴极保护仅能保护距管板 250~300 mm 内的铜管,如果凝汽器水室、管板、铜管管端进行了涂防腐胶处理,则可以延伸铜管受保护距离,同时,可以提高阴极保护效果,减少保护电流密度;如果阴极保护中采用铁阳极,则在保护过程中铁阳极的溶解会产生 Fe^{2+} , Fe^{2+} 会在铜管表面形成保护膜,它们的联合使用既消除铜管管端的腐蚀,也可使整个铜管的耐蚀性提高。在铜管 FeSO_4 镀膜(与补膜)过程中,如果投入胶球清洗,可以使膜质耐蚀性提高;它们的联合使用对于减少或消除铜管的点蚀、沉积物下的腐蚀意义重大。

对此,下面讨论了这些防腐方法的特点、应用情况及联合使用原则。

2 凝汽器铜管 FeSO_4 镀膜

对于整个铜管来说,最经济、最有效的防护方式是 FeSO_4 镀膜,它不仅对管端的冲击腐蚀有效,而且对铜管的点蚀有较好的防护作用。统计数据表明^[5],日本采用 FeSO_4 处理后,在清洁海水中铜管的泄漏事故发生率从每年 5.68 根/万根降到 0.32 根/万根;国内的华东电网调查结果:采用 FeSO_4 处理

后, 铜管的使用年限增加 30%~100%。

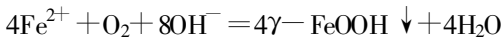
2.1 FeSO₄ 镀膜应用概况

早在 1940 年人们就发现了水中的铁离子对铜合金具有保护作用, 但直到 1961 年美国才报道了利用硫酸亚铁处理, 可以解决电厂凝汽器铜管腐蚀与泄漏问题。随后, 英、德、日等许多国家都采用了该技术; 我国在 1963 年开始使用该技术, 目前, 作为一种简单、有效的铜管防腐方法, FeSO₄ 镀膜在大多数热电厂已成为常规的运行操作程序。

2.2 镀膜原理

经过多年的研究及通过对膜质的分析, 人们发现铜管经过 FeSO₄ 处理后, 其表面膜质是由三层组成的, 上面松散层是各种结构的水合氧化铁, 中间紧密层主要是 Cu₂O 与 γ-FeOOH, 下层主要是铜合金基体上的 Cu₂O。

FeSO₄ 镀膜的机理—经过处理后(水冲洗或碱洗)的铜管表面生成活性的 Cu₂O, FeSO₄ 水解后产生的活性的氢氧化铁胶体在 Cu₂O 上沉积, 生成一种相互渗透、复合的水合氧化铁(γ-FeOOH)膜。其反应式为:



2.3 实施方法

FeSO₄ 镀膜通常采用两种方式, 高浓度“一次性”镀膜与运行中“开放式”镀膜。“一次性”镀膜需要增加临时系统, 如大流量的临时泵与临时管道, 蒸汽加热管, 压缩空气管道, 有时还需要较大容积的临时水箱, 操作复杂一些, 但成膜效果好一些。而“开放式”镀膜则不需增加任何临时系统, 操作简单。

“一次性”镀膜工艺条件—Fe²⁺ 浓度为 80~150 mg/L; pH 值为 5~6; 温度为 15~35 °C; 流速为 0.1~0.3 m/s; 时间为 96~120 h。操作中不间断地通入压缩空气, 以补充镀膜中氧的消耗(条件允许的话, 亦可补充工业纯氧), pH 值的控制可用 NaOH、Na₃PO₄ 调节, 亦可加入循环冷却水进行调节。

“开放式”镀膜工艺条件—通过硫酸亚铁镀膜泵加入硫酸亚铁溶液, 保持循环水入口中 Fe²⁺ 的浓度为 1~2 mg/L(或出口水中 Fe²⁺ 的浓度不小于 0.5 mg/L)。镀膜时间为 96~120 h; 水温 10 °C 以上为宜; 在镀膜过程中定期投入胶球清洗系统, 每 8 h 投入一次, 每次 0.5 h。

补膜工艺条件—每天进行一次, 每次 1 h, 在冷却水入口加入 0.5~1.0 mg/L 的 Fe²⁺(试验表明在冷却水中加入 0.01 mg/L 的 Fe²⁺, 在铝黄铜的允许

