

实验应力分析 文献汇编

中国科学技术情报研究所重庆分所

前 言

結構和机器的强度是工程师在設計中最重要的問題，如何設法来防止結構或机器的破坏，首先要作应力分析。在許多情形下，材料力学的初等方法不能充分显示結構和机器中的应力分布，例如梁上荷載及其支点附近的局部应力、各向同性体中的应力分布、梁和軸截面如有剧烈的变化都无法用初等理論来研究，又例如在結構和机器上有凹角、孔、縫以及較深的切削刀痕而产生的应力集中問題，一切破裂事故都由此开始，經過一个时期工作后，而使結構或机器成为废物；一个极微小的小孔就足以使价值高昂的大馬力透平机发生破坏，而打在螺旋桨要害上的檢驗合格标记，亦足以使一架飞机失事，这些問題都不是材料力学的初等方法能解决的，必需借重弹性力学中更强有力的方法。

弹性力学是根据简单几何形状的固体在最简单形式的应力作用下的性能而得出許多有价值的原理和結果。但是在許多实际問題中，这类情况是少有的。为了使問題能够簡化，工程师常根据經驗的判断作出某些近似假設，并由此得出近似解答，但很难估計他所作的假設包含的誤差到什么程度，因此工程师总是在寻求那些可以校核他的計算的方法。目前已有許多为此目的的方法，例如光弹性法、应变計法、脆性漆涂层法、分格画网法、X射綫图解法等。除校核計算外，当結構或机器形状非常复杂，其所受荷載也非常复杂时，可以直接采用用这些方法分析的結果作为設計的依据。

本汇编仅就光弹性、电阻应变技术和固体力学中的模拟技术三方面选择了九篇文章。

光弹性法是利用人工双折射现象来测量应力的方法，这一方法开始已一个多世紀，在相当长的时期內只限于解决二向問題，现在已发展解决大部分现代工业問題。本汇编首先就光弹性涂层法方面选譯了两篇文章：（1）光弹性涂层技术的近代发展，（2）关于任意厚度涂层的双折射涂层法的精度。光弹性法只能应用于弹性阶段，在塑性阶段，双折射不再与应变及应力成比例，此外經常需要直接在結構或机器表面上測量应力，以补模型試驗之不足，这两个問題都可用光弹性涂层法来解决。前一篇文章評述了近代光弹性涂层技术的发展，文中指出，这种技术由于对使用塑料、仪器和技术作了許多改进，它已与工业日益密切結合，而与一般二向和三向光弹性法、电阻应变計法及脆性漆涂层法并駕齐驅，成为实验应力分析中的一个强有力的工具。在最后一篇文章中作者力图发展和証明光弹性涂层的純理論概念，来进一步全面了解影响这个方法的精度的各种因素。为了証明这些概念并了解涂层效应的性質，作者进行了一些試驗分析。散光法为研究立体模型的光弹性法，此法的优点为不必将模型切开，缺点就是方法的探討不够充分，且必需特殊設備，关于这方法，我們推荐了《散光光弹性的一些新技术》一文。文中提出了散光法中确定次主应力的方向及其差值的一些新技术，这些新技术不使用补偿器也能得到和补偿法相同的精确度。

光弹性涂料和应力凍結法的一个特别有意的应用是創造了光弹性应变計。光弹性应变計的主要优点是只要模型負荷时保留对光弹性应变計作直接观察的可能性，就可以无需任何仪器进行靜力測量。光弹性应变計是从光弹性涂料和应力凍結法二者为根据的。本汇编选譯了《光弹性应变計》一文，这篇文章介紹了一种新的光弹性应变計，它能准确地直

接指示出主应力的大小和方向；同时可以观测許多应变計，并且可以容易地找出部件的危险区域。这种应变計也可应用于高溫問題和动力測量。

在許多微小变化应力場問題中，由于沒有各向同性点，一般采用逐漸改变荷載而观察条紋的发展来确定整数条紋級。但此法不能适用于从三向模型中切取的薄片，在此情况下，可逐漸减少薄片的厚度观察所产生的条紋級。但如果原来的切片很薄，此法是困难的而且有时行不通，唯一只有采用补偿法。論文《光弹性分析中确定各个整数条紋級的方法》中提出了一个与此相反的而比較簡單的方法，文中討論方法的理論基础和进行的步驟，并証实这方法是非常成功的。

溫度变化对应变計物理性質的影响是很大的，这种影响包括两方面，一方面是由于应变計栅网的几何尺寸受热膨胀而引起的电阻、电阻率、泊松系数以及綫膨胀系数的变化，另一方面为涉及金属的物理化学变化，所以现在世界各国一直都在寻求各种方法，将目前在常溫下可得出滿意結果的电阻应变計推广用于高溫条件下。关于电阻应变計我們提供了三篇文章。第一篇文章《高溫电阻应变計的評定》指出为了瞭解应变計的性能有对它进行全面評定的必要，文中介紹了进行評定的設備，討論了評定的內容（应变灵敏性、時間稳定性、溫度灵敏性、应变范围及高速加热）及方法并給出典型結果。第二篇文章《高溫康銅絲应变計》敘述了苏联中央鍋炉透平研究所所完成的有关各种牌号康銅絲应变計电学特性与热处理溫度、時間和制度的关系的系統研究結果。第三篇文章《埃佛罗电阻应变計及其在高溫条件下的使用》中提出了一种足够灵敏的电阻应变計，它能在測出因瞬变增溫而产生的較小溫度应变，而且有足够大的量程，容許測量那些表达出飞行負載的較大机械施加应变，精度很大，并且能在长期保持一致和稳定的性能。

最后，我們选譯了一篇有关固体力学中的模拟技术的文章：《扭轉問題——一个新的扭曲試驗》。这篇文章敘述了求解泊松方程式的一个快速和經濟的电比拟法，其精确度可达百分之几以內，文中对典型截面的理論值和实验值进行了比較。

