

国内油气田漏失性地层固井防漏技术研究^{*}

姚晓¹ 周保中² 赵元才³ 张嵇南² 宗贻平³

(1.南京工业大学材料科学与工程学院 2.吉林石油集团有限公司钻井工艺研究院 3.中国石油青海油田分公司)

姚晓等.国内油气田漏失性地层固井防漏技术研究.天然气工业,2005;25(6):45~48

摘要 近年来国内油气田漏失井钻井数量一直呈增加趋势。漏失井固井作业中的水泥浆低返是各油气田尚未很好解决的技术难题,因而严重地制约了油气田开发战略地实施。文中就漏失性地层的特点、固井技术难点、主要影响因素和防漏材料的作用机制进行了讨论,对国内各油气田采取的防漏工艺措施和所用防漏水泥浆体系存在的问题进行了分析和比较。最后,介绍了国内外新开发的防漏水泥浆体系及应用情况。

主题词 固井 漏失层 水泥浆 防漏材料 固井质量

一、国内油气田易漏地层特点和漏失情况

1. 易漏地层的类型与特征

地质因素是造成井漏的最主要因素,了解漏失性地层的裂缝特性对于解决固井过程中的漏失有着十分重要的意义。地层裂缝系统的定义为^[1]:在油藏条件下,宽度下限为10 μm 的裂缝,及与其连通的溶洞所组成的孔隙网络。①微裂缝:裂缝宽度小于1 μm ;②小裂缝:裂缝宽度介于1~10 μm ;③中裂缝:裂缝宽度介于10~100 μm ;④大裂缝:裂缝宽度大于100 μm 。对于碳酸盐地层,裂缝的划分为:①大裂缝:裂缝开度大于15000 μm ;②中裂缝:裂缝开度在1000~4000 μm 之间;③细裂缝:裂缝开度在60~1000 μm 之间。

钻井过程中的漏失可分为以下4种。①渗透型漏失:指渗透性地层的漏失。正常地层孔隙度大、渗透性高的地层易发生渗漏;②次生裂缝型漏失:因地层承压过高后诱发的裂缝所致。例如:水泥浆流变性差,循环排量过大,水泥浆被泥浆污染变稠,施工不连续等都会产生次生裂缝;③裂缝型漏失:指天然裂缝、孔洞式洞隙地层的漏失。大裂缝地层最易发生井漏,其漏失原因在于:正压差下的漏失;重力诱导型漏失;置换性漏失;溶洞性漏失;其它漏失(边

喷边漏,地下井喷等);④裂缝/孔隙型漏失:指孔隙较发育并有微裂缝的地层漏失。

根据井内流体漏失速度,漏层可划分为:①渗漏:漏速小于10 m^3/h ;②小型漏失:漏速小于20 m^3/h ;③中型漏失:漏速小于50 m^3/h ;④大型漏失:漏速小于80 m^3/h ;⑤严重漏失:漏速大于80 m^3/h ;⑥特大漏失:井内失返(只进不出)。

依据地层的漏失特性,固井施工可分为:①低压漏失层固井,指在用低密度钻井液,且在钻井过程中发生井漏经反复堵漏后仍不能达到水泥浆密度梯度的情况下固井作业;②高压漏失层固井,指液柱压力大于地层压力时发生井漏,低于地层压力时发生井喷,通常高压漏层为高压水层或气层。

2. 国内部分油气田钻井漏失情况

1990年国内油田发生重大井漏复杂853次,损失钻井时间70000 h以上,平均井漏复杂时率(处理井漏时间/钻井总时间)在3%左右^[2]。

(1)四川气田。1991~1997年四川石油管理局川东探区共发生井漏446次,损失钻井时间90000 h,井漏复杂时率为8.95%^[3];1999年川东钻探公司在川东北探区钻井17口,平均井漏复杂时率超过20%^[4](其中鹰1井为44.46%,东安1井为75.76%),损失钻井时间7450 h。2002年在川东地区已钻的62口井中,有42口井发生井漏,严重漏失

