

# “四合一”钻具在定向钻井工程中的应用分析

曹永斌, 杨德全\*, 杜斌, 杨小兵, 马健, 李蓓, 李岩

(宁夏回族自治区煤炭地质局, 宁夏银川 750000)

**摘要:**“四合一”钻具是一种把钻头、螺杆、短钻铤和稳定器四种钻具按照固定顺序组合起来的定向钻具,具有双稳定器刚性结构,同时利用单弯螺杆的特性,既可以实现直井段的防斜打直,又可以在造斜段进行滑动定向钻进,还可以在稳斜段、增斜段、降斜段进行复合钻进。本文针对不同“四合一”钻具组合对井眼轨迹控制产生不同影响的问题,结合桃7-15-17X1天然气开发定向井钻井工程施工案例,探讨了该钻具组合影响井眼轨迹控制的关键因素,分析了不同钻具组合参数影响井眼轨迹控制的主要原因,对促进定向井井眼轨迹控制技术发展、提高定向井钻井施工效率具有重要意义。

**关键词:**“四合一”钻具;定向井;井眼轨迹;井下工具

**中图分类号:**P634.7;TE243 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2024)S1-0172-06

## Application analysis of the “four in one” drilling tools in directional drilling engineering

CAO Yongbin, YANG Dequan\*, DU Bin, YANG Xiaobing, MA Jian, LI Bei, LI Yan

(Ningxia Hui Autonomous Region Bureau of Coal Geology, Yinchuan Ningxia 750000, China)

**Abstract:** The “four in one” drilling tool is a directional drilling tool that combines the drill bit, screw, short drill collar, and stabilizer in a fixed order. It has a double stabilizer rigid structure. By utilizing the characteristics of a single bending screw, it is possible to achieve anti deviation straightening in the straight section, sliding directional drilling in the inclined section, and composite drilling in the stable, increased, and lowered sections. This article focuses on the different effects of different “four in one” drilling tool combinations on wellbore trajectory control. Combining with the construction case of Tao7-15-17X1 natural gas development directional well drilling project, the key factors affecting wellbore trajectory control by this drilling tool combination are discussed. The main reasons why different drilling tool combination parameters affect wellbore trajectory control are analyzed, which is of great significance for promoting the development of directional well trajectory control technology and improving the efficiency of directional well drilling construction.

**Key words:** “four in one” drilling tool; directional well; wellbore trajectory; downhole tools

### 0 引言

无论是石油天然气钻井工程,还是非常规天然气钻探、地质钻探,基本都涉及到定向钻井施工,施工中就需要使用井下定向工具。国内定向钻井技术研发使用起步较晚,近年来,随着各井下工具生

产企业和科研技术单位的大力投入和深入研究,国内定向钻井技术和井下工具逐渐丰富完善,部分单位进行了自主研发,国内石油天然气行业也逐渐在随钻测量及定向器具方面形成了标准。

目前,地质勘探及油气钻井行业使用最广泛的

收稿日期:2024-07-02 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.S1.025

第一作者:曹永斌,男,汉族,1989年出生,工程师,地质工程专业,硕士研究生在读,从事地质钻探技术研究及煤炭地质勘查工作,宁夏银川市金凤区新昌东路158号,249385720@qq.com。

通信作者:杨德全,男,回族,1985年出生,工程师,石油工程专业,从事石油地质钻探技术研究及煤炭地质勘查工作,宁夏银川市金凤区新昌东路158号,735819762@qq.com。

引用格式:曹永斌,杨德全,杜斌,等.“四合一”钻具在定向钻井工程中的应用分析[J].钻探工程,2024,51(S1):172-177.

CAO Yongbin, YANG Dequan, DU Bin, et al. Application analysis of the “four in one” drilling tools in directional drilling engineering [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(S1): 172-177.

