DOI: 10.11883/bzycj-2017-0014
文章编号: 1001-1455(2018)01-0148-07

不同爆炸载荷下 TA2 钛合金圆管膨胀破坏过程*

俞鑫炉[1,2],董新龙[1],潘顺吉[1]
(1. 宁波大学机械工程与力学学院,浙江 宁波 315211;
2. 北京理工大学机电学院,北京 100081)

摘要: 金属柱壳破坏过程与材料、结构及载荷等相关,断裂结果呈现多种形式,采用有限元结合实验对不同爆炸载荷作用下,TA2 钛合金圆管的破坏机制开展研究。有限元结果显示:对于理想均质柱壳,由于冲击波传播使壁厚中间形成二次塑性区,圆管壁厚中部的等效塑性应变总是大于内、外壁。在较高爆压下,裂纹在加载阶段从试样壁厚中部起始,沿 45°或 135°向内外壁剪切扩展;而在较低爆压下,破坏发生在自由膨胀阶段,断裂从内壁起始向外壁剪切扩展,两者破坏过程和机制不同,总体来说,与实验现象符合较好。相关实验中出现的一些外壁拉伸断裂现象,可能与试样的几何、材料缺陷等因素相关,其对金属圆管爆炸破坏的影响值得进一步关注。

关键词: 金属圆管; 爆炸加载; 缺陷; 有限元
中图分类号: O382 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

韧性金属柱壳外爆碎裂是一个强冲击(约 100 GPa)作用下材料和结构经历了高应变率塑性变形导致断裂的复杂物理现象,倍受学者们的关注[1-7]。早先由于军事需求较多关注破片尺寸分布及预测。Gurney[1]基于能量平衡原理给出了柱壳破片速度的经验公式,不考虑具体的破坏模式;Taylor[2-3]基于拉伸破坏假设,提出了 Taylor 断裂判据;Mott[4]基于统计激活概念,提出了用于计算爆炸环和柱壳碎片尺寸、质量分布的分析模型。这些研究奠定了这一领域的重要基础并延续影响至今。近年来,越来越多的工作关注碎裂演化过程及机制。Hoggatt 等[5]对钢柱壳碎片进行断口分析,认为在较低的爆轰压力下,断裂首先在柱壳外壁形成径向裂纹,而将不稳定剪切区预制在内壁附近,形成拉/剪混合现象;而在较高爆轰压力下,内壁处于压缩状态,阻碍了裂纹的发展,会在壳内形成不稳定剪切区,因此破片中可观察到大量剪切区。Singh 等[6]通过对铜圆管的外爆膨胀实验研究却认为:金属圆管在高速膨胀变形中剪切破坏占主导地位。胡海波等[8-9]对 45 钢、TC4 钛合金及钨合金等开展了系列实验研究,包括不同径厚比、不同热处理条件等因素的影响,结果发现:柱壳以剪切断裂模式为主,部分呈拉/剪混合破坏,并发现存在单旋绝热剪切等多种断裂破坏模式,但其形成机制和控制因素并不十分清楚。张世文等[10]、金山等[11]开展比较实验及有限元分析认为缺陷是控制外壁裂纹起始断裂的主要原因。

综上可见,金属柱壳外爆膨胀碎裂过程及机理讨论,在诸多方面存在差别;胡海波等[8]分析也认为:金属壳壁爆炸膨胀断裂行为受材料、爆炸载荷特性、柱壳结构等的影响,破坏过程及断裂结果呈现多种形式,这些现象的物理机制及控制因素还需更深入研究解决。

本文中,采用有限元及实验方法对爆炸膨胀 TA2 钛合金圆管的破坏过程及载荷影响开展研究,通过对不同装药爆炸载荷作用下理想金属圆管内的冲击波传播、应变演化发展及应力状态等规律的分析,探讨载荷特性对 TA2 钛合金圆管碎裂现象、断裂机制的影响。

1 圆管爆炸膨胀有限元模型

圆管外爆膨胀断裂实验轴向速度比径向速度方向低一个量级,对于滑移爆轰定常段圆管横截面可

* **收稿日期**: 2017-01-12; **修回日期**: 2017-03-06。 "第十一届全国爆炸力学学术会议"推荐论文。
基金项目: 国家自然科学基金项目(11672143);
国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院 NSAF 联合基金资助项目(U1230122)
第一作者: 俞鑫炉(1989—),男,博士研究生; **通信作者**: 董新龙,dongxinlong@nbu.edu.cn。

