预保冷技术在 LNG 低温管道的应用及前景分析

刘　靖　刘　淇（延长石油天然气股份有限公司，陕西　延安　716000）

摘　要：天然气是目前使用最为广泛的清洁能源之一，在工业、交通、民用、发电行业得到应用，预保冷技术作为 LNG 低温管道中的重要环节，可以有效减少环境热量传入管道内，确保了低温管道冷量不散失。文章结合实际案例，从多个层面分析预保冷技术在 LNG 低温管道中的具体应用，以及对预保冷技术在生产生活应用前景，以此来提升深化预保冷技术在 LNG 低温管道中的实际应用，提高了企业生产的经济性。

关键词：预保冷技术；LNG 低温管道；实际应用；未来前景

0 引言

在 LNG 生产储运过程中，保冷效果的好坏不仅关系到整个设备的输送效率，而且对装置的安全生产也有至关重要的影响。为了保证各地区能够获得稳定的 LNG 供应，合理调配区域资源，需要增加 LNG 接收站的建设。因此，相关人员需要加强预保冷技术的使用，完成良好的管道保冷工作，从而提升接收站的使用性能，服务于生产生活。

1 LNG 低温管道保冷基本情况

在实际生产生活中，液化天然气（LNG）的使用在客观上缓解了能源急缺的现状，在一定程度上平衡了能源供需的紧张局面 [1]。LNG 接收站的建设为 LNG 的高效利用提供了载体，低温管道的建设是 LNG 接收站的关键环节之一，相关人员应当加强管道保冷，保证液化天然气的质量。

目前，常用的 LNG 管道保冷技术有堆积绝热、真空绝热等。堆积绝热方法较为传统，在管道外侧敷设绝热材料，从而减少管道冷量的损失。真空绝热将绝热结构设置为密封夹层，利用真空结构减少热量的传入。上述两种保冷方式有着各自的优缺点。堆积绝热方式需要占用较大空间，通过大量绝热材料完成保冷，效果略差于真空绝热，但是该方法的施工难度较低，资金成本较小，后续维护方便。真空绝热方法的发展历程较长，有着较为成熟的技术体系，空间占用小，有着较好的保冷效果，但是施工成本相对较高。

2 预保冷技术在 LNG 低温管道中的实际应用

2.1 材料准备

在 LNG 低温管道中使用预保冷技术时，相关人员需要事先完成材料准备工作，为预保冷技术的高效利用奠定基础。现阶段，常见的堆积绝热材料为多孔结构，如硬质聚氨酯、泡沫玻璃、弹性泡沫材料等。表 1 展示了预保冷技术可用材料的性能要求。准备预保冷技术所用材料时，相关人员需要科学确定材料参数，加强采购环节的把控，在根本上保证材料质量，为预保冷技术的应用创造良好条件。

表 1　预保冷 PIR 材料性能要求

序号	项目	性能参数
1	密度 /（$kg \cdot m^{-3}$）	45~65
2	导热系数 /[W ·（$m \cdot K^{-1}$）]	≤ 0.024（23℃）
3	闭孔率 /%	≥ 95
4	吸水率（体积含量）/%	≤ 5
5	水汽渗透率 /[ng ·（$Pa \cdot s \cdot m$）$^{-1}$]	≤ 5.5（23℃，相对湿度 50%）
6	压缩强度 /kPa	≥ 300（23℃）
7	抗拉强度 /kPa	≥ 300（23℃）
8	线热膨胀系数 /[10^{-6}m ·（$m \cdot K$）$^{-1}$]	≦ 70（23~-165℃）
9	氯离子含量 /（$\mu g \cdot g^{-1}$）	≦ 60
10	pH 值	5.5~7.0
11	火焰蔓延系数	＜ 25
12	工作温度范围 /℃	-200
13	氧指数 /%	≥ 30

2.2 浇筑准备

完成材料准备工作之后，相关人员需要按照 PIR 绝热系统施工工艺的基本要求和流程设置完成 PIR 浇筑工作前的准备环节。

2.2.1 安装高密度 PU 止滑环

高密度止滑环在预保冷技术中有着较为关键的作用，施工人员在安装高密度止滑环时，需要将其放置在不锈钢管的中心位置，并确保止滑环的高度至少高于第一层 PIR 厚度的 6mm 以上 [2]。通常施工人员需要参考保冷管道的管径确定止滑环的数量，利用低温粘接剂将止滑环贴在管道中心位置，并使用金属绑带临时固定，在 12h 之后解开金属绑带，以免 PIR 在管道上产生位移。

2.2.2 包裹玻璃针刺毡

安装止滑环后，施工人员需要在未安装止滑环的其他部位包裹 6mm 左右的玻璃棉针刺毡，使其在

LNG 低温管道表面形成一层隔离层。在此基础上，施工人员需要借助 PVA 不透气铝膜以机械性缠绕包裹的方式将玻璃棉针刺毡的厚度压缩至 4mm 左右，以此吸收低温应力。

