

# 内防喷工具在井口抢接成功率偏低的原因分析与综合施策

樊泽鑫<sup>1\*</sup>, 黄学建<sup>2</sup>, 唐健夫<sup>2</sup>, 胡越桥<sup>2</sup>, 樊明冲<sup>2</sup>, 蔡红<sup>2</sup>, 李忠明<sup>3</sup>

<sup>1</sup>乌鲁木齐广汇天然气有限公司, 新疆 乌鲁木齐

<sup>2</sup>西部钻探工程有限公司, 井控实训中心, 新疆 阜康

<sup>3</sup>西部钻探工程有限公司, 工程技术处, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2021年11月12日; 录用日期: 2021年12月14日; 发布日期: 2021年12月23日

## 摘要

内防喷工具是实现钻具内井控的有效手段, 是井口防喷器组合的重要组成部分。但就其井口应急使用的效果来看, 若井底没装钻具浮阀或钻具浮阀失效, 目前井口抢接内防喷工具与剪切钻具的成功率较低就是实现钻具内井控的重大隐患。该文从井口钻具内井控的工具和方法入手, 全面分析内防喷工具在应急关井时所出现的使用问题, 并提出改进思路与措施建议, 可以有效提高内防喷工具在使用中的可靠性、有效性和及时性, 具有较高的推广应用价值。

## 关键词

钻井井控, 内防喷工具, 抢接, 原因分析, 综合施策, 钻具浮阀, 放喷单根

# Cause Analysis and Comprehensive Measures on Lower Success Rate of IBOP Quick-Connection at Wellhead

Zexin Fan<sup>1\*</sup>, Xuejian Huang<sup>2</sup>, Jianfu Tang<sup>2</sup>, Yueqiao Hu<sup>2</sup>, Mingchong Fan<sup>2</sup>, Hong Cai<sup>2</sup>, Zhongming Li<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Urumqi Guanghui Natural Gas Co., Ltd., Urumqi Xinjiang

<sup>2</sup>Well Control Training Center, Xibu Drilling Engineering Co., Ltd., Fukang Xinjiang

<sup>3</sup>Engineering and Technology Department, Xibu Drilling Engineering Co., Ltd., Urumqi Xinjiang

Received: Nov. 12<sup>th</sup>, 2021; accepted: Dec. 14<sup>th</sup>, 2021; published: Dec. 23<sup>rd</sup>, 2021

\*第一作者。

文章引用: 樊泽鑫, 黄学建, 唐健夫, 胡越桥, 樊明冲, 蔡红, 李忠明. 内防喷工具在井口抢接成功率偏低的原因分析与综合施策[J]. 仪器与设备, 2021, 9(4): 131-138. DOI: 10.12677/iae.2021.94021

## Abstract

The IBOP tools are the important means to achieve inside well control in drill pipes, and are the important components of the wellhead BOP units. Pursuant to the effect of the emergency use in the wellhead, while the floating valve in BHA becomes invalid or is compelled not to be installed, the lower success rate to connect peremptorily the IBOP tools at the wellhead and, to shear rapidly the drilling pipes off, will be a great hidden trouble for the inside well control in drill-pipes at wellhead. Starting with the IBOP tools and methods of inside well control in drilling pipes, this paper analyzes comprehensively the problems about IBOP tools in emergency shut-in, and puts forward improving ideas and suggestions, which can effectively improve the reliability, effectiveness and timeliness of IBOP tools in use, and has the high popular application values.

## Keywords

Drilling Well-Control, IBOP Tool, Peremptory Connection, Cause Analysis, Comprehensive Measures Floating Valve in BHA, Single Pipe with a Inside Well Control Valve

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

井控是钻井安全生产的核心，容不得任何操作失误和井控失败的结果[1]。在井控实践中，因钻具内井控失败引发全井井控失败的案例举不胜举，教训十分惨痛。关于因内防喷工具操作失误引发井喷失控的内部课件和案例分析还有一些，但目前公开发表的文章还非常少，可谓屈指可数。按照问题导向、需求导向原则，通过原因分析和综合施策，努力为作业现场拓展操作空间并提供方案选择。

