

文章编号: 1001-1455(2007)02-0097-06

# 爆轰波对碰驱动下加环紫铜圆管对碰区 变形特性研究\*

张崇玉, 谷岩, 李庆忠, 华劲松, 孙学林, 彭其先, 张振涛

(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实验室, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 针对爆轰波对碰驱动下金属圆管对碰区易出现过早断裂的问题, 以加环紫铜(T2)圆管作为研究对象, 利用高速分幅摄影、脉冲 X 光照相、VISAR 三种测试技术, 对其在爆轰波对碰驱动下的变形及破坏过程进行了观测。实验结果显示: 在紫铜圆管对碰部位增加保护环结构, 可以有效推迟该部位圆管的破裂时间。但同时也发现: 加保护环后圆管对碰区会出现射流状超前突起现象。由高速摄影结果与 X 光照相结果对比分析证实: 射流状超前突起物质为圆管表面微喷颗粒与空气冲击波混合形成的雾状结构。另外, 采用 DYNA3D 程序对实验模型进行了模拟, 计算结果与实验结果符合较好。最后, 利用 DYNA3D 程序就保护环倒角变化对金属圆管对碰区壳体破裂的影响特征进行了初步分析。

**关键词:** 固体力学; 变形特性; 爆轰波对碰; 紫铜圆管; 保护环

**中图分类号:** O346.1

**国标学科代码:** 130 · 1545

**文献标志码:** A

## 1 引言

金属圆管作为一种轴对称结构, 其动载行为在国防、工业等领域有着非常广泛的应用背景, 一直是人们关注的热点<sup>[1-4]</sup>。

金属圆管在内装炸药爆轰驱动下的动载行为研究大多集中于单端起爆的情况, 对于两端起爆情况下金属圆管膨胀断裂特性的研究则较少。近年来, 陈军等<sup>[5]</sup>、张世文等<sup>[6]</sup>、张崇玉等<sup>[7]</sup>先后对爆轰波对碰驱动下金属圆管的膨胀破裂特性进行了实验和数值模拟研究。他们的研究结果均表明: 爆轰波对碰区金属圆管膨胀速度大于邻近部位圆管的膨胀速度, 对碰区壳体出现超前突起鼓包, 而且在膨胀过程中该部位壳体易发生提前断裂。M. Singh 等<sup>[8]</sup>在研究铜、铝柱壳在高应变率下的动态拉伸变形及断裂规律时也发现了类似的实验现象。针对金属圆管对碰区易出现过早断裂的问题, 王德生等<sup>[9]</sup>对此曾进行过专门的研究。为了推迟圆管对碰区的断裂时间, 他们在金属圆管内部对碰部位增加不同厚度、不同材料的保护环, 以考察保护环质量(线质量: 壁厚×密度)对对碰区壳体破裂时间的影响。实验结果显示: 在金属圆管对碰区增加适当保护环来推迟其破裂时间是可行的。但他们没有给出如何针对不同材料、不同尺寸的金属圆管设计适当保护环的方法。在实际工程应用中, 若完全依靠实验或经验来设计适当保护环结构显然是不可取的。能否利用数值模拟手段针对不同金属圆管快捷有效地设计适当保护环结构, 是工程设计中非常关心的问题。

本文中拟选择紫铜圆管作为研究对象, 首先利用 DYNA3D 程序设计适当结构的保护环及实验装置, 然后采用高速分幅摄影、脉冲 X 光照相、VISAR 测速三种测试手段, 对爆轰波对碰驱动下加环紫铜圆管的膨胀变形过程进行观测和测试。将得到的实验结果与数值计算结果进行比较, 校验数值模拟计算的有效性与合理性。最后, 利用 DYNA3D 程序对采用不同保护环角度的计算模型进行计算, 初步分析保护环倒角变化对金属圆管对碰部位壳体破裂的影响特征。

\* 收稿日期: 2005-11-07; 修回日期: 2006-04-03

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术基金项目(20050101)