^{*} 本文系国家863项目(2003AA327120)、CNPC攻关项目(03B2091000)。

作者简介:姚晓,1960年生,教授,博士生导师;1982年毕业于西南石油学院油田化学专业,2000年在南京化工大学获博士学位,2003年南京工业大学化学工程与技术学科博士后出站。研究方向为油田材料化学、油井水泥外加剂。地址:(210009)江苏省南京市新模范马路5号。电话:(025)83364556。E-mail:htm@njut.edu.cn

占20%~30%,特大漏失占10%~20%,损失钻井时间8009 h,井漏复杂时率在50%以上。

(2)江苏油田。沙7区块在2002年实施开发定向井3口,因注水产生异常高压(泥浆当量密度为 $1.52\sim 1.72\text{ g/cm}^3$)而发生严重井涌,在压井过程中诱发裂缝性漏失(漏速 $20\sim 96\text{ m}^3/\text{h}$),其中沙7—22井因严重漏失导致上部疏松地层坍塌引发卡钻,最终不得不埋钻具填井侧钻,3口井共损失钻井时间2000 h,井漏复杂时率为56%。

(3)青海油田。青海油田的花土沟、油沙山、七个泉区块和涩北气田(涩北1号、涩北2号)均存在漏失问题,如N2—63—29井漏失高粘(滴流)钻井液 50 m^3 ;N1井发生漏失83次,漏失钻井液 17232 m^3 、堵漏水泥浆 376 m^3 ,损失钻井时间1968 h;S5—1—3井漏失9次,漏失钻井液 288 m^3 。2003年因漏失严重(均大于 5000 m^3)报废3口井(狮12井、南2井和南7井)。

(4)塔里木油田。塔里木油田的山前构造漏失严重,迪那11井发生井漏17次,共漏失钻井液 2095 m^3 ;迪那22井发生井漏20次,共漏失钻井液 1813 m^3 。却勒4井漏失4次,共漏失钻井液 257 m^3 ,损失钻井时间249 h;却勒6井漏失3次,共漏失钻井液 308 m^3 ,损失钻井时间840 h;却勒11井漏失5次,共漏失钻井液 557 m^3 ,损失钻井时间2712 h。

(5)吉林油田。吉林油田的海坨、新民和乾北区块的地层裂隙发育,井漏现象严重。如海3井漏失钻井液 300 m^3 ;海6井漏失钻井液 155 m^3 ;海22井平均漏速达 $50\text{ m}^3/\text{h}$;海23井漏失钻井液 780 m^3 ;海24井漏失钻井液 120 m^3 以上,并被迫提前完钻。乾北24—10井钻井过程中发生井漏4次,共漏失钻井液 770 m^3 ,损失钻井时间168 h。

此外,在大庆海拉尔、杏北和南1—3区^[5],玉门青西,新疆准南油田,辽河油田^[6],中原油田和长庆油田的部分区块也存在较为严重的井漏问题。可见,井漏是目前国内各油气田普遍存在的技术难题。由于固井时水泥浆的密度比钻进时要高,因此,易漏性地层固井时极易发生井漏、水泥浆回落和低压。

二、漏失性地层防漏固井技术难点

1. 地层裂缝发育、承压能力低、压力窗口小

国内油气田易漏地层的压力系数普遍较低(见表1),且压力窗口小,在外部压力变化时,常导致裂

缝宽度相应明显变化。压差是造成钻井液漏失的外因,地层孔隙度大、渗透性高和裂缝发育是造成井漏的内因。可以推测,渗漏大多是由孔隙型高渗透微裂缝造成的,小型漏失往往是由中—大诱导性裂缝造成的,而大型和特大型漏失大都是由于诱导性大裂缝、原生大裂缝或孔洞性地层造成的。

表1 国内部分油气田低压易漏地层的压力系数^(7~10)