某工程在 LNG 长直低温管线中使用了管线预保冷技术，通过四层防护达到预计的绝热保冷效果。

2.3 材料浇筑

PIR 材料的浇筑是预保冷技术的重要工序，施工人员需要在 PIR 发泡机中添加原材料多元醇组合料和异氰酸酯并充分搅拌，随后将混合料浇筑在 PVA 铝膜上。第一层 PIR 浇筑的高度应高于已经安装的止滑环，便于后续修整，统一第一层 PIR 材料与止滑环的高度。通常情况下，施工人员需要完成多层 PIR 浇筑。在此过程中，施工人员需要在每层材料浇筑中预留管段两端 300mm 左右的不发泡距离，便于后续焊接工作的进行。浇筑时，PIR 材料的容重应控制在 45~65kg/m^3 范围内，每层浇筑厚度控制在 50~65mm 左右。在 PIR 材料发泡成型后，施工人员需要使用切割机完成浇筑层表面的切割打磨以及平整工作，确保每层 PIR 材料的厚度符合工艺要求。切割后，相关人员需要清理多余粉末，提升 PVA 铝膜的防潮效果。图 1 为工作人员浇筑 PIR 材料的现场施工图。该工程在应用预保冷技术时使用剪力阻隔片系统原理，将转动设备可以承载的管道长度延长至 12m，借助机械设备的旋转完成 PIR 材料的浇筑和多层发泡保冷。

图 1　浇筑 PIR 材料

2.4 玻璃钢外护

施工人员需要将已经完成 PIR 浇筑的管道管段放置在玻璃钢外护设备上，利用设备自动化生产性能完成玻璃钢外护的自动缠绕生产。一般玻璃钢外护材料为聚酯玻璃钢树脂系统结合复合玻璃纤维短切毡和表面毡，利用自动化设备生产线完成连续浇筑。玻璃钢外护材料缠绕在 LNG 低温管道表面之后，施工人员需要使用紫外线灯照射外护材料直至其完全硬化，测试机械强度，确保玻璃钢外护达到规范标准。

另外，相关人员需要检查玻璃钢外护表面的浇筑质量，保证不存在结构瑕疵后完成 LNG 低温管道预保冷管段两端的密封。施工人员需要将胶水均匀涂抹在 PIR 两端的阶梯口，平整铺贴网格布，再次涂抹胶水，随后使用气阻材料完成 PIR 端部的密封。需要注意在涂抹胶水时，施工人员应当将胶水覆盖在管道上至少 20mm，以保证密封质量。

2.5 现场保冷收口

完成 PIR 瓦片的安装工作。现场安装 PIR 瓦片时，施工人员可以使用 SHC105-01 涂抹接缝处，中间层的瓦片接缝处则使用 PVA 铝膜，通过粘贴铝膜增强管道的不透气性。内层瓦片通过不锈钢带固定，使其更加牢固。涂抹胶水时，施工人员应尽可能保证胶水的均匀性，合理搭配玻纤网格布，以达到较好的防潮效果。

科学设置收缩缝。施工人员需要按照相应施工规范和技术标准完成预保冷管段的安装与焊接工作，采用传统 PIR 瓦片系统完成保冷收口。在收口工序中，施工人员需要完成三层 PIR 保温系统的设置，经过长期施工实践的验证，相关人员应当将玻璃棉压缩 50% 后放入第一层缝隙中，第一层缝隙的宽度通常为 100mm，第二、第三层的伸缩缝为 50mm 宽 [3]。在最外层的膨胀收缩缝隙中，施工人员需要借助丁基橡胶片完成密封，搭接 100mm，并在两侧的主防潮层上绑扎 SS316 绑带，进一步固定。

2.6 安装镀铝钢板外护

防火镀铝钢板外护是预保冷技术以及预保冷系统中必备的关键技术设施，施工人员在设计预保冷系统时必须配备符合施工技术规范的镀铝钢板作为金属外护，并根据保冷系统规范中的规定确定钢板的具体厚度。

在伸缩缝位置安装的钢板外护应为带状金属板，宽度为 250mm 左右，相邻的镀铝钢板应当使用不锈钢带固定，另一侧使用胶水密封。选用的防火镀铝钢板应当具备表面光滑、平整、无凹陷等特征，确保钢板在预保冷技术的实际应用中能够发挥有效作用。绑扎时，施工人员可以将相邻两道不锈钢带固定的距离控制在 4m 左右，根据钢带尺寸选择合适的不锈钢扣完成串接。在防火镀铝钢板外护中，常见的使用材料为Ⅱ型镀铝钢板，按照 ASTM A463-T2 300 规范的具