近似看作一维平面应变状态[10]，如图 1 所示。圆管内径 40 mm，外径 50 mm，壁厚 5 mm。圆管内壁沿径向施加瞬态载荷：

$$p = p_0 \mathrm{e}^{-t/t_\mathrm{d}} \tag{1}$$

式中：p_0 为炸药的 C-J 压力，t_d 为衰减时间，分别模拟不同填充装药条件的爆炸载荷特性。

为与实验结果比较，试样材料选用 TA2 钛合金，材料本构采用 Grüneisen 状态方程和 Johnson-Cook 本构模型。为分析圆管的损伤、破坏及裂纹演化特性，引入塑性剪切软化内聚力失效模型，即：

$$D = \frac{\varepsilon - \varepsilon_\mathrm{cr}}{\varepsilon_\mathrm{f} - \varepsilon_\mathrm{cr}} \qquad \varepsilon_\mathrm{cr} < \varepsilon < \varepsilon_\mathrm{f} \tag{2}$$

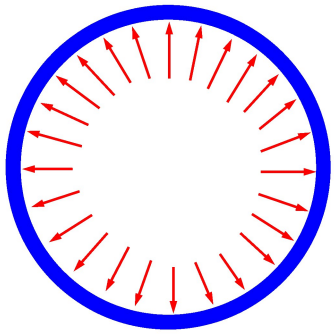

图 1　平面应变圆管爆炸加载模型

Fig. 1　Finite element model of metal cylinder subjected to explosive load

式中：ε_cr 为损伤起始塑性应变，ε_f 为材料失效应变。一旦损伤软化起始，流动应力为：

$$\sigma = \sigma_0 (1 - D)$$

由于需要模拟分析柱壳截面的破坏起始及演化过程，模型应采用尽量小的平面应变单元网格尺寸，最小单元尺寸为 50 μm×50 μm。

2　有限元结果及分析

为比较不同装药下，TA2 钛合金膨胀变形及破坏演化过程，有限元计算中对圆管施加不同爆轰峰值 C-J 压力 p_0 及 t_d 特性的爆炸载荷。图 2 给出一组不同炸药填塞作用下，TA2 钛合金圆管的膨胀破坏过程的等效塑性应变分布云图。

