

doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2026.02.005

# 燃气场站压力能与太阳能 耦合利用系统能流分析及工艺研究

张晓瑞<sup>1</sup>, 郭帅杰<sup>1</sup>, 杜紫薇<sup>1</sup>, 王洪建<sup>1</sup>, 钟婉灵<sup>2</sup>

1.北京市煤气热力工程设计院有限公司; 2.广东石油化工学院

**摘要:** 城市燃气的调压场站蕴含着丰富的压力能与太阳能, 其高效利用有利于实现燃气场站的零碳排放。但是在天然气压力能与太阳能耦合利用系统的规划建设过程中, 常常面临系统组合复杂、方案多变、缺少理论体系指导等问题, 业内对不同系统组合的适用场景也缺少共识。本文通过分析天然气压力能与太阳能耦合利用系统的能流情况, 根据系统的主导能量类型、电力利用方式、冷能消纳利用方式, 将系统分为电力主导型系统与冷能主导型系统两大类, 以及电力并网型系统、电力上网型系统、电力-冷能自消纳系统、冷电综合外送型系统与单冷能外送型系统5小类。分析了不同系统的特点与适用场景, 提出电力并网型系统与电力-冷能自消纳型系统受政策、周边市场等因素影响小, 是未来的主要发展方向。本文的成果为燃气场站压力能与太阳能开发利用奠定了良好的理论基础。

**关键词:** 天然气压力能; 太阳能; 耦合利用; 系统分类; 规划

## Energy Flow Analysis and Process Research on a Coupled Utilization System for Pressure Energy and Solar Energy in Gas Stations

ZHANG Xiaorui<sup>1</sup>, GUO Shuaijie<sup>1</sup>, DU Ziwei<sup>1</sup>, WANG Hongjian<sup>1</sup>, ZHONG Wanling<sup>2</sup>

1. Beijing Gas and Heating Engineering Design Institute Co., Ltd.;

2. Guangdong University of Petrochemical Technology

**Abstract:** Urban gas pressure regulation stations possess abundant pressure energy and solar energy resources. Their efficient utilization is conducive to achieving zero carbon emissions from gas stations. However, during the planning and construction of coupled utilization systems for natural gas pressure energy and solar energy, challenges often arise, including complex system configurations, variable schemes, and a lack of guidance from a theoretical framework. The industry also lacks consensus on the applicable scenarios for different system combinations. By analyzing the energy flow of coupled utilization systems for natural gas pressure energy and solar energy, this study categorized the systems into two main types, namely power-dominated systems and cooling energy-dominated systems, based on the dominant energy type, electricity utilization method, and cooling energy consumption/utilization method. These were further divided into five subcategories: grid-connected power systems, grid-fed power systems, self-consumption power-cooling systems, comprehensive external cooling-power delivery systems, and external cooling-only delivery systems. The study analyzed the characteristics and applicable scenarios of different systems and proposed that grid-connected power systems and self-consumption power-cooling systems, being less affected by policies and surrounding market factors, represent the main future development directions. The findings of this study lay a solid theoretical foundation for the development and utilization of pressure energy and solar energy at gas stations.

**Keywords:** natural gas pressure energy; solar energy; coupled utilization; system classification; planning

基金项目: 内蒙古自治区科技计划(项目编号: 2023YFHH0032, 项目名称: 耦合天然气压力能与太阳能燃气场站新型供电系统技术研发)

[第一作者简介] 张晓瑞, 道石研究院总工程师, 高级工程师, 从事天然气与氢能储运与综合利用相关研究工作。

## 1 引言

天然气在能源系统低碳转型中承担着关键过渡功能, 2024年全国天然气消费量达4 260.5亿 $\text{m}^3$ , 预计到2035年—2040年我国天然气消费量达到峰值, 总量约6 200亿 $\text{m}^3$ <sup>[1]</sup>, 增长潜力巨大。

城市燃气场站需要将天然气由高压降至低压, 调压过程中蕴藏着丰富的压力能资源, 目前尚未得到有效的利用<sup>[2]</sup>。同时, 部分地区的燃气场站太阳能资源丰富, 发电形式简单。发展燃气场站的压力能与太阳能综合利用技术, 可以显著提升我国天然气资源的综合利用能力, 落实节能减排的基本国策。

