

氢脆试样应力集中系数的 光弹性测定和有限元计算

于 崇 华

许多合金材料,在电化学加工等工艺过程中,表面都会有一定量的氢原子渗入,从而使构件在应力状态下产生脆性破断,即所谓氢脆现象。特别是高强度钢,由于其本身强度高韧性低,对氢脆比较敏感。为此,必须对航空材料的氢脆现象进行研究。

在研究材料的氢脆性能时,要对各种缺口试样进行应力集中程度的分析。应力集中程度是用应力集中系数来表征的。对于典型的应力集中情况,其应力集中系数可从有关的手册和图表中查到,或者用理论公式计算^[1,2,3]。但在工程实际中,构件的几何形状和载荷方式都是相当任意的,其应力集中系数就不能简单地由查表或公式得到,而必须通过实验测定或数值计算法得到。光弹性法是确定应力集中系数的有效实验方法之一,而有限元法又是近几年随着电子计算机的发展而迅速发展起来的一种数值计算方法,是进行强度分析的有力工具。为了比较,我们用这两种方法分别测定和计算了不同曲率半径、60°V型缺口拉伸试棒的应力集中系数,并且与理论值进行了对照。最后,讨论了光弹性法和有限元法的关系。

一、基本原理

根据定义^[1],应力集中系数(K_t)等于不超过弹性极限的最大应力(σ_{max})与名义应力的比值,即

$$K_t = \sigma_{max} / \sigma_n \quad (1)$$

名义应力(σ_n),是根据普通材料力学公

式计算得到的平均应力。在我们这里研究的具体情况下

$$\sigma_n = 4P / \pi d^2 \quad (2)$$

式中: P ——试棒两端所加载荷;

d ——缺口处最小截面直径。

现在的问题是如何求出最大应力(σ_{max})。下面我们就分别用光弹性法和有限元法测定计算此值。

二、分析模型的设计

在对任何实际工程问题进行应力分析之前,必须对所研究对象进行详细分析研究,找出能够反映问题实际的主要因素。尤其是所研究对象的几何形状和受力情况比较复杂时,必须进行简化,找出反应问题本质的主要作用力,以及直接影响力分布的几何尺寸,忽略其他

次要成份,设计出要进行分析的模型。当然,这种简化必须是工程上所允许的,而且保证结果不致失真。

图1是所研究的氢脆试棒的分析模型。一个带有周向V型缺口的试棒,直径 $D = 6.500$ 毫米,缺口角度 $\omega = 60$ 度,缺口深度 $t = 1.000$ 毫米,试棒最小直径 $d = 4.500$ 毫米。根据圣

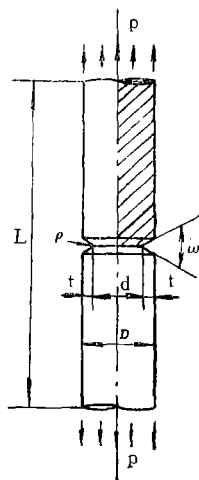


图1 分析模型

维南原理^[4],试棒计算长度 $L=30.000$ 毫米。缺口根部曲率半径 $\rho=0.125, 0.175, 0.250$ 毫米。

试棒两端承受均匀拉力。

试棒材料是 GC-4 高强度钢, 其弹性模量为 1.9916×10^6 公斤/厘米², 泊松比是 0.260 。

很明显, 这是一个三维轴对称应力分析问题。

三、光弹性实验

众所周知, 光弹性是一种模型实验方法, 它是用光学灵敏材料制成实物模型, 施加相应的载荷, 在偏振光下照射, 就能测定出模型表面和内部各点的应力及其分布, 然后根据相似理论将模型应力换算成实物应力。因此, 首先必须进行模型的浇铸和加工。由于所研究的是三维应力问题, 应该采用三维模型分析法。这里所采用的是最基本的、也是最常用的“冻结”切片法。

用 6101* 环氧树脂作光弹性材料, 其配比 (按重量计) 是:

6101* 环氧树脂: 顺丁烯二酸酐(分析纯)
= 100 : 30

这里没有加催化剂。实验证明, 按上述配比做成的材料性能良好。

根据 Neuber 应力集中理论^[1], 应力集中系数与试棒直径和缺口根部曲率半径成线性比例关系。因此, 同时将其尺寸放大或缩小同样倍数, 而不致改变应力集中系数的大小。为了便于加工, 提高实验精度, 将实际试棒尺寸放大四倍进行研究。所以, 首先将材料浇铸成 $\phi 60$ 毫米的棒材, 然后用机械加工做出模型。

