

多级离心式森林消防泵汽蚀性能的研究

蔡亚光 于文华 宋 杨
(北京林业大学工学院)

摘要:为提高多级离心式森林消防泵的使用性能,延长其工作寿命,针对离心泵内可能产生的汽蚀现象,设计了森林消防泵的汽蚀实验。实验在自行搭建的开式汽蚀实验测试系统上进行,测试系统主要由交流电力测功机、测控系统和水泵实验台组成。交流电力测功机提供系统动力,带动森林消防泵工作,并将实验数据传输到测控系统实时读取。通过采集包括额定工况在内的 3 个不同工况点下泵的流量、转速、进口压力值、首级叶轮压力值、大气压力值、实验水温等各项数据,计算得到各个工况点下泵的汽蚀余量与首级叶轮扬程值。以首级叶轮扬程值下降到无汽蚀现象扬程值的 3% 时的汽蚀余量作为临界汽蚀余量的判别标准,绘制 3 个工况点下的临界汽蚀余量判别曲线,进而绘制出森林消防泵的汽蚀特性曲线,并根据吸水管线的水力损失计算泵的许用安装高度。本实验为多级离心式森林消防泵汽蚀性能的研究和改进提供了依据。

关键词:森林消防泵;汽蚀;使用性能;工况;扬程

中图分类号:S776. 29 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1522(2013)06-0118-06
CAI Ya-guang; YU Wen-hua; SONG Yang. **Cavitation characteristics of a multi-stage centrifugal forest fire-extinguishing pump.** *Journal of Beijing Forestry University*(2013) **35**(6) 118-123 [Ch, 10 ref.] College of Technology, Beijing Forestry University, 100083, P. R. China.

Aiming at the cavitation phenomenon which may occurred in the centrifugal pump, caviation test was designed to improve the service performance and operating life of forest fire-extinguishing pump. The test was carried out on the open-type pump cavitation test system, which was mainly composed of AC electrical dynamometer, test-control computer and pump test-bed. The AC electrical dynamometer powered the system, drove the pump to work and transmitted the data to test-control computer for real time reading. And by acquiring all the data at three different working conditions, including the rated working condition, such as the pump flow, speed, the inlet pressure value, the first stage impeller pressure value, the atmospheric pressure value and the experimental temperature, the NPSH and the first stage impeller lift value at the three working conditions were calculated. With NPSH when the first-stage impeller lift value decreased to 3% of no cavitation lift value as the critical one, the critical NPSH discrimination curve at the three working conditions and the NPSH curve of forest fire pump were drawn, then the allowable height of installation was calculated according to the hydraulic loss of the pipeline. It provides guidance for the research and improvement of this type of fire pump's cavitation performance.

Key words forest fire-extinguishing pump; cavitation; service performance; working condition; lift

近年来,森林消防行业高速发展,森林消防泵作为以水灭火消防技术的重要装备,其研究和应用日益广泛。北京林业大学工学院在已有研究的基础上,通过采用叶栅式扩压、叶轮之间轮毂端齿传动的设计,将多个叶轮串联安装在同一泵轴上,研制开发了一种三级离心式森林消防泵,并对其进行了性能测试和林区使用实验。结果表明,该消防泵具有体积小、重量轻、扬程高、流量适中、结构简单的特点,

收稿日期: 2013-02-25 修回日期: 2013-03-19
基金项目: 林业公益性行业科研专项(201004003)。
第一作者: 蔡亚光。主要研究方向: 森林火灾防御技术及装备。Email: cycle1568@ yahoo. com. cn 地址: 100083 北京市清华东路 35 号北京林业大学工学院。
责任作者: 于文华, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 森林火灾防御技术及装备。Email: yuwenhua56@ sina. com 地址: 同上。
本刊网址: <http://journal.bjfu.edu.cn>