体要求调整钢板参数，达到最好的保冷效果。

2.7 安装不锈钢带及钢扣

安装防火镀铝钢板外护之后，施工人员需要完成不锈钢带以及钢扣的安装工作。不锈钢带以及钢扣应由 AISI 316 L 型冷轧材料制成，对金属保护层进行有效固定，保护绝热层，提升 LNG 低温管道的保冷效果，减少冷量流失。通过总结实际工作经验，完成保冷后的外径在 600mm 以下时，应当使用 13mm×0.5mm 的不锈钢绑带；保冷后外径大于 600mm 时则使用 19mm×0.5mm 的不锈钢绑带。为了增强预保冷技术的规范性、保证保冷效果，钢扣厚度应为 0.8mm。按照管道以及设备的绝热外径选择合适的不锈钢带以及钢扣的尺寸并完成安装工序后，施工人员需要使用硅胶枪处理金属外护搭接缝的内侧，进一步填充金属外护中存在的缝隙，增强密封性，避免水汽、杂物等进入。在保冷绝热材料的最外层，施工人员需要设计主防潮层，设置厚度至少为 1.2mm 的总干膜，根据 LNG 低温管道的保冷绝热需求和已有保冷措施科学设置玻璃布，在最大程度上提升预保冷技术的效果。

该工程在低温不锈钢管上安装了止滑环，利用玻璃纤维针刺毡制作隔离层，设置了连续无缝保冷层、隔汽防潮层等。

2.8 设置低温管道气阻层

在之前的 LNG 低温管道预保冷技术处置环节中，施工人员在管道两端预留了阶梯式的 PIR 材料，对于这一部分，施工人员需要使用气阻层完成保冷。预保冷技术中常见的气阻层为双组分黑色胶泥状材料，施工人员需要将容积相同的两组材料分别放置在相同的两个塑料容器中，随后搅拌，经过 1min 左右的均匀混合后使用带齿镘刀均匀涂抹，网格布包裹并嵌入胶泥中。施工人员需要在网格布表面再次覆盖胶泥，直至网格布的网格被覆盖，无法清晰辨别。通常湿膜的厚度应当大于 2mm。气阻层的主要作用是完成管段端部的密封，保护保冷层，减少雨水、杂物等的进入。

2.9 完成局部破损部位修补

施工人员需要使用砂纸打磨破损部位，将其制成粗糙表面，利用清洁溶剂完成粉末和油脂的清洗工作，在破损处涂刷粘接剂，并在其未完全干透时在被修补部位张贴大小合适的紫外线硬化比例钢卷材，使用滚轮压实。施工人员需要在被修补部位完成防雨保护措施，涂刷防潮层材料，在其表面干燥后填充 PIR，覆盖 PVA 复合铝膜，起到保护作用。

3 预保冷技术在生产生活应用中的未来前景

管道保冷效果直接影响着 LNG 接收站的工作质量以及生产安全性，相关人员在使用以及研究预保冷技术的过程中应当重视保冷效果测试[4]。目前在低温管道保冷效果测试中常用的测试方法有表面温度法、热流计法等，相关人员需要根据现有各测试手段的优缺点完成技术手段的针对性提升。以热流计法为例，该测试方法的测试较为直接，所得数据处理难度较低，但测试时间较长，需要耗费大量时间完成装置安装，在多点测量中的效果较差。因此，在未来的研究和应用过程中，研究人员可以将重点放在测量时间的缩短上，在保证测试准确性的前提下在最大程度上提升测试速度，并强化设备研究，降低测试装置的安装难度和使用门槛，并重视多点测量的实际应用。

另外，经过大量工程实践活动的检验，预保冷技术在非直管段管线上的保冷应用效果较差，如弯头、三通等。在上述非直管段管线中，预保冷技术的实际保冷效果低于预期水平，往往需要额外采取相应的保冷措施以达到标准的保冷效果。因此，相关人员应当加强非直管段管线保冷效果的提升，并重视复杂管线的保冷工作，提升保冷质量。

4 结论

相关人员在 LNG 低温管道中使用预保冷技术时应当重视材料准备工作，完成高密度 PU 止滑环安装以及玻璃针刺毡包裹等浇筑前的准备工作。在此基础上，相关人员需要完成 PIR 浇筑，加强玻璃钢外护，开展现场保冷收口作业，安装防火镀铝钢板外护、不锈钢带及钢扣，设置低温管道气阻层，完成局部破损部位修补，通过多道工艺完成预保冷技术的实施，强化 LNG 低温管道性能。

参考文献：

[1] 李云山，沈小兵，唐胜波，等 .LNG 换热器用低温管道保冷结构与设计 [J]. 当代化工研究 ,2020(05):112-113.

[2] 秦玉良，池旺 .LNG 接收站低温管道预保冷技术应用研究 [J]. 山东化工 ,2023,52(08):181-184.

[3] 刘富鹏，刘启松，孙紫麾，等 .LNG 低温管道一体化预保冷技术 [J]. 石油和化工设备 ,2021,24(07):35-37+43.

[4] 胡超，杨敬杰，吴仲昆，等 .LNG 接收站低温管道保冷安全及效果评价 [J]. 石油化工设计 ,2020,37(02):44-47+6.