



液体散货码头工艺管道水击分析

白云香¹, 何正榜¹, 史 军²

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007;

2. 中国石油工程建设有限公司华北分公司, 河北 任丘 062550)

摘要: 在液体散货码头运营过程中, 会因水击压力过大导致管道破裂从而引发码头火灾或爆炸。结合工程实例, 对码头管道水击现象的成因及危害进行分析。采用水击计算公式及专业软件数值模拟, 得出了码头工艺管道在不同工况下的水击压力值, 进而提出了防止码头管道产生水击破坏的预防措施。

关键词: 水击; 工艺管道; 液体散货码头

中图分类号: U 658.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)10-0143-05

Analysis of water hammer in process pipeline of liquid bulk cargo terminal

BAI Yun-xiang¹, HE Zheng-bang¹, SHI Jun²

(1.CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

2.China Petroleum Engineering & Construction Corp. North China Company, Renqiu 062550, China)

Abstract: During the operation of a liquid bulk cargo terminal, excessive water hammer pressure is likely to make the processing pipeline rupture and cause a fire or explosion at the terminal. This article analyzes the causes and hazards of the water hammer phenomenon in the terminal process pipeline combined with engineering examples. Using water hammer calculation formula and professional software numerical simulation, the water hammer pressure values of the terminal process pipeline under different working conditions are obtained, and then preventive measures to prevent the terminal process pipeline from being damaged by water hammer are put forward.

Keywords: water hammer; process pipeline; liquid bulk cargo terminal

在液体散货码头的装卸作业过程中, 通常采用密闭输送工艺系统。密闭输油管道及设备处于一个水力系统中, 一旦运行工况发生突变, 管道内流体由于流速突变引起压力急剧变化, 从而形成水击。水击产生的压力波会在管道系统内往复震荡, 严重破坏管道系统的稳定性^[1]。因此, 预防和控制液体散货码头工艺管道的水击压力对于码头工艺系统的安全运行至关重要。

1 码头工艺系统水击成因及危害

1.1 码头工艺系统组成

液体散货码头主要用于原油、成品油和化工

品等液体物料的装卸船作业。码头装卸工艺系统由装卸臂/复合软管、阀组区及水域工艺管线组成。为方便到港船舶利用船泵扬程直接将物料输送至陆域储罐, 通常在码头附近陆域配套建设储罐区, 并通过工艺管线将后方储罐与前方码头相连。当码头卸船作业时, 利用船泵将船舱内物料泵送至陆域储罐; 码头装船作业时, 则利用库区装船泵将储罐内物料泵送至船舱。

为方便船舶在紧急状况下脱离码头, 在装卸臂外臂设置紧急脱离装置; 为防止水域工艺管线破损导致物料泄漏污染水域, 在水陆域分界处附近设置紧急切断阀。

收稿日期: 2021-06-08

作者简介: 白云香(1982—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事液体散货码头装卸工艺设计工作。

1.2 水击产生的原因

管道水击是管道中瞬变流动产生的压力，流速变化越大、变化时间越短，瞬变压力波动越剧烈。水击发生时，其水击压力波会沿管道向上下游传播，使管道沿线的压力发生波动。水击压力的大小与物料初始流速、管道直径、管道长度、阀门和机泵的特性等因素有关。水击压力较小时，不会影响装卸工艺系统的安全；但当水击压力较大时，则会导致管道损坏甚至爆裂。

根据液体散货码头工艺系统特点，水击现象主要发生在以下几种工况。

1.2.1 装/卸船泵突然停泵

装/卸船泵组因突然断电、机械故障或误操作等原因，导致装/卸船泵组在出口开阀状态下突然停车，泵出口管道中的物料会因为惯性继续沿管道向前流动，导致泵的出口压力不断降低乃至出现负压。当管道中物料的流速减小为零时，物料会在管道中反向流动，当管道中物料的反向流速达到一定程度时，泵出口处的止回阀会快速关闭，导致止回阀处压力急剧升高，从而导致水击的产生。

