

# 过热蒸汽干燥技术对提高传统褐煤电厂运行效率的研究

李胜<sup>1</sup>, 蒋斌<sup>1</sup>, 史勇春<sup>1</sup>, 李捷<sup>1</sup>, 董文学<sup>2</sup>, 徐坚<sup>2</sup>, 张弘<sup>2</sup>, 杨军<sup>3</sup>,  
陈福祥<sup>3</sup>

1、山东省科学院工业节能研究中心, 山东济南 250103;

2、中电投上海电力股份有限公司, 上海 200010;

3、华能九台电厂, 吉林长春 130501

## Super-heated Steam Drying: an Innovation of Clean Coal Technology for Lignite-fired Power Plant

Li-sheng<sup>1</sup>, Jiang-bin<sup>1</sup>, Shi-yongchun<sup>1</sup>, Li-jie<sup>1</sup>, Dong-wenxue<sup>2</sup>, Xu-jian<sup>2</sup>, Zhang-hong<sup>2</sup>, Yang-jun<sup>3</sup>,  
Chen-fuxiang<sup>3</sup>

1, Industrial Energy Conservation Research Center of Shandong Academy of Sciences, Jinan, Shandong 250103;

2, Shanghai Electric Power Co., Ltd of China Power Investment Corporation, Shanghai 200010;

3, Jiutai Power Plant of China Huaneng Group, Changchun, Jilin, 130501

**ABSTRACT:** A comprehensive overview of the status of lignite pre-drying technology is given in this study. The practical problems of high energy consumption, high investment and poor safety exist in the lignite drying using the traditional thermal drying, for the reason that the super-heated steam drying technology for lignite is put forward. The mechanism experiment research and pilot-scale test research of the super-heated steam drying technology for lignite were carried out, and the results show that the drying efficiency of the super-heated steam is better than the hot air at given conditions, the lignite drying can be accomplished stably and continuously and the drying product can meet the requirement of the industrial application of the lignite fired power plant. A more innovative approach as a new lignite Super-heated steam low-rank Coal Upgrading (SCU) is proposed by Energy Conservation Research Center of Shandong Academy of Sciences. The technical advancement in terms of energy-saving and safety among the applied technologies are compared and analyzed, and the results show this technology has the advantages of low energy consumption, high safety and energy saving. To sum up, the exploitation of the super-heated steam drying technology for lignite fired power plant can promote the

development of the energy and power industry, and the technology has wide application prospect.

**KEY WORDS:** lignite; super-heated steam drying; clean coal technology; safety; energy-saving

**摘要:** 本文总结了国内外褐煤预干燥技术的发展现状, 针对传统热力干燥在褐煤电厂应用中存在的高能耗、高投资 and 较低安全性的实际问题, 提出过热蒸汽干燥技术能用于褐煤的干燥。开展了褐煤过热蒸汽干燥的机理实验研究和中试试验研究, 结果表明: 过热蒸汽的干燥效果优于常规热空气的干燥效果; 中试试验系统能稳定、连续地对褐煤进行干燥, 且干燥产品符合褐煤干燥实际电厂工业应用的要求。提出了一种由山东省科学院开发的过热蒸汽预干燥低质煤提质 (SCU) 洁净煤技术, 对其在节能、安全等方面的技术先进性作了具体的对比分析, 结果表明该技术能耗低、安全且节能效果好。开发褐煤过热蒸汽干燥成套工艺, 能促进能源和电力行业的发展, 具有广阔的应用前景。

