

文章编号: 1001-1455(2002)04-0333-05

外部爆轰加载过程中金属圆管断裂实验研究*

汤铁钢, 胡海波, 李庆忠, 谷 岩, 王德生, 孙学林

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 利用脉冲 X 光照相技术和高速摄影对 HR-2 抗氢钢圆管在外部爆轰加载下的压缩过程进行了动态诊断。X 光照相观察到抗氢钢圆管在压缩过程中管壁内出现了宏观裂纹, 回收破片具有显著的剪切断裂特征, 金相分析观察到了绝热剪切带及微孔洞与微裂纹。对半圆管结构的压缩过程进行了高速摄影, 直接观测到抗氢钢圆管内壁裂纹萌生与发展的动态过程。由两种动态诊断实验结果对比分析推断, 抗氢钢圆管在外部爆轰加载压缩过程中, 裂纹首先在圆管内壁生成。

关键词: 抗氢钢圆管; 脉冲 X 光照相; 高速摄影; 绝热剪切带; 裂纹; 断裂

中图分类号: O346.1 文献标识码: A

1 引 言

爆炸加载下金属圆管的膨胀断裂一直是人们关注与研究的问题。R. W. Gurney^[1]早在 1943 年就提出了用于预测内部爆轰加载下金属圆管破片速度的经验公式。G. I. Taylor^[2]1944 年提出了著名的 Taylor 断裂判据。随后, C. Hoggatt 等^[3]在研究内部爆轰加载下金属圆管膨胀断裂时, 发现了部分剪切断裂机理; D. E. Grady 等^[4]、D. R. Warren^[5]、R. L. Martineau 等^[6]的研究表明: 金属圆管在内部爆轰加载下膨胀时, 存在拉伸断裂和剪切断裂两种模式, 但在高应变率 (10^4s^{-1} 以上) 时, 剪切断裂占主导地位。然而, 多年来对于金属圆管的压缩过程研究, 一直局限于金属圆管的收敛运动规律^[7-8]; V. F. Nesterenko 等^[9]1995 年首先报道了关于金属圆管的压缩断裂机理研究成果, 但采用的是控制回收实验, 没有将动态诊断应用于这一研究。

本文中, 利用脉冲 X 光照相和高速摄影, 观测了抗氢钢圆管在压缩过程中出现的宏观断裂现象, 及裂纹在圆管内壁萌生与发展的动态过程图像; 对回收的抗氢钢圆管破片进行截面金相分析, 观察内部微观组织结构的变化。最后, 对金属圆管在外部爆轰加载压缩过程中的断裂机理进行了分析。

2 实验装置

脉冲 X 光照相及回收实验装置如图 1, 粉状 TNT 炸药厚度均匀地填装在抗氢钢圆管外围, 采用一端雷管先起爆传爆药柱, 再引爆粉状 TNT 炸药, 滑移爆轰波压缩抗氢钢圆管向内运动。在传爆药柱下加一个有机玻璃缓冲块, 以减少爆轰波对抗氢钢圆管顶端的预破坏。抗氢钢圆管长 150.0 mm,

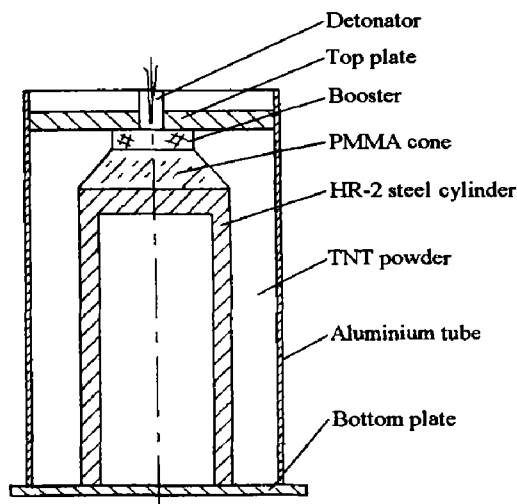


图 1 X 光照相实验装置示意图
Fig. 1 Experimental configuration
for X-flash photography

* 收稿日期: 2001-09-26; 修回日期: 2001-12-15

基金项目: 中国工程物理研究院行业预研基金项目(20010101)

