

第一届燃煤电厂能效提升技术交流研讨会



孟继安

凝汽器节能新技术与工程示范

清华大学航天航空学院高级工程师。主要研究方向：传热强化与节能理论研究、技术研发与应用，负责和承担了国家“十二五”重大专项课题、国家发改委示范工程项目和973课题等多个国家项目。在电厂凝汽器管束优化布置和胶球清洗新技术研发与应用、压水堆严重事故下压力容器的非能动冷却技术研发、大型燃气烟气深度余热利用技术研发与应用等方面做出突出贡献，发表学术论文近百篇，授权专利 40 余项，获得国家科技进步二等奖 1 项。研发的电厂凝汽器管束优化布置和胶球清洗新技术，已在多个电厂 300-600MW 八台机组进行工程示范，提高凝汽器真空 1-1.5kPa，节煤 3-4g/kwh。

一、电厂凝汽器节能潜力分析

二、新型管束优化布置技术与示范

三、新型胶球清洗技术与示范

四、结论



典型常规燃煤发电机组供电煤耗参考值 单位: 克/千瓦时

	机组类似	供电煤耗 (g/kwh)	
		设计值	75%-80%负荷率
135MW	亚临界	342	360
	200MW	342	360
300MW	亚临界		353
	超临界	314	326
350MW	超临界	307	319
	亚临界	311	323
600MW	超临界	304	315
	超超临界	289	299
1000MW	超超临界	283	290

汽机侧	影响因素	影响热耗	影响煤耗
热耗总偏高		260-550 kJ/(kW·h)	10.3-17.8 g/(kW·h)
高压效率偏低	3%-6%	49-97.8 kJ/(kW·h)	1.8-3.7 g/(kW·h)
中压缸效率偏低	2%-4%	47-95 kJ/(kW·h)	1.8-3.5 g/(kW·h)
低压缸效率偏低	2%-4%	76-152 kJ/(kW·h)	2.8-5.7 g/(kW·h)
热力系统冗余		30-63 kJ/(kW·h)	1.2-2.5 g/(kW·h)
冷端影响真空	1-2.5 kPa	65-163 kJ/(kW·h)	2.4-6.1 g/(kW·h)
辅机效率偏低	10%-20%	15-26 kJ/(kW·h)	0.6-1 g/(kW·h)



电力行业低碳技术创新及产业化专项

大型电站冷源节能新技术创新及产业化示范工程

国家发展和改革委员会文件

发改办能源[2013]148号

国家发展改革委办公厅关于请组织申报 2013 年 低碳技术创新及产业化示范工程项目的通知

各省、自治区、直辖市计划单列市、新疆生产建设兵团发展改革委，
工业和信息化部办公厅，中国煤炭工业协会，中国建材工业联
合会，中国机械工业联合会，有关中央管理企业：

为加快推进我国战略性新兴产业、重点节能环保行业低碳技术创
新及产业化，加快培育战略性新兴产业，培育节能环保产业，培育节能环保和清洁能源
装备制造业，现就有关事项通知如下：2013 年低碳技术创新、能源、建
筑、建材行业低碳技术创新及产业化示范工程专项。现就有关事项
通知如下：

主审单位：中国电研集团
协作组织单位：中国机械工业联合会
承担单位：华电电力科学研究院
清华大学航天航空学院

联系人：
联系电话：
电子邮箱：

2013 年 3 月 6 日

➤项目研发及产业化主要内容:

- (1)大型电站凝汽器管束优化布置设计与制造技术
- (2) 典型600MW、300MW机组凝汽器管束优化布置技术节能示范工程（5台）
- (3) 大型电站凝汽器管束优化布置技术规范
- (4) 典型大型机组凝汽器新型胶球清洗设计与制造技术
- (5) 典型600MW、300MW机组凝汽器新型胶球清洗技术节能示范工程（5台）
- (6) 凝汽器新型胶球清洗装置技术规范

➤项目项目主要技术指标:

通过典型的600MW、300MW机组凝汽器管束优化布置技术节能示范工程和新型胶球清洗技术节能示范工程，凝汽器传热系数高于美国HEI标准10%以上，5分钟收球率达98%以上，冬季可照常运行，二次滤网和收球网的运行压差同比降低20%以上或者比电力行业标准DL/T581-95的标准值降低20%以上，胶球寿命可达3个月以上。

➤项目示范工程:

- ✓ 在华电集团公司实施5台凝汽器和3套胶球清洗系统及二次滤网进行节能改造示范
- ✓ 在大唐国际张家口发电有限公司的2套胶球清洗系统及二次滤网进行节能改造示范。

二、新型管束优化布置技术与示范

在国家973等项目的支持下，基于**积微理论**导出了凝汽器的**背压**和**抽气量**与**传热参数**之间的**定量关系**，采用**仿生优化技术**，研发了**一种仿生双连树形管束式凝汽器**。

