

## 生物质热电联产发展现状

樊瑛<sup>1</sup>，龙惟定<sup>2</sup>

(1.同济大学机械工程学院，上海201804；2.同济大学中德工程学院，上海200092)

[摘要]生物质热电联产具有能源供给稳定、温室气体排放量极低等优点，解决了能源消耗与环境相矛盾的问题。本文介绍了生物质原料类型、生物质转换路线及其优缺点；阐述了生物质热电联产的直接燃烧和气化技术的设备、特点、存在的问题和解决的办法以及商业化程度；分析了不同原动机的生物质热电联产系统；简介了芬兰、瑞典及丹麦生物质热电联产的发展状况。鉴于当前的国际能源局势，可以认为生物质热电联产的前景是美好的。

### 1引言

全球变暖引起世界各国对温室气体排放量的关注，《京都议定书》规定了缔约国温室气体排放量的限额。为了实现《京都议定书》的减排目标，可再生能源的开发利用和能效的提高已成为各国减排的主要途径。提高热电部门的供应效率为近期温室气体减排提供了一个机会。传统化石燃料发电系统的平均综合效率数十年以来一直保持在35%~37%，而一般的热电联产系统的综合效率达60%~80%，最先进的热电联产系统的综合效率可达到90%以上。热电联产具有可减少温室气体排放量、降低热电网输送系统的投资、增强能源供给的稳定性等优点，理论上几乎适合于任何燃料，如天然气、煤、柴油、城市固体废弃物(MSW)和生物质等，其中生物质的应用日益受到重视。

生物质原料包括农业废弃物、动物废弃物、林业木材废弃物、专用能源种植物、城市固体垃圾和掩埋气、污水处理生物质气、城市木材废弃物以及食品残渣。目前有机废弃物和残渣一直是主要的生物质资源，但专用能源种植物正逐渐受到重视。用生物质代替化石燃料有许多潜在的优点，具体取决于生物质的来源和用途，通常包括：降低温室气体和其它污染物排放；节省成本；加快地方经济发展；减少废弃物的数量；增强国内燃料供给的稳定性；同时生物质更加灵活可靠。生物质能与其它可再生能源，如太阳能、风能、水能相比，不受气候条件、季节或昼夜变化的影响，且可以储存。另外，其碳中性的特性符合减排、可持续发展的局势。但是，生物质作为燃料，其能源密度较低，这也正是其只能小规模应用或混合燃烧的原因。

生物质热电联产是一个综合的能源系统，系统形式和组成取决于生物质燃料类型和末端用户的需求。生物质原料的燃料特性差别很大，因此在应用过程中所考虑的问题也不同。不同的生物质原料需要不同的收集、储存、运输以及转化技术。生物质的转化路线如图1所示，图中所示为用于热电联产的生物质的转化路线，大体分为二类：直接燃烧技术和气化技术，后者包括固体生物质直接气化、固体生物质高温分解生成生物油后气化，以及湿生物质(如动物废弃物)经厌氧发酵生成生物质气。