作者简介: 汤铁钢(1974—), 男, 硕士。

外径 50.0mm, 壁厚 3.5、5.0mm。TNT 粉状炸药厚度为 20.0mm, 装药密度为 $1.1 \sim 1.3\text{g}/\text{cm}^3$, 爆速为 $3.6 \sim 4.2\text{km}/\text{s}$ 。

对图 1 装置进行改进, 抗氢钢圆管沿轴线对称剖开, 便于在高速摄影中观察圆管的内壁, 同时在剖开圆管的两侧和顶部焊接防护板, 防止爆轰产物过早进入摄影视场。实验时为了保证圆管内壁光强足够且亮度均匀, 采用两个前照明弹。

3 实验结果

3.1 脉冲 X 光照相结果

由压缩过程中的 X 光动态照片, 可以判定抗氢钢圆管在压缩过程中产生了宏观断裂。对于壁厚为 3.5 mm 的抗氢钢圆管, 外径由 50.0 mm 压缩到 30.0 ~ 31.8 mm 时, 产生的宏观裂纹可以从 X 光底片上识别出来 (见图 2), 此时对应的宏观径向应变 ϵ_r 为 0.36 ~ 0.40, 这里简单近似地定义 $\epsilon_r = (R_0 - R)/R_0$ 。图 2 中标识出了从 X 光底片上可判别的断裂区域, 由于上述因素的影响, 可以推断断裂发生的区域要超出标识区, 也就是说, 抗氢钢圆管在压缩过程中断裂时的宏观径向应变小于 0.36。

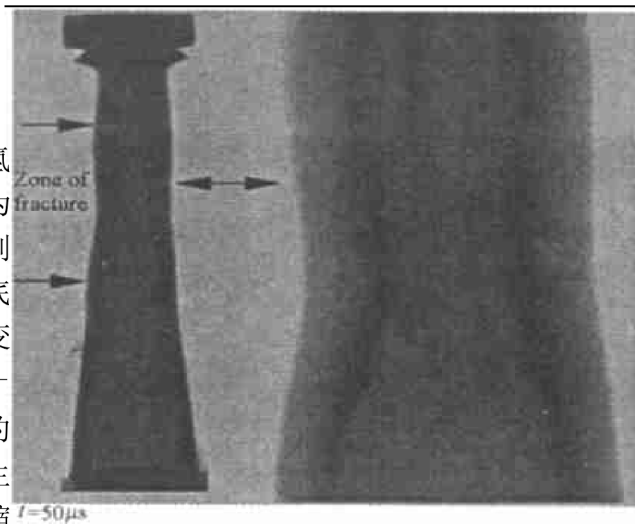


图 2 脉冲 X 光抗氢钢圆管压缩图像

Fig. 2 An X-flash photograph of steel cylinder

3.2 破片回收及金相分析

进行脉冲 X 光动态照相的同时对抗氢钢圆管破片进行了回收, 破片具有以下特征: (1)宏观断口为剪切断裂, 断口面与当地径向成 45° 或 135° 夹角; (2)断口沿轴向由轴向小断口贯穿连通形成, 沿径向由径向小断口贯穿连通形成, 于是断口面由若干马赛克状“断口胞元”组成; (3)轴向断裂呈现一剪切方向占优的单旋现象; (4)单条破片内壁存在数十条小裂口, 对应外壁仅有 1 ~ 2 条裂口。

对回收的抗氢钢圆管破片进行了截面金相细观分析, 在裂纹尖端区域观察到了绝热剪切带, 其细观形态如图 3 所示。图 3(a)是一裂纹尖端区域, 裂纹尖端与绝热剪切带相连接; 裂纹旁侧已形成一条分岔的微裂纹, 其尖端也与绝热剪切带相连接, 说明裂纹是沿绝热剪切带传播的。图 3(b)是图 3(a)中与裂纹尖端相连接的绝热剪切带的局部放大, 可以看到绝热剪切带内及附近存在一些微孔洞。破片截面上的裂纹几乎都从内壁向外壁扩展, 且与径向成 45° 夹角, 与破片宏观断口特征一致, 这说明裂纹的生成与扩展均沿最大剪应力的方向。

