专题报道

责任编辑:魏佳琪 秦紫函
电　　话:59963398
邮　　箱:weijq@sinopec.com
审　　校:张春燕
版式设计:赵 博 王 强

地质工程一体化多学科联合作战 为复杂油气藏效益勘探开发带来新希望

周48气田4号脱硫站全景。 李晋 摄

阅读提示

我国非常规等复杂油气藏资源丰富,但复杂的地表条件、多变的地下储层,也为油气勘探开发带来更多挑战。近几年,地质工程一体化思路的提出及尝试,展现了新的生机,为诸多复杂油气藏效益勘探开发带来了新的希望。

围绕隐蔽油气藏、超深层碳酸盐岩、致密油气、页岩油气等重点领域,中国石化持续加强地质理论基础研究与工程技术攻关,加快技术装备升级,坚持地质工程一体化发展思路,建立一体化运行协同机制,加大项目全过程一体化管理力度,切实推进各油气田降本增效,助力实现高质量勘探和高效益开发。

知识链接

地质工程一体化内涵

地质工程一体化是针对复杂油气藏开发提出的一种有效的技术与管理模式。具体来讲,它是针对某一油气田的产能建设、开发部署、开发调整或提高采收率等工作,通过技术和管理创新对地质、工程技术、专业人员、经济等各种要素进行统筹管理和集成优化,实现工程科技与管理的融合,达到提质降本增效的目的。

地质工程一体化的有力实施离不开一体化目标、一体化数据平台、一体化理念的团队、一体化管理4个基本要素的支撑。该模式是对传统运行模式和决策机制的变革,由专业业务应用变革为跨专业业务协同,打破了部门管理的"藩篱",由分段式管理变为在线闭环式管理、由现场工作协调变为网络化在线协调、由内部操作变为内外联动大操作模式,可全面提升处理、决策、执行水平。

西北油田

合作共赢 内外联动破解深地难题

□张 俊 蒋琳琳 丁玉萍

集团公司重点工程顺北油田天然气处理站成功投产,重点探井顺北10X井喜获高产、亚洲陆上垂深最深千吨井顺北84斜井诞生……

"半年不到,取得多项重要成果,一体化大兵团作战模式恩功至伟。"西北油田工程技术管理部经理刘湘华说。

打破界限,共破发展困局

2021年,集团公司提出在顺北特深层实施一体化大兵团作战模式,集中力量办大事。西北油田成立顺北增储上产项目部,全面推进一体化大兵团联合作战。

他们打破单位、部门界限,与物探院、石勘院、工程院及6所高校、专业化公司的近120名技术人员,组建顺北油气高效勘探开发、塔河缝洞型油藏提高采收率等六大"联合攻关团队"。

前不久实现突破的顺北84斜井,通过地质工程一体化研究,井深斜、垂深在设计基础上分别增加了1038米和761米,钻井周期较设计缩短40天,油气柱高度提高到1088米,大幅降低了勘探成本。

"两年来,西北油田共开展科研合作项目120个、合作课题27项,推动近20项先进技术的适应性转化及迭代升级,减少研发费用3200余万元。"西北油田首席专家杨敏说。

合力攻关,"亮剑"世界难题

塔里木盆地地质结构复杂,存在断层多、岩石硬度大、松散垮塌等问题,深层采油还面临高温、高压等难题。

顺北10斜井井场冰冻在晨光下。 张 俊 摄

对此,西北油田以开放合作的姿态形成了内外联动的科研格局。

在地下9000米深处、温度高达200摄氏度、地层压力在150兆帕以上,钻杆就像"煮熟的面条"难以操控,一般设备和仪器内的电子元器件、橡胶件等会损坏失效,钻头上的"导航"系统也会失效。

一体化模式促使技术人员遇到问题不再仅从自身出发,而是从地质、工程、勘探、开发等多个角度综合考虑解决办法,以更好地实现地质和工程目标。

攻关团队积极研发适应极限工作条件下的测控仪器和井下工具,创新形成超深层储层立体成像技术和缝洞体精细雕刻技术,擦亮了地质人员的"眼睛",断裂识别精度从30米精确至15米;成功研发耐高温高压的高精度随钻测量仪器,给钻头安上眼睛,推广应用"垂钻+螺杆+PDC钻头"技术,平均钻速较前期提高57%,在地下8000米可以准确命中目标靶区,中靶精度由60%提高至90%。