編者

1964年8月

目 录

前 言

光弹性学

- 光弹性涂层技术的近代发展.....G. S. Holister(7)
关于任意厚度涂层的双折射涂层法的精度.....Daniel Post, Felix Zandman(17)
散光光弹性的一些新技术.....Y. F. Cheng(33)
光弹性应变計.....U. G. Oppel(39)
光弹性分析中确定各个整数条紋級的方法.....Banshidhar Pant(55)

电阻应变計技术

- 高温电阻应变計的評定.....R. L. Bloss(58)
高温康銅絲应变計.....Е. Ю. Нехендзи, Н. П. Харитонов(69)
埃佛罗电阻应变計及其在高温条件下的使用.....J. Edwards, R. Turnbull(74)

模拟技术

- 扭轉問題——一个新的扭曲实验.....J. H. Swannell(90)

光 弹 性 学

光弹性涂层技术的近代發展*

G.S.Holister著

1. 历史的发展

从具有双折射材料涂层的结构表面上直接测量应变的最初概念的提出应归功于 Mesnager¹ (法国, 1930), 当时, 他未能得到实际的结果, 因为, 缺乏适当灵敏的光弹性材料。其后, 1932年法国的 Mabboux², 1936年德国的 oppel³ 和1949年英国的 K. O. Scott 作了许多工作。1953年3月 H. T. Jessop 在英国皇家航空协会杂志 (Journal of the Royal Aeronautical Society) 上发表了近代的塑料与结构物粘贴可能性的某些研究成果。1954年7月美国 Drucker⁴ 在布鲁塞尔国际理论力学和应用力学协会的会议上提出了一篇他在布朗大学 (Brown University) 研究的文章。

近年来, J. R. Linge 发表了几年前在航空学院所做的一些研究成果⁵, 同时, 在日本, K. Kawata 也作了类似的研究⁶。此外, J. R. Dixon 在苏格兰国立工程实验室里也完成了一些有关这一领域的工作。

1953年, 在法国, F. Zandman 实现了应用于任意零件的 (不管材料、尺寸或形状如何) 在弹性和塑性变形范围内的最早实际结果在工业上的应用⁷⁻¹⁰, 在那里光弹性涂层技术首次直接用来作为这个领域内的实用工具。

自从1956年以来, 这种技术已在美国出现并与工业相结合, 对塑料、仪器和技术已作的改进给光弹性涂层技术取得与一般的二向和三向光弹性、电阻应变计以及脆性漆涂层技术并列的位置, 作为一个完全公认的应力分析的工具¹¹。

由于“光应力”名称的通俗性, 这种技术已在工业和科学界中有名, 为了方便起见, 作者以后将采用这个名称。

符号:

E ——弹性模量

μ ——泊松比

t ——塑料厚度

δ ——光波的相对减速

ε_1 ——较大的主应变

ε_2 ——较小的主应变

σ_1 ——较大的主应力

σ_2 ——较小的主应力

* Journal of The Royal Aeronautical Society, 1961, vol.65, No.610, pp.661—669.
«Recent Developments in Photoelastic Coating Techniques».

θ ——光线在塑料上的入射角

c ——塑料的应力光学常数

K ——表示塑料光学应变灵敏性的无量纲常数

注脚:

m ——表示金属或工件

n ——表示正射光

p ——表示塑料涂层

ob ——表示斜射光

2. 基本 原 理

定义:

等倾线: 即在平面偏振光中所观察到的黑色条纹, 它是主应力方向为不变的并与正交偏振镜的偏振轴重合的点的轨迹。

等色线: 它是一根同样颜色的线, 也是等最大剪应力或等主应力差的线。

古典的光弹性理论是有名的¹², 把它稍微修改后几乎完全可以应用于光弹性涂层。

简要地说, 任意材料在受力的时候, 将显示出人工的或暂时性的双折射, 在正射之下的相对减速 δ 与主应力差的关系可用 New-方程式表示:

$$\delta_n = (n_1 - n_2)2t = C(\sigma_1 - \sigma_2)_p 2t$$

$$\text{或} \quad \frac{\delta_n}{2tC} = (\sigma_1 - \sigma_2)_p \dots \dots \dots (1)$$

(注意: 公式中表示的 $2t$ 是因为光线由试件表面反射经过塑料两次的缘故。)

当所粘贴的塑料涂层精确地随试件的变形而变形, 并假定垂直于表面的应力是微小的可忽略不计, 则可以证明:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)_m = \frac{\sigma_n(E_m/1 + \mu_m)}{2tK} \dots \dots \dots (2)$$

其中 $K = CE_p/1 + \mu_p$ 。一般说来, K 由校准来获得或者由涂层制造厂给出。应注意到在零件表面上, 最大剪应力为 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ 之半。把虎克定律应用于方程(2)中, 可看出:

$$(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) = \delta_n/2tK \dots \dots \dots (3)$$

有了 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ 以及 σ_1 和 σ_2 的方向, 就可应用数学方法来确定主应力的单独值。同样, 沿大部分破坏发生的任意自由边界(孔、缺口等), 垂直于边界的应力等于零; 所以, 切向应力值可由边界处的条纹值直接得到。

在单独主应力必须用实验来确定的情况下, 以斜射的偏振光通过塑料涂层进行的光弹性分析(见图3), 将提供 σ_1 和 σ_2 的单独值和符号^{8, 10, 13, 14}。

组合一次正射和一次以 45° 光线通过塑料的斜射的读数, 可以证明:

$$\sigma_1 = \frac{E_m}{tK(1 + \mu)} \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \delta_{ob} - \frac{\delta_n}{2} \right) \dots \dots \dots (4)$$

$$\sigma_2 = \frac{E_m}{tK(1+\mu)} \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \delta_{ob} - \delta_n \right) \dots\dots\dots (5)$$

