文章编号：1000-5773(2011)02-0188-05

缺陷对圆管膨胀断裂影响的实验研究*

金 山，张世文，龙建华

（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：采用高速分幅摄影技术，通过对比实验，获得了清晰的无缺陷和预制缺陷金属圆管膨胀断裂的演化图像。实验结果表明，缺陷大大加速了圆管的断裂过程；有缺陷圆管的产物开始泄漏的时间比无缺陷圆管提前 5.5 μs，采用应力/应变集中法很好地解释了这种现象。另外，针对预制缺陷圆管膨胀断裂时出现的裂块较小而数量较多、无缺陷圆管膨胀断裂时裂块相对较大而数量较少的现象，采用 Mott 波理论进行了合理的解释。

关键词：爆炸力学；圆管；缺陷；膨胀断裂；Mott 波
中图分类号：O346.1；O343.4 **文献标识码**：A

1 引 言

对于金属圆管的膨胀断裂行为，人们已经进行了大量的研究工作，例如：Mott 等人[1-3]采用 Mott 波理论分析了膨胀断裂下金属圆管破片的大小，Grady 等人[4]采用概率理论探讨破片的概率分布。但是这些研究均是针对破片的最终形貌，对于圆管从产生裂纹到最终破坏的中间过程分析相对较少。大量的实验表明，采用均匀的连续介质模型很难解释圆管膨胀断裂实验中的异常现象，比如圆管远未达到通常意义的断裂应变时，就在圆管外表面出现细小的裂纹，或者局部位置出现过早破裂[5-6]。张世文等人[7]的研究结果表明，如果圆管外表面不存在缺陷，是很难解释圆管外表面首先出现裂纹这一实验现象的，如果采用含缺陷的圆管膨胀研究方法，就可以很好地解释这一现象。同时，他们还指出圆管的外表面缺陷是最危险的缺陷。本研究通过对比实验，探讨各种因素引起的损伤或缺陷对圆管膨胀断裂的影响，研究结果对于如何延缓断裂过早发生具有一定的参考价值。

2 实 验

在金属圆管膨胀断裂实验中，由于轴向的位移和速度一般比径向低一个量级，因此可将滑移爆轰定常段每个截面近似为一维平面应变状态，这样就可以大大简化分析过程。基于这种思路，在圆管的外表面沿轴向预制不同深度的缺陷，如图 1 所示，研究缺陷对圆管膨胀断裂的影响。力学分析过程中将预制的刻槽缺陷按一维平面应变状态处理，这可以使问题得以简化。

采用预制缺陷的方法，对比研究缺陷对圆管膨胀断裂的影响程度。实验装置示意图见图 2。其中：主炸药采用∅32 mm×140 mm 的 RHT-901 炸药；传爆药为∅20 mm×5 mm 的 PETN 药柱；金属圆管为 45 钢，内径为 32 mm，外径为 38 mm，长度为 160 mm。两根圆管的尺寸完全相同，一个未刻槽，另一个外表面采用钼丝切割法预刻深度为 0.3 mm 的沟槽。

为了排除不同实验中偶然因素（主要指起爆系统漂移时间不同）的干扰，采用在一幅底片上同时记

* **收稿日期**：2009-12-08；**修回日期**：2010-05-06
作者简介：金 山（1981－），男，助理研究员，主要从事高速摄影技术及材料动态断裂研究. E-mail：jin9835@163.com
通讯作者：张世文（1971－），男，博士，副研究员，主要从事冲击动力学研究. E-mail：zswxueshu@yahoo.com.cn

录两个圆管(无缺陷和带有 0.3 mm 深的缺陷)的膨胀断裂图像,这样就可以直接在底片上对比分析两者之间的差异。图 3为圆管的实验布局照片。要求两圆管在高速摄影底片上处于同一高度,便于比较分析。图 4 为对比实验的整体布局。实验中利用炸药激发氩气作为照明光源,采用前照明方式,以白纱布为背景,采用 FJZ-250 型高速转镜式分幅相机拍摄圆管的膨胀过程,其中相机转速为 240 kr/min,即照片的时间间隔为 0.5 μs。

