

文章编号: 1001-1455(2005)02-0107-05

钢圆管在内爆加载下的层裂特性研究*

李雪梅, 金孝刚, 李大红

(中国工程物理研究院冲击波物理与爆轰物理实验室, 四川 绵阳 621900)

摘要: 利用完整回收技术, 获得了 20 钢圆管在不同固体装药厚度、装药类型以及外壳条件的滑移内爆加载下形变和层裂的特征和规律, 得到了钢圆管层裂的相对临界装药厚度等初步结果, 分析了装药类型、装药厚度、外壳对钢圆管层裂的影响。

关键词: 固体力学; 层裂; 内爆; 钢圆管; 滑移爆轰; 临界装药厚度

中图分类号: O347.4 **国标学科代码:** 130 · 15 **文献标志码:** A

1 引 言

关于炸药内爆(外部装填炸药)或外爆(内部装填炸药)作用下圆柱壳体力学行为的研究已有半个多世纪的历史, 军用方面的研究工作多侧重于弹药研制关心的外爆引起的壳体碎裂、破坏等。关于内爆的研究, 在民用方面作为材料爆炸合成的手段而受到重视; 在军用方面则主要受到核武器研究机构, 尤其是前苏联和美国的关注。但是, 这些研究大部分是针对绝热剪切断裂进行的, 对圆柱壳体的收缩形变和层裂, 研究还很少^[1~2]。

本文中采用滑移爆轰加载和完整回收的实验方法, 研究钢圆管在内爆驱动下的会聚变形和层裂特性, 并就装药类型、装药厚度、外壳等装药条件对钢圆管层裂的影响做简要分析。

2 研究方法

实验装置如图 1 所示, 主要由 20 钢圆管(试件)、薄炸药壳、外壳、塞子、引爆及定位系统、支撑部件等组成, 部分实验的炸药采用裸装而无外壳。

考虑圆柱壳稳定汇聚条件和管材的初始规格, 钢圆管外径 63 mm、壁厚 7.5 mm、长 200 mm。钢塞子用于防止顶端爆轰产物过早进入管内而干扰其变形。软回收采用厚层疏松介质, 它与主体装置间以长空腔隔开, 以形成自由飞散的环境, 避免二次碰撞。

装药类型包括 2 种^[3]: 一种为塑性粘结炸药 GI-920(固泰-920), 其密度 $\rho_0 = 1.53 \text{ g/cm}^3$, 爆速 $D_{CJ} = 7.3 \text{ km/s}$, 多方指数 $\gamma = 2.88$, 爆压 $p_{CJ} = 21.0 \text{ GPa}$; 另一种为强度更高的 GH-925(固黑-925), 其密度 $\rho_0 = 1.65 \text{ g/cm}^3$, 爆速 $D_{CJ} = 8.1 \text{ km/s}$, 多方指数 $\gamma = 3.17$, 爆压 $p_{CJ} = 26.1 \text{ GPa}$ 。装药厚度 d 包括 3~7.5 mm 间的几种尺寸, 相对装药厚度 \bar{d} ($\bar{d} = \text{炸药厚度} / \text{钢圆管壁厚}$) 不超过 1.0, 以防止圆管收缩量过大而发生闭合、反弹等复杂现象, 使其运动到一定位置后静止, 从而可通过软回收“冻结”其终态变形。另外, 实验中还对薄层炸药选用了无外壳、1 mm 和 2 mm 厚钢壳等 3 种外壳约束条件。

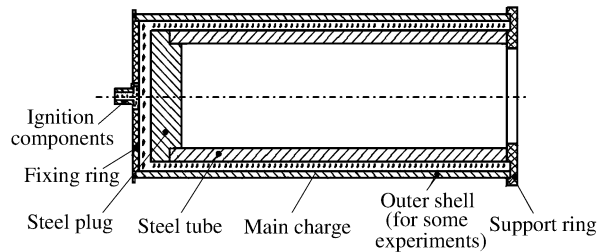


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental device

* 收稿日期: 2004-06-25; 修回日期: 2004-11-15

基金项目: 国防科技实验室基金项目(51478040504ZW0101)

作者简介: 李雪梅(1975—), 女, 硕士, 助理研究员。

3 实验结果与分析

3.1 变形形貌及特征

图2给出了不同装药条件下钢圆管的变形截面。由此可见,随装药厚度 d 的改变,钢管在一定条件下发生了层裂。装药条件不同,则层裂片及残余壳体的形态有所差别(本文中约定,对已层裂的钢圆管,其内壁与层裂面间的部分称为层裂片,层裂片以外部分称为残余壳体)。

