



天问二号挥发分分析仪设计与地面定标

刘冉冉^{1*}, 许浒², 杨永帅², 张小华³, 周琴⁴, 贺怀宇^{5,6}, 贺怀航¹, 徐红光¹, 张嘉榕¹, 王自发¹

1. 中国科学院大气物理研究所大气环境与极端气象全国重点实验室, 北京 100029

2. 西安微电子技术研究所, 西安 710000

3. 苏州安益谱精密仪器有限公司, 苏州 215151

4. 中国科学院国家天文台月球与深空探测重点实验室, 北京 100101

5. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

6. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

*联系人, E-mail: liuranran@mail.iap.ac.cn

收稿日期: 2025-01-02; 接受日期: 2025-02-25; 网络出版日期: 2025-06-05

行星探测工程天问二号任务探测器系统有效载荷分系统挥发物分析仪研制项目和国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(编号: 42322506)资助

摘要 本文对天问二号任务中配置的重要科学载荷之一挥发物分析仪中的挥发分分析仪(VITA)进行了介绍. 挥发分分析仪采用离子阱质谱原理, 目标是探测主带彗星311P周围以气体形式存在的挥发分, 拟获得挥发分化学组成和含量探测数据, 可用于研究311P的形成和活动机制等科学问题. 针对311P的特殊探测需求, 挥发分分析仪具有高灵敏度、轻量化、全自主的特点. 正样件已完成地面定标与科学验证, 质量范围可达1–182 amu, 质量分辨率优于0.5 amu, 对 5.8×10^{-10} Pa极低分压的 ^{20}Ne 标气检测灵敏度为 1.1×10^{-4} 计数/s/(1/cm³), 探测对象和动态范围等各项性能均满足设计指标要求.

关键词 挥发分分析, 性能指标, 载荷设计, 地面定标与验证

PACS: 07.75.+h, 07.87.+v, 82.80.Ms, 95.55.-n

1 引言

天问二号任务将实现近地小行星2016HO3和主带彗星311P的原位探测^[1]. 主带彗星指的是轨道位于小行星主带内同时又具有彗星物理特征的小天体^[2]. 主带彗星活跃时会喷射气体或尘埃^[3,4]. 311P在被发现时观测到其具有与彗星相似的多条尘埃喷发尾迹^[5]. 根

据311P轨道和活动特性等观测结果, 目前研究倾向于将其活动机制归因为加速自转导致的表面物质抛射^[4,6]. 考虑到311P表面尘埃不断丢失、新鲜表面不断暴露, 在其活跃期可能存在稀薄气体, 但含量极低. 311P的轨道位于小行星带内边缘附近, 被认为很可能是Flora族S型小行星的成员^[4], 对应的陨石可能是LL型, 与Hayabusa采样返回任务的目标Itokawa类似^[7].

引用格式: 刘冉冉, 许浒, 杨永帅, 等. 天问二号挥发分分析仪设计与地面定标. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55: 279513

Liu R, Xu H, Yang Y, et al. Design and calibration of the volatiles ion trap analyzer for the Tianwen-2 Mission (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2025, 55: 279513, doi: 10.1360/SSPMA-2025-0001

Itokawa样品的分析结果表明其矿物含水量为698–988 ppm^[7], LL型陨石的含水量250–350 ppm^[8], 均高于月球含水量^[9]. 因此可推测活跃期时311P周围气体密度应高于月表气压, 至少为3000个分子/cm³.

挥发物分析仪中的挥发分分析仪可探测主带彗星周围喷发气体的组成和含量, 从而帮助了解主带彗星形成和起源^[10]. 这是由于形成于内太阳系和外太阳系的小行星挥发分组成差别很大^[7,11–14]. 主带彗星探测的另一重要科学目标是探测其活动机制, 而气体活动机制是其中重要组成部分. 挥发分分析仪可获得主带彗星活跃期喷发气体成分和通量, 辅助判断主带彗星喷发活动背后的原因和机制.

2 方案与指标

天问二号挥发分分析仪的功能是对主带彗星挥发分化学组成和含量进行探测. 挥发分分析仪采用离子阱质谱法. 质谱法是一种普适的化学分析方法, 可以极为精确地确定物质的分子量和含量. 离子阱质谱仪是使用离子阱作为质量分析器的质谱仪, 特点是利用离子阱囚禁离子以达到富集作用, 可达到较高灵敏度, 尤其适合主带彗星周围可能存在的稀薄气体的检测, 而且结构简单, 重量轻, 可满足小行星探测任务的需求.

