

文章编号: 1001-1455(2009)06-0561-05

缺口膨胀环实验的设计分析与数值模拟*

汤铁钢, 李庆忠, 刘仓理

(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: 提出并设计了用于研究材料在冲击拉伸加载下损伤演化过程的缺口膨胀环实验。通过数值模拟研究了缺口膨胀环的拉伸加载历程。研究表明, 缺口膨胀环各位置经历拉伸加载时间的长度由其与缺口之间的距离决定, 但加载时间长度不能简单按 Mott 卸载波的传播时间来估计, 需要借助膨胀环各位置的速度历史来确定。

关键词: 固体力学; 冲击拉伸; 缺口膨胀环; 卸载波

中图分类号: O346.1

国标学科代码: 130·15

文献标志码: A

1 引言

用膨胀环实验研究材料在高应变率加载下的动态特性已经有半个世纪的历史了^[1-3], 主要研究内容包括本构关系和动态破碎。在利用膨胀环实验研究圆环的破碎时, 很多研究者都运用 Mott 的一维破碎理论进行分析^[4-5]。N. F. Mott^[6]认为, 如果整个圆环材料呈现出相同的断裂应变, 则断裂将在整个环上同时发生, 且产生的碎块尺寸无限小, 这显然与客观不相符, 于是他假设了一个断裂应变分布, 当应变从 ϵ 增加到 $\epsilon + d\epsilon$ 时, 单位长度未发生断裂的圆环断裂概率为

$$dP = Ce^{\gamma\epsilon} d\epsilon$$

式中: C, γ 为常数。

破碎是一个过程, 并非瞬间完成, 这个过程中包含了材料损伤累积与断裂发生等微观过程。要深入研究圆环的破碎过程, 必然要研究圆环材料中的损伤演化过程。然而, 传统的膨胀环实验中圆环经历 1 次冲击后连续膨胀, 直至其动能耗尽, 最后或运动终止, 或发生破碎。膨胀破碎过程中各个位置的圆环材料经历的拉伸加载时间基本相同, 只有在后期断裂发生后, 由于 Mott 波的作用会引起破片各位置加载时间的微小变化。在此过程中, 材料中的损伤在加载早期的演化过程是无法直接“冻结”的, 往往需要借助改变加载条件或回收条件达到此目的。本文将讨论如何进行实验设计, 并利用同一发膨胀环实验研究材料在冲击拉伸加载下的损伤演化过程。

2 实验设计与分析

2.1 实验设计

研究金属圆环材料在拉伸加载下损伤演化的传统方法有 2 种: 一种是约束应变的方法, 即采用软材料限制圆环的膨胀应变; 另一种是采用不同加载强度的方法, 即使圆环具有不同的初始动能, 运动到不同应变后自动停止。前一种方法中圆环的损伤不可避免地会受到回收条件的影响, 而后一种方法中圆环经历的是不同的加载强度, 其损伤的演化可能会经历不同的历程。所以, 最好的方法是在同一次实验中获得不同加载时间长度的试样材料, 这样圆环材料经历了相同的初始加载强度, 后续的损伤演化过程才具有可比性。

* 收稿日期: 2008-07-22; 修回日期: 2008-11-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(10872187);

冲击波物理与爆轰物理国防科技重点实验室基金项目(9140C6702010903)

作者简介: 汤铁钢(1974—), 男, 博士研究生, 副研究员。

本文中设计了一种带缺口的膨胀环实验来实现上述目的。实验设计如图 1 所示:加载手段采用中心线起爆的爆炸膨胀环加载装置^[7],加载装置由爆炸丝、柱形装药、驱动器和膨胀环等部件组成。膨胀环上预置一个缺口,缺口深度可以根据实验结果进行调整,目的是当整个环获得最大膨胀速度时在缺口位置发生断裂。

