文章编号: 1001-1455(2005)05-0385-08

压剪联合冲击下 K9 玻璃中的失效波*

徐松林,唐志平,谢 卿,张兴华,方子骏,郑 航
(中国科学技术大学中科院材料力学行为和设计重点实验室,安徽 合肥 230027)

摘要: 对 K9 玻璃进行了冲击速度为 150～400 m/s,倾斜角为 10°、15°的纵剖试样斜撞击实验。结果表明,在加载剪切横波(S^+)和卸载纵波(P^-)之间有波速超过了纵波波速的波阵面存在,此波的存在对卸载纵波和卸载横波的幅值有一定的影响。由于失效波的产生与材料的表面性质密切相关,为消除纵剖试样中间界面的影响,模拟 VISAR 的实验条件,进行了冲击速度为 70～300 m/s、倾斜角为 10°的横剖试样斜撞击实验。可以确定在此冲击范围失效波的波速在 0.98～1.4 km/s,产生失效波的临界状态为:压应力 0.86～1.01 GPa,对应剪应力 0.053～0.071 GPa。表明剪应力的存在极大降低了失效波产生的阈值。在此基础上初步分析了撞击面的动摩擦因数和相对滑移速度。

关键词: 爆炸力学;失效波;压剪联合冲击;K9 玻璃;动摩擦
中图分类号: O383 **国标学科代码**: 130・3520 **文献标志码**: A

1 引 言

失效波的研究始于 20 世纪 90 年代,S. V. Rasorenov 等[1]首先发现 K19 玻璃样品后自由表面的速度时程曲线上有反常再压缩信号。这一发现引起了国际冲击动力学界的广泛兴趣,R. J. Clifton[2]、N. K. Bourne 等[3]、贺红亮[4]、赵剑衡等[5]先后开展了这方面的研究工作。这些工作主要集中在应用 VISAR 记录样品后自由表面速度随时间的变化关系,根据波形中有无再压缩信号的出现来判断失效波的存在。N. K. Bourne 等[6]利用高速摄影仪对玻璃中应力波传播进行了观测。贺红亮[4]、赵剑衡等[5]利用高速摄影仪观测了双层玻璃在冲击压缩下损伤的演化,表明失效波主要从玻璃样品表面开始传播。

这些研究结果同时表明失效波的产生与冲击载荷强度有关。N. K. Bourne 等[3]认为失效波产生的阈值条件是冲击载荷达到弹性极限应力(HEL)附近。近年来的实验研究表明失效波不可以在远低于 Hugoniot 弹性极限应力的条件下产生[1],理论研究则预测失效波也可能在 2 倍于 HEL 的载荷附近产生,后者还有待进一步的实验证明。以上这些研究基本上是在正撞击实验基础上进行。本文中将采用压剪冲击复合加载初步探讨剪切作用对失效波产生的影响,并对压剪联合冲击过程接触面的动摩擦和界面滑移进行初步研究。

2 试样与实验

2.1 试样

实验所用材料为 K9 玻璃,其化学组分为[4]:SiO_2(69.13%),B_2O_3(10.75%),K_2O(6.29%),Na_2O(10.4%),BaO(3.07%),As_2O_3(0.36%)。

实验靶的设计采用纵剖和横剖 2 种形式。纵剖靶,先加工成厚度为 30 mm 左右的圆柱,然后对分为 2 个相同的半圆柱,对其上下表面和中间接触面进行精细机磨,保证上下不平行度低于 0.01 mm,同时保证上下表面与中间接触面完全垂直,在中间埋设粒子速度计,然后采用环氧树脂粘结实。横剖靶加工成厚度 8～10 mm 左右的圆片,对其上下表面进行精细机磨,保证上下不平行度低于 0.01 mm,此试

* **收稿日期**: 2004-07-05; **修回日期**: 2004-11-02
基金项目: 国家自然科学基金项目(10202022)
作者简介: 徐松林(1971—),男,博士,副教授。

样主要用于模拟 VISAR 实验条件的对称碰撞,即飞片和靶采用相同的材料相同的尺寸。

2.2 实验方法和内容

实验主要基于唐志平等[7~8]提出的剪切波跟踪技术(SWT)进行。此方法认为:当飞片与靶发生斜碰撞,在试样中将依次传播 4 道主要波阵面:加载压缩纵波(P^+)、加载剪切横波(S^+)、卸载纵波(P^-)和卸载剪切波(S^-),形成 4 波 5 区。每道波的传播特性与前方区域的材料在当时当地的状态相关,每道波产生的影响留给了后方区。因此,波特性实时地反映材料的动特性,并能在一定程度上体现材料的细观统计特性。本次实验希望通过对剪切波的跟踪能够研究剪切作用对失效波产生的影响。