## 2. 井口控制钻具内井喷的工具与方法[2]

钻具内防喷工具的作用就是通过封闭钻具水眼通道实现控制钻具内井喷的。目前钻井现场在井口控制钻具内井喷的工具与方法综述如下。

### 2.1. 钻具内井控工具

1) **方钻杆或顶驱**：装有**上旋塞阀和下旋塞阀**。在循环工况下发生钻具内溢流时，通过关闭上旋塞阀或下旋塞阀实现便捷操作和井控功能的双保险，在方钻杆内或顶驱内实现关井操作，同时可以保护后端的水龙带和钻井液泵等承压薄弱的环节。

2) **防喷短接、防喷单根、防喷立柱和钻具浮阀**：装有**钻具止回阀**，其具体型号有箭型阀(FJ)、球型阀(FQ)、碟型阀(FD)、投入式阀(FT)、钻具浮阀(FZF)等多种止回阀。其作用就是因负压发生钻具内钻井液自井底向上流动时，止回阀便会迅速自动关闭而阻断管内钻井液的流动，达到在钻具内实现自动关井的目的。

3) **剪切闸板 + 全封闸板**：当钻具内防喷工具都失效而发生钻具内井涌、井喷时，现场根据喷出物性质、井控难度和喷势判断，可通过防喷器的剪切闸板将钻具剪断后下丢钻具再关闭全封闸板，以实现控制钻具内井喷的目的[3] [4]。

## 2.2. 钻具内井控方法

防范钻具内发生井喷的方法有循环法、预置法、抢接法和应急法等。

1) **循环法**: 针对钻井液使用密度偏低的情况, 特别是停泵后, 钻具内液柱压力 ECD 与地层压力差为负压差时, 在钻柱内打入**重浆帽**, 使钻柱内井底液柱压力 ECD 略大于井底地层压力, 即实现钻柱内保持正压差, 有效避免井底受到气侵污染的钻井液进入钻具内部。

2) **预置法**: 在入井管柱靠近钻头的钻铤端安装钻具浮阀(单流阀类的内防喷工具), 一旦井底出现负压差时, 钻具浮阀会快速自动关闭, 有效避免井底受到气侵污染的钻井液进入钻具内部。但钻具浮阀的阀体多因受地层温度、井底压力、钻井液冲蚀、堵漏颗粒等影响引发其功能失效。还有的因特殊施工需要全通径水眼, 有些非全通径的阀体就无法使用, 迫使井下不装钻具浮阀[5] [6] [7]。

3) **抢接法**: 即在井口抢接内防喷工具。在井下单流阀功能失效后, 若遇到钻台发生溢流、井涌时, 需要在井口抢接内防喷短接、防喷单根、防喷立柱、方钻杆或顶驱等, 阻止井底受到气侵污染的钻井液进入钻具内部, 涌出钻台面。及时控制住钻具内溢流或井涌, 不仅能够控制住钻具内发生井喷, 还能避免井底岩屑从钻头水眼进入钻具后引发堵水眼等系列复杂[8] [9]。

4) **应急法**: 针对空井直接用全封关井; 在钻具极少的情况下, 可采用下丢钻具后关闭全封, 实现关井; 在钻具内失控的情况下, 剪切井下丢钻具后, 再使用全封进行关井。总之, 为确保井控安全, 快速有效地实现钻具内关井、有效避免在井口发生钻具内井喷失控事件是操作的关键。

## 3. 内防喷工具在井口抢接中所遇到的问题及其原因

### 3.1. 具体案例

#### 3.1.1. 案例 1

2018 年 12 月 21 日, XXX-01 井, 在下 5"筛管过程中未按要求及时灌浆, 导致井内液柱压力偏低引发地层流体侵入井筒, 进而因油气上窜而突发强烈井涌, 见图 1(a), 管柱在井涌向上推举力的作用下上行, 致使多次抢接防喷单根全都失败, 且剪切操作因受井涌上推和钻具上行的双重作用而引发钻具剪切失效。这是一起因钻具内所有内防喷工具失灵、剪切钻具失效所导致的一起严重井喷失控事故。具体经过如下:

1) 11:28 开始下尾管作业(计划下入 724.76 m)。

2) 14:15 监测环空液面距井口 232 m。

3) 14:46 下至第 23 根(260 米)时, 坐岗发现溢流, 立即报告司钻, 司钻立即发出报警信号, 井口人员立即从大门坡道旁边上提防喷单根。

4) 14:52 防喷单根上提至钻台, 钻井液从钻柱内外上涌至钻台面以上 1 m 左右, 井口人员抢接防喷单根 6 次不成功, 司钻操作刹把、工程师操作司控台, 关环形防喷器且环形防喷器关井到位, 钻台上其他人员撤离, 但钻具内依然外涌钻井液。这时, 在钻井液井涌向上推举力的作用下, 井内管柱开始上移。

5) 15:02 钻井监督通过对讲机下令关闭剪切全封一体式全封闸板, 工程师迅速跑下钻台到远控房, 打开限位, 关闭剪切闸板, 打开旁通阀, 期间尾管已被向上推举力推至井口。实施剪切关井后钻井液上涌高度短暂回落至转盘面, 1 分钟左右又再次涌出转盘面, 说明剪切全封关井失效, 后喷高约 40 m, 井喷失控事故发生。

6) 15:06 现场立即停车停电, 人员撤离。

#### 3.1.2. 案例 2

2020 年 6 月 24 日, XXX-02 井, 在起传输电测管柱时, 发生单吊环操作、钻具断落事故, 钻具落井, 造成井漏, 井内因压力失衡而引发溢流, 井队抢下几柱钻具后, 接连发生抢接防喷单根失败、剪切钻具

失效,即所有控制钻具内井控方法都失灵,从而引发井喷失控事故。历经 55 天应急抢险救援后险情解除。

### 1) 井漏经过(见图 1(b))

11:48 起传输电测钻具至 73 柱,发生单吊环事故,钻具从母接头以下 0.7 m 处折断,上部断裂钻具从吊卡上部弹出,掉落至转盘边缘一侧,下部 4492.08 m 钻具落井。

11:50 钻具落井后,井队各路值班干部陆续上钻台查看实际情况。工程师对所断钻具进行测量后,到录井房核对落鱼长度及鱼顶位置,现场一直忙于做打捞准备和编写断钻具事故快报。

12:07 井上各路分头向各自的上级汇报。

12:10 该井项目组组长接到井队汇报后,立即下令驻井井控专家到井场查看、处置。

### 2) 灌浆经过(见图 1(c))

12:10 钻井液工开始灌浆;

12:13 灌浆不返,坐岗钻井液工向司钻汇报,司钻收到汇报后停钻观察。

12:20 灌浆 6.7 m<sup>3</sup> 未返;

12:22 钻井液工从 4 号罐倒浆;

12:26 倒浆 3.21 m<sup>3</sup> 后,再次灌浆;

12:32 再次灌浆 3.75 m<sup>3</sup> 后,出口见到返浆。

### 3) 井喷失控经过

12:32 下入第一柱。

12:36 下入第二柱。

12:39 下入第三柱。通过录井曲线发现总池体积液量增加 0.83 m<sup>3</sup>。

12:40 坐岗钻井液工通过对讲机呼喊 2~3 次“出口返浆了”。

12:47 下入第四柱,通过录井曲线发现总池体积液量增加 11.61 m<sup>3</sup>。

12:51 第五柱钻杆下放至离转盘面 3~5 m 时,自下第一柱钻杆后共发生溢流近 15 m<sup>3</sup>。

12:53 带班干部到钻井液罐出口处观察,随即用对讲机喊钻台关井。

12:54 带班干部及井口操作人员将防喷短接抬至井口附近,因钻杆盒内钻杆已被提起,又放下防喷短接,随即去拉钻杆,钻杆拉到井口时,钻杆水眼外溢量持续增大,被迫将钻杆拉回。钻台人员准备抢接防喷短接。

12:56 工程师在远控房打开液动防喷阀,关闭了闸板防喷器,根据录井曲线显示此时套压由 0 ↑ 1.5 MPa。此时,钻台人员正在抢接防喷短接,抢接 2 次均未成功。