在材料浇铸过程中, 采用二次固化法, 其固化曲线如图 2 所示。第一次和第二次固化时的恒温时间, 以及升降温速度, 都应视固化温度和模型尺寸而定。

将浇铸好的棒材按图纸进行机加工。由于环氧树脂性脆、易崩裂, 以及导热性差, 在进行机加工时必须保证刀具锋利, 并且尽量采用小切削量, 以最大限度地减少加工应力。为了

保证缺口部分的精度, 用成型刀具一次车成。

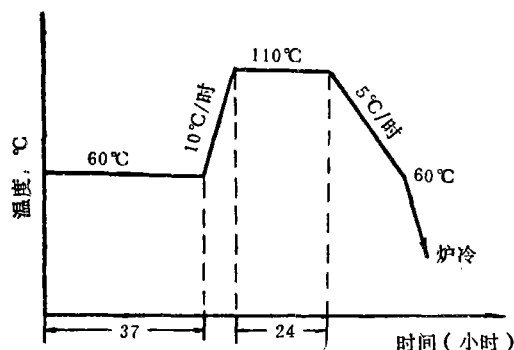


图 2 固化曲线

在冻结应力过程中, 为了减少模型的额外约束, 尽量作到冻结载荷与原型相似, 在设计冻结加载机构时作了充分考虑。此外, 严格控制升降温速度, 以避免将热应力冻结进去。图 3 即为冻结曲线。

将冻结好的模型加工成 1~2 毫米厚的切片, 以供应力条纹序数的测量和应力光图的拍摄。图 4 示出了缺口半径 $\rho=0.175$ 毫米的暗、明场应力光图。

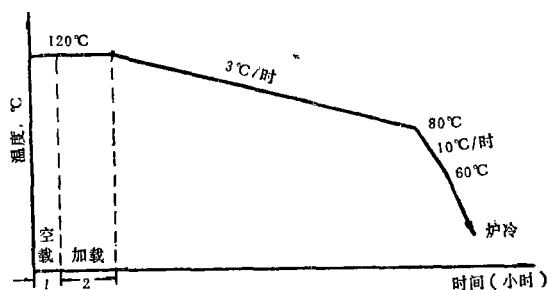
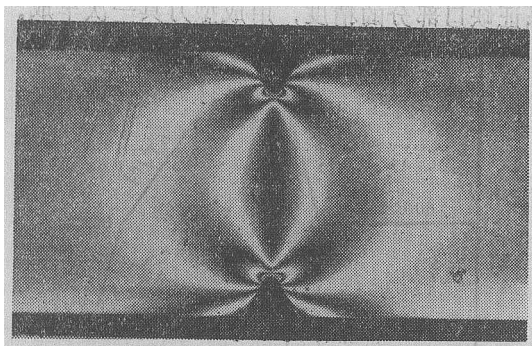


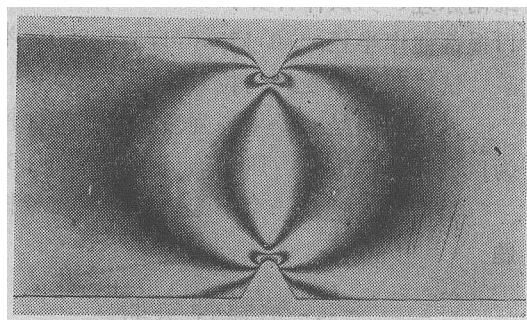
图 3 冻结曲线

由于应力集中系数是局部最大应力与名义应力的比值, 因此直接由模型应力计算就可以了, 而不需要将模型应力换算出原型应力。冻结时所加载荷为 10.9 公斤, 放大后的模型最小截面直径是 18 毫米。于是由式 (2) 即可求出名义应力 $\sigma_n = 4.27$ 公斤/厘米²。

根据所研究问题的要求, 这里是属于确定边界应力问题。这是光弹法重要应用方面之一。其所以重要, 是因为受力零件的最大应力一般



(暗场)



(明场)

图 4 $\rho=0.175$ 毫米的应力光图(载荷10.9公斤,切片厚2毫米)

都发生在边界,结构的应力集中所引起的疲劳裂纹,往往是从自由表面应力集中部位开始。在平面模型的自由边界上任一点的应力状态是单向受力状态,即只有一个与边界相切的主应力,边界上法向应力等于零。边界应力可由下式计算〔4〕:

$$\sigma_t = \pm \frac{\sigma_o^{1.0}}{t} n \quad (3)$$

具体到我们的问题中,缺口根部的边界应力就是要求的最大应力,且符号为正,即

$$\sigma_{max} = \frac{\sigma_o^{1.0}}{t} n \quad (4)$$

式中 $\sigma_o^{1.0}$ 是材料条纹值。用径向受压圆盘试件〔5〕在白光下测得 $\sigma_o^{1.0} = 0.35$ 公斤/厘米·级。 t 是切片厚度。为了便于在偏光显微镜下测量,将切片磨成1毫米厚。 n 是缺口处条纹序数。我们在偏光显微镜下,用Berek补偿器精确地测定了切片左右缺口处的条纹序数。由实验得知,最大应力都发生在缺口根部。表1列出了白光下测得的结果。由表1可以看出, $\rho = 0.125$ 毫米切片的左右缺口条纹序数偏差较大,这是由冻结应力时载荷稍偏所致。