凝汽器壳侧压降与分布参数的关系

$$\left(\frac{1}{2}U_i^2 + \frac{\Delta P}{\rho}\right) D_i = \iiint_V \left[\beta(F_u u + F_v v) + \beta \frac{\bar{p}}{\rho} \dot{m} + \frac{1}{2} \beta(u^2 + v^2) \dot{m} + \beta \phi_\mu \right] dV$$

凝汽器抽气率与分布参数的关系

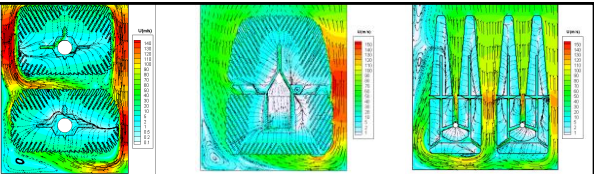
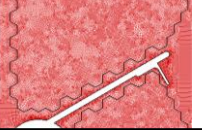
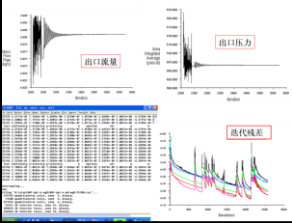
$$\frac{1}{2} D_o \bar{Y}_{ao} = \iiint_V \left\{ \frac{1}{2} \beta Y_a^2 \dot{m} - \beta \rho D_e \left[\left(\frac{\partial Y_a}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial Y_a}{\partial y} \right)^2 \right] \right\} dV$$

◆ 基于理论指导的精确仿真优化

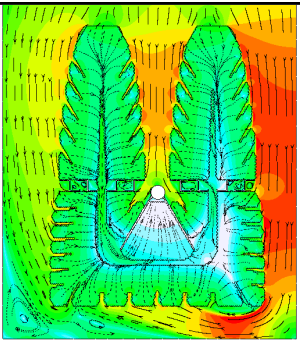
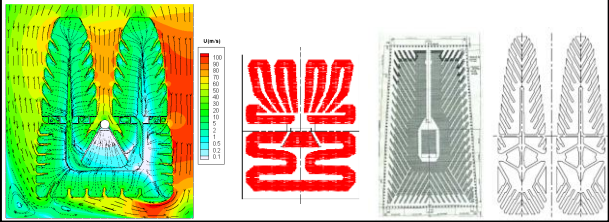
- 多孔介质模型
- 真实管束模型
- 基于先进理论仿生布管优化

准真实管束
多孔介质模型

- ✓ 精确建模技术,真实管束模型。
- ✓ 先进管束网格生成技术。
- ✓ 过程监控技术,残差<1E-6。
- ✓ 实验验证,数值结果与实验及工程基本一致。
- ✓ 理论指导布管优化。



比较了现有典型布管布置方式，仿生树形优化布置性能最优！



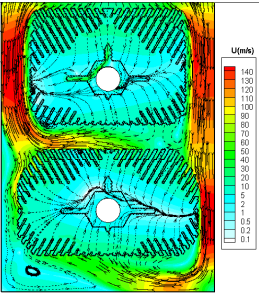
基于先进理论和仿生数值优化开发的管束布置新技术，消除了现有技术的不足，显著提高了换热性能。

ZL201010197078.9

优化方案
性能优良

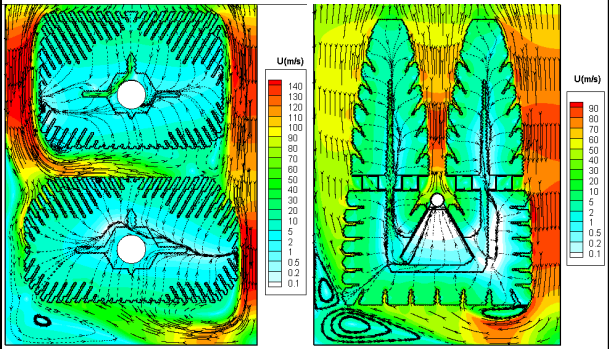
- 传热系数 { ✓ 比初步方案高>20%
✓ 比HEI高>10%
- 管束汽阻<200Pa

前期示范：西柏坡电厂2#机改造凝汽器管束优化分析与应用



美国西屋双菱形布管

- (1) 由于上部管束的阻挡，蒸汽难以到达下部管束，换热性能差异大；
- (2) 非合理设置空冷区，管束流阻不均，造成凝结不均，部分蒸汽未充分冷凝；
- (3) 存在明显的比较大低速区，影响整体换热性能；
- (4) 壳侧流速过大（超过140m/s），容易造成管束振动；
- (5) 壳侧阻力明显偏大（达430Pa）；
- (6) 回热效果差，冷凝水过冷度较大；
- (7) 换热性能非常差，比按HEI设计的换热性能相差30%以上；
- (8) 抽气设计不合理。



美国西屋双菱形布管

新型仿生优化管束

换热系数比原方案提高40%以上！



改造后凝汽器压力降低1.5-1.8kPa



Stev
perip
exce
your
cond
com

Thank you kindly for your clarification on tube arrangement. I agree with your assertion that your design with peripheral steam penetration lanes minimizes flow resistance as excessive pressure loss is critical to a power plant. So I am confident that your tube arrangement is superior and "best of class" of steam condensers. Besides, you have actual operating data from the field to compare well with your model. This is an excellent confirmation!

