

第9届SPE油层保护会议论文集

地层

伤害

的控制

杨金华 等译

石油工业出版社

C 81

53

(京) 新登字 082 号

内 容 提 要

美国石油工程学会 (SPE) 每两年举办一次控制地层伤害的会议, 第 9 届控制地层伤害会议是 1990 年 2 月 22~23 日在路易斯安那州召开的。本书就译自这届会议的论文集, 共有 27 篇论文, 内容涉及到了钻井、完井、修井和强化增产等各项施工所引起的地层伤害, 集中反映了国外在地层伤害防治方面的最新研究成果及研究动向, 有助于推动我国地层伤害的研究与防治工作。

本书可供从事地层伤害研究及其防治的技术人员参考, 也可供有关院校的师生学习参考。

地层伤害的控制

——第 9 届 SPE 油层保护会议论文集

杨金华 等译

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 $21\frac{3}{4}$ 印张 549 千字 印 1—1,200

1992 年 1 月北京第 1 版 1992 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-0687-1 / TE · 652

定价: 11.40 元

目 录

影响长斜井段砾石充填的因素·····	(1)
在阿拉斯加库克海湾 Trading 湾油田的单腿平台上实施混合压裂-砾石充填完井的 进展·····	(23)
对提高受水力压裂液伤害的支撑剂充填层的渗透率所需破胶剂浓度的评价·····	(31)
各种添加剂对清洁黄原胶聚合物体系性能的影响·····	(41)
温度对常规石英砂和陶粒砾石充填尺寸稳定性的影响·····	(53)
关于氢氟酸酸化造成砾石充填层伤害的研究·····	(76)
油藏孔隙系统的图象分析: 解决与油藏性质有关问题的技术的发展水平·····	(88)
用 CT 扫描仪研究疏松岩心受到的伤害·····	(98)
通过测定压力和排量来检验基岩增产处理作业的有效性·····	(108)
酸化产生沥青烯淤泥的现象及其控制·····	(118)
在受力贝雷靶中冲击波边界效应对聚能射孔器穿透深度的影响·····	(128)
非固结沥青油藏有机、无机伤害的评价及处理·····	(136)
pH 值和离子交换对微粒运移和地层伤害的影响·····	(149)
地层伤害对水平井流动效率的影响·····	(163) ✓
井壁污染对水平井生产能力的影响·····	(178) ✓
用高分子聚合物稳定多孔介质中的蒙脱石粘土·····	(194)
微生物多糖的产生对地层伤害的影响·····	(209)
砂岩储层中受伤害炮眼的酸化模拟·····	(217)
油藏工程中地层伤害的模拟·····	(233) ✓
粘土矿物在酸中的稳定性·····	(258)
利用极化显微术评价酸系统设计和地层伤害·····	(272)
砂岩酸化作业的最优化·····	(283)
硫酸盐还原菌在模拟油层条件下的活性·····	(293)
完井液侵入情况的模拟与用钠基和钾基盐水恢复渗透率的试验·····	(300)
用于水基聚合物的囊包式破胶剂·····	(310)
完井液的设计准则和现有技术的不足·····	(319)
在高渗透性近海折褶走向带的完井中用交联羟乙基纤维素控制失水·····	(332)

影响长斜井段砾石充填的因素

D.G.Gurley, T.E.Hudson
Dowell Schlumberger

杨金华 译
滕学顺 校

摘 要

实践已经证明,恰当地设计和实施砾石充填完井是控制出砂的最有效方法。采用砾石砂浆充填技术、清洁流体和节点(NODAL^①)分析法以提高砾石充填井的产能。对于长斜井段的完井,需要进一步改进砾石充填技术。

虽然不能准确地测得用于定量评价的炮眼充填效果,但是现场实践和实验室模型证明,即使在垂直井中,当完井井段的长度超过10英尺左右时,砾石充填的有效性也会迅速下降。现场施工报告和室内实验数据均表明,在足够多的砾石砂浆滤失到地层中以充填炮眼之前,筛管/套管环空内可能出现桥堵。垂直井中的过早桥堵并不总是很明显,因为砂桥上的压差消失之后砂桥通常要垮塌。但是,在井斜大于55°左右的井中,砂桥垮塌之后,砾石并不会下沉,其结果是环空充填层出现空穴。

许多研究人员已经用实际尺寸的砾石充填模型研究过筛管/套管环空和炮眼的充填过程,他们为认识这些充填过程作出了重大贡献^[1-12]。Wahlmeier研究出的数学模型是将这些研究人员提供的知识科学地应用到实际井中的一种好方法^[13]。这些研究人员研究过的且Wahlmeier曾用数学方法描述过的因素是:(1)砾石输送,(2)摩擦压力及其对筛管/套管环空中砂浆流动过程的影响,(3)携带液滤失及其对炮眼充填的影响。

本文论述了砾石砂浆的流变性和影响这些因素的几何条件,并用简单而恰当的数学关系式来说明下列诸方面的重要性:颗粒沉降、砾石砂浆流速、筛管/套管环空内的剪切速率、砾石砂浆进入地层时的剪切速率和井下充填压力。

一、引 言

为了在下有套管并采用砾石充填完成的井中长期获得最高的产能,必须将砾石致密地充填到炮眼和筛管/套管环空中。即使在垂直井中也常出现桥堵,桥堵会妨碍砾石形成完整的充填层。因此,砾石的输送和充填非常重要。

人们已经使用过许多方法来获得完整而致密的砾石充填层。不管在垂直井中,还是在斜井中,获得有效充填层的难度随层段长度的增加而增大。不过,井斜还要使获得有效充填层这一问题更加复杂和明显,因为停泵后空穴得不到充填。充填大斜度长井段时常用的一种方法是,在下筛管之前挤注砾石砂浆,然后下筛管进行循环充填。这种方法叫做预充填法,尽管它是一种好方法,但仍然不能保证所有的炮眼都将得以充填,而且它需要花更多的钻机时间。更有效的方法应该是在下有筛管的情况下使最多的炮眼得到充填。

