

石英晶体测试实验中干扰的消除

卢芳云 陈丕琪* 张震宇 何智*

(国防科技大学应用物理系 长沙 410073)

摘要 Y一切石英晶体的各向异性物理特性,使它在正碰撞或平面冲击波作用条件下能产生压剪波的传播,为实现对材料的压剪加载实验研究提供了条件。由于石英晶体的压电效应,国外采用了VISAR技术进行测试。在我们的工作中,首次尝试用锰铜压阻法和电磁质速测量法进行测试。压电效应造成了明显的干扰,妨碍信号的获取。实验中用磁控溅射方法将石英晶体表面镀银层约 $1\mu\text{m}$,达到了中和极化电荷、屏蔽极化电场的目的,比较成功地消除了压电干扰,获得了有效的测试信号。

关键词 压电效应,压剪加载,干扰

分类号 O482.1

利用Y一切石英晶体的各向异性特性,在一维平面正碰撞的加载条件下,通过石英晶体产生耦合的平面复合压缩剪切波^[1]传入粘接在晶体后表面的试件中,实现对试件的复合压缩剪切加载,从而为研究材料在更接近实际情况的加载条件下的响应行为提供了一种有效方法。但是石英晶体的压电效应却给实验测试带来电干扰,因此国外采用光电方法:VISAR技术测试压剪波的传播情况^[2],但是VISAR技术只能给出自由面的速度信息,对压剪波在试件中的传播过程缺乏直观的描述。为此,我们首次采用锰铜压阻法和电磁质速法进行试件内部质点信息的测试,然而压电干扰妨碍实验信号的正确获取,为此我们摸索并采取晶体表面镀层方法,消除了压电效应的干扰,保证了实验测试的有效进行。

1 Y一切石英晶体的压电效应

α 石英晶体有特定的晶轴坐标系,其各轴对应着固有的物理性质(如图1所示)。x轴称为电轴,沿x轴方向或沿y轴方向施加应力时,在x轴方向产生压电效应。如果用电位移矢量 $D=(D_1, D_2, D_3)^T$ (这里1, 2, 3, 分别表示x, y, z方向时)来表征压电效应的强度,在应力T的作用下可写出下面的压电方程:

* 中国工程物理研究院 绵阳
1994年4月25日收稿

$$D = dT \quad (1a)$$

T 与应力张量 a_{ij} 的关系是:

$$T = (T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6)^T = (\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{23}, \sigma_{13}, \sigma_{12})^T \quad (1b)$$

d 是压电常数张量

$$d = \begin{bmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} & -2d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1c)$$

石英晶体压电常数见表 1。

表 1 α 石英晶体压电常数^[2]($10^{-12}C/N$)

d_{11}	d_{12}	d_{14}	d_{25}	d_{26}
2.31	$-d_{11}$	0.727	$-d_{14}$	$-2d_{11}$

2 利用石英晶体的压剪加载

利用石英晶体: Y-一切面 α 石英产生压剪加载的实验装置示意图见图 1 (加载可以由炸药爆轰造成的平面冲击波作用来实现)。

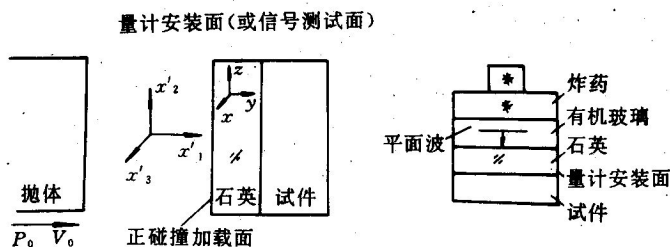


图 1 利用 Y-一切石英晶体产生压剪加载实验

在 x_i 坐标系中, 处于 P_0 应力状态的抛体以 V_0 的速度沿 x_1 轴正碰撞石英晶体或平面冲击波作用于石英, 将在石英中耦合产生两波结构^[1], 引起两个方向的运动, 在石英中造成下面的应力状态:

$$\sigma'_{11} = (C_{11}\zeta + C_{14}) \frac{\alpha_2}{v_2} H\left(t - \frac{x'_1}{v_2}\right) - (C_{11} - C_{44}\zeta) \frac{\alpha_3}{v_3} H\left(t - \frac{x'_1}{v_3}\right) \quad (2a)$$