流速 2 m/s 左右, 就能形成保护膜)。如果采用部分铁阳极的阴极保护系统, 则可省略补膜过程。

2.4 FeSO₄ 镀膜的经济性

FeSO₄ 镀膜是很经济的, 一台采用开式循环的 300 MW 机组, 其冷却水量为 36 000~40 000 t/h, 如果加入的 Fe²⁺ 浓度为 1 mg/L, 每天加 1 h, 则所需的 FeSO₄ 量为 40 kg 左右, 加药费约合人民币 32 元。如果该机组每年运行 7 000 h, 则每年所需的药费 0.93 万元。一台 300 MW 机组凝汽器铜管价值数百万元, 延长铜管一年的服役期, 直接经济效益数十万元。

3 凝汽器阴极保护

3.1 阴极保护原理

阴极保护对于管板与铜管管端来说, 是有效的, 因为冲击腐蚀、磨蚀、沙蚀的本质原因是电化学腐蚀, 如果能将凝汽器水室、管板、铜管管端的自然腐蚀电位负移到阴极以下, 则它们的腐蚀过程会完全停止。实际操作中, 一般是将它们的腐蚀电位负移到阴极电位附近(如果电位过负, 会引起析氢反应, 同时也不经济), 这样, 阴极保护能够大大地减缓这些部位的腐蚀。

阴极保护分为牺牲阳极与外加电流两种方式。在海水和海水倒灌的体系中, 这两种保护方式差别不大, 选择的主要根据是凝汽器所需总的保护电流大小(一般以 50 A 为分界点, 所需电流 ≤ 50 A 时, 选择牺牲阳极; 所需电流 > 50 A 时, 选择外加电流), 或者根据电极(牺牲阳极或辅助阳极)安装是否方便确定。但在淡水体系中, 由于介质的导电性差(其电导率一般是海水的 1/200), 基本上不采用牺牲阳极方式, 一般选择外加电流阴极保护方式^[6-9]。

3.2 国内外应用状况

牺牲阳极(如铸铁阳极、镁基阳极)在早期的凝汽器保护中得到应用, 随后是锌基阳极、铝基阳极的推广利用; 但随着热力发电机组容量的增加, 凝汽器所需的保护电流增大, 1950 年初开始在凝汽器上采用外加电流式阴极保护法; 到 1960 年国外已广泛采用外加电流法了(同时, 牺牲阳极式保护法也在继续使用), 且在电厂的设计中就考虑了阴极保护的安、运行问题。

我国在 1980 年前后开始在电厂凝汽器上采用阴极保护法, 但到目前为止也只有屈指可数的几家滨海电厂与几家内地电厂采用了该法保护凝汽器。

3.3 保护参数的确定

海水中铜合金的自然腐蚀电位为 $-0.25 \sim -0.4 \text{ V (S.C.E)}$, 碳钢的自然腐蚀电位为 $-0.5 \sim -0.6 \text{ V (S.C.E)}$ 。按照将自然腐蚀电位负移 0.3 V 作为阴极保护电位的原则, 凝汽器保护电位为: $-0.8 \sim -1.0 \text{ V (S.C.E)}$; 其保护电流密度, 对铜合金为 $100 \sim 500 \text{ mA/m}^2$ (通常为 150 mA/m^2 左右), 对水室碳钢根据有无涂层确定, 从几个毫安每平方米到一百多毫安每平方米^[14]。

在淡水中, 则需根据水质情况通过试验确定^[10~11]。

3.4 凝汽器阴极保护效果

作为一种经典的防腐方法, 阴极保护在地下管网、输油管线、海船、海洋与港湾等工程上获得了巨大的成功, 成为人们的一种共识。同样, 在热电厂凝汽器保护上, 它也获得了令人满意的效果。如某滨海电厂有 4 台凝汽器^[12], 在未实施保护前, 运行不到 2 年就有 2 台凝汽器的铜管因腐蚀而完全更换; 而其中 1 台凝汽器实施阴极保护(同时进行了硫酸亚铁镀膜)后, 运行 4.5 年仅有 3 根铜管泄漏, 充分说明了该保护方法的有效性。但阴极保护技术在国内外电厂凝汽器上的应用推广, 还任重道远。

