

文章编号: 1001-1455(2004)02-0097-11

# 金属柱壳在爆炸加载断裂中的单旋现象\*

胡海波, 汤铁钢, 胡八一, 王德生, 韩长生

(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: 系列实验结果表明, 在较强的滑移爆轰加载下, 许多金属材料的旋转柱壳会呈现一种奇特的单旋剪切失稳破坏模式——受驱动壳壁结构上众多剪切滑移带及断口取向一致化, 在 $45^\circ$ 和 $135^\circ$ 两族剪切带中, 出现一族占优的现象。通过高速分幅和X光照相对剪切裂纹在壳壁内、外表的生成发展图像的记录和碎片样品回收, 结合过程应力分析, 对微剪切断裂发展过程中环向和纵向关联的可能机制进行了分析讨论, 但疑点仍较多。在分析柱壳的高应变率失稳行为时, 对于与加载条件及几何构形紧密耦合的材料动载剪切强度、各向异性性质所扮演的角色需要进一步认识。剪切断裂的单旋与聚能罩内层无破坏的射流整体旋转现象表现方式和程度虽有差异, 但可能有着共同本质, 值得深入探索。

关键词: 固体力学; 单旋; 爆炸加载; 金属柱壳; 断裂模式; 剪切胞元

中图分类号: O346.1 国标学科代码: 130°1545 文献标志码: A

## 1 引言

在本文中, 研究对称滑移爆轰加载下, 金属柱壳壳壁中处于环向压应力的区域内, 材料断裂失稳的起源、宏观剪切断裂面方向的选择机制及其对壳壁整体断裂行为的影响。

旋转柱壳是战斗部(各类杀爆弹、聚能罩、自锻弹丸)典型结构的代表。金属壳壁在爆炸膨胀断裂和高速压塌过程中的表现及其效能会受到被驱动飞层材料高速变形及其不稳定性行为(失稳、断裂、旋转)的影响。这些行为主要受炸药种类、加载方式、金属材料性能及结构的尺寸和形状特征, 即加载条件、材料参数及几何因素的影响。随这些参数及其组合的变化, 现象的过程和结果会呈现丰富的变化。对其中所蕴涵规律的探求, 吸引了各国科学家的持续兴趣。G. I. Taylor<sup>[1]</sup>讨论了爆炸膨胀断裂判据: 拉伸型裂纹从外表起源, 沿径向朝内壁方向发展, 并随着作用于内壁上的爆轰产物压力下降, 最终贯穿从环向压应力状态变化到环向拉应力状态的壳壁内层, 形成贯穿断裂。该模型可较好描述低爆压下柱壳的断裂行为。C. R. Hoggatt 等<sup>[2]</sup>讨论了处于环向压应力状态(Taylor 模型假定不会断裂)的壳壁内层中的剪切断裂机制。N. F. Mott<sup>[3]</sup>、F. Olive 等<sup>[4]</sup>、D. E. Grady<sup>[5]</sup>和 A. Г. ИВАНОВ<sup>[6]</sup>、S. T. S. Al-Hassani<sup>[7]</sup>分别研究了球柱壳断裂的碎片尺度分布、应变率效应及断裂过程的能耗机制等。在本文中关注的断裂模式及其起源方面, 主要有以柱形内爆加载为手段的 M. A. Meyers 和 V. F. Nestenko 等的系列工作<sup>[8~10]</sup>。在国内, 基于实际应用的需要和精密物理实验的要求, 开展了系列研究, 如王德生<sup>[11]</sup>、胡海波<sup>[12]</sup>、胡八一<sup>[13]</sup>、汤铁钢<sup>[14]</sup>等的研究。

在本文中, 主要基于这些实验中的观察进行讨论, 但仅限于对现象事实的描述和一些初步分析, 更多地是提出一些问题, 希望有兴趣的研究人员继续做工作。

## 2 研究内容和实验方法

实验采用内装炸药的金属圆柱壳和内衬金属圆柱壳的空心炸药柱两类实验装置。从一端起爆的膨胀柱壳要有充分的长度, 以利用沿爆轰传播方向的上、下游(柱壳侧面某一母线上)处于不同膨胀应变及

\* 收稿日期: 2003-07-07; 修回日期: 2004-02-26

基金项目: 中国工程物理研究院预研基金项目(20010101)

作者简介: 胡海波(1965—), 男, 博士, 研究员。

断裂发展状态的各被观测点之间断裂行为表现的准“定常”性;从两端起爆的实验利用爆轰对碰压力,研究在更高内部压力及应变率下的断裂行为。向内驱动实验则相当于在前一类型实验的过程中,排除了壳壁中环向应力拉伸作用区,使受试材料始终处于环向压应力状态的一类“理想”实验。

被研究材料涉及 WTG05 钨合金、HR2 钢、TC4、LY12 等和不同条件热处理的 45 钢<sup>[11~14]</sup>。为调整加载强度或应变率,除采用不同的受试壳壁厚度 1.2~12 mm 外,还用到了不同尺寸  $\varnothing 24$ 、32、50、100 mm 的 JOB-9003、JO-9195、T/R、TNT 炸药。实验测试以高速分幅照相为主,辅以多脉冲 X 光照相,对壳壁内层剪切带滑移错动进行测试。对断裂碎片进行了软回收和宏、细观分析。

### 3 实验结果及其分析

几种受试金属材料,在不同壁厚、主炸药品种和实验构形(内、外爆方式及系统特性尺寸关系)以及不同(一端或两端同时)的起爆方式下,破碎过程的快慢以及断裂机制、碎块的尺度等表现极其多样化,部分结果归纳在表 1 中。观察到了包括从典型的 Taylor 拉伸型断裂到典型贯穿剪切的不同模式断裂。实验中层裂现象无明显表现,碎片长度以单旋的最长,纯剪的次之。

单旋式的贯穿剪切断裂占了相当比例,是最特异和重要的一种类别,将重点讨论。

表 1 几种受试材料的实验记录

Table 1 The test data of some testing materials

材 料	厚度 $\delta/\text{mm}$	直径 /mm	炸药	膨胀速度 /(km/s)	初始裂纹 $\epsilon_i/(\%)$	产物逸出 $\epsilon_t/(\%)$	断裂类型
TC4	8	32	T/R	1.18	20	100	疑似单剪左旋
TC4	8	32	JO-9159	1.32	19	116	单剪右旋
45 钢	8	32	T/R	1.03	44	90	双向纯剪
45 钢	8	32	JO-9159	1.10	30	110	拉剪混合
45 钢 <sup>1)</sup>	8	32	JO-9159	1.12	30	95	双向纯剪
45 钢	3.6	32	JO-9159	1.80	56	120	单剪右旋
45 钢 <sup>1)</sup>	3.6	32	JO-9159	1.60	52	123	双向纯剪
45 钢	11	100	T/R	1.33	28	> 60	双向纯剪
WTG05	8	32	JO-9159	~1.00	~10		纯拉伸型
WTG05	3.6	32	JO-9159	~1.10	~20	~70	拉剪混合
45 钢	2.4	24	JO-9159	两端起爆			单剪右旋
HR2	5	50	TNT	向内驱动	~16	~36 <sup>2)</sup>	单剪右旋
LY12	5	50	TNT	向内驱动			单剪右旋