裸露 GI-920 装药时(见图2(a)),钢圆管外表面的收缩变形呈现出与初始几何相似的轴对称形状。装药较厚($d=7.75$ mm)时,钢圆管中未出现宏观层裂,它呈整体轴对称收缩,管壁厚度显著增加。随着装药减薄($d=5.50$ mm 或更薄),钢圆管的收缩程度减小,且发生层裂,同时层裂片明显偏离初始轴对称形状而失稳。装药越薄,层裂片的厚度越小。由于层裂,导致残余壳体和层裂片经历较小的变形后便停止收缩,这种现象在某些利用结构会聚效应的特殊应用中值得重视。

采用强度更高且带外壳的 GH-925 装药时(见图2(b)、(c)),在一定装药厚度下钢圆管也会发生层裂破坏(见图2(b)、图2(c)中 $d=3.30$ mm),其层裂片基本呈轴

对称形状,部分实验的层裂片已完全脱开而形成规则的长柱体(见图2(b)中 $d=3.30$ mm);但是,由于外壳的存在,残余壳体不再保持轴对称,而发生不同程度的失稳,出现裂纹和局部凹凸等现象。另外,此装药条件下钢圆管发生层裂的临界装药厚度较低:图2(c)中 $d=5.30$ 、 4.30 mm的2种装药厚度下钢圆管均未出现层裂。另外,由于GH-925炸药的强度较高,且使用了外壳,因此,钢圆管的内聚变形较大,即使发生层裂而耗散了大量能量,层裂片心部仍产生较多的裂纹,部分层裂片由于心部闭合、反弹而几乎破碎(见图2(b)中 $d=4.30$ mm),装药越厚,则裂纹越显著。

在图2(b)、(c)中,除层裂破坏外,还出现了萌生于外壁的剪切裂纹等断裂现象,这一点将另文分析。

3.2 层裂规律

3.2.1 层裂的量化分析

这里定义初始层裂片厚度 δ 为:层裂面最初形成时刻所对应的层裂片厚度,它可按文献[1]中提供的方法确定,即假定层裂是在第一个冲击波从钢圆管自由面处(内壁)反射时发生的,这时管壁移动不大(这种管壁移动不大的假定与数值模拟结果相符),利用回收测得的残余壳体厚度和外径,按照塑性体积不可压的假设,并忽略钢圆管的轴向变形,便可求出层裂形成时刻对应的残余壳体厚度,从而求出初始层裂片厚度。

表1给出了不同装药厚度下回收钢圆管(圆管初始尺寸: $\varnothing(63-48)$ mm \times 200 mm)的各尺寸实测值和相关数据的计算结果。

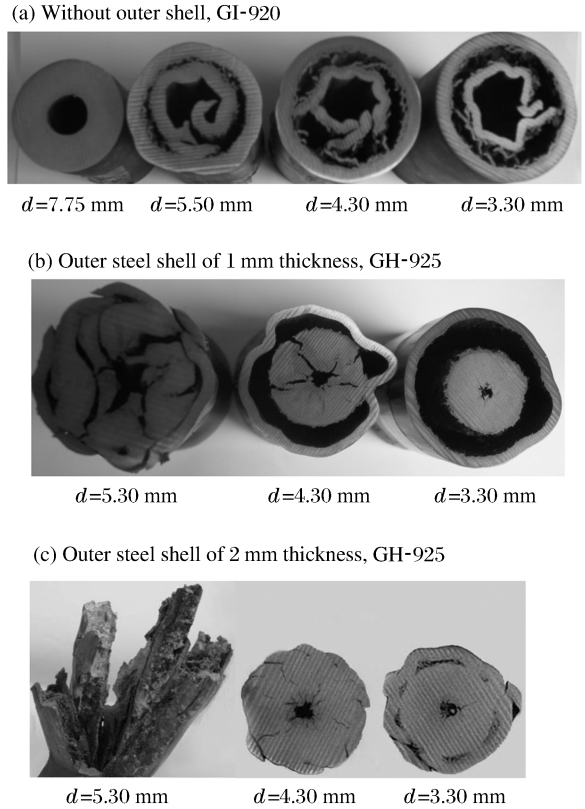


图2 钢圆管的变形截面

Fig. 2 Deformation section of steel tube

表 1 不同装药条件下对回收钢圆管的测量结果

Table 1 The measured results for recovered steel tube with different loading conditions

