

# 能源桩在 LNG 接收站的应用与研究

袁 安（中海油绿能港浙江宁波能源有限公司，浙江 宁波 315000）

**摘要：**能源桩技术是一种创新的建筑节能技术，它利用现有构筑物结构桩基，在桩基内埋设闭合换热管路，与岩土体进行热交换，通过管内流体循环流动，实现热量在循环流体和桩基周围土壤间的传递。这种技术能够大幅减少项目运营成本及建筑能耗，达到降本增效的目的。目前，国内外针对能源桩的理论研究较多，但在 LNG 接收储罐工程中的实际应用较为匮乏，因此有必要加强对能源桩在 LNG 接收站中的应用与研究。本文章围绕能源桩的研究现状进行了文献综述，并深入研究了能源桩在某 LNG 接收站中的应用方案，分析了方案的可行性和经济性，本篇文章对能源桩技术在 LNG 接收站的应用具有重要意义和参考价值。

**关键词：**能源桩；换热管；LNG 储罐；水伴热

在经济迅猛发展的背景下，各行业对能源的需求急剧攀升，传统能源的使用加剧了全球气候变暖，加快可再生清洁能源技术的研发步伐显得尤为迫切。地源热泵作为浅层地热能开发的关键技术之一，凭借其高效节能的特点，在全球范围内得到了广泛应用。但地源热泵系统由于水平布置占地面积较大，而竖直布置面临钻孔成本高昂的问题，限制了大规模推广。能源桩技术的出现为地源热泵的广泛应用提供了新的解决方案。通过在现有的建筑结构桩基内部嵌入多种形状的换热管，利用这些管道内流体的循环流动，有效促进了热量在循环流体与桩基周围土壤之间的转移，能源桩不仅满足了建筑物的承载需求，还实现了与浅层地层的热交换，有效克服了传统地源热泵系统的局限性。但国内外关于能源桩的机理研究和工程应用还相对匮乏，因此有必要加强对能源桩的应用研究。本篇文章介绍了能源桩技术发展现状，并依据实际工程项目分析了某 LNG 接收站项目中储罐工程能源桩系统应用技术方案的可行性和经济性。本研究的成果旨在为后续的实际应用项目及相关工程领域提供坚实的技术支撑与参考价值。

## 1 研究现状

20 世纪 80 年代，奥地利的学者们开创性地提出了桩埋管技术，这一技术巧妙地将地源热泵的传热管嵌入到建筑物的桩基之中，实现了与建筑的完美融合。这一创新不仅替代了传统的钻孔方法，还有效解决了地源热泵占地面积大、初期投资高昂的问题。随后，由 Laloui 等人正式提出了“能源桩”的概念，并在实际施工现场成功应用，取得了令人瞩目的测试结果。2009 年，Bourne 等人深入探究了温度在能源桩桩深和桩径方向上的变化情况。他们发现，当能源桩的直径

为 0.6m 时，桩心与桩壁之间的温差可超过 5℃，这一发现有力地证明了桩体内部传热过程对整个传热特性具有不可小觑的重要影响。2010 年的上海世博会世博轴项目中，安装了 6000 根桩长分别为 25m 和 40m，桩间距约为 4m 至 6m 的桩基埋管换热器，地理管采用 W 形设计，在实际应用中取得良好效果。2018 年，我国制定了行业标准规范（JGJ/T 438—2018《桩基地热能利用技术标准》），进一步推动了能源桩技术的发展。

Alberdi-Pagola 等人通过 Comsol 软件模拟研究了能源桩的热力学性能，结果显示典型能源桩不会影响建筑结构的热应力及应变，但当能源桩平均温升为 6℃ 时，其热力耦合荷载为桩基承载力的 0.8 倍。赵强探究了螺旋形能源桩换热性能与螺距之间的关系，并提出较小的螺距有助于提升能源效率，实现节能效果。随着螺距的增大，系统的平均能效比呈现下降趋势，这一降幅介于 0.77% 至 15.52% 之间。桂树强等人开展了试验，该试验在维持桩顶加载的同时，施加温度荷载，并监测桩身结构的响应。试验结果显示，对桩体实施加热或冷却操作后，会在桩体中产生附加温度荷载。由结构荷载和温度变化共同引起的附加荷载合力，有可能会突破桩基设计规范的限定值。

## 2 工程概况

某 LNG 接收站位于浙江省宁波市，项目建设规模总计达 600 万吨 / 年，包括 6 座 27 万方 LNG 储罐。其中 3#、5# 和 6# 储罐为坐地式储罐，2# 储罐为半桩基半坐地式储罐，1# 和 4# 储罐为全桩基基础储罐。

## 3 储罐能源桩应用

能源桩技术在桩基中埋设换热管，把桩基作为换热器，具备储热换热功能。相比于传统地源热泵，能

源桩技术将换热管预埋在桩基内部，无需设置专门的地下储罐设备，也无需单独钻孔埋管，具有空间利用更优，工程造价更低的优势。目前，能源桩在商业建筑领域应用较为广泛，在 LNG 接收站中的应用却较少。LNG 接收站若能有效应用能源桩技术将会减少运营成本以及能耗，达到降本增效的目的。