我国对天然气压力能回收利用有强而有力的政策支持。《中华人民共和国节约能源法》(2020年修订)提出: 重点用能单位应当采用高效节能设备, 对余热、余压等进行综合利用, 鼓励开发、利用余热、余压、煤层气等新能源和可再生能源。《北京市“十四五”时期节能规划》提出深化工业余能回收利用, 重点推进钢铁、化工、建材等行业工艺系统节能改造, 实现高炉炉顶余压发电(TRT)、螺杆膨胀机发电等技术的普及应用。《内蒙古自治区碳达峰实施方案》提出在工业领域加强工艺余热余压回收。

目前天然气压力能主要通过发电与制冷两种形式回收利用<sup>[3]</sup>。1998年, 美国加利福尼亚圣迭戈天然气门站安装了1台制冷膨胀机发电机组, 实现管道天然气的压力能发电并制冷。2003年日本东京电力公司建设了1座天然气压差发电小型发电站, 发电功率7 700 kW<sup>[4]</sup>。2009年, 英国某公司与国家电网合作, 成功将微型涡轮膨胀机安装在高压天然气管网上, 发电功率100kW。我国的天然气压力能回收技术研究起步较晚, 目前尚处于商业化导入阶段<sup>[5-8]</sup>。2013年深圳燃气集团开发了求雨岭压力能发电制冰项目, 是我国首个公开报道的天然气压力能利用项目<sup>[9]</sup>。2022年中国石油西南油气田公司某天然气净化厂压差发电项目正式投运, 项目总装机容量达710kW<sup>[10]</sup>。

目前, 针对燃气场站压力能与太阳能耦合利用技术的研究还处于理论阶段, 集中于系统构型构建、热力学模拟与技术经济性分析等方面。李建等<sup>[11]</sup>公开了一种基于太阳能加热的天然气压差发电转换机组的专利, 以克服发电系统稳定性差、降压过程中冷量浪费

严重以及发电效率低、经济效益低等缺陷。邸建军等<sup>[12]</sup>提出一种天然气调压站与太阳能综合发电系统的构建方法, 将太阳能集热系统、有机朗肯循环发电系统、天然气压差发电系统耦合, 形成联合循环发电系统。Farzanhed-Gord等<sup>[13]</sup>人针对典型燃气场站的研究表明, 在燃气场站中使用太阳能热能每年可提供27 011美元的利润, 成本为144 000美元, 回收期 and 贴现回收期分别为5.5年和8年。

由于涉及的能量种类繁多、转换路径多样, 燃气场站压力能与太阳能耦合利用系统在规划设计阶段需要考虑诸多可能的系统组合。而且缺少理论指导与系统类型划分共识, 需要逐一分析各种可能的系统组合, 导致规划设计单位与建设单位前期工作量极大, 业内也对不同系统组合的适用场景缺少共识。

本文根据系统主导能量类型、系统是否外送能量、典型用户等因素, 结合系统能流分析对燃气场站压力能与太阳能耦合利用系统进行了分类, 然后分析了不同类型系统的适用场景, 搭建了系统规划的理论框架, 提出了未来的发展方向。

## 2 系统能流分析

燃气场站压力能与太阳能耦合利用系统的能量输入与输出品类繁杂。系统能量输入包括天然气压力能、太阳能、天然气化学能、电网电能、空气能以及可能的周边工厂废热, 能量输出则包括场站用电与用热、发电上网、对外供冷等。图1展示了可能的输入与输出能流方向。可以看出, 品类繁多的能量输入与输出使系统设计非常灵活, 对应的, 在系统规划设计阶段需要考虑诸多可能的系统组合。

燃气场站压力能与太阳能耦合利用系统产生的能量包括电能、冷能两种, 以主导能量类型为系统类型划分原则, 可以将系统分为电力主导型系统、冷能主导型系统两大类, 两者的主要差别在于能否资源化利用压差发电的伴生冷能。两大类系统的进一步细分则需要详细分析可能的能量流动情况, 下文通过分析系统产出电能与冷能的消纳利用途径, 为系统类型细分提供支撑。