挥发分分析仪的性能指标要求如表1所示.

1–150 amu的质量数范围包括了常见挥发性气体, 如H₂, NH₃, N₂, H₂O, CO, CO₂, H₂S和所有稀有气体及其同位素. 同时, 也包括了比常见气体质量数更大的有机物, 如氨基酸、小分子有机聚合物等. 挥发分中质量数大于150 amu的分子极少, 这从Rosetta号对67P彗星的探测结果得到了验证^[7,11–14].

3 系统设计

3.1 离子阱质谱原理

离子阱质谱对挥发分的分析过程可以分为三步: 首先将挥发分分子用离子源发射出的电子电离, 使其转化为不同质荷比(m/e)的带电离子; 离子在离子阱质量分析器内部由于电场作用被囚禁; 最后改变离子阱内电场强度, 质荷比不同的离子先后弹出阱并由检测器检测其数量从而得到各种挥发分含量, 同时通过分析各离子弹出时电场强度可获得其质量, 进而推断出

其化学成分. 离子阱质谱仪传感器的结构如图1所示.

挥发分分析仪的离子源采用电子轰击型离子源, 产生能量高达70 eV的电子束对气体分子进行轰击, 造成电子从分子中逃逸, 形成离子用于质谱分析. 离子源由电子发射体和聚焦透镜组成. 电子发射体为逸出功较小的金属片, 在通电后升温. 当温度达到一定阈值后金属原子内部电子可脱离原子核束缚并逃逸到外部空间. 在聚焦透镜的作用下, 大部分电子可进入离子阱质量分析器内部并电离其中的挥发分, 产生的挥发分离子可被阱内部电场束缚住. 通过增加离子化时间可提高被离子阱束缚住的离子数量, 达到富集的效果. 挥发分分析仪的离子化时间可以在5–5000 ms内调节, 从而改变离子产生的数量, 调节富集效率和仪器灵敏度.

表 1 挥发分分析仪主要性能指标要求

Table 1 VITA measurement requirements

指标名称	指标要求
质量数范围	不小于1–150 amu
质量分辨率	≤0.25 amu@1–10 amu; ≤1 amu@11–150 amu
灵敏度	≥10 ⁻⁴ 计数/s/(1/cm ³)
探测对象	挥发分、游离气体分子(H ₂ O、CO _x 、N _x O _y 、C _x H _y 、稀有气体等)

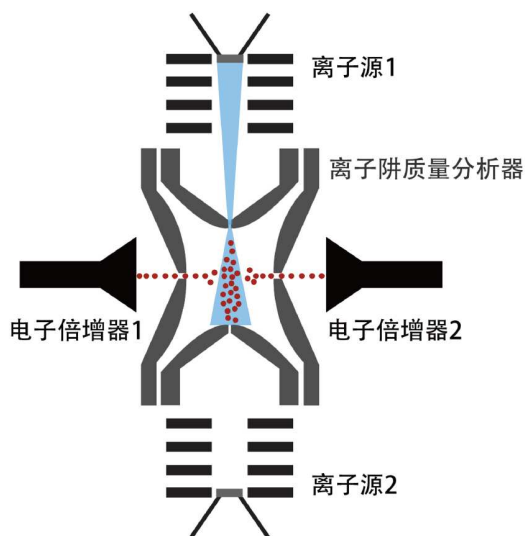


图 1 离子阱质谱传感器组成示意图(蓝色区域表示离子源发射电子, 红点表示电离生成的离子)

Figure 1 Composition of an ion trap mass spectrometer sensor (the blue area indicates electrons emitted from the ion source and the red dots indicate produced ions).

离子阱质量分析器由在中间的环状电极和两片端盖电极组成. 两个端盖电极在环电极轴向的两边呈对称分布, 环电极和端盖中心有小孔让电子或离子通过. 环电极和端盖电极的内表面均呈双曲面结构.

