

效率

在燃烧高湿度煤的同时提升电厂效率和减少 CO₂ 排放量

无论在世界任何地方，采用提高现有燃煤电厂效率的效果都不会让人后悔，效率更高的电厂用煤量更少、排放量更低、可变成本也较低。Great River Energy 公司的 Coal Creek Station 电厂已经证明，采用 DryFining 回收利用低品质废热，能够降低包括 CO₂ 在内的排放量，在燃用湿煤的同时提升电厂性能。

文 | Nenad Sarunac, Mark Ness 和 Charles Bullinger

在现有电厂实现效率提升是一种减少 CO₂ 排放量的有效而经济的方法。对于一家典型的燃烧粉末煤的电厂

为例，在恒定功率输出之下，净机组效率提升 1% 会减少 2.7% 的 CO₂ 排放量。为了让这种效率提升功效纳入前景

考量，也为了满足提案中的《清洁电力计划》对全美国电力行业温室气体减排目标，美国环保署在一份自己编制的方案当中，制订了燃煤发电机组净机组热耗率平均提升 6% 的目标，这个目标相当于平均热耗率为 10 000 Btu/kWh (1 Btu/kWh = 1.055 06 kJ/kWh) 的燃煤电厂的净机组效率提升约 2.7%。对于燃煤电力行业来说，这是一个令人生畏的目标。

众多热耗率提升方案

电力行业确实有一些可用方案。表 1 汇总了一份可备选的热耗率改进和减排方案概要。但是，可能达到的热耗率改进幅度在很大程度上取决于所燃烧的煤种。对于燃烧高湿度煤电电厂，最想要采用的热耗率提升方案是寻求采用从烟气当中回收的低品质废热实现的煤干燥技术。

美国和世界 50% 左右的煤储量均为低等级高湿度煤种。考虑到这些低成本

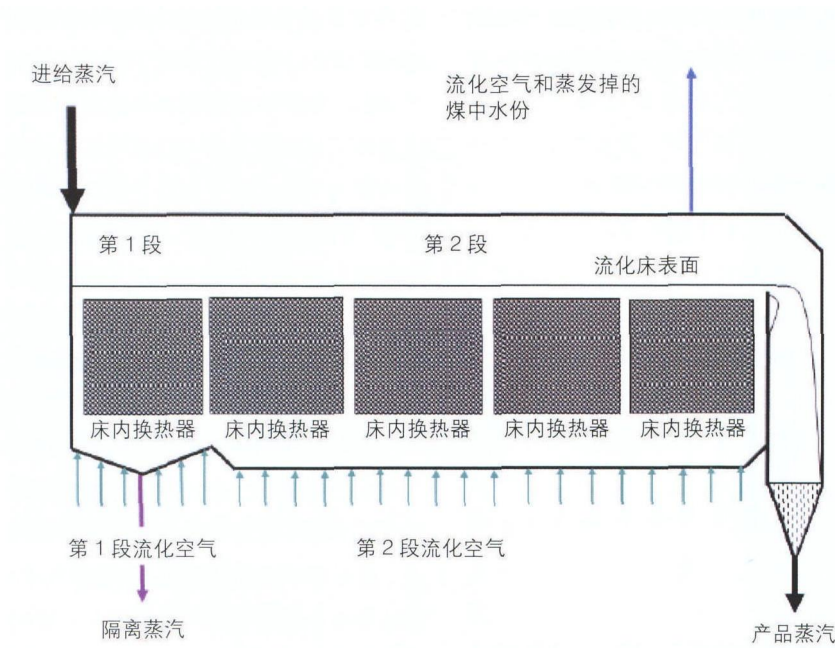


图 1 2 段式干燥器。这张动床式流化床干燥器的原理简图显示：第一阶段如何从原煤当中清除掉硫和汞，第二阶段如何对煤进行干燥。高温流化床空气由电厂低品质废热供给

表1 众多热耗率提升方案

改进方案	热耗率改进 (%)	注释
高湿度煤热力干燥	0.6 ~ 5.9	取决于煤种
烟气回收废热利用	1.2 ~ 3.6	取决于回收废热的利用
汽机循环改进	2 ~ 4.5	
排热系统改进	0.5 ~ 3	取决于机组负荷
锅炉辅助设备改进	0.2 ~ 1	取决于现场具体情况
传感器和控制器改进	≤ 1.5	取决于机组机龄
煤流量平衡	≤ 1	取决于现场具体情况
燃烧优化	1 ~ 2	取决于现场具体情况
吹灰优化	1 ~ 2	取决于现场具体情况

