

空间微小尘埃质量累积测量方法

冯 杰 王 鷁 王先荣 姚日剑 柏 树

(兰州物理研究所,真空低温技术与物理重点实验室,兰州 730000)

文 摘 利用石英晶体微量天平(QCM)测量技术,开展了针对空间微小尘埃累积质量流的原位测量方法研究,建立了石英晶体电极表面与尘埃粒子吸附的黏附力系数模型。结果表明,当电极表面与尘埃粒子的黏附力系数 $k > m\omega_0^2$ 时,石英晶体电极表面累积尘埃粒子的质量与石英晶体振荡频率的关系符合 Sauerbrey 公式。在上述结论的基础上,采用在石英晶体电极表面涂敷黏性薄膜的方法实现了对微小尘埃粒子累积质量流的测量,对理论模型进行了验证。

关键词 空间微小尘埃,累积质量流,石英晶体微量天平(QCM),黏性薄膜

Method of Measuring Space Fine Dust Mass Accumulation

Feng Jie Wang Yi Wang Xianrong Yao Rijian Bai Shu

(Science and Technology of Vacuum & Cryogenics Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000)

Abstract Along with the development of exploration in deep sky research, the stylists pay mote attention to the influence of Lunar dust and Martian dust on spacecraft. In this paper, with the technique of quartz crystal microbalance(QCM), a research of measuring the space fine dust mass accumulation is introduced. A model of adhaesion coefficient between the surface of the quartz crystal pole and the mass of dust particles was established. As a result, when the adhesion coefficient is $k > m\omega_0^2$, dust particles accumulation and the frequency of quartz crystal accord with Sauerbrey function. Based on this theory, by spreading sticky film on the surface of the pole of QCM, fine dust particles mass accumulation can be measured.

Key words Space fine dust, Mass accumulation, Quartz crystal microbalance(QCM), Sticky film

0 引言

月球表面和火星表面都存在由于长期环境作用而形成的微小尘埃,这些细小微粒很容易被自然或人为活动扰动而悬浮在空中。这些尘埃粒子具有黏性的特点,容易黏附于航天器表面产生尘埃污染效应,其产生的负面效应包括阻塞仓外活动部件的闭锁装置和仪器盖,隔离表面的热传递,黏附于功能表面引起光学性能、太阳吸收率和红外发射率的降低,以及影响光电阵列和散热器表面的工作情况等^[1]。因此监测这些表面尘埃潜在的积累效应可为将来探测器尘埃粒子的防护设计和清除提供重要的参考依据。

本文针对月球和火星表面微小尘埃环境的测量需

求,利用成熟的空间分子污染物石英晶体微量天平(QCM)测量技术^[2],开展了针对空间微小尘埃累积质量流的原位测量方法研究。

1 QCM 测量原理

QCM 测试技术可用于监测非金属材料出气^[3]和航天器敏感系统表面的分子污染沉积^[4]。传感器选用压电石英晶体作为微量分子污染物的探测元件,如图 1 所示。

晶体两面镀上金属材料作为电极,由外部电子振荡器驱动,在两电极之间加一个与时间相关的电场,使晶体以一定的频率振荡,振荡频率由晶体本身以及电极表面附着物的总质量决定的。当污染物在电极上沉积(质

量增加)时,所有沉积物都将随着晶体振荡产生移位。因此,由于质量的增加使晶体运动的频率降低,通过对晶片频率变化来检测沉积质量的变化。

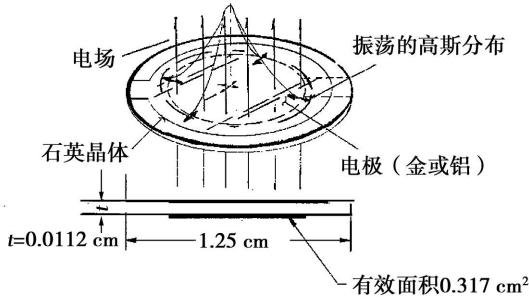


图1 压电石英晶体的电场及振荡频率

Fig.1 Electric field of piezoelectric quartz crystal and oscillation frequency

石英晶片体内的行波在晶片表面之间反射,形成驻波,其谐振频率的基频为:

$$f = \frac{v}{2h} \quad (1)$$

式中, v 为垂直于晶体表面的剪切波速; h 为晶片厚度; 当石英晶片上沉积的污染物质量远小于振动系统总质量时,晶片质量的增加正比于沉积厚度的增加。此时,有:

$$\Delta m = -\frac{\rho v \Delta f}{2f^2} A \quad (2)$$

式中, ρ 为石英晶体的密度; A 为晶片面积。

通过对频率变化 Δf 的监测即可获得晶片上沉积的污染物质量 Δm 。频率变化与到达或离开石英晶体微量天平敏感晶体上的质量的关系 S 为:

$$S = \frac{d(-\Delta f)}{d(\Delta m/A)} = \frac{2f^2}{\rho_{qc}} \quad (3)$$

式中, S 又称为质量灵敏度。常温下,各种谐振频率的石英晶体微量监测仪的理论质量灵敏度如表1所示。

表1 AT切型石英晶体的理论质量灵敏度

Tab.1 Theoretical mass sensitivity of AT-cut quartz crystal

谐振频率 /MHz	质量灵敏度 (25°C) / $10^{-9} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$
5	17.7
10	4.42
15	1.96
20	1.10

2 石英晶体电极表面与尘埃粒子黏附力系数

基于上述理论,在真空中对微小尘埃(直径 $<50 \mu\text{m}$)进行测量,发现直接对微尘测量时,随着尘埃质量的

累积,石英晶体的频率变化不规则的上升,这与 Sauerbrey 公式描述的原理不一致。为了进一步分析 QCM 对微小尘埃的测量机理,建立下面的模型。QCM 测试系统是一种微粒振荡器系统,它的数学模型为一对耦合振荡器,如图2所示。

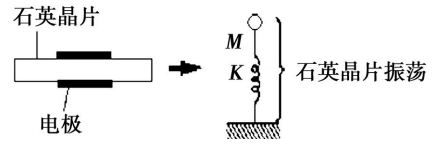


图2 QCM 振荡系统简化模型

Fig.2 Simplified model of QCM oscillating system

QCM 振荡系统简化模型中,石英晶片片可以看作是在恒定驱动力为 K 的弹簧上质量为 M 的物体,通过合适的石英弹性系数来确定 K 。根据牛顿定律,可以得到振荡系统的微分方程:

$$MX'' + KX = 0 \quad (4)$$

式中, X 是 M 偏离平衡位置的距离。

解微分方程有:

$$X = l \sin\left(\sqrt{\frac{K}{M}} t\right) \quad (5)$$

所以这个振荡系统的角频率为

$$\omega_0^2 = K/M \quad (6)$$

同样,对于黏附微尘的 QCM 的振荡系统也可以进行模型简化,如图3所示。将尘埃颗粒与 QCM 电极表面之间的黏附力系数简化为弹簧的弹性系数 k ,微尘黏附于石英晶片电极表面,可以认为是质量为 m 的尘埃微粒是通过一个恒定驱动力 k 未知的弹簧连接在质量为 M 的石英晶片上,这个耦合振荡系统将以一个新的频率 ω 振荡。

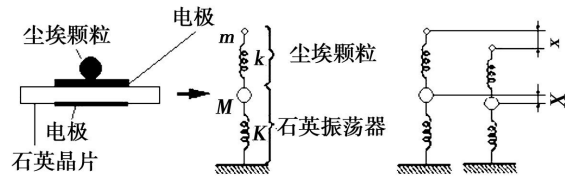


图3 黏附微尘的 QCM 振荡系统简化模型

Fig.3 Simplified model of dust adhesion on QCM oscillation system

对于这个振荡系统有:

$$mx'' + k(x - X) + F = 0 \quad (7)$$

$$MX'' + KX - F = 0 \quad (8)$$

式中, F 是弹簧 k 对 M 作用力。

求解上述微分方程组,可以得到该振荡系统的角频率:

$$2\omega^2 = \begin{cases} \left(\frac{K}{M} + \frac{k}{M} + \frac{k}{m}\right) + \sqrt{\left(\frac{K}{M} + \frac{k}{M} + \frac{k}{m}\right) - 4\frac{K}{M} \cdot \frac{k}{m}} & k < m\omega_0^2 \\ \left(\frac{K}{M} + \frac{k}{M} + \frac{k}{m}\right) - \sqrt{\left(\frac{K}{M} + \frac{k}{M} + \frac{k}{m}\right) - 4\frac{K}{M} \cdot \frac{k}{m}} & k > m\omega_0^2 \end{cases} \quad (9)$$

从公式(9)可以看出,对于不同的 k ,即微尘与 QCM 电极的黏结力大小不同,系统的振荡角频率变化曲线不一样,将公式(9)在图 4 中表达出来,反映了测量系统频率 ω 与微粒的弹性系数 k 之间的关系。