离子阱对离子分析时先后进行离子捕集和离子弹出. 在离子捕集过程中, 离子源发射的电子进入离子阱, 同时在环电极上施加一个射频电压, 如式(1)所示:

$$\phi_0 = V \cos \Omega t, \quad (1)$$

其中, V 是交流电势, Ω 是角频率(rad/s). 此时阱内形成一个四极电场, 仅有一段质荷比范围内的离子可在该交变电场的作用下做循环往复运动, 离阱中心越远的离子所受到的将其拉向中心的力就越大, 类似于被囚禁在一个势阱内, 而其余质荷比的离子则会撞在离子阱的电极上. 在离子弹出过程中, 通过从小到大调整扫描电压 V , 改变离子在阱内的运动轨迹, 离子就会按质荷比从小到大的顺序先后穿过端盖上的孔弹出离子阱, 进而被检测器检测. V 满足式(2):

$$\frac{m}{e} = \frac{4V}{0.908r_0^2\Omega^2}, \quad (2)$$

其中 r_0 是环电极内半径.

检测器为电子倍增器, 离子撞击到其内表面后轰击出二次电子, 二次电子在检测器中继续轰击出更多电子, 最终产生放大电信号. 为了进一步提高挥发分分析仪的检测灵敏度, 电子倍增器使用高增益, 数据采集模块采用计数模式, 每检测到一个脉冲对应一个撞击到检测器的离子.

3.2 结构设计

挥发分分析仪采用单层框架式结构, 各功能单元分布在同一框架并根据互连关系划分为五个区域, 各区域通过横梁分隔(图2). 离子阱传感器处于中上区域中, 采用独立设计, 嵌入框架缺口内. 框架内其余部分为电子学模块. 挥发分分析仪固定于探测器+X面舱板内侧, 狭缝开口朝向探测器+X方向. 整机采用镁合金等轻量化材料并优化结构设计, 保证力学强度的同时将重量降低至2.38 kg.

3.3 传感器设计

挥发分分析仪的离子阱传感器包括两个离子源、一个离子阱质量分析器、两个检测器以及一个屏蔽盒. 离子源内的电子发射体寿命有限, 虽然已通过1:1寿命验证其寿命可满足单机工作时长要求, 但为了保证长期探测的可靠性, 传感器配备两个离子源, 其中一个作为冷备份.

挥发分分析仪配置了两个电子倍增器, 分别置于离子阱质量分析器的两侧. 由于离子阱中的离子从两个方向弹出的概率相同, 因此两个倍增器可检测到向两个方向弹出的全部离子, 在提高可靠性的同时将灵敏度提高了一倍.

屏蔽盒起到屏蔽外界噪声干扰的作用. 屏蔽盒盖上有两条尺寸为6 mm×29 mm的进气狭缝, 允许挥发分以自由扩散的形式经过狭缝进入离子阱内部从而被检测. 此外, 在地面测试过程中屏蔽盒可连至真空系统, 使内部形成高真空, 进行挥发分分析仪的测试和

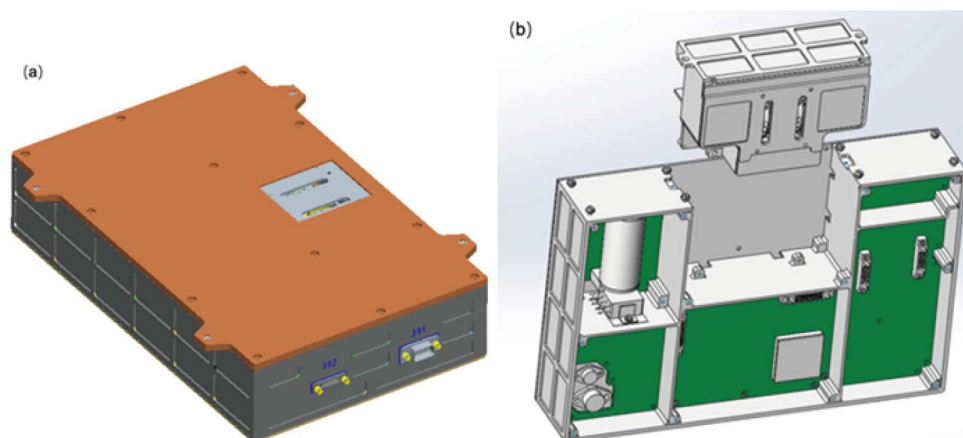


图 2 挥发分分析仪外部(a)和内部(b)三维设计图

Figure 2 External (a) and internal (b) 3D view of VITA.

