

# 一种压电压力传感器的防热方法

吴松 陈宏 谷笏华 俞鸿儒\*

(中国科学院力学研究所高温气体动力学实验室, 北京 100080. \* 联系人, E-mail: yuhr@imech.ac.cn)

**摘要** 论述压电压力传感器被测量气流加热出现失真的来源. 研究结果指出干扰信号来源于传感器前端膜片受热膨胀使晶体片预载荷减载和晶体片升温产生的热电电荷. 在传感器前端膜片外表面粘贴塑料薄膜后, 则在测量期间可有效防止传感器前端膜片和晶体片被气流加热. 给出了隔热薄膜厚度的估算方法.

**关键词** 瞬态压力测量 压电传感器 隔热器

压电压力传感器响应频率高, 量程范围宽, 在动态压力测量中, 已获得广泛的应用. 但在超高速气流以及激波、爆炸波、爆轰波引起的气流中测压时, 传感器除了感受压力变化外, 同时还会被气流加热. 测压与热干扰产生的信号混叠在一起难以区分, 致使测量结果畸变与失真. 为了解决这一难题, 首先对传感器热干扰的来源进行了分析. 在了解产生热干扰机理的基础上, 推荐一种方便、有效的防热方法, 并给出选择有关参数的准则和方法.

## 1 压电压力传感器热干扰的来源

压电压力传感器的感应元件为压电晶体. 压电晶体受压时, 产生的电荷随压力上升而增加, 晶体两极间电势差也随之升高, 即晶体的压电效应. 然而压电晶体还具有热电效应, 即晶体被加热时, 也产生电荷, 晶体两极间电势差也随加热量增加而升高. 直观地消除压电传感器热干扰信号的办法就是防止热量传入晶体片. 我们曾在压电晶体片与端部膜片之间增加了陶瓷隔热片(图1). 验证实验表明, 热干扰的影响仍未能消除. 实验结果指出, 压电传感器热干扰信号还有其他来源.

压电压力传感器通常都具有预压力, 即无外载荷时晶体片还承受一定的压力. 当前端膜片被加热, 由于膜片受热膨胀, 作用在晶体上的预载荷也随之下降. 可以设想压电压力传感器被气流加热产生干扰电荷的来源有两处: ( ) 晶体片自身的热电效应产生的; ( ) 前端膜片被加热引起晶体片预载荷减载产生的. 这两种干扰信号具有不同的极性, 膜片

受热相当于减载, 而晶体片受热相当于加载, 正负相反. 热量首先传入膜片, 然后通过膜片传入晶体片, 两者产生热干扰的时间有先后. 压电压力传感器热干扰的信号是先产生膜片受热生成的卸载信号, 随后才叠加上由于晶体片受热生成类似加载的信号.

为了验证上述设想是否正确, 我们提出并完成如下的实验. 将压电压力传感器和铂膜电阻温度计同时放入 60 的热水中, 得到如图 2 所示的曲线. 上边的曲线为铂薄膜电阻温度计输出的温度随时间变化曲线, 曲线形状接近抛物线, 由热传导原理<sup>[1]</sup>可以判定, 大致是恒定热流率加热. 下边的曲线为压电压力传感器输出信号. 压电压力传感器接触热水后, 首先出现负跃变信号, 这是由于前端膜片受热使预载荷减少而形成的. 随后由于叠加晶体片不断温升产生的正信号而逐渐上升. 实验证实上述设想是正确的.

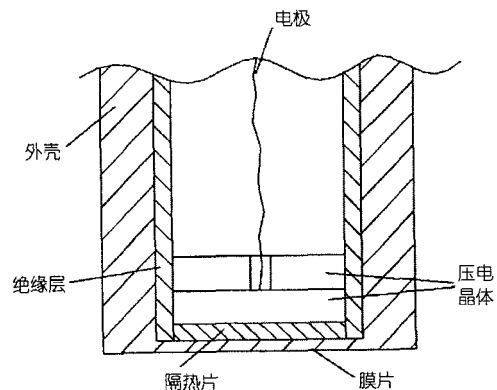


图1 压电压力传感器结构示意图

2007-02-02 收稿, 2007-03-10 接受  
国家自然科学基金资助项目(批准号: 90605006)

