

文章编号: 1001-1455(2008)02-0105-05

# 滑移爆轰驱动钢管的层裂\*

熊俊, 周海兵, 刘文韬, 张树道, 孙锦山

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

**摘要:** 将 VG 损伤模型推广到二维情况, 考虑了最大主应力方向对损伤演化的影响, 并使用显式断裂算法对 20 钢管在 GI-920 炸药滑移爆轰驱动下层裂的问题进行二维数值模拟。分析了一维内爆和滑移爆轰两种加载方式下作用于钢管外表面的压力及钢管内部受力状态的区别, 考察了滑移爆轰加载方式下钢管外表面的受力随炸药厚度变化的规律, 进而研究了钢管内损伤的分布和演化, 以及裂纹的产生和扩展现象。计算得到的层裂片初始厚度随炸药厚度的变化规律与实验结果符合较好。

**关键词:** 爆炸力学; 层裂; 数值模拟; 滑移爆轰; 损伤

**中图分类号:** O381; O346

**国标学科代码:** 130 · 35

**文献标志码:** A

## 1 引言

动态断裂在理论和工程上都是重要而复杂的研究课题, 其机理和特征因材料性质和加载方式的不同而差异很大。滑移爆轰驱动金属圆管的层裂是典型的动态断裂现象, 实验已观测到 20 钢管在 GI-920 (固态 920) 炸药滑移爆轰驱动下的层裂图像, 并给出了层裂厚度与炸药厚度的定量关系<sup>[1-2]</sup>; 文献[3-4]在一维内爆假定下对该爆轰驱动圆管的层裂问题进行了数值模拟。

从爆轰加载条件来看, 一维内爆时存在内聚效应, 而滑移爆轰时存在侧向稀疏波的影响, 因此同样厚度的炸药在一维内爆时作用于圆管外表面的峰值压力通常比滑移爆轰高一些。同时, 一维内爆情况下压力比滑移爆轰时卸载速度快。这些因素都会影响炸药驱动金属圆管的能力。

从金属圆管的受力状态来看, 在一维内爆下金属柱壳内各点在  $r-z$  平面上只有正应力  $\sigma_r, \sigma_z$ ; 而在滑移爆轰下, 还存在剪切应力分量  $\sigma_{rz}$ 。同时, 在一维内爆加载条件下仅需关注裂纹的产生, 而在滑移爆轰加载下, 初始裂纹产生后沿圆柱壳轴向的扩展也是动态断裂过程的重要特征。

因此, 有必要对滑移爆轰驱动金属圆管的层裂问题进行二维数值模拟, 避免一维假定带来的误差。本文中将在对二维动力学问题, 特别是断裂问题数值模拟算法研究的基础上, 对 20 钢管在 GI-920 炸药滑移爆轰驱动下层裂的问题进行数值模拟, 并与典型实验<sup>[2]</sup>、一维数值模拟结果<sup>[4]</sup>进行比较。

## 2 数值方法

主体计算采用总能量守恒的二维拉氏算法, 具体的计算格式这里不作介绍, 可参见文献[5]。下面依次介绍在爆轰、损伤、断裂处理方面的算法。

### 2.1 爆轰模型

采用体积起爆方式, 未反应炸药与爆轰产物的混合单元的平均压力取为  $p = fp_p$ , 其中炸药反应份额  $f = (1 - \rho_0/\rho)\rho_0 D_{CJ}^2 p_{CJ}$ ,  $\rho_0$  和  $\rho$  分别为炸药的初始密度和当前密度,  $p_{CJ}$  为 CJ 爆压,  $D_{CJ}$  为 CJ 爆速;  $p_p$  为采用 JWL 状态方程得到的爆轰产物压力。

\* 收稿日期: 2006-10-27; 修回日期: 2007-01-24

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金(NSAF)项目(10676004); 国家重点基础研究专项基金项目(2005CB321703)

