

滨海电厂低温多效海水淡化技术及系统的研究

肖冰

华北电力设计院有限公司，北京市 100120

摘要：水资源短缺已经成为我国经济与发展的主要瓶颈之一，我国沿海地区作为工业化和城市化水平较高的人口和经济的密集地带，其缺水形势更为严峻。低温多效蒸馏（LT-MED）技术是近二十年来在国际国内新发展起来的脱盐技术，低温多效技术相对于多级闪蒸技术，其工作温度较低，材料要求相对较低，负荷调节范围广，运行简单，启停方便，可临时停机，目前国内生产厂家技术也较为成熟，因此低温多效技术更多的应用在海水淡化技术场景。

关键词：滨海电厂；蒸发器；TVC；热法海水淡化；低温多效

DOI:10.69979/3060-8767.24.1.002

1. 前言

水资源短缺已经成为我国经济与发展的主要瓶颈之一，我国沿海地区作为工业化和城市化水平较高的人口和经济的密集地带，其缺水形势更为严峻。

滨海电厂在建设时也越来越多受到水资源的制约，而海滨电厂在生产电能的同时，利用其丰富且廉价的热源和电能，进行海水淡化，不仅可满足其自身用水的需要，而且还可为周边地区提供淡水水源。在推动和利用海水淡化技术方面，电厂有着其得天独厚的有利条件，因此，贫水地区滨海电厂配套建设海水淡化装置已成发展趋势。

2. 海水淡化技术

2.1 反渗透海水淡化技术

反渗透海水淡化系统工作原理就是利用反渗透膜分离技术，对透过的物质具有选择性的薄膜成为半透膜。一般将只能透过溶剂而不能透过溶质的薄膜视为理想的半透膜。该法是利用只允许溶剂透过、不允许溶质透过的半透膜，将海水与淡水分隔开的。在通常情况下，淡水通过半透膜扩散到海水一侧，从而使海水一侧的液面逐渐升高，直至一定的高度才停止，这个过程为渗透。此时，海水一侧高出的水柱静压称为渗透压。如果对海水一侧施加一大于海水渗透压的外压，那么海水中的纯水将反渗透到淡水中。反渗透法的最大优点是节能，它的能耗仅为电渗析法的 1/2，蒸馏法的 1/40。反渗透海水淡化设备技术发展很快，工程造价和运行成本持续降低，主要发展趋势为降低反渗透膜的操作压力，提高反渗透系统回收率，廉价高效预处理技术，增强系统抗污

染能力等。

2.2 低温多效蒸馏（LT-MED）海水淡化技术

原料海水的最高蒸发温度低于 70℃的多效蒸馏海水淡化技术。其特征是将一系列的水平管降膜蒸发器或垂直管降膜蒸发器串联起来并被分成若干效组，用一定量的蒸汽输入通过多次的蒸发和冷凝，从而得到多倍于加热蒸汽量的蒸馏水的海水淡化技术。

低温多效温度低，设备结垢比较轻，除垢等工作量少；海水在换热面的低温侧，如发生泄漏，不污染成品水；运行控制相对简单；负荷调节范围比较大，负荷调节范围在 40~110%之间；单位制水电耗低。

2.3 多级闪蒸（MSF）海水淡化技术

多级闪蒸的工作原理就是将原料海水加热到一定温度后引入闪蒸室，由于该闪蒸室中的压力控制在低于热盐水温度所对应的饱和蒸汽压的条件下，故热盐水进入闪蒸室后即成为过热水而急速地部分汽化，从而使热盐水自身的温度降低，所产生的蒸汽冷凝后即所需的淡水。

多级闪蒸装置具有设备单机容量大、使用寿命长、出水品质好、造水比高、热效率高寿命长等优点。但该装置海水的最高操作温度在 110℃~120℃左右，对传热管和设备本体的腐蚀性较大，必须采用价格昂贵的铜镍合金、特种不锈钢及钛材，因此设备造价高。闪蒸海水在换热面的高温侧，如有泄漏成品水要受到污染，如水质不满足要求则需要强迫停机处理；调试工作量较大，但正常运行平稳，调节控制工作量很少。另外，为了减轻结垢和腐蚀，对进入装置的海水必须加酸和进行脱气（脱除 CO₂ 和 O₂）处理，因而也增加了造水成本。单位制

水电耗大约是低温多效方式的两倍, 一般情况下设备总造价要高于低温多效。

从规模来看: 截至 2023 年底, 全国海水淡化应用反渗透技术的工程 169.6 万吨/日, 占全部工程规模的比重约 2/3; 应用低温多效技术的工程约 80 万吨/日, 约占 1/3; 应用多级闪蒸技术工程规模 0.6 万吨/日, 仅占 0.2%。