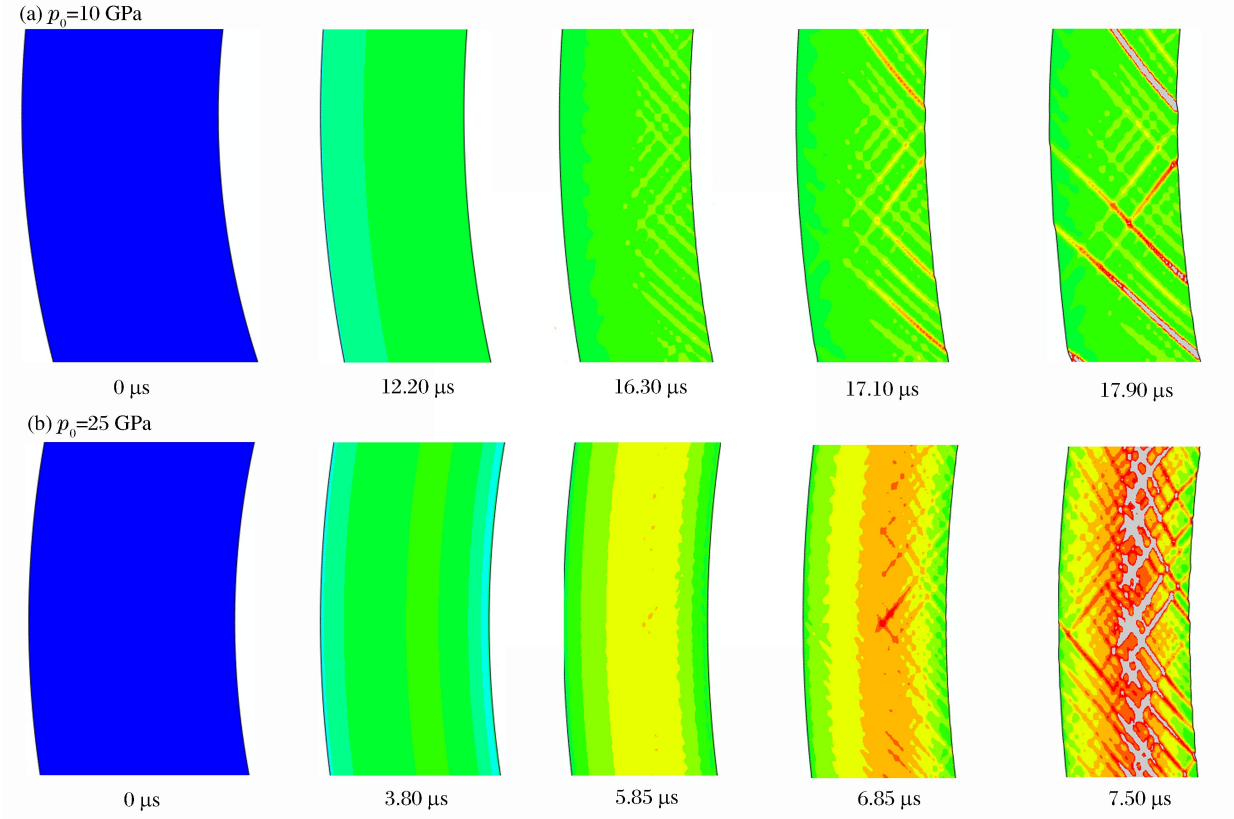

图 2　圆管膨胀、破坏过程等效塑性应变演化

Fig. 2　Equivalent plastic strain evolution of circular tube during expansion and failure

从图 2 中可以看出：(1)在较高爆轰压力($p_0=25$ GPa，$t_d=2$ μs)作用下，如图 2(a)所示，圆管横截面初始呈现均匀膨胀变形(0～5.85 μs)；随加载进行，圆管厚度中间位置的等效塑性应变逐渐增大，并首先发生局部应变集中及塑性损伤，继而应变集中带或微裂纹集中沿与径向成 45°或 135°向试样内外壁传播，形成剪切型破碎特征。(2)在较低爆轰压力($p_0=10$ GPa，$t_d=2$ μs)作用下，如图 2(b)所示，与较高压加载不同，圆管经历了较长时间的均匀膨胀过程(0～15.90 μs)，之后内壁首先出现沿与径向成 45°或 135°的剪切应变局域化集中带，并向外壁发展，裂纹沿局域化带发展形成了剪切破坏。虽然两者宏观都呈现出剪切型碎裂特征，断口均呈 45°或 135°发展，但两者破坏机制完全不同。

图 3 给出了两者外壁的速度时程曲线。从图中可以看出，由于冲击波在试样内外壁间来回反射，圆管外壁速度呈上下震荡增大的特征，随后进入自由膨胀阶段。圆管试样外壁的速度时程曲线显示：在较高爆轰压力($p_0=25$ GPa)加载下，在 $t=6.85$ μs 时刻，外壁相邻质点速度出现分离，对比图 2(a)可见此时由试样中部形成的局域化应变集中带已发展至外壁，到 $t=7.50$ μs 时，裂纹传播至外壁产生破坏，在较高爆轰波作用下破坏发生在加载阶段。而在较低爆轰压力($p_0=10$ GPa)加载下，碎裂破坏发生在 $t=17.90$ μs时刻，为圆管自由膨胀阶段。

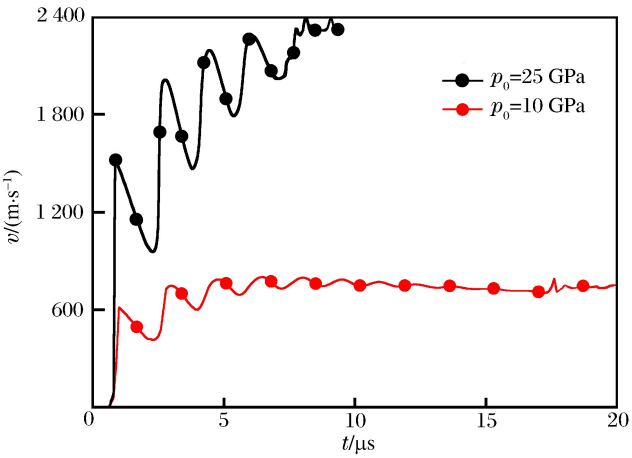

图 3 圆管外壁在不同爆轰载荷下的速度时程曲线

Fig. 3 Histories of explosive load and outer surface velocity of circular tube under explosive load