**关键词:** 褐煤; 过热蒸汽干燥; 洁净煤技术; 安全; 节能

## 1 前言

褐煤是一种高挥发分、高水分、高灰分、低热值 (14MJ/kg左右)、低灰熔点、污染重且利用率相对

较低的低质煤资源<sup>[1, 2]</sup>。目前,我国烟煤、无烟煤等优质煤资源已被充分利用,拓展空间十分有限,而对褐煤的大规模开发利用才刚刚开始。我国褐煤资源相对比较丰富,已探明的储量就达1303亿吨,占全国煤炭储量的13%,其中内蒙古的褐煤储量最大,占全国褐煤总储量的77%<sup>[3]</sup>。我国的褐煤普遍存在湿度大(30~50%)造成的燃点低和二氧化碳排放量大的缺点,直接燃烧未提质的褐煤原煤,会产生严重的环境污染问题(二氧化碳排放量比普通烟煤高15%左右),而且增加电厂装置建设和运行的成本;同时,较高的含水量导致褐煤运输费用增加,限制了褐煤资源外运至沿海城市电厂利用的空间。因此,对褐煤进行干燥提质,能够提高褐煤的能量利用率和降低其对环境的污染,具有重要的意义。

国内目前褐煤预干燥的工艺大都采用褐煤与燃煤烟气直接接触的转筒式干燥机、气流干燥机和链板式干燥机等<sup>[4-6]</sup>,但普遍存在单机处理量小、占地面积大、投资高等不足,且高温烟气与煤粉直接接触存在一定的安全隐患,不适合褐煤电厂的工艺要求和技术改造。

国外对褐煤预干燥技术进行了大量的研究<sup>[7, 8]</sup>。美国 Encoal, Coaltek, K-fuel, 澳大利亚 Coldry, 日本神户钢铁, 分别利用电厂冷凝水余热、微波、高压蒸汽蒸煮、溶剂油萃取等方式对褐煤进行干燥提质,但存在装置投资巨大、运行费用高等缺点。目前国外在褐煤电厂预干燥领域,最成熟工艺是过热蒸汽流化床技术<sup>[9-12]</sup>。过热蒸汽干燥(super-heated steam drying)是指利用过热蒸汽直接与物料接触而去除水分的一种干燥方式。过热蒸汽干燥具有节能效果突出、干燥品质好、无失火和爆炸危险、传热传质效率高等特点,能够将其用于褐煤的干燥。澳大利亚褐煤研究中心对过热蒸汽褐煤干燥工艺进行了机理研究<sup>[13, 14]</sup>。德国 RWE 公司采用先进的过热蒸汽褐煤干燥工艺,已经在德国建成3套装置,最大脱水能力达到110T/h。

由于过热蒸汽干燥技术具有上述多种优点,将其用于国内低质褐煤的干燥,能够改善褐煤的品质,提高传统褐煤电厂运行的效率。2008年我国褐煤发电总装机量为13GW(仅统计300MW以上机组),2010年将扩容15GW,达到28GW,褐煤发电装机量迅猛发展。以28GW的装机量计,应用过热蒸汽褐煤预干燥洁净煤工艺后,发电煤耗降低10~12g/(kW·h),上

网电价降低8~15元/(MW·h),新建褐煤电厂设计规范将会被彻底改变,平均每台新建670MW的发电机组的投资降低6亿元,而且将实现CO<sub>2</sub>减排近600万吨/年,争取CDM支持近37000万元/年,年节煤1848万吨,节约静态电厂建设投资134.3亿元。

在我国以煤炭为主要能源的战略背景下,针对褐煤发电比例的快速增长趋势,推广褐煤过热蒸汽预干燥这一洁净煤新技术,符合我国可持续发展战略。通过传统褐煤电厂的设计革新和技术改造,对我国能源电力行业的节能减排能起到巨大的带动效应。本文将针对褐煤的过热蒸汽干燥进行研究,并提出一种过热蒸汽高床层内加热流化床干燥洁净煤技术,以推动褐煤过热蒸汽干燥技术的应用发展。