就是“四合一”钻具,即把钻头、螺杆、钻铤和稳定器四种钻具组合起来的一种定向钻具组合<sup>[1]</sup>,配合MWD无线随钻测斜仪,可以满足定向钻井施工对井眼轨迹控制的需要,高效完成钻井施工。该钻具组合,相比传统井下定向工具,具有实时控制井眼轨迹、提高纯钻时间比例、大幅提升钻进效率的优点。本文依托苏里格气田桃7-15-17X1天然气开发定向井施工,对“四合一”钻具不同外径、长度组合发挥不同作用的情况进行了研究分析,总结出了在 $\varnothing 222.2$  mm井径定向井钻井施工中“四合一”钻具选配的技术方法,对发挥“四合一”钻具组合功能,提高定向井井眼轨迹控制效率具有积极作用。

## 1 工程概况

桃7-15-17X1井是川庆钻探苏里格气田的一口天然气开发定向井,施工地点位于内蒙古自治区乌审旗,由宁夏回族自治区煤炭地质局承担实施。该井设计井深3740 m,设计垂深3440 m,设计位移759.58 m,设计方位 $22.85^\circ$ ,设计靶点垂深3280 m,磁偏角 $-3.89^\circ$ ,允许中靶半径30 m。目的为获取桃7区块盒8、山1段油气资源,加快苏里格气田开发速度。该井实际钻井周期28 d,二开采用“四合一”钻具组合钻进,实际完钻井深3615 m,中靶半径25.07 m,距靶心方位 $134^\circ$ 。该井测井数据(方位已校正)如表1所示。

表1 桃7-15-17X1井测井数据

序号	井深/m	垂深/m	井斜角/ $^\circ$	方位/ $^\circ$	水平位移/m	闭合方位/ $^\circ$	狗腿度/ $[(^\circ)\cdot(25\text{m})^{-1}]$
1	640	639.99	0.517	353.267	2.89	353.16	0.45
2	840	839.92	5.144	7.484	5.04	339.53	2.70
3	1040	1035.99	12.221	27.926	42.49	21.15	0.09
4	1240	1231.08	13.402	27.168	86.39	24.15	0.21
5	1440	1424.30	16.588	26.357	137.89	25.03	0.32
6	1640	1614.63	19.119	25.957	199.26	25.18	0.29
7	1840	1802.66	20.436	26.377	267.39	25.35	0.14
8	2040	1989.65	21.665	24.808	338.32	25.33	0.25
9	2240	2173.63	24.841	24.918	416.69	25.23	0.50
10	2440	2352.18	28.845	23.895	506.68	25.13	0.44
11	2640	2523.23	33.795	23.716	610.17	24.58	0.55
12	2840	2701.18	16.505	37.005	699.04	25.22	2.39
13	3040	2897.52	5.983	76.341	732.61	26.25	1.17
14	3240	3097.03	2.596	143.771	736.09	27.23	0.60
15	3440	3296.97	1.351	45.291	735.18	27.25	0.26
16	3565	3421.87	1.785	112.465	736.93	27.46	0.41
17	3615	3464.14	-9999	-9999	746.42	28.46	68.99

## 2 “四合一”钻具的结构形式

“四合一”钻具,即钻头+螺杆钻具+短钻铤+稳定器4个部分组成的井下定向钻具组合,如图1所示。钻头一般可选用牙轮钻头或人造金刚石复合片钻头(即PDC钻头),螺杆钻具一般使用带有稳定器的单弯螺杆<sup>[2]</sup>,短钻铤即为长度比常规钻铤较短的钻铤,长度根据增斜段复合钻进造斜率要求而定,上稳定器用于配合螺杆钻具前端的稳定器形成双稳定器刚性结构,两稳定器之间的钻具受重力及钻压作用在垂直方向上向下弯曲,致使钻头偏离钻

孔轴线,产生向上的角度,在螺杆工具面的共同作用下,实现对井眼轨迹的控制。

该钻具组合利用螺杆钻具的特点,既能进行滑动定向钻进,其可调能力可以满足定向段造斜、扭方位的需要,又能进行复合钻进,其双稳定器的刚性结构可以在直井段、稳斜段起到稳斜、稳方位的作用。钻进过程中,根据实际情况,通过调整单弯螺杆的弯头角度、短钻铤的长度和稳定器的外径大小,可以实现不同功能需求<sup>[3]</sup>。结构简单,易于掌握钻具控制井斜角、方位角的变化规律<sup>[4]</sup>。

