

短路电流石英传感器及其动态标定

吴嵩毓

(1984年7月30日收到)

本文讨论了用于测量应力—时间历史的短路电流石英传感器的原理, 设计及标定问题。我们的标定结果指出: 全电极型传感器在 25 kbar 以内, 电流系数等于 $2.04 \times 10^{-9} C \cdot cm^{-2} \cdot kbar^{-1}$, 保护环型传感器在 8—25 kbar 应力范围, 电流系数是 $2.15 \times 10^{-9} C \cdot cm^{-2} \cdot kbar^{-1}$ 。

一、原 理

当高速平板碰撞产生的应力波在石英晶体片 x 轴向传播时, 由于应力波的作用, 石英晶体片将产生极化。如果将晶体片两极面通过外电路短路起来, 那么在晶体片极化的同时, 将在外电路上伴随产生压电电流。由于负载电阻(一般小于 50Ω) 与晶体绝缘电阻相比是很小的, 故压电电流又称短路电流。短路电流的波形反应了样品与晶体片交界面上的应力—时间历史。这个技术的特点是: 阻抗低, 抗干扰性能好, 灵敏度高, 响应快并且使用起来比较简单, 可以用来研究一维应变条件下固体材料力学性质。

1965年 Graham, R. A., 等⁽¹⁾对高速平板碰撞过程作了以下假设, 其主要内容是: (1) 石英晶体片在受应力作用时处于一维应变状态; (2) 压电产生的电场是一维的; (3) 石英处于弹性区; (4) 介电常数不随应力改变; (5) 晶体的导电率等于零; (6) 晶体受压时应变量为无穷小; (7) 应力波瞬时达到整个晶体片上; (8) 压电极化强度 P 与施加在晶体上的应力 σ 成正比, 即 $P = k\sigma$, 并且比例系数 k 值在一定应力范围内是不变的。

应用静电学原理并限制讨论的问题满足上述假设, 导出短路电流的表达式

$$i(t) = \frac{kA}{l} \int_0^l \frac{d}{dt} \sigma(x, t) dx \quad (1)$$

式中, A 为电极面积, l 为晶体片厚度。当厚度为 l 的平板进行高速对称碰撞时, 其应力波形宽度等于 $2l/U_s$, U_s 是石英声速, 应力可由下列式子表示。

$$\left. \begin{aligned} \sigma(x, t) &= \sigma_1 + \sigma_2 \\ \sigma_1 &= \sigma_0 H(t - \frac{x}{U_s}) \\ \sigma_2 &= \sigma_0 H(t - 2l/U_s + x/U_s) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 H 是Heaviside函数,把式(2)代入(1),并在不同时间区域内进行积分,得到各时刻应力波形:当 $0 < t < l/U$,时

$$i(t) = kAU_s/l \cdot \sigma_0 \quad (3)$$

当 $l/U < t < 2l/U$,时

$$i(t) = -kAU_s/l \cdot \sigma_0 \quad (4)$$

在 $0 < t < l/U$ 期间,电流波形正确反映了应力历史,这段时间为有效测量时间,(3)式是这种传感器的基本公式。 $t > l/U$ 以后,由于受到侧向卸载波的影响,所测得的信号波形将发生失真。图1是传感器的理想波形。

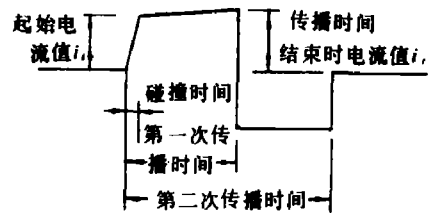


图1 典型一维条件下传感器电流波形

我们使用轻气炮对石英传感器电流系数进行标定,根据动量守恒方程,碰撞应力为

$$\sigma = \rho_0 U_s U_s \quad (5)$$

式中,石英初始密度 $\rho_0 = 2.65 \text{g/cm}^3$,石英声速 $U_s = 5.72 \text{mm}/\mu\text{s}^{(1)}$ 。当同样材料对称碰撞时,质点速度 U_s 是碰撞速度 U_0 的一半,碰撞速度由实验测得,代入式(5)确定应力 σ ,式(3)中的电流 i 可由记录仪器测量电压波形得到,从而确定电流系数 k 值。

二、传感器装置

在传感器设计和安装上要力求满足前述假设要求。石英晶体性能稳定,动态弹性极限高,基本上满足假设3、4、5、6、8等条件,而假设1、2、7则须要由传感器设计和安装上保证,传感器装置如图2。

弹与靶间倾斜角必须严格控制方能产生比较理想的平面波,否则将违背一维应变条件和应力波同时作用在整个晶片上的要求,造成波形畸变,并且测得的波形也偏低。波形附加一个上升时间,这个时间就是应力波横向掠过晶片表面的时间。

