

气体钻水平井的携岩研究及在白浅 111H 井的应用^{*}

孟英峰¹ 练章华¹ 李永杰² 梁红²
吴仕荣³ 伍贤柱⁴ 陈刚³ 肖新宇⁴

(1.“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室·西南石油学院 2.西南石油学院

3.中国石油西南油气田分公司 4.四川石油管理局)

孟英峰等.气体钻水平井的携岩研究及在白浅 111H 井的应用.天然气工业,2005;25(8):50~53

摘 要 目前国际上流行的斜井、水平井气体钻井流动计算与井下真实情况相比有很大区别,从而导致计算得到的携岩气体需求量过小,难以保证井下正常携岩、清岩。通过研究气体钻水平井的携岩问题,发现水平井气体携岩的规律与垂直井有本质不同。依据研究结果所得出的携岩气体需求量比目前国际流行计算的结果要大 50%~100%,而且还需要配合其他措施,方可保证井眼净化。文章简要介绍了研究结果在白浅 111H 井的应用。

关键词 气体钻井 岩屑 携岩能力 岩屑运移 输气量

一、岩屑运移机理

气体钻井中的岩屑运移,其学术范畴属于气固多相流中的颗粒和颗粒群运动。

1851 年,Stokes 研究了单个圆球在粘性可压缩流体层流中的匀速直线运动,提出了 Stokes 公式。Basset、Boussineq 和 Oseen 在 1885~1927 年之间将 Stokes 研究扩展至非匀速颗粒运动,指出颗粒运动不但与 t 时刻运动状态有关,也与颗粒的非匀速运动历史有关,这就是颗粒运动的 B.B.O 方程。之后的许多研究者将颗粒运动扩展到紊流、颗粒群影响。根据颗粒浓度分为流化床理论(高浓度)、稀疏固相气固两相流,两者之间的过渡相。气体钻井的携岩属于稀疏固相气固两相流。

在垂直井筒中,岩屑上升的力主要是上升气流对岩屑的冲击力、气体粘性对岩屑的拖曳力、以及岩屑有加速时的上升惯性力;而岩屑下沉的力主要是浮重。此外,岩屑还产生水平方向的分力和由此引起的水平运动(Magnus 力、Saffman 力、Basset 力等)。因此,真实垂直井筒内的岩屑在上升气流中是螺旋向上或“Z”字型向上或翻滚向上的复杂轨迹。

气体钻井的工程计算中,垂直井岩屑上升计算

未考虑水平方向的分力和由此引起的水平运动;也未考虑岩屑加速或减速的惯性影响;又由于气体粘性力与气流冲击力相比甚小,故被略去。最终得到的是气流冲击升力与岩屑浮重相平衡的匀速直线运动的模型(Stokes 公式):

$$\frac{1}{2} C_D \frac{\pi}{4} d^2 v^2 = \frac{\pi}{6} d^3 (\rho - \rho_g) g \quad (1)$$

$$v = \sqrt{\frac{4d(\rho - \rho_g)g}{3C_D \rho}} \quad (2)$$

式中: d 为岩屑直径; ρ 为岩屑密度; ρ_g 为气体密度; g 为重力加速度; C_D 为形状阻力因子; v 为岩屑匀速直线运动的平衡速度。

可见,垂直井筒内岩屑运移相对简单,气流速度、升力和回落力均为同一方向。在一定气流冲击下,如果岩屑足够小,则其必然会被带出井筒;如果岩屑比较大,则其必然回落井底而被重复破碎,直至小到可以被带出井筒,如图 1 所示为垂直井内携岩示意图。

气体钻水平井的水平井段携岩,比垂直井井筒内携岩要难得多,研究也要复杂得多。

气体钻井水平段携岩的难点主要表现在以下方面。

(1)岩屑一旦被破碎、脱离井底后,很难再回到

^{*} 本文系“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室基金项目(编号:PLN0405)。

作者简介:练章华,1964 年生,教授,博士,博士生导师;1994 年毕业于西南石油学院机械系,获博士学位;现在西南石油学院“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室、完井中心从事 CAD/CAE/CFD、套管损坏机理、古构造应力、地应力及射孔完井等教学与科研工作。地址:(610500)四川省成都市新都区。电话:(028)83032210,13308072813。E-mail:lianhuang@nc-public.sc.cninfo.net

