

核动力应用：为家庭和工业供热

越来越多的国家对利用较小型核反应堆帮助满足工业和城市供热需求感兴趣

1956年10月，联合王国科尔德霍尔电站的第一座核反应堆投入商业运行，向电网提供电力，并向附近的燃料后处理厂供热。40多年后，4台50 MWe的科尔德霍尔机组仍在运行。在瑞典，Agesta反应堆从1963年开始，曾向斯德哥尔摩市郊一个地区提供地区供热用水长达10年。

这两个例子展示了核能的为许多人所不熟悉的一面——即为工业过程和城市需求供热的能力。这类应用开始得很早，实际上在核动力堆开始用于发电时就开始了。

自核动力开发的这些早期岁月以来，反应堆产生的热的直接利用一直在扩大。保加利亚、加拿大、中国、捷克共和国、德国、匈牙利、印度、日本、哈萨克斯坦、俄罗斯、斯洛伐克、瑞典、瑞士和乌克兰等国家发现，除发电外，将核热用于地区供热或工业过程，或用于二者是很便利的。尽管目前全世界反应堆产生的热量用于地区和工业用热还不足1%，但有迹象表明人们对这些应用的兴趣越来越大。

直接利用核热不是新鲜事。毕竟，核裂变过程的结果是在反应堆内产生热。热被通过堆芯循环的冷却剂带出，然后可用于发电或提供工业或场地供热所需的热或蒸汽。但是，电和热在性质和应用方面，以及这两种形式的能量的市场之间有很大差别。这些差别以及核反应堆的一些固有特性，是核动力主要打入电力市场和相对次要地用作直接热源的原因。

能源市场

目前世界总能源消费量的约33%用于发电。这一比例在稳步增长，预计到2015年将上升至40%。其余部分中，用于居住与工业目的和运输方面的热占大部分，其中居住和工业两方面所占比例稍大。实际上整个热能市场是通过烧煤、石油、天然气或木柴来供应的。

能源消费总量正稳步增长，预计这一趋势将深入持续到下个世纪。虽然节能和提高效率的措施已使能源消费增长速率有所降低，但这两种措施的作用还未大到足以将能源消费量保持在现有水平上。

预计在今后二十年内核发电量将适度增长。在运输方面，实际上除了间接地

Bela J. Csik
和 Juergen
Kupitz

Csik 先生是 IAEA 核动力技术发展科高级职员，Kupitz 是该科科长。

更多利用电力外,还预见不到核能的利用。

热能市场是一个公开竞争的市场。尽管核能已用于满足一部分热能需求,但它还未占很大份额。核能在这个市场能够占到多大份额和何时占到这一份额,将主要取决于如何使核反应堆的特性与热能市场的特点相匹配,以成功地与其它能源相竞争。

热能市场的特点

热传输是困难而昂贵的。它需要管道、保温和泵送措施以及相应的投资,传输中会发生热损失,传输设施需要维护,泵送需要能量,这些使超过几公里或最多几十公里距离的热传输难以实现。此外还有很强的规模效应。当要传输的热量减小时,传输热的比费用会大大增加。与热能相比,电力从发电处输送至最终用户是容易且便宜的,即使是几百公里的远距离也是如此。

住宅部门和工业部门仍然是整个热能市场的两个主要部分。在住宅部门中,除炊事用热必须在使用地直接产生外,场地用热的需求可以且常常是通过合理距离内的集中供热系统来满足的。该系统通过一地区传热与配热网,为诸多用户服务。

地区供热。大城市中的地区供热网的装机容量通常在 600 到 1200 兆瓦热 (MWth) 之间,而城镇或小社区的装机容量则下降到大约 10 到 50 MWth。3000 到 4000 MWth 的容量是罕见的。显然,地区供热的潜在市场只局限于冬季较长且寒冷的气候带。例如在西欧,芬兰、瑞典和丹麦是广泛利用地区供热的国家,在奥地利、比利时、德国、法国、意大利、瑞士、挪威和荷兰也利用这一方法,只不过使用程度差些。地区供热系统的年负荷因子取决于需要场地供热的寒冷季节的长短,它最