最初主要采用纵剖靶的传统试样,实验原理图见图 1(a)。对 K9 玻璃进行了倾斜角 0°~15°、冲击速度 150~400 m/s 的斜撞击实验。但是在实验中,我们发现一个异常现象,即在加载剪切横波(S^+)和卸载纵波(P^-)之间产生了一个奇怪的波阵面,其波速很高,超过了纵波波速。考虑到纵剖试样中间界面可能存在影响,为了排除此影响因素,我们模拟 VISAR 实验条件,采用一片横剖试样,在试样的自由表面贴粒子速度计,测试当飞片与靶的厚度相同时,自由表面的粒子速度波形,应用应力波理论,并与纵剖靶的结果进行对比分析。其实验原理图见图 1(b)。以期能够得到更可靠的实验结果。

实验在中国科学技术大学轻气炮实验室口径为 57 mm 的一级轻气炮上进行。靶内部粒子速度的测量采用自行研制的双磁场 IMPS 粒子速度测量系统[9],粒子速度计采用自行研制的电磁粒子速度计[8]。整个速度计尺寸为:长 60 mm、宽 21 mm,包括 2 层绝缘胶,速度计厚为 50 μm。5 个测量计长度分别为 15.44、13.44、11.44、9.44、7.44 mm,计之间的间距为 2 mm,计宽为 100 μm。输出信号的记录采用美国 Tektronix 公司生产的高采样率四通道示波器:TDS640A(频响 500 MHz,采样速率 2 GS/s)、TDS654C(频响 500 MHz,采样速率 5 GS/s)等。本实验的实验误差为约 5%。

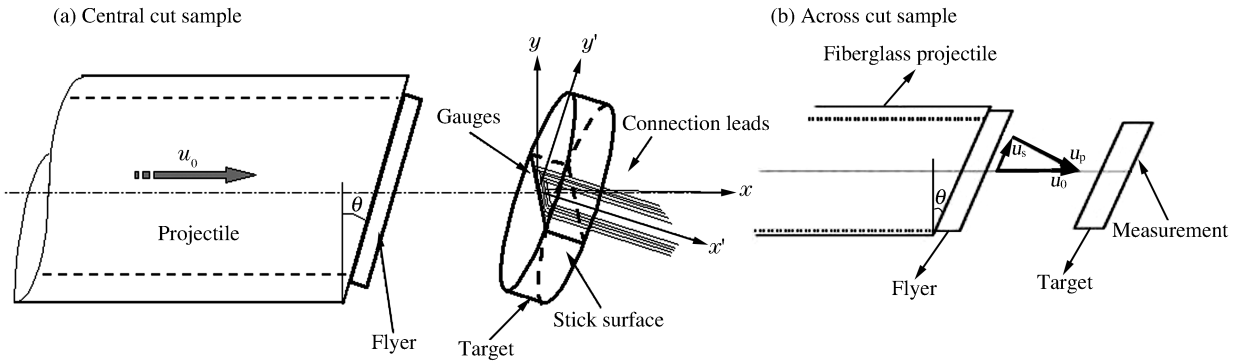

图 1 平板斜碰撞示意图

Fig. 1 Schematic diagram of an inclined plate impact

3 实验结果分析

本次实验进行了倾斜角 0°~15°、冲击速度 150~400 m/s 的系列平板撞击实验,主要包括:(1)平板正撞击实验,倾斜角 $\theta=0°$;(2)纵剖试样的斜撞击实验,如图 1(a)所示;(3)横剖试样的斜撞击实验,如图 1(b)所示。实验结果统计如表 1 所示,表中 μ 为动摩擦因数,v、v_0 为比容,p 为应力,τ_{S^+} 为通过剪切加载波得到的剪应力,u 为 Lagrangian 波速。

3.1 正撞击实验

图 2 为 K9-02 的正撞击波形。对应飞片的厚度 $h_f=7.96$ mm,靶的厚度 $h_t=25.4$ mm,冲击速度 $u_0=252.2$ m/s。采用垂直磁场,磁场强度 0.075 T。第一个粒子速度计 G1 的长度为 15.44 mm,对应感生电动势波形的平台段幅值为 0.145 V,根据法拉第电磁感应定律可得到相应的粒子速度为 125.2 m/s。对称碰撞粒子速度理论值为 $u_0/2$,即 126.1 m/s,两者基本一致。图 2 表明,P^+ 与 P^- 的幅值相等,P^+ 与 P^- 之间保持非常好的平台,但此过程没有发现失效波。

