

中国电力建设企业协会 主编

电力建设科技成果选编

(2014年度)

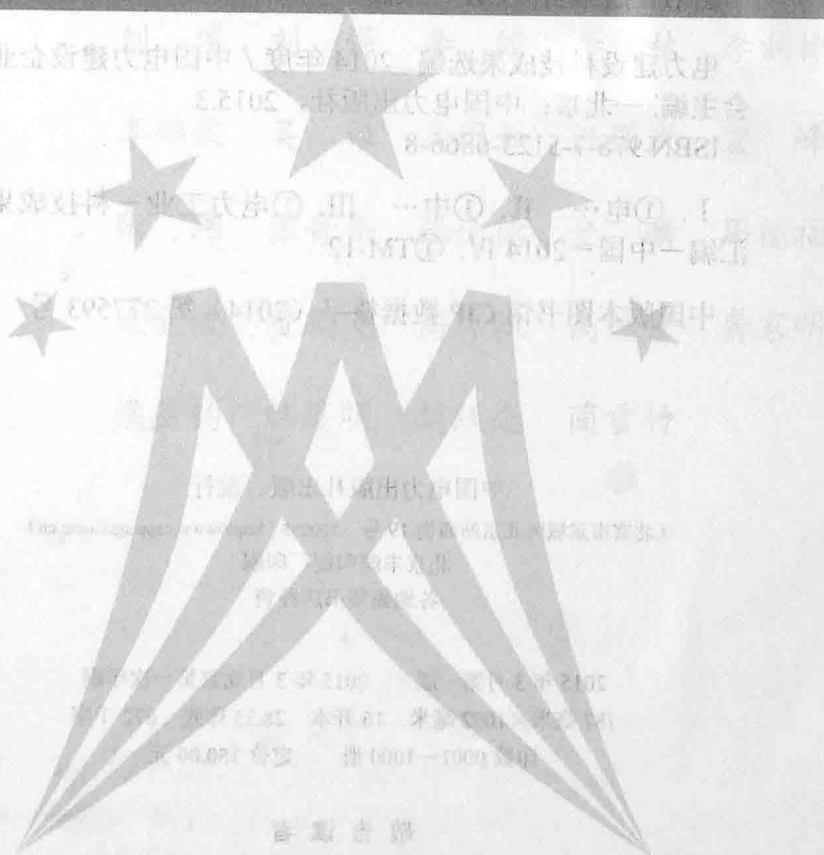


中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

中国电力建设企业协会 主编

电力建设科技成果选编

(2014年度)



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

依据《电力建设科学技术进步奖评选办法(2013年版)》的规定,中国电力建设企业协会组织中国电力建设专家委员会科技评审委员会按年度对电力建设科学技术成果进行评审,并经中国电力建设企业协会审核批准。

2014年度共评选了364项科技成果,分为一、二、三等奖,其中一等奖50项、二等奖93项、三等奖221项。

本书选编了已获奖并具有代表性的37项科技成果,每项科技成果的主要内容包括前言、主要用途和技术原理、关键技术和创新点、与国外同类先进技术的比对、推广应用及前景、经济及社会效益、图表及照片。

本书可供发电、电网公司及建设、设计、监理、施工、调试及科研等单位的相关专业技术人员使用,以适应电力建设新常态,促进电力建设主动创新驱动,推动电力建设企业科技成果的研发与应用。

图书在版编目(CIP)数据

电力建设科技成果选编. 2014年度 / 中国电力建设企业协会主编. —北京: 中国电力出版社, 2015.3

ISBN 978-7-5123-6866-8

I. ①电… II. ①中… III. ①电力工业—科技成果—汇编—中国—2014 IV. ①TM-12

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第277593号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2015年3月第一版 2015年3月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 28.25印张 672千字

印数0001—1000册 定价150.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

本书编委会

主 任 尤 京

副 主 任 陈景山 范幼林

委 员 (按姓氏笔画排序)

王文祥 王兴军 王家强 王淑燕 王景朝

石玉成 卢浙安 田种青 司广全 乔中格

刘 博 刘 强 李 婧 李仲秋 李润林

李鹏庆 吴 松 吴国如 汪国武 宏 峰

张 玮 张青年 张金德 金 麟 周德福

孟金波 贾鹏飞 高伟斌 高德荣 龚家明

梁燕钧 韩英明 楚跃先 蔺雪竹

关于表彰 2014 年度 电力建设科学技术进步奖的通知

中电建协工〔2014〕29 号

各有关单位：

根据国家科技部准予中电建协开展“电力建设科学技术进步奖”的公告（国科奖字〔2013〕17 号）和《电力建设科学技术进步奖评选办法》（2013 版）的规定，中电建协组织中国电力建设专家委员会科技进步奖评审委员会，在安徽省合肥市召开了 2014 年度电力建设科学技术进步奖评审会。