"我们已经研发应用了14项特深层定向钻井系列技术,形成国家和行业标准24项,拿下9项亚洲第一,实现了我国关键核心技术的突破,钻井周期从3年前的280天缩短到97天。"西北油田石油工程技术研究院党委书记王龙说。

协同发力,赋能勘探开发

3月8日,西北油田与塔里木油田百余名专家、技术骨干开展"线上+线下"技术交流研讨,更进一步地达成了共识,在过去资料共享的基础上,探索油、气、水、地、路共享。

西北油田和塔里木油田是区块相连、道路相通、油井相望的"近邻"。2021年,双方建立长效合作双赢机制,全年交流学习60余次,引进关键技术65项,其中26项已在现场应用,效果良好。

通过联合攻关形成"少井高产"动用配套技术,顺北5-14H井分层酸压改造后,成功沟通两个目标体,油井初期日产量403吨,较邻井提升140%。

西北油田完善创新体制机制,探索实施"揭榜挂帅"、长期资助、项目委托、知识产权共享、人才交流等新模式,初步建立了基于理论识识、技术序列及产品化三大类型的科技成果库,科技成果转化率提升至85%。

总院一分院支撑模式,"中一中"合作交流机制,与东部油田风险合作开发……各创新要素协同发力,集智创新的良好局面已初步形成。

西南油气

协同联动 科学精准解难题提效益

□薛 婧 尹 琅

"虽然总体处于上产阶段,但我们的矿权资源小、散、边、差、少,复杂油气藏有效开发必须在技术管理模式上创新。"西南油气总经理刘言说。

多年来,西南油气面对复杂气藏效益开发挑战,持续推进地质与工程深度融合,针对地质难点及工程技术瓶颈,综合多专业、多单位开展一体化攻关,实现了多专业协同、链条式运作,先后建成了中江、元坝、威荣等9个大中型气田。

构建团队,地质工程协同联动

截至6月底,投产近一年的中江气田新盛201井累计生产天然气1.47亿立方米,须家河组气藏"虚家伙"的帽子摘掉了。

深埋地下4800米左右的四川盆地须家河气藏,资源量丰富,但由于地质工程未有效结合,动用率仅占11%。

"我们以气藏为核心,成立多学科深度融合的一体化创新团队、一体化设计跟踪团队,集智集力整合技术体系,整体优化创新,统筹协调运行。"刘言说。

西南油气勘探开发研究院、工程技术研究院技术人员做好床策、优化和督导,采气单位配合项目部精细组织实施,采取地质与钻采工程专业"一对多"模式,推进开发全过程科学化、精准化,现场服务覆盖率达100%。

"须家河地质工程一体化团队从2015年起就系统梳理地质资料,分析改造工艺适应性,最终明确了气藏高产主控因素和有效开发的关键。"西南油气工程技术研究院专家刘林说。

问题导向,把准提产增效关键

6月3日,林页10HF井测试获日产气22万立方米,取得该区页岩气勘探重大突破;6月11日,水页54-4HF井40天完钻,创西南油气钻井周期最短纪录……深层页岩气井建报频传,地质工程一体化功不可没。

"坚持问题导向,通过一体化攻关,削析气井低产、开发低效原因,明确高产主控因素,增强工作预见性、主动性和有效性。"刘言说。

威荣页岩气田员工在巡检。 任远均 摄

西南油气组建非常规油气勘探开发管理部,同时抽调科研骨干力量以点带常规技术中心,攻关深层页岩气效益开发难题。

他们建立"逆向设计、正向实施"的工作模式,以储层改造为中心、以经济开发为目标,将开发设计思路由改造模式、改造工具、完井结井方式、井身结构、井眼设计到布井"逆向行驶"。同时,他们搭建从"气藏工程"到"钻采工程"的桥梁,精准翻译地质"术语",强化"钻、完、改、采"全链条统筹,靠前支撑,协同解决难题。

一体化团队把计划、调度、操作由接力管理转变为全程在线、闭环管理,设计、实施、评估、决策各环节实现无缝衔接,提供"现场+远程"技术服务。

创新驱动,技术管理稳步提升

"地质工程一体化涉及众多学科和众多工程技术应用领域,必须以地质特征为基础,确定工程技术方向,保障油气成果最大化。"刘言说。

他们聚焦技术瓶颈,开展地质工程一体化攻关研究,针对陆相中浅层砂岩气藏、陆相深层须家河气藏和川南深层页岩气藏,创新形成了海相超深长水平段页岩气开采压裂压技术等多项关键技术。