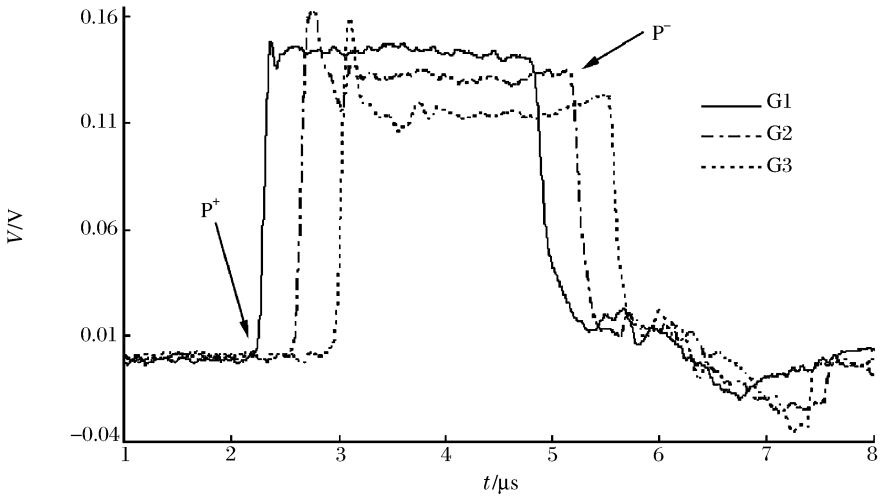

图 2　K9-02 实验波形

Fig. 2　Wave profiles for K9-02

表 1　粒子速度计实验结果统计

Table 1　Summary of experimental results with electromagnetic particle velocity gauge

试样	玻璃	h_f/mm	h_t/mm	u_0/(m/s)	θ/(°)	μ	峰值状态			u/(km/s)			
							v/v_0	p/GPa	τ_S^+/GPa	u_P^+	u_S^+	u_P^-	u_S^-
	K9-02	7.96	25.40	252.2	0		0.9756	1.8382		5.785		5.626	
纵	K9-10	8.26	24.20	154.9	10	0.0246	0.9835	0.9463	0.0233	6.155	3.696	6.066	3.876
剖	K9-03	7.90	24.70	195.2	10	0.0249	0.9854	1.4218	0.0325	6.373	3.721	5.938	3.912
试	K9-08	7.74	24.10	303.5	10	0.0293	0.9760	2.2042	0.0662	5.928	3.846	5.716	3.768
样	K9-06	8.34	24.80	360.0	10	0.0690	0.9705	2.7397	0.1943	6.247	3.902	6.013	3.869
	K9-01	8.00	24.90	198.5	15	0.0880	0.9842	1.4053	0.1226	6.103	3.577	5.882	3.694
	K9-16	10.56	10.57	71.2	10	0.0697	无失效波						
横	K9-17	8.88	8.88	112.3	10	0.0606	无失效波						
剖	K9-18	8.86	8.87	129.2	10	0.0711	失效波波速：0.984 km/s						
试	K9-12	10.22	10.22	275.4	10	0.0808	失效波波速：1.118 km/s						
样	K9-13	10.20	10.21	292.6	10	0.0548	失效波波速：1.344 km/s						
	K9-11	7.24	5.00	315.3	10	0.0575	失效波波速：约 1.4 km/s(靶厚 5.0 mm，波系较复杂)						

3.2　纵剖试样的斜撞击实验

对 K9 玻璃的纵剖试样，采用图 1(a)的实验原理，进行了冲击速度在 150～360 m/s 范围内倾斜角为 10°、15°的压剪联合冲击实验研究。材料在冲击过程中基本处于弹性状态。

图 3(a)为冲击速度 195 m/s 时 K9-01 的原始电动势波形。相应实验条件可参见表 1。图中表明，在此冲击速度下，具有一般斜撞击所有的 4 个明显的波阵面(P^+、S^+、P^- 和 S^-)。但由于 K9 玻璃的特殊性质，在加载剪切波(S^+)和卸载纵波(P^-)之间出现了一道未知的波阵面(图 3(a)中 A 点处)。若将其按冲击波来处理，其波速达到 8 km/s，超过了纵波波速。而玻璃中失效波的波速仅为 1～2 km/s[4～5]，两者差别太大。另外需注意的是，此波阵面的存在似乎只影响了卸载纵波的幅值。

图 3(b)为冲击速度 360 m/s 时 K9-06 的原始电动势波形。图中同样具有 4 个明显的波阵面。但由于在加载剪切波(S^+)和卸载纵波(P^-)之间出现的未知的波阵面(图 3(b)中 A 点处)，其存在已经明

显影响到随之而来的卸载纵波和卸载横波的幅值,但对卸载冲击波的波速影响不大。在此冲击速度下,此波的传播速度为 7.4 km/s,相对于 K9-01 已有一些下降,但仍然高于纵波波速。

纵剖试样的斜撞击实验中,除以上列出的 2 个冲击速度外,在其他的情况下(150～360 m/s),同样产生了此未知的波阵面。其波速超过玻璃的纵波波速,与文献[4～5]得到的 K9 玻璃中失效波波速有较大差别。考虑到实验靶材采用的是纵剖形式,在试样中间人为制造了一个界面,这可能是与文献[4～5]的实验条件的根本区别,因此,为消除纵剖试样中此界面的影响,设计了后面的一系列实验,即将靶制作成与飞片完全相同的整个圆柱体,传感器粘在靶的后自由表面,模拟 VISAR 实验条件测量后自由表面的粒子速度。