## 2 褐煤过热蒸汽干燥的研究

### 2.1 褐煤过热蒸汽干燥的原理

褐煤过热蒸汽干燥技术是利用褐煤内水分蒸发所形成的过热蒸汽为与褐煤接触的干燥介质,通过再热器或流化床内置换热器间接提供干燥所需要的能量。系统闭路循环,全部为惰性无氧气氛环境。干燥所产生的褐煤内水分蒸发所形成的过热蒸汽被排出系统后,可以回收全部干燥所供给的热量,蒸汽耗量小,热效率大大提高。过热蒸汽干燥原理图如图1所示。

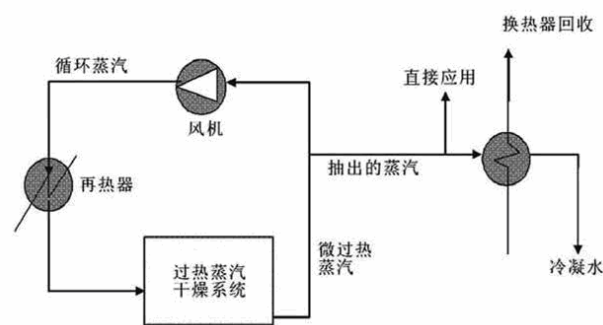


图1 过热蒸汽干燥原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the super-heated steam drying

