

泥 浆

设 备

手 册

4

除气器

〔美〕戈登·劳森 沃尔特·利杰斯特兰德

京)

石油工业出版社

· 40213

泥浆设备手册 4

除 气 器

SY60/09

〔美〕戈登·劳森

沃尔特·利杰斯特兰德

孙振纯 译 肖 禾 校

石油工业出版社

目 录

4.1	主要泵必须开动	(1)
4.1.1	引言	(1)
4.1.2	除气器的历史	(1)
4.1.3	保持泵的运转	(2)
4.1.4	泵的限制	(2)
4.1.5	气体侵入泥浆的征兆	(3)
4.2	定义	(5)
4.2.1	气侵泥浆	(5)
4.2.2	气侵量	(5)
4.2.3	气侵百分比	(5)
4.2.4	真实泥浆密度	(6)
4.2.5	井底泥浆液柱压力	(6)
4.2.6	井底压力	(6)
4.2.7	地层压力	(7)
4.2.8	真正泥浆密度	(7)
4.2.9	实际泥浆密度	(8)
4.2.10	滞留时间	(8)
4.2.11	抽吸气体	(8)
4.2.12	井涌	(8)
4.2.13	井喷	(8)
4.3	泥浆中的气泡	(9)
4.3.1	泥浆中地层气体的影响	(9)
4.3.2	泥浆中空气的影响	(10)
4.3.3	泥浆中硫化氢的影响	(10)

4.4	气侵泥浆密度的迷惑性	(11)
4.4.1	用加重方法来补偿气侵效应	(11)
4.4.2	静液柱压力	(11)
4.4.3	对气侵泥浆使用除气器而不使用重晶石加重的 处理方法	(16)
4.5	气侵对泥浆泵作业的影响	(17)
4.5.1	一般泵的操作	(17)
4.5.2	泵送气侵泥浆	(17)
4.5.3	气侵10%的泥浆使用双缸泵泵送实例	(17)
4.5.4	泵送极限	(19)
4.5.5	气侵泥浆对活塞泵的影响	(20)
4.6	气泡的清除	(21)
4.6.1	没有除气器前的除气办法	(21)
4.6.2	泥浆粘度的影响	(21)
4.6.3	气泡的清除	(22)
4.6.4	除气器的安装位置	(23)
4.6.5	按处理量来选择除气器的尺寸	(24)
4.6.6	常压除气器概述	(24)
4.6.7	常压除气器的操作	(26)
4.6.8	真空除气器	(28)
4.6.9	卧罐—泥浆薄层除气—射流泵	(29)
4.6.10	立罐—泥浆薄层除气—射流泵	(34)
4.6.11	立罐—泥浆薄层除气—自灌注式泵	(35)
4.6.12	真空除气器的操作	(36)
4.6.13	真空泵的作用	(37)
4.6.14	真空泵的起动	(38)
4.6.15	泥浆液面控制	(41)
4.6.16	真空度、上水高度和泥浆密度	(42)
4.6.17	射流泵和自灌式离心泵的作用	(43)
4.6.18	气泡尺寸和处理时间	(45)

4.6.19	密闭除气系统	(47)
4.7	除气罐和泥浆-气体分离器	(51)
4.7.1	简述	(51)
4.7.2	泥浆-气体分离器用于除大气泡	(51)
4.7.3	泥浆-气体分离器的设计要求	(53)
4.7.4	主要放喷管线	(55)
4.7.5	对泥浆-气体分离器的要求	(55)
4.7.6	泥浆-气体分离器罐的底部出口	(55)
4.7.7	缓冲室	(57)
4.7.8	安全排泄压力	(58)
4.7.9	从分离罐到废气处理区之间的排气管线	(58)
4.8	各种泥浆密度 (真实泥浆密度、真正泥浆密度和实际 泥浆密度)	(60)
4.8.1	概述	(60)
4.8.2	真实泥浆密度、真正泥浆密度和实际泥浆密度 的定义	(60)
4.8.3	比重计的使用	(61)
4.8.4	真实泥浆密度	(62)
4.8.5	用水试验气泡法	(62)
4.8.6	搅拌除气	(63)
4.8.7	改变表面张力除气	(64)
4.8.8	除气泡或加压装置	(64)
4.8.9	测量气侵泥浆的真实密度	(65)
4.8.10	测量气侵泥浆的实际密度	(66)
4.8.11	除气器的性能试验	(66)
4.9	现场常遇到的几个问题	(69)
4.9.1	空气侵与天然气侵泥浆的比较	(69)
4.9.2	问题的提出	(71)
4.9.3	问题之一: 搅拌不够, 泥浆气泡严重	(71)
4.9.4	问题之二: 射流泵喷嘴处的压头太低	(72)

