

文章编号: 1000-0747(2017)06-0967-07 DOI: 10.11698/PED.2017.06.15

国内外水平井控水技术研究现状

孙昕迪, 白宝君

(Missouri University of Science and Technology, Rolla Missouri 65401, USA)

摘要: 分析了国内外水平井控水技术研究现状, 介绍了水平井中常用的控水技术, 总结了针对不同完井方式水平井的控水方法。控水方法大体上可分为两类, 即机械方法和化学方法, 两类方法可单独使用或组合使用。机械方法通常用于井筒或近井堵水, 化学方法可用于封堵基质孔隙或裂缝。在设计堵水方案时应考虑井筒的完井方式, 机械方法和化学方法均可用于裸眼完井及套管射孔完井的水平井; 割缝衬管完井及防砂筛管完井只能选择化学方法进行堵水, 机械方法只能提供临时的区域分隔。机械方法成本略高于化学方法, 且堵水过程中的深度校正也是一个操作难点。当出水点在水平井趾端时, 机械或化学方法均可单独使用; 当出水点靠近跟端或在水平井段时, 则需使用封隔工具进行层位封隔及目标层封堵。图1表1参47

关键词: 水平井; 控水技术; 机械堵水; 化学堵水

中图分类号: TE358.3

文献标识码: A

Comprehensive review of water shutoff methods for horizontal wells

SUN Xindi, BAI Baojun

(Missouri University of Science and Technology, Rolla Missouri 65401, USA)

Abstract: This paper provides a comprehensive review of the water control techniques that have been applied in horizontal wells and presents the water control methods for wells of different completion types. Water shutoff techniques are classified as mechanical methods and chemical methods. These methods can be used individually or in combination. Mechanical methods are usually used to deal with wellbore water shutoff or near wellbore water control. Chemical methods are used in plugging matrix or fractures. Completion type should be considered when designing a water shutoff project. Both mechanical methods and chemical methods can be used in open hole and cased hole horizontal wells. In the wells that completed with perforated liners and wells completed with sand screen pipe, only chemical methods can be used to control excess water production, while the mechanical methods can only provide temporary zonal isolation. Mechanical methods are slightly higher in cost than chemical methods, and the depth correction is a challenge. Mechanical and chemical methods can be individually used if the water entry point is at the toe. A combination of packers should be designed for the wells with water entry point near the heel or along the lateral.

Key words: horizontal well; water control technique; mechanical water shutoff; chemical water shutoff

引用: 孙昕迪, 白宝君. 国内外水平井控水技术研究现状[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(6): 967-973.

SUN Xindi, BAI Baojun. Comprehensive review of water shutoff methods for horizontal wells[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(6): 967-973.

0 引言

过度产水是油气田开采中面对的严峻问题之一, 尤其是对于开采中后期的油气藏。过度产水严重影响油气藏的开采寿命及油气产量, 也会造成井眼腐蚀、出砂等问题。由于产出水的化学组成比较复杂, 要使处理后的产出水完全达到环保标准也会增加处理成本。因此, 选择有效且经济的堵水方案十分重要。目前, 在油气开采过程中, 为了增加井筒与油气藏的接触面积进而达到增产目的, 水平井的使用与日俱增, 水平井过度产水问题也逐渐得到重视。本文通过文献

调研, 分析国内外水平井控水技术研究现状, 介绍水平井中常见的控水方法, 并总结针对不同完井方式应选择的控水方法。


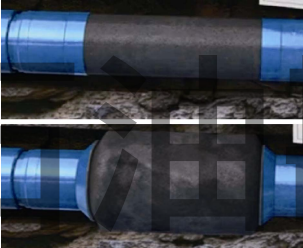






1 常见控水方法

应用于水平井的控水方法大致可分为两类: 机械方法和化学方法。这两类方法可单独使用或组合使用^[1-2]。

1.1 机械方法

机械方法是使用机械封隔工具封堵出水点或者为后续堵水提供层位封隔。封隔工具可分为可膨胀封隔工具和非可膨胀封隔工具(见表1)。可膨胀封隔工具

表 1 常用封隔工具特性及封堵机理

名称	形态	可膨胀性	可回收性	封堵机理
水泥塞		无	无	水泥固化成刚性水泥块从而完全封堵空隙
膨胀式封隔器		有	有	橡胶囊膨胀后完全填充空隙从而实现封堵
桥塞		有	有	通过机械扩张实现膨胀从而封堵空隙
跨式封隔器		有	有	与膨胀式封隔器类似,由可膨胀元件(即橡胶囊)膨胀实现封堵
遇水/油膨胀封隔器		有	有	与井液接触后引发膨胀从而实现封堵
水泥膨胀式封隔器		有	有	可膨胀元件膨胀并挤注水泥实现封堵
膨胀管		有	无	由锥体向金属保护层施压,使膨胀管产生形变从而封堵空隙
套管外封隔器		有	无	橡胶囊膨胀后实现封堵

