

文章编号:1009-9603(2022)06-0077-08

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.202205007

# 基于油藏合理能耗的油田企业 能耗指标分解配置方法 ——以胜利油田为例

李振泉<sup>1</sup>,李东玻<sup>2</sup>,邴绍献<sup>2</sup>,肖武<sup>2</sup>,张海燕<sup>2</sup>,徐永春<sup>2</sup>,郑炜博<sup>3</sup>,杨秀丽<sup>3</sup>

(1.中国石化胜利油田分公司,山东东营 257000; 2.中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院,山东东营 257015; 3.中国石化胜利油田分公司技术检测中心,山东东营 257000)

**摘要:**石油企业作为高能耗单位,面对效益生产、节能降碳的双重要求,迫切需要开展能源优化管控,科学合理地为采油单位下达节能降耗指标。目前常用的能耗指标分解配置方法主要是吨油气单耗法,该方法沿用采油单位吨油气单耗的历史趋势,结合下一年度的开发生产部署,测算各采油单位下一年度的能耗规模,并按比例分解配置能耗目标。这种方法虽然所需参数少、操作简单,但是沿用历史规律,无法体现不同采油单位节能空间的差异,也无法反映油藏条件的不同对能耗的影响。为此,采用油藏数值模拟、矿场数理统计分析、灰色关联理论等手段,提出充分体现不同油藏条件能耗水平差异的简便有效、精度较高的原油生产系统合理能耗及降耗潜力计算,并形成能耗指标分解配置方法,为能耗管理部门将指标科学、合理地配置到各采油单位提供借鉴和依据。

**关键词:**原油生产系统;能源优化管控;企业能耗;合理能耗;指标分解配置

中图分类号:TE32

文献标识码:A

## Decomposition and allocation method of energy consumption quota for oil enterprises based on reasonable energy consumption of oil reservoir: A case of Shengli Oilfield

LI Zhenquan<sup>1</sup>, LI Dongbo<sup>2</sup>, BING Shaoxian<sup>2</sup>, XIAO Wu<sup>2</sup>, ZHANG Haiyan<sup>2</sup>,

XU Yongchun<sup>2</sup>, ZHENG Weibo<sup>3</sup>, YANG Xiuli<sup>3</sup>

(1. Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257000, China; 2. Exploration and Production Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China; 3. Technology Testing Center, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257000, China)

**Abstract:** As high-energy-consumption units, oil enterprises are requested to meet the dual requirements of efficient production and energy saving & carbon reduction. Thus, they urgently need to carry out energy optimization management and control and scientifically and rationally assign energy saving and consumption reduction tasks to oil production units. At present, the commonly used decomposition and allocation method of energy consumption quota is the method of unit consumption per ton of oil and gas. Following the historical trend of unit consumption per ton of oil and gas in oil production units, this method calculates the energy consumption scale for each oil production unit in combination with the deployment of development and production in the next year and decomposes and allocates the energy consumption quota proportionally. Although this method requires few parameters and is simple to operate, it follows the historical law and can neither reflect the difference in energy saving space of different oil production units nor indicate the impact of different reservoir conditions on energy consumption. In view of this, this paper proposes a simple, effective, and highly precise calculation method

收稿日期:2022-05-07。

作者简介:李振泉(1964—),男,山东东营人,正高级工程师,博士,从事油气田开发及油田节能工作。E-mail:lizhenquan.slyt@sinopec.com。

基金项目:中国石化重点科技项目“水驱油藏提升开发用能效率关键技术研究”(P22022)。

for reasonable energy consumption and consumption reduction potential of crude oil production systems with the help of reservoir numerical simulation, the mathematical statistical analysis of an oilfield, and grey correlation analysis. It can fully reflect the differences in energy consumption levels under different reservoir conditions. Further, the paper develops a decomposition and allocation method for energy consumption quota, which can provide reference and a basis for energy consumption management departments to allocate the energy consumption quota to oil production units scientifically and rationally.

**Key words:** crude oil production system; energy optimization management and control; energy consumption of enterprise; reasonable energy consumption; quota decomposition and allocation

石油企业作为能源密集型高耗能企业,其节能降耗内在需求迫切且外部压力巨大。油田开发生产过程中,机采系统、注水系统和集输系统等原油生产系统的能耗在油田的总能耗中占有较高比重<sup>[1-6]</sup>。随着油田开发逐步进入特高含水阶段,开发难度不断增加,原油生产系统能耗在油田生产成本中所占的比重也越来越大。因此,亟需加强原油生产系统能耗的优化管控和企业能源管理,以提高企业的经济效益。

目前油田企业现行的能耗指标分解配置方法主要是吨油气单耗法。该方法基于各采油单位目前吨油气单耗,根据下一年生产部署测算能耗;然后根据油田企业总体能耗目标,按比例分配采油单位下达能耗指标<sup>[5-9]</sup>。吨油气单耗法易于操作计算,但存在一定不足:一是原油生产自身的开发规律以及能耗变化规律主要受油藏的自身性质、开发方式以及开发阶段等影响,差异很大<sup>[3-20]</sup>;作为主要测算依据的吨油气单耗,受设备工艺条件、管理水平、油藏条件等多种因素影响,难以客观地反映不同单位之间油藏条件差异等对能耗的影响。二是按照采油单位的吨油气单耗计算出的能耗进行能耗指标分解配置,默认了目前各单位的单耗水平都是合理的,因此无法客观评价各单位降耗潜力的差异,未体现能耗管理的科学性和进步性。