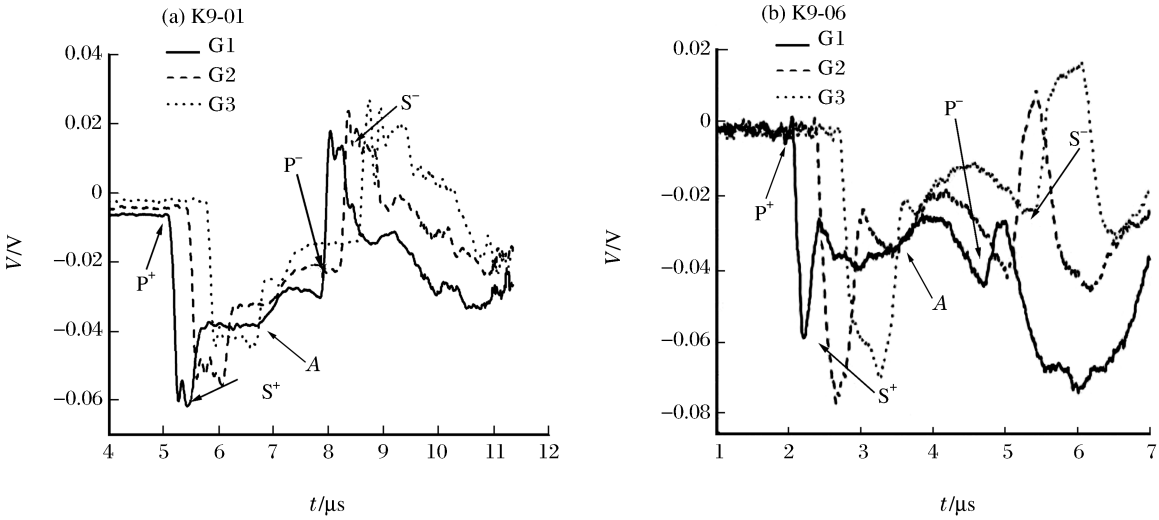

图 3 实验波形

Fig. 3 Wave profiles

3.3 横剖试样的斜撞击试验

横剖试样的斜撞击试验采用图 1(b)的原理进行试验,冲击速度为 70～320 m/s,倾斜角为 10°,实验结果参见表 1。

图 4(a)为冲击速度 112.3 m/s 时 K9-17 的原始电动势波形。实验采用的飞片与靶的厚度均为 8.88 mm。若假定材料内没有失效波产生,可以推算出,从 P^+ 开始到 S^- 之间的时间间隔大约为 3.95 μs。这与图中实验结果基本一致,因此在此冲击条件下没有失效波产生。图 4(b)为冲击速度 275.4 m/s时 K9-12 的原始电动势波形。实验中飞片与靶的厚度均为 10.22 mm,若假定材料内没有失效波产生,可以推算出,从 P^+ 开始到 S^- 之间的时间间隔大约为 6.6 μs。然而实验结果两者之间的时间间隔为 3.5 μs,差异明显。表 1 中 K9-13 实验是对此实验的重复,规律基本相同,表明实验是可以重复的。实际上,从冲击速度为 129.2 m/s(K9-18 实验)开始就可以类似推算出这种波系传播时间与实验结果对比的差异。而且,随着冲击速度的增加,这种差异性更加明显。这种差异表明,从靶的撞击表面已经产生向材料内部传播的失效波阵面。实验同时也表明,对于倾斜角为 10°的压剪联合冲击,产生失效波的临界冲击速度为 112.3～129.2 m/s。

下面根据应力波理论对此过程中的波系传播进行分析。

对于厚度和材料均相同的飞片和靶的对称碰撞,假定没有失效波产生,斜撞击将在靶内依次产生一右行的加载纵波和加载剪切横波,到达自由表面后将依次反射一左行的卸载纵波和卸载横波。卸载纵波到达撞击面后与飞片内的卸载纵波相遇,飞片和靶分离,纵波消失。在此界面同时产生一卸载横波。此后,只有剪切波在试样内部传播。此过程靶中波系传播见图 5(a)。但是当有失效波产生时,相对于图 5(a),卸载纵波到达撞击面之前就要与失效波相遇,由于失效波过后材料的性质要发生一定程度的弱化,因此,卸载纵波和失效波作用的结果,将透射一幅值降低的卸载纵波,并反射一加载纵波。这两个