定标试验.

3.4 电子学设计

挥发分分析仪电子学可分为主控单元、低压电源单元、高压电源单元和射频电源单元3个部分, 布局如图3所示.

如图4所示, 主控单元负责整机时序控制, 模拟量和信号采集, 供电开关和通信. 低压电源单元将一次母线转换为挥发分分析仪其他功能单元所需二次电压. 高压电源单元为电子倍增器提供约 -2800 V 电压. 射频电源单元为离子阱电极提供幅值线性扫描的交流电源. 挥发分分析仪的平均功率为 14.7 W .

3.5 工作模式与自主功能

挥发分分析仪随整星发射入轨后, 在向小行星和主带彗星的转移阶段, 每半年开机自检一次, 每次自检开机时间约为 40 min , 对设备健康状态进行监测同时探测周围背景. 在抵达主带彗星后, 长时间开机持续进行探测.

在上文中已提到, 在特定离子阱电场下仅有一段质荷比范围内的离子可被离子阱囚禁进而被检测. 针对该特性, 挥发分分析仪采用五种不同探测方法探测不同质量数范围的挥发分. 各探测方法的区别在于离子阱环电极射频频率、电压幅值及其扫描速率. 以上参数均均在定标试验时进行了优化, 以获得各质量数段内最优的灵敏度. 简单来说, 运行方法1–3时射频电源频率较高、扫描较快, 用于测量低质量数挥发分, 可获得更高的灵敏度和分辨率; 运行方法4和5时射频电源频率通过继电器切换后自动降低, 在维持低功耗的情

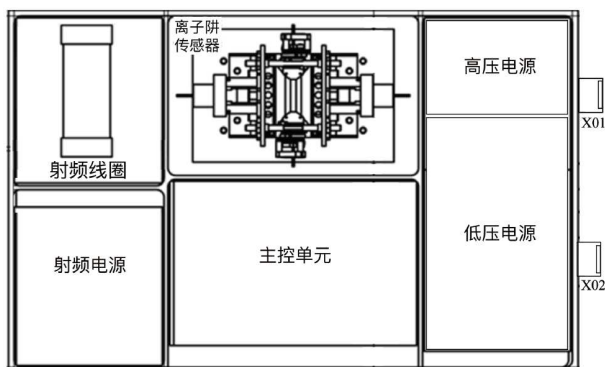


图3 挥发分分析仪内部布局

Figure 3 VITA internal layout.

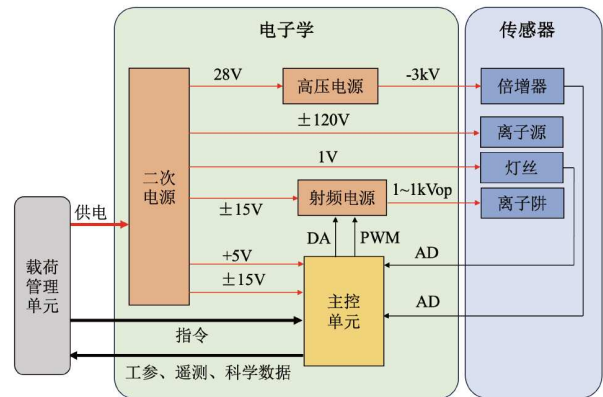


图4 挥发分分析仪电子学功能框图

Figure 4 VITA electronics block diagram.

况下可测量更高质量数挥发分. 正样件探测方法与质量数范围的具体对应关系见4.1节. 挥发分分析仪在自检模式和探测模式下按预先设定的5种探测方法自动进行探测器背景气体和主带彗星挥发分的测量.

挥发分分析仪具有两项自主功能. 一项为离子源发射电流的自主监测功能, 即在电流过低时自动切换电源供电对象到备份离子源, 保证挥发分探测灵敏度. 另一项为在探测器发动机喷气时的安全保护功能. 由于发动机喷气时产生局部高压环境, 可能影响离子源和检测器的正常工作, 而且喷出气体还会被误认为是挥发分. 因此, 在收到发动机将要喷气的信息后挥发分分析仪会自动关闭离子源和检测器供电电源, 在喷气结束后恢复供电继续探测, 并在科学数据中标示当前科学数据可能会受到发动机喷出气体的影响.