评审委员会对电力建设工程的建设、设计、监理、施工、调试等单位申报的科技成果进行了资料预审、会议评审及网上公示。

中电建协决定对山东电力建设第三工程公司完成的“燃油添加剂在抑制锅炉内部腐蚀中的研究与应用”等 364 项成果（其中一等奖 50 项、二等奖 93 项、三等奖 221 项）授予 2014 年度电力建设科学技术进步奖，并颁发证书（获奖名单详见附件 1）。

希望广大电力建设企业继续在工程建设中，积极推广应用，新技术、新工艺、新流程、新装备、新材料，为电力建设的科技创新、技术进步做出更大贡献。

关于编制《电力建设科技进步奖选编》（2014 年度）的有关要求见附件 2；关于领取证书的说明见附件 3。

附件请登录中电建协 www.cepca.org.cn 点击“通知公告”栏下载。

中国电力建设企业协会

2014 年 4 月 21 日

前言

中国电力建设企业协会（简称中电建协）依据国家科学技术部准予中电建协开展“电力建设科学技术进步奖”的公告（国科奖字〔2013〕17号）和《电力建设科学技术进步奖评选办法（2013年版）》，组织中国电力建设专家委员会科技评审委员会进行了电力建设科技成果的评审工作，评选出364项电力建设科学技术进步奖，并以中电建协工〔2014〕29号文公布。

为了便于广大电力建设企业学习和推广应用电力建设科技成果，促进电力建设主动创新驱动，推动电力建设企业科技成果的研发与应用。中国电力建设企业协会本着“有代表性、优中选优”的原则，从获得“2014年度电力建设科学技术进步奖”中选出具有代表性的37项，将其汇编成《电力建设科技成果选编（2014年度）》。

本书遴选了火电、水电、输变电、风光储等电力建设工程各专业具有推广价值的37项科技成果。每项成果内容包括前言、主要用途和技术原理、关键技术和创新点、与国外同类先进技术的比对、推广应用及前景、经济及社会效益、图表及照片7项内容。其关键技术有较强的专业性，应用范围广，内容翔实，图文并茂，文字表达准确，对电力建设企业工程管理和工程技术人员具有较强的指导意义，可供电力建设工程管理人员和技术人员学习参考。

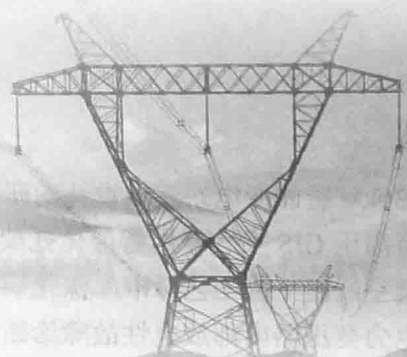
本书的科技成果来自于全国电力建设企业，他们为电力建设科技成果的研发和应用做出了突出贡献，在此表示感谢！

中国电力建设企业协会

2014年11月

电力建设科技成果选编

(2014年度)



目 录

前言

燃油添加剂在抑制锅炉内部腐蚀中的应用	1
封闭式储煤设施的选型研究	6
冷却塔斜支柱及下环梁一体化施工技术研究与应	19
青藏高原输电工程冻土基础优化设计、施工关键技术研究及应	31
抗雾霾型燃机进气过滤系统研发	41
生物膜与浸没式超滤膜组合工艺在间接空冷机组的研究及应	53
上汽 600MW 超超临界汽轮机安装技术研究与应	66
百万核电机组主蒸汽系统平衡负荷法安装的研究与应	74
大型电站锅炉余热回收利用联合设计的研究	78
锅炉主要辅机单列配置研究与应	106
PCT 冷却塔结构计算软件研发及在高位收水冷却塔上的应用研究	132
火电厂烟气脱硝工艺及催化剂国产化研究与应	137
环保型散料装船(车)技术的开发及应	158
WB36CN1 埋弧焊工艺研发及在核电配管中应	161
火电厂三维数字化系统的研究与应	169
脱硝系统利用热一次风节能降耗技术开发与研	176
“智慧电厂”全工况运行智能生产管理系统的研发与应	180
热电厂循环水低值热能回用技术研发及其合同能源管理的研发	229
超(超)临界电站锅炉安全运行和节能降耗技术研究及应	235
锦屏一级水电站工程混凝土骨料大型管状带式输送机系统的开发与应	263
龙开口水电站右岸变形体边坡处理研究与应	276
高寒地区不对称峡谷深覆盖层上混凝土面板堆石坝施工技术的研究与应	279
大型地下洞室混凝土施工关键技术的研发	288
大流量、深厚覆盖层河流上土石过水围堰研究与应	312
高海拔大温差地区混凝土坝智能监控关键技术研究及应	318
750kV 可控高抗工程研究与应	327