波的幅值与材料内部的损伤程度有关。同时将在试样内产生右行的卸载横波。此时材料内部应力波传播过程就比较复杂，见图 5(b)。

由此，根据试验中得到的波系传播的具体时间以及靶的尺寸，可以计算不同的冲击速度下失效波的波速为 0.98～1.4 km/s，结果见表 1。这与文献[4～5]得到的 K9 玻璃中失效波的传播速度在 1～2 km/s 之间基本吻合。同时，根据纵剖试样实验中得到的加载纵波和横波的波速，可以估算出失效波产生的临界状态，即对应冲击速度为 112.3～129.2 m/s 时的正压力为 0.86～1.0 GPa，剪应力为 0.053～0.071 GPa。其正压力远低于 K9 玻璃的 HEL 值[5](8.4 GPa)和文献[4～5]的正撞击下失效波产生的阈值 4.1～4.4 GPa。这表明剪切作用对产生失效波有很大的影响。

再来分析 3.2 节中纵剖样品中增加的波阵面。文献[4～5]的研究结果表明，失效波主要是因为材料界面初始具有的微缺陷在一定载荷作用下发展并聚集，当这种损伤积累到一定程度后就开始向材料内部进行传播。横剖试样只有撞击面一个界面，而纵剖试样除了撞击面外，在试样的中间还有一个纵剖界面。因此，在纵剖实验中，失效波在这两种界面处均有可能产生。由撞击面传播的失效波与横剖试样的相同，但由中间界面传播的失效波则比较复杂。若中间界面产生失效波绝对垂直该界面传播，则由图 1(a)的试验方式观测到的失效波的波速应该为无穷大。而图 3 中 A 点处实验中得到波阵面的传播速