某 LNG 接收站 2# 储罐总桩数为 406 根，桩长在 50m 范围内，考虑桩身长度较大能够充分发挥地层储存换热优势，因此能源桩拟建立在 2# 储罐位置。由于 3#、5# 和 6# 储罐为坐地式储罐，为避免超低温 LNG 对储罐地基产生的冻胀等不利影响，本项目利用 2# 储罐能源桩系统和空气源热泵为 3#、5# 和 6# 坐地式储罐的水伴热系统以及厂前区暖通系统供能。

夏季，空气源热泵作为热源，通过内部的制冷剂循环吸收空气中的热量，并将其在冷凝器中释放给内部的传热介质，使传热介质温度升高，然后利用循环泵将加热后的传热介质通过管道汇集至 2# 储罐能源桩内，从而达到了厂前区空调制冷的效果，同时能源桩系统储存了一定的热量。冬季，能源桩作为热源，为 3#、5# 和 6# 坐地式储罐的水伴热系统提供能量。

#### 4 能源桩技术可行性分析

LNG 接收站储罐桩基使得能源桩的应用有了基础条件，换热管布置在 LNG 储罐钢筋混凝土灌注桩钢筋笼内，既能实现热量的交换又能提高桩基础承载力，实现一桩两用。LNG 作为一种超低温物质储存在混凝土全容罐中，其沸点为 -162℃，由于全坐地式储罐地基直接和地面土壤接触，经调研表明，若储罐地基温度过低，将会影响储罐的承载性和稳定性；若储罐地基温度超过一定值时，有可能发生 LNG 汽化，影响其安全性和稳定性。夏季，能源桩吸收接收站厂前区的热量并存储在能源桩内，在冬季将这部分热量提供至全坐地式 LNG 储罐，实现了水伴热系统供热以及厂前区空调制冷的效果，降低了 LNG 接收站的能耗，并且做到了将能源桩这一成熟技术应用到 LNG 接收站新的工程领域。

##### 4.1 热平衡方案

项目中需要冷源主要是夏季接收站内建筑的空调冷用负荷。通常能源桩能代替的空调系统为中央空调系统。项目中需要热源主要是 3#、5# 和 6# 坐地式地式储罐的水伴热系统，由于维持储罐地基温度在 5 摄氏度至 7 摄氏度需要大量热量，采用储罐电伴热系统需耗费较多的电能，而能源桩方案可以达到 LNG 接收站节能降耗的目的。

##### 4.1.1 夏季冷负荷

根据空调机负荷以及宁波当地环境气温范围，考虑空调机组运转时间为 5 月份至 9 月份，空调机组平均负荷值为 60%。

$$Q_1=113\text{kW} \times 4 \div 3 \times 5/12 \times 8760 \times 0.6=329960\text{kWh}$$

##### 4.1.2 水伴热补温

为避免储罐内 LNG 低温对地基的影响，需对坐地式储罐底部提供一定的热量，根据储罐罐底漏热量计算，单罐所需热负荷为 110kW，制热系数 COP 取 4，以自然年为周期分析，一年共 8760h，为维持罐底土壤温度在 5℃ -7℃，粗略估计单罐所需供热时间为 3942 小时，因此，全年冷量

$$Q_2=110\text{kW} \times 3/4 \times 3942\text{h}=325215\text{kWh}.$$

从热量平衡的角度分析夏季冷负荷与冬季所需热负荷基本接近，满足热量平衡要求。

#### 4.2 能源桩数量计算

按照国家住房和城乡建设部 2018 年 7 月颁布实施的《桩基地热能利用技术标准》，能源桩的换热参考值，直径大于 0.6m 的桩，每延米与地基土接触面积可获得 35W 的热量。LNG 储罐桩埋管长度 250m，有效桩长 50.0m。单根桩内换热管采用螺旋型管布置，制热 COP 取 4.0 计算。

##### 4.2.1 冷负荷

夏季空调负荷所需能源桩数量：

$$113\text{kW} \times 4 \div 3 \div 35\text{W/m} \div 50\text{m}=86 \text{ 根桩}.$$

##### 4.2.2 热负荷

按平时工况热负荷 110kW 计算能源桩数，单罐所需能源桩数量：

$110\text{kW} \times 3 \div 4 \div 35\text{W/m} \div 50\text{m}=47$  根。为避免运行后期可能出现的部分埋管故障，设计能源桩数量时考虑 100% 备用，单罐最终所需能源桩数量为 94 根，因此为三座坐地式储罐水伴热系统提供热量所需能源桩数为 282 根，考虑桩基布置方案，实际采用 286 根能源桩。

#### 4.3 能源桩系统布置

本项目 2# 罐最外三圈桩基数量为 190 根，无法满足能源桩布置数量要求，因此采用最外圈桩基与中心桩结合的布置方案，能源桩之间采用集管同程式连接，不大于 5 根能源桩为一组，共划分 62 组支路，然后各支路供水、回水集管分别连接至 4 个分集水小室内的分集水器，能源桩布置图如图 4-1 所示，蓝色桩代表能源桩。