高可以达到约 50%,这仍然低于机组基荷运行所需的范围。另外,为了确保地区供热网为居民可靠供热,必须提供足够的备用产热容量,这意味着需要相当于几分之一峰值负荷的冗余度和产热容量。地区供热系统所要求的温度范围约为 100 到 150℃。

总的说来,预计地区供热市场将大大扩大。这不仅因为在人口稠密区它在经济上可以同个别供热方案相竞争,而且因为它为减少城区空气污染提供了可能性。虽然燃料燃烧产生的排放物在较大型集中供热设施中可被控制和减到很少,但在燃烧天然气、石油、煤或木柴的个别小型供热设施中做不到这一点。

工业过程。在工业部门内,工业用热的应用范围极广,其所需的热不同,温度范围很大。虽然能源密集型工业中能量输入占最终产品成本相当大的部分,但在许多其它工艺过程中只占很小百分比。然而,能源供应起着极其重要的作用。没有能源,生产就得停止。这意味着,实际上所有工业用户的一个共同特点是,需要确保有高度可靠性和可利用性的能源供应,尤其是对大型工业设施和能源密集型工艺过程,其可靠性和可利用性要接近 100%。

就所要求的热源功率范围而言,大多数工业化国家的情况类似。总的说来,约半数用户要求热源功率小于 10 MWth,另外 40% 用户要求在 10 MWth 到 50 MWth 之间。随着功率要求变高,用户数量稳步减少。约 99% 用户要求在 1 MWth 到 300 MWth 的范围。这些用户占所消耗总热能的 80%。少数经营能源密集型工业生产的大用户占据工业用热市场的剩余部分,其功率要求高达 1000 MWth,个别的功率要求甚至更高。这表明工业用热市场高度参差不齐。

大规模采用由集中热源——为集中在所谓的工业发展区中的一些用户服务的热源——供给的配热系统的可能性目前似乎相当小,但它可能是长期发展的趋

势。与地区供热相反,工业用户的负荷因子不取决于气候条件。大型工业用户的需求通常具有基本负荷的特征。

温度要求取决于工业类型,涉及范围很广,最高可达 1500℃左右。超过 1000℃的用户主要是铁/钢工业。高达 200—300℃之间的低温用户有海水淡化、浆粕与造纸或纺织工业等。化工、炼油、油页岩及砂处理和煤气化等工业则要求温度在 500—600℃的水平。有色金属、烟煤与褐煤的精制和水裂解产氢等工艺过程要求 600—1000℃的温度。

所有用热工业用户同时也用电。所用电热的比例因工艺过程类型的不同而不同,在这些工艺过程中可能不是热就是电起主要作用。所需电力可以由电网提供或者由专用发电厂提供。热电联供是有吸引力的选择。它能提高总的能源效率和提供相应的经济利益。热电联供厂当成为大型工业联合企业的一部分时,便可随时并入电网系统,并向系统提供生产的剩余电力。在其他场合,它们将起确保电力供应的后援作用。这种安排通常是令人满意的。

核热源特性

从技术角度讲,核反应堆基本上是产热装置。在将核热用于地区供热和工业过程方面已有丰富的经验,因此可以认为在技术方面已相当成熟。将核反应堆用作地区供热和工业用热的热源已无技术障碍。原则上任何类型和规模的核反应堆都可用于这些目的。

地区供热网或工业过程获得的产品的潜在放射性污染可以通过采取适当的措施得以避免,如采用具有起有效屏蔽作用的压力梯度的中间热交换器环路。从未报道过用于这些目的任何反应堆发生过涉及放射性污染的事故。

关于温度范围,高达约 300℃,可在轻

水堆和重水堆获得,高达 540℃,可在液态金属冷却快堆获取,高达 650℃,可在改进型气冷堆获得,高达 1000℃,可在高温气冷堆获得。

就地区供热或工业用热的应用而言,有两种基本选择,即热电联供反应堆和只供热反应堆。热电联供反应堆已广泛应用,而只供反应热堆方面的经验却不多。从原理上说,可从热电联供反应堆中获得设计限值内的任何量的热能。当不需要供热时,反应堆产生的热能就用于发电,就是说这种堆的灵活性很高。而只供热反应堆只有一个任务,因为其设计中未考虑发电。