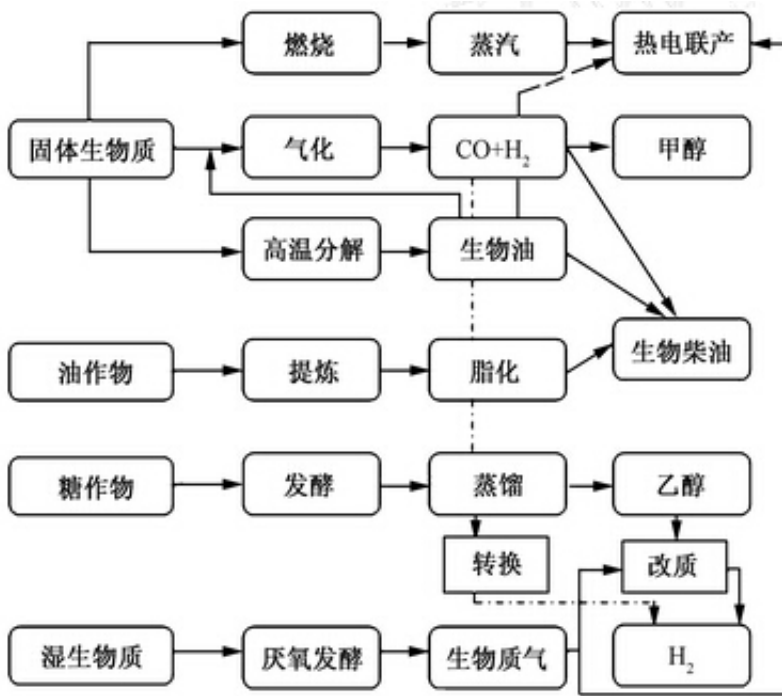


图 1 生物质转换路线

生物质热电联产系统的原动机具有不同类型，如蒸汽轮机、燃气轮机、燃料电池、往复式发动机和燃料电池等。模块化系统出现了一些正处于研发阶段或正在商业化过程中的新技术，如有机朗肯循环(ORC)、“熵”循环、热空气透平以及斯特林发动机。

## 2 生物质热电联产中的生物质转化技术

生物质转化是将生物质转化为可用于发电供热的能源的过程。用于生物质热电联产的主要转化技术为直接燃烧技术与气化技术。

### 2.1 直接燃烧技术

直接燃烧技术可追溯至19世纪，当今依然广泛应用。图2为直接燃烧热电联产系统组成图，常用于生物质燃烧的锅炉为炉排锅炉和流化床锅炉，这2种锅炉完全依靠生物质来维持燃烧或者将煤与生物质混合燃烧。

炉排锅炉根据燃料供给位置的不同分为下送炉排(underfeed)和上送炉排(overfeed)锅炉，前者从炉排下向上供给燃料和空气，而后者的燃料从炉排上供给，空气则由炉排下向上送。上送炉排进一步分为集中式供给(massfeed)和撒布式供给(spreader)，在集中式供给炉排里，燃料被连续地送至炉排的一端，当燃烧的时候，燃料沿着炉排运动，在炉排的另一端清除灰渣；撒布式供给炉排是最普通的炉排锅炉，燃料被均匀地散在炉排面上，空气从炉排下供给。炉排锅炉的效率约为65%。

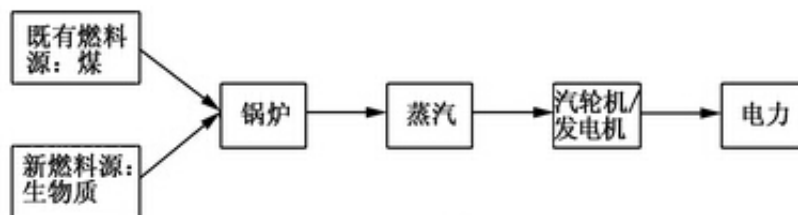


图 2 直接燃烧热电联产系统组成

流化床锅炉分为常压流化床锅炉和带压流化床锅炉。根据流化速度的不同，常压流化床锅炉又分为沸腾(或称为泡沫)

流化

床锅炉和

循环流化床锅炉。

与炉排锅炉相比，流化床锅炉燃烧效

率高，可有效燃烧生物质和低级燃料，SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>的排放量低。流化床锅炉的效率约为85%。

影响生物质燃烧效率的主要因素是生物质的含水量、引入锅炉的过量空气和未燃烧或部分燃烧的生物质的百分比。高热值、低含水量的生物质比低热值、高含水量的生物质效率高。

直接燃烧生物质热电联产系统与燃煤热电联产系统相比，增加了生物质准备工场、生物质处理设备(干燥器、筛选机和研磨机等)、捕集大颗粒粉尘的旋风分离器、处理细微粒的囊式集尘室、干式筛分系统、氮氧化物排放量控制装置以及其它控制设备。直接燃烧包括混合燃烧(cofiring)和专用生物质燃烧。混合燃烧指的是将少量的生物质原料与化石燃料混合作为锅炉的燃料。

生物质燃料的热值占锅炉总热值的5%~15%时，锅炉以及配套设备几乎不用做大的改动就可以运行。混合燃烧具有降低原料成本、改善空气污染物排放量、多样化原料供应以及适于节能改造的优点。但是碱含量高的生物质燃料在燃烧过程中会在换热器等设备表面出现结渣、结垢问题；氯含量高的生物质燃料在燃烧过程中，尤其在高温时，会加速对设备的腐蚀。这些问题可以通过以下途径解决：筛选掉氯、碱含量高的生物质原料，如青草、干草；用燃料添加剂。大多数木制材料与废纸不会出现结渣、结垢和腐蚀问题。将既有锅炉改造成适合混合燃烧的锅炉，附加成本大约占到生物质系统的15%~30%。