作者简介: 熊俊(1975—), 男, 博士, 副研究员。

## 2.2 损伤模型

在滑移爆轰驱动中层裂问题中钢管处于二维应力状态,因此实际的损伤状态并非严格的各向同性,但是由于钢管所受应力张量中偏量相对较小,损伤演化仍然主要决定于压力,因此本文中仍然采用 Johnson (1981 年)提出的适用于延性金属孔洞各向同性生长的 VG (void growth)模型<sup>[6]</sup>来描述断裂前钢管的损伤演化。令多孔介质的单元宏观体积为  $V$ ,孔洞体积为  $V_v$ ,基体材料的体积  $V_m = V - V_v$ 。令  $\alpha = V/V_m$ ,其时间演化方程为

$$\dot{\alpha} = \begin{cases} 0 & \Delta p \geq 0 \\ -\frac{(\alpha_0 - 1)^{2/3}}{\eta} \alpha (\alpha - 1)^{1/3} \Delta p & \Delta p < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\alpha_0 > 1$ ,与材料的初始孔隙度相关;材料常数  $\eta$  表征金属的粘性; $\Delta p = \bar{p} + \frac{\alpha_s}{\alpha} \ln \frac{\alpha}{\alpha - 1}$ ,其中  $\bar{p}$  为名义压力,材料常数  $\alpha_s$  具有应力的量纲。损伤度  $D \equiv V_v/V$  为材料的孔隙度。损伤对状态方程的影响可用下式表示<sup>[7]</sup>

$$\bar{p} = (1 - \phi) p_m(\rho_m, e) \quad (2)$$

式中: $\rho_m = \bar{\rho}/(1 - \phi)$ , $\bar{\rho}$  为名义密度, $\phi$  为孔隙度; $p_m(\rho_m, e)$  为基体材料的状态方程,其中  $e$  为内能。损伤对剪切模量和屈服强度的影响分别采用 J. H. Mackenzie<sup>[8]</sup>和 D. R. Curran 等<sup>[9]</sup>的公式

$$\bar{G} = G \left( 1 - 15 \frac{1 - \nu}{7 - 5\nu} \phi \right), \quad \bar{Y} = \max\{Y(1 - 4\phi), 0\} \quad (3)$$

## 2.3 断裂算法

模拟断裂问题的方法按是否在裂纹处分离相邻单元可分为隐式方法和显式方法两大类。隐式断裂处理方法通过修正插值函数和单元刚度矩阵,使之与裂纹处的间断相匹配,同时考虑基于连续损伤力学的应力承载能力的“耗蚀”。隐式方法的复杂度相对较低,实现较容易,但是难以处理裂纹表面间存在较大的相对位移时引起的网格变形,且“耗蚀”处理会造成裂尖锐化,影响对裂纹传播过程的模拟。因此本文中采用显式断裂处理方法,即在计算过程中发生断裂时在断裂处改变网格拓扑结构,分离相邻单元以刻画新表面的产生。这就不仅需要标量损伤度  $D$ ,还需要关于损伤度的方向信息,因此这里引入一个辅助矢量  $\mathbf{D}$ ,用于记录损伤演化的历史累积效应,为显式断裂算法中断裂面的方向提供依据。令  $\|\mathbf{D}\| = D$ ,同时考虑到拉伸损伤占优的情况下最大主应力方向上损伤演化最快,从而其垂直面最易发生断裂,因此假设矢量  $\mathbf{D}$  的增量方向与材料的当前最大主应力  $\sigma_1$  对应的主方向  $\mathbf{e}_1^{n+1}$  相同,即

$$\mathbf{D}^{n+1} = \mathbf{D}^n + \Delta D \mathbf{e}_1^{n+1} \quad (4)$$

由于已知  $\|\mathbf{D}^n\|$ 、 $\|\mathbf{D}^{n+1}\|$ 、 $\mathbf{e}_1^{n+1}$ ,不难求出  $\Delta D$  ( $\Delta D \geq 0$ ),进而得到  $\mathbf{D}^{n+1}$ 。在数值计算中,应力定义在单元上,因此矢量  $\mathbf{D}$  也定义在单元上。在断裂处理中,定义边上的损伤度

$$D_e = |[(\mathbf{D}_l + \mathbf{D}_r)/2] \cdot \mathbf{n}_e| \quad (5)$$

式中: $\mathbf{D}_l$ 、 $\mathbf{D}_r$  为边两侧单元矢量  $\mathbf{D}$  的值, $\mathbf{n}_e$  为边的单位法向矢量,即边上的损伤度为边两侧单元损伤度矢量的平均值在边的法向投影。当  $D_e$  超过指定阈值  $D_{ec}$  时,认为该边发生断裂,产生新的自由面,将两侧的单元分离开来。

