

文章编号: 1001-1455(2003)06-0523-06

# 液体炸药滑移内爆加载下钢管的 变形与层裂破坏研究\*

李雪梅<sup>1,2</sup>, 金孝刚<sup>2</sup>, 李大红<sup>2</sup>, 胡时胜<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学力学与机械工程系, 安徽 合肥 230026;

2. 中国工程物理研究院流体物研究所冲击波物理与爆轰波物理实验室, 四川 绵阳 621900)

摘要: 用液体炸药滑移内爆加载方式, 研究了不同炸药厚度和外壳条件下 20 钢圆管的内聚变形和破坏特征。实验中, 钢管发生了较大径向应变, 应变值大致随炸药厚度的增加而线性增大。在炸药厚度不低于 3mm 时钢管变形均匀, 轴对称较好; 药厚小于 3mm 时其变形不再是基本轴对称收缩, 管子表面出现扭转褶皱。各种装药厚度下, 均未观察到预期的层裂破坏。对未层裂的原因进行了初步分析。

关键词: 固体力学; 对称和扭转变形; 滑移内爆; 层裂; 钢管; 硝基甲烷

中图分类号: O347.4 国标学科代码: 130·1545 文献标志码: A

## 1 引 言

内爆即向内汇聚爆轰, 在爆炸合成、一些特殊结构的爆轰驱动等领域中都有重要应用。研究该加载方式下结构部件的内聚变形和破坏规律对结构的可靠设计与理论分析具有重要的指导意义。目前用内爆加载方法对金属圆管的变形和动态破坏所作的研究还相对较少。M. A. Meyers 等<sup>[1]</sup>研究了圆管在内爆加载下的绝热剪切破坏, 但未对层裂作出研究; 汤铁钢等<sup>[2]</sup>对内爆作用下金属柱壳的剪切断裂作了详细分析, 由于药层较厚, 金属管完全破碎, 亦未观察到明显的层裂现象。80~90 年代初, 在俄罗斯有对内爆加载下的层裂开展的系列研究, 主要有 A. Г. Иванов 等<sup>[3~4]</sup>的研究, 他们通过完整回收和一维数值计算研究了塑性炸药内爆驱动下钢管的稳定性和层裂破坏特性, 认为当炸药厚度小于某临界值后, 钢管将发生层裂, 且随着炸药层减薄, 轴对称状的层裂片将减薄, 并失稳破碎; 此后, 董玉斌等<sup>[5]</sup>用考虑损伤演化的层裂程序对 A. Г. Иванов 等的实验进行了一维数值模拟, 计算了钢管在薄层炸药内爆作用下的层裂破坏, 但未作实验研究。

本文中采用带外壳的薄层均相液体炸药, 通过滑移内爆加载、完整软回收和金相分析的实验方法研究在不同炸药厚度和不同外壳条件下 20 钢管的变形和破坏, 以期对金属圆管在该类加载方式下的变形和层裂破坏规律获得基础性认识, 对内爆下钢管发生层裂的条件作出初步探讨。

## 2 实验装置

实验装置由 20 钢管、薄炸药层、外壳、塞子、引爆及定位系统、支撑部件等组成, 详见图 1。钢管尺寸为  $\varnothing(60-50)\text{mm} \times 200\text{mm}$ 。炸药选用硝基甲烷 ( $\text{CH}_3\text{NO}_2$ ), 并在其中加入约 7% 的三氯甲烷 ( $\text{CCl}_3$ ) 以改善其爆轰性能。在选择外壳时, 曾采用

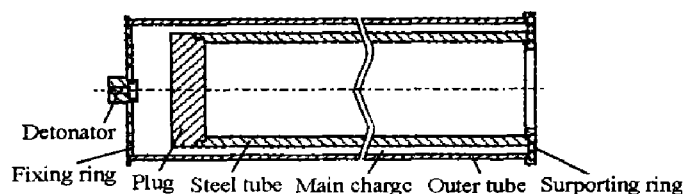


图 1 滑移内爆实验装置图

Fig. 1 Experimental device for sliding detonation with liquid explosive

\* 收稿日期: 2003-01-20; 修回日期: 2003-03-12  
基金项目: 中物院重大基金项目(2000Z0307)  
作者简介: 李雪梅(1975—), 女, 硕士研究生。

