

文章编号: 1001-1455(2009)02-0162-05

# 内爆和柱壳条件下无氧铜的层裂特性\*

李雪梅,汪小松,王鹏来,卢 敏,贾路峰

(中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理国防科技重点实验室,四川 绵阳 621900)

**摘要:** 利用任意反射面位移干涉系统(DISAR)激光测速技术,成功地获得了滑移内爆加载和柱壳结构条件下无氧铜的内表面(自由面)速度剖面,并对其层裂特性进行了初步分析。结果表明:(1)在固定炸药和改变无氧铜圆管壁厚条件下,层裂片厚度  $\delta$  随着圆管壁厚  $h$  的减小而增加;以圆管壁厚  $h$  为参照进行归一化,则相对层裂片厚度 ( $\delta/h$ ) 随相对装药厚度 ( $h_e/h$ ) 的增大而增加,这种规律与以往对 20 钢的研究结果一致,但圆管发生层裂的临界条件,却显示出明显的材料相关性。(2)初步来看,无氧铜的层裂强度对结构的依赖性不明显,而与加载脉冲的幅值和宽度相关。(3)受无氧铜粘性和 Taylor 波衰减的影响,无氧铜的层裂强度随管壁厚度的增加而略有降低;同时,材料分散性也对此有一定影响。

**关键词:** 爆炸力学;层裂;DISAR;无氧铜;自由面粒子速度;滑移内爆

**中图分类号:** O347.1; O347.3

**国标学科代码:** 130·3520

**文献标志码:** A

## 1 引 言

层裂作为动态冲击领域金属材料最典型的动态断裂之一,它的形成主要是由于来自样品前、后界面的稀疏卸载波相互作用,导致样品某一区域产生较强的拉伸应力,使样品在此处被拉开。

动态冲击下金属材料的层裂当前已有很多研究。这些研究主要利用一维平板冲击实验,获得层裂样品的自由面粒子速度剖面 and 软回收样品,研究材料的层裂规律,并建立相应的层裂模型。然而,基于一维应变实验结果建立的各种层裂模型,在复杂应力和复杂构型情况下是否具有普适性,亟待有足够的实验数据进行模型检验和程序校核。

由于复杂应力和复杂构型下开展材料动态断裂研究的难度较大,迄今已有的文献报道相当有限,这些研究大多利用软回收样品开展后继显微分析获取层裂的定性规律<sup>[1-3]</sup>,开展实时测量研究的很少<sup>[4]</sup>。

本文中利用激光干涉测速技术<sup>[5]</sup>,测量无氧铜圆管在内聚爆轰驱动下的自由面粒子速度剖面,研究柱壳结构和内爆加载条件下无氧铜的层裂规律,为相关的物理建模以及数值仿真提供依据,并为进一步开展复杂结构的损伤断裂研究奠定基础。

## 2 实验系统简介

图 1 给出了实验装置的基本结构,由炸药壳体、铜管、探针支架、薄片过渡药层、雷管等组成。其中铜管采用无氧铜,外径为 120 mm,高 200 mm,壁厚包括 14、10、8 mm 等 3 种。炸药壳体采用 RHT-901,厚度为 9 mm,紧贴在铜管外壁,两者间的间隙不大于 0.06 mm。为实现滑移爆轰,在装置顶端放置  $\varnothing 138 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  的过渡药片,材料为 RHT-901,起爆点为药片中心。

实验采用 DISAR<sup>[5]</sup> 测量铜圆管的自由面(内表面)速度剖面。DISAR 探头距圆管起爆端约 90 mm,针对本实验的特殊要求,在传统设计下对 DISAR 探头进行了新的设计,使该探头具有光路拐弯、长景