图 4 所示为不同爆轰压力下圆管厚度中间一点的归一化压力时程曲线，由于加载冲击波在试样中来回反射，试样壁厚方向静水压呈现拉、压变化的特征。在爆轰冲击波作用时间段内，两圆管有着相同的压力响应特征。图 5 为沿圆管内壁、中点及外壁处的应力三轴度时程曲线。其中应力三轴度可用 $\eta=p_s/\sigma_M$ 表示，p_s 为静水压，σ_M 为 Von-Mises 等效应力。从图中可以看出，圆管内壁应力三轴度始终处于静水压应力状态，绝对值呈指数衰减趋势，外壁主要处于静水拉应力，而壁厚中间随冲击波来回反射作用在拉、压状态之间变化。

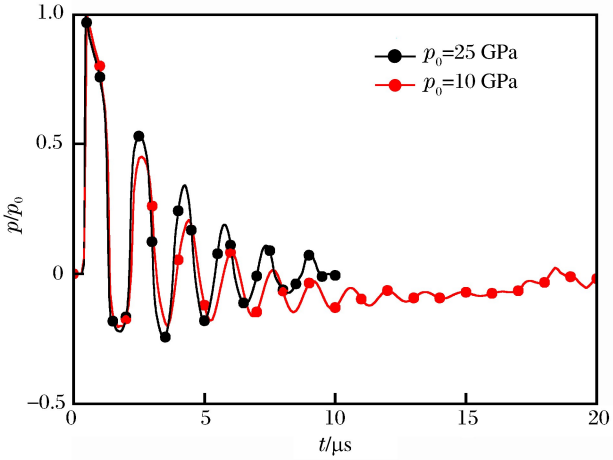

图 4 圆管中点静水压归一化时程曲线

Fig. 4 The normalizing pressure of the middle point

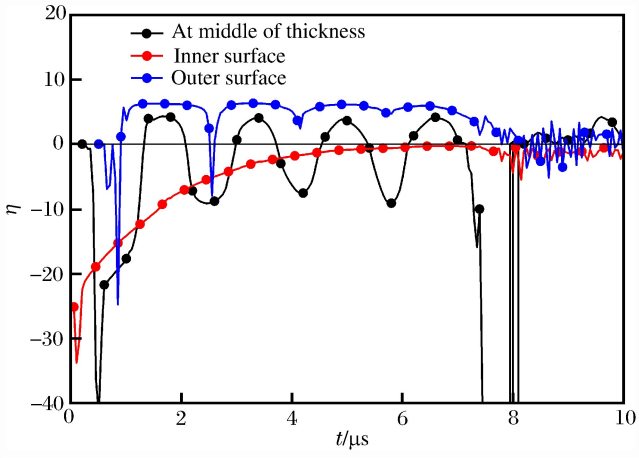

图 5 圆管壁厚应力三轴度分布

Fig. 5 Distribution of stress triaxiality along thickness

图 6 所示为较高爆轰压力作用下，试样壁厚方向上各点的应力状态，可见在加载阶段外壁环向应力 σ_θ 始终为正，但远小于厚度中间的应力水平，因此对于理想均质的金属圆管，一般不可能在外壁首先产生拉伸破坏。进一步计算给出加载过程沿圆管壁厚(径向)的等效塑性应变演化特征，如图 7 所示。当

爆轰波作用在圆管内壁并沿径向传播时，等效塑性应变稳定发展，如图 7 中第一阶段，由于柱面波扩散及黏塑性的耗散作用，等效塑性应变从内壁向外壁呈递减分布；但当冲击波传至试样外壁后，自由面反射卸载，加载塑性波与卸载弹性波相交后的应力值超过塑性变形历史中曾达到过的最大应力值，仍能重新发生塑性加载而形成二次塑性区[12]，导致厚度中间部位的应变逐渐超过两边界的等效塑性应变，呈凸形分布状态，如图 7 中第二阶段，因此随加载冲击波在内外壁反射传播，试样厚度中部塑性应变积累最大。随冲击波在圆管中传播发展，当塑性损伤积累增大首先在中部形成塑性应变局域化集中带及孔洞或微裂纹带，剪切裂纹从试样中部向内、外壁传播导致柱壳破碎。

