

固体炸药在压剪加载下的起爆 特点实验研究

卢芳云^a 薛鸿陆^a 陈丕琪^b 卫玉章^c 张震宇^a

(a. 国防科技大学应用物理系, 长沙 410073)

(b. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 成都 610003)

(c. 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, 成都523信箱 610003)

摘要 采用平面正碰撞 Y -切面 α 石英, 使之产生压剪波传入粘接在石英后表面的炸药 (T/Γ 40/60, 10[#]-159) 试件中的方法, 实现对炸药试件的一维平面压剪复合加载。用埋入多重拉格朗日量计——电磁质速计, 记录传入炸药试件中的纵向运动和横向运动变化历史, 分析炸药中压剪波的传播规律, 从而认识炸药在压剪加载下的起爆响应特点。

关键词 压剪加载 起爆性能 敏化

中图分类号 O 384

1 引言

炸药装药在平面冲击波或平面飞板高速碰撞垂直作用下的力学响应和起爆, 国内外已作了大量研究。但是, 实际弹药受到的作用不再是一种垂直正碰撞造成的单纯压缩加载, 而是一种复合的压剪加载, 局限于单轴应变压缩的数据不能帮助研制出更普遍、更切合实际的材料模型, 也不能正确解释实际中更多出现的非正冲击碰撞造成的大量力学响应和起爆问题。剪切应力, 尤其是与压缩应力联合作用的剪切应力, 在亚爆轰状态下, 对于炸药的起爆, 极其可能是非常重要的, 但是研究得非常少。

为了简化压剪复合加载对材料作用效应的分析, 我们立足于对材料试件实现一维平面复合压剪加载, 有两种加载方式能达到这个目的。Y. M. Gupta^[1]等采用平行倾斜碰撞方式, 使 B3 炸药试件随受压剪复合加载, 并将多重电磁质速计埋入试件中, 测量并分析在试件中相应位置上拉格朗日质点的纵向运动和横向运动的变化规律, 从而给出了 B3 炸药在压剪复合加载下起爆特点的初步认识^[6]。L. C. Chhabildas^[2]采用平面正碰撞方式, 碰撞 Y -切石英, 在石英中产生准纵波和准横波^[3], 传入粘接在其后的炸药 (PBX-9404) 试件中, 使试件承受一维平面压剪复合加载, 并用两台 VISAR 装置测试试件后自由面的纵向运动和横向运动变化情况。但他们对 PBX-9404 的起爆特性未作深入分析。

* 本实验得到中国工程物理研究院科学基金资助。

1994年4月21日收到原稿, 同年11月24日收到修改稿。

在我们的实验中,采用平面波发生器的爆轰实现对 Y-切石英的平面正冲击波输入,从而造成粘接在石英后面的炸药(T/Γ 40/60 和 10[#]-159)试件承受一维平面压剪复合加载,用多重埋入式拉格朗日量计——电磁质速计,来跟踪试件中相应位置上的纵向运动和横向运动变化规律,考察炸药的起爆特点。

2 实验方法

对 Y-切石英的平面碰撞利用平面波发生器的爆轰实现,图 1 是实验装置示意图。平面波发生器爆轰产生的平面波,通过一定空气层的衰减,传入有机玻璃(PMMA)挡板中,再次衰减后进入 Y-切石英中,在石英中产生准纵波(QL)和准横波(QT)以不同的运动速度 U_{QL} 和 U_{QT} 通过石英,在不同时刻 t_{QL} 和 t_{QT} 到达石英与炸药试件的界面,分别都将与波传播方向一致的纵向运动 v_x 和与波传播方向垂直的 v_z 传入试件,使试件承受一维平面压剪复合加载。两次作用的时间差为 $t_{QT} - t_{QL} = L/U_{QT} - L/U_{QL}$, 其中 L 是石英厚度。预计传入试件的波形如图 2 所示。

