

# 用动态焦散线方法研究圆环在冲击 载荷作用下的破坏机理

刘 承 苏先基

(北京大学)

**摘要** 本文用动态焦散线实验方法并结合理论分析,深入地研究了圆环在冲击载荷作用下的破坏问题。考察了试件的几何尺寸和支承材料对破坏模态及破坏过程的影响。用应力波传播的几何理论(rays-theory)分析了应力波在圆环内部的传播过程,着重分析了圆环中应力波聚焦的现象。理论分析和实验结果在破坏时刻和破坏位置上吻合的很好。

**关键词** 焦散线法, 动态焦散线法, 冲击试验。

## 1 引言

圆环是一种基本构件,它在机械结构和管道工程中有着很广泛的应用。在实际使用过程中,这种构件有时会因受到冲击载荷的作用而破坏。因此,研究它在冲击载荷条件下的力学行为和破坏机理有着重要的意义。Rao和Sundararajan<sup>[1]</sup>曾经分析了圆环在自身平面内的弯曲振动。Durelli、Clark和Kochev<sup>[2]</sup>用动态光弹性的方法研究了应力波在环氧树脂圆环中的传播。Kida和Oda<sup>[3]</sup>用闪光照相的方法研究了在集中冲击载荷作用下脆性圆环的断裂行为。但是在他们的研究中,一次实验只能得到一幅照片,所以很难搞清楚圆环破坏的整个过程。苏先基和雷志辉<sup>[4]</sup>曾用动态焦散线方法研究了内边界上下两端带有预裂纹的圆环在冲击载荷作用下的破坏过程,实验中发现了在冲击载荷作用下,远离加载点的下端裂纹,比离加载点较近的上端裂纹先起裂扩展的有趣现象。为了弄清圆环在冲击载荷作用下出现这种破坏状态的原因和机理,我们用动态焦散线方法针对这个问题进行了一系列的实验研究,并用应力波的几何理论进行了分析。

1987年3月7日收到,

## 2 实验

### 2.1 焦散线方法基本原理简介

焦散线方法是实验应力分析中的一种光学方法,目前已被用于工程问题中奇异应力场的研究。按照这一方法,把奇异应力区域用纯几何光学的方法转换成为一条很亮的曲线,这条曲线可以在距试件平面一定距离处的参考屏上接收到。由于在通常的实验应力分析方法中,奇异区域的测量是很困难的,同时也是不准确的,而在屏上形成的焦散线可以很准确地求出它的几何特性,从而可以很容易地确定出所考虑的应力场的特征量。在研究裂纹扩展的问题中,根据焦散线的形状和尺寸,可以计算出裂纹尖端的动态应力强度因子  $K_I^d$  和裂纹尖端的位置<sup>[5]</sup>

$$K_I^d = \frac{2\sqrt{2\pi}}{3|c| \cdot d \cdot z_0} \left( \frac{3}{10 \sin \frac{2\pi}{5}} \right)^{5/2} \cdot \left( \frac{D_1}{\delta_1} \right)^{5/2} \quad (1)$$

$$X_c = \frac{1}{2 \cos^2 \frac{\pi}{10}} D_1 \quad (2)$$

其中  $D$  和  $D_1$  分别是焦散线的横向直径和纵向直径,  $X_c$  是裂纹尖端到焦散线前缘的距离,  $d$  是试件厚度,  $z_0$  是试件和参考屏之间的距离,  $c$  是试件材料的应力光学常数,  $\delta_1$  是由裂纹扩展速度引入的修正因子。

### 2.2 试件和实验结果

圆环试件是用厚度为 3 mm 的有机玻璃板材加工制成。外径尺寸均为 120 mm,为了观察试件的几何尺寸对破坏模态的影响,采用了三种不同内径的试件:试件 R I,  $d=60$  mm; 试件 R II,  $d=40$  mm; 试件 R III,  $d=80$  mm。为了考察应力波在圆环下端边界的反射对圆环破坏过程的影响,在圆环的下面分别使用了三种不同的支承材料:钢(用 S 表示); 有机玻璃(P) 聚氨酯橡胶(R)。它们的弹性模量分别远大于、等于或远小于试件材料的弹性模量。在圆

