

# 压电元件的高温、高稳定性性能研究

## Research on High Temperature and High Stability of Piezoelectric Element

上海航空测控技术研究所 屠光峰 李志强

**[摘要]** 通过试验、分析、比较,提出了高温、高稳定性压电元件的研制要求,并确认了铋钛系列晶体是制作压电加速度传感器较理想的材料。

**关键词:** 航空发动机 压电加速度传感器 压电晶体 压电元件 绝缘电阻

**[ABSTRACT]** By testing, analyzing and comparing, the demands on high temperature and high stability for piezoelectric elements are proposed, and it is confided that Bi-Ti series crystal is the suitable piezoelectric material in making accelerometer transducer.

**Keywords:** Aeroengine Piezoelectric accelerometer transducer Piezoelectric crystal Piezoelectric element Insulation resistance

飞机发动机振动测量是发动机制造、装配或维修后,衡量其技术指标的综合测试方法。压电加速度传感器是完成这种测试方法,实现对发动机振动信号进行准确可靠拾取与转换的有效器件。

航空发动机在工作状态下,不仅振动大,而且温度高,特别是汽轮机、涡轮机部位表面温度高达350~480℃,因此要求用于测量其振动的压电加速度传感器不仅能长时间对发动机进行振动测量,而且还要有稳定的电信号输出。

航空发动机振动测量用压电加速度传感器与普通的压电加速度传感器相比,其工作原理、结构形式基本相同;其不同点在于前者能在高温环境下长期稳定地工作,所以其加速度传感器必须能在高温环境下长期工作、且有稳定的电信号输出。这种传感器既然要在高温环境下工作,其研制难点自然也就在“高温”上。传感器的研制涉及到以下几个方面:

- 压电元件的高温、高稳定性;
- 传感器在高温下的机械应变和热应变;
- 传感器绝缘电阻的下降;
- 传感器内部引起的物理、化学反应;
- 传感器接插件的结构及可靠性;
- 高温、抗干扰、低噪声电缆。

其中压电元件的高温、高稳定性性能对传感器的

高温性能影响最大。本课题对影响传感器高温性能的敏感元件——压电元件的高温、高稳定性性能进行了研究。

### 1 对高温、高稳定性压电元件的要求

压电元件的选择有几种情况:对小量程、高灵敏度的压电加速度传感器而言,要求选用压电系数 $d_{33}$ 高的压电材料,如PZT-5(锆钛酸铅系列压电陶瓷)等;对大量程的压电加速度传感器而言,为得到较大的刚度系数,一般要求选用弹性系数、硬度较高的压电材料,如PZT-8压电陶瓷、石英、锗酸铋等晶体材料;而对精度要求高、长时间稳定性好的标准加速度传感器而言,要选用稳定性、环境特性好的压电材料,一般选用天然石英、锗酸铋等单晶材料。

从一般的压电加速度传感器研制、应用中可知,传感器中压电元件的性能是影响传感器在高温环境下长期、稳定工作的关键,而压电元件的高温、高稳定性性能又与它的成分、配方、制造工艺等方面有关。对航空发动机振动测量用压电加速度传感器而言,其选择的压电元件必须能耐高温,具有良好的热稳定性和抗热振性,才能保证传感器在高温、恶劣的环境下长期稳定地工作。

根据传感器的结构原理可知,组装后的传感器在承受沿其敏感轴方向的外力作用下,会产生电荷,因此它相当于一个电荷源。当压电元件表面聚集电荷时,它又相当于一个以压电材料为介质的电容器。

其电容量为

$$C_a = \frac{\epsilon_0 \epsilon A}{\delta}$$

式中, $C_a$ 为压电传感器内部电容(F), $\epsilon_0$ 为真空介电常数( $\epsilon_0=8.85 \times 10^{-12}$ F/m), $\epsilon$ 为压电材料相对介电常数, $A$ 为压电元件面积( $m^2$ ), $\delta$ 为压电元件厚度(m)。

由此可见,压电传感器既是电荷源又是电容器,其等效电路可认为是二者并联,如图1所示。

根据等效电路,当 $R_f$ 无穷大时可求出压电传感器的开路电压:

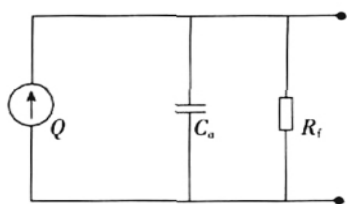


图1 压电传感器等效电路

Fig.1 Piezoelectric transducer equivalent circuit

$$u_a = \frac{Q}{C_a} \quad (1)$$

从图1可知,只有当 $R_t$ 无穷大,且内部无漏电阻时,压电传感器在工作中所输出的电压才能长期保持稳定。

为减少传感器在静态标定和动态测量中电荷的泄漏,压电加速度传感器必须具有足够高的绝缘电阻,其大小一般不低于 $10^9\Omega$ 。

从式(1)还可获知,组装后传感器的电荷量是一个定值,在使用温度范围内只要压电元件的电容不发生变化(或变化很小),传感器就能在这一温度范围内保持长时间的工作,且有稳定的电压输出。

## 2 压电元件高温、高稳定性试验

### 2.1 几种典型材料制成的压电元件性能测试

我们选择了几种典型的压电材料——石英晶体、铌酸锂单晶 $\text{LiNbO}_3$ 、偏铌酸铅 $\text{PbNb}_2\text{O}_6$ 制作压电元件,组装成传感器后先做温度试验,观察传感器输出电信号随温度升高的变化情况。得到的温度响应曲线见图2,图中一部份数据点用括号注出温度值和电压值。然后,通过对传感器的振动试验,观察压电元件的强度及抗振性。

(1) 选用石英晶体作传感器中的压电元件(压电系数 $d_{33}$ 为 $3\text{pC/N}$ ;灵敏度为 $2\text{pC/g}$ )。石英晶体的居里点为 $573^\circ\text{C}$ ,无热释电现象,绝缘电阻大,重复性好,时间、温度稳定性极好,从室温到 $200^\circ\text{C}$ 范围内的温度变化率仅为 $-0.016\%/^\circ\text{C}$ 。测试结果显示灵敏度较小( $0.2\sim 0.3\text{pC/m}\cdot\text{s}^{-2}$ )。

(2) 选用铌酸锂单晶作传感器的压电元件(压电系数 $d_{33}$ 为 $38\text{pC/N}$ ;灵敏度为 $15\text{pC/g}$ )。这种单晶的居里点高达 $1200^\circ\text{C}$ ,测试表明:组装后的传感器灵敏度较高,线性差,时间稳定性较好,因为是单晶,压电元件易碎,不能抗热振。

(3) 选用偏铌酸铅系列作传感器的压电元件

(压电系数 $d_{33}$ 为 $75\text{pC/N}$ ;灵敏度为 $22\text{pC/g}$ )。偏铌酸铅的居里点为 $570^\circ\text{C}$ ,具有较好的强度,因压电系数 $d_{33}$ 在 $75\sim 85$ 之间,故电荷灵敏度较大,在 $250^\circ\text{C}$ 环境温度以下工作有稳定输出;随传感器工作温度的上升,输出变化也随之加大。

从图2的温度响应曲线中还可以看出:压电元件的压电系数 $d_{33}$ 越大,传感器灵敏度就越高,但传感器有稳定输出的工作温度范围就较小(不大于 $250^\circ\text{C}$ ),如偏铌酸铅;居里点较高,传感器有稳定输出的工作温度范围就相应较大(不大于 $300\sim 320^\circ\text{C}$ ),如铌酸锂单晶、石英晶体。

### 2.2 偏铌酸铅和铌钛系压电元件测试

偏铌酸铅的居里点为 $573^\circ\text{C}$ ,在不同温度下对偏铌酸铅压电元件( $d_{33}$ 为 $72\text{pC/N}$ ,这是该材料在 $d_{33}$ 测试仪上所测得的 $d_{33}$ 值,下同)进行了电容和能量损耗测试(试验状态:均测, $f=1\text{kHz}$ ),见图3。由图3可见,电容和能量损耗基本稳定的温度区间不很宽,当温度较高时,电容和能量损耗急剧变化。