由可膨胀元件组成,在其到达目标层后,可以在井眼中膨胀并完全填充空隙从而达到封隔的目的。大多数可膨胀封隔工具是可回收的,在特定情况下,可回收式膨胀封隔工具也可与水泥塞一起实现永久封隔。

可膨胀封隔工具包括膨胀式封隔器、桥塞、遇水/油膨胀封隔器、跨式封隔器、水泥膨胀式封隔器及膨胀管等。膨胀的过程由不同的机制触发:膨胀式封隔器通过橡胶囊实现膨胀;桥塞和膨胀管由机械助力完成膨胀过程^[3];遇水/油膨胀封隔器与井液接触时触发膨胀。一些可膨胀封隔工具(如跨式封隔器)具有两个膨胀元件和喷嘴,既可用于层位封隔又可用于注入装置。两个膨胀元件可提供层位封隔,工作液可通过两个膨胀元件间的喷嘴注入到目标层位。

套管外封隔器(ECP)是一类特殊的可膨胀封隔工具,主要结构是套管外的可膨胀橡胶囊,经常在裸眼井水平段中与割缝衬管或防砂筛管间隔配置使用,通过橡胶囊膨胀实现环空填充从而达到封堵目的。

非可膨胀封隔工具一般为水泥塞。水泥是常见的直井堵水材料。但在用于水平井段堵水时,由于重力的影响可能造成不完全封堵。因此,水泥塞适用于封堵井筒内靠近垂直井段区域的出水点。近年来,新型泡沫水泥已被广泛应用于矿场实践。泡沫水泥是将高压气体(通常为氮气)注入含有发泡剂和泡沫稳定剂的水泥浆中产生的^[4]。相较于常规水泥,泡沫水泥具有钻井液驱替率较高和抗水、气突破等优点^[5]。此外,还有一些其他类型的水泥仍处于试验阶段,如膨胀水泥、高触变性水泥和纤维增强型中性密度水泥等。

1.2 化学方法

机械封隔工具可以用于封堵井筒本身的硬件破损以及近井地带较大的裂缝^[6]。然而,在一些特定情况下需要封堵岩石基质或细小的裂缝,因此化学方法便被广泛研究和使用的。以下是一些在水平井中常用的堵水剂。

①凝胶。常见的凝胶主要由部分水解聚丙烯酰胺(HPAM)和乙酸铬组成,可通过加入其他添加剂来调节凝胶的性能^[7]。不同的交联体系组分和油藏环境会使凝胶呈现不同强度。由于注入物是成胶前的聚合物与交联剂的混合物,因此凝胶的成胶过程发生在地下。

②聚合物及膨胀剂。聚合物由于强度较低,经常被用作流度控制剂而非堵水剂。然而,Zaitoun等^[8]发现聚丙烯酰胺(PAM)在遇到膨胀剂时会发生膨胀,因此可以被用来封堵目标层。因为该药剂对水和油气的封堵效率不同,所以被称为选择性堵水剂。通常情况下,对水的封堵效率高于对油的封堵效率。

③吸水膨胀型高分子化合物(WSP)。这种材料是高吸水性聚合物交联体系,也被称为颗粒凝胶^[9-10],其

颗粒大小为微米—毫米级。在不同组分和浓度的盐水中，WSP可以吸收质量为其自身质量5~400倍的水。

④微基质水泥。该水泥的颗粒尺寸小于10 μm，仅为常规水泥的10%。微基质水泥可以进入高渗油藏的基质孔隙和小至0.05 mm的裂缝^[11]。由于与化学堵水剂有相似的堵水机理，因此被归类为化学方法。

⑤HWSO系列堵水剂。HWSO是由亚乙基丙烯酸乙酯共聚物、烷基溴和丙烯酰胺合成的^[12-13]。由于含有亲油和亲水基团，HWSO在堵水过程中具有一定的选择性。HWSO表现为遇水时膨胀，遇油时收缩。该堵水剂具有溶液和颗粒两种形态。马广博等^[14]研究表明HWSO颗粒耐温可达95℃。

2 不同完井方式水平井堵水实例

2.1 裸眼完井

作为最常见的水平井完井方式之一，由于没有套管和衬管，裸眼完井具有成本低和节流低等优点。然而，在裸眼井中，与井液直接接触的页岩层可能会发生膨胀从而导致井壁垮塌。由于具有易操作和成本低的优势，化学方法被广泛应用于裸眼完井的水平井堵水作业。