## 3 数值结果

钢管外径 6.3 cm,管厚  $d_T = 0.75$  cm,炸药厚度  $d_E = 0.2 \sim 1.0$  cm。网格划分取  $\Delta r = \Delta z = 0.125$  mm。炸药 GI-920 的材料参数见表 1;20 钢的材料参数及 VG 损伤模型的参数见表 2。断裂损伤阈值  $D_{ec} = 0.2$ 。

炸药的加载波形对钢管的层裂具有决定性的影响,因此首先来看炸药厚度不同时加载波形的变化。炸药起爆后达到稳定的爆轰状态需要一定的时间和过程,通过分析钢管外表面的压力时间曲线,认为  $z \geq 4$  cm 后炸药进入稳定爆轰状态。从图 1 所示的  $z = 5$  cm 处钢管外表面的压力时间曲线可见,炸药厚

度的变化对压力的卸载速度的影响比较显著。随着炸药厚度的增加,压力卸载越来越慢,一方面增大了对钢管的压缩作用,另一方面也将对钢管的层裂产生重要影响。

表 1 炸药 GI-920 的材料参数

Table 1 Material parameters for the high explosive GI-920

$\rho_0 / (\text{g}/\text{cm}^3)$	$p_{\text{CJ}} / \text{GPa}$	$D_{\text{CJ}} / (\text{m}/\text{s})$	JWL 状态方程参数					
			$A / \text{MPa}$	$B / \text{kPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E_0 / (\text{MJ}/\text{cm}^3)$
1.53 <sup>[2]</sup>	21.0 <sup>[2]</sup>	7 300 <sup>[2]</sup>	47.97	530.5	4.5	1.2	0.36	0.08

表 2 20 钢材料参数

Table 2 Material parameters for steel 20

$\rho_0 / (\text{g}/\text{cm}^3)$	杨氏模量/GPa	泊松比	屈服强度/GPa	VG 模型参数		
				$\alpha_0$	$a_s / \text{GPa}$	$\eta / (\text{Pa} \cdot \text{s})$
7.8 <sup>[4]</sup>	206.7 <sup>[4]</sup>	0.31 <sup>[4]</sup>	0.65 <sup>[4]</sup>	1.000 3	0.2	1.0

图 2 显示了当炸药厚度  $d_E=0.4 \text{ cm}$  时,  $z=5 \text{ cm}$  横截面上不同半径处损伤度的时间演化曲线,其中  $r_0$  表示拉氏质点的初始径向坐标。各点的损伤度均单调增长,到  $t \approx 10.2 \mu\text{s}$  时,  $z=5 \text{ cm}$  处发生断裂,损伤基本停止增长。各点的损伤发展程度差异很大,  $2.6 \text{ cm} < r_0 < 2.8 \text{ cm}$  区间上各点的损伤发展较为充分,可能发生断裂。