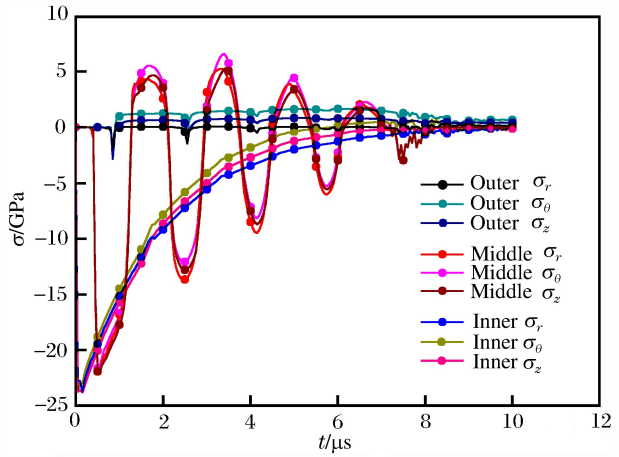

图 6 高爆轰压力下沿壁厚各点应力时程曲线

Fig. 6 Histories of stressalong thickness under higher pressure

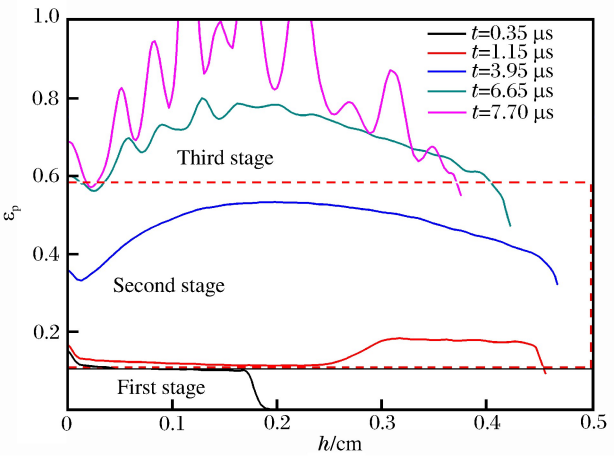

图 7 高爆轰压力下沿壁厚等效应变演化特性

Fig. 7 Development of equivalent plastic strain under higher pressure

对于较低爆轰压力作用时，由于加载阶段应变积累较小，还不足以产生损伤破坏，继而圆管进入自由膨胀阶段。在圆管自由膨胀阶段，试样中的应力状态与加载阶段不同，圆管截面处于膨胀拉伸状态，如图 8 所示。此时，试样截面内壁的等效塑性应变最大，如图 9 所示，导致破坏从内壁形成并沿 45°或 135°方向向外壁发展。

通过分析不同爆炸载荷下的 TA2 柱壳应力发现：对于理想均质金属圆管膨胀过程，圆管外壁处的应力、应变总是处于最小状态，一般应不会在外壁产生裂纹起始。同时，在不同爆炸压力下，虽然断裂方向都表现为 45°剪切特征，但其破坏机制是不同的，在较高压力下，裂纹是在加载阶段从圆管壁厚中部起始，但在较低压力下，破坏发生在自由膨胀阶段，并且从内壁起始向外壁扩展。

