

大功率等离子体点火技术在高水分褐煤上的运用

李顺波¹ 岳福堂² 姜楠²

1.武汉天和技术股份有限公司 湖北 武汉 430077

2.华能汇流河热电分公司 内蒙古 呼伦贝尔市 022150

【摘要】等离子体点火技术是在电站锅炉上广泛应用的一种节能点火技术，不仅可以实现锅炉的零燃油冷态启动，而且还可以协助锅炉实现“3060 碳达峰碳中和”大背景下的灵活性调峰。目前该技术在电站锅炉上的实际运用中，在高水分褐煤的项目上实施的效果并不理想。本文为拓宽等离子体点火技术在电站锅炉的运用场景，开展了大功率等离子体点火技术在高水分褐煤上运用的一系列研究：分析了高水分褐煤点火特性及大功率等离子体特性，创建了大功率等离子体点燃高水分煤粉的理论计算模型，搭建 1:1 试验点火平台开展了点火试验，找出了等离子体点燃高水分褐煤的关键因素及理论判断方法。同时，进行了经济测算和环保意义分析：在高水分褐煤电站燃煤锅炉上采用 300kW 大功率等离子体点火技术，不仅可以产生良好的经济效益，而且符合国家对火电机组的环保要求。

【关键词】等离子体点火技术；高水分褐煤；300kW；大功率；理论模型

引言

等离子体点火技术是在电站锅炉上广泛应用的一种节能点火技术，不仅可以实现锅炉的零燃油冷态启动，而且还可以协助锅炉实现“3060 碳达峰碳中和”大背景下的灵活性调峰。等离子体点火技术目前在电站锅炉上的实际运用过程中，其等离子体功率调节范围一般在 80-200kW 之间，也更多运用于热值和挥发分较高的烟煤项目；而在高水分褐煤项目上运用过程中，由于褐煤的水分高、热值低，其运用效果很不理想。为解决上述等离子体点火技术运用中的瓶颈，拓展等离子点火技术在电站锅炉上的运用场景，本文开展了一系列大功率等离子体点火技术在高水分褐煤上的运用研究。

1. 大功率等离子体点火技术在高水分褐煤上的运用研究

1.1. 高水分褐煤点火特性分析

褐煤是煤化程度较低的煤种，主要赋存在内蒙古、黑龙江、云南等省区。褐煤具有高水分、低热值、高挥发分、较低的热稳定性、低燃点等特点[1]。目前褐煤主要用来直接燃烧发电，国内的多家电厂主要以褐煤为燃料。以本文研究的伊敏煤（冬季）为例，其全水分（Mt）高达 39.6%，低位发热量（Qnet.ar）仅为 2857kcal/kg，具体煤质工业分析报告如下表 1 所示：

表 1 伊敏煤（冬季）煤质工业分析

| 项目 | 单位 | 数据 |
|------------------|---------|-------|
| 收到基低位发热值/Qnet.ar | kcal/kg | 2857 |
| 收到基全水份/Mt | % | 39.60 |

| | | |
|---------------|---|-------|
| 收到基灰份 /Aar | % | 11.52 |
| 干燥无灰基挥发份/Vdaf | % | 22.38 |
| 空气干燥基水份/Mad | % | 18.38 |

伊敏煤经磨煤机干燥制粉后，磨煤机出口的风粉温度在 60-65℃，根据《火力发电厂制粉系统设计计算技术规定》（DL/T 5145-2012）中“煤粉水分与原煤水分及磨煤机出口温度的关系图”（见下图 1），煤粉的水分仍高达 19%-21%。