Uddin等^[15]用两种凝胶在Wafa Ratawi Oolite油田^[16]对一裸眼完井水平井实施了堵水作业。水驱导致该生产井过度产水，出水点在水平段趾端。利用连续油管将无污染交联羟乙基纤维素(HEC)凝胶放置于水平井跟端作为区域隔离段塞，从而保护上部产油层。然后，向水平井趾端注入另一种凝胶封堵出水点。堵水作业后，该井含水率从82%降低到70%~80%。Utomo等^[17]在该油田用两种凝胶对另一裸眼完井水平井进行了堵水作业。先将一种可流动的凝胶注入到目标层，确保其最大程度进入裂缝从而实现堵水，随后注入一种强度大的凝胶封堵近井区域。

Dashash等^[18]在Ghawar油田^[19]一裸眼完井水平井中成功地实施了堵水作业。生产测井仪显示出水点位于水平段趾端。先用膨胀式封隔器隔离产水区，再在封隔器后注入61.0 m的水泥塞以加强封堵强度，最后在水泥塞后注入91.4 m的高黏度凝胶防止水泥坍塌。堵水作业后，该井含水率降低了50%，原油产量提高了159 m³/d。Sharma等^[20]用化学方法对该油田的另一裸眼完井水平井实施了堵水作业，但效果并不理想。该井有360.3 m处于产层中，堵水前含水率为60%，出水点位于趾端。针对该井实际情况，采用水泥塞和有机聚合物进行堵水。在2636.5 m处放置了1个水泥

膨胀式封隔器并在其下方注入了23.85 m³有机聚合物。第2个水泥膨胀式封隔器被置于2617.9 m处，并在两封隔器间挤入水泥形成水泥塞。堵水后含水率并无明显变化，可能是部分化学堵水剂进入产油段并堵塞井筒所致。

除了化学方法外，膨胀式封隔器配合水泥塞封堵是常用的机械封堵方法。Saudi等^[21]将该方法运用于Ghawar油田一裸眼完井水平井中，出水点在水平段趾端。先将膨胀式封隔器置于趾端，随后注入水泥塞加强封堵。该堵水操作成功地提高了采油量并降低了含水率。Al-Zain等^[22]在该油田另一裸眼完井水平井中使用了相同的堵水方法，使原油产量从492.9 m³/d增加至1049.4 m³/d，同时含水率从47.8%降低到8.4%。

2.2 套管射孔完井

套管射孔完井是将套管下入井中并以水泥固井，再通过射孔使得井筒与产层相通。由于射孔段可以精确定位，该完井方式可以有效地控制流体从产层流入井筒。然而，为了避免液体从套管和井壁之间流出，该方式对固井质量要求较高。

Lane等^[23]对一套管射孔完井的水平井进行了有效堵水。该井由于断层连通底水造成了产水量大的问题。为了保护射孔段，采用化学堵水方法。考虑到断层与基质渗透率存在明显差异，因此将HPAM和乙酸铬凝胶通过笼统注入的方式注入至目标层位。生产数据表明堵水作业后，产油量从7.4×10⁴ m³/d增加至11.6×10⁴ m³/d，同时含水率从90%降低至72%，但在后续产油过程中含水率略有增加。

Snaas等^[24]对卡塔尔Idd El Sharji油田的一套管射孔完井水平井进行了堵水作业。利用连续油管将水泥膨胀式封隔器下入到3073 m处注入水泥从而形成水泥塞，成功地封堵了出水点，进而提高了产油量并降低了含水率。

2.3 衬管射孔完井

衬管射孔完井可分为3类：预钻孔衬管完井、割缝衬管完井和预置筛管完井。预钻孔衬管上有多个孔，将其置于生产段可以在提供流动通道的同时提高井筒稳定性。对于一些胶结程度较差的储集层，一旦发生坍塌，衬管的孔隙可能会被堵塞从而导致渗透率降低^[25]，进而降低油井产能。另外由于割缝衬管与预钻孔衬管具有相似功能，二者可相互替换。尽管割缝衬管和防砂筛管均可用于防砂，但防砂筛管的防砂效率明显更高^[26]。这3种完井方式均未进行固井，岩层未与衬管接触，因此衬管与产层间存在环空。由于衬管

具有较低的机械强度,机械封隔工具并不适用于封堵该环空,因而对环空中流体的控制难度较大。针对该问题有3种解决方案,第1种是使用ECP进行永久封堵,但需在设计井筒时提前考虑ECP排布;第2种是使用化学堵水剂对环空进行封堵;第3种是使用新型可控流筛管。目前,一些新型可控流筛管已经成功应用于水平井控水^[27]。