4 地面定标与科学验证

结合挥发分分析仪的性能要求, 需要在地面对挥发分分析仪正样件的质量数范围、质量分辨率、探测对象、灵敏度、含量和动态范围进行定标. 定标试验需要使用一套辅助系统(图5), 由挥发分传感器提供超高真空环境的真空系统和为其提供特定标准气体的进样系统两部分组成.

真空系统由分子泵、前级泵、超高真空热电离真空规以及将其连接的真空组件组成. 真空系统与传感器屏蔽盒采用压紧橡胶密封圈的方式气密相连. 进行

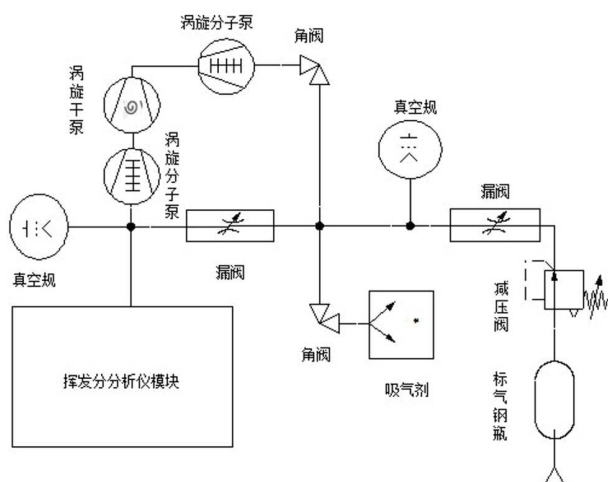


图 5 挥发分分析仪定标系统框图

Figure 5 Calibration system block diagram for VITA.

定标试验前, 真空规示数需降至 5×10^{-7} Pa以下。

进样系统由标气样品、减压阀、气体管路、分子

泵、开关阀门、可调节漏阀、真空规、吸气剂组成。标气通过减压阀后, 根据真空规示数调节漏阀控制其进入气体管路内的气压。在测量稀有气体时, 打开吸气剂阀门, 吸附其中的活性气体杂质以降低干扰。气体管路中的标准气体通过另一漏阀进入真空系统, 从而进入挥发分传感器屏蔽盒。通过漏阀精细调节进入真空系统的标准气体流量, 与分子泵抽走的气体达到动态平衡, 利用超高真空电离规测量标气压力作为标准值。

4.1 质量范围和质量分辨率

利用挥发分分析仪测量 H_2 , He, Ne, Ar, Kr, Xe六种高纯标准气体(图6), 对质量范围和质量分辨率进行定标。由于不同气体检测峰在质量检测范围中的位置与其质量数成正比, 据此推算出各探测方法分别对应的质量范围(表2)。5种方法分别覆盖特定质量数范围, 相邻方法间有部分质量数重合, 总包络为1–182 amu, 即