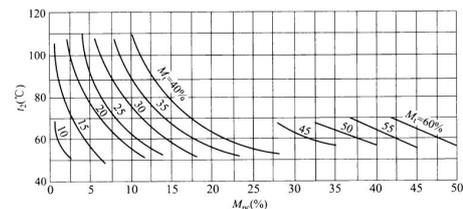


图 1 煤粉水分与原煤水分及磨煤机出口温度的关系图

磨煤机出口的伊敏煤粉中的水分是以结晶水为主，其析出温度在 150-200℃，挥发分大量析出温度区间则在 400℃左右[2]。因而，在实施等离子体点燃高水分褐煤过程中，水分的析出是早于挥发分的析出的。煤粉中的结晶水变为水蒸气过程中会吸收大量的气化潜热，这会降低煤粉中挥发分的析出速率和析出量，最终影响等离子体点燃高水分褐煤的效果。这也是目前常规功率的离子体（额定功率在 150kW 及以下）对高水分褐煤适应性较差的主要原因。

因此，结合高水分褐煤点火特性分析，理论上采用加大等离子体的功率，从而克服煤粉中的结晶水析出吸热的影响，可有效提高等离子体点火的效果。

1.2.大功率等离子体的特性研究

产生高温等离子体的核心设备为等离子体发生器。一般将额定功率在 150kW 及以下的等离子发生器称为常规等离子体发生器, 而将额定功率在 200kW 及以上的称为大功率等离子体发生器。

常规等离子体发生器采用的是点阴极的结构型式, 即阴极前端为点实心(如下图 2 所示)。启弧后, 高温的等离子体会对点阴极进行定点烧蚀。因此, 常规等离子体发生器为保证点阴极的使用寿命, 对等离子体的运行电流有限制要求, 一般要求小于 300A, 否则点阴极很快会被烧损; 这也限制了这种型式的常规等离子体发生器的功率不超过 200kW。

与常规等离子体发生器的阴极结构型式不同, 大功率等离子体发生器采用的空腔阴极的型式, 即阴极为空腔圆柱体(如下图 2 所示)。启弧后, 通过对产生的等离子体的载体风的控制, 可使高温等离子体在空腔阴极内不断游动, 由常规等离子体发生器的点烧蚀变为环面烧蚀, 等离子体运行电流可提高至 600A, 功率可达 300kW 以上。

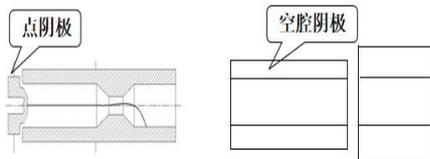


图 2 点阴极和空腔阴极结构示意图

根据煤粉与等离子体作用机理[3], 等离子体点燃煤粉的过程如下: 等离子体发生器启动后, 在等离子燃烧器的一燃室中形成温度 $T > 5000K$ 的温度梯度极大的局部高温区, 煤粉颗粒通过该等离子“火核”后受到卷吸、高温作用, 并在 10-3 秒内迅速释放出挥发物, 使煤粉颗粒破裂粉碎, 从而迅速燃烧。由于反应是在气相中进行, 使混合物组分的粒级和成分发生变化, 有助于加速煤粉的燃烧, 大大地减少点燃煤粉所需要的引燃能量, 这样就可以用很低的能量点燃煤粉[4]。

从上述过程可以得出, 等离子体点燃煤粉能力的两个关键指标分别为等离子体主体区域的流速 V 及温度 t 。通过仿真计算可得出不同功率 P 下的等离子体主体区域的流速 V 及温度 t 的关系图, 见图 3 和图 4:

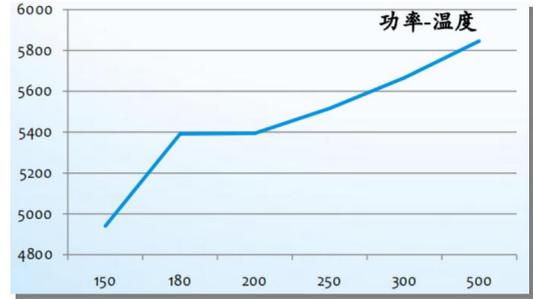


图 3 等离子体功率与等离子体主体区域温度关系图

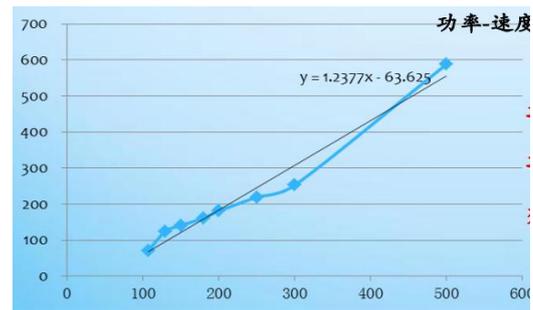


图 4 等离子体功率与等离子体主体区域速度关系图

以本文研究的 300kW 大功率等离子体为例, 其等离子体主体区域的温度达到 5667°C (高出 150kW 常规等离子体 14.7%)、速度达到 253m/s (高出 150kW 常规等离子体 79.4%)。由此可见, 大功率等离子体由于其主体区域的温度和速度更高, 对煤粉的卷吸和热解作用更强, 更适合于本文研究的高水分褐煤(伊敏煤)。

1.3.大功率等离子体点燃高水分煤粉理论计算模型研究

结合等离子燃烧器内部结构简图(见下图 5), 等离子体在等离子燃烧器内点燃煤粉的过程如下: 进入一燃室的煤粉在高温等离子体的卷吸、热解作用下, 快速析出挥发分并燃烧; 一燃室出口的火焰继续点燃进入二燃室的煤粉(主要也是挥发分燃烧, 伴随少量的煤焦燃烧); 高温的火焰喷入锅炉炉膛后, 在氧量充足和着火温度均满足的工况下, 煤焦开始迅速燃烧, 从而实现点燃煤粉的过程。

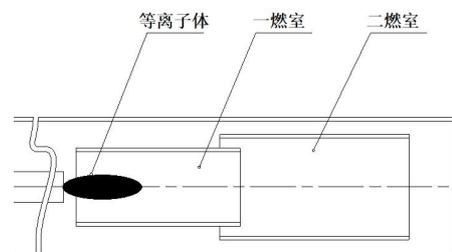


图 5 等离子燃烧器内部结构简图

在一燃室里，主要是煤粉析出的挥发分和极少量的煤焦进行燃烧，根据相关研究和试验数据得出结论：一级筒出口要形成连续、稳定的火焰，出口断面的平均烟温（ t_1 ）应不低于所燃烧煤质的煤焦着火温度（ tm_j ），同时为了防止煤粉在一燃室结焦， t_1 也应低于煤粉的变形温度（ T_1 ），即： $tm_j < t_1 < T_1$ 。在二燃烧室，主要是新补入煤粉的挥发分以及一燃烧室内因缺氧未燃尽的挥发分以及少量的煤焦燃烧，同样要求二燃室出口的平均烟温（ t_2 ）满足： $tm_j < t_2 < T_1$ 。

根据以上理论模型，本文先进行目前在高水分褐煤项目中运用比较多但效果不佳的 150kW 等离子体的点火理论计算，以验证上述理论模型的合理性。

开展 150kW 点火理论计算的边界条件如下：煤质全水分（ Mt ）39.6%，风粉温度为 65℃，煤粉水分（ Mpc ）19%，进入等离子燃烧器的煤粉量 7t/h，煤粉浓度 0.4kg/kg，等离子体运行功率 150kW。

一燃室的输入热量主要由进入一燃室的煤粉携带的热量、空气携带的热量、等离子体的点火热量、挥发分燃烧释放的热量、煤焦燃烧释放的热量等组成。在一燃室缺氧工况下，仅有极少量的煤焦燃烧，因此一燃室的输入热量的计算公式可简化如下：

$$Q_1 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4$$

式中： Q_1 为一燃室总的输入热量，kW； q_1 为进入一燃室的煤粉携带的热量，kW； q_2 为进入一燃室空气携带的热量，kW； q_3 为等离子体的点火热量，kW； q_4 为一燃室中挥发分燃烧释放的热量，kW。