The other area of interest is with the design of the air cooling section in

at

...我确信你的凝汽器管束设计是同类中最好的 (superior and "best of class")。...

—— 具有40年凝汽器设计制造和工程经验的美国专家

工程示范I：莱城电厂1、2号机组凝汽器

华电莱城电厂300MW机组原凝汽器设计参数

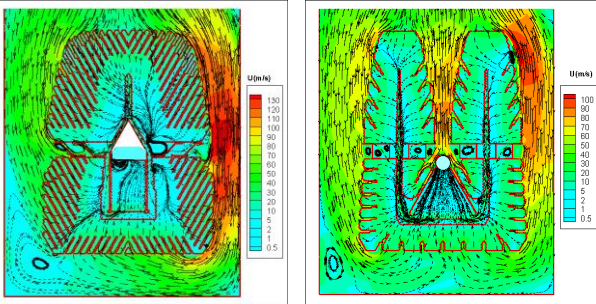
凝汽器型号	N-17000-2	凝汽器冷却面积	17000 m ²
循环水流量	35600 t/h	设计循环水温度	20℃
冷却水管内流速	2m/s	换热管外径	28
换热管有效长度	10840mm		
换热管规格:	Φ28×1	材料HSn70	数量16255
	Φ28×1	材料BFe	数量1580
凝汽器设计压力	5.39kPa		

凝汽器在300MW工况下的试验结果修正到设计冷却水量和进水温度条件下，凝汽器压力为5.84kPa，未达到设计规范保证值(凝汽器设计压力为5.39kPa)。
(2012年11月华电电科院测试报告)

0.45kPa

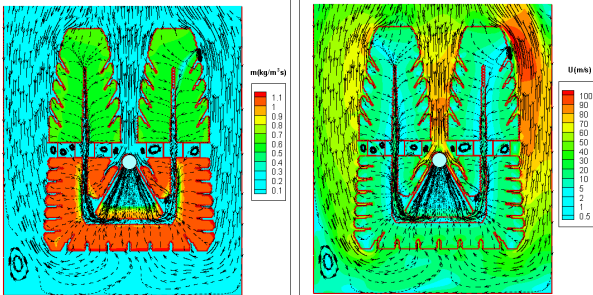
莱城电厂凝汽器改造要达到的三个目标：

- 1、要适应汽轮机通流改造，从300MW增容至330MW；
- 2、凝汽器设计压力从5.39kPa减低至4.9kPa；
0.45kPa+0.49kPa=0.94kPa
- 3、将铜管换成不锈钢管后凝汽器抗振性能要满足HEI标准。



模拟计算汽阻397Pa 模拟计算汽阻156Pa

◆壳侧汽阻下降50%以上
◆换热系数提高25%以上



管束布置
优化方案
性能优良

— 传热系数 —
— 管束汽阻156Pa<200Pa

✓比原布置高>25%
✓比HEI高15%



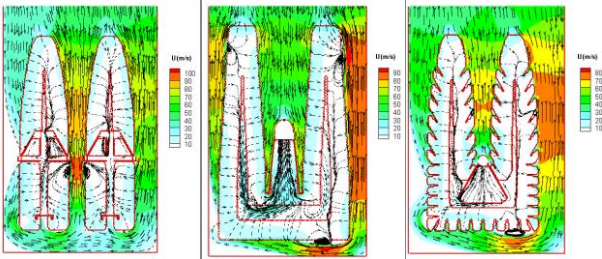
2014年6月、9月完成改造

凝汽器改造结果

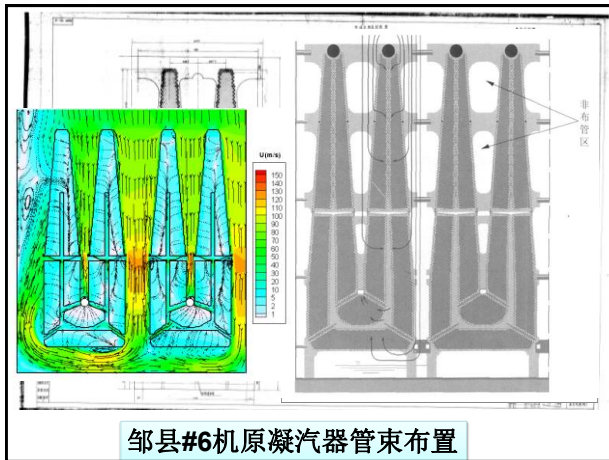
- 1、从300MW增容至330MW；
- 2、凝汽器真空由5.84kPa提高至4.33kPa；
0.45kPa+0.49kPa+0.57=1.51kPa
- 3、机组降低标准煤耗4g/kwh，年节能经济效益大约400万元。