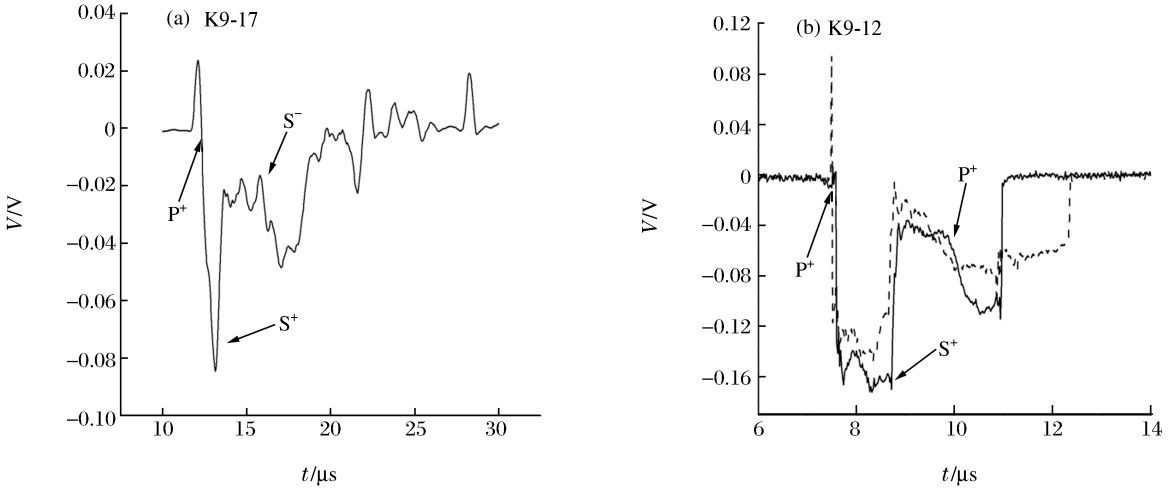

图 4 实验波形

Fig. 4 Wave profiles

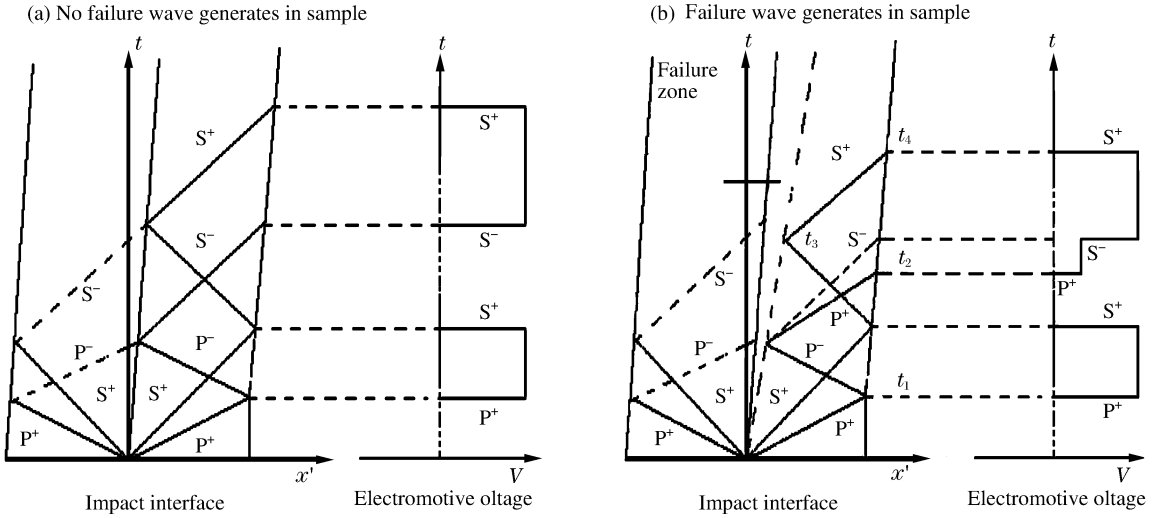

图 5 对称碰撞冲击波传播示意图

Fig. 5 Schematic diagrams of wave propagation for symmetric impact

度为 7～8 km/s,可以推测,随着冲击波的传播,由于中间界面上各观测点载荷作用的时间随深度依次递减,因此在此界面上沿深度方向各观测点破坏形式的传播实际上在时间上是有差异的,这可能就是产生纵剖样品中增加的波阵面的原因。要深入揭示其机理,还需借助数值分析方法等其他的手段。

4 压剪冲击过程的界面摩擦与滑动

在压剪联合冲击加载实验中,在碰撞界面飞片和靶对有些材料(如 K9 玻璃)很容易发生界面的滑动。考虑一个飞片撞击靶的压剪联合冲击加载实验,其剪应力和撞击面切向速度关系见图 6[10]。

对于一般的界面没有滑动的情况,撞击后靶上的纵向和横向速度可根据图 6 中 A 点进行求解。由于发生撞击的材料接触面的摩擦力是有限的,当剪切方向的作用力超过界面的极限摩擦力后,界面将发生相对滑动。这样,飞片和靶的平衡点不在 A 点,而是分别在 C 点和 B 点达到一种平衡。相应界面的相对滑动速度为[10]

$$u_{\mathrm{slip}}(t)=u_B-u_C$$

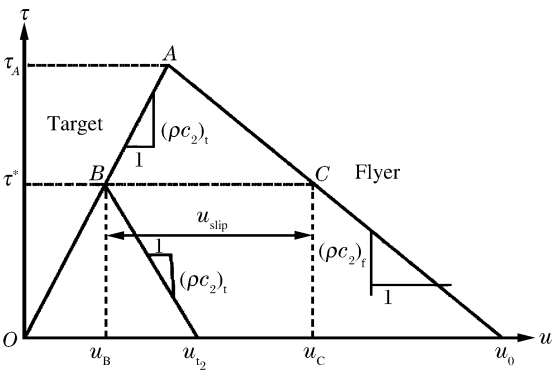

图 6 压剪联合冲击实验界面摩擦分析的 τ-u_s 图

Fig. 6 Schematic diagram of interfacial traction under compression and shear impact loading

由摩擦因数的定义:$\mu(t)=\tau(t)/\sigma(t)$,可以得到动摩擦因数与时间的关系(见图 7)。图 7(a)为纵剖试样的动摩擦因数,图中列出 K9-13 是为了对两种试样进行对比。由此可见:对同一个实验,在开始阶段,动摩擦因数基本上逐步增加;冲击波形成后,基本保持不变(我们认为冲击波形成后,应力脉冲保持恒定);当卸载冲击波到来后,由于横波卸载相对纵波卸载有一定的滞后,表现出动摩擦因数在卸载开始时,有一定的上升趋势。比较倾斜角为 10°的实验,其动摩擦因数随冲击速度的增加,由 154.9 m/s 的 0.024 6 增加到 360 m/s 的 0.069 0。倾斜角为 15°的实验的动摩擦因数比这些都大,其原因比较复杂,除了倾斜角增大的影响外,还包括表面处理等其他因素的作用。图 7(b)为横剖试样的动摩擦因数,根据图 5 的分析,一般没有纵波卸载的记录,因此,只有加载过程的动摩擦分析。由图 7(b)可见,此加载过程中动摩擦因数的历程比较复杂,同样与试样表面性能有关。其最终的摩擦因数较稳定,约 0.06～0.08。对比以上两种试样形式,很明显,横剖试样的摩擦因数比纵剖试样的稳定且高。这可能也说明,纵剖试样在粘结过程中对撞击表面的平整度不易控制,造成倾斜或不平整,导致撞击接触面面积减小。