作者简介: 张崇玉(1975—), 男, 硕士, 助理研究员。

## 2 实验装置及测试技术

### 2.1 实验装置

实验装置如图1所示。圆管材料为紫铜 T2, 内径 32 mm, 壁厚 2 mm, 长 130 mm; 内装炸药成份为 RHT-901, 药柱长 100 mm; 保护环材料为 LY12 铝, 壁厚 3 mm, 两端面加工成 30°倒角。整个实验装置放在支撑底盘上。为了与加环紫铜圆管的实验结果进行比较, 实验还进行了不加环紫铜圆管的对比实验, 实验装置与图1类似, 仅去掉中间部位的保护环。

### 2.2 高速分幅摄影技术

实验采用前照明高速分幅摄影技术来记录紫铜圆管的膨胀变形及破裂过程, 实验布局示意图如图2所示。高速相机为 FJZ-250 转镜式高速分幅相机, 相机转速设置为  $2.4 \times 10^5$  r/min, 幅间距为  $0.5 \mu\text{s}$ 。

### 2.3 脉冲 X 光照相技术

为消除爆轰产物泄漏以及其他因素对圆管壳体轮廓观测的影响, 实验还采用 2 台脉冲 X 光机从不同角度、不同时刻对实验装置进行拍摄, 以观察紫铜圆管的膨胀变形轮廓。

### 2.4 VISAR 测速技术

为获得铜管的膨胀速度, 在进行高速分幅摄影实验的同时采用 VISAR 对紫铜圆管特征部位的膨胀运动速度进行测试。实验时, 对准紫铜圆管中间部位(对应爆轰波对碰部位)和轴向距中间部位 20 mm 处各放置 1 个 VISAR 探头, 两个 VISAR 探头呈 180°布置(见图2)。为增加实验数据可靠性, 每个探头均采用 316 和 392 m/s 两种条纹常数来记录同一点的速度历史。

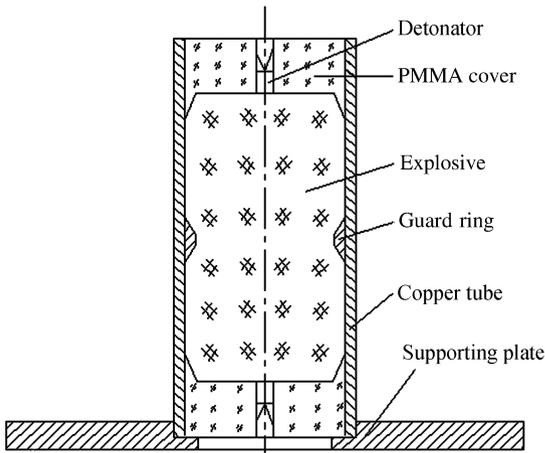


图1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic of experimental setup

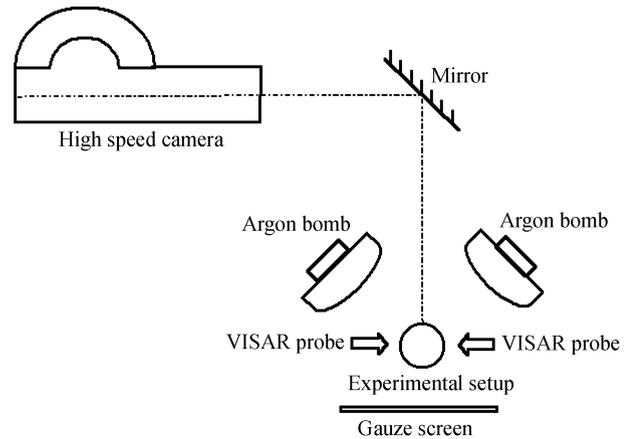


图2 高速摄影与 VISAR 实验布局图

Fig.2 Layout of high speed photography and VISAR

## 3 实验结果

图3为高速分幅相机拍摄到的、不加环紫铜圆管和加环紫铜圆管在爆轰波对碰驱动下的膨胀变形及破坏图像(图中加环圆管表面黑斑为材料缺陷, 有爆轰产物逸出)。由图可见, 无保护环的紫铜圆管, 在爆轰波对碰驱动下对碰区出现鼓突。加环后, 圆管对碰区的变形明显不同, 由于保护环的阻滞作用, 加环紫铜圆管的对碰区运动变慢, 相对邻近壳体呈凹陷形状。但圆管对碰区依然有超前突起现象, 呈射流状。由高速分幅摄影图像无法判断射流状超前突起的物质构成, 后面将结合脉冲 X 光照相结果进行分析。