## 2.2 气化技术

气

化技术是

指将生物质通过高

温分解或厌氧发酵产生中、低热值的

合成气。合成气的热值在3726~18630kJ/m<sup>3</sup>

之间，具体数值取决于生物质的含碳量、含氧量以及气化器的特性。图3为生物质气化热电联产系统示意图。

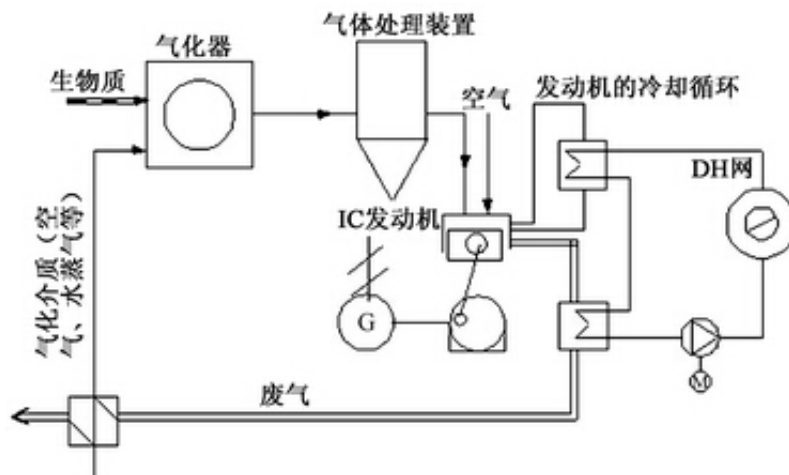


图3 生物质气化热电联产系统示意图

气化器包括固定床气化器与流化床气化器。按照空气气流方向不同，固定床气化器可分为向下送风式、向上送风式与交叉流。向下送风式是指空气通过固定床由上向下流动，合成气在炉排下侧流出；向上送风式是指空气通过炉排由下向上流动，在固定床上侧收集合成气；交叉流是指空气流向与固定床交叉，空气从一侧进入，合成气从另一侧流出。

按照空气气流流速由小到大的顺序，流化床气化器可分为沸腾式、再循环式与夹带式。与固定床气化器相比，流化床气化器结构复杂，造价高。然而，流化床气化器具有较好的灵活性，可处理大范围的生物质原料，甚至包括含水率达到30%的生物质。固定床气化器与流化床气化器的典型参数见表1。

**表 1 固定床气化器与流化床气化器的典型参数**

参数	固定床气化器 (向下送风式)	流化床气化器
燃料尺寸/mm	10~100	0~20
燃料含灰量/(%重量)	<6	<25
工作温度/℃	790~1 400	730~950
调节比	4:1	3:1
容量/(MW 热量)	<5	≥
启动时间	数分钟	数小时
焦油含量/(kg/kJ ×10 <sup>-8</sup> )	<0.5	<0.86
高位热值/(kJ/m <sup>3</sup> )	4 847	5 592

影响气化器运行性能的主要因素包括生物质含水率、气体净化及工作压力。生物质原料中水分的含量会影响到合成气的热值。水分含量越高，合成气热值越低，可利用程度越小。如果水分含量过高且没有外部热源时，气化器不能正常工作。固定床气化器的生物质原料含水率通常要小于20%，流化床气化器的生物质原料含水率通常要小于30%。气化器制成的合成气中含有多种类型的污染物，在用作下游设备的燃料之前，需要进行净化。

如燃料电池、蒸汽轮机、发动机都需要清洁的气体。合成气中的主要污染物及相应的净化方法如表2所示。气体净化过程中损失了显热，目前针对此问题的高温气体净化技术正在研究中。气化器可在常压或高压下运行，高压下产生的合成气无需压缩可直接引入燃气轮机燃烧。厌氧发酵制成富甲烷的沼气技术不在此赘述。

**表 2 合成气中的主要污染物及其相应的净化方法**

污染物	净化设备
焦油	湿式除尘器静电除尘器当板过滤器催化转换器或燃烧
颗粒	旋风除尘器纤维过滤器静电除尘器或湿式除尘器
碱性化合 物	1)将合成气冷却至50℃使碱蒸汽冷凝 2)用旋风除尘器 纤维过滤器静电除尘器或湿式除尘器过滤
氨	催化转换器碳氢化合物改质或湿式除尘器