PVC 塑料, 结果硝基甲烷不能稳定爆轰, 故实验中均采用钢质外壳。炸药厚度有 5、4、3、2.5 和 2mm 几种尺寸, 其密度为  $1.13\text{g}/\text{cm}^3$ , 爆速为  $6.29\text{km}/\text{s}$ 。

由于炸药层较薄, 其相对厚度(炸药与 20 钢管的厚度比)不超过 1.0, 便于形成钢管层裂的条件, 同时可以防止内聚变形时发生闭合、反弹、破碎等实验现象, 保证完整回收。

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 变形形貌

图 2~3 分别为 20 钢管在带钢外壳的硝基甲烷炸药内爆加载下典型的整体变形外貌及横截面图。当炸药厚度不小于 3mm 时, 除两端因受边界影响而略有扰动外, 钢管整体变形较均匀, 呈规则的轴对称形状(图 2(a)、图 3(a)、图 3(b)); 而当炸药厚度为 2.5、2mm 时, 回收样品的外观失去轴对称收缩的特征, 外表面可看出明显的扭转褶皱(图 2(b)、图 3(c)), 这可能是由于炸药厚度已低于其保持稳定爆轰的

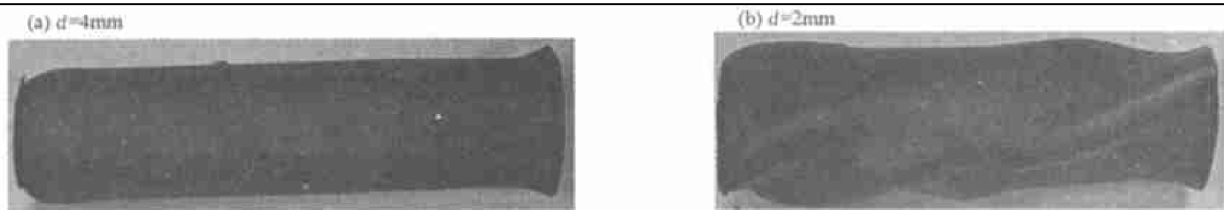


图 2 不同厚度的液体炸药(带钢外壳)内爆加载下钢管的整体变形外貌

Fig. 2 Whole deformations after implosion by liquid explosive with different thickness and with outer steel shell

临界尺寸, 从而出现不稳定爆轰-螺旋(或脉动)爆轰并引起钢管变形失稳。由此也可看出: 硝基甲烷稳定爆轰的临界尺寸在 2.5~3mm 之间, 当药厚小于此值时, 会出现爆轰不稳定现象。这与文献[6]所给硝基甲烷临界尺寸为 2.8mm 的结果是一致的。

此外, 由图 3 还可看出: 尽管采用均质的液体炸药, 钢管变形后其内表面已失去与初始形状几何相似的轴对称收缩特征, 而出现明显扰动; 炸药越厚, 则内表面的扰动越大。这说明在柱对称内爆驱动下, 钢管的内表面存在固体界面不稳定现象, 而不是理想的稳定收缩。

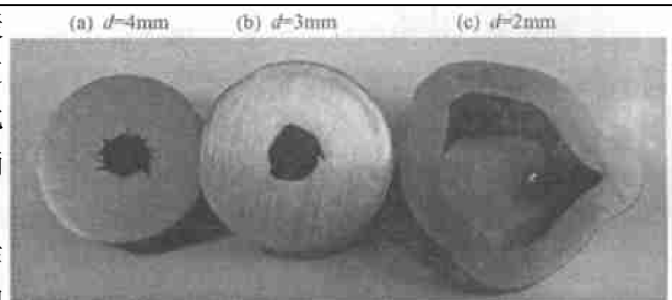


图 3 不同厚度的液体炸药(带钢外壳)内爆加载下钢管的典型变形外貌

Fig. 3 Typical figures of deformation section after implosion by liquid explosive with outer steel shell