从数量来看: 截至 2023 年底, 全国应用反渗透技术的工程 140 个, 占全国海水淡化工程全部数量的 88%; 应用低温多效技术的工程 17 个, 占全国海水淡化工程的比重约 11%; 应用多级闪蒸技术的海水淡化工程仅有 1 个。

3. 低温多效海水淡化技术

3.1 低温多效海水淡化原理

低温多效蒸馏海水淡化装置是将一系列的水平管喷淋降膜蒸发器串联起来, 用一定量的蒸汽输入通过多次的蒸发和冷凝, 后面一效的蒸发温度均低于前面一效, 从而得到多倍于蒸汽量的蒸馏水。其运行原理为:

进料海水在冷凝器中预热后被分成两股水流。一股水流作为冷却水排回大海, 另外一股水流通过进料泵送入低温多效蒸馏装置。在进入低温多效蒸馏装置前, 进料海水需加入阻垢剂, 之后喷淋系统把料液喷淋分布到各蒸发器中的顶排管上, 在沿顶排管向下以薄膜形式自由流动的过程中, 一部分海水由于吸收了在蒸发器内冷凝蒸汽的冷凝潜热而汽化。汽轮机抽出的蒸汽输入到温度最高一效组的蒸发管内部, 在管内发生冷凝的同时, 在管外也产生了与冷凝量基本相同的蒸发。产生的二次蒸汽在穿过了浓盐水液滴分离器, 又引入到下一效组的传热管内, 第二效组的操作温度和压力要略低于第一效组。

这种蒸发和冷凝过程沿着一串蒸发器的各效组一直重复, 每效组都产生了相当数量的蒸馏水, 到最后一效组的蒸汽在排热段被海水冷却液冷凝, 收集为产品水。第一效输入的蒸汽经冷凝后, 用泵经冷却器冷却以后输入到化水车间, 除盐以后, 再进入热力循环。

浓缩海水也逐效流动, 闪蒸冷却以回收其热量。经过冷却之后, 浓盐水经盐水泵排入大海。

蒸发一凝结过程产生的不凝结气体被抽出, 并逐效收集, 最后在冷凝器的富集, 并用真空泵抽出。

3.2 低温多效蒸馏的技术特点

使用低品位的蒸汽热能生产淡水, 电力消耗少, 每

吨淡水耗电可以达到 1.5kWh 以下。

水、电联产, 经济性好, 能源利用率高。目前先进的装置, 生产淡水总能耗可以达到 5~7.5kWh/t。

对海水品质变化的适应性强, 进料海水的预处理简单。

产品水水质好, 含盐量可达到小于 5mg/L。

操作温度低, 避免或减缓了设备的腐蚀和结垢, 设备的使用寿命可以达到 30 年。

设备可在 40~110% 额定负荷范围内正常运行。

多效蒸馏平衡调节时间较短, 一般为 10 分钟左右。

运行维护简便, 设备的化学清洗时间间隔长, 年可用率可以高于 97%。

3.3 低温多效海水淡化汽源

低温多效海水淡化设备对加热蒸汽压力的适应范围比较大, 第一效温度在 65~70℃ 之间, 对应饱和蒸汽压力为 25~32kPa. a; 当蒸汽压力增高时, 为充分利用蒸汽的压力能, 可增设蒸汽压缩机 (TVC), 将后面效的蒸汽压力提高, 输送至前面效, 减少加热蒸汽量, 提高设备效率。但 TVC 蒸汽的压缩比有一定的极限限制, 新蒸汽压力大于 0.4MPa. a 以后新蒸汽压力的增高对 TVC 效率的提高已经极为有限, 因此不一定要要求汽轮机提供很高的蒸汽压力。

3.4 低温多效海水淡化技术制水量和耗汽量

低温多效海水淡化设备蒸汽耗量和设备的造水比相关, 造水比越高, 单位制水耗汽量越小。黄骅一期工程低温多效海水淡化设备造水比为 8.33, 104m³/d 制水设备耗汽量 50t/h, 二期工程 MED 造水比 9.67, 104m³/d 制水设备耗汽量 43.1t/h。造水比越高相对单位制水的设备费用越高, 但蒸汽耗量减少。对于海水淡化制水成本的设备费和蒸汽费, 应存在一个最佳造水比使制水成本最低, 但是近几年来由于设备材料和煤炭价格的变化很大, 对低温多效海水淡化设备的效数和设备价格关系很难确定一个最佳造水比, 需要具体项目具体分析。