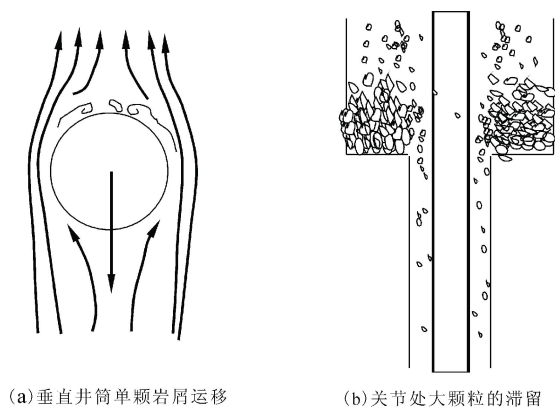


图1 垂直井内携岩示意图

井底被钻头重复破碎,而是被气流带走(小颗粒)或滞留在水平段某处的下井壁(大颗粒),大颗粒始终是大颗粒。

(2)岩屑的重力方向与气体流动方向相垂直,气体流动不能像在垂直井筒内那样直接克服重力沉降而使岩屑运移。

(3)重力使钻具躺在下井壁上,这种偏心环空造成下井壁处低速区,而这些低速区恰是岩屑在重力作用下的滞留区。

除了上述气体钻水平井岩屑运移的3项困难以外,水平气流使颗粒水平运移也有很大难度。在半无限空间的平面上,水平气流使颗粒迁移的基本方式有3种:蠕移、悬移和跃移,如图2所示为颗粒的水平运移示意图。蠕移:是颗粒在气流推力下不脱离下平面的移动,平行移动或翻滚移动。悬移:是颗

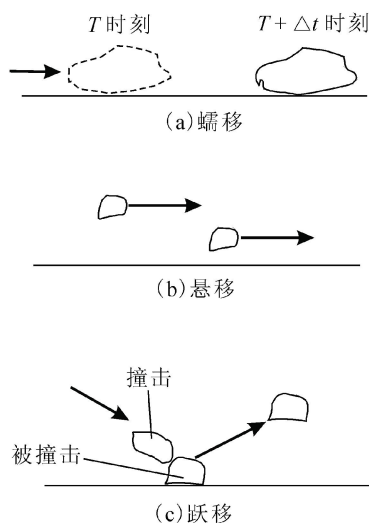


图2 颗粒的水平运移示意图

粒升力克服重力后,悬浮在空间被气流吹走;跃移:在其它运动颗粒的撞击和气流浮力、推力的共同作用下的跳跃式移动。悬移是运移效率最高、速度最快的运移方式。悬移首先要求颗粒“悬浮”,即升力克服重力。在水平气流下颗粒产生升力(其示意图见图3所示)主要有3种方式:①Magnus效应:颗粒由于表面形状不均匀在高速气流下产生自转,或其它颗粒碰撞产生自转,高速自转产生升力,类似于飞碟产生升力;②Saffman效应:颗粒在梯度流速场中由于气流速度梯度产生的升力;③儒可夫斯基效应:由于颗粒形状导致颗粒两侧的气流速度差别,由此产生升力。这种效应类似于机翼升力。

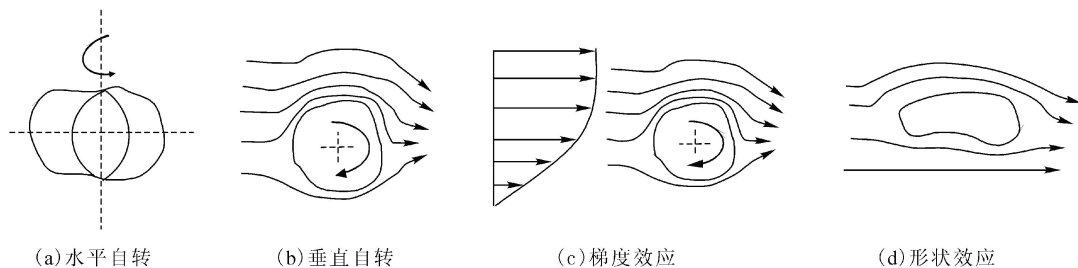


图3 水平气流对颗粒的升力示意图

大量的理论和实验研究表明:水平气流对颗粒产生克服重力的升力,只对微小颗粒可能。在 $10 \sim 20 \text{ m/s}$ 风速下,可升力悬浮颗粒直径不超过 0.1 mm 。因此,水平井段悬移携带的岩屑均是粉末、细小颗粒,显然这不是主要排屑方式。

岩屑的主要排屑方式是蠕移和跃移,且这两种

方式常常交替进行,以跃移为主。

岩屑蠕移要考虑岩屑沉陷约束的影响,如图4所示,粗糙的井壁、下井壁上堆积的岩屑床,这些凹凸不平都对岩屑造成沉陷约束。平面上的蠕移与有沉陷约束的蠕移大不相同,后者的起动风速取决于沉陷程度、颗粒尺寸和形状,比平面蠕移起动风速大