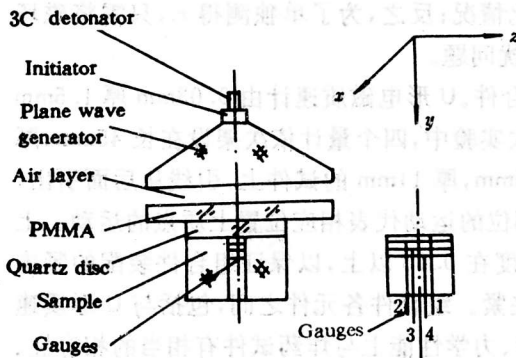


图 1 电磁质速测量实验装置

Fig. 1 Experimental set-up of EMPV

QL 波和 QT 波引起的传入试件中剪切运动的大小,直接受试件与石英交界面的粘接强度影响。我们采用了特别研制的以环氧树脂胶为主的 6[#] 胶进行粘接。静态测试这个粘接界面的抗剪强度,对于试件 T/Γ40/60 为 7~13MPa; 对于 10[#]-159 为 4~6MPa; 对于 TNT 为 3~5MPa。在实验中,胶中还配以一定比例的 Al₂O₃ 粉末(粒度 < 10μm)作为填料,预计界面抗剪强度将会更高^[4]。高的界面抗剪强度

对于试件 T/Γ40/60 为 7~13MPa; 对于 10[#]-159 为 4~6MPa; 对于 TNT 为 3~5MPa。在实验中,胶中还配以一定比例的 Al₂O₃ 粉末(粒度 < 10μm)作为填料,预计界面抗剪强度将会更高^[4]。高的界面抗剪强度

对于 TNT 为 3~5MPa。在实验中,胶中还配以一定比例的 Al₂O₃ 粉末(粒度 < 10μm)作为填料,预计界面抗剪强度将会更高^[4]。高的界面抗剪强度

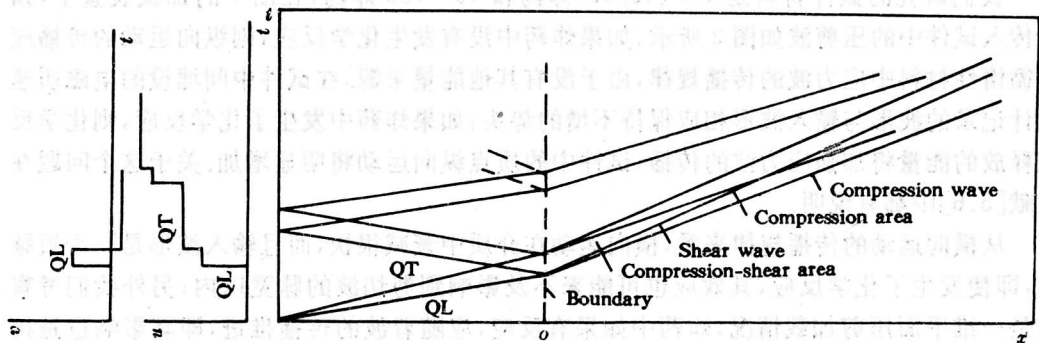


图 2 实验装置所对应波系结构和输入波形预测

Fig. 2 Estimate of the wave structure and incident wave pattern for the experimental set-up

可以减少界面滑移,有利于剪切运动最大限度地传入试件中,以便实现对炸药试件的压剪复合加载。试件中产生的压剪应力大小还与材料性质有关。

经过一番调试,将空气衰减层厚度取为 20mm,使传入炸药试件中的压应力幅度处于亚爆轰状态。我们设想,从压剪波在炸药试件中的传播特性,来分析压剪复合加载对炸药起爆性能的影响,采用埋入多重拉格朗日量计——电磁质速计,来记录不同拉氏质点的纵向压缩运动和横向剪切运动的变化情况,从而观察在亚爆轰应力状态,剪切作用同时存在可能造成的影响。

根据法拉弟电磁感应定律,导体 \vec{l} 在磁场 \vec{B} 中以 \vec{v} 运动,在导体两端得到动生电动势 $\varepsilon = \vec{l} \cdot \vec{v} \times \vec{B}$ 。在图 1 中所示的坐标系下,沿 x 方向放置的导体,长为 l_x ,只有 v_y, v_x 两个方向运动速度时,动生电动势由 $\varepsilon = l_x(v_y B_z - v_x B_y)$ 决定。所以,为了单独测得 v_y ,只需将磁场设置为 B_z ,示波器记录到 $\varepsilon = l_x v_y B_z$,反推出 v_y 的变化情况;反之,为了单独测得 v_x ,只需将磁场设置为 B_y ,两次测试原则上不应该存在互相干扰问题。