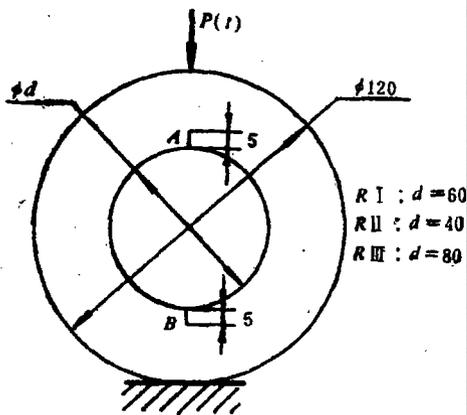


图 1 圆环试件

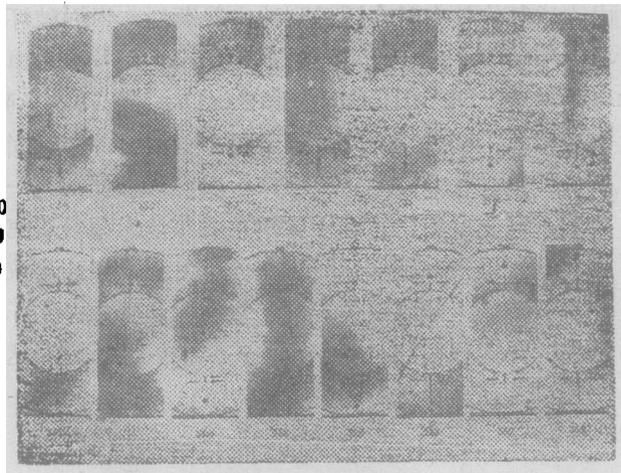


图 2 试件 R I S (2) 的破坏过程照片

环内边界的上下两端分别开有长度为 5 mm 的预裂纹,如图 1 所示。实验中用落锤加载,并用

多大花式高速照相系统记录动态焦散线。共进行了九组不同状态的实验，每组实验至少重复了三次。

图2是试样RIS(2) (即内径为60mm, 支承材料为钢的2号试件) 在冲击载荷作用下破坏过程的动态焦散线系列照片。从中可以看到一个十分有趣的现象：在冲击载荷的作用下，远离加载点的下端裂纹(裂纹B)首先起裂，当裂纹B快要达下端边界时，距加载点较近的上端裂纹(裂纹A)才开始起裂扩展。图3给出的是试件RIS(1) 在  $t = 200 \mu s$  时的焦散照片，从这张照片中，上述现象可以看得很清楚。按照(1)、(2)式计算得到的试件RIS(2) 中裂纹A和裂纹B尖端的动态应力强度因子  $K_I^d$  及裂纹扩展量  $\Delta a$  随时间  $t$  的变化曲线在图4

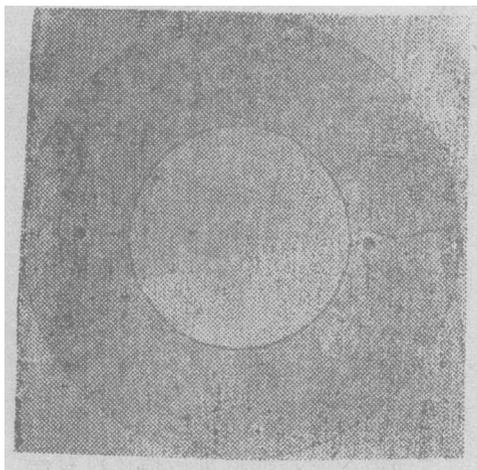


图3 试件RIS(1)在  $t = 200 \mu s$  时的焦散照片

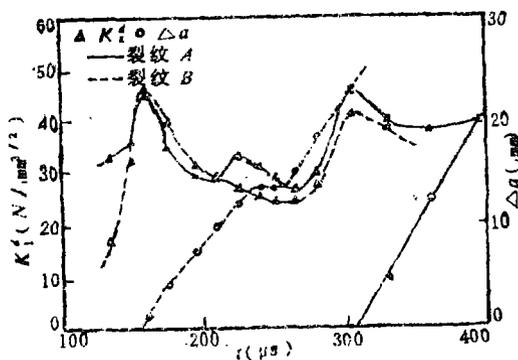


图4 试件RIS(2)的  $K_I^d - t, \Delta a - t$  曲线

中给出。从图中看到在裂纹B起裂之前，应力强度因子  $K_I^d$  迅速增大，当  $K_I^d$  达到临界值时裂纹B即起裂扩展，起裂后  $K_I^d$  就迅速下降。在裂纹B起裂时，裂纹A的  $K_I^d$  也达到了一个极大值，