气化技术与直接燃烧技术相比，具有气体燃料用途广泛、适于处理不同类型的生物质原料以及低排放量的特点，是一项很有潜力的技术。一些研究甚至表明气化热电联产与传统的燃煤热电联产厂经济性相同。

### 2.3 直接燃烧技术与气化技术的商业化程度

固定炉排锅炉直接燃烧技术已有100多年的历史，流化床锅炉直接燃烧技术近年已在欧洲、美国广泛推广，混合燃烧适合于多种类型的锅炉。固定床气化器是正在出现的技术，目前全世界在运行的生物质气化系统的实际数量估计低于25个。流化床气化器的商业化程度比固定床气化器要好。

### 3 不同原动机的综合生物质热电联产技术

蒸汽轮机(steamturbine)、蒸汽机(steamengine)、内燃机、燃气轮机、燃料电池、微型透平都是较成熟的技术。蒸汽轮机中的动力机械为旋转式，而蒸汽机为往复式动力机械，蒸汽机的主要缺点是电热比低，仅为0.1~0.15。内燃机包括柴油发动机和奥托发动机(汽油发动机)，具有单位投资成本低、建设周期短、启闭快、部分负荷时高效、容易维修以及适合多种燃料的特点。这些原动机的详细介绍见文献。直接燃烧锅炉蒸汽轮机生物质热电联产(>5MWel)、模块化直燃锅炉小型蒸汽轮机生物质热电联产(<5MWel)以及以厌氧发酵生物质气为燃料的内燃机、微型透平、燃气轮机热电联产都是已商业化的技术。本节介绍在生物质应用中处于研发阶段或研发示范阶段的新技术。

#### 3.1 有机朗肯循环(Organic Rankine Cycle, ORC)



有机朗肯循环是用有机流体替代水作为工质的朗肯循环(见图4)。ORC可回收地热、太阳能辐射热量和低温余热用于发电，图5为地热ORC发电流程图。ORC工质的选择对ORC过程的使用起着关键的作用，工质类型取决于其用途和余热能级。

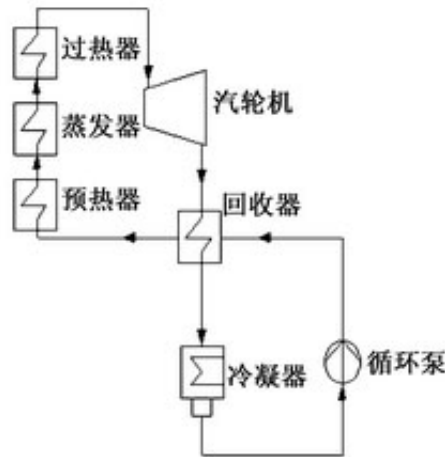


图4 带回收器的ORC

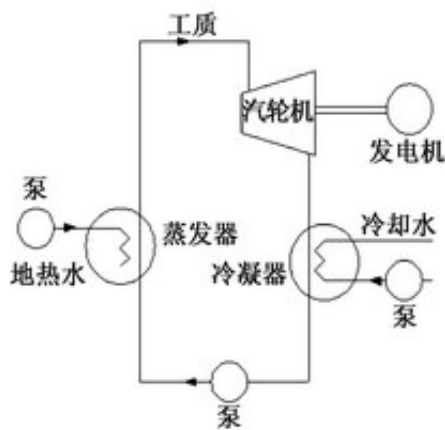


图5 地热ORC热电联产示意图

ORC很适合于用生物质作为燃料的热电联产系统。低温时，有机流体有着更高的循环效率；应用于小规模生物质热电联产厂时，部分负荷下有机流体的透平效率较高，这就是ORC用于生物质热电联产的主要原因。在大多数生物质的应用中，八甲三硅氧烷(OMTS)一直被选为ORC的工质，但是OMTS也有缺陷，高温ORC过程中总热回收效率偏低。

生物质能，尤其是生物质厌氧发酵能是达到欧洲实施可再生能源目标的最具吸引力的选择之一，具有替代化石燃料的潜力。然而，这项技术仅在补贴时，在经济方面才是可行的。图6为一个ORC生物质热电联产系统示意图，将动物废弃物、有机垃圾和能源种植物倒入储存装置，根据需要送入发酵罐制生物质气(富甲烷)，产生的生物质气流入气体储存罐，根据需求调节供气量，气体脱硫后进入大型内燃机(Large Internal Combustion Engine)发电，余热供给ORC系统的蒸发器，驱动系统运行，从而实现同时发电供热。简单地说，该循环为采用内燃机的余热加热的ORC循环。

