

“余热+光伏”技术在油田中转站中的应用

——以中原油田濮三中转站为例

陈小敏

(中国石油化工股份有限公司中原油田分公司石油工程技术研究院, 河南 濮阳 457001)

摘要: 在全球气候变暖 and “双碳”目标的背景下, 油气田行业面临着稳油增气与控排减碳的双重挑战。近年来中原油田大力发展新能源, 以濮三中转站新能源替代为试点, 结合中转站资源及用能特点, 充分利用本区域油田采出水余热资源和太阳能资源, 形成“余热+光伏”多能源综合利用技术, 为中转站提供清洁低碳稳定的热源。项目实施后, 年减少天然气消耗 160 万 m^3 , 年可节约标煤 1 864 t, 年减排二氧化碳 3 392 t, 取得了良好的经济及社会效益, 并在油田各中转站推广实施, 为实现油田的绿色低碳发展奠定了基础。

关键词: 油田; 余热利用; 绿色转型; 节能降碳

中图分类号: TK115 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)13-0235-06

在全球气候变化和“双碳”目标背景下, 油气田行业正面临前所未有的压力。油气田生产中的能耗问题尤为突出, 生产过程中消耗大量能源并产生大量碳排放, 特别是在集输、脱水等环节需要大量的热能。随着国家提出“3060”碳达峰、碳中和目标, 发布《加快油气勘探开发与新能源融合发展行动方案(2023—2025年)》等政策, 国内各油田积极响应国家号召, 寻找清洁替代方案, 通过利用低碳节能及新能源技术, 加快油田能源结构转型。余热综合利用技术正逐步在工业、建筑等领域推广应用^[1-3]。油田在生产过程中的采出水余热资源丰富, 大部分油气田所在区域太阳能资源丰富, 且具备开展光伏发电的场地, 利用“余热+光伏”为油气生产提供用能成为油气田清洁用能的重要方向^[4]。

油气田生产是一个高能耗的过程, 涉及注水、采油、集输等多个环节。根据现有数据, 油气田企业的能耗结构以天然气为主, 占比约 75.1%, 原油占 6.1%, 电力占 15.2%。余热利用及光伏发电技术作为一种清洁的可再生能源技术, 具有替代传统化石燃料的巨大潜力。如何提高可再生能源在油气生产过程中的消纳比例, 实现可再生能源的高效利用, 是目前亟须解决的问题和技术突破的主要方向^[5]。

1 区域资源概况

中国石化提出的“一基两翼三新”发展格局, 将

新能源作为重要增长点。中原油田作为中石化下属企业, 提出油田“化石能源+绿色能源”双轮驱动发展新格局, 构建多能互补新型能源体系, 大力推进“源网荷储”体系建设, 加强风电、余热、光伏、地热、光热等综合利用, 助力油气主业降本增效。中原油田采出水余热及太阳能资源丰富, 具体如下。

1.1 油田采出水余热资源

向油层注水保持油层压力来提高原油采收率是目前中国油田主要开发手段。中原油田从发现至今已近 40 年, 目前已进入开发的中后期, 油田采出液平均含水率高达 92.7% 以上^[6]。原油分离出来的污水具有水量大、温度高等特点, 是非常好的余热资源。目前油田污水经处理后全部用于回注, 如果能对油田污水的余热进行有效开发利用, 对于节能减排、提高中原油田的经济效益和环境效益具有非常重要的意义^[7]。

中原油田集输系统建有 13 座中转站, 原油开采过程中分离出来的采出水量 3 029 万 m^3/a , 可获得采出水余热量 145 万 GJ/a (按 30 $^{\circ}C$ 以上, 10 $^{\circ}C$ 温差计算), 具有可观的余热利用价值。油田采出液的温度主要介于 37~50 $^{\circ}C$, 其中濮二、濮三中转站温度较高, 平均温度为 50 $^{\circ}C$, 其余中转站采出液温度大都在 40 $^{\circ}C$ 以下。采出水余热与常规地热开发相比, 可节省地热井钻井、尾水回灌等投资费用, 具有

收稿日期: 2025-02-06

作者简介: 陈小敏(1988—), 男, 河南范县人, 硕士, 工程师, 研究方向为余热、光伏等新能源与油气生产融合。

绿色节能、运行成本低等特点^[8-9]。油田污水虽然有以上优点,但也有矿化高、易结垢、腐蚀严重等缺点。在原油集输处理过程中,虽然加有防腐剂和阻垢剂,腐蚀和结垢仍然是使用中的两个最不利因素。一般情况下,为保护热泵机组和供热系统,油田高温污水不直接进入热泵机组和供热系统,需要增加换热器进行热能转换^[10-12]。