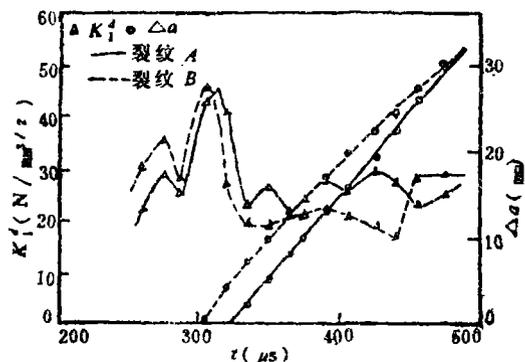


图5 试件RIS(5)的  $K_I^d - t, \Delta a - t$  曲线

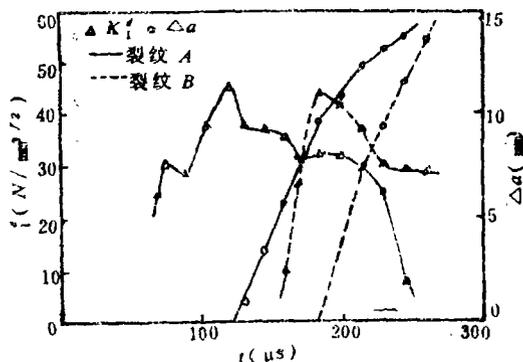


图6 试件RIS(2)的  $K_I^d - t, \Delta a - t$  曲线

但比临界的  $K_I^d$  稍低，所以它并未起裂扩展。到裂纹B快要扩展到下端边界时，裂纹A的  $K_I^d$  才达到临界值而开始起裂。裂纹A的起裂时间比裂纹B晚  $150 \mu s$ 。裂纹B起裂时裂纹的扩展速度较高， $V_c = 240 m/s$ ；起裂后不久扩展速度有所降低，这时  $V_c = 150 m/s$ ；当裂纹扩展了约

13mm后,出现了止裂的现象,止裂约 $20\mu\text{s}$ 后又以 $V_B=200\text{m/s}$ 的速度扩展下去.而裂纹A的扩展速度基本上保持不变, $V_A=200\text{m/s}$ .

图5和图6给出了试件RⅡS(5)和RⅢS(2)的 $K_I^2-t$ 和 $\Delta a-t$ 曲线.

由于篇幅所限,不能将所有其它状态的实验结果在此一一列举,只将主要的实验结果列在表1和表2中.

### 2.3 对实验结果的讨论

表1给出了三种圆环试件在冲击载荷作用下,裂纹起裂时间的实验结果.在试件RI和试件RⅡ中都有下端裂纹首先起裂扩展的现象(RIP中可以认为上下裂纹同时起裂),并且

表 1

单位:  $\mu\text{s}$

下 端 支承材料	RI			RⅡ			RⅢ		
	$t_A$	$t_B$	$t_A-t_B$	$t_A$	$t_B$	$t_A-t_B$	$t_A$	$t_B$	$t_A-t_B$
S	306	156	150	320	302	18	124	186	-62
P	151	155	-4	337	307	30	115	185	-70
R	—	161	—	—	—	—	122	190	-68

对于每一种试件,下端裂纹的起裂时刻基本上不因支承材料的改变而发生变化.所以,可以认为试件RI下端裂纹的起裂是由于应力波在圆环内部的传播造成的,而这种传播还没有受到支承材料的影响.试件RI下端裂纹起裂的时间也可以说明这一点.试件RⅡ中,也有下端裂纹首先起裂的现象,而且在P、S两种情况下起裂时间不随支承材料的改变而变化.但是下端裂纹起裂的时间在 $300\mu\text{s}$ 以上,在这段时间内,应力波在圆环内已反射了多次.并且在RⅡR情形中上下裂纹均不起裂.所以,试件RⅡ破坏的原因还不清楚.另外,试件RI和

表 2

单位:  $\text{m/s}$

试 件 阶 段	RI				RⅡ			RⅢ			
	I	II	III	IV	I	II	III	I	II	III	
S	$V_A$	220	220	220	220	190	190	190	157	91	15
	$V_B$	240	150	0	200	250	180	156	232	138	138
P	$V_A$	232	145	0	0	210	210	210	170	76	0
	$V_B$	216	108	0	0	210	210	210	210	147	147
R	$V_A$	0	0	0	0	0	0	0	143	86	19
	$V_B$	222	25	0	0	0	0	0	182	143	143