330kV 智能变电站三维设计的研发与应用·····	337
特高压 GIS 安装专用智能化托架研制及应用·····	343
架空线路工程工艺标准库深化研究与应用·····	350
电力变压器内部放电性故障诊断关键技术研究与应用·····	360
大型变压器现场干燥和局部放电试验技术研究与应用·····	364
青藏直流输电谐波传播与影响机理的研究·····	368
沿海大规模风电并网检测与安全运行关键技术研发及应用·····	383
电力互感器现场检定试验技术与装置的研究·····	419
220~750kV 变电站设备噪声控制关键技术研究与应用·····	424
垃圾焚烧全自动控制系统的研究与应用·····	429
超(超)临界锅炉高温管屏在线监测(PSSS)技术的研究及应用·····	434

燃油添加剂在抑制锅炉内部腐蚀中的研究与应用

山东电力建设第三工程公司

张文博 邢学东 刘 鹏 杨 亮 王洪石 门 俊

1 前言

燃油机组电站是中东区域的电站发展主要方向。在我国燃油机组没有大规模使用，但随着中国电力建设行业走出国门的总体形势下，燃油机组的相关知识和应用逐渐被了解和采纳。视情况采用新方案、引用新技术是企业不断进取的源泉，以沙特拉比格 2×660MW 燃油机组 EPC 总承包为载体，山东电力建设第三工程公司根据重油的特点，引入了燃油添加剂系统。

2 成果的主要用途和技术原理

沙特拉比格项目燃油采用 380cSt 的重油，380cSt 重油中含有的元素分析见表 1。

表 1 380cSt 重油中含有的元素

序号	参数	单位	含量
1	碳 (C)	% (质量分数)	85~87
2	氢 (H)	% (质量分数)	10~12
3	氮 (N)	% (质量分数)	0.1~0.4
4	硫 (S)	% (质量分数)	0.06%~0.8%
5	氧 (O)	10^{-6}	0.5~3
6	钒 (V)	10^{-6}	≤200
7	镍 (Ni)	10^{-6}	≤40
8	钠 (Na)	10^{-6}	≤25
9	钾 (K)	10^{-6}	≤5
10	铝 (Al)	10^{-6}	≤25
11	钙 (Ca)	10^{-6}	≤10
12	铅 (Pb)	10^{-6}	≤1.0
13	铁 (Fe)	10^{-6}	≤20

重油作为原油提炼汽油、柴油后剩余的重质油，燃烧的主要问题是燃料中高硫S、高钒 V、高钠 Na。这些元素与过量空气中的氧产生化学反应产生有害的成分和沉淀，是引起锅炉内部腐蚀的主要原因。

根据重油以及添加剂的成分特点，燃料添加剂可以与钒的氧化物及铁的氧化物反应，以减少锅炉的腐蚀。添加剂的有效成分是镁的氧化物、镁的氢氧化物和一些镁盐。燃料添加剂

可以以水合物或油合物的形式存在，可以有机的也可以是无机的。通过加入以镁为主要成分的添加剂（特性参数见表 2），使镁与燃料中的腐蚀成分相反应，通过提高灰的熔点等方式，实现抑制燃油锅炉内部腐蚀的效果。

表 2

EM330 添加剂特性参数

主要成分	镁的化合物 32%	主要成分	镁的化合物 32%
外观	红褐色液体	闪点	$\geq 55^{\circ}\text{C}$
比重	1.23 (15/4 $^{\circ}\text{C}$)	毒性	无
黏度	≤ 250 cSt (40 $^{\circ}\text{C}$)	腐蚀性	无



图 1 燃油添加剂操作台图片

燃油添加剂系统的主要设备构成：存储罐、罐体液位计、卸载泵及相关阀门管道、加注泵及相关阀门管道、流量计、就地盘柜等。如图 1 所示。

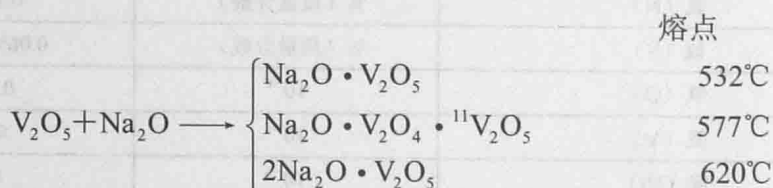
3 关键技术和创新点

3.1 成果的理论依据

3.1.1 燃油添加剂在抑制高温腐蚀中的作用

因重油中含有较多的钒、钾和钠，其燃烧时，会生成 V_2O_5 ，钠、钾生成 Na_2O 和 K_2O 。

V_2O_5 是一种强氧化剂，其熔点为 675°C 。在 675°C 以上， V_2O_5 为液态，其易黏附在设备相关部位，导致设备腐蚀。 Na_2O 和 K_2O 可与 V_2O_5 形成钠、钾的络合物，使 V_2O_5 的熔点降得更低，对设备的腐蚀作用更明显。如：



