

并联贮罐出液受堵问题分析及数值模拟

贡小庚 范刘兵 赵春来 杨 建 李 猛

(中国酒泉卫星发射中心, 酒泉, 732750)

摘要: 针对某加注系统在某任务过程中两台贮罐并联供液时其中一台发生出液受堵问题, 为避免再次发生类似问题, 建立系统物理模型, 通过流体动力学连续方程和动能方程进行分析计算, 找出了导致问题产生的主要原因。利用 FLUENT 仿真软件对两罐汇流区域进行数值模拟和结果分析, 验证了并联贮罐出液受堵问题发生的根本原因, 提出了针对性措施。

关键词: 并联贮罐; 出液受堵; 水头损失; 数值模拟

中图分类号: TV134.2

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2019)S-0107-06

Analytical Calculation and Numerical Simulation of Liquid Output Blockage in Parallel Tanks

GONG Xiaogeng, FAN Liubing, ZHAO Chunlai, YANG Jian, LI Meng

(Jiuquan Satellite Launch Center of China, Jiuquan, 732750, China)

Abstract: Aiming at the liquid output blockage of one tank in two parallel tanks of the filling system during a certain mission, the physical model of the system is established to avoid similar problems, and the main causes of the problem are found by analyzing and calculating of the hydrodynamic continuity equation and kinetic equation. Using FLUENT simulation software to conduct the numerical simulation and result analysis of the confluence area of the two tanks, the root cause of the blockage problem of the outflow of parallel tanks is verified, and the targeted measures are proposed.

Key words: parallel tanks; liquid blockage; head loss; numerical simulation

某加注系统给试验产品加注液体推进剂工艺流程如图 1 所示, 液体从贮罐 1 和贮罐 2 流出, 经阀门、加注泵、流量计以及电动调节阀等工艺设备进入产品贮箱。系统在执行某任务过程中, 准备加注阶段贮罐 1 出液阀(阀门 1)和贮罐 2 出液阀(阀门 2)正常开启, 两台贮罐并联供液。开始加注时首先一台加注泵运行, 流量约 1 000 L/min, 约 7 min 后第二台加注泵启动开始大流量加注, 流量约 2 400 L/min。加注过程中发现只是贮罐 2 液位高度逐渐下降, 贮罐 1 液位高度基本保持不变, 即贮

罐 1 发生出液受堵问题。继续加注至贮罐 2 液位下限值时程序自动关闭阀门 2, 此后贮罐 1 开始出液, 并由此导致加注泵短暂气蚀。

贮罐 1 和贮罐 2 出液阀开始加注前已处于开启状态, 两罐通过回气管路连通压力基本一致, 保持在 0.080~0.095 MPa 范围, 正常状态在加注泵运行后两个贮罐均应该出液且流量基本一致。本文通过工程液体力学^[1]等相关知识, 从理论上进行分析计算, 找出了问题发生的原因, 通过 Fluent 软件^[2-4]进行数值模拟和验证。

收稿日期: 2019-04-09; **修订日期:** 2019-06-20

通信作者: 贡小庚, 男, 高级工程师, E-mail: gongjlc@163.com。

引用格式: 贡小庚, 范刘兵, 赵春来, 等. 并联贮罐出液受堵问题分析及数值模拟[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(增刊): 107-112. GONG Xiaogeng, FAN Liubing, ZHAO Chunlai, et al. Analytical Calculation and Numerical Simulation of Liquid Output Blockage in Parallel Tanks[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(S): 107-112.