能够很好地满足森林灭火的需要。

汽蚀是离心泵中可能发生的一种物理化学现象,也是阻碍泵向高速化发展的一个突出障碍。离心泵内出现汽蚀时,泵的扬程与效率均下降,产生振动和噪音,泵运行不稳定。长期工作在汽蚀状态下,泵内部件的材料将遭到腐蚀、破坏,严重时会引起泵的损坏。对于三级离心式森林消防泵来说,由于流量较小、扬程较高,叶轮内的流道设计得比较狭窄,汽蚀现象产生的气泡会严重堵塞流道,使泵的性能曲线急剧下降。因此,对森林消防泵的汽蚀性能进行研究,计算不同工况下的临界汽蚀余量,确定许用安装高度,对提高森林消防泵的使用性能和延长森林消防泵的工作寿命具有十分重要的意义。

1 离心泵的汽蚀现象

1.1 汽蚀发生的机理

离心泵运转时,液体在泵入口与叶轮入口之间压差的作用下,被压入离心泵,液体的压力从泵入口到叶轮入口逐渐下降。此后,由于叶轮对液体做功,压力很快上升。当叶轮叶片入口附近压力小于等于液体当时温度下的汽化压力(即饱和蒸汽压力)时,液体就汽化。同时,还可能有溶解在液体内的气体溢出,形成许多气泡。当气泡随液体流到流道内压力较高处时,外面的液体压力高于气泡内的汽化压力,则气泡会凝结溃灭形成空穴,瞬间周围的液体以极高的速度向空穴冲来,造成液体互相撞击,使局部的压力骤然剧增(有的可达数百个大气压)^[1]。这不仅阻碍流体的正常流动,更为严重的是,如果这些气泡在叶轮壁面附近溃灭,则液体就像无数小弹头一样,连续地打击金属表面,其撞击频率很高(有的可达2 000~3 000 Hz),金属表面会因冲击疲劳而破裂。若气泡内夹杂某些活性气体(如氧气等),则可能借助气泡凝结而放出能量(局部温度可达200~300℃),还会形成热电偶并产生电解,对金属起电化学腐蚀作用,从而加速金属剥蚀的破坏速度。这种液体汽化、凝结、冲击,形成高压、高温、高频率的冲击载荷,造成金属材料的机械剥裂与电化学腐蚀破坏的综合现象称为汽蚀。

1.2 临界汽蚀余量与许用安装高度

泵内压力降低到当时水温的汽化压力以下时,泵内就会产生汽蚀;所以,要使泵内不发生汽蚀,至少应使泵内水流的最低压力高于水在该温度下的汽化压力。那么,在泵入口处的水流总水头应比汽化压力水头富余,才能保证泵内不发生汽蚀,水头的富余量称为汽蚀余量,用NPSH表示。或者说,汽蚀余量是泵入口处单位水量所具有的总水头与相应汽化

压力水头之差^[2-4]。

$$NPSH = H_1 + \frac{P_b}{\rho g} - \frac{P_v}{\rho g} = Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_b}{\rho g} - \frac{P_v}{\rho g} \tag{1}$$

式中: $H_1 = Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g}$ 为泵的入口总水头,m; Z_1 为从泵吸入测压截面中心所在的水平面至基准面的垂直距离,m; P_1 为泵入口处的压力,Pa; v_1 为泵入口处的流速,m/s; ρ 为液体密度,kg/m³; g 为重力加速度,m/s²; P_b 为大气压力(绝对),Pa; P_v 为液体的饱和蒸汽压力(绝对),Pa。

泵的汽蚀实验就是用实验的方法得出泵将要发生汽蚀现象时的汽蚀余量,该汽蚀余量即为临界汽蚀余量NPSH_c。我国泵汽蚀实验标准规定,扬程下降到无汽蚀现象扬程的 $(2 + \frac{K}{2})\%$ 时,其汽蚀余量即为临界汽蚀余量。对于多级离心泵应测量第一级叶轮处扬程的下降量^[5]。