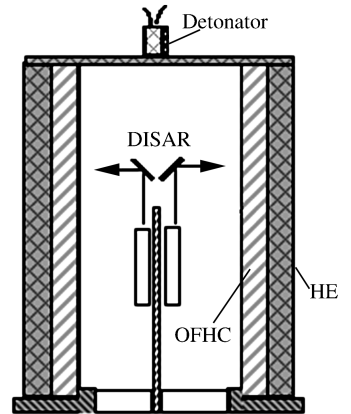


图 1 实验装置简图

Fig. 1 Experimental configuration

\* 收稿日期: 2007-12-06; 修回日期: 2008-03-31

作者简介: 李雪梅(1975—),女,硕士,助理研究员。

深的特点,可以更精细地测量柱壳的内表面速度剖面,同时又能实现较长时间的连续测量。DISAR 探头需要多个部件进行组装和对光,其尺寸较大,安装工艺较复杂,通过特殊设计的支架实现中心定位和光纤引出。

### 3 滑移爆轰作用下铜管内冲击参数估算

在图 2 中,设  $AB$  为金属圆管中的冲击波阵面, $AC$  为被压缩圆管的界面, $AF$  为爆轰波阵面, $AE$  为自炸药-圆管界面发出的稀疏波波头。爆轰波以爆速  $u_{CJ}$  沿管轴向传播,产物膨胀角为  $\theta$ ,圆管内产生的斜冲击波波速为  $u_d$ ,波后粒子速度为  $u_p$ ,压力为  $p$ ,波阵面与轴向的夹角为  $\alpha$ ,斜冲击波作用后管壁产生的变形角为  $\beta$ 。

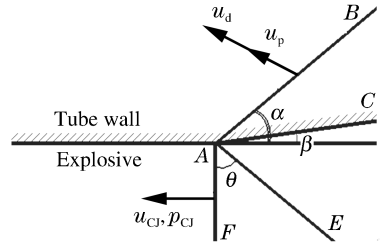


图 2 滑移爆轰时产物与圆管的相互作用

Fig. 2 Interaction between the explosive and metal tube subjected to the sliding detonation

利用以下近似条件和基本关系,估算了圆管内

的  $u_d$ 、 $u_p$ 、 $p$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  等冲击参数:(1) 爆轰波和冲击波在炸药-圆管界面上速度相等;(2) 圆管界面  $AC$  两侧的法向运动速度、压力相等;(3) 爆轰波  $CJ$  面基本守恒关系和圆管冲击波基本关系;(4) 爆轰产物区普朗托-迈耶流的压力与转角  $\beta$  的关系;(5) 无氧铜的 Hugoniot 关系,  $u_d = c_0 + \lambda u_p$ 。

炸药 RHT-901 的爆轰参数分别为:初始密度  $\rho_0 = 1.684 \text{ g/cm}^3$ ,多方指数  $\kappa = 2.787$ ,爆压  $p_{CJ} = 27.0 \text{ GPa}$ ,爆速  $u_{CJ} = 7.786 \text{ km/s}$ 。无氧铜的主要参数: $\rho_0 = 8.93 \text{ g/cm}^3$ ,  $c_0 = 3.94 \text{ km/s}$ ,  $\lambda = 1.489$ 。炸药 RHT-901 滑移爆轰下无氧铜圆管内的冲击参数预估值分别为: $\alpha = 36.4^\circ$ ,  $\beta = 2.8^\circ$ ,  $u_d = 4.618 \text{ km/s}$ ,  $u_p = 0.455 \text{ km/s}$ ,  $p = 18.8 \text{ GPa}$ 。

因此,当不考虑内爆的汇聚效应时,滑移爆轰下无氧铜圆管内的冲击压力约为  $18.8 \text{ GPa}$ 。由管内冲击波倾角  $\alpha$  和粒子速度  $u_p$ ,按照自由面粒子速度 2 倍近似,可以估算出自由面粒子速度的径向分量  $u_{rfs} = 2u_p \cos\alpha = 732.5 \text{ m/s}$ 。当然,若考虑冲击波的汇聚效应,则在铜管向內汇聚变形时,粒子速度、冲击波速度和冲击压力将不断增大。

