

文章编号: 1001-1455(2009)06-0596-05

# Y 态 TU1 环的动态脆性碎裂特性\*

桂毓林, 孙承伟, 李 强, 张光升

(中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理国防科技重点实验室, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 针对膨胀环的碎裂问题, 以 Mott 碎裂理论和 Grady 能量平衡理论为基础, 利用裂纹张开位移碎裂模型(crack opening displacement model, COD)描述脆性无氧铜环的碎裂特性, 并推导了碎片尺寸和数目表达式。利用电磁膨胀环加载技术, 完成了不同应变率的脆性无氧铜(TU1)环碎裂实验, 实验结果与理论计算结果符合较好, 可为脆性金属环膨胀碎裂特性描述提供参考。

**关键词:** 固体力学; 脆性碎裂特性; COD 模型; Y 态 TU1 环

**中图分类号:** O346.1

**国标学科代码:** 130·15

**文献标志码:** A

## 1 引言

碎裂是日常生活、工程与自然界中一个普通的物理力学现象。在大多数情况下, 碎裂是不受欢迎的, 应尽可能避免或最小化其影响。在某些情况下, 要对碎裂机理加以利用, 例如研究炸弹形成破片的规律、刻槽式破片战斗部以及定向爆破、采矿等。因此, 理解动态碎裂机制, 对预测、控制或防止碎裂十分重要。研究一维拉伸应力状态下金属环的动态碎裂问题, 有助于研究复杂柱形圆筒的碎裂机理。目前, 一维碎裂问题主要集中在 4 个方面: (1) 碎片尺寸和数目的描述; (2) 环碎裂后继续膨胀过程中碎片张开位移的理论描述; (3) 断裂应变的理论描述; (4) 与随机激活断裂相联系的夹杂和缺陷以及断裂应力卸载相互作用的统计特征描述。对于一维碎裂问题, 主要有 2 种不同的经典碎裂理论: N. F. Mott<sup>[1-2]</sup> 的碎裂理论和 D. E. Grady<sup>[3-5]</sup>、M. E. Kipp 等<sup>[6]</sup> 的能量平衡碎裂理论。2 种理论的区别在于, N. F. Mott 没有考虑断裂过程中能量的耗散, 圆柱壳断裂点是瞬时发生的; 而能量耗散和与断裂驰豫时间是能量平衡碎裂理论的核心。

在研究脆性材料一维碎裂问题上, 1947 年, N. F. Mott<sup>[1-2]</sup> 在研究炸弹壳体的动态碎裂时, 给出以膨胀半径、密度和断裂应变为函数的碎片尺寸分布, 即著名的 Mott 分布; 1982 年, D. E. Grady<sup>[4]</sup> 利用能量的观点发展了一种描述动态碎裂的一般方法, 引入碎裂过程中新生表面的表面能, 认为碎裂过程中新生表面和表面能由局部动能提供, 给出了以密度、声速、断裂韧度和应变率相关的碎片尺寸表达式; 1986 年, L. A. Glenn 等<sup>[7]</sup> 研究动态碎裂的应变能效应, 对 Grady 模型进行了修正, 提出了应变能起主导作用的修正模型, 给出了与断裂韧度、Rayleigh 波速、应变率等有关的碎片尺寸表达式。

针对脆性无氧铜环碎裂问题, 本文中拟以 Mott 统计理论和 Grady 能量平衡理论为基础, 利用裂纹张开位移碎裂模型<sup>[8]</sup> (COD 模型), 推导并给出描述脆性无氧铜环碎裂特性的碎片尺寸和数目表达式。利用电磁膨胀环加载技术, 完成不同应变率的脆性无氧铜环碎裂实验。

## 2 脆性金属环碎裂特性的理论描述

对于脆性金属膨胀环, 例如脆性的 Y 态无氧铜环 TU1, 其碎裂特征为: 以裂纹张开模式发生断裂, 断裂时径向膨胀量很小, 无颈缩发生, 碎片长度较为均匀。实验表明: Y 态 TU1 环以一点或几点首先发生断裂, 随后其余断裂点几乎瞬时发生断裂, 其特征与一维 Mott 圆环碎裂问题的假设条件一致。因

\* 收稿日期: 2008-07-18; 修回日期: 2009-03-12

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术基金项目(20060102)