1) 表示 860 °C 油淬, 540 °C 回火热处理; 2) 表示 X 光照相记录可识别的  $\epsilon_t$  值。

#### 3.1 过程应力分析

因滑移爆轰加载下层裂不是断裂现象的主要机制,分析中可忽略爆轰在壳壁中引发的入射及反射波作用。壳壁中生成的入射及反射波作用的早期阶段结束后的动载过程中,壳壁紧邻炸药一侧受到爆轰产物径向压力  $p$  的作用,而另一侧对应为自由面,压力可视为 0。在爆炸膨胀时,柱壳壁中环向应力外层为拉,内层为压,两区分界随内部爆轰产物压力下降向内移动<sup>[1]</sup>;柱壳受爆轰向内驱动压缩时,壳壁内环向始终保持压应力。壳壁中具体材料微元上由径向应力和环向应力决定的剪切应力与径向夹角在 45° 和 135° 的方向上最大,在其幅值超过特定阈值时,剪切失稳随即可能发生。

解析及模拟计算的结果<sup>[14]</sup>表明:无论炸药在内在外,壳壁向外膨胀,还是向内压缩,柱壳内壁面附近材料微元上的剪应力总是比其外部层面中的大,幅值可能接近或略超过材料的静态抗剪强度。模拟计算还表明,壳壁中剪应力幅值及其分布会随材料性能(本构及参数)不同而有所变化。

定性上看,一旦某微元处剪切强度超过当地抗剪能力,或由于任何材料因素的薄弱点(夹杂、晶界、表面形状),热塑剪切失稳便可启动、发展,生成剪切带。壳壁内部层面中同样可能存在这样的点,但在四周无缺陷介质的约束下,相对进一步失稳倾向受到限制;对内壁附近的微元,不只是当地剪应力大,可

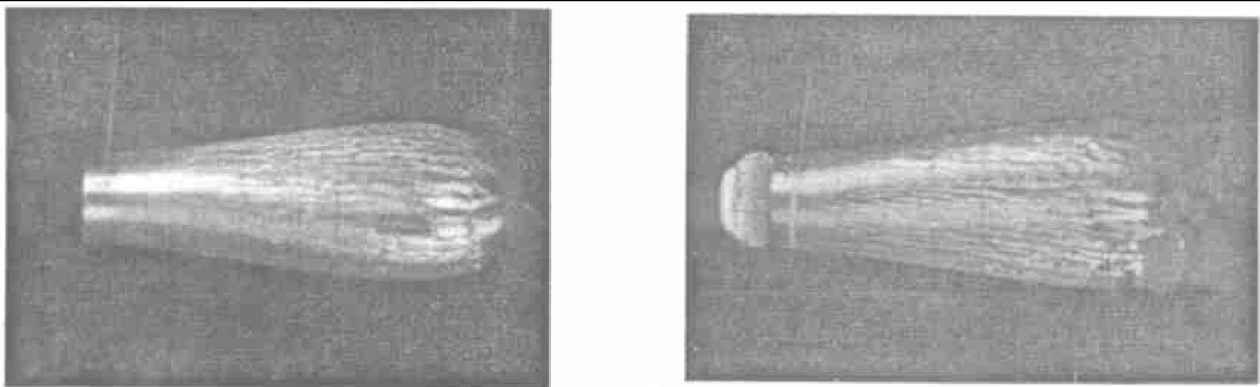
能先失稳,更重要的是该局部处在对剪切滑移几乎无限制的区域。这些剪切带的起源先后和剪切失稳方向选择受到哪些因素制约是关注的核心。

壳壁中环向压应力区内,最大剪应力面被导向和限制在与径向夹角为  $45^\circ$  和  $135^\circ$  的方向上,这成为主导断裂模式发展的关键。这两方向数学上是等权的,任一剪切带随机启动,取向结果或是  $45^\circ$ ,或是  $135^\circ$ ,各 50% 的概率。一般认为大量的碎片裂口方向统计的结果将支持这样的平衡,但在作者完成的系列试验中,结果就出现了偏离,上述的数学预期反而成了特例。看来原有认识并未穷尽所有,甚至可能是决定性的影响因素。

### 3.2 TC4 宏观动态过程图像

因单旋剪切断裂表现典型,而最先被关注的是 TC4 材料<sup>[15~16]</sup>。

图 1 给出了两组 TC4 柱壳的爆炸膨胀断裂过程图像。拍摄时照明用光相对柱壳轴线上、下是基本对称的。画面上的主要特征是较密集的纵向裂纹,其从动态光学分辨率下最早可识别的膨胀应变段 ( $\epsilon \approx 20\%$ ) 开始出现,几乎按直线延续、伸长,直至产物逸出的壳壁贯穿断裂时刻 ( $\epsilon \approx 100\% \sim 120\%$ )。从画面上可识别的所有宏观断口均是剪切断裂,且可看到滑移错动开的剪切面,甚至可尝试测定相邻滑移面的相对运动速度(如图 1(a)中约 300 m/s),对应  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  剪切带宽度,剪切应变率可达  $10^8 \text{s}^{-1}$ <sup>[12]</sup>。画面上过程的特异之处是每发实验上出现的或是全部一致与径向呈  $45^\circ$  的同族剪切断口,或全属与径向夹角  $135^\circ$  的另一族。在以装置轴线分界的上下两侧,画面的不对称性随断裂应变增大变得明显:其中一侧(图 1(a)上半部)上的滑移错开面基本正对观察者视线(相机光路)方向,在画面视场中顺序展开,能大致地看到新生成的剪切断裂面的宽度;另一侧上的滑移错动面的法线则接近垂直于观察者视线,故看到的仅是滑移断口“侧视”窄窄的阴影线。且这样的不对称性特征因剪切带选向不同,在图 1(a)、(b)两实验照片系列中,上、下视觉特征互相易位。