但是倾斜是难免的,一般要求应力波横向掠过晶片的时间 ΔT 远远小于应力波轴向通过晶片的时间,即要求 $\Delta T = d \sin \alpha / U_0 \ll T_{min}$,式中 d 为晶片直径, α 为包括整个系统的倾斜角, U_0 为碰撞速度, T_{min} 为最小测量时间。这个式子表明,随碰撞速度增加,对 α 要求降低,高速碰撞时比较容易满足倾斜度的要求。

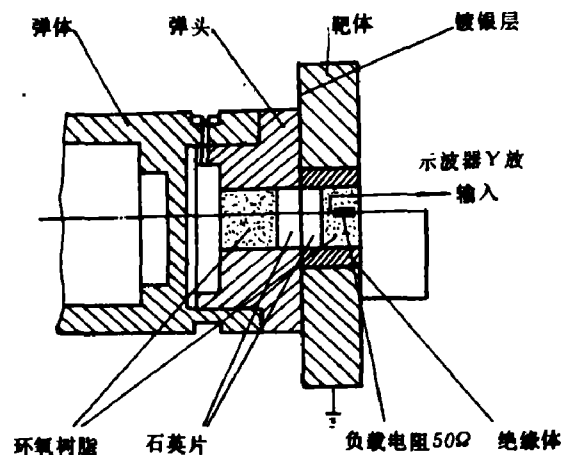


图2 石英-石英对称碰撞装置图

三、全电极型石英传感器的设计和标定

选择 $x(0)$ 石英晶片, 在 $+x$ 面上真空镀银。为了改善贴结强度, 先镀铬, 然后在铬面上镀银以达到良好的导电层。按图 2 装置安装弹体和靶体, 并在安装上力求石英片与弹体, 石英片与靶体成为一个平面。靶体安装后在碰撞面上镀银, 使得 $-x$ 面与地相连接。在石英片的安装上取正定位, 即应力波的传播方向为 $-x \rightarrow +x$, 从 $+x$ 面取出信号, 接到记录仪器输入端。在晶片直径 d 与厚度 l 的选择上, 要求 d/l 足够大, 以得到比较好的波形。但是直径大了价格昂贵, 倾斜度要求更高, 厚度小了测量时间短, 因此合理选择直径和厚度比值是十分重要的。文献〔1〕指出: $d/l \geq 20$ 时测量波形基本上满足一维条件; $d/l \geq 10$ 时, 在有效测量时间内波形呈线性变化; 当 $d/l \leq 4$ 时, 整个波形呈非线性变化, 并且电流系数也偏低。以下给出我们采用晶片直径 $d = 20 \text{ mm}$, 厚度 $l = 3.5 \text{ mm}$ 的实测数据, 见表 1。

表 1 全电极型石英传感器实验数据

项目 \ 序号	1	2	3	4	5	6	7	8
弹速($\text{mm}/\mu\text{s}$)	0.102	0.118	0.142	0.214	0.241	0.280	0.330	0.334
应力(kbar)	7.71	8.96	10.75	14.22	18.63	21.60	25.11	26.01
电 流 系 数 $\times 10^{-8} \text{ C} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{kbar}^{-1}$	2.05	2.04	2.09	1.95	2.06	1.97	2.04	2.10

电流系数的平均值 $\bar{k} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 k_i = 2.04 \times 10^{-8} \text{ C} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{kbar}^{-1}$, 与文献〔1〕同样条件下

的数据相近。但是实测波形显示出与理想波形明显失真, 电流随时间上升。全电极型传感器不满足一维条件是造成波形失真的主要原因, 其理由是: 当应力波沿轴向传播时, 卸载波从侧向向里传播, 侧向卸载波引起的附加极化效应造成波形失真。我们知道一维条件下的压电方程为 $D_i = k_{11}\sigma_{11} + k_{12}\sigma_{12}$ 。第一项为正应力引起的压电效应, 是我们所需要的。第二项为侧向应力引起的附加压电效应, 而对于石英 $k_{11} = -k_{12}$, σ_{12} 与 σ_{11} 的极性也是相反的, 故第二项的效果引起电位移上升。

受应力作用后的晶片两表面之间的电场, 与静电学中平板电容器之间形成的电场相类似。当 d/l 较小时, 电场的边缘效应是不可忽略的, 它将引起电流波形失真。

四、保护环型传感器设计和标定

首先用光刻或机械刻的办法将 $+x$ 面的银层分成内环和外环两个部分, 刻槽宽度选 $0.08 - 0.1 \text{ mm}$, 过宽会影响测量精度, 并且在环周围形成新的边缘效应, 过窄不能达到绝缘强度要求。槽的深度以清除干净银层为原则。槽的边缘要求光滑、均匀。外环宽度的选择要求确保在有效测量时间以内, 内电极处于一维应变与一维电场状态。考虑到晶体各向异性, 定量选择有困难。我们根据文献〔1〕的经验, 选外环宽度 $W = 1.5l$ 。为了使内外电场强度一致, 消除电场边缘效应的影响以及匹配的需要, 内外电极上的电阻是这样选择的: 内电极电阻为 50