他们聚焦产量影响,推行地质工程整体优化设计、一体化实施调整,地质评价选区,制定开发技术政策和工艺策略,从源头上削减断层、地应力等对产量的影响。

早在川西气田评价阶段,一体化团队就认识到,识别并沟通裂缝是高产主控因素,优质层段充分改造是提产的关键。

地质要求倒逼工程进步。一体化团队不断调整开发思路,迭代工艺技术,经历了小规模解盐酸化、大规模交替注入酸压等5个阶段,最终形成了超深海相长水平段水平井定点酸压技术,实现了日超深长水平段开发井平均无阻流量超200万立方米/日,全面建成20亿立方米/年产能。

专家观点

一体化压裂,最大限度挖掘储层潜力

□王 迪

勘探开发进入致密油气、页岩油气等非常规领域后,储层基质更致密、构造更复杂、非均质性更强,压裂施工难度更大,常规压裂改造模式由于缺少地质和工程的紧密结合,影响了压裂改造的针对性和措施有效性,因此,地质、工程等多学科一体化压裂技术成为一种趋势与共识。

地质工程一体化压裂技术改变了传统地质油气藏工程"接力式"压裂设计思路,多专业相互融合,提升储层认识程度及综合改造效果。2018年以来,围绕非常规油气藏勘探开发技术难点,石油勘探开发研究院复杂油气藏高效压裂技术创新团队以压裂为核心,集合地球物理、测井、建模、油藏、压裂等专业精干力量,强化基础理论技术研究,破解"卡脖子"难题,形成了系列技术和有形化产品,为最大限度挖掘储层的增产稳产潜力及单井可采储量潜力提供了技术保障。

在地质工程"一体化"高精度评价方面,研发基于常规测井裂缝定量评价、基于波速各向异性精定地应力方位技术,以及电阻率倾角差异测井响应的分量裂缝参数算法及系统;针对常规地震预测小断裂、微裂缝方法预测精度差难题,形成地震多尺度断裂和裂缝检测技术,描述裂缝空间发育情况,为地质裂缝建模提供天然裂缝发育密度、方位等有效数据信息;通过纵向"甜点"测井定量评价,并震融合三维"甜点"预测,水平井段"甜点"分布预测,分别解决了"点—线—面"除合"甜点"评价技术难题,准确指导压裂选层选段。

在全三维复杂裂缝扩展模拟方面,建立密集群动力学表征与协同扩展模型,创新显式算法+并行计算方式,形成考虑密集簇间的复杂裂缝扩展高效模拟方法;基于"井筒—孔眼—裂缝"全耦合流动参数分配模型,引入智增、非均匀射孔等工艺数学表征,结合不同"甜点"特征,形成不同非均质地质条件的精细化压裂缝网设计无瑕投表。

在压后复杂裂缝定量评价方面,建立岩石层理、天然裂缝延伸等缝网扩展的压力响应机制,形成复杂裂缝扩展模式判别准则,准确识别天然裂缝+人工裂缝协同动态扩展形态,与微地震事件动态变化特征响合;打破传统压后评价仅考虑单一裂缝造成模式,首次在物质平衡方程中引入次级裂缝压降速率特征函数,耦合求解主缝、次级裂缝面积及缝网复杂程度,形成压后复杂缝网定量评价技术。

此外,构建了自主产权地质工程一体化压裂设计软件。基于业务层、支撑层、数据层,构建软件平台框架;集成自研"甜点"评价、压裂设计等关键技术模块,并统一数据接口,打通地质工程数据流,自主研发一体化压裂设计软件,打破国外垄断。

近年来,技术团队紧密结合现场勘探开发难题,加大现场技术支撑力度,技术带干驻井支撑,与油田各部门密切配合,严格把控入井材料质量检测、压裂液配制指导、压裂泵注优化、压后分析等施工环节,做到段簇划分、泵注设计"一段一策"实时优化,为储层高效动用提供有力保障。