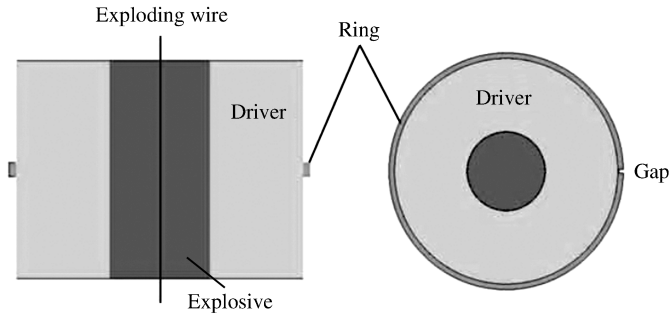


图 1 缺口膨胀环实验装置示意图

Fig. 1 Sketch of an expanding gap-ring experimental setup

2.2 拉伸加载时间与损伤程度分析

膨胀环获得最大膨胀速度后,将在缺口位置发生断裂,随后卸载波从缺口位置向膨胀环内部传播,在其他位置不发生断裂的情况下,离缺口越远,经历的拉伸加载时间将越长,如图 2 所示。在缺口附近位置,由于拉伸加载时间很短,可以认为膨胀环材料只经历了初始的冲击加载,这也是整个环所经历的同冲击加载,材料中的损伤程度可以代表整个环中的初始损伤程度。从缺口处沿膨胀环到缺口对面位置,拉伸加载时间不断增加,材料中的损伤也会不断累积、增长,在没有达到断裂的条件下,缺口对面位置将经历最长时间的拉伸加载。如果中间某位置发生了断裂,后面的加载过程将可以利用 Mott 卸载波进行分析。

对于图 2 中的缺口膨胀环,稀疏波经过的区域是否就不再承受拉伸加载呢?对于 N. F. Mott 分析的圆环,由于断裂发生较晚,断裂时圆环的膨胀速度很低,认为 Mott 波后是应力卸载区域,没有其他的应力波再加载,于是不再承受拉伸加载。然而,图 2 中带缺口的膨胀环是在获得最大膨胀速度时刻缺口位置发生断裂,卸载波从断口位置沿膨胀环向内传播,此时膨胀环仍具有较高的膨胀速度,而且断口位置的单元将改变运动方向,其运动速度大于相邻位置的单元,相邻单元将会继续承受拉伸加载。由此看来,是否承受拉伸加载,不仅仅与从断口产生的卸载波有关,而且与膨胀环中各位置的运动速度有关。由于速度矢量差的存在,还会不断有拉伸波产生,膨胀环仍将承受拉伸加载,直至相邻单元速度矢量差与该位置的法线方向一致,该单元才不再承受拉伸加载。

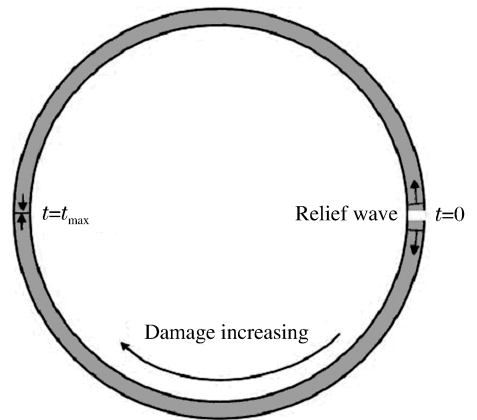


图 2 缺口膨胀环各位置的拉伸加载历程示意图

Fig. 2 Sketch of an expanding gap-ring undergoing tensile loading

3 数值模拟分析

3.1 计算模型

为了更好地理解缺口膨胀环的运动规律及其各位置承受的拉伸加载历程,拟通过三维数值模拟对缺口膨胀环实验的过程进行分析。模拟计算采用 LS-DYNA 三维动力学有限元程序进行,计算模型与图 1 所示的实验装置一致:中心为直径 10 mm 的柱形 PETN 炸药,采用中心线起爆方式;驱动器为 20

钢,壁厚 15 mm;膨胀环为 OFHC,内径 40 mm,厚度 1 mm,宽度 2 mm,缺口深度为 0.8 mm,对应的圆周角为 2° ;整个装置的轴向长度为 30 mm。

炸药为密度 1.26 g/cm^3 的 PETN,采用 JWL 状态方程。20 钢和无氧铜均采用 Johnson-Cook 本构模型,模型参数见表 1,表中 ρ 为密度, c_p 为比定压热容, E 为杨氏模量, ν 为泊松比, A 为屈服应力, B 为硬化常数, n 为硬化指数, C 为应变率常数, m 为热软化指数。

