

## 射流清管过程压力波动特性研究

刘珏 王炳人 邵游凯 王溢维 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院

**摘要:** 为研究天然气凝析液管道射流清管过程中压力的变化规律,建立了含有清管器收发装置、水平管路、起伏管路和立管的室内大型多相流实验环道,以空气和水为实验介质,在多种气体流量、液体积聚量及旁通率的条件下,测量了射流清管过程中管线各处压力值的波动变化,得到大量的实验数据。分析实验结果得到结论:清管器在管道中运行不连续,出现“走走停停”的现象,并且随着旁通率增加这种现象更剧烈;射流清管器能够实现含有积液的输气管道中清管的压力波动降低,且随着旁通率的增加这种降低效果更加明显;随积液量的增加,射流清管器通过立管处所需压力升高。

**关键词:** 射流清管器;立管;旁通率;压力;积液量

doi:10.3969/j.issn.1006-6896.2015.12.009

在气田开采中后期产率会逐渐下降,导致气藏压力下降,流体中包含的液体逐渐增多<sup>[1]</sup>,气液会产生严重的脱滑现象<sup>[2]</sup>,极易造成液体的大量积聚,使管道流通面积减小、能量损耗增大,在特定条件下还可能生成水合物堵塞管道,通常采用定期清管<sup>[3-4]</sup>的方法解决凝析液积聚问题。传统清管器通过前后密封产生的压差为动力推动清管器运行,但会导致清管器运行速度过快、管线压力波动较大而造成管道设备和清管器的损坏,影响正常的生产作业。针对以上问题,提出了应用于海底凝析液管道的新型射流清管器。

鉴于国内外对射流清管器的实际应用研究较少,射流清管器在输气管道积液的清除过程中能够起到什么样的作用是研究的重点。为此,建立了包

含水平管路、起伏管路和立管的大型室内实验环道,利用射流清管室内实验系统对射流清管器清管过程中管线压力的变化进行研究。

## 1 实验环道

建立总长约为100 m的室内实验环道,如图1所示,其中包含水平管段约48 m、角度为 $6^\circ$ 的上倾和下倾起伏管段19 m,角度为 $4^\circ$ 的下倾管27 m以及立管管段6 m。该环道由规格为 $\text{O}60\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的Ocr18N19不锈钢管搭建而成。环道能够保证管道内径53.4 mm恒定不变,保证清管器在管线中运行时所受摩擦力基本恒定;环道中所有弯管曲率半径均为500 mm,远大于环道钢管直径,利于清管器的顺利运行。