在没有千锤星组成功压裂经验可以借鉴的前提下,技术团队从河道描述出发,并展借鉴3井三维储层地质工程"甜点"评价、优化形成支撑缝复合体和压裂改造工艺技术思路,最终获得13万立方米/日高产气流,成为中原油田普光探区启动陆相勘探10余年来首个实质性突破。

在西南油气深武系塔什寺组新层系页岩气藏勘探中,技术团队创新优选出低有机质厚层纹粉砂质页岩为综合"甜点"段,并提出部署水平井全五103HF井建议,结合压裂施工过程中出现的异常现象对储层地质、工程特征不断深化认识,优化形成了"多段沙蓝密切割+提高前置仪隐率+形成网状缝控叠变+组合粒径强加砂"的压裂改造模式,试获天然气产量25.8万立方米/日,标志着川南新区新层系塔什寺组页岩气勘探取得重大突破。

(作者来自石油勘探开发研究院采油工程研究所)

胜利石油工程

深度融合 紧抓生产运行"牛鼻子"

□孙金鑫

205.24万米,相当于"钻"透了232座珠穆朗玛峰。这是胜利石油工程今年上半年交出的钻井进尺超目标任务的亮眼成绩单,也是该公司深入推进地质工程一体化运行的优异成果。

近年来,胜利石油工程成立一体化运行领导小组,建立地质工程一体化优化、生产组织一体化运行、监督考核一体化评价"三个一体化"机制,紧紧抓住生产运行时效的"牛鼻子",推动"四提"工作成效不断巩固扩大,有力支撑了中国石化上游板块油气储量产量箭头双向上。

联合作战打开难动用储量开发大门

以往,新井方案设计、钻井施工常由两家公司分工负责,甲方来油厂主导方案设计,负责钻井施工的工程技术服务企业很少介入地质工程设计优化。

双方合作开发后,胜利石油工程主动作为,靠前服务,积极参与源头方案设计,根据施工区域部井地层状况,地下油气层显示、钻井作业风险等,与甲方一起反复论证、不断优化地质工程设计。

永936扩区块是胜利油田的难动用区块,通过地质工程一体化优化设计,工程设计迭代升级,他们大胆应用大斜度井穿"糖葫芦"、仿水平井密切割改造等创新开发模式,单井最高日产油量达到20吨,是普通井的3倍以上,为后续工作量的释放提供了有力支撑。

一体化运行小组成员在讨论研究优化措施。 王 福 摄

"没有动用不了的储量,只有解放不了的思想。只要从技术、管理、思路上取得突破,难动用也是可以'动'起来的。"胜利石油工程钻井工程首席专家万绪新说。

胜利石油工程深知地质工程一体化对难动用储量合作开发的重要性,积极推动各方力量,组成"英雄联盟",对区块开发方案进行整体研究和优化,对开发技术进行集约集成,工程与油藏地质高度融合的一体化运行模式应运而生。

地质工程一体化运行就像一把钥匙,胜利石油工程接连打开了盐222区块、高892区块、利567区块等一个个难动用储量开发的大门。

难动用项目合作开发以来,累计动用储量1.56亿吨,新建年产能210万吨,释放升位1200口,进尺近300万米,直接产值达100亿元,被称为"石油工程管理的革命"。

技术融合推动页岩油规模效益开发

地质工程一体化不仅为胜利工区难动用储量合作开发带来了曙光,更推动了页岩油规模效益开发。

如果把难动用储量比作一块"硬骨头",那么页岩油算是"骨头缝里的肉渣",但这些"肉渣"不可小视。

"就算是'深水区',我们也要闯一闯、蹚一蹚!"胜利石油工程负责人说。

2021年11月,国家级页岩油示范区在胜利油田拉开建设帷幕。

实现页岩油的效益开发,关键在于油藏地质、工程技术、开发工艺的相互融合。胜利石油工程坚持提效率、提产能、提效益,用一体化的创新思路解决井位和井身结构对工程提速的大幅限制问题,把施工工艺融入工程设计、把地质认识融入工程技术、把工程技术落脚到开发需求,大力推进技术、管理、装备"三个升级",形成了页岩油高效勘探、效益开发新模式。

奥页、牛页、渤页、义页、丰页……从敢不敢打、能不能打,会不会打的疑问,到找到打得成、打得好、打得快的答案,胜利石油工程用理念革命、施工革新,打破页岩油开发的高成本桎梏,将一组组不断崭新的数据、一串串打破历史的指标,填写在端牢能源饭碗的"答卷"上。