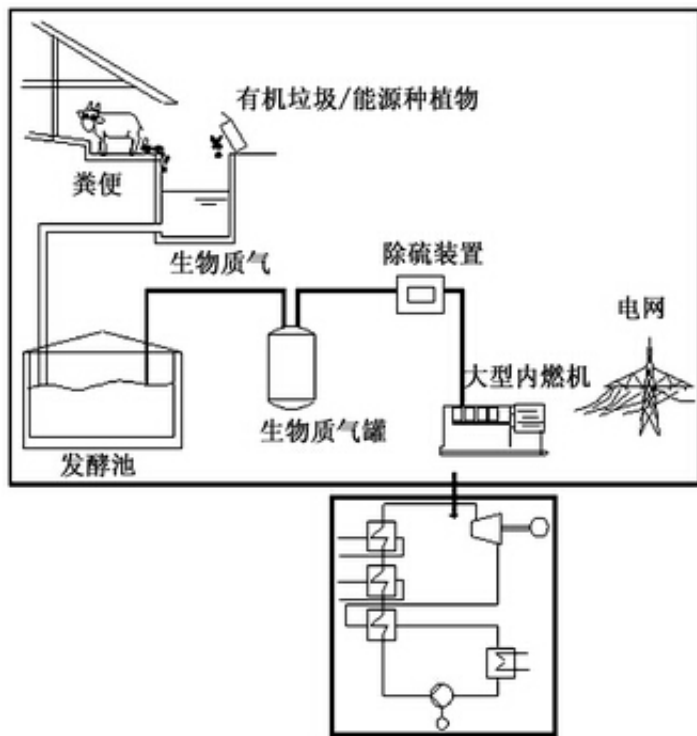


图6 ORC生物质热电联产系统示意图<sup>[11]</sup>

ORC的发电效率为6%~17%，虽然发电效率低，但是它有其它的优点：维修量小、人工费低；有机流体的高压与膨胀蒸汽之间的焓差小，相应地质量流量大，从而减小了间隙损耗；ORC气轮机效率可达到85%以上；显著的部分负荷性能。生物质ORC技术目前还未完全商业化，其发电范围为300~1500kW。

### 3.2斯特林发动机

斯特林发动机是一种外燃往复式发动机。用外部能源加热汽缸内的气体，此气体加热后带压膨胀，驱动活塞做功，然后已释放能量的膨胀气体被冷却压缩准备下一轮加热循环。斯特林发动机的构造主要分成3类： $\alpha$ 型、 $\beta$ 型与 $\gamma$ 型。 $\alpha$ 型发动机由2个成90°夹角的独立汽缸组成，其中一个汽缸被加热，另一个汽缸用水或空气间接冷却； $\beta$ 型由具有热区与冷区的一个汽缸组成，置换剂在汽缸里面； $\gamma$ 型是在 $\beta$ 型的基础上改造的，由2个单独的汽缸组成，置换剂在其中的一个汽缸内。图7显示了每种类型斯特林发动机的外形。

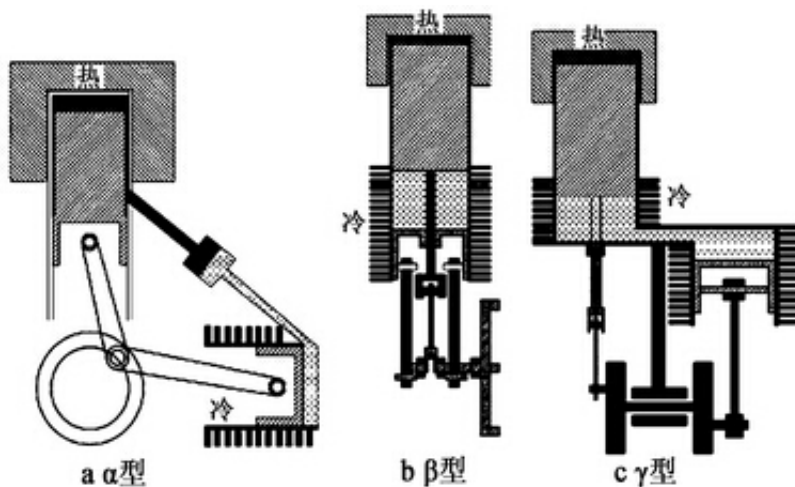


图7 斯特林发动机的类型

斯特林发动机具有相当低的排放量(特别是 $\text{NO}_x$ )、噪音小、运行安静、维修量小。但是斯特林发动机的发电效率相当低，当用天然气作为燃料时，发电效率大约为2

