机械强度

JIXIEQIANGDU

实验应力分析专辑

3

机械强度　　第 3 期

实验应力分析专辑

目　录

光弹性中光应力图条纹倍增……上海交通大学工程力学教研组(1)
光弹性贴片法的应用……郑州机械科学研究所强度室(6)
60万瓩汽轮机低压焊接转子模型光弹性实验应力分析……
……哈尔滨汽轮机厂　清华大学工程力学系(18)
激光全息干涉法——位移和振型的测定……
……浙江大学固体力学教研组　解放军成字130部队(29)
全息光弹性中的非漫射照明全息摄影……
……郑州工学院激光全息科研组　郑州机械科学研究所强度室(42)
脆性涂层法的"液冷"试验……福州大学机械系力学教研组(46)
脉频调制式单路遥测……铁道部科学研究院机车车辆研究所(49)
BNG-650 型 650°C 半桥式粘贴应变片研制阶段小结……三机部 606 研究所 11 室(58)
700°C 动态电阻应变片研制小结……郑州机械科学研究所强度室(65)
609 燃气轮机低压透平拉杆转子应力试验……上海汽轮机厂研究所设计科(75)
塑料模型实验技术……六机部 711 研究所一室结构强度组(88)
端面接触式引电器……哈尔滨汽轮机厂研究所强度组(101)

光弹性中光应力图条纹倍增

上海交通大学工程力学教研组

在实验应力分析中，光弹性法的特点就是直观性强。它通过光应力图——等色线图表达构件应力分布状况。光应力图是定量测定构件内各点应力的主要根据。但，对于光学敏感性差的光弹材料，应力条纹有显示不足的缺点；以及在三向光弹性中，进行应力"冻结"时，为了防止模型产生过大变形或者"冻结"载荷不足，以致应力条纹过少等等问题，都可以用条纹倍增给予解决。同时，光应力图条纹倍增又是一种全场小数级条纹补偿法。因此，采用条纹倍增对于提高光弹性实验技术是有相当意义的。国外，D. Post[1,2] 已对其基本原理和方法有所论述，现就我们的初步实践和制造条纹倍增装置介绍于后。

一、基本原理

我们在一台普通的偏光弹性仪上增加一对半反镜就可以实现应力条纹的倍增。这对半反镜放在模型两侧，如图 1 所示。使用时，其中一块半反镜少微加以倾斜 ϕ 角，如图 2 所示。光线将在这两块半反镜中来回多次经过模型。光线经过模型的次数，将决定应力条纹增加的倍数。

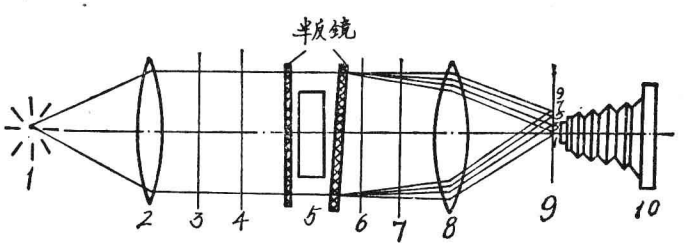


图 1　应力条纹倍增装置图

1—光源　2—准直透镜　3,7—偏振器　4,6—1/4 波片　5—模型　8—视场透镜　9—挡板　10—照相机

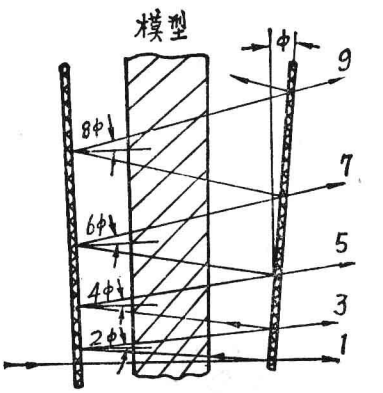


图 2　光线在一对半反镜中的轨迹

1—半反镜　2—半反镜

图 2 表示平行光束中一根光线的轨迹，由于 ϕ 角很小，实际上 1、3、5……光线是通过一点附近很小范围(为了便于说明我们才有意将 ϕ 角夸大)。当光线进入半反镜时，光有一部分被反射掉，只有一部分透过。各点透过的这部分光通过模型 1 次，形成模型的应力条纹图。而那些在 2 半反镜被反射的光线又回到 1 半反镜上，将以 2ϕ 角再反射给 2 半反镜。2 半反镜又将透射一部分光，这部分光已经是通过模型三次，各点的这种透射光将形成三倍光场的应力条纹图。同样，由 1 半反镜反射的 4ϕ、6ϕ、8ϕ……角方向的光线，透过 2 半反镜获得模型 5、7、

9……倍的应力条纹图。

如何分离1、3、5、7、9……这些光场呢？偏光弹性仪上的视场透镜8以及挡板9(见图1)起了这个作用。平行于光线1的光经过视场透镜会聚于挡板中心即主焦点处，而平行于光线3、5、7、9……的光将以倾斜2ϕ、4ϕ、6ϕ、8ϕ……角射向视场镜，每组平行光会聚于挡板(图3所示)主焦面处，但不通过主焦点。象图1所示排列于3, 5, 7, 9……处。如果在挡板上开一小孔，只允许一个焦点的光线通过。这样，我们就分离出一个倍增应力条纹的光场。我们用眼睛从小孔中就可以看见倍增的应力条纹图；用照相机在小孔后面就可以拍摄出相应的应力条纹倍增的照片。

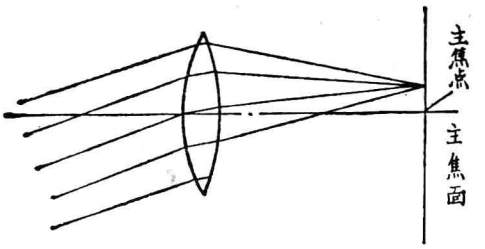


图3　平行光斜射透镜的会焦

二、装　　置

上述的一对半反镜是怎样制造的？怎样夹持在模型两侧呢？我们进行了实践。现总结于下：

1．半反镜的制造

我们希望光线能在模型上多次通过。为此，要求在进行一定倍增时，光强在半反镜上损失最小，也就是要获得最大光强。

现在，我们假定未加半反镜时通过模型后的光强为I_0。半反镜透射系数为T，反射系数为R，若半反镜对光强没有吸收(这是可以忽略的)，那么

$$R+T=1 \tag{1}$$

光强I_0的光线第一次通过两块半反镜时的光强I_1为

$$I_1=I_0T^2$$

这是一倍光场强度。如果光线在半反镜中间反射两次再透射出2半反镜，则光强为

$$I_3=I_0T^2R^2$$

这是三倍光场强度。五倍光场强度为

$$I_5=I_0T^2R^4$$

……

同理，n倍光场强度(n称为倍增因子)