燃油添加剂中 Mg 的化合物，会与 V_2O_5 等反应生成没有强氧化作用、高熔点（ 1110°C ）的化合物，抑制了高温腐蚀的发生。这种方法不仅可以阻止高温腐蚀，同时增加了设备相关部件表面的少量沉积物。但少量的高熔点沉积物可以起到防腐蚀的作用。值得说明的是，沉积层不能太厚，并且要松软易清除，否则影响热效率（若使用传统镁基添加剂，虽可阻止高温腐蚀，但会产生大量的沉积物，影响设备的正常使用）。

3.1.2 燃油添加剂在抑制低温腐蚀中的作用

低温腐蚀的主要过程可概括为： $\text{S} \rightarrow \text{SO}_2 \rightarrow \text{SO}_3 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$ （腐蚀性强酸），在燃烧时，S 转变成 SO_2 。1%~5% 的 SO_2 再进一步转化为 SO_3 。它和水反应生成硫酸，具有强腐蚀性。而在 $\text{SO}_2 \rightarrow \text{SO}_3$ 的过程中， V_2O_5 作为强氧化性物质发挥着重要的作用，同高温腐蚀中的描述， V_2O_5 在燃油添加剂的生成产物作用下已经转变为无强氧化性的物质，所以燃油添加剂通过 $\text{SO}_2 \rightarrow \text{SO}_3$ 的环节从氧化剂着手的出发点上起到了抑制低温腐蚀的作用。而 MgO 和低于酸露

点区域的 SO_3 发生反应



生成没有腐蚀性的 MgSO_4 。

3.2 成果的实际应用

结合上述对理论的理解，燃油添加剂的添加比量计算式如下：

燃油添加剂添加量为

$$V(\times 10^{-6}) \times \frac{V_2\text{O}_5}{V_2} \times \frac{\text{MgO}}{V_2\text{O}_5} = V(\times 10^{-6}) \times \frac{181.9}{101.9} \times \frac{40}{181.9} \times \frac{100}{32} \times \frac{0.98}{1.3} \\ = 0.925V(\times 10^{-6})$$

燃油添加剂添加量理论计算值： $148 \times 10^3 \times 0.925V(10^{-6})$

其中：重油耗油量（单台炉）为 148t/h ；重油密度为 $0.98 \times 10^3\text{kg/m}^3$ ；燃油添加剂密度为 $1.3 \times 10^3\text{kg/m}^3$ ；燃油添加剂中氧化镁质量比例为 32%。

由于每船重油中 V 的含量是不一致的，在对重油的取样分析中，测得每船重油含 V 量见表 3。

表 3 每 船 重 油 含 V 量

油	第二船油					第三船油	第四船油	第五船油	第六船油	第八船油
实验取样	1	2	3	4	5 号油罐油样					
V 钒含量 (mg/kg)	42	44	44	41	44	52	53	51	100	84

从表 3 中可看出，到港重油最高含 V 量为 100mg/kg ，考虑到炉膛实际反应一定不完全，是按照理论计算一样一对一反应的，一定存在损耗，所以初步以 1.5 为经验倍数，以此得出的添加量数值为 20.535L/h 。通过一段时间的运行，燃油添加剂的使用效果并没有预期的好，所以在此基础上，继续进行了为期 3 个月的试验，为了评价添加剂的使用效果，用以下参数进行评价。