按照上述公式进行计算，得出 Q_1 为 1205kW。

一燃室损耗的热量主要是进入一燃室的煤粉中水分由液体变为气态所吸收的气化潜热，其计算公式如下：

$$Q_2 = r \cdot m_1 \cdot Mpc$$

式中： Q_2 为一燃室损耗的热量，kW； r 为水的单位气化潜热，kJ/kg； m_1 为进入一燃室的煤粉量，kg/s； Mpc 为煤粉的水分，%。

按照上述公式进行计算，得出 Q_2 为 322kW。一燃室出口烟气的热量 Q_3 则为 883kW（ $Q_3 = Q_1 - Q_2$ ）。而一燃室出口烟气主要由氮气、水蒸气、二氧化碳及煤焦等组成，满足以下等式：

$$Q_3 = VN_2 \cdot CN_2 \cdot t_1 + VH_2O \cdot CH_2O \cdot t_1 + VCO_2 \cdot CCO_2 \cdot t_1 + mm_j \cdot Cm_j \cdot t_1$$

式中： VN_2 为一燃室出口烟气中的氮气的体积流量， Nm^3/s ； t_1 为一燃室出口的平均烟温，℃； CN_2 为氮气

在 t_1 温度下的比热容， $kJ/(Nm^3 \cdot ^\circ C)$ 。其它符号表示意义根据下标以此类推。

分别将一燃室出口各烟气组分的流量、比热容（比热容是关联一燃室出口的平均烟温的函数）等带入上述公式，通过迭代计算，可以得出一燃室出口平均烟温 t_1 仅为 319℃，已经低于伊敏煤的煤焦着火温度[5] tm_j 值 515℃，一燃室出口已无法形成稳定火焰，点火失败。上述对 150kW 等离子体点高水分褐煤的理论计算分析结果与目前常规等离子体点火在高水分褐煤的电站锅炉上的运用效果基本一致。

再将等离子体运行功率提高至 300kW，在其它边界条件不变的工况下，按照上述计算方法，可以得出一燃室出口平均烟温为 710℃，高于伊敏煤的煤焦着火温度 tm_j 值 515℃，一燃室出口可以形成稳定、连续的火焰；同时，平均烟温也小于伊敏煤的软化温度 T_1 值 1140℃，无结焦风险。二燃烧室入口，由于补入了新的风粉混合物，一燃室内因缺氧未燃尽的挥发分及新析出的煤粉挥发分在有氧条件下继续燃烧释放热量。按照上述计算公式，同样可计算出二燃烧室出口的平均烟温 t_2 为 691℃，仍大于煤焦的着火温度（515℃）且小于软化温度（1140℃），二燃室出口仍可形成连续、稳定的火焰。当二燃室出口的火焰进入炉膛，与燃烧器周边的二次风接触后，在氧气充分、温度达到着火温度的工况下，未燃尽的煤焦便会迅速着火燃烧，从而实现等离子体点燃煤粉的过程。

通过以上大功率等离子体点燃高水分煤粉理论模型分析及计算，300kW 大功率等离子体理论上可以有效点燃高水分伊敏煤。

1.4. 大功率等离子体点燃高水分煤粉试验

为了验证上述理论计算模型的分析结果，搭建了 1:1 点火平台进行点火试验。试验平台主要由风机、风温电加热装置、给粉机、风速测量装置、风温测温热电偶、煤粉管道、等离子燃烧器、燃烧室等组成，见下图 6 所示：

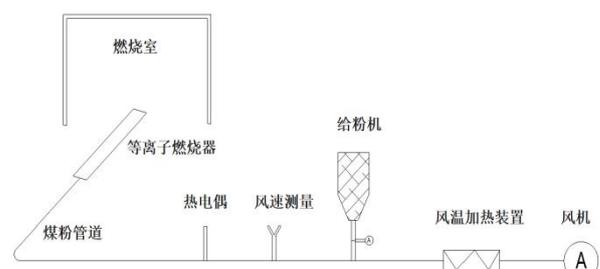


图 6 等离子体点煤粉试验平台系统图

同时在等离子燃烧器的一燃室和二燃室出口增加烟温测量热电偶组，对断面进行多点烟温测量来得出断面的烟温平均值，同时在对侧增设观火孔，观察一燃室和二燃室出口的着火情况，见下图 7 所示：