装药条件	d/mm	层裂情况	实验后钢圆管尺寸(实测)			δ (计算值)/mm
			残余壳体尺寸/mm		终态层裂片厚度/mm	
			外径	厚度		
裸露装药	7.75	否	43.7	14.0		
GI-920	5.50	是	49.3	5.4	5.8	3.8
	4.30	是	54.4	5.9	4.2	2.8
3.30	是	57.6	6.0	3.3	2.3	
	1 mm 厚钢外壳,	5.30	是	46.7	3.3	
GH-925	4.30	是	53.5	3.4	14.0	4.7
	3.30	是	57.1	4.0	12.9	3.9
2 mm 厚钢外壳,	5.30	否	42.2	17.8		
GH-925	4.30	否	42.2	17.8		
	3.30	是	42.4	4.8	13.0	4.5

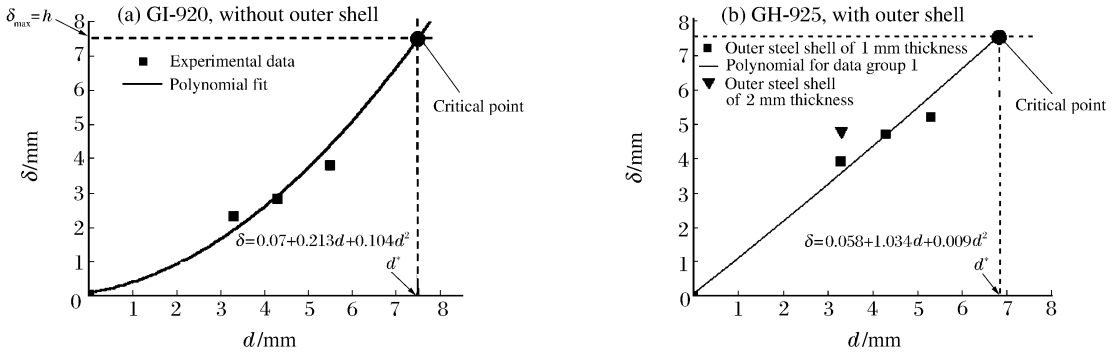


图 3 不同装药条件下层裂片厚度与装药厚度的关系

Fig. 3 Relation between spall scab's thickness δ and HE thickness d

图 3 给出了不同装药条件下初始层裂片厚度 δ 与装药厚度 d 之间的关系。 δ 不能超过钢圆管壁厚 h ($h=7.5 \text{ mm}$), 即 $\delta_{\max}=h$, 由此便可得到临界装药厚度 d^* 。

由表 1 和图 3 可以看出, 初始层裂片厚度 δ 随装药厚度 d 的增加而增加; 存在一个使钢圆管发生层裂的临界装药厚度 d^* , 当 d 增加到 d^* 后, 钢圆管不再发生层裂。由图 3 中数据的拟合外推可知: 在裸露 GI-920 装药条件下, 此临界装药厚度 $d^* \approx 7.5 \text{ mm}$, 相对临界装药厚度 $\bar{d}^* = 1.0$; 采用 1 mm 厚钢外壳的 GH-925 装药条件下, $d^* \approx 6.8 \text{ mm}$, 相对临界装药厚度 $\bar{d}^* = 0.9$; 同样采用 GH-925 炸药而将外壳增厚到 2 mm 时, d^* 和 \bar{d}^* 将进一步降低。由此可推断: 在钢圆管尺寸不变时, 提高载荷强度并增加外壳厚度将使钢圆管发生层裂的临界装药厚度 d^* 及 \bar{d}^* 值降低。

对照表 1 的实验数据: 裸露 GI-920 装药条件下, 当 $d=7.75 \text{ mm}$ 时, 钢管已不出现层裂, 故此种装药条件下的临界装药厚度 d^* 应小于 7.75 mm, 本文中采用二次拟合得到 $d^*=7.5 \text{ mm}$, 可见这里采用二次拟合得到的结果基本是合理的。