$$K = \frac{2\pi n Q^{\frac{1}{2}}}{(gH)^{\frac{3}{4}}} \tag{2}$$

式中: K 为泵的型式数; n 为泵的转速,r/min; Q 为泵的流量,m³/h; H 为第一级叶轮扬程值,m。

水泵的安装高度为水泵入口基准面与吸入液面之间的高度差。泵运行时,为了防止汽蚀现象发生,计算安装高度所用的汽蚀余量应大于临界汽蚀余量NPSH_c,此时的汽蚀余量称为许用汽蚀余量[NPSH]。安装高度 H_2 由下式确定:

$$H_2 = \frac{P_b}{\rho g} - h - \frac{P_v}{\rho g} - [NPSH] \tag{3}$$

$$[NPSH] = (1.1 \sim 1.3) NPSH_c \tag{4}$$

式中: h 为从吸入液面到泵入口处的水力损失,m。

2 汽蚀实验

2.1 主要实验设备

汽蚀实验的目的在于确定泵在工作范围内临界汽蚀余量NPSH_c与流量 Q 的关系。实验中需要测得的参数有:水泵进口压力、首级叶轮压力、流量、电动机的转速与扭矩。

主要的实验设备有:YN-100耐震真空表(-0.1~0 MPa)、ZHP118压力传感器(0~60 MPa)、ZHP118A压力传感器、LWGY智能涡轮流量计、水温计、CAC-16交流电力测功机、FC2000系列测控系统。

2.1.1 压力的测量

进口压力由真空表直接读出,在第一级叶轮壳体处打孔安装ZHP118压力传感器测量首级叶轮压力,由ZHP118A压力传感器测量大气压力,并将信号采集到测控系统。

2.1.2 流量的测量

流量采用涡轮流量计测量,该流量计既可以在表盘上直接读出流量数值,同时也可以输出流量信号到数据采集系统。

2.1.3 转速、扭矩的测量

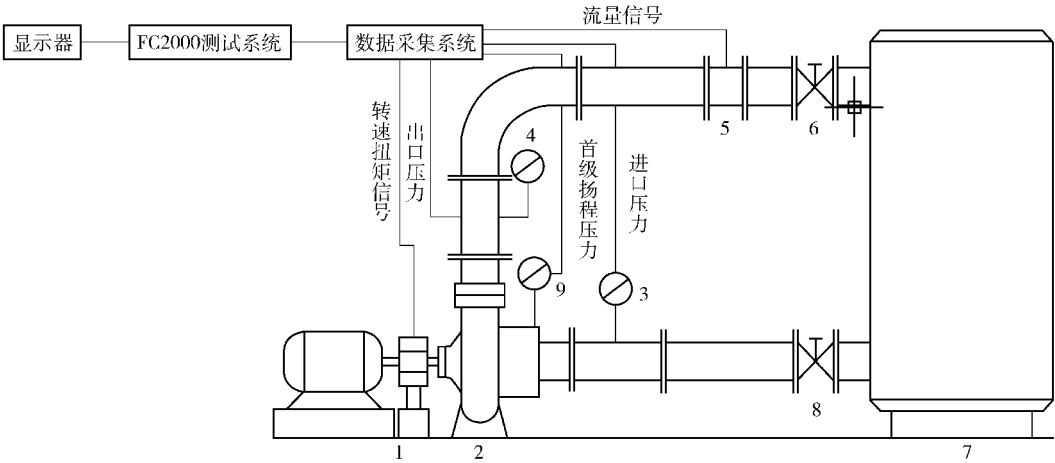
实验系统的动力输入装置为 CAC-16 交流电力测功机,额定功率 16 kW,额定转矩 60 N·m,额定转速 3 000 r/min。该测功机除了可以对实验离心泵进行动力输出外,还装有转速扭矩传感器,可以实现对实验泵转速以及输入扭矩的准确测量。

2.1.4 测控系统

FC2000 系列发动机测控系统与 CAC-16 测功机配套使用时除了可以对测功机的转速、扭矩进行精确测量和控制,还可以采集温度、压力以及流量等信号。

2.2 开式汽蚀实验系统的搭建

三级离心式森林消防泵的汽蚀实验选择在开式汽蚀实验系统上进行,该开式汽蚀实验系统以北京林业大学工学院车辆实验室的原有水泵测试平台为基础,严格按照 GB/T3216—2005^[5]进行管路布置(图 1)^[6-9]。