1.2.2 阀门突然关闭

水域工艺管道通常在码头平台装卸区设置两道阀门，在水陆域交界处附近设置一道紧急切断阀，然后通过陆域管线与库区储罐相连。阀门操作方式通常采用电动或气动操作，在正常作业工况下，管道沿线阀门均处于开启状态；但当断电/气、误操作或出现紧急情况时，阀门会突然关闭，导致管道内物料流速急剧变化，从而导致水击的产生。

1.2.3 装卸臂紧急脱离

根据相关规范要求^[2]，对于大型液体散货码头、装卸甲 A 类和极度危害介质的码头，其装卸臂或软管端部应设置紧急情况下可切断管路并与船舶接口脱离的装置，以便在码头装卸作业出现紧急情况或因潮差等原因导致船舶漂移距离过大时，能使装卸臂/软管与船舶快速脱离。根据相关工程技术要求，紧急脱离装置从启动至装卸臂与油船分离所需时间设计为 5~30 s^[3]。若紧急脱离

速度较慢，则船舶漂移量较大，会拉扯输油臂，导致输油臂损坏或倾倒，严重时损坏码头水工结构；同时由于切断阀门关闭不及时，导致油品泄露污染海洋。因此，装卸臂在接到紧急脱离信号后，紧急脱离装置上的两道切断阀会快速关闭，从而导致水击的产生。

1.3 水击造成的危害

上述工况在装卸作业过程中发生时，会引发水击从而对码头工艺管道系统的正常运行。当水击现象轻微时，水击压力较小，会导致工艺管道及装卸设备振动，产生噪音，并对管道支吊架产生破坏。当水击现象严重时，水击压力较大，导致管道局部超压，造成管道泄漏、管件接头破损或爆裂、阀门破坏、泵机组设备损坏等，严重影响管道的安全性、可靠性和经济性。因此，在进行液体散货码头装卸工艺系统设计时，需要对可能出现的水击工况进行模拟计算分析，采取预防措施控制水击压力不超过工艺系统设计压力。

2 水击理论计算与动态模拟

2.1 水击压力计算

根据水击理论，假设 L 为管道长度(m)， a 为波速(m/s)，如果阀门关闭时间 T_v 小于 $2L/a$ ，这时产生的水击最大，称为直接水击^[4]，这时的水击压力 ΔP (MPa)为：

$$\Delta P = 10^{-6} \rho a \Delta v \tag{1}$$

式中： ρ 为流体密度(kg/m³)； Δv 为流速的瞬间变化量(m/s)。

根据压力波沿管道传播时管道充装过程中液体的质量守恒原理，考虑管道的弹性变形特性和管道的约束条件，对于薄壁管，可以推导出压力波传播速度的计算公式^[4]为：

$$a = 10^3 \cdot \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{KD_i}{Et}}} \tag{2}$$

式中： K 为液体的体积弹性系数(MPa)； E 为管材的弹性模量(MPa)； D_i 为管道内径(mm)； t 为管壁厚度(mm)。

如果阀门关闭时间 T_v 大于 $2L/a$, 这时产生的水击称为间接水击^[5], 一般采用经验公式计算:

$$\Delta P' = \Delta P \cdot \frac{2L/a}{T_v}$$

(3)

式中: $\Delta P'$ 为间接水击压力 (MPa)。

2.2 水击动态模拟

目前, 常用的水击仿真软件为 SPS, 是由德国船级社公司开发的用于单相流管道的软件。在软件中建立工艺管道系统计算模型, 通过对输油泵的启停、阀门的开关模拟管道运行过程中不同工况下、不同时间和不同位置的压力、温度和介质黏度等参数的变化^[6]。由于码头至库区距离较短, 流体在管输过程中发生的温度