### 2.1 电能的利用途径

电能是一种高品质的能源, 在燃气场站中有多种

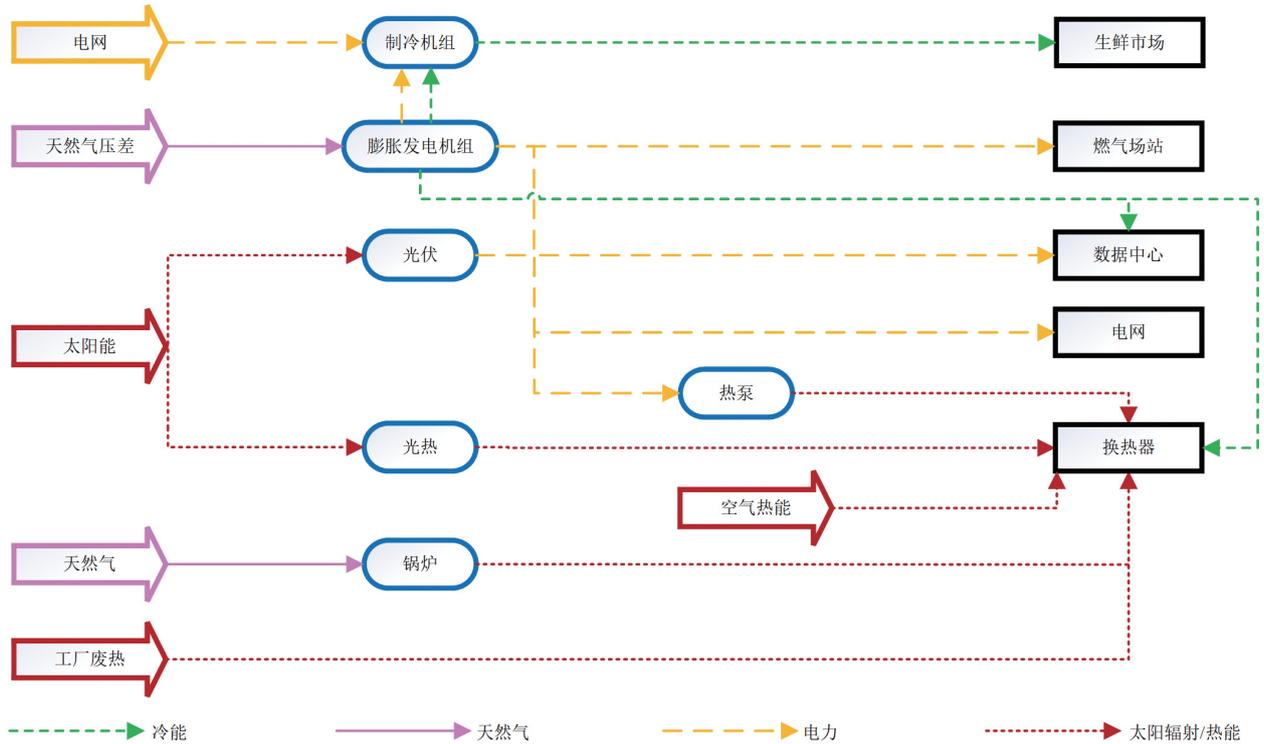


图1 燃气场站压力能与太阳能耦合利用系统能流图

用途，表1列出了天然气压力能发电与光伏发电的利用途径。

表1 电能的利用途径

序号	利用途径	能源利用形式	用户
1	替代燃气场站自用电	电能	燃气场站
2	上网外送	电能	外部电力用户
3	通过热泵或电加热方式，加热天然气	热能	燃气场站
4	驱动制冷机组制冷	冷能	周边冷能用户