新疆	四川	青海	大港	吉林	江苏	辽河	长庆
0.88~0.92	0.45~0.8	0.50~0.80	0.56~0.98	0.99~1.12	0.98~1.05	0.4~0.75	<0.95

对吉林油田HT地区已完钻的18口探井资料分析发现,该地层裂缝发育,裂缝以纵向裂缝、网状裂缝为主,少量水平裂缝和单斜裂缝(在7口取心井中,5口井岩心共见到317条裂缝,岩心长354.4 m,裂缝总长58.1 m,单条裂缝长0.1~10 m,平均缝长在0.2~0.5 m),且多为诱导裂缝和应力释放裂缝。这是造成该地区钻井漏失和固井低压的主要原因。H32井使用 1.50 g/cm^3 低密度水泥浆固井,设计封固段长510 m,顶替时发生漏失,水泥浆低压434 m且声幅值偏高。对于大裂缝性地层的漏失,即使采用低密度水泥浆(1.30 g/cm^3)和双级固井工艺,也会频繁发生水泥浆低压和漏封事故^[10]。

江苏油田SN区块油层埋深2300 m左右,1740 m至油层顶部存在多层辉绿岩,存在漏失通道或在交界面岩性脆弱。如S7—23井在钻井液密度低于 1.52 g/cm^3 时井涌,大于 1.52 g/cm^3 时井漏。该井在井深1970~2250 m间多次发生严重漏失,多次采用桥堵浆堵漏,在1998 m、2060 m、2250 m漏点附近3次打水泥塞堵漏(G级净浆),继续钻进时再次发生严重漏失。

2. 井身结构简单、裸眼井段长、层间复杂

为节约钻井成本,各油气田简化井身结构,采用两层套管结构(表套+油套),使得裸眼井段加长,且不能确切掌握漏层位置、漏层数量、吸收量、地层破裂压力和漏速。长裸眼井段内可能包含不同岩性的砂、泥、页、砾和盐岩层段,且垮塌、缩径、出水和气侵现象并存,上述复杂因素造成固井过程顶替困难,很容易漏失低压。

青海油田SB区块气井平均井深1200~1500 m,表层套管下深400 m,裸眼产层总长800~1100 m。钻井过程存在渗漏或小型漏失(漏层位置不确

定)。固井设计水泥浆返出地面,但由于顶替过程中常发生大型漏失(失返),水泥浆经常返不到表层套管内,严重影响了气井的固井质量。

3. 施工工艺要求严格,固井质量要求高

漏失井固井工艺和措施随井下漏失情况不同而变化(或正注反挤或分级固井),水泥浆体系也因井况而异(或低密度或双凝体系)。由于漏失性地层的固井过程中存在诸多不可预见的因素(大漏或不漏),在压稳地层的同时,灵活地控制(限制)顶替排量 and 顶替压力以达到替净的目的,一直是固井施工过程中十分重要的应变环节。由于漏失性地层固井时既要求防止水泥浆低返,同时全井封固段固井质量也必须得到保证,从而使得固井难度增大。

三、漏失性地层固井工艺及防漏水泥浆体系评析

近年来,国内各油气田提出的解决漏失井固井问题的工艺措施和水泥浆体系有:①先期堵漏法:在下套管前后注水泥前采用桥堵材料和静置的办法封堵漏层,然后固井;②平衡压力固井法:使用低密度水泥浆(注重水泥浆密度和流变性设计,使环空水泥浆柱压力低于渗透性地层的漏失压力,降低环空流动阻力)、双级(多级)和正注反挤注水泥;③使用防漏前置液:降低环空的静液柱压力,提高地层承压能力(如硅酸钠前置液渗入高渗层,与地层内钙离子反应形成凝胶,产生壁面保护层)。但现行的技术措施和水泥浆体系均存在一定程度的局限性,固井低返现象依然存在,固井质量仍然不够理想,现加以分析和评述。