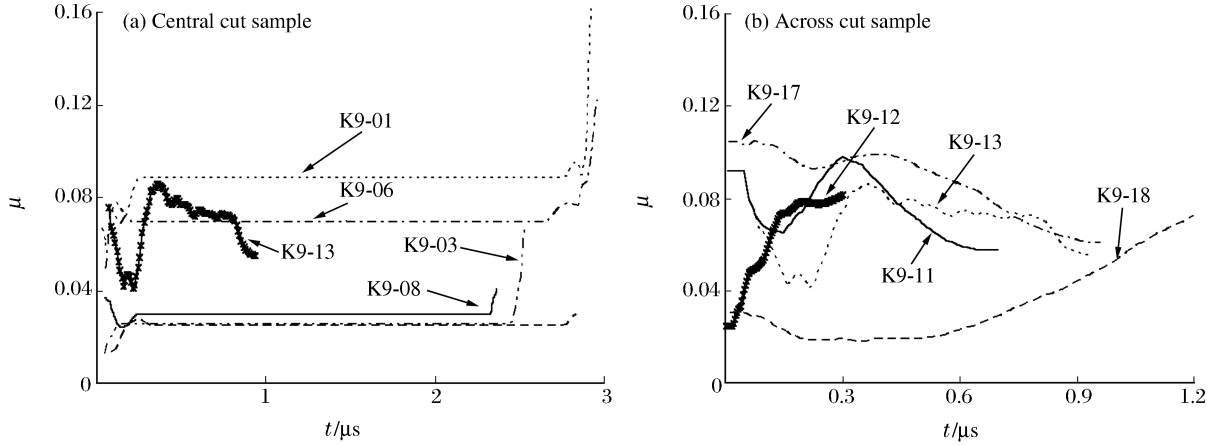

图 7 K9 玻璃的动摩擦因数与时间关系

Fig. 7 Relationship of dynamic friction coefficients to time for K9 glass

由 $u_{slip}(t)$式可以得到界面滑动速度与时间的关系(见图 8)。由此可见，两类试样的滑移速度在初期随时间增长基本有一个下降的趋势，图中显示的为此阶段。其后直到卸载冲击波到来，滑移速度基本保持不变。P. D. Zavattieri 等[11]对不同的粗糙表面撞击过程进行了数值模拟分析，其结论有助于理解图 7(b)和图 8(b)的实验结果。

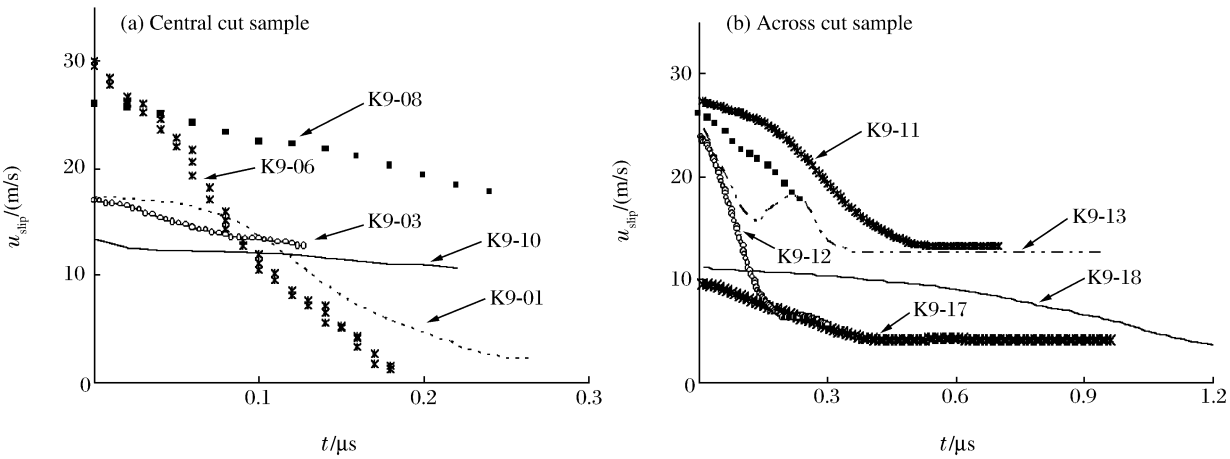

图 8 K9 玻璃的界面滑移速度与时间关系

Fig. 8 Relationship of dynamic slip velocity to time for K9 glass

5 结论和讨论

为研究剪切作用对失效波产生的影响，对 K9 玻璃进行了冲击速度 150～400 m/s，倾斜角 10°、15°的纵剖试样斜撞击实验。在这些实验中，无论冲击速度高低，在加载剪切横波(S^+)和卸载纵波(P^-)之间均存在波速 7.0～8.5 km/s(高于纵波波速 6.1 km/s)的波阵面，它的存在对卸载纵波和卸载横波的幅值有一定影响。由于失效波的产生与材料的表面性质密切相关，推测此波的产生可能与中间界面有关。为消除纵剖试样中间表面的影响，模拟 VISAR 实验条件，进行了冲击速度 70～300 m/s、倾斜角为 10°的横剖试样斜撞击实验。当冲击速度超过 129.2 m/s 时，可以确定失效波的存在，波速 0.98～1.4 km/s，与文献[4～5]结论基本一致。对应产生失效波的临界状态为：压应力 0.86～1.01 GPa，对应剪应力 53～71 MPa。表明剪应力的存在极大降低了失效波产生的阈值，剪切作用对失效波的影响很大。