### 4 实验结果及分析

共进行了 3 发实验。3 发实验中均采用  $9 \text{ mm}$  厚的 RHT-901 炸药,对应的无氧铜圆管壁厚分别为  $14$ 、 $10$ 、 $8 \text{ mm}$ 。从 3 发实验的结果来看,采用的新型 DISAR 探头成功地获得了信噪比较好的信号。需要说明的是,DISAR 探头测量的是铜管自由面(内表面)速度的径向分量,为便于叙述,以下对此不做强调,统称为自由面粒子速度剖面。

#### 4.1 自由面粒子速度剖面分析

图 3 给出了 3 发实验的自由面粒子速度剖面。由于 DISAR 探头的特殊设计,其有效测量时间较长 ( $11 \sim 15 \mu\text{s}$ ),对应的自由面径向运动距离为  $7 \sim 10 \text{ mm}$ 。

(a) Copper tube wall thickness of 14 mm

(b) Copper tube wall thickness of 10 mm

(c) Copper tube wall thickness of 8 mm

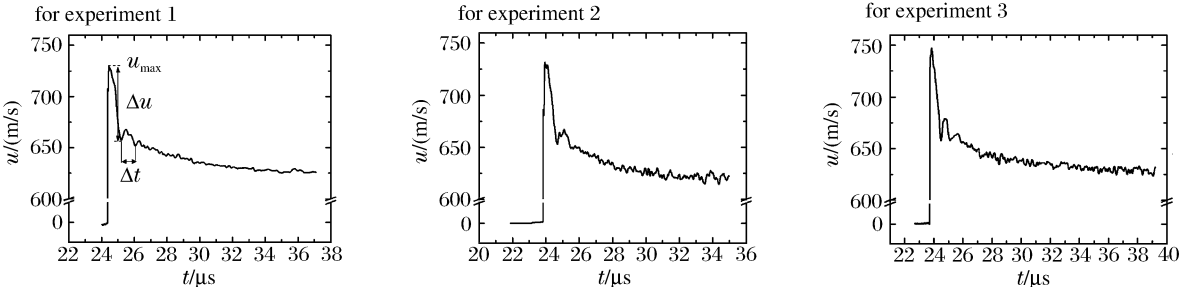


图 3 用 DISAR 测得的 3 发实验的自由面粒子速度剖面

Fig. 3 Free-surface particle velocity profiles measured by DISAR for the three experiments

3发实验对应的自由面粒子速度峰值分别为729.2、730.7、748.0 m/s,由第3节理论估算得出的初始自由面粒子速度径向分量为732.5 m/s,实测值与理论估算值基本相符,分别相差0.5%、0.2%、2.1%。同时,实验1和实验2的速度峰值比实验3的略低,这与无氧铜的粘性有关,即峰值压力随管壁厚度增加而衰减有关;材料的分散性以及实验测量误差也对此有一定影响。

由速度剖面可以看出,3发实验的自由面粒子速度剖面均表现出明显的层裂振荡,14、10、8 mm等3种厚度的铜管均发生了层裂;层裂片内的残余应力波在接下来的几微秒内来回振荡并逐渐衰减,表现出典型的三角波加载特性。不过,在最长达15  $\mu\text{s}$ 的测试时间内,自由面粒子速度在经历了层裂振荡后没有出现后期加速现象<sup>[4]</sup>。原因主要有2点:(1)圆管内聚收缩时冲击波的汇聚效应将导致粒子速度不断增加,但在圆管收缩的初期,这种汇聚效应并不明显;(2)由于炸药层较薄(9 mm),加之没有外壳约束,爆轰产物稀疏波很快传入圆管内,这成为影响粒子速度变化的主导因素,导致圆管内的粒子速度随时间增加而逐渐降低。