$$\sigma'_{12} = \sigma'_{21} = - (C_{14}\zeta + C_{44}) \frac{\alpha_2}{v_2} H\left(t - \frac{x'_1}{v_2}\right) - (-C_{14} + C_{44}\zeta) \frac{\alpha_3}{v_3} H\left(t - \frac{x'_1}{v_3}\right) \quad (2b)$$

$$\sigma'_{22} = \sigma'_{33} = \sigma'_{23} = \sigma'_{13} = 0 \quad (2c)$$

使石英处于压缩应力 σ'_{11} 和剪切应力 σ'_{12} 的作用之下, 这样的运动或应力状态通过石英与试件的界面后传入试件中, 对试件实现了复合压缩剪切加载。

公式(2)中的参数与晶体的材料性质及碰撞状态有关^[1]。所以有:

$$T_1 = T_3 = T_5 = 0 \quad (3a)$$

$$T_2 = \sigma'_{11} \quad T_4 = \sigma'_{12} \quad (3b)$$

代入式(1a)中可得:

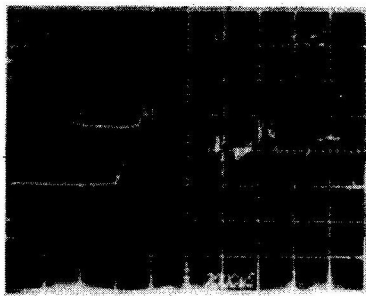
$$D_1 = d_{12}\sigma'_{11} + d_{14}\sigma'_{12}$$

或

$$D_1 = -d_{11}\sigma'_{11} + d_{14}\sigma'_{12} \quad (4a)$$

$$D_2 = D_3 = 0 \quad (4b)$$

当 σ'_{11} 、 σ'_{12} 应力值在 GPa 量级时, D_1 约为 $3 \times 10^{-3} \text{C/m}^2$, 冲击波作用时间 10^{-6}s , 则此时可产生的电流密度约为 $3 \times 10^3 \text{A/m}^2$. 这种表面极化电荷引起的电场严重干扰其他电场、磁场的正常工作, 从而影响了电测信号的获取。图 2 是在石英裸露的情况下用锰铜压阻法所测得的石英与聚四氟乙烯试件界面上的应力信号。可见, 干扰在抛体碰撞石英时就已经产生了, 当所测压剪波到达量计界面时, 应测的信号已无从获得。



石英晶体: $\Phi 31.5 \times 5.09$ (裸)
试件: 聚四氟乙烯 $\Phi 35 \times 10$
扫描速度: $1 \mu\text{s}/\text{格}$
灵敏度: $50 \text{mv}/\text{格}$
锰铜压力量计置于石英与试件之间

图 2 裸露石英参与的锰铜压阻法测量信号

3 正确信号的获取

我们在实验中所用的 Y-切面石英尺寸为 $\Phi 45 \times 5 \text{mm}$ 或 $\Phi 31.5 \times 5 \text{mm}$, 试件是聚四氟乙烯 (PTFE) 或炸药 (T/ $\Gamma(40/60)$), 采用的电学测试方法是锰铜压阻法或电磁质速测量法。为了获取正确信号, 首先要消除压电干扰的影响。

我们从两个方面来考虑消除压电效应对被测信号的干扰:

- (1) 使压电效应引起的表面极化电荷屏蔽起来, 防止极化电场对外的干扰;
- (2) 使极化的反向电荷及时得到中和, 削弱极化电场强度, 减轻干扰。

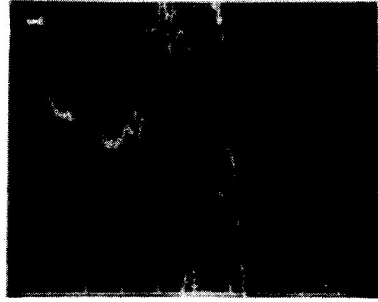
出于第一种考虑, 石英需要一个金属外壳作为屏蔽层; 出于第二种考虑, 石英晶体最好处于导电性良好的金属壳体中, 在波传播过程中就能迅速使电荷达到平衡, 保持等势状态。