首先，天然气压力能与太阳能耦合发电可以供应燃气场中的自用电，包括生产用电与生活用电。富余电力可以通过电网上网外送，不过能否上网会受到地区政策影响。

其次，天然气膨胀发电后温度会降低，如果天然气膨胀发电后温度低于下游运行工艺要求，需要对天然气进行加热。燃气场站中通常采用燃气锅炉的方式对天然气进行加热，也可利用压力能与太阳能耦合利用系统发出的电能通过热泵或电加热对天然气进行加热。具体的加热方式需要通过技术经济比选确定。

最后，电能也可以送入制冷机组，产生冷能，以冷水或冰块的形式为周边用户供冷。

## 2.2 冷能的利用途径

天然气膨胀发电会伴生冷能，这既是可供利用的能量资源，也是必须考虑消纳的工艺运行约束。

表2列出了天然气膨胀发电伴生冷能的利用途径，其资源化利用方式受周边市场条件制约。比较理想的利用方式是为周边电冷综合用户供能，例如数据中心、医院等。数据中心是燃气场站压力能与太阳能耦合利用系统的理想用户，因数据中心同时需要电力与冷能，用能需求稳定，能源价格承受能力强，对低碳化供能需求高。另外一种利用方式是制冰。制冰工艺主要消耗电力，伴生冷能可以为制冰工艺预冷。制冰项目受所在地、周边市场等因素制约，一般经济效益不佳，而且我国北方地区用冰的季节性需求突出。

表2 天然气膨胀发电伴生冷能的利用途径

序号	利用途径	能源利用形式	典型用户
1	为周边电冷综合用户供能	电、冷	数据中心、医院
2	制冰	冰	生鲜市场、超市

若受周边市场限制，无法资源化利用伴生冷能，一般需要考虑利用外部能源对天然气进行必要的加热。天然气膨胀发电伴生冷能的消纳方式如表3所示。燃气场站一般通过燃气锅炉加热低温天然气。引入压力能与太阳能耦合利用系统后，可以沿用原有加热工艺。对于我国南方全年平均最低气温不低于0℃的地区，可以选用空温式换热器对天然气进行复热，这是一种技术成熟、经济性好的天然气加热方式，但需要一定的土地资源。如果周边工厂或站内有余热资源，则可以通过利用余热低成本地解决天然气膨胀发电伴生冷能消纳问题。最后可以利用太阳能消纳伴生冷能，包括光伏、光热两种方式。光伏发电通过结合热泵或电加热器加热低温天然气，通常燃气场站内的光伏发电功率低于天然气加热需求，需要利用天然气膨胀发出的电力进行补充。光热系统则通过生产热水加热低温天然气，考虑到太阳资源的间歇性，需要设置储能设施，为满足天然气加热需求，所需设备的占地也比较大，系统较复杂。

表3 天然气膨胀发电伴生冷能的消纳方式

序号	消纳方式	适用场景
1	燃气锅炉	燃气场站已安装燃气锅炉且经济适用
2	空温式换热器	全年平均最低气温不低于0℃地区，有土地资源
3	周边或自有余热	化工区、储气库等
4	电加热	太阳能资源优质
5	光热	太阳能资源优质，土地资源充足

### 3 工艺方案研究

上文分析了不同能量流动路径的可能性、典型用户与适用场景，以此为基础对电力主导型与冷能主导型两大类系统进一步细分，讨论每类系统的适用场景，建立燃气场站天然气压力能与太阳能耦合利用系统规划设计的理论框架，以指导工程实践。

#### 3.1 电力主导型系统

电力主导型系统的特点是不资源化利用天然气膨胀发电伴生冷能，需要考虑天然气的加热问题。按照电力外送情况、天然气加热方式，电力主导型系统可以进一步细分为电力并网型系统、电力上网型系统与

电力-冷能自消纳型系统，如表4所示。

表4 电力主导型系统细分

序号	名称	天然气加热方式	太阳能利用方式	电力用户
1	电力并网型系统	燃气锅炉/空温式气化器/余热	光伏	站内或周边用户
2	电力上网型系统	燃气锅炉/空温式气化器/余热	光伏	电网外送
3	电力-冷能自消纳型系统	低温热泵/电加热/热水	光伏/光热	加热天然气