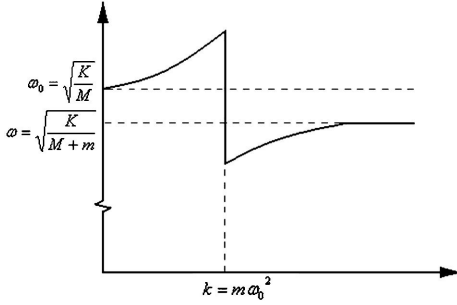


图 4 振荡系统频率与尘埃颗粒黏附力系数的关系

Fig. 4 Relationship between oscillating system frequency and dust particles adhesion force coefficient

从图 4 中可以看出,黏附力系数较小的时候($k < m\omega_0^2$),QCM 的测量频率随着黏附灰尘质量的增加而增加,而且随着黏附力的增大,黏附同样多的灰尘频率上升速率增加。当黏附力系数达到一定程度后($k > m\omega_0^2$),QCM 的测量频率随着黏附灰尘质量的增加而减少,这种情况就符合 Sauerbrey 公式:

$$\Delta f = -\frac{2f^2}{\rho v} \cdot \frac{\Delta m}{A} \quad (10)$$

随着黏附力的增大,直至趋近于无穷大时,微粒的质量可以作为振荡器的一部分,且紧紧吸附在振荡器上,则这个渐近值则等于振荡器频率减少的值。石英振荡器的弹性系数方程(9)可近似为

$$\omega^2 = K/(m+M) \quad (11)$$

这种情况完全符合 Sauerbrey 公式,从现象上可解释为黏性石英晶片与灰尘颗粒成为一体振荡。

3 验证实验

从表 1 中可以看出,谐振频率越高,质量灵敏度越高。对于实际应用选择合适谐振频率的石英晶体,在航天器设计中,高可靠性是设计师首先考虑的因素,石英晶体微量天平测量空间微小尘埃时,由于空间微小尘埃颗粒直径在微米量级,在选择使用石英晶体时选择谐振频率为 10 MHz 的石英晶片^[5],这样既能保证测量灵敏度又能保证石英晶体微量天平运行的可靠性。为了增

加微尘与 QCM 电极之间的黏附力系数,选取了一种“黏性聚合物”在石英晶片探头电极上制备成均匀薄膜,在真空中对微小尘埃(直径 $<50 \mu\text{m}$)进行测量。测试结果中频率随时间的变化就反映出频率随微尘质量增加的变化。结果如图 5 所示。

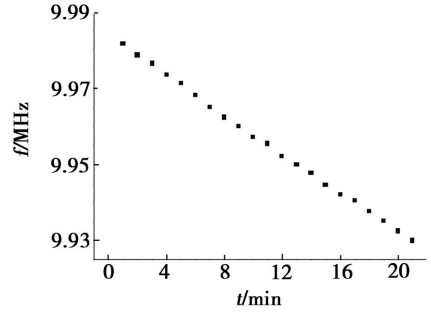


图 5 晶片频率随时间的变化

Fig. 5 Chip frequency vs time

从图 5 看出,QCM 的频率随时间呈线性变化趋势,微尘的累积与时间成正比,则 QCM 的频率变化随微尘质量增加线性变化,这符合 Sauerbrey 公式。

4 结论

(1)针对 QCM 不能直接测量微小尘埃质量累积的原因,提出了将“黏性聚合物”包裹在 QCM 电极上,进行了理论分析,给出了 QCM 能够进行微尘测量的条件即黏附力系数 $k > m\omega_0^2$ 。

(2)选用了一种“黏性聚合物”在 QCM 电极上作为增加黏性系数的介质,在真空中对微小尘埃进行了测量,测量结果符合 Sauerbrey 公式,验证了理论的正确性。

参考文献

- [1] Apollo 11 Mission Report[R]. NASA Special Publication 238,NASA Manned Spacecraft Center,1971:165
- [2] QJ1371-88 真空中材料可凝挥发物测试方法[S]. 中华人民共和国航天工业部部标准
- [3] 冯杰,王先荣,王鹤,等. 空间用油脂材料原位质损测试及出气成分分析方法[J]. 真空与低温,2010,113(2):81
- [4] 韩大炜,孙丽琳. QCM 用于检测航天器表面污染的技术研究[J]. 航天器环境工程,2006,23(6):333
- [5] 周传良,于钱. 10MHz 温控石英晶体微量天平的研制[J]. 航天器环境工程,2003,20(3):25

(编辑 任涛)