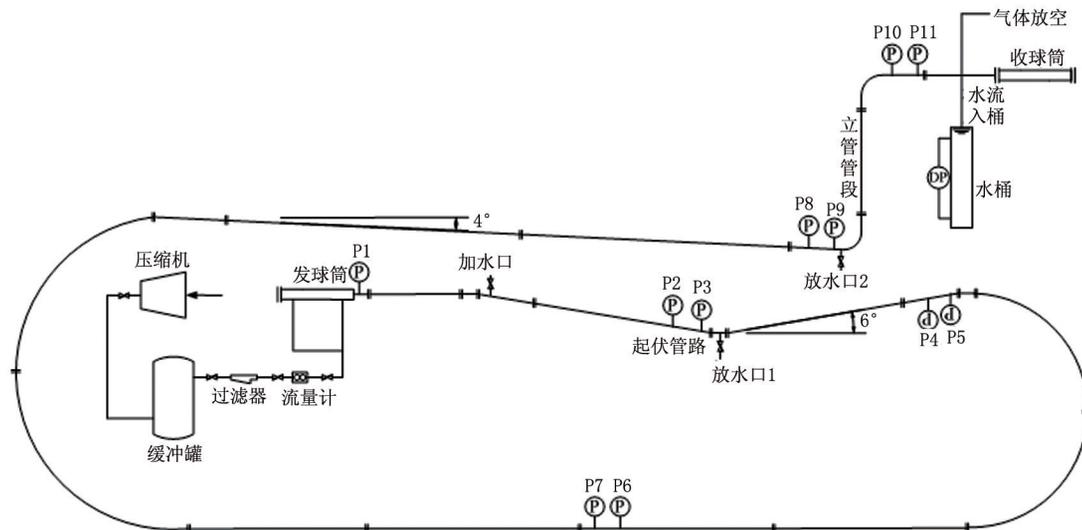


图1 实验环道流程

基金论文: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2011ZX05026)资助。



实验系统的操作介质是空气和水,模拟研究海底天然气凝析液管道清管过程中的气相和凝析液流动规律。整个环道的实验装置由压缩机和气相计量系统、加水口和放水口、压力传感器、压差传感器以及清管器收/发球筒组成。压缩机和气相计量系统能够提供稳定气源,并能精确计量气相流量。液相通过加水口直接注入,可以精确确定加注量。共有11个压力传感器布置在环道上,在环道入口端的压力传感器P1和出口处的压力传感器P11不仅能够测量压力波动,而且能够起到清管器通过指示仪的作用,清管器通过P1开始计时、通过P11清管器运行结束。实验在动态条件下进行,当管线中流体流动达到稳定后开始采集数据,采集时间达到20~50 s后发射清管器<sup>[6]</sup>,清管器到达终端的清管器收球筒后,继续采集数据约60 s后停止采集,关闭压缩机实验结束。

## 2 压力分析

通过文献调研并结合实验室自身条件,最终确定射流清管室内实验过程中清管器皮碗过盈量为3%,实验过程中实验变量为射流清管器旁通率、气相入口流量、积液量。其中清管器旁通率为0%、2%、4%、6%、8%,气相入口流量为100、120、140、160、180 m<sup>3</sup>/h,积液加注量为2、4、6、8 L。

图2是气量为100 m<sup>3</sup>/h、液量为6 L、旁通率为0的清管器清管过程压力波动曲线。管道入口处的压力传感器P1压力突然急剧增高,此时清管器开始发射。P2-P3、P4-P5、P6-P7、P8-P9、P10-P11这5对压力传感器均成对布置且间距极小(仅为20 cm),清管器以极高的速度通过每对传感器,前后两个传感器压力变化间隔时间极短,几乎在同一时刻急剧升高,在图中重叠显示。清管器通过各对压力传感器时,压力值依次升高,压力变化趋势基本相同,最终压力曲线汇合。清管开始时,当清管器进入管道后,由于清管器及其前方液塞对流动的阻碍,流体的补给中断或减少,使得两相流体突然失去或减小驱动力,流动出现短暂的停滞或减小,因此发球筒下游各个测压点的压力持续下降,直到清管器到达测压点,后来流体推动清管器前进,压力快速上升。当清管器离开测压点之后,气相区会在清管器后面形成,在压力波动曲线上表现为清管器过后各测压点的压力变化比较平稳<sup>[6]</sup>。由于立管的存在,液塞势能增加了清管器运行阻力,使清管器到达立管处时需要更高的驱动力,压力积聚上升,直至清管器到达收球筒后管线压力区域稳定。

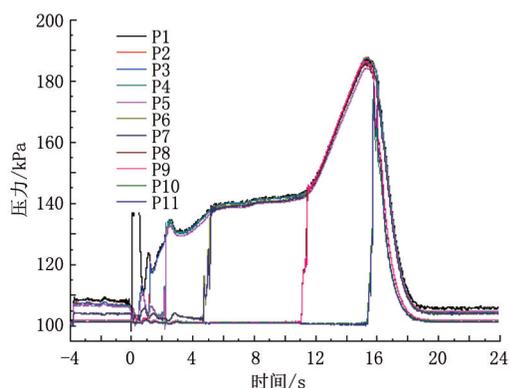


图2 清管期间压力波动曲线

### 2.1 压力曲线特性分析

#### 2.1.1 旁通率对管线压力的影响

由于管线较短,可以通过P1位置的压力变化曲线来表示清管器通过管线后管线压力变化的规律。在气量和液量分别为140 m<sup>3</sup>/h-2 L、140 m<sup>3</sup>/h-6 L、160 m<sup>3</sup>/h-2 L、160 m<sup>3</sup>/h-6 L四个工况下,随着射流清管器旁通率不同,管线压力曲线也发生变化。