3.2.2 层裂与装药类型、厚度及外壳间关系的初步分析

首先不考虑外壳而只分析装药厚度的影响, 这时爆炸所产生的加载脉冲接近于三角形, 这种三角形脉冲有利于层裂的形成。由于爆炸载荷的脉冲峰值和入射角主要与炸药类型有关, 因此, 假定入射脉冲的峰值压力 σ_0 和入射角 α 均为恒值, 影响层裂的主要因素则是炸药与钢圆管的相对厚度, 即脉冲的相

对宽度。为简化起见,这里采用最大拉应力层裂准则进行分析,图 4 给出了装药厚度(脉冲宽度)对层裂的影响,其中 h 为样品厚度, L_i 为脉冲宽度。图 4(a)中,由于炸药层较薄,爆轰产物的稀疏波来得较早,使入射脉冲很快衰减,因此入射脉冲较窄,它在自由面反射后,距离自由面为 X_1 的位置处首先达到层裂强度并发生层裂;图 4(b)中,炸药厚度有所增加,从而入射脉冲略宽,它在自由面反射后,距离自由面为 X_2 位置处首先达到层裂强度并发生层裂,但 $X_2 > X_1$;图 4(c)中,炸药厚度最厚,过宽的入射脉冲在自由面反射后,钢管管内没有可满足层裂条件的拉应力区,因此不层裂。由此可见:当钢圆管厚度不变时,确实存在使钢圆管发生层裂的临界装药厚度。当装药厚度超过此临界值,由于脉冲过宽,钢圆管不会层裂,否则钢圆管将发生层裂,且层裂片厚度随装药厚度的减小而减小。

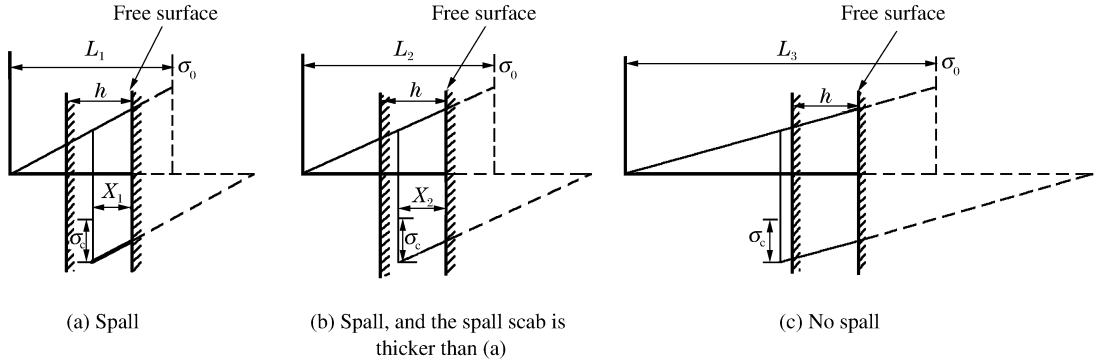


图 4 不同装药厚度下入射波的反射及拉伸应力区的位置

Fig. 4 Reflecting of incident wave and the location of stretch stress zone

采用高强度炸药时, σ_0 也随之增大。这里忽略入射角 α 的影响,并设层裂强度 σ_c 不变,则相同脉冲宽度下对应的层裂片厚度 X 将减小。因此,随着载荷强度的提高,发生层裂的临界装药厚度增加。

外壳在钢圆管层裂中的作用,相当于增加了炸药的等效装药厚度^[4]。因此,采用外壳将使钢圆管层裂的临界装药厚度降低。外壳越厚,则临界装药厚度越低,这在我们的实验中已得到证实。

利用钢外壳和高强度炸药的双重影响,带外壳的 GH-925 装药下,钢圆管层裂的临界装药厚度将比裸露 GI-920 装药时低,这就是对 3.2.1 节中不同装药条件下临界装药厚度规律的初步理论解释。

3.2.3 层裂面形态分析

观察图 2 中的层裂面可以发现:其断口色泽黯淡,呈现不同程度的粗糙,通常将这种层裂称为“粗糙层裂”。断口的粗糙程度随装药条件的不同而有所差别:在采用载荷强度较低的 GI-920 炸药且无外壳时,无论是层裂片还是残余壳体的断口上均可看到许多凹凸不平的毛刺,断面非常粗糙,部分区域还存在“藕断丝连”的现象,似乎是经过了较长时间的撕裂后形成的。当采用 GH-925 且带外壳时,尽管层裂面仍较粗糙,但比采用裸露 GI-920 装药加载时要光滑得多,尤其在残余壳体上更明显。