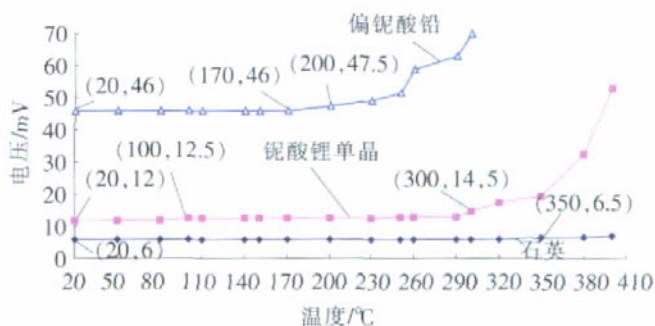


图2 3种压电元件组装传感器后的温度响应曲线  
Fig.2 Temperature response curve of the transducer consists of 3 piezoelectric elements

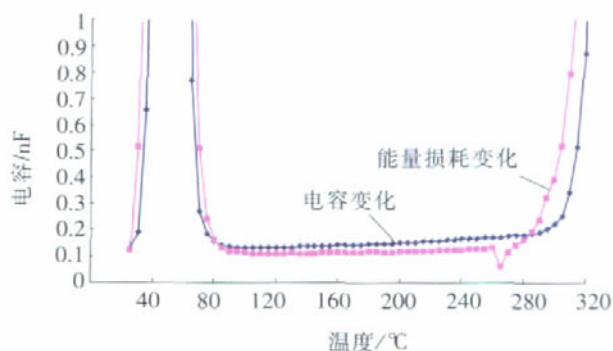


图3 偏铌酸铅压电元件的电容、能量损耗  
Fig.3 Variation curve on capacitance energy depletion of  $\text{PbNb}$  piezoelectric crystal

图 4 显示了偏铌酸铅压电元件的绝缘电阻随温度上升而变化的曲线。

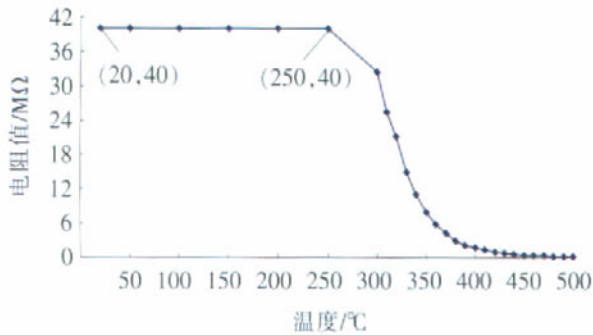


图 4 偏铌酸铅绝缘电阻随温度上升的变化曲线  
Fig.4 Variation curve of PbNb insulation resistance rising with temperature

从图 4 可以看出, 当用偏铌酸铅压电元件作试验, 工作温度超过 250°C 时, 其绝缘电阻就明显下降; 当温度继续上升时, 还会出现瞬时短路现象。但冷却到常温后又恢复正常。这一现象也同样出现在铋钛系列的压电元件(居里点可达 800°C)上, 不同的是这一现象出现的温度较高(400°C 左右)。图 5 是用居里温度为 680°C 的铋钛系压电元件作试验时, 其绝缘电阻随温度上升而变化的曲线, 从图上可以看出其有稳定输出的工作温度范围可达 390°C。

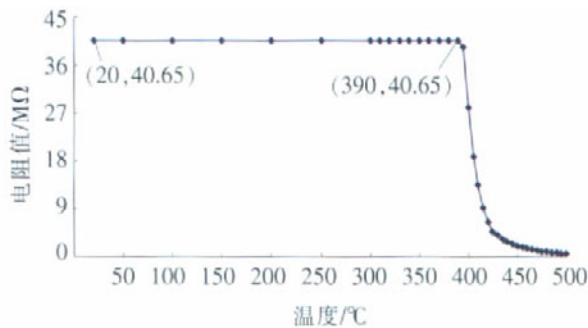


图 5 铋钛系压电元件绝缘电阻随温度上升的变化曲线

Fig.5 Variation curve on insulation resistance of Bi-Ti series piezoelectric element rising with temperature

### 3 新型压电元件研制

#### 3.1 对前期测试工作的思考

含铋层状结构的压电陶瓷是一种各向异性的铁电陶瓷, 其特点是居里温度高, 自发极化也比较高, 压电性能和介电性能的各向异性大, 机械品质因素高。另外, 它的谐振频率的时间稳定性和温度稳定性都比