4 凝汽器管板与铜管管端涂胶

4.1 原理与应用概况

前面已述, 凝汽器铜管管端与管板的冲击腐蚀、磨蚀、沙蚀是发生频率最高, 危害极大的腐蚀形式; 虽然阴极保护、 FeSO_4 镀膜可以大大地减轻或消除这种腐蚀, 但是对于管板胀管处由于振动、热胀冷缩等原因造成的渗漏, 则只有通过涂刷耐磨增韧防腐胶(如 XZ-A 型)的方式使之消除。由于这种防腐胶优异的防护性能与极强的附着力, 涂刷一次后可使凝汽器铜管管端与管板在 6~9 年完全消除冲击腐蚀、磨蚀、沙蚀, 并根除胀口渗漏; 同时, 可以提高阴极保护效果(如果一起使用)。

凝汽器铜管管端与管板涂刷防腐胶是推广相当成功的防腐法, 全国有数百台机组采用该法, 它对于减少铜管泄漏、延长铜管使用年限和提高凝结水水质起到了积极的作用; 这其中 XZ-A 型耐磨增韧防腐胶(长沙)、KHS-1 聚酯聚硫耐磨增韧防腐胶(西安)、N-D 防腐放漏专用胶(沈阳)等得到厂家的认可与接受^[13]。

4.2 对防腐胶的要求

耐磨性—循环水进入铜管管口时会出现涡流, 产生剧烈的冲刷作用, 从而破坏铜管表面保护膜; 同时, 循环中不可避免地含有气泡(有一部分在涡流作用下形成), 气泡的破裂产生强烈的锤击作用, 带来更大破坏力; 如果循环水中含有沙子或其它杂物, 它们共同作用的结果, 会产生严重的磨蚀问题。这就要求涂刷在凝汽器管板与铜管管端的防腐胶具有优良的耐磨性, 同时, 具有较好的韧性, 以消化、吸收涡流与气泡产生的冲击力。

耐温性—机组启停及负荷异常时, 凝汽器温度变化较大, 同时, 一年中凝汽器冷却水侧的工作温度变化也较大, 如夏季与冬季的温度变化可达 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右。这就要求防腐胶具有良好的耐温特性, 不因温度变化而开裂、脱落。

密封性—主要是针对管板胀管处状态而言, 要求防腐胶不因铜管的振动、伸缩而出现缝隙、裂纹, 在 6~9 年服役期内, 完全根除胀管处的渗漏。

附着力—要求防腐胶具有良好的粘接特性, 在一般机械除锈条件下, 与金属基体具有极强的附着力, 在冲击、温变的情况下, 其涂层的理化特性保持不变, 在服役期内涂层完整。

4.3 应用效果

凝汽器铜管管端与管板涂刷防腐胶后, 显著减少了铜管的泄漏问题, 减少了因此而造成的停机事故。同时由于消除了胀管处的渗漏问题, 凝结水水质得以提高; 既延长了凝结水精处理装置的再生周期, 又提高了机组水汽品质。

5 结论

凝汽器的腐蚀与防护问题, 关系到整个机组生产的安全性、经济性, 一直是困扰人们的难题。通过采用联合保护法, 可以大大地减轻或消除铜管的腐蚀问题, 由此也就减少了炉管腐蚀, 及随之引发的“四管”爆破问题; 同时, 也延长了机组的服役年限。

参考文献:

- [1] 杨善让. 汽轮机凝汽设备及运行管理[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [2] 张卓澄. 大型电站凝汽器[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [3] 龚洵洁. 热力设备的腐蚀与防腐[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

(下转第 96 页)

内, 汽机本体的各段抽汽压力略有降低, 而在停用时各抽汽压力有所上升, 但全在正常波动范围内, 温度基本不变, 抽汽对除氧器的正常运行影响也不大。

经 FGD 再热器后的凝结水出水泵打回至除氧头, 除氧器内压力略有下降、水位略有上升, 而水温基本无波动, 对除氧器的正常运行影响不大。若凝结水质不合格未回收, 将使机组的补水率增加约 2%, 因此在 FGD 投运后, 运行人员应经常化验水质, 合格后及时回收凝结水。