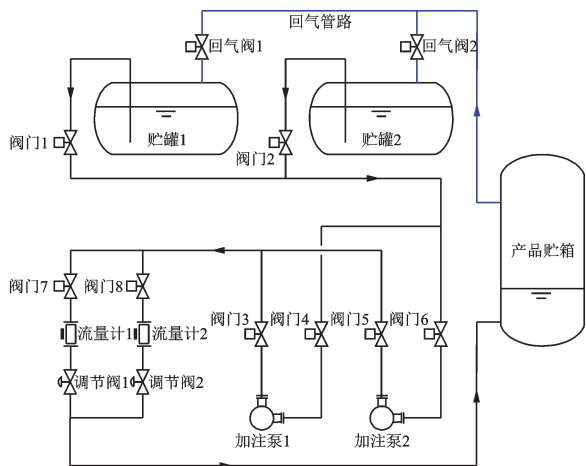


图1 试验产品加注液体推进剂工艺流程图

Fig. 1 Flow chart of test product filling liquid propellant

1 理论分析计算

1.1 系统物理模型

系统物理模型如图2所示,贮罐1、2结构形式和尺寸相同,出液管内径 $d_1=d_2=150$ mm;弯管弯曲半径均为500 mm,出液主管内径 $d_0=200$ mm。相对位置尺寸见图2。

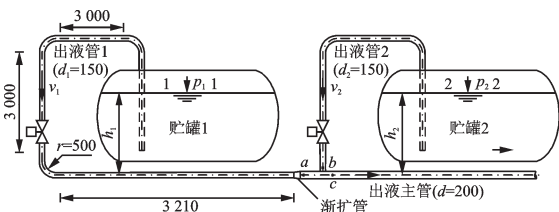


图2 系统物理模型

Fig. 2 Physical model of system

1.2 分析计算

1.2.1 贮罐1出液情况

由流体动力学可知,流体总是从总能量(位能、压能及动能之和)较大的过流断面流向总能量较小的过流断面,总能量大小决定了流体的运动方向。对贮罐1以渐扩管出口 a 点断面为参考对象,当 a 点断面总能量小于贮罐1液面总能量一定量值时贮罐1开始出液,反之当 a 点断面总能量大于贮罐1液面总能量某一量值时贮罐1则会进液。这里考虑贮罐出液情况,出液时 a 点断面总能量模型通过以下计算得到。计算前,进行以下假设:

(1)系统液体推进剂为不可压缩流体,且密度、粘度等参数不受温度影响;

(2)系统准备加注阶段已完成充分灌泵,贮罐出液管路和出液主管路充满液体,无气体存在。

以贮罐1液面(1-1断面)和 a 点断面两过流断面为计算断面,出液主管中心轴线所在水平面为基准面,建立伯努利^[5]方程如下

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = h_a + \frac{p_a}{\rho g} + \frac{V_a^2}{2g} + h_{L1-a} + h_{J1-a} \quad (1)$$

式中: h_1 为贮罐1液面到基准面的距离, h_a 为 a 点断面到基准面的距离, p_1 为贮罐1压力, p_a 为 a 点断面压力, V_1 为贮罐1液面下降速度,考虑贮罐容积很大,可近似认为 $V_1=0$, V_a 为 a 点断面液体流速, h_{L1-a} 为1-1断面至 a 点断面的沿程水头损失, h_{J1-a} 为1-1断面至 a 点断面的局部水头损失, ρ 为液体推进剂密度。

1-1断面至 a 点断面沿程包括3个90°弯管、1个阀门、1个渐扩管以及直管段。系统阀门为球阀,全开时流阻很小可当作同径直管段。对1-1断面至 a 点断面管路沿程水头损失和局部水头损失分别计算。

(1) 管路沿程水头损失 h_{L1-a}

贮罐1出液管内径 d_1 为0.15 m,液体运动粘度 $\nu = 0.63 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (10 °C时),以临界雷诺数 $Re = 2000$ 为标准,可求得管内液体层流和紊流两种流态的临界流速为 $6.93 \times 10^{-3} \text{ m/s}$,对应流量约为7.34 L/min。贮罐容积约80 m³(即1-1断面很大),以临界流速出液,加注过程中是难以观察到贮罐液位高度下降的,即可认为贮罐没有出液。因此只要出液管流量大于临界值,管内液体一定为紊流状态,其管路沿程水头损失如式(2)所示

$$h_{L1-a} = \lambda \frac{L_1}{d_1} \frac{v_1^2}{2g} \quad (2)$$

式中:沿程水力摩阻系数 λ 与出液管流速 v_1 相关^[6],根据加注系统管道内壁相对粗糙度,参照流体经验公式和计算水力摩阻莫迪图,取 $\lambda = 0.015$; L_1 为1-1断面至 a 点断面沿程距离,经测算,除去弯头及渐扩管长度, $L_1 = 12.57 \text{ m}$ 。代入式(2),可得1-1断面至 a 点断面的沿程水头损失如式(3)所示