较好。由于它的性能受制备工艺影响较大, 故对制备工艺要求较高。

用于制造压电元件的压电陶瓷的主要成分为碱土金属的氧化物。在高温状态下, 氧化物中的低价金属离子易与氧发生反应, 生成高价氧化物。工作温度越高, 这种反应就越激烈, 并导致产生相变, 从而降低压电元件的压电性能, 引起传感器灵敏度下降。

有研究表明, 物质内部不仅只有电子及离子会移动, 如果氧化物中有氧空位, 在高温下, 氧空位也会移动。这种移动将导致压电元件的绝缘电阻下降, 当回复到常温时又恢复到原绝缘电阻。在高温下压电元件内部氧空位的移动, 就很好地解释了压电元件在高温时绝缘电阻下降, 常温时又恢复的原因。

从图 4、图 5 可以看出, 压电元件加温到一定温度时, 其绝缘电阻将随温度上升而下降。绝缘电阻发生变化的温度与压电元件的性能、居里点有关。就同一系列的压电元件而言, 居里点越高, 出现压电元件绝缘电阻开始变化的温度也越高。

实际上, 当压电元件组装成传感器后, 传感器绝缘电阻的大小, 主要与压电元件的性能有关, 另外还和插座上二插针的绝缘电阻的大小、绝缘材料的选择、零部件的清洗、装配环境、结构密封等因素有关。

为防止高温环境下压电元件氧化后绝缘电阻降低, 可在压电元件表面用纯铂浆或银钯烧结作电极, 并对组装后的传感器充惰性气体封装保护。

压电陶瓷是高阻抗、小功率元件。在常温下工作时绝缘电阻很高, 故传感器的可靠性和稳定性都非常好, 但随着温度的升高, 其绝缘电阻下降, 最终导致传感器输出发生变化。

试验表明, 这些压电加速度传感器中的压电元件分别在灵敏度、强度、工作温度等方面均不能满足航空发动机振动测量用传感器的要求。

#### 3.2 甲、乙、丙系列新型压电元件测试

为探求具有良好高温、高稳定性的压电元件, 经过长期摸索和反复试验, 自行研制出了甲、乙、丙系列压电元件, 并进行了温度试验, 试验结果见图 6~8 (试验状态: 均测,  $f=1\text{kHz}$ )。

图 6 为甲系列压电元件( $d_{33}$  为  $19\text{pC/N}$ )从室温加热到 400°C、450°C 时的电容变化和能量的损耗变化情况。图 7、8 分别为乙系列压电元件( $d_{33}$  为  $20\text{pC/N}$ )和丙系列压电元件( $d_{33}$  为  $17\text{pC/N}$ )从室温加热到 490°C 时电容变化和能量损耗变化情况。

试验表明, 只有居里点高、绝缘电阻高、随温度上

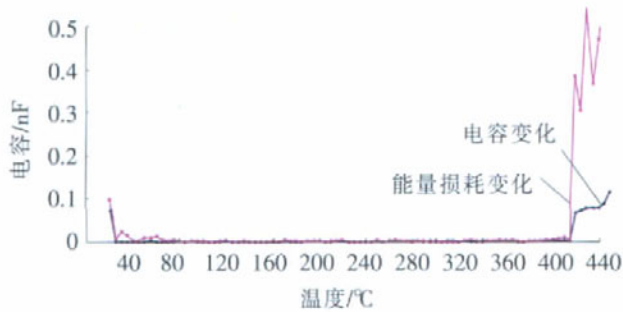


图6 甲系列压电元件的电容变化和能量损耗变化

Fig.6 Capacitance variation curve on piezoelectric elements and energy depletion of series A