4 讨论与结论

(1) 当 FGD 系统启、停时, 烟气进行由旁路和主路的切换, 由于两路烟道的阻力不一样, 此时会对锅炉的炉膛负压产生明显的影响, 特别是, 当 FGD 发生保护时将造成锅炉的炉膛负压波动更大, 若燃烧的煤质差, 在很短的时间内运行人员无法将负压调整过来, 极有可能造成锅炉灭火。因此 FGD 旁路挡板的开关并不是越快越好, 为保护 FGD 系统, 在其入口处加装事故喷水装置可能更好, 在脱硫系统的设计中应考虑。

当只有一台锅炉运行时, FGD 系统投运后其入口处由负压变为正压。由于停运锅炉烟道上的挡板关不严, 造成烟气倒灌入停运锅炉炉膛及烟道中, 这会造成停运锅炉系统的严重腐蚀和检修工作的困难, 因此在 FGD 系统设计时必须考虑这一点。

(2) 脱硫前烟气温度和烟道内壁温度基本上大于酸露点温度, 故烟气不会在尾部烟道和烟道内壁结露, 已在负压区不会出现酸腐蚀问题; 而脱硫后烟气尽管得到加热, 但烟气温度已低于酸露点温度, 烟

气会在尾部烟道和烟道内壁结露, 加上脱硫后烟道正压区的增大, 会使烟道的腐蚀加大, 因此在尾部烟道和烟道的设计时就应当考虑防腐问题。

(3) FGD 系统的用水来源于机组的工业水, 当 FGD 满负荷运行时对原有工业水系统影响较大, 机组设备的冷却水压力明显下降, 因此 FGD 工艺水系统单独设计为好, 或原系统应留有较大的余量, 尽量减少对机组运行的影响。

(4) 烟气脱硫后产生的石膏通过抛弃泵将其输送到电厂的灰渣缓冲池, 与原有冲灰渣水一起通过灰渣泵打到灰场, 这种方式在国内是首次应用。初步研究表明, 这种设计对现有排灰渣管道的影响不大, 可以不必单独设立脱硫石膏液浆排放管道, 这样可以大大地节约投资。

(5) 使用汽机的抽汽来加热脱硫后烟气对汽机正常运行影响不大, 凝结水口收对除氧器运行影响也很小, 加热系统流程也简单, 电厂初投资少。但是当 FGD 运行时所用蒸汽量较大, 年运行费用很高, 此时采用蒸汽加热器或气—气加热器哪个更好, 或不采用加热而用湿烟道的方式, 应综合比较后选定。

参考文献:

- [1] 何育东. 重庆发电厂 2×200 MW 机组湿法烟气脱硫系统工艺流程分析[J]. 电力环境保护, 2001, 17(4): 9—12.
- [2] 曾庭华. 连州电厂石灰石/石膏湿法烟气脱硫系统的工艺流程分析[J]. 电力环境保护, 2001, 17(2): 11—13.
- [3] 曾庭华. 石灰石/石膏湿法烟气脱硫系统的调试[J]. 华东电力, 2001, 29(11): 39—44.
- [4] 范从振. 锅炉原理[M]. 北京: 水力电力出版社, 1995.
- [5] 岑可法. 锅炉和换热器的结灰、结渣、磨损和腐蚀的防止原理与计算[M]. 北京: 科学出版社, 1994.

(辉 编辑)

(上接第 92 页)

- [4] 朱志平, 陈天江, 吴志宏. 某热电厂凝汽器铜管汽侧腐蚀原因分析[J]. 材料保护, 1998, 31(12): 31—32.
- [5] 钱 晖, 冯 斌, 王加明. 凝汽器铜管硫酸亚铁一次成膜的应用[J]. 湖南电力, 2000, 20(1): 29—30.
- [6] 许崇武, 朱志平. 用牺牲阳极保护凝汽器的试验研究[J]. 腐蚀与防护, 1991, 12(1): 16—21.
- [7] 朱志平. 铝基与锌基阳极保护凝汽器的比较试验[J]. 腐蚀与防护, 2001, 22(1): 18—19.
- [8] 朱志平. 锌基阳极特性探讨[J]. 腐蚀与防护, 1995, 16(1): 31—32.
- [9] 朱志平. 间歇式阴极保护法的试验研究[J]. 腐蚀与防护, 1996, 17(4): 150—153.