(a) 爆炸膨胀断裂—右手单旋

(b) 爆炸膨胀断裂—左手单旋

(a) Exploding expanding fracture—right simple rotating

(b) Exploding expanding fracture—left simple rotating

图 1 实验 TC4 柱壳的爆炸膨胀断裂过程图像

Fig. 1 The process photo of TC4 shell under explosive loading

### 3.3 TC4 碎片宏观形貌特征

回收样品分析很好地支持了前述的现象过程观测。图 2 的照片上的长条碎片呈单旋贯穿剪切断裂特征,纵向长度达数十毫米,宽度仅  $3 \sim 5 \text{mm}$ 。碎片的内外表基本完整,而由与柱壳内外表面几乎呈  $45^\circ$  夹角的同族剪切面滑移生成的两侧宏观断口,表面色泽发蓝(在图 1 的彩色动态画面上呈高反射率金属光泽)。这与剪切面浅表的瞬时高温和随后其与碎片内部金属的热传导“淬火”有关。碎片上来自原柱壳外表面的局部的色泽与初始状态及动态照片上的差别不大,只偶尔有少数不大的剪切裂口;碎片上残留的柱壳内表面局部的色泽则与两侧断口面的相近,表明同样经历了高温,不过其机制可能与侧表的不同。在内表上可观察到较密集的细、微裂切带错动形成的小台阶或裂口,每一条在纵向上延续距离也很短,相互间似无固定的排列分布规律,但剪切裂口方向均与宏观断口方向一致。检查碎片与轴向垂直的横向断裂端面,发现其中许多是在回收过程中折断的,部分还未彻底脱离开,说明动态过程中横向断裂

未充分发展。将各类实验不同断裂模式的碎片长度作比较,可发现极度延伸的纵向长度特征是单旋断裂模式的典型特征之一。



(a) 断裂碎片实物照片

(a) The photo of fragments

(b) 外表及剪切断面外观放大

(b) The outside of shell and the shell fracture surface

图2 TC4柱壳呈剪切贯穿断裂特征的膨胀断裂碎片

Fig.2 The fragments of expanding TC4 shell with shear characteristic

### 3.4 剪切失稳及断裂形貌的微观分析

在TC4对回收样品进行SEM观察时发现:两宏观剪切断面间包含了多条内表浅层微细剪切带,且其方向选择也明显地与宏观剪切断面方向一致。从表1不同材料样品的分析结果可以看出,大量微细剪切带取向的严格一致性是单旋表现的一个主要方面。

在众多的抽样中偶尔能找到两族剪切带相互正交交汇的典型图像,见图3(e)、(f)。其中被错动离开原走向的一条与形成宏观断口的一族显然是“异族”。在同与之正交的另一条作用后,该方向继续滑移被抑制,中止了发展,中止前滑移的距离约100 μm。与众多方向一致的宏观及微细剪切带相比,这样的微细剪切带出现概率极小。似乎偶而有个别“异类”剪切带启动,也在其远未形成宏观断口前,被抑制而“淘汰”了。

大量源自内壁区的随机失稳滑移、微剪切带无论是从入射冲击波到达时刻起始,还是在环向应变发展到一定程度时才陆续失稳发展,如何在“瞬间”之内统一行为模式:以绝对放弃一族剪切带方向选择为代价,集中保留和发展“命中注定”的一族?或干脆另一族一开始就未能启动?是单旋现象的中心谜团。

### 3.5 试件材料的初始状态分析

受试TC4材料为锻压棒料。试验前从柱壳顶部取样做金相分析,发现有带一定拉长特征的晶粒群落,但这些不大的群落仅涉及数个晶粒,在更大面积范围内的晶粒的相互取向没有规律,即呈现短程有序、长程无序的特征(图3(c)~(h)上剪切带以外区域)。从细部放大的剪切带与剪切带以外的晶粒取向关系,包括内壁附近起点区中,找不到剪切带与晶粒取向的对应联系。甚至与剪切带中“河流样”的塑性流变区紧邻(其中许多晶粒可能已局部进入到剪切带中)的“岸上”晶粒之间晶界分隔方式、晶粒方向似乎丝毫未受到剪切变形的影响(图3(e)、(f))。D.A.Shockey<sup>[17]</sup>等也证明在较强加载条件下,初始冶金学(晶粒)条件对剪切方向取向的影响已完全不可能再是主导因素。

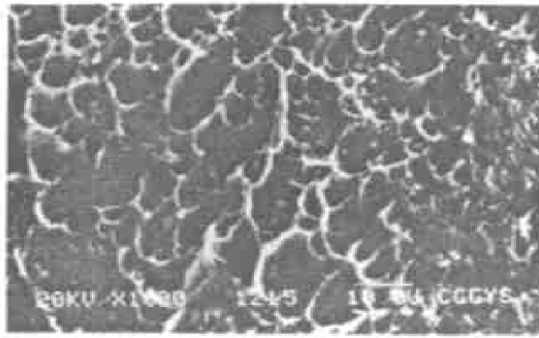
在讨论的同样观察到单旋剪切模式的其它受试材料,如HR2、LY12、45#钢等,仅从表观的晶粒取向上,均不能明确判定其为各向异性材料<sup>[14]</sup>。

对单旋起因追究甚至深入到了车削加工可能引起的对剪切带方向起源的影响,即柱壳内壁的预损伤(包括剪切)、浅表粒晶或残余应力的方向性上,这是值得认真研究的最大疑点。但图1的两发试件的制备中,材料取自同一棒材上紧邻段,加工工艺一致,仅加载炸药变更,试验现场的布置也严格一致,但顺序的两发实验分别遵循了单旋(拇指朝爆轰传播方向的)左手定则和右手定则。

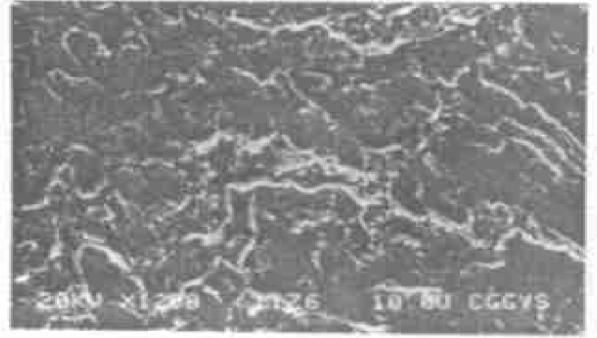
关于初始晶粒的角色,包括浅表层局部,各方面观察出现矛盾,暂无从下结论。

### 3.6 过程时序分析

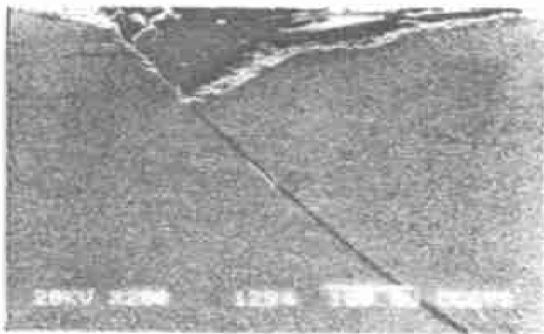
下面对其它与剪切方向协调的因素进行讨论。



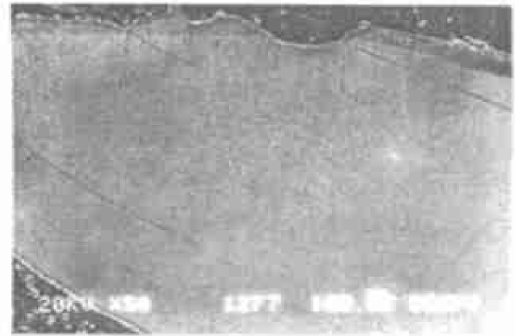
(a) 外表附近剪切断面表面拉剪形貌  
(a) The SEM on the tensile-shear fracture surface near outside



