

# 玻璃样品表面对失效波萌生的影响<sup>1)</sup>

赵剑衡<sup>\*\*</sup> 孙承纬<sup>\*</sup> 段祝平<sup>\*</sup> 赵峰<sup>\*</sup> 文尚刚<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川绵阳 919 信箱 113 分箱, 621900)

<sup>\*\*</sup>(中国科学院力学研究所, LNM, 北京 100080)

**摘要** 通过三个对比实验, 首次发现经酸(5% HCl)处理的玻璃样品表面以及飞片表面粗糙度的变化均对失效波(Failure wave)形成的载荷阈值有明显影响。该实验结果对于说明失效波的形成机制、玻璃样品表面固有微裂纹以及碰撞瞬间由于样品表面与其内部力学性质差异导致的微裂纹形核、长大等因素有直接关系, 从而对进一步研究和建立失效波的萌生机制提供了重要的实验支持, 有助于进一步建立失效波的理论模型。

**关键词** 失效波, 冲击波

## 引言

失效波的研究始于 Rasorenov 和 Kanel<sup>[1]</sup>发现 K19 玻璃样品后自由表面粒子速度时程曲线上有反常的再压缩信号。它是二十世纪九十年代国际冲击动力学领域重要的研究发现之一, 它是指在一维平面冲击压缩下, 在玻璃等脆性材料中由冲击波引起的一种独特的失效或破坏现象。近年来国外许多实验室开展了失效波的实验研究, 失效波的一些基本的力学性质逐渐被人们认识, 例如它是一个移动破碎界面, 从碰撞面处萌生, 在冲击波后的纯压缩区内自持地以 1~2 km/s 的速度扩展, 其速度随传播的距离的增大而衰减, 失效波阵面后材料的声阻抗变小<sup>[1]</sup>, 强度下降为零<sup>[2]</sup>, 失效波前后纵向应力变化不大<sup>[3]</sup>, 失效波后材料横向应力变大<sup>[4]</sup>, 材料的折射率发生永久变化, 且不透光<sup>[5]</sup>。

从失效波被发现以来, 其萌生机制一直是人们关注的重点, 目前有三种比较有影响的假设: Kanel<sup>[1]</sup>、章冠人<sup>[6]</sup>和贺红亮<sup>[7]</sup>等认为失效波是玻璃样品表面微裂纹在冲击波后的压缩区内失稳扩展造成的; Clifton<sup>[8]</sup>认为失效波与冲击相变有关; Grady<sup>[9]</sup>提出一种剪切失效模型, 认为失效波是冲击波后的材料在剪切应力驱动下发生微裂纹形核、长大造成的。由于受实验测试技术的限制, 上述三个假设正确与否需要实验支持。

Raiser<sup>[10]</sup>和 Bourne<sup>[11]</sup>均开展过玻璃样品表面粗糙度变化对失效波萌生影响的实验, 其实验目的是想确定失效波和玻璃样品表面微裂纹之间的关系, 但两者得出完全相反的实验结论。玻璃样品表面粗糙度的差异意味着样品表面微裂纹数目、长度的差异以及碰撞时应力集中程度不同。Raiser 和 Bourne 均认识到这个问题, 因此他们希望通过实验测量出由于表面初始富集裂纹数目和长度差异在碰撞时可能导致失效波萌生弛豫时间或失效波后材料破碎程度的差异, 也就是失效波后的声阻抗大小会略有不同。他们的实验可能存在以下一些问题: (1) 考虑样品表面粗糙度不同对失效波的影响时, 还必需考虑另外一个问题即飞片的表面粗糙度不同, 如果飞片表面的粗糙度远比样品表面粗糙, 那么由飞片带来的微应力集中会掩盖样品表面粗糙度对失效波的影响。而 Raiser 和 Bourne 的实验中均未提及飞片表面粗糙度, 他们没有