5%~30%；当用固体燃料，如生物质作为燃料时，效率低达15%；但总效率与其它热电联产方式差不多。斯特林发动机适合于住宅、宾馆等场所，其发电量通常低于100kW。德国的SOLO斯特林 GmbH 在2004年已生产了一系列燃气斯特林161发动机。SOLO斯特林161(2~9.5kW<sub>el</sub>；8~26kW<sub>th</sub>)的参数如下。

1) 发动机数据：V2斯特林发动机缸容量为160cm<sup>3</sup>，运行气体为氦，介质最大运行压力为150bar，发动机公称转速为1500r/min。

2) 性能数据：外环最大出口温度为65℃，加热入口性能温度为50℃，输出电力为2~915kW<sub>el</sub>，发电效率为22%~24.5%，输出热能力为8~26kW<sub>th</sub>，制热效率为65%~75%，总效率为92%~96%。

3) 外形尺寸：长为1280mm，宽为700mm，高为980mm，重量为460kg。

4) 燃烧器与燃烧室：燃烧器性能最小为16kW，最大为40kW，燃料为天然气和液态气，系统为无焰氧化系统。

5) 燃料消耗量与排放量：NO排放物为80~120mg/m<sup>3</sup>，CO排放物为40~60mg/m<sup>3</sup>，燃料消耗量(净热值10kWh/Nm<sup>3</sup>)为1.2~3.8Nm<sup>3</sup>/h。

6) 冷却系统：冷却流体体积(内部)为4.121m<sup>3</sup>。

el的生物质气斯特林机、1台35kW<sub>el</sub>的以木柴片为燃料的斯特林机，并在奥地利建成了1个35kW<sub>el</sub>的小规模生物质热电联产厂。现场测试的斯特林发动机发电效率为20%，热电联产的总发电效率为9.2%，综合效率为90%，测试所用木柴片含水率为30%左右。斯特林生物质热电联产是新的技术，目前处于研发示范阶段。

### 3.3 熵循环、热空气透平

熵循环与有机朗肯循环(ORC)相似，而热空气透平就是布雷顿循环，目前都处于研发阶段。这2项技术以及ORC均适用于直燃模块系统(<5MW<sub>el</sub>)，以含水率为20%的柳枝稷作为燃料的系统规模、成本以及系统效率如表3所示。

**表3 直燃模块系统的规模、成本及效率**

类型	规模 /kW	成本 /\$	热电联产总效率/%	发电效率/%
有机朗肯循环	300~3 000	6 000~9 000	67	11
熵循环	100~3 000	1 800~3 800	76	13
热空气透平	50~1 000	2 800~5 500	49	8

### 4 欧洲生物质热电联产技术发展状况

欧盟2010年的可再生能源目标是国内总能源消耗量中可再生能源份额为12%，绿色电力为22.1%。要实现这个目标，即意味着2010年需要大约74Mtoe的生物质，生物质发电量为32Mtoe。

#### 4.1 芬兰

芬兰在热电联产方面的发展居世界领先地位。2007年，热电联产发电量已占到国内总发电量的29%，热电联产在区域供热和热电生产中所占份额如图8所示。芬兰的能源局势主要受到本国的寒冷气候、降低能源进口以及努力降低碳排放量3方面的影响。生物质在芬兰是最大的可再生能源供应源，在2001年占到可再生能源的85%。