电力并网型系统与电力上网型系统都采用燃气锅炉、空温式气化器或余热的方式加热低温天然气，发出的电力根据是否具备上网条件、经济效益，供应燃气场站或周边用户，或者上网外送。这两类系统的特点是利用系统外部的能量输入消纳伴生冷能，高品质的电能全部输出到系统外。当天然气加热方式选用燃气锅炉时，对燃气场站系统的改造程度小，系统建设运行难度低，但其经济性依赖于电力销售收入与天然气加热能耗费用的对比。若项目所处的地理位置适宜、站内或周边具有废热资源，可采用空温式气化器或废热消纳伴生冷能，更加经济适用。

电力并网型系统与电力上网型系统是目前建设最多的天然气压力能利用系统，两种系统能流图见图2。例如，中石油华北油田苏桥储气库投建2台3MW天然气压差发电机组，利用注气压缩机级间废热消纳伴生冷能。储气库在注气阶段，注气联络线来气压力可能高于压缩机入口运行压力，这部分天然气压力能可用

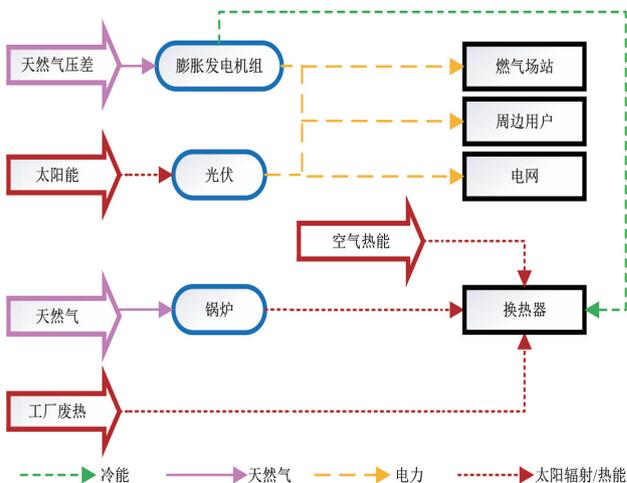


图2 电力并网型系统与电力上网型系统能流图

于发电,伴生冷能可用集注站压缩机废热中和,是一种非常有发展潜力的模式<sup>[14-15]</sup>。无锡华润燃气在新区储配站建设天然气压差发电示范项目,配套空温式换热器加热低温天然气,电力供应站内自用<sup>[16]</sup>。

电力-冷能自消纳型系统采用低温热泵、电加热或光热水的方式加热低温天然气,电力源自系统发电,优先供应天然气加热使用,富余部分再供应站内使用或上网。其特点在于无需系统外部输入能量,可在系统内部自行消纳伴生冷能。当采用低温热泵或电加热方式时,配套建设光伏系统,整体系统建设难度略高,需要仔细分析系统发电量曲线与加热电量负荷曲线,保证天然气加热的电力需求。当采用光热水加热低温天然气时,需配套建设储热系统,为满足天然气加热需求,对土地资源要求偏高。目前,自消纳型系统还处于研究阶段,鲜有相关示范工程项目<sup>[17]</sup>。