表 1

缺口半径(毫米)	0.125	0.175	0.250
条纹序数(级)			
左缺口	5.47	4.18	3.85
右缺口	4.23	4.43	3.45
平均值	4.85	4.30	3.65

将表1的值代入式(4),很容易得到不同缺口的最大应力值。再由式(1)求出应力集中系数 K_t (见表2)。

表 2

缺口半径(毫米)	0.125	0.175	0.250
计算结果			
σ_{max} (公斤/厘米 ²)	17.00	15.05	12.80
K_t	4.0	3.5	3.0

四、有限元计算

有限元法是根据变分原理来求解数学物理问题的一种数值计算方法,它与近代电子计算机迅速发展密切相关。以固体力学为例,有限元法的基本概念是:把一个连续体化为一个由分散的,但与连续体相应的一些元素所组成的装配体,然后用矩阵代数表述这些元素,把它们装配成一个整体,并保证各元素在相交节点处静力平衡和变形一致。解此矩阵方程,即可求出所需的应力、位移等〔6,7〕。近十几年来,有限元法在理论上和实际应用上,都有了迅速的发展,越来越引起人们的普遍注意。

在图1所示的分析模型中,按照我们的具体试验,载荷 P 为缺口试棒一次拉断值(即缺口极限抗拉强度)的75%,在此 $P = 3500.0$ 公斤。所以由式(2), $\sigma_n = 218.0$ 公斤/毫米²。下面就用有限元法,在TQ-16电子数字计算机上计算最大应力。

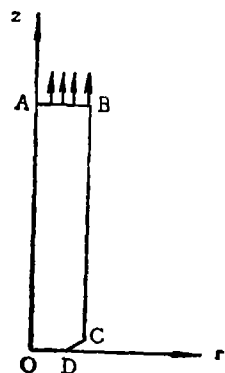


图 5 求解区域

前面说过，我们的问题是轴对称应力分析问题。根据对称性，求解区域只取分析模型中四分之一（图 1 中影线部分）就够了。取柱面坐标 OZr （见图 5）。根据已知条件，在 AB 面上受有均布拉力。于是，在受载变形过程中，试棒沿 Z 轴上的所有质点在 r 方向上的位移皆为零；同样，沿 r 轴上的所有质点在 Z 方向上的位移皆为零；而 O 点，在整个变形过程中既不产生 Z 方向上的位移，也不产生 r 方向上的位移。这就是所有已知边界条件。

我们用三角形线性元和 8 节点等参元同时进行了计算。图 6 是计算程序粗框图（源程序略）。计算结果表明，8 节点等参元能够更好

地反映应力集中情况，可以得出工程上满意的近似解。这是由于等参元上位移、应变及应力都是节点坐标的复杂函数，而三角形元上应力、应变和位移都是常数〔6〕。此外，对求解区域的边界，特别是曲线边界，用等参元可以进行很好的逼近。图 7 为用 8 节点等参元将求解区域进行分割的情况。由图可以看出，有限元法节点配置方式相当任意，不仅可以对求解区域的边界很好处理，而且还可以根据实际需要，在一部分求解区域配置较密集的节点，而在其余部分配置较稀疏的节点，这样可以在不过分增加节点总数的情况下，提高计算精度。在计算应力集中时，应充分利用节点配置的这一特点。

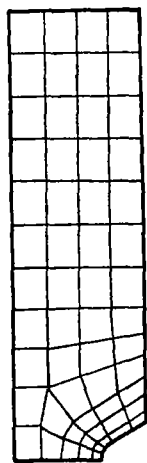


图 7 元素分割

表 3 给出了用 8 节点等参元计算的各种缺口半径的最大应力值。与光弹性实验结果一样，最大应力都发生在缺口根部。表中还列出了有限元计算的应力集中系数值。

表 3

缺口半径 (毫米)	0.125	0.175	0.250	0.500	0.750
最大应力 (公斤/毫米 ²)	883.11	738.09	620.93	474.55	420.47
应力集中系数	4.1	3.4	2.9	2.2	1.9

五、结果讨论

根据试样几何尺寸分析，缺口深度 1 毫米，与直径相比不算深缺口；缺口角度 60° ，适中。因此属于 Neuber 应力集中理论中所述的理想应力集中情况，按诺谟图〔1〕计算了应力集中系数，表 4 中列出了光弹性实验、有限元计算和诺谟图的结果。