Foucault等^[28]针对委内瑞拉Zuata油田西南部SINCOR区域的1口水平井设计了控水方案。产层为厚200m的未固结砂岩。出于防砂考虑,完井时选择了孔径0.5mm(0.02in)、直径177.8mm(7in)的割缝衬管。堵水前含水率为80%,出水点在实测深度1710m处。该井堵水应用了凝胶、微基质水泥和水泥环。水泥由选择性注入式封隔器注入,封堵衬管外环空,以提供区域分隔。在形成两水泥环后,再通过可回收水泥膨胀式封隔器将凝胶和微基质水泥从两水泥环间注入地层用于封堵近井区域和基质孔隙。堵水后,含水率在两周内从80%降至5%以下,随后在日产液159m³的情况下稳定在2%~3%。

Zaitoun等^[8]使用化学堵水剂在加拿大1口割缝衬管完井水平井中成功实施了堵水。该井堵水作业采用了高分子聚合物及膨胀剂。低水解度的高分子聚合物不仅可用于油井,也可用于气井^[29]。由于聚合物及膨胀剂黏度较低,方案实施中采用了笼统注入的方法将聚合物和膨胀剂注入地层。堵水后,该井产油量有明显提升,含水率由85%降至低于50%。Zaitoun等^[30]在加拿大西部的Pelican Lake油田同样采取笼统注入聚合物溶液的方法对4口割缝衬管完井的稠油水平井进行了堵水,但是仅有1口井堵水效果理想。作业后,该井含水率从85%降低至50%,产油量在作业后两年内持续增加。

袁辉等^[31]介绍了海南文昌海上油田割缝衬管及防砂筛管完井水平井的堵水经验。该井出水点在水平段趾端,堵水作业使用了2个筛管外化学环空段塞及5个流量控制器。堵水后产量增加了98.2m³/d。Tudball等^[32]采取在防砂筛管中直接挤入化学药剂的堵水方案,对英国南部北海Rose油田1口产气井实施了堵水。刘怀珠等^[33]在冀东油田成功实现了堵水增产。堵水作业中采用了笼统注入的方法将2470m³浓度为3000mg/L及600m³浓度为5000mg/L的HWSO堵水剂注入地层。关井15d后开井投产,含水率降低了2.9%,一年半内总计增油892t。Vasquez等^[34]用WSP对北海1口海上割缝衬管完井注水井进行了堵水操作。由于烃

基流体携带的WSP颗粒膨胀程度最小,因此可有效地防止连续油管堵塞。当WSP颗粒填充到裂缝之后,注入淡水可使WSP颗粒膨胀,进而实现封堵。除了割缝衬管完井外,WSP还在裸眼、预射孔等完井方式水平井堵水中有广泛应用^[34-35]。Arangath等^[36]对尼日利亚海上油田1口预钻孔衬管完井水平井进行了有效堵水。堵水作业中采用了膨胀式桥塞和水泥环以形成层位分隔,随后通过连续油管将凝胶注入到目标层中实现堵水。堵水后,含水率下降了92%,同时产油量恢复到初期产油量的87%。

2.4 衬管射孔及ECP完井

该完井方式中,ECP通常与割缝衬管或防砂筛管组合使用,因此,在形成封隔的同时可兼顾防砂。该完井方式可以对产出水迅速进行封堵,然而ECP只能封堵环空,因此地层水可能绕过ECP流入井筒而造成封堵失效。相比其他完井方式,该完井方式成本较高。

2.5 其他完井方式

在某些情况下,可能会根据具体情况对完井方案进行修改。张国文等^[37]及王金忠等^[38]介绍了针对冀东油田防砂需求而设计的一种新型完井方式。该完井方式不仅具有防砂功能,且能够有效解决防砂管与裸眼井壁间环空的洗井问题。新型完井设备中最主要的部分为调流控水筛管(见图1)及遇水/油膨胀封隔器。相比传统的防砂筛管完井,该新型完井方式具有产油率高、含水率低等优点。饶富培等^[39]针对大港油田存在的底水脊进造成的过度产水问题设计了一种新型完井方式。完井设备主要由遇水/油膨胀封隔器、插入锁紧密封总成和优质星孔梯级筛管组成。

