

· 研究简报 ·

## 几种引力波天线材料低温下的Q值研究

陈树鸿 唐孟希

(物理学系)

在脉冲型引力波作用下,棒状天线会发生纵向振动。当天线受迫振动的能量与天线热噪声能量相等时,对应的脉冲引力波的能量密度为

$$I_{0\min} = \frac{\sqrt{2} \pi c^3 k}{32G} \cdot \sqrt{\frac{\text{tg}\delta}{\beta}} \cdot T \cdot \frac{1}{LS} \cdot \frac{1}{\rho v_s^2 \sqrt{Q}} \cdot \frac{1}{\tau}$$

这就是天线的灵敏度。式中  $c$  为光速,  $k$  是玻尔兹曼常数,  $G$  是引力常数,  $\delta$  为换能器的损耗角,  $\beta$  为换能器的机电耦合系数,  $T$  为工作温度,  $L$  和  $S$  分别是天线棒的长度和横截面积,  $\rho$  为棒材料的密度,  $v_s$  是材料中纵波传播的速度,  $Q$  为天线棒的品质因数,  $\tau$  为脉冲源的爆发持续时间。式中除常数因子外,其余各因子依次与换能器、工作温度、天线的几何尺寸,天线材料的物理性质和引力波源的性质有关。可见引力波探测天线的材料应具备下列性质:(1)在低温下应有较大的  $\rho v_s^2 \sqrt{Q}$  值;(2)有可能做到较大的几何尺寸;(3)为了避免电磁干扰,材料应为非铁磁性物质;(4)成本低廉,有较好的工艺性。

近年,国外对天线材料作过一些研究<sup>[1-5]</sup>,除西澳大利亚大学研究过铍天线外,其余各组研究的是不同牌号、不同形状的铝合金天线的Q值。从他们的研究结果可得到以下两点结论:(1)金属材料的Q值随温度下降而升高,不同成份的合金Q值随温度的变化量不同;(2)适当的热处理可以在一定限度内提高Q值。

可以证明<sup>[6]</sup>,材料的Q值与杨氏模量成正比,与弹性后效值成反比。在所有的非铁磁性材料中,铍青铜和磷铜具有较高的强度和硬度,杨氏模量比国外目前用作引力波天线的铍和铝合金高。它们的弹性极限高,弹性滞后值小,价格远比铍便宜。工艺性也较好。因此,我们选择铍青铜、磷铜和铝镁合金作为试验材料,研究它们的Q值及Q值随温度变化的关系。

样品加工成片状,长90.0mm,宽20.0mm,厚2.0mm。研究基模横振动,在节线处支承。

本文于1986年1月收到

## 1. 实验方法及结果

(1) 换能器及检测电路 为了减少换能器本身的损耗,我们采用非接触式的电容换能器。在样品中部的上下方各固定一块电容极板,它们与样品板组成两个电容。当在电容板上加入交变电压  $V_0 \sin \omega t$  时,电容板对样品板产生交变吸引力

$$f(t) = \frac{V_0^2 \epsilon_0 S}{4d^2} (1 - \cos 2\omega t).$$

样品作受迫振动,电容器的电容量就随时间变化。但用电容板激发样品振动效率很低,要激起相当振幅的振动,需要很高的激发电压。对于我们的样品,基频  $f = 1.2 \times 10^8$  Hz,电容极板面积  $S = 2.0 \text{ cm}^2$ ,电容极板与样品板的原始距离  $d_0 = 2 \times 10^{-2} \text{ cm}$ ,在  $V_0 = 250 \text{ V}$  的交变电压激发下,可算得样品板的最大振幅  $A \approx 5 \times 10^{-5} \text{ cm}$ 。这是一个很小的数值。产生稳定高振幅的正弦交流电压是不容易的。

为解决这个困难,我们用高直流偏压加小幅度交变电压的方式激发,下面的计算表明,用较小的交变电压便可激起较大的振动。设加在激发电容板上的总电压

$$V = E_0 + u_0 \sin \omega t,$$

则加在样品上的激发力

$$f(t) = \frac{\epsilon_0 S}{2d^2} (E_0^2 + 2E_0 u_0 \sin \omega t + u_0^2 \sin^2 \omega t).$$

当  $E_0 \gg u_0$  时,第二项远大于第三项。这种作用的实质是交变电压在电容板上产生的交变电荷受到直流偏压所产生的强静电场的吸引力使样品板振动。

为了使作用在样品板上的直流电场作用力得到平衡,我们在接收输出信号的电容板上也加上同样大小的直流偏压。为避免输入输出信号直馈,采用了严格的屏蔽措施。我们设计了专用的支承装置和恒温装置,支承装置结构见图1、实验装置方框图见图2。样品的激发、测量均由本室自行设计制造的金属内耗测试仪<sup>(7)</sup>自动完成,并自动显示测量结果。