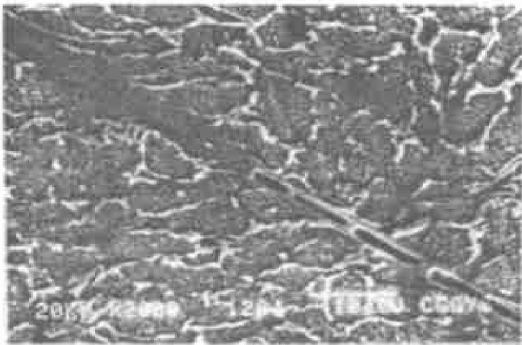
(b) 内表附近剪切断面表面压剪形貌  
(b) The SEM on the compress-shear fracture surface near inside



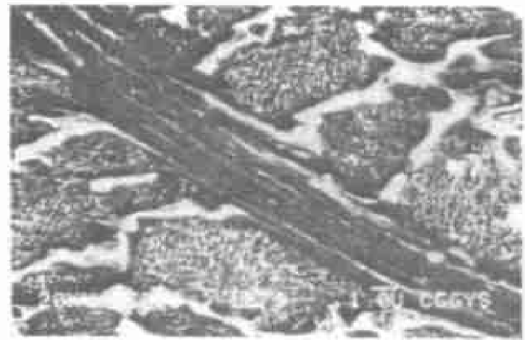
(c) 内壁处的微细剪切带相对滑移  
(c) The sliding of the shear bend near inside



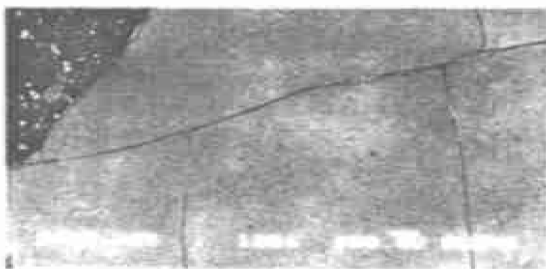
(d) 同族剪切带形貌(上侧为内壁)  
(d) The same group of shear bands(Top is inside)



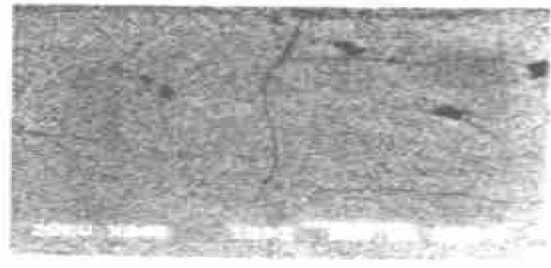
(e) 剪切带中早期裂纹生成形貌  
(e) The crack behind the shear band



(f) 剪切带流变及其周围晶粒形貌  
(f) The flow characteristic of shear band



(g) 不同族剪切带间的抑制和中止  
(g) The restrain and stop of some different groups of shear bands



(h) 宏观裂口(上侧)旁被中止的剪切带  
(h) The stopped shear bands near crack

图 3 TC4 断口的表面及横断(切片)面的和两族剪切带相互正交交汇的典型 SEM 图像

Fig.3 The series SEM photos of different sections in TC4 fragments

当内部炸药爆轰引发的冲击波出柱壳外壁时,外表反射率突然下降。从图 1 外表失去光泽位置到动态光学照片上可明确识别的最早宏观裂纹段的距离,折合为相对爆速的时间差仅为约  $1.8 \mu\text{s}$  (外表传播),其后总体的宏观断裂图像便被“锁定”了。严格说用于形成单一方向选择过程的时间值可能还更小,除光学分辨率尚不够高的因素外,还因这些宏观剪裂在从内壁发展到外壁之前更早时刻其方向就应被“预锁定”了。对圆周尺寸约 100 mm 的柱壳,若按应力波效应的传播机制,假定只需应力波头往返一次的时间,显然比上述特征时间应长许多。

看来力学机制似乎难以关联整个壳壁上众多剪切带,令其滑移方向在充分短的时间内协调一致。

### 3.7 整体结构影响

在分析中也曾考虑过是否会因为试样壁厚较大带来影响。从失稳处局部结构的角度,两个正交的滑移同时在一点上发生也不可能。若形成单旋模式,如图 3(g)、(h)中只能有一条(族)在滑动,则无论是从局部,还是从壳结构整体角度,在拓扑学上均是最佳选择。但这里所谓柱壳整体结构角度,是从不计时间的静力趋势上看,这种趋势在加载应力波到达前不会存在,甚至在微剪切带随机发展,直至相互冲突前,也不会有明显的作用和影响。

只在剪切带方向选择明确,明显滑移,不同剪切带间作用可“感知”相互存在时,整体结构因素才可能在过程中起决定作用。但这种晚期行为本身也只是单旋现象的结果表现而已,与探寻的单旋方向选择起源无关。

### 3.8 不同条件下断裂模式的变化

随炸药品种、几何尺度的变化,断裂模式也会“转移”。在图 4、图 5 上分别给出了呈现单剪模式和非单剪模式的两类钢柱壳的动态断裂过程照片。可以看到象图 4 中单旋模式下一直沿壳壁外表母线延伸很长的纵向裂口(请注意画面的表观对称性:裂纹发展早期似不对称,晚期的产物逸出现象对称),在图 5 上被一些远偏离固定母线,几乎随机在壳壁外表出现的有限长度、断续无规则的“唇形”裂口代替了(可能仍属贯穿型剪裂)。稍后从各“唇形”裂口两端开始形成的横(环)向断裂,决定了碎片的纵向尺度。