对高速分幅摄影照片进行处理后, 得到了加环与不加环情况下紫铜圆管对碰区的破裂时刻(以产物泄漏作为圆管破裂的标准): 不加保护环紫铜圆管对碰部位破裂时间为  $14 \mu\text{s}$ (以雷管起爆时刻为时间零时, 下同), 加保护环后紫铜圆管对碰区破裂时间为  $18 \mu\text{s}$ 。可见, 在圆管对碰部位增加适当保护环结构推迟圆管的破裂时间的措施是可行的, 这也证实了文献[9]中的结论。

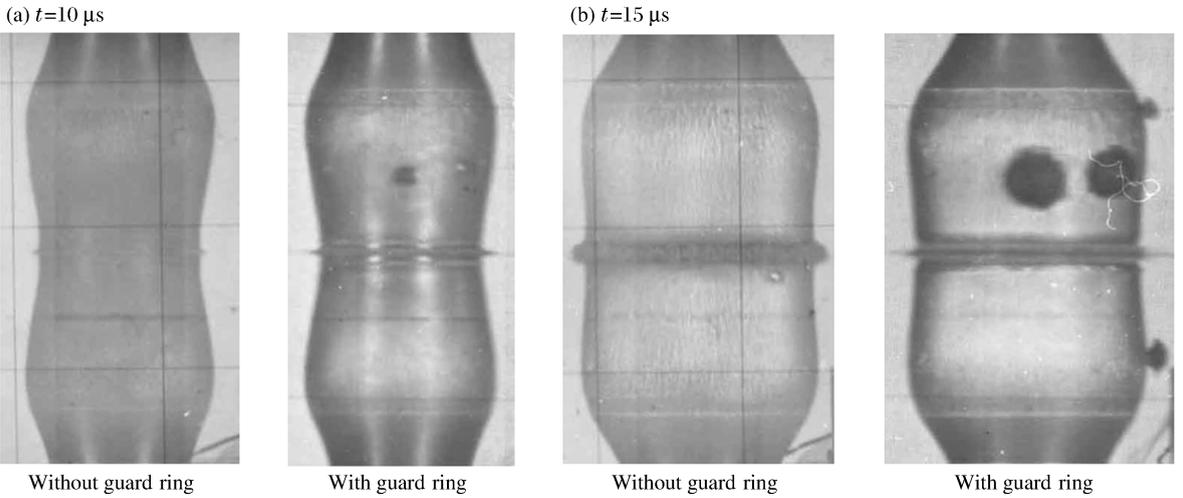


图 3 紫铜圆管在爆轰波对碰驱动下的膨胀变形图像

Fig. 3 Photos of copper tube taken by high speed frame camera

图 4 为加环紫铜圆管在爆轰波对碰驱动下壳体变形轮廓的 X 光照片,其中图 4(a)为采用 2 台 X-II 型脉冲 X 光机(二极管电压约 1 MeV)得到的实验图片。由图可以发现,加环紫铜圆管对碰区呈凹陷形状,没有超前突起现象,这与高速分幅摄影照相(见图 3)观察到的实验现象明显不符。这表明射流状超前突起物质的密度较低,无法在 X 光底片上留下阴影。为进一步确定射流状突起的物质成分,又采用 2 台能量较低的软管 X 光机(一台 450S,另一台 300S,二极管电压分别约 0.45 和 0.3 MeV)对加环紫铜圆管装置进行了重复实验,实验结果见图 4(b)所示。结果发现,在爆轰波对碰的早期,紫铜圆管对碰区有喷射状物质出现(见图 4(b)中  $t=9.8 \mu\text{s}$  时刻图像),但比较模糊;随着时间的推移,该现象减弱,变得肉眼几乎不可见(见图 4(b)中  $t=14.0 \mu\text{s}$  时刻图像)。这表明射流状超前突起中包含呈离散状的较高密度物质,且该物质存在扩散减弱的迹象。综合高速分幅摄影结果和脉冲 X 光照相结果,可以推断:射流状超前突起不是圆管的壳体轮廓、爆轰产物或射流等其他物质,而是由紫铜圆管表面的微喷颗粒与空气冲击波混合而形成的雾状结构。上述分析仅是对射流状超前突起构成物质的初步推断,其成因和形成机理还有待于通过进一步的实验和数值模拟等手段得到更深入的认识。