(1) 锅炉受热面的沾污情况，可用以下指标进行描述。

1) 过热器和再热器温度；

2) 过热器和再热器减温水量；

3) 空预器的空气侧和烟气侧的差压值；

4) 省煤器出口烟气的温度；

5) 吹灰频率。

(2) 灰样的 pH 值。

(3) 腐蚀速率。

机组使用添加剂一段时间后，在检修可以发现受热面比以前更干净，锅炉受热面管排上形成的沉淀更松散和易清除，如图 2 所示。

通过对比机组运行参数可发现：

(1) 过热蒸汽温度和减温水有减少趋势；

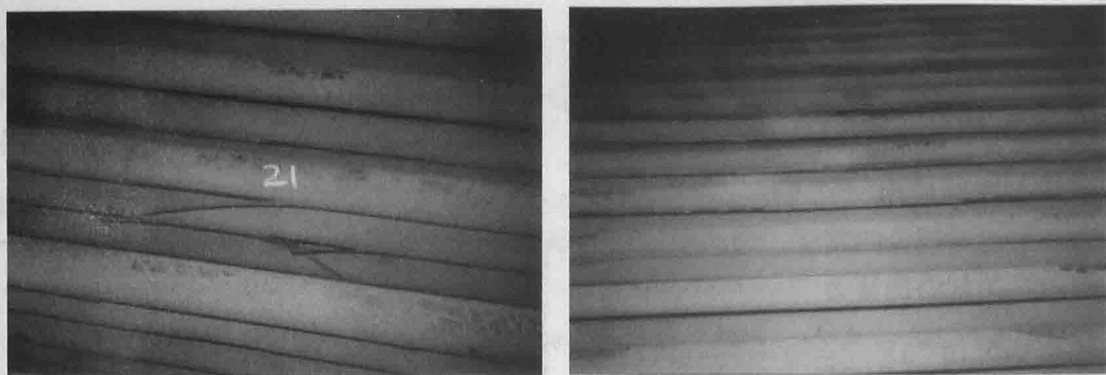


图2 使用添加剂后的管排积灰

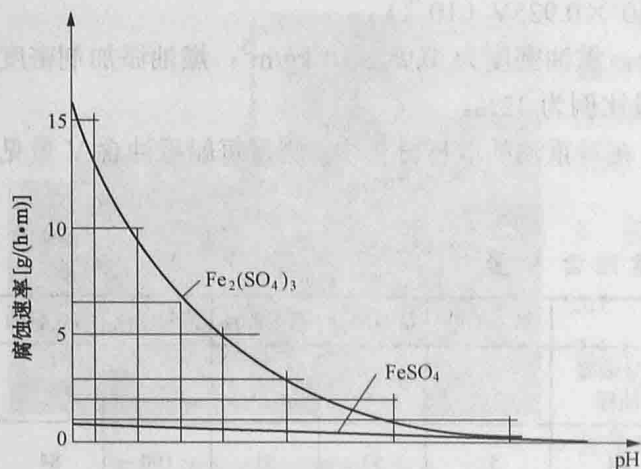


图3 腐蚀速率与 pH 值关系曲线图

(2) 由于再热器进行喷水, 再热器温度有增加趋势;

(3) 空气预热器出口烟温有升高趋势。

为此采用失重挂片的测试法, 得到腐蚀速率与空气预热器出口灰样 pH 值关系曲线 (见图 3)。

通过测试得出, 当灰样 pH 值稳定在 3.5 时, 腐蚀速率可大幅降低, 此时燃油添加剂的添加量加至 27L/h 左右时, 腐蚀速率基本稳定。通过此过程可得出实际添加量与理论计算量之间的经验系数为 2, 修改了之前的初步算值 1.5。而依此试验结果得

出的 pH 值指标调整到另一台锅炉的添加量后时, 添加剂使用效果完好, 验证了上述工作的正确性。

4 技术指标比对分析情况

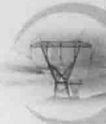
(1) 燃油添加剂投入使用后, 有效避免了高低温腐蚀情况的发生; 而不投入燃油添加剂, 在燃用有害成分较多燃料油的前提下, 锅炉设备极易受损, 影响机组正常运行。

(2) 燃油添加剂投入使用后, 减轻了受热面积灰情况, 提高了换热效率。

(3) 提炼出了燃油添加剂添加量计算理论以及修正添加量的重要指标参数, 对后续相关项目有重要参考价值。

5 推广应用情况及前景

通过两台锅炉调试运行的实践应用, 证明燃油添加剂系统对整套燃油机组炉内腐蚀控制和积灰控制方面效果明显, 从而延长了机组的寿命周期, 降低了因为腐蚀引发的机组修理频率, 从积灰控制角度提高了机组的效率, 所以整体作用明显、效果显著, 具有推广使用的价值和前景。



6 经济及社会效益情况

燃油添加剂采购价格为 15 沙特里亚尔/L，折人民币接近 25 元/L，每桶燃油添加剂 208L 价值高达 5200 元。厂家原建议添加量为 62.9L/h，通过精细的计算和合理的现场修正，实际添加量降低到 27.0L/h，单台炉每小时节省 35.9L，两台机组每天节省 43 080 元。

从避免高低温腐蚀作用方面，保护了机组设备，节省了维护成本；从减轻受热面积灰作用方面，提高了机组的热效率，为机组持续稳定运行提供了保证，对于 2×660MW 机组经济价值巨大。