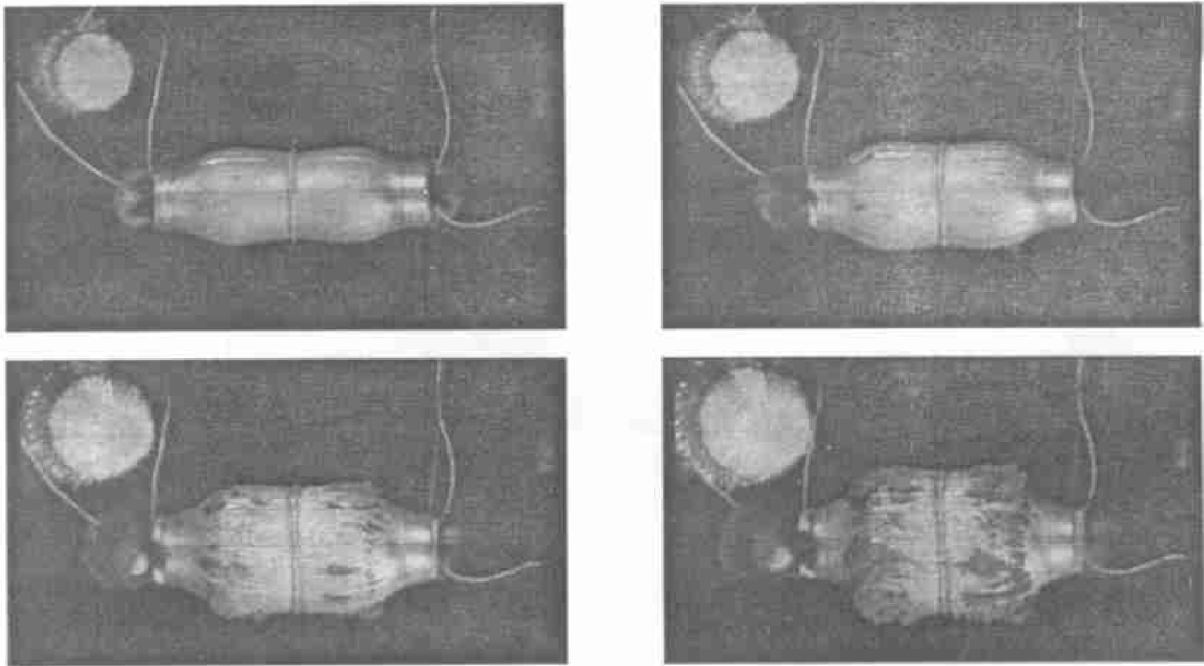
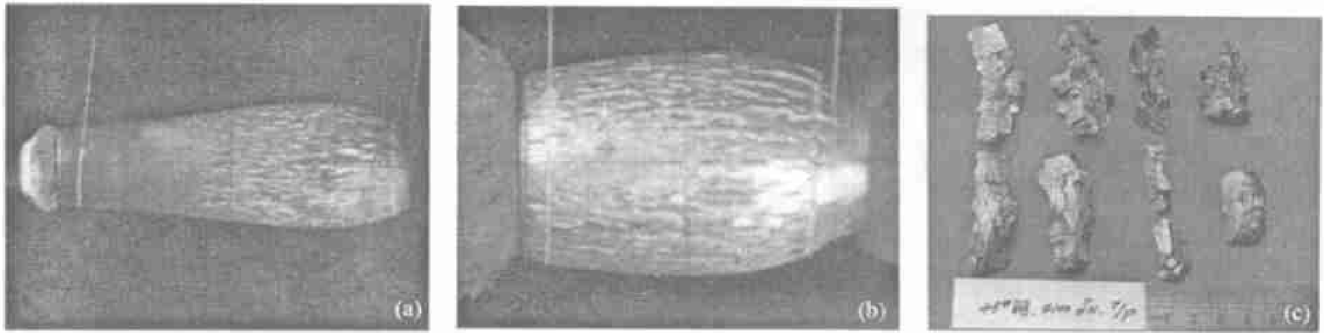


图 4 Fe 柱壳呈现单剪模式的动态断裂过程照片

Fig.4 Thy dynamic photos of Fe shell with simple shear fracture

对应实验回收碎片及金相照片见图 6。在其上可以看到从内壁贯穿至外壁的剪切带形成略呈曲面特征(裂纹尖端处  $45^\circ$  具体取向随应变和其在柱壳壁上不同层面位置也在变化,类似某种“螺线”)的断口,也可看到因两不同族剪切带形成的贯穿断口和两不同族剪切带在壳壁中交错形成的有两“正交”断面的断口。这时两方向的剪切均未能压制住对方的发展,相对自由地形成了宏观剪切断面。

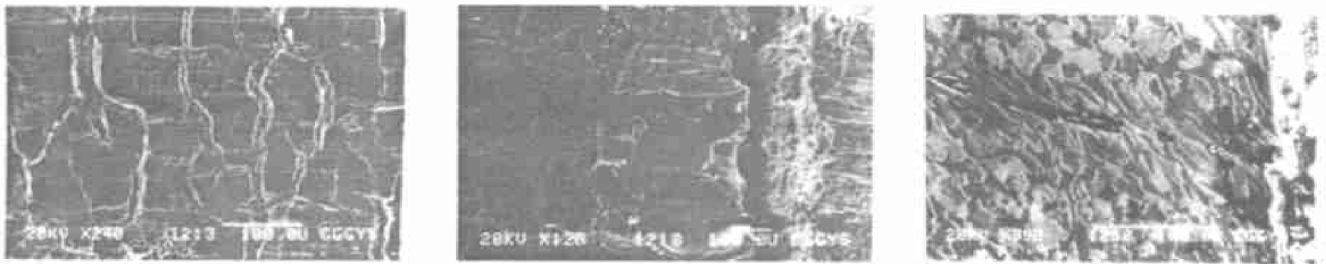


- (a) Simple shear fracture of 45<sup>#</sup> steel shell with 3.6 mm wall under JO-9159 explosive loading;  
 (b) Simple shear fracture of 45<sup>#</sup> steel shell with 8 mm wall under JO-9159 explosive loading;  
 (c) Two way shear fracture of 45<sup>#</sup> steel shell with 11 mm wall under T/R explosive loading

图 5 Fe 双向随机贯穿剪切(唇形模式)的钢柱壳的动态断裂过程照片

Fig.5 The dynamic photos of Fe shell with two different random shear fracture

但在类似以剪切机制的断裂过程中也可能观察到某些局域化现象(如图 6(a)): 仅相邻几条纵向也不极度延伸的单一方向的宏观断口, 总体上仍是多向, 甚至许多局域之间剪切取向一致的倾向。这类现象可以用结构因素、近程关联来解释, 但单旋的影子似乎总在忽隐忽现。



- (a) 外表的微拉伸断裂网; (b) Fe 外表的微剪切为主的断口; (c) Fe 剪切带及周围组织形貌  
 (a) The tensile crack net on outside of fragment; (b) The shear fracture surface near outside;  
 (c) The shear band and it's ambient constitution of Fe fragment