分别对两种试样进行了撞击面的动摩擦因数和相对滑移速度的初步分析，结果表明，横剖试样的摩擦因数要比纵剖试样的稳定且高，横剖试样的摩擦因数约在 0.06～0.08，纵剖试样在 0.024～0.069，这说明靶的形式对动摩擦因数有一定的影响。两类试样的滑移速度表明在初期滑移速度随时间增长基本有一个下降的趋势，而后趋于稳定。

但是在以上的研究中，我们尚无法确定横剖试样实验中得到的多余波阵面的性质及产生的机制，由于其波速较高，幅值的规律性也不好，因此还需要结合其他有效的手段进行综合分析研究。

参考文献：

[1] Rasorenov S V, Kanel G I, Fortov V E, et al. The fracture of glass under high-pressure impulsive loading[J]. High Pressure Research, 1991,6:225－332.

[2] Clifton R J. Analysis of failure waves in glasses[J]. Applied Mechanics Reviews, 1993,46(12):540－546.

[3] Bourne N K, Rosenberg Z, Crouch I G, et al. The effect of micro-structural variations upon the dynamic compressive and tensile strengths of alumina[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1994, A446:309－318.

[4] 贺红亮. 冲击波极端条件下脆性介质的力学响应特性及其细观结构破坏特征[D]. 绵阳：中国工程物理研究院，1997.

[5] 赵剑衡. 冲击压缩下玻璃等脆性材料中失效波的实验和理论研究[D]. 北京：中国科学院力学研究所，2000.

[6] Bourne N K, Rosenberg Z, Field J E. High-speed photography of compressive failure wave in glasses[J]. Journal of Applied Physics, 1995,78(6):3736－3789.

[7] Tang Z P, Xu S L, Dai X Y, et al. S-wave tracing technique to investigate the damage and failure behavior of brittle materials subjected to shock loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005,31:1172－1191.

[8] 徐松林,唐志平,胡晓军,等.聚丙烯短微纤维增强水泥砂浆冲击特性研究[J].爆炸与冲击,2004,24(3):251－260.
XU Song-lin, TANG Zhi-ping, HU Xiao-jun, et al. Experimental investigation on dynamic properties of polypropylene micro-fiber reinforced cement under impact loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(3):251－260.

[9] 唐志平,胡晓军,廖香丽,等.双磁场 IMPS 粒子速度测试系统[J].实验力学,2000,15(1):16－21.
TANG Zhi-ping, HU Xiao-jun, LIAO Xiao-li, et al. An experimental facility for measuring longitudinal and shear waves with dual magnetic fields[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2000,15(1):16－21.

[10] Okadaa M, Liou N S, Prakash V, et al. Tribology of high-speed metal-on-metal sliding at near-melt and fully-melt interfacial temperatures[J]. Wear, 2001,249:672－686.

[11] Zavattieri P D, Espinosa H D. An examination of the competition between bulk behavior and interfacial behavior of ceramics subjected to dynamic pressure shear loading[J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 2003, 51:607－635.

Experimental investigation on failure wave in K9 glass under combined pressure and shear impact loading

XU Song-lin*, TANG Zhi-ping, XIE Qing,
ZHANG Xing-hua, FANG Zi-jun, ZHEN Hang
(*CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei* 230027, *Anhui, China*)

Abstract: To investigate the effects of shear stress to failure wave, series of experiments including oblique planar impact with inclination angle 10 and 15 degree, impact loading velocity ranging from 150 m/s to 400 m/s for K9 glass of central cut sample, are carried out in the present paper. Experimental results show that there existed a wave front with wave velocity exceeding that of longitudinal wave between the loading transversal wave and the unloading longitudinal wave. The wave has affected the amplitude of the unloading waves. Since the wave might be generated for the existing of central surface in central cut sample, some experiments including oblique planar impact with inclination angle 10 degree and impact loading velocity ranging from 70 m/s to 300 m/s for K9 glass of across cut sample are carried out in succession to eliminate the effect of central surface. In these experiments, the wave velocity of failure wave is determined to be 0.98－1.4 km/s and corresponding critical value for failure wave under combined pressure and shear impact loading are pressure 0.86－101 GPa and shear 0.053－0.071 GPa. All these show that shear stress may greatly decrease the critical value for failure wave. Some preliminarily discussions on dynamic friction coefficients and sliding velocity of impact surface are also conducted.

Key words: mechanics of explosion; failure wave; combined pressure and shear impact loading; K9 glass; dynamic friction

* Corresponding author: XU Song-lin
E-mail address: slxu99@ustc.edu.cn
Telephone: 0551-3607731