- [10] 范隆海. 电厂淡水凝汽器腐蚀的阴极保护[J]. 腐蚀与防护, 2001, 22(7): 303—306.
- [11] 许崇武, 胡学文, 艾春杰. 热力机组凝汽器阴极保护防蚀技术的研究及应用[J]. 华北电力技术, 2001(7): 37—39.
- [12] 朱瑜麟. 海水冷凝器联合防护技术初探[J]. 华东电力, 1989, (3): 9—13.
- [13] 唐汉文. 凝汽器冷却水的泄漏与胶封[J]. 中国电力, 1995, 28(6): 31—33.
- [14] 朱志平. 阴极保护技术及在凝汽器上实施要点[J]. 火力发电厂水处理设计, 1994(1): 17—21.

(渠 源 编辑)

is necessary to conduct a more thoroughgoing research on a reference environment model. **Key words:** exergy, environmental impact, pressurized fluidized bed combustion combined cycle (PFBC-CC), emissions

水煤膏压力泌水特性与可泵性分析 = **Coal-water Paste Water-seeping Properties under Pressure and Its Pumpability** [刊, 汉] / LU Ping (Power Engineering Institute under the Nanjing Normal University, Nanjing, China, Post Code: 210042), ZHANG Ming-yao (Thermal Energy Engineering Institute under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 78 ~ 81
Water-seeping properties of coal-water paste (CWP) under pressure are studied experimentally with the influence of particle size distribution and water content, etc on the pumping properties of CWP being analyzed. In conjunction with a CWP slump index proposed is a pumpability evaluation index of the CWP. It is found that the pumpability of the CWP can be featured by two indexes, namely, the slump and the total quantity of water seeping under pressure. The CWP with a good pumpability has a slump in the range of 8 - 24cm. The corresponding relative water seeping rate and water seeping quantity are respectively $S_{10} \leq 40\%$ and $V = 70 - 110$ ml. **Key words:** coal-water paste, water seeping under pressure, pumpability

下降液膜流动模型及稳定性分析 = **Model of a Falling Liquid-film Flow and an Analysis of Its Stability** [刊, 汉] / QIAN Huan-qun, HU Zhi-hua, SUN He-dong, et al (National Key Laboratory of Multi-phase Flows under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 82 ~ 85

A sound mathematical model has been set up for the film flow of a free falling liquid. Boundary layer theory was used to analyze and simplify the model, securing a second-order boundary-layer model for the liquid-film flow. A stability analysis of this model was performed. Through calculations the wave growth rate of the falling liquid film and a neutral stability curve were obtained. The comparison of the calculation results with those of other models has confirmed that the second-order boundary model offers better prediction effectiveness and its form is more suited for performing further a nonlinear analysis. **Key words:** liquid film, boundary layer, wave, growth rate, neutral stability

后加载技术在极小展弦比叶栅中的应用 = **The Use of Rear-loading Technology in Ultra Low-aspect Ratio Cascades** [刊, 汉] / WANG Yu-zhang, WANG Yong-hong (Institute of Mechanical and Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030), ZHAO Ya-fang, FENG Zhen-ping (Turbomachine Research Institute under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 86 ~ 88

Through the use of turbine blades with a rear-loaded load profile one can effectively control the formation of secondary flows in the blade passage, reducing secondary-flow losses. Meanwhile, this type of cascades is highly adaptive to a variety of incidence angles, thus significantly enhancing the flow efficiency in a cascade passage. An ultra low-aspect stator cascade with rear-loaded characteristics was designed by using the rear loading technology. The results of numerical analysis and test of the above-mentioned cascade indicate that the latter features a low three-dimensional cascade loss. Moreover, the cascade performance hardly changes with the change of aspect ratios, incidence angles and outlet Mach numbers. **Key words:** rear-loading technology, aspect ratio, secondary flow, cascade test

凝汽器铜管的联合保护研究 = **A Study of the Combined Protection of Steam Condenser Copper Tubes** [刊, 汉] / ZHU Zhi-ping, YANG Dao-wu (Chemistry Department, Changsha Institute of Electric Power, Changsha, China, Post Code: 410047) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 89 ~ 92, 96

The corrosion and protection of condenser copper tubes has always been a problem people are keenly concerned with but for which there still lacks a satisfactory solution. The complicated operating conditions of the copper tubes, variegated types of their fabrication material and the increasingly deteriorating quality of cooling water have led to a multitude of corrosion forms. In view of the above the authors have explored a combined protection method for condenser copper tubes.