鉴于此,提出基于油藏条件的简便有效、精度较高的原油生产系统合理能耗及降耗潜力计算方法,并形成了能耗指标分解配置方法,为生产管理部门对油田企业内部能耗指标分解配置或管理考核评比提供科学的、定量的借鉴和依据。该方法应用于胜利油田,辅助生产管理部门开展能耗指标分解配置工作,提高了能耗指标分解配置的科学性、合理性,促进了能耗管理水平的提升。

## 1 能耗指标分解配置方法的提出

胜利油田油藏条件差异显著,油藏埋深跨度为500~5 000 m,从特高渗透、低渗透到致密油藏均有发育,从稀油、稠油到特超稠油均有分布,水驱、化

学驱、热力采油等多种开发方式并存,每年都有新区投产,开发几十年以上的老油田仍在生产。原油生产的各环节始于油藏、终于油藏,围绕油藏形成一个油藏—机采系统—集输系统—注水系统—油藏连续闭环,油藏条件的差异对能耗的影响不容忽视。

机采系统、注水系统和集输系统是原油生产系统主要能量消耗环节。以各子系统为研究对象,分别研究关联油藏属性的合理能耗计算方法,结合现状能耗进行采油单位降耗潜力测算,以实际降耗潜力为配置标准,指导油田企业能耗指标科学分解。现状能耗指基于目前设备工艺的技术水平状态下测算的油田能耗。合理能耗指在满足油藏开发目标的基础上,在现有的油藏条件及设备工艺所能达到的较优技术水平状态下所消耗的能量。进行能耗指标分解配置首先是分采油单位油藏特征和生产目标,计算合理能耗和现状能耗;然后计算各采油单位降耗潜力,即现状能耗与合理能耗的差值,得到油田各采油单位的降耗潜力空间;最后根据油田企业总的耗能目标,按照各采油单位的降耗潜力空间所占权重,分解各采油单位的节能目标。其分解配置的计算式为:

$$E_{k\text{下达}} = E_{k\text{现状}} - \left( \sum_{j=1}^m E_{j\text{现状}} - E_0 \right) \times \frac{E_{j\text{现状}} - E_{k\text{合理}}}{\sum_{j=1}^m (E_{j\text{现状}} - E_{j\text{合理}})} \quad (1)$$

油藏的合理能耗受地层系数、埋深、含水率、地层压力等因素影响,在计算各采油单位合理能耗过程中需要充分考虑各因素差异对计算产生的影响。

## 2 不同油藏条件合理能耗测算

合理能耗可以由合理有用功除以合理系统效率计算,一般可以对单井或单个设备进行系统优化测试获得。而对于整个生产系统的合理能耗计算,逐井或逐设备进行优化测试显然是难以实现的;因此,需要建立机采、注水和集输等生产系统合理能

耗的计算方法,以满足节能管理部门对生产系统层面合理能耗测算的需求。合理能耗的计算式为:

$$E_{合理} = E_{机采} + E_{注水} + E_{集输} \quad (2)$$

### 2.1 机采系统合理能耗测算

机采系统是指用以将油井产出液从井下举升至地面的采油设备总体和油井所组成的系统,其边界界定为抽油机地下至井口的举升过程,这一过程消耗的能量,即为机采系统能耗。机采系统采油设备主要有游梁式抽油机、电潜泵、螺杆泵等,其中游梁式抽油机是主要的举升设备,为了简化问题,本次研究主要针对游梁式抽油机开展。机采系统合理能耗是指在一定油藏条件下满足开发生产液量需求的目前设备最优工艺状态下所消耗的能量。下面分别针对合理有用功和合理系统效率的测算方法进行阐述。

#### 2.1.1 机采系统合理有用功测算

有用功即机械采油系统有效功率,是将井内液体输送至地面所需要的功率。通过有用功影响因素分析认为,有用功与原油密度、含水率、产液量、动液面、油管吸入口深度、油管压力、套管压力等因素有关。在产液量、油藏条件和油水性质一定的条件下,有用功主要受沉没度和油套压差影响,合理优化沉没度和油套压差即可得到油井当下合理有用功。为了快速计算油田机采系统合理有用功,提出合理有用功计算黑箱模型,即将某油田整个机采系统模拟成一口油井,根据单井合理有用功计算公式获得油田机采系统合理有用功:

$$P_{机采} = \frac{QH'\rho g}{86400} \quad (3)$$

其中:

$$H' = H_d + \frac{1000(p_o - p_i)}{\rho g} + \frac{(H_x - H_d)(\rho - \rho_o)}{\rho} \quad (4)$$

油田平均动液面由油田的油井动液面按单井液量加权得到。合理油套压差满足外输需求即可,一般取0.3~0.5 MPa;合理沉没度为300~400 m(含水率<90%)和200~250 m(含水率>90%)。

#### 2.1.2 机采系统合理系统效率测算

机采系统效率是机械采油井的有效功率与输入功率的比值。合理系统效率指既定油藏条件下实现产液量目标,在充分优化设备及工作制度条件下所达到的最优系统效率。传统思路中合理系统效率的求取,需优化每一口油井杆泵组合及工作制度,测算其理论系统效率,工作量大、效率低。为此,提出了机采系统合理系统效率测算方法。

