

原油管输泵汽蚀余量校核计算及思考

于泽洋¹ 苗忠超² 李强¹ 尚煜森¹

(1. 山东港口日照港油品码头有限公司, 山东 日照 276800)

(2. 山东港口日照港山钢码头有限公司, 山东 日照 276800)

摘要: 对于离心泵, 当叶轮进口处某点压力降低到输送液体的汽化压力 (饱和蒸气压) 时, 就有一部液体汽化, 生成气泡。蒸汽泡被液流带到压力较高的区域时迅速凝结。在凝结过程中气泡周围的液体就以高速向气泡中心运动, 从而产生严重的水击现象。水击的地方产生非常巨大的瞬时压力, 如气泡紧贴在叶轮或其他部分的金属表面上, 这里就会受到冲击, 这种液体的汽化、凝结、水击的综合就称为汽蚀现象。为避免汽蚀现象发生, 流体在进入泵组前应具备足够汽蚀余量, 汽蚀余量分为两个方面: 一是与安装方式有关, 称有效汽蚀余量 (装置汽蚀余量) $NPSHa$, 它是指流体流经吸入管路到达泵吸入口后高出液体饱和蒸气压的那部分能量, 是可利用的汽蚀余量, 与现场实际工况有关。二是与泵体本身有关, 称必需汽蚀余量 $NPSHr$, 它是流体由泵吸入口至泵内压力最低处 (通常发生在叶轮背面入口稍后的 K 处, 如图 2 所示) 的压力降低值, 是泵组的固有参数, 与吸入管路、流体性质等无关。要确保泵组在运行中不汽蚀, 必须在安装上保证 $NPSHa > NPSHr$ 。

关键词: 原油管输泵; 汽蚀现象; 汽蚀余量

1 有效汽蚀余量 $NPSHa$ 计算

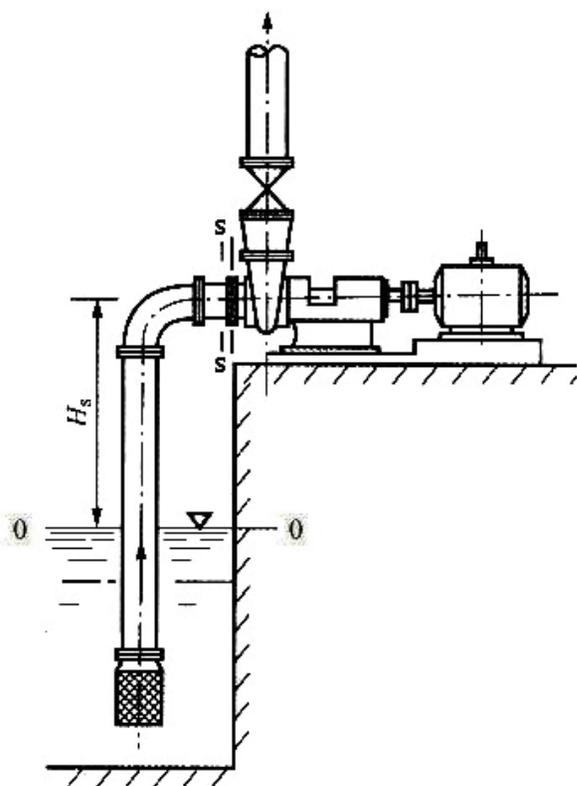


图 1 流体进入泵前流动过程

如图 1 所示, 有效汽蚀余量 $NPSHa$ 发生在吸入池至泵吸入口过程中, 列出吸入池液面 0-0 和离心泵吸

入口 S-S 之间伯努利能量守恒方程。

$$z_0 + \frac{p_0}{\rho g} + \frac{v_0^2}{2g} = z_s + \frac{p_s}{\rho g} + \frac{v_s^2}{2g} + h_{0-s}$$

z ——吸入池液面和泵入口中心标高;

p ——吸入池液面和泵入口流体压力;

v ——吸入池液面和泵入口流体平均流速;

h_{0-s} ——0-0 断面至 S-S 断面吸入管路水力损失;