为此我们首先采用的措施是: 用真空蒸镀的方法将铝金属镀在石英晶体的外表面, 石英片的两个表面的镀层厚度为 $0.2 \mu\text{m}$, 受蒸镀技术的限制, 石英片侧面的镀层较薄, 导电性也较差。而侧向所对应的 x 轴方向却是极化电荷的积累方向, 因此实验前在侧向涂上了导电胶。图 3a 是在这种石英晶体与 PTFE 试件间安放锰铜压阻计所记录的信号照片。由图可见干扰仍存在, 与图 2 相比, 看不出改观。分析原因可能是: 1. 镀层太薄, 石英片的加工精度达不到 $0.2 \mu\text{m}$, 致使镀层不均匀覆盖甚至影响原设想的完全屏蔽电场的目的; 2. 导电胶在动态加载下, 工作状态不理想, 不能起到很好的导电作用, 从而极化电荷不能及时得到中和, 干扰依在。



石英晶体: $\Phi 45 \times 4.89$ (镀铝 $0.2\mu\text{m}$)
 试件: PTFE $\Phi 40 \times 10$
 扫描速度: $1\mu\text{s}/\text{格}$
 灵敏度: $50\text{mv}/\text{格}$
 量计置于石英与试件之间

(a)



石英晶体: $\Phi 31.5 \times 5$ (0.01mm 铝箔包封)
 试件: PTFE $\Phi 35 \times 10$
 扫描速度: $1\mu\text{s}/\text{格}$
 灵敏度: $100\text{mv}/\text{格}$
 量计置于石英与试件之间

(b)

图 3 有包封的石英晶体参与的锰铜压阻法测试信号

作为改进措施,我们试想用 0.01mm 厚的铝箔作金属壳体包封石英,考虑到石英与试件界面不宜加入太厚的其它材料,以免影响压剪波尤其是剪切量的传入,我们用上述已镀铝层的石英,在交界面以外的地方全部以铝箔包封石英。外包封讲究,紧密贴住石英,以便有效屏蔽极化电场,方便极化电荷迅速达到中和。图 3b 是采取这种措施,在与图 3a 的实验相同的条件及测试方法情况下所获取的锰铜压阻法测试结果。可见所测信号有所改进,干扰虽然存在,但是幅度及频率都有所下降,信号依稀可辨,这说明改进措施是有效的。但是由于铝箔包封与未包封表面难以保证完全紧贴,还存在较薄镀层,加之铝金属的导电性也不是十分理想,所以存在的干扰仍然妨碍信号的准确获得。

在上面的基础上,我们认为: 1. 要改进包封质量; 2. 要加强包封金属的导电性,才有可能达到我们的目的。因此我们仍然考虑金属镀层的方法。真空蒸镀虽然使镀层细腻,但是石英片侧面蒸镀有一定困难,而且周期长、技术复杂、镀层不易太厚,难以掩盖石英片由于加工精度受限所引起的缺陷。于是我们采取了核磁共振溅射技术对石英进行全方位镀银。我们是在西南流体物理研究所的南光机器厂生产的射频直流磁控溅射台 H46500-7 型上完成镀银工作的。侧面镀层 $\geq 1\mu\text{m}$, 两上下表面镀层 $\leq 1\mu\text{m}$ 。采用这样的石英晶体做实验得到图 4 所示的记录信号。图 4 是在石英与炸药试件间的锰铜压阻计所记录的压力信号,图上看到的明显两个台阶是石英特性决定的两波结构 QL 波和 QT 波的反映,分别代表 $\sigma_{11,QL}$ 和 $\sigma_{11,QT}$, 而第一个台阶上的波动是由于锰铜传感器本身包封层太厚引起的响应行为。而压电干扰在信号记录基本结束(即信号到达 $2\mu\text{s}$)以后才出现,而且幅频很低,可能因为冲击波作用以后镀层破坏,干扰重现;而受过冲击波作用的石英,原有特性也有所改变,压电干扰不再很强。干扰重现的时间与反射波再入石英的时间相近。

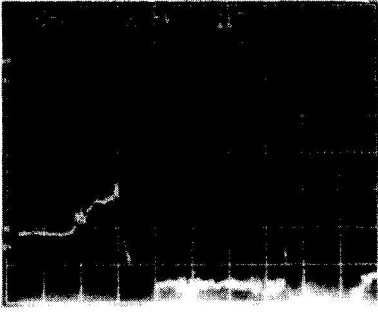


图4 镀银石英晶体参与的锰铜压阻法测试信号
石英晶体: $\Phi 45 \times 10$ (镀银层 $1\mu\text{s}$); 试件: T/r $\Phi 45 \times 20$; 扫描速度: $1\mu\text{s}/\text{格}$; 灵敏度: $50\text{mv}/\text{格}$; 量计置于石英与试件之间