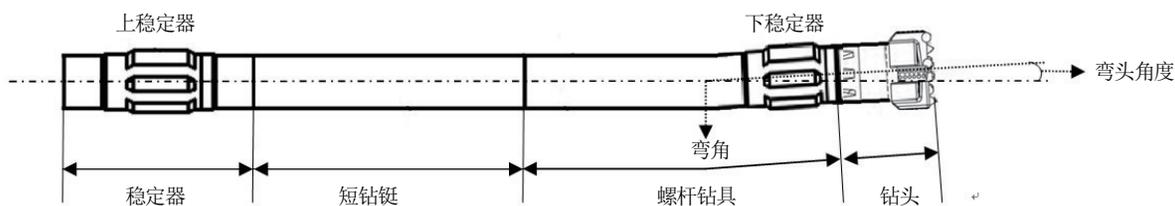


图1 “四合一”钻具示意

## 2.1 螺杆钻具的选用

螺杆钻具是实现井下定向钻进的主要工具,因其弯头的存在,可以对井斜角和方位角进行调整。在“四合一”钻具组合中,一般采用 $1^{\circ}\sim 1.5^{\circ}$ 的单弯螺杆, $1^{\circ}$ 单弯螺杆定向或扭方位速度慢,适用于定向施工井段长,全角变化率要求严格的定向井。 $1.25^{\circ}$ 或 $1.5^{\circ}$ 单弯螺杆定向及扭方位速度相对较快,适用于定向施工井段短,全角变化率要求相对宽松的定向井。弯头角度超过 $1.5^{\circ}$ ,不适宜进行复合钻进,实际施工中根据位移大小及设计情况合理选用。

## 2.2 稳定器的选用

在 $\varnothing 222.2$  mm口径的钻井施工中,上下两个稳定器外径选取范围一般为208~213 mm,当两个稳定器外径都较大时,稳方位效果越好,下部稳定器相对较小时,降斜作用明显,上部稳定器直径较小时,增斜作用明显,实际根据需要选用。

## 2.3 短钻铤的选用

短钻铤长度的选用,一般按照定向井的位移大小及设计增斜率选用,当位移较大,复合钻进需要较大增斜率时,选用较长的短钻铤。在桃7-15-17X1井施工中,二开增斜段采用2.74 m的短钻铤,复合钻进时实现了 $0.7\sim 1.2(^{\circ})/100$  m的井斜增斜率,稳斜段采用1.38 m的短钻铤,复合钻进时保持 $0.3\sim 0.5(^{\circ})/100$  m的井斜增斜率,甚至表现为稳斜状态。根据多口井的施工经验,当复合钻进需要较大增斜率时,短钻铤宜采用长度为2.5~7 m不等。当复合钻进需要增斜率较小甚至需要稳斜或降斜时,短钻铤长度一般为2.5 m以下或不使用。

# 3 钻具应用分析

## 3.1 井眼轨迹设计

“四合一”钻具的合理搭配和使用,离不开前期的井眼轨迹设计。要充分认识到定向井轨迹设计在钻井工程中对钻井难度、施工工艺、泥浆性能要求、钻进效率和安全文明施工的重要作用<sup>[5]</sup>。设计

之前,应对临井资料进行分析对比,厘清目标井设计参数、地层情况和设备性能参数,使用定向井设计软件,根据目标靶点垂深、方位角、闭合距、绕障要求和表层套管深度等,合理确定造斜点、造斜段、增斜段及降斜段,选择与之匹配的钻具长度、钻具参数以满足相应造斜要求,并做到科学严谨<sup>[6]</sup>。

## 3.2 钻具组合在轨迹控制中的应用

### 3.2.1 直井段

在苏里格气田定向井施工中,为满足防碰要求和表层套管封堵易垮塌层、水层及漏层需要,根据钻井地质和工程设计,直井段井深一般为500~900 m,且井斜角 $\geq 3^{\circ}$ ,需要做好防斜打直<sup>[7]</sup>。“四合一”钻具在直井段复合钻进时,由于单弯螺杆的预先弯曲变形,钻头侧向力变为降斜力,采用 $\varnothing 222.2$  mm钻头钻进时,当钻压控制在30 kN及以下,钻头侧向力为负值最大<sup>[8]</sup>,且大于钟摆钻具的降斜力,预先弯曲变形可以消除钻头偏向力,井斜越小,其降斜力越大,复合钻进时防斜效果很好<sup>[9]</sup>,还可以在井斜超标时通过滑动钻进进行纠偏。