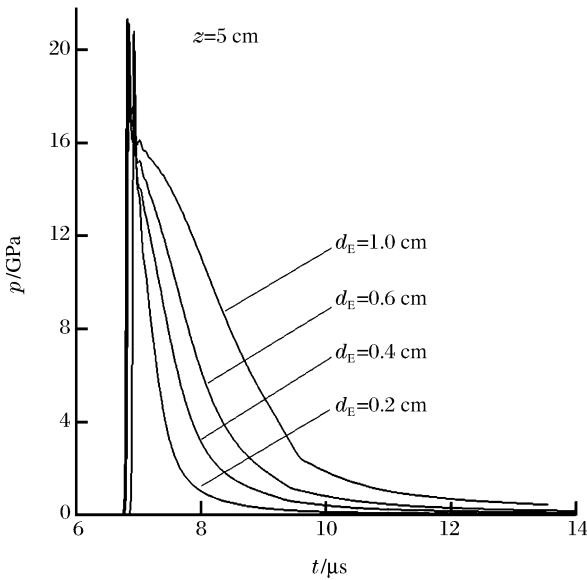


图 1 钢管外表面的压力随炸药厚度的变化

Fig. 1 Variation of pressure on the outer surface

of steel tube with the increase of high explosive thickness

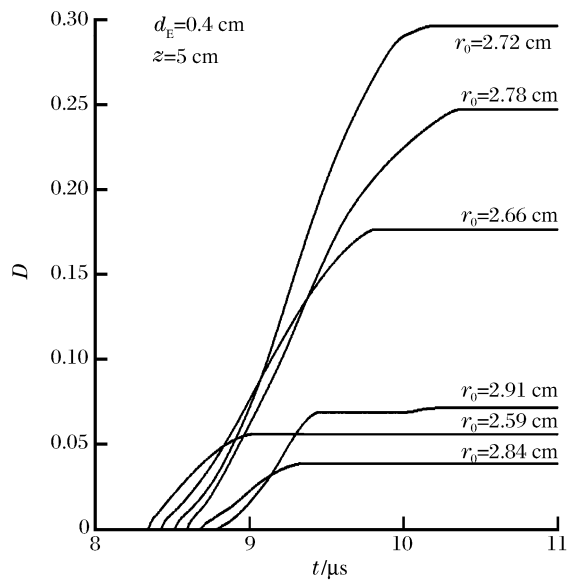


图 2 钢管损伤的时间发展

Fig. 2 Temporal evolution of damages

in the steel tube

根据图 1 中钢管表面压力的时间曲线作定性分析,随着炸药厚度的增加压力的卸载速度降低,在与钢管内壁面反射回来的稀疏波迭加时增大了对材料拉伸的削弱作用,从而使层裂现象减弱。图 3 显示了计算得到的不同炸药厚度下钢管层裂现象的比较。为方便比较,将层裂位置与钢管内壁间的部分称为层裂片,层裂片在初始时刻的厚度记为  $h_0$ 。由于炸药从起爆到稳定爆轰需要一定的过程,钢管起爆端大约 2~3 cm 长度部分的受力状态尚未达到稳定,因此在各算例中均未发生层裂。根据数值结果考察层裂现象随炸药厚度的变化规律,当炸药厚度  $d_E=0.2 \text{ cm}$  时,随着爆轰波(从左至右)的推进,裂纹持续向前扩展,层裂片的初始厚度  $h_0$  在各横截面处保持不变;当  $d_E=0.4, 0.6 \text{ cm}$  时,裂纹出现时断时续的现象,  $h_0$  也随之沿轴向发生变化,表明层裂现象比  $d_E=0.2 \text{ cm}$  时的情况有所减弱;  $d_E=1.0 \text{ cm}$  时未发生层裂现象。这与定性分析的结果一致。文献[2]中通过对实验数据的拟合得到钢管发生层裂的

炸药厚度临界值  $d_{Ec} = 0.75$  cm, 即  $d_E < d_{Ec}$  时钢管发生层裂, 而  $d_E > d_{Ec}$  时则不会发生层裂。本文的计算结果中,  $d_E = 0.2, 0.4, 0.6$  cm 的情况出现层裂现象;  $d_E = 1.0$  cm 的情况没有层裂现象, 与实验结果吻合。

为进一步作定量的比较, 计算了钢管层裂片的初始厚度  $h_0$  随炸药厚度的变化, 如图 4 所示。需要说明的是, 对于层裂片厚度沿钢管轴向发生改变的情况 ( $d_E = 0.4, 0.6$  cm), 我们认为轴向长度最大的裂纹为主裂纹, 取其对应的层裂片厚度。本文的二维计算表明层裂片的初始厚度  $h_0$  随炸药厚度  $d_E$  的增大而增大, 这与实验结果<sup>[2]</sup>一致。而且二维计算定量的结果和一维计算<sup>[4]</sup>的结果相比与实验数据更相近。