为了埋设电磁质速量计,将试件设计成组合件。U 形电磁质速计由 0.03mm 厚 1.5mm 宽的铜箔制成,敏感部位长度为 $l_x = 5\text{mm}$ 。一次实验中,四个量计依次架设在长 45mm,厚 3mm,宽 5mm 的三条试件及一块长 45mm,宽 5mm,厚 11mm 的试件上,引线从后面引出,避免引线运动造成对被测信号的干扰。敏感部位的运动代表相应位置上质点的运动。上述条状试件机加工后用金相砂纸研磨,加工精度在 0.03 以上,以保证组合件装配的紧凑性,减小界面效应,其两侧面用半圆柱形试件夹紧。组合件各元件之间,包括与 U 形质速计之间的界面都用 6# 胶压紧粘接。6# 胶在化学、力学性能上与炸药试件有相当的相容性。试件总厚度 20mm,直径 45mm,最后一个量计位于距波入射面 9mm 处,侧向稀疏波的影响将破坏一准平面结构,使该量计压缩波的测量保持 $3\mu\text{s}$ 的有效时间,对剪切波的测量保持 $1\mu\text{s}$ 的有效时间。

实验中,由亥姆赫兹线圈产生所需磁场,用 485 型示波器监视放电过程,以便求得磁场强度 \vec{B} ,用两台 7844 示波器记录四个计的动生电动势信号。

3 实验结果与讨论

我们研究的试件材料是 T/ Γ (40/60)炸药和 10#-159 炸药,在图 1 的加载装置下,预计传入试件中的压剪波如图 2 所示。如果炸药中没有发生化学反应,则纵向运动的传播应遵循惰性材料中应力波的传播规律,由于没有其他能量来源,在试件中间埋设的电磁质速量计记录的波形与输入波形相应保持不增的势头;如果炸药中发生了化学反应,则化学反应释放的能量将加强应力波的传播,试件中的质点纵向运动将明显增加。关于这个问题在文献[5、6]中都有说明。

从横向运动的传播规律来看,横向运动在介质中衰减很快,而且输入波形是一个短脉冲,即使发生了化学反应,其效应也可能来不及影响到剪切波的脉宽以内;另外我们考察的是一维平面压剪加载情况,炸药中如果有反应,应随着波的传播推进,即其影响也是接近一维平面传播,主要表现在对压缩应力或者说纵向运动的变化上。因此,横向运动的传播规律不明显受炸药反应的影响。

我们着眼于记录到剪切运动及其传播规律,讨论在这样的剪切作用下,炸药中纵向运

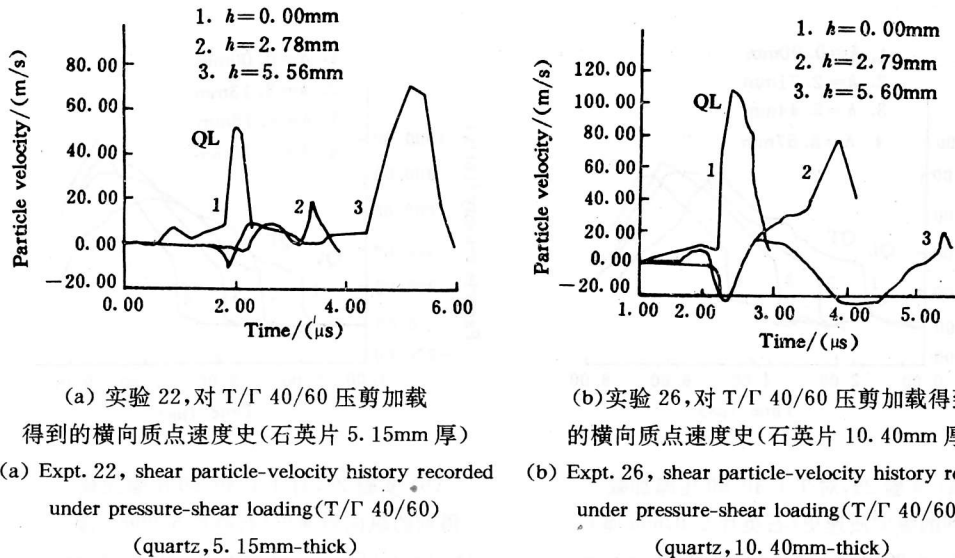
动变化史表现出的特点所反映的炸药起爆特点。

3.1 剪切运动及其传播规律

在 Expt. 22 中,采用了 5.15mm 厚的石英片,试件材料为 T/Γ 40/60,预计剪切波输入波形脉宽约 0.3μs,图 3(a)给出了这次实验的记录结果,可以看到第一个计,也就是波入射平面上的量计测得了 52.1m/s 的最大横向运动速度,波形与预计的比较接近,但波幅却相差甚远;第二、三个计的记录不甚清楚,信号信噪比太小。理论预计剪切波幅值为 125.5m/s。