核反应堆的可利用性通常与燃化石燃料的发电厂相似。经验表明,可利用因子可达到 70%至 80%,甚至 90%。通过良好的预防性和预测性检修,可以将非计划停堆的频度和持续时间维持在相当低的水平。不过,反应堆的可利用性和可靠性不可能达到许多大型热能用户所要求的近 100%的水平。因此,燃化石燃料热源要有冗余度。有多台机组的热电联供厂、模块设计或备用热源是合适的解决办法。

核反应堆是资本密集型设施。固定成本部分,在能源最后成本中起主要作用。因此需要以可达到的高的负荷因子作基本负荷运行,以便与其它能源竞争。只有当要供应的热能市场的需求有基本负荷特征,或热电联合市场使热电联供厂能作全面基本负荷运行时,才能实现这一点。

虽然核反应堆能够成为技术上成熟的、安全的、可靠的和环境上清洁的能源来源,但为了商业利用,它们还必须是能在经济上同其它能源来源竞争的。与化石燃料能源相比,核反应堆的特点是投资较高,燃料费用较低。核动力要是没有满足经济竞争性这一条件,也就不会打入电力市场。尽管化石燃料价格水平普遍较低,核动力依然在世界大部分地区保持着竞争地位。如果化石燃料价格如预期的那样上涨,核动力在发电和供热两方面的经济

竞争性将增加。

由于规模效应,通常较大型核电机组的,其经济性较好。这已导致具有大型互连电网系统的工业化国家开发和主要利用大型反应堆。不过,中小型动力堆(SMR)已经并将继续有市场。现有设计的SMR不是大的商用反应堆的缩小型,其设计的意图是要在经济上具有竞争力。

核电厂选址已成为一个主要问题,即使在那些通过启动新项目继续实施核计划的国家里也是如此。最近,在已有核电厂厂址上增建机组成为普遍的做法,而开辟新的核电厂厂址则很少见。经济因素促使核电厂选址应尽可能靠近负荷中心,即使发电厂也是如此。对于热电联供或只供热反应堆,这是必须满足的条件。但是“别在我家后院”(NIMBY)并发症是影响选址的重要因素。它促使人们倾向于将厂址选在较远而又容易到达的地方,以避免潜在的冲突与反对。厂址远离人口密集地,还有助于满足越来越严格的监管要求。先进反应堆设计,尤其是在具有改进了的安全设施的SMR范围内的设计,选址靠近负荷中心也许可为公众接受。它们也可能更容易满足监管要求,而且可将热传输费用保持在合理水平。

在核动力领域与在许多工业企业中不同,长远观点占支配地位。对任何反应堆来说,规划、设计、项目准备工作及许可证审批要花费若干年时间才能完成。反应堆的设计和建造可使其持续运行40年或更长的时间,并可实现预期的经济效益,它们必须在其经济寿期内以高负荷因子运行。还有一些基础设施方面的要求,如果还没有这些设施,则需要时间和大量的开发工作。这些工作只有在长期核计划前景下才是正当的。

核热应用的前景

从核动力发展伊始,就存在将核热源用于地区供热和工业过程的技术可行性。

但是,核热源尚未能真正打入商业热能市场。核热应用的前景主要取决于,核反应堆所能提供的东西可以在哪些场合和以何种方式满足热能市场的需求特性。

地区供热市场。对于地区供热市场,热电并供核动力厂是供应方案之一。在大中型核反应堆情况下,由于热能市场的功率需求有限及负荷因子较低,电力将是主要产品,而地区供热只占生产的全部能量的很小部分。这些反应堆及其选址,应是针对有关电力市场条件加以优化的,而地区供热实际上只是一种副产品。这类动力厂如果建得十分靠近气候寒冷地区的人口中心,便也能满足地区供热需求。俄罗斯、乌克兰、捷克共和国、斯洛伐克、匈牙利、保加利亚和瑞士已这样做,所用的单堆功率不超过100 MWth。预计将来在基本条件类似的地区也可能使用同样的方法。

对于功率范围分别高达300 MWe和150 MWe的小型热电联供反应堆来说,用于地区供热的热能比例将会大一些。但是,假定这些反应堆由于经济原因而以基本负荷运行,预计电力仍然是主要产品。这些反应堆的应用范围与大中型反应堆情况将是相似的。另外,它们还可能有一些特殊用途,如为世界上偏远和寒冷地区的集中负荷提供能量。