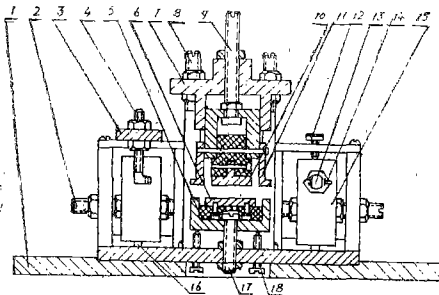


图1 支承装置结构

- |            |           |            |
|------------|-----------|------------|
| 1. 底座,     | 2. 移位螺杆,  | 3. 支承板,    |
| 4. 定位螺杆,   | 5. 下屏蔽罩,  | 6. 下电容板,   |
| 7. 定位槽,    | 8. 支承螺杆,  | 9. 调节杆,    |
| 10. 上电容板,  | 11. 上屏蔽罩, | 12. 上固定螺钉, |
| 13. 松紧螺杆,  | 14. 固定螺丝, | 15. 活动板,   |
| 16. 下固定螺钉, | 17. 调节螺杆, | 18. 微调螺丝.  |

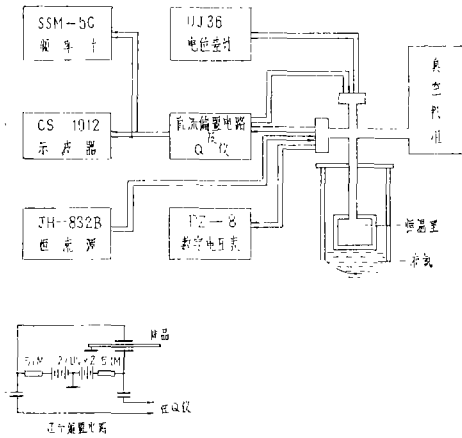


图2 实验装置方框图

我们还测量了Q值与真空度之间的关系。结果表明，当恒温室内的剩余气压小于  $2 \times 10^{-2}$  托时，Q值基本上不随真空度变化。

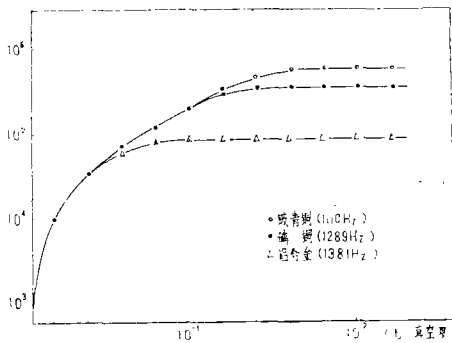


图3 室温下Q值随真空度的变化

(2) Q值及频率随温度的变化 为了使支承的损耗尽量减少，采用直径50μ的钨丝悬吊样品，并把样品封装于恒温室内，达到密气的要求。由于在测量过程中，温度计的触点与样品直接接触会增加损耗而影响测量准确的结果确性，故我们采用间接测量加修正的办法。先测量样品Q值与频率同恒温室上温度计指示的度数的关系，然后把另一温度计的触点粘在样品表面，在相同的真空度和相同的降温速率下，测出恒温计指示的度数与样品温度的修正关系。测量结果见图3及图4。

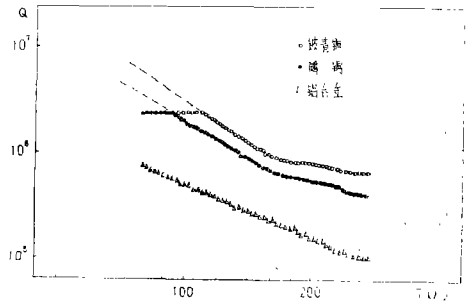


图4 Q值随温度的变化

2. 讨论:

(1) 由实验曲线可以看到，三种不同样品的Q值和频率都随温度下降而升高。从室温到液氮温度，Q值约升高一个数量级。对于铍青铜和磷铜样品，Q值上升到  $2.4 \times 10^6$  就保持不变，它们所对应的温度分别为110K和93K，而频率仍随温度下降而上升。这时不变的Q值反映了支承装置的背景损耗。从实验曲线可以看出，低于160K时，Q值随温度的下降基本上按直线规律上升，把实验曲线外推，可以估计在液氮温度下两种样品的Q值约为  $6.2 \times 10^6$  和  $3.8 \times 10^6$ 。表1和表2列出三种实验样品的有关参数，并与世界上现公认为最好的引力波天线材料的5056铝合金相比较。