1. 测功机; 2. 实验泵; 3. 真空表; 4. 出口压力表; 5. 涡轮流量计; 6. 出水节流阀; 7. 开式储水池; 8. 进水节流阀; 9. 首级叶轮压力表

图 1 开式汽蚀实验系统

Fig. 1 Testing system of opening cavitations

实验时,水泵由测功机带动工作,水泵的吸水管从储水池吸水,水经吸水管进入水泵,能量增加后由水泵压出,经出水管流经流量计,最后流回水池。实验要求整个吸水管路中的所有部件采用与泵入口法兰连接处直径相等的同直径圆管^[10]。测压横截面附近应避免存在任何弯头、管道横截面突然变化,且吸水管路中需要安装真空表与节流阀。真空表安装在距泵入口法兰连接处 2 倍吸水管路直径的上游位置,节流阀与泵入口法兰连接处的距离应大于 12 倍的管路直径,以避免取压段液体的压力与速度分布

不均匀,造成流态混乱;并且保证阀门开度减小时,吸水管路内部可以充满液体。水流经进水节流阀时阻力增加且流速发生变化,可能会在阀门处产生汽蚀现象,串联 2 个节流阀可以避免该现象出现。吸水管路测压段设计如图 2 所示。

吸水管路测压段左端加工为外管螺纹,连接串联的 2 个节流阀;右端加工为内管螺纹,与泵入口处法兰相连,并加工出密封槽放置胶垫以实现端面密封。在管路右端距泵入口 100 mm 处加工取压孔,取压孔与带内螺纹的取压连接件连接,以便安装真

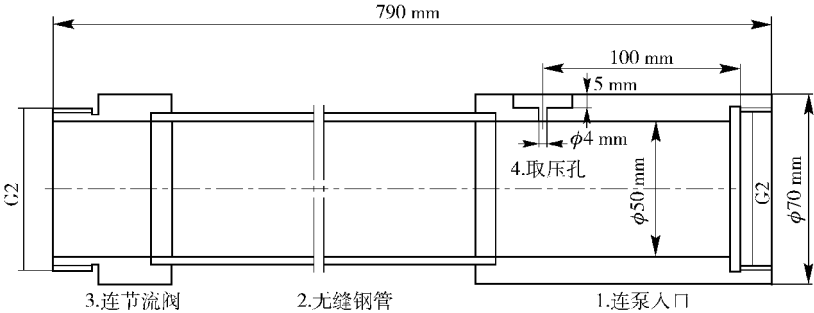


图 2 吸水管路

Fig. 2 Suction pipeline

注:G2 为非螺纹密封的圆柱形管螺纹。

空表。

2.3 方法与步骤

GB/T3216—2005^[5]规定,泵的汽蚀实验可在规定转速的±20%范围内进行。本实验将汽蚀实验中泵的转速设定为4 800 r/min。离心泵的汽蚀实验一般在泵的工作范围内选取3个工况点,在此取额定流量工况 Q 、小流量工况 $Q_1=0.8Q$ 、大流量工况 $Q_2=1.2Q$,从小流量工况开始实验。

首先将进水节流阀全部打开,启动测功机,将转速慢慢调至4 800 r/min左右,调节出水节流阀至实验流量,待流量稳定后,测量流量、转速、进口压力、首级叶轮压力值、大气压力值以及水温;缓慢关闭进水节流阀,同时加大出水节流阀开度,使管路中的流量保持恒定,操作完成后,待系统运转60 s左右,读取实验数据。每调节1次进水节流阀,记录下进口压力、首级叶轮压力以及转速值;同时减小吸水管路上串联的2个节流阀开度,以避免当单个节流阀开度过小而出现汽蚀现象。随着泵进口压力的降低,进水节流阀调节幅度应逐渐减小(进水节流阀只能朝关闭的方向调节,当1次的调节幅度过大时,决不允许将进口节流阀再回调);当首级叶轮压力出现大幅度下降时,停止实验。