### 2.2 褐煤过热蒸汽干燥的机理实验研究

#### 2.3.1 实验介绍

实验对象褐煤的湿基含水率28.22%,粒径1~2mm。搭建的褐煤干燥机理实验台架流程简图如图2所示。

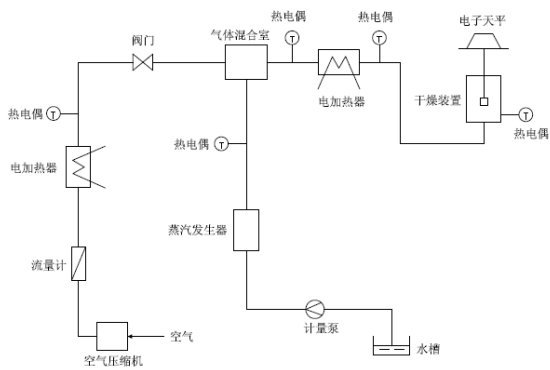


图2 褐煤干燥机理实验台架流程图

Fig. 2 Flow chart of the mechanism experimental system of the lignite drying

通过采用热空气、过热蒸汽以及它们的混合气体为干燥气体。本实验采用四种气体组合方式，具体成分见表1所示。干燥气体温度均保持在150℃。

表1 干燥气体的成分

Table 1 Components of the drying gases

编号	空气流量(kg/h)	过热蒸汽流量(kg/h)
1#	6	0
2#	4	2
3#	2	4
4#	0	6

每次干燥的煤样重量均为5.00g，将其放置在小托盘中，托盘的底部材料为较小孔径的石棉网，一方面使气流均匀地流过托盘中的褐煤颗粒，另一方面保证褐煤不发生泄漏。

实验时将装有煤样的托盘放入干燥装置中，并记录不同干燥时间内褐煤的质量。根据褐煤质量值的变化和时间的关系，对褐煤的干燥机理进行分析。

### 2.3.2 实验结果及分析

根据物料湿含量与干燥时间的关系，即可绘制出干燥曲线。其中物料的湿含量指的是干基湿含量，其计算公式如式(1)所示：

$$M = (G_1 - G_2) / G_2 \quad (1)$$

式中，M为干基湿含量(kg/kg)，G<sub>1</sub>为湿物料总重(kg)，G<sub>2</sub>为绝干物料量(kg)。

湿物料总重G<sub>1</sub>为每次记录的褐煤的质量值。通过计算，即可得出不同干燥时间下褐煤的干基湿含量值，然后便可通过软件绘制出褐煤在不同实验条件下

的干燥曲线，如图3所示。

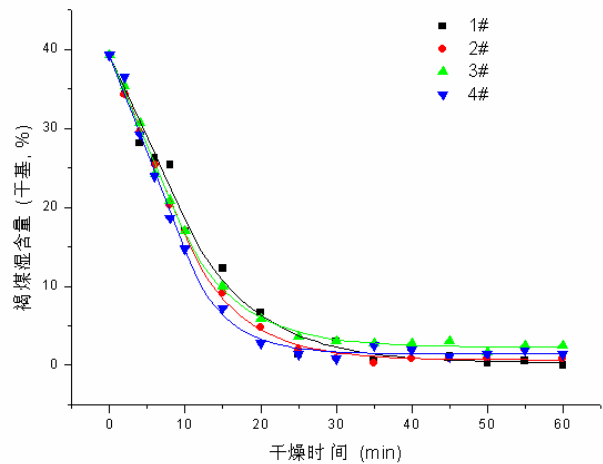


图3 不同实验条件下褐煤的干燥曲线

Fig. 3 Drying curves of the lignite at different experimental conditions

可以看出，图3的干燥曲线中明显存在拐点，其对应临界含水率X<sub>cr</sub>。根据干燥机理，其干燥过程存在恒速干燥阶段和降速干燥阶段两个不同的过程<sup>[15]</sup>。

在恒速干燥阶段，湿物料的干燥速率是恒定的。物料内部的水分向其表面转移的速率与水分从物料表面汽化的速率相适应，使物料表面能始终维持润湿状态。恒速干燥阶段干燥的水分主要为非结合水，包括物料中吸附的水分和孔隙中的水分，这些水分与物料是机械结合，结合力较弱，非结合水的蒸汽压与同温度下纯水的饱和蒸汽压相同，因此在干燥过程中极易除去。恒速干燥阶段的干燥速率大小取决于物料表面水分的汽化速率，即取决于物料外部的干燥条件，故又被称为表面汽化控制。

当物料的含水率降至临界含水率之后，便转入降速干燥阶段。降速干燥阶段干燥的水分主要为结合水，包括物料细胞壁内的水分及毛细管中的水分，这种水分主要是属于物化结合方式，与物料的结合力较强，因此结合水分的特点是产生低蒸汽压，即其蒸汽压低于同温度下纯水的饱和蒸汽压，致使干燥过程的传质推动力降低，所以结合水分较难除去。在此阶段中，干燥速率的变化规律已与物料性质及内部结构有关，总的表现为水分自物料内部向表面转移的速率低于物料表面向环境的汽化速率，蒸发已由表面汽化控制转变成内部扩散控制。

当褐煤含水率X > X<sub>cr</sub>时，曲线呈直线型，属恒速

干燥阶段；当褐煤含水率 $X < X_{cr}$ 时，曲线呈指数型，属降速干燥阶段。其数学描述如式(2)和式(3)所示。

$$X = X_0 - (X_0 - X_{cr}) \times t / t_{cr} \quad X > X_{cr} \quad (2)$$

$$X = X_{eq} + (X_{cr} - X_{eq}) \times \exp\left(-\frac{X_0 - X_{cr}}{t_{cr}} \times \frac{t - t_{cr}}{X_{cr} - X_{eq}}\right)$$

$$X < X_{cr} \quad (3)$$

式中， $X$ 为褐煤含水率， $X_0$ 为褐煤初始含水率， $X_{cr}$ 为褐煤临界含水率， $X_{eq}$ 为褐煤平衡含水率， $t$ 为干燥时间， $t_{cr}$ 为临界含水率对应的干燥时间。

将干燥曲线中的数据进行拟合，得到相应的特征参数值，见表2所示。

表2 不同实验条件下褐煤干燥机理方程的特征参数

Table 2 Characteristic parameters of the mechanism equation of the lignite drying at different experimental conditions

编号	初始含水率 $X_0$ (%)	临界含水率 $X_{cr}$ (%)	平衡含水率 $X_{eq}$ (%)	临界干燥时间 $t_{cr}$ (min)
1#	39.2758	19.47501	0.26374	9.45125
2#	39.2758	17.07557	0.65735	9.66963
3#	39.2758	19.51064	2.28831	8.59313
4#	39.2758	14.2978	1.43318	10.07005