和黏度等参数变化不明显, 不会影响管系的安全运行。故仅针对不同工况下的压力变化进行仿真模拟, 以便合理确定管系的设计压力以及阀门的启闭时间。

根据液体散货码头装卸作业特点, 卸船作业时, 码头工艺管线与船舶自带卸船泵距离较短, 水击现象不明显; 装船作业时, 陆域库区装船泵与码头工艺管线距离较远, 可能会发生较严重的水击现象。因此, 液体散货码头工艺系统水击模拟分析可取装船作业工况。码头在装船过程中可能出现水击现象的工况包括: 装船泵事故停泵、紧急切断阀突然关闭和装卸臂紧急脱离。水击计算模型见图 1。

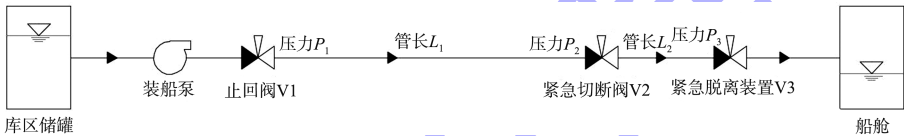


图 1 码头工艺管道水击计算模型

3 工程实例

3.1 工程概况

以山东某 10 万吨级原油码头工程为例, 进行码头工艺管道水击压力分析。码头距离陆域库区约 5 km; 设置 2 根 DN1000 工艺管道进行原油装卸船作业, 管道外径为 1 016 mm, 壁厚 10 mm; 库区设置 3 台装船泵并联运行, 泵出口压力 0.6 MPa, 单泵流量为 3 500 m³/h, 最大装船流量为 1 万 m³/h; 管道设计压力为 1.6 MPa, 背压 0.2 MPa, 设计温度为 60 ℃; 原油密度为 950 kg/m³, 50 ℃ 时黏度为 100 mPa·s。

3.2 水击工况分析

3.2.1 装船泵事故停泵工况

库区装船泵遇紧急状态关停时, 泵出口管道中的物料因为惯性继续沿管道向前流动, 导致泵的出口压力不断降低乃至出现负压。当管道中物料流速减小为零时会发生反向流动, 导致止回阀处压力急剧升高, 从而导致水击的产生。

装船泵急停后因为转动惯量导致不能立刻停止转动, 利用式 (1) 和 (3) 计算泵在不同停转时间下的水击压力, 计算结果见表 1。

表 1 装船泵紧急停泵时泵出口及止回阀处管道压力

泵状态	阀门状态	泵停转时间/s	直接水击压力/MPa	间接水击压力/MPa	说明
急停	全开	≤10.42	-1.63	-	临界时间内停转, 泵出口管道产生负压
急停	全开	30	-	0.56	止回阀处管道压力
急停	全开	40	-	0.42	止回阀处管道压力
急停	全开	50	-	0.34	止回阀处管道压力
急停	全开	60	-	0.28	止回阀处管道压力
急停	全开	90	-	0.19	止回阀处管道压力

由表 1 可知, 当泵停转时间 ≤ 10.42 s 时, 泵出口处管道产生直接水击减压波; 当泵的停转时

间 > 10.42 s 时, 止回阀处产生间接水击增压波, 水击压力小于设计压力, 随着停转时间的延长,

增压波逐渐减小。

利用 SPS 软件模拟装船泵紧急状态关停，泵出口止回阀后管道产生水击现象，管道内压力先降低后增加，最大水击压力为 0.54 MPa，未超过管道设计压力，最终趋于管道背压（图 2）。