1) 国家自然科学基金(19772048)和中国工程物理研究院基金(980103)资助项目

报导其实验中飞片经过特殊处理。(2) 失效波萌生时弛豫时间可能很短<sup>[26]</sup>, 而且弛豫时间上的差异可能是 VISAR 等测试仪器反映不出来的, 用慢响应、低空间分辨率的横向应力计来反映弛豫时间的差异就更加困难。(3) Bourne 用  $100\mu\text{m}$  的 SiC 粗砂来将玻璃样品表面磨粗糙, 那么玻璃样品被处理表面的大量的微裂纹和缺陷尺寸应该不小于  $0.1\text{mm}$ 。拿这样的玻璃样品与抛光的玻璃样品进行对比实验, 其实际未受损伤的玻璃样品厚度本来就比与之对比的玻璃样品的未损伤区薄, 加之碱石灰玻璃中失效波的运动速度只有  $1.5\text{mm}/\mu\text{s}$ , 失效波扩展  $0.1\text{mm}$  左右所需时间有百纳秒量级, 而实验测出的失效波到达时间差异也正好在这个量级上。因此 Bourne 的实验结论不能充分说明玻璃样品粗糙度对失效波萌生有影响或者失效波萌生与玻璃样品表面有关。

玻璃样品表面粗糙度差异, 也就是样品表面微裂纹数目的差异可能导致碰撞时萌生失效波的载荷阈值的差异, 这是 Raiser 和 Bourne 的实验没有考虑的问题。本文将通过 5% 的 HCl 处理玻璃样品表面和改变飞片表面粗糙度, 通过对比实验考证这些变化对失效波萌生的载荷阈值的影响。显然这项工作对于进一步正确阐明失效波的形成机制及其与玻璃样品表面微裂纹之间的关系是非常重要的。

## 1 实验

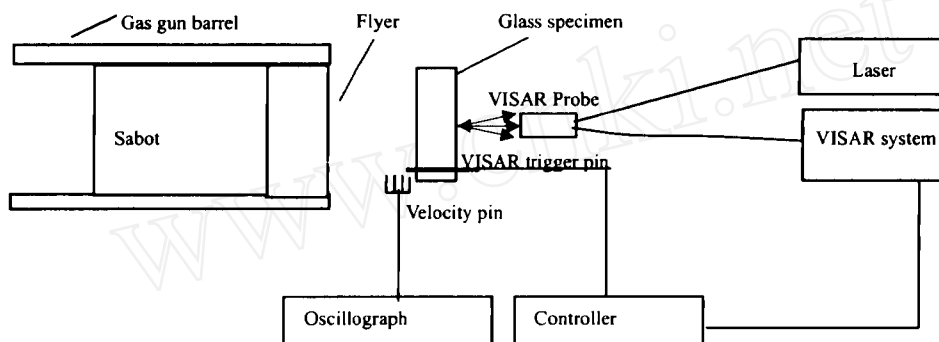


图1 气炮实验装置简图

实验在中国工程物理研究院流体物理研究所爆炸与冲击重点实验室进行, 图 1 给出了实验装置的简图。气炮口径为  $\phi 100\text{mm}$ 。弹丸由弹托和飞片组成, 其速度在  $40\sim 1500\text{m/s}$  范围内可调; 弹丸击靶时碰撞角小于  $0.03^\circ$ 。飞片出炮管后首先通过测速探针记录飞片的速度, 测速误差为 5%; 当弹丸碰撞触靶面触发探针, 给总控单元一个触发信号, 触发 VISAR (激光速度干涉测速仪) 系统和示波器, 开始记录玻璃样品后自由表面速度的变化。图 1 中的玻璃样品、测速探针、触发探针及 VISAR 探头等都位于靶室内。实验之前, 靶室内抽真空, 真空度为  $0.133\text{Pa}$ , 其目的是减小弹丸飞行时的阻力, 排除弹丸前方脱体或附体激波对靶样品的影响。表 1 给出了相关的实验加载条件。

实验中样品为 K9 玻璃材料, 其密度为  $2.52\text{g}/\text{cm}^3$ , 弹性模量为  $82.3\text{GPa}$ , 纵波声速为  $5.83\text{km/s}$ 。样品的碰撞面尺寸为  $70\text{mm}\times 70\text{mm}$ , 厚度见表 1。玻璃被碰撞表面的光洁度是按光学四级加工, 平面度为一个光圈。两面的平行度小于  $30'$ 。玻璃样品的后自由表面用  $5\mu\text{m}$  的金刚砂磨毛作为漫反射面, 并镀  $300\text{nm}$  厚的银膜, 用于 VISAR (测量任意自由表面激光速度

干涉仪)测试。在酸浸蚀玻璃样品表面实验中, K9 玻璃样品的碰撞面用 5%的 HCl 浸泡两个小时, 然后用纯净水清洗玻璃样品表面, 用灯烤干。文献<sup>[12]</sup>报导, 按照该工艺处理后, 玻璃样品表面对辐照其上的激光的能量吸收有明显的不同, 表明酸处理明显改变了玻璃样品的表面物理化学性质, 对样品表面微裂纹也产生一定的影响<sup>[13]</sup>。