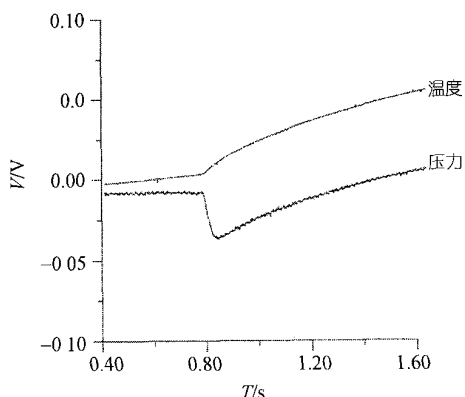


图 2 热干扰信号随时间变化

## 2 防热方法

从上节压电压力传感器热干扰的来源分析和实验结果可以得出, 压电压力传感器热干扰信号包括压电晶体片被加热和传感器膜片被加热产生的信号。在气动加热环境中进行压力测量时, 热量首先传入膜片, 然后通过膜片进入压电晶体。所以膜片被加热产生的卸载信号先显现, 随后才叠加上晶体片被加热产生的加载信号。虽然压电晶体和膜片被加热都有可能产生热干扰信号, 然而在瞬时测量中, 只要对膜片防热而无需另对晶体防热, 就可消除传感器的热干扰。

在采用防热措施时, 不仅要有效隔绝气流对传感器加热, 同时还不应改变传感器的特性(如灵敏度和频响特性等)。目前已经采用在传感器前端膜片上涂抹油脂, 在测压孔灌油或吹气以及粘贴塑料薄膜等措施来防止传感器被加热。无论从实验气体是否被污染, 气流流场是否被干扰, 是否容易控制等方面来看, 在压电压力传感器前端膜片上粘贴隔热薄膜都是既简单易行又有效的防热方法。

## 3 隔热薄膜材料和厚度的选定

隔热薄膜的形状为等厚度的平面。因此需要选定的参数只有两项: 材料种类和厚度。

压电压力传感器膜片被加热产生的热干扰信号大小随晶体片预载荷卸载量变化。预载荷卸载量与传入膜片的热量、传感器结构、使用的材料和装配状况有关。按膜片受热量计算卸载量, 不仅十分复杂与困难, 还由于生产厂商不会提供上述有关资料而难以实行。为了克服这种困难, 提出另一种解决问题的思路: 在测量周期中, 将传感器前端膜片的表面温升

限制在允许的范围内, 在这种条件下, 热干扰的影响可认为已消除。从下面的分析可以看到, 在测量时间较短的条件下, 易于将传感器前端膜片表面温升限制在相当低的水平。

### 3.1 膜片表面温升

厚度为  $l$  的单层板, 表面受恒热流  $q_0$  加热, 背面热绝缘, 则板内温升场<sup>[1]</sup>:

$$\Delta T(y) = \frac{2q_0\sqrt{\alpha t}}{K} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \operatorname{ierfc} \frac{(2n+1)l-y}{2\sqrt{\alpha t}} + \operatorname{ierfc} \frac{(2n+1)l+y}{2\sqrt{\alpha t}} \right\}, \quad (1)$$

表面温升为

$$\Delta T_f(y=l) = \frac{2q_0\sqrt{\alpha t}}{K} \times \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \operatorname{ierfc} 0 + 2\operatorname{ierfc} \frac{l}{\sqrt{\alpha t}} + 2\operatorname{ierfc} \frac{2l}{\sqrt{\alpha t}} + 2\operatorname{ierfc} \frac{3l}{\sqrt{\alpha t}} + \dots \right\}, \quad (2)$$

背面温升为

$$\Delta T_b(y=0) = \frac{2q_0\sqrt{\alpha t}}{K} \times \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ 2\operatorname{ierfc} \frac{l}{2\sqrt{\alpha t}} + 2\operatorname{ierfc} \frac{3l}{2\sqrt{\alpha t}} + 2\operatorname{ierfc} \frac{5l}{2\sqrt{\alpha t}} + \dots \right\}, \quad (3)$$

其中  $\alpha = \frac{K}{\rho C}$ ,  $K$ ,  $t$  和  $l$  分别为薄膜导热系数、导热系数, 加热持续时间和膜厚。

按(2)和(3)式求出的平板表面和背面温升随时间变化曲线(实线)如图 3。图 3 中还绘出平板背面有底衬的温升曲线(虚线)<sup>[2]</sup>。从图 3 中曲线可以看到, 对于表面温升, 在被加热后的相当一段时间里, 背面绝热和有底衬时两者几乎相同; 与此不同, 有底衬时背面温升一开始就比背面热绝缘时的背面温升高。还可以看到, 平板被气流加热时, 初始阶段表面温度迅速升高, 随后上升速率逐渐下降; 而与此相反, 背面温度上升速率开始时很缓慢, 之后不断加快, 最后与表面温升一样趋近相同的恒定上升率。