2.4 结果与分析

2.4.1 实验数据

实验时大气压力为99 kPa、水温为17℃,该温度下水的汽化压力为1.938 kPa,可计算出3个工况点下泵的汽蚀余量与首级叶轮扬程值,结果见表2~4。

表2 小流量工况的汽蚀实验数据

Tab.2 Cavitation test data at the small flow condition

序 号	转速/ (r·min ⁻¹)	流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	进口压 力/MPa	出口压 力/MPa	首级叶轮 扬程/m	汽蚀 余量/m
1	4 803	5.763	-0.010	0.218	23.294	8.895
2	4 804	5.763	-0.020	0.208	23.294	7.873
3	4 804	5.755	-0.036	0.192	23.294	6.238
4	4 804	5.763	-0.042	0.185	23.192	5.625
5	4 804	5.772	-0.052	0.175	23.192	4.604
6	4 804	5.763	-0.060	0.166	23.089	3.786
7	4 804	5.763	-0.066	0.161	23.192	3.173
8	4 804	5.763	-0.072	0.154	23.089	2.560
9	4 803	5.763	-0.074	0.153	23.192	2.356
10	4 804	5.763	-0.076	0.149	22.987	2.152
11	4 803	5.763	-0.078	0.147	22.987	1.947
12	4 803	5.763	-0.082	0.142	22.885	1.539
13	4 804	5.763	-0.086	0.130	22.068	1.130
14	4 803	5.763	-0.090	0.000	9.195	0.721

表3 额定流量工况的汽蚀实验数据

Tab.3 Cavitation test data at the rated flow condition

序 号	转速/ (r·min ⁻¹)	流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	进口压 力/MPa	出口压 力/MPa	首级叶轮 扬程/m	汽蚀 余量/m
1	4 803	7.199	-0.017	0.205	22.681	8.180
2	4 804	7.199	-0.030	0.190	22.476	6.851
3	4 803	7.199	-0.040	0.181	22.579	5.830
4	4 804	7.199	-0.050	0.17	22.476	4.808
5	4 803	7.199	-0.060	0.161	22.579	3.786
6	4 804	7.199	-0.062	0.158	22.476	3.582
7	4 804	7.199	-0.068	0.151	22.374	2.969
8	4 804	7.199	-0.070	0.149	22.374	2.765
9	4 803	7.199	-0.074	0.144	22.272	2.356
10	4 803	7.199	-0.078	0.139	22.170	1.947
11	4 803	7.199	-0.082	0.131	21.761	1.539
12	4 803	7.199	-0.084	0.000	8.582	1.334

表4 大流量工况的汽蚀实验数据

Tab.4 Cavitation test data at the large flow condition

序 号	转速/ (r·min ⁻¹)	流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	进口压 力/MPa	出口压 力/MPa	首级叶轮 扬程/m	汽蚀 余量/m
1	4 801	8.635	-0.022	0.185	21.148	7.669
2	4 800	8.635	-0.028	0.178	21.046	7.056
3	4 800	8.635	-0.040	0.166	21.046	5.830
4	4 800	8.635	-0.050	0.157	21.148	4.808
5	4 800	8.635	-0.060	0.146	21.046	3.786
6	4 800	8.635	-0.063	0.143	21.046	3.480
7	4 800	8.635	-0.068	0.136	20.842	2.969
8	4 800	8.635	-0.072	0.131	20.740	2.560
9	4 800	8.635	-0.076	0.124	20.433	2.152
10	4 801	8.635	-0.078	0.055	13.588	1.947
11	4 801	8.635	-0.080	0.000	8.173	1.743

