

◀“863”计划专栏▶

## 气体钻井地面分离设备液体排料系统的设计研究

付双成 孙国刚 高翠芝 郭广军

(中国石油大学(北京) 化学科学与工程学院,北京 昌平 102249)

**摘要:**目前,氮气、天然气欠平衡钻井过程中将由井筒返回至地面的气体进行直排放燃,这样既污染了环境,又浪费了能源,增加了钻井成本。为此,设计了一套气体钻井地面分离系统对由井筒返回至地面的气体进行回收,并对分离设备的排料系统进行了设计研究。为充分回收气体并保证连续排料,采用了液体排料的方案。液体输送需要保证排料速度大于临界流速,而临界流速与所输送固体的粒径有关,通过调研和采样分析,掌握了井口钻屑粒度分布范围,确定采用相应的B.C.克诺罗兹公式计算排料临界流速。同时,为了达到带压锁气排料的目的,设计了料罐液位自控方案。最后,针对气体钻井的实际工况对排料系统进行了实例设计,并进行了排料系统携岩排料能力试验,证明所做的设计可行。

**关键词:**气体钻井;分离设备;排料;临界流速;携岩能力

**中图分类号:**TE926    **文献标识码:**A    **文章编号:**1001-0890(2009)02-0010-04

气体欠平衡钻井技术具有减轻地层伤害、提高油井产能、实时发现地质异常情况和评价油藏、避免复杂情况与事故发生、提高钻井速度、缩短钻井周期等优点<sup>[1-3]</sup>。现行的气体钻井工艺将由环空返回至地面的携岩气体直接排放到放喷池处,当有油气产出时在排砂管口进行点火放燃,这样既污染环境,又浪费能源。如果在井口设计地面分离设备对气体进行分离和净化,对于空气钻井,可以减小环境污染;对于氮气或者天然气钻井,还可以将分离后的气体进行回收或加压后循环注入井筒,不但可以保护环境,还可以节省能源、有效降低氮气钻井的成本。国外虽已有从充气钻井液中回收气体的工艺与设备专利报导<sup>[4-6]</sup>,但关于气体钻井中气体回收工艺设备的报导却很少<sup>[7]</sup>。

为分离、净化气体钻井井筒返出的携岩气体,笔者设计了一套气体钻井井口地面分离系统,它由两级旋风分离器、过滤器和排料部分组成,如图1所示。气体钻井井口返出的混合物先进入两级旋风分离器,分离出来的气体再进入后面的过滤器(一开一备)进一步净化,净化后的气体可进行回收或通过压缩机增压后循环利用;分离下来的钻屑则落入旋风分离器下面的料罐中。由于气体钻井钻速可达5~25 m/h,所产生和带出钻屑的质量很大。而钻井作业流动性较强,分离设备要求体积小,没有足够的空间容纳大量的钻屑,必须及时将分离下来的钻屑连续排出。因此,带压锁气排料是气体钻井地面分离

系统设计和操作的一个关键问题。笔者介绍了该井口旋风分离器排料系统的设计及试验。

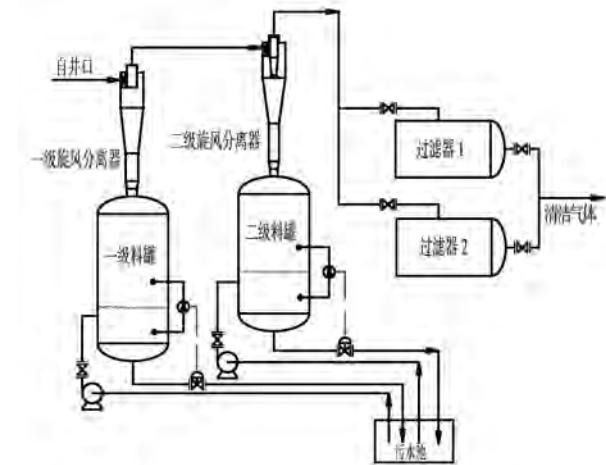


图1 气体钻井井口地面分离系统流程

收稿日期:2008-05-12;改回日期:2008-12-30

**基金项目:**国家高技术研究发展计划(“863计划”)重大项目“气体钻井技术与装备”(编号:2006AA06A103)、中国石油集团公司重点技术开发项目“氮气循环利用装置研究”(编号:06B2030503)和中国石油化工股份有限公司科技开发项目“氮气循环钻井关键技术的研究”(编号:P05062)部分研究内容