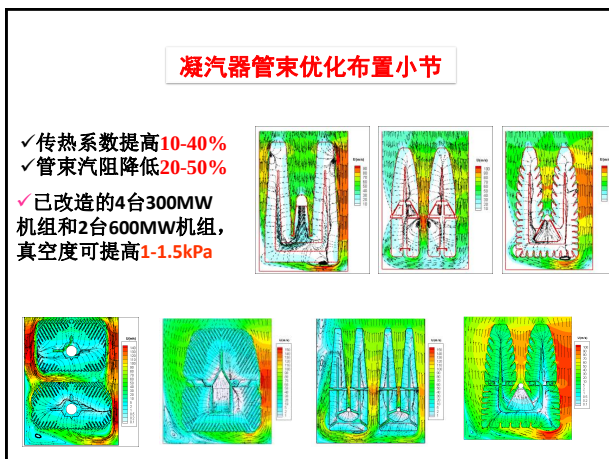
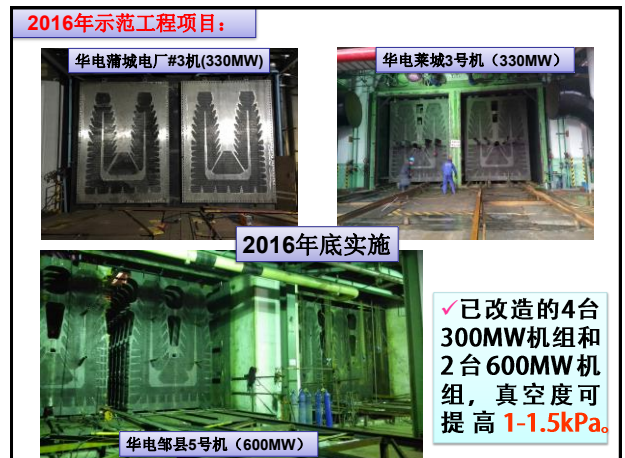
工程示范II：邹县#6机（600MW）凝汽器



					HEI
设计工况	ΔP (Pa)	322	599	125	
	Q_o (kg/h)	275	541	110	196
抽气条件	P_k (kPa)	5.01	5.13	4.58	4.75



凝汽器运行性能分析计算结果									
序号	名称	单位	500MW 低压力侧A	500MW 高压侧B	550MW 低压力侧A	550MW 高压侧B	623MW 低压力侧A	623MW 高压侧B	
1	机组功率	MW	500	500	550	550	600	623	
2	进水	◆平均凝汽器真空比HEI提高0.43kPa ◆比改造前凝汽器真空提高1.03kPa ◆降低煤耗2.6g标煤/kWh ◆节能经济效益500万元/年						18.5	
3	出水							24.5	
4	冷却水流量							6	
5	冷却水温度							23.47	
7	凝汽器真空							97.5	
8	凝汽器热耗率							3.5	
9	对应煤耗							26.69	
10	端差		℃	4.42	-1.07	3.74	-0.89	6.68	2.19
11	设计凝汽器压力		kPa	5.25	-	5.14	-	3.37	4.28
12	凝汽器压力运行值-设计值	kPa	-0.45	-	-0.84	-	-0.17	-0.78	



三、新型胶球清洗技术与示范

◆现有电厂凝汽器清洗除垢技术

- | | |
|---------------|------------|
| ❑ 化学清洗 | ——污染、成本大 |
| ❑ 人工机械清洗 | ——停产、损坏换热管 |
| ❑ 机器人 类 | ——昂贵、易损坏 |
| ❑ 管内插物清洗与换热强化 | ——流阻大、易损坏 |
| ❑ 胶球清洗 | ——公认最佳 |

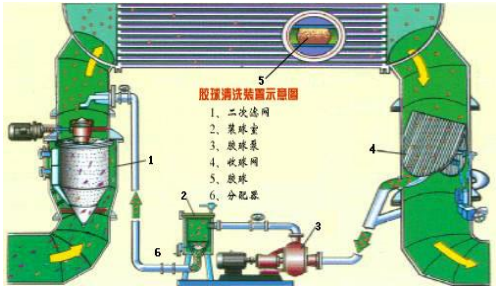
目前电厂凝汽器胶球清洗被认为投资最少、运行最经济、最为可靠、环保…的**最佳选择**。

污垢厚度 (mm)	清洁时传热系 数 (w/m²k)	总传热系数 (w/m²k)	清洁系数	背压 kPa
0.02	3425	3154	0.92	4.86
0.026	3425	3081	0.90	4.90
0.04	3425	2924	0.85	5.00
0.05	3425	2821	0.82	5.07
0.06	3425	2725	0.80	5.14
0.1	3425	2398	0.70	5.43
0.2	3425	1845	0.54	6.27
0.3	3425	1499	0.44	7.24
0.4	3425	1262	0.37	8.35
0.5	3425	1090	0.32	9.58