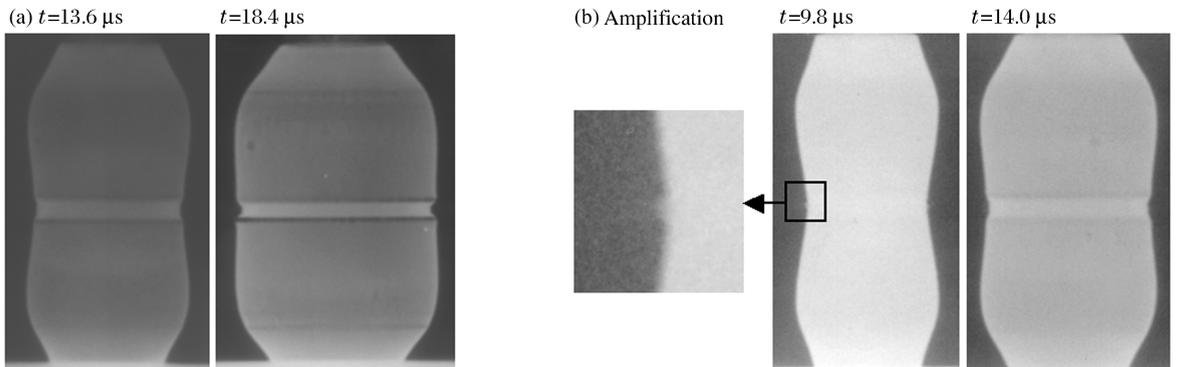


图 4 加环紫铜圆管的 X 光照相图像

Fig. 4 Images of copper tube with guard ring by pulsed X-ray photography

## 4 数值模拟

### 4.1 材料参数

采用三维有限元程序 DYNA3D 对实验模型进行模拟计算。计算中,紫铜 T2 和 LY12 铝的本构关系采用流体弹塑性材料模型和 Gruneisen 状态方程描述,紫铜 T2 的主要材料参数分别为: $\rho_0 = 8.96$

$g/cm^3, G=46.4 \text{ GPa}, Y=0.12 \text{ GPa}, c_0=3.958 \text{ km/s}, \lambda=1.497$ ; LY12 铝的主要材料参数分别为:  $\rho_0=2.79 \text{ g/cm}^3, G=27.6 \text{ GPa}, Y=0.69 \text{ GPa}, c_0=5.200 \text{ km/s}, \lambda=1.400$ 。RHT-901 炸药采用高能炸药燃烧材料模型和 JWL 状态方程描述,其主要材料参数分别为:  $\rho_0=1.71 \text{ g/cm}^3, D_{CJ}=7.98 \text{ km/s}, p_{CJ}=29.5 \text{ GPa}, A=524.2 \text{ GPa}, B=7.68 \text{ GPa}, R_1=4.2, R_2=1.1, \omega=0.34, E_0=8.5 \text{ kJ/cm}^3$ 。

### 4.2 计算结果与实验结果比较

图 5 为加环紫铜圆管非对碰部位(距对碰部位 20 mm 处)膨胀半径、膨胀速度的计算结果与实验结果的比较。由于对碰区有射流状物质掩盖了圆管的膨胀轮廓,高速相机和 VISAR 无法获得对碰部位的膨胀半径和膨胀速度,因而只能进行非对碰部位的计算结果与实验结果的比较。图 6 为紫铜圆管膨胀轮廓的 X 光底片图像处理结果与计算结果的比较。

由图 5~6 可见,计算结果与实验结果符合得非常好,实验数据与计算曲线基本重合。这表明 DYAN3D 程序能够较好地模拟加环紫铜圆管在爆轰波对碰驱动下的膨胀变形过程。同时也说明,利用 DYAN3D 程序针对不同材料、不同尺寸的金属圆管设计适当保护环结构是可行的。