ρ ——流体密度。

其中 $Z_0=0$, $V_0=0$, P_0 为大气压, $Z_s=H_s$ 泵的安装高度。

$$\frac{p_s}{\rho g} = \frac{p_0}{\rho g} - z_s - \frac{v_s^2}{2g} - h_{0-s}$$

由泵的有效汽蚀余量为流体到达泵吸入口时, 高出饱和蒸气压 (P_v) 的能量。

$$NPSHa = \frac{p_s}{\rho g} + \frac{v_s^2}{2g} - \frac{p_v}{\rho g}$$

带入 $\frac{p_s}{\rho g}$

$$NPSHa = \frac{p_0}{\rho g} - \frac{p_v}{\rho g} \pm H_s - h_{0-s}$$

其中 H_s 为泵的安装高度，吸上为负号，灌注为正号。

可见 $NPSHa$ 与吸入管路参数和管线内流体流速有关，与泵的结构无关。

2 必需汽蚀余量计算

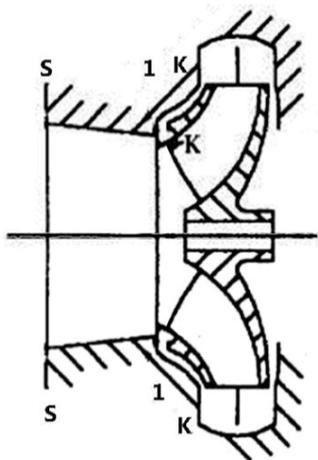


图2 流体进入泵吸入口后流动过程

如图2所示，必需汽蚀余量 $NPSHr$ 发生在泵吸入口之后过程中，泵的吸入口 S-S 断面至 1-1 断面，由伯努利能量守恒方程

$$z_s + \frac{p_s}{\rho g} + \frac{v_s^2}{2g} = z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + h_{s-1}$$

液流由 1-1 至 K-K 断面，由伯努利能量守恒方程（需注意流体在 K 点处，已不是直流运动，而是一方面随着叶轮做圆周运动 ω ，另一方面流体沿着叶片做相对运动 μ ）

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\omega_1 - \mu_1^2}{2g} = z_k + \frac{p_k}{\rho g} + \frac{\omega_k - \mu_k^2}{2g} + h_{1-k}$$

带入 S-S 断面至 1-1 断面伯努利方程得出：

$$\frac{p_s}{\rho g} + \frac{v_s^2}{2g} = z_k - z_s + \frac{p_k}{\rho g} + \frac{\omega_k - \mu_k^2}{2g} + \frac{\omega_1 - \mu_1^2}{2g} + \frac{v_1^2}{2g} + h_{s-k}$$

左侧减掉饱和蒸气压 P_v

$$\frac{p_s}{\rho g} + \frac{v_s^2}{2g} - \frac{p_v}{\rho g} = z_k - z_s + \frac{p_k - p_v}{\rho g} + \frac{\omega_k - \mu_k^2}{2g} + \frac{\omega_1 - \mu_1^2}{2g} + \frac{v_1^2}{2g} + h_{s-k}$$

整理：

$$\frac{p_s}{\rho g} + \frac{v_s^2}{2g} - \frac{p_v}{\rho g} = \frac{p_k - p_v}{\rho g} + z_k - z_s + \frac{\omega_k - \mu_k^2}{2g} + \frac{\omega_1 - \mu_1^2}{2g} + \frac{v_1^2}{2g} + h_{s-k}$$

其中取 $NPSHa = \frac{p_s}{\rho g} + \frac{v_s^2}{2g} - \frac{p_v}{\rho g}$ ， $NPSHr = z_1 - z_s + \frac{\omega_1 - \mu_1^2}{2g} + \frac{\omega_k - \mu_k^2}{2g} + \frac{v_1^2}{2g} + h_{s-1}$ ，

得出：

$$NPSHa = \frac{p_k - p_v}{\rho g} + NPSHr$$

可见必需汽蚀余量 $NPSHr$ ，与泵组结构有关，而与吸入管路、流体性质等参数无关。

分析得出：为防止叶轮内发生汽蚀现象，必需使泵入口具有足够的有效汽蚀余量 $NPSHa$ ，以便使得流体在泵内流动压力下降 $NPSHr$ 后，依然能让流体压能 P_k 高于流体饱和蒸气压 P_v 。