表 1 20 钢和 OFHC 的本构模型参数
Table 1 The parameters for 20 steel and OFHC

材料	$\rho/(\text{g/cm}^3)$	$c_p/(\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}))$	E/GPa	n	A/MPa	B/MPa	ν	C	m
20 钢	7.83	477	159	0.33	792	510	0.26	0.014	1.03
OFHC	8.96	383	129	0.34	90	292	0.31	0.025	1.09

3.2 计算结果与分析

为了比较膨胀环不同位置的速度、应力、应变的变化历程,计算中选取膨胀环缺口以及顺时针旋转 45° 、 90° 、 180° 这 4 个位置的节点和单元进行分析,选取的节点和单元的编号及其位置如图 3 所示。

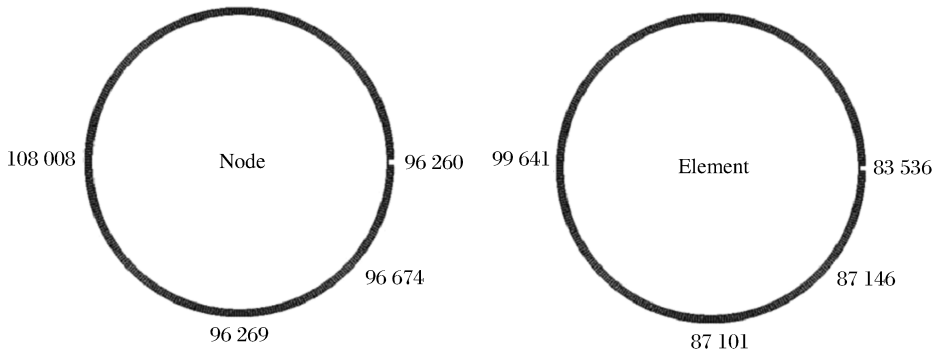


图 3 膨胀环中选取的节点和单元的位置示意图

Fig. 3 Positions of nodes and elements selected on the expanding ring

缺口膨胀环的膨胀过程如图 4 所示,显然,膨胀环在缺口位置断裂后,不再严格沿径向膨胀,于是膨胀环各相邻位置的膨胀速度也将逐渐不一致,膨胀环各点的膨胀速度会因其位置而改变,特征点的合速度历史如图 5 所示,各特征位置单元等效应变历史见图 6,最大主应力历史见图 7。从图 5~图 7 可以看出,在冲击加载下,膨胀环各位置在发生较大应变之前($6.6 \mu\text{s}$ 之前),获得了相同的膨胀速度、初始应变和初始应力,表明整个环经历的初始加载基本上是一致的。

在膨胀环上选取的 4 个特征点中,缺口位置断裂后其边缘点处于加速运动阶段,其他点经历一段相同的减速运动后速度发生不同程度的转折变化。在速度发生转折之前,认为该点未受到断口卸载及相邻单元速度变化的影响。中间 2 点经历拉伸的时间可以从速度历史(图 5)读取, 45° 点和 90° 点经历拉伸的时间分别为 22、 $60 \mu\text{s}$ (时间零点从膨胀环获得最大速度时刻算起,即图中坐标时间减去 $6.6 \mu\text{s}$),而此时它们距离缺口的长度分别约 16.5、40.5 mm(考虑试样环的拉伸),经历的拉伸加载时间与该位置到缺口的距离不严格满足比例关系。

从单元中的等效应变历史和最大主应力(环向应力)历史来看,缺口边缘单元经历冲击加载后,仅发生很小的应变,其应力就很快衰减,没有经历明显的拉伸加载过程。其他位置的单元经历了不同时间长度的拉伸加载,但拉伸加载强度是一致的。从应变历史判读, 45° 和 90° 位置单元经历的拉伸加载时间分别为 21、 $55.3 \mu\text{s}$;从最大主应力历史判读, 45° 和 90° 位置单元经历的拉伸加载时间分别为 20、 $55 \mu\text{s}$,与应变历史判读的时间基本一致,但均小于从速度历史中判读的时间长度,这可能是因为在加载过程中,膨胀环中的应力、应变变化相对速度更为灵敏。如果假定存在一个卸载波,按卸载波传播的距离除以传播时间计算,则该卸载波的传播速度仅有 800 m/s 左右,远远小于无氧铜中的声速 3794 m/s ,而 Mott