可以看出，采用过热蒸汽对褐煤进行干燥后，褐煤的平衡含水率较低在5%以下，能够满足工业上褐煤干燥的要求。

通过对实验数据进行分析，得出褐煤在不同实验条件下的干燥速率曲线，如图4所示。

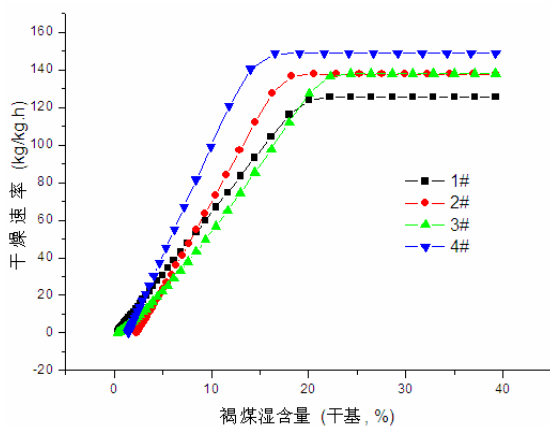


图4 不同实验条件下褐煤的干燥速率曲线

Fig. 4 Curves of drying rate of the lignite at different experimental conditions

可以明显看出，过热蒸汽的干燥速率比空气的干燥速率大。原因在于：①干燥介质为过热蒸汽，无传质阻力。过热蒸汽干燥时，由于整个环境仅有一种气体成分存在，在实际过程中从颗粒表面移去蒸汽的阻力可以忽略，因此过热蒸汽干燥无气膜传质阻力。②过热蒸汽的比热容大。空气的比热容为1.005kJ/(kg·K)，而蒸汽的比热容为1.968kJ/(kg·K)，因而在相同质量流量下过热蒸汽传递的热量比空气的多。总的来说，过热蒸汽的传热系数比空气的大。通过实验研究表明，温度为150℃已经达到了逆转点温度之上，过热蒸汽的干燥速率比空气的大。

通过分析，可以得出以下几点结论：

①干燥速率随着不凝气体含量的增加而略有降低。

②该褐煤的临界含水率在14~20%之间，并且随着干燥气体中不凝气体的增加，临界含水率略呈上升趋势。

③平衡含水率较低均在5%以下。

## 2.3 褐煤过热蒸汽干燥的中试试验研究

### 2.3.1 试验介绍

本文针对褐煤的过热蒸汽流化床干燥技术进行了中试试验研究，采用的干燥系统为过热蒸汽高床层内加热流化床干燥中试试验系统。该干燥系统以饱和蒸汽作为热源，用来干燥平均粒径小于6.3mm的褐煤，针对用户为燃烧褐煤的电厂和具有蒸汽热源条件的煤矿，详细流程如图5所示。其中，热源饱和蒸汽由电厂汽轮机的抽气系统得到。饱和蒸汽送入干燥床中特殊设计的内加热管，实现与高水分褐煤的热交换后，形成冷凝水，由疏水阀排出干燥系统，引回锅炉系统。

高水分褐煤经过进料阀及褐煤进料机送入干燥床，在过热蒸汽环境下，通过内置的高层换热管实现与管内饱和蒸汽的换热过程，达到脱除水分的目的后，由干燥床下部排料阀排出干燥系统，进入电厂输煤系统。

由褐煤中脱出的水分形成过热蒸汽，排出干燥机后，进入二级除尘系统除尘合格后，通过循环风机将一部分过热蒸汽送回干燥床参与下一个干燥循环，其余过热蒸汽引出干燥系统，进入电厂余热回收系统再利用。