为了促进可再生能源的发展，芬兰政府长期资助此方面的研发工作。在芬兰，生物质热电联产厂已有20年的历史，

已建成10多个生物质热电联产厂。如2001年建成的炉排锅炉与蒸汽轮机组合的以树皮、木片和锯末为燃料的Karstula电厂,年发电量为5GWh,年供热量为45GWh;原Kymijarvi电厂经改造后成为气化技术结合燃气轮机的生物质热电联产厂,气化技术使当地的廉价燃料得以利用;建于1992年的以木材废弃物为燃料的Kuhmo电厂采用了循环流化床技术,额定发电量为4.8MW,额定供热量为12.9MW;2002年建成的以泥炭、木片为燃料的Kokkola电厂采用沸腾流化床技术,额定发电量为20MW,额定供热量为50MW;在芬兰的皮耶塔尔萨里,2002年投产的目前世界上规模最大的生物质热电联产厂——AlholmensKraft发电厂,其燃料以废木材、泥炭为主,煤炭和油为辅,常在启动时使用,其总发电量为240MWel,蒸汽产量为100MWth。

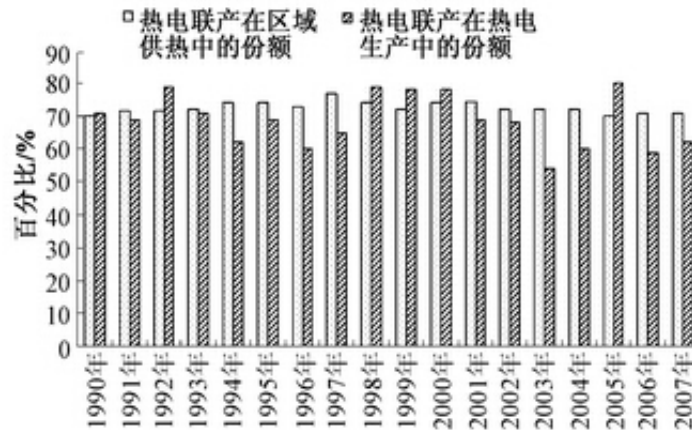


图8 芬兰热电联产在区域供热和热电生产中所占份额

#### 4.2瑞典

瑞典能源主要依靠核能与水能,所以热电联产发电在2001年仅占7%。据瑞典国家能源部门的预测,2010年瑞典总发电量的8%将由热电联产供给。在瑞典,与集中供热热网相连的生物质热电联产厂约有15个,其中3个生物质热电联产厂由于经济原因已停止运行,仍在运行的生物质热电联产厂,如FalunEnergi生物质热电联产厂采用沸腾流化床锅炉,以树皮、木材废弃物和木片为燃料,额定发电量为8MW,额定供热量为22MW;Kristianstad生物质热电厂采用循环流化床,以木材为燃料,额定发电量为13.5MW,额定供热量为35MW。然而,从政治方面考虑,瑞典可能会减少核电厂,同时禁止水力发电的建设,从而会推动生物质热电联产的发展。

#### 4.3丹麦

丹麦热电联产发电量占到其年发电量的70%,在供电供热方面占着重要的份额。丹麦政府能源政策自1986年以来一直推广热电联产,1992年后,能源政策设法鼓励使用本土燃料,对生物质热电联产的示范工程还给予额外补贴。到1999年,丹麦已有10个生物质热电联产厂和10个研发工程在运行。

### 5结论

炉排锅炉与蒸汽轮机相结合的技术是一项标准化的技术;混合燃烧作为一项有效的节能改造技术,商业化程度高,实际应用很成功;流化床锅炉直燃技术近年在欧洲应用广泛,是一项新技术;气化技术是正在出现的技术;模块化生物质热电联产技术因具有使用灵活方便、启停快的优点,尤其适合于远离城市的偏远地带的发电供热,如直燃小型蒸汽轮机生物质热电联产已商业化。

用生物质作为热电联产的燃料,与燃气热电联产相比,系统会出现许多问题,如结垢、结渣和腐蚀等,而且不同的生物质原料会存在不同的问题。然而,碳中性以及能源供给稳定的特性使生物质在可再生能源中占有重要位置。

生物质热电联产在欧洲各国发展状况不同,与国内能源结构及政府能源政策有关。瑞典主要以核能和水能发电,生物质热电联产份额不高;芬兰和丹麦政府支持生物质热电联产,且国内生物质资源丰富,该系统发展很好。

与太阳能、风能等可再生能源相比,生物质能源供给稳定、温室气体排放量接近零、可规模化发电供热、可加强本土资源的利用、降低对进口能源的依赖性、减少国内市场受到国际能源局势的冲击。生物质热电联产在解决能源问题的同时,环境影响很小,符合目前减排的局势,在近些年应具有很好的发展前景。



原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/86962.html>