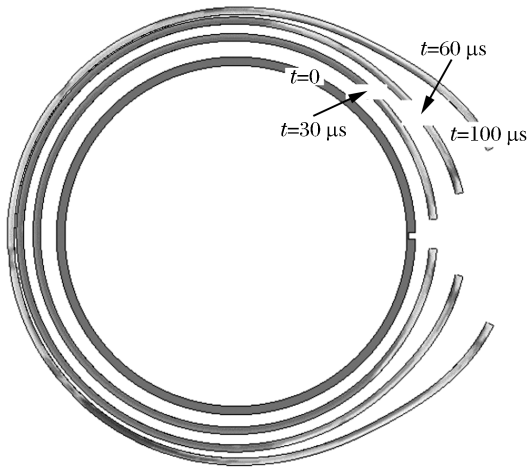


图 4 缺口膨胀环的膨胀过程
Fig. 4 Expanding process of a gap ring

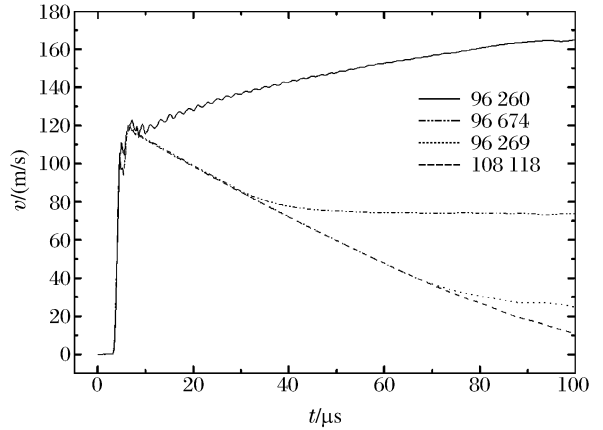


图 5 缺口膨胀环不同位置节点的膨胀合速度历史
Fig. 5 Resultant velocity histories of nodes in different positions of a gap ring

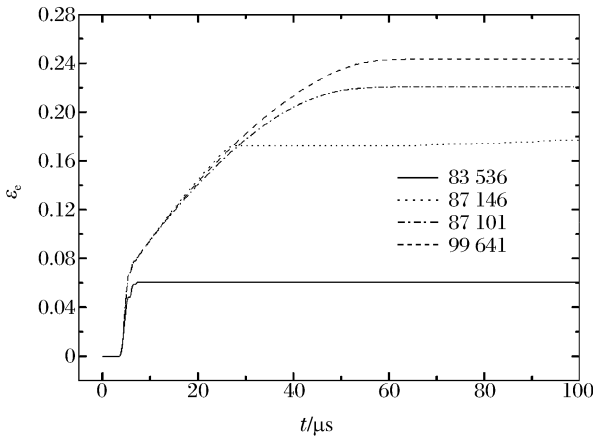


图 6 缺口膨胀环不同位置单元的等效应变历史
Fig. 6 Effective strain histories of elements in different positions of a gap ring

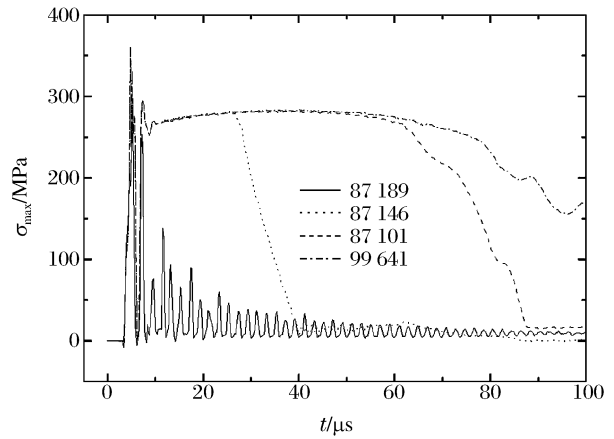


图 7 缺口膨胀环不同位置单元的最大主应力历史
Fig. 7 Maximum principal stress histories of elements in different positions of a gap ring