抓住胜利页岩油大发现、大发展的战略机遇,胜利石油工程将继续围绕提效率、提产能、提效益,创新页岩油开发技术体系,以页岩油的大发展助力保障国家能源安全。

江汉石油工程

按图寻宝 助力页岩气规模效益开发

□于成旺 李 澎 李知聪 朱 沂

近年,江汉石油工程凭借过硬的技术实力和优异的施工业绩,再次中标贵州正安页岩气两口井的钻井工程项目。目前,该公司在正安页岩气区块已高效完成22口井钻井和11口井压裂施工,助力贵州正安从一个"富煤、缺油、少气"的地区,一跃成为继重庆涪陵、四川长宁和威远、内蒙古鄂尔多斯后又一大页岩气主产区。成果的取得,离不开地质工程一体化服务模式。

一张"藏宝图",精准定位高甜度"甜点"

准确找到富含油气的"甜点",对于提高储层钻遇率和油气产量至关重要。

早在涪陵、宜昌、长宁等地区的页岩气勘探开发中,江汉石油工程就探索形成了以井震精细对比、页岩气井全周期跟踪评价为代表的地质工程一体化运作模式。但正安属页岩气新区域,周边可借鉴的地质资料少,"甜点"识别评价难。

为此,该公司地质工程一体化技术人员通过借鉴邻近区域地质资料,开展大数据分析对比,最终落定了该地区页岩气层段纵向"甜点"分布特征。

他们将"地质甜点"与"工程甜点"相结合,在寻找优质页岩气层的同时充分考虑工程技术能力,实现目标层和目标区的精准刻画。

通过一体化研究、一体化设计,技术人员绘制出了正安页岩气开发的"藏宝图",指引施工人员开辟了一条条地下通道,牵引贵州地下沉睡亿万年的页岩气喷涌而出。

地质工程研究人员一起讨论设计方案。 李 澎 摄

地质钻井一体化,快速到达"藏宝阁"

"虽然拿到了'藏宝图',规划好了寻宝路线,但在途中会遇到哪些困难仍未可知,必须小心谨慎。"江汉工程钻井二公司正安页岩气项目经理柳文君说。

为了提前预警、及时规避风险、提高钻井时效,在每口井钻井施工前,技术人员都会仔细梳理邻井施工经验,认真分析区块资料,研判风险点,不断细化"一井一策、一段一策、一趟一策"施工方案。

同时,他们大力推行首席专家包区、专家包井、工程师包技术模式,详细研定风险防控措施和关键井段提速方案,技术骨干全程驻井指导,确保各项技术措施精准落实。

钻井施工过程中,工程、地质技术人员一体化协同作战,紧盯施工关键节点,联合开展技术攻关,确保施工顺利推进。

安页3-7HF井仅用28天就完成了4448米的钻井施工,周期节约率达到27%,打破了区块纪录;安页10-1HF井钻井周期29天,刷新正安区块单趟进尺最多、水平段最长等纪录,打造了可复制、可推广的页岩气井样板工程。

地质压裂一体化,让"甜点"充分释放

压裂,就是在地底修建页岩气"村村通"工程,把分散在各处的细小裂缝连接起来,再把里面的页岩气"挤"出来。

"正安地区优质页岩厚度偏薄、储层环境复杂,想把页岩气顺利'挤'出绝非易事。"江汉石油工程页岩气开采技术服务公司储层改造研究所技术人员同秀介绍。

技术人员加强研究攻关,最终确定采用密集切割压裂工艺,通过增加改造体积内裂缝密度,由井控储量模式转变为缝控储量模式,彻底释放页岩气产能。

通过实验分析,技术人员发现该地区页岩气储层质含量高,当遇到酸性压裂液时,溶蚀率差异大,并且其中含有蠕动性矿物,遇酸就变成软泥膏,对储层破坏较大。"很可能出现我们刚修好'路',就被'泥石流'给淹没的状况。"同秀说。