(为了简化公式已假定: $\mu_m = \mu_p = \mu_o$)

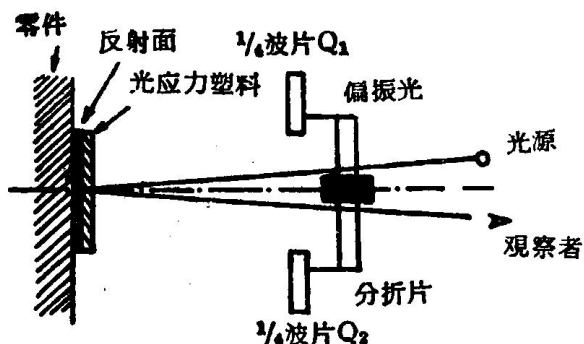


图1: 确定 ϵ_1 和 ϵ_2 方向的反射偏振镜构造的示意图 (平面偏振镜)

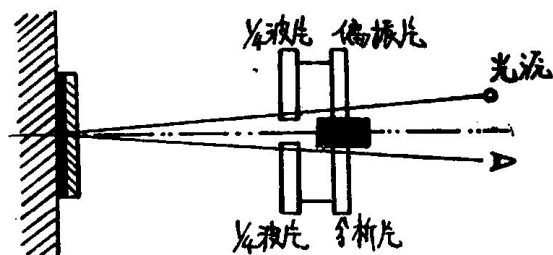


图2: 测量最大剪应变 $\epsilon_1 - \epsilon_2$ 的装置 (圆偏振镜)

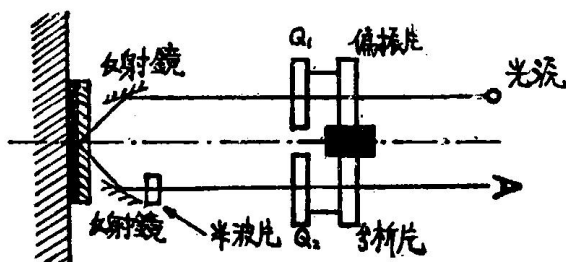


图3: 利用斜射法测量主应变 ϵ_1 和 ϵ_2 的单独大小和符号的装置

3. 实 验 技 术

光弹性涂层可用刷子把液态塑料涂在结构物表面上, 并加热结构部分使涂层聚合而应用的。或者, 把预先做好的平板或割成一定外形的塑料薄片于室温 T_1 粘贴在结构物上。(图4(a)—4(d))