一旦井斜超过50°左右,在筛管/套管环空内,砂桥下面的空穴在停泵之后依然存在

①Schlumberger公司为该算法定的标记。

在, 用密度测井或中子测井技术就能将它们探测出来。遗憾的是, 炮眼充填效率无法直接测量, 只能通过监测注入炮眼的砾石数量间接测得。1974 年和 1975 年的数据表明, 环空内的砾石充填效率和炮眼数随层段长度的增加而下降。为确定每英尺炮眼内注入的砾石数量, 总共监测了 263 口井。图 1 示出的结果表明, 当层段长度超过 10 英尺时, 每英尺炮眼内注入的砾石数量急剧下降。尽管人们已经认识到在这些井中炮眼接收的砾石较少, 环空桥堵妨碍了砾石完全地充填炮眼, 但对产能所受到的影响并没有充分认识。采用改进后的完井程序和砾石砂浆充填技术已经使产能提高了很多, 以致于通过提高炮眼的充填效率难以进一步提高产能。在此应强调的是, 在抽查的这些井中, 大多数井是垂直井或微斜井。产能之所以得到了提高, 是因为用砾石砂浆充填技术可确保至少一部分炮眼为清洁砾石所充填。在较长的层段, 出砂情况可保证得到控制, 因为在不带眼管子的环空内几乎总有一些过量的砾石沉降并充填砂桥下面可能存在的任何空穴。

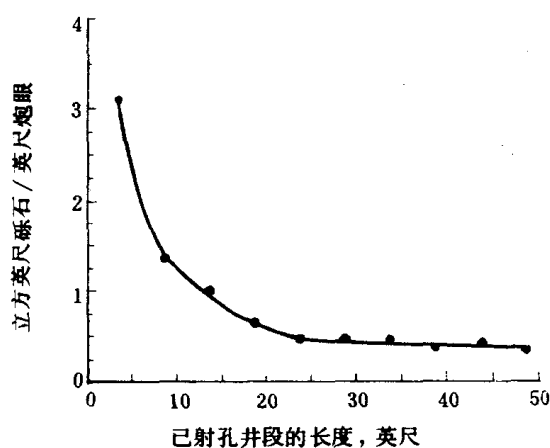


图 1 南路易斯安那州 263 口井中的砾石注入量
——立方英尺砾石 / 英尺炮眼。对所有的炮眼都进行过冲洗, 充填砾石使用的是挤注法或循环挤注法

在抽查的这些井中, 有些井 (不到 5%) 在驱替全部砾石砂浆时压力没有升高。这并不说明炮眼充填得更好, 而是说明地层破裂了或压实了。测井表明, 这些井一般是在泥质地层或页岩地层中完井的。这会增大地层破裂的可能性, 因为砾石砂浆的滤失有限, 而且砂浆不会脱水。在垂直井中, 地层破裂可能是有益的, 但并不确保砾石充填整个环空, 也不确保砾石充填所有的炮眼。

用物理模型研究砾石充填已使人们对炮眼和筛管 / 套管环空中控制充填效率的诸因素有了极其重要的认识^[1-5]。但是, 还没有很大的把握将所获得的这些知识应用于长井段的砾石充填作业。1985 年, Dowell Schlumberger 公司开始进行一项用数学方法

模拟砾石充填的研究。这一研究导致开发出了一种能够预测现场实际施工中砾石充填效率的算法 (Pac CADE[®])。该算法已经为大量的物理模型和许多井中进行的砾石充填效率测井所证实。业已证明, 它是设计砾石充填程序的一种有用方法。

本文讨论在开发这个算法时所考虑到的一些因素。文中要给出一些基本方程, 以便设计人员对有些基本物理规律如何影响砾石充填有所了解。我们并不打算把这些方程用于设计目的, 因为它们太简单。在介绍这种算法时要引用一些垂直井或微斜井中的例子, 但所阐述的观点既适用于垂直层段, 又适用于倾斜层段。

二、砾石输送原理

砾石的输送取决于携带液的砾石悬浮性能和移动砾石砂浆所需的能量。砾石悬浮性能好理解, 但摩擦压力的影响就可能被误解。虽然 Gruesbeck 在以前发表的论文中已经论述过

●Schlumberger 公司为该算法定的标记。

砾石砂浆流经筛管/套管环空时产生的摩擦压力,但工业界还没有充分利用他所提供的知识^[5]。下面讨论与砾石充填有关的问题,以及为尽量减少这些问题而建议采用的方法。

讨论分两节进行,一节是砾石悬浮,另一节是摩擦压力(等于用来输送砾石砂浆的能量)的影响。

(一) 砾石悬浮

至今已经发表了若干描述颗粒沉降速度的方程,其中大多数适用于牛顿流体的单颗粒沉降模型。而其他一些关系式则用于模拟非牛顿流体中的团粒沉降或受阻颗粒沉降。团粒沉降关系式指出,在较低的砾石浓度下,颗粒倾向于聚集成团,并以较单个颗粒更高的速度沉降。这种趋势随着砾石浓度的增大而增强,直至砾石浓度增大到大约4磅/加仑(颗粒的绝对体积占15%)时为止。当砾石浓度约为5~6磅/加仑时,颗粒沉降速度开始随砾石浓度的增大而下降。这是由于干扰造成的,这种沉降叫做受阻沉降。这一事实并不一定意味着高颗粒浓度才是最理想的。高颗粒浓度可能使过多的携带液改向流入筛管中去。

大多数沉降方程依据的是斯托克斯定理,或者用斯托克斯定理和关于自由沉降的牛顿定律对它们加以修改,使它们适用于范围更广的流体和颗粒粒径^[14, 15]。常用的一个适用于砾石充填作业的单颗粒沉降方程就是通过修改斯托克斯定理获得的。本文介绍此方程是为了说明有哪些因素影响沉降速度。

$$v = \frac{9.28\beta g (8.34SG_p - \rho_1) d^2}{18\mu_a} \quad (1)$$

式中 v ——颗粒沉降速度,英寸/秒;

β ——幂律流体的因子,其值为0.22,无量纲;

g ——重力加速度,32.2英尺/秒²;

ρ_1 ——携带液的密度,磅/加仑;

SG_p ——颗粒密度;

d ——砾石颗粒粒径,英寸;

μ_a ——携带液的表现粘度,厘泊。

显然,颗粒和携带液之间的密度差是影响颗粒沉降速度的一个重要因素。颗粒粒径也是一个重要因素,因为粒径增大一倍就要使颗粒沉降速度增大3倍。表现粘度也是一个关键因素,它一直被人误解。有些研究人员一直用砾石沉降速度来确定携带液的工作时间(破胶时间),又用在0.03秒⁻¹的剪切速率下测得的表现粘度来确定破胶时间^[16-18]。他们的理由是,这个剪切速率更接近颗粒沉降时的剪切速率。这是确定破胶时间的一种正确方法,但在颗粒因携带液流动而受到外来剪切时,决不能用这种方法来确定携带液的破胶时间。用来携带砾石的大多数液体,其流变特性最符合最近发表的粘弹性流动模型^[19]。这些液体在层流条件下遵循幂律流动模型,但在摩擦压力降较大的紊流条件下则与幂律流动模型有一定偏差。粘弹性液体具有剪切稀释特性,在很低的剪切速率下,其表现粘度可能比砾石充填条件下的大几个数量级。如果采用在很低的剪切速率下测定的表现粘度,那么由此计算出的颗粒沉降速度会比动态下的低得多。在剪切速率等值于砾石充填过程中由携带液的流动而产生的剪切速率的条件下,所测定的表现粘度比较符合实际。Novotny指出,作用在砾石颗粒上的有效