12:59 再次组织抢接防喷短接,2 次抢接均未成功,钻台喷高至钻台面 2 m 以上,喷势逐渐增大。但因剪切钻具失效引发管内失控,井喷失控事故发生。

## 3.2. 原因分析

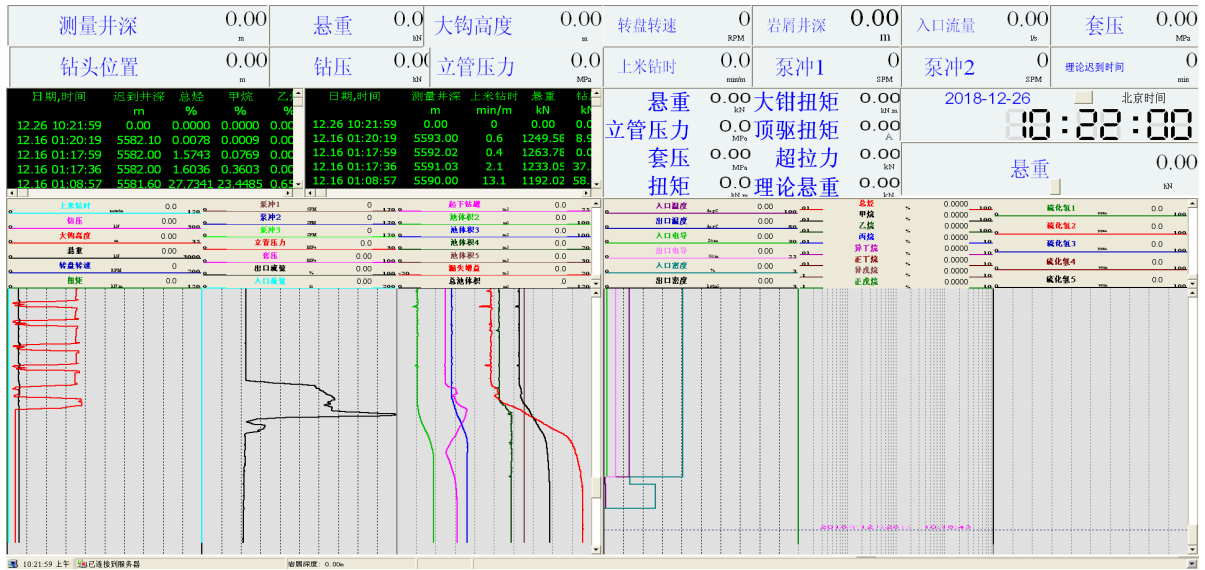
### 3.2.1. 两口井对比(表 1)