社会效益方面有效解决重油燃烧中对机组产生的各项比例影响，可以更好地利用重油，有效地利用资源。

7 必要的照片（见图 4）



图 4 燃油添加剂进重油管道的接点

封闭式储煤设施的选型研究

大唐清苑热电有限公司

高向前 楚树林 陈 朝 郑路华 沈 涛 田 铂 赵树强 汪瑞庆

1 前言

近年来,随着建筑工程技术的发展,以及人类对环保问题关注程度的提高,储煤形式在不断发展,从最初开放式的露天煤场到半开放式的干燥棚,再到全封闭式储煤设施。目前应用较为广泛的全封闭式储煤设施有圆形煤场、筒仓。

大唐清苑热电有限公司坐落于保定市以南 2.6km 处的清苑县界内,南距保沧高速 800m,东距保清路 300m,紧临保定市区。规划装机容量为 $4\times 300\text{MW}$ 国产燃煤抽凝式供热机组,分二期建设,一期建设 $2\times 300\text{MW}$ 供热机组,承担长城汽车股份公司和保定市南部及清苑县集中供暖任务。作为城市周边电厂,根据环保部环境影响评价报告书及环评批复意见,要求储煤设施采用全封闭式,考虑本项目的地理位置、周边环境、环保性能、人文关怀等多方面因素,将三种不同的封闭式储煤设施进行对比。经分析研究,实施建成了一种新型球形储煤设施。该储煤仓造型美观、环保性能优越、技术经济性指标先进、自动化程度高、运行费用低。它的建成与运行,为大唐清苑热电有限公司打造安全高效、节能环保型火电企业起到了不可轻视的作用,也可为其他火电企业储煤设施的选型提供借鉴。

2 封闭式储煤仓方案比较分析

经分析,清苑热电项目的储煤设施应满足以下要求:

(1) 位于城市周边,对环保、城市景观要求严格,储煤场不允许采用露天布置,应采用封闭式储煤方式;

(2) 为满足锅炉的正常燃烧,要求输煤系统有混配煤的功能。

筛选出三种满足以上要求的储煤方案,分别是球形储煤仓方案、筒仓方案、圆形煤场方案;从技术、经济、施工和运行等各不同角度对各方案进行详细分析,从而选出技术合理、有利环保、投资适宜的储煤方案。

2.1 封闭式储煤方案技术比较

表 1 封闭式储煤方案技术比较表

项目	方案一:球形储煤仓方案	方案二:筒仓方案	方案三:圆形煤场方案
储煤设施	一期建设 2 座直径 65m、高 40.5m 的球形储煤仓	一期建设 2 座直径 36m 筒仓,二期建设 1 座直径 36m 筒仓	一期建设一座直径 90m 的圆形煤场,挡墙侧堆高 14m

续表

项目	方案一：球形储煤仓方案	方案二：筒仓方案	方案三：圆形煤场方案
储煤量	一期总储煤量为 12 万 t, 可供一期机组燃用 19.4d	一期总储煤量为 6 万 t, 可供一期机组燃用 9.7d, 规划总储煤量 9 万 t	一期总储煤量为 9 万 t, 可供一期机组燃用 14.5d
外观造型	半球型结构, 外形美观	筒式结构, 外形普通	半球形顶棚, 外形美观
占地面积及容积利用率	一期整个厂区占地 18.82hm ² (储煤设施一次建成), 容积利用率高	一期整个厂区占地 18.80hm ² (其中包括了下期的筒仓), 占地面积最小, 容积利用率	一期整个厂区占地 21.34 hm ² (不包括下期的圆形煤场) 占地面积最大, 容积利用率差
土石方量	较大	一般	因需要填厂区东侧大坑, 土方量巨大
混煤配煤效果	可实现精确配煤、混煤	可实现精确配煤、混煤	混煤效果相对较差
系统自动化程度	球形储煤仓上部采用单路带式输送机单点进煤, 底部 5 台叶轮给煤机互为备用, 按照编排好的取煤程序或根据煤位信号, 从 5 条缝式煤沟中顺序取煤, 日常运行无需人员进入仓内, 自动化程度高	燃煤经环形布料机装入仓内, 通过活化给煤机送入带式输送机系统, 均可实现远程控制, 日常运行无需人员进入仓内, 自动化程度较高	需要运行人员进入圆形煤场, 采用半自动和手动操作, 自动化程度相对较低
环保和辅助作业	球形储煤仓内的煤可全部由叶轮给煤机送入带式输送机, 对环境无污染, 无辅助工作量	筒仓内的煤可全部由活化给煤机送入带式输送机, 对环境无污染, 无辅助工作量	煤场辅助作业量大, 工人劳动强度大, 煤尘飞扬大, 进入操作需要带防护设备
运行条件及功能	球形储煤仓在系统中起缓冲作用, 将卸煤部分和上煤部分分开, 互不影响。底部 5 台叶轮给煤机互为备用, 可精确配煤、混煤	筒仓在系统中起缓冲作用, 将卸煤部分和上煤部分分开, 互不影响。底部 2 台活化给煤机互为备用, 可精确配煤、混煤	设一座事故煤斗, 当圆形堆取料机故障检修时, 可通过推煤机将煤推向煤斗, 由煤斗下活化给煤机向带式输送机系统供煤。具有粗略混煤的功能
检修条件	取煤系统设备多、且布置在地下, 检修环境比较差	取煤系统设备少、布置在地上, 设备检修环境较好	圆形煤场内部空间大, 检修环境比较好
对恶劣工况适应能力	不受天气条件影响, 系统运行安全可靠	不受天气条件影响, 系统运行安全可靠	基本不受天气条件影响, 但抵御暴风雨能力较差, 系统运行较为安全可靠
防自燃能力	球形储煤仓内部空间较大, 与外部大气不连通, 燃煤遵循先进先出的原则, 存放时间相对较短, 并设置完善的监测和置换惰化保护装置, 防氧化、防自燃能力较强, 煤质变化小, 热值损失较小	单个筒仓内部空间较小, 与外部大气不连通, 燃煤遵循先进先出的原则, 存放时间短, 并设置完善的监测和置换惰化保护装置, 防氧化、防自燃能力强, 煤质变化小, 热值损失小	煤场内部空间大, 直接与大气相通, 堆取煤很难做到先进先出, 长期储存燃煤发生自燃的概率较高, 产生一定的热值损失。为防止煤的自然, 进出煤场的燃煤调度要求执行先进先出原则, 管理要求很高