1.2 太阳能资源

河南省濮阳市根据太阳能资源区划指标,项目地点属于中国太阳能资源丰富地区,太阳辐射量为1 050~1 400 (kW·h)/m²,全年平均日照时数为2 454 h,属于Ⅲ类,太阳能资源较丰富(C)地区。从太阳辐射的年变化来看,5—7月太阳辐射量最强,这3个月月平均太阳辐射量均在147.6~161.0 (kW·h)/m²,日平均达4.92~5.19 (kW·h)/m²;8月份平均为141.2 (kW·h)/m²,日平均达4.55 (kW·h)/m²。

2 项目介绍

2.1 中转站工艺概况

濮城采油厂设计有濮一、濮二和濮三3座中转站。濮一、濮二中转站原油统一送至濮三中转站后集外输至柳屯油库。濮三中转站负责濮城采油厂作业三区、四区生产的在濮三联合站中。

濮三中转站用热需求包含两部分,一部分用于外输原油加热,加热量为720 t/d,加热前(油水分离后)的原油温度为34~38℃;加热后(外输前)的原

油温度为65~72℃。另一部分用于热水站清水加热,加热量为280 t/d,清水加热前温度5~20℃,加热后温度93℃。用热量约为5.2万GJ/a。濮三中转站工艺流程如图1所示。

2.2 余热利用工艺优选

针对濮三中转站采出水水质、水温等特点,对取水点、换热器、热泵运行模式等进行优选,并开展含油污水换热装置试验,形成满足濮三中转站生产用热需求的工艺路线。

2.2.1 采出水取水点优选

采出水取水选取需要考虑如下因素:污水温度高,经济性好;取热具有连续性、稳定性;满足集输工艺要求,不破坏现有集输工艺;工程施工难度小,工程造价低。工艺流程上分析,满足上述要求的有三相分离器水相出口和污水处理系统污水出口。采出水滤前A处温度48℃,滤后B处温度38℃。中原油田滤前采出水一般具有含油量高、水温高、矿化度高、pH偏酸,含有细菌、含溶解氧和少量铁、一定数量破乳剂等(表1)。

根据水质分析,由于三相分离器排出的采出水未经处理,含有机械杂质、悬浮物、原油、天然气、氯离子等且矿化度高,是影响采出水取热的关键指标,常规换热方式耐堵能力差,且难以长时间稳定换热,中石化系统内同类项目采出水余热取热点均在滤后。但此项目滤后水温仅为38℃,若将原油温度由38℃加热至65℃,余热设备的装机功率大,运

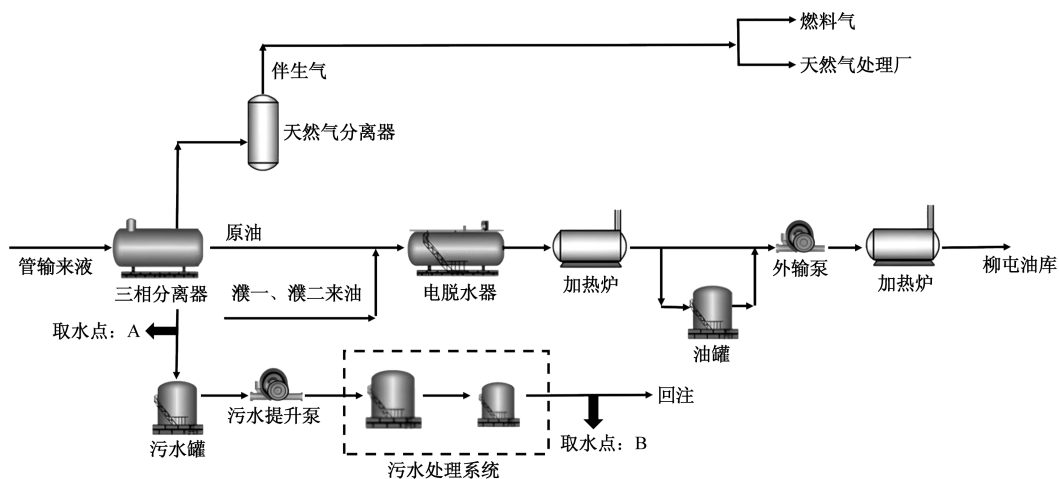


图1 濮三中转站工艺流程

表1 濮三中转站采出水水质

取样地点	pH	含量/(mg·L ⁻¹)												
		S ²⁻	悬浮物	来水含油	K ⁺ Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	矿化度	Fe ³⁺	∑Fe	
濮三污	1	6.07	0	35	107.27	55 338	1 844	1 288	91 200	1 013	204.62	151 000	7.5	18.5
	3	6.17	0	35	441.73	51 709	2 725	1 770	88 600	1 036	176.84	146 000	6.5	24.0