图 6 Fe 回收碎片的金相照片

Fig.6 The micro-characteristics of Fe fragments

### 3.9 其它断裂模式表现

对所用炸药到目前为止进行的实验中, 45<sup>#</sup>钢上尚未出现完全拉伸贯穿断裂模式。完全拉伸断裂的例子仅在采用类似构形和炸药, 而材料换成 W 合金( $\varnothing_{\text{内}} 32\text{mm}$ ,  $\delta=8\text{mm}$ )时出现, 表现为从外壁至内壁的拉伸断裂, 纯径向裂口, 碎片纵向尺寸也较短, 在约 10 mm 水平。而同样装置在 W 壳壁减少到  $\delta=3.6\text{mm}$  时, 在壳壁内层附近又开始出现为数有限, 且只占壳壁小半厚度的剪切型断裂面。

对壁厚差别引起的断裂机制变化还需从应力分布变化及应变率差别两方面定量地作深入分析。从这里的变化看来, 内壁环向压应力层中的剪切滑移机制确是 Taylor 拉伸型断裂的有力竞争因素。

### 3.10 其它断裂模式表现

应注意到拉伸、剪切断裂两种机制间的差别。从裂纹传播上讲, 剪切失稳滑移一旦发生, 便可穿过环向压应力-拉应力的分界, 传至典型受拉应力作用的外表层, 形成贯穿剪切断裂, 不受 Taylor 判据<sup>[1]</sup>对拉伸断裂传播不能进入到环向压应力区的限制。贯穿剪切传至外表的剪切(带)错动, 属接触式断裂, 在爆炸膨胀过程中, 脱开型的环向开口只是在稍晚时刻与环向拉应力作用后的表现; 而内爆下始终保持接触滑移间断状态。

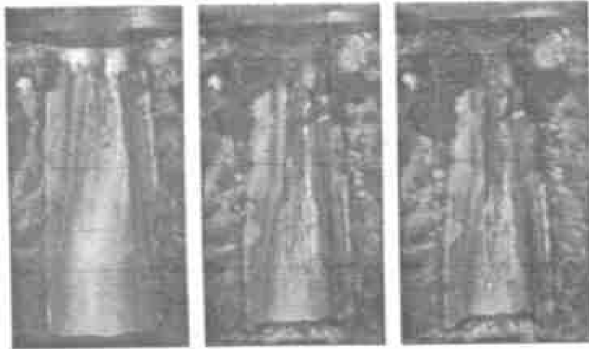
爆炸膨胀时外层都要经受拉应力历程, 但特早出现的剪切带会使得外表甚至连拉伸微裂纹也形成不了, 或形成发展到一定程度也被“冻结”, 故而形成贯穿型剪切断裂。具体材料性能的差别扮演了关键角色, 类似 D.A.Shockey<sup>[17]</sup>改变环境温度的实验, 在对 45Fe 调质的实验中, 就观察到从外壁拉伸断裂向

纯剪、单旋剪切的转化,包括外壁上拉伸微裂纹完全消失的现象(图 6(b)、(c))。所以,材料性能与加载应力在壳壁变形过程中相互耦合作用,共同决定着壳壁介质的变形行为及断裂表现。

### 3.11 向内驱动时纯环向压应力变形过程特点

针对研究剪切型断型的需要,采用向内驱动柱壳的方式,创造出环向应力始终为压应力的高应变率加载过程,排除了拉伸断裂可能,锁定一种断裂模式,来研究受试材料的行为特性。尽管在最大剪应力所处位置与爆炸膨胀断裂起源有共同处,均在内壁,这里还需强调几点差异:剪切失稳起源的内壁面上径向压力,在内爆下为 0,而外爆时为爆轰产物膨胀过程中剩余压力。膨胀情况下内壁附近微元是伸长,内爆下则是被压短。一旦内壁面微剪切带生成后滑移错动,则两种情形下从横断面上看,内壁形状分别是钝角模式(膨胀壳壁变薄)和锐角模式(压缩壳壁变厚)。此外,宏观断面形状也由剪切带尖端传播过程中所处位置上最大剪应力方向及后续的整体变形决定,一般并非平面,包括剪切滑移面相互脱开前的擦伤严重程度,内、外爆会有差别。

TNT 加载下,光学分幅照相观察到 HR2 柱壳内表出现纵向裂纹错动时,对应的应变率约 16%;而对同一过程的 X 光照相可识别的内表大尺度错动的压缩应变为约 36%,见图 7。这些纵向裂口实际上是由一系列先后独立在内壁起源生长的剪切裂纹(无论炸药在内、在外)相互连通形成<sup>[18]</sup>。



(a) 内爆过程中柱壳内表的剪切裂口沿爆轰方向(朝下)的发展过程

(a) The developing shear cracks inside the HR2 shell under imploding

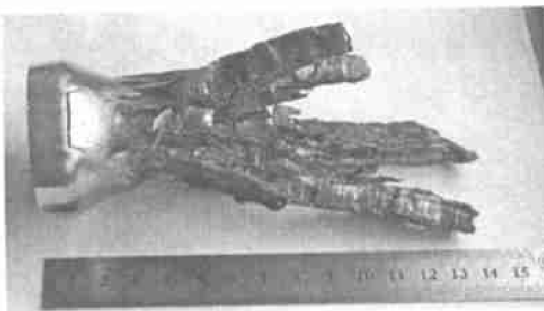


(b) 对应过程的 X 脉冲光照片其上剪切错动纵向阴影可辨

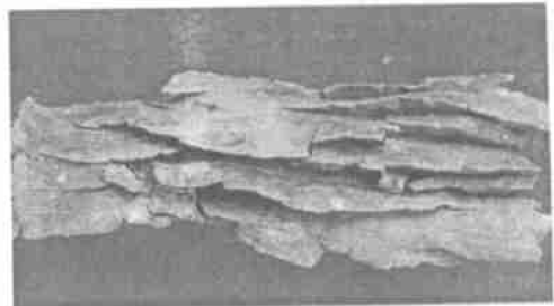
(b) The shear sliding on the X-flash photo

图 7 HR2 钢柱壳内表宏观错动的动态断裂过程照片

Fig.7 The dynamic fracture photos of HR2 shell with shear sliding near inside



(a) The recover sample of HR2 shell



(b) The recover sample of fracture cells on the shear

图 8  $\delta=5\text{mm}$  壁厚柱壳、 $\delta 50\text{mm}$  TNT 加载向内驱动回收试样

Fig.8 The recover samples of metal shells with 5 mm wall and 50 mm diameter under TNT imploded

总体上看,几种加载条件下对 HR2、LY12 均表现为单旋,见图 8。与相近尺寸和加载强度下爆炸膨胀断裂的同种材料行为相比,在向内驱动时似乎“约束”更强,单旋出现更容易、更典型。

### 3.12 纵向断口特征“胞元”及实际应变因素

从 HR2 钢回收试样粗看平整的剪切断口,实际上排列着许多从内壁到外表与内外壁母线垂直的棱角线,每两条隔离出的一个窄长小平台(已不可能用 D. A. Shockey<sup>[17]</sup>等深宽相当的半圆模型描述)。由