通过表 1 对三种封闭式储煤设施技术角度分析对比, 可得到以下结论:

(1) 外观造型上, 球形储煤仓方案和圆形煤场方案均为半球形顶棚, 筒仓方案则为筒式结构。对于城市周边电厂, 城市景观对电厂的建筑物要求尽量去工业化, 美观协调, 前两种方案外观色彩靓丽, 更能体现人文关怀。球形储煤仓方案较圆形煤场方案而言, 结构更坚固, 具有其他建筑形式无法比拟的抗强地震性能及抗冰雪灾害的能力, 因此球形储煤仓方案优于其他两种方案。



(2) 占地面积及容积利用率上, 由于球形储煤仓和筒仓的容积利用率远高于圆形煤场, 造成的直接后果是圆形煤场方案的占地面积远高于方案一和方案二。同时, 由于受本工程场地的限制, 若采用圆形煤场方案, 则需将煤场放置于厂区中间, 化学水的位置需往西挪, 厂前区将被挤掉; 若放在厂区东侧大坑的位置, 栈桥长度很长, 造价很高, 且需填厂区东侧大坑, 并且需征用清苑货场一角的土地, 土方量巨大, 造价高, 经济性差, 因此圆形煤场方案基本不予考虑。

球形储煤仓方案和筒仓方案的最终储煤量、整个厂区占地面积基本一致, 但前者储煤设施可一次建成, 筒仓方案则需分两期。因此, 从造成的间接后果分析, 球形储煤仓方案可减少施工工期, 降低人力成本, 是三种封闭式储煤方案中的较优方案。

(3) 就运行管理角度而言, 圆形煤场方案混配煤效果较差, 自动化程度较低, 辅助作业量大, 工人劳动强度大, 运行环境较差、热值损失较大, 为避免自燃的燃煤调度管理要求较高, 在三种封闭式储煤方案中基本没有优势。

筒仓方案的主要技术优点是存煤先进先出, 无存煤死角, 可实现精确混配煤, 自动化程度高等; 缺点是大型筒仓在结构安全性上存在隐患, 出料口面积小, 只占筒仓截面的 1%~2% 左右, 容易发生结拱、堵煤情况。

球形储煤仓方案在运行管理方面的优势与筒仓方案基本一致, 区别在于底部出料面积大, 约占球仓底面积的 12%~13%, 不易形成棚煤现象, 且取料设备成熟可靠, 备用度高。在用煤高峰时, 还可实现汽运煤与球形储煤仓存煤的配煤掺烧, 系统灵活、简单、可靠, 日常运行无需人员进入仓内, 自动化程度高。同时, 球形储仓的高度低于普通筒仓, 降低了提升高度, 有利于节省后期运行费用。

因此, 通过对封闭式储煤方案运行管理的对比分析, 三种方案的优劣程度依次为: 球形储煤仓方案>筒仓方案>圆形煤场方案。

2.2 封闭式储煤方案经济比较

通过对三种封闭式储煤设施投资角度分析对比, 可得到以下结论:

(1) 三种方案的合计建筑安装费用由高到低依次是: 球形储煤仓方案>圆形煤场方案>筒仓方案。

(2) 三种方案的输煤廊道、栈桥部分长度依次为: 球形储煤仓方案 538m、筒仓方案 669m, 圆形煤场方案 994m, 相应的建筑费用依次递增。球形储仓输煤廊道栈桥长度最短, 建筑费用最低, 同时由于球形储煤仓的高度低于普通筒仓, 有利于整个运煤系统的布置, 降低了提升高度, 一方面节省栈桥长度, 另一方面便于后期维护, 降低运行费用。因此从输煤廊道角度考虑, 三种方案的优劣程度依次为: 球形储煤仓方案>筒仓方案>圆形煤场方案。

(3) 球形储煤仓方案的环基及球壳设计施工费用约占整个方案投资的 28%。根据《封闭式薄壳混凝土球形储煤仓的应用与研究科技查新报告》, 球膜材质采用含 PVC 的聚氨酯织物在国内公开发表的中文文献中未见报道, 属创新点之一, 该新型球膜的应用属国内首例, 其内在的科技开发成本要远高于其他成本, 抛开科技开发成本, 该方案与筒仓方案投资基本持平。另外, 新技术引进造成的科技成本在日后其他工程中通过积累经验、优化设计, 降低的程度将十分可观, 这更符合中国大唐集团公司优化创新思路的理念。



2.3 封闭式储煤方案施工过程比较（见表 2）

表 2

封闭式储煤方案施工过程比较

项目	方案一：球形储煤仓方案	方案二：筒仓方案	方案三：圆形煤场方案
施工工期	工期较短， 内部施工不受天气影响	工期较长， 施工受天气影响	工期较长， 施工受天气影响
环境保护	球膜充气完成后，施工过程在壳体内部进行，内部施工不影响外界环境，不存在扬尘污染、噪声污染等	存在扬尘现象、噪声污染等	存在扬尘现象、噪声污染等
材料资源利用	外膜做为仓体外壁，永久保留不拆除；施工过程中的支撑系统恒压的空气，无周转材料	支撑系统为传统的脚手架等，存在大量周转材料	支撑系统为传统的脚手架等，存在大量周转材料
机械设备利用程度	改装起重量为 80t 的吊车，将起升高度增至 40m，可 360°全方位旋转，并在吊车上搭建 4m ² 的能全方位施工的作业平台，最大限度地投入机械设备，劳动效率高、作业安全系数高	传统的脚手架法，机械投入率低	传统的脚手架法，机械投入率低

从表 2 可知，球形储煤仓技术的特殊性决定了其施工工艺的特殊性，具体表现在：施工工期短、施工中对周边环境无污染、节约材料、机械设备利用程度高等，更符合我国所提倡的文明施工、绿色施工的目标要求。因此，球形储煤仓方案在施工过程中对节能减排的落实程度远优于筒仓方案和圆形煤场方案。

2.4 小结

通过对三种封闭式储煤方案技术、经济、施工过程比较，可以得到以下结论：

（1）从技术上看，球形储煤仓方案造型美观；容积利用率高，造成的直接或间接经济效益明显；运行时存煤先进先出，无存煤死角，可实现精确混配煤，系统灵活、简单、可靠，自动化程度高。三种方案就技术角度而言优劣程度依次为：球形储煤仓方案>筒仓方案>圆形煤场方案。

（2）从经济上看，三种方案建筑安装费用由高到低依次为：球形储煤仓方案>圆形煤场方案>筒仓方案。但球形储煤仓方案内在的科技开发成本所占比重较大，抛开这部分成本，该方案与筒仓方案投资基本持平。另外，球形储煤仓方案的输煤廊道栈桥长度最小，有利于降低后期运行维护费用。因此，从应用新技术改善人文自然景观角度而言，可优先考虑球形储煤仓方案。

（3）从施工过程看，球形储煤仓方案施工工期短、施工中对周边环境无污染、节约材料、机械设备利用程度高，优于另两种方案。

综上所述，可知球形储煤仓方案较其他方案具有无法替代的优势，因此决定采用球形储煤仓方案。

3 成果的主要用途和技术原理

3.1 主要用途

大唐清苑热电有限公司的两座球形薄壳混凝土储煤仓，直径 65m、地上主体部分高 40.5m（不包括顶部转运站高度），每座储煤量 6 万 t，两座球形储煤仓总储煤量 12 万 t，可供 2×300MW 燃煤供热机组燃用 19.4d，电厂达规划容量时可供 4×300MW 机组燃用 9.7d。