$$I_n=I_0T^2R^{n-1} \tag{2}$$

将(1)式代入(2)式后，得

$$I_n=I_0(1-R)^2R^{n-1} \tag{3}$$

而

$$\frac{\partial I_n}{\partial R}=I_0[(n-1)(1-R)^2R^{n-2}-2(1-R)R^{n-1}]$$

$$=I_0(1-R)[(n-1)(1-R)R^{n-2}-2R^{n-1}] \tag{4}$$

按照极值条件：

$$\frac{\partial I_n}{\partial R}=0$$

得

$$(n-1)R^{n-2}-(n-1)R^{n-1}-2R^{n-1}=0$$

$$(n-1)R^{n-2}-(n+1)R^{n-1}=0$$

化简后得：

$$(n-1)-(n+1)R=0$$

最后得：

$$R=\frac{n-1}{n+1} \tag{5}$$

(5) 式说明获得最大光场强度，反射系数的条件。它说明反射系数 R 是倍增因子的函数。例如，我们倍增因子选取为 7，那么要求半反镜的反射系数 R，由(5)式算出为 $R=0.75$，并由(1)式可知透射系数 $T=0.25$。这时光场强度最大。现将对应倍增因子 n 的最佳半反镜参数(R 和 T)列于表中：

应力条纹倍增时半反镜参数表

倍增因子 n	反射系数 R	透射系数 T	强度系数 T^2R^{n-1}
1	0	1	1
3	0.500	0.500	0.0625
5	0.677	0.333	0.0219
7	0.750	0.250	0.0111
9	0.800	0.200	0.0067
11	0.833	0.167	0.00449
13	0.857	0.143	0.00327

表中强度系数是由(2)式算得 I_0 的倍数。

我们是用普通制造偏振片的玻璃，直径为 100 毫米，厚度为 3 毫米。在玻璃上用真空镀膜法镀上硫化锌和氟化镁反射层(层数越多反射系数越大)。我们镀了五层和七层两对半反镜。一般采用反射系数 $R=0.75\sim0.85$ 的半反镜倍增 5 或 7 倍应力条纹是能够实现的。经过实践过低的反射系数 R 半反镜得不到倍增效果。

2. 镜架装置

我们制作了两个极简单的装置，一个是用普通镜片夹固定在一个开槽的铁板上，在槽内可以改变两镜夹相互之间的距离。下面螺钉固紧后，镜夹可以转动一定角度。在镜夹上面用一根铅丝缠紧，用来调节两镜片的平行度。这个装置如图 4 照片所示。我们用它在空气中进行倍增应力条纹图。

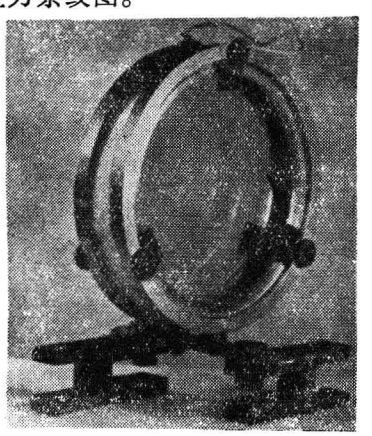


图 4 一个用于空气中倍增应力条纹的装置

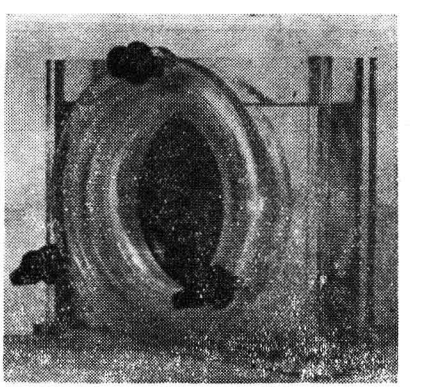


图 5 用来倍增"冻结"切片应力条纹的装置

试读结束，需要全本PDF请购买 www.ertongbook.com

另外一个装置是将一个有机玻璃油缸改制成的。我们在油缸前后挖了两个孔洞，再用两个有机玻璃镜夹固定在两孔中。一个镜夹是有机玻璃胶（氯仿＋四氯乙烷＝4:6）粘结在缸内壁一个孔洞上。另一个镜夹外圈套一个环板，在板上装有三个调节螺钉，这个镜夹与油缸壁孔之间浇铸了一个硅橡胶弹性密封圈（用南大704胶浇铸）。装置如图5所示。我们将半反镜镀膜的一面置于空气，未镀膜的一面朝向油缸内，这样当油缸放入油后镀膜不会与油接触。因为镀膜不能擦拭或接触油污。这个装置用来作"冻结"切片的应力条纹倍增较为有效。

三、初步实验效果

我们是在国产58型偏光弹性仪上，以普通GP20瓦钠光灯做光源，企图用最简单地方式来实现应力条纹倍增的。进行了观察应力条纹倍增、模型在空气中应力条纹倍增和"冻结"切片应力条纹倍增的实践，特总结于下：

1．观察：用眼睛直接在挡板后面观察应力条纹倍增图是非常清晰的。此时对倍增镜架调整也比较方便。但是，观察高倍增因子光场的应力条纹密集区、由于光度削弱很多、应力条纹分辨比较困难。为此，我们可以借助照相机来观察，在照相机毛玻璃处装一个放大镜，调节一定焦距位置，应力条纹图将得到放大，也能清晰地分辨条纹。

2．在空气中摄制倍增应力条纹图：我们用一个圆盘光弹试件，预先将它抛光得非常透明（这是空气中倍增要求）。在偏光弹性仪上圆盘试件对径受压加载，用图4装置和挡板小孔直径ϕ10毫米，照相机镜头为国产（长城牌）f4.5焦距240毫米的镜头，摄制在不同载荷下暗场和明场的三倍应力条纹图。图6、7、8、9照片是未倍增及倍增应力条纹图比较图。