行成本高,因此考虑滤前取水。由于滤前水质较差,需对换热器类型、材质、流道宽度进行优选,确保余热利用装置稳定、连续高效运行。

2.2.2 换热器优选

目前常用的余热利用换热器有螺旋板换热器、板式换热器和管壳式换热器(表2)。其中板式换热器具有热损失小、不易结垢、易清洗、传热效率高等优点,本项目选用板式结构换热器,但由于水质较差,需对换热器流道型式进行优选。不同板换当量直径下参数对比见表3。

三相分离器后未过滤的油田污水,矿化度高易结垢,含原油易结蜡,含直径较大的颗粒悬浮物等对换热器的板间距提出了要求。当换热器通道面积不变、当量直径最大时,流量分配均匀性最好,压降最低。因此选择宽流道换热器^[13-15]。

油田污水矿化度较高、成分复杂,易对金属材料产生腐蚀。污水余热利用需重点解决腐蚀问题,目前制造换热器的主要材料有铜及铜合金、

钢、铝合金、石墨和钛合金等(表4),经分析,钛合金材料广泛使用于有机化合物、碱溶液以及盐溶液等介质,耐腐蚀性优良,适合油田采出水水质。

2.2.3 含油污水换热装置试验

为验证板式换热器使用滤前采出水的效果,开展含油污水专用宽流道大长宽比纯钛板式换热器试验,对换热器换热量、传热系数、热端端差进行分析。开展800 h连续换热试验,每5 d(120 h)进行一次反冲洗,根据反冲洗效果适时开展热冲洗。传热系数随着时间推移逐渐降低,由850 W/(m²·°C)降低至600 W/(m²·°C),3次反冲洗后传热系数降低至700 W/(m²·°C),进行热冲洗,热冲洗后传热系数提高至850 W/(m²·°C)。换热器换热量变化趋势与传热系数变化趋势基本一致。热端端差随着时间推移逐渐升高,由5 °C升高至8 °C,3次反冲洗后热端端差升至6 °C,进行热冲洗,热冲洗后热端端差降至5 °C。

表2 不同换热器特点对比

设备名称	管壳式换热器	螺旋板式换热器	板式换热器
设计压力/MPa	无限制	4.0	2.5
设计温度/°C	无限制	无限制	200
小端差传热	不适应	不适应	适应
传热系数/(W·m ⁻² ·°C ⁻¹)	1 000~2 000	1 500~3 000	3 000~6 000
耐堵	管直径任选,耐堵能力好	通道6~60 mm	由模具决定
处理量	无限制	单通道, DN200以下接口	DN400以下接口
防腐	考虑腐蚀裕量。钛管成本高	考虑腐蚀裕量。碳钢寿命4~6 a	采用耐腐蚀材料
优势	设计与制造工艺成熟	换热效率高,工艺较成熟	体积小,效率高,1 °C端差
不足	体积大、换热效率低	处理量有限,体积较大	承压受限、制造工艺高

表3 不同板换当量直径下参数对比

板换当量直径/m	悬浮物固体含量/(mg·L ⁻¹)	结垢速率/(mm·a ⁻¹)	含油量/(mg·L ⁻¹)	污垢系数/[(m ² ·°C)·kW ⁻¹]	颗粒度直径中值/μm
0.004	0~10	<0.07	0	<0.17×10 ⁻⁴	0
0.006	10~30	<0.09	0~100	<0.26×10 ⁻⁴	0~10
0.008	>30	>0.09	>100	>0.43×10 ⁻⁴	>10

表4 不同板换材料优缺点对比

材料名称	特点	缺点	结论
铜及铜合金	导热性好	当污水中的氯离子含量>100 mg/L时,对铜的腐蚀作用明显	不适合油田采出水水质
铝合金	导热性能好,成本低	氯离子>50 mg/L时,出现明显点蚀和晶间腐蚀倾向	不适合油田采出水水质
钢及不锈钢	结构坚固、导热性好	氯离子含量>25 mg/L 不锈钢就会发生应力腐蚀、孔蚀、晶间腐蚀	不适合油田采出水水质
石墨	较强的耐腐蚀性,导热系数高	强度低、耐冲击性差,一旦泄漏,很难找到漏点和修复	不适合长期运行
钛合金	可广泛使用于有机化合物、碱溶液以及盐溶液等介质,耐腐蚀性优良	材料价格较高	适合采用