#### 3.2 金属管形变随炸药厚度的变化规律

内爆加载下, 钢管内外表面均向内收缩, 其平均径向应变大于外表面的径向应变。表 1 给出了炸药厚度和不同外壳条件下的完整回收结果。

表 1 液体炸药内爆加载下钢管的完整回收实验结果

Table 1 Complete recovery of the steel tube after implosion

$d_s/\text{mm}$	$d/\text{mm}$	$\phi/\text{mm}$	$h/\text{mm}$	$\epsilon_o$	$\epsilon_{av}$	备 注
2	5.0	34.1~7.3	13.4	0.432	0.624	无层裂
	4.0	34.6~10.2	12.2	0.423	0.593	无层裂
	3.0	37.8~18.2	9.8	0.370	0.491	无层裂
	2.5	39.6~22.7	8.5	0.340	0.434	无层裂, 出现螺旋变形
	2.0	41.3~26.1	7.6	0.312	0.387	无层裂, 出现螺旋变形
1	4.0	38.6~19.2	9.7	0.357	0.475	无层裂
	3.0	42.8~26.6	8.1	0.287	0.369	无层裂
	2.5	45.0~30.2	7.4	0.250	0.316	无层裂, 出现螺旋变形

注:  $d_s$  为钢外壳厚度,  $d$  为炸药厚度,  $\phi$ 、 $h$  为回收铜管的直径、壁厚,  $\epsilon_o$  为外表面径向应变,  $\epsilon_{av}$  为平均径向应变。

图 4 给出了钢管形变随炸药厚度的变化关系。可以看出: 随着装药厚度  $d$  的增加, 钢管的形变增大, 形变随药厚增加而大致呈线性递增关系, 当药层进一步增厚, 钢管形变随炸药厚度的增加而增大的趋势减缓。2mm 外壳对应的曲线在炸药厚度  $d$  为 4mm 时出现拐点,  $d \leq 4\text{mm}$  时的斜率较  $d > 4\text{mm}$  时大。这是由于钢管形变的大小与炸药的初始能量及能量的分配密切相关。薄药层下, 增加药层厚度则炸药的初始能量显著增加, 加之钢管所获得的有效能量较大, 从而形变随药层厚度增长较显著; 随着药层进一步增厚, 炸药厚度对钢管变形的影响减弱, 钢管的形变随药厚增长的趋势变缓。

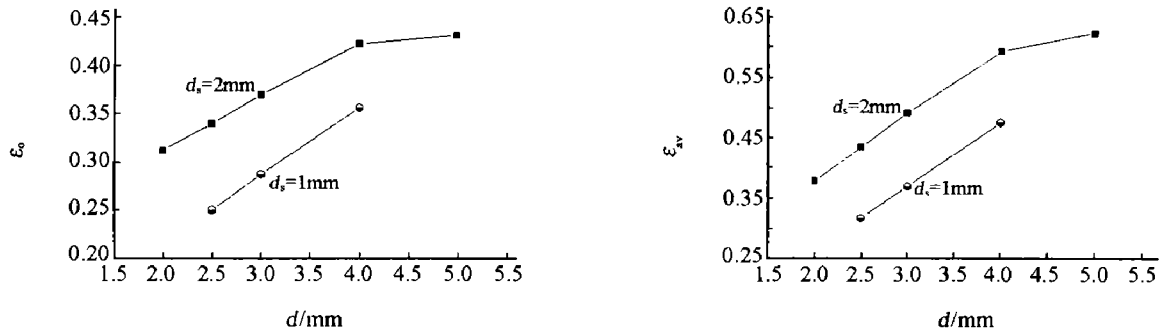


图 4 金属管的形变随炸药厚度的变化关系

Fig. 4 Relation between steel tube's radial strain and explosive thickness

### 3.3 平均显微硬度随炸药厚度的变化

20 钢样品的初始硬度较低, 仅为 141 (韦氏硬度)。内爆加载后其平均显微硬度大为提高, 在 3 ~ 5mm 的炸药厚度下韦氏硬度均超过了 200, 比初始材料的硬度增大将近 1 倍。图 5 给出了钢管平均显微硬度随炸药厚度的变化关系。可以看出: 平均显微硬度随炸药厚度的增加而增大, 在炸药较薄时 ( $d \leq 4\text{mm}$ ) 时, 钢管硬度增加较显著,  $d > 4\text{mm}$  后硬度随炸药厚度的增加趋于平缓。这种变化规律与应变随装药厚度的变化基本一致。