1. 工艺措施

常用的防漏工艺措施有两种,其一是分级注水泥技术,即采用分级箍(最好选用液压开孔)将长封固井段人为分隔开,以降低固井施工中的注、替压力;其二是采用正注反挤(或分级固井+正注反挤)的方法,以平衡地层压力,防止水泥浆漏失。这两种工艺措施常常因地层岩性、井身质量和分级箍质量(井径不规则或分级箍打不开)的原因而失效。如实施分级固井和正注反挤工艺要求对漏层位置和地层破裂压力判断准确,分级箍安放处要求井眼规则且岩性致密,井斜不超过 2° 。正注反挤作业有时要反复施工方能奏效,且容易污染地层。

现行固井防漏技术存在的问题:①先期堵漏工

艺一般适用于漏层不在产层的井,如果漏层在储层,则不利于保护油气层;②漏层位置的准确判定一直是影响分级固井和正注反挤固井技术应用的关键,目前缺乏相应的技术改进手段。

2. 防漏水泥浆体系

目前国内用于漏失性地层固井的防漏水泥浆体系主要有3类^[2,5~11]:①各种低密度体系(使用硅藻土、膨润土、SNC、泡沫、陶粒及粉煤灰等材料);②交联聚合物材料(含触变水泥体系);③专用防漏水泥浆体系(由不同尺度、不同弹性模量的纤维群构成,可有效封堵各类地层裂缝)^[12]。

从材料特性和应用效果分析,低密度水泥浆体系只具有减轻水泥浆密度,降低注、替压力的作用,而不具备堵漏作用,因而防漏作用有限且效果不稳定。同时,受其固有的高体积收缩($-6\% \sim -14\%$)、高脆性和低抗压强度的限制,应用效果有待改进。尽管颗粒紧密堆积理论的引入,使低密度水泥浆的抗压强度有所提高,但高收缩、高脆性的固有缺陷并未得到改善,特别是低密度水泥石的高脆性会给后续各种采油作业埋下隐患。第二类防漏水泥浆体系主要成分为交联的水溶性聚合物材料(如触变水泥),其本身具有堵漏作用,但施工风险大,对作业设备和操作人员技术要求很高(如触变性小,堵漏效果不佳,而触变性强,施工中容易憋泵),故其应用实例十分有限。而第三类防漏水泥浆体系的主要成分为特种纤维材料,防漏失效果十分显著。同时,堵漏水泥浆所形成的水泥石还具有显著的增韧抗裂作用,有助于防止聚能射孔对水泥环的破坏,延长油气井生产寿命。

四、新型防漏材料的性能和应用

1. 新型防漏材料应具备的性能

在保证水泥浆体流动性能的前提下,要求防漏材料既要有一定的尺寸和级配分布,又有不同的弹性模量。其目的在于:①在水泥浆泵送过程中有利于清洁井眼和提高环空流动壁面剪应力,以提高顶替效率;②在水泥浆被顶替过程中,不同尺度的纤维材料能够进入漏失性地层不同尺寸的裂缝并搭桥成网,增加漏失水泥浆的流动阻力,达到堵漏的目的;③随水泥浆体进入地层深部和浆体稠度的增加,提高漏失性地层的承压能力,达到防漏、堵漏和提高固井质量的目的。

2. 防漏水泥浆体系应用实例

(1) 国外油气田研究及应用情况

以特种纤维材料为主的防漏水泥浆体系为国内外近年来新开发的特种水泥浆体系,其研究及应用的公开报道不多。国外使用单一种类的纤维材料,并采用“后批混”施工工艺^[12],即先配好水泥浆,然后将纤维材料加入到水泥浆中混合搅拌,再泵入井内。