XXX-01 和 XXX-02 井两口井的基础资料、抢接过程、剪切过程和实施结果基本雷同,见表 1。

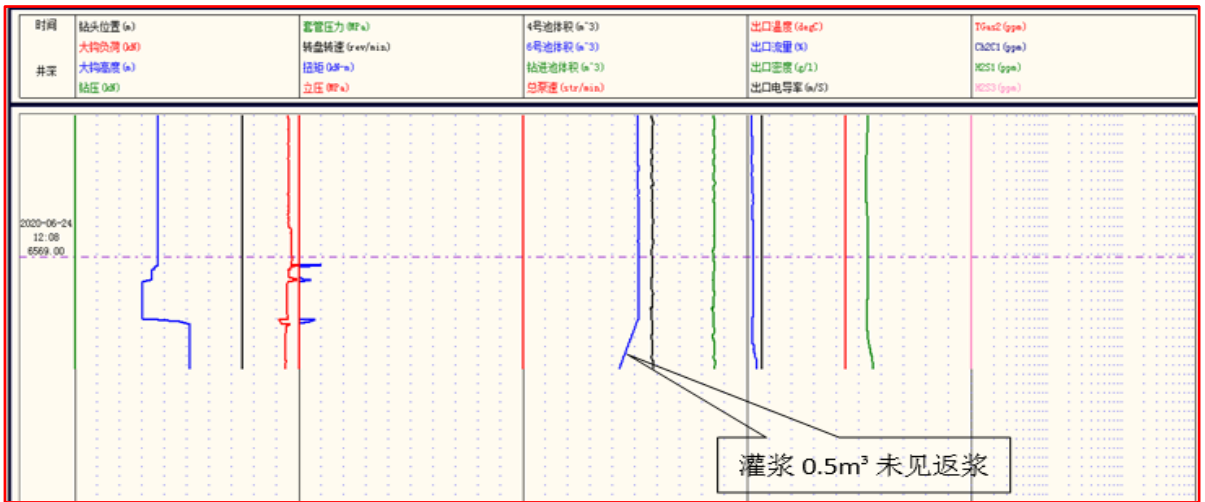
### 3.2.2. 应急失败的原因

1) 应急抢接失败的原因。根据现场监控视频,结合内防喷工具在抢接过程中受力状态、自身重量、扣型规格、钻具接箍的位置判断、人员视线等因素,两口井都因钻具内井涌致使抢接内防喷工具失败,过程基本一致,都是多次抢接失败,见表 1。

2) 应急剪切失败的原因。根据调查报告,导致剪切失败的决定因素是钻具受向上推举力的作用持续上移、其次是没有通过储能器增压、最后是对管柱是否剪断的判定等,见表 1。



(a)



(b)

时间	井深 (m)	大钩高度 (m)	大钩负荷 (kN)	总池体积 (m <sup>3</sup> )
12:32:00	6569	26.06	284.83	52.10
12:39:56	6569	27.47	321.62	52.93
12:47:19	6569	3.13	272.69	64.54

(c)

**Figure 1.** The mud-logging overflow-lost data of the well XXX-01 and XXX-02; (a) The mud-logging overflow graphics of the well XXX-01(the red one indicates the quick increase of the lost-overflow); (b) The mud-logging grouting graphics of the well XXX-02; (c) The mud-logging overflow data of the well XXX-02

**图 1.** XXX-01 和 XXX-02 井溢流漏失录井监测记录; (a) XXX-01 井录井溢流监测曲线图(红色曲线指示漏失增溢迅速增大); (b) XXX-02 井录井灌浆监测曲线图; (c) XXX-02 井录井溢流监测数据截图

3) 应急丢弃失败的原因。现场监控视频显示 XXX-02 井在控制钻具内井涌的过程中运用了下丢钻具入井的方法, 由于钻具在井筒内不居中, 加之用小绞车上提, 绞车钢丝绳斜向拉力, 迫使钻具不能垂直下落, 而被卡在防喷器的旁侧孔上, 导致下丢钻具入井失败, 被迫采取剪切钻具的方法控制钻具内井涌。

Table 1. The data comparison of the well XXX-01 and XXX-02

表 1. XXX-01 井 和 XXX-02 井资料对比

井号		XXX-01 井	XXX-02 井	
概 况	基 础 资 料	作业工况	下套管	
		钻具长度	260 m	
		油藏特性	高温、高产、高含硫气井	
		地层连通性	缝洞型碳酸盐岩	
处 理 过 程	抢 接 过 程	内防喷控工具	防喷单根	
		抢接次数	6	
		发现溢流	晚	
		抢接时间	4'36"	
	剪 切 过 程	井涌态势	间歇式	
		剪切闸板型号	剪封一体化	
		操作人员	工程师	
		操作顺序	先剪切后增压	
		安装位置	双闸板上	
		操作位置	远控房	
处 理 结 果	实 施 结 果	抢接钻具内防喷工具	对扣失败	
		剪切钻具	失败	
		丢入钻具	——	
原 因 分 析	抢 接 失 败	内防喷工具上下振动	上下振动较小, 第一扣损坏小	
		操作人员视线条件	较好	
		内防喷工具抗上顶能力	较好(约 350 kg)	
		冲蚀破坏	小	
	剪 切 失 败	抢 接 失 败	井口喷出流体	气体
			抢接最佳时机	井涌高度 $h \leq 1\text{ m}$
			圆周摆动状态	摆动大, 对扣难
			连接位置视线状况	好
			扣型	短圆扣(细扣)
			控制钻具移动操作	钻具有上行
	剪 切 失 败	抢 接 失 败	钻具居中条件	较差
			钻具内承压情况	带压较大
			剪切操作步骤	不正确
			剪切是否增压	没增压