**作者简介:**付双成(1976—),男,黑龙江绥化人,1999年毕业于辽宁石油化工大学化工设备与机械专业,在读博士研究生,从事多相流分离技术与装备研究。

**联系电话:**(010)89734820

# 1 排料系统设计

## 1.1 排料系统输送方式的选择

常见的物料输送方式有气体输送和液体输送两种。如果分离设备采用气体输送方式,势必会造成气体的外溢,还会污染环境,因此分离设备选用了液体输送方式。这样既起到液封的作用,又可以保证连续排料,使装置能够连续运行。把一级、二级料罐的液面分别与其进、排水的流量建立自控关系,从而控制两个料罐的液面保持稳定,防止气体外溢。

## 1.2 临界流速的计算

要保证连续排料,必须保证排料管线中的液体有足够的携岩能力,只有当排料管线中液体的流速大于临界流速时才能保证其携岩能力。

关于水力输送临界流速,国内外学者<sup>[8]</sup>在试验的基础上提出了很多计算公式,但是,由于输送液体的特性差异很大,影响水力输送的因素很多,这些计算公式都有一定的适用范围和局限性,至今尚未归纳出一个公认的、适用各种输送流体的统一公式。笔者采用了广泛使用的B.C.克诺罗兹公式。

B.C.克诺罗兹针对不同平均粒径的输送介质提出了不同的临界流速公式。钻屑粒度的大小与钻头类型、岩层性质、钻进速度、井深和注气量等因素都有关系,是一个比较难确定的值<sup>[9-10]</sup>。笔者对气体钻井钻屑进行了采样分析:四川龙岗空气钻井井深2 000~2 300 m的钻屑,80%的钻屑粒径分布在40~300  $\mu\text{m}$ 之间,粒径中值为58  $\mu\text{m}$ ;四川大邑101井和大邑4井均采用氮气钻井,大邑101井井深4 600 m和大邑4井井深5 077 m的钻屑粒径中值分别为32.76  $\mu\text{m}$ 和20.62  $\mu\text{m}$ ,80%的钻屑粒径均分布在15~100  $\mu\text{m}$ 之间。

通过调研和采样分析可知,正常气体钻井条件下,井口钻屑的粒度分布主要在10~500  $\mu\text{m}$ 范围内。因此,气体钻井地面分离设备选用平均粒径 $d_{\text{cp}} \leq 0.07 \text{ mm}$ 时的B.C.克诺罗兹公式<sup>[11]</sup>计算临界流速:

$$v_L = 0.2\beta(1+3.43\sqrt[4]{P_w D_L^{0.75}}) \quad (1)$$

式中,  $v_L$  为输送流体的临界流速,  $\text{m/s}$ ;  $D_L$  为临界管径, 取排料管线直径为临界管径,  $\text{m}$ ;  $\beta$  为钻屑密度修正系数, 取  $\beta=1$ ;  $P_w$  为输送流体的稠度,  $P_w = \frac{M_s}{M_w} \times 100\%$ ;  $M_s$  为单位时间内输送钻屑质量,  $\text{kg/h}$ ;

$M_w$  单位时间内为输送流体质量,  $\text{kg/h}$ 。

由式(1)可以看出,临界流速与输送流体的稠度和管线直径有关。输送流体稠度越大,管线直径越大,所需要的输送临界流速越高,同时所需要的输送动能也越大。

## 1.3 排料速度的计算

在钻井现场,可以利用钻井现场排污池中的水作为分离设备排料系统的输送流体。由于一般井场的排污池兼作放喷池,对采出的气体进行放燃,因此分离设备需要与排污池保持一定的距离。为了把分离设备分离出来的钻屑通过管道及时排放到排污池中,在分离设备下面料罐中的压力和液位势能的共同作用下,排料管线中的流速需要大于临界流速。而料罐中的压力是由井口压力决定的,其值略低于井口压力。根据伯努利方程可得:

$$\frac{p-p_0}{\rho g} + Z_h = \left(1 + \lambda \frac{l+l'_0}{d}\right) \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