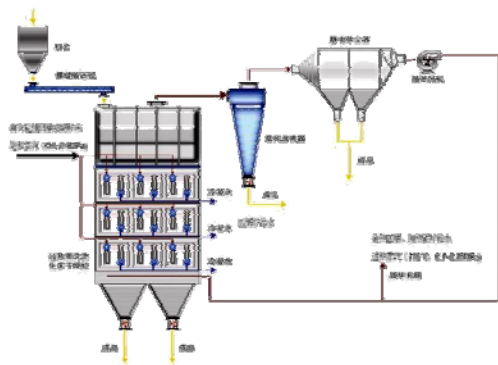


图5 褐煤预干燥系统流程

Fig. 5 Flow chart of lignite pre-drying

图6所示的是褐煤过热蒸汽干燥的中试试验系统实物图。



图6 褐煤干燥中试试验系统

Fig. 6 Pilot-scale testing system of lignite drying

高床层内加热流化床独特特点包括：穿流床设计，运行稳定可靠、操作弹性大；布风结构特殊设计，保证布风均匀而不易堵塞；高床层设计，提高干燥能力，换热结构可以独立拆分和组装；设置了完善的防爆措施，为过热蒸汽系统增添更完善的安全装置；高度自控水平，完全实现床层温度、高度、流化床状态和产品品质的自动化调节；设置了完善的保温和伴热系统，保证系统稳定运行等。

除尘系统装置特点包括：采用二级除尘系统，保证除尘效率。一级细粉除尘器采用螺旋切线结构，降低动力消耗，提高除尘效率。二级除尘器采用静电或布袋除尘器，保证出口过热蒸汽含尘量满足工艺要求，保证系统稳定运行。

循环动力风机特点包括：采用单吸入、双支承、

多级叶轮结构，保证工艺参数；设置严格的机械密封，采用稀油站强制供油使轴封处气体接近零泄露，保证运行环境和系统稳定。

### 2.3.2 试验结果及分析

中试试验结果表明，采用该褐煤过热蒸汽干燥的中试试验系统能稳定、连续地对褐煤进行干燥，能将含水率 30% 以上的褐煤干燥到含水率约 10% 左右，符合褐煤干燥实际工业应用的要求。图7所示的是干燥前、后褐煤实物图。



图7 干燥前、后的褐煤

Fig. 7 Lignite sample before and after drying

褐煤过热蒸汽高床层内加热流化床干燥系统可以与电厂工艺系统实现无缝连接，在工艺的布置上也可以灵活处理，在原煤场或磨煤机前都可以实现。

干燥系统设置在磨煤机前，工艺流程可以简述为：由原煤仓获得的粗粒度褐煤，经过输送、破碎筛分装置处理，进入干燥系统，干燥合格的褐煤通过输送设备送入磨煤机的给煤设备。

## 3 过热蒸汽高床层内加热流化床干燥洁净煤技术工业应用前景分析

### 3.1 工程技术简介

针对我国以煤炭为主要能源的战略方针，受中电投上电股份和华能九台电厂的委托，山东省科学院工业节能中心在褐煤干燥提质处理工艺上推出了以 SFCU 过热蒸汽内加热流化床干燥（Super-heated steam Fluid bed low-rank Coal Upgrading）为主的洁净煤新技术，将其用于褐煤的干燥，并进行推广应用。

过热蒸汽高床层内加热流化床干燥洁净煤技术优势主要体现在：

①安全：过热蒸汽系统内部为无氧环境，干燥过程安全可靠。

②节能：系统能耗明显降低，通过乏汽余热全部

重新利用，综合干燥耗能仅为0.22t蒸汽/t水。

③节水：蒸发出的水分全部冷凝回用，节约水资源。

④减排：单位褐煤的发热量增加到原煤的1.6倍，燃料消耗减少3~5%，燃烧效率提高1.2~2%，发电效率提高1.2%，二氧化碳减少0.03~0.08吨/(MW·h)，约减少3~8%。