Under this method the copper tube end and tube sheet are coated with XZ-A toughness-enhancement and corrosion-prevention glue along with the introduction of cathode protection. Other parts of the copper tube are plated with a FeSO_4 film (including the film replenishment conducted periodically) combined with the use of sponge-ball cleaning. Practice has shown that this type of combined protection is highly effective in preventing condenser copper tube corrosion. **Key words:** condenser copper tube, corrosion, combined protection

湿法烟气脱硫系统对发电机组运行的影响研究= Research on the Influence of Wet-process Flue Gas Desulfurization (FGD) System on the Operation of a Power Plant [刊, 汉] / ZENG Ting-hua, MA Bin, LIAO Yong-jin, et al (Guangdong Provincial Electric Power Test and Research Institute, Guangzhou, China, Post Code: 510600) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 93 ~ 96

The influence of a flue gas desulfurization system on the operation of a power plant was investigated on a limestone/gypsum wet-process flue gas desulfurization (FGD) system installed at Lianzhou Power Plant in Guangdong Province. Mainly analyzed is the influence of the FGD system on the following items: boiler furnace negative pressure, corrosion of flue-pass at the boiler tail section, industrial water system, steam turbine operation. The impact of mixed drainage of desulfurization gypsum and plant ash-slag water on the existing drainage system has also been investigated. The results of the investigation may serve as reference data for the design and operation of the wet-process FGD system. **Key words:** wet-process flue gas desulfurization, power plant, influence

基于能量价值分析的给水泵驱动方式的技术经济论证= Technico-economic Argumentation of a Feedwater Pump Drive-mode Based on an Energy Value Analysis [刊, 汉] / CHEN Guo-nian (Jiangsu Provincial Electric Power Co., Nanjing, China, Post Code: 210024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 97 ~ 100

Through the value analysis of various forms of energy produced by a power plant the authors have put forward a principle of "energy value analysis". On the basis of this theory deduced is a calculation formula for "comprehensive cost-based coal consumption rate". Under this approach it is possible to overcome the limitation of a traditional thermodynamics-based analytical method. By way of organically integrating the theory of thermodynamics with economics a scientific method is found for the technico-economic analysis of power plants under market-economy conditions. Moreover, an effective approach for cost reduction at power plants under market-economy conditions and the criteria for analyzing energy savings have also been identified. All the above has been successfully applied in the technico-economic argumentation concerning the drive mode for a feedwater pump. **Key words:** electric power plant, energy value, comprehensive cost-based coal consumption rate, electric-drive pump, steam-drive pump, argumentation

超临界机组汽水系统蒸汽加氧吹扫钝化工艺应用= The Application of Steam-plus-oxygen Purging and Passivation Technology for the Steam-water system of a Supercritical Boiler Unit [刊, 汉] / GUO Jiang-bin (Heilongjiang No.3 Thermal Power Plant Construction Co., Harbin, China, Post Code: 150016), ZHANG Yong, WANG Ying (Harbin No.703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 101 ~ 103

In accordance with the layout features of a boiler unit at Lazidan Power Plant in Armenia, boiler steam-plus-oxygen technology instead of the traditional chemical washing plus ignition purging technique was introduced for the purging and passivation of the steam-water system of the boiler unit. Good results have been achieved in the practical use of the above-mentioned technology with energy loss being reduced and pollution of environment by chemicals avoided. Through a comparison of the technology under discussion with traditional ones the authors describe the theoretical basis of the recommended washing and passivation techniques. The latter are worthy of a wider popularization and can serve as additional reference data and information for analogous domestic techniques. **Key words:** supercritical parameter, steam, purging, passivation