Ω ，外电极电阻的选择要使得内外电阻值反比于内外电极面积，这样，内外电极处于等电位，两电极之间不存在电位差，满足一维电场要求。

表 2 保护环型传感器实验数据

项目 \ 序号	1	2	3	4	5	6	7
弹 速 ($mm/\mu s$)	0.0716	0.110	0.164	0.204	0.261	0.302	0.336
应 力 ($kbar$)	5.46	8.32	12.40	15.46	19.80	22.85	25.39
电 流 系 数 $\times 10^{-8} C \cdot cm^{-2} \cdot kbar^{-1}$	2.07	2.14	2.14	2.16	2.14	2.16	2.16
i_t/i_0	1.00	1.03	1.08	1.05	1.09	1.10	1.16

表中 i_0 是 $t=0$ 时的电流值； i_t 是 $t=l/U$ 时的电流值

这部分的实验结果是 从 $8 \sim 25kbar$ 电流系数平均值为 $2.15 \times 10^{-8} C \cdot cm^{-2} \cdot kbar^{-1}$ ， $6kbar$ 以下电流系数略低。

图 3、4 为实测保护环型传感器波形

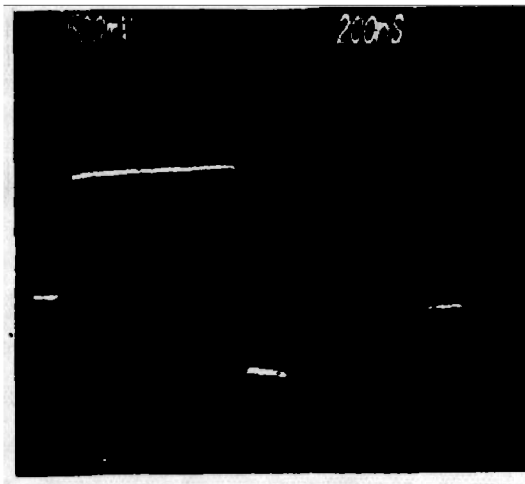


图 3 弹速 $0.203 mm/\mu s$ 、应力 $15.4 kbar$
示波器扫速 $0.2 \mu s/div$

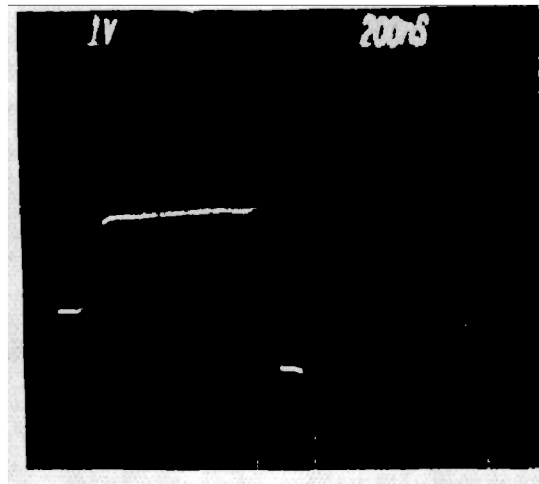


图 4 弹速 $0.302 mm/\mu s$ 、应力 $22.85 kbar$
示波器扫速 $0.2 \mu s/div$

表中 i_t/i_0 比值以及实测波形显示了应力波在保护环型传感器中传播时，电流值随时间仍有轻微增加。Graham, R. A.,⁽²⁾对于波形向上升的原因作了详细的分析。他们认为石英晶体片在受到应力作用后，介电常数改变，以及材料在应力波作用下的轴向应变是不能忽略的。而这两种因素在公式推导中忽略掉了，如果考虑了这两项因素就可定量导出对波形的影响。Graham, R. A.,⁽²⁾导出的公式为 $i_t/i_0 = a^2 / (1 - U_p/U_s)^2$ ，式中： $a = \epsilon_2/\epsilon_1$ ， ϵ_2 为受应力作用后的介电常数， ϵ_1 为石英初始介电常数。公式所显示的规律与表中 i_t/i_0 比值随应力增加而增加的规律相一致。