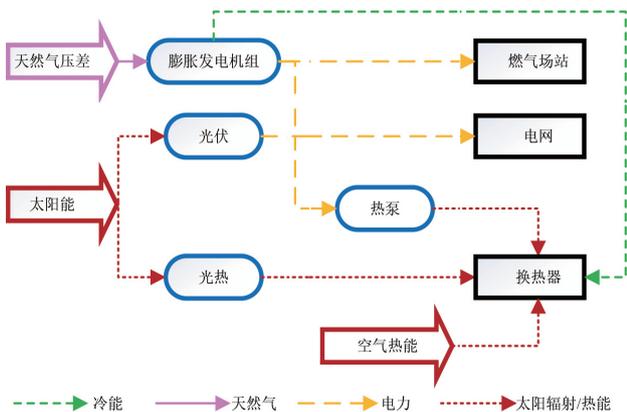


图3 电力-冷能自消纳型系统能流图

### 3.2 冷能主导型系统

冷能主导型系统的特点是资源化利用天然气膨胀发电伴生冷能。按照终端用户用能类型,冷能主导型系统又可以分为电冷综合外送型系统和单冷能外送型系统。

电冷综合外送型系统的典型用户为数据中心,能够同时消纳压力能与太阳能耦合利用系统的电力与冷能,能流图见图4。电力既可以用于数据中心设备运行,也可以用于冷却系统。冷能以冷冻水的方式提供给数据中心,直接用于冷却系统。这种系统的建设难度略高,对燃气场站、数据中心的改造程度小,运行难度低。电冷综合外送型系统适用于燃气公司在相关场站旁自建数据中心的场景,目前针对这种场景

的研究极少。

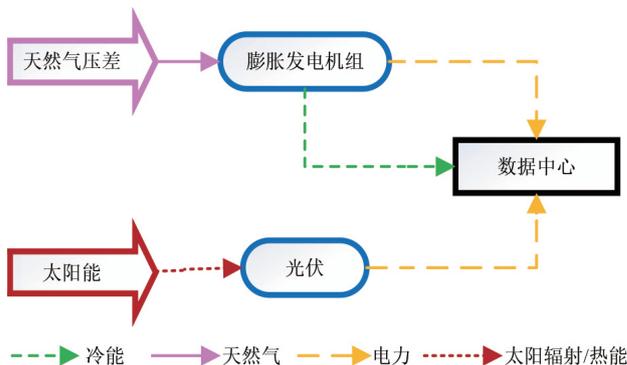


图4 电冷综合外送型系统能流图

单冷能外送型系统的用户为纯冷能用户,例如制冰设施。这种系统将压力能与太阳能耦合利用系统产生的电、冷全部输送给制冷机组,能流图见图5。根据下游用户的不同,可以选用冷水机组或制冰机组。电力是制冷机组运行的主力能源,伴生冷能主要用作制冷系统的预冷。当制冷量不能满足需求时,可考虑引入电网电力。

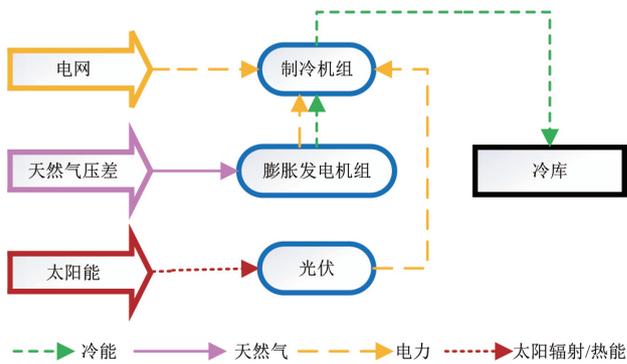


图5 单冷能外送型系统能流图

目前,国内已建成少数几处天然气压差制冷应用项目。例如,深圳燃气公司在求雨岭天然气门站建设了调压设备压差利用的天然气发电和制冰的联合工艺项目,发电机组装机容量200kW,制冰量80d/t<sup>[18]</sup>。武汉燃气在三金潭高中压调压站建设天然气压差综合利用示范项目,发电机组装机功率355kW,制冰量48d/t。

冷能主导型系统的推广应用面临两个难点:一是依赖外部市场,不论是冷冻水还是块冰的运输距离不能太远,冷冻水管道运输一般不宜超出5km,块冰车辆配送一般不宜超出50km,否则经济性偏差;二是

市场壁垒问题，燃气行业与数据中心或者制冷行业为差距很大的行业。

#### 4 结束语

本文通过分析燃气场站压力能与太阳能耦合利用系统的能流情况，根据系统的主导能量类型、电力利用方式、冷能消纳利用方式，对系统进行了工艺方案研究，并分析了不同系统的特点与适用场景，详见表5。