### 3.2.2 造斜段

该井段多采用滑动定向钻进的方式,通过调整螺杆钻具的工具面,依靠螺杆驱动钻头旋转,按照既定方位角钻进,此时增斜力随井斜角的增加而增加,井斜角与螺杆增斜率成正比关系<sup>[10-11]</sup>,通过不断调整钻井参数和钻进方式,可以满足造斜的需要。当定向初始角井斜增够,方位角稳定后,可采用复合钻进增斜<sup>[12]</sup>,进入增斜段施工。

### 3.2.3 增斜段

根据实际施工经验,当定向井井深 $> 2000$  m或井斜角 $> 20^{\circ}$ 时,由于钻具较长且因自重和钻压作用贴下井壁现象严重,大大增加钻具与井筒的接触面积<sup>[13]</sup>,只通过螺杆钻具带动钻头进行滑动定向钻进时,钻具反扭角较大且不易掌握,托压严重,造斜工具面不稳定,滑动定向钻进效果差且严重影响钻进效率,一般采用复合钻进<sup>[14]</sup>。“四合一”钻具在自重及钻

压的影响下,产生垂直方向向下的弯曲,通过调节钻具组合中上下两个扶正器的大小、短钻铤的长度和钻压,其弯曲程度也会发生变化,从而调整钻头上扬角度,可以抵消因钻具自重导致的井斜角变化和反作用力导致的方位角偏移,实现对井眼轨迹的控制<sup>[15]</sup>。

在桃7-15-17X1井施工中,螺杆长度为8.32 m,根据施工数据分析,当短钻铤长度为2.5 m左右时,上下两个稳定器间钻具较短,钻压保持在20~50 kN时,受重力及钻压作用,稳定器间钻具发生向下的较小的弯曲变形,钻头向上翘起角度较小,钻具增

斜作用有限,在重力或地层降斜作用下,多表现为稳斜状态,如图2所示。当短钻铤长度>2.5 m时,两稳定器间钻具较长,受重力及钻压作用,发生弯曲变形较大,钻头向上角度变大,增斜作用明显,多表现为增斜状态,如图3所示。随短钻铤长度加长,长度>7 m以后,两稳定器间钻具弯曲变形过大,容易靠于井壁,钻头向上角度不再变大,增斜作用最大化,不再随短钻铤的增长及钻压影响而变大,反而因钻具靠于井壁,造成稳定器及钻具严重磨损,钻具摩阻力变大,不利于正常钻进,如图4所示。



图2 稳斜钻具形态示意

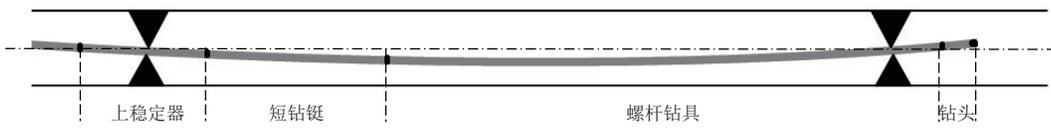


图3 增斜钻具形态示意



图4 钻具弯曲过大形态示意

### 3.2.4 降斜段

降斜段是决定定向井是否满足设计要求,达到规定闭合位移和方位角,顺利钻达目的靶区的关键一环。该井段一般处于钻达目的靶区的最后几百米,采用“四合一”钻具按照设计要求直接穿过目的靶区是可行,但在实际施工中,由于井深较深,此时井斜角普遍较大,继续采用稳斜、增斜钻具时,两个稳定器与环空的间隙有限,钻具活动空间小,摩阻力大,发生卡钻、埋钻、钻具断裂的风险很高,且对泥浆泵及循环系统的可靠性和柴油机动性都有着极高的要求,所以在满足闭合位移达到要求的前提下,多采用降斜钻具。

若采用钻头+钻铤+加重钻杆+钻杆的普通降斜钻具,降斜效果虽然明显,但会受井斜角和钻遇岩层可钻性的影响,井斜角越大,钻遇岩层越软,降斜效果越明显,反之则越差,且降斜时方位角难