水伴热系统温度传感器分两层布置，上部测温点

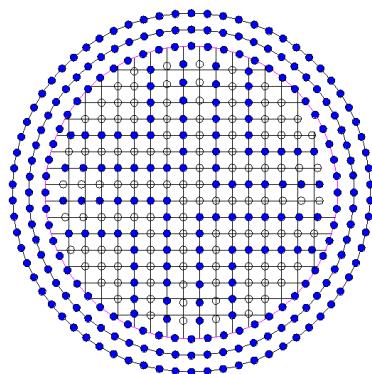


图 4-1 能源桩布置图

在承台下混凝土层，共布置温度传感器 77 个，其中回水侧温度采集点 40 个，在四个换热区域回水管束侧；外部温度采集点 12 个；换热过程温度采集点 24 个，位于四个换热区域中间。最高温度采集点 1 个，位于正中心位置，为隔爆温度传感器，根据此位置反馈温度信号，设置高温报警，当此点温度高于 40℃，则水伴热系统报警显示高温异常。将中心区域径向距离中心 39900mm，近回水管束处温度传感器返回温度平均值作为控制信号，当其小于 4℃时开启水伴热系统，大于 12℃时关闭水伴热系统。上方最外侧设置 1 个低温报警点，采用隔爆型温度传感器，当温度低于 0℃，启动低温报警。下部测温点在混凝土层近土壤侧，主要为验证传热温度场均匀性，均为观测点，温度信号不做控制用。水伴热系统温度监测布置图如图 4-2 所示。

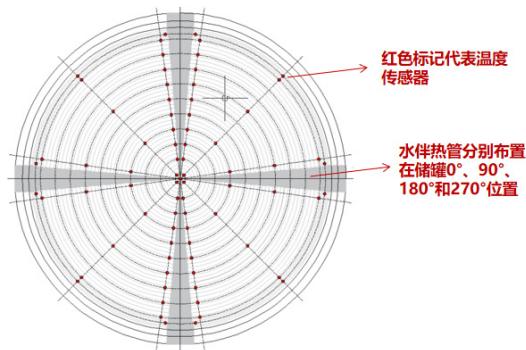


图 4-2 水伴热系统温度监测布置图

#### 4.4 经济性分析

能源桩系统作为额外增加的供能系统，主要增加了埋管部分，地源侧集、分水器及水循环系统，软化水及补水系统等几部分投资，储罐底部电伴热系统和建筑内空调末端系统不需要改变。

因此，能源桩方案的总投入约 650 万元。3 座制热功率为 110kW 空气源热泵机组的设备费用和管道安装铺设费用按 130 万元考虑，考虑空气源热泵机组及安装费用总计 780 万元。

表 1 能源桩系统设备投资估算表

项目	单价	单位	数量	单位	总价(万元)	备注
供暖系统水泵 / 补水 / 集、分水器 / 软化水箱	100	万元 / 套	2	套	200	含备用的相关设备
机房铺材及安装	100	万元 / 座	1	座	100	
室外管网	500	元 / 米	5000	米	250	罐区至机房
室外管网及安装及地面恢复					100	
总计					650	

表 2 能源桩系统初步投资回报估算表

方案	电伴热 + 暖通机组	能源桩 + 空气源热泵
系统热、冷负荷	413.9 (电伴热的电负荷) +52.4	65.0/52.4+65.0
运行时间	3942 小时 +1971 小时	1971 小时 +1971 小时
增量投资 (万元)	/	414
机组 COP	/+3	4/4.5+4
年耗电 (万度 / 年)	431	44
能耗成本 (万元 / 年)	344.8	35.2

能源桩系统年运行耗电 44 万度，按 0.8 元 / 度估算运行电费 35.2 万元 / 年，能耗成本较电伴热 + 暖通机组降低 309.6 万元 / 年。粗略计算投资回收年限 = 投资 / 年节约成本 = 780 万元 /309.6 万元 =2.5 年。

#### 5 总结

本文章针对能源桩在 LNG 接收站中的应用进行了深入研究，初步总结出以下结论：①目前国内对能源桩的理论研究较多，但在 LNG 接收储罐工程中的实际应用较为匮乏，有必要加强对能源桩在 LNG 接收站中的应用与研究。②根据冷热平衡计算结果，浙江 LNG 三期项目储罐能源桩需 286 根 50m 长的螺旋换热管能源桩，就可实现冷热平衡需求。③储罐能源桩的水伴热系统设有温度监测，实现对罐底基础温度的实时监测，确保安全性。④粗略计算能源桩系统投资回收期约为 2.5 年，在本项目中采用能源桩方案的经济性较好。

#### 参考文献：

- [1] 张鹏, 高晓强. 唐家会煤矿矿井水余热利用技术 [J]. 建井技术, 2020, 41(1):30-33.
- [2] 赵强. 螺旋埋管能源桩换热器的传热研究 [D]. 济南: 山东大学, 2018:52-65.
- [3] 桂树强, 程晓辉. 能源桩换热过程中结构响应原位试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6):1087-1094.