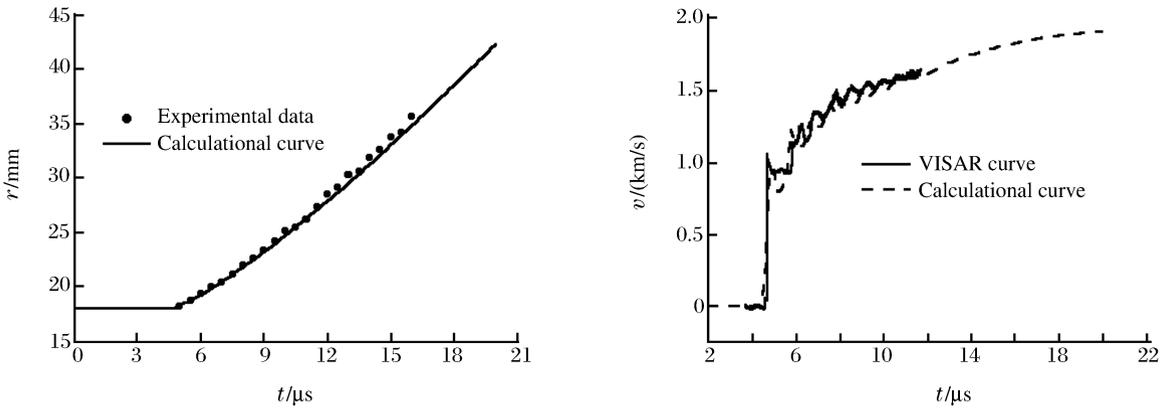


图 5 紫铜圆管非对碰部位的实验结果与计算结果的比较

Fig. 5 Comparison of calculated result and experimental result of copper tube with guard ring

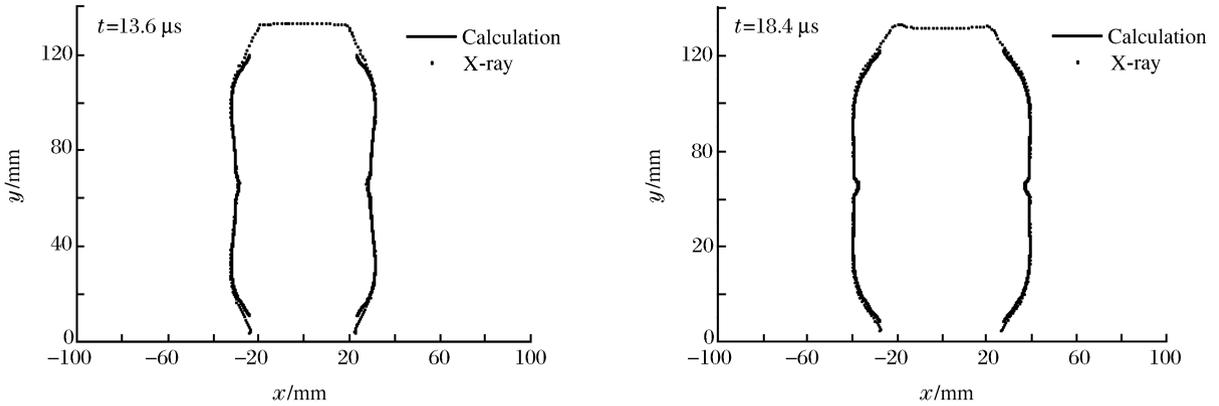


图 6 紫铜圆管膨胀轮廓的实验结果与计算结果的比较

Fig. 6 Comparison of calculated outline and experimental outline of copper tube with guard ring

### 4.3 保护环倒角变化对金属圆管对碰区壳体破裂的影响特征

为考察保护环倒角变化对金属圆管对碰区壳体破裂的影响,在计算中固定保护环壁厚  $d$  和内柱面高度  $l$  不变,仅改变保护环的倒角  $\alpha$ ,局部计算模型如图 7(a)所示。