4.9.5	问题之三: 喷流阀开启过大	(74)
4.9.6	问题之四: 重晶石在井内沉淀	(75)
4.9.7	问题之五: 堵漏物质堵塞喷流阀	(75)
4.9.8	问题之六: 泥浆处理剂引起的泡沫	(76)
4.9.9	问题之七: 聚合物泥浆吸附空气和天然气	(78)
4.9.10	问题之八: 搅动时空气进入泥浆	(78)
4.10	废气处理管汇	(81)
4.10.1	概述	(81)
4.10.2	真空泵的特性	(81)
4.10.3	真空泵的排气管线	(82)
4.10.4	自动排气管线	(83)
4.10.5	常压除气器的排气管线	(83)
4.10.6	泥浆-气体分离器 (和除气器) 的排气管线	(85)
附录4A	常压除气器的故障排除	(87)
附录4B	卧式真空除气器的故障排除	(91)
附录4C	立式真空除气器的故障排除	(95)
附录4C (续)	采用自灌式离心泵的立式真空除气器的 故障排除	(100)
附录4D	气侵泥浆中的气体在被泵入井底过程中的压 缩	(105)
附录4E	气泡的漂浮和破裂	(110)
附录4F	在比重计中采用水稀释顶替来检测泥浆是否含 天然气的方法	(117)
附录4G	泥浆在真空除气器中的滞流时间	(124)
附录4H	真空除气器控制系统之间的依赖性	(125)
附录4I	钻井气体的计算	(134)
附录4J	本书非许用单位和许用单位换算表	(137)

4.1 主要泵必须开动

4.1.1 引言

钻井泥浆中不允许有任何气体存在，但是，钻油气井很可能引起气体进入泥浆中。本书将全面讨论气侵泥浆的影响、测量气侵泥浆密度的方法、使用除气器除气的原理以及各种泥浆密度测量的问题。井控技术主要涉及在一定条件下控制大量地层气体侵入泥浆的方法，但这不是本书研究的内容。控制泥浆中的气体对防止井喷是至关重要的，并且使用除气器是除掉已侵入井内环形空间泥浆中气体的最有效的方法。本书列出了各种气体和空气进入泥浆的途径，并推荐了处理这些问题的办法。

除气器是用来使气泡迅速运移到泥浆的表面，并将其除掉的专门设备。最早的除气器一直到今天还在继续使用。除气器发明于40年代，当时的目的并不是为了清除泥浆中的气体，而是用来除掉在生产系统盐水中的气体，而后再将除气后的盐水注入井中。

4.1.2 除气器的历史

气侵泥浆一直是钻井工业所碰到的难题。过去，很多钻机是蒸汽钻机，泥浆池通常是挖的土池子。钻机上的泥浆泵的上水条件一般都不好，而且泥浆工程师也希望要是在钻机上有足够的双缸泥浆泵驱动的泥浆枪来搅拌泥浆池就好了。泥浆池、泥浆液面一般低于泥浆泵上水管线法兰中心线2~6英尺，同时离心泵、泥浆枪、金属罐和泥浆池搅拌器也很少见。地层压力梯度还没有为人们充分地认识到，所以也没有开展压力预测工作。因为在套管设计中没有考虑地层压力，所以套管程序通常不是很有效。压力控制或“气侵”或“井喷”控制也没有形成正式的工艺，大多数钻井人员还不理解其重要性。泥浆录井还处于萌芽阶段，同时泥浆

工程师自认为他们所掌握的泥浆知识远比实际工作中所碰到的要多。实际上，那时许多井都出现“缩颈”现象，而且对新区的探井更是心中无数。

4.1.3 保持泵的运转

大多数钻井人员都公认，一口井开钻以后，保持泥浆泵运转是很重要的。除气器首先得到应用，并且一直沿用至今的主要原因就是：除气器能保持泥浆泵运转。

当然，当今的作业日趋复杂且发展很快。三缸泵有灌注上水系统并有灌注式离心泵，比以往使用双缸泵-土池系统能处理更多的气体。在气侵泥浆问题严重的地方，已普遍采用除气器来进行处理，从而可以更好地控制泥浆的性能，使井控成为正式工艺并能在开钻前就做好设计。