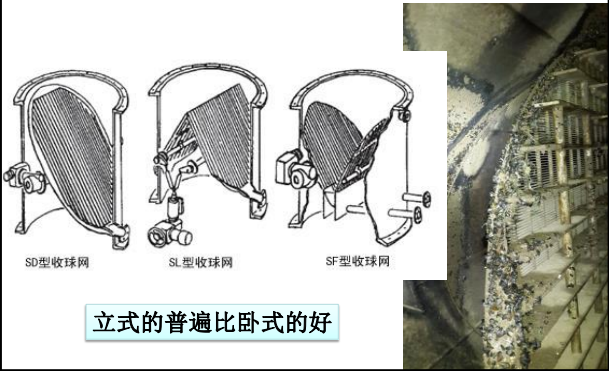
#污垢的导热系数一般为0.2~1w/m·k，上表取0.8w/m·k。

◆ 现有胶球清洗技术存在的问题

➤ 现有投球结构与问题



➤ 现有收球网结构与问题



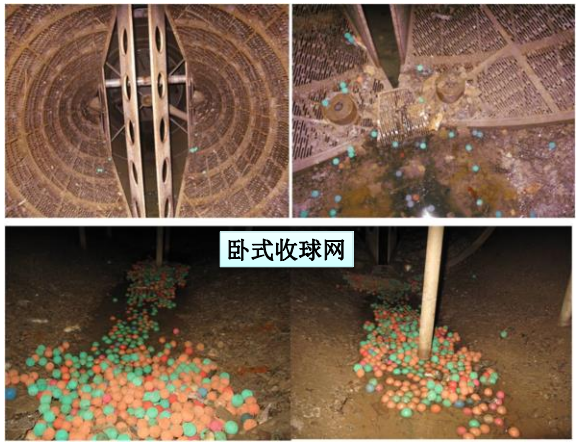
立式的普遍比卧式的好



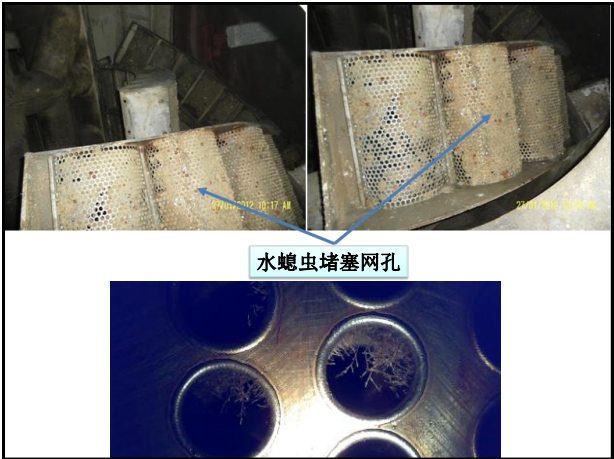
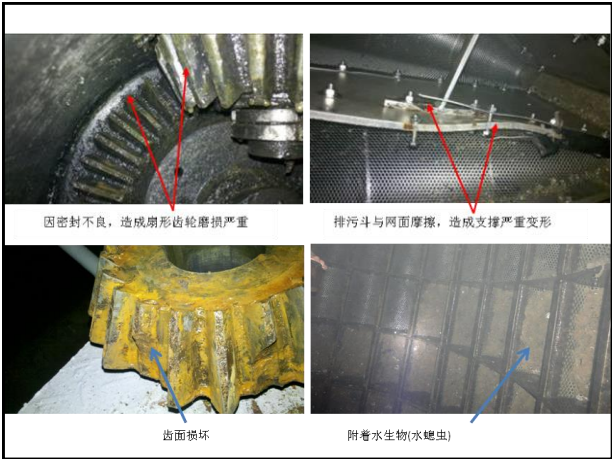
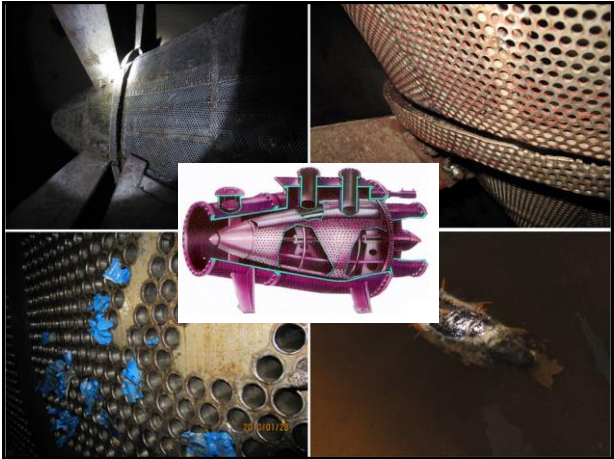
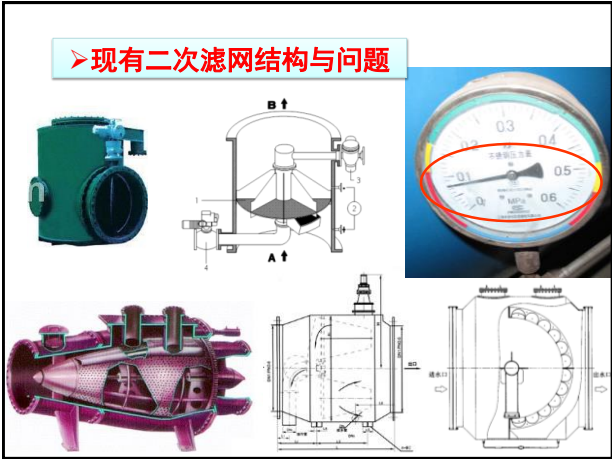
立式收球网