泵在运行时是否发生汽蚀是由外部条件即吸入装置和泵本身特性等因素共同决定的，当 $NPSHa$ 大于 $NPSHr$ 时泵不会发生汽蚀。设计泵时，依据给定的使用条件设计泵的汽蚀余量 $NPSHr$ ，使其必须小于按使用条件确定的装置汽蚀余量 $NPSHa$ ，另外用户也要依据给定的泵汽蚀余量 $NPSHr$ 确定泵的使用安装条件，通常在给定整套系统有效汽蚀余量条件下，有效汽蚀余量（ $NPSHa$ ）应比泵所必需汽蚀余量（ $NPSHr$ ）大 10% 的裕量，并且有效汽蚀余量（ $NPSHa$ ）与额定点的必需汽蚀余量（ $NPSHr$ ）之差应大于 1.0m（即 $NPSHa - NPSHr \geq 1.0m$ ）。

3 油库三期给油泵（TSY250-200-520）汽蚀余量校核

3.1 相关参数

原油来自上游罐组，受罐液位、地形高差、输送油品沿程摩阻及局部摩阻损失影响，给油泵入口压力变化工艺计算参数选取如下：

①原油罐液位：LL=2.0m，L=2.25m，HH=19.98m；

②地形高差：经与总图及油罐配管结合，罐接管高出给油泵进口按 0.3m 考虑；

③沿程摩擦及局部摩阻：最远罐组距离输油站按 1km，局部摩阻按沿程摩限 5% 考虑；

④给油泵前局部压损：主要为过滤器压损，按照其发生堵塞时报警值 0.03MPa 选取。

3.2 校核计算

$$NPSHa = \frac{p_0}{\rho g} - \frac{p_v}{\rho g} \pm H_s - h_{0-s}$$

其中：

p_0 为大气压力 0.1MPa；

p_v 为原油饱和蒸气压按 0.01~0.025MPa；

ρ 为密度 839~929kg/m³；

H_s 为泵的安装高度，罐组高出给油泵进口 0.3m，

$H_s = +0.3$ 。

$\sum h_{0-s} = \sum h_{沿程阻力损失} + \sum h_{局部阻力损失}$ ，其中局部阻力损失为 5% 的沿程阻力损失

$$h_{0-s} = h_{沿程阻力损失} + h_{局部阻力损失} = 1.05h_{沿程阻力损失} = 1.05\lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

其中:

$$\lambda = \frac{64}{R^e}, \text{沿程阻力系数, } R^e \text{ 为雷诺系数;}$$

L 为管线长度 1km;

D 为管道内径 DN500;

v 为平均流速, $v = \frac{4Q}{\pi D^2}$, Q 流量 730m³/h。

① p_v 为原油饱和蒸气压按 0.01MPa, ρ 为密度 839kg/m³

$$NPSHa = \frac{p_0}{\rho g} - \frac{p_v}{\rho g} + H_s - h_{0-s} = 7.83\text{m}$$

② p_v 为原油饱和蒸气压按 0.025MPa, ρ 为密度 929kg/m³

$$NPSHa = \frac{p_0}{\rho g} - \frac{p_v}{\rho g} + H_s - h_{0-s} = 5.12\text{m}$$

综合①、②故选型时有效汽蚀余量 NPSHa 按 5m 考虑。

4 汽蚀余量试验方法

通过试验可以获取离心泵必需汽蚀余量数值, 汽蚀试验通过改变泵的吸入装置条件, 达到泵即将开始汽蚀时的临界条件, 通过装置汽蚀余量 NPSHa 间接求得泵的必需汽蚀余量 NPSHr。依据国标 GB/T3216-2016《回转动力泵水力性能验收试验 1 级、2 级和 3 级》中关于汽蚀余量试验方法规定, 逐渐降低 NPSH 直至恒定流量下扬程下降 3%, 此时测试系统的装置有效汽蚀余量 NPSHa 为泵当前流量点的必需汽蚀余量 NPSHr。