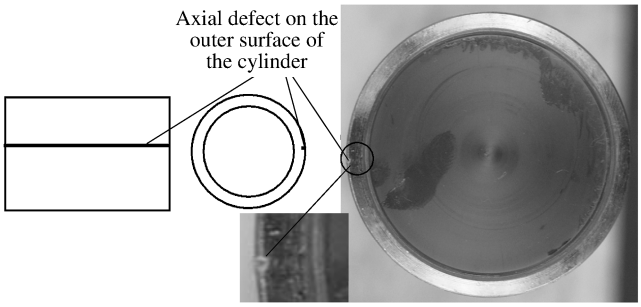


图 1　具有轴向缺陷的金属圆管

Fig. 1　Metal cylinder with an axial defect

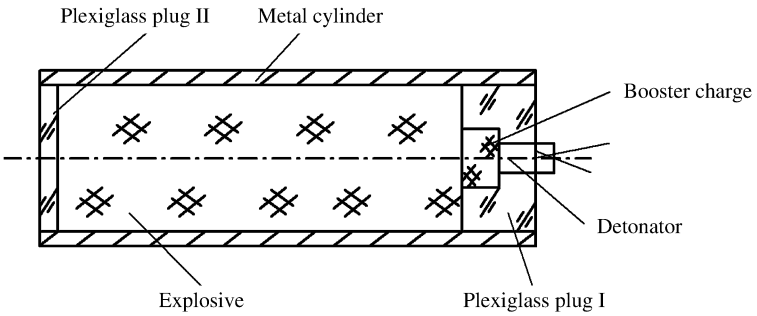


图 2　实验装置示意图

Fig. 2　Sketch of the experimental setup



图 3　对比实验装置图像

Fig. 3　Image of the contrast experimental setup



图 4　对比实验整体布局

Fig. 4　Whole layout of the contrast experiment

3　实验结果及分析

3.1　圆管膨胀整体实验图像

图 5 为两圆管膨胀断裂图像。从图 5 中可以看出:尽管缺陷在圆管膨胀初期影响并不明显,但随着圆管膨胀的发展,缺陷的影响越来越显著;未刻槽的圆管与刻有 0.3 mm 深沟槽的圆管在整体膨胀应变上没有明显差异。

选取距起爆端 50 mm 和 70 mm 两处为测量点(实验前在壳体上画标记线),以起爆时刻为零时刻,对得到的高速摄影底片进行测量。测得的两种圆管的裂纹产生和产物泄露时间列于表 1。从表 1 中可以看出,在距离起爆端 50 mm 的位置上:未刻槽圆管出现明显裂纹的时间为 18.5 μs,而刻槽圆管为 15.5 μs,两者相差约 3 μs;未刻槽圆管产物开始泄漏的时间为 23.0 μs,刻槽圆管为 17.5 μs,两者相差

5.5 μs。在距离起爆端 70 mm 的位置上，未刻槽圆管产物开始泄漏的时间为 25.5 μs，刻槽圆管为 21.0 μs，两者相差 4.5 μs。

表 1 有、无缺陷圆管膨胀时的裂纹产生时刻和产物泄露时刻比较

Table 1 Comparisons of the crack generation time and resultant leakage time of the expanded metal cylinders with and without defect

Sample	Crack generation time/(μs)		Resultant leakage time/(μs)	
	50 mm	70 mm	50 mm	70 mm
Cylinder without defect	18.5	22.0	23.0	25.5
Cylinder with defect	15.5	19.0	17.5	21.0