首先,基于灰色关联理论进行机采系统举升效

率影响因素分析。通过确定参考数列(合理系统效率)和若干比较数列(地层系数、黏度、含水率等)的几何形状相似程度判断其联系是否紧密,以关联度定量化评价因素间的相关程度,量化不同影响因素的关联度,由此明确合理系统效率的主控因素(图1)。

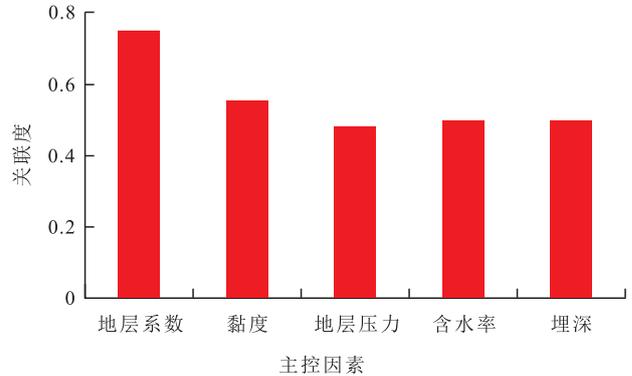


图1 机采系统合理系统效率主控因素关联度

Fig.1 Correlation degree of main control factors of reasonable system efficiency in mechanical mining system

其次,根据油田相关参数,测算某一液量下多组杆柱及工作制度组合系统的效率,得到该液量下系统最高效率。考虑泵漏失、管杆柱弹性伸缩、气体等影响对计算结果进行修正优化,得到该液量下的合理系统效率。例如,在产液量为65 t/d时,测算不同工作制度组合下的系统效率(表1)。

表1 产液量为65 t/d时不同杆柱及工作制度组合系统效率测算结果

Table1 System efficiency calculation results under different combinations of rod string and working system at liquid production of 65 t/d

下泵深度/m	冲程/m	冲次/分	泵径/mm	系统效率/%
850	3	7.5	56	35.6
1 150	3	7.5	56	29.2
1 350	4.8	4.5	56	29.3
750	3	7.5	60	37.7
1 200	3.9	4	70	31.8
800	3	7.5	56	36.8
1 500	3.9	4	70	25.7
1 500	3	5.5	70	23.3
1 000	4.8	4.5	56	36.9
1 300	4.8	4.5	56	30.4
750	4.8	4.5	60	42.3
950	4.8	4.5	56	38.1
1 150	3.9	4	70	33.0
1 450	3.9	4	70	26.8
800	4.8	4.5	60	41.5
900	4.8	4.5	60	39.3
850	4.8	4.5	56	40.5

再次,反复对不同产液量进行优化计算,得到油田单井日产液量-合理系统效率关系曲线(图2)。

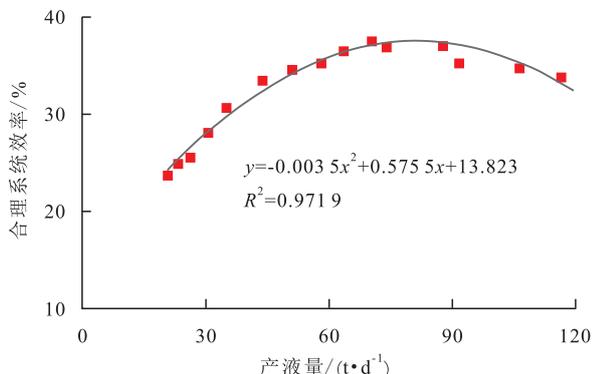


图2 油田单井日产液量-合理系统效率关系曲线

Fig.2 Relationship between liquid production and reasonable system efficiency of single well in oilfield

油田合理系统效率的测算则需要根据油田内部所有单井的产液量,在合理系统效率图版上查询各自对应的合理系统效率,按单井产液量对单井合理系统效率进行加权,得到油田的合理系统效率。其计算式为:

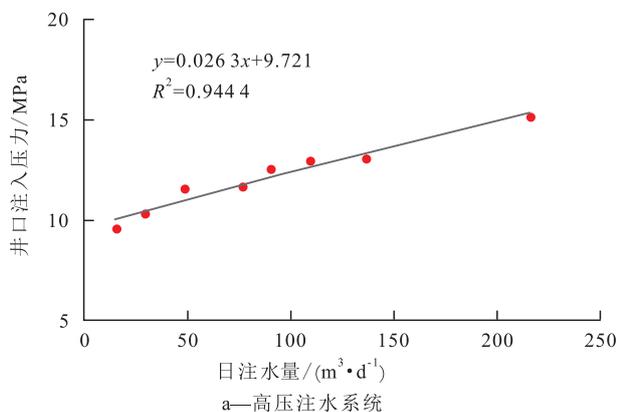
$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_i q_i}{\sum_{i=1}^n q_i} \quad (5)$$

基于计算得到的机采系统合理有用功和合理系统效率,可以求出机采系统合理能耗:

$$E_{\text{机采}} = \frac{QH'\rho g}{86400} \frac{\sum_{i=1}^n \eta_i q_i}{\sum_{i=1}^n q_i} \quad (6)$$

## 2.2 注水系统合理能耗测算

注水系统主要由注水泵站、注水管网、配水间



和注水井组成。合理能耗测算方法的核心是基于目前管网和设备状态,分别建立泵站出口合理有用功和泵站合理系统效率测算方法,进而得到注水系统合理能耗。

### 2.2.1 注水系统合理有用功测算

注水系统有用功定义为泵站出口处所具有的能量,等于注水管网沿程损失、阀组节流损失和注水井注入能量之和。油藏条件是影响能耗的关键因素,因此从与油藏直接相关的井口功率推算泵站有用功。