卧式收球网



卧式收球网





□二次滤网主要性能指标

- ✓水阻 (<4.9kPa or 6.9kPa)
(流通面积、结构、排污能力与方式)
- ✓排污能力
(水草、树枝、塑料袋、鱼蚌、污泥、水螅虫等)
- ✓传动结构
(结构、材料、密封、故障率、检修方便性)
- ✓监控
(自动与非自动)

- 重技术、重质量、重服务！
- 轻价格、严把关！

➤现有装球室结构与问题



➤现有装球室结构与问题



➤现有装球室结构与问题



➤现有杂物过滤结构与问题



➤ 现有杂物过滤结构与问题



➤ 现有监测与控制系统与问题



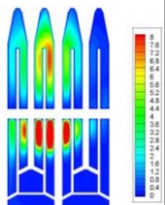
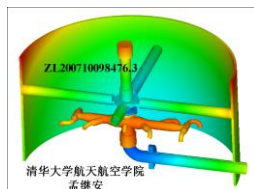
现有技术存在的问题及不足：

- ◆ 二次滤网：过滤效果差、运行稳定性差、水阻大
- ◆ 投球不均：边缘结垢、部分换热管堵塞一串胶球
- ◆ 收球网：跑球、不稳定，甚至难以收球的问题
- ◆ 胶球：外形尺寸、软硬度、密度等指标合格率低
- ◆ 冬季收球率低，通常不投球或者开高速泵投球
- ◆ 操作劳动强度大



3.2、胶球清洗新技术与工程示范

◆ 自旋转均布投球新技术



- 2009年营口电厂，收球率达97.6%
- 2010年西柏坡电厂，收球率达96%以上
- 2012年张家口电厂，收球率>98%
- 投球率可达20%

自旋转均布投球技术试验





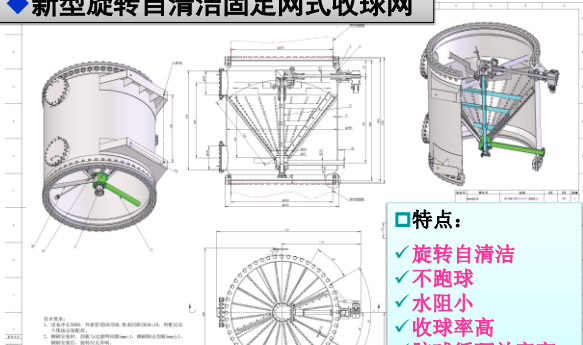
<50%的换热管可被胶球清洗



某电厂(>96%) 某电厂(97.6%)

100%的换热管可被胶球清洗!

◆ 新型旋转自清洁固定网式收球网



□ 特点:

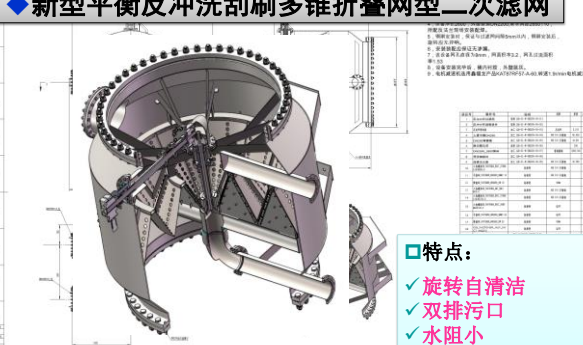
- ✓ 旋转自清洁
- ✓ 不跑球
- ✓ 水阻小
- ✓ 收球率高
- ✓ 胶球循环效率高
- ✓ 长寿命、故障率低

旋转冲/反冲、刮、刷相结合



新型收球网样机

◆ 新型平衡反冲洗刮刷多锥折叠网型二次滤网



□ 特点:

- ✓ 旋转自清洁
- ✓ 双排污口
- ✓ 水阻小
- ✓ 排污水流量小
- ✓ 长寿命、故障率低

旋转冲/反冲、刮、刷相结合



新型平衡反冲洗刮刷多锥折叠网型二次滤网

◆ 新型自旋转清洗除垢胶球技术

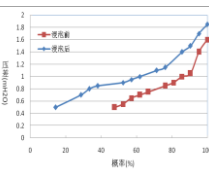
□ 影响性能的结构参数:

- ✓ 直径及均匀性
- ✓ 密度及均匀性
- ✓ 弹性(硬球/软球)及均匀性
- ✓ 微孔的均匀性
- ✓ 通球流阻
- ✓ 运行过程的变化
- ✓ 寿命

□ 新型胶球的优点:

- ✓ 密度可控
- ✓ 尺寸可控
- ✓ 寿命长
- ✓ 自旋转
- ✓ 软球+硬球
- ✓ 流阻小
- ✓ 除垢效果好
- ✓ 收球率高
- ✓ 不易堵塞

理论上100%的收球率!