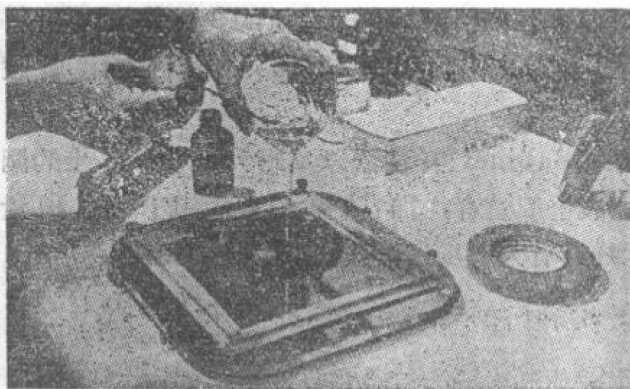


图4(a): 注混合塑料和硬化剂到模子中, 在放热反应之后升高温度到90—100°F

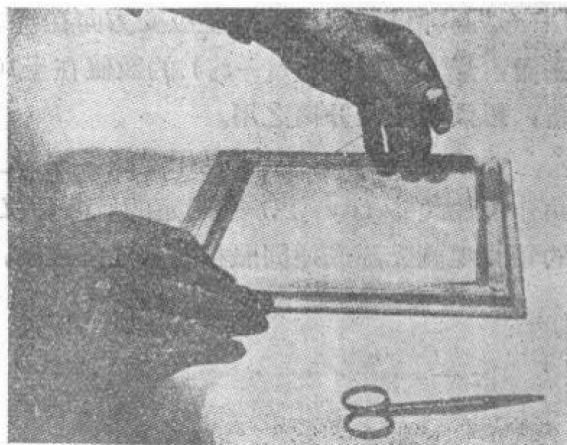


图4(b): 从模子中取下半聚合的薄片

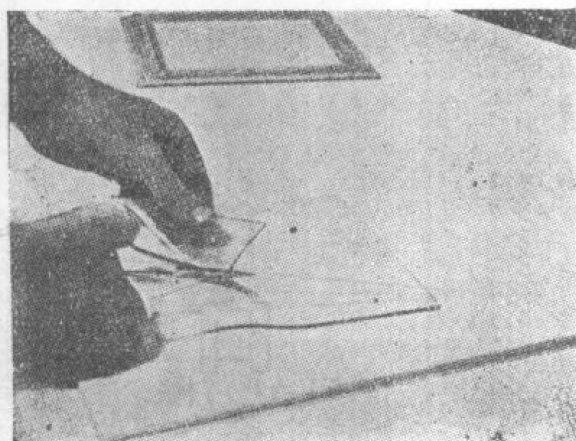


图 4(c): 根据尺寸来切割薄片

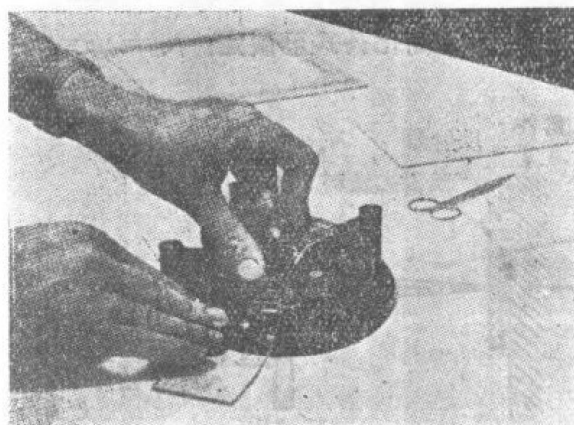


图 4(d): 根据结构部分画塑料的轮廓线

测得的最大应变可能为 3—50% 的数量级, 这将取决于所使用塑料的类型¹⁰。最大伸长为 3% 的塑料一般运用于金属结构部分, 对于 0.120 吋厚的薄片 ($K=0.1$) 来说, 它所具有的条纹值近似为 1000 微吋/吋/条纹。最大伸长为 50% 的塑料一般用在其他塑料、橡胶、帆布、纤维制品和其他具有高的固有伸长特征的材料上。对于 0.120 吋厚的薄片 ($K=0.02$) 来说, 它所具有的条纹值近似为 5000 微吋/吋/条纹。

塑料的校准通常由于悬臂梁端点上施加静荷而受到影响, 在悬臂梁上盖上从相同模型上割取的微小塑料薄板条或贴上作为粘贴于结构上塑料的薄片。

对于一给定荷载杆子上部表面的应变是容易计算的。测量了由此荷载所产生的双折射 δ , 且在应用一弯曲修正因数以后利用方程(3)可求得系数 K (这一点在后面讨论)。

4. 仪 器

发展了两种用于应变分析的基本仪器; 一种是研究很小结构部分或高应变梯度区域 (孔、嵌条、缺口等等) 的显微镜型偏振镜 (图 5), 另一种是测量相当大结构的大视场偏振镜 (图 1、2、3 和 6)。

这两种仪器所提供的主应变方向在 ± 2 度之内, 对于厚为 0.120 吋的 3% 伸长的塑料来说, 最大剪应变 ($\epsilon_1 - \epsilon_2$) 的数值在 ± 10 微吋/吋之内。两种仪器都具有斜射的附属设备, 以供主应变分离之用。

一相对减速的分数级是用显微偏振镜上的 Babinet 补偿器以及用大视场仪器上的测角补偿法 (Tardy 法) 来确定的。两种仪器设计成这样, 即它们可以连同用于动力测量的频闪观测光源或连同照相设备 (静或动, 并具有大视场仪器, 高速) 一起使用。



图 5：小視场（显微镜）偏振鏡

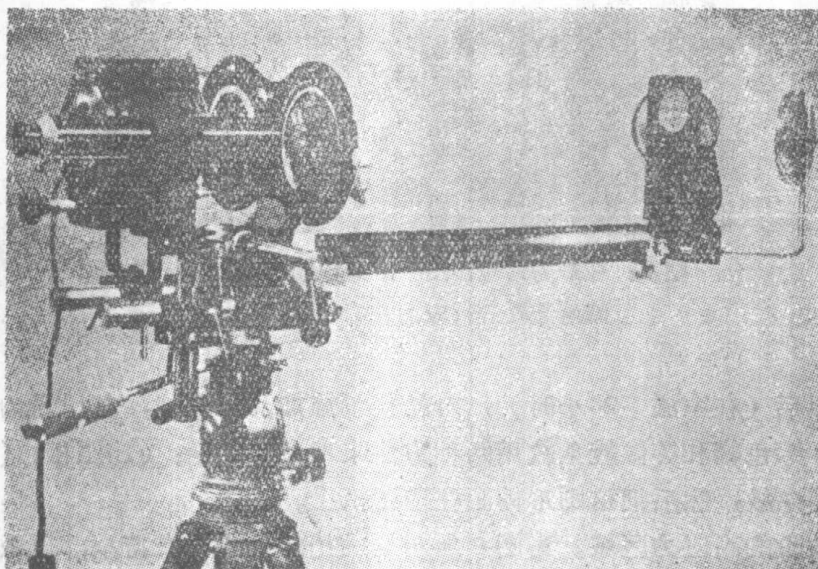


图 6：具有斜射附属设备的大視场偏振鏡

5. 光应力在航空学领域中的应用

5.1 飞机降落装置的应力分析

光弹性涂层法已经应用于大量的结构问题中，这类问题必须知道最大剪应力的分布。图7中所示的飞机降落装置是一个在范围广泛分析之下的大型结构的实例。整个降落装置用0.075吋厚的部分聚合的塑料薄片涂层，薄片外形做成如同结构物的形状。利用了許多零散薄片，每一块薄片是小心且缓慢地对着它的相邻薄片切割而得到的。