首先,油田井口注入压力的传统计算方法为每一口水井根据配注水量及注水指示曲线来确定井口注入压力。合理能耗测算方法的思路为建立各油田不同注水系统井口注入压力-日注水量变化关系,明确实现一定注入量条件下所需的井口注入压力(图3)。

其次,确定注水阀组阀损。传统计算方法的思路为每一口水井逐一计算注水阀组阀损。合理有用功测算方法根据矿场实际,建立不同类型油藏注水阀组阀损与干线压力关系,定量表征注水阀组阀损,在已知油藏类型和干线压力情况下,可以快速计算注水阀组阀损值(图4)。

再次,确定注水管网压力损失。传统计算方法采用魏斯巴赫-达西和柯列布鲁克-怀特公式计算沿程损失,参数多、计算过程复杂。合理有用功测算方法建立了注水管网沿程压力损失与供水距离的关系,定量表征注水管网沿程压力损失,在已知注水管网长度情况下,可以快速计算注水管网沿程压力损失值(图5)。

由此,即可根据注水量和压力值计算注水系统合理有用功:

$$P_{\text{注水}} = (\Delta p_{\text{管损}} + \Delta p_{\text{阀损}} + p_{\text{井口}}) Q_{\text{注水}} \quad (7)$$

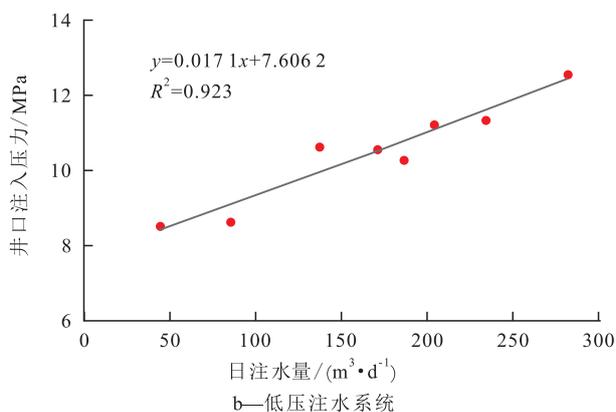


图3 ST油田高压、低压注水系统井口注入压力-日注水量关系

Fig.3 Relationships between wellhead tubing pressure and water injection rate of high-pressure and low-pressure water injection systems in ST Oilfield

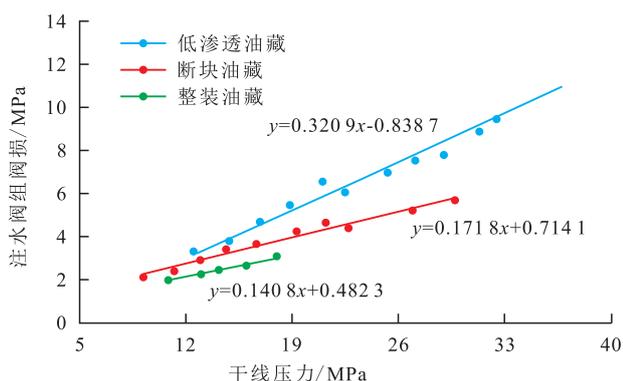


图4 不同油藏类型注水阀组阀损与干线压力关系

Fig.4 Relationships between valve loss of water injection manifolds and trunk pressure in different reservoir types

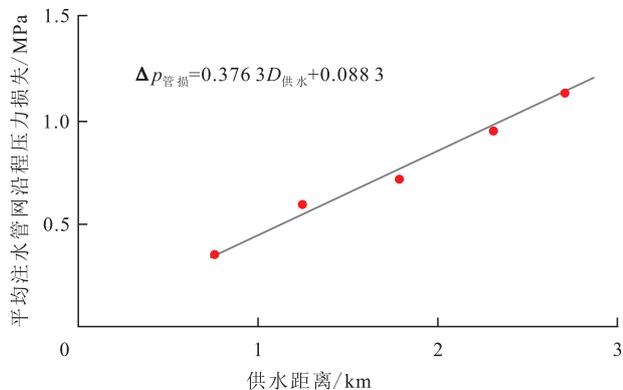


图5 平均注水管网沿程压力损失与供水距离关系

Fig.5 Relationship between pressure loss along water injection pipe network and water supply distance

### 2.2.2 注水系统合理系统效率测算

注水系统合理系统效率是在给定总排量、注水压力条件下,对注水泵机组进行优化组合,得到的最高系统效率。注水泵的泵效随着泵排量增加,呈现先升后降的特性,为了满足一定的输出排量和压力,注水站多台泵之间有多种开泵组合方案(图6)。优化数学模型为:目标函数为最高泵机组系统效率,优化变量为各个泵的排量,约束条件为累积泵排量≥配注量、开泵数量≤总泵数量。通过进行多方案迭代组合计算,给定压力、排量条件,迭代泵组功