剪切速率是剪切速率 v/d 与由携带液流动造成的剪切速率 γ' 具有某种当量换算因子的和, 即

$$\gamma'_t = \left(\frac{v}{d} + \gamma'^2 \right)^{1/2} \quad (2)$$

式中 γ'_t ——作用在砾石颗粒上总的有效剪切速率, 秒⁻¹;

γ' ——作用在颗粒上的动态剪切速率, 秒⁻¹;

v ——颗粒沉降速度, 厘米/秒;

d ——粒径, 厘米。

剪切速率 v/d 与动态剪切速率相比不是很重要。筛管/套管环空内的典型剪切速率为 50~150^① 秒⁻¹。

动态剪切速率可由下列方程之一计算:

$$\text{对油管流, } \gamma' = 96 \frac{V}{D} \quad (3a)$$

$$\text{对环空流, } \gamma'^{\bullet} = 144 \frac{V}{D_2 - D_1} \quad (3b)$$

式中 V ——平均流速, 英尺/秒;

D ——管子的内径, 英寸;

D_1 ——内管的外径, 英寸;

D_2 ——外管的内径, 英寸。

求平均流速时要考虑到流动剖面管壁处的流速为零, 横切面中心处的流速最大。可用下列方程求解环空流的平均流速:

$$V = \frac{13.476 \times 4Q}{\pi (D_2^2 - D_1^2)} \quad (4)$$

式中 Q ——流量, 桶/分。

联立方程 3b 和方程 4, 则牛顿流体在环空中的剪切速率为:

$$\gamma' = \frac{1647.18Q}{(D_2 - D_1) (D_2^2 - D_1^2)} \quad (5)$$

对层流流态下的粘弹性液体或幂律液体的 γ' 进行修正, 变为:

①原文数字为 50~50 秒⁻¹。

②原文印刷错误。——校注

$$\gamma'_{pl} = \frac{(3n' + 1) \gamma'}{4n'} \quad (6)$$

式中 γ'_{pl} ——幂律液体（或层流流态下的粘弹性液体）的剪切速率， 秒^{-1} ；

n' ——流动特性指数，无量纲。

在下面这个例子中，用方程 5 和方程 6 来计算幂律液体的剪切速率。所用的液体是羟乙基纤维素凝胶，其 n' 为 0.374。以 3 桶/分的排量将它泵入筛管（外径为 4.1 英寸）和套管（内径为 6.184 英寸）之间的环空。剪切速率为 157.2 秒^{-1} 。由此可见，这个剪切速率与用来确定破胶时间的剪切速率 0.03 秒^{-1} 相差很大。用下列方程可确定任何剪切速率下的表观粘度 (μ_a)（用它计算颗粒沉降速度）：

$$\mu_a = \frac{47880 K'}{\gamma'^{1-n'}} \quad (7a)$$

式中 K' ——剪切速率为 1 秒^{-1} 时的剪切应力（磅·秒 n' / 英尺 2 ）。

在这种情况下计算出的表观粘度为 36.3 厘泊，而剪切速率为 0.03 秒^{-1} 时测得的表观粘度为 7740 厘泊。

需要记住的是，在低剪切速率（ $0.03 \sim 0.5 \text{ 秒}^{-1}$ ）下测得的携带液粘度对测量砾石充填作业中动态条件下的颗粒沉降速度毫无价值，对于象生物聚合物这样的具有一定触变性的流体尤其如此，这并不是指责将生物聚合物用于砾石充填作业，而仅仅是指出，应该在更高的剪切速率（它更能代表砾石充填过程中经历的剪切速率）下测定粘度。

在低剪切速率下测定的粘度对确定停泵后且砾石砂浆处于静止状态时的砾石沉降速度有用。

（二）摩擦压力及筛管周围的砾石充填

有人把斜井中的砾石充填比拟成管道中的砂浆输送和钻井液对钻屑的输送。事实上，斜井中的砾石充填是一个更加复杂的输送问题。在水平管道内输送砂浆时常用的是低粘度携带液，携带效率取决于颗粒沉降速度和流速。颗粒沉降速度又受到粒径和颗粒与携带液之间密度差的很大影响。如图 2 所示，当砂浆被泵送经管道时，颗粒就会沿管道的低边沉积成砂丘。如果降低流量，砂丘就会增高，直至流速因流道面积的减小而增大到颗粒重新被携带，砂丘高度达到稳定的程度。继续降低流速会使砂丘继续增高，直至出现桥堵为止。

筛管周围的砾石充填是一个更加复杂的携带问题，因为携带液有多个流道。携带液可以漏失到地层中去，也可以绕流进入冲洗管/筛管环空。当低粘度携带液携带的是低浓度砾石，且井斜大于 50° 左右时，在筛管周围砾石颗粒就会以管道中同样的方式沉降，形成颗粒丘。但是，砂浆在筛管/套管环空内的流动阻

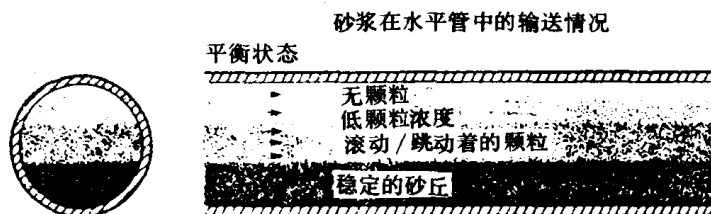


图 2 低粘砂浆在水平管道中输送砾石的情况。

在管道的低边形成稳定的砂丘，管道上侧的颗粒浓度降为零，流速的大小如箭头所示

力（摩擦压力）会使携带液与砾石分离，并绕流进入冲洗管/筛管环空。这会导致砾石砂浆的流速降低和颗粒丘增高。在有些情况下，随着颗粒与液体体积之比的增大，携带液的绕流可能使砾石砂浆的粘度显著增大。砾石砂浆粘度的增大又会使摩擦压力增大，甚至使更多的携带液漏失到地层中去并绕流进入冲洗管/筛管环空。