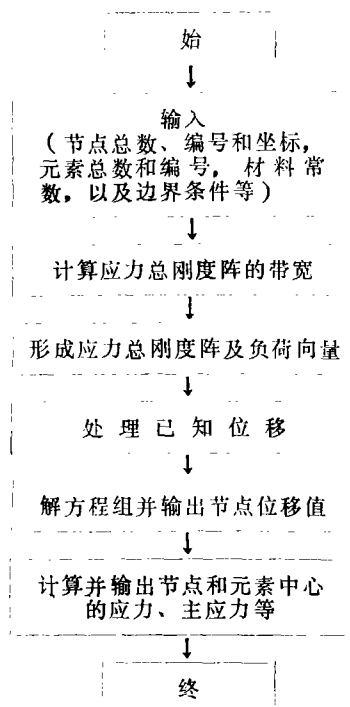


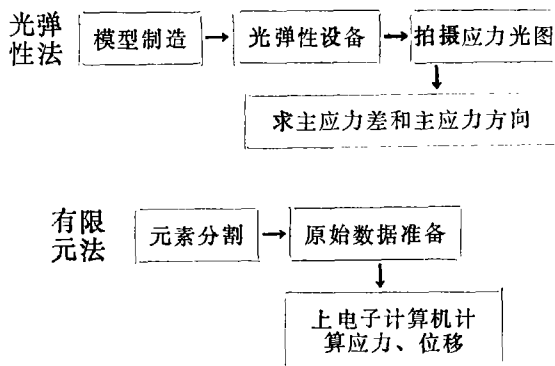
图 6 程序框图

表 4

缺口半径 (毫米)	0.125	0.175	0.250	0.500	0.750
方 法					
光弹性实验	4.0	3.5	3.0	—	—
有 限 元 法	4.1	3.4	2.9	2.2	1.9
诺 漠 图	3.9	3.3	3.0	2.2	1.9

由表 4 可以看出, 光弹性实验值和有限元计算结果基本一致。同时, 它们与理论值比较也相当接近。这说明, 我们的实验和计算符合实际情况, 其结果基本能满足工程需要。

由前面的介绍, 可以把用光弹性实验和有限元法计算的解题步骤归纳如下:



两种方法比较, 有限元法有其明显的特点:

1. 解题周期短。就文中具体问题来说, 如果要求增加计算一种缺口半径的应力集中系数, 有限元法只将缺口部分求解区域进行元素重新分割, 改变少量原始数据, 就可以上机计算。而光弹性法必须从作光弹材料开始, 一个完整过程要全部完成。同样, 就一个全过程来说, 有限元法的解题周期短得多; 2. 精度高。在光弹性实验中, 从做光弹材料开始, 到应力条纹测定止, 每一步骤都必须十分仔细, 稍不注意就会带来实验误差。特别对于类似这种曲率半径很小, 尺寸精度要求很高的应力集中区, 在光弹模型加工过程中难于达到要求。此外, 冻

结应力时模型不可避免的变形, 材料泊松比等, 都直接影响着实验精度; 3. 工作量小, 费用低。

有限元法的有效性已得到普遍的证明。目前在求解平面应力(应变)和轴对称问题时, 以有限元法代替了光弹性法〔8〕。至于更复杂的三维问题, 随着大容量电子计算机的出现, 可以预料, 不久就可以用有限元法方便地求解。至于用有限条法将三维问题化为二维问题来求解, 更是一个新的方向。因此, 电子计算技术的迅速发展, 也已迫使光弹性实验法去寻求新的职能。

当然, 作为一种古老的、行之有效的实验应力分析方法, 光弹性法有其独特之点。应该在提高模型制作精度, 加载模拟准确性, 切片机械化, 测量、分析和计算的自动化, 特别在缩短实验周期等方面作一些研究, 充分发挥其特点。此外, 一些复杂问题的有限元法解, 也往往需要光弹性法验证。因此, 两种方法各有特长, 应相辅相成配合发展, 迅速准确地解决工程实际问题。

参 考 文 献

- [1] H. 诺埃伯, 应力集中, 科学出版社, 1958.
- [2] R.E. Peterson, Stress Concentration Design Factors, 1953.
- [3] 西田正孝, 应力集中, 森北出版株式会社, 1971.
- [4] S. 铁摩辛柯, J.N. 古地尔, 弹性理论, 人民教育出版社, 1964.
- [5] M.M. 弗罗赫特, 光测弹性力学, 科学出版社, 1964.
- [6] O.C. Zienkiewicz, The Finite Element Method in Engineering Science, McGraw-Hill, 1971.
- [7] Kenneth H. Nuebner, The Finite Element Method for Engineers, Techn Wiley and Sons, 1975.
- [8] 高桥赏, 非破坏检查, 21(1972), 8, 465.