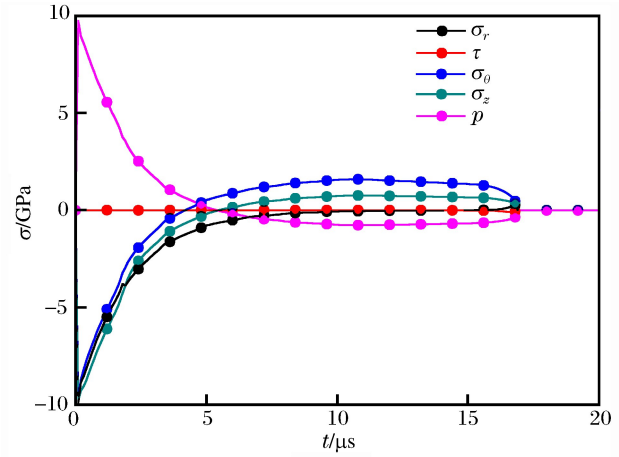

图 8 低爆轰压力作用下内壁应力时程曲线

Fig. 8 Histories of stress along thickness under higher pressure

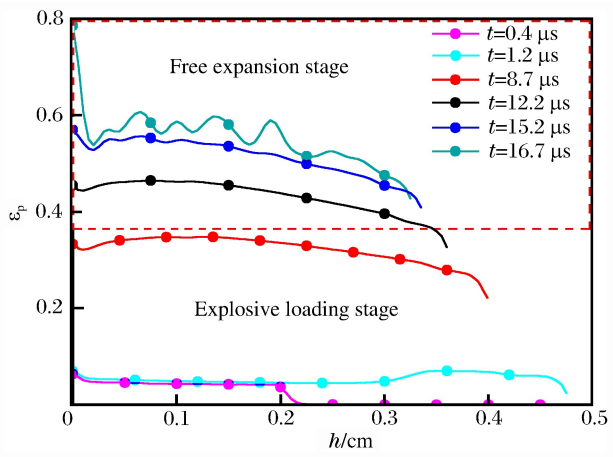

图 9 低爆轰压力下等效应变演化发展特征

Fig. 9 Development of equivalent plastic strain under lower pressure

3 进一步分析讨论

一般认为[5]:较低爆压时,圆管易在外壁产生裂纹并向内扩展;中爆压时,圆管内壁剪切失稳断裂和外壁拉伸断裂在中间贯通,形成剪切/拉伸混合断裂模式;在较高爆压时,以内壁产生的剪切断裂为主。

有限元计算结果的分析显示:与准静态情况不同,无论较高爆压还是较低爆压作用下,对于理想均质 TA2 钛合金圆管膨胀过程,圆管外壁处的应力、应变总是处于较小状态,不可能是首先发生裂纹起始的位置。针对外壁起始的拉伸断裂模式,张世文等[10]、金山等[11]开展有限元及实验比较分析也认为:外壁起始的拉伸断裂模式可能主要受圆管外壁缺陷控制,而理想无缺陷状态不会发生外壁起始的拉伸破坏。有限元计算显示:即使在较低爆压下破坏发生在自由膨胀阶段,此阶段整个圆管壁厚虽都进入拉伸应力状态,但断裂却以内壁起始向外壁剪切扩展,也与传统认为低压下以外壁拉伸断裂模式为主的观点不完全符合。也就是说,相关实验中出现的一些外壁拉伸断裂现象,可能与试样外壁几何缺陷、材料缺陷或加工残余应力引起的拉压性能不对称等因素相关。正如张世文等[10]、金山等[11]开展有限元及实验比较研究结果所揭示外壁拉伸断裂模式是由于外壁存在缺陷,导致裂纹于外壁缺陷处起始,理想情况下一般不可能出现。另外,有限元模拟显示:在不同爆炸压力下,虽然破碎宏观断口都表现为 45°剪切特征,但其破坏机制是不同的,在较高压力下,由于冲击波反射卸载引起二次塑性使得试样壁厚中部区域等效塑性应变较大,损伤、裂纹最先在加载阶段从试样壁厚中部起始,沿 45°向内外壁扩展,由于外壁处于拉伸状态,易于裂纹扩展,因此裂纹可能较早扩展至圆管外壁。这样,即使在柱壳外壁可见裂纹情况下,裂纹并也未贯通整个柱壳截面,也可解释文献[8-9,11-13]中的高爆炸药作用下外壁出现裂纹的时刻均早于爆轰产物泄漏时刻这一实验现象。

为比较不同压力下圆管膨胀破坏特性,设计金属圆管在不同爆炸载荷加载状态的比较实验,炸药是 PETN(88%太安为基),密度为 1.468 g/cm^3,通过采用相同装药但在炸药与试样内壁间填充紫铜内衬改变爆炸载荷峰值压力。对回收碎片进行了微观分析,图 10 为碎片截面典型的金相,结果显示:较高爆炸压力加载时(试样与炸药无紫铜内衬情况),截面中部存在损伤微裂纹带,断裂从损伤带起始,向内外壁 45°或 135°扩展,而低爆炸载荷作用下,裂纹从内壁起始破坏。这与有限元模拟的破坏现象吻合。