针对这一难题,技术人员优化压裂液体系,通过降低酸液浓度、添加蠕动性矿物抑制剂等降低酸岩反应,尽量减小储层伤害,在取得"宝藏"的同时也确保"藏宝地"不被破坏。

前不久,江汉石油工程井下测试公司压裂施工的安页10井用获试气初期日产5万立方米,充分展示了中国石化石油工程地质工程一体化的技术服务能力。

一体化协作,赋能复杂油气效益开发

□胡群爱

油气田勘探开发是对油气田地质认识不断深化细化和对工程技术不断优化改进的过程。近年来,国内油气勘探向非常规、超深层等领域快速延伸,面临着地质风险急剧增大、开发投入大幅增加等问题,地质工程一体化模式应运而生。

所谓地质工程一体化,是以地质目标最大化和工程风险最小化为原则,从高精度三维地震资料和精细地质综合研究入手,通过地震、地质、开发、测录井、钻井、压裂等多学科、多专业有机结合,相互协同、多维度优化,以增强复杂、特殊油气藏勘探开发效果。

2014年,石油工程技术研究院以提高页岩气开发效益为目标,分析了我国页岩气开发中存在的主要问题,在国内率先系统论述了针对页岩气储层特征的地质工程技术思路和方法,建立了页岩气地质工程一体化技术体系。

为实现页岩气井产量和工程投资最优匹配目标,工程院在地质和工程"甜点"评价基础上,采用"交叉+单向"的布井方式;针对压裂区井间密集、防碰防风险大等难题,提出井眼轨迹降设计流程和方法,实现井眼"零"碰撞;针对上部气层易漏失、长水平井眼轨迹控制难度大的难题,开展页岩地层岩石力学特征精细描述,形成"导眼+三开制"的长井段水平井身结构设计技术;应用地震实时跟踪及方位伽马成像技术,优选导向54-4HF井,优质储层穿行率达98%以上。由此,工程院逐步优化形成了从总式井组到"井工厂"再到大型长水平段立体开发"井工厂"的优快钻井技术体系。

储层改造方面,针对压前储层评价,工程院建立了测井曲线、关键录井元素等评价方法,实现地质工程一体化优选"甜点"段和最优"甜点"段准确识别;针对压裂优化设计,开展压裂注入模式及工艺参数优化研究,获取了与储层特征相匹配的最优压裂施工参数组合,同时优化提标压后返排时机及返排制度,提出了有利于加快压后油气峰值到来的排采原则;针对压后评估反演,建立了基于压裂施工曲线及数据对储层地质参数的系列化反演分析模型,为地质参数的实时修正和压裂施工参数的适时调整,提供了有力技术保障。

通过地质工程一体化技术的实施,截至2023年4月底,涪陵页岩气田一期单井累产超亿立方米的井达178口,占投产井数量的七成,单井平均最终可采储量1.5亿立方米。

为实现顺北油气田"少井高产、多控长稳"的开发目标,工程院针对超深碳酸盐岩油气藏复杂地质工程条件,推进地质工程协同攻关、整体优化。基于"火山岩地震相控反演、断裂多尺度检测"等钻井风险预测,指导井位优选,复杂周期缩短78%。基于破碎性储层三维地应力场模型,确定最优钻井方位,井壁稳定率提高65%;根据储层发育模型优化井眼轨迹,最大程度揭示有效储层;深化碳酸盐岩缝洞储集、储层异常高压认识,形成了地质工程风险联合分析的井身结构设计方法,井身结构持续优化。基于"四要素"协同高效破岩理念与方法,研选井型商PDC钻头及减振器、冲击类辅助破岩提速工具,建立了多约束条件下钻井参数优化方法,优化形成了易钻地层防斜打快技术、超深水平井轨道高效控制技术、复杂地层井筒强化技术等,实现了钻井技术的系列化、模板化。

储层改造方面,工程院基于立体雕刻容积法储量计算,采用自研软件确定断裂面最优连通路径,实现了连通缝洞体的量化表征。基于"波动-管渗"耦合试井方法,建立裂缝洞体综合因子预测地层系数方法,高产井预测精度超90%;形成断裂连通和裂缝连通两种设计方法,实现规模储量高效动用。建立复杂地层酸岩反应等模型,针对不同裸状结构,设计三种酸压沟通模式,单井产能提升20%以上。

通过地质工程一体化技术的实施,顺北油气田油区钻井周期缩短52%,气区钻井周期缩短30.4%,完井一次成功率达92.3%,收获26口千吨井。

(作者来自石油工程技术研究院,集团公司高级专家)