作者简介: 桂毓林(1973—), 男, 博士, 副研究员。

此,脆性金属膨胀环的碎裂问题可以 Mott 碎裂理论和能量平衡碎裂理论为基础,并利用 D. S. Dugdale<sup>[9]</sup>研究准静态断裂阻力中的裂纹张开位移模型推导碎片长度和数目表达式。

脆性金属膨胀环断裂时,断裂阻力从流动应力  $\sigma$  减小到零,裂纹张开位移  $y$  从零增加至某一个临界裂纹张开位移  $y_c$ ,如图 1 所示。

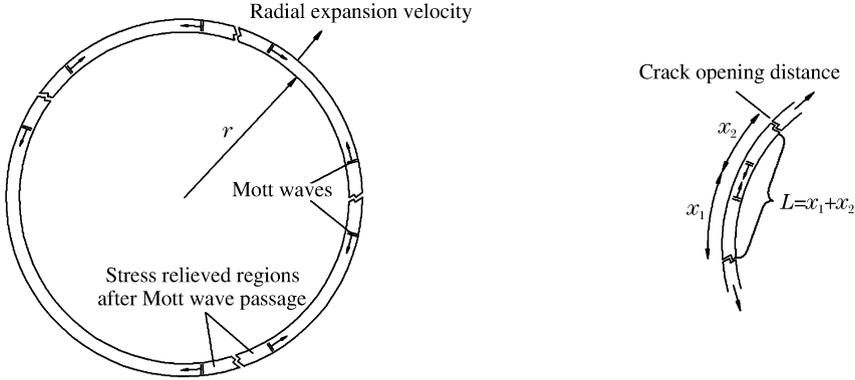


图 1 脆性金属膨胀环碎裂分析模型

Fig. 1 An analytical model for the brittle fragmentation of an expanding metal ring

假设断裂阻力随裂纹张开位移增大而线性减小,则断裂能量耗散为  $\Gamma = \sigma y_c / 2$ <sup>[10]</sup>。根据 M. E. Kipp 等<sup>[6]</sup>对 Mott 卸载波的处理方法,由动量守恒得到 Mott 卸载波所在位置  $x$  与裂纹张开位移  $y$  之间的微分表达式为

$$\rho \dot{\epsilon} x \frac{dx}{dt} = \frac{\sigma^2}{2\Gamma} y \tag{1}$$

而裂纹张开位移的运动方程为

$$\frac{dy}{dt} = \dot{\epsilon} x \tag{2}$$

求解方程(1)和(2),得

$$x(t) = \frac{1}{12} \frac{\sigma^2}{\rho \Gamma} t^2, \quad y(t) = \frac{1}{36} \frac{\dot{\epsilon} \sigma^2}{\rho \Gamma} t^3 \tag{3}$$

断裂时裂纹张开位移为  $y_c$ ,则由式(3)得断裂时间

$$t_f = \left( \frac{72 \rho \Gamma^2}{\dot{\epsilon} \sigma^3} \right)^{1/3} \tag{4}$$

在  $t_f$  时间内,Mott 卸载波从断裂点向未卸载区域传播的距离

$$x_c = \left( \frac{3\Gamma}{\rho \dot{\epsilon}^2} \right)^{1/3} \tag{5}$$

根据脆性金属膨胀环的碎裂特征,作如下假设:(1)膨胀环几乎同时发生断裂,即 Mott 卸载波从断点处向未卸载区域传播的距离相同(图 1 (b)中:  $x_1 = x_2 = x_c$ );(2)膨胀环驱动到最大速度  $v_{r,max}$  时发生断裂,膨胀半径几乎未变,即  $\dot{\epsilon} = v_{r,max} / r_0$ 。

根据以上假设,碎片的平均长度和数目分别为

$$\bar{L}_f = 2x_c = \left( \frac{24 \Gamma}{\rho \dot{\epsilon}^2} \right)^{1/3} = \left( \frac{24 \Gamma r_0^2}{\rho v_{r,max}^2} \right)^{1/3} \tag{6}$$

$$N_f = \frac{2 \pi r_0}{\bar{L}_f} = 2 \pi \left( \frac{\rho v_{r,max}^2 r_0}{24 \Gamma} \right)^{1/3} \tag{7}$$