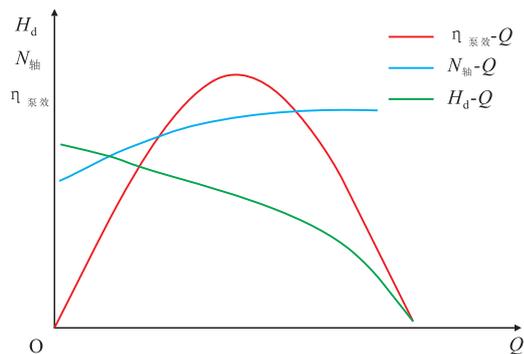


图6 离心泵工作特性曲线

Fig.6 Working characteristic curve of centrifugal pump

率,明确最优工况下的耗电量,进而优化得出注水系统合理系统效率的机泵组合。

根据注水系统合理有用功测算方法与合理系统效率测算方法,可以计算得到注水系统合理能耗:

$$E_{\text{注水}} = \frac{(\Delta p_{\text{管损}} + \Delta p_{\text{阀损}} + p_{\text{井口}})Q_{\text{注水}}}{\eta_{\text{注水系统}}} \quad (8)$$

### 2.3 集输系统合理能耗测算

集输系统是油田内部将油井采出液汇集、处理和输送的整个工艺处理系统,边界界定为从油井井口到原油外输首站。传统方法的思路借鉴整个系统的历史单耗规律,预计当年单耗水平计算集输系统总能耗,方法默认历史水平合理,无法体现节能空间。为解决上述问题,通过研究确定影响能耗的主控因素,构建集输系统合理能耗计算模型,提出集输系统合理能耗测算方法。

集输系统合理能耗主要包括管线散热损失能耗、各设备能耗等。通过研究各环节合理能耗,可计算求得集输系统合理能耗,其计算式为:

$$E_{\text{集输}} = E_{\text{管线}} + E_{\text{st}} + E_{\text{g}} + E_{\text{wd}} \quad (9)$$

以燃料单耗、电能单耗和综合能耗为母列,生产参数(原油标准密度、外输含水率、进站流量、进站温度、进站压力、锅炉氧量、沉降温度、泵效率、外输温度、外输流量等18个生产参数)为子列,通过灰色关联分析,计算得到各影响因素关联度,进而筛选主控因素(表2)。

表2 集输系统合理能耗影响因素关联度分析结果  
Table2 Results of correlation degree analysis on influencing factors of reasonable energy consumption of gathering system

序号	变 量	灰色关联度
1	沉降温度/°C	0.999 9
2	外输温度/°C	0.998 9
3	原油标准密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	0.988 911
4	外输含水率/%	0.986
5	进站温度/°C	0.976 14
6	进站流量/(m <sup>3</sup> ·d)	0.973
7	外输流量/(m <sup>3</sup> ·h)	0.963 27
8	三相分离器出口含水率/%	0.961
9	进站含水率/%	0.958
10	进站压力/MPa	0.948 2

管线合理能耗测算 依据苏霍夫温降公式,结合输送原油凝析点确定集输管道最低输送温度,考虑安全运行阈值和经济合理性确定集输管道最优输送温度,进而求取此时的管线合理能耗(图7)。

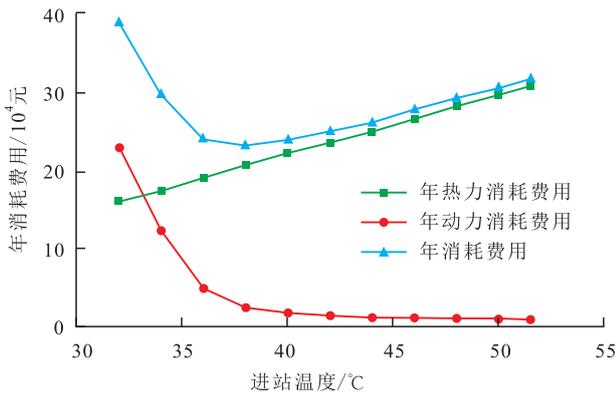


图7 不同进站温度下管线年消耗费用

Fig.7 Annual pipeline costs under different inlet oil temperatures

三相分离器合理能耗测算 建立三相分离器计算模型,模拟入口温度对三相分离后原油的流量、水流量、含水率等指标的影响(图8),优化求取三相分离器合理能耗,其计算式为:

$$E_{sf} = K(\pi D_{sf} L_{sf} + \pi D_{sf}^2)(t_{si} - t_{so}) \quad (10)$$

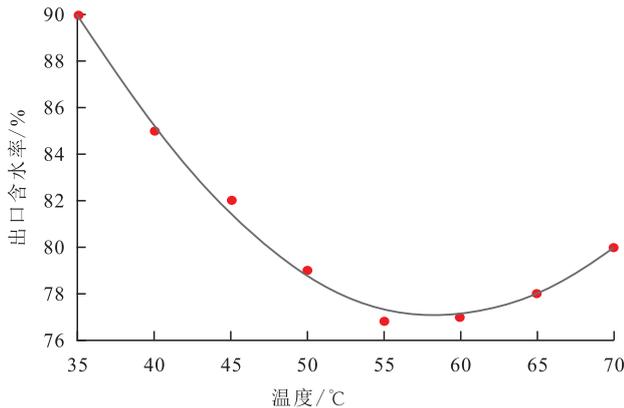


图8 三相分离器出口含水率与温度关系

Fig.8 Relationship between moisture content and temperature at outlet of three-phase separator