许多小平台连通、集合在原来柱壳外表的某一条母线附近构成宏观剪切断面。据此推测, 这种小平台的早期发展行为相对独立, 准确地对应了一个自内壁生成, 最后发展贯穿至外壁的剪切失稳带, 纵向宏观裂口以其作为基本单元连接成, 称为“胞元”, 见图 9。

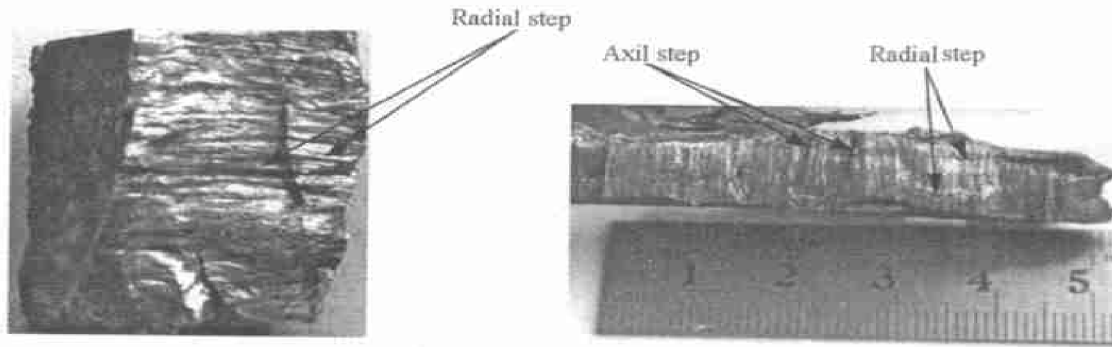


图 9 HR2 钢回收试样的剪切断裂口上的特征“胞元”

Fig.9 The fracture cells on the shear surface of HR2 sample

此外, 对图 1、4 中所示的动态过程的碎片, 两剪裂口间隔尺度已远小于壳壁本身厚度。对这样的情形, 壳壁在膨胀过程中剪切滑移与材料本身的环向应变伸长相比, 对环向总应变的贡献, 孰多孰少很值得研究, 甚至包括在其贯穿壳壁前, 外表面上不会出现对应的错动量。这种贯穿前后的错动量对整体应变、应力分布及结构对称性的影响也还需认真评估。

## 4 讨 论

近年 V. F. Nesterenko、M. A. Meyers 等针对 TC4、不锈钢开展了系列的研究<sup>[8~10]</sup>, 集中对内爆剪切断裂的单旋现象 (self-organization of adiabatic shear bands), 采用统计的方法对微剪裂特征尺寸, 包括相互间距等, 利用失稳模数方法进行分析。但直至最近的研究主要局限在回收试验的样品分析上, 并未试图将现象与有时间刻度的动态发展过程联系讨论。同时, 由于分析数据以横断面为采样空间, 对纵向胞元间关联也未特别重视。

在厚壁构形下, 类似动态层曲导致的不稳定性作用可能会淡化。无限窄带内发生的剪切滑移, 从幅度上看, 相当于一系列  $\delta$  函数, 分布在准均匀小应变的壳壁圆周上, 也是不稳定性的表现。只不过两类失稳的时空尺度, 分别对应整体的结构失稳和极度局域化的材料失稳。本文讨论的单旋现象是一个与两方面似乎都有联系的特例。

本专业方向 M. Held<sup>[19]</sup>、K. Winer<sup>[20~21]</sup>、M. E. Kipp<sup>[22]</sup> 多年研究的聚能射流的旋转现象与这里所讨论的单旋问题在本质上可能有联系。同样是轴旋转对称壳壁的高应变率压缩问题, 几何构形、加载历程、应力环境几乎完全一致, 只是此时药型罩的壳壁内层尽管已失去最高程度的对称性, 表现仍为连续的介质流动。从严格的对称压塌, 到压塌导致的旋转和完全的 (单旋) 剪切失稳断裂, 难以找到一条明确的理由或界限来划分其间物理机制的不同。两类现象完全可能在同一过程中并存, 彼此推动。例如: 处于剪切断裂失稳早期的动载过程中的构型断面, 在更进一步的压缩中, 是一个典型“促旋型”带槽药型罩 (Fluted shaped-charge)<sup>[23]</sup> 的压塌。只不过这里“初始”的状态, 本是前一阶段剪切失稳的结果, 又成了下一阶段旋转现象的动力。

虽已有较成熟技术的解决射流旋转补偿, 如工艺控制<sup>[19]</sup> 或带槽药型罩的设计<sup>[23]</sup>, 在模拟计算方面有周培基等<sup>[23]</sup> 的人为设定的应变与剪切耦合 (Strain-shear coupling) 方法。但在现象过程物理起因的分析上, 明确的答案尚未找到, 直到最近多年, 仍有不少学者试图采用最新发展起来的检测分析手段, 试图从金属金相学方面、从微细的力学不对称性 (残余应力分布) 方面寻找一些定量联系。由典型旋压工艺制成的 Cu 药型罩试样上逐点残余应力的涨落及对称性也反映出较大的不确定性<sup>[24]</sup>, 难以给出明确规律, 在具体计算旋转的模型中残余应力也未作为影响因素计入。

LLNL<sup>[24]</sup>、LANL<sup>[25]</sup> 针对材料各向异性的微观结构或本构建模计算尝试, 反映了问题的深度及重要

性,与本文讨论的问题也直接相关。众多最新研究的视线仍旧不能完全脱离材料初始的各向异性。A. J. Schwarts 等<sup>[24]</sup>在人为堆叠有方向的晶粒组成非各向同性计算代表微元基础上进行计算,得出的结论与 D. A. Shockey 等<sup>[17]</sup>的基本结论在定性上冲突,尽管两者讨论的现象分别是剪切带和连续介质,结合本文关注的单旋现象起因,确有必要将其关联思考。

对于爆炸膨胀断裂,除简单的断裂模式划分外,有许多实际工程的定量化需求,如碎片尺度分布、断裂时间、初速及其控制等,与本文讨论的断裂机制和断裂模式均有密切联系,如碎片长度就是与断裂模式相关的敏感参数,而传统的碎片质量分布研究大多未将此物理现象的影响计入。

若在加载条件充分对称,材料初始条件也充分对称,后续过程的对称性受哪些因素影响?从工艺的角度,什么类型或幅度的扰动需严格控制,或如何去预测和利用?所以,本文所讨论现象的物理机制还需更深入的研究来给出回答。

