利用爆破膜片防止泵站水锤的试验研究,

西北农学院水利系农水教研组 陕西省水利水电勘测设计院

在水泵站中,如何防止由于水锤压力所造成的事故,是有关工程单位和科研部门十分 关注的问题。目前所采取的防护措施很多。但我们认为,采用爆破膜片是一种结构简单、 造价低廉、使用方便的有效方法,它和电路上安装保险丝,在电力变压器上设置爆破管一 样,即把一片簿的园形金属板装在逆止阀出水侧主管路的一支管的端部,当事故停机时, 逆止阀突闭,因水锤作用,管中压力升高,当超过预定值时,膜片自行爆破,释放水流, 这样既限制了管中压力增高,又避免了机组反转,从而保证了设备的安全。

近年来,我国有关部门对此曾作过一些研试工作,并在某些泵站中采用,但总的看来,这种水锤防护措施尚未引起足够的注意,有关资料很少。为此我们结合陕西东部抽黄 (河)工程高扬程泵站设计和运行的需要,对铝质膜片进行了一次较系统的爆破试验,所用 铝板的型号有L2M、L3M、L3y2和日用合金铝,并对六种厚度(1^{m·m}、1.5^{m·m}、 2^{m·m}、3^{m·m}、3.5^{m·m}、4^{m·m}),三种膜片直径(160^{m·m}、200^{m·m}和330^{m·m}) 共进行了18种组合34次试爆。同时对膜片的爆破压力,拱高和应变等做了相应的量测, 并据此进行了分析、计算,取得了初步研究成果。现分述如下。

一、试验设备和量测方法概述

试验现场布置如图1所示。试爆膜片5用法兰压环固紧在试压管段6的支管端部,图 2示出了膜片的固紧方式。



1 一稳压箱;
2 一供压管路;
3 一压力调节阀;
4 一压力表;
5 一试爆膜片;
6 一试压管段;
7 一放水阀。

图 1

图1 试验设备布置示意图

• 參加本试验的有: 西安冶金建筑学院马有科; 陕西省水利水电勘测设计院郑克敬、薛三平、杜碧娥、刘田生、赵睿
屬,西北农学院水利系范振江、汪志农、李志耘、庄成根、栾鸿儒等同志。本文由范振江和栾鸿儒两同志执笔。
?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki



为了防止加压后压环孔周边下缘处膜片承受锐角剪切,因而将其加工成圆弧形。 试验量测的主要项目有:爆破压力Pm,膜片拱高(挠度)H和膜片相对应变(延伸 率)ε等,其电测方框图如图3所示。测定压力的传感器是由Y-100型弹簧管压力计改 装而成,拱高曾采用电测和机械式两种方法量测。图4是电测法示意图。即在一弹性梁



图3 电测方框图



图4 弹性梁测拱高示意图

(钢锯条)上靠根部处贴应变片,把拱高(即梁端的位移)的改变量转换成应变片电阻值的 变化,通过应变仪放大,再由示波仪显示其变化曲线,此法只适用于膜片挠度较小时,因 拱高过大,梁端的应变片将会滑脱而失效。

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki

膜片应变的景测,在加压初始阶段,由于变形小,所以采用在膜片中部贴电阻丝片的 方法量测,而最大应变值采用直测法,即事先用细锥尖在膜片上轻划出小方格网,膜片爆 破后,量出拉长后方格的边长,最大相对应变值即可用下式求出:

$$\varepsilon = -\frac{1-1_0}{1_0} \tag{1}$$

 l_0 一方格原边长(本试验为 $l_0 = 20^{m \cdot m}$); 式中:

1-拉长后的边长(4个周边的平均值);

ε--最大相对应变值(延伸率)。

三、膜片爆破压力公式理论的推导

设直径为D(半径为R)的膜片未承受压力前的厚度为 t_{o} ,受力拱起后厚度为 t_{o} ,如图 5 所示,则膜片未受力前的体积为:



图5 膜片受力拱起后尺寸图

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki

 $V = \pi R^2 t$. 受力拱起后,拱形表面面积为: $F = 2 \pi \rho H$ 式中: H-拱高(挠度): o一拱的曲率半径。 $\rho^2 = R^2 + (\rho - H)^2 = R^2 + \rho^2 - 2\rho H + H^2$ 伯 . $2 \text{ oH} = R^2 + H^2$ (2) 代入上式后得: $F = \pi (R^2 + H^2) = \pi R^2 (1 + 4 h^2)$ 式中:h=H/D-相对拱高。 所以变形后的膜片体积为: $V' = F t = \pi R^2 (1 + 4 h^2) t$ 因为变形前后膜片的体积未变,即V = V',所以可得: $\pi R^2 (1 + 4 h^2) t = \pi R^2 t_o$ $t = \frac{t_0}{1 + 4 h^2}$ (3) 或 另外从公式(2)可得圆拱的曲率半径为: $\rho = \frac{R^2 + H^2}{2H} = \frac{1 + 4h^2}{4h} \cdot R = \frac{1 + 4h^2}{8h} \cdot D$ (4)今从拱起的膜片取出一微小单元进行受力分析,如图6所示。 设P为微元内表面所受的压强(即水压力),N₁和N₂为微元截面分别在两个方面上所 ●的总内拉力。列出微元在垂直方向力的平衡方程式:

$$2 N_{1} \sin \frac{d\alpha_{1}}{2} + 2 N_{2} \sin \frac{d\alpha_{2}}{2} = P d l_{1} d l_{2}$$
 (5)

假定膜片拱起高度(挠度)较小,即认为dα1和dα2很小,则有:

$$\sin \frac{d \alpha_1}{2} \approx \frac{d \alpha_2}{2}$$
 $\sin \frac{d \alpha_2}{2} \approx \frac{d \alpha_2}{2}$

又X $BN_1 = \sigma_1 t d l_2$; $N_2 = \sigma_2 t d l_1$ (式中 σ 是腹片所受的拉应力)。代人公式(5) 中得:

 $\sigma_1 \operatorname{td} I_1 \operatorname{d} \alpha_1 + \sigma_2 \operatorname{td} I_1 \operatorname{d} \alpha_2 = \operatorname{Pd} I_1 \operatorname{d} I_2$

- 或 $\sigma_1 \frac{d\alpha_1}{dl_1} + \sigma_2 \frac{d\alpha_2}{dl_2} = \frac{P}{t}$
- 但因: $\frac{d\alpha_1}{dl_1} = \frac{1}{\rho_1};$ $\frac{d\alpha_2}{dl_2} = \frac{1}{\rho_2}$ $\therefore \qquad \frac{\sigma_1}{\rho_1} \div \frac{\sigma_2}{\rho_2} = \frac{P}{t}$ (6)

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki

r



图6 膜片拱起后微元受力图

由于膜片承受均布荷载,形状为对称的球面,所以有: $\sigma_1 = \sigma_2 - \sigma$; $\rho_1 = \rho_1 = \rho$ 于是公式(6)变为:

$$2\frac{\sigma}{\rho} = \frac{P}{t}$$

 $P = 2 \sigma \frac{t}{\rho}$

或

设膜片爆破时的压力为Pm,这时膜片承受的拉应力σ为极限拉应力σ,所以公式 (7)最后可写成:

$$Pm = 2 \sigma_s \cdot \frac{t}{\rho}$$
 (8)

将上式中的t和p用公式(3)和(4)加以代换经整理后得:

$$P_{n} = 16\sigma_{s} \frac{t_{0}}{D} \cdot \frac{h}{(1+4h^{2})^{2}} = 16\sigma_{s} \frac{t_{0}}{D} f(h)$$
 (9)

从上式不难看出,当t_o、D和σs已定时,要使膜片达最大爆破压力Pm, **f**(**h**)应最 ?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki

(7)

大,因此必须满足下列条件,即

$$\frac{d f(h)}{d h} = \frac{d \left[\frac{h}{(1+4h^2)^2} \right]}{d h} = 0$$

微分后并令之等于0,则得:

$$\frac{d f(h)}{d h} = \frac{1 - 12h^2}{(1 + 4h^2)^3} = 0$$

即 $1 - 12h^2 = 0$

解之得h=0.289(负值舍去),这时f(h)=0.16,将其代入公式(9)中得:

$$Pm = 2.56\sigma s \frac{t_0}{D}$$
 (10)

即从小挠度薄壳理论分析,膜片的爆破压力和其厚度成正比,和受压面的直径成反比。从公式(10)可得爆破时的膜片极限拉应力为:

$$\sigma_{s} = \frac{PmD}{2.56t_{o}}$$
(11)

三、试 验 成 果 分 析

图片爆破后的形态,如图7(照片)所示。



甲---拉裂;

乙——剪切

图7、膜片爆裂形态(照片)

1、爆破压力^{Pm}和膜片厚度 t₀、膜片直径 D之间的关系:根据测得数据,绘制了 它 们之间的关系线,如图 8 所示。

可以看出, Pm和to成较好的线性关系,其误差一般在±1.5kg/Cm²以内, 根据图 8 推导出的计算L 2 M、L 3 M型铝片爆破压力的经验公式为:

)
$$Pm = 2 \ 0 \ 0 \ 0 \ \frac{t_0}{D^0 \cdot s_2} \quad (kg/Cm^2)$$
 (12)

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki

式中: t₀和D的单位是厘米 它和理论推导出来的公式(10)基本相符。 对其它铝质膜片的爆破压力可从图8(乙)、(丙)中直接查得。



图8、铝质膜片爆破压力Pm和片厚to, 直径D之间的关系

2、腹片相对拱高h:图9绘出了膜片爆破时的相对拱高h(=Hm/D)和爆破 压力 之间的关系。这时的相对拱高基本为一常数,它不随爆破压力的大小而变,对L2M和 L3M铝片,h \approx 0.4;对L3y2铝片,当剪切破坏时,h \approx 0.2。由前述知,爆破时的 相对拱高理论计算值为h=0.289,虽然理论值和试验值相差较大,但这对公式(9)求 解Pm值时影响不大,例如当h=0.289时,式(9)中的f(h)=0.16,当h=0.4 时,f(h)=0.15,两者相差仅1%。



3、爆破时膜片厚度和曲率:将相对拱高h=0.4代入公式(3)中,得L2M和L3M铝片爆破时的厚度为.

$$t = \frac{1}{1+4h^2} t_0 = \frac{1}{1.64} t_0 = 0.61t_0$$
(13)

即爆破时的膜片厚度为原厚度的61%,这和实测值基本相符。 将h=0.4代入公式(4)中,得膜片爆破时的曲率半径为:

$$\rho = \frac{1 + 4 h^2}{8 h} \cdot D = \frac{1.64}{3.2} - D \approx 0.52 D$$
 (14)

即此时的曲率半径几乎和膜片半径相等。

4、膜片爆破时的极限拉应力:将测得的有关数据代入公式(11)中,求出L2M和 L3M铝板的极限拉应力σs≈1000kg/cm²,而由单向拉伸试验和厂家给出该铝板的极限 应力值平均为750kg/cm²,所以可得:

$$\frac{(\sigma_{\rm s})_{\mathcal{R}}}{(\rho_{\rm s})_{\dot{\mu}}} \approx \frac{1000}{750} \approx 1.33$$

或 $(\sigma_s)_{\alpha} = 1.33(\sigma_s)_{\alpha}$

(15)

即双向拉伸的极限应力是单向的1.33倍。

四、结 语

1、理论分析和试验结果表明:采用标准工业铝板制作的爆破膜片,其爆破压力和片 厚之间成较好的线型关系,可应用于工程实际中。当采用L2M和L3M型铝片时,其有关数 据可根据图8(甲)查出或用公式(12)计算;采用L3 y2型铝片和压环 周边为锐缘 时,多为剪切破坏,其有关尺寸可按图8(乙)确定,当选用其它村质制作爆破膜片时, 可用理论公式(10)估算其所需尺寸,但式中的极限应力值是双向受拉情况的,采用单向 拉伸极限应力值时,应适当加大。对L2M和L3M型铝片应将该值乘以1.33后,再代入 该式中求解。

2、膜片的破坏形式,是拉裂还是剪切,主要和压环孔的下边缘是否修圆有关,如加 以修圆,则膜片主要是受拉破坏,否则是剪切破坏;对周边修圆的压环,膜片破坏形式主 要决定于膜片材质和固紧方式。例如对L3y2型厚1.5毫米的铝片,由于是一种延伸率小 的硬质薄铝板,在试爆时,上面垫有石棉垫圈,有助于剪切,同时夹持较紧,膜片不易拉 伸,所以多为剪切破坏;当取去石棉垫圈夹持较松时,即出现拉裂破坏。可见,这种用法 兰盘螺栓压紧膜片方式,其松紧程度和有无垫圈对硬质薄铝板有较大的影响。

3、材质对爆破压力值影响很大。例如试验中所用厚1毫米的直径160毫米膜片, 为市场上供应的日用合金铝制成,不同于试验所用的其它膜片材质,其爆破型力高达 22kg/cm²,几与L3y2型厚1、5毫米同直径膜片爆破压力24kg/cm²相近,这说明在工 程上选用爆破膜片时,必需注意材质的一致性。

4、本试验是在静压条件下进行的,它和实际装置在水泵站的腹片受力情况尚有一定 差别。在泵站正常运行时,腹片一直承受着水泵的动工作压力,长期处于受压拱起状态, 其爆破压力值,可能比试验的时加压方式所得的爆破压力值要低,从泵站运行角度来看, 这是趋于安全的。但究竟低多少?有待于今后进一步从实践中总结、确定。

本试验曾得到陕西省红旗水泥厂的大力支持和协助,特此表示感谢。