沉降罐合理能耗测算 确定沉降罐最优脱水温度,其受进罐液量、含水率、储罐容积、原油标准密度、破乳剂浓度等因素影响。根据油水分离的工作特点,建立水滴沉降计算模型,确定最优脱水温度,进而得出沉降罐合理能耗。其计算式为:

$$E_g = K_{gs} F_{gs} (t_{gi} - t_{go}) + K_{gx} F_{gx} (t_{gi} - t_{gx}) + K_{gc} F_{gc} (t_{gi} - t_{go}) \quad (11)$$

稳定塔合理能耗测算 建立稳定塔合理能耗计算模型,模拟温度、塔内压力对原油饱和蒸汽压、出气量等参数的影响,确定稳定塔出气量、塔内压力与来油温度之间的关系,进而确定合理能耗,其计算式为:

$$E_{wd} = K_s F_{wds} (t_{wdi} - t_{wdo}) + K_x F_{wdx} (t_{wdi} - t_{wdx}) + K_c F_{wdc} (t_{wdi} - t_{wdo}) \quad (12)$$

### 3 应用效果

根据胜利油田分公司各采油单位油藏条件、2021年能耗状况及2022年产液量、产油量生产目标等,分别计算各采油单位的合理能耗与现状能耗,得到各采油单位生产系统2022年现状能耗为142.9亿吨标煤,合理能耗为134.8亿吨标煤;同时,中国石化集团公司下达给胜利油田分公司的2022年能耗总额为138.8亿吨标煤,依据各采油单位现状能耗及降耗潜力空间权重,对油田节能目标进行分解,给各采油单位下达了能耗指标(表3)。对比利用传统的吨油气单耗法,笔者建立的利用降耗潜力法进行能耗指标分解配置可以充分体现不同采油单位油藏条件及降耗潜力差异对能耗指标分解配置的影响,更加科学实用。

表3 不同采油单位能耗指标分解配置计算

Table3 Calculation results of energy consumption quota decomposition and allocation for different oil production units

采油单位	合理	现状	降耗潜力		下达指标		
	能耗/亿吨标煤	能耗/亿吨标煤	潜力值/亿吨标煤	占总潜力权/%	降耗潜力法/亿吨标煤	吨油气单耗法/亿吨标煤	差值/亿吨标煤
A1	7.2	7.7	0.5	6.2	7.45	7.48	-0.03
A2	27.4	28.3	1.0	12.3	27.84	27.54	0.30
A3	2.9	3.1	0.2	2.9	2.98	3.01	-0.03
A4	15.1	15.9	0.8	10.0	15.45	15.40	0.05
A5	2.6	2.8	0.2	2.9	2.69	2.73	-0.04
A6	10.3	10.8	0.5	6.6	10.53	10.49	0.04
A7	3.1	3.4	0.3	3.6	3.29	3.34	-0.05
A8	0.7	0.7	0	0.5	0.72	0.71	0
A9	12.5	13.6	1.1	13.1	13.11	13.26	-0.14
A10	7.4	7.7	0.3	3.3	7.52	7.43	0.08
A11	9.5	10.3	0.7	9.2	9.91	9.99	-0.08
A12	10.1	11.1	0.9	11.6	10.61	10.77	-0.16
A13	6.1	6.7	0.6	7.0	6.42	6.51	-0.09
A14	17.3	18.0	0.7	9.1	17.62	17.48	0.14
A15	1.3	1.4	0.1	1.0	1.39	1.38	0
A16	1.3	1.3	0.1	0.7	1.30	1.29	0.01
总计	134.8	142.9	8.1	100.0	138.8	138.8	0

### 4 结论

能耗合理分解到采油单位,是油田企业落实节

能目标考核责任制、实现科学管理的重要依据。油田企业内部能耗指标合理配置的关键是准确测算不同油藏条件下不同生产单位原油生产系统的合理能耗。原油生产系统合理能耗及降耗潜力计算方法充分体现了油藏差异对能耗的影响,操作简便、精度较高;通过对比现状寻找潜力空间,对油田降耗目标进行标准化分解配置,为下一级采油单位下达能耗指标,督促采油单位深挖降耗潜力,降低生产能耗。研究解决了吨油气单耗法无法体现不同单位在不同油藏条件下能耗水平差异的缺点,为能耗管理部门的能耗指标分配工作提供借鉴和依据。矿场实践表明,应用该方法可以充分挖掘各采油单位的降耗潜力,避免了“鞭打快牛”等现象,体现了管理部门对能耗管理的科学性、准确性和公平性。