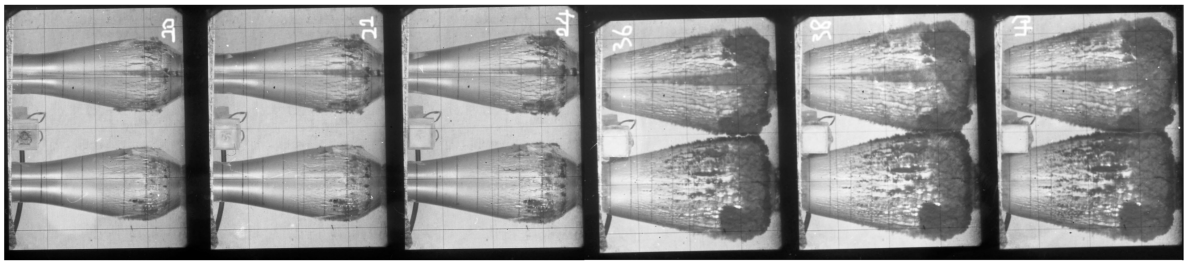


图 5 对比实验动态膨胀图像

Fig. 5 Dynamic expanding image of the contrast experiment

汤铁钢等人[8]曾对 45 钢圆管的膨胀断裂进行了实验研究，结果表明在相同的加载下，不管是拉剪混合模式还是纯剪切断裂模式，当壁厚由 5 mm 减小到 4 mm 时，即壁厚减薄 20%，圆管外表面出现裂纹时间相差不到 2 μs，产物开始泄漏的时间不超过 3 μs。对于本实验，有刻槽部位的壁厚为 2.7 mm，相对于其它部位的壁厚降低了 10%，而出现裂纹时间相差 3 μs，产物开始泄漏的时间相差高达 5.5 μs，这说明刻槽导致的壁厚减薄不是造成差异的主要原因。张世文等人[9]对含缺陷的圆管膨胀进行了数值模拟，结果表明外表面含有缺陷时，缺陷部位的等效塑性应变比不含缺陷时高近 10 倍，较强的应力集中使该部位的断裂时间比其它部位大大提前，因此缺陷处的应力集中才是引起差异的主要原因。

3.2 缺陷对圆管局部破裂的影响

缺陷不仅影响产物的泄漏，缺陷还使其附近的裂纹与无缺陷时有明显差异。图 6 为有、无缺陷圆管的膨胀断裂图像。从图 6 可以看出，相对于无缺陷圆管，在有缺陷圆管的缺陷附近，裂纹明显增多。

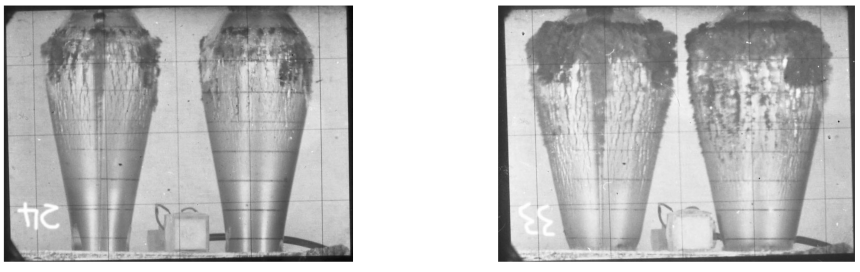


图 6 缺陷附近的裂纹分布图像对比

Fig. 6 Contrast images of crack distribution near the defect

采用 Mott 波理论可以解释缺陷附近裂纹增多这一现象，如图 7 所示。图 7(a)为带有预制缺陷的圆管示意图，图 7(b)为预制缺陷对新增裂纹的影响示意图。当预制缺陷引起的卸载波与原有卸载波相

互作用时,产生第 1 级裂纹,如图 7(b)中粗实线所示;第 1 级裂纹产生更多卸载波,卸载波相互作用,催生出第 2 级裂纹,如图 7(b)中虚线所示;新增裂纹的数目与圆管最终的断裂模式有关,直到圆管整体破裂为止。

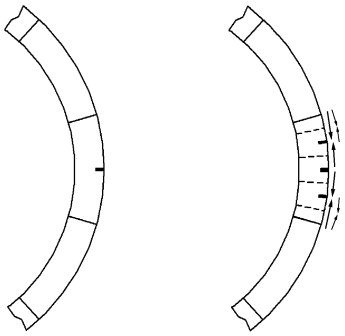


图 7　预制缺陷作用下圆管新增裂纹演化示意图

Fig. 7　Evolution of new crack in the wall of metal cylinder with a prefabricated defect