增加保护环后,对碰区壳体首先从中间部位断裂(图 7(a)中  $B$  点)的可能性很小,而从保护环倒角根部(图 7(a)中  $A$  点)首先断裂的可能性比较大。这是因为增加保护环后,对碰区质量增大,圆管膨胀速度降低,与邻近部位圆管膨胀速度存在速度差。由于速度差的存在, $A$  点部位管壁在向外膨胀过程中

必然会受到拉伸力的作用,在拉伸力的持续作用下,A 部位管壁变得越来越薄,最终在该部位首先出现破裂。X 光照相结果可以证实这种观点(见图 4(a))。

图 7(b)给出了不同保护环倒角角度对保护环倒角根部壳体单元(A 点)有效塑性应变历史的影响。由图可见,在圆管膨胀变形的后期,随保护环倒角角度的增大,保护环倒角根部壳体单元的有效塑性应变增大。这说明保护环倒角越大,保护环倒角根部壳体出现断裂的时间越早。这是因为保护环倒角增大后,A 点附近的质量变化梯度增大,在爆轰产物压力相差不大的情况下,A 点两侧壳体的膨胀速度差增大,A 点所受的拉伸力增加,因而 A 点部位壳体断裂时间会提前。上述数值计算结果以及分析表明:保护环倒角增大对推迟对碰区圆管的破裂时间是不利的。因此设计保护环倒角角度时,在机械加工以及实验装置结构允许的情况下,应尽量选择较小的倒角角度。

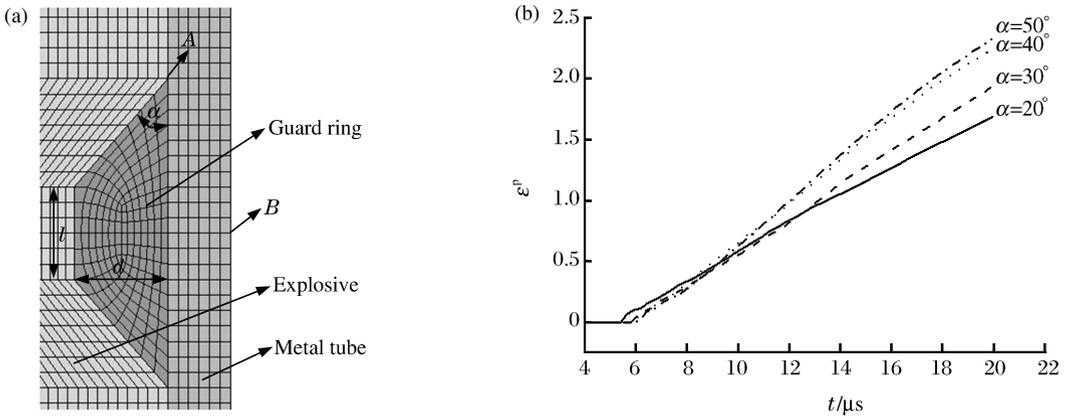


图 7 保护环倒角对紫铜圆管对碰区有效塑性应变的影响

Fig. 7 The influence of guard ring's fillet on effective plastic strain of collision region of copper tube

## 5 结 论

通过对爆轰波对碰驱动下加环紫铜圆管对碰区变形特性的实验研究和数值模拟分析,可以得到以下初步认识:

(1)在紫铜圆管对碰区增加适当保护环可以有效推迟对碰区圆管的破裂时间。

(2)加环后紫铜圆管对碰区会出现射流状超前突起现象,由高速分幅摄影结果和脉冲 X 光照相结果对比分析证实:射流状超前突起为圆管表面的微喷射颗粒和空气冲击波混合形成的雾状结构。

(3)利用 DYNA3D 程序针对不同材料、不同尺寸的金属圆管设计适当保护环是可行的,这为实际工程应用中保护环的优化设计提供了一种快捷有效的方法。

(4)由数值模拟发现,保护环倒角对金属圆管对碰区的破裂有一定的影响。保护环倒角增大,圆管对碰区出现断裂的时间也会随之提前。

对于韩长生、汤铁钢对实验工作的指导,张世文、于锦泉、金山、王健、王慧、谷新蓉、王晓、刘俊等在实验测试中的协助和支持,张晓琳在图像处理工作中给予的帮助,在此一并表示感谢。