### 3.4 外壳的作用

外壳的材料和厚度对硝基甲烷炸药的性能及钢管试件的形变有很大影响。实验中, 使用惰性较小的塑料外壳时, 即使 5mm 厚的硝基甲烷也不能稳定爆轰; 使用钢外壳时, 更薄的硝基甲烷 (如 3mm) 也可稳定爆轰。采用钢外壳时, 尽管硝基甲烷的载荷强度较低, 但钢管收缩却较大, 在 2 ~ 5mm 厚的几种炸药加载下其外表面径向形变范围在 25% ~ 43.2% 之间, 均比文献 [4] 中给出的 10mm 厚固体裸装炸药加载下钢管的形变 (20.4%, 无层裂) 大。相同装药厚度下, 2mm 的钢外壳导致钢管的外表面径向形变比 1mm 钢外壳时略大 7% ~ 9%。

外壳的作用在于延缓爆轰产物的侧向飞散, 从而增加爆轰产物对金属管的加速效应, 由于厚壁外壳的作用时间长于薄壳, 在其余加载条件相同时, 增加外壳厚度则内部钢管的形变相应增加。而在相同厚度裸装固体装药加载下, 尽管载荷强度较大, 但由于爆轰产物无阻挡地向外膨胀, 爆轰能量很快被稀疏耗散, 导致钢管试件的形变较小。

由图 2 中钢管的变形看, 在炸药厚度比较小时 ( $d \leq 4\text{mm}$ ), 外壳厚度分别为 2mm 和 1mm 的两条  $d-\epsilon$  曲线大致平行, 其水平距离约为 1.5mm。由此可以认为: 就液体炸药而言, 钢外壳的作用是增加炸药的等效厚度, 外壳增加 1mm, 则基本相当于炸药厚度增加 1.5mm。可见惰性较大的钢外壳对增加液体炸药等效厚度的作用是比较显著的。

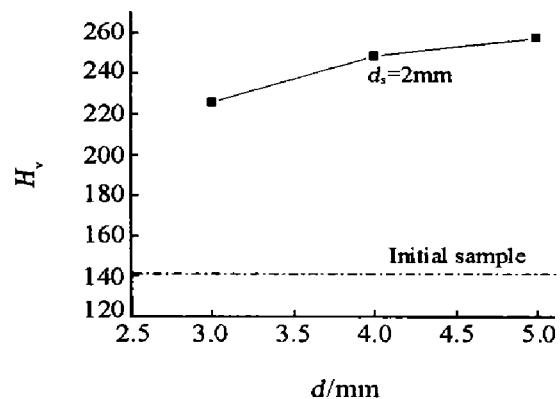


图 5 显微硬度随装药厚度的变化

Fig. 5 Relation between micro-hardness and explosive thickness

### 3.5 损伤与破坏分析

将液体炸药由厚减薄进行的一系列实验中均未观察到钢管中出现预期的层裂现象。图 6 为钢管内表面附近样品的典型金相分析图。图中未观察到预期的层裂破坏;但钢管内表面附近有明显的由内向外表面发展的剪切裂纹。当药层较厚时,剪切裂纹分布范围较大,变形较显著,随着药层减薄,裂纹数量减小。剪切裂纹的出现与汤铁钢等<sup>[2]</sup>的内爆实验是一致的,其发生机理和钢管内外表面所受的应力存在较大差异有关,由于已有较多人对绝热剪切断裂作过研究,故此处只列出该现象,不作具体分析。

主要对钢管不发生层裂的原因作初步分析。一般认为:层裂是由于入射压缩波到达样品自由面后,在入射压缩波、反射稀疏波及追赶稀疏波相互作用下导致样品受较大的拉伸应力而产生的一种破坏形式。由于反射稀疏波与追赶稀疏波的作用区域的两侧均处于拉伸状态,故该处易于形成层裂。入射脉冲的形状、宽度及强度均是影响层裂的主要因素。裸装固体炸药时,由于入射波压力、形状均有利于层裂形成,影响层裂的主要因素为炸药与钢管的相对厚度。当两者的相对厚度大于一定值时,钢管内表面的反射稀疏波与来自后方的产物稀疏波相交于钢管外,从而不易发生层裂;随着相对厚度的减小,两稀疏波的相互作用区域进入钢管内部,从而易导致层裂,炸药与钢管的相对厚度越小,则相互作用区域越靠近内表面(自由面),层裂片越薄。