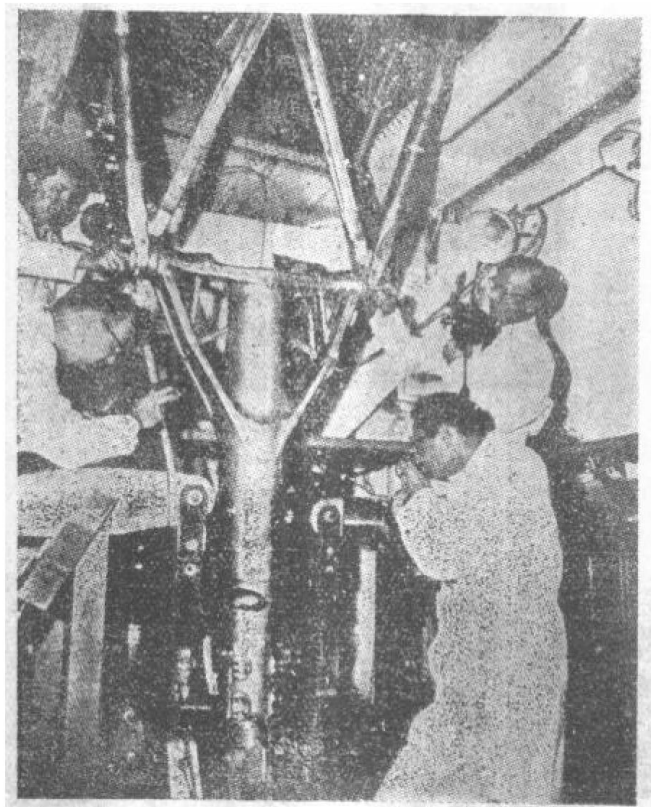


图7：在静力荷载作用下，对B.58 “Hustler”
降落装置进行应力分析

完全聚合以后（在室温下24小时），对结构物施加静力荷载，其增量为估计的最终设计荷载的10%。等色线和等倾线条纹用两种方法来观察和记录：（1）照相；（2）用脂油笔直接在涂层上描绘条纹，然后把这图形转画在描图纸上。

图8表示危险的高应力区域。当图8所示的结构部分为了支持全部荷载需要修改成为显而易见时，在估计的设计荷载的40%之际，停止了试验。

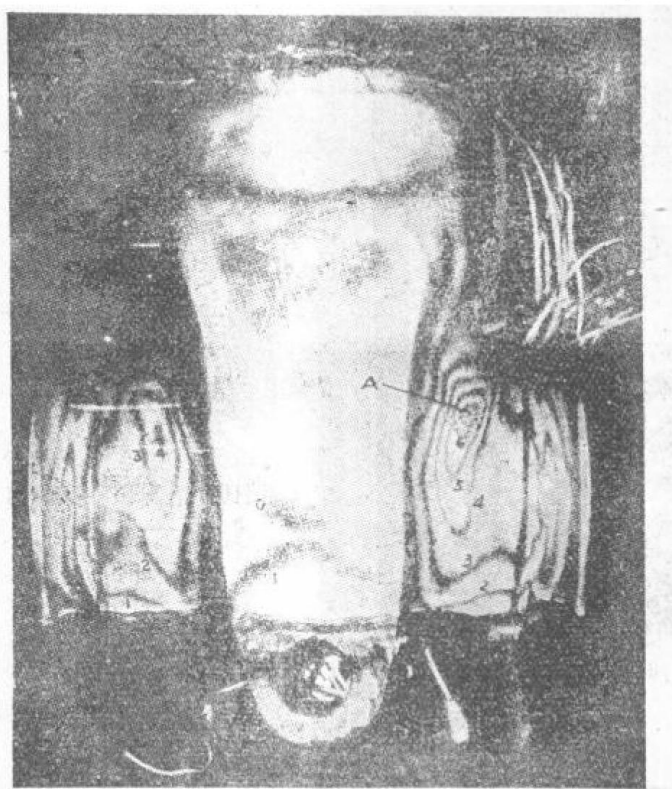


图 8: 在40%的垂直荷载和30°的滑行转弯条件下, 运输机降落装置的前轴。在 $A(6\frac{1}{2})$ 点的最大剪应力 $= \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) = 123,500 \text{ 磅/吋}^2$

5.2 火箭发动机箱的应力分析

重叠点焊的不锈钢压力容器用光弹性涂层和电阻应变计两种方式进行实验应力分析。对于容器的各个特征区域确定了应力分布。

涂层由厚为0.056吋和0.053吋的两种具有一定外形的薄片所组成。聚合后无初始双折射出现。试件的其他区域用液体树脂直接刷在试件表面上的非常薄的塑料层(0.010吋)来覆盖。这部分单独用来观察塑性变形区域一薄的刷上的涂层特别适宜于塑性应变测量, 因为可获得较好的粘着(应该注意, 因为应变在塑性变形范围内高, 所以薄涂层能给出足够的双折射)。