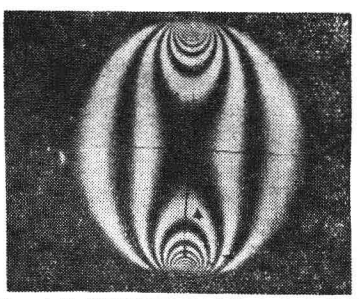


图6　未倍增暗场圆盘试件应力条纹图

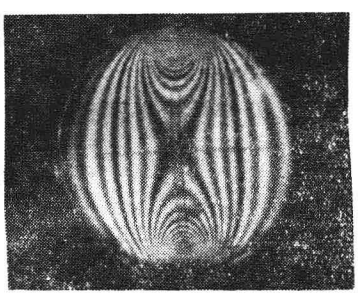


图7　圆盘试件暗场三倍应力条纹图

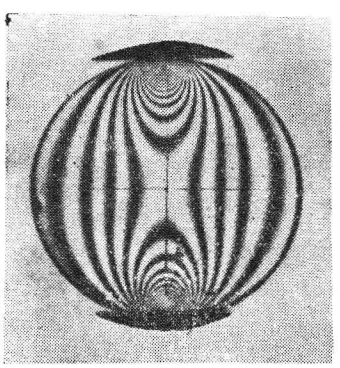


图8　未倍增明场圆盘试件应力条纹图

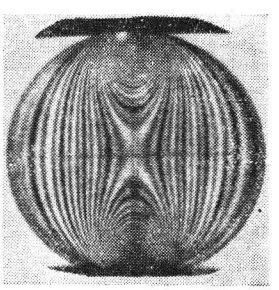


图9　圆盘试件明场三倍应力条纹图

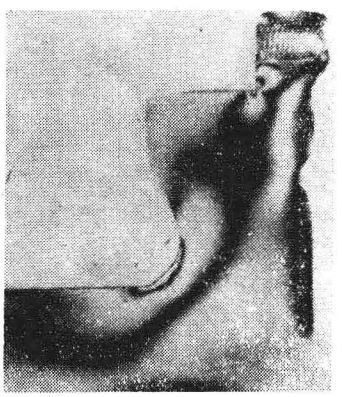


图10　未倍增烘缸轴头光弹"冻结"切片应力条纹图

对于“冻结”切片，表面不能抛光，为了增加透明度，特用两块薄玻璃（洗去药膜的照相底片玻璃）制成薄油缸。其总厚度小于10毫米，油缸间隙5毫米。小于4毫米的“冻结”切片能置于缸中得到增透。我们也能象上述装置摄制应力条纹倍增照片。图10，11所示照片就是大型造纸烘缸光弹模型轴头“冻结”切片三倍应力条纹图和未倍增的应力条纹图。

图4装置由于两半反镜之间尚有空气与光弹模型的介面，光强在介面上因反射受到损失，所以在上述的倍增应力条纹图中，倍增的小数条纹较浅。这是此装置的缺点。在高倍增应力条纹中因光强削弱以致难以实现倍增。

3．在浸渍液中进行应力条纹倍增：我们使用图5装置对“冻结”切片进行应力条纹倍增。这样可以消除上述空气介面光强损失，倍增应力条纹收到较好的效果。

我们用一个大型烘缸受气压时环形顶盖的光弹模型，截取径向“冻结”切片，其厚度为2毫米，最大应力条纹级数在1.5级左右，未倍增时明场应力条纹图如图12所示，使用图5装置摄制三倍和七倍应力条纹图如图13、14所示。实验时我们尚未测定“冻结”切片材料及浸渍液的折射率，所以在折射率匹配上有问题。若这个问题解决，倍增应力条纹的清晰度和倍增因子还可提高。

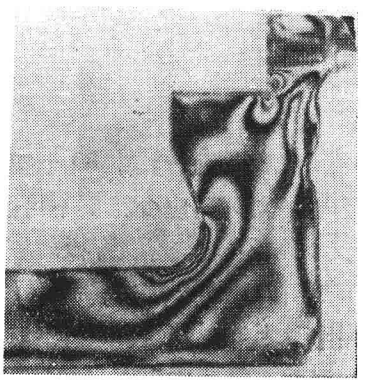


图11　烘缸轴头光弹“冻结”切片三倍应力条纹图

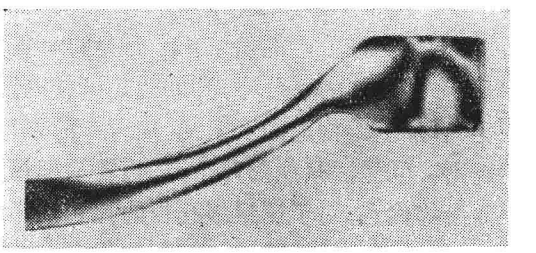


图12　环形顶盖径向“冻结”切片未倍增的应力条纹图

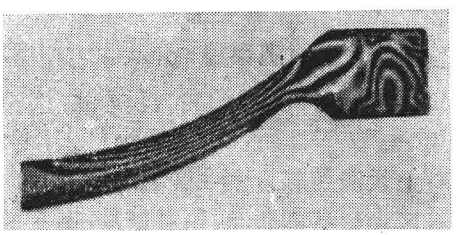


图13　环形顶盖径向“冻结”切片三倍应力条纹图

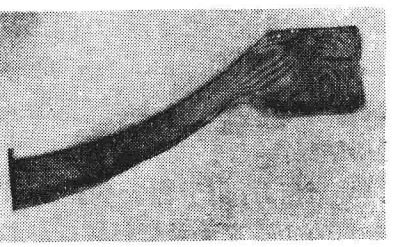


图14　环形顶盖径向“冻结”切片七倍应力条纹图

参　考　文　献

[1] Isocromatic Fringe Sharpening and Fringe Multiplication in Photoelasticity, D. Post, S. E. S. A Porc XII (2), p. 143—156 (1955).

[2] Photoelastic-Fringe Multiplication-For Tenfoid Increase in Sensitivity, D. Post, Experimental Mechanics, 10 (8), p. 305, 1970.