煤种的丰富储量，利用高湿度煤进行电力生产是一种常见做法而且采用度正在上升。仅在美国就有 279 座发电设施燃烧着高湿度煤，诸如褐煤和粉河盆地次烟煤。根据能源部信息，这些电厂生产着美国近 1/3 的燃煤电力。

当电厂锅炉燃烧高湿度煤时，约 7% 的燃料热输入量被用于蒸发燃料水份并将其加热至过热程度，使其离开烟气，此项损失的绝大部分与蒸发潜热有关。此外，相较于烟煤，高湿度、低热值的煤种会导致更高的燃料和烟气流量、更高的辅助电力用量、更高的净机组热耗率以及更高的磨煤机、输煤管和燃烧器维护成本。反之，通过热力烘干降低煤湿度能够提升锅炉和机组效率、电厂运行和经济性，同时还能减少 CO₂ 排放量。但是，已经开发的许多此类煤干燥热力过程或者在机械上较为复杂，或者要求使用成本高昂的一次能源或蒸汽来去除煤当中的水份，这样会显著提升与燃料处理相关的成本，也是得到行业接受的主要障碍。

有一种新颖的低温煤干燥和清洗工艺采用了动床式流化床干燥器 (FBD)，并利用废热来降低低品质煤种的湿度，此项工艺最近由 Great River Energy 开发并在旗下 Coal Creek Station 电厂进行了商品化。这项技术已经投放市场，名称为 DryFining 燃料增强工艺。

DryFining 的热力集成与现场具体情况高度相关，并取决于可用的热源、空间条件限制以及电厂的总体布局。诸如热耗率提升在内的煤干燥会随着煤湿度

减少的增加而加大。能够达到的煤湿度减少量可能受限于锅炉对流烟道的热性能、可用热量的数量，或者煤的平衡含水量。

DryFining 燃料增强工艺

Great River Energy 公司的 FBD 设计方案成就了两项重要功能：在第一个 FBD 段，很大一部分的原煤当中的硫和汞被脱去，对煤进行清洗，并在第二个 FBD 段对煤进行干燥。此项清洁功能使这项煤干燥技术脱颖而出，提供了非常重要的减排共生效益。

由于动床式 FBD 具有很高的导热和传质系数，DryFining 工艺采用了这种结构，达成了紧凑的干燥器设计。流化介质采用了空气而不是常用的蒸汽。通过以电厂低品质废热进行干燥，避免了干燥过程期间可能出现的煤去挥发现象 (图 1)。

粉碎后的煤送入流化床干燥器的第一段，并在第一段将无法进行流化的物质，诸如石头和其他高密度的成份在干燥器的底部分离出来，而密度较低和体积较小的颗粒物则趋向于浮起。因此，与干燥煤 (成品流) 相比，从干燥器排出的经分离蒸汽当中存在更高含量的矿物质 (包括黄

铁矿)。由于绝大多数以无机形式相关的硫都以黄铁矿的形式存在于煤内，就北达科州 (ND) 褐煤来说，煤中约 30% 的硫和汞从 FBD 的第一阶段分离出来。

可以流化的物质下一步进入干燥器第二段，在此阶段，在流化空气和床内换热器所供应的热量作用下，煤表面的水份和一部分固有水份被蒸发出来。床内换热器提升了流化空气和流化煤床的温度，提升了干燥速率。这个干燥过程会影响到干燥期间碎裂的煤颗粒的微观结构。干燥器和较为细化的煤作为成品流从 FBD 排出，流化床驻留时间和温度是影响剩余水份的主要参数。

四年运行经验

在 Coal Creek 1 号机组上实施了 3 个系列的受控试验，这些试验分别在 DryFining 实施之前和之后执行，并在满负荷 (600 MW，总负荷) 稳态条件下运行，用于定量分析机组性能和排放量的改进。煤干燥和煤清洁系统的规模定为 1100 t/h 原 ND 褐煤，此煤含水量范围从 38% ~ 40%。自 2009 年 12 月以来，DryFining 技术一直在 Coal Creek Station 电厂持续正式运行。