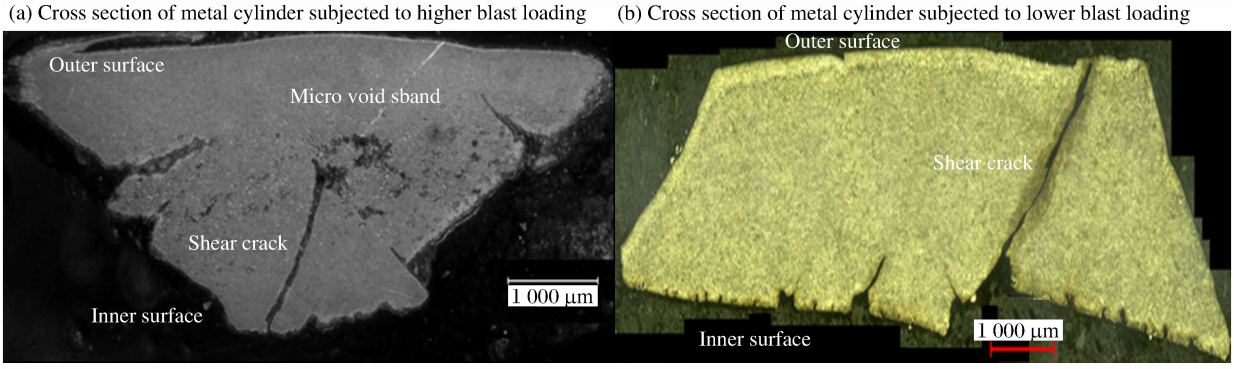

图 10 不同爆炸载荷下金属柱壳的破坏特征

Fig. 10 Cross-sectional micrograph of fragment

对于相关实验中报道的在高爆炸载荷作用下,圆管以内壁产生的剪切失稳断裂为主导的破坏模式[12-13],可以认为与在高爆轰压力作用下,材料不均匀性、内壁加工等缺陷演化有关[14]。

需要说明的是:金属壳壁爆炸膨胀断裂行为除爆炸载荷特性因素影响外,还与材料特性、柱壳结构特征尺寸等因素相关[8],这里主要针对特定结构尺寸的 TA2 合金圆管,在不同爆炸压力作用下的分析。Goto 等[7]实验比较了高强度的 AerMet_100 韧性合金及低强度的 AISI 1018 钢,发现两者破坏模式不同,其中高强度的 AerMet_100 合金碎裂主要是从内表面起始的绝热剪切带破坏,而 AISI 1018 钢碎片与 TA2 合金较高压力加载下的实验结果类似,截面中部可见大量孔洞,剪切裂纹从中部孔洞处向内外壁扩展。可见韧性金属断裂结果还可能因材料不同呈现多种形式,值得进一步深入研究。

4 结　论

采用有限元及实验分析结合方法对 TA2 钛合金爆炸膨胀破坏机制及影响因素开展研究，通过分析在不同装药爆炸载荷作用下理想金属圆管内的冲击波传播、应变及应力状态演化发展等规律，探讨金属圆管碎裂现象，结果显示：

(1)不同爆炸压力下 TA2 金属圆管破坏均为与径向呈 45°或 135°方向的剪切断口，但裂纹起始、破坏过程不同。在较高爆压下，碎片截面微观金相在壁厚中部可见孔洞及微裂纹带分布，裂纹从试样截面中部形成向内、外表面扩展断裂；而在较低爆压下，裂纹从试样内壁处起始向外扩展引起断裂；有限元结果与实验现象趋势符合较好。

(2)有限元分析显示，在较高爆炸压下，由于冲击波在试样内、外壁间来回反射形成二次塑性区，使试样壁厚中部区域等效塑性应变较内、外表面大，断裂发生在冲击波加载阶段，损伤裂纹首先从试样壁厚中部起始并向内、外壁扩展导致断裂；而在较低爆压下，破坏发生在自由膨胀阶段，此时试样整体进入拉应力状态，内壁处等效塑性积累最大，断裂从内表面起始向外壁剪切扩展。

(3)相关实验中出现的一些外壁拉伸断裂现象，可能与试样几何、材料缺陷等因素相关，对于缺陷对金属圆管爆炸破坏特性的影响值得进一步关注。

参考文献：

[1] GURNEY R W. The initial velocities of fragments from bombs, shell and grenades[R]. Army Ballistic Research Lab Aberdeen Proving Ground Md, 1943.