目前工业上使用的砾石砂浆在携带液粘度和颗粒浓度方面有很大的变化范围。这里既讨论砾石砂浆类型、高粘携带液和高颗粒浓度，又讨论低粘携带液和低颗粒浓度。



图3 砾石颗粒均匀地分布在高粘砂浆内。在长井段内，粘度差异和密度差异使顶替液在井筒上侧顶替的砂浆较多。砂丘不高。由于砂浆粘度与携带液粘度比值较高，上端可能出现桥堵

管上携带液进入筛管的地方形成稳定的砂瘤（node）^[10]。如果这种情况没有出现在充填过程中，它就可能出现在脱水期间，从而阻止砾石砂浆完全脱水。总之，很难获得致密的砾石充填层，充填之后出现的沉降可能在砾石充填层内留下空穴。

低粘砂浆一般是用在 170 秒^{-1} 剪切速率和 80°F 下粘度低于 50 厘泊的液体配制而成的。这样的液体可能是不含任何添加剂的水、盐水或油之类的牛顿液体。砾石沉降速度通常很高，并且，在动态环境下，颗粒的分布情况是底部有很多颗粒，而筛管顶部实质上没有颗粒。图4说明了使用低粘携带液时的砾石充填过程。使用这种携带液通常能获得致密的砾石充填层，但是用稀砂浆难以充填炮眼，因为稀砂浆不能把颗粒很好地带入炮眼，特别是当炮眼位于套管上部时尤其如此。砂浆向筛管中的漏失会在充填层的末端引起桥堵，在出现桥堵之前能够充填的层段长度有一个极限。这种砾石砂浆比高粘砾石砂浆好，

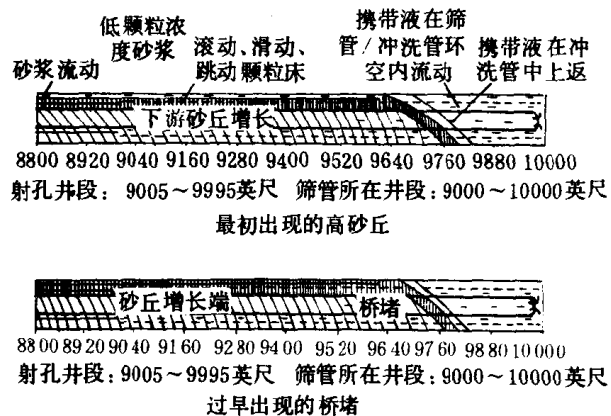


图4 砾石颗粒在低粘低密度砂浆中分布不均。筛管/套管环空内的流速随着砂丘长度的增加而降低，从而使更多的携带液漏失到冲洗管/筛管环空和地层中去。用粗冲洗管可以控制筛管内携带液的绕流

但为了改善炮眼充填和增加可充填的筛管长度，还可以对它作一些改进。

物理模型和数学模型证明，当流体在筛管/套管环空中向下流动并经冲洗管上返时，即使在有下部信号筛管的情况下，也会有流体流入冲洗管/筛管环空。这是一个值得考虑的问题，因为它会促使砾石颗粒形成桥堵。当泵送具有低砾石浓度的低粘砂浆时，形成桥堵的可能性减小了。但是，如果筛管内的流量很大，流速最终会降低到在砂丘下游端形成桥堵的程度。这种效应不同于高粘液体中的效应。如果携带液的绕流失去控制，桥堵就会出现在筛管的顶部，这是因为此处的砾石浓度较高，并且携带液具有粘滞阻力。携带液的粘滞阻力使砾石颗粒在筛管上形成砂瘤。稀携带液不会使砾石颗粒形成稳定的砂瘤。没有任何方法可以完全阻止携带液的绕流，但用大直径冲洗管和低砾石浓度可以控制它。

由筛管/套管环空内的砂浆产生的摩擦压力迫使携带液流入冲洗管/筛管环空。在冲洗管/筛管环空内携带液会流到紧靠筛管顶部的地方，因为此处的压差最大。在冲洗管/筛管环空内，几乎没有携带液继续往下游流动。接收携带液的那部分筛管的长度以及携带液的绕流流量取决于筛管内外之间的压差和筛管的流动面积。这个压差又受到下面两个参数的很大影响：(1) 筛管/套管环空内的砾石砂浆与冲洗管/筛管环空内的携带液的相对粘度；(2) 冲洗管外径与筛管内径之比。在砾石砂浆中，基液的流变特性决定着砾石砂浆在不同颗粒浓度下的相对粘度。一般说来，用低粘基液配制的砾石砂浆较用高粘基液配制的砾石砂浆具有更大的相对粘度 (μ_r)。有几个关系式可用来预测牛顿液体的相对粘度，还有些关系式适用于非牛顿液体。遗憾的是，这些关系式大多与实验结果不一致。

为了解决这个问题，有人^[18]曾在实验室研究过用于水力压裂和砾石充填作业的液体的摩擦压力。结果发现，这些关系式没有给出准确结果的原因是基液既不遵循牛顿模型，也不遵循幂律模型。于是，首先把研究的重点放在了解基液和发展可以更准确地预测基液摩擦压力的方法上，然后开发出了一个可用来计算砾石砂浆相对粘度的关系式。大多数稠化水基携带液都属于粘弹性液体类。只要这些液体处于层流状态下，它们就遵循幂律模型，而且它们维持层流的雷诺数范围比幂律液体的宽。图 5 是牛顿液体、幂律液体和粘弹性羟丙基瓜尔胶 (HPG) 液体的莫氏图 (羟乙基纤维素 (HEC) 液体的莫氏图与粘弹性羟丙基瓜尔胶液体的莫氏图相似)。注意：粘弹性液体在雷诺数远远超过 2300 的情况下仍然处于层流状态，而牛顿液体和幂律液体在雷诺数超过 2300 的情况下就经过渡区进入紊流状态。开发出了一个符合粘弹性液体莫氏图的新关系式，即

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 14.9n'^{-1.6} D^{0.13} \log (N_{Re} \sqrt{f}) - 53.9n'^{-1.9} D^{0.27} \quad (7b)$$

尽管其中一些图是粘弹性羟丙基瓜尔胶液体的莫氏图，但它们同样适用于稠化羟乙基纤维素液体。 N_{Re} 是牛顿雷诺数 (即密度为 1.00 的水的雷诺数)。已发现这个关系式在计算油管和油管/套管环空内的摩擦压力方面相当准确。