除了涂层之外, 在四个临界位置还应用了1/4吋规长的应变计。

外壳是采用内部水压加载, 每次增量为100磅/吋², 加到1500磅/吋²时发生破坏。

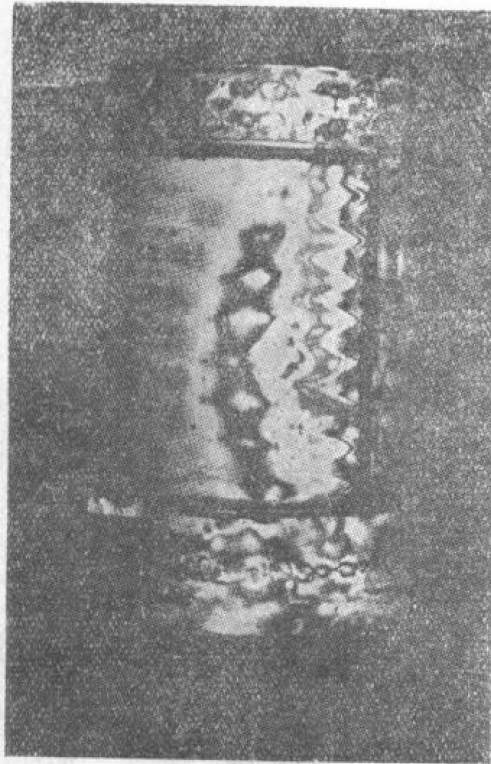


图9：在500磅/吋²压力时的光弹性图

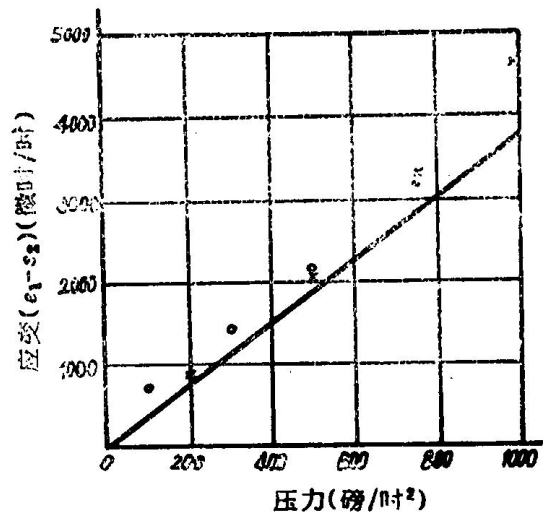


图10：计算值和实验值的比较

—— 计算值
 ○ 光弹性涂层
 × 应变计

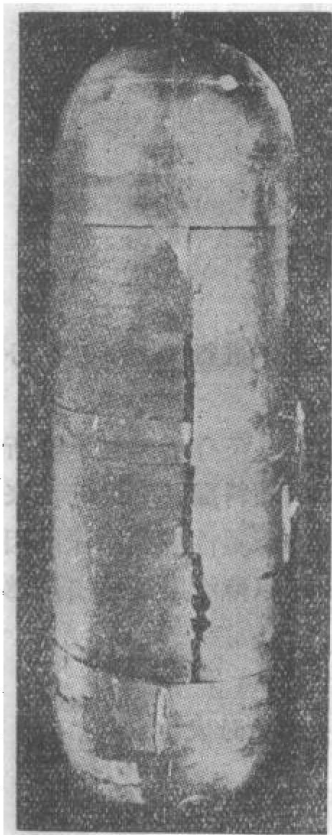


图11(a)：破坏后的压力容器



图11(b)：破坏后永久应变的光弹性图

光弹性涂层应变测量的记录的可复演性为 ± 30 微吋/吋，而应变計則为 ± 10 微吋/吋。計算出由塑料所发生的增强效应，但是，这种效应在理論上和实验上都是不足取的。已发现古典压力容器公式可用来作为一满意的第一次近似公式。爆炸压力和計算值极为一致。应变計和光应力讀数在 ± 100 微吋/吋范围之内是一致的。