$$h_{L1-a} = \frac{1.26}{2g} v_1^2 \quad (3)$$

(2) 管路局部水头损失 h_{J1-a}

液体在1-1断面至 a 点断面的局部水头损失主要发生在出液管入口、弯管以及渐扩管位置。计算方法为

$$h_{J1-a} = \xi_1 \frac{v_1^2}{2g} + 3 \times \xi_2 \frac{v_1^2}{2g} + \xi_3 \frac{v_1^2}{2g} \quad (4)$$

式中: ξ_1 为出液管入口处局部阻力系数,查表得 $\xi_1 = 1.0$; ξ_2 为90°弯管局部阻力系数,取决于弯曲半径与管径之比,查表得 $\xi_2 = 0.36$; ξ_3 为渐扩管局部阻力系数,与渐扩管的扩散角、长度以及进出口截面积相关,经计算 $\xi_3 = 0.3$ 。代入式(4),可得1-1断面至 a 点断面的局部水头损失为

$$h_{J1-a} = \frac{2.38}{2g} v_1^2 \quad (5)$$

(3) a 点断面总能量 W_a 数学模型

将式(3,5)代入式(1),经整理可得 a 点断面总能量 W_a 数学模型如下

$$W_a = h_a + \frac{p_a}{\rho g} + \frac{V_a^2}{2g} = h_1 + \frac{p_1}{\rho g} - \frac{3.64}{2g} v_1^2 \quad (6)$$

1.2.2 贮罐2出液情况

对贮罐2以出液管 b 点断面为参考对象,贮罐2液面(2-2断面)至 b 点断面沿程包括2个 90° 弯管、1个阀门和直管段。与贮罐1出液情况的分析方法相同,可得到2-2断面至 b 点断面管路沿程水头损失、局部水头损失计算公式以及 b 点断面总能量 W_b 数学模型。

2-2断面至 b 点断面管路直管段 $L_2 = 9.2$ m,沿程水头损失为

$$h_{L2-b} = \frac{0.92}{2g} v_2^2 \quad (7)$$

2-2断面至 b 点断面局部水头损失主要发生在出液管入口和弯管位置。管路局部水头损失为

$$h_{J2-b} = \frac{1.72}{2g} v_2^2 \quad (8)$$

b 点断面总能量 W_b 数学模型为

$$W_b = h_b + \frac{p_b}{\rho g} + \frac{V_b^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} - \frac{2.64}{2g} v_2^2 \quad (9)$$

1.2.3 贮罐出液受堵原因分析

由式(6,9)得到 a 点与 b 点总能量之差为

$$W_a - W_b = (h_1 - h_2) + \frac{p_1 - p_2}{\rho g} - \left(\frac{3.64}{2g} v_1^2 - \frac{2.64}{2g} v_2^2 \right) \quad (10)$$

加注前 $h_1 = h_2 = 2.4$ m,两贮罐通过回气连通,理论上 $p_1 = p_2 = 0.09$ MPa。假设开始加注时贮罐1、2同时正常出液,流量相同均为500 L/min(对应流速 $v_1 = v_2 = 0.47$ m/s),由式(10)可知 $W_a - W_b < 0$,即 b 点总能量高于 a 点总能量, b 点液体将会呈现向 a 点流动趋势,这与贮罐1以流量500 L/min正常出液是相悖的,因此贮罐1、2出液流量分配是 $Q_1 < Q_2$,一定条件下贮罐1出液流量很小甚至静止,即出液受堵。从前面计算过程可知,导致两罐出液流量不均或其中一个罐不出液的根本原因是由管路水头损失不同所致。由于系统各管件的实际水力摩阻与计算时取的经验系数存在一定差异,故前面计算过程求得的管路水头损失并不一定准确,但不影响问题机理分析的正确性。另外,由于各管件存在局部流阻,液体在管内的流动过程中参数并不恒定,很难保证两股液体的压力、

流速等参数的一致性,在汇流区域管壁附近会形成分离区,使流体在管道内产生二次流动,从而在汇流区域造成较大的能量和总压损失。

2 数值模拟^[7-11]