排料速度为:

$$v = \sqrt{\frac{2(p-p_0) + 2\rho g Z_h}{\rho[1+\lambda(l+l'_0)]/d}} \quad (4)$$

式中,  $p$  为料罐的压力,  $\text{Pa}$ ;  $p_0$  为大气的压力,  $\text{Pa}$ ;  $\rho$  为流体的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $Z_h$  为料罐中液面高度,  $\text{m}$ ;  $v$  为管道中流体流速,  $\text{m/s}$ ;  $\lambda$  为管道阻力系数;  $l$  为管道长度,  $\text{m}$ ;  $l'_0$  为管件阻力等值长度,  $\text{m}$ ;  $d$  为管道直径,  $\text{m}$ 。

只有排料速度  $v$  大于临界流速  $v_L$ , 才可以保证流体的携岩能力, 从而使排料系统能够连续运行。

## 1.4 料罐液位控制

如果料罐中的液位过低,会造成料罐压空,起不到液封和携岩的作用;如果料罐中的液位过高,液体会反窜到旋风分离器中,造成分离效率下降和气体严重带水。因此,必须建立料罐的液位自控系统。

由式(3)可得:

$$Z_h = \left(1 + \lambda \frac{l+l'_0}{d}\right) \frac{v^2}{2g} - \frac{p-p_0}{\rho g} \quad (5)$$

当排料管线确定以后,其长度  $l$  和直径  $d$  就确定了,管道阻力系数随着流速的变化也略有变化,此时决定液位的主要参数为管件阻力等值长度  $l'_0$  和料罐的压力  $p$ 。当进口压力波动时,料罐的压力  $p$  也随之波动,此时可以通过调节排料管线的调节阀来改变管件阻力等值长度  $l'_0$ , 以维持料罐液位。

由于气体钻井在接单根时停止向井内注气,为

了实现排料系统的自动连续工作,料罐的排料系统需要在常压下也能正常工作。如果料罐的液位势能够保证排料管线的排料速度大于临界流速,就可保证在没有压力的情况下排料速度大于临界流速,具有足够的携岩能力,此时料罐的最小液位高度为:

$$Z_{\min} \geq \left(1 + \lambda \frac{l}{d}\right) \frac{v_L^2}{2g} \quad (6)$$

## 1.5 供水系统

当临界流量确定以后,就可以确定进液量。当料罐液面控制平稳时,料罐的进液量等于排液量,根据料罐的压力和进液量来确定污水泵的扬程和流量,选择相应的防爆污水泵。为保证在操作压力范围内的进液量能够达到设计要求,污水泵选型时还需要考虑现场吸入管线的阻力和泵的吸入高度。

## 2 设计实例及试验

### 2.1 设计实例

设计条件:气体钻井,井深 3 000 m,钻头直径 0.215 9 m,机械钻速 5~25 m/h,标准状态下注气量 100 m<sup>3</sup>/min,井口出口压力 0.15~0.30 MPa,所钻地层的平均孔隙度为 0.15,钻屑密度为 2 700 kg/m<sup>3</sup>,排料管线内径为 0.05 m,长度为 20 m,排料管线阻力系数经查表并计算得  $\lambda=0.0226$ 。

通过工厂和钻井现场试验测得,地面分离设备的一级旋风分离器对于钻屑的分离效率  $\eta_1$  可达 96% 以上,也就是说,钻进过程中产生并携带至地面的钻屑有 96% 进入到一级料罐中,进入二级旋风分离器和二级料罐的钻屑只有 4% 左右。由式(1)、(2)可知,固体含量越高,所需要的临界流速就越大,液体输送越困难,因此,只要一级料罐能够保证正常连续排料,采用同样方法设计的二级料罐排料系统也能正常工作。所以,在这里只对一级料罐进行计算和分析。