波通常认为卸载波是以声速传播的。由此看来,缺口膨胀环在运动过程中,缺口断开后,不只是存在所谓的 Mott 卸载波,同时还会由于环中各位置存在膨胀速度差而产生新的拉伸波加载膨胀环,这与前面的分析是一致的。

在承受拉伸加载阶段,无论是膨胀环各位置的速度还是最大主应力,均保持相同的水平。这说明膨胀环在膨胀过程中,处于塑性流动状态,膨胀环各位置的拉伸加载强度是一致的,不同的只是加载时间的长度,这正好有利于对膨胀环中的损伤演化过程进行回收分析。从应变历史上看,45°位置单元的应变在一定的时间内超过了后面 2 点的应变,这是由于膨胀环缺口的张开引起的非均匀变形造成的,从应变幅度看,缺口张开造成的应变是很小的,基本上可以忽略,应该不会对膨胀环中损伤演化造成明显的影响。

对于延性较差的材料,单缺口膨胀环仍可能发生严重破碎,将不利于回收分析损伤演化过程,加载时间也不好控制。可设计 2 个或多个缺口,合理设计缺口的深度和位置,就可以控制膨胀环各位置的加载时间长度。

4 结 论

(1) 缺口膨胀环各位置所经历的拉伸加载时间与其到缺口的距离相关, 拉伸强度基本相同, 可以利用缺口膨胀环实验来研究材料经历相同拉伸加载强度、不同拉伸加载时间的损伤演化过程。

(2) 缺口膨胀环各位置承受的拉伸加载时间不能按 Mott 卸载波的传播时间估计, 可以通过测量各位置的速度历史来确定, 也可以通过数值模拟进行预估。

(3) 从本文的理论分析和数值模拟来看, 缺口膨胀环实验可以作为研究材料冲击拉伸加载下损伤演化的一种实验手段。

感谢朱建士院士对本文思想的建议。

参考文献:

- [1] Johnson P C, Stein B A, Davis R S. Measurement of dynamic plastic flow properties under uniform stress[C]// Symposium on the Dynamic Behavior of Materials. ASTM Special Publication, 1963:195-198.
- [2] Hoggatt C R, Recht R F. Stress-strain data obtained at high rates using an expanding ring[J]. Experimental Mechanics, 1969,9:441-448.
- [3] Warnes R H, Duffey T A, Karpp R R, et al. An improved technique for determining dynamic material properties using the expanding ring[C]// Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals. New York, 1981:23-36.
- [4] Grady D E, Benson D A. Fragmentation of metal rings by electromagnetic loading[J]. Experimental Mechanics, 1983,23(4):393-400.
- [5] 桂毓林. 电磁加载下金属膨胀环的动态断裂与破碎研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2007.
- [6] Mott N F. Fragmentation of shell case[C]// Proceedings of the Royal Society. London, 1947:300-308.
- [7] 汤铁钢, 李庆忠, 陈永涛, 等. 实现材料高应变率拉伸加载的爆炸膨胀环技术[J]. 爆炸与冲击, 2009,29(5):546-549. TANG Tie-gang, LI Qing-zhong, CHEN Yong-tao, et al. An improved technique for dynamic tension of metal ring by explosive loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2009,29(5):546-549.

Design analysis of expanding gap-ring test for studying evolvement of damage

TANG Tie-gang^{*}, LI Qing-zhong, LIU Cang-li

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

Abstract: The expanding gap-ring test was put forward and designed for studying the evolvement of damage in material under impact tensile. The impact tensile process of an expanding gap ring was studied by numerical simulation. The length of loading time for different positions in the gap ring is relative to the distances of these positions from the gap. However, the length of time can't be calculated by Mott-wave transmitting, but can be determined by the velocity histories of nodes in different positions of the gap ring.

Key words: solid mechanics; impact tensile; expanding gap ring; relief wave

* Corresponding author: TANG Tie-gang
Telephone: 86-816-2485132

E-mail address: ttg1974@163.com