经过 800 h 连续试验,验证了滤前取水的可行性,形成了不停机反冲洗和热洗技术及装置,研制了新型专用含油污水换热装置,实现在 150 ~ 400 mg/L 污水含油工况下稳态高效传热。

2.2.4 热泵及运行模式优选

濮三中转站用热需求为原油加热 73 °C,清水加热 93 °C。若只使用吸收式热泵,可满足工艺需求,但热泵 COP(能效比)较低,且与原工艺相比只可替代约 40% 天然气,因此考虑同时使用压缩式热泵及吸收式热泵。为提高热泵系统整体 COP,同时降低系统能耗,对两种热泵的运行模式进行研究。

以加热外输原油为例,若将原油温度加热到 70 °C,余热利用设备需要制取 80 °C 的热水才可以满足要求。在余热水出口温度 30 °C 的条件下,单独使用吸收式热泵,其 COP 为 1.7,而单独使用电热泵,其 COP 为 2.92。可以采取热泵耦合技术,充分利用吸收式热泵和电热泵能效与温度的关系特性来满足。使电热泵和吸收式热泵两种热泵都处于高效运行区间。热泵耦合工艺流程如图 2 所示。

吸收式热泵与压缩式电热泵并联运行,吸收式热泵产生的一部分 92 °C 热水为清水换热,一部分 92 °C 热水与压缩式电热泵产生的 70 °C 热水进行混合,混合后介质温度达到 80 °C,通过板换为原油进行换热。此时压缩式电热泵 COP 为 4.26,吸收式热泵 COP 为 1.68。热泵耦合运行时,可以根据电价与气价的波动,选择不同的能源应用方式,更好地提高项目的经济性,同时可通过调控吸收式热泵热水流量来调控混合水温度^[16]。

2.3 具体方案

根据用热负荷计算,全部替代加热炉及热水炉,冬季最大用热负荷为 1 784 kW。考虑濮三联合站产量递减情况,余热利用建设规模均按目前用热负荷考虑,不考虑附加系数,建设规模为供热能力

1 784 kW。经过以上分析,确定濮三中转站余热利用项目采用“电动压缩式热泵+直燃型吸收式热泵+板式换热器”吸热换热技术路线,分别从滤前采出水和滤后采出水中提取热量,替换站内原有的天然气加热炉和热水炉对外输原油和热水站清水进行加热。滤前取水热源主要用于加热温度需求较高的热水站热水,滤后取水的热量主要用于原油加热和热水站取水的初次加热,实现了滤前、滤后采出水的综合利用。利用濮城采油厂濮三联合站内闲置场地以及可利用的建筑物屋顶面积 13 645 m² 建设光伏发电场,为余热项目提供绿电。安装容量 1.3 MW,年均发电量 137×10⁴ kW·h。濮三中转站余热利用工艺流程如图 3 所示。

2.4 能耗对比

表 5 显示,项目实施前,中转站年耗电量约为 10.5 万 kW·h,天然气 196.7 万 m³,项目实施后,光伏年发电量 143 万 kW·h,年消耗电力 173 万 kW·h,增加网电消耗 19.5 万 kW·h,天然气减少 160 万 m³。

表 5 余热利用项目改造前后能耗对比情况

项目	实施前年 能耗	实施后年 能耗	实施后光 伏发电量	增(+) 减(-)
电消耗/(10 ⁴ kW·h)	10.5	173	143	+19.5
天然气消耗/10 ⁴ m ³	196.7	37.2	—	-160

3 项目效益及推广前景

“余热+光伏”项目实现了清洁能源与可再生能源的互联利用,通过余热利用减少了自用天然气量,增加了油田天然气商品量;利用中转站空闲场地建设光伏,实现光伏发电自发自用,在增加效益的同时实现了节能降碳,提升了油气生产过程中绿电替代率,实现了油气生产与新能源深度融合。通过太阳能光伏发电减少了余热利用系统耗