(1) 清管器在管线中的运动并不是连续的,有“走走停停”的现象<sup>[7]</sup>。曲线每一个波峰值都代表了清管器的一次停顿或减速,清管器旁通率较小时,清管器基本上只会发生在发射阶段和立管底部发生停顿并积聚压力,在其他位置由于动力充足清管器连续运动,曲线较为平滑;随着旁通率的增加,清管器动力不足,清管器频繁出现停顿现象,曲线峰值出现的频率增加。

(2) 曲线中第一个峰值代表清管器的发射时刻,最后一个峰值代表了清管器通过立管的时刻。清管器发射是一个从静止到运动的过程,静止期间需要克服静摩擦力,所需压力较高;而运动后所需克服的是动摩擦力,所需压力较低,故清管器发射过程出现一个压力的峰值。清管器运行到立管处,进行压力积聚并使压力升高到足以克服清管器摩擦阻力和积液静液柱压差,清管器通过立管后清管器阻力降低、管线压力下降,故清管器通过立管过程也出现一个压力的峰值。

(3) 当气量较大时,高旁通率的射流清管器也可以通过管道,但是压力波动的规律性变差。当气量为160 m<sup>3</sup>/h、旁通率为8%时,在2~8 s之间出现了一个较长的波峰,清管器出现了明显的停顿、卡堵现象。这一方面是由于旁通率过大,造成清管器动力不足,持续的泄压致使憋压过程较长;另一方面也是室内实验条件所致,由于室内空间有限,管道采取法兰连接方式较多,整个环道共有50个法兰,这就增加了清管器运行卡堵的可能性。



### 2.1.2 积液量对管线压力的影响

从气量和旁通率分别为 140 m<sup>3</sup>/h-0%、140 m<sup>3</sup>/h-4%、180 m<sup>3</sup>/h-0%、180 m<sup>3</sup>/h-4% 的四个工况下随积液量不同管线压力曲线的变化可以看出:

(1) 无旁通或低旁通率曲线, 压力曲线变化的峰值主要有三个(起始端两个, 终端一个)。经过分析, 第一个峰值是清管器发射憋压形成的, 第二个峰值是清管器运行到下倾、上倾管底部清扫液塞形成的, 第三个峰值是清管器运行到立管底部较高的静液柱压差形成的, 曲线整体较为平滑。而高旁通率曲线, 由于旁通射流造成清管器动力不足, 清管器频繁停顿, 所以峰值较多且不规律。

(2) 无旁通或旁通率较低时, 积液量较高的管线清管器通过立管时所需的压力值要比积液量较低的管线高得多。旁通率为 0 时, 8 L 积液比 2 L 积液的的压力值分别高出约 45 kPa (气量 140 m<sup>3</sup>/h)、50 kPa (气量 180 m<sup>3</sup>/h); 而清管器存在旁通并且旁通率较高时, 这种压力差值得到了明显的降低, 旁通率为 4% 时, 8 L 积液比 2 L 积液高出的压力值约为 22、20 kPa。这说明在较高旁通率下, 射流清管器对液塞的控制作用是十分高效的。