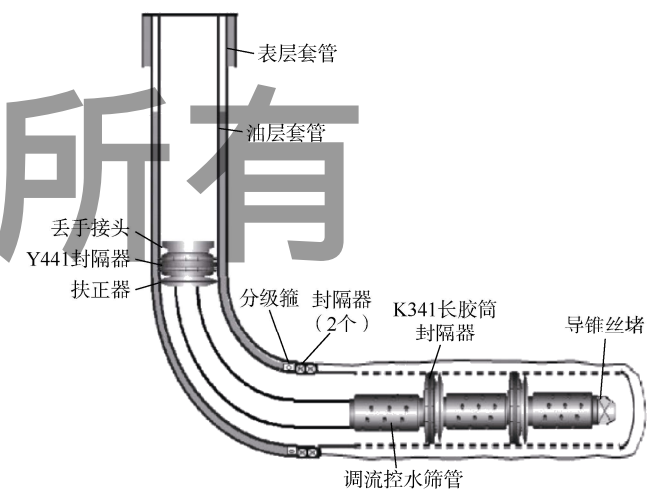


图1 管内分段调流控水管柱结构示意图^[38]

另一种新型完井方式为流入控制装置(ICD)完井。该完井方式可以通过设置水平段中每个 ICD 的流量来控制井中压降,从而有效地延缓底水、边水脊进,达到控水目的。但是在 ICD 放置在井中之后流量便无法改变,因此需预设流量^[40-41]。

3 水平井控水方法选择

根据不同的完井方式可以选择不同的堵水方法。裸眼完井水平井的堵水可以通过化学方法、机械方法或二者并用来实现。由于大部分的机械封隔工具为可回收型,因此可为后续的操作提供临时层位分隔。除了机械方法外,一些化学堵水剂(如凝胶)同样可以作为暂堵剂。化学堵水剂有两种放置方式:一种是在膨胀式封隔器辅助下通过水泥膨胀式封隔器放置,另一种是直接通过跨式封隔器放置。大部分封隔器利用连续油管下入井中,在放置堵水剂后,封隔器可以回收或留在井中。在一些情况下,可直接采用笼统注入的方法将化学堵水剂注入地层。该方法要求目标区域和岩石基质的渗透率具有明显区别,使堵水剂最大程度地进入目标区域。封隔器放置过程中的深度校正是常见的难题。相较于其他井段,出水点通常存在温度异常,可通过光纤探测该温度异常从而指示出水点^[42]。光纤可以辅助连续油管提高深度控制精度,精确地将封隔器放置于设计深度。但是该技术只能用于底水或边水温度与储集层温度有明显差异时,否则光纤无法探测温差。

在套管射孔完井中,堵水作业主要有两种方法:化学方法和机械方法。因为套管射孔完井井筒稳定性好,所以通常采用笼统注入化学堵水剂的方法,化学堵水剂通过射孔孔眼进入目标层进行封堵。膨胀式封隔器和水泥塞可以在套管射孔完井中提供永久封隔。

在衬管射孔完井中,由于防砂筛管和预钻孔衬管容易塌陷,因此堵水只能采取化学方法以减少对衬管的破坏。在进行堵水操作时,可膨胀封隔工具可为后续的化学堵水剂注入提供区域分隔。在衬管射孔完井中,化学堵水剂通过连续油管和跨式封隔器注入,并在井壁和衬管间形成环空化学封隔段塞^[43-44]。Arco Alaska 和 Schlumberger Dowell 公司已经将环空化学封隔段塞技术应用于 Prudhoe Bay 油田^[45]。一些情况下可以采取笼统注入化学堵水剂的方法,尤其是对于低黏度聚合物凝胶。笼统注入容易操作,但如果出水段压力高于产油层压力,化学堵水剂将进入产油层进而破坏地层^[46]。

衬管及 ECP 完井方式可以提供区域分隔或封堵出水段。ECP 膨胀后封堵环空,优点是及时封堵出水。大庆油田成功地使用 ECP 对 1 口斜井实施了有效堵水^[47]。但需要注意的是该完井方式也存在着成本高和深度校正难等缺点。

根据完井方式及井筒自身条件进行合理、有效的控水方法选择十分重要。另外,在设计堵水方案时还应考虑成本、操作难度以及封隔工具可回收性等问题。机械封隔工具更适用于封堵井筒及近井地带,而化学堵水剂则可以对裂缝、窜流通道及酸蚀孔洞等进行封堵。当出水点在水平段趾端时,机械或化学方法均可单独使用,直接封堵;当出水点靠近跟端或在水平段中时,则需在形成层位封隔后再进行目标层封堵。在某些情况下,为防止堵水剂对非目标区域造成损害,需要放置可回收封隔工具提供临时区域分隔。对于大多数机械封隔工具,在提供临时封堵后可以被回收。而对于一些化学堵水剂,如暂堵凝胶,可以在完成封堵后通过降解或破碎等方式移除。此外,相较于化学堵水剂,使用机械封隔工具成本较高。因此从成本角度考虑,如果笼统注入条件成熟,应该选择化学方法。虽然化学堵水剂易注入,但是所有的化学堵水作业均存在破坏地层且不可逆的潜在风险,因此在注入化学堵水剂时要求较高的精度。针对这一要求,有喷嘴的跨式封隔器可在深度校正后将堵水剂精准地注入目标层位。由于衬管承重能力低,机械封隔工具并不适用于衬管射孔完井。对于裸眼完井或套管射孔完井水平井而言,机械方法与化学方法相结合的技术也日趋成熟。