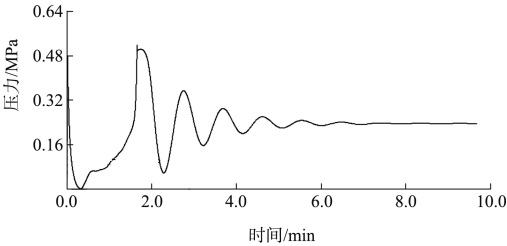


图 2 装船泵紧急停泵时泵出口止回阀后管道压力变化

表 2 紧急切断阀遇紧急状态关闭时管道内压力

泵状态	阀门状态	关阀时间/s	直接水击压力/MPa	间接水击压力/MPa	管道内压力/MPa	说明
开车	V2 关,V1、V3 开	≤9.79	1.63	—	2.23	泵出口压力 0.6 MPa,临界时间内关阀
开车	V2 关,V1、V3 开	15	—	1.06	1.66	泵出口压力 0.6 MPa
开车	V2 关,V1、V3 开	20	—	0.80	1.40	泵出口压力 0.6 MPa
开车	V2 关,V1、V3 开	30	—	0.53	1.13	泵出口压力 0.6 MPa
开车	V2 关,V1、V3 开	40	—	0.40	1.00	泵出口压力 0.6 MPa
开车	V2 关,V1、V3 开	60	—	0.27	0.87	泵出口压力 0.6 MPa
开车	V2 关,V1、V3 开	90	—	0.18	0.78	泵出口压力 0.6 MPa

利用 SPS 软件模拟水陆域分界处紧急切断阀遇紧急状态关闭，管道内产生水击现象，最大水击压力为 1.35 MPa，未超过管道设计压力，之后全线压力不超压（图 3）。

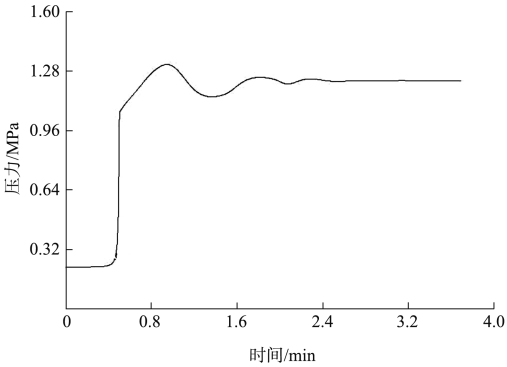


图 3 紧急切断阀关闭、不连锁停泵时管道内压力变化

3.2.2 紧急切断阀突然关闭工况

距码头前沿约 300 m 长的工艺管道上设置水陆域紧急切断阀。当该阀门遇紧急状态关闭时，装船泵未及时停泵，泵出口至该阀门之间的管道瞬间封闭，管道内产生水击现象。

利用式(1)和(3)计算紧急切断阀在不同关闭时间下的水击压力，结果见表 2。

由表 2 可知，当紧急切断阀关闭时间小于 9.79 s 时，管道内产生直接水击，水击压力超过管道设计压力；当紧急切断阀关闭时间 $9.79\text{ s} \leq T_v \leq 15\text{ s}$ 时，产生间接水击，管道内压力超过设计压力；当紧急切断阀关闭时间大于 15 s 时，管道内压力小于设计压力，并随着关阀时间的延长逐渐减小。

3.2.3 装卸臂紧急脱离工况

码头前沿装卸臂外臂上设置紧急脱离装置，在接收脱离信号后快速启动，库区装船泵未及时停泵，泵出口至装卸臂切断阀之间管道瞬间封闭，管道产生水击现象。利用式(1)和(3)计算脱离装置在不同脱离时间下的水击压力，结果见表 3。

由表 3 可知，当装卸臂紧急脱离时间 $\leq 10.42\text{ s}$ 时，管道内产生直接水击，水击压力超过管道设计压力；当装卸臂紧急脱离时间 $10.42\text{ s} < T_v < 17\text{ s}$ 时，产生间接水击，管道内压力超过设计压力；当装卸臂紧急脱离时间 $\geq 17\text{ s}$ 时，管道内压力小于设计压力，并随着脱离时间的延长逐渐减小。