2009 年 9 月采用湿煤 (原煤) 执行了试验，用于确定机组性能和排放量

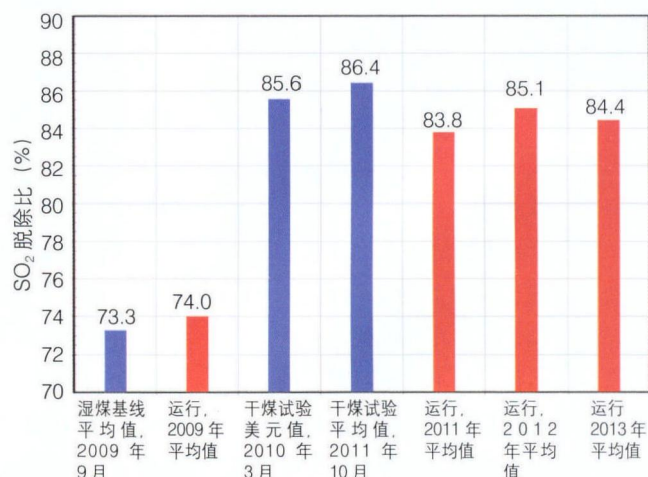


图2 显著脱除 SO₂。实施 DryFining 之前和之后的 FGD 内 SO₂ 脱除比如图所示，蓝条代表性试验结果，红条代表平均年度数据



图3 对热耗率的审视。所增为精制煤（2013年，经3年运行后）和湿煤（2009年，DryFining实施之前）的月度平均净机组热耗率

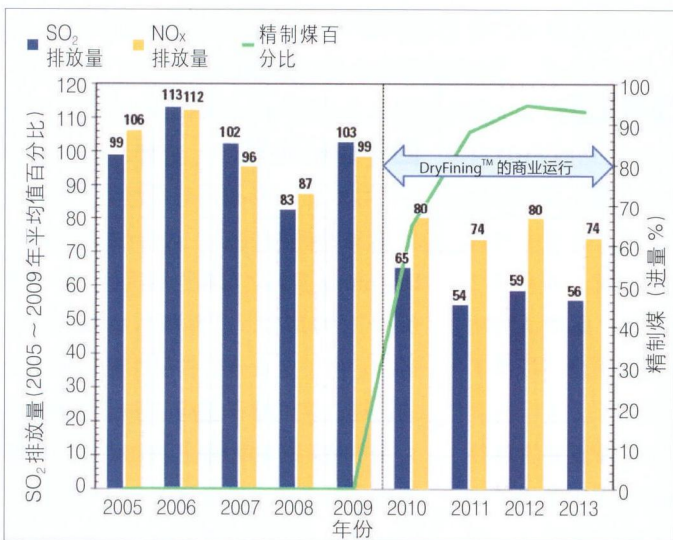


图4 DryFining之前和之后。2009 ~ 2013年间 SO₂ 平均年度排放减少量为 45.6%。2009 年至 2013 年间 NO_x 平均年度排放减少量为 24.7%

的基线。在 DryFining 投运后的试验分别于 2010 年 3 ~ 4 月和 2011 年 10 月执行。因为 FGD 旁路流量更低的缘故，烟囱温度降低但仍充分地保持在饱和温度以上。而且，随着烟气温度的更低，烟气流过冷气静电除尘器（ESP）时的速度也降低了，改进了颗粒物采集效率并降低了浑浊度。

含水量减少后的煤的可磨性也得到了改善，使得磨煤机功率降低近 10%。这样就让机组能够在 6 台磨煤机同时投运的情况下运行，而不需要习惯上的 7 台或 8 台磨煤机。解放出来的一台磨煤机将作为备用机使用，提高了电厂的可用性，因为磨煤机需要轮流投入和退出运行以便执行例行维护或修理，而不会减

少燃料处理能力。APH 下游的烟气体积流量会随煤流量和烟气温度的降低而减小，带来更低的引风损失量和引风机耗用功率。

采用锅炉汽机循环效率方法计算，使用更干燥煤时的净机组热耗率降低了 3.5%。根据 ASME PTC 4 标准测定的锅炉效率提升了 3.4%。净机组热耗率的提升幅度高于锅炉效率的提升，这是因为在采用干燥煤时，与湿煤相比，电厂辅助用电量也得到了降低。

DryFining 对 NO_x、SO₂ 和总汞（Hg_T）排放量有着显著积极的影响。与湿煤运行相比，NO_x 排放量的减少归功于更低的煤输入量以及更低的一次风（PA）与二次风（SA）流量比。

更低的一次风流量导致燃烧器处 NO_x 生成量更少，同时更高的二次风流量能够达到更深入的炉膛分段，可提供更多的二次风量。所达到的 30% 的 NO_x 减少量允许 Coal Creek 公司通过锅炉精调达到新的 NO_x 排放限制，避免安装成本昂贵的选择性非催化型还原系统。