光弹性贴片法的应用

郑州机械科学研究所强度室

光弹性贴片法是实验应力分析方法之一，它的优点是：能直接测量实物或模型的表面应变，可在生产现场或实验室内进行；观察面积大，直观性强，便于测量应力集中等。它兼有光弹性法和电测法的长处，在某些情况下，是一种方便有效的实验方法。65年以来，我们多次在生产课题实验工作中应用。本文通过三个例子，介绍在不同的要求下应用这种方法的情况。而关于贴片法的原理和常规方法[1]则不多述。

一、用于热交换器双层管板的应力测定

设计制造承受压力及温度的双管板结构的热交换器是个困难的新问题。但是通过模型试验，可以求得在各种情况下管板的应力状况，为设计提供依据。

由于以下两个原因，试验方法采用了光弹性贴片法：

1．由于热交换效能的要求，在ϕ500mm圆管板上布置有247个管孔，其中89个按菱形分布，158个孔按辐射形分布，孔间距小到使电阻片在孔间距内贴不下，贴应变花更不可能；孔间距变化大，加上结构上的要求，孔内管子的壁厚也不相同，支承刚性不同，造成管板的应力分布很不规则。电测法只能测几个点，很容易把最大应变处遗漏掉，而光弹贴片法具备直观，能大面积测量等优点，对于测量多孔板的孔边最大应力更具备优越性。

2．由于管板承受垂直于板平面的均布液压作用，利用一般的光弹性法很困难，甚至不可能。因此，采用光弹性贴片法，并首次把贴片法用于液下测量的尝试。

图1为管板及管板上的光弹性贴片（材-6）[1]，最大贴片的面积为ϕ500圆的一半。

为了在受液压作用下能通过封头观察管板的干涉条纹图，故在封头上开了八个观察孔，直径为ϕ100mm，用26mm厚的光学不灵敏材料有机玻璃作为密封观察窗，介质为$l^{\#}22$无色透平油，试验压力$P=30\text{kg/cm}^2$（见图2）。

试验结果：

1．夹紧压力：由于管板不平整，有翘曲，在整配时上紧法兰螺钉而在管板上产生的装配应力，在管板的边缘离法兰螺钉较近处较大，而菱形布孔区由于孔间距小，削弱严重，应变普通达到$\varepsilon=1302\times10^{-6}$，而在辐射形布孔区一般$\varepsilon=840\times10^{-6}$，个别孔最大应变为$1554\times10^{-6}$。

图3为夹紧管板所产生的明场应力光图。

2．胀管应力：管板与管子是胀结联接的。单孔胀结后在菱形布孔区，孔边进入塑性，胀结应变条纹达4～6条，幅向布孔区达1.7～2.15条。

图4为幅向布孔区单孔胀结产生的应力光图。

胀管度不易掌握，而胀管度的不同对孔边产生的应变差异极大。为了保证胀结后不漏，和各孔胀结应力均匀，我们采用光弹贴片上产生的条纹数来掌握胀管度，为此对$\phi16\times1$的黄铜

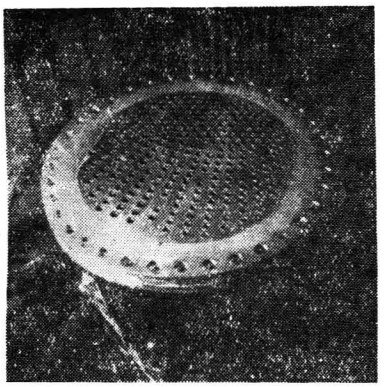


图 1

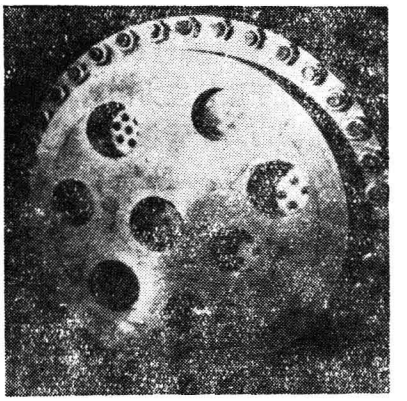


图 2

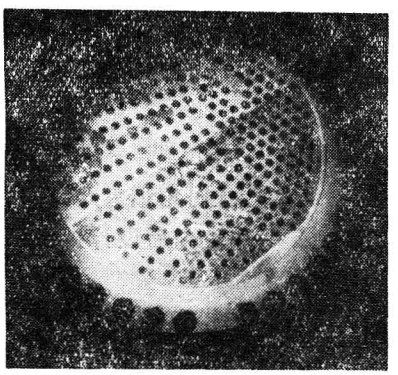


图 3

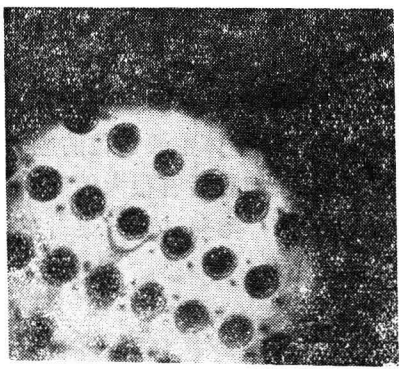


图 4

管与黄铜板的三种胀管度产生的应变进行了测量。以便掌握和选择胀管度：

(1) 胀后管子内径为 15 毫米，孔边最大条纹数 2.2 条。

(2) 胀后管子内径为 15.2 毫米，孔边最大条纹数 3.3 条。

(3) 胀后管子内径为 15.3 毫米，孔边最大条纹数 4.5 条。

3．工作压力为 30 公斤/厘米^2，所引起的应变：

有温度半周补偿器时，孔边最大应变差 $\Delta\varepsilon=336\times10^{-6}$，

有温度全周补偿器时，孔边最大应变差 $\Delta\varepsilon=756\times10^{-6}$，

4．有温差 110°C 引起的孔边最大应变差 $\Delta\varepsilon=1848\times10^{-6}$，

试验中的问题：

1．介质和观察窗(有机玻璃)及工作压力作用在贴片上产生的应变对试验结果的影响，我们均在各种条件下进行过测量，但其影响不明显，不易测得准确，因此采用在试验条件相同的情况下进行标定，以免它们的影响。

2．贴片法的液下测量我们还是首次尝试，试验也仅限于对孔边的测量。由于没有分解主应力，只得到应变差。对于孔与孔之间的测试分析，有待于进一步研究。

小结：

在这次试验中，用光弹性贴片法对装配夹紧应力进行了测量，显示出贴片法的直观，大面积测量的优点。对于胀管应力的测量，又使贴片法的应用推广到用来掌握工艺，改进工艺，作监视元件来应用。而对于管板工作应力的液下测量，虽还未能独立解决问题，但可以看到在这方面进行测量的可能性。可见光弹性贴片法是一个值得重视的方法。

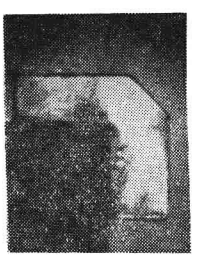
二、用于机车车体静强度试验[2]

新设计的电力机车与老结构相比变动较大，特点是重量轻、高度低、窗口多，结构复杂，难于计算。因此采用光弹性贴片法和电测法测定其应力分布和校核其静强度，重点是测量车体门窗拐角的应力分布。