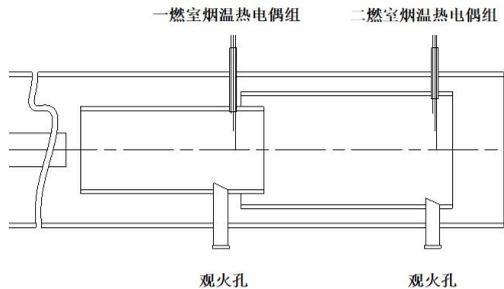


图 7 等离子燃烧器试验件

试验过程如下：通过初步计算，确定风机的开度和风温电加热运行功率，启动风机、风温电加热装置、等离子体发生器、给粉机等设备运行，将运行工况调整至 300kW 理论模型计算的边界条件下的参数值，分别记录一燃室、二燃室出口烟温，观察一燃室出口、二燃室出口、喷口出口的着火情况，相关试验数据见下表 2。

表 2 点火试验烟温测量表

| 项目 | 一燃室 | 二燃室 |
|----------------|-------|------|
| 烟温 1 (贴壁处) | 430℃ | 435 |
| 烟温 2 (1/4 直径处) | 785℃ | 823 |
| 烟温 3 (1/2 直径处) | 1023℃ | 1055 |
| 平均烟温 | 746℃ | 771℃ |

从试验数据来看，一燃室试验测得的平均烟温为 746℃，高于理论模型的计算值 710℃，经分析是由于在理论模型计算中为简化计算模型而未计入少量煤焦燃烧释放的热量所致；同样，二燃室试验测得平均烟煤烟温 771℃，大于理论模型 691℃，说明二燃室内已有部分碳焦开始燃烧。

二燃室喷出火焰从等离子燃烧器喷口喷出后，在有氧的环境里，由于平均烟温大于煤焦着火温度，未燃尽的煤焦开始充分燃烧：火焰沿传播方向其宽度逐渐变大、燃烧强度逐渐变得剧烈、火焰亮度递增。

通过本次试验验证了大功率等离子体点燃高水分煤粉理论计算模型的合理性，同时通过点火效果观察也直观地得出了 300kW 大功率等离子体能有效地点燃高水分褐煤。

2.经济效益和环保意义分析

2.1.经济效益分析

在燃用高水分褐煤上电站燃煤锅炉上采用 300kW 大功率等离子体点火技术，可实现良好的经济效益，下表 3 为 350MW 燃煤锅炉分别采取三种不同点火及稳燃方式的全年费用的统计、对比：

表 3 350MW 燃煤锅炉采取三种不同点火方式的费用统计

| 对比项 | 单位 | 大油枪点火 | 微油点火 | 等离子体点火 |
|---------------------------|------|-------|------|--------|
| 锅炉单次冷态启炉耗油 | 吨 | 35 | 10 | 0 |
| 锅炉全年冷态启炉次数 | 次 | 2 | 2 | 2 |
| 全年冷态启动耗油量 | 吨 | 70 | 20 | 0 |
| 低负荷稳燃时投运数量 | 台 | 2 | 4 | 4 |
| 低负荷稳燃时单位耗油量 | 吨/小时 | 2 | 0.8 | 0 |
| 低负荷稳燃时间 | 小时 | 300 | 300 | 300 |
| 低负荷稳燃用油量 | 吨 | 600 | 240 | 0 |
| 全年用油量 | 吨 | 670 | 260 | 0 |
| 全年油耗费用(A) | 万元 | 536 | 208 | 0 |
| 用油节约标煤量 | 吨 | 976 | 379 | 0 |
| 用油等效标煤费用(B) | 万元 | 88 | 34 | 0 |
| 点火系统耗电费用(C) | 万元 | 8 | 8 | 15 |
| 点火系统消耗品费用(D) | 万元 | 0 | 0 | 12 |
| 点火系统全年运行费(E) E=A-B+C+D | 万元 | 456 | 182 | 27 |