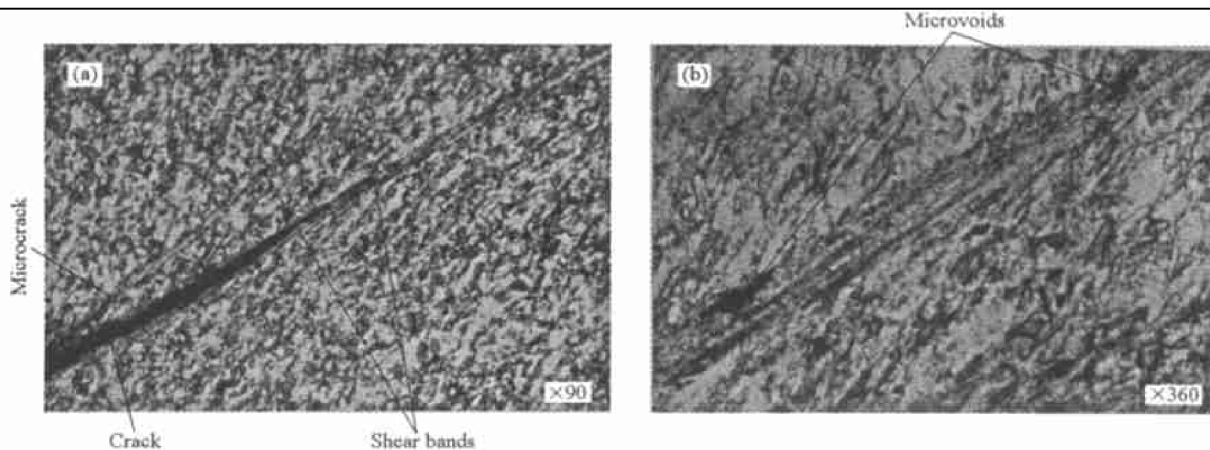


图 3 抗氢钢圆管破片中的微裂纹、绝热剪切带和微孔洞

Fig. 3 Microcracks, adiabatic shear bands and microvoids in the fragments of HR-2 steel cylinder

3.3 高速摄影实验结果

图 4 为壁厚 3.5 mm 的抗氢钢圆管内壁部分时刻的高速摄影照片，箭头为裂纹传播方向及大概到达的位置。从照片上可以清楚地看到裂纹在圆管内壁上的发展情况。裂纹首先在靠近圆管顶端的内壁上出现，然后沿轴线方向向下发展，这与外部爆轰传播方向是一致的。内壁上裂纹的形态不同于金属圆管膨胀断裂时外壁上的张开型裂纹，几乎看不到裂纹的深度，但可以看见由于裂唇错开在内壁表面上形成的皱褶。壁厚 5.0 mm 的抗氢钢圆管内壁上的裂纹发展图像及特征与壁厚 3.5 mm 的基本相同。