⑤经济：高床层内加热流化床干燥洁净煤技术已申请专利保护（专利号：ZL200920026493.0，ZL200920026492.6），此工艺产能比德国 RWE 工艺高 2~3 倍，投资节省 60%。而且，可以降低磨煤系统的消耗和磨损，能实现与现有电厂锅炉系统的无缝连接。

表 3 所示的是几种典型干燥工艺的指标的比较。

表 3 几种典型干燥工艺的比较

Table 3 Comparison of several kinds of typical drying process

干燥工艺	吨产品能耗	吨产品成本	数量	投资
SFCU 山东	0.2t 蒸汽, 5.1kW·h	23.06 元	1 台	3200 万
SFCU RWE	0.2t 蒸汽, 9.2kW·h	25.52 元	1 台	9000 万
SDCU 山东	0.2t 蒸汽, 6.4kW·h	23.84 元	2 台	3000 万
管式干燥	0.55 蒸汽, 1.82kW·h	56.09 元	4 台	3200 万
烟气转筒	139kg 煤, 34kW·h	37.08 元	2 台	4000 万

注：上述均以 300MW 褐煤机组预干燥项目为例，蒸汽按 100 元/吨计，电按 0.6 元/度计，褐煤原煤按 120 元/吨计

通过上述对比分析可以发现：

相对于以热烟气为干燥热源的烟气转筒干燥工艺，以饱和蒸汽为热源的新型干燥方式具有明显的经济和技术优势；

管式干燥机投资和过热蒸汽干燥相同，但具有能

耗高，运行成本高，所需设备数量多，占地面积大，且环保节能性差等劣势；

山东科学院SFCU过热蒸汽内加热流化床干燥工艺，运行成本最低，投资最少，无尾气排放，安全和环保性能最佳。

此外，山东省科学院针对中小规模的电力、煤炭企业和以褐煤为原料的煤化工行业推出了以过热蒸汽为核心工艺的SDCU过热蒸汽回转圆筒提质技术（Super-heated steam Drum low-rank Coal Upgrading）。SDCU技术为低温蒸汽回转干燥方式，对原料的含水量（35~50%）和粒度（0.5~35mm）适应性广，通过采用氮气保护工艺，可实现安全的深度脱水（成品褐煤含水量低于2%），适用于年处理量50万吨的煤化工项目和云南地区高水分褐煤发电机组预干燥工程。

### 3.2 对发电能耗的影响分析

该工艺对发电能耗的影响分析如下所述：①由于褐煤干燥后热值增加，单位燃煤量产生的热量增加，所以产生相同蒸发量所消耗的燃煤量减少。②采用该褐煤干燥工艺，通过回收褐煤中蒸发出水蒸气热量加热锅炉给水，能够降低发电煤耗。按一期一台670MW机组改造测算，褐煤水分从32%降到12%，总的发电煤耗降低约为12.2g/(kW·h)，节约标煤4.49万吨/年，减少二氧化碳排放12.1万吨/年，技改投资回收期为3.71年。

从以上技术经济分析数据可以看出，过热蒸汽高床层内加热流化床干燥洁净煤技术能明显优化整体运行参数，降低发电煤耗，项目的技术经济效益较好，技改投资回收期短。

### 4 CDM资金扶植情况

提质褐煤综合利用，申请CDM资金支持的关键的要求是：减少发电机组的二氧化碳的总排放量。采用山东省科学院褐煤过热蒸汽高床层内加热流化床干燥系统工艺，可以实现干燥的尾气热量（过热蒸汽）循环利用，此工艺的热效率比常规工艺高一倍还多，如果考虑蒸汽用作供热和加热锅炉给水，还有很大的提升空间，这样就能真正实现褐煤脱水、提质的能耗降低，真正实现使用高水分褐煤时的二氧化碳总排放量的减少，有利获得CDM的支持。