实验中使用的飞片材料均是黄铜, 密度为  $8.6\text{g/cm}^3$ , 其纵波声速为  $4.7\text{mm}/\mu\text{s}$ , HEL 弹性极限为  $1.12\text{GPa}$ , 铜飞片厚度为  $10\text{mm}$ , 直径为  $95\text{mm}$ 。飞片的表面粗糙度为  $3\mu\text{m}$ , 能够见到加工的刀痕。在酸处理玻璃样品的对比实验和飞片表面粗糙度对比实验中, 飞片的碰撞面作特别处理, 首先用  $5\mu\text{m}$  的金刚砂研磨表面约 4 个小时, 然后抛光约 14 个小时。最后经过检测, 铜飞片碰撞表面的粗糙度只有  $0.025\mu\text{m}$ 。

表1 实验加载条件和结果

Shot No.	Surface processing of K9 glass sample	Thickness of sample mm	Roughness of flyer surface $\mu\text{m}$	Thickness of flyer mm	Velocity of flyer m/s	Loading stress GPa	Velocity of failure wave mm/ $\mu\text{s}$
KG2	/	5.8	3	10	423.08	4.40	0.90
KG3	5%HCl, 2 hours	6.4	0.025	10	445.35	4.63	/
KG4	/	6.4	0.025	10	451.35	4.63	0.82

## 2 结果和分析

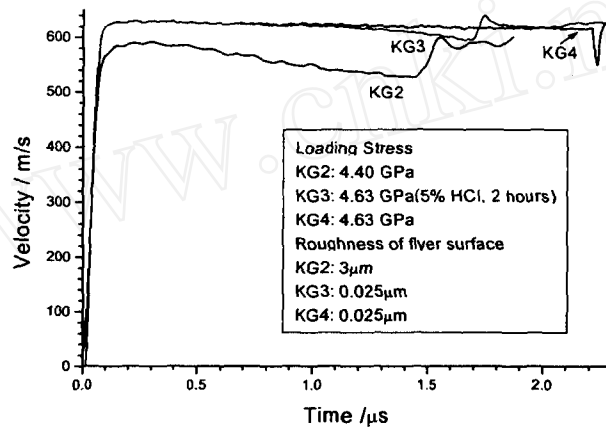


图2 VISAR记录的样品后自由表面速度时程曲线

图2给出了表1中不同表面粗糙度的飞片和不同表面状况的玻璃样品(用5%盐酸处理和未经酸处理)条件下, 样品后自由表面速度时程的实验结果, 可以看到当飞片的表面粗糙度为 $3\mu\text{m}$ 时, 在冲击载荷为 $4.4\text{GPa}$ 时, KG2实验的玻璃样品后自由表面速度时程剖面上有明显的再压缩信号, 即产生了失效波。当用飞片表面粗糙度为 $0.025\mu\text{m}$ (抛光)时, 进一步将碰撞压力提高到 $4.48\text{GPa}$ , 实验KG4中的玻璃样品中却没有产生失效波。这说明表面粗糙的飞片会在碰撞时使玻璃样品表面产生高的局部微应力集中, 从而对失效波萌生的所需的最小载荷阈值有明显影响, 这可能就是文献<sup>[20]</sup>没有得出玻璃样品表面状况对失效波萌生有影响的原因。对比图2中实验KG3和KG4的速度时间关系曲线, 可以发现用5%的稀盐酸HCl处理过两个小时的玻璃样品中产生了失效波, 而未经过酸处理的玻璃样品在完全相同的加载条件下没有产生失效波。

需要说明的是用5%HCl浸泡过两个小时的玻璃样品表面凭肉眼看不出与未浸泡玻璃样品表面的差异。上述实验表明酸处理玻璃样品表面也能够明显地改变玻璃样品产生失效波的冲击载荷阈值。这一方面是因为酸侵蚀改变了玻璃样品表面的化学成分，另一方面是因为氢离子H<sup>+</sup>由玻璃原子的电子层吸附在裂纹尖端。由于氢离子没有电子层，其大小比其它离子小数千倍，及易被其它分子的电子吸附进入其电子层，因而减小了介质其它价键的结合，降低玻璃样品的强度<sup>[6]</sup>。在玻璃中裂纹的扩展速度可以表示为<sup>[6]</sup>

$$\frac{dl}{dt} = \frac{r_0}{\tau_0} \cdot \exp[-(U_1 + \gamma_1 K_1) / RT] \quad (1)$$