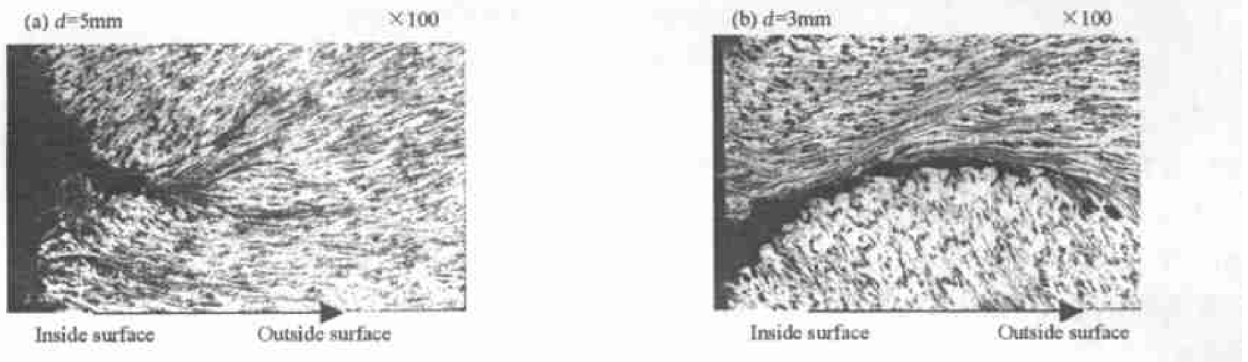


图 6 内表面附近由内向外发展的剪切裂纹

Fig.6 Shear cracks from inside surface to outside surface

由于惰性外壳的存在可认为是增加了炸药厚度,若将此时的炸药厚度换为等效炸药厚度,则对带惰性外壳炸药内爆加载下钢管是否层裂的判断应可采用上述分析。

下面对带钢壳的液体炸药滑移加载下钢管的层裂作初步分析。

#### 3.5.1 爆轰产物与钢管界面压力及钢管中入射角的估算

作为近似,可将柱形滑移内爆简化为平面滑移爆轰,以估算爆轰产物与钢界面的压力等参数。由于爆轰产物的粒子速度方向平行于金属管的对称轴,使产物的动能部分对驱动管子变形基本没有作用,起作用的主要是爆轰产物的势能。设爆轰波阵面与钢管表面垂直(距起爆端较远的部分可作此近似),在以压力和离子速度为参量的  $p-u_p$  图中,应将纵坐标轴平移至  $u = u_{CJ}$  处,以此作为钢的 Hugoniot 曲线的参考纵坐标轴,此后可以采用常规正碰时的镜向反演方法进行界面压力估算。图 7 给出了平面滑移爆轰下界面压力估算的示意图。用此方法对硝基甲烷-钢界面的压力进行估算,可得界面压力  $p_c \approx 12.0\text{GPa}$ 。计算时钢参数分别为:  $\rho_0 = 7.85\text{g/cm}^3$ ,

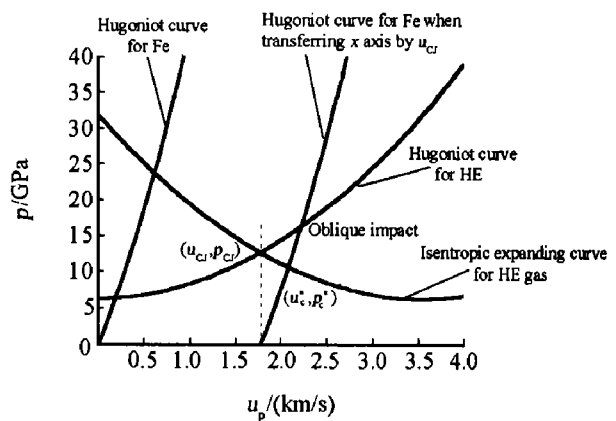


图 7 滑移爆轰时爆轰产物与钢界面间的压力估算

Fig.7 Estimate of interface pressure between steel tube and explosive gas

$c_0=3.57\text{km/s}$ ,  $\lambda=1.92$ ; 硝基甲烷炸药参数分别为:  $\rho_0=1.14\text{g/cm}^3$ ,  $D_{\text{CJ}}=6.29\text{km/s}$ ,  $\gamma=2.17$ ,  $p_{\text{CJ}}\approx 14.1\text{GPa}$ 。