## 4.2 层裂初步分析

由于DISAR探头空间位置固定,只能探测到固定方向的速度分量;因此,在滑移内爆驱动铜圆管发生折转变形的过程中,探头对准的径向测量点在不同的时刻对应于不同的运动质点。严格来讲,必须对测量波形进行复杂的修正,才能准确获得内爆铜管的真实层裂波形。鉴于圆管发生的折转角很小( $\beta \approx 2.8^\circ$ ),加之本文中关注的层裂信号重点只在自由面运动后约2  $\mu\text{s}$ ,对应的圆管径向位移仅约1 mm。因此,这里忽略铜管自由面上相邻质点的径向速度差异,将实验测得的自由面粒子速度波形近似地视为同一质点的运动历史,并借用一维平板冲击实验处理方法,对铜管层裂的相关参数进行初步估算。

层裂强度可以按照声学近似进行估算: $\sigma_s = \rho_0 c_1 \Delta u / 2$ ,其中 $\rho_0$ 为密度, $c_1$ 为弹性纵波声速,回拉速度 $\Delta u = u_{\max} - u_{\min}$ , $u_{\max}$ 和 $u_{\min}$ 分别为实测波剖面上速度最大值和第1个速度最小值。由于实验测量的是自由面粒子速度的径向分量,这里进行简单修正,以得到回拉速度的全量 $\Delta u' = (u_{\max} - u_{\min}) / \cos\alpha$ , $\alpha$ 为斜冲击波倾角(见图2)。因此 $\sigma_s = \rho_0 c_1 (u_{\max} - u_{\min}) / (2 \cos\alpha)$ 。层裂片厚度 $\delta = \Delta t c_1 / 2$ ,其中 $\Delta t$ 为层裂振荡周期。

由于自由面粒子速度波形上层裂振荡周期不明显,速度剖面在经历了速度回拉以后的第1个周期回跳幅度很低,约20 m/s,此后速度逐渐振荡衰减。因此,对层裂振荡周期 $\Delta t$ 的判读存在一定的误差,由此计算的层裂片厚度也存在一定的近似。

同样,按照声学近似可以估算层裂对应的拉伸应变率

$$\dot{\epsilon} \approx \frac{u_{\max} - u_{\min}}{|t_{\max} - t_{\min}|} \frac{1}{2c_b}$$

式中: $t_{\max}$ 和 $t_{\min}$ 为速度剖面上 $u_{\max}$ 和 $u_{\min}$ 对应的时刻, $c_b$ 为体波声速。

表1对铜管的层裂参数进行了汇总,其中 $h_e$ 为炸药厚度, $h$ 为圆管壁厚。

表1 层裂数据汇总

Table 1 Summary for experimental spall data of cylindrical OFHC copper

实验编号	$h_e/\text{mm}$	$h/\text{mm}$	$u_{\max}/(\text{m/s})$	$\Delta u/(\text{m/s})$	$\Delta t/\mu\text{s}$	$\sigma_s/\text{GPa}$	$\delta/\text{mm}$	$\dot{\epsilon}/\text{s}^{-1}$
1	9	14	729.2	72.0	0.86	1.90	2.05	$(1.2 \sim 1.4) \times 10^4$
2	9	10	730.7	78.3	0.73	2.07	1.73	$(1.2 \sim 1.4) \times 10^4$
3	9	8	748.0	90.5	0.63	2.39	1.48	$(1.2 \sim 1.4) \times 10^4$

由于3发实验采用的炸药类型和炸药厚度均相同,因此,他们对应的拉伸应变率基本相同,为 $(1.2 \sim 1.4) \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ 。

为便于分析,这里定义相对装药厚度 $h'_e$ 为绝对装药厚度 $h_e$ 与圆管壁厚 $h$ 之比,即 $h'_e = h_e/h$ 。当固定装药厚度 $h_e$ 时,不同的圆管壁厚 $h$ 对应于不同的相对装药厚度 $h'_e$ ,3发实验对应的 $h'_e$ 分别为0.643、0.900和1.125。