初步分析表明,这种层裂面粗糙程度的差别主要与加载条件有关。裸露 GI-920 装药条件下,实际传入钢圆管内部的脉冲幅值将低于 Fe 的相变压力 13.1 GPa^[5],这种情况下无相变发生,不会出现稀疏波的汇聚或稀疏冲击波现象^[6],由样品自由面反射形成的左行中心稀疏波和入射方向的右行追赶卸载波相互作用,将使材料内局部区域的拉伸应力平缓增加,这就使损伤可在较大范围内萌生、演化并发展,导致层裂断面比较粗糙。GH-925 装药时,一方面其载荷强度比 GI-920 高,同时,外壳的存在使波在钢圆管内传播时衰减减慢,因此,传入钢圆管内壁附近时载荷幅值应已超过 13.1 GPa。由于相变(在对回收样品的显微分析中观察到明显的相变,证明了该推论的有效性),入射波将分离为两个波,传播较快的第 1 个冲击波在自由面反射形成的中心稀疏波将与第 2 个高幅值入射冲击波相互作用,并使第 2 个冲击波的幅值逐渐衰减,降到 13.1 GPa 时该区域中心稀疏波的传播速度改变,发散的稀疏波逐渐汇聚。类似地,在入射方向的卸载波也将逐渐汇聚。由于两束逐渐会聚的稀疏波相互作用,将在相对较窄的区域内形成较大的拉伸应力,使损伤演化发展的区域较窄,形成的层裂断面比在 GI-920 装药条件下更光滑。当然,由于加载峰值压力不够高,逐渐汇聚的稀疏波不足以形成稀疏冲击波,仍属粗糙层裂范畴。

4 结 论

(1) 在一定装药条件的内爆加载下, 钢圆管会发生层裂。层裂的临界装药厚度与装药条件密切相关。采用裸露 GI-920 装药时, 相对临界装药厚度 $\bar{d}^* \approx 1.0$, 采用带 1 mm 厚钢外壳的 GH-925 装药时, $\bar{d}^* \approx 0.9$, 增加外壳厚度会使该临界值进一步降低。(2) 对发生层裂的钢圆管, 其收缩程度和轴对称运动姿态会受到较大影响。裸露装药时, 残余桥体(或整体)对称性较好, 但层裂片出现严重失稳; 带外壳装药时, 层裂片基本保持轴对称, 但残余壳体(或整体)外形明显失稳。(3) 本研究中, 两种固体装药条件下的层裂均属于“粗糙层裂”, 但随着装药强度的提高, 层裂面的光滑程度提高。(4) 由于内爆加载的复杂性, 实验中还出现了其他形式的动态破坏, 并出现冲击相变。

参考文献:

- [1] Иванов А Г. Особенности осесимметричного схождения откольных слоев в стальных цилиндрических оболочках [J]. ПМТФ, 1984(3):125—127.
- [2] 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.
- [3] 董海山, 周芬芬. 高能炸药及相关物性能[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 349—352.
- [4] 李雪梅, 金孝刚, 李大红, 等. 液体炸药滑移内爆加载下钢管的变形与层裂破坏研究[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(6): 523—529.
LI Xue-mei, JIN Xiao-gang, LI Da-hong, et al. Deformation and spallation of cylindrical steel tube loaded by sliding implosion of liquid explosive[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(6): 523—529.
- [5] 李雪梅. 内爆加载下钢圆管的变形、损伤及层裂研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2003.
- [6] Erkman J O. Smooth spall and the polymorphism of iron[J]. Journal of Applied Physics, 1961, 32(5): 939—944.

The spall characteristics of cylindrical steel tube under inward explosion loading

LI Xue-mei*, JIN Xiao-gang, LI Da-hong

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

Abstract: By using complete soft recovery technique, the deformation and macroscopical spalling characteristics of steel 20 tube under sliding inward explosion were investigated. Experiments were carried out with different kinds of solid high explosives (HE), with several HE thicknesses, and under different outer shell conditions. The quantitative result of critical thickness of HE for steel tube's spalling was obtained, the influence of load intensity, HE thickness and outer shell on steel tube's spalling were also analyzed.

Key words: solid mechanics; spall; inward explosion; cylindrical steel tube; sliding explosion; critical thickness of HE for spall

* Corresponding author: LI Xue-mei
Telephone: 0816-2485107