2.1 汇流区域几何模型

贮罐1和贮罐2出液管汇流区域几何模型如图3所示,包括一个水平管路入口(Inlet 1)、一个垂直管路入口(Inlet 2)以及一个水平出口(Outlet)。

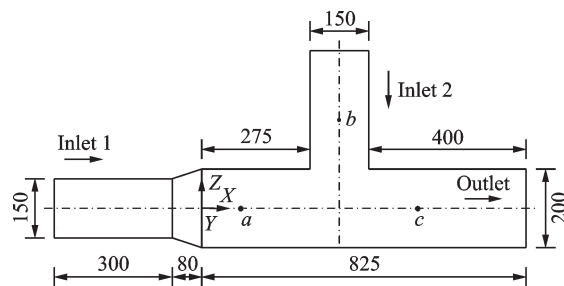


图3 贮罐1和贮罐2汇流位置几何模型

Fig. 3 Geometric model of confluence location of tanks 1 and 2

2.2 网格模型

利用前处理软件GAMBIT生成网格,用Fluent作为CFD计算求解器,根据图3所示的几何模型参数绘制出汇流区域几何体,划分网格间距1 mm,体网格单元22 154个,创建的三维物理模型如图4所示。模型中包含入口1(Inlet 1)、入口2(Inlet 2)、出口(Outlet)以及管壁(Wall)4种边界类型。

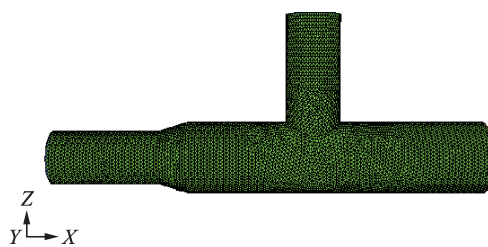


图4 汇流区域几何体网格模型

Fig. 4 Geometric mesh model of confluence region

2.3 求解模型选择

数值模拟采用三维稳态计算,求解条件采用非耦合求解法(Segregated)、隐式算法(Implicit)、定常流动(Steady)、绝对速度(Absolute)。采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型,模拟过程中动量方程、能量方程、 $k-\epsilon$ 方程的离散采用二阶迎风格式。设置收敛精度为0.001,迭代60次。

2.4 实际条件下数值模拟结果

实际条件下贮罐1在初速加注和全速加注过程中均处于出液受堵状态。

2.4.1 初速加注出液受堵

初速加注(1 000 L/min)过程边界条件设置如表 1 所示。

表 1 初速加注边界条件设置

Tab. 1 Setting of boundary conditions for initial-speed filling

边界	类型	速度/(m·s ⁻¹)
Inlet 1	Velocity inlet	0.00
Inlet 2	Velocity inlet	0.94
Outlet	Outflow	—
Wall	Wall	—