3.5 低温多效海水淡化技术抽汽参数对水、电联产经济性的影响

汽轮机最大的热损失在于冷端损失, 热电联产节能在于综合利用了汽轮机的排汽热量, 使热电联产综合热损失降低, 提高热量的利用率。热电联产时外用抽汽焓值均还有一定的发电利用价值, 可利用价值和抽汽的压力成一定的比例关系, 压力越高利用价值越高, 即对应蒸汽的可以利用发电量越高。热电联产的抽汽压力越低,

热电联产的效益越高。在计算制水蒸汽价格时,是以对应蒸汽可发电量的多少为基准计算的,抽汽压力越低蒸汽计算价格越低。

低温多效海水淡化设备造水比越高,单位制水的蒸汽耗量越低。如果采用负压蒸汽不设置 TVC,低温多效海水淡化设备效数最大在 10 效左右,造水比在 8~9 之间。新蒸汽压力高时,可设置 TVC 提高造水比。蒸汽压力提高和蒸汽的焓值增加不成比例关系,压力增高时蒸汽焓值增加有限,因此,采用高参数蒸汽提高造水比,可以降低单位制水的热耗量。

在低温多效海水淡化中高造水比、低热耗和高热电联产效率之间存在一定的矛盾,国内有关专家对此提出了“单位当量电耗率”(EECR)概念,意义如下:

$$\text{EECR} = \text{制水影响的发电量} / \text{制水量} \\ [\text{kWh}/\text{m}^3]$$

国外相关文章也提到制水电耗率当量的概念,两者是一样的概念,即水、电联产中单位制水耗热对发电的影响。

4. 主要系统研究

4.1 海水淡化工艺方案

在确定海水淡化工艺系统、设备容量、制水总量等主要原则时,要综合考虑当地特有的自然条件和依托电厂的优势条件,如:海水水质、场地预留条件、机组抽汽和发电能力、蒸汽价格、电价、淡化装置规模以及技术与安全性要求等因素,要充分发挥水电联产的优势,降低综合能耗,降低海水淡化的制水成本,提高综合经济效益。

对于 MED 工艺,主要考虑的则是悬浮物的影响。对于悬浮物含量较低的原海水(如海湾地区的海水),一般不需进行复杂的预处理。

4.2 加热蒸汽系统

蒸汽进入海水淡化设备管道上设蒸汽关断阀,保证海水淡化设备和供汽母管的隔离。TVC 前后设有蒸汽喷水减温器,TVC 前减温器减温根据蒸汽温度调节喷水量,控制减温后蒸汽温度处于饱和状态,提高 TVC 工作效率,同时使设备温度处于较低的工作状态。TVC 后蒸汽压力进一步降低,TVC 后部喷水减温器再次喷水降温,使进入第一效蒸汽温度处于饱和状态,不使蒸发器产生任何局部超温的现象。

低温多效海水淡化设备设置蒸汽喷射压缩机,利用新蒸汽的压力抽取多效蒸发制水以后的低压蒸汽,经高

压加热蒸汽压缩,提高其蒸汽压力和温度,输送至低温多效海水淡化设备的第一效前,作为新的加热蒸汽。蒸汽喷射压缩机的设置,提高了低温多效海水淡化设备蒸汽的循环利用率,有效的减少了新蒸汽的消耗量 and 提高了海水淡化设备的造水比,降低了制水成本。

4.3 冷却海水系统

冷却海水系统用于向海水淡化设备凝汽器提供冷却水,冷凝最后一效蒸汽;向物料水系统提供物料水;提供成品水和凝结水减温的冷却用水。

海水的外部供应由电厂循环水泵房的海水提升泵送至中间海水池,经中间海水提升泵升压送至海水淡化设备前。交接点设计压力需保证海水经海水滤网、盐水冷却器、凝汽器、排水调节阀后排水压力满足水排放的压力要求。

冷却海水进入系统前首先经过自动反冲洗海水滤网,保证进入海水中没有大的有害颗粒物,保证设备的运行安全。冷却海水经过滤后分为两部分,一部分经凝结水冷却器后排放,冷却凝结水。

另一部分向凝汽器提供冷却水,此部分并列设置有成品水冷却器、海水预热器、和预热器海水旁路调节阀。额定工况冷却海水不需要预热,直接由旁路供应至凝汽器,冬季冷却海水水温低时,投入海水预热器,以提高冷却海水温度,保证凝汽器内正常压力,保证凝汽器后物料水的温度。

4.4 物料水系统

低温多效海水淡化设备物料水系统采用一次平行喷淋进料系统,系统简单可靠。物料水来自凝汽器后冷却海水,系统由管道、物料水升压泵、供水流量调节阀、流量调节缩孔,凝结水换热器等组成。物料水经升压泵升压,经调节阀调节流量后供至蒸发器进料喷嘴。