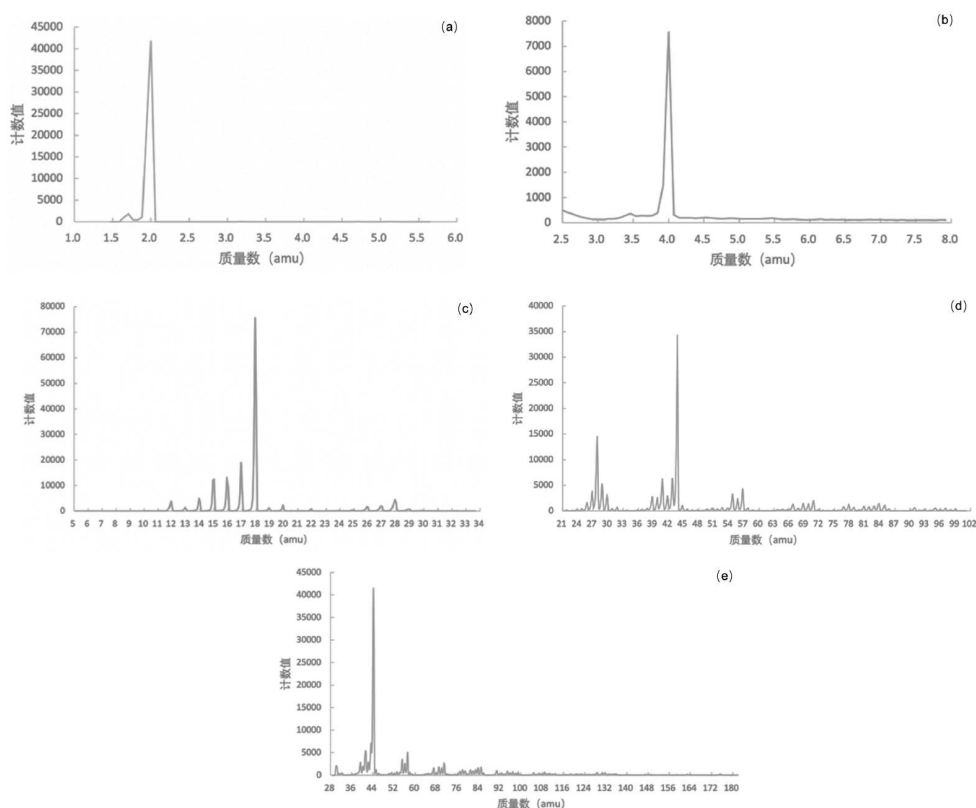


图 6 挥发分分析仪分别使用方法1测量 H_2 样品(a)和方法2 (b)、方法3 (c)、方法4 (d)、方法5 (e)测量He, Ne, Ar, Kr, Xe五种稀有气体混合样品所得质谱图

Figure 6 Mass spectra for H_2 using measurement method #1 (a) and for a mixture of He, Ne, Ar, Kr and Xe using measurement methods #2–#5 (b)–(e) obtained with VITA.

挥发分分析仪的可测质量范围. 各方法对应的质量数范围适用于在轨所得科学数据的质量轴校准.

通过计算 H_2 , ^4He , ^{20}Ne , ^{40}Ar , ^{84}Kr , ^{132}Xe 六个质谱峰峰高一半处的宽度(半峰宽), 可确定挥发分分析仪在1–10 amu质量数段内质量分辨率 ≤ 0.1 amu, 在11–150 amu质量数段内质量分辨率在0.14–0.44 amu范围内(表3).

4.2 探测对象

利用挥发分分析仪测量了 H_2 , He , Ne , Ar , Kr , Xe , N_2 , CO_2 , NO , NO_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 等13种单一组分高纯标准气体, 确定了主要检出峰的位置, 并与美国国家标准与技术研究院(NIST)提供的标准质谱图库(www.nist.gov)中该物质的主要检测峰进行比较(表4), 峰位置对应性很好, 确认了定性检测的有效性.

4.3 灵敏度

灵敏度由测量一定分压的标准气体所得信号和气体分压计算得出, 具体公式为: 灵敏度 = $C/t/P$, 其中 t 为挥发分累积测量时间, C 为被测气体总信号, P 为样品气体的密度. 为了模拟主带彗星极低挥发分环境, 利用 He 中含有1026 ppm Ne 的混合标气, 在传感器屏蔽盒口处产生了 5.8×10^{-10} Pa极低分压的 ^{20}Ne 标气, 对应气体密度为 1.38×10^5 个分子/ cm^3 . 挥发分分析仪对该气体累积测量12 s获得了188个计数, 灵敏度为 1.1×10^{-4}

表 2 挥发分分析仪5种探测方法对应质量范围

Table 2 Mass ranges of five measurement methods

探测方法	起始质量数 (amu)	终止质量数 (amu)
1	1	6
2	2	8
3	5	34
4	20	101
5	28	182

表 3 挥发分分析仪检测 H_2 , ^4He , ^{20}Ne , ^{40}Ar , ^{84}Kr , ^{132}Xe 的质量分辨率

Table 3 Mass resolutions for H_2 , ^4He , ^{20}Ne , ^{40}Ar , ^{84}Kr and ^{132}Xe

样品气体	理论质量数 (amu)	实测质量数 (amu)	质量分辨率 (amu)
H_2	2	2	0.1
^4He	4	4	0.09
^{20}Ne	20	19.9	0.14
^{40}Ar	40	39.8	0.33
^{84}Kr	83.9	83.8	0.43
^{132}Xe	131.9	131.8	0.44

计数/ $\text{s}/(1/\text{cm}^3)$. 受限于真空设备在地面可达到和测量的真空度, 无法进一步降低标气分压从而验证挥发分分析仪对更低分压气体的灵敏度, 但可进行推算, 过程如下. 挥发分分析仪在轨工作过程中, 通过延长离子化时间以及多次运行探测方法等方式提高累积测量