于控制,降斜越快,方位角漂移越快,容易导致井眼轨迹脱离靶圈,如图5所示。

为稳定降斜速度,保持方位角,保留对井眼轨

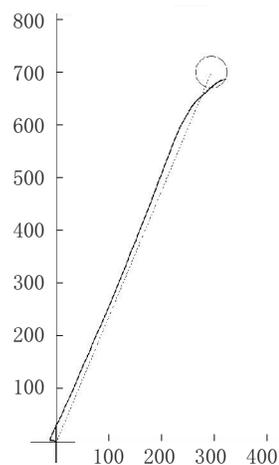


图5 方位角漂移

迹的调整能力,可以继续使用“四合一”钻具,但需要减小扶正器的尺寸,尤其是要减小处于螺杆钻具下端近钻头扶正器的尺寸,同时尽量缩短短钻铤的

长度或不使用短钻铤,减小钻具弯曲,发挥钻具在重力作用下的降斜效果,见图6。



图6 降斜钻具形态示意

#### 4 “四合一”钻具优势分析

##### 4.1 复合钻进对井斜角的影响

开动钻机转盘复合钻进时,上部钻具的转速与钻机立轴转速相同,钻头在螺杆钻具的动力作用下本身就在转动,两者共同作用下,转速要更高。螺杆钻具转动时,其工具面也在时刻变化,此时钻头钻进方向不再受螺杆钻具弯头的影响,只受“四合一”钻具组合中两个稳定器间钻具弯曲的影响,钻头始终保持微小上扬的状态,产生向上的造斜率,抵消钻具本身因自重而向下造斜的趋势。

##### 4.2 复合钻进对方位角的影响

###### 4.2.1 常规钻具方位角控制的难点

常规钻具钻进时,按照对井斜控制的作用,可区分为稳斜钻进、增斜钻进和降斜钻进三种状态。不同状态下,因钻头受力情况和在孔底所处位置的不同,钻进中对方位角产生不同的影响<sup>[16]</sup>。尤其在增斜钻进和降斜钻进中,会出现“增斜降方位,降斜增方位”的普遍规律,这是导致定向井施工中非滑动定向钻进时方位角产生漂移变化,井眼轨迹难于控制的主要原因。

(1)采用常规钻具实现增斜钻进时,钻头向上偏离钻孔中心,开动转盘顺时针转动时,受孔底向左下方向的反作用力,钻头向左偏离,导致方位角逆时针减小,如图7所示,即所谓“增斜降方位”。

(2)采用常规钻具实现降斜钻进时,钻头向下偏离钻孔中心,开动转盘顺时针转动时,受孔底向右上方向的反作用力,钻头向右偏离,导致方位角顺时针增大,如图8所示,即所谓“降斜增方位”,在常规钻具降斜段施工中尤为明显。

###### 4.2.2 “四合一”钻具方位角控制的优点

“四合一”钻具钻进时,无论处于增斜、降斜还是稳斜状态,都具有常规钻具稳斜钻进时稳定方位角的特点。由于该钻具组合中上下两个扶正器的

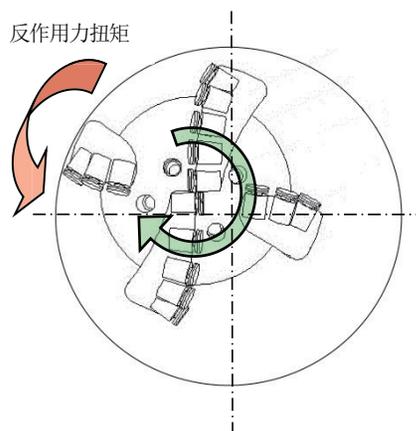


图7 增斜钻进

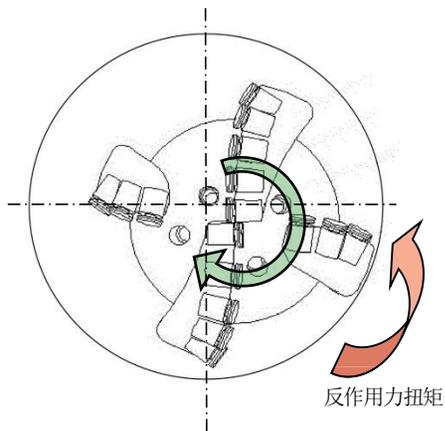


图8 降斜钻进

存在,在钻具尤其是钻头四周与孔壁之间起到支撑作用,避免钻具因自重、钻压或反作用力紧贴于孔壁一侧,始终保持钻具及钻头相对处于钻孔中心,钻头始终沿着钻孔中心钻进,从而保持方位角的稳定,如图9所示。稳定方位角的效果受稳定器大小的影响,稳定器越大,与环空的间隙越小,稳定效果越好,反之则越差。施工中根据需要采用合适大小的稳定器,还可以利用这一特点实现对方位角的微调。