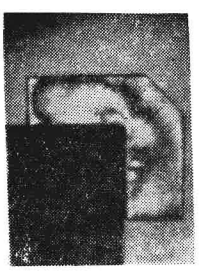
I．光弹性贴片试验及其结果

图5是车体光弹性贴片布置及加载图。车体外壳为09Mn2钢，$\sigma_s=3600\,kg/cm^2$，厚3.5毫米。贴片为自制二次固化环氧型光弹塑料片，厚约5毫米，$E=4.8\times10^4\,kg/cm^2$，$\mu=0.37$ $\varepsilon_0^t=659\,\mu\varepsilon$/条，最大贴片尺寸为$500\times70mm^2$。试验时加额定载荷200吨。测量用大视场反射式光弹性仪LF/Z型和441型各一台。

试验结果给出了车体主要部位的应力分布，应力峰值的大小和位置。有些拐角的应力超过了材料的屈服限，卸载后有很大的残余变形，司机室附近的门窗拐角最为严重，是机车的薄弱环节。为此，生产厂参照试验结果对车体进行了局部补强。并为今后设计提供了经验。试验的部分结果见图6～图9。



(a) $P=50$ 吨



(b) $P=100$ 吨

(c) $P=200$ 吨

图6 47#拐角的条纹图

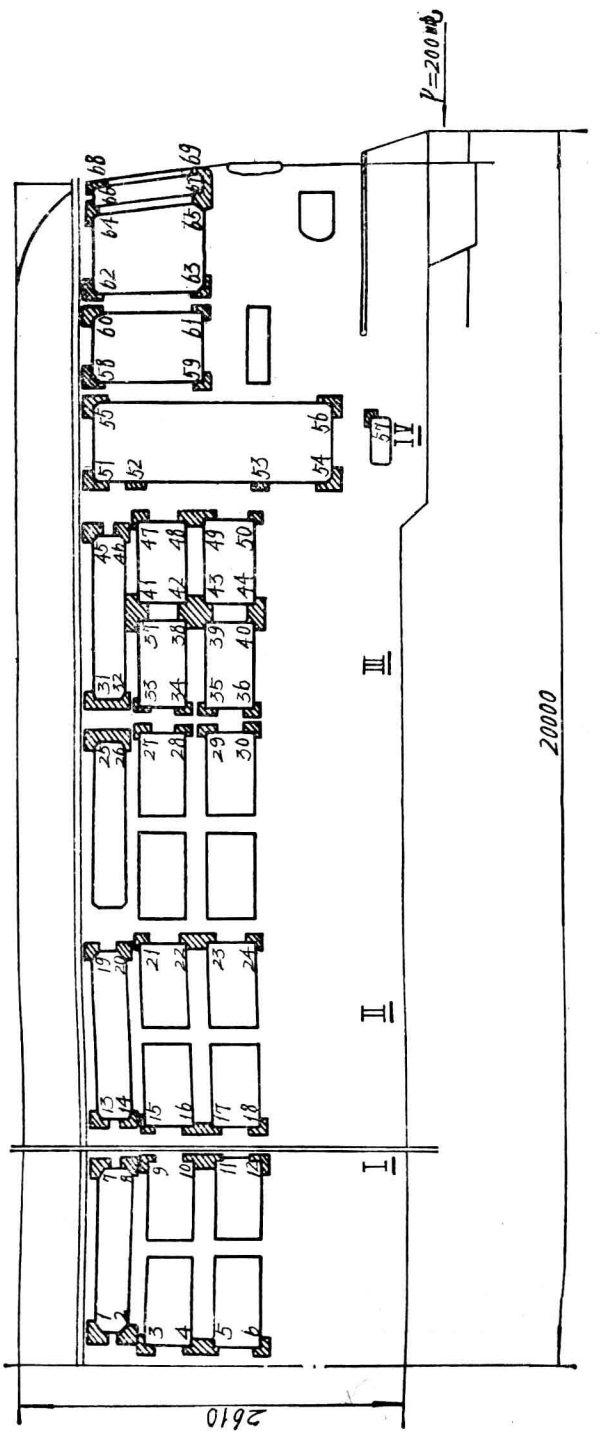


图 5　光弹贴片布置及加载示意图(另一端做电测)