5.3 导弹尾部断面的应力分析

試驗的目的为寻求：(i)应力集中的位置和大小；(ii)在模拟的飞行荷重下，弹性和弹塑性变形范围内的一般应变分布。

以前的应变計試驗已指出无临界点存在，因为仅仅在四个非常有限的面积上存在着高应力，而其余的面积上皆受到非常低的应变值。

两个铝合金的安定翼用光应力塑料涂层并对它进行分析。量测了最大剪应变，主应变分离值、应变梯度、应变集中系数和主应变的方向。

图12表示了在試驗台上的导弹以及显微偏振鏡装置。图13表示在左翼中观察到的条纹图，清楚地显示了应力集中。

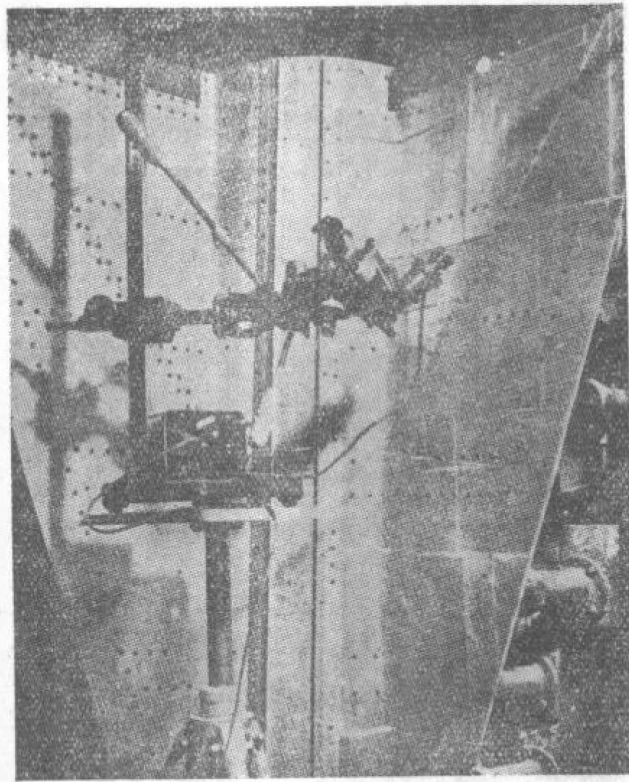


图12：在試驗台上的定向导弹，該試驗台裝有定位的小視场仪表

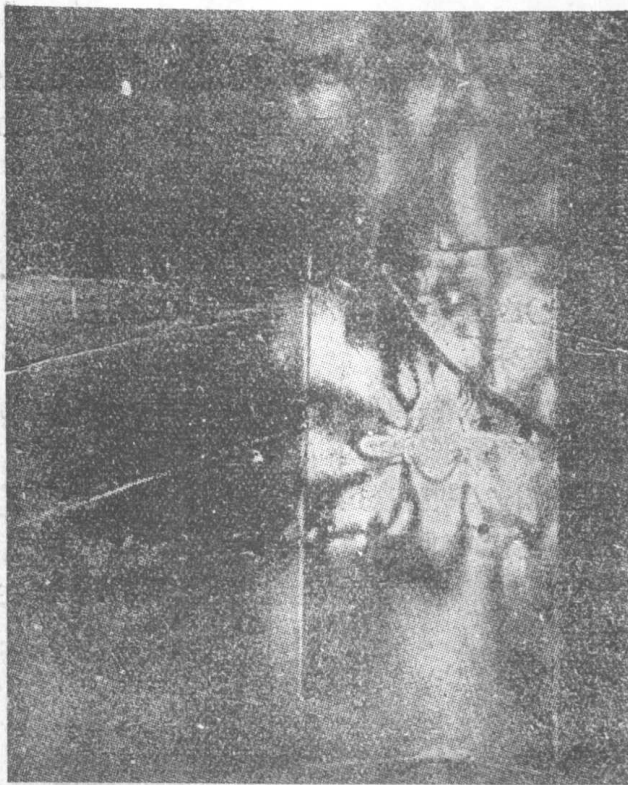


图13: 左翼中高应力集中的照片

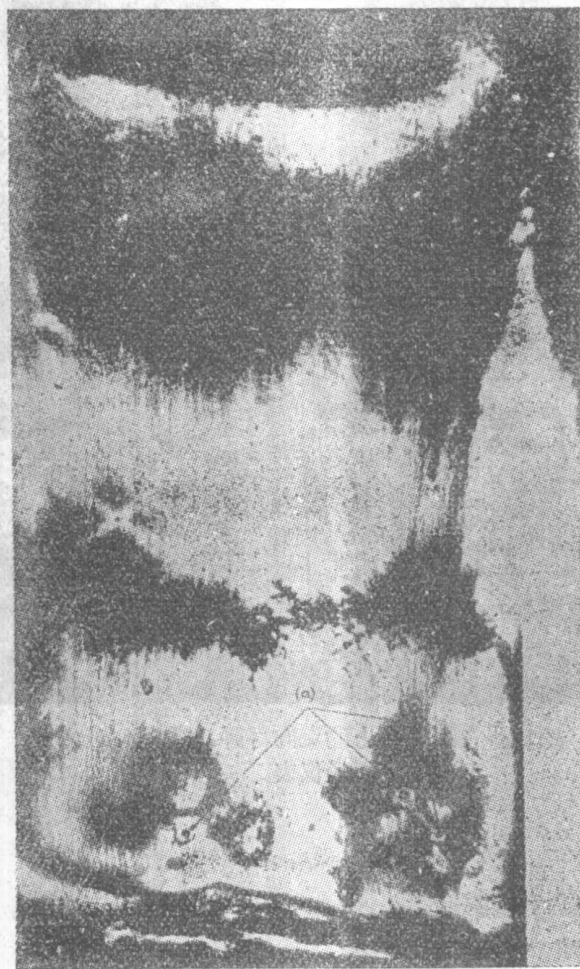


图14: 在透平叶片腐蚀区域周围由于应力集中所产生的条纹图

分析使它可能建議某些設計修改，这些修改将减少重量和縮短制造時間，同时增加結構强度。

5.4 透平叶片腐蝕凹陷处的应力分析

气体透平在連續運轉50小时后，取下若干透平叶片并涂上光应力塑料，目的是为了能确定由微小腐蝕凹陷所引起的应力集中对叶片极限强度的影响。叶片在拉伸試驗机上加载，并測量腐蝕凹陷处周围的应力集中（见图14）。

6. 光应力的其他应用

6.1 塑性屈服的研究

目前許多塑料都具有能够变化的以产生綫性弹性范围（此綫性弹性范围如果需要的话，則可从3%变化到100%以上）的弹性性质这一事实的意义是光弹性涂层技术已經达到了一个发展阶段，在这一阶段中它能在研究材料的塑性和弹塑性性能时作为一种有力的工具。在这領域內，已經作出了某些工作，其中包括金属真正屈服点的初步研究²⁵，以及塑性变形紋理的边界应变的研究。

6.2 残余应力

早已成功地完成了鑄造結構中的残余应力的若干研究¹⁵。所使用的方法是涂到結構部分上并随后把它除去，因此产生由于应力解除所引起的条紋图，然后可以分析这个条紋图。

6.3 热应力

近代鋁和鉄合成的汽車发动机的工业发展带来了許多热应力問題，其中的一小部份已經研究过了^{16, 26}，对于这类問題的研究，光应力技术显然是适合的。但是，必需小心对由于涂层和結構两者的热胀系数的不同而在涂层內所引起的附加应变进行修正。

6.4 疲劳和裂縫的传播

用于近代的光弹性涂层的塑料能比大多数工业材料具有頗較高的疲劳寿命，因而，可以和頻閃光源結合起来用于研究疲劳和裂縫的传播問題。然而，应注意到，由于当靜止完整的涂层下出現一裂縫时产生的在塑料中的“位移应变”要得到裂縫附近的可靠的定量讀数是困难的。当然，这种应变不会与結構中任何相当的应力有关。但是，这个缺点却变成发现裂縫的根据，由于“位移应变”所产生的高条紋級，允許所采用的薄涂层来检查和理解試驗目的。

6.5 弹性和塑性波的研究

已經完成了确定鋁受爆炸冲击所引起的弹性和塑性波性质的研究¹⁷。采用高速照相机，此照相机在500,000张/秒速度时，能給出良好的条紋变化。这种形式的試驗显然将对金属

爆炸的新领域中所出现的许多问题提供一种有用的研究方法。

6.6 粘弹性材料中的应力

许多新的火箭固体燃料都是粘弹性的，在具有温度和压力梯度的情况下，将产生性质极其复杂的应力问题，这些问题直接影响此种燃料的燃烧稳定性。这种粘弹性燃料的分析已经完成了在一定温度和压力梯度之下的应力研究，并得到了有用的量的资料¹⁸。利用这类材料时，塑料增强效应是重要的，而且必需小心考虑这种效应。