### 2.2 旁通率对压力峰值的影响

清管器在管线运行过程中, 通过立管时所需压力值最高, 达到清管器运行的最大压力峰值。

从不同气量和液量工况下清管器通过立管时的压力峰值随旁通率的变化关系曲线可以看出, 当射流清管器旁通率在 2%、4%、6%、8% 范围内变化时, 随旁通率的增加, 清管器通过立管时管线的压力峰值降低。这说明射流清管器的旁通射流在清管期间起到了重要的作用, 一方面, 射流气体能够通过气流的剪切携带作用将管线一部分积液带离管线; 另一方面, 射流气体对液塞能够有很好的流型控制作用, 利用液塞充气, 降低立管处液塞的静液柱压差。随着旁通率的增加, 旁通射流作用越剧烈, 清管器运行阻力降低越明显, 通过立管所需的压力值就越低, 这与前面的理论分析完全相符。

然而, 大多数旁通率为 0 的清管器通过立管所需要的压力峰值反而低于旁通率为 2% 的清管器, 这是与分析的清管规律不相符的, 这个现象可以通过分析清管器所受摩擦力来解释。旁通率为 0 的清管器, 也就是平时用的普通清管器, 由于没有旁通泄流的作用, 清管器动力比较充足, 在经过立管时并没有产生停顿而直接通过, 此时清管器所克服的阻力是立管处的静液柱压差阻力及清管器所受的动摩擦力; 当清管器存在旁通率时, 由于旁通泄压的原因, 清管器运行到立管底部时, 可能由于动力不

足而需要在立管底部产生停顿积聚足够的背压来克服阻力, 清管器再次运动所要克服的就是皮碗的静摩擦力和静液柱压差阻力, 而旁通射流对静液柱压差降低值低于静摩擦力与动摩擦力之间的差值, 即造成旁通率为 0 的清管器所受阻力低于旁通率为 2% 的射流清管器, 最终导致了这种反常现象。

从各工况下清管器通过立管时的压力峰值随管线积液量的变化关系曲线可以看出, 在相同气量和清管器旁通率的情况下, 随着积液量的增加清管器通过立管时的压力峰值升高。当清管器运行到立管底部时, 整个管线的积液会全部聚集在清管器下游的立管处, 形成静液柱压差阻碍清管器的运动。而随着积液量的增加, 静液柱压差形成的阻力增大, 清管器需要更高的压力使其继续运行, 所需的压力峰值也就越高。

## 3 结论

(1) 低旁通率射流清管器清管过程中运行较为稳定、停顿较少, 高旁通率清管器由于动力不足导致停顿、减速频率较高。

(2) 射流清管器的旁通射流作用能够很好地控制清管器前方气液两相流型, 实现了清管器及时的降速、泄压效果, 从而降低了清管期间的压力峰值, 且这种降峰值效果随着旁通率的增加而增加。

(3) 随着管道中积液量的增加, 清管器到达立管处所受静液柱压差阻力升高, 射流清管器通过立管时所需的压力升高。

### 参考文献

- [1] Mandke J S, Harry Shen, John Roscoe. Single trip pigging of gas lines during late field life[C]//OTC 14184, Houston: Offshore Technology Conference, 2002.
- [2] 张金成. 清管器清洗技术及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005: 153-158.
- [3] Minami K. Pigging dynamics in two-phase flow pipelines: experiment and modeling[J]. SPE Production Facility, 1995, 10 (4): 225-231.
- [4] Wu H L, Van Spronsen G, Klaus E H. By-pass pig passes test for two-phase pipelines[J]. Oil & Gas Journal, 1996, 94 (42): 73-77.
- [5] 何利民, 郭烈锦, 陈学俊. 通球清管过程中微起伏管内的段塞流特性试验研究[J]. 西安大学学报, 2002, 36 (7): 674-678.
- [6] 肖荣鹤, 董正远. 水平管气液两相流清管瞬态过程试验研究[J]. 油气储运, 2007, 26 (4): 21-25.
- [7] 李玉星, 寇杰, 唐建峰, 等. 多相混输管路清管技术研究[J]. 石油学报, 2002, 23 (5): 101-104.

收稿日期 2015-05-13

(栏目主持 杨 军)