理论100%收球率



□新型胶球的特点:

- ✓密度可控 <2%
- ✓尺寸可控
- ✓寿命长 10倍
- ✓自旋转
- ✓软球+硬球
- ✓流阻小
- ✓除垢效果好
- ✓收球率高
- ✓不易堵塞

◆新型在线胶球流量计





◆新型免开仓装球室

放气阀 放球阀 装球阀 观察窗口



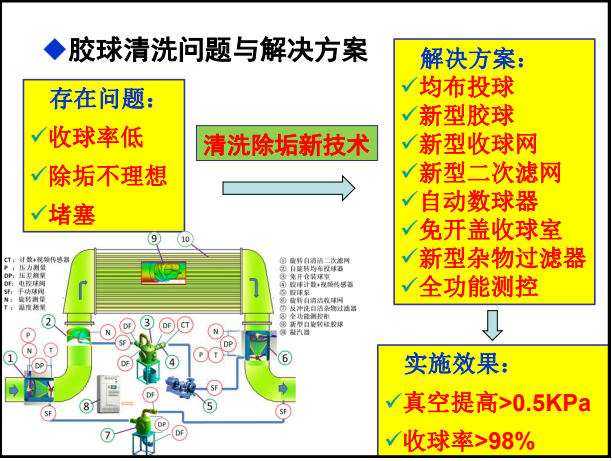
简单、方便、快捷

◆胶球清洗问题与解决方案

存在问题:

- ✓收球率低
- ✓除垢不理想
- ✓堵塞

清洗除垢新技术



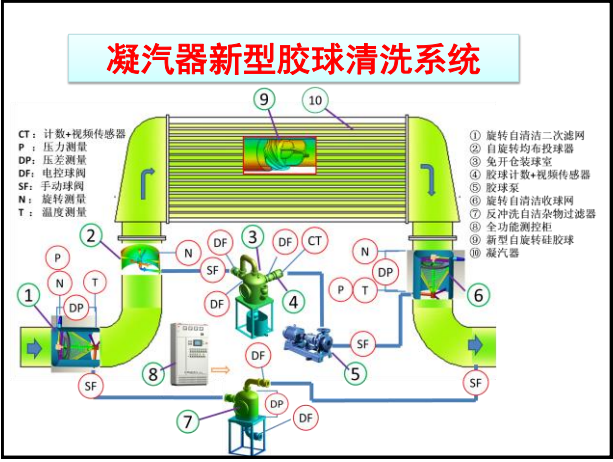
解决方案:

- ✓均布投球
- ✓新型胶球
- ✓新型收球网
- ✓新型二次滤网
- ✓自动数球器
- ✓免开盖收球室
- ✓新型杂物过滤器
- ✓全功能测控

实施效果:

- ✓真空提高>0.5KPa
- ✓收球率>98%

凝汽器新型胶球清洗系统



CT: 计数+视频传感器
P: 压力测量
DP: 压差测量
DF: 电控球阀
SF: 手动球阀
N: 旋转测量
T: 温度测量

① 旋转自清洗二次滤网
② 自旋转均布投球器
③ 免开仓装球室
④ 胶球计数+视频传感器
⑤ 胶球泵
⑥ 旋转自清洗收球网
⑦ 反冲渣自洁杂物过滤器
⑧ 全功能测控柜
⑨ 新型自旋转硅橡胶球
⑩ 凝汽器

◆新型胶球清洗技术效果

- 理论上100%的被清洗
- 理论上100%的收球率
- 投球率可达20%以上
- 胶球寿命提高10倍
- 冬季可运行
- 5分钟收球率达98%
- 真空度提高0.5-1kPa, 节能降耗1.5-3gtce/(kW·h)
- 300MW机组真空度提高0.6kPa, 节能180万元/年

- ◆收球率高
- ◆清洗效果好
- ◆过滤效果好
- ◆水阻小
- ◆故障率低
- ◆劳动强度低

◆新型胶球清洗技术示范工程

大唐国际张家口发电厂
2号机胶球系统及凝汽器循环水出入口蝶阀改造

工程验收单

6号机胶球系统及凝汽器循环水出入口蝶阀改造

工程验收单

2012年11月1日

验收单位：大唐国际张家口发电厂

验收日期：2012年11月1日

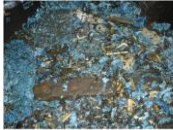
验收人：刘永

验收人：刘永

◆机组A侧原有凝汽器胶球系统收球试验

运行时间：1小时	收球时间：15分钟
投球数量：1000个海绵胶球	投球率：22%
收球数量：286	收球率：28.6%

结论：收球率偏低，无法达到凝汽器管路清洗效果。（执行标准：电力行业标准DLT581—95）



◆投球率试验：

投球数量	投球率	平均循环胶球个数/min	平均循环速率/min	1分钟收球率	3分钟收球率	5分钟收球率
500个	11.3%	692	138%	97%	97%	98%
800个	18.1%	984	123%	98%	98%	98%
1000个	22.6%	1081	108%	93%	98%	98%
1500个	33.9%	1233	82%	81%	95%	96%
1800个	40.7%	1135	63%	59%	91%	95%
2000个	45.3%	952	47.5%	48%	82%	93%
2500个	56.6%	776	31%	27%	75%	90%
2800个	63.4%	647	23%	21%	60%	86%