图 5 显示了钢管内表面径向速度的时间曲线, 当圆管中发生层裂时 ( $d_E = 0.6$  cm), 自由面的速度曲线在 A 点出现回跳现象; 而未发生层裂时 ( $d_E = 1.0$  cm), 速度曲线无回跳现象。这与飞片冲击加载下的平面层裂现象相似。

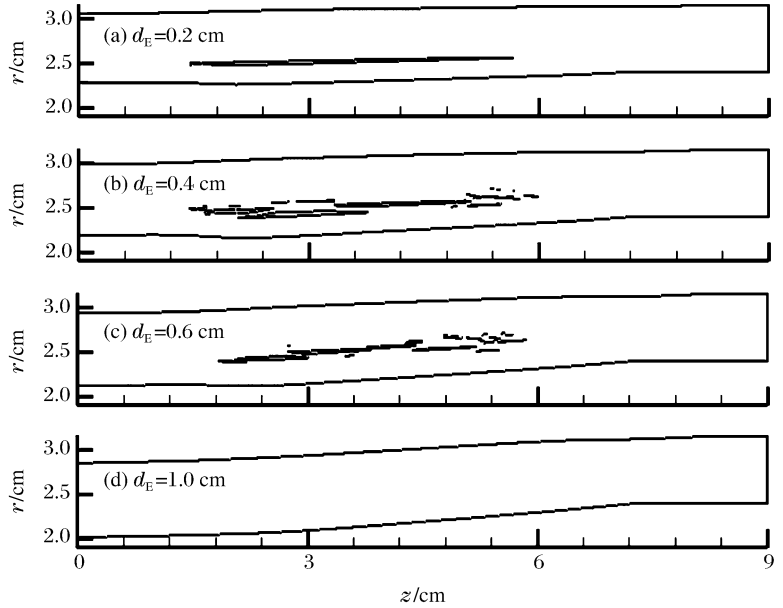


图 3  $t = 11 \mu s$  时不同炸药厚度下钢管层裂特征的比较  
Fig. 3 Comparison of spallation features of the steel tubes with different thicknesses of high explosives

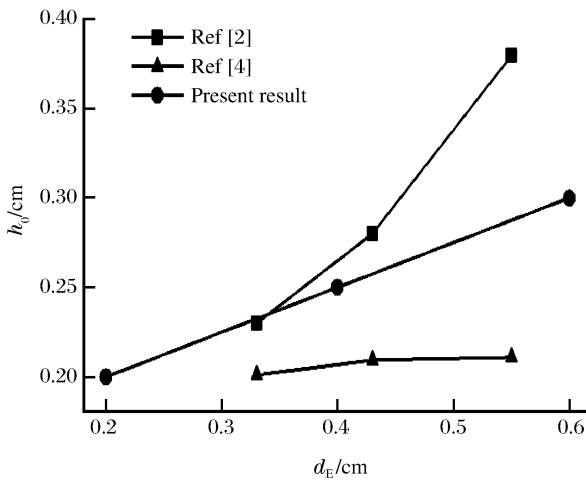


图 4 层裂片的初始厚度随炸药厚度的变化  
Fig. 4 Variation of the initial thickness of spalled layer with the thickness of high explosives

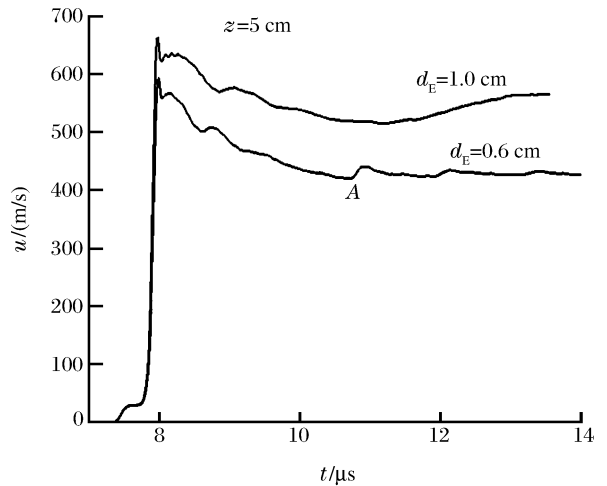


图 5 钢管内表面的向心速度时间曲线  
Fig. 5 Temporal history of radial velocity on the inner surface of steel tube