由表1可知,3发实验对应的层裂片厚度 $\delta$ 分别为2.05、1.73、1.48 mm。这里引入相对层裂片厚

度  $\delta'$ , 定义  $\delta' = \delta/h = \delta h'_c/h_c$ , 则 3 发实验对应的  $\delta'$  分别为 0.146、0.173、0.185。 $\delta'$  随着  $h'_c$  的增大而增大。这与内爆钢管层裂规律基本一致<sup>[3]</sup>, 见图 4。在文献<sup>[3]</sup>中, 固定圆管厚度, 层裂片厚度随装药厚度的增加而增加; 然而, 当  $h_c$  增加到与  $h$  相当, 即  $h'_c \approx 1.0$  时, 由于最大拉应力区已不在管壁内, 钢管不再发生层裂。本文实验条件下, 实验 3 的  $h'_c$  已超过 1.0, 却仍然发生明显的层裂; 可以预计, 当固定装药时, 即使将铜管壁厚  $h$  继续减小 ( $h'_c > 1.0$  后, 继续增大), 在一定壁厚范围内铜管仍然会产生层裂。由此看来, 内爆加载下圆管发生层裂的临界条件具有明显的材料相关性, 主要与材料的声速相关。无氧铜的声速比 20 钢的声速小, 所以, 当  $h'_c > 1.0$  时, 铜管内壁反射的卸载波仍然在管壁内与来自产物的稀疏波相交, 形成拉应力区。因此, 本文实验条件下要获得铜圆管不层裂的临界条件, 尚需开展更薄管壁条件下的实验研究。

实际上, 除自由面速度测量外, 还同时开展了高能 X 光闪光灯相测量以获得层裂片的瞬时厚度。3 发实验中, 由 X 光相机获得的层裂片厚度分别为 1.48、1.26、1.19 mm, 约为自由面速度测量结果的 72%~80%。这说明由自由面速度剖面确定层裂片厚度存在一定误差。考虑到 X 光照相的分辨率有限, 加之速度测量自身的误差, 2 种方法所得结果的实际差异有望降低。由于介绍 X 光照相结果需要占用较大的篇幅, 对此部分内容, 将另外撰文进行介绍。

根据表 1, 3 发实验的层裂强度分别为 1.90、2.07、2.39 GPa。层裂强度随无氧铜圆管壁的减薄而略有增加。这种规律与自由面粒子速度峰值随铜管壁厚的变化关系一致, 一定程度上反映了无氧铜内冲击波强度随传播距离增加而降低的粘性特性; 同时材料分散性以及实验测量误差也对此有一定影响。

另外, 文献<sup>[6]</sup>中采用平板冲击方法得到 8 GPa 三角波加载下无氧铜的层裂强度为 2.04 GPa, 比本文 8 mm 壁厚下的结果略低; 而在文献<sup>[4]</sup>中, 无氧铜半球在 PBX-9501 高能炸药内爆驱动下, 与起爆点夹角  $50^\circ$  (近似滑移态) 处对应的层裂强度为 2.7 GPa, 比本文采用 RHT-901 炸药获得的结果略高。初步来看, 无氧铜的层裂强度对结构的依赖性不明显, 而与加载脉冲的幅值和宽度有关。由于内爆相当复杂, 已有的层裂数据又十分有限, 因此, 需要开展进一步的实验, 并结合速度剖面测量以外的其他手段 (如损伤分析), 以获得复杂结构和复杂应力对材料层裂特性影响的规律性认识。

## 5 结束语

利用 DISAR 激光测速技术, 获得了滑移内聚爆轰加载下无氧铜圆管层裂的自由面粒子速度剖面, 初步分析了柱壳结构和滑移内爆条件下无氧铜的层裂特性。其结果为进一步将层裂研究拓展到复杂应力和复杂构型奠定了基础。研究表明: (1) 在固定炸药 (类型和厚度) 和改变无氧铜圆管壁厚  $h$  条件下, 层裂片厚度  $\delta$  随圆管壁厚  $h$  的减小而增加; 以圆管壁厚  $h$  为参照进行归一化, 则相对层裂片厚度 ( $\delta/h$ ) 随相对装药厚度 ( $h_c/h$ ) 的增大而增加。这种规律与对 20 钢的研究结果是一致的, 但圆管发生层裂的临界条件, 却显示出明显的材料相关性。(2) 无氧铜的层裂强度随管壁厚度的增加而略有降低, 这一方面与 Taylor 波衰减和无氧铜的粘性有关, 同时, 材料分散性和实验测量误差也对此有一定影响。(3) 初步来看, 无氧铜的层裂强度对结构的依赖性不明显, 而与加载脉冲的幅值和宽度相关。