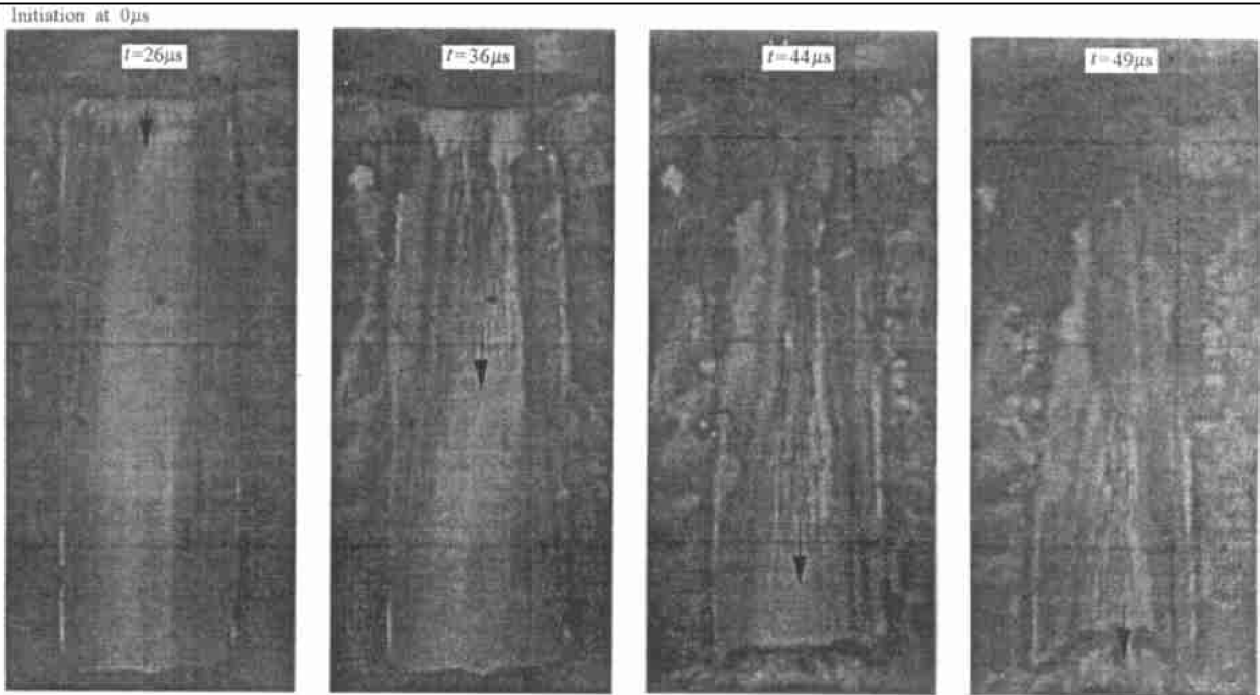


图 4 抗氢钢圆管在压缩过程中内壁上裂纹发展图像的部分高速摄影照片

Fig. 4 High-speed photography results of internal surface of HR-2 steel hemicylinder during the external TNT explosive loading

宏观裂纹沿轴向发展的速度为约 5.7 km/s，近似等于抗氢钢材料的纵波声速 (5.79 km/s)。宏观裂纹沿轴向传播的过程是微观裂纹在轴向不同位置边生成边连通、形成视觉上可见的宏观裂纹传播的过程，而非单一裂纹沿轴向传播的过程，所以这里宏观裂纹发展速度不完全等同于单一裂纹传播速度。

4 分析与讨论

4.1 准静态应力分析

不考虑材料本身的非均匀性，并假设在圆管压缩形成宏观剪切裂纹前，圆管内壁面运动速度近似均匀。对理想均匀材料的圆管结构采用传统的准静态方法进行应力分析，圆管外半径为 b ，内半径为 a ，管外受均匀压力为 $-p$ (见图 5)。取一单位长度管壁内微元，对其建立平衡方程，并且当 $d\theta \rightarrow 0$ 时， $\sin d\theta/2 \approx d\theta/2$ ，略去二阶小量可得

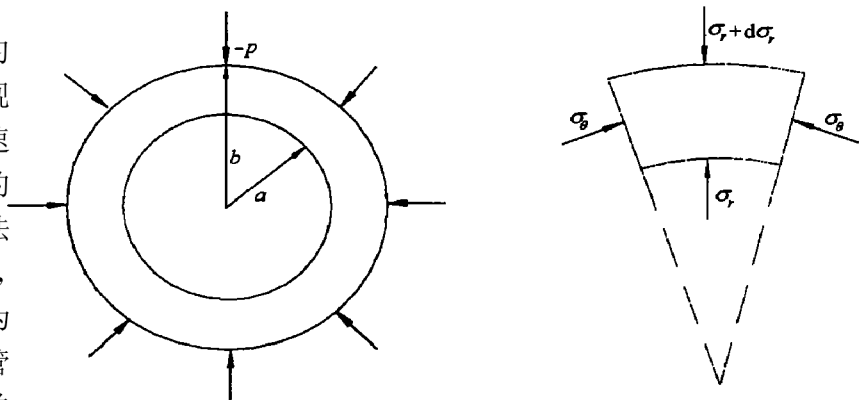


图 5 金属圆管应力分析示意图

Fig. 5 Stress analysis of the metal cylinder

$$\sigma_{\theta} - \sigma_r = r \frac{d\sigma_r}{dr} \quad (1)$$

假定管子在压缩过程中受纵向冲击波影响很小, 轴向应变 ε_z 在所考虑圆管的长度范围内为常数 0, 则由 $\varepsilon_z = (\sigma_z - \nu\sigma_r - \nu\sigma_{\theta})/E = 0$, 有