R II 的上端裂纹的起裂时间却随支承材料的不同而有明显变化。

试件 R III 在三种支承材料的情况中，都是上端裂纹首先起裂，下端裂纹后起裂，而且上下裂纹的起裂时刻没有明显变化。

从表 2 中可以看出：在以钢为支承材料时，三种试件的下端裂纹的起裂速度都比上端裂纹的起裂速度高。试件 R III 在三种支承材料的情况中都是下端裂纹的起裂速度比上端裂纹的起裂速度高，而且下端裂纹的起裂速度随着支承材料弹模的降低而减小。大部分裂纹起裂后扩展速度逐渐减小，也有部分裂纹的速度保持不变，只有试件 R IS 的下端裂纹从起裂的最高值降到零，经一段时间止裂后，又重新起裂扩展。

综上所述，可以看出，圆环试件破坏的模式，也就是上端首先破坏还是下端首先破坏由试件的几何尺寸决定。圆环下部的支承材料主要影响着试件的破坏过程。

### 3 应力波在圆环内传播的分析与讨论

文献[3]中曾用弯曲理论分析了受阶跃载荷作用的圆环中的弯矩分布，并指出了弯矩首先在力作用点达到极大值，随后，这一弯曲矩脉冲沿圆环向下部传播。试件 R III 的实验结果与这一分析是符合的。用弯曲理论可以很好地解释圆环的破坏现象。但是，当圆环的内外半径比  $r/R$  较小时，即对于圆环壁较厚的情况，弯曲理论就不再适用了。

对于试件 R I 和 R II，其破坏现象用弯曲理论无法解释，而其破坏模式又不受下端边界支承材料的影响，也就是说不是由下端边界反射的应力波控制的。那么，控制的因素只可能是由应力波在圆环内外边界反射而产生的能量集中。在均匀各向同性弹性介质中，任一位移扰动的传播在一般情况下将分解为膨胀波 P 和剪切波 S，它们分别以波速  $c_i$  和  $c_s$  独立无关地传播。当一弹性平面波（无论是膨胀波还是剪切波）斜入射到一自由表面时，由于波型耦合，都将同时反射膨胀波和剪切波。若入射角为  $\theta$ ，反射角为  $\phi$ ，则  $\theta$  与  $\phi$  满足下列关系

$$\frac{\sin \theta}{\sin \phi} = N = \begin{cases} c_i/c_s, & \text{当 } c_s^{(P)} \\ 1, & \text{当 } c_s^{(P)} \text{ 或 } c_s^{(S)} \\ c_s/c_i, & \text{当 } c_s^{(S)} \end{cases} \quad (3)$$

其中， $c_s^{(P)}$ 、 $c_s^{(S)}$ 、 $c_i^{(P)}$  和  $c_i^{(S)}$  中的上标表示入射波的类型，下标表示反射波的类型。

当圆环受到集中的冲击载荷作用时，应力波从载荷作用点向外传播，应力波在圆环的内外边界都会发生反射。显然，在内边界的反射将使应力波发散，而外边界却有对应力波的聚焦作用。换句话说，当应力波在外边界反射后，可能形成一些包络线，它们是那些反射线汇集得最密集的点的轨迹。这种现象称为应力波的聚焦 (stress wave focus)，也是应力波反射后形成的焦散线。在这些焦散线上将集中大量的能量。应力波在圆环中的反射是比较复杂的，现分析其中的几种情况。

考虑应力波在外边界一次反射的情况 (图 7(a))，可以通过计算得出应力波形成的焦散线，见图 7(b)。在这里没有能量集中在对称轴上。

对于图 8(a) 所示的应力波在圆环中两次反射的情况，图 8(b) 给出了在三种试件中形成的焦散线。在试件 R I 和 R II 中分别形成两种焦散线  $F_{1,1}$  和  $F_{1,2}$ ，而在试件 R III 中没有形成应力波的聚焦。 $F_{1,1}$  表示在  $c_0$  处的反射是  $c_s^{(S)}$ ，在  $c_1$  处的反射是  $c_i^{(P)}$ ； $F_{1,2}$  表示在  $c_0$  处的反射是  $c_s^{(S)}$ ，在  $c_1$  处的反射是  $c_s^{(P)}$ 。这两种焦散线都在圆环的对称轴上相交，交点  $A_1$  和  $A_2$ 。