中东地区的 Radhuma 油田系裂缝性灰岩地层,采用乳化或泡沫钻井液钻井。因固井施工低返问题严重,曾先后采用多级注水泥工艺、常规低密度水泥浆(1.28 g/cm^3)、高性能低密度水泥浆体系(紧密堆积体系, 1.14 g/cm^3)及100%水泥附加量固井,并配套水玻璃前置液,但水泥浆仍不能达到设计返高。在SY—36井(钻井液漏速 $15 \sim 24 \text{ m}^3/\text{h}$)的固井施工中,以 1.28 g/cm^3 的高性能低密度水泥浆为基浆,以“后批混”工艺加入长度为12 mm的特种纤维材料(掺量: 6 kg/m^3),固井施工获得圆满成功。该体系先后在中东和美国的5口漏失井和易漏煤层气井中应用,水泥返高和固井质量均能满足施工设计的要求。

(2) 国内油田研究及应用情况

南京工业大学研发的F27A防漏增韧剂系不同尺度的混杂纤维材料^[11],采用干混方式混灰,简化了施工工艺,便于现场施工。国内部分油田易漏地层不同水泥浆体系的应用情况,如国内西部某气田原用的水泥浆体系在固井时均未进入表层套管,而采用F27A防漏水泥浆体系固井后,水泥浆均返入上层套管内或返出地面。在国内东部某油田(井号H或QB)严重漏失地层,采用较高密度的F27A防漏水泥浆体系($1.55 \sim 1.95 \text{ g/cm}^3$)固井,虽然也偶有低返现象发生,但水泥浆上返进入了上层套管且胶结良好,基本解决了易漏或严重漏失性地层的固井技术难题。但该项技术尚需进一步完善和改进。

五、结束语

易漏地层固井作业中的水泥浆低返现象的影响因素十分复杂,要成功地防漏需要系统地研究影响易漏井固井质量的各种因素,诸如漏层特性、裂缝尺度、漏层位置和数量,所使用的钻井液和完井液的性能,固井施工工艺、选用的防漏材料与水泥浆性能的

关系等。其中防漏水泥浆体系的选择和施工工艺是技术关键,必须加以重视并进行深入的研究。此外,防漏材料的研发尚需系列化,以满足不同特性漏失地层防漏固井施工的技术要求。

由于国内裂缝性储层的油气储量约占总储量的50%^[1],今后易漏地层的钻井和固井数量还会增加,如何提高易漏井固井质量将是各油气田需要面对的严峻挑战。在这一特种材料领域研究的任何突破,对于防止易漏地层的水泥浆低返、提高固井质量和延长油气井生产寿命有着重要的技术经济意义,增加必要的材料及技术投入势在必行,各油气田的甲方(油公司)将是最大的也是最终的受益者。

参 考 文 献

- 1 崔迎春,刘媛,陈玉林等.裂缝性油气储层保护技术研究.石油钻采工艺,2003;25(6)
- 2 徐同台,刘玉杰,申威等.钻井工程防漏堵漏技术.北京:石油工业出版社,1997
- 3 姚声贤,任兴国.东安1井井漏的启示.天然气工业,2004;24(1)
- 4 吴华.川(渝)东北构造带钻探难点及技术对策.天然气工业,2003;23(2)
- 5 李天群.大庆油田调整井防漏固井施工技术.钻采工艺,2003;26(2)
- 6 柳平林,张运桥,张家栋.高塑性强度水泥浆堵漏试验.石油钻探技术,1997;25(3)
- 7 李毅,柳世杰.漏失井注水泥工艺.天然气工业,1996;16(5)
- 8 李宝贵.双级注水泥技术在低压易漏探井中的应用.新疆石油科技,2002;12(4)
- 9 刘振宇,张古森,张启运等.双基双凝水泥浆体系固井.石油钻采工艺,2002;24(3)
- 10 郭小阳,张玉隆,刘硕琼等.低压易漏长裸眼井注水泥工艺研究.天然气工业,1998;18(5)
- 11 姚晓,吴叶成,樊松林等.F27A油井水泥防漏增韧剂的研究及应用.天然气工业,2004;24(6)
- 12 Low N, Dacoord G *et al*. Designing fibered cement slurries for lost circulation applications: case histories. SPE 84617, 2003

(收稿日期 2004-12-29 编辑 钟水清)