2.4.2 临界汽蚀余量判别曲线

根据泵汽蚀实验标准,在定转速、定流量条件下,三级离心式森林消防泵首级叶轮扬程值下降为无汽蚀现象扬程值的3%时,其汽蚀余量即为临界汽蚀余量 $NPSH_c$ 。一般由作图法确定 $NPSH_c$,以汽蚀余量 $NPSH$ 为横坐标,首级叶轮扬程值 H 为纵坐标,绘制3种工况点下的临界汽蚀余量判别曲线 $NPSH-H$ 曲线如图3所示。无汽蚀现象扬程值为 H_0 ,扬程下降3%时的扬程值为 $H'=(1-3\%)H_0$, H' 与 $NPSH-H$ 曲线交点的横坐标值即为临界汽蚀余量 $NPSH_c$,也记为 $NPSH_3$ 。

2.4.3 汽蚀特性曲线

因实验时的实际转速不是离心泵的额定转速,

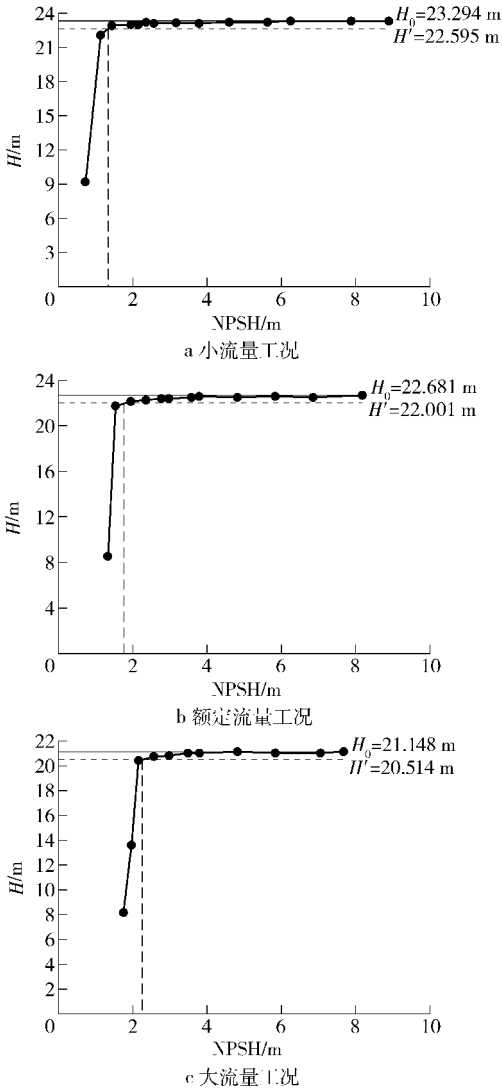


图 3 临界汽蚀余量判别曲线

Fig. 3 Discriminant curve of $NPSH_c$

所以需将实验数据换算至额定转速 n_{sp} 下的数据,各性能参数的换算公式为:

$$Q_T = Q \frac{n_{sp}}{n} \tag{5}$$

$$H_T = H \left(\frac{n_{sp}}{n} \right)^2 \tag{6}$$

$$NPSH_{cT} = NPSH_c \left(\frac{n_{sp}}{n} \right)^2 \tag{7}$$

式中: Q_T 为额定转速下的流量值, m^3/h ; H_T 为额定转速下的扬程值, m ; $NPSH_{cT}$ 为额定转速下的临界汽蚀余量值, m 。计算额定转速下的临界汽蚀余量见表 5,并绘制出三级离心式森林消防泵的汽蚀特性曲线(图 4)。

2.4.4 消防泵安装高度的确定

从已知资料查得汽蚀实验中与三级离心式森林消防泵配套使用的吸水管线在流量为 7.20、9.00、10.79 m^3/h 时,每 30 m 的水力损失分别约为 2.4、

表 5 额定转速下的临界汽蚀余量

Tab. 5 $NPSH_{cT}$ at the rated speed

流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)		$NPSH_{cT}/m$	
测量值	换算值	判别值	换算值
5.763	7.20	1.34	2.09
7.199	9.00	1.76	2.75
8.635	10.79	2.25	3.52