只供热反应堆是地区供热的另一种方案。这种应用的规模很小(几MWth),只是作为实验或示范项目。俄罗斯曾在1983年到1985年开始建造2台500 MWth机组,但后来中断。中国正在开发几种设计,并计划不久开始建造1台200 MWth机组。显然,用于地区供热的只供热堆的潜在应用只限于很小规模的反应堆。这些反应堆是专为厂址选在人口集中地区或其附近,使热量传输费用最小而设计的。即使这样,由于要求的负荷因子较小,很难达到经济竞争性,除非在一些化石燃料成本非常高且冬季寒冷而漫长的偏远地区。

总之,核能地区供热的前景是确实存

在的,但限于与地区供热市场和核反应堆有关的特殊条件得到满足的应用。热电联供反应堆,特别是中小型这类堆的前景,主要由于经济的原因看来要比只供热堆好。

工业用热。工业用热市场的特性与地区供热大不相同,尽管有一些共同点,尤其是都需要最短的热传输距离。不过,工业用热用户不一定要位于构成地区供热市场的人口集中的地区内。许多工业用热用户,特别是大用户,可能并通常位于城区以外,常常离城区较远。这不但使核反应堆与工业用热用户联合选址成为可能,而且是人们所希望的——可大大降低甚至省去热传输费用。

对于大型反应堆,常用的方法是建造多机组核电站。当采用热电联供模式时,电力总是其主要产品。因此,这些机组必须并入电网系统,并在电力生产方面最优化。对于 SMR 规模的反应堆,尤其是小型或极小型反应堆,其工业用热产量份额将较大,热甚至可成为主要产品。这将影响机组最优化准则,且可为潜在工业用热用户提供更具吸引力的条件。因此 SMR 作为供应电力和工业用热的热电联供厂的前景,要比大型堆好得多。

若干运行中的热电联供核动力厂,已向工业用户提供工业用热。已实施的最大型项目在加拿大(布鲁斯,重水生产和其它工业/农业用户)和哈萨克斯坦(阿克套,海水淡化)。其它目前只发电的动力堆,也可转换成热电联供堆。如果核动力厂附近有一个对接受此产品感兴趣的大型工业用热用户,那么向热电联供厂的相应转换在技术上将是可行的。不过这将涉及一些追加费用,必须通过成本/效益分析加以论证。虽然可以执行若干这种转换

项目,但总的来说这种方案的前景相当狭窄。

在现有的和感兴趣的工业用户附近建造一座新的核热电联供厂,有更好的前景。甚至更好的做法是搞联合项目,在这个项目下,核热电联供厂和需要工业用热的工业设施作为一个一体化设施来规划、设计、建造,并最终运行。

一般的和先进的轻水堆和重水堆提供低温度范围的热能。这个范围与一些工业工艺过程的要求相适应。在这些工程过程中,海水淡化目前被视为最具吸引力的应用。其它堆型,如液态金属冷却快堆和高温气冷堆也能提供低温工业用热,不过它们还能提供较高温度范围的热能。这就扩大了它们的潜在应用范围。这些堆仍需要经过大量开发工作,才能达到商业成熟性。如果这些堆型能象预期的那样达到商业竞争性,从中长期观点看,它们的前途似乎是有希望的,尤其是在高温工业的应用方面。

只供热反应堆还没有以工业/商业规模用于工业用热的供应。已开发了若干设计方案,并已建造了一些示范堆。虽然许多已经进行的研究表明,经济竞争性似乎是可以达到的目标,但这还有待实践证明。这类只供热反应堆的可能市场,将限于功率很小的反应堆,即低于约 500 MWth 的反应堆。

核能用于地区供热和工业供热的前景与 SMR 应用的前景密切相关。最近的一份 SMR 市场评估报告认为,到 2015 年约有 30 个国家计划建造 70—80 台新机组。它还认为,这些机组的约三分之一预计将专用于核海水淡化。其余的大部分,除提供电能外,还将提供很多热能,预计只有少数几台机组是只供热反应堆。 □