试读结束，需要全本PDF请购买 www.ertongbook.com

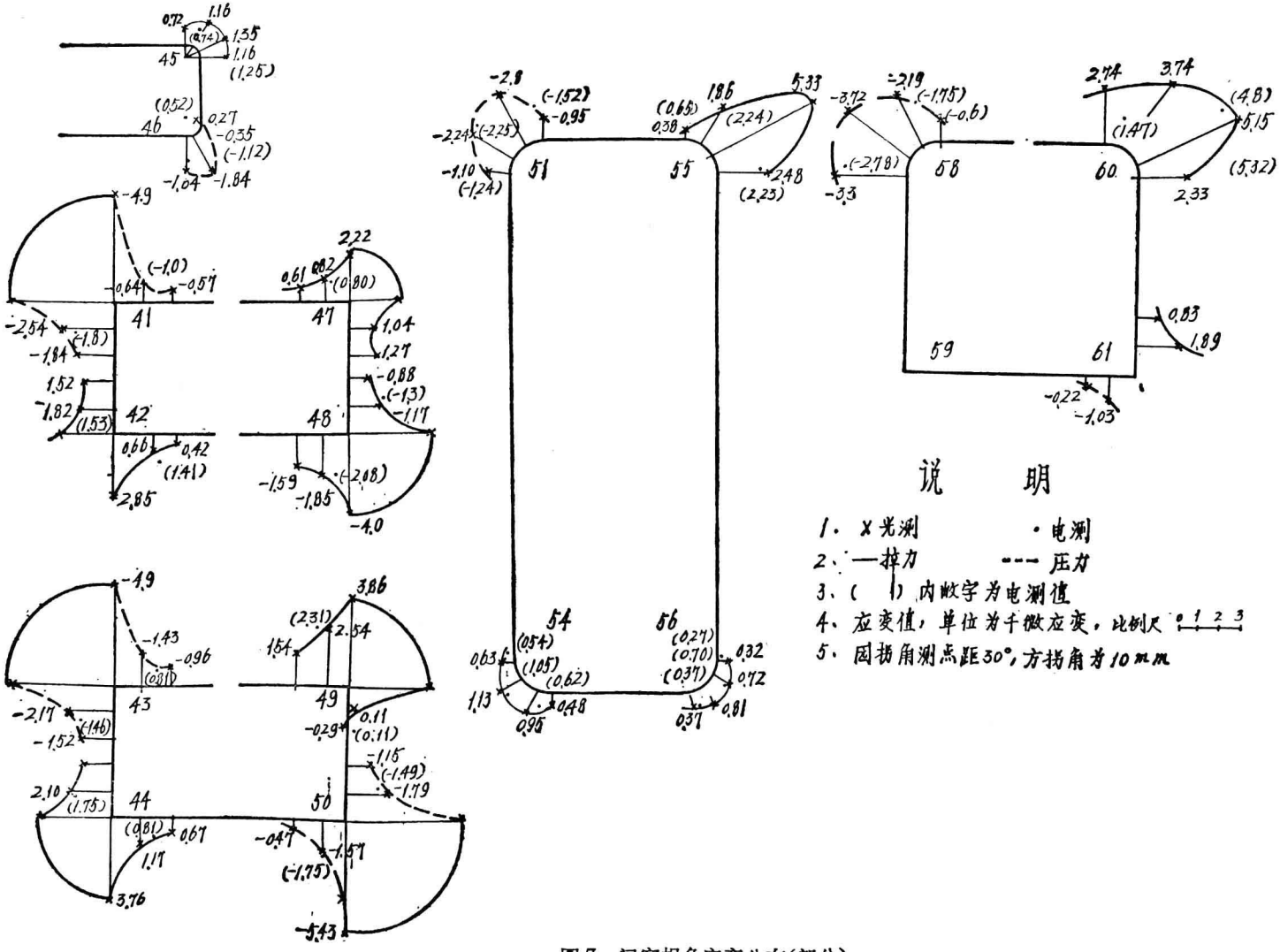
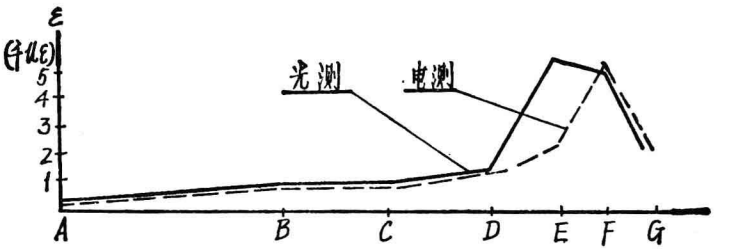
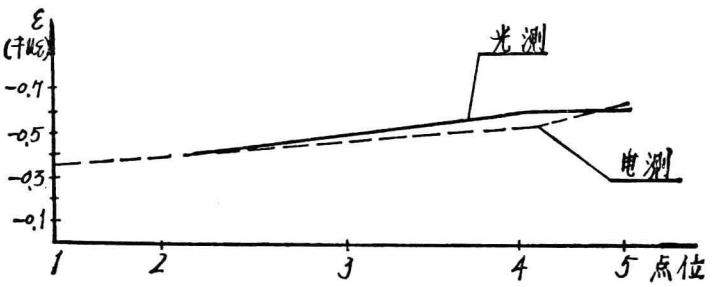


图7　门窗拐角应变分布(部分)



点位	A	B	C	D	E	F	G
光测	0.21	0.90	0.88	1.35	5.38	5.15	1.91
电测	0.18	0.65	0.74	1.18	2.24	5.32	2.62

图 8　侧墙上边圆弧窗口最大拉应变比较



点位	1	2	3	4	5
光测		−0.39	−0.50	−0.61	−0.62
电测	−0.34	−0.39	−0.43	−0.53	−0.66

图 9　侧墙下部边沿应变分布

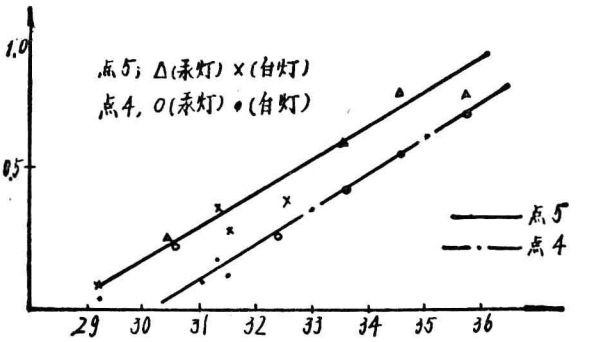
II. 试验技术的几个问题

1. 曲面贴片的成形

试验大部分是平面贴片，采用常规方法[1]，初应力很小。而司机室前窗具有一定的曲率须采用曲面贴片。为了现场操作方便，我们用二次固化材料[1]在实验室完成第一次固化——预制成平板，第二次固化在现场进行，操作程序为：加温软化后立即复于已打磨好的被测部位，并使其与被测处形状吻合，然后固定，继续加温使完成第二次固化。即得到所须的曲面贴片。加温是采用红外线灯，由于控制不佳，软化成形操作时间过长，至使成形后的贴片初应力较大(局部达到 1 条)，有待今后改进。

2. 温度的影响

由于钢和塑料的线膨胀系数差异较大($\alpha_{钢}\approx 12.5\times10^{-6}$，$\alpha_{塑料}\approx 0.6\sim0.9\times10^{-4}$)，测量时与贴片时的温差会引起贴片上额外的初应力。图 10 是在不同的室温下测得车体上一贴片的条纹变化情况，可见影响是很大的，初应力虽可先测量，然后在加载后测得的结果中扣除。但由于贴片多要采用这种方法是很麻烦的。在这次试验中我们是根据当地气象站的气温统计资料，选择了气温较稳定的夜间(23 点到 5 点)进行贴片和测量，以免反复加载，看来，在贴片多，测量工作量大时，温度误差是一个较麻烦的问题。



°C	29.2	30.6	31.3	31.5	32.5	33.5	34.5	35.7
点4	0.04	0.26	0.18	0.12	0.23	0.45	0.57	0.73
点5	0.09	0.28	0.36	0.28	0.39	0.61	0.80	0.80
光源	白	汞	白	白	白	汞	汞	汞

图 10　温度对测量结果的影响

3．加强效应

贴片材料贴在构件表面，增强了结构，在被测构件材料与贴片材料的弹性模量相近时，这种增强效应更为明显，增强的量随着构件的受力状态和它们的厚度比不同而异，例如弯曲要比拉伸大些，在本试验中，车体材料与贴片材料的弹性模量相差较大，厚度比虽大但变化小，受力状态基本上属拉伸，因而采用包括其加强因素在内的模型条纹值结来进行计算。不再另行修正。