从上表可以得出：在燃用高水分褐煤的电站锅炉上采用大功率等离子体点火技术，单台炉每年相比大油枪点火方式减少费用 429 万元、相对于微油点火方式减少费用 155 万元；经济效益明显。

2.2.环保意义分析

燃用高水分褐煤的锅炉采用油点火方式，不可避免的未燃尽的燃油与煤粉包裹混合形成难以燃尽的油污；油污进入锅炉尾部的脱硝、除尘及脱硫等装置，对这些设备的性能和安全造成不小的影响，成为机组运行的一个安全隐患，具体表现为：

对脱硝装置的影响：油污沉积在催化剂的孔隙中，

会阻拦 NO_x、NH₃ 和氧进入催化剂内部反应,影响脱硝效率;严重时,油污可能自燃,使催化剂的局部过热烧结而失活,甚至烧毁催化剂。

对布袋除尘的影响:油污或油灰会粘接在布袋上堵塞孔隙,无法清除,使除尘器透气性变差,阻力增大,电耗增加,也降低了滤袋的使用效果。

对脱硫装置的影响:烟气中含有大量的油污和粉尘将会使 GGH 的堵塞雪上加霜。从而增加引风机能耗,如无旁路,严重时必须停机冲洗。同时,因锅炉燃油期间无法投运除尘器,造成脱硫石膏浆液严重污染,增加了石膏浆液的置换量和时间。

燃用高水分褐煤锅炉采用大功率等离子点火技术进行冷态启动时,由于全过程不会产生油污,尾部的除尘、脱硫、脱硝等烟气处理设备可及时投入,烟气的 NO_x、SO₂、粉尘等指标满足《火电厂大气污染物排放标准(GB 13223-2011)》排放要求。同时采用大功率等离子体进行点火及稳燃不仅可有效避免油污对锅炉尾部的脱硝、除尘、脱硫等烟气处理等设备造成不同程度的损害,而且提高了后端的烟气处理设备的使用效率。

3. 结束语

高水分褐煤在实施等离子体点火过程中,煤粉水分析出温度区间低于挥发分大量析出的温度区间。结晶水变为气态过程中会吸收大量气化潜热,从而降低高温等离子体对煤粉的热解作用。采用加大等离子体的功率,克服水分析出吸热的影响,可有效提高等离子体点火的效果。

在进行高水分褐煤项目的等离子体功率选取和等

离子燃烧器设计时,可建立等离子体点燃高水分煤粉理论计算模型,计算出一燃室、二燃室、三燃室(如有)的出口断面的平均烟温,再与对应煤质的煤焦着火温度进行比较,从而判断出是否能形成连续、稳定的火焰。这可作为等离子体能否有效点燃高水分褐煤的重要判断手段之一。

通过建立 1:1 试验点火平台开展点火试验,验证了等离子体点燃高水分煤粉理论计算模型的适用性,并通过点火效果观测,得出了 300kW 大功率等离子体有效点燃高水分褐煤(伊敏煤)。这对拓宽等离子点火及稳燃技术在电站锅炉上的运用场景具有重要意义。

在高水分褐煤电站燃煤锅炉上采用 300kW 大功率等离子体点火技术,不仅可以产生良好的经济效益,而且符合国家对火电机组的环保要求。

【参考文献】

[1]万永周,肖雷,陶秀祥,刘炯天.褐煤脱水预干燥技术进展[J].煤炭工程,2008(8):91-93.

[2]徐通.褐煤水分和挥发分析出特性研究[J].洁净煤技术,2016(3):31-36.

[3]田亚峻,陈宏刚,李凡,等.煤与等离子体的作用机理探讨[J].煤炭转化,1998,21(4):126.

[4]张孝勇,王雨鹏,郭永红,等.等离子燃烧器燃烧特性的数值模拟[J].动力工程,2005,25(6):834-839.

[5]傅维标,张恩仲.煤焦非均相着火温度与煤种的通用关键及判别指标[J].动力工程,1993,13(3):34-58.

基金项目:受华能集团总部科技项目'HNKJ21-HF242 技术研究'资助