式中: $\rho$  为材料密度, $r_0$  为初始环半径。

### 3 脆性无氧铜环的碎裂实验

利用电磁膨胀环加载技术作为碎裂实验手段<sup>[11-12]</sup>,对相同半径  $r_0 = 21.1 \text{ mm}$  的 Y 态 TU1 环进行碎裂实验。通过控制充电电压来控制膨胀环的加载应变率,实验共完成了 9 发,分为回收实验和高速分幅摄影实验,实验状态在表 1 中列出。表中  $U_0$  表示充电电压, $v_{r,\max}$  表示环膨胀最大速度, $\dot{\epsilon}_{\max}$  表示最大应变率, $N_f$  为碎片数目。

表 1 碎裂实验状态

Table 1 State parameters for fragmentation tests

$U_0/\text{kV}$	$v_{r,\max}/(\text{m/s})$	$\dot{\epsilon}_{\max}/\text{s}^{-1}$	实验类型	$N_f$
1.52	19	950	回收	
1.53	21	990	回收	2
1.54	23	1 020	回收	1
1.60	27	1 080	回收	1
3.20	105	4 750	回收	11
3.60	132	5 900	回收	14
3.00	92	4 160	高速摄影	8
3.01	94	4 180	高速摄影	9
3.02	96	4 200	高速摄影	10

#### 3.1 脆性无氧铜环断裂特征

在 1.52 kV 加载电压下,环变形比较均匀,轴向上没有尺寸变形,通过对回收样品尺寸测量计算,其延伸率为 0.85%。膨胀环圆周上出现了 2 处明显的裂纹,至少还有 3 处没有发展成裂纹的损伤。加载电压为 1.53、1.54、1.60 kV 的环断裂成 1 个或 2 个碎片,碎片中都含有 1 个较为严重的裂纹,断口齐整,且断口有烧蚀现象,回收样品照片如图 2 所示。

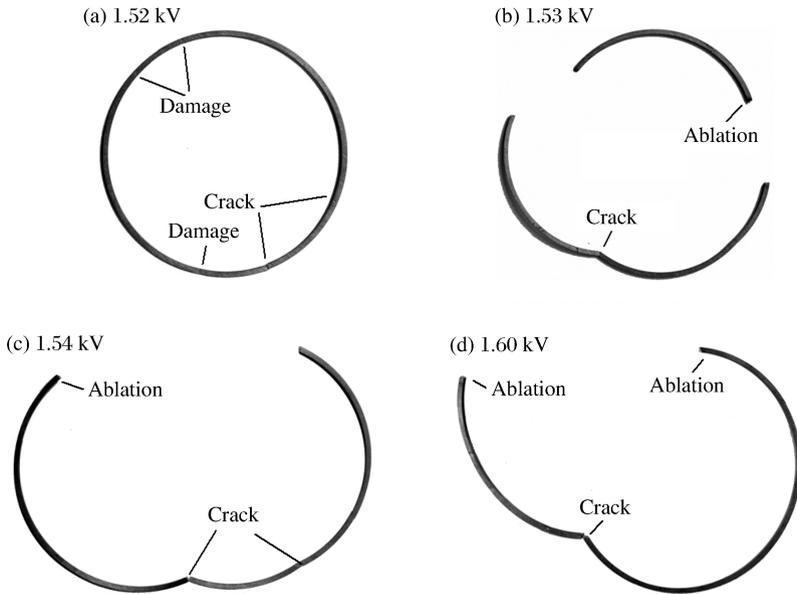


图 2 Y 态 TU1 环拉伸断裂回收照片

Fig. 2 Photos of recovered Y-state TU1 rings after tests

这些回收样品充分反映了脆性材料的断裂特征,即裂纹模式发生断裂。

#### 3.2 脆性无氧铜环碎片尺寸描述

为了研究不同加载电压(应变率)下的 Y 态 TU1 环的碎裂特性,在前面拉伸回收实验基础上补充了加载电压为 3.2、3.6 kV 的碎裂回收实验,回收照片如图 3 所示。从图 3 中可以观察到,断口较整齐,无颈缩现象发生,除了个别碎片比较长外,其余碎片长度较为均匀,应变率高的比应变率低的碎片长度小,而且大多数碎片中含有损伤。另外,还进行了加载电压分别为 3.00、3.01、3.02 kV 的高速分幅摄影实验,从分幅摄影照片上看出环的碎片之间的断裂间隙处有发光现象,也证实了 1.53、1.54、1.60 kV 加载电压下的环碎片断口处的烧蚀现象是由断口温度急剧上升引起的。