表 4 挥发分分析仪对12种单一标准气体的实测峰位置与NIST标准峰位置

Table 4 List of major peaks identified for 12 individual gas samples and major peaks in the mass spectra provided from the NIST Mass Spectrometry Data Center

样品气体	探测方法	实测峰位置 (amu)	NIST标准峰位置 (amu)
H_2	1	2	2
H_2O	3	17, 18	17, 18
He	2	4	4
Ne	3	20, 22	20, 22
Ar	4	40	40
Kr	4	84, 86	84, 86
Xe	5	129, 131, 132, 134, 136	129, 131, 132, 134, 136
NO	3	30	30
NO_2	4	30, 32, 46	30, 46
N_2	3	28, 29	28
CO_2	4	44	44
CH_4	3	12, 13, 14, 15, 16	15, 16

表 5 挥发分分析仪检测H₂, He, Ne, N₂, CH₄, Ar, Kr, Xe的定量曲线和动态范围**Table 5** Calibration curves and dynamic ranges for H₂, He, Ne, N₂, CH₄, Ar, Kr, and Xe

样品	定量曲线方程	R^2	含量范围 (Pa)
H ₂	$\log C = 1.1172 \log P + 11.42$	0.9995	$3.2 \times 10^{-8} - 3.2 \times 10^{-6}$
He	$\log C = 1.0264 \log P + 11.401$	0.9962	$1.3 \times 10^{-8} - 3.2 \times 10^{-6}$
Ne	$\log C = 0.9951 \log P + 11.287$	0.9994	$5.8 \times 10^{-10} - 2.9 \times 10^{-6}$
CH ₄	$\log C = 0.9399 \log P + 11.472$	0.9986	$6.1 \times 10^{-10} - 6.1 \times 10^{-8}$
N ₂	$\log C = 1.0395 \log P + 10.945$	0.9939	$6.4 \times 10^{-8} - 6.4 \times 10^{-6}$
Ar	$\log C = 0.9986 \log P + 10.739$	0.9984	$1.3 \times 10^{-8} - 3.2 \times 10^{-6}$
Kr	$\log C = 1.0269 \log P + 10.836$	0.9996	$3.2 \times 10^{-8} - 3.2 \times 10^{-6}$
Xe	$\log C = 0.9404 \log P + 10.455$	0.9996	$3.2 \times 10^{-8} - 3.2 \times 10^{-6}$

时间, 进而提高阱内离子富集程度. 在轨累积测量时间相较于定标试验使用的12 s可提高50–400倍, 相应地可测量到比 1.38×10^5 个分子/cm³密度低50–400倍的气体, 低于311P周围气体的推测密度3000个分子/cm³.

4.4 含量和动态范围

动态范围为检测信号与气体浓度成线性关系的气体浓度范围. 利用挥发分分析仪测量了H₂, He, Ne, N₂, CH₄, Ar, Kr, Xe共8种单一组分高纯标准气体的含量和动态范围, 获得每种气体的定量曲线(表5), 用于从在轨所得挥发分检测信号反推其含量.

5 结论与展望

根据主带彗星可能含有的极稀薄挥发分的探测需求, 设计了基于离子阱质谱原理的挥发分分析仪. 挥发分分析仪可测量1–182 amu范围内的挥发分的分子质量和含量, 整个质量数范围内质量分辨率(半峰宽)均优于0.5 amu. 通过离子捕集功能达到了较高的灵敏度, 对 5.8×10^{-10} Pa极低分压的²⁰Ne标气检测灵敏度达到了 1.1×10^{-4} 计数/s/(1/cm³). 对主带彗星探测所得科学数据将为研究主带彗星形成位置和活动机制等科学问题提供重要线索.

致谢 感谢国家航天局探月与航天工程中心、中国科学院月球与深空探测总体部、探测器有效载荷分系统、兰州空间技术物理研究所在挥发分分析仪研制工作中的指导、帮助与支持.