汇流区域几何体呈 Y 轴对称,取 Y=0 切平面进行观测。初速加注受堵模拟计算结果 Y=0 切平面如图 5,6 所示。

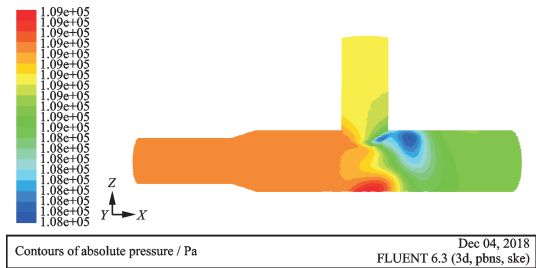


图 5 初速加注受堵时压力分布云图

Fig. 5 Cloud map of pressure distribution of initial-speed filling blocked

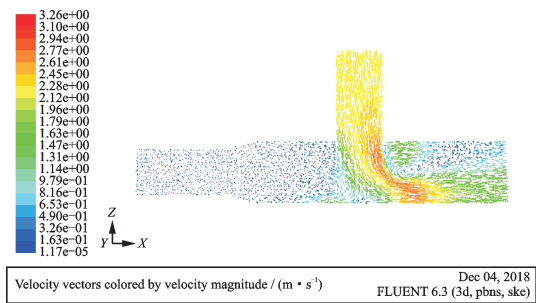


图 6 初速加注受堵时速度矢量图

Fig. 6 Velocity vector diagram of initial-speed filling blocked

2.4.2 全速加注出液受堵

全速加注(2 400 L/min)边界条件设置如表 2 所示。全速加注受堵模拟计算结果 Y=0 切平面如图 7,8 所示。

表 2 全速加注边界条件设置

Tab. 2 Setting of boundary conditions for full-speed filling

边界	类型	速度/(m·s ⁻¹)
Inlet 1	Velocity inlet	0.00
Inlet 2	Velocity inlet	2.26

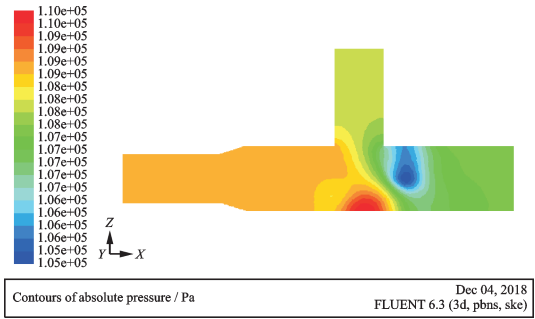


图 7 全速加注受堵时压力分布云图

Fig. 7 Cloud map of pressure distribution of full-speed filling blocked

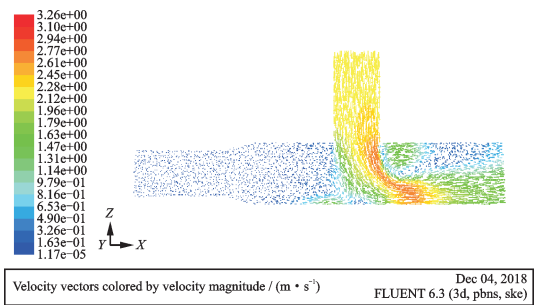


图 8 全速加注受堵时速度矢量图

Fig. 8 Velocity vector diagram of full-speed filling blocked

选择 X=500 切平面,得到出液主管截面上的速度矢量图,如图 9 所示。

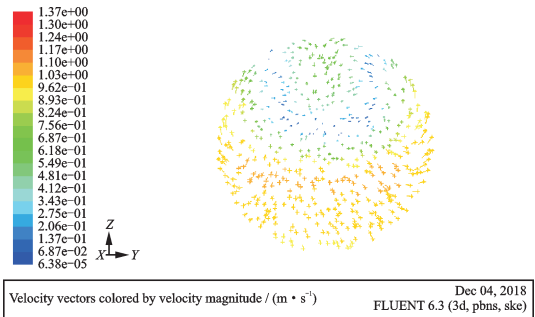


图 9 出液主管截面速度矢量图

Fig. 9 Velocity vector diagram of outlet main pipeline section

2.4.3 分析讨论

从图 5 和图 7 可得到汇流区域不同工况时 Inlet 1(a 点)、Inlet 2(b 点)、Outlet(c 点)、旋涡区以及最高压力区平均压力值如表 3 所示。

表 3 汇流区域参考位置平均压力值

Tab. 3 Average pressure at reference position in confluence area

工况	a 点	b 点	c 点	旋涡区	最高压力区
初速出液受堵	108 822	108 706	108 591	108 205	108 938
全速出液受堵	108 877	108 073	107 603	105 254	109 717

根据表3和图5—9可以得出以下结论:

(1)贮罐1受堵过程中出液管1压力基本保持不变,等于流体静止时的静压力;

(2)出液管2(Inlet 2)和出液主管(Outlet)压力与流量相关,流量越大静压力越小,从而对贮罐1出液状态产生影响;

(3)在贮罐1受堵贮罐2出液过程中,出液主管靠近出液管2区域产生了较强烈的涡流区和二次流动(如图9所示),形成低压区,流量越大压力越低;