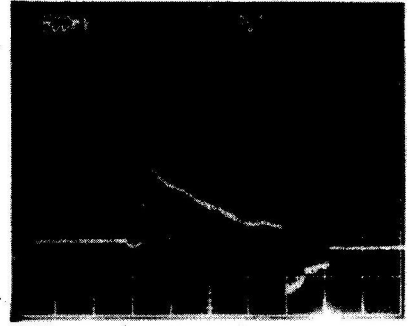


图5 镀银石英晶体参与的电磁法测试信号
石英晶体: $\Phi 45 \times 5.08$ (镀银层 $1\mu\text{m}$); 试件: PTFE 组合试件; 扫描速度: $2\mu\text{s}/\text{格}$; 灵敏度: $500\text{mv}/\text{格}$; 电磁质速度量计置于石英与试件之间

进行电磁法测试获得了图5所示的信号记录。在 $500\text{mv}/\text{格}$ 的灵敏度下, 干扰几乎不见, 信号干净, 小干扰在信号记录 $6\mu\text{s}$ 以后才出现。信号起跳后可见两个小台阶, 那是石英引起的 QL 波和 QT 波所致的 $\sigma_{11\text{QL}}$ 和 $\sigma_{11\text{QT}}$ 。随后是波的衰减, 这个信号是成功的。

4 总 结

利用 Y 一切石英晶体实现对材料的压剪加载实验中, 石英的压电干扰可以通过将石英外表面镀银 $1\mu\text{m}$ 来消除。这样的镀层可达到屏蔽极化电场, 及时迅速中和极化电荷的目的, 使电学测量能获得正确可读的测试信号。

在电磁法测量中, 有一个现象有待解释: 将石英外的银屏蔽层引出地线与信号地线相接, 可以避免屏蔽的等势体上悬浮电压的干扰。然而, 与此地线相接的记录计的信号前反而出现小干扰, 使信号起跳点前的扫描线不连续。虽这个现象普遍存在, 但不影响信号记录。

本实验在中国工程物理研究院西南流体物理研究所完成, 过程中与该所的刘仓理和张文平作过有益的讨论, 电学测量在何智、张勇的帮助下完成, 并一直得到方青、卫玉璋等同志的支持, 在此一并感谢。

参 考 文 献

- 1 J N Johnson. Shock Propagation Produced by Planar Impact in Linearly Elastic Anisotropic Media. J A P 1971, 42(13):55
- 2 秦自楷. 压电石英晶体. 北京: 国防工业出版社, 1980
- 3 L C Chhat Idas. Pressure—shear loading of Materials, Shock Waves in Condensed Matter 1987, S C Schmidt, N N Holmes (editors). Elsevier Science Publishers B V, 1988

Elimination of the Interference in Measurement

With Quartz Crystals

Lu Fangyun Chen Paiqi

Zhang Zhenyu He Zhi

(Department of Applied Physics)

Abstract

Pressure—shear waves were produced in Y—cut α quartz crystals by normal impact with their linearly elastic anisotropism. This provided a way to research the response of materials under pressure—shear loading, experimentally. Because of the piezoelectricity of quartz, VISAR technique was used in the experimental measurement abroad. In our work, Manganin piezoresistive method and electric—magnetic partial velocity method were first adopted for getting the internal state variation of samples. In our experiment the surfaces of quartz pieces were electroplated with silver layers of $1\mu\text{m}$ thick by means of magnetic—controlled shoot, which neutralized polarized current and covered polarized electric field. Consequently the piezoelectric interference was eliminated.

Key words piezoelectricity, pressure—shear loading, interference

国防科技大学学报编委会

主任： 陈启智

副主任： 张金槐 陈火旺 陆仲良

委员： 方丁酉 任钧国 王永仲 袁建民

常文森 王正志 刘克成 皇甫堪

庄钊文 张仁 王兴业 周世光

吴泉源 杨晓东 邹鹏 沙基昌

金治明 苏建志 李圣怡 罗飞路