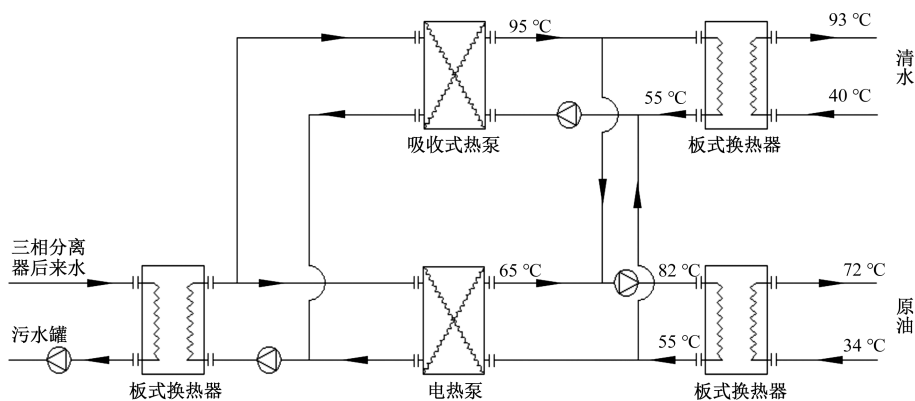


图 2 热泵并联运行工艺流程

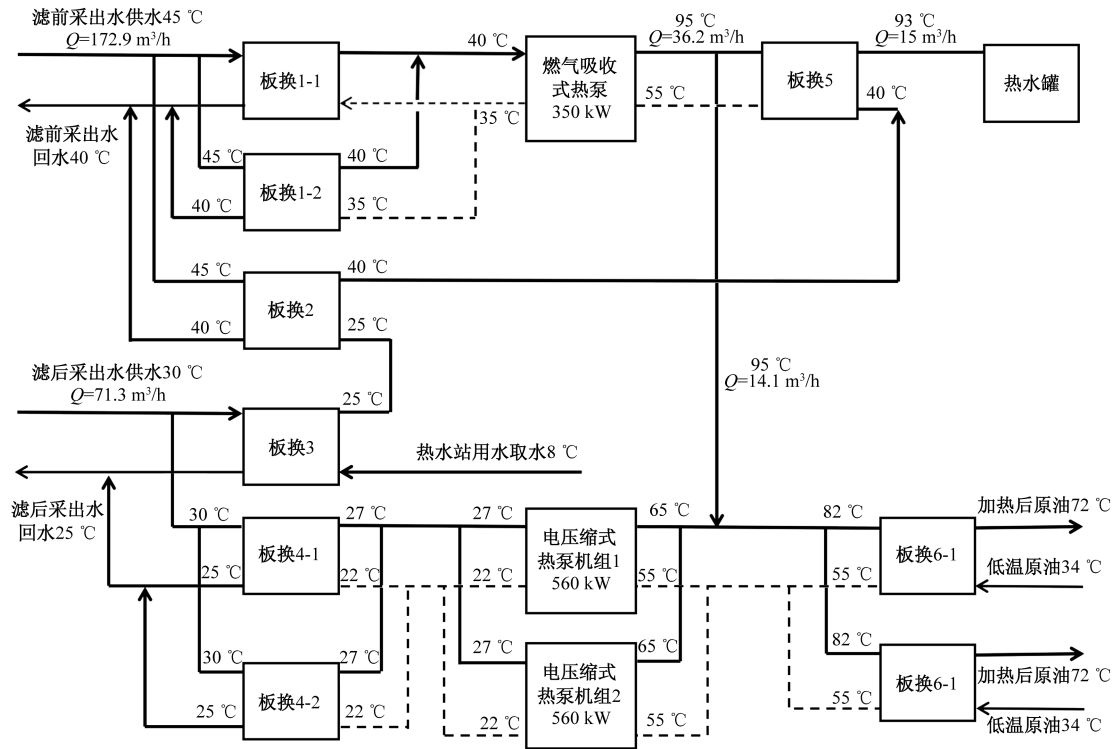


图3 濮三中转站余热利用工艺流程

电。项目实施后,年可节约标煤 1 864 t,年减排二氧化碳 3 392 t。

该项目是中原油田首次利用“余热+光伏”技术解决中转站高耗能、高排放等问题的实践应用。为提高采出水余热利用效率,研究形成了滤前取水和吸收式与压缩式电热泵并联运行等技术,并通过试验验证了板式换热器使用滤前采出水的效果满足生产需求,进而进行了工业化应用。