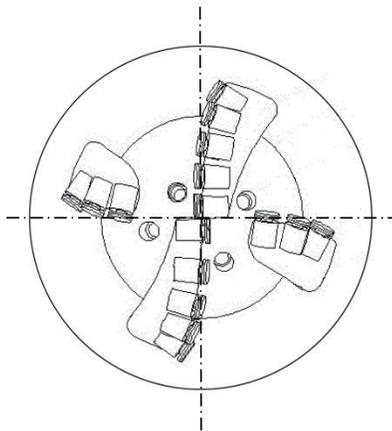


图9 稳斜钻进

## 5 结论与认识

“四合一”钻具组合是钻井工作者经历多年实践、总结,发展出的一种定向钻井新技术。该钻具组合利用单弯螺杆的特性,滑动定向钻进时可以及时调整井斜角和方位角,复合钻进时,通过不同稳定器外径的大小、单弯螺杆的弯头角度和短钻铤的长度,又可以实现增斜、稳斜、降斜及稳方位的作用,随时都能实现对井眼轨迹的调整,能够有效降低滑动钻进在定向井钻进中的比例,一种钻具组合就可以完成直井段、造斜段、增斜段、稳斜段及降斜段的施工,在中、小位移定向井施工中尤为适用,可以大幅减少起下钻更换钻具组合次数,提高纯钻时间和机械钻速,提升钻进效率。该技术的广泛应用,解决了许多定向井施工井斜角、方位角难以调整,井眼轨迹难于控制的难题,对促进定向井井眼轨迹控制技术发展、提高定向井钻井施工效率具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] 尹伟,李伟景.采用四合一复合钻井技术提高石油钻井效率[J].中国科技信息,2012(7):41,81.
- [2] 胡广强,周太彬,刁斌斌,等.单弯螺杆钻具组合滑动钻进造斜率预测方法[J].西部探矿工程,2023,35(2):31-34.
- [3] 黄巍.“四合一”钻具在某水平井的应用[J].科技信息,2013(14):373.
- [4] 王建博,王鹏,兰正升.苏里格气田定向井钻井技术探讨[J].价值工程,2011,30(27):48-49.
- [5] 赵飞涛,窦斌,陶维显,等.定向钻探技术在复杂城区隧道勘察中的应用及探讨[J].钻探工程,2023,50(5):125-132.
- [6] 王吉龙,牛意,余璐.定向井钻井工艺技术优化措施分析[J].化工设计通讯,2022,48(6):14-16.
- [7] 丁红,李成龙,徐广飞,等.克81井区水平井轨迹控制与提速技术[J].西部探矿工程,2023,35(8):66-69.
- [8] 赵巍,黄占盈,吴学升.长庆油田“四合一”钻具组合轨迹控制能力力学分析[J].石油化工应用,2012,31(9):45-47,51.
- [9] 李小玉.“四合一”钻具组合在镇泾油田的应用[J].西部探矿工程,2010,22(5):49-50.
- [10] 李鑫.定向井钻井速度的影响因素及提高方法分析[J].西部探矿工程,2023,35(10):93-95.
- [11] 赵帆,王雷,杨传佐.陇东地区“四合一”钻具轨迹控制优化[J].化工管理,2016(8):25.
- [12] 吕贵州.定向井的井身轨迹控制[J].陕西煤炭,2010,29(1):85-86.
- [13] 孙宝阳.渤海油田大斜度定向井钻井提速关键技术研究[J].石化技术,2023,30(10):71-73.
- [14] 陈俊松,尚亚军,杨建军,等.重庆市秀山县ZK2地热井定向井段钻进工艺[J].钻探工程,2022,49(3):37-43.
- [15] 曹云志.定向井钻井工艺技术优化措施讨论[C]//Proceedings of 2022 Shanghai Forum on Engineering Technology and New Materials, 2022:037548.
- [16] 杜军.定向井钻井施工常见问题及对策[J].化学工程与装备,2023(2):129-130,149.

(编辑 王文)