注：投球时间：30分钟

建议投球率20%

◆收球率试验：

实验时间	循环泵投运	收球网压差	收球时间与收球率			胶球循环个数/min
			1分钟收球率	3分钟收球率	5分钟收球率	
夏季(6~8月)	双泵	<4.5 kPa	>92%	>95%	>98%	950~1050
秋季(9~10月)	单高速泵	<2 kPa	>95%	>97%	>98%	980~1100
冬季(11月~1月)	单低速泵	<1 kPa	>95%	>98%	>99%	1050~1200

注：投球数量：1000，投球时间：5小时45分

◆清洗效果节对比试验：

时间：2013年4月1日~4月12日
发中功率：200MW 循环泵工况、单台低油泵

对比试验结果：

机组平均真空提高0.65kPa，折算节约标煤近1.63g/kwh，节能直接经济效益大约165万元，投资回收期小于2年。

日期	14.41	31.36	33.58	89.4	4.22
4月4日	12.59	29.79	33.46	89.49	3.67
4月5日	15.94	32.51	38.01	88.81	5.35
4月8日	14.17	30.48	34.52	89.63	4.04
4月9日	13.89	28.52	32.33	89.59	3.81
4月10日	15.01	28.07	30.8	90.26	2.73
4月11日	14.21	24.1	28.2	90.16	4.1
4月12日	16.03	29.1	33.3	89.3	4.2
平均值：	14.66	28.05	31.83	89.79	3.78
对比值：	-1.28℃			+0.98kPa	-1.57℃

◆胶球泵

◆装球室

◆杂物过滤罐

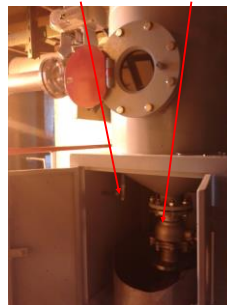




□ 胶球投运情况

➤ 装球、放球：简单、方便、快捷

放气阀 放球阀 装球阀



➤ 胶球运行效果

- 投球率：20%
- 每分钟胶球循环流量：≥ 100%
- 收球率：≥ 95%
- 收球时间：≤ 5分钟
- 冬季可正常运行
- 在线显示循环流量和收球率
- 收球网双泵运行压差3-4kPa < 4.9kPa
- 可3-6个月更换一次胶球



- 二次滤网过滤效果良好
- 二次滤网运行压差 < 4kPa (双泵)
- 二次滤网排污效果良好



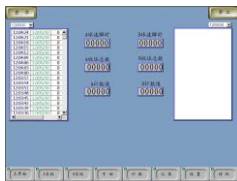
□ 自动控制与安全保护情况

- 全自动集成控制柜
- ✓ 触摸屏操作、PLC集成控制
- ✓ 实现无人值守、自动投球、收球
- ✓ 排污等功能
- ✓ 一般故障自动提示、报警
- ✓ 严重事故自动报警、停机



➤ 胶球流量计

- ✓ ※实时监控胶球循环率
- ✓ 自动在线数球
- ✓ 与改进版硅胶球配合使用，
无需每月数球
人工换球频率可放大至3个月以上



➤ 安全保护:

- ✓ 视窗保护（玻璃耐压1.0Mpa）；
- ✓ 旋钮式视窗玻璃保护盖；



➤ 安全保护：
(胶球泵憋压)

- 胶球泵安装机械压力表和压力开关。
- 当系统憋压时，表压持续升高，超过设定值时，胶球泵自动跳停。
- 电控柜上弹出报警提示。
- 电控柜报警灯闪烁



四、结论

◆ 电厂冷端节能潜力

- 采用凝汽器新技术可节能3-6gtce/(kW·h)

◆ 凝汽器优化布置技术与示范

- 换热传热系数提高10-40%，管束汽阻降低20-50%
- 已完成的5x300MW和2x600MW凝汽器效果良好
- 提高凝汽器真空1-1.5kPa

◆ 新型胶球清洗技术与示范

- 真空提高0.5-1kPa，节能降耗1.5-3gtce/(kW·h)
- 已完成的2x300MW胶球系统改造效果良好



谢谢！

项目支持：

- 1、国家973项目（2013CB228301、2007CB206901）
- 2、国家科技支撑计划项目
- 3、2013国家发改委节能示范工程专项