## 参考文献:

- [1] Taylor G I. Fragmentation of tubular bombs; Science papers of Sir G I Taylor[M]. London: Cambridge University Press, 1963:387-390.
- [2] Hoggatt C R, Recht R F. Fracture behavior of tubular bombs[J]. Journal of Physics, 1968,39(3):1856-1862.
- [3] 胡八一,董庆东,韩长生,等. 内部爆轰加载下的钢管膨胀断裂研究[J]. 爆炸与冲击,1993,13(1):49-54.  
HU Ba-yi, DONG Qing-dong, HAN Chang-sheng, et al. Studies of expansion and fracture of explosive-filled steel cylinders[J]. Explosion and Shock Waves, 1993,13(1):49-54.
- [4] 汤铁钢,谷岩,李庆忠,等. 爆轰加载下金属柱壳膨胀破裂过程研究[J]. 爆炸与冲击,2003,23(6):529-533.

TANG Tie-gang, GU Yan, LI Qing-zhong, et al. Expanding fracture of steel cylinder shell by detonation driving [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(6):529-533.

- [5] 陈军, 孙承伟, 蒲正美, 等. 爆轰波对碰区产物驱动金属圆管的研究[J]. *爆炸与冲击*, 2003, 23(5):442-447.  
CHEN Jun, SUN Cheng-wei, PU Zheng-mei, et al. Expansion of metallic tubes by detonation product behind two head-on colliding detonation waves[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(5):442-447.
- [6] 张世文, 华劲松, 刘仓理, 等. 金属圆管内爆轰波相互作用效应的数值模拟研究[J]. *爆炸与冲击*, 2004, 24(3):219-225.  
ZHANG Shi-wen, HUA Jin-song, LIU Cang-li, et al. A Numerical simulation of the metallic tube expansion induced by inside head-on hitting two detonation waves[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2004, 24(3):219-225.
- [7] 张崇玉, 谷岩, 张世文, 等. 爆轰波对碰驱动下金属圆管膨胀变形特性研究[J]. *爆炸与冲击*, 2005, 25(3):222-226.  
ZHANG Chong-yu, GU Yan, ZHANG Shi-wen, et al. Study on expanding characteristic of steel tube driven by two head-on colliding detonation waves[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(3):222-226.
- [8] Singh M, Suneja H R, Bola M S, et al. Dynamic Tensile deformation and fracture of metal cylinders at high strain rates[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2002, 27:939-954.
- [9] 王德生, 韩长生, 马松合, 等. 推迟内装炸药爆轰作用下金属圆管断裂时间的研究[J]. *爆炸与冲击*, 1997, 17(增刊):360-364.  
WANG De-sheng, HAN Chang-sheng, MA Song-he, et al. On studies of delaying fracture time of cylindrical metallic tubes under detonation of inner explosive[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1997, 17(suppl):360-364.

## Study on deformation characteristics of collision region of copper tube with guard ring driven by two head-on colliding detonation waves

ZHANG Chong-yu<sup>\*</sup>, GU Yan, LI Qing-zhong, HUA Jin-song,  
SUN Xue-lin, PENG Qi-xian, ZHANG Zhen-tao

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

**Abstract:** The deformation characteristics of copper tube with guard ring under two head-on collision detonation waves were experimentally researched. High-speed frame photography, pulsed X-ray radiography and VISAR interferometer were employed to record the expanding process, radius history and velocity history of the copper tube with guard ring. Experimental results show that guard ring can postpone the collision region shell to rupture. The jet-shaped protuberance was found on collision region of copper tube with guard ring. The jet-shaped protuberance consisted of mass ejection from free surface of copper tube and air shock. The DYNA3D code was utilized to simulate the expanding process of copper tube with guard ring. The calculated results and the experimental results are coincident. The LS-DYNA3D code was used to analyze the influence of guard ring's fillet on deformation characteristics of metal tube.

**Key words:** solid mechanics; deformation characteristics; two head-on collision detonation waves; copper tube; guard ring

\* Corresponding author: ZHANG Chong-yu  
E-mail address: zcy\_7718@yahoo.com.cn  
Telephone: 86-816-2493874