### 3.2.3. 原因分析(表 1)

1) **抢接防喷工具的视野受到干扰**。井内钻具在井口一般高出钻台面约 30 cm。现场实践告诉我们,若钻具内钻并液涌高 50 cm,则接箍部位视线模糊,影响司钻的判断和钳工的抢接,主要影响对扣与找正。若涌高达 50~100 cm,即高于防喷短接的高度,人的视线受到更大的干扰,既无法靠近,也无法用手摸着短节,这时要迅速换成防喷单根或防喷立柱。若涌高达 150~200 cm,人的生命受到威胁,必须改用方钻杆或顶驱,类似于机械化抢接。若涌高达 200 cm 以上则发生了井喷,由于钻井液向上的冲蚀作用增大,若喷出物中含有气体则人身安全受到极大的威胁,需要钻台人员立即撤离井口。

2) **抢接防喷工具的对扣找正受到干扰**。抢接内防喷工具受向上推举力的影响进一步加大了对扣与上扣的难度。实践经验表明,若向上推举力达到内防喷工具自身重量的 50%,则对扣与上扣成功的几率几乎为零。且随着井涌高度的增加,若涌出物有气的话,则向上推举力会不断地增大。当向上推举力等于防喷工具重量、甚至大于其重量时,抢接内防喷工具时根本无法对扣,所以,一定要赶早在井涌发生之前或早期抢接防喷工具。为此,可根据井涌的高度,参照表 2 选择对应的内防喷工具。

Table 2. The relatives of the kick height and IBOP tool selection

表 2. 井涌高度与内防喷工具优选建议

井涌高度	$h \leq 0.5 \text{ m}$	$0.5 \text{ m} < h \leq 1 \text{ m}$	$1 \text{ m} < h \leq 1.5 \text{ m}$	$1.5 \text{ m} < h \leq 2 \text{ m}$
优选建议	防喷短接	防喷单根	防喷立柱	方钻杆或顶驱(装有上下旋塞)

3) **抢接过程中内防喷工具螺纹、端面受损**。① **螺纹受损**。钻具内井涌的状态下,涌出物的向上推举力随涌出物的间歇频率忽大忽小,致使抢接过程中内防喷工具上下作轴向振动,连接次数越多对螺纹的损害越大,会造成螺纹本体和顶面变形、缺失甚至断裂,这是导致丝扣螺纹损坏的主要原因,而且细扣比粗扣更易受损。② **端面受损**。由于内防喷工具在井涌抢接时作轴向振动,导致接头端面与连接管柱的间隙忽大忽小。连接次数越多,接头端面受到喷出流体冲蚀作用越大,端面会出现划痕、冲槽、蚀坑等,从而造成端面不平整和不规则,致使端面封闭性能降低。即使连接上了在关闭时也会形成刺漏,即在内防喷工具的连接处也很快会受损甚至断裂。

## 4. 应对策略

在井控实践中,在抢接内防喷工具和剪切作业时,这两个案例井一系列抢接和剪切等操作失败或失效有着一定的代表性和普遍性,值得深入研究[10][11][12]。在还没有能有效辅助内防喷工具抢接设备可用的当下,能否统筹考虑,步步为营,最大限度地发挥井口设备的综合能力把井快速关住呢?答案是肯定的,具体意见有如下 5 个方面:

1) **工具可选**。钻台上要备有一定类型和数量的备用钻具内防喷工具,若数次应急关井仍连接不上时,可及时替换内防喷工具。

2) **及时抢接**。防喷单根、防喷短接等,重量上要有重有轻,喷势小的时候用轻便的可以便捷一些;喷势大的时候用重量大的,有助于对扣。关键是防,一是根据井底压力优选性能优越的钻具浮阀,减少钻具浮阀失效的几率,避免管内溢流。二是若无法带钻具浮阀或井底钻具浮阀失效的情况下,要第一时间先控制管内,强接内防喷工具,如喷势较高,考虑放喷强接,研发辅助装置协助井口内防喷工具的强接操作,避免靠人力强接,提高强接内防喷工具的成功率。

3) **准备剪切**。剪切钻具需要靠前准备,特别是发生井喷时,剪切钻具要提前准备到位。剪切的时机很重要,钻具受液柱上推后会被钻井液顶出井口,且持续上移,这样,就很难一次性剪切成功。为此,一是要研究超级剪切工具,钻具与钻铤都能够剪切;二是要研究在 21 MPa 内就能保证实现剪切的工具;