表 3 装卸臂紧急脱离时管道内压力

泵状态	阀门状态	关阀时间/s	直接水击压力/MPa	间接水击压力/MPa	管道内压力/MPa	说明
开车	V3 关,V1、V2 开	≤10.42	1.63	—	2.23	泵出口压力 0.6 MPa,临界时间内脱离
开车	V3 关,V1、V2 开	11	—	1.54	2.14	泵出口压力 0.6 MPa
开车	V3 关,V1、V2 开	13	—	1.30	1.90	泵出口压力 0.6 MPa
开车	V3 关,V1、V2 开	15	—	1.13	1.73	泵出口压力 0.6 MPa
开车	V3 关,V1、V2 开	17	—	1.00	1.60	泵出口压力 0.6 MPa
开车	V3 关,V1、V2 开	20	—	0.85	1.45	泵出口压力 0.6 MPa

利用 SPS 软件模拟装卸臂紧急脱离, 管道内产生水击现象, 最大水击压力在 1.38 MPa, 未超过管道设计压力, 之后全线压力不超压 (图 4)。

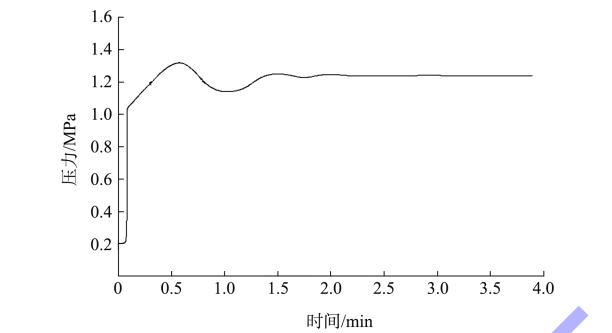


图 4 装卸臂紧急脱离时不连锁停泵管道内压力变化

3.3 水击计算结果分析

基于对上述 3 种工况下的水击工况分析可知, 库区装船泵遇紧急状态关停时, 管道系统产生的水击压力先降低后增加, 最终趋于管道背压; 水陆域紧急切断阀突然关闭导致的水击压力次之; 装卸臂由于允许的脱离时间较短, 当其紧急脱离时, 导致的水击压力最大。因此, 事故停泵工况下的水击压力可作为管线负压设计的依据; 装卸臂紧急脱离工况下的水击压力可作为管线超压设计的依据。

理论计算通常采用经验公式, 计算过程中考虑的参数较少, 且部分参数取值不够精细, 导致计算结果偏大, 应用时需结合工程实际对其进行修正。SPS 软件能考虑更多的介质物性参数、设备及管线参数, 使得软件能够动态仿真模拟流体在管道内的实际运行情况, 水击压力模拟值比理论公式计算值偏小, 模拟结果与类似工程数据吻合较好, 可以作为确定管道设计压力、紧急切断

阀关闭时间、装卸臂紧急脱离时间以及装船泵选型的重要依据。

4 结论

1) 根据液体散货码头装卸船作业特点, 长距离敷设的工艺管道宜采用水击仿真软件动态模拟事故停泵、紧急切断阀急停和装卸臂紧急脱离 3 种工况下的水击影响, 并将模拟结果作为确定管道设计压力、紧急切断阀关闭时间、装卸臂紧急脱离时间以及装船泵选型的重要依据。

2) 对于距离较长的管道须适当降低管道输送流速, 必要时增设水击泄压阀。水击压力与流速的变化量成正比, 通过降低管道内介质的流速来减小流速的变化量, 从而降低管道的水击压力。

3) 在装/卸船泵出口处设置泄压阀。当事故停泵产生水击时, 可通过泄压阀将水击压力泄放至装/卸船泵入口管道。

4) 水陆域紧急切断阀或其它工艺阀门选型时应适当延长阀门关闭时间。切断阀的关闭时间影响单位时间内流速变化梯度, 通过适当延长关阀时间, 可以降低管道水击压力。

5) 根据相关工程技术要求, 装卸臂紧急脱离时间为 5~30 s, 切断阀关闭时间为 5~15 s, 为防止出现水击现象, 装卸臂选型时应尽可能在有限的时间范围内适当延长切断阀关闭时间, 并控制装卸臂内流体流速。

参考文献:

[1] 叶富艳. 输油管道水击分析与防护[J]. 化工管理, 2020(7): 100-101. (下转第 154 页)