的纵坐标分别是  $y_{A_1} = -0.57R$ ,  $y_{A_2} = -0.92R$ ,  $R$  是圆环的外半径。

对于图 9 (a) 所示的应力波在圆环中的三次反射的情况, 图 9 (b) 给出了在三种试件中形成的焦散线。在这里试件 R II 和 R III 均未能在对称轴上形成应力波的聚焦, 只有在试件 R I 中才形成应力波的聚焦, 其中  $F_{2,3,1}$  在对称轴上交于  $A_3$  点,  $y_{A_3} = -0.73R$ 。

类似地, 可以对更高次数反射的情况进行分析。但是, 考虑到应力波每反射一次都要损失一定的能量, 经多次反射后所聚集的能量的影响也就相对地小了。

从上面关于应力波聚焦现象的分析中, 可以得出如下的结论:

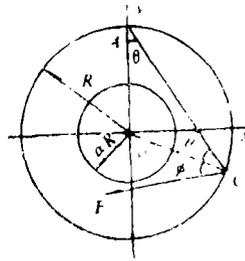


图 7(a) 应力波在圆环外边界的一次反射

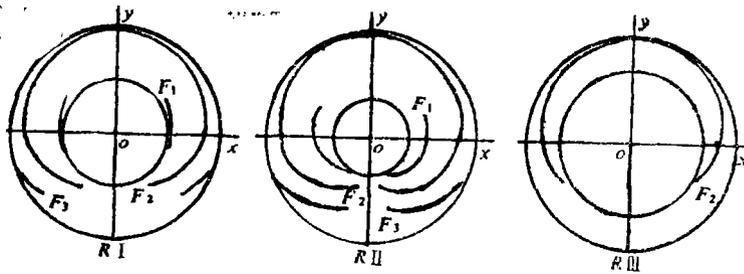


图 7(b) 应力波在圆环外边界一次反射形成的焦散线

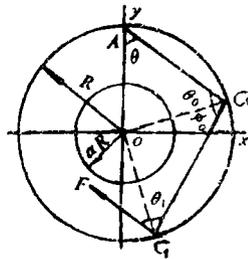


图 8(a) 应力波在圆环中的两次反射

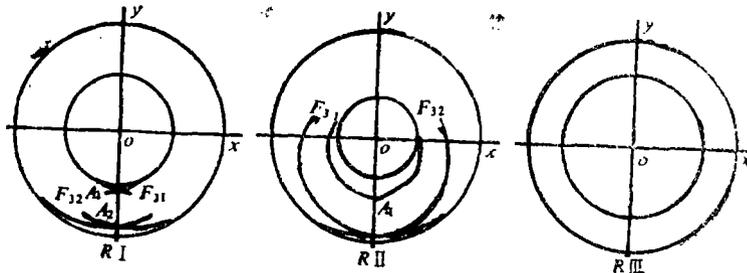


图 8(b) 应力波在圆环中两次反射形成的焦散线



>0.57 时, 破坏由弯曲效应控制。理论分析与实验结果吻合得很好。本文的工作还表明, 动态焦散线方法在研究实际工程结构的断裂过程方面, 有着非常广泛的应用前景。

### 参 考 文 献

- [1] Rao, S. S. Sundararajan, V., *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, **36** (1969), 620-625.
- [2] Durelli, A.J., Clark, J.A., Kochev, A., *J. Strain Analysis*, **4** (1969), 297-305.
- [3] Kida, S., Oda, J., *Exp. Mech.*, **23**(1983), 425-430.
- [4] 苏先基、雷志辉, 动态焦散线实验方法及其在断裂力学中的应用, *力学学报*, 1987.
- [5] 苏先基、刘承, 动态断裂中的动力因素对用焦散线法测量  $K_I^d$  的影响, 全国第五届实验应力分析学术会议论文集, CO2(1987).

## Damage Mechanism of Rings Subjected to Impact Loading

Liu Cheng    Su Xianji

(Beijing University)

**Abstract** The method of dynamic caustics is used to study the damage of a ring subjected to impact loading. The influences of the size of specimen and the supporting material under the ring on the broken mode and fracture process are studied. On the other hand, theoretical approach, based on the rays-theory, is also presented in this paper. The process that stress wave prepagating in the ring, and especially the stress wave focus phenomenon are analysed. The time and position of fracture determined from both experimental and analytical approaches agree very well with each other.

**Key words** caustics, dynamic caustics, impact test!