只要能更加准确地计算出基液摩擦压力，就能获得一个计算砾石砂浆与基液相对粘度的关系式。以前推导出的关系式仅仅是颗粒体积浓度的函数，没有考虑所观察到的非牛顿效应。曾用来帮助解决这个问题的方法是测量具有不同填料浓度的砂浆的粘度，填料为等浮力小球，其体积分数在现场具有代表性。基液是用羟丙基瓜尔胶 (其浓度为 30、40 和 60 磅/1000 加仑) 稠化的 2% KCl 盐水。小球 (其密度为 1.02) 是按 10%、20%、30% 和

35%的体积分数 (Φ_p) 混合的。这些体积分数对应的砂粒浓度分别为 2.5、5.5、9.5 和 12 磅/加仑。粘度是在温度为 75 °F、100 °F、125 °F 和 150 °F，牛顿剪切速率为 5、170 和 1000 秒⁻¹ 的条件下测量的。测试结果证明，相对粘度 (μ_r) 不仅随体积分数 (Φ_p) 变化，而且还随剪切速率和流动特性指数 (n') 变化。

通过修改 Eiler 关系式获得了下面这个计算相对粘度 μ_r 的新关系式，这个关系式考虑了流动特性指数 n' 和剪切速率的影响：

$$\mu_r = \left(1 + 0.75 (e^{1.5n'} - 1) e^{\frac{-(1-n')\gamma}{1000} \frac{1.25\Phi_p}{1-1.5\Phi_p}} \right)^2 \quad (8)$$

Φ_p = 颗粒的绝对体积分数

$$= \frac{C_p}{C_p - \rho_p}$$

式中 C_p ——颗粒的重量浓度，磅/加仑；

ρ_p ——颗粒密度，磅/加仑；

γ ——剪切速率，秒⁻¹。

剪切速率 γ' 如方程 3a 和方程 3b 所述。

图 6 是 μ_r 与凝胶浓度 (磅羟乙基纤维素/1000 加仑) 之间的一组关系曲线。这些曲线说明，当羟乙基纤维素的浓度很小时，在较高的砾石浓度下， μ_r 值要大得多。当流动特性

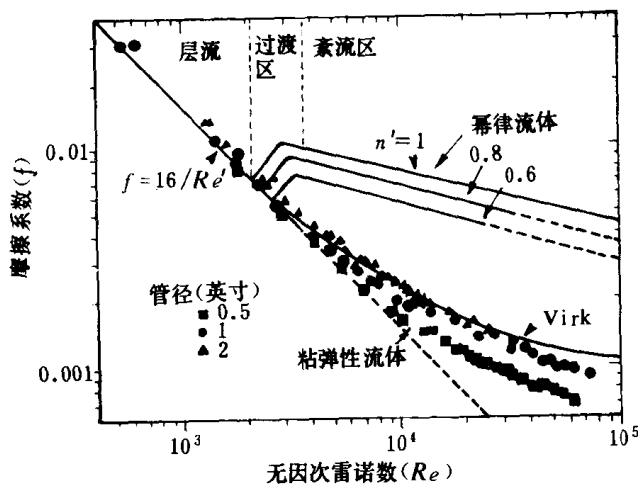


图 5 牛顿液体、幂律液体和粘弹性液体的莫氏图。可以看出，粘弹性液体维持层流的雷诺数范围比幂律液体宽得多

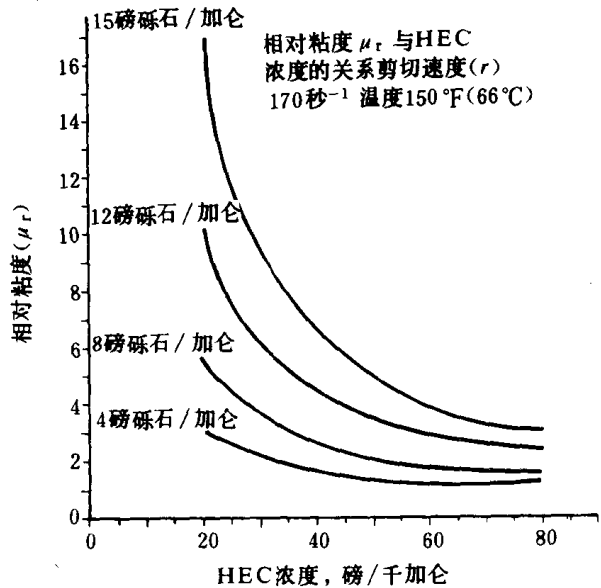


图 6 在不同的砾石浓度下，相对粘度 μ_r 与羟乙基纤维素浓度的关系。在低粘液体中，砾石浓度对 μ_r 的影响更大

指数 n' 接近 1 时, 它对相对粘度的影响要大得多。大家可能立即想到用较高的羟丙基瓜尔胶浓度来降低 μ_r 值与砾石砂浆及携带液之间的摩擦压力差值。但是, 进一步分析表明, 为确保携带液把颗粒带入炮眼, 必须权衡 μ_r 、携带液粘度和泵排量。携带液的粘度必须高得足以携带颗粒, 但又必须足够低, 以使漏失速率足够高, 从而充填炮眼。

既然 μ_r 可以计算出来, 则可以通过修正携带液的摩擦压力来预测砾石砂浆的摩擦压力。

表 1 总结了 Keck 用来计算携带液摩擦压力的方程。通过调整携带液摩擦系数就可计算出砾石砂浆的摩擦压力。于是, 砾石砂浆摩擦系数 f_s 就是携带液摩擦系数 f_{cf} 和修正系数 CF 之积。即

$$f_s = f_{cf} CF \quad (9)$$

人们提出了两个修正系数, 一个是层流修正系数, 另一个是紊流修正系数。层流修正系数 CF_1 就是砾石砂浆与携带液的相对粘度, 即

$$CF_1 = \mu_r \quad (10)$$

所提出的紊流修正系数 CF_t 表达式是莫氏图上 Verk 斜率的渐近表达式, 即

$$CF_t = \mu_r^{0.55} \rho_r^{0.45} \quad (11)$$

ρ_r 是砾石砂浆与基液的相对密度。可由下式计算:

$$\rho_r = \frac{1 + \frac{C_p}{\rho_f}}{1 + \frac{C_p}{\rho_p}} \quad (12)$$

式中 C_p ——颗粒浓度, 磅/加仑;

ρ_f ——携带液密度, 磅/加仑;