从表一可以看到，铍青铜在室温及液氮温度的Q值都比5056铝合金高。由于铍青铜的比重较大，故  $\rho v_s^2 \sqrt{Q}$  比5056高一倍多。磷铜在室温及液氮温度的Q值虽比5056小，但它的  $\rho v_s^2 \sqrt{Q}$  值在液氮温度下却比5056高近一倍。可见铍青铜和磷铜都可能是很好的高Q值低温引力波天线材料。

表1 四种材料的 $\rho$ ,  $v_s$ 和 $Q$ 值

材料名称	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$v_s$ (km/sec)		$Q(\times 10^5)$		$\rho v_s^2 \sqrt{Q}(\times 10^{14}$ g/cm $\cdot$ s <sup>2</sup> )	
		290K	77K	290K	77K	290K	77K
		铝合金 5056	2.7	5.1	5.4	5.0	49
铍青铜 QBe1.9	8.3	4.0	4.4	5.8	62	10	40
磷铜 QSn6.5~0.1	8.8	3.8	4.3	3.6	38	7.6	32
铝合金 LD7	2.7	5.0	5.6	0.84	7.5	2.0	7.3

表2 样品的化学成份 单位: %

材料名称	Cu	Al	Mg	Mn	Fe	Ni	Si	Zn	Pb	P	Be	Ti	Cr	Nb	Sn
5056	余量	余量	5.1	0.12									0.12		
铍青铜	余量	0.36	0.007		0.005				0.11	0.10	1.92	0.007	0.25		
磷铜	余量	0.007			0.046				0.13	0.31					6.53
LD7	2.6	余量	1.3	0.31	1.1	1.3	0.11	0.005				0.056		0.02	

(2) 实验装置的其它应用: 由于支承装置的损耗在高于液氮温度已起主要作用, 应用此装置不可能在液氮温度下工作。但此装置可应用于金属物理领域对材料内耗的研究。因为在内耗的研究中, 对支承装置引起的背景损耗不是很感兴趣, 而关心的是内耗峰的位置及各内耗峰的相对高度、宽度随外界条件和材料本身的化学成份、金相组织等因素的变化规律。且研究的大部分材料 $Q$ 值都小于 $10^6$ 。这样, 我们的装置是适用的。

## 参 考 文 献

- [1] P.Carelli etc., *Cryogenics*, 15 (1975), 406.
- [2] J.F. Kos etc., *J. Appl. Phys.*, 48 (1977), 3190.
- [3] D.G. Blair etc., *Journal of Low Temperature Physics*, 41 (1980), 267.
- [4] T.Suzuki etc., *Phys. Lett.*, 67A (1978), 2.
- [5] S.Kimura etc., *Phys. Lett.*, 81A (1981), 302.
- [6] 冯端等, 《金属物理》下册, 科学出版社(1975), 559.
- [7] 管同仁等, 中山大学学报, 2(1980)42.

## Research to Q Value of Some Materials of Gravitational Wave Antenna in Low Temperature

Chen Shuhong Tang Mengxi

### Abstract

Selecting materials which have high value of  $\rho v_s^2 \sqrt{Q}$  in low temperature is one of important ways to improve the sensitivity of gravitational wave detector. A set of experimental equipment has been designed and manufactured in order to measure Q value of material in low temperature. From theoretical and experimental research it has been shown that the amplitude of exciting signal could be dropped remarkably by means of adding a D.C. bias to the sample. As another result, the values of  $\rho v_s^2 \sqrt{Q}$  of Be-Cu and P-Cu alloys are larger than that of 5056 aluminum alloy. They are possible candidates of materials for gravitational wave antenna.

### • 新产品 •

### 彩色闪光芳香炮竹

中山大学化学系钟增培、英柏宁和南海红旗炮竹厂刘建中等，继获得无硫磺芳香炮竹的国家发明专利后，最近又完成了彩色闪光芳香炮竹的研制，并于七月八日通过了技术鉴定。

彩色闪光芳香炮竹燃放时不单具有一般电光炮竹的声响效果，而且在爆炸时会闪烁出红、绿、白的彩色光芒，光亮夺目，色彩缤纷，并放出怡人的芳香气味，声、色、香俱全。这种炮竹的火药配方，由于取消了氯酸钾成份，经差热分析、火焰感度、撞击感度、摩擦感度、高温贮存、吸湿性试验表明，具有较好的安全稳定性能，符合我国有关部门关于烟花、炮竹管理的新规定要求，配方原料符合西欧及日本等国家的规定。彩色闪光芳香炮竹各项质量指标经广州市产品质量监督检验所检验，符合轻工部SG237—81标准。此项成果具有新颖性和独创性，今年四、五月份已向中国专利局申报发明专利，被选送参加十月在武汉举行的第二届全国发明展览。目前这项成果已在南海红旗炮竹厂批量生产投放市场，受到用户和外商的一致好评，国内许多工厂纷纷来人来函，要求转让此项技术。

(钟增培)