由 COD 碎裂模型中的(6)、(7)式可以计算出碎片平均尺寸  $\bar{L}_f$  和碎片数目  $N_f$ ,其中断裂能量  $\Gamma =$

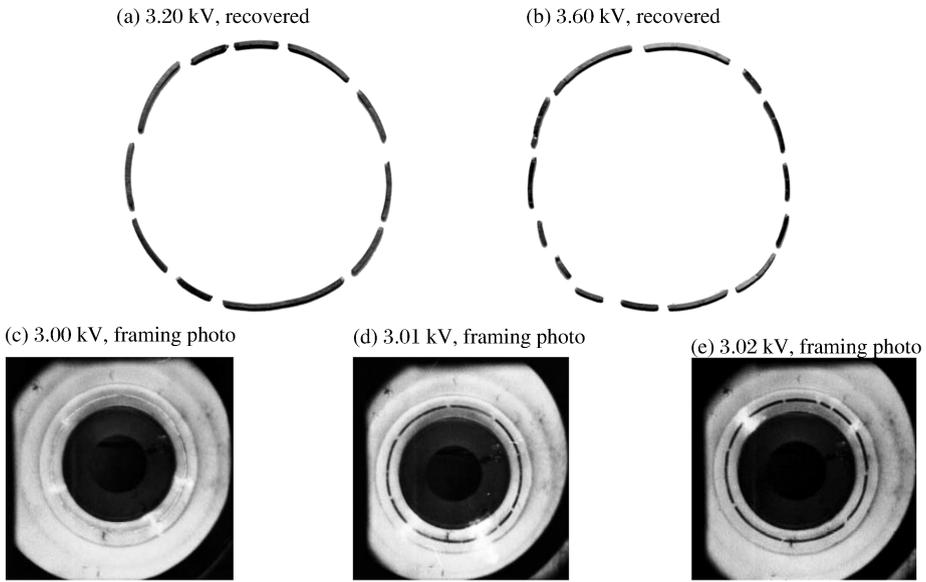


图 3 脆性无氧铜环碎裂照片

Fig. 3 Fragmentation photos of brittle TU1 rings

16 kJ<sup>[12]</sup>。Y 态 TU1 环碎片数目与最大径向膨胀速度的关系曲线如图 4 所示。从图 4 中可以看出,碎片数目随膨胀环最大径向膨胀速度增大而增多,即应变率越高碎片数目越多。碎片平均长度与最大应变率的关系曲线如图 5 所示,碎片平均长度随膨胀环最大应变率增大而减小,表明脆性 Y 态 TU1 环对应变率非常敏感。另外,在应变率范围 4000~6000 s<sup>-1</sup>内,碎片数目与平均长度的实验值和理论值非常接近;在较低应变率下,实验值和理论值误差较大,尤其是碎片平均长度,可能与断裂能量取值有关;在相同应变率下,分别得到了 8、9 和 10 个不同数目的碎片,说明环的碎裂存在一定的随机性。