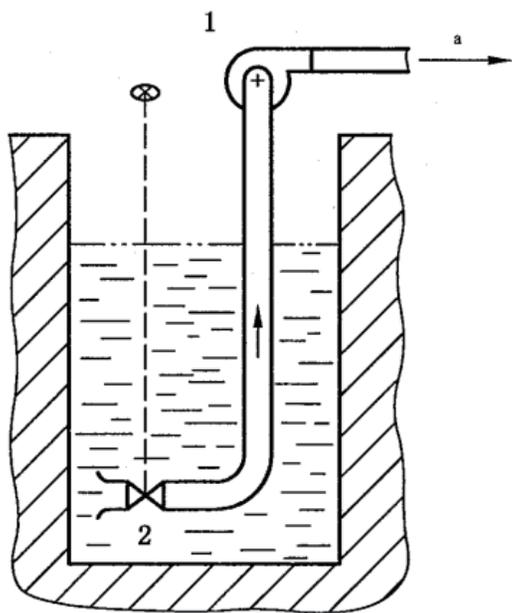


图 3 泵汽蚀余量

试验中, 试验水池部分与大气相通。为了加速水泵汽蚀现象的出现, 通常采用的方法是改变吸入管路系统阻力。通过吸入管路系统阻力改变来影响吸入口压力值, 这一个方法直观的体现就是调节入口阀门的开度, 当入口阀门开度小到一定程度, 离心泵就形成了汽蚀现象, 达到临界状态, 此时 $NPSHa = NPSHr$ 。

5 结语

泵制造厂家, 依据有效汽蚀余量 (NPSHa) 应比泵所必需汽蚀余量 (NPSHr) 大 10% 的裕量, 并且有效汽蚀余量 (NPSHa) 与额定点的必需汽蚀余量 (NPSHr) 之差应大于 1.0m (即 $NPSHa - NPSHr \geq 1.0\text{m}$), 在汽蚀余量试验后通过比对设计院给定的 NPSHa, 确定是否需要调整泵的本身结构参数, 以适应设计要求, 通常采用以下方法降低 NPSHr。

①改进泵的吸入口至叶轮附近的结构设计。增大过流面积; 增大叶轮盖板进口段的曲率半径, 减小液流急剧加速与降压; 适当减少叶片进口的厚度, 并将叶片进口修圆, 使其接近流线形, 也可以减少绕流叶片头部的加速与降压; 提高叶轮和叶片进口部分表面光洁度以减小阻力损失; 将叶片进口边向叶轮进口延伸, 使液流提前接受做功, 提高压力;

②采用前置诱导轮, 使液流在前置诱导轮中提前做功, 以提高液流压力;

③采用双吸叶轮, 让液流从叶轮两侧同时进入叶轮, 则进口截面增加一倍, 进口流速可减少一倍;

④设计工况采用稍大的正冲角, 以增大叶片进口角, 减小叶片进口处的弯曲, 减小叶片阻塞, 以增大进口面积; 改善大流量下的工作条件, 以减少流动损失。但正冲角不宜过大, 否则影响效率;

⑤采用抗汽蚀的材料。材料的强度、硬度、韧性越高, 化学稳定性越好, 抗汽蚀的性能越强。

参考文献:

- [1] 刘新福, 王春升, 齐明侠, 等. 海上平台原油外输泵汽蚀余量计算方法 [J]. 石油机械, 2018, 42(1): 5-6.
- [2] 高国强, 林林, 王均. 低装置汽蚀余量下原油外输泵的选型 [J]. 新技术新工艺, 2013(08): 13-15.
- [3] 张楼会. 马鞭洲首站原油装船的水力分析 [J]. 广石化科技, 2018(3): 4-6.
- [4] 肖功槐, 赵永伟, 杨怀武. 中缅原油管道输油泵的国产化研制 [J]. 通用机械, 2019(3): 4-6.

作者简介:

于泽洋 (1990-), 男, 汉族, 山东临沂人, 工程师, 学士/本科, 研究方向: 危化品安全管理。