石英片的厚度直接影响剪切波的脉宽,为了避免剪切运动的衰减影响真实记录,在 Expt. 26 中采用了 10.40mm 厚的石英片,试件材料仍是 T/Γ 40/60,预计输入剪切波脉宽为 0.7μs,图 3b 给出了这次实验的记录,可以看到前三个量计都给出明确的横向运动速度波形,对应的最大幅度分别是 107.9m/s、76.4m/s、17.8m/s,呈很快的衰减规律。输入波形和幅度比较接近理论预估。对应所记录的 107.9m/s 横向质点速度,试件中的剪切应力约为 0.3GPa。

两次实验是在同一装置下完成,但记录到不同幅度的运动速度,误差来源可能与 6# 胶粘接工艺、装置的重复性、石英片的加工及定向精度有关。



(a) 实验 22,对 T/Γ 40/60 压剪加载得到的横向质点速度史(石英片 5.15mm 厚)

(a) Expt. 22, shear particle-velocity history recorded under pressure-shear loading(T/Γ 40/60) (quartz, 5.15mm-thick)

(b) 实验 26,对 T/Γ 40/60 压剪加载得到的横向质点速度史(石英片 10.40mm 厚)

(b) Expt. 26, shear particle-velocity history recorded under pressure-shear loading(T/Γ 40/60) (quartz, 10.40mm-thick)

图 3

Fig. 3

对纵向运动波形的讨论基于上述剪切运动。由于装置的原因,实际输入试件的压剪波波形有异于图 2 的预估波形,但是性态是一致的。我们的讨论和比较将相对于实际的输入波形,即处于边界面上的第一个量计得到的波形。

3.2 亚爆轰状态下剪切存在呈现敏化炸药的趋势

Expt. 25 和 Expt. 29 是加载装置几乎全同的两次实验,试件是 T/Γ 40/60 炸药。所不同的是:Expt. 25 试件组合体用 6# 胶粘接而成,Expt. 29 试件组合体不强调粘接强度,用

914# 胶粘接,其结果是在 Expt. 25 中造成了压剪加载,而 Expt. 29 中只主要实现了压缩加载。两次实验的纵向质点运动速度史记录在图 4 中。

从图 4(a)可见,在没有横向运动速度传入的 Expt. 29 实验中,输入压缩波波头幅度为 314.9m/s(对应 $h=0$ 的波形),而后续几个量计(对应于 $h \neq 0$ 的其他三个量计)记录的最大纵向质点运动速度波形相对于入射波形的幅值变化不超过 40m/s,可以认为,这个波传播特征反映了炸药的惰性响应性质。

从图 4(b)可见,Expt. 25 实验的输入波形整体上低于 Expt. 29 相应波形幅值,但后续量计记录的最大纵向质点运动速度表现出单调增加的趋势,最大增加超过 300m/s。这个增加应该反映了由于剪切存在引起的化学反应释放的能量作出的贡献。

(1)与 Expt. 29 实验作对比,如果没有横向运动输入,Expt. 25 实验中的动态响应应该更接近惰性响应。

(2)剪切引起热效应对诱发化学反应的作用,主要表现在压缩波的尾部相对抬高上,一是因为剪切波本身滞后于压缩波;二是因为剪切引起的效应有一个时间过程。

根据估算,如果输入的横向质点速度超过 100m/s,则 Expt. 25 实验的试件中剪切应力值可能达到 0.3GPa。从这个比较可以认为,剪切造成了 T/ Γ 40/60 炸药点火的趋势,点火感度增高,使炸药敏感化了。