此外,通过相关估算还可得出钢管中斜入射波的入射角  $\alpha\approx 43^\circ$ 。

### 3.5.2 钢管内入射波、反射波叠加后的应力计算以及层裂相关分析

为简化分析,设钢管中的入射波为一维平面弹性三角压缩波,设其峰值为  $\sigma_0$  ( $\sigma_0=-p_c$ ),反射纵波强度应为入射波的  $R$  倍,其中  $R$  为反射系数,它可由入射角  $\alpha$ 、横波反射角  $\beta$  及材料泊松比  $\nu$  计算<sup>[7]</sup>

$$R = \frac{\tan\beta\tan^2(2\beta) - \tan\alpha}{\tan\beta\tan^2(2\beta) + \tan\alpha} \quad (1)$$

$$\sin\beta = \sin\alpha \left[ \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

取钢的泊松比  $\nu=0.29$ ,当  $\alpha=45^\circ$  时,反射系数为  $-0.41$ ,负值表示反射反向,为拉伸波。

在  $t$  时刻,入射波的波头经过自由面反射后到达距自由面为  $x$  的位置,其幅值变为  $R\sigma_0$  (为拉应力),此时该位置同时有强度为  $\sigma_1$  的入射波 ( $0<\sigma_1<\sigma_0$ ),  $\sigma_1$  与  $R\sigma_0$  两者的矢量叠加便是该处的合应力。利用一维应变和摩尔圆理论<sup>[7]</sup> 可求得此处的最大主应力  $\sigma_{\text{max}}$  (约定拉伸为正,下同)

$$\sigma_{\text{max}} = [1/2(1-\nu)] \{ R\sigma_0 - \sigma_1 + (1-2\nu)[(R\sigma_0)^2 + \sigma_1^2 - 2R\sigma_0\sigma_1\cos 2\alpha]^{1/2} \} \quad (3)$$

$\sigma_1$  与  $x$  具有如下关系 ( $\lambda$  为入射脉冲长度)

$$\frac{x}{\lambda} = \frac{1}{2\cos\alpha} \left( 1 - \frac{\sigma_1}{\sigma_0} \right) \quad (4)$$

根据前面的估算结果,采用硝基甲烷液体炸药时,在离起爆端较远的钢管中间段,入射压力峰值  $p_c$  为约  $12.0\text{GPa}$ ,入射角  $\alpha$  为约  $43^\circ$ 。取压力估算值的  $80\%$  作为入射到钢管中的峰值压力,并设  $20$  钢的层裂强度  $\sigma_c$  为  $1.3\text{GPa}$ ,则  $\sigma_0\approx 7\sigma_c$ 。由 (3) 式可作出  $\sigma_{\text{max}}-\sigma_1$  关系曲线(图 8):在  $0\sim 3.5\sigma_c$  的入射应力区(对应的  $x$  区间为  $0.71\lambda\sim 0.35\lambda$ ),入射波与反射波叠加后的最大主应力  $\sigma_{\text{max}}$  可达到钢的层裂强度,其余区间则不能满足强度要求。入射强度越大,入射角越小,则满足强度要求的区间越宽。由此可见,脉冲强度、入射角、入射脉冲宽以及试件厚度对层裂的影响是相互关联的。

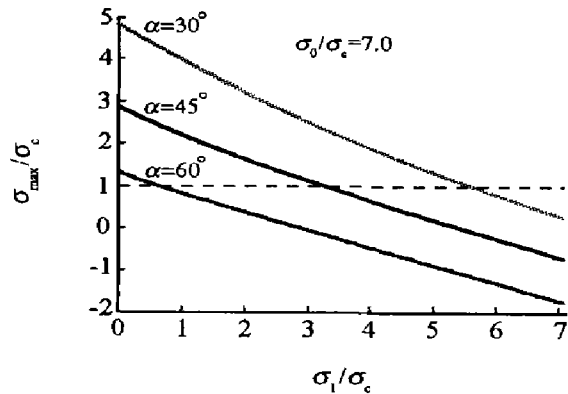


图 8 最大主应力与入射应力的关系

Fig. 8 Relation between maximum stress and incident stress

### 3.5.3 对硝基甲烷内爆驱动下 20 钢管不发生层裂的初步结论

相对于固体炸药,硝基甲烷液体炸药的载荷强度略低,但已超过钢管层裂强度数倍。钢管未出现预期层裂的原因可能在于惰性外壳。外壳对薄层液体炸药的“性能”改善作用相当明显,它使炸药的等效厚度大大提高;虽然炸药较薄,其等效炸药厚度依然较大,可能已超过使钢管发生层裂的临界炸药厚度,入射脉冲幅值、入射角及相对宽度的联合作用造成反射后的拉应力区域不在钢管内,钢管不发生层裂。