五、测量毫微秒应力脉冲

我们使用本文所述传感器对毫微秒应力脉冲的产生和测量进行初步探讨，实验是在轻气炮上进行的，结构如下：

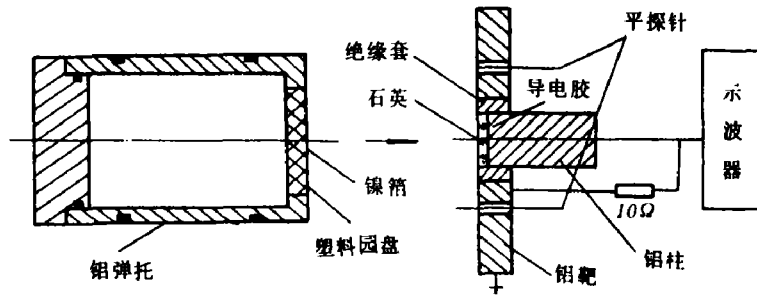


图5 弹、靶结构形式

用 l' 与 U_1 表示弹片的厚度与弹材料的声速，仍用 l, U_2 表示石英片的厚度和声速。在图5描述窄脉冲条件下，应力脉冲宽度 $2l'/U_1$ 远远小于传感器有效测量时间 l/U_2 。当两板碰撞后，其应力波形分析如下

令

$$\sigma(x, t) = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_0 H\left(t - \frac{x}{U_2}\right) \\ \sigma_2 &= -\sigma_0 H\left(t - \frac{2l}{U_2} + \frac{x}{U_1}\right) \\ \sigma_3 &= -\sigma_0 H\left(t - \frac{2l'}{U_1} - \frac{x}{U_2}\right) \\ \sigma_4 &= \sigma_0 H\left(t - \frac{2l'}{U_1} - \frac{2l}{U_2} + \frac{x}{U_1}\right) \end{aligned} \right\} (6)$$

式中 H 是Heaviside函数。把方程式(6)代入方程式(1)。最后在不同时间区间内进行积分则得到理想毫微秒应力脉冲波形，见图6。

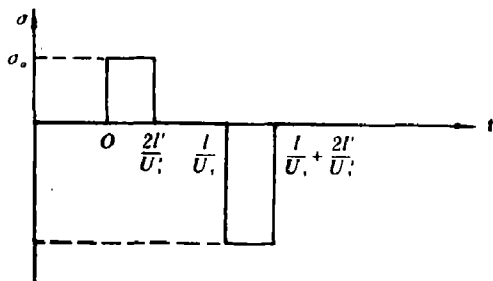


图6 理想毫微秒应力脉冲波形

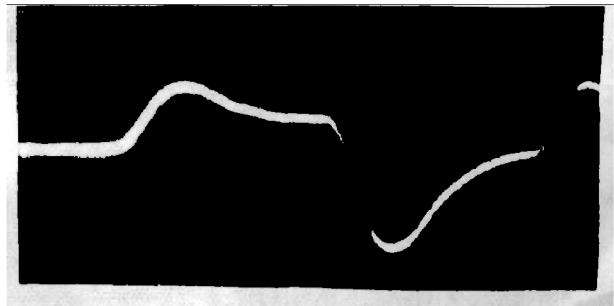


图7 实测毫微秒应力脉冲波形

由于平板碰撞实验中，存在碰撞面倾斜度，使得应力波形有一定上升时间，而整个应力脉冲很窄，故上升时间对波形的影响就更为明显。另外，在石英片背面存在声阻抗较低介质，

使得负脉冲小于两倍正脉冲。图 7 为实测毫微秒应力脉冲波形。

参加实验工作的有史毓香、沈乐天、李天估、赵双录、杨大光、陈淑霞等同志，在波形分析方面得到白以龙同志指导，在此表示感谢。

参 考 文 献

- (1) Graham, R. A., Neilson, F. W., Benebick, W. B., *J. Appl. Phys.*, **36**(5) (1965), 1775.
 (2) Graham, R. A., *Phys. Rep. B.*, **6** 12 (1972), 4779.

PIEZOELECTRIC CURRENT QUARTZ- GAUGE AND ITS DYNAMIC CALIBRATION

Wu Songyu

Abstract

The principle, design and calibration of piezoelectric current quartz-gauge, used for measuring stress- time history in solids are discussed in this paper. The calibration results show that the current coefficient for full electrode disk quartz- gauge is $2.04 \times 10^{-8} \text{C} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{kbar}^{-1}$ below 25 kbar, and that for guard- ring disk is $2.07 \times 10^{-8} \text{C} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{kbar}^{-1}$ up to 6 kbar and $2.15 \times 10^{-8} \text{C} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{kbar}^{-1}$ from 8 to 25 kbar, which are all close to Graham's data.

一种同时观测受冲击铅自由 面和微物质喷射面运动的技术

温殿英

(1984年6月4日)

用带放大系统的高速扫描阴影技术，成功地观测了在冲击加载下铅自由表面及其微物质喷射的前沿边界的运动轨迹。照片上的轨迹线清晰，测得的自由表面和微物质喷射速度均随压力而增加，这表明所用的测试技术是可信的。