例如，以一个670MW装机容量的褐煤电厂计算，

每年减排CO<sub>2</sub>约10万吨,可获得CDM资金支持约700万元,节约标煤近4万吨,节约支出约3000万元,同时提高发电效率超过1%,带来相当可观的经济效益。

## 5 总结

本文针对褐煤电厂的过热蒸汽干燥技术进行了研究,主要得出以下结论:

(1)通过高含水褐煤的干燥预处理、降低褐煤燃烧前的水分是提高传统褐煤电厂运行效率的行之有效的技术解决方案,是褐煤高效应用领域发展的大趋势。

(2)过热蒸汽干燥技术可以满足电厂褐煤脱水的工艺要求,干燥速度高于常规的热空气干燥技术。

(3)采用褐煤过热蒸汽干燥的中试试验系统能稳定、连续对褐煤进行干燥,且干燥产品满足工业应用要求。

(4)过热蒸汽内加热流化床褐煤预干燥洁净煤成套工艺在安全生产、节能降耗和节约水资源方面具有明显优势,褐煤水分从32%降到12%时发电煤耗可以降低约12.2g/(kW·h),明显优化电厂运行参数,保障使用中速磨机组出力达标。

由此可见,积极推广和应用高床层过热蒸汽褐煤预干燥洁净煤成套工艺,是促进能源、电力行业的技术升级和节能减排的工艺革新重要而现实的途径,符合我国可持续发展战略和节能减排的要求,并可使我国在该领域迅速达到国际先进乃至国际领先水平,实现跨越式发展。

## 参 考 文 献

- [1] 虞继舜. 煤化学. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [2] 陶著. 煤化学. 北京: 冶金工业出版社, 1983.
- [3] 戴和武, 谢可玉. 褐煤利用技术. 北京: 煤炭工业出版社, 1999.
- [4] 王海峰, 朱书全, 任红星, 王娜, 朱海博. 通辽褐煤在流化床干燥

器中的干燥特性研究. 选煤技术, 2007, (4): 43-47.

- [5] 林美强. 印尼褐煤的不同干燥方法的技术经济性及工艺分析选择. 环境科学, 2010, (2): 130, 132.
- [6] 迟艳红. 利用褐煤低温干燥技术干燥老公营子矿末煤. 煤质技术, 2009, 增刊: 12-13.
- [7] M. T. Ho, G. W. Allinson, D. E. Wiley. Factors affecting the cost of capture for Australian lignite coal fired power plants. Energy Procedia, 2009, 1: 763-770.
- [8] Y. Iwaia, Y. Koujina, Y. Arai, I. Watanabe, I. Mochida, K. Sakanishi. Low temperature drying of low rank coal by supercritical carbon dioxide with methanol as entrainer. Journal of Supercritical Fluids, 2002, 23: 251-255.
- [9] Arun S. Mujumdar. Handbook of Industrial Drying, Third Edition. CRC, 2006.
- [10] 潘永康, 王忠喜, 刘相东. 现代干燥技术. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [11] 史勇春. 干燥过程原理与设备及新进展——Mujumdar 关于工业干燥技术的论述. 济南: 济南出版社, 2002.
- [12] 金国森等. 干燥设备. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [13] G. D. Bongers, W. R. Jackson, F. Woskoboenko. Pressurised steam drying of Australian low-rank coals Part 1. Equilibrium moisture contents. Fuel Processing Technology, 1998, 57: 41-54.
- [14] G. D. Bongers W. R. Jackson, F. Woskoboenko. Pressurised steam drying of Australian low-rank coals Part 2. Shrinkage and physical properties of steam dried coals, preparation of dried coals with very high porosity. Fuel Processing Technology, 2000, 64: 13-23.
- [15] 徐帮学. 最新干燥技术工艺与干燥设备造型及标准规范实施手册. 合肥: 安徽音像出版社, 2003.

作者简介: 李胜 (1971-), 男, 山东济南人, 毕业于山东大学, 归国博士, 应用研究员, 主要从事洁净煤技术的研究。