4 结语

机械方法和化学方法均可用于水平井堵水以及提供永久或暂时区域分隔。机械方法通常用于井筒或近井堵水,化学方法可用于封堵基质孔隙或裂缝。机械方法成本略高于化学方法,而且堵水过程中的深度校正也是一个操作难点。在设计堵水方案时应考虑井筒的完井方式,机械方法和化学方法均可用于裸眼完井及套管射孔完井的水平井。从现场经验来看,割缝衬管完井及防砂筛管完井只能选择化学方法进行堵水,机械方法只能提供临时的区域分隔。同时,为防止衬管堵塞,选择化学药剂时应考虑衬管射孔孔径加以考虑。

参考文献:

- [1] 白宝君,周佳,印鸣飞. 聚丙烯酰胺类聚合物凝胶改善水驱波及

- 技术现状及展望[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(4): 481-487.
- BAI Baojun, ZHOU Jia, YIN Mingfei. A comprehensive review of polyacrylamide polymer gels for conformance control[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(4): 481-487.
- [2] 刘佳声. 稠油边底水油藏水平井堵水技术改进与试验[J]. 当代化工, 2013, 42(3): 290-293.
- LIU Jiasheng. Improvement and test of water plugging technology for horizontal wells in heavy oil reservoirs with edge and bottom water[J]. Contemporary Chemical Industry, 2013, 42(3): 290-293.
- [3] 李涛. 高温高压套损井膨胀管修复技术[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(3): 374-378.
- LI Tao. Solid expandable tubular patching technique for high-temperature and high-pressure casing damaged wells[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(3): 374-378.
- [4] PETROWIKI. Foamed cement[EB/OL]. (2015-06-25)[2017-03-26]. http://petrowiki.org/Foamed_cement.
- [5] HARLAN T D, FOREMAN J M, REED S D, et al. Foamed cement selection for horizontal liners proves effective for zonal isolation: Case history[R]. SPE 71055-MS, 2001.
- [6] 梁晓芳, 张红岗. 水平井找堵水技术研究及应用[J]. 石油化工应用, 2014, 33(1): 46-49.
- LIANG Xiaofang, ZHANG Honggang. Research and application of horizontal well plugging water technology[J]. Petrochemical Industry Application, 2014, 33(1): 46-49.
- [7] DAI Licai, QING You, XIE Yuhong, et al. Case study on polymer gel to control water coning for horizontal well in offshore oilfield[R]. OTC 21125-MS, 2011.
- [8] ZAITOUN A, KOHLER N, MONTEMURRO M. Control of water influx in heavy-oil horizontal wells by polymer treatment[R]. SPE 24661-MS, 1992.
- [9] BAI Baojun, HUANG Fusheng, LIU Yuzhang, et al. Case study on preformed particle gel for in-depth fluid diversion[R]. SPE 113997-MS, 2008.
- [10] PEIRCE J W, HUTCHERSON M R, JENSEN M D, et al. An overview of conformance control efforts for the West Sak Field on the North Slope of Alaska[R]. SPE 169073-MS, 2014.
- [11] HALLIBURTON. Micro matrix cement[EB/OL]. (2016-05-16)[2017-04-12]. http://www.halliburton.com/public/cem/contents/data_sheets/web/h/h00693.pdf.
- [12] 刘怀珠, 李良川, 梁超. 水平井选择性化学堵水技术在高尚堡油田浅层油藏的应用研究[J]. 油田化学, 2010, 27(4): 428-430.
- LIU Huaizhu, LI Liangchuan, LIANG Chao. Application of horizontal well selective chemical water shutoff technology on Gaoshangpu Oilfield shallow reservoir[J]. Oilfield Chemistry, 2010, 27(4): 428-430.
- [13] 李宜坤, 魏发林, 路海伟, 等. 水平井化学控水技术研究与应[J]. 石油工业技术监督, 2011, 27(6): 50-54.
- LI Yikun, WEI Falin, LU Haiwei, et al. Horizontal well water control for chemical research and application[J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2011, 27(6): 50-54.
- [14] 马广博, 董金平, 刘中良, 等. 水平井选择性化学堵水技术在高尚堡浅层油藏中的研究与应用[J]. 内蒙古石油化工, 2011(14): 113-114.