三是能优化或简化剪切程序, 实现一键或智能剪切功能。

4) **应急防护**。对于高产、高含硫的气井, 一旦发生井涌, 就会迅速转成井喷, 给井口应急抢接内防喷工具的时间非常少, 而且对作业人员的生命安全构成威胁。正压式呼吸器是抢险的基础设备, 在钻揭目的层前 100 m 就应在多个地方备有正压式呼吸器, 随手、顺手就能拿到, 便于穿戴。

5) **强化演练**。应急抢险是一个紧张度极高的操作过程, 对作业者的心理素质和生理机能都是一次严峻的考验, 只有操作熟练、流程迅速、沉着应战才能动作不变形、无偏差。

## 5. 结论

- 1) 内防喷工具是井控设备的重要组成部分, 是控制钻具内井喷的必要手段。
- 2) 提高抢接与剪切的成功率是井控的关键之一。抢接是关键, 剪切是后手。
- 3) 加强监测与坐岗观察, 争取溢流关井, 强化井涌关井, 做好应对井喷失控的预案编制与演练。

## 6. 建议

1) **不同涌势采取不同的工具**。井涌高度预示着向上推举力的大小, 参照表 2 优选工具。

2) **日常维护与应急检查都重要**。一是日常维护、保养、检查到位; 二是抢接不上了就换一个; 三是没有备用的就检查丝扣。

3) **钻具剪切的压力推荐**。对 5"或 5 1/2"钻杆的剪切, 既然当前使用 21 MPa 剪切有不确定性, 建议使用 28 MPa 的表面切入压力。

4) **转换接头的使用推荐**。建议首选连接细扣再连接粗扣。例如, 在套管上抢接内防喷工具, 先将转换接头细扣端抢接在 5"套管上, 再将转换接头粗扣端连接内防喷工具。建议日常演练时就提前验证其连接的可靠性与准确性。

5) **优选内控方法与工具**。一是针对不同工况选用不同的方法。原则是起钻普及循环法, 下钻推广预置法, 井涌实施抢接法, 提前准备应急法。二是根据井涌态势及井涌高度及时正确选用不同防喷工具(参照表 2), 提高工具的针对性。三是高度关注井控风险叠加。三高井、高硫井在提钻后期和下钻初期, 因为井内钻具少、提下钻铤、井筒静止时间长等因素, 会因井控风险叠加而增加井控应急的难度。四是抓住关井时机, 降低井控风险。“发现溢流就关井, 安全; 发现井涌才关井, 危险。”说的就是抢接防喷单根的难度不同, 剪切钻具是迫不得已的选择。五是随时做好剪切的准备。加强演练和准备, 把剪切当成抢接失败的后手。

## 参考文献

- [1] 石油天然气钻井井控编写组. 石油天然气钻井井控[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 1-10, 241-247.
- [2] 谢娟, 王德玉, 李悦钦, 陈浩. 钻柱内防喷工具的现状和研究方向建议[J]. 机械, 2007, 34(10): 4-6.
- [3] 王华. 井控装置使用手册[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008: 166-180.
- [4] 张耀明. 剪切闸板在井喷失控抢险中的成功应用[J]. 钻采机械, 2001, 24(1): 66-67+71.
- [5] 金池, 周晓来. 国外井下防喷器的研究现状[J]. 内蒙古石油化工, 2011, 37(4): 34-35.
- [6] 王世宏, 冯耀荣. 方钻杆上部旋塞阀失效分析及其改进意见[J]. 石油工业技术监督, 1997(7): 1-6.
- [7] 高成军, 郑军辉, 景英华, 李忠明, 李洪兵, 蔡黎清. 全通径钻具内防喷器研制与应用[J]. 钻采工艺, 2011, 34(6): 65-67.
- [8] 阎凯, 李锋. 塔里木油田井控技术研究[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(2): 522-527.
- [9] 宋路江. 顶驱内防喷器在井控中的应用与维护[J]. 石油矿场机械, 2010, 39(9): 89-91.
- [10] 杨红德. 修井作业井下防喷器设计研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2018.
- [11] 陈龙. 一种新型内防喷工具的设计及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2019.
- [12] 陈永森. 内防喷工具测试装置设计与开发[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2019.