[2] TAYLOR G I. Analysis of the explosion of a long cylindrical bomb detonated at one end[M]// Scientific Papers of G I Taylor. Cambridge: Cambridge University Press, 1963:277-286.

[3] TAYLOR G I. The fragmentation of tubular bombs[M]// Scientific papers of G I Taylor. Cambridge: Cambridge University Press, 1963:387-390.

[4] MOTT N F. Fragmentation of shell casings and the theory of rupture in metals[M]// Fragmentation of Rings and Shells: Shock Wave and High Pressure Phenomena. Springer Berlin Heidelberg, 2006:295-325.

[5] HOGGATT C R, RECHT R F. Fracture behavior of tubular bombs[J]. Journal of Applied Physics, 1968,39(3): 1856-1862.

[6] SINGH M, SUNEJA H R, BOLA M S, et al. Dynamic tensile deformation and fracture of metal cylinders at high strain rates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2002,27(9):939-954.

[7] GOTO D M, BECKER R, ORZECHOWSKI T J, et al. Investigation of the fracture and fragmentation of explosively driven rings and cylinders[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008,35(12):1547-1556.

[8] 胡海波，汤铁钢，胡八一，等. 金属柱壳在爆炸加载断裂中的单旋现象[J]. 爆炸与冲击，2004,24(2):97-107.
HU Haibo, TANG Tiegang, HU Bayi, et al. An study of uniform shear bands orientation selection tendency on explosively loaded cylinder shells[J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(2):97-107.

[9] 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.
TANG Tiegang, LI Qingzhong, SUN Xuelin. Strain-rate effects of expanding fracture of 45 steel cylinder shells driven by detonation[J]. Explosion and Shock Waves, 2006,26(2):129-133.

[10] 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.
ZHANG Shiwen, JIN Shan, LIU Cangli. Simulation of the dynamic expanding process of thick-walled cylinder with defects[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2010,27(3):622-625.

[11] 金山，张世文，龙建华. 缺陷对圆管膨胀断裂影响的实验研究[J]. 高压物理学报，2011,25(2):188-192.
JIN Shan, ZHANG Shiwen, LONG Jianhua. Experimental study on the influences of defects on expanding fracture of a metal cylinder[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2011,25(2):188-192.

[12] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京：国防工业出版社，2005.

[13] REN G, GUO Z, FAN C, et al. Dynamic shear fracture of an explosively-driven metal cylindrical shell[J]. Inter-

national Journal of Impact Engineering, 2016,95(9):35-39.

[14] 俞鑫炉.爆炸加载下柱壳剪切断裂的机理研究[D].宁波:宁波大学,2014.
YU Xinlu. Research on shear fracture mechanism of cylindrical shells subjected to explosive loading[D]. Ningbo: Ningbo University, 2014.

Fracture behaviors of explosively driven TA2 alloy cylinders under different loadings

YU Xinlu[1,2], DONG Xinlong[1], PAN Shunji[1]

(1. *Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo* 315211, *Zhejiang, China*;
2. *School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: The failure process of an explosively driven TA2 alloy cylinder is related with its material, structure, loading, and so on, with its fracture behavior shown in various ways. In this paper we investigated the mechanism underlying this failure under different explosive loadings using numerical and experimental methods. The results of the finite element analysis showed that, during the driven period, for the ideally homogeneous cylinder, the equivalent plastic strain effect in the inner zone of the cylinder's thick shell, where the secondary plastic zone was formed due to shock wave propagation, was always larger than that on the inner and outer surfaces; under higher blast loading, the cracks originated first in the secondary plastic zone during the driven period and propagated to the inner and outer surfaces in an angle of 45° or 135° to the radial; for lower blast loading, the shear cracks, which originated first in the inner surface, propagated to the outer surface in an angle of 45° or 135° to the radial during the free expanding period; and, although the cracks were all shear cracks, their failure mechanisms differed. The simulated results and experiments agreed pretty well. The phenomenon that cracks originated in the outer surface, as reported earlier concerning some related experiments, might have been affected by the specimens' geometrical and material defects, whose influence on the cylinder's explosion-induced failure needs to be studied further.

Keywords: metal cylinder; explosive load; defect; finite element model

(责任编辑 王易难)