III．小结

这次试验说明贴片法用于大面积的测量是有效的，试验结果与电测结果相符，并能准确地给出应力集中的位置及其峰值。

三、用于水轮机叶片根部应力集中的测定

I．试验目的和结果

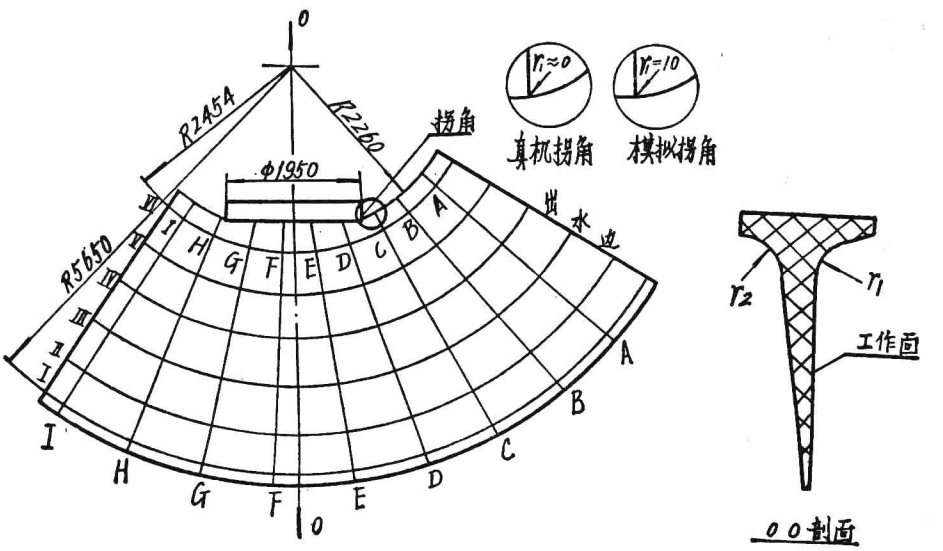
某大型水轮机叶片（见图 11），净重 32 吨，工作面面积约 21 米^2，承受 27 米水头压力和一定的动负荷。叶片根部是受力最大的区域，粗略的计算其应力达 1737 公斤/厘米^2，而两翼与法兰过渡的尖锐拐角处还有应力集中，是叶片的最薄弱部位。为了了解和改善叶片根部的受力状况，我们采用了在环氧-石膏模型上贴光弹性贴片，测定其应力，并对几种改进结构进行对比。试验结果见图 12 和表 1。

结果表明：叶片根部各径向截面的最大应力位于过渡圆弧的中段，而不是在通常计算的 VI 截面上。这说明过渡圆弧处有应力集中现象。而拐角处更严重，原设计此处用 $r\approx 0$ 的过渡形式很不利。几种修改结构的比较指出，当 $r=20\sim 40$mm 时，应力峰值可降低 24～35％。

II．试验技术的几个问题

1．模型制造

水轮机叶片的结构形状复杂，工作表面和背面皆为三度曲面的变截面扇形体。试验模型



各纵截面过渡圆弧半径

	C	D	E	F	G	H
r_1	300	300	220	220	300	340
r_2	430	430	430	430	430	300

图 11　水轮机叶片工作面展开简图

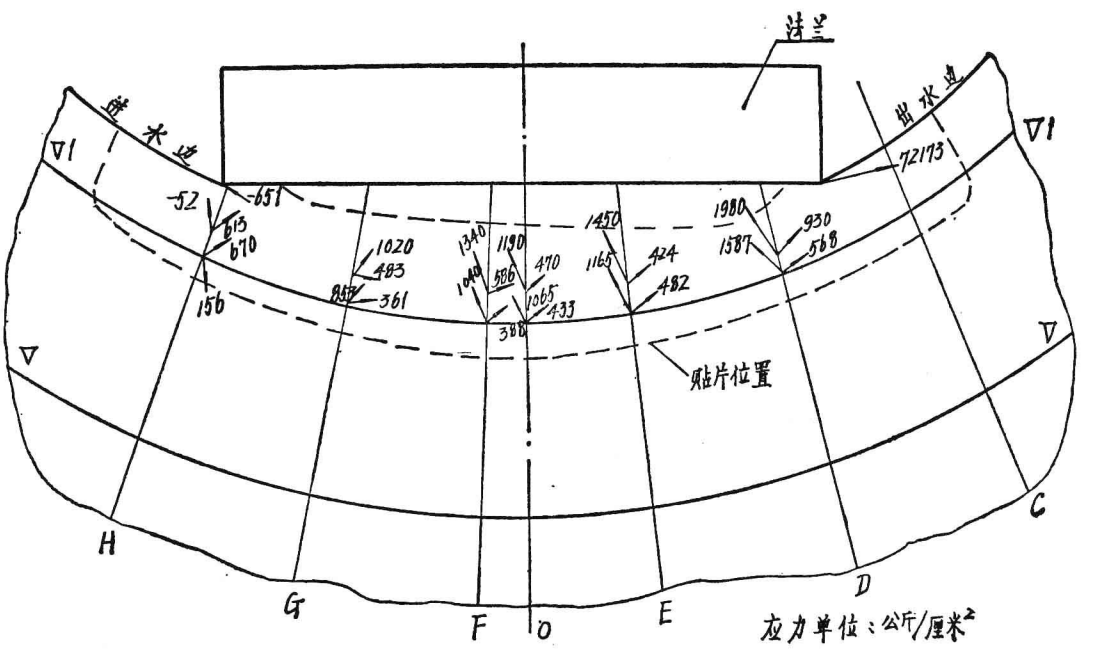


图 12　原设计叶片根部应力分布图〔工作面〕

表1　几种结构拐角处的过渡形式与应力峰值

	原结构		修改结构				
	原设计	试验模型	1#	2#	3#	4#	5#
凸圆弧 r(mm)	0	10	20	40			
凹圆弧 r(mm)					15, 60	15, 60	60
圆弧中心位置*	*OA*	*OA*	*OA*	*OA*	*OC*, *OA*	*OC*, *OB*	*OC*
凹入深度(mm)					33	60	90
应力峰值 kg/cm²	>2173	2173	1307	1655	1985	2064	2690
应力降低百分比	0	>0	>35.3	>24	>9	>5	>−23.4