- MA Guangbo, DONG Jinping, LIU Zhongliang, et al. Selective chemical water plugging technique in horizontal well in Gaoshangpu shallow oil reservoir in the research and application[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2011(14): 113-114.
- [15] UDDIN S, DOLAN J D, CHONA R A, et al. Lessons learned from the first openhole horizontal well water shutoff job using two new polymer systems: A case history from Wafra Ratawi Field, Kuwait[R]. SPE 81447-MS, 2003.
- [16] LONGACRE S A, GINGER E P. Evolution of the Lower Cretaceous Ratawi Oolite reservoir, Wafra Field, Kuwait-Saudi Arabia partitioned neutral zone[J]. Giant Oil and Gas Fields, 1988(12): 273-331.
- [17] UTOMO B, AL-HARBI M, RAZZAK S, et al. Innovative water shut off solution combining real time downhole measurement and analysis with zonal isolation technologies for horizontal open hole producer in Ratawi Field: A case history from partitioned zone[R]. SPE 145901-MS, 2011.
- [18] DASHASH A A, AL-ARNAOUT I, AL-DRIWEESH S M, et al. Horizontal water shut-off for better production optimization and reservoir sweep efficiency (case study)[R]. SPE 117066, 2008.
- [19] STENGER B, PHAM T, AL-AFALEG N. Tilted original oil/water contact in the Arab-D reservoir, Ghawar Field, Saudi Arabia[J]. GeoArabia, 2003, 8(1): 9-39.
- [20] SHARMA H, DUARTE J, MUFEEED E, et al. Lessons learnt from water shutoff of horizontal wells using inflatable packers and chemicals in Ghawar Field of Saudi Arabia[R]. IPTC 16637, 2013.
- [21] SAUDI M, AL-UMRAN M I. Inflatable enables successful water shutoff in high angle wellbores in Ghawar Field[R]. SPE 93261-MS, 2005.
- [22] AL-ZAIN A, DUARTE J, HALDAR S, et al. Successful utilization of fiber optic telemetry enabled coiled tubing for water shut-off on a horizontal oil well in Ghawar Field[R]. SPE 126063, 2009.
- [23] LANE R, SERIGHT R. Gel water shutoff in fractured or faulted horizontal wells[R]. SPE 65527-MS, 2000.
- [24] SNAAS A, ALVAREZ D. Successful water shut off in extended reach horizontal wells using inflatable technology[R]. IPTC 12410-MS, 2008.
- [25] 周勇. 我国水平井完井技术综述[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2012, 33(15): 75.
- ZHOU Yong. Overview of horizontal well completion technology in China[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2012, 33(15): 75.
- [26] 董长银, 张清华, 高凯歌, 等. 机械筛管挡砂精度优化实验及设计模型[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(6): 991-996.
- DONG Changyin, ZHANG Qinghua, GAO Kaige, et al. Screen sand retaining precision optimization experiment and a new empirical design model[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(6): 991-996.
- [27] 徐鑫. 水平井控流筛管完井技术研究及应用[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(3): 71-75.
- XU Xin. Development and application of flow control screen completion for horizontal wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(3): 71-75.
- [28] FOUCAULT H, POILLEUX D, DJURISIC A, et al. A successful experience for fiber optic and water shut off on horizontal wells with