4.1.4 泵的限制

因为泥浆泵只能处理泵送液体中的一定量的气体，所以除气器就得以普遍的应用。除气器可将泥浆泵泵送的泥浆中的气体除掉，因此，当需要往井里泵泥浆时，泥浆泵就能连续向井内泵送除过气的泥浆。

当密度为12磅/加仑的泥浆由于气侵其密度降到8磅/加仑时，我们很快就知道，这时泵送将有 $1/3$ 的泵的能力利用不了，因为在每分钟500加仑的排量下，我们每分钟泵送的泥浆实际上是4000磅，而不是3000磅。但是我们遇到的问题远比损失三分之一的泵的能力更为严重，其原因如下：

若双缸泵的液力端装有 $5\frac{1}{2}$ 英寸的缸套，冲程为16英寸，则从进口管线顶部到泵的出口管线凡尔的底部在活塞全部处于回行程时，其容积为4.12加仑，当活塞处于上行程时，排出泥浆为1.65加仑，因此液力端的容积为2.47加仑。这样可求出其压缩比为 $\frac{4.12}{2.47}$ 或1.7，这个数字对泵来说是理想的（一般来说，汽车引擎的压缩比大约为8:1，对引擎来说较为理想）。

例如，一台泵在泵送没有气侵的泥浆时，如果压力为1500磅

/平方英寸，则排量为400加仑/分。但是假如密度为12磅/加仑的泥浆气侵到8磅/加仑后仍用该泵泵送，也许该泵仍可开到60冲/加仑的泵速，但只能压缩气体，每冲程泵送0.28加仑的混气泥浆（67加仑/分），排出端的压力大约为43磅/平方英寸（见4.5.3节中的图4-3和4、10节中的公式）。

泵的液体排量仅为67加仑/分。这样小的排量不足以维持正常循环。只有采用关井的办法才能控制住这口井。如果12磅/加仑的泥浆气侵至10.8磅/加仑，并假设泵的排量是300加仑/分，泵压为850磅/平方英寸，则进入泵内的混气泥浆可能不均匀，所以泵的排量也就不稳定同时引起泵工作不平衡（振动）。如果能用除气器清除泥浆中所有的气体或大部分气体，则可以保持泵的工作能力并可用泥浆来控制井底压力，对钻井人员来讲这是控制气侵或井喷的唯一适用的方法。本书并不是想用各种办法来介绍井控，但人们已通常认为除气器是井控的一个组成部分，所以必须懂得除气器在井控中的作用。

除气器有用的另一个原因是，当气体从泥浆中排出以后，泥浆罐系统的泥浆量可以更为准确地确定出来。当井底侵入大量气体后，地面泥浆罐内泥浆体积增加是事故发生的最好征兆，也就是说可显示出气侵量的大小，或是否已真正发生了气侵，这对井控来说是很重要的。假如泥浆罐内的泥浆增加是由较小的气侵引起的，则难以发现罐内泥浆液面的变化，这样气侵就可能被忽略。

4.1.5 气体侵入泥浆的征兆

高粘度、高切力的泥浆能将小的气泡带到地面并再次循环到井内。甲烷是天然气的主要成分，在高压下能很快溶于水。如果所钻的是气层，一些气体就会溶解在泥浆中。在这种情况下，唯一能得到的气体侵入泥浆的征兆只能通过气测显示仪表读数和泥浆密度略有降低获得。然而，如果所钻地层的含气量大于溶解在泥浆中的气体量，则泥浆密度会下降0.2到1磅/加仑或者更多。假如所钻地层的大量气体侵入井中，就会出现一些明显的征兆，

如，泥浆密度大幅度地下降，泥浆从“喇叭口”短节中溢出，通过泥浆振动筛的泥浆突然增多甚至从转盘上溢出。在这种情况下，泥浆密度下降已超过1磅/加仑。

经过振动筛流下来的气侵泥浆通常看起来象“撒上粉末”、“胡椒粉状”或“不光滑”，有时可能在泥浆表面上有泡沫（在取样量杯内）。假如是这样，先去掉泡沫再看其下部的泥浆。如果一加仑的泥浆气侵为10%，每个气泡的直径为1/32英寸，这样其中就有1445650个气泡且气泡表面之间的平均三角间距为1/10英寸，通过计算可以求出最多只有800个气泡浮在泥浆量杯内的液面上。气侵泥浆的外观是随气侵量、气泡的尺寸和泥浆性能而变化的。