*　圆弧中心位置参看图 21

缩小 15 倍，用石膏阴模成型浇注后，根据样板精修而成(见图 13)。模型材料的配制工艺：按配比(618#：二丁酯：乙二胺：石膏＝100:8:6.5:30)先将 618#、二丁酯和石膏混合均匀，加温去气泡，冷至 38°C 左右加入乙二胺，为了控制搅拌温度低于 40°C，在冷水浴中搅拌约 1 小时，温度在 40°C 左右浇入涂有黄油的阴模中，两天后脱模。

2．贴片的制备及粘贴

这次的贴片为曲率较大的三度曲面，为了得到成形时软化温度较低，反应较慢的贴片，选用了材——5#[1]的配比，制备程序如下：按配比(618#：二丁酯：三乙烯四胺＝100:5:11)先将 618# 与二丁酯混合均匀，加温去气泡，冷至 40～45°C 时加入三乙烯四胺，仔细搅拌均匀后浇入事前准备好的敞模中(见图 14) 在常温下固化。用聚氯乙烯薄膜代替常用的脱模剂——聚苯乙烯涂层，可以使起模时间提前有利于曲面形成。浇注后要注意观察，待塑料不能流动而可裁剪时即起模，塑料贴片和薄膜一起取出剪下所须大小放在待测处，并使塑料的上表面与模型表面接触，取下薄膜，用吹风机稍加温，贴片即软化并随被测表面形状不同而改变，到贴片全部与模型完全吻合后即停止加热，经室温硬化后取下(见图 15)。此时贴片尚未完全固化，较脆，取下时要小心，被测表面要涂以适当的油脂。

粘贴用胶水是在用与贴片材料相同的配方再加入 30% 铝粉，以增加反射能力，粘贴时，粘贴表面用丙酮清洗后风干，涂上胶水，放上贴片，挤出多余的胶水和气泡，在 30°C 温度下固化 36 小时即可测量。

这样得到的曲面贴片，不但形状能与模型吻合而且初应力也很小。

3．加载装置和条纹测定

由于采用弹性模量较低的环氧树脂——石膏塑料作模型，使得到最佳测量条纹数(2～3 条)时所须加的载荷不大，和以静水头均压作为试验模拟工况，不考虑离心力两原因，所以加载装置极为简单(见图 16)。模型是用和真机相似的十个螺栓通过法兰固定在支座上，静水头压

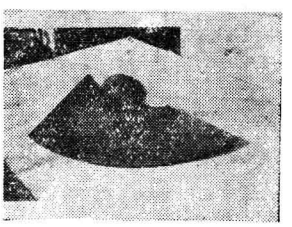


图 13　叶片模型

图 14　敞模

图 15　成形贴片

力用气囊压在工作面上来实现(见图 17)，压力的大小用 U 形水银压力计控制。通过在 VI 截面的三个不同位置所贴电阻片，观察到载荷的重复性良好，没有明显的蠕变现象。

用大视场反射式光弹性仪进行逐点测量，分数条纹用双四分之一波片旋转检偏镜补偿。图 18 为出水边拐角的条纹图。

4．加强效应

在本试验中，模型材料和贴片材料的弹性模量相近（$E_m=5.66\times10^4\text{kg/cm}^2$、$\mu_m=0.38$，$E_c=3.8\times10^4\text{kg/cm}^2$ $\mu_c=0.32$，$\varepsilon_0^{1.0}=530\times10^{-6}$），而且各测点基本上处在受弯曲的状态。因此其加强效应较大，必须予以考虑，为此在做模型的同时用同样的材料在同样的条件下做了一根和 0–0 径向切面相似的变断面悬臂梁(见图 19)测定其不同情况下的修正系数(见图 20)，梁的实际应变用电测测得，然后在相同的载荷下测取条纹数。求得 $\varepsilon_0^{1.0}=\dfrac{2t_c(\varepsilon_1-\varepsilon_2)}{m}$ 如在梁高 3.3cm 处，贴片厚度为 0.136cm 时测得综合梁的 $\varepsilon_0^{1.0}=610\times10^{-6}$。因而得到此具体条件下的加强修正系数 $C_1=610/530=1.15$。

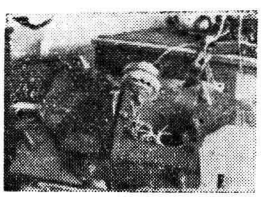


图 16　加载装置

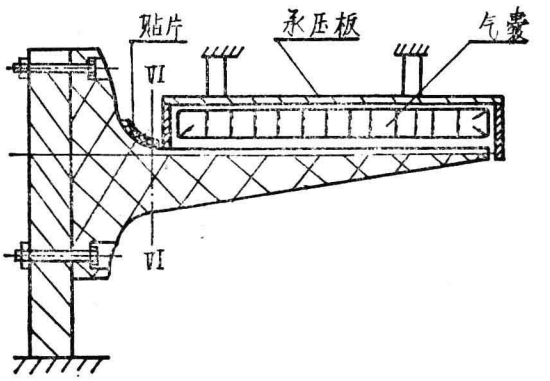
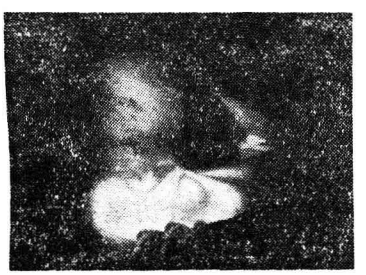
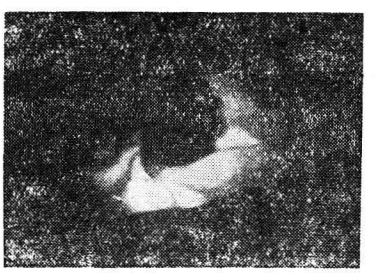


图 17　气囊加压示意图



(a) 1#($r=40$)



(b) 5#($r=60$)

图 18　出水边拐角的条纹图

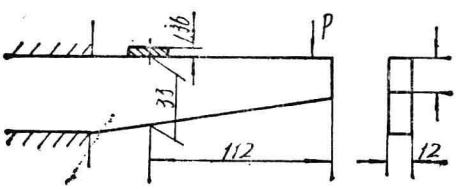


图 19　标定梁

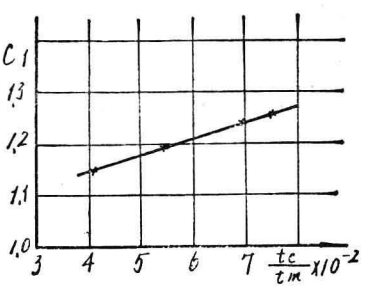


图 20　加强修正系数

试读结束，需要全本PDF请购买 www.ertongbook.com