近年来中原油田大力发展新能源,提出了“化石能源+绿色能源”双轮驱动发展战略,不断扩大成熟新能源利用规模,实现首个上游企业光伏风电装机规模“双破百”,新能源与传统能源多能互补格局初步形成。目前中原油田正在根据濮三中转站积累的“余热+光伏”技术经验大力推广中转站新能源替代,因地制宜地实施“余热+光伏”能源互联技术,根据中转站余热资源及用能条件,一站一策制定中转站新能源替代技术路线,发挥各类能源优势,促进新能源消纳和提升可再生能源利用占比,为油田多资源开发、绿色转型奠定高质量发展基础。

参考文献

- [1] 王永利,刘泽强,陈鑫,等. 基于梯级利用的工业园区综合能源系统双层优化[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(29): 12595-12603.
- [2] 陈姝伊,张泉,邹思凯,等. 湖水源数据中心余热回收系统性能模拟研究:以东江湖大数据产业园为例[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(22): 9502-9508.
- [3] 李国柱,崔美华,黄凯良,等. 数据中心余热利用现状及在建筑供暖中的应用[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(26): 11287-11295.
- [4] 张光宇,陈丽丽,充清波,等. 油田采出液余热资源梯级利用设计方法与工程实践[J]. 石油石化节能与计量, 2024, 14(8): 102-108.
- [5] 钟迪,李启明,周贤. 多能互补能源综合利用关键技术研究现状及发展趋势[J]. 热力发电, 2018(2): 1-5.
- [6] 黄雪松,李思,朱宁宁,等. 中原油田东濮老区高含水原油常温集输技术[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(16): 6681-6689.
- [7] 马玲. 采出液余热:老油田的“新能源”[N]. 中国石化报, 2023-09-11(008).
- [8] 张光宇,陈丽丽,充清波,等. 油田采出液余热资源梯级利用设计方法与工程实践[J]. 石油石化节能与计量, 2024, 14(8): 102-108.
- [9] 刘佳. 某油田联合站污水余热利用研究[J]. 石油石化节能与计量, 2024, 14(2): 59-63.
- [10] 李华山,雷文贤,付浩,等. 长庆油田采出水余热利用技术研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(8): 36-37, 40.
- [11] 徐辉,周生懂,王智,等. 油田联合站多能互补系统应用与节能降耗分析[J]. 油气与新能源, 2024, 36(2): 104-112.
- [12] 李杰. 龙一联合站余热回收利用[J]. 石油石化节能,

- 2023, 13(4): 1-5.
- [13] 刘宏毅, 刘德浩, 赵雪松. 板式换热器结构优化对供热循环水减少结垢的影响研究[J]. 现代制造技术与装备, 2024, 60(10): 23-25.
- [14] 赵博, 汪贵旺, 赵凯程, 等. 紧凑式余热排出换热器实验研究[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(33): 14237-14242.
- [15] 王宏建, 雷勇刚, 张建伟. 收缩式角孔通道对板式换热器流动均匀性的影响[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(9): 3617-3622.
- [16] 张蓉, 宋永明, 李洋, 等. 电压缩式热泵和吸收式热泵余热回收分析[J]. 煤气与热力, 2024, 44(8): 11-13.

Application of “Waste Heat+Photovoltaic” Technology in Oilfield Transfer Stations: Taking Pusan Transfer Station in Zhongyuan Oilfield as an Example

CHEN Xiaomin

(Petroleum Engineering Technology Research Institute of Sinopec Zhongyuan Oilfield Branch, Puyang 457001, Henan, China)

Abstract: Under the background of global climate change and the “dual carbon” goal, the oil and gas field industry is facing a dual challenge of stabilizing oil and gas production and controlling emissions to reduce carbon emissions. In recent years, Zhongyuan Oilfield has vigorously developed new energy, with the Pusan Transfer Station as a pilot for new energy substitution. Combining the resources and energy consumption characteristics of the transfer station, the oilfield has fully utilized the waste heat resources and solar energy resources of the produced water in this area, forming a “waste heat+photovoltaic” multi energy comprehensive utilization technology, providing a clean, low-carbon and stable heat source for the transfer station. After the implementation of the project, the annual natural gas consumption has been reduced by 1.6 million cubic meters, saving 1 864 tons of standard coal annually and reducing 3 392 tons of carbon dioxide annually, achieving good economic and social benefits. It has been promoted and implemented at various transfer stations in the oilfield, laying the foundation for achieving green and low-carbon development of the oilfield.

Keywords: oil fields; waste heat utilization; green transformation; energy conservation and carbon reduction