物料水温度对低温多效海水淡化设备的效率影响较大,如物料水温低于对应效的设计温度较大时,将消耗此一效中加热蒸汽的较大部分热量用于将物料水加热至饱和蒸汽温度,而降低蒸凝汽水量,降低效的效率。特别是高温效,由于热量逐级下传,如增加高温效的物料水温度,可增加相同热量在低温海水淡化设备中的蒸凝系数,提高效率。

4.5 盐水系统

盐水系统用于将各效喷淋蒸发浓缩的浓盐水汇集排放,同时回收利用浓盐水的部分热量加热冷却海水。

盐水排放系统采用逐级回流方式,利用各效间的自

然压差，浓盐水由第一效逐级排放，最终至最后一效，最后一效后浓盐水经盐水泵升压排放。凝汽器凝结水利用设备高差，凝结水自然回流至最后一效。

海水经蒸发器后，盐水被浓缩，含盐量提高，浓缩盐水可用于制盐等工业，有一定的利用价值，根据具体项目确定利用方案或排放。

4.6 凝结水系统

因电厂汽水品质控制要求，汽水系统添加有联氨，致使加热蒸汽中含有少量联氨，海水淡化产品水作为饮用水，对联氨由严格控制，因此电厂海水淡化设备第一效加热蒸汽凝结水和成品水分开排放，形成单独的凝结水系统。

凝结水系统用于排出第一效的凝结水，向加热蒸汽系统提供减温水。TVC 前蒸汽管道的高压减温水由凝结水泵后管道引出，经减温水泵升压后供给。TVC 前蒸汽减温水量由减温流量调节阀控制，控制蒸汽温度处于饱和状态。TVC 后低压减温水由凝结水泵后直接引出，送至减温器。

4.7 成品水系统

成品水系统采用逐级回流排放方式，由第二效开始，成品水逐级向下一级蒸发器排放。进入下一级蒸发器，压力下降，高温成品水闪蒸出部分蒸汽，增加了产水量，热量得到回收，效率得到提高。

各效成品水最终汇集至最后一效的热井，凝汽器布置高度略高于蒸发器，凝结水也自流至最后一效。最后一效成品水经成品水泵升压排出，成品水经成品水冷却器换热减温后输送至厂区成品水母管，设备启动初期当成品水水质不合格时，排放至冷却水排放母管。

4.8 真空系统

低温多效海水淡化设备蒸发器工作在负压真空状态，设备密封不严密会有空气漏入，海水中溶解的不凝结气体会随物料水进入蒸发器，物料水随蒸发器内压力下降，温度提高达到饱和状态，不凝结气体溢出，造成不凝结气体富集。如果不及时将不凝结气体排出，将造成蒸发器压力提高，蒸发器温度偏离设计工况；不凝

结气体的富集还将造成换热效率下降，制水达不到设计值。为使海水淡化设备工作正常，设置真空系统将蒸发器内不凝结气体排出。

真空系统可以采用射汽抽气器方案，也可以采用机械真空泵方案。射汽抽气器方案设备简单，工作可靠，设备投资低，但消耗蒸汽对效率有一定影响。机械真空泵方案，设备投资稍高，电力消耗较大，取消了抽汽蒸汽消耗，对设备效率有好处，根据具体项目确定最优方案。

4.9 化学加药系统

在温度较高或雨后的海水表面易产生泡沫。带有泡沫的海水喷淋到蒸发管表面会影响热交换，因此需要在补给海水中加入消泡剂。消泡剂能降低海水的表面张力，防止和减少泡沫的产生。

在海水给水中有时还应该加入亚硫酸钠，去除海水中残留的余氯，以减少对设备的腐蚀。

5. 结论

低温多效蒸馏（LT-MED）技术是业内公认的第二代热法海水淡化的主流技术，具有淡化水质高，设备构造简单，不受原海水浓度限制，对预处理无特殊要求等特点，已经广泛应用于海水淡化技术。这种技术能够充分利用热力学原理，高效地去除海水中的盐分，生产出高纯度的淡水，可以有效地解决淡水资源短缺问题。

参考文献：

- [1] 孙育文、周军. 低温多效蒸馏法海水淡化技术的应用. 华电技术, 2009.
 - [2] 阮国岭, 尹建华, 赵河立、吕庆春、于开录. 海水淡化技术国内进展及其在循环经济中的应用. 中国建设信息（水工业市场），200703.
- 肖冰（1982- ），女（汉族），山西省长治市人，大学本科，高级工程师，主要从事火力发电、热力、热法海水淡化、风光火储、新能源设计研究等，在电力设计院工作。