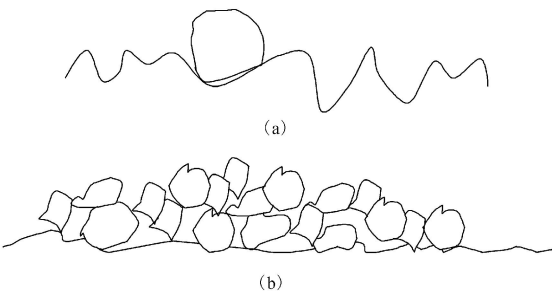


图 4 沉陷约束对岩屑蠕移的影响示意图

得多。起动风速与沉陷度、颗粒直径(球形)的关系,其中沉陷度为沉陷深度与颗粒半径之比。可见,在常见岩屑直径和常见沉陷度范围内,起动风速比常规气体钻井的最小携岩速度大得多(50%~100%)。跃移是岩屑运移的常见情况。靠下井壁由于低速区,岩屑沉积、滞留成床。随着床体堆高,顶部进入高速区。高速气流克服沉陷使岩屑起动。起动后岩屑加速运动,之后高速冲击约束体(钻具或上井壁),反弹后冲向下井壁,撞击其它岩屑使其起动。因此,可以认为:在气体钻井的水平段携岩中,粉尘和细小颗粒是悬浮运移的,而较大颗粒是贴下井壁克服沉陷后蠕滑运移的,大部分中等尺寸颗粒是跳跃、碰撞式运移的,如图 5 所示。

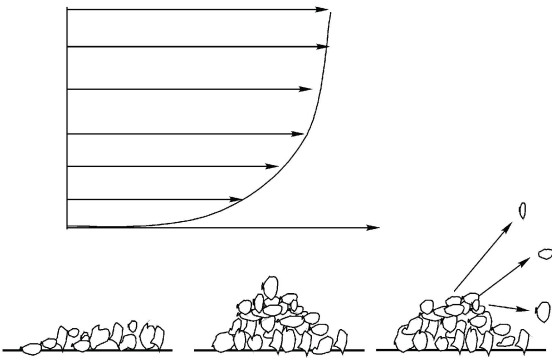


图 5 水平井段岩屑的跃移示意图

二、保证水平段携岩的综合措施

(1)足够的气量。目前国际上用于直井、斜井、水平井的气体钻井计算过于粗糙,估算的气量过小。应该在一维流场分析的基础上,对关键部分再进行三维流场分析,然后结合岩屑运移起动分析确定合理气量。粗略讲,目前国际通用软件的计算值,若对泥页岩、泥质胶结低强度砂岩,扩大 30%~50%;若对碳酸盐岩、变质岩、火成岩等硬脆地层,扩大 70%~100%。

(2)采用减磨接头、变径短节、扶正器等使钻柱抬升,脱离下井壁,消除下井壁处偏心环空造成的低速区。

(3)减磨接头、变径短节、扶正器等直径变化区域,要注意良好的排屑流场。尤其是由大到小直径的过渡,防止出现低速区、回流区,应采用螺旋大流道提供良好排屑通道。

(4)保持水平段钻柱旋转(即是用井下动力钻具),以改善直径变化区域的岩屑滞留、堆积现象。

(5)经常很短距离地上提下放钻具,使钻头脱离井底后再回到井底,将钻头附近大颗粒岩屑推回井底重复破碎。

(6)限制钻速,低钻压、高转速,使钻头第一次破碎产生的岩屑不致于过大。对 PDC 钻头,可粗略估计:每旋转一周破碎 1~2 mm 大小岩屑 1 层,则钻速由此计算(每小时 6~12 m)。

(7)减磨接头、扶正器等处,外侧面镶硬质合金,使其旋转时产生研磨、破碎作用,使大颗粒岩屑再次破碎变小。

(8)采用本文作者的专利技术,近钻头处加装二次破碎钻头,使脱离井底的大颗粒岩屑及时再次破碎,形成适合运移的尺寸分布。

三、白浅 111H 井应用实例

通过本文计算、分析,最后综合确定白浅 111 井水平段钻井合理气量为 45 m³/min。由计算可知,注入立管压力 2.5 MPa;携岩能量的最低值约两倍于最小携岩能量,最大环空岩屑浓度为 0.2% 左右(按 ROP=20 m/h 计)。因此,岩屑携带与井眼清洁是有保障的(见表 1)。