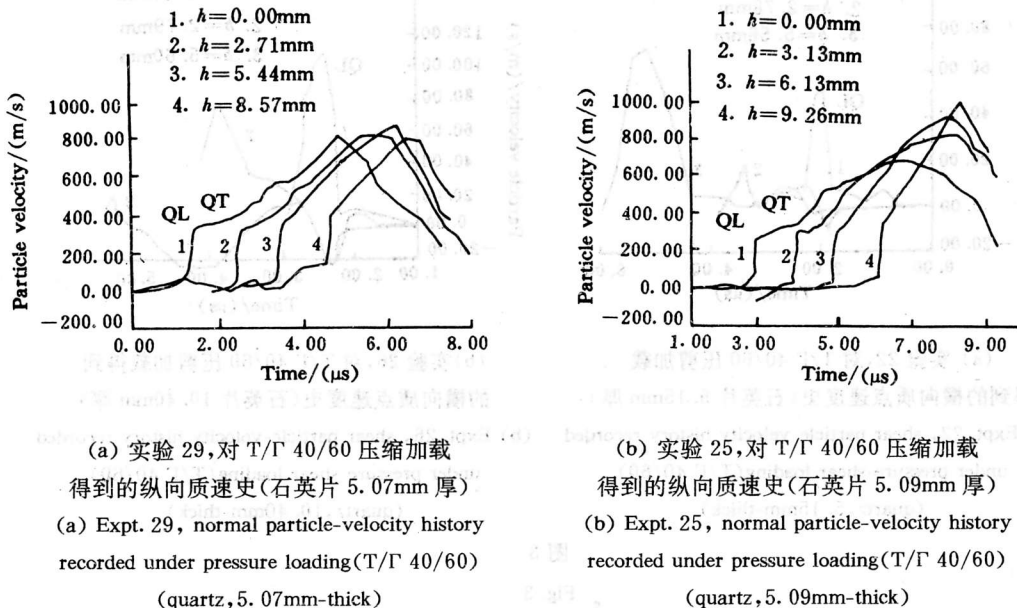


图 4

Fig. 4

4 结束语

从前面的实验现象得知:在所实现的压剪加载下,T/ Γ 40/60 固体炸药呈现出敏化的响应特征,但这个响应特征还有待于从实验上给出更多的佐证。因为在进行各向异性石英

的压剪加载实验过程中,我们发现,从实验装置的设计,实验结果重演性,以及实验曲线的判读等方面仍存在明显不足,还不能由此作出肯定确切的结论。无论从实验上,还是从理论上,都有必要尤其对敏化现象的规律及其机理作更深入细致的探讨,以达到真正认识固体炸药装药对压剪加载响应规律的目的。

感谢冲击波物理与爆轰物理实验室的领导和同志们热心指导和帮助,感谢何智等同志的帮助完成了测试工作,感谢化工材料研究所的鼎力相助。

参 考 文 献

- 1 Cowperthwaite I M, Gupta Y M. Shock Waves in Condensed Matter. New York, London: Plenum Press, 1986. 863~869
- 2 Chhabildas L C, Kipp M E. Proceedings of the VIII Symposium on Detonation. Silver Spring, Maryland: Naval Surface Weapons Center White Oak, 1985. 274~283
- 3 Johnson J N. J Appl Phys, 1971, 42(13): 5522~5529
- 4 殷立新,等. 胶粘基础与粘接剂. 北京:航空工业出版社,1988
- 5 A H 德列明,等. 凝聚介质中的爆轰波. 北京:原子能工业出版社,1986
- 6 Cowperthwaite M, AD-A205917/8. 1989. 1~76

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF IGNITION FEATURES FOR SOLID EXPLOSIVE CHARGES UNDER PRESSURE-SHEAR LOADING

Lu Fangyun^a, Xue Honglu^a, Chen Peiqi^b, Wei Yuzhang^b, Zhang Zhenyu^a

(a. Department of Applied Physics, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

(b. Southwest Institute of Fluid Physics, P. O. Box 523, Chengdu, Sichuan 610003)

(c. Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Southwest Institute
of Fluid Physics, P. O. Box 523, Chengdu, Sichuan 610003)

ABSTRACT In this paper, one-dimensional planar pressure-shear loading upon solid explosive charges (T/Γ 40/60, $10^{\#}$ -159), which were cohered to the rear surface of the quartz piece, were realised by means of the waves propagation resulting from planar impacting on a Y -cut α quartz piece. Longitudinal (or normal) and transverse (or shear) movement histories in the explosive samples were recorded by means of electric-magnetic particles velocity (EMPV) gages. They are Lagrangian gages embeded in the sample. By analysis of the law of pressure shear wave propagation in the sample, that would result in the realization of ignition features of solid explosives under pressure-shear loading.

KEY WORDS pressure-shear loading, ignition feature, sensitization.