ρ_p ——颗粒密度, 磅/加仑。

现举例说明筛管内流量的大小。

图 7a 是一口油井的示意图, 在这口井内下有内径为 6.125 英寸的套管、外径为 4.5 英寸的筛管和外径为 2.06 英寸的冲洗管, 从 10000 英尺至 10200 英尺的井段充满了密度为 10 磅/加仑的盐水。当盐水在筛管外面以 3 桶/分的流量循环时, 筛管顶部的压力要增大到这样一个值, 该值等于盐水在筛管/套管环空内向下流动过程中的摩擦压力损失与盐水在筛管内流动和在冲洗管内向上流动的压力损失之和。计算结果 (表 2) 表明, 从筛管顶部至底部的压力损失约为 6 磅/英寸², 通过筛管时的压力损失不到 0.5 磅/英寸²。因此, 从筛管顶部至底部通过筛管的总压力损失约为 6.5 磅/英寸²。对携带液的绕流也可进行同样的压力损失分析, 只是绕流的携带液从筛管顶部进入筛管, 冲洗管/筛管环空内的摩擦压力较大,

表 1 粘弹性液体有关公式一览表

流态	参 数	管 内 液 流	环 空 液 流
层流	平均流速	$V = 13.476 \frac{4Q}{\pi D^2}$	$V = 13.476 \frac{4Q}{\pi(D_2^2 - D_1^2)}$
	雷 诺 数	$N_{Re} = \frac{1.86\rho V^{2-n'} D^{n'}}{96^{n'} K' \left(\frac{3n'+1}{4}\right)^{n'}}$	$N_{Re} = 2.28\rho V^{2-n'} \frac{(D_2 - D_1)^{n'}}{144^{n'} K' \left(\frac{2n'+1}{3n'+1}\right)}$
	摩擦压力降	$P_f = \frac{0.039f\rho LV^2}{D}$	$P_f = \frac{0.039f\rho LV^2}{0.8165(D_2 - D_1)}$
	范氏摩擦系数	$f = \frac{16}{N_{Re}}$	$f = \frac{16}{N_{Re}}$
		$N_{Re(c)} = 3470 - 1370n'$	
		$V_c = \frac{1}{30.5} \left[\frac{500(3470 - 1370n')K'}{\rho} \right]^{\frac{1}{2-n'}} \left(\frac{6n'+2}{2.54D^{n'}} \right)^{\frac{n'}{2-n'}}$	$V_c = \frac{1}{30.5} \left[\frac{408(3470 - 1370n')K'}{\rho} \right]^{\frac{1}{2-n'}} \left(\frac{3n'+4}{2.54(D_2 - D_1)^{n'}} \right)^{\frac{n'}{2-n'}}$
紊流	平均流速	$V = 13.476 \frac{4Q}{\pi D^2}$	$V = 13.476 \frac{4Q}{\pi(D_2^2 - D_1^2)}$
	雷 诺 数	$N_{Re} = \frac{928\rho VD}{\mu}$	$N_{Re} = \frac{928\rho V 0.8165(D_2 - D_1)}{\mu}$
	摩擦压力降	$P_f = \frac{0.039f\rho LV^2}{D}$	$P_f = \frac{0.039f\rho LV^2}{0.8165(D_2 - D_1)}$
	范氏摩擦系数	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 14.9n'^{-1.6} D^{0.13} \log(N_{Re} \sqrt{f}) - 53.9n'^{-1.9} D^{0.27}$	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 14.9n'^{-1.6} [0.8165(D_2 - D_1)]^{0.13} \log(N_{Re} \sqrt{f}) - 53.9n'^{-1.9} [0.8165(D_2 - D_1)]^{0.27}$

 D_2 ——套管内径,英寸; D_1 ——油管外径,英寸; L ——管子长度或套管长度,英尺; ρ ——流体密度,磅/加仑; μ ——流体粘度,厘泊; P_f ——摩擦压力降,磅/英寸²; Q ——泵排量,桶/分; N_{Re} ——雷诺数,无量纲; $N_{Re(c)}$ ——临界雷诺数,无量纲; V_c ——临界流速,英尺/秒; n' ——幂律液体流性指数,无量纲; K' ——流体稠度系数,磅·秒 ^{n'} /英尺²。

表 2 流量和摩擦压力一览表

流体	流量 (桶/分)	筛管/套管 环空内的 压力降 (磅/英寸 ²)	在底部流入 筛管时的 压力降 (磅/英寸 ²)	流体	流量 (桶/分)	冲洗管/筛管 环空内的 压力降 (磅/英寸 ²)	在顶部流入 筛管时的 压力降 (磅/英寸 ²)	流体	流量 (桶/分)	冲洗管内 的压力降 (磅/英寸 ²)
盐水 ^①	3	6	0.5	盐水	1.4	6.25	0.25	盐水	4.4	244
HEC 稠化盐水 ^②	3	16	2	HEC 稠化盐水	0.66	17.5	0.5	HEC 稠化盐水	3.6	726
砂浆 ^③	3	44	2	HEC 稠化盐水	0.85	45.3	0.7	HEC 稠化盐水	3.9	765
砂浆 ^④	3	44	2	HEC 稠化盐水	0.26	45.5	0.5	HEC 稠化盐水	3.3	151

条件: 套管内径6.125英寸

筛管12号规格, 外径4.6英寸, 内径3.5英寸, 长度200英尺

冲洗管外径2.06英寸, 内径1.76英寸, 长度300英尺

① 10 磅/加仑盐水, 粘度 5 厘泊。

② 10 磅/加仑盐水由 HEC 稠化, 在 175 ° F 的温度下, $n' = 0.579$, $K' = 0.015$ 。

③ 与②相同, 稠化盐水砂浆浓度为 10 磅/加仑。

④ 砂浆与③相同, 只是增大了冲洗管外径。

从而进入筛管的摩擦压力损失较小。计算出的筛管内流量约为 1.4 桶 / 分，使总流量达到 4.4 桶 / 分。如果通过炮眼没有压力损失，就可以计算出冲洗管内的压力损失，对这个具体的例子而言，计算出的该压力损失为 91 磅 / 英寸²。

图 7b 示出的条件与图 7a 相同，但是，此时的盐水是用羟乙基纤维素 (HEC) 稠化的，在 170 秒⁻¹ 的剪切速率和 175 ° F 的温度下，其粘度为 83 厘泊。 n' 和 K' 的值分别为 0.579、0.015。羟乙基纤维素的加入增大了盐水的粘度，在筛管 / 套管环空内向下流动和从筛管底部通过筛管时的摩擦压力为 18 磅 / 英寸²。粘度的增大使冲洗管 / 套管环空内的流量下降到 0.66 桶 / 分。冲洗管内的摩擦压力为 726 磅 / 英寸²，使总压力降达到 744 磅 / 英寸²。