## 4 结束语

液体炸药厚度对钢管变形外貌有很大影响。当硝基甲烷厚度不小于  $3\text{mm}$  时,整体变形外观呈较对称的柱状,当厚度小于  $3\text{mm}$  时,钢管外观失去轴对称收缩的特征,其外表面可看出明显的扭转褶皱。在所采用的各种炸药厚度下,钢管内表面均出现明显的扰动,说明在轴对称内爆驱动时,钢管的内表面存在界面不稳定现象,而不是理想的稳定收缩。

对实验中钢管未出现层裂的原因尚有待于更深入的分析,目前正在用固体炸药对钢管进行滑移内

爆加载实验,以进一步研究钢管的层裂破坏规律。实验中,随着药层减薄,已观察到明显的层裂破坏,这将在后续的文章中作出分析。

### 参考文献:

- [1] Meyers M A, Nesterenko V F. High-strain, high-strain-rate deformation of tantalum; the thick-walled cylinder method [A]. Metallurgical and materials application of shock-wave and high-strain-rate phenomena [C]. Elsevier Science B V, 1995: 487—494.
- [2] 汤铁钢, 胡海波, 王德生, 等. 内爆压缩加载下抗氢钢圆管剪切断裂研究 [J]. 高压物理学报, 2002, 16(1): 75—79.  
TANG Tie-gang, HU Hai-bo, WANG De-sheng, et al. Shear fracture of HR-2 steel tube under shock loading [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2002, 16(1): 75—79.
- [3] Иванов А Г. Особенности осесимметрично сходящегося откольных слоев в стальных цилиндрических оболочках [J]. ПМТФ, 1984, 3: 125—127.
- [4] Иванов А Г, Ордунцов В А, Тюнькин Е С. Поведение оболочек под действием импульсной нагрузки на пушки малые возмущения [J]. ФТВ, 1992, 6: 112—115.
- [5] 董玉斌, 苏林祥, 陈大年, 等. 滑移爆轰作用下内爆柱形钢壳层裂的数值模拟研究 [J]. 高压物理学报, 1989, 3(1): 1—10.  
DONG Yu-bin, SU Lin-xiang, CHEN Da-nian, et al. Numerical simulation on the spallation of a steel cylindrical shell imploded under slipping detonation [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1989, 3(1): 1—10.
- [6] 孙承纬, 卫玉章, 周之奎. 应用爆轰物理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 222—224.
- [7] Rinehart J S. Stress transients in solids [M]. New Mexico: Hyper Dynamics, 1975: 214—216.

## Deformation and spallation of cylindrical steel tube loaded by sliding implosion of liquid explosive

LI Xue-mei<sup>1,2\*</sup>, JIN Xiao-gang<sup>2</sup>, LI Da-hong<sup>2</sup>, HU Shi-sheng<sup>1</sup>

(1. Department of Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

2. Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

**Abstract:** By using methods of sliding implosion, the converging deformation and fracture characteristics of the cylindrical steel tube were researched, which was loaded by liquid explosive nitromethane ( $\text{CH}_3\text{NO}_2$ ) with different thickness and under different outer-shell conditions. The results show that the large deformation of the steel tube increases linearly with the explosive's thickness approximately. Even and symmetrical deformations are observed when explosive thickness are 5mm, 4mm and 3mm. The deformations are torsional instead of symmetrical when explosive thickness is less than 3mm. Expected spallation hasn't been observed in all these experiments. Analysis has been done for the reason of no spallation.

**Key words:** solid mechanics; symmetrical and torsional deformation; sliding implosion; spallation; cylindrical steel tube;  $\text{CH}_3\text{NO}_2$

\* Corresponding author: LI Xue-mei