### 符号解释

$D_{\text{供水}}$ ——供水距离, km;  
 $D_{\text{st}}$ ——三相分离器直径, m;  
 $E_{\text{合理}}$ ——合理能耗, 亿吨标煤;  
 $E_{\text{机采}}$ ——机采系统合理能耗, 亿吨标煤;  
 $E_{\text{注水}}$ ——注水系统合理能耗, 亿吨标煤;  
 $E_{\text{集输}}$ ——集输系统合理能耗, 亿吨标煤;  
 $E_{\text{管线}}$ ——管线合理能耗, 亿吨标煤;  
 $E_{j\text{现状}}$ ——采油单位的现状能耗, 亿吨标煤;  
 $E_{j\text{合理}}$ ——采油单位的合理能耗, 亿吨标煤;  
 $E_{k\text{下达}}$ ——采油单位的能耗下达指标, 亿吨标煤;  
 $E_{k\text{合理}}$ ——采油单位的能耗合理指标, 亿吨标煤;  
 $E_{k\text{现状}}$ ——采油单位的能耗现状指标, 亿吨标煤;  
 $E_0$ ——油田企业能耗总额, 亿吨标煤;  
 $E_{\text{g}}$ ——沉降罐合理能耗, 亿吨标煤;  
 $E_{\text{st}}$ ——三相分离器合理能耗, 亿吨标煤;  
 $E_{\text{wd}}$ ——稳定塔合理能耗, 亿吨标煤;  
 $F_{\text{gc}}$ ——沉降罐四周侧面的面积,  $\text{m}^2$ ;  
 $F_{\text{gs}}$ ——沉降罐顶的面积,  $\text{m}^2$ ;  
 $F_{\text{gx}}$ ——沉降罐底的面积,  $\text{m}^2$ ;  
 $F_{\text{wdc}}$ ——稳定塔四周侧面的面积,  $\text{m}^2$ ;  
 $F_{\text{wds}}$ ——稳定塔顶的面积,  $\text{m}^2$ ;  
 $F_{\text{wdx}}$ ——稳定塔底的面积,  $\text{m}^2$ ;  
 $g$ ——重力加速度, 取值为  $9.801 \text{ m/s}^2$ ;  
 $H'$ ——平均扬程, m;  
 $H_{\text{d}}$ ——扬程, m;  
 $H_{\text{x}}$ ——泵挂深度, m;  
 $i$ ——油井编号;  
 $j$ ——采油单位编号;  
 $k$ ——某采油单位, 取值为  $j-m$ ;  
 $K$ ——三相分离器壁传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;

$K_{\text{c}}$ ——稳定塔侧面的总传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  
 $K_{\text{s}}$ ——稳定塔顶的总传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  
 $K_{\text{x}}$ ——稳定塔底的总传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  
 $K_{\text{gc}}$ ——沉降罐侧面的总传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  
 $K_{\text{gs}}$ ——沉降罐顶的总传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  
 $K_{\text{gx}}$ ——沉降罐底的总传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  
 $L_{\text{st}}$ ——三相分离器管长, m;  
 $m$ ——采油单位总数;  
 $n$ ——油井总数;  
 $N_{\text{轴}}$ ——轴功率, kW;  
 $p_0$ ——油压, MPa;  
 $p_{\text{t}}$ ——套压, MPa;  
 $p_{\text{机采}}$ ——机采系统合理有用功, kW;  
 $p_{\text{注水}}$ ——注水系统合理有用功, kW;  
 $p_{\text{井口}}$ ——井口注水压力, MPa;  
 $\Delta p_{\text{管损}}$ ——管线压力损失, MPa;  
 $\Delta p_{\text{阀损}}$ ——节流阀压力损失, MPa;  
 $q_i$ ——油田内部从  $i$  至  $n$  的单井产液量,  $\text{t/d}$ ;  
 $Q$ ——油田或区块总产液量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  
 $Q_{\text{注水}}$ ——注水量,  $10^4 \text{ m}^3$ ;  
 $t_{\text{gi}}$ ——沉降罐内部流体的平均温度,  $^\circ\text{C}$ ;  
 $t_{\text{go}}$ ——沉降罐周围空气的平均温度,  $^\circ\text{C}$ ;  
 $t_{\text{gx}}$ ——沉降罐底部土壤的平均温度,  $^\circ\text{C}$ ;  
 $t_{\text{si}}$ ——三相分离器内部流体平均温度,  $^\circ\text{C}$ ;  
 $t_{\text{so}}$ ——三相分离器外部环境平均温度,  $^\circ\text{C}$ ;  
 $t_{\text{wdi}}$ ——稳定塔内部流体的平均温度,  $^\circ\text{C}$ ;  
 $t_{\text{wdo}}$ ——稳定塔周围空气的温度,  $^\circ\text{C}$ ;  
 $t_{\text{wdx}}$ ——稳定塔底部土壤的温度,  $^\circ\text{C}$ ;  
 $\eta$ ——合理系统效率, %;  
 $\eta_i$ ——某油井合理系统效率, %;  
 $\eta_{\text{泵效}}$ ——泵效, %;  
 $\eta_{\text{注水系统}}$ ——注水系统合理系统效率, %;  
 $\rho$ ——油井混合液密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  
 $\rho_0$ ——原油密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

### 参考文献

- [1] 张琪. 采油工程原理与设计[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2006.  
 ZHANG Qi. Principle and design of oil production engineering [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2006.
- [2] 肖武, 张海燕. 基于油藏条件的机采系统合理能耗测算方法[J]. 当代石油石化, 2020, 28(5): 28-32.  
 XIAO Wu, ZHANG Haiyan. Calculation method for reasonable energy consumption in mechanical recovery based on reservoir condition [J]. Petroleum & Petrochemical Today, 2020, 28(5): 28-32.
- [3] 孙红霞, 仪垂杰, 周扬民. 采油系统能耗分析研究[J]. 青岛理工大学学报, 2008, 29(5): 90-93.  
 SUN Hongxia, YI Chuijie, ZHOU Yangmin. A study on energy consumption analysis in extraction system [J]. Journal of Qingdao Technological University, 2008, 29(5): 90-93.