式中： $l$ 为裂纹长度， $U_1$ 为断裂一根键的能量， $\gamma_1$ 为表面能， $\tau_0$ 为特征时间， $r_0$ 为原子间的间距。 $R$ 为气体常数。对于玻璃 $U_1 = 1.495 \text{ J}/(\text{g Pa})$ ，由于氢的屏蔽作用，裂纹尖端的 $U_1$ 要减小20%~30%。因而被酸侵蚀后的玻璃的裂纹更容易扩展。上述实验结果表明玻璃样品表面微应力集中、表面微裂纹和表面结构的变化均对失效波有影响。

失效波首先萌生于玻璃样品的界面，表明玻璃表面的强度比其内部的要弱。这有两方面的因素：第一，所有的玻璃表面均有缺陷存在，即使加工非常好，表面光洁度很高的光学玻璃的表面每平方厘米都有几百到几千条微裂纹，这是在抛光过程中研磨料与玻璃体相互磨擦时留下的，表面微裂纹的存在削弱了玻璃表面固有的强度，使其抵抗破坏的能力比玻璃体内部大大下降<sup>[13]</sup>。（2）玻璃样品表面的化学组成与玻璃主体的化学组成有一定的差异。造成这种差异的原因主要是熔制、成形、热加工以及玻璃体表面受大气、水和其它溶剂侵蚀造成的<sup>[6, 13]</sup>。

### 3 结 论

实验发现玻璃样品表面受5%HCl处理后，产生失效波的最小载荷阈值明显降低，同时发现飞片表面粗糙度越大，产生失效波的载荷阈值越小。这些结果证实失效波形成机制与玻璃样品表面固有微裂纹和碰撞瞬间表面处形核的微裂纹的失稳扩展有关。

致谢 中国工程物理研究院流体物理研究所 102 室的胡绍楼研究院、汪小松、王维、贾卢峰等参加本文实验，作者在此表示衷心的感谢。本文完成过程中得到贺红亮博士的帮助和指导，特此致谢！

### 参 考 文 献

- 1 Rasorenov SV, Kanel GI, Fortov VE and Abashev MM. The fracture of glass under high-pressure impulsive loading. *High Pressure Research*, 1991, 6: 225~232
- 2 Brar NS, Rosenberg Z and Bless SJ. Spall strength and failure waves in glass. *J De Phys IV, Colloque C3, suppl*, 1991, 1: 639~644
- 3 Bourne NK, Millett JCF and Rosenberg Z. The shock wave response of a filled glass. *Proc R Soc Lond A*, 1996, 452: 1945~1951
- 4 Rosenberg Z, Bourne NK and Millett JCF. Direct measurements of strain in shock-loaded glass specimens. *J Appl Phys*, 1996, 79(8): 3971~3974
- 5 Bourne NK, Rosenberg Z, Mebar Y, Obara T and Field JE. A high-speed photographic study of fracture wave propagation in glasses. *Journal De Physique IV*, 1994, 4, Colloque C8: 635~640
- 6 章冠人. 冲击压缩脆性材料中破碎波的几个问题. *高压物理学报*, 1998, 12(2): 81~85
- 7 He Hongliang. dynamic response and microstructure damage of brittle materials under shock wave loading. A dissertation in partial

- fulfillment of requirements for the degree of PH.D, Southwest Institute of fluid physics, 1997
- 8 Clifton RJ. Analysis of failure waves in glasses. *Appl Mech Rev*, 1993, 46 (12), Part1, 540-546
  - 9 Grady DE. Dynamic failure in brittle solids, NTIS, 1994
  - 10 Raiser GF, Wise JL, Clifton RJ, Grady DE and Cox DE. Plate impact response of ceramics and glasses. *J Appl Phys*, 1994, 75(8): 3862-3870
  - 11 Neil Bourne, et al. On the origin of failure waves in glass. *J Appl Phys*, 1997, 81(10)
  - 12 李仲伢等. 化学处理增强光学玻璃的抗激光破坏强度. *光学学报*, 1999, 19(6): 856-859
  - 13 王承遇, 陶瑛. 玻璃表面和表面处理. 中国建材工业出版社, 1993, 北京
  - 14 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. 博士学位论文, 中国科学院力学研究所, 2000