### 4 结 论

- (1) 滑移爆轰加载方式下炸药厚度减小会引起钢管外表面的峰值压力和炸药爆速的减小, 但对于层裂问题来说更重要的影响是钢管外表面的压力卸载速度随炸药厚度减小而显著加快;
- (2) 钢管内损伤的各点的损伤发展程度差异很大, 损伤度的空间分布具有局域性的特点, 钢管横截

面上具有可能发生多层层裂的迹象;

(3) 随炸药厚度的增加, 钢管的层裂现象逐渐减弱, 直至消失。层裂片初始厚度随炸药厚度增大而增大的规律与实验结果定量地符合较好。

### 参考文献:

- [1] 李雪梅, 金孝刚, 李大红, 等. 内爆压缩加载下钢圆管的层裂宏观分析[C]. 第12届全国高压学术讨论会文集. 安徽黄山, 2004: 86.
- [2] 李雪梅, 金孝刚, 李大红. 钢圆管在内爆加载下的层裂特性研究[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(2): 107-111.  
LI Xue-mei, JIN Xiao-gang, LI Da-hong. The spall characteristics of cylindrical steel tube under inward explosion loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(2): 107-111.
- [3] 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.
- [4] 孙宇新, 张进, 李永池, 等. 内爆加载下热塑性管壳的应力波演化与层裂效应研究[J]. 高压物理学报, 2005, 19(4): 319-324.  
SUN Yu-xin, ZHANG Jin, LI Yong-chi, et al. Propagation of stress wave and spallation of cylindrical tube under external explosive loading[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005, 19(4): 319-324.
- [5] Caramana E J, Burton D E, Shashkov M J, et al. The construction of compatible hydrodynamics algorithms utilizing conservation of total energy[J]. Journal of Computational Physics, 1998, 146: 227-262.
- [6] Johnson J N. Dynamic fracture and spallation in ductile solids[J]. Journal of Applied Physics, 1981, 52: 2812-2825.
- [7] Carroll M, Holt A C. Suggested modification of the P-a model for porous materials[J]. Journal of Applied Physics, 1972, 43: 759-761.
- [8] Mackenzie J K. The elastic constants of a solid containing spherical holes[J]. Proceedings of the Physical Society: B, 1950, 63: 2-11.
- [9] Curran D R, Seaman L, Shockey D A. Dynamic failure of solids[J]. Physics Reports, 1987, 147: 253-388.

## Spallation of steel tube driven by sliding detonation

XIONG Jun<sup>\*</sup>, ZHOU Hai-bing, LIU Wen-tao, ZHANG Shu-dao, SUN Jin-shan  
(Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

**Abstract:** VG(void growth) damage model is generalized to the 2D situations, which counts in the effect of the principal stress direction on the evolution of damage, and is used in the 2D numerical simulations of spallation of steel tube driven by sliding detonation of high explosive GI-920, as well as the explicit fracture algorithm. The different pressure profiles on the outer surface of steel tube between the 1D implosion case and the 2D sliding detonation case are analyzed. Especially the influence of the thickness of high explosive on the pressure profiles is investigated in detail. The numerical results present the distribution and evolution of damage in the steel tube, as well as the initialization and extending of the spalled crack. The initial thicknesses of spalled layer obtained numerically conform to the experiments.

**Key words:** mechanics of explosion; spallation; numerical simulation; sliding detonation; damage

\* Corresponding author: XIONG Jun  
E-mail address: xiong\_jun@iapcm.ac.cn  
Telephone: 86-10-62014411-3130