- [4] 冯虎,吴晓东,张建军,等.有杆抽油系统井下能耗研究[J].石油钻采工艺,2005,27(6):63-65,104.  
FENG Hu, WU Xiaodong, ZHANG Jianjun, et al. Research on energy loss of downhole sucked-rod pumping system [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2005, 27(6): 63-65, 104.
- [5] 梁晶,马建国,吕毫龙.油田注水系统能耗指标及其影响因素分析[J].石油石化节能,2016,6(3):37-39.  
LIANG Jing, MA Jianguo, LÜ Bolong. Analysis on energy consumption index and influencing factors for oilfield water-injecting system [J]. Energy Conservation in Petroleum & Petrochemical Industry, 2016, 6(3): 37-39.
- [6] 底国彬,汪海霞,董瑞珍,等.原油集输与处理工艺低能耗技术应用研究[J].石油规划设计,2007,18(6):31-32.  
DI Guobin, WANG Haixia, DONG Ruizhen, et al. Application of the low energy conservation technique in oil gathering and processing technology [J]. Petroleum Planning & Engineering, 2007, 18(6): 31-32.
- [7] 董世民,张喜顺,吴长杰,等.抽油机井区块整体节能参数仿真优化方法[J].石油学报,2010,31(3):475-479.  
DONG Shimin, ZHANG Xishun, WU Changjie, et al. Simulation and optimization method for the integral energy-saving suction parameters of rod pumping wells in an oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(3): 475-479.
- [8] 郑海金,邓吉彬.能耗最低机采系统效率评价方法的研究与应用[J].复杂油气藏,2010,3(2):68-71.  
ZHENG Haijin, DENG Jibin. Research and application on evaluation method of system efficiency of pumping well with the least energy consumption [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2010, 3(2): 68-71.
- [9] 刘晨,张金庆,李文忠,等.基于近似理论水驱曲线的油藏水驱体积波及系数动态计算方法[J].油气地质与采收率,2020,27(5):112-118.  
LIU Chen, ZHANG Jinqing, LI Wenzhong, et al. A new dynamic calculation method of volume sweep coefficient of water drive reservoir based on approximate theoretical water drive curve [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(5): 112-118.
- [10] 陈晓贺,陈俊聪,袁舟.抽油机井平衡比与能耗的关系[J].油气田地面工程,2014,33(1):5-6.  
CHEN Xiaohu, CHEN Juncong, YUAN Zhou. Relationship between balance ratio and energy consumption of pumping wells [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2014, 33(1): 5-6.
- [11] 张瑞超,王增林,王欣辉,等.多因素约束条件下高含水油井抽油机宏观工况图版绘制与应用[J].石油钻采工艺,2018,40(1):94-101.  
ZHANG Ruichao, WANG Zenglin, WANG Xinhui, et al. Preparation and application of macroscopic behavior chart of pumping unit in high-water-cut oil wells under the constraint of multiple factors [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40(1): 94-101.
- [12] 吴忠维,崔传智,杨勇,等.高含水期大孔道渗流特征及定量描述方法[J].石油与天然气与地质,2018,39(4):839-844.  
WU Zhongwei, CUI Chuazhi, YANG Yong, et al. Seepage characteristics and quantitative description of large pore pathways at high water cut stage [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(4): 839-844.
- [13] 杨勇.胜利油田勘探开发大数据及人工智能技术应用进展[J].油气地质与采收率,2022,29(1):1-10.  
YANG Yong. Application progress of big data & AI technologies in exploration and development of Shengli Oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(1): 1-10.
- [14] 阮晶琦,梁宏宝,郑应伟.不同工况下抽油机能耗规律研究[J].石油矿场机械,2014,43(7):8-12.  
RUAN Jingqi, LIANG Hongbao, ZHENG Yingwei. Study on energy consumption laws of the pumping unit under different working conditions [J]. Oil Field Equipment, 2014, 43(7): 8-12.
- [15] 郭振东.抽油机井口密封装置能耗损失计算[J].机械工程师,2007,6:125-126.  
GUO Zhendong. Energy loss calculation of wellhead sealing device in pumping unit [J]. Mechanical Engineer, 2007, 6: 125-126.
- [16] 别锋锋.油田注水系统规划优化研究[D].大庆:大庆石油学院,2004.  
BIE Fengfeng. Optimization research to the layout of the oilfield water injection system [D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2004.
- [17] 王兰灵.注水系统节能挖掘措施[J].油气田地面工程,2007,26(2):29-30.  
WANG Lanling. Energy-saving excavation measures for water injection system [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2007, 26(2): 29-30.
- [18] 詹建东,陈学艳,刘强鸿,等.提高中原油田注水系统效率的措施探讨[J].江汉石油学院学报,1999,21(2):85-86.  
ZHAN Jiandong, CHEN Xueyan, LIU Qianghong, et al. Measures to raise the efficiency of water injection system in Zhongyuan Oilfield [J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 1999, 21(2): 85-86.
- [19] 贾光政,常玉连,邹龙庆,等.油田大型注水系统调速节能技术[J].大庆石油学院学报,2000,24(1):58-62.  
JIA Guangzheng, CHANG Yulian, ZOU Longqing, et al. Study on energy saving technology used for large water-injection system in oilfield [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2000, 24(1): 58-62.
- [20] 李贺.大庆长垣油田特高含水后期水驱控水提效试验区开发效果[J].大庆石油地质与开发,2021,40(4):94-100.  
LI He. Evaluation on development effects of water cut control and efficiency-improvement test areas at the late stage of ultra-high water cut in Daqing Placanticline Oilfield [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2021, 40(4): 94-100.

编辑 邹淑滢