参考文献

- Li C L, Liu J J, Ren X, et al. Scientific objectives and payloads configuration of the Tianwen-2 Mission (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2024, 11: 304–310 [李春来, 刘建军, 任鑫, 等. “天问二号”任务科学目标和有效载荷配置. *深空探测学报*, 2024, 11: 304–310]
- Hsieh H H, Jewitt D. A population of comets in the main asteroid belt. *Science*, 2006, 312: 561–563
- Hsieh H H, Jewitt D, Lacerda P, et al. The return of activity in main-belt comet 133P/Elst-Pizarro. *Mon Not R Astron Soc*, 2010, 403: 363–377
- Jewitt D, Agarwal J, Weaver H, et al. Episodic ejection from active asteroid 311P/PanSTARRS. *Astrophys J*, 2015, 798: 109, arXiv: 1410.8573
- Jewitt D, Agarwal J, Weaver H, et al. The extraordinary multi-tailed main-belt Comet P/2013 P5. *Astrophys J*, 2013, 778: L21
- Liu B, Liu X, Jia X, et al. Active asteroid 311P/PanSTARRS: Rotational instability as the origin of its multitails? *Astrophys J*, 2023, 166: 156, arXiv: 2310.10455
- Chan Q H S, Stephan A, Franchi I A, et al. Organic matter and water from asteroid Itokawa. *Sci Rep*, 2021, 11: 5125
- Jarosewich E. Chemical analyses of meteorites: A compilation of stony and iron meteorite analyses. *Meteoritics*, 1990, 25: 323–337
- Lin H, Li S, Xu R, et al. *In situ* detection of water on the Moon by the Chang'E-5 lander. *Sci Adv*, 2022, 8: eab19174
- Li C L, Liu J J, Yan W, et al. Overview of scientific objectives for minor planets exploration (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2019, 6: 424–436 [李春来, 刘建军, 严韦, 等. 小行星探测科学目标进展与展望. *深空探测学报*, 2019, 6: 424–436]
- Balsiger H, Altwegg K, Bar-Nun A, et al. Detection of argon in the coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Sci Adv*, 2015, 1: e1500377

- 12 Le Roy L, Altwegg K, Balsiger H, et al. Inventory of the volatiles on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from Rosetta/ROSINA. *Astron Astrophys*, 2015, 583: A1
- 13 Wright I P, Sheridan S, Barber S J, et al. CHO-bearing organic compounds at the surface of 67P/Churyumov-Gerasimenko revealed by Ptolemy. *Science*, 2015, 349: aab0673
- 14 Kurosawa K, Moriwaki R, Yabuta H, et al. Ryugu's observed volatile loss did not arise from impact heating alone. *Commun Earth Environ*, 2021, 2: 146

Design and calibration of the volatiles ion trap analyzer for the Tianwen-2 Mission

LIU Ranran^{1*}, XU Hu², YANG Yongshuai², ZHANG Xiaohua³, ZHOU Qin⁴,
HE Huaiyu^{5,6}, HE Huaihang¹, XU Hongguang¹, ZHANG Jiarong¹ & WANG Zifa¹

¹ State Key Laboratory of Atmospheric Environment and Extreme Meteorology, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

² Xi'an Microelectronics Technology Institute, Xi'an 710000, China

³ Suzhou Anyeep Instrument Co., Ltd., Suzhou 215151, China

⁴ Lunar and Deep Space Exploration Division, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

⁵ State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

⁶ College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

*Corresponding author (email: liuranran@mail.iap.ac.cn)

As one of the scientific payloads of the Tianwen-2 Mission, the Volatiles Ion Trap Analyzer (VITA) of the Ejection Analyzer serves to detect the volatiles surrounding the main-belt comet 311P. Based on ion trap mass spectrometry, VITA is able to measure the chemical composition and concentration of volatiles. The crucial information obtained with VITA will facilitate the research on 311P including its formation and activity mechanism. To accomplish the challenging objectives of *in-situ* volatile analysis for 311P, VITA has a very compact design and extremely high sensitivity as well as the ability to operate in an automatic fashion. Calibration of the flight model results in a mass range of 1–182 amu, a mass resolution better than 0.5 amu and a sensitivity of 1.1×10^{-4} ct/s/(1/cm³) for ²⁰Ne at 5.8×10^{-10} Pa. The detectable volatiles and dynamic range fulfill performance requirements as well.

volatiles analysis, measurement requirements, payload design, calibration and validation

PACS: 07.75.+h, 07.87.+v, 82.80.Ms, 95.55.-n

doi: [10.1360/SSPMA-2025-0001](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2025-0001)