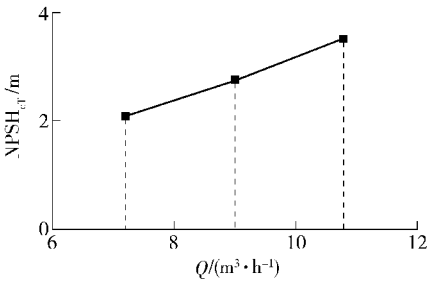


图 4 $NPSH_{cT}$ - Q 曲线

Fig. 4 Curve of $NPSH_{cT}$ - Q

4.0、4.8 m,取许用汽蚀余量为泵汽蚀余量的 1.2 倍,三级离心式森林消防泵的许用安装高度计算结果如表 6 所示。

表 6 许用安装高度

Tab. 6 Allowable height of installation

序号	流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	吸水管线长度/m	许用安装高度/m
1	7.20	3	7.16
2	7.20	6	6.92
3	7.20	9	6.68
4	7.20	12	6.44
5	9.00	3	6.20
6	9.00	6	5.80
7	9.00	9	5.40
8	9.00	12	5.00
9	10.79	3	5.20
10	10.79	6	4.72
11	10.79	9	4.24
12	10.79	12	3.76

从实验结果可知,三级离心式森林消防泵的临界汽蚀余量随流量的增加也逐渐增加,为了防止汽蚀现象发生,泵的许用安装高度随之降低。这样水流在泵入口处留有足够的汽蚀余量,以便泵内压力减去由流速变化和水力损失而导致的压力后,所剩的压力还高于汽化压力。

在实际使用中,可根据泵的流量、吸水管线长度等实际条件确定消防泵合理的安装高度,泵的安装高度较高时,因位置水头增加引起的压力损失增加,降低了泵入口处的压力值,泵较容易发生汽蚀;因此,较低的安装高度可有效增加装置汽蚀余量,但安

装高度过低时,会降低泵的使用效率。

3 结 论

本文针对离心泵内可能产生的汽蚀现象,设计了开式汽蚀实验系统,通过对自行研制的三级离心式森林消防泵进行汽蚀性能实验,得到了森林消防泵的汽蚀余量曲线和许用安装高度,为小型高扬程、低流量的森林消防泵的技术研究和改进开发创造了条件,也为该类型水泵的实际使用提供了依据。

参 考 文 献

[1] 朴奇鏞,宋元萍. 离心泵实验室中的汽蚀试验[J]. 农机化研究,2005(5):174-175.

[2] 叶晓琰,丁亚娜,胡敬宁,等. 离心泵汽蚀性能改善与基于CFD的汽蚀性能预测研究[J]. 流体机械,2010,38(12):9-12.

[3] XAVIER E, EDUARD E I, MOHAMED F, et al. Detection of cavitation in hydraulic turbines [J]. Medianical Systems and Signal Processing,2006,20(4):983-1007.

[4] OKITA K,UGAJIN H,MATSUMOTO Y. Numerical analysis of the

influence of the tipclearance flows on the unsteady cavitating flows in a three-dimensional inducer [J]. Journal of Hydrodynamics, 2009,21(1):34-40.

[5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 3216—2005 回转动力泵水力性能验收试验:1级和2级[S]. 北京:中国标准出版社,2005:13-15.

[6] 谭磊,曹树良,桂绍波,等. 带有前置导叶离心泵空化性能的试验及数值模拟[J]. 机械工程学报,2010,46(18):177-182.

[7] 苏永生. 离心泵空化试验研究[J]. 农业机械学报,2010,41(3):77-78.

[8] BRENNEN C E. Multifrequency instability of cavitating inducers [J]. ASME Journal of Fluids Engineering,2007,129(6):731-736.

[9] PHILIPPE D, TOMOYO S O. Cavitating flow calculations in industry[J]. International Journal of Rotating Machinery,2003,9(3):163-170.

[10] 郑梦海. 泵测试实用技术[M]. 北京:机械工业出版社,2011:141.

(责任编辑 李文军)