由于滑移内爆很复杂, 本文中对层裂速度剖面的分析还不够。结合铜管的动态损伤图像进行分析将有助于对速度剖面的解读。限于篇幅, 这部分内容将另外撰文论述。

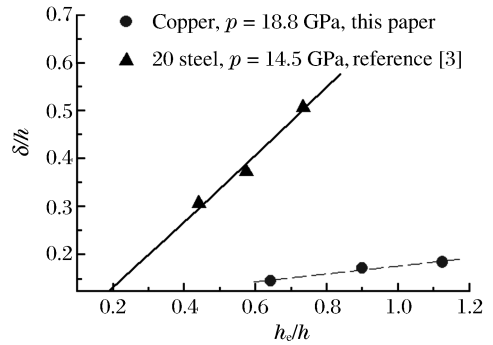


图 4 层裂片厚度与装药厚度关系

Fig. 4 Relation between the thicknesses of spall scabs and high explosive

## 参考文献:

- [1] Rybakov A P. Experimental study of spall-fracture zone[J]. International Journal of Solids and Structures, 2001 (38):5453-5464.
- [2] Иванов А Г. Особенности осесимметричного схождения откольных слоев в стальных цилиндрических оболочках [J]. ПМТФ, 1984(3):125-127.
- [3] 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.
- [4] Cagliostro D J, Warnes R H, Johnson N L, et al. Spall measurements in shock-loaded hemispherical shells from free-surface velocity histories[C]// American Physical Society. Shock Waves in Condensed Matter. Monterey, California; Elsevier Science Publishers B V, 1987:367-370.
- [5] WENG Ji-dong, TAN Hua, HU Shao-lou, et al. New all-fiber velocimeter[J]. Review of Scientific Instruments, 2005(76):093301.
- [6] Koller D D, Hixson R S, Gray III, et al. Influence of shock-wave profile shape on dynamically induced damage in high-purity copper[J]. Journal of Applied Physics, 2005(98):103518.

## Spall of cylindrical copper by converging sliding detonation

LI Xue-mei\*, WANG Xiao-song, WANG Peng-lai, LU Min, JIA Lu-feng

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

**Abstract:** The dynamic tensile fracture of cylindrical OFHC copper subjected to converging waves induced by sliding detonation was experimentally investigated. The inner surface (or free-surface) velocity profiles were measured by the displacement interferometer system for any reflector (DISAR). Analysis to velocity profiles gives some lights on the spalling characteristics of copper. Firstly, if the thickness  $\delta$  of the spall scab and the high explosive (HE) thickness  $h_e$  are both divided by the wall thickness  $h$  of OFHC copper, it follows that the relative thickness  $\delta/h$  of the spall scab increases with the relative HE thickness  $h_e/h$ . This accords with the research results of the steel cylindrical shell under the similar loading, however, the critical value of  $h_e/h$  for shell spalling is dependent on its material. Secondly, by comparing with other literatures, it can be seen elementarily that the spall strength of OFHC copper depends weakly on the geometric structure but mainly on the pressure and duration of impact loading. Lastly, the spall strength of OFHC copper is slightly lowered when its thickness increases, where material viscosity and Taylor triangular wave attenuation both contribute, also the dispersion of material.

**Key words:** mechanics of explosion; spall; DISAR; OFHC copper; free-surface velocity; converging sliding detonation

\* Corresponding author: LI Xue-mei

E-mail address: lxm023@yahoo.com.cn

Telephone: 86-816-2485107