表5 燃气场站压力能与太阳能耦合利用系统分类与适用场景

序号	名称	适用场景
1	电力并网型系统	具有经济适用的方式消纳伴生冷能，例如空气能、废热等；受政策限制电力不能上网，站内电力负荷大或通过新建用电负荷（如电解水制氢）可消纳发电量
2	电力上网型系统	具有经济适用的方式消纳伴生冷能，例如空气能、废热等；具备电力上网条件
3	电力-冷能自消纳型系统	原调压工艺中天然气加热成本高，例如利用网电加热或者天然气价格较高
4	电冷综合外送型系统	周边（5km内）存在电冷综合用户，例如数据中心、医院等
5	单冷外送型系统	周边存在冷能用户，例如生鲜市场、超市等

根据主导能量类型不同，燃气场站压力能与太阳能耦合利用系统可以分为电力主导型系统与冷能主导型系统两大类。电力主导型系统根据冷能消纳方式、电力是否上网分为电力并网型系统、电力上网型系统与电力-冷能自消纳型系统。电力并网型系统与电力上网型系统利用外部输入能量，例如燃气锅炉、空温式气化器或废热来消纳伴生冷能。电力-冷能自消纳型系统则利用自身产生的能量消纳伴生冷能。冷能主导型系统根据用户用能类型分为电冷综合外送型系统与单冷外送型系统，分别适用于冷电综合用能场景与纯冷能用能场景。

由于电力并网型系统与电力-冷能自消纳型系统受政策、周边市场等因素的影响小，是未来的主要发展方向。其它3类系统则会受到电力上网政策、周边市场缺少用户、不同行业壁垒等因素的影响，工程实践落地时困难重重。

#### 参考文献

[1]中国石化集团经济技术研究院有限公司,中国石化咨询有限责任公司.中国能源展望2060(2025年版)[R].2025:37-46.

[2]魏江东,李治东,朱英如,等.天然气膨胀压差发电回收余能技术研究进展[J].化工机械,2021,48(05):644-647.

[3]徐文东,刘一成,蔡振培,等.天然气管网压力能发电技术现状及未来发展方向[J].现代化工,2019,39(12):11-15+20.

[4]日利用天然气压差发电[J].中国能源,2002,(11):49.

[5]李秉繁,刘培胜,潘振,等.天然气压力能回收利用研究进展及分析[J].当代化工,2014,43(12):2591-2593.

[6]高顺利,颜丹平,张海梁,等.天然气管网压力能回收利用技术研究进展[J].煤气与热力,2014,34(10):1-5.

[7]刘宗斌,徐文东,边海军,等.天然气管网压力能利用研究进展[J].城市燃气,2012,(01):14-18.

[8]孙洁.城市门站压力能回收设备研究应用进展[J].煤气与热力,2010,30(07):18-20.

[9]张晓瑞,刘瑶,孙明焯,等.燃气调压箱小型压力能发电设备研究和测试[J].煤气与热力,2018,38(11):40-43+61.

[10]夏林,龚晓斌,程晓明,等.某天然气净化厂余压发电装置应用评估研究[J].天然气与石油,2023,41(01):50-58.

[11]李建.基于太阳能加热的天然气压差发电转换机组及其实现方法:201210238126.3[P].2012-10-24.

[12]碧海舟(北京)节能环保装备有限公司.天然气调压站与太阳能综合发电系统:201620204185.2[P].2016-09-07.

[13]Farzaneh-Gord M,Arabkoohsar A,Dasht-bayaz M D,et al.Energy and exergy analysis of natural gas pressure reduction points equipped with solar heat and controllable heaters[J].Renewable Energy,2014,72:258-270.

[14]朱力洋,熊波,王志军,等.天然气压差发电技术在地下储气库的应用[J].天然气工业,2021,41(03):142-146.

[15]肖罗坤,陈加松,范丽林,等.压差发电技术在盐穴储气库中的应用[J].石油石化绿色低碳,2025,10(01):59-63+69.

[16]刘析,林楠.天然气余压发电的技术应用与发展[J].化工管理,2023,(27):73-75+112.

[17]刘国荣,王春喜,何泽慧.天然气压差发电、光伏发电及太阳能集热技术在油气田中的应用研究[J].节能与环保,2022,(12):74-76.

[18]陈秋雄,徐文东,安成名.天然气管网压力能发电制冰技术的开发及应用[J].煤气与热力,2012,32(09):25-27.