SO₂ 排放量的减少可分成 3 个部分。第 1 部分：输送至锅炉干燥的流量更低会导致进入锅炉的硫含量降低。第 2 部分：以无机形式存在的硫当中很大一部分（约 30%）在流化床干燥内分离了出来。在干燥机验收试验当中测得的硫分离比率为 33.2%。最后，更低的烟气体积流量让更大比例的烟气得到了脱洗，进一步减少了 SO₂ 排放量（图 2）。

在空预器入口、流化床干燥器入口和出口、流化床干燥器旁路和烟囱处，使用基于湿式碰撞器的半连续性排放量监测仪，对烟气汞浓度和形成进行了测量。并且执行了吸附阱测量作为质量控制手段。采用电厂连续排放物监测系统对烟囱内的 Hg_T 含量进行了连续测量。

DryFining 产生了 35% ~ 40% 的 Hg_T 排放量减少，其原因在于干燥煤进入电厂的流量更低，并通过重力式分离、汞形成机制的改变，以及在流经 FBD 的烟气流量的增加，并在 FBD 内脱除了氧化汞（Hg²⁺）。Hg_T 排放量的减少使得 Coal Creek Station 电厂通过 FGD 添加剂减少了 Hg²⁺ 再排放，满足了新的排放限值，因此无需注入粉末活性炭进行控制。

整体上，通过在 Coal Creek 电厂实施 DryFining 技术，Great River Energy 公司避免了 3.66 亿美元的资本支出，这笔支出是如未实施 DryFining 技术时满足排放规定而需要投入的资本。

长期运行经验

4 年多以来，DryFining 一直在

Coal Creek Station 电厂投入连续正式运行, 达到了高于 95% 的可用性, 并且没有造成一次机组停运。自实施 DryFining 以来, 电厂净发电量也出现了增长。

自 DryFining 于 2009 年 12 月正式投入运行以来, 两台 Coal Creek 机组的性能都持续出现了改进。图 3 提供了对月度平均净机组热耗率值的对比, 此值采用输入/输出方法计算得出。1 号机组的净机组热耗率的平均年度提升幅度为 3.4%, 实际上与基线试验当中测得结果相同。2 号机组 5.8% 的热耗率提升更高, 其原因是此数据当中还包括了汽机升级的作用。自 2009 年以来, 每台机组的电厂辅助用电量减少了 5 MW。

图 4 所示为 2005 ~ 2013 年期间 Coal Creek 电厂 1 号和 2 号机组年度

平均 NO_x 和 SO_x 排放量。在 DryFining 实施之后, 与 2005 ~ 2009 年平均值相比, SO_x 排放量减少了 44% ~ 46%, 而 NO_x 排放量减少了 24% ~ 25%。

煤烘干对电厂运行的作用

采用 DryFining 技术影响了从锅炉至烟囱气体路径内各个组成部分的性能。精制煤的低流量及其低含水量减少了对流路径内的烟气流量、烟气的热容量以及对流导热系数。为了保持再热蒸汽温度设定值, 燃烧控制系统增加了主燃烧器的倾角并关闭了减温器阀。尽管用量分配发生了改变, 但总吹灰蒸汽流量保持不变。

在实施 DryFining 之前, 空预器会在一次风和烟气段范围内存在较高的压差。通常需要运行 7 台磨煤机 (在寒冷

天气下满负荷运行需要 8 台磨煤机)。在 DryFining 的帮助下, Coal Creek 电厂每台机组只需 6 台磨煤机就可运行在满负荷条件下, 并且一次风流量也得到了降低。随着一次风流量的降低, 磨煤机容量增加, 磨煤机功率和维护量都减少。磨煤机、给煤机跳闸现象得到消除, 电厂可用性得到了提升。因为烟气流量减少、烟气密度更高以及 APH 结垢减少, 每台机组的引风机功率都降低了 2 ~ 4 MW。

尽管经 DryFining 处理后, 煤的硫含量减少了, 但现有冷侧静电除尘器 (ESP) 的性能仍然很好。烟气温度的降低减少了飞灰的电阻率, 因此提升了 ESP 的性能。而且, 烟气体积量的减少也降低了烟气的流速并延长了停留时间。[11]

 纸媒
  在线
  会议
  服务







关注MM《现代制造》微信, 关注有礼!

详细资料请垂询

☎ 广告部: 010-63326090-230



MM创刊于1894年



Vogel 弗戈工业媒体

www.vogel.com.cn