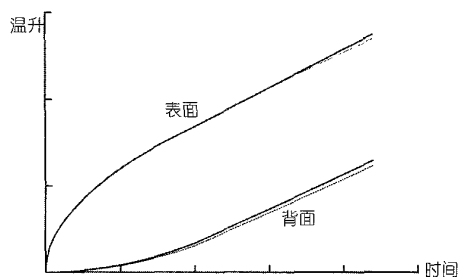


图 3 平板表面与背面温升随时间的变化

传感器前端膜片粘贴隔热薄膜后,其结构如图4.未贴隔热薄膜的传感器膜片被气流直接加热,膜片表面温度将急速升高;粘贴隔热薄膜后,传感器膜片的表面温度与隔热薄膜背面温度相同,从而使传感器膜片的表面温度变为缓慢上升.若传感器膜片的表面温度升高相同的数值,粘贴隔热薄膜较未贴薄膜所需时间要长得多.也就是说,粘贴薄膜后传感器产生的热干扰信号超出测量误差允许值所需的时间将大大延迟.

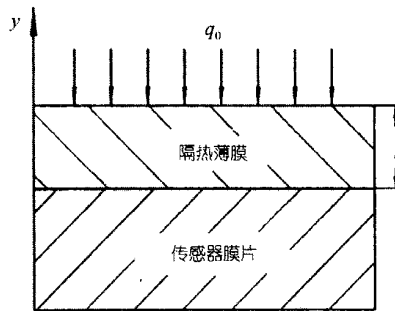


图4 隔热模型示意图

传感器被气流加热对信号失真的程度可由传感器膜片表面温升来表征.温升愈高则失真愈严重.由(3)式,温升 $\Delta T_b$ 正比于加热热流率 $q_0$ ,并随着 $l/\sqrt{\alpha t}$ 增加而急剧下降.

### 3.2 隔热薄膜材料的选择

导温系数 $\alpha$ 为薄膜材料的物性参数.在其他参数不变的条件下, $\alpha$ 愈小则薄膜背面,即传热器膜片表面温升愈小.所以要选择 $\alpha$ 尽量小的材料.塑料薄膜的导温系数很低,适于用作隔热薄膜材料.

### 3.3 隔热薄膜厚度的选择

若选用 Teflon 作隔热薄膜材料( $\alpha = 1.14 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ , 热传导系数  $K = 0.24 \text{ W}\cdot\text{K}^{(3)}$ ), 当恒定加热热流率  $q_0 = 1 \text{ MW}/\text{m}^2$  时, 按(3)式可求出薄膜背面, 即传热器膜片表面温升 $\Delta T_b$ . 表1列出不同隔热膜厚度和不同测量时间条件下, 传感器表面最高温升.

表1 不同隔热膜厚度和不同测量时间条件下, 传感器表面的最高温升

| $l/\text{mm}$                     | 0.05 | 0.1  | 0.2   | 0.2  |
|-----------------------------------|------|------|-------|------|
| $t/\text{ms}$                     | 10   | 10   | 10    | 20   |
| $l/\sqrt{\alpha t}$               | 1.48 | 2.96 | 5.92  | 4.18 |
| $\Delta T_{b\text{max}}/\text{K}$ | 60   | 5    | 0.002 | 0.4  |

由表1数据可以看到,在特殊条件下,薄膜厚度和测量时间对薄膜背面温升的影响非常敏感.当测量时间同为10 ms时,薄膜厚度从0.1 mm增加到0.2 mm时,温升下降为1/2500;而当薄膜厚度同为0.2 mm,测量时间从10 ms延长一倍时,温升可提高200倍.

如果隔热薄膜厚度很小,加上塑料膜很柔软,贴塑在传感器膜片上的薄膜对传感器性能的影响可以忽略.

## 4 验证实验

由于爆轰能产生高温高压的高速气流,并且在直管的端部立即起爆的爆轰波后气体压力随时间变化在理论上可以预报,所以我们选用爆轰管作验证实验.在爆轰管管壁上用粘贴了塑料薄膜和未贴塑料薄膜的压电压力传感器测量爆轰波后气体压力随时间的变化过程,来考核隔热薄膜的防热效果.爆轰管结构和波系图<sup>[4]</sup>如图5,在爆轰管的最左端点火直接起始爆轰.爆轰管与卸爆管之间用膜隔开,爆轰波到达隔膜处将膜冲开,反射稀疏波.压力传感器距左端管壁1.55 m.初始压力0.2 MPa,氢气:氧气:氮气的摩尔比为2:1:1.