由于泥浆发生了气侵，泥浆粘度增加，密度下降。但是，在采取决定性的措施来处理高粘度问题之前，应检查除气器处理后的泥浆性能。如果泥浆粘度的增加仅是由于气侵的原因引起的，除气以后的泥浆的粘度和密度应该能恢复到原来的数值。

4.2 定 义

气体侵入泥浆中是很危险的。它危及到钻机和油井的存亡。为了解释清楚各种条件和事件，必须很认真地阐述和命名专用词。本书给出的定义也适应于其它分册，并在这里进行详细讨论，因为后面要用到这些术语。这些定义也尽量做到与有关防喷的书籍保持一致。

4.2.1 气侵泥浆

这是指含有天然气或空气泡的泥浆。侵入井下泥浆中的天然气泡来自钻屑和地层。侵入泥浆的空气来自泥浆流经管线、振动筛、除气器、泥浆罐搅拌器、泥浆枪、水力旋流器和混合漏斗的过程中。

4.2.2 气侵量

这是指在常压下测得的泥浆密度的降低值，用磅/加仑来表示。当泥浆内没含有天然气或空气时，其真实或真正泥浆密度为11.5磅/加仑，而当气侵以后其实际泥浆密度为9.9磅/加仑，我们则说其气侵量为1.6磅/加仑（11.5-9.9）。同样，若真实泥浆密度为18磅/加仑，气侵到实际泥浆密度为15.8磅/加仑，则其气侵量为2.2磅/加仑。

4.2.3 气侵百分比

这是指气侵后泥浆密度的降低值（磅/加仑）除以真实泥浆密度（磅/加仑）所得的百分比值。

1.6磅/加仑气侵量除以11.5磅/加仑的真实泥浆密度等于13.9%（重量百分比）。

$$1.6/11.5=0.139 \times 100\% = 13.9\%$$

2.2磅/加仑气侵量除以18磅/加仑等于12.2%（重量百分比）。

$$2.2/18=0.122 \times 100\% = 12.2\%$$

气侵百分比是可以比较的，13.9%比12.2%的含气量大。而气侵量用磅/加仑来表示，当真实（或真正）泥浆密度不一样时就不能比较。11.5磅/加仑的泥浆气侵量为1.6磅/加仑时，其含气量就比18磅/加仑的泥浆当气侵量为1.8磅/加仑的值大。

4.2.4 真实泥浆密度

这是指在泥浆泵吸浆罐内取的搅拌均匀的泥浆试样不含气时在泥浆比重计上所得的读数。当将真实泥浆密度转换成为井底的液柱压力时，一般假设钻柱的泥浆密度与所测的泥浆密度一样。当采用泥浆比重计测密度时要读最接近的刻度值，并且比重计要定期用清水校正。

4.2.5 井底泥浆液柱压力

井底泥浆液柱压力是由真实泥浆密度和垂直井深计算得到的。

$$\begin{aligned} \text{泥浆液柱压力 (磅/平方英寸)} &= \text{真实泥浆密度 (磅/加仑)} \\ &\quad \times \text{真实垂直井深 (英尺)} \\ &\quad \times 0.052 \text{ (加仑/平方英寸/英尺)} \end{aligned}$$

如要取得准确的数值，测量的泥浆密度必须是真实泥浆密度。同时井深一定得是真实垂直井深而不是斜井的钻柱长度（钻柱长度一般用来计算井眼容量）。

泥浆比重计的刻度标定为磅/加仑，也可以是磅/平方英寸/1000英尺。这个关系来自上面的公式。液柱压力计算的有效性，取决于真实泥浆密度测量值的准确度。由于取样或准备泥浆样品的误差、比重计精确度的误差，以及计算时使用的是钻柱长度而不是垂直井深，井底实际液柱压力和真实泥浆与计算值有时相差很大。同样，固相被泵送入井，也会增加液柱压力。