假设在稳定钻进过程中产生的钻屑全部被及时携带出来,单位时间内钻出的钻屑量可由下式求得<sup>[12]</sup>:

$$M = \rho_s V = \rho_s \frac{\pi(1-\phi)d_1^2}{4} \frac{dD}{dt} \quad (7)$$

式中,  $M$  为钻井过程中单位时间内产生的钻屑质量, kg/h;  $\rho_s$  为钻屑密度, kg/m<sup>3</sup>;  $V$  为钻进过程产生的钻屑体积, m<sup>3</sup>/h;  $\phi$  为地层的平均孔隙度;  $d_1$  为钻头直径, m;  $dD/dt$  为机械钻速, m/h。

由式(7)可以计算出一级旋风分离器分离出来进入一级料罐的钻屑质量为:

$$M_1 = \eta_1 M = \eta_1 \rho_s \frac{\pi(1-\phi)d_1^2}{4} \frac{dD}{dt} \\ = 21.6 \sim 108.0 \text{ kg/h}.$$

再利用式(1)和式(2)计算出临界流速  $v_L$  为 0.54~0.68 m/s。根据国外的经验<sup>[13]</sup>,输送流速应比临界流速大 0.30 m/s,因此可以把设计临界流速  $v_L$  定为 1.00 m/s。

由式(6)可以计算出在常压下达到临界流速所需要的料罐最小液位高度  $Z_{\min}$  为 0.5 m,实际料罐的控制液位高度为 1.0 m,也就是说,即使在常压下,排料速度也会大于临界流速,在带压条件下工作时,排料速度会更大,完全能够保证足够的携岩能力。

由式(4)可以得出排料速度与料罐压力的关系:

$$v = \left[ \frac{\rho + 91500}{5020 + 226l_0} \right]^{1/2} \quad (8)$$

当料罐压力达到 0.3 MPa 时,最大排料速度可以达到 8.83 m/s。由于排料速度过高会对排料管线和阀门造成严重的磨损,建议排料速度控制在 2.00~3.00 m/s,还可以把利用泵出口阀门调节给水量来控制液面作为备用调节手段。

### 2.2 试验验证

为了考察分离设备在加压条件下能否建立稳定的液封和排料系统的携岩能力,进行了带压排料试验。试验的工艺流程如图 2 所示。通过水泵向料罐中注水,在水泵出口和排料管线上面都安装了流量计,可以计量进出料罐的液体流量。试验粉料为 30 目细砂,装在料罐上面的加料斗中,采用正压加料,可以通过阀门 1、2 对加料斗和料罐进行加压,通过调节阀门 3 来控制加料速度。

在常压下建立水循环,维持液面高度  $Z_h$  为 1.0 m,当阀门 5 全开的时候测得排料流速为 1.35 m/s,大于设计临界流速 1.00 m/s。

料罐逐渐加压至 0.2 MPa,调节阀门 4 和阀门 5,控制液位为  $Z_h=1.0$  m。该操作条件下,由式(9)可以计算出排料管线出口的最大速度为 4.65 m/s。考虑到操作弹性以及管线的磨损,将排料速度的自控值定为 2.50 m/s,试验排料速度调为 2.55 m/s。

由设计条件可以计算出一级旋风分离器分离出来的钻屑质量  $M_1$  为 21.6~108.0 kg/h,试验加料速度控制在 300 kg/h,约为设计条件下的 3 倍。根