$$\sigma_r + \sigma_{\theta} = 2C_1 \quad (2)$$

边界条件: 当 $r=a$ 时, $\sigma_r=0$; 当 $r=b$ 时, $\sigma_r=-p$ 。

由(1)、(2)式及边界条件可得

$$\sigma_r = \frac{-b^2 p}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \quad (3)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{-b^2 p}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) \quad (4)$$

$$\text{对厚壁圆管} \quad \sigma_z = \nu(\sigma_r + \sigma_{\theta}) = \frac{-2\nu b^2 p}{b^2 - a^2} \quad (5)$$

由(3)~(5)式可以看出, 三个主应力均处于受压状态, σ_z 在整个管壁内已被假定成为常数, 仅依赖于外围压力 $-p$; 而 σ_r 、 σ_{θ} 则随着 r 的变化而变化。在圆管内壁 ($r=a$), σ_r 趋于最大值 0, 而 σ_{θ} 趋于最小值 $\frac{-2b^2 p}{b^2 - a^2}$; 在靠近圆管外表 ($r=b$), σ_r 、 σ_{θ} 分别趋于 $\frac{-b^2 p}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right)$ 、 $\frac{-b^2 p}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{a^2}{b^2}\right)$ 。不考虑裂纹沿纵向发展, 仅在 $r-\theta$ 平面内考虑裂纹的发展情况, 则 $r-\theta$ 平面上最大剪应力 $\tau_{\max} = (\sigma_r - \sigma_{\theta})/2$ 。由此看来, 最大剪应力在圆管的内壁附近要大于圆管外表附近的最大剪应力, 可以推断在圆管的内壁比在圆管的外表更利于剪切裂纹的生成。

4.2 讨论

由准静态应力分析可知, 抗氢钢圆管受均匀外压时, 最大剪应力在内壁处最大, 因而裂纹可能最先在圆管内壁生成。高速摄影在抗氢钢圆管内壁直接观察到裂纹出现的时刻为 $26\mu\text{s}$, 裂纹沿纵向发展出底端的时刻为 $49\mu\text{s}$ (见图4)。对应时刻的 X 光底片 ($50\mu\text{s}$ 时刻) 只能判定圆管部分纵向区域出现断裂现象, 且应为贯穿断裂 (定义宏观裂纹传播出圆管壁的内、外表面为贯穿断裂)。若裂纹首先在外壁附近或壁内中心区域生成, 当在圆管内壁上观测到裂纹出现时, 圆管对应位置应已发生贯穿断裂, 从 X 光底片上应该可以判读出来。实验结果显示, 从 X 光底片判读出现断裂的时刻比对应位置在内壁出现裂纹的时刻晚很多, 由此推断抗氢钢圆管在外部爆轰加载压缩过程中裂纹首先在内壁生成, 与准静态应力分析一致, 应该是合理的。此外, 在所讨论的压力范围内可近似将金属看作体积不可压材料, 则金属圆管在压缩收敛过程中体积不变, 即圆管的横截面积保持为常数 (忽略纵向变形), 那么随着圆管的压缩收敛运动, 内径的变化要快于外径的变化, 即圆管内壁附近具有较高的应变率和较大的应变, 比外壁更加有利于动态断裂的发生。

金相分析观测到几乎所有裂纹都从内壁向外壁扩展, 与上述分析结果相吻合。同时裂纹尖端与绝热剪切带相连接, 绝热剪切带内及附近存在微孔洞。在外部爆轰加载压缩下, 抗氢钢圆管发生收敛运动, 在管壁内形成环向压应力和径向压应力。在径向压应力的作用下, 管壁内微元向内运动, 管内空腔变小; 在环向压应力作用下, 管壁内微元沿圆周方向挤压。随着时间的增加, 管内空腔逐渐变小, 管壁内剪应力越来越大, 温度也越来越高。由于材料本身存在晶界、位错、夹杂等微缺陷, 而使材料在微观上成为非均匀的, 材料在经历高应变率的变形过程中生成大量的热, 尤其是在材料中的微缺陷附近生成的热会更多, 生成的大量热来不及扩散而使材料局部软化, 当软化作用超过材料变形过程中的应变硬化作用时, 就加速了剪切变形的局域化过程, 形成绝热剪切带。当最大剪应力超过材料的局部剪切强度时, 剪切裂纹首先在圆管内壁附近沿绝热剪切带生成, 随后, 剪切裂纹一边向圆管外壁扩展, 一边沿爆轰传播方向纵向发展、传播, 最后形成贯穿剪切断裂。