从图 4 和图 5 知,实验结果与理论计算结果较为一致,同时说明 COD 碎裂模型比较适合于脆性金属膨胀环的碎裂特性描述。

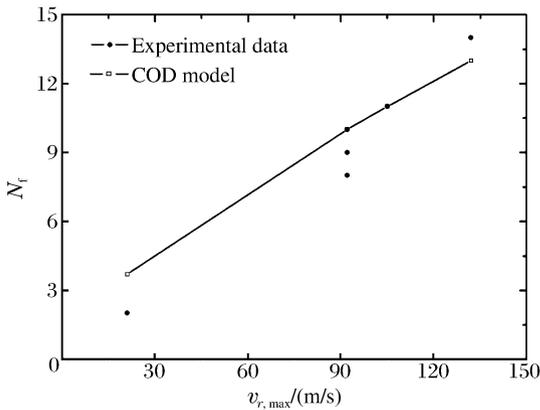


图 4 Y 态 TU1 环的碎片数目与最大径向膨胀速度关系曲线

Fig. 4 Dependence of fragment number on maximum radial expansion velocity

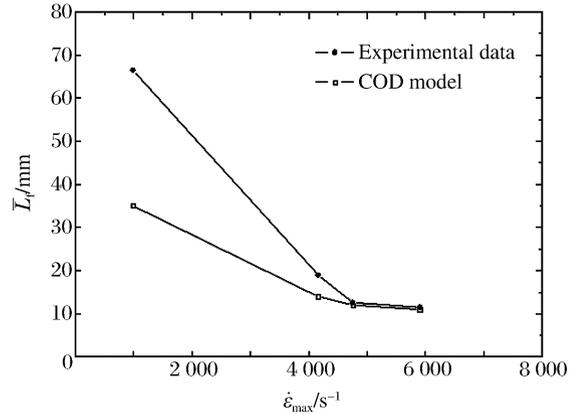


图 5 Y 态 TU1 环的碎片长度与应变率的关系曲线

Fig. 5 Dependence of fragment length on maximum strain rate

### 4 结 论

- (1) 脆性 Y 态 TU1 环是以典型的裂纹模式发生的脆性断裂;
- (2) 碎片长度和数目的理论预估采用 COD 碎裂模型比较适合;
- (3) 碎片长度和数目对应变率非常敏感,即应变率越高,碎片长度越小,碎片数目越多。

感谢杨礼兵、欧阳凯、何智等对实验给予的热情帮助。

## 参考文献:

- [1] Mott N F. Fragmentation of shell case[J]. Proceedings of Royal Society London, 1947, A-189:300-308.
- [2] Mott N F. A theory of the fragmentation of shells and bombs[R]. Ministry of Supply, AC4035, 1943.
- [3] Grady D E. Fragmentation of solids under impulsive stress loading[J]. Journal of Geophysics Research, 1981, 86: 1047-1054.
- [4] Grady D E. Local inertial effects in dynamic fragmentation[J]. Journal of Applied Physics, 1982, 53(1):322-325.
- [5] Grady D E, Kipp M E. Mechanisms of dynamic fragmentation: Factors governing fragment size[R]. SAND-84-2304C, 1984.
- [6] Kipp M E, Grady D E. Dynamic fracture growth and interaction in one dimension[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1985, 33(4):399-415.
- [7] Glenn L A, Chudnovsky A. Strain-energy effects on dynamic fragmentation[J]. Journal of Applied Physics, 1986, 59:1379-1380.
- [8] Grady D E. Investigation of explosively driven fragmentation of metals — Two-dimensional fracture and fragmentation of metal shells[R]. Progress Report II, Applied Research Associates Technical Report, UCRL-CR-152264, 2003:1-74.
- [9] Dugdale D S. Yielding of steel sheets containing slits[J]. Journal of Mechanics Physics Solids, 1960, 8:100-104.
- [10] Grady D E. Dissipation in adiabatic shear bands[J]. Mechanics of Materials, 1993, 17:289-293.
- [11] 桂毓林, 孙承伟, 李强, 等. 实现金属环动态拉伸的电磁加载技术研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(6):481-485.  
GUI Yu-lin, SUN Cheng-wei, LI Qiang, et al. Experimental studies on dynamic tension of metal ring by electromagnetically loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(6):481-485.
- [12] 桂毓林. 电磁加载下金属膨胀环的动态断裂与碎裂研究[D]. 绵阳:中国工程物理研究院, 2007.

## Brittle fragmentation characteristic of Y-state TU1 rings

GUI Yu-lin\*, SUN Cheng-wei, LI Qiang, ZHANG Guang-sheng

(National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

**Abstract:** Based on Mott's statistical theory and Grady's energy balance theory, The Crack Opening Displacement model (COD model), was used to describe the brittle fragmentation characteristic of TU1 ring. The formula of fragment size and number were derived from the COD model. The fragmentation experiments were carried out for brittle TU1 rings. The freely expanding ring specimens were electromagnetically driven at different strain rates. The experimental results are in agreement with the COD model, and provide an important reference for the description of the brittle metal fragmentation behavior.

**Key words:** solid mechanics; brittle fragmentation characteristic; crack opening displacement model (COD model); Y-state TU1 ring

\* Corresponding author; GUI Yu-lin  
Telephone: 86-816-2494732

E-mail address: guiyulin@21cn.com