4.2.6 井底压力

这是指所钻井眼的井底压力。不管它什么原因引起的，井底压力等于井底泥浆液柱压力，即等于钻杆和环形空间敞口充满且

无流动时的液柱压力。液柱压力是不包括泵压和流体摩阻在内的计算值。

实际上，当泥浆循环时，井底压力略大于计算的液柱压力。地层中的气和水侵入环形空间内的泥浆，会降低井底压力。井控技术告诉我们，在井内液体不流动的情况下，井底压力等于计算的液柱压力加上关井钻杆压力。

在正常循环过程中，由于环形空间存在着流动摩阻，井底压力增加。泥浆流过阻流器在阻流器喷嘴处造成压力降，也会引起井底压力增加。这些原因都很有可能导致井漏。

地层中水或油的侵入会降低泥浆密度，从而引起井底压力减小。环形空间的气侵泥浆无阻力流出也会稍微地降低井底压力。在严重情况下，大量的气体侵入则会使得井内卸载并大幅度地降低井底压力。井漏能引起井内环形空间的液面下降，降低井底压力。还有很多其他原因对井底压力有影响，如起下钻速度、循环过程中泥浆的粘度、起下钻时井内没灌满泥浆以及突然停止循环等。如果不知道真实泥浆密度，那么实际井底压力与所计算的压力就有可能不同。

如果井底压力小于地层压力，称为负平衡状态。这时， CH_4 、 CO_2 、 H_2S 、油、水以及盐水有可能进入井中，造成溢流。如果井底压力大于地层压力，称为正平衡状态，会降低钻速。正平衡压力钻井也易造成地层破裂，引起井漏。

4.2.7 地层压力

这是指靠近井眼地层内的液体或气体的压力。最好是能预测地层压力，但井和井、油田与油田的地层压力各异。准确判断出地层压力的大小能加快钻井速度并降低泥浆成本。

4.2.8 真正泥浆密度

这是指泥浆样品中没有空气、没有气泡时的泥浆密度。泥浆样品可以在泥浆出口管线到泥浆泵吸浆罐之间的任何位置取得。一般情况下，在各处取得的泥浆样品应一致。但是事实并非如此，其影响因素较多，如井眼条件、泥浆粘度的变化、搅拌不好

以及泥浆的加重或加水处理等。

4.2.9 实际泥浆密度

实际泥浆密度是指与泥浆罐里泥浆尽可能一致的泥浆样品的密度。这个样品与泥浆比重计量杯的试样相比,还包括泥浆中的气泡在内。用除气器前后的实际泥浆密度与其真正泥浆密度进行比较,可判断出除气器的工作性能。

4.2.10 滞留时间

滞留时间是指泥浆、气体、岩屑等从井底循环到地面在井中所停留的时间。在深井中从循环开始到返至地面滞留时间达几个小时。

4.2.11 抽吸气体

这是在起下钻的过程中环形空间储集的、被带到泥浆管线和泥浆罐中聚集而成的气体。一般来说,气侵量在15~30分钟内会增加到0.5~1磅/加仑。在某些情况下,必须关上闸板防喷器并控制液流。长时间的起钻可能会产生大量的抽吸气体。抽吸气体在被携带到地面之前就可通过一些现象反映出来。

4.2.12 井涌

井涌是指从地层中进入环空或管线中的液体或气体,它会引起泥浆罐内泥浆体积大幅地增加。假如不引起注意并加以控制,则将会转为井喷。

4.2.13 井喷

井喷是地层中的流体在地面失去控制而喷出的现象。

4.3 泥浆中的气泡

4.3.1 泥浆中地层气体的影响

气侵泥浆对钻井作业的影响，有些是很明显的，而有些并不容易发现。如果对气体泥浆处理不当，一般情况下都将增加钻井成本，严重时，将导致井喷。本节主要介绍气体在泥浆中造成的主要影响以及为什么要避免这些影响。下面将详细讨论泥浆中气体的影响。

气侵泥浆中的气体的主要是甲烷，有些是乙烷、丙烷等，其影响如下：

(1) 降低泥浆密度。

(2) 增加泥浆上返速度，故引起泥浆罐过满或外溢。同时需要关上闸板防喷器并使液流通过节流管汇。

(3) 气侵泥浆进入泵的吸浆罐会引起泵的容积效率降低而造成泵的排量降低（泵的部分冲程用来压缩气体而没有往外排泥浆）。对于严重的气侵，泥浆泵根本无法运转。

(4) 气侵后的实际泥浆密度能反映出井内液柱压力降低，并且使你产生要立即加重的错觉。根据实际泥浆密度而不是按真实泥浆密度加重，这样将增大几百个磅/平方英寸的液柱压力，甚至有可能引起井漏，而后导致井喷。当需要加重时应根据真实泥浆密度来加重。