5 结论

通过系列实验研究及实验结果分析, 初步得到以下认识:

(1) 实验研究表明, 抗氢钢圆管在外部爆轰加载过程中, 裂纹首先在圆管内壁生成, 随后一边向外壁

扩展, 一边沿纵向发展。

(2)回收破片具有显著的剪切断裂特征, 断口面由若干马赛克状“断口胞元”组成; 轴向断裂呈现一剪切方向占优的单旋现象; 单条破片内壁有数十条小裂口, 对应外壁仅有1~2条裂口。

(3)金相分析观察到微裂纹与绝热剪切带从内壁向外发展, 裂纹走向与当地径向成 45° 或 135° 夹角, 位于最大剪应力(剪应变)迹线上, 与文献[9]中的研究结果一致。

参考文献:

- [1] Gurney R W. The Initial Velocity of Fragments from Bombs, Shells and Grenades[R]. BRL Report 405, 1943.
- [2] Taylor G I. Science Papers of Sir G I Taylor[M]. London: Cambridge University Press, 1963: 387.
- [3] Hoggatt C, Recht R. Fracture Behavior of Tubular Bombs[J]. J Appl Phys, 1968, 39: 1856-1862.
- [4] Grady D E, Hightower M M. Fracture of a 4140 Steel Cylinder under High Explosive Loading[R]. Sandia National Laboratories Report, Sand-90-0882C, 1990.
- [5] Warren D R. Strain Rate Dependent Deformation and Fracture of Titanium Alloy Cylinders under Explosive Loading Conditions[R]. AD-A268811, 1993.
- [6] Martineau R L, Anderson C A. Expansion of Cylinder Shells Subjected to Internal Explosive Detonations[J]. Experimental Mechanics, 2000, 40(2): 219-225.
- [7] 张凯. 圆筒在外布炸药滑移爆轰载荷作用下飞行姿态和实验研究[A]. 爆轰驱动和爆轰不定常增长会议论文集[C]. 昆明, 1985.
ZHANG Kai. The Experimental Study on the Flying Process of the Metal Cylinder with Outer Explosive Load[A]. The Proceeding of Detonation Driving and Instable Growing-up of Explosives[C]. Kunming, China, 1985.
- [8] 封加波. 爆炸载荷下金属柱壳的变形和破坏规律研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院研究生部, 1988.
FENG Jia-bo. Deformation and Fracture of the Metal Cylinder with Internal Explosive Load[D]. Mianyang: Postgraduate Department of CAEP, 1988.
- [9] Nesterenko V F, Meyers M A, Wright T W. Collective Behavior of Shear Bands[A]. Murr L E, et al. Metallurgical and Materials Applications of Shock-wave and High-strain-rate Phenomena[C]. The Netherlands, 1995: 397-404.

Studies on the Fracture of Steel Cylinder under External Explosive Loading

TANG Tie-gang, HU Hai-bo, LI Qing-zhong,
GU Yan, WANG De-sheng, SUN Xue-ling

(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: The fracture phenomena of HR-2 steel cylinder under external explosive loading are studied by the dynamical technology of X-flash photography and high-speed photography. The results of X-flash photography show that the fracture has occurred in the steel cylinder wall during the external explosive loading. There are clear shear characteristics on the collected fragments. The metallography examinations show that there are adiabatic shear bands on the tip of the microcracks and microvoids within the adiabatic shear bands. The germination and development processes of cracks have been directly observed by the high-speed photography experiments. The comparison between the two kinds of experimental results shows that the cracks germinate firstly in the internal surface of steel cylinder, which agree with the quasi-static stress analysis.

Key words: HR-2 steel cylinder; X-flash photography; high-speed photography; adiabatic shear bands; cracks; fracture