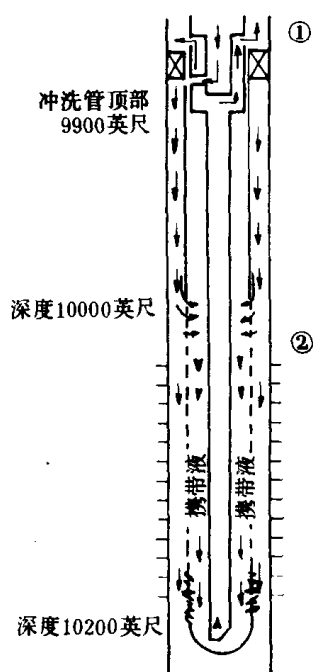


图 7a 盐水在筛管 / 套管环空和冲洗管 / 筛管环空内的流动情况。盐水从筛管顶部进入冲洗管 / 筛管环空。流量主要受到冲洗管直径的控制，大多数液体在筛管 / 套管环空内向下流动，并从筛管的下端进入筛管。

①—井眼示意图

套管内径 6.123 英寸

筛管 12 号规格，外径 4.60 英寸，内径 3.5 英寸，长度 200 英尺

冲洗管外径 2.06 英寸，内径 1.76 英寸

井内充满 10 磅 / 加仑盐水

②—条件 1

10 磅 / 加仑盐水的粘度为 5 厘泊

以 4.4 桶 / 分的排量循环 10 磅 / 加仑盐水

在筛管 / 套管环空内以 3 桶 / 分的流量流动

$\Delta P 6.0$ 磅 / 英寸²

在底部以 3 桶 / 分的流量流入筛管

$\Delta P 0.5$ 磅 / 英寸²

总摩擦压力

6.5 磅 / 英寸²

在冲洗管 / 筛管环空内以 1.4 桶 / 分的流量流动

$\Delta P 6.25$ 磅 / 英寸²

在顶部以 1.4 桶 / 分的流量流入筛管

$\Delta P 0.25$ 磅 / 英寸²

总摩擦压力

6.50 磅 / 英寸²

在 300 英尺长的冲洗管内以 4.4 桶 / 分的流量流动

$\Delta P 244$ 磅 / 英寸²

图 7c 说明在每加仑携带液中添加 10 磅砾石所产生的影响。根据计算，当砂浆刚到达筛管底部时，筛管 / 套管环空内的摩擦压力增到了 46 磅 / 英寸²，冲洗管 / 筛管环空内的流量为 0.85 桶 / 分。此时总的排量 3.85 桶 / 分和以 0.85 桶 / 分流量流入筛管的携带液的压力损失，已使有效砾石浓度增到了 14.7 磅砾石 / 加仑携带液。若继续泵送，则可能在筛管顶部产生桥堵。

图 7d 说明冲洗管的外径从 2.062 英寸增大到 2.875 英寸所产生的影响。在筛管 / 套管环空内用于泵送砂浆的排量为 3 桶 / 分。由筛管顶部至筛管底部的压力损失与上个例子相同。但是发现，冲洗管 / 筛管环空内的流量只有 0.26 桶 / 分，这是由于冲洗管外径与筛管内径之比从 0.58 增大到了 0.82 的缘故。增大冲洗管的内径也会减小携带液在冲洗管内向上流动时的摩擦压力。增大冲洗管的外径是防止携带液绕流的最有效方法。如果以 3.26 桶 / 分的泵排量继续泵送砂浆，泵压就会随着砂浆自下而上的脱水而增大。当砂浆刚到达筛管顶部时，需要用 196 磅 / 英寸² 的泵压才能将砂浆向下泵入冲洗管 / 筛管环空，泵压净增 150 磅 / 英寸²。对长井段的砾石充填来说，这可能是一个限制因素。长井段可能需要使用较稀的携带液和低颗粒浓度。