感谢孙学林、张海平、王慧等在实验测试技术上的密切配合。

## 参考文献:

- [ 1 ] Taylor G I. Scientific Paper of G. I. Taylor( III No. 44)[ M ] . London: Cambridge University Press, 1963.
- [ 2 ] Hoggatt C R, Recht R F. Fracture behavior of tubular bombs[ J ] . Journal of Applied Physics, 1968, 30: 315 ~ 321.
- [ 3 ] Mott N F. Fragmentation of shell cases[ A ] . Proceedings of Research Society[ C ] . London: [ s. n. ] , 1947, 189: 300—308.
- [ 4 ] Olive F, Nicaud A, Marilleau J, et al. Rupture behaviour of metals in explosive expansion[ J ] . Institute of Physics Conference Series, 1979, 47: 242—252.
- [ 5 ] Grady D E, Hightower M M. Fracture of a 4140 steel cylinder under high explosive loading[ R ] . Sandia National Laboratories Report, Sand-90-0882C, 1990.
- [ 6 ] Иванов А Г. Особенности взрывной деформации и разрушения труб[ J ] . Проблемы прочности, No. 11, 1976, (11).
- [ 7 ] Al-Hassani S T S, Johnson W. The dynamics of the fragmentation process for spherical shells containing explosives[ J ] . International Journal of Mechanics Science, 1969, 11: 545—549.
- [ 8 ] Meyers M A, Xue Q, Nesterenko V F. Evolution in the patterning of adiabatic shear bands[ A ] . Furnish M D, Thadhani N N, Horie Y. Shock Compression of Condensed Matter[ C ] . USA: American Institute of Physics, 2001: 567—570.
- [ 9 ] Nesterenko V F, Xue Q, Meyers M A. Self-organization of shear bands in stainless steel: grain size effects[ J ] . Journal of Physics (IV), 2000, (10): 269—274.
- [ 10 ] Meyers M A, Nesterenko V F. High-strain, high-strain-rate deformation of tantalum: the thick-walled cylinder method[ A ] . Lawrence E M, Karl P S. Metallurgical and materials application of shock-wave and high-strain-rate phenomena[ C ] . the Netherlands: Elsevier Science Inc, 1995: 484—453.
- [ 11 ] 陈大年,王德生. 双向一维流计算[ A ] . 全国计算力学会议文集[ C ] . 1980.
- [ 12 ] 胡海波,王德生. 炸药加载圆柱壳的初始断裂及断裂模式实验研究总结[ R ] . 中国工程物理研究院流体物理研究所, 1992.
- [ 13 ] 胡八一. 金属圆筒在内部爆轰加载下的膨胀断裂机理[ D ] . 绵阳: 中国工程物理研究院流体物理研究所, 1993.
- [ 14 ] 汤铁钢. 内爆加载下金属圆管的热塑失稳与断裂研究[ D ] . 绵阳: 中国工程物理研究院流体物理研究所, 2002.
- [ 15 ] Cazamias J U. The effects of shear banding in 6-4 Titanium on round and square Taylor impacts[ A ] . Furnish M D, Thadhani N N, Horie Y. Shock Compression of Condensed Matter[ C ] . USA: American Institute of Physics, 2001: 587—590.
- [ 16 ] Hopkins A, Brar N S. Hugoniot and shear strength of Titanium 6-4 under shock loading[ A ] . Furnish M D, Chhabidas L C, Hixson R S. Shock Compression of Condensed Matter[ C ] . USA: American Institute of Physics, 1999: 423—426.
- [ 17 ] Shockey D A, Elich D C. Metallurgical influences on shear band active[ A ] . Meyers M A. Shock Wave and High-Strain-Rate Phenomena in Metals[ C ] . New York: Plenum Press, 1981: 249—261.
- [ 18 ] Meyer M A, Han-Ryong Pak. High-Voltage transmission electron microscopy of shear bands in titanium and 4340 steel[ J ] . Progress in Materials Science, 1983, 28: 1—96.
- [ 19 ] Held M. Spinning jets from shaped charges with flow turned liners[ A ] . 12th International Symposium on Ballistics[ C ] . San Antonio, Texas: [ s. n. ] , 1990: 1—7.
- [ 20 ] Winer K, Shaw L, Muelder S, et al. Dynamic behavior of shear-formed shaped-charge liner[ J ] . Propellants, Explosives, and Pyrotechnics, 1993, 18: 345—351.
- [ 21 ] Winer K, Breithaupt D, Shaw L, et al. High-speed, high-resolution observations on shaped-charge jets undergoing particulation

- [A] . Mayseless M, Bodner S R. 15th International Symposium on Ballistics[C] . Jerusalem, Israel: [ s.n. ], 1995: 89—96.
- [22] Kipp M E, Martinez R R, Hertel E S, et al. Experiments and simulations of spinning shaped charges with fluted liners[A] . William G Reinecke. 18th International Symposium on Ballistics[C] . San Antonio, Texas: Tecknomic Publishing Company Inc, 1999: 499—506.
- [23] PEI Chi-chou, Segletes S B. Jet rotation resulting from anisotropy of shaped-charge liners[A] . International Symposium on Ballistics[C] . Brussels, Belgium: [ s.n. ], 1989: 36—45.
- [24] Schwarts A J, Busche M J, Becker R, et al. Role of texture in spin formed Cu shaped-charge liners[A] . Iris Rose Crewther. 19th International Symposium on Ballistics[C] . Switzerland: Vetter Druck A G, 2001: 733—740.
- [25] Burkett M W, Claucy S P, Maudin P J, et al. Modeling anisotropic plasticity: 3D Eulerian hydrocode simulations of high strain rate deformation processes[A] . Furnish M D, Thadhani N N, Horie Y. Shock Compression of Condensed Matter[C] . USA: American Institute of Physics, 2001: 279—282.

## An study of uniform shear bands orientation selection tendency on explosively loaded cylindrical shells

HU Hai-bo<sup>\*</sup>, TANG Tie-gang, HU Ba-yi, WANG De-sheng, HAN Chang-sheng  
(*Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics,  
China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China*)

**Abstract:** The self-organized shear bands phenomena of cylindrical metal shells driven by sliding explosively loading in either outward or inward direction are discussed. By means of high-speed photograph, the processes of the appearance of initial shear bands and their developments on out and inner surfaces were recorded and the fractured surfaces of recovery specimen are analyzed, showing the longitude shear fracture cell characteristics typical for some metals, such as HR2. The mechanism of the exclusive selection of shear bands orientation remains unexplained about the correlation between the shear bands on a given periphery of cylinder section and between the shear bands along a generatrix of the explosively loaded cylindrical shell with respect to the short time delay before shear bands orientations to be fixed. This uniform selection of shear failure anisotropy from two alternatively groups ( $45^\circ/135^\circ$  with respect to the cylinder radii) under explosive loading seems not always related to initial metallurgical texture. It might have some common basic with jet spin phenomenon.

**Key words:** solid mechanics; shear band orientation selection; explosive loading; cylindrical metal shell; fracture mechanism; shear fracture cell

---

\* Corresponding author: HU Hai-bo  
E-mail address: huhaiibo@caep.ac.cn;  
Telephone: 0816-2484721