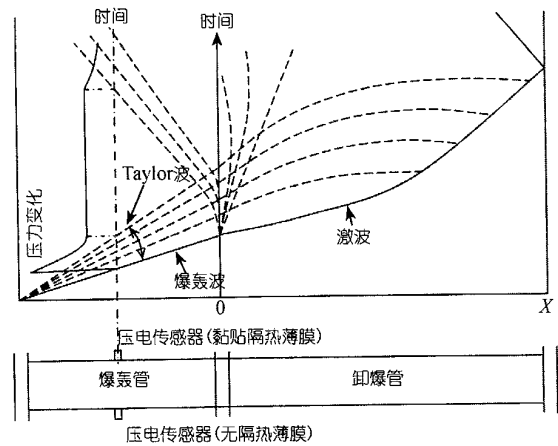


图5 爆轰管结构和波图

爆轰波阵面扫过传感器后,压力信号陡然跳起,跟随在爆轰波后的 Taylor 波扫过时,压力逐渐下降. Taylor 波完全扫过之后产生一个准定常状态,形成稳定的 5~6 ms 的压力平台.随后破膜产生的稀疏波到达,气体压力又逐渐下降.

表面贴有厚度  $l = 0.13 \text{ mm}$  普通塑料胶纸和无隔热薄膜的压电压力传感器测量曲线和理论计算曲线如图6.图6中有脉动的曲线为实测曲线,光实线为

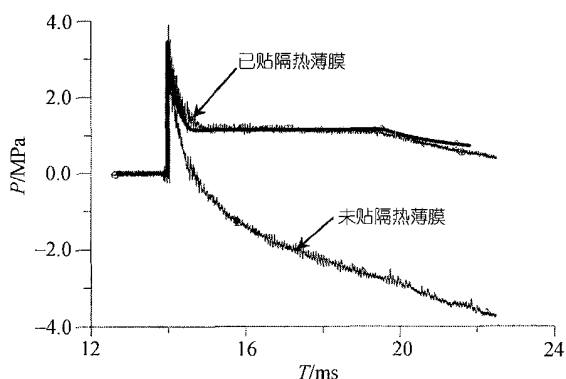


图 6 传感器有、无塑料薄膜时的压力信号曲线与计算结果的比较

理论计算曲线。可以看到未防热的传感器信号与理论计算曲线相差很大,表明膜式压电压力传感器热干扰影响很严重。而贴塑料胶纸的传感器测量结果与理论计算符合得很好:不仅峰值、平台的值与理论计算相符,而且峰值衰减的时间以及压力平台维持的时间也与计算结果相一致。这表明 0.13 mm 厚的塑料薄膜在实验时间内消除了压电压力传感器因受热

引起的热干扰,具有良好的防热效果。

## 5 结论

在压电压力传感器前端膜片上粘贴塑料薄膜是一种方便易行且十分有效的防热方法。选定传感器膜片表面允许的最高温升、加热热流率和测量持续时间,就可按(3)式估算出隔热薄膜的厚度。对选定隔热薄膜厚度的传感器作一次防热效果的实验考核,如果符合要求即可实际应用。一旦被测条件改变了,可通过(3)式调整隔热薄膜厚度来满足实用要求。

致谢 本工作得到王世芬、李仲发研究员和李进平同志的帮助,在此深表感谢。

## 参 考 文 献

- 1 Carslaw H S, Jaeger J C. Conduction of Heat in Solids. Oxford: Clarendon Press, 1986
- 2 Schultz D L, Jones T V. Heat-transfer measurements in short-duration hypersonic facilities. AGARD Onogr No. 165, 1973
- 3 沈锡华. 密封材料手册. 北京: 中国石化出版社, 1991. 170—178
- 4 陈宏, 冯珩, 俞鸿儒. 用于激波管/风洞的双爆轰驱动段. 中国科学 G 辑: 物理学、力学、天文学, 2004, 34(2): 183—191

· 书 讯 ·

## 《有机氟化学》

作者: 卿凤翎 邱小龙

出版: 科学出版社 2007 年 3 月

定价: 58 元

近年来,有机氟化合物(含氟功能材料)在高新技术产业和生命科学中发挥着越来越重要的作用,因而有机氟化学的研究也逐渐成为人们关注的热点。本书是我国学者编著的第一本系统介绍有机氟化学的著作,其框架结构和内容基于作者近 20 年来在有机氟化学领域的学习和研究的亲身体会和经验积累。本书首先介绍了有机氟化物的性能,特别是详细地讨论了有机氟化物与相应的碳氢化合物的化

学反应性差异;然后全面系统地论述了有机氟化物的合成方法,通过列举大量已报道的最新成果,对不同合成方法的优点和局限进行了分析;最后阐述了含氟药物和含氟功能材料。

本书可供从事有机化学、药物化学和高分子化学的研究人员和研究生阅读,对于工业界开展有机氟化物研制的技术人员也具有重要的参考价值。