图 7b 粘弹性液体的流动情况。即使筛管 / 套管环空内的压力降增加了, 筛管内的流量仍有所下降。这是由于粘度的缘故。

①—井眼示意图

套管内径6.123英寸

筛管12号, 外径4.60英寸, 内径3.5英寸, 长度200英尺

冲洗管外径2.06英寸, 内径1.76英寸

井内充满10磅 / 加仑盐水

②—条件2

10磅 / 加仑盐水由HEC稠化, 在 170秒^{-1} 和 175°F 下, 其粘度为83厘泊

在 175°F 下, $n' = 0.579$, $K' = 0.015$

以3.66桶 / 分的排量循环盐水

在筛管 / 套管环空内以3桶 / 分的流量流动

$\Delta P 16\text{磅} / \text{英寸}^2$

在底部以3桶 / 分的流量流入筛管

$\Delta P 2\text{磅} / \text{英寸}^2$

总摩擦压力

18磅 / 英寸²

在冲洗管 / 筛管环空内以0.66桶 / 分的流量流动

$\Delta P 17.5\text{磅} / \text{英寸}^2$

在顶部以0.66桶 / 分的流量流入筛管

$\Delta P 0.5\text{磅} / \text{英寸}^2$

总摩擦压力

18.0磅 / 英寸²

在300英尺长的冲洗管内以3.66桶 / 分的流量流动

$\Delta P 726\text{磅} / \text{英寸}^2$

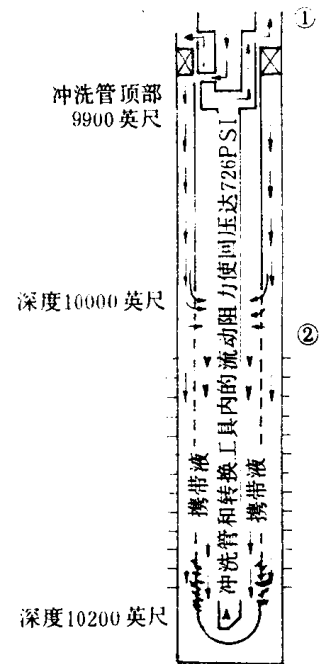


图 7c 砂浆在环空内的流动情况。冲洗管 / 筛管环空内的流量因筛管 / 套管环空内压力的升高而增大。

①—井眼示意图

套管内径6.123英寸

筛管12号规格, 外径4.60英寸, 内径3.5英寸, 长度200英尺

冲洗管外径2.06英寸, 内径1.76英寸

井内充满10磅 / 加仑盐水

②—条件3

10磅 / 加仑盐水由HEC稠化, 每加仑盐水含10磅砾石

在 170秒^{-1} 和 175°F 下, 粘度为228厘泊

在 175°F 下, 携带液的 $n' = 0.579$, $K' = 0.015$

以3.85桶 / 分的排量循环砂浆

在筛管 / 套管环空内以3桶 / 分的流量流动

$\Delta P 44\text{磅} / \text{英寸}^2$

在底部以3桶 / 分的流量流入筛管

$\Delta P 2\text{磅} / \text{英寸}^2$

总摩擦压力

46磅 / 英寸²

在冲洗管 / 筛管环空内以0.85桶 / 分(原文为0.66桶 / 分)的流量流动

$\Delta P 45.3\text{磅} / \text{英寸}^2$

在顶部以0.85桶 / 分(原文为0.66桶 / 分)的流量流入筛管

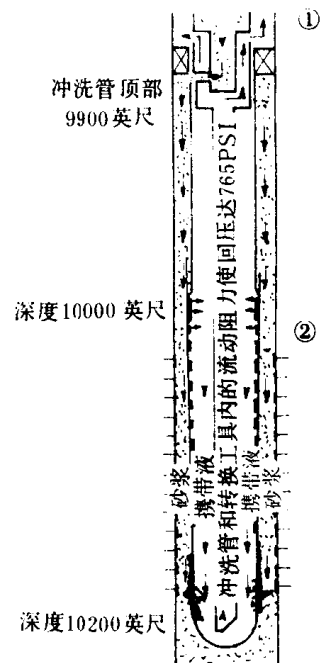
$\Delta P 0.7\text{磅} / \text{英寸}^2$

总摩擦压力

46.0磅 / 英寸²

在300英尺长的冲洗管内以3.85桶 / 分的流量流动

$\Delta P 765\text{磅} / \text{英寸}^2$



在所有这些例子中, 筛管和套管之间的间隙保持不变。对于给定尺寸的套管, 增大筛管的外径会增大筛管 / 套管环空内的摩擦压力, 迫使更多的携带液流入筛管。这对设计工作非常重要, 因为当筛管和套管之间的间隙微乎其微时, 砂浆桥堵的趋势要大得多。

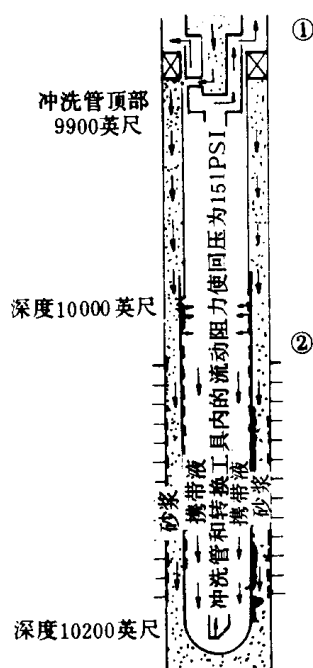


图 7d 冲洗管外径从 2.06 英寸增大到 2.875 英寸所产生的影响。冲洗管 / 筛管环空内的流量降低到 0.26 桶 / 分。

①——井眼示意图

套管内径 6.123 英寸

筛管 12 号规格, 外径 4.60 英寸, 内径 3.5 英寸, 长度 200 英尺

冲洗管外径 2.875 英寸, 内径 2.441 英寸

井内充满 10 磅 / 加仑盐水

②——条件 4

10 磅 / 加仑盐水由 HEC 稠化, 每加仑盐水含 10 磅砾石, 在 170°F 和 175°F 下, 粘度为 228 厘泊

在 175°F 下, 携带液的 $n' = 0.579$, $K' = 0.015$

以 3.26 桶 / 分的排量循环砂浆

在筛管 / 套管环空内以 3 桶 / 分的流量流动 $\Delta P 44 \text{ 磅} / \text{英寸}^2$

在底部以 3 桶 / 分的流量流入筛管 $\Delta P 2 \text{ 磅} / \text{英寸}^2$

总摩擦压力 46 磅 / 英寸²

在冲洗管 / 筛管环空内以 0.26 桶 / 分的流量流动 $\Delta P 45.3 \text{ 磅} / \text{英寸}^2$

在顶部以 0.26 桶 / 分的流量流入筛管 $\Delta P 0.7 \text{ 磅} / \text{英寸}^2$

总摩擦压力 46.0 磅 / 英寸²

在 300 英尺长的冲洗管内以 3.26 桶 / 分的流量流动 $\Delta P 151 \text{ 磅} / \text{英寸}^2$

(三) 砾石颗粒与携带液的密度比值对环空砾石充填的影响

如前所述, 砾石颗粒密度和携带液密度之间的差值对颗粒沉降速度有很大的影响。这反过来又会影响到大斜度井中能够充填的井段长度, 还会强化炮眼的充填。增大携带液密度或降低砾石颗粒密度, 或者同时改变二者的密度就能改变砾石颗粒的浮力。

在很多场合下用高密度盐水 (密度为 16.5~17 磅 / 加仑) 进行了砾石充填, 这样做不是试图增大砾石颗粒的浮力效应, 而是试图维持井控, 结果没有遇到任何问题。

计算机模拟和物理模型试验表明, 从砾石充填的角度来讲, 理想的砂浆应由这样一种携带液组成, 其密度与颗粒密度之比约为 0.8~0.87, 粘度为 25~30 厘泊。颗粒含量 ($\Phi_p = 0.16 \sim 0.2$) 应足够低, 从而使砂浆的相对粘度 μ_r 不超过 1.6~2.1 左右, 以减弱筛管顶部出现桥堵的趋势, 并使砾石颗粒得以致密充填。

(四) 炮眼充填原理

正如前面讨论的那样, 炮眼要得以充填, 就必须有携带液漏失到地层中去, 而且漏失速率必须足够高, 以便使砾石先充填套管周围存在的炮眼和所有空穴, 后充填筛管 / 套管环空。当使用高砾石浓度 (> 8 磅 / 加仑) 时, 筛管 / 套管环空充填得很快。在有些井段, 砂浆到达筛管之后不到 1 分钟, 砾石充填就完成了。

(五) 砾石颗粒与携带液的密度比值会影响炮眼充填效率

砾石颗粒在携带液中的沉降速度对炮眼和筛管 / 套管环空的充填效率影响很大。控制颗粒沉降速度的常规方法是增大携带液的粘度和提高颗粒的浓度。另一种方法是设计一种颗粒密度与携带液密度更为接近的砂浆。要做到这一点, 可以采用低密度颗粒或增大携带液密度, 或者同时改变二者的密度。

不管颗粒的密度如何, 高浓度总会显著增大砂浆粘度和摩擦压力, 并且又如上面讨论的那样, 还会增大桥堵的可能性。这样一来, 控制颗粒沉降速度的合理方法就是降低颗粒浓