- slotted liner completion in an extra heavy oil field[R]. SPE 89405-MS, 2004.
- [29] ZAITOUN A, PICHERY T. A successful polymer treatment for water coning abatement in gas storage reservoir[R]. SPE 71525-MS, 2001.
- [30] ZAITOUN A, KOHLER N, BOSSIE-CODREANU D, et al. Water shutoff by relative permeability modifiers: Lessons from several field applications[R]. SPE 56740-MS, 1999.
- [31] 袁辉, 李耀林, 朱定军, 等. 海上油田水平井控水油藏方案研究及实施效果评价: 以 Wen8-3-A2h 井为例[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(4): 996-1002.
- YUAN Hui, LI Yaolin, ZHU Dingjun, et al. Reservoir project research and implementation effect evaluation of offshore oilfield horizontal well water controlled: For example Wen8-3-A2h[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(4): 996-1002.
- [32] TUDBALL I C, MCGINN P, WATSON D. Successful coiled-tubing water-shutoff solution for a sand-screen horizontal completion using novel fluids[R]. SPE 94175-MS, 2005.
- [33] 刘怀珠, 李良川, 郑家朋, 等. 水平井选择性化学堵水技术在冀东油田浅层底部水油藏的研究与应用[J]. 石油地质与工程, 2010, 24(2): 109-111.
- LIU Huaizhu, LI Liangchuan, ZHENG Jiapeng, et al. Application of selective permeability reduction agent in Jidong Oil field[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2010, 24(2): 109-111.
- [34] VASQUEZ J, RODRIGUEZ L. A water swelling polymer for fracture shutoff to improve injection profile during secondary recovery: Case histories and lessons learned after more than 600 well interventions[R]. SPE 174292-MS, 2015.
- [35] BEAMAN D J, BRINK D I, RITCHIE B, et al. Qualification and deployment of a unique polymer conformance control system[R]. IPTC 13074-MS, 2009.
- [36] ARANGATH R, MKPASI E. Water shut-off treatments in open hole horizontal wells completed with slotted liners[R]. SPE 74806-MS, 2002.
- [37] 张国文, 钱杰, 刘凤, 等. 水平井控水完井管柱的研究与应用[J]. 石油机械, 2013, 41(3): 89-91.
- ZHANG Guowen, QIAN Jie, LIU Feng, et al. Research and application of the water control completion string for horizontal wells[J]. China Petroleum Machinery, 2013, 41(3): 89-91.
- [38] 王金忠, 肖国华, 陈雷, 等. 水平井管内分段调流控水技术研究与应用[J]. 石油机械, 2011, 39(1): 60-61.
- WANG Jinzhong, XIAO Guohua, CHEN Lei, et al. Research and application of the staged flow regulating and water control technology with screen or tubing in horizontal wells[J]. China Petroleum Machinery, 2011, 39(1): 60-61.
- [39] 饶富培, 董云龙, 吴杰生, 等. 大港油田底部水油藏水平井控水完井工艺[J]. 石油钻采工艺, 2010, 32(3): 107-109.
- RAO Fupei, DONG Yunlong, WU Jiasheng, et al. Technology of water control and well completion of horizontal wells in bottom water reservoir in Dagang Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2010, 32(3): 107-109.
- [40] 杨进先. 底部水油藏水平井控水技术[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2012, 33(15): 143.
- YANG Jinxian. Water shutoff technology in bottom water reservoirs[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2012, 33(15): 143.
- [41] 张瑞霞, 王继飞, 董社霞, 等. 水平井控水完井技术现状与发展趋势[J]. 钻采工艺, 2012, 35(4): 35-37.
- ZHANG Ruixia, WANG Jifei, DONG Shexia, et al. Status and development trends of water-controlling completion technology of horizontal well[J]. Drilling and Production Technology, 2012, 35(4): 35-37.
- [42] BUROV A, KHARRAT W, HUSSEIN N A. Innovative coiled tubing water shutoff techniques in horizontal wells[R]. SPE 149651-MS, 2012.
- [43] 陈维余, 孟科全, 朱立国. 水平井堵水技术研究进展[J]. 石油化工应用, 2014, 33(2): 1-4.
- CHEN Weiyu, MENG Kequan, ZHU Ligu. Progress in research on water shutoff for horizontal well[J]. Petrochemical Industry Application, 2014, 33(2): 1-4.
- [44] 李宜坤, 胡频, 冯积累, 等. 水平井堵水的背景、现状及发展趋势[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2005, 27(3): 757-760.
- LI Yikun, HU Pin, FENG Jilei, et al. Background, current situation and trend of development for water shutoff in horizontal wells[J]. Journal of Oil and Gas Technology (J.JPI), 2005, 27(3): 757-760.
- [45] BOND A, BLOUNT C, DAVIES S, et al. Novel approaches to profile modification in horizontal slotted liners at Prudhoe Bay, Alaska[R]. SPE 38832-MS, 1997.
- [46] 朱怀江, 徐占东, 罗健辉, 等. 水平井调堵技术最新进展[J]. 油田化学, 2004, 21(1): 85-90.
- ZHU Huaijiang, XU Zhandong, LUO Jianhui, et al. Technologies of water and gas shutoff in horizontal wells: An overview[J]. Oilfield Chemistry, 2004, 21(1): 85-90.
- [47] 于洪江, 张凤武. 侧钻水平井机构堵水工艺技术[J]. 大庆石油地质与开发, 1997, 16(3): 56-58.
- YU Hongjiang, ZHANG Fengwu. Deviate well water control in Daqing Oil Field[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1997, 16(3): 56-58.

第一作者简介: 孙昕迪(1990-), 女, 黑龙江大庆人, 美国密苏里科技大学地球科学、地质与石油工程学院在读博士研究生, 主要从事化学堵水调剖技术在二氧化碳驱油藏的应用研究。地址: Geosciences and Geological and Petroleum Engineering Department, Missouri University of Science and Technology, 129 McNutt Hall, 1400 N. Bishop, Rolla, Missouri 65409, USA. E-mail: sxpm4@mst.edu

收稿日期: 2017-05-06 修回日期: 2017-09-15

(编辑 胡苇玮)