7. 光应力技术的优越性和局限性

7.1 优越性

光弹性涂层相当于无数个规长为无限小的应变计连续地分布于结构物表面上。应力可在承受工作荷重条件的结构物上直接读出。

实际上，对于所有的建筑材料，如木材、混凝土¹⁹、金属、玻璃、橡皮、塑料等等都可以分析。

可以制造塑料以抵抗几乎任何所需要的伸长，此塑料具有双折射/应变的线性特征，这线性特征使数据能在大多数结构的弹性和塑性范围内获得。

静止、运动或高速照相可以如同黑、白或彩色电视那样用来研究静力和动力加荷的情况。

可以直接确定出最大剪应变和主应变的方向。斜射的另外读数可以给出分离的单个主应变的大小和符号。

在过去四年的时间内，系统的测量指出，塑料的灵敏度保持不变，且对湿度的影响相对不灵敏，因而使得它能用于长期测量，如坝体、桥梁等等的结构。

7.2 局限性

在不易照射到光线的面积上，应变是不能测得的（然而，如果受力超过弹性极限的这一部份在卸载后变成易受光线的話，则残余应力能够测量出。）

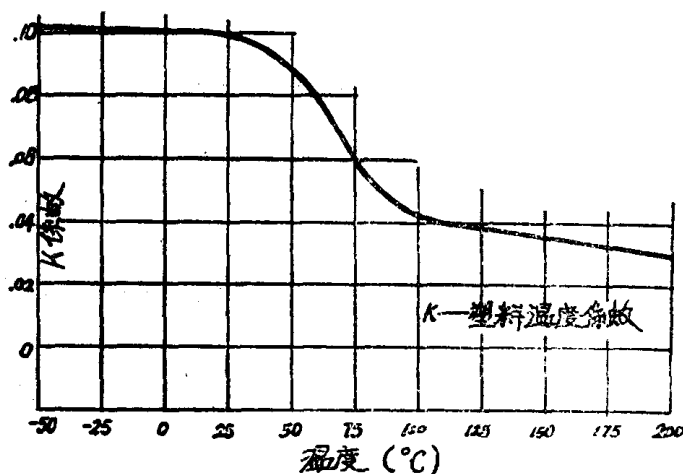


图. 15

应变光学常数 K 在温度从 -40° 到 95° F 范围之外是变化的。必须对这范围之外所取得的读数进行修正（见图15）。

如果读数是在某一温度下取得的，而这温度与涂层粘贴于结构上时的温度相差很远，则在塑料边缘由于塑料和试件之间膨胀的不同而将产生依附双折射。在

这种情况下，结构中的应变可以根据有载和无载的双折射来计算^{20, 21, 22}。

光弹性涂层技术仅用来测量表面应变。

对于可以用最大剪应力理论来作为结构破坏的准则的一些情况，正射读数将常常提供有关破坏预兆和结构上安全零件设计的足够资料。然而，条纹图只能提供涂层平面内的最大剪应变，但这未必是任何点上的最大剪应变。

我们合理地假设垂直于结构自由表面的应力 σ_3 为零。最大剪应力等于代数上最大和最小主应力之间差值的一半，如果 σ_1 和 σ_2 的符号相反（即一个是拉，一个是压），那末，最大剪应力等于 $\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)$ ，且发生在表面内。但是，如果 σ_1 和 σ_2 具有相同的符号（两个同

为拉或压），那末，最大剪应力为 $\frac{1}{2}\sigma_1$ 或 $\frac{1}{2}\sigma_2$ ，而 $\sigma_3=0$ ，且发生在垂直于表面的平面内。

在这种情况下，主应力分离值将由斜射的附加读数确定。

确定应变的精度不仅依赖于双折射的测量精度，而且也依赖于确定涂层厚度的精度（见方程(3)）。对于不含有曲率突然变化的平坦的薄片和在结构部件上画出轮廓线的薄片来说，厚度变化不大于2%到3%。对于在有毛病的形状的结构部分上画出轮廓线的薄片和直接在表面上已聚合的涂层，局部的厚度变化可大大地大于此值。在这种情况下，在取读数的每一点上厚度必须已知。对于直接聚合的薄涂层，厚度可用光学（为此小视场偏振仪包含一个设备）和利用千分尺的机械法来测定。用有一定轮廓的薄片，把塑料在结构部分上聚合就很容易测量出厚度，然后，取下薄片并在涂层粘贴于结构之前，必需测量每一处的厚度变化。但是，通常厚度变化是小于3%，甚至对于含有混合曲面的结构也是一样，故如果精度要求超过3%的话，测量是必要的。

对结构增加塑料涂层，能产生增强效应。在任何两向应力系统中，为这种增强效应进行补偿的修正系数如下：

$$C = 1 + \frac{S_p E_p}{S_m E_m}$$

这里， S_p = 塑料的横截面积，

S_m = 金属的横截面积，

E_p = 塑料的弹性模量，

E_m = 金属的弹性模量。

在大多数实际情况下，这修正系数是小的，故可以安全地忽略不计。

当在垂直于涂层的平面内发生弯曲效应时，由于塑料内应变梯度的影响和中性轴位置的改变，增强将成为更加重要的因素。在这种情况下，修正系数可从那些相似于图16中的修正曲线中得到。对于最普通的结构材料也存在相应的曲线²³。

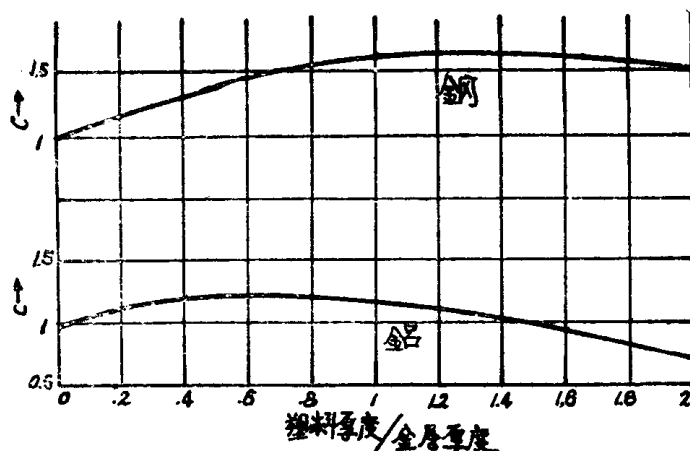


图16. 塑料系数K应乘上的弯曲校正系数的修正