表 1 白浅 106、108H、109、111H 丛式井组产量统计表

井 号	钻井液密度 (g/cm ³)	完井测试 产量 (10 ⁴ m ³)	增产改造 后产量 (10 ⁴ m ³)
白浅 106(直井)	1.05~1.07(泥浆)	0.379	/
白浅 108(斜井)	1.07~1.09(泥浆)	0.831	4.563
白浅 109H(水平井)	1.17~1.25(泥浆)	0.302	5.346
白浅 111H(水平井)	0.023~0.029(气体)	6.85	/

为进一步提高携岩效率,采用了减扭接头、扶正器将钻杆抬升,消除偏心环空影响。虽然井下采用螺杆钻具,但全程保证转盘旋转的复合钻进,利用钻杆运动辅助携岩。同时控制钻速不超过 10 m/h,避免产生大颗粒岩屑。钻进过程中经常短距离上提下

放钻具,以使钻头附近大颗粒岩屑及时再次破碎。整个钻进是顺利的,机械钻速平均为 9.73 m/h,是临近泥浆钻井钻速的 2.3 倍。白浅 106、108、109、111H 4 口井为处于同一井场的丛式井组,采用了气体钻水平井工艺的白浅 111H 井产量比白浅 106、109 井提高了近 20 倍,见表 1 所示。白浅 108 井为一大斜度井,最大井斜为 80.4° ,目的层与白浅 111H 井基本一致(蓬Ⅳ主砂体),实钻斜深 977~1308 m,进尺 331 m(白浅 111H 井进尺 245 m)。

该井采用无固相钻井液钻进,完钻后提高泥浆密度至 1.15 g/cm^3 压井。完井测试产量 $0.831 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。在各方面条件极其相似的情况下,全过程采用气体钻井、完井方式的白浅 111H 井完井测试产量达到 $6.85 \times 10^4 \text{ m}^3$,较白浅 108 井提高了 7 倍多。很明显看出,常规钻井方式中的钻井液、完井液对白马庙构造蓬莱镇组储层的水敏性伤害是非常严重的。即使在白浅 108 井进行了后期的增产改造,产量也仅能恢复到白浅 111H 井完井测试产量的 80% 左右。显而易见,钻井液、完井液对白马庙构造蓬莱镇组储层造成的不可逆转性的伤害,是难以补救的。

四、结 论

(1) 本文研究了气体钻水平井的携岩问题,指出:目前国际上通用的一维稳定流动计算方法在确定水平井携岩的最小气量方面有较大偏差。计算结果不能保证充足的携岩能量。

(2) 水平井气流携岩计算,必须在一维稳态流动计算基础上,考虑偏心环空和直径变化导致的三维稳态流场。在流场分析基础上再考虑岩屑运移影响。这样确定的携岩最小气量要比目前国外通用模型、商用软件的计算值大 50%~100%。

(3) 钻柱内由于重力作用,靠下井壁造成的偏心环空对水平井段携岩及其不利,应采用抬升钻柱的方法予以消除。

(4) 水平段钻柱直径变化对岩屑运移有较大的影响。应采用变径段的螺旋排屑流道予以改善。

(5) 使钻柱旋转,经常地短起下,控制钻速,在水平段增加重复破碎功能,都是提高水平段携岩的有效辅助方法。

(6) 研究成果在白浅 111H 井应用取得了成功,机械钻速平均为 9.73 m/h,是泥浆钻井的 2.3 倍。

(7) 气体钻水平井在白马构造蓬莱镇组产层获得了理想产能,充分说明了以往水基工作液对储层的伤害,也充分说明了气体钻水平井的增产效果优于垂直井的压裂改造。

(8) 气体水平井的岩屑运移,成床堆积,是一个很复杂的物理过程。有必要结合大型台架实验、数值模拟、理论模型进一步强化研究。

参 考 文 献

- 1 孟英峰,练章华,唐波等.反循环钻头井底流场研究及其新产品开发.天然气工业,2004;24(9)
- 2 练章华,骆发前等.钻杆刺漏的流场分析.石油机械,2003;31(特刊)
- 3 练章华,刘干等.高压节流阀流场分析及其结构改进.石油机械,2004;32(9)
- 4 练章华,骆发前等.钻杆反转运动及其弯曲频率分析.西南石油学院学报,2004;26(3)
- 5 陈小榆,练章华等.井下机械式脉动发生器的实验研究.西南石油学院学报,2000;22(2)

(收稿日期 2005-03-03 编辑 钟水清)