(5) 随着泥浆被泵送到钻杆内的气体对井内的液柱压力几乎没有任何影响。尽管10磅/加仑的泥浆，气侵到泥浆密度为9磅/加仑，在10000英尺的井深处，井内液柱压力只降低9.6磅/平方英寸，这一点并非大家都清楚。

(6) 气侵泥浆可能使得离心泵气锁，使水力旋流器、泥浆枪、灌注泵等无法工作。

(7) 可反映出泥浆可能需要少量加重,但由于气体的侵入的途径不一,无法确定具体的加重措施。

(8) 根据泥浆设计和选用设备不一,可能还有一些其他重要影响。

4.3.2 泥浆中空气的影响

空气侵入泥浆通常是在液流进入流动管线后以及用设备处理泥浆的过程中发生的。空气对于泥浆系统的影响不同于地层气。其主要影响是对钻具的腐蚀,另外一个不好的方面是,很不容易知道泥浆中的气泡是空气还是地层气。除气器可以除掉其上游泥浆中的空气,但其下游设备又可能使空气进入泥浆中去。

泥浆中的空气:

- (1) 在泥浆罐表面形成泡沫。
- (2) 如果不注意时,将降低泥浆密度读数。
- (3) 通常不象地层气有小气泡。
- (4) 由搅拌器或加重漏斗处带入的空气可能使离心泵气锁。
- (5) 分散在泥浆里的空气会腐蚀钻具。
- (6) 泥浆录井装置不能监测出泥浆中的空气。
- (7) 空气也和地层气一样也会造成井内液柱压力的计算错误。

在4.10.1中还将详细讨论泥浆液流中的空气。

4.3.3 泥浆中硫化氢的影响

有些地层含有硫化氢(一种毒性很强的气体),必须提前作好处理硫化氢气体的一切准备工作。但这方面内容已超出了本书的讨论范围。决不能低估硫化氢气体伤害人的力量。一定要用真实泥浆密度来计算井底液柱压力。在4.6.19中还将讨论消除硫化氢气体的密闭除气器系统。

4.4 气侵泥浆密度的迷惑性

气侵后泥浆密度的降低对井内液柱压力的影响，比人们所想象的要小得多。图4-1表示泥浆中气侵量达到30%时，在不同井深对井内液柱压力的影响。就此意义上来说，气侵发生并非一点迹象也没有，并且这些气体很可能是所钻地层的气体所致，特别是当钻速很快的时候。

4.4.1 用加重方法来补偿气侵效应

目前，许多人还没认识到用加重方法来补偿气侵效应所能导致的巨大危害。如泥浆的气侵量是0.6磅/加仑，并且我们并没有意识到，当时的真实泥浆密度为10磅/加仑，但由于系统内有气体存在，所以实际泥浆密度为9.4磅/加仑。由此可知道，需要10磅/加仑的泥浆来控制在10000英尺处的地层压力，所以我们将实际的泥浆加重到10磅/加仑，实际上所得到的真实泥浆密度为10.6磅/加仑。这时有可能出现两种情况：一是由于泥浆密度的增加，钻速降低，泥浆泵由于气侵的原因排量也减小；二是原来的液柱压力已比地层压力高出500磅/平方英寸，而现在比地层压力大800磅/平方英寸。这样如果地层对附加压力敏感，就会有井漏的危险。

图4-1说明，尽管气侵使泥浆降低了1磅/加仑，井内液柱压力仍只减少了9.6磅/加仑，但是由于我们实际上将泥浆密度提高了0.6磅/加仑以补偿气侵效应，这样，液柱压力增加为：

$$10000 \text{ 英尺} \times 0.052 \times 0.6 \text{ 磅/加仑} = 312 \text{ 磅/平方英寸}$$

注意，气侵并没有使真实泥浆密度发生变化，只是在泥浆比重计上其读数有所变化。气侵对井内液柱压力的影响比人们想象的要小得多。

4.4.2 静液柱压力