(4)最高压力区产生于正对出液管2出液主管底部位置,流量越大压力越高。

2.5 措施及验证

由上文系统物理模型不难理解,由于贮罐1距离出液主管比贮罐2远,且多一个弯管和渐扩管的水头损失,因此两贮罐出液流量一致时贮罐1管路水头损失一定大于贮罐2。根据式(10)可知,若要实现 $v_1=v_2$ 且 a 点处总能量等于 b 点处总能量,理论上可采取2种措施:一是增大贮罐1和贮罐2的压力差,使 p_1 大于 p_2 一定值;二是增大贮罐1和贮罐2的液位高度差,使 h_1 大于 h_2 一定值。考虑产品贮箱加注需要两贮罐推进剂,加注前两贮罐通常都是满的,即基本上 h_1 等于 h_2 ,故只可采取前一种措施。

2.5.1 初速加注两贮罐正常出液压力条件

初速加注(1 000 L/min)边界条件设置如表4所示。

表4 初速加注边界条件设置

Tab. 4 Setting of boundary conditions for initial-speed filling

边界	类型	压力/Pa
Inlet 1	Pressure inlet	128 876
Inlet 2	Pressure inlet	108 837
Outlet	Outflow	—
Wall	Wall	—

初速加注两贮罐正常出液模拟计算结果 $Y=0$ 切平面如图10,11所示,表明贮罐1压力 p_1 压力值提高约0.02 MPa可以保证初速加注时两贮罐正常出液。

2.5.2 全速加注两贮罐正常出液压力条件

全速加注(2 400 L/min)边界条件设置如表5所示。全速加注两贮罐正常出液模拟计算结果 $Y=0$ 切平面如图12,13所示,表明贮罐1压力 p_1 压力值提高约0.02 MPa可以保证全速加注时两贮罐正常出液。

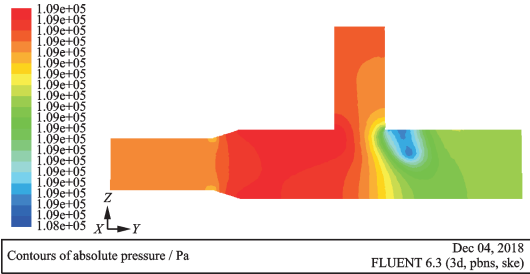


图10 初速加注两贮罐正常出液压力分布云图

Fig. 10 Cloud map of normal liquid output pressure distribution of two tanks with initial-speed filling

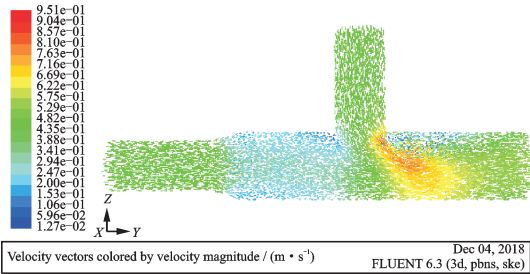


图11 初速加注两贮罐正常出液速度矢量图

Fig. 11 Velocity vector diagram of normal liquid output of two tanks with initial-speed filling

表5 初速加注边界条件设置

Tab. 5 Setting of boundary conditions for full-speed filling

边界	类型	压力/Pa
Inlet 1	Pressure inlet	129 227
Inlet 2	Pressure inlet	108 947
Outlet	Outflow	—
Wall	Wall	—

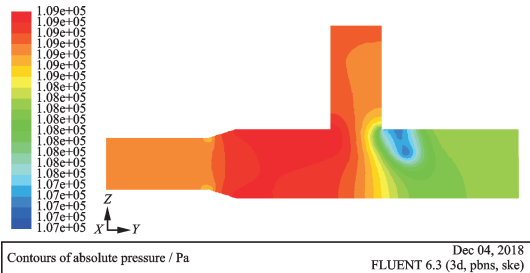


图12 全速加注两贮罐正常出液压力分布云图

Fig. 12 Cloud map of normal liquid output pressure distribution of two tanks with full-speed filling

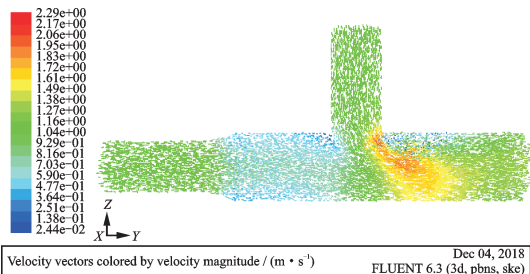


图13 全速加注两贮罐正常出液速度矢量图

Fig. 13 Velocity vector diagram of normal liquid output of two tanks with full-speed filling