4　结　论

利用高速分幅摄影技术,通过对比实验,获得了清晰的无缺陷和预制缺陷金属圆管膨胀断裂演化图像,由此可以清楚地判断缺陷对圆管膨胀断裂的影响。实验结果表明:(1)有缺陷圆管出现明显裂纹的时间(15.5 μs)比无缺陷圆管(18.5 μs)提前 3 μs,而产物开始泄漏的时间则提前 5.5 μs,说明缺陷对圆管膨胀断裂的影响非常明显,分析认为这是由于缺陷处的应力集中引起的;(2)有缺陷圆管膨胀断裂时出现的裂块较小且数量较多,无缺陷圆管则是裂块较大且数量较少,采用 Mott 波理论可以很好地解释这一现象。

需要指出的是,缺陷的形状与缺陷预制方法密切相关,预制缺陷越接近理想尖裂纹,缺陷处的应力集中程度就越严重,上述实验现象也就越明显,这还有待进一步研究。圆管外表面的损伤会大大加速圆管的膨胀断裂进程,因此如何对外表面进行处理,防止划伤等机械损伤非常关键。

References:

[1] Mott N F. Fragmentation of H. E. Shells: A Theoretical Formula for the Distribution of Weights of Fragments, AC3642 [R]. UK: Ministry of Supply, 1943.

[2] Mott N F. A Theory of the Fragmentation of Shells and Bombs, AC4035 [R]. UK: Ministry of Supply, 1943.

[3] Mott N F. Fragmentation of Shell Cases [J]. Proc R Soc London Ser A, 1947, 189(1018): 300-308.

[4] Grady D. Investigation of Explosively Driven Fragmentation of Metals-Two-Dimensional Fracture and Fragmentation of Metal Shells, UCRL-CR-152264 [R]. California: Lawrence Livermore National Laboratory, 2003.

[5] Tang T G, Gu Y, Li Q Z, et al. Expanding Fracture of Steel Cylinder Shell by Detonation Driving [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(6): 529-533. (in Chinese)
汤铁钢,谷　岩,李庆忠,等. 爆轰加载下金属柱壳膨胀破裂过程研究 [J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(6): 529-533.

[6] Zhang C Y. Experimental and Simulation Study on the Influences of the Guard Ring on the Metal Cylinder Driven by Two Head-on Colliding Detonation Waves [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2005. (in Chinese)
张崇玉. 爆轰波对碰驱动下保护环对金属圆管保护的实验和数值模拟研究 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2005.

[7] Zhang S W, Liu C L, Yu J Q. Influences of Microdefects on Expanding Fracture of a Metal Cylinder [J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(4): 316-323. (in Chinese)
张世文,刘仓理,于锦泉. 微缺陷对圆管膨胀断裂的影响 [J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(4): 316-323.

[8] Tang T G, Li Q Z, Sun X L, et al. Strain-Rate Effects of Expanding Fracture of 45 Steel Cylinder Shells Driven by Detonation [J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(2): 129-133. (in Chinese)
汤铁钢,李庆忠,孙学林,等. 45 钢柱壳膨胀断裂的应变率效应 [J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(2): 129-133.

[9] Zhang S W, Jin S, Liu C L. Simulation of the Dynamic Expanding Process of Thick-Walled Cylinder with Defects [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2010, 27(3): 622-625. (in Chinese)
张世文,金　山,刘仓理. 含缺陷厚壁圆管爆轰膨胀断裂的数值模拟 [J]. 应用力学学报, 2010, 27(3): 622-625.

Experimental Study on the Influences of Defects on Expanding Fracture of a Metal Cylinder

JIN Shan, ZHANG Shi-Wen, LONG Jian-Hua

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: By means of high-speed frame photography, clear images of the expanding fracture of two metal cylinders with and without a notch were obtained. The experimental results showed that the notch defect would significantly accelerate the fracture process of the cylinder. For the metal cylinder containing a prefabricated notch, the leakage time of detonation products (5.5 μs) is earlier than that without a notch, which can be satisfactorily explained by stress or strain concentration. Furthermore, using Mott wave theory, it is well explained that the fragments of the metal cylinder with a notch defect are smaller and more abundant than that without defect.

Key words: mechanics of explosion; cylinder; defect; expanding fracture; Mott wave