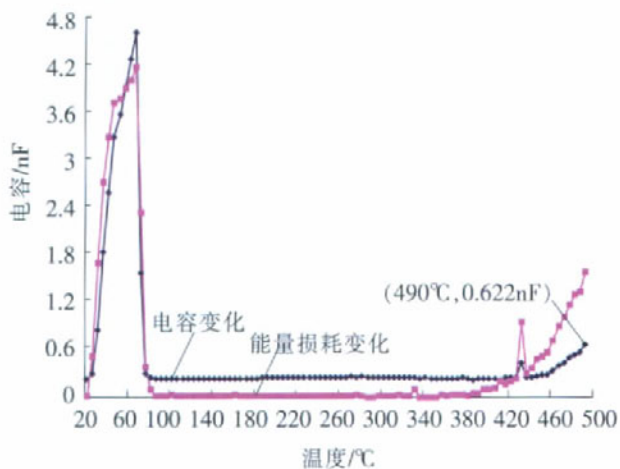


图7 乙系列压电元件的电容变化和能量损耗变化

Fig.7 Capacitance variation curve on piezoelectric elements and energy depletion of series B

升电容基本上不变化或变化很小、抗热振性能好的压电元件才具备高温、高稳定性性能。

根据偏铌酸铅、甲乙丙3个系列压电元件从室温到490°C时电容变化和能量损耗变化情况,可判断出用这些压电元件组装成传感器的最高使用温度和工作过程中传感器输出电压的稳定性状况。

偏铌酸铅的居里点为570°C,而甲、乙、丙系列的居里点相近,均在680°C~800°C,用居里点高的压电元件组装的传感器,其电容发生变化的温度也较高,故用甲、乙、丙系列压电元件组装的传感器的使用温度比用偏铌酸铅压电元件组装的传感器使用温度高。

上述试验还表明:提高传感器绝缘电阻,或防止、延缓绝缘电阻下降,将有利于提高传感器的高温性能;提高压电元件的居里温度,将有利于提高传感器的使用温度。但是居里温度的提高又将影响到压电元

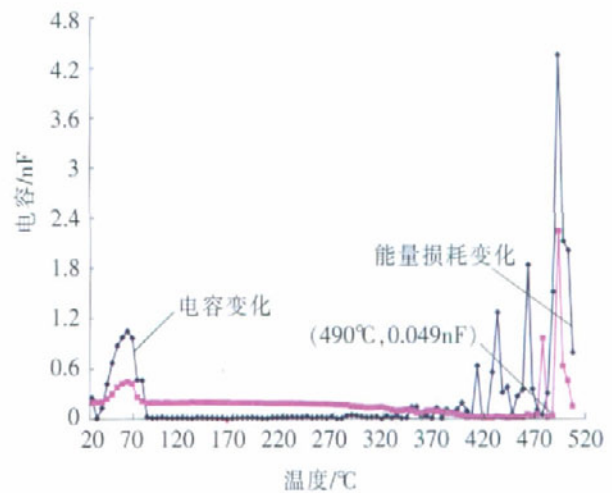


图8 丙系列压电元件的电容变化和能量损耗变化

Fig.8 Capacitance variation curve on piezoelectric elements and energy depletion of series C

件的压电常数,降低传感器的灵敏度,这是一对相互制约的因素。选择压电元件的最佳居里温度,既能保证压电元件具有一定的压电常数,又可使传感器在较大的工作温度范围内有稳定的信号输出。

### 3.3 结论

通过反复的试验和分析,我们得到的结论是:适合航空发动机振动测量用压电加速度传感器的压电元件必须满足以下要求:高的居里点;好的热稳定性;较高的绝缘电阻;好的抗热振性;较高的强度。

而自行研制的甲、乙、丙系列压电元件基本上能够满足这些要求。表1为用乙系列压电元件组装成传感器后的温度响应测试结果。

表1 传感器的温度响应测试

温度/°C	20.2	240	300	350	400	420	430	440	450
灵敏度/(pC·g <sup>-1</sup> )	11.2	11.2	11.2	11.2	10.9	10.7	10.6	10.6	10.3
温响误差/%	0	0	0	0	2.68	4.46	5.36	5.36	8.04

传感器的温度响应误差<10%(室温~450°C),基本上满足了航空发动机振动测量用传感器的使用要求。

高温、高稳定性压电元件的研制是成功研制航空发动机振动测量用传感器的关键之一。在航空发动机振动测量传感器用的高温、高稳定性压电元件研制过程中,遇到了不少问题,其中,应用中出现的一些问题比较难解决,它涉及到基础研究工作,所以只有把基础研究和应用研究有机结合起来才能取得成功。

(责编 凌蓝)