3 结 论

并联贮罐出液受堵问题在工程中并不少见,例如多节推进剂槽车同时转注过程中常发生部分槽车出液受堵问题。通过理论计算分析和数值模拟可知,这是由于管路水头损失存在差异以及汇流区域扰动等综合因素共同作用导致的。贮罐出液不均或受堵问题对系统正常完成工作带来不利影响,应当尽量保证并联贮罐出液管路的流量均匀。为避免或减少此类问题发生,除提高贮罐压力这一应急措施外,还应该在设计、选材、制造等方面注重优化和提高,尽量减小水头损失;同时科学合理使用管理系统。

(1)优化系统管道设计,如适当增大弯管弯曲半径、减少渐扩管的扩散角等,以减小系统局部水头损失;

(2)提高管道选材等级,选用内表面光滑粗糙度低的管材,以减小管道沿程水头损失;

(3)强化管道制造施工标准,提高管道焊缝质量;

(4)优化工艺流程及参数,采取对远端贮罐优先打开出液阀、合理调节流量等方法保证工作过程中贮罐正常出液。

参考文献:

- [1] 汪楠,陈桂珍. 工程流体力学[M]. 北京:石油工业出版社,2007.
WANG Nan, CHEN Guizhen. Engineering fluid mechanics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.
- [2] 韩占忠,王敬,兰小平,等. 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2010:243-258.
HAN Zhazhong, WANG Jing, LAN Xiaoping, et al. Example and application of fluid engineering simulation [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2010:243-258.
- [3] 王福军. 计算流体动力学分析 CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
WANG Fujun. Computation fluid dynamics analysis - theory and application of CFD software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.

- [4] 江帆,黄鹏. Fluent 高级应用与实例分析[M]. 北京:清华大学出版社,2008.
JIANG Fan, HUANG Peng. Fluent advanced applications and case studies[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [5] 吕宏兴,裴国霞,杨玲霞. 水力学[M]. 北京:中国农业出版社,2002.
LÜ Hongxing, PEI Guoxia, YANG Lingxia. Hydraulics[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2002.
- [6] 华绍增,杨学宁. 实用流体阻力手册[M]. 北京:国防工业出版社,1985.
HUA Shaozeng, YANG Xuening. Practical fluid resistance manual[M]. Beijing: National Defence of Industry Press, 1985.
- [7] 巩启涛,杨俊红,韩奎,等. 大管径 T 型三通数值模拟及局部阻力特性分析[J]. 动力工程学报, 2016, 36(9):753-758.
GONG Qitao, YANG Junhong, HAN Kui, et al. Characteristic analysis on the flow and local resistance in large pipe tees[J]. Journal Chinese Society of Power Engineering, 2016, 36(9):753-758.
- [8] 魏显达,王为民,徐建普. 基于 Fluent 的三通数值模拟及分析[J]. 当代化工, 2011, 40(2):165-167.
WEI Xianda, WANG Weimin, XU Jianpu. Numerical simulation and analysis of fluid in three-way connection pipe based on Fluent software[J]. Contemporary Chemical Industry, 2011, 40(2):165-167.
- [9] 石喜,吕宏兴,朱德兰,等. PVC 三通管水流阻力与流动特征分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1):73-79.
SHI Xi, LÜ Hongxing, ZHU Delan, et al. Flow resistance and characteristics of PVC tee pipes[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2013, 44(1):73-79.
- [10] GUO B Y, TIM A G L, DAVID F F. CFD simulation of precession in sudden pipe expansion flows with low inlet swirl[J]. Applied Mathematical Modeling, 2002, 26(1):1-15.
- [11] 贺益英,赵懿珩,孙淑卿,等. 弯管局部阻力系数的试验研究[J],水利学报, 2003, 34(11):54-58.
HE Yiyi, ZHAO Yijun, SUN Shuqing, et al. Experimental study on local loss coefficient of bend in pipeline[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(11):54-58.

(编辑:张彤)