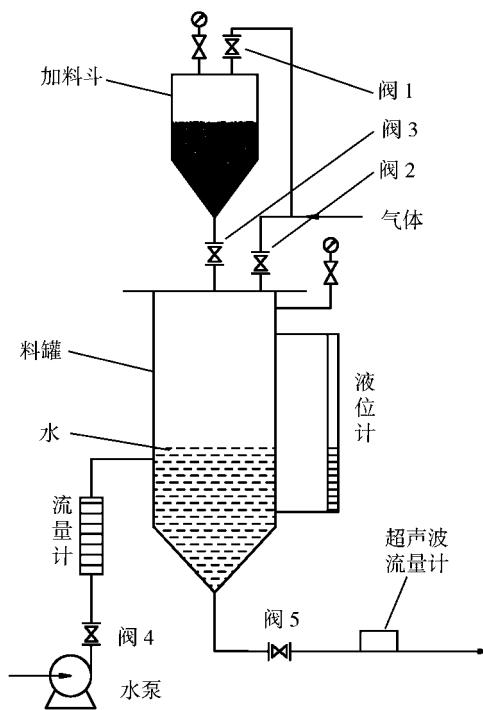


图2 带压排料试验流程

据式(2),稠度增加临界流速也增大,如果试验高稠度的流体能够顺利携岩排料,那么就可以保证此排料系统在设计条件下的正常工作。试验结果表明,在排料速度 $v$ 为2.55 m/s时,此排料系统能够将料罐中的细砂顺利带出系统,说明该排料系统能够在设计条件下正常工作,从而验证了设计的可行性。

### 3 结 论

1)研究设计了气体钻井井口地面分离设备的液体排料系统,确定了临界流速计算公式和排料流速

## Design of Ground Separation Equipment Liquid Discharge System in Gas Drilling

Fu Shuangcheng Sun Guogang Gao Cuiyi Guo Guangjun

(College of Chemical Science and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Changping, Beijing, 102249, China)

**Abstract:** At present, the well-head gas carrying cuttings in drilling system are burnt directly, which is polluting environment, wasting energy and increasing cost. The ground separation equipment in gas drilling was designed and the discharge system was investigated. In order to recover gas sufficiently and achieve continuous discharge, a liquid material discharge system was used. When the flow rate of material discharge was higher than critical flow rate, liquid had the enough carrying capacity. Critical flow rate was related to the granularity, and the granularity of wellhead drilling cuttings in gas drilling were investigated and analyzed. The Critical flow rate is determined by B. C Knoroz formula. The flow rate of material discharge was calculated. For the purpose of gas lock, a tank liquid-level control system was designed. Finally the liquid material discharge system was designed and tested; the testing results indicate this design is reliable.

**Key words:** gas drilling; separation equipment; nesting; critical flow velocity; carrying capacity of rock

计算公式,提出了料罐液位的自控方案。

2)根据气体钻井的操作条件对排料系统进行了设计计算,并进行了排料系统的携岩排料试验,试验验证了计算的正确性和设计的可行性。

### 参 考 文 献

- [1] 许爱.气体钻井技术及现场应用[J].石油钻探技术,2006,34(4):16-19.
- [2] 周英操,翟洪军.欠平衡钻井技术与应用[M].北京:石油工业出版社,2003:2-4.
- [3] 刘伟,李丽,贾学钰.高压气井CX488井天然气欠平衡压力钻井技术[J].石油钻探技术,2007,35(2):21-23.
- [4] Chitty Gregory H, Saponja Jeffrey Charles, Hosie David Graham. Closed loop multiphase underbalanced drilling process: US,7178592[P]. 2007-02-20.
- [5] Speed David. Recovery of gas from drilling fluid returns in underbalanced drilling: US, 5775442[P]. 1998-07-07.
- [6] Sprehe Paul Robert. Well drilling system with closed circulation of gas drilling fluid and fire suppression apparatus: US, 5890549[P]. 1999-04-06.
- [7] 付双成,孙国刚,柳贡慧,等.天然气钻井气体回收设备的研制[J].石油钻探技术,2008,36(5):28-31.
- [8] 白晓宁,胡寿根.固液两相流管道水力输送的研究进展[J].上海理工大学学报,1999,21(4):366-372.
- [9] 王存新,孟英峰,邓虎.气体钻井注气量计算方法研究进展[J].天然气工业,2006,26(12):97-99.
- [10] 孟英峰,练章华,梁红,等.气体钻水平井的携岩CFD数值模拟研究[J].天然气工业,2005,25(7):50-52.
- [11] 王荣祥,郭亚兵,张永鹏,等.流体输送设备[M].北京:冶金工业出版社,2002:298-300.
- [12] 鄢捷年.钻井液工艺学[M].山东东营:石油大学出版社,2001:271-290.
- [13] 王绍周.管道输送工程[M].北京:机械工业出版社,2004:133-134.

[审稿 李子丰]