

微型微焦斑 X 射线闭管及阴极丝 电子发射差异性*

李 帆^{1,2} 曹 阳¹ 牟 欢¹
刘亚宁¹ 李海涛¹ 李保权^{1,2}

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 行星岩石成分原位测量是行星探测的基本需求, X 射线荧光分析是开展元素成分测量的重要技术手段。针对深空探测 X 射线荧光分析仪的需要, 设计并研制了一款微型微焦斑 X 射线闭管, 尺寸为 $\Phi 15\text{ mm} \times 22\text{ mm}$, 焦斑尺寸 $230\text{ }\mu\text{m}$, 工作时阳极接地, 阴极接浮地负高压, 最大电压为 -50 kV 。在微型 X 射线闭管研制过程中, 开展了螺旋型钨丝、直线型钨丝、直线型铈钨丝等常用热阴极的电子发射差异性研究, 测量了各型热阴极的电子发射效率。结果显示, 在 200 V 阳极电压下, 低铈含量直线型铈钨丝电子发射效率最大为 $27.87\text{ }\mu\text{A}\cdot\text{W}^{-1}$, 是螺旋型钨丝的 4 倍, 直线型钨丝的 9 倍; 掺铈钨丝电子发射效率远高于纯钨型阴极丝。此外, 铈钨丝还具有电子发射快、预热要求低、对真空度要求不高等特点, 是深空探测 X 射线闭管阴极丝较理想的选择。

关键词 微型 X 射线闭管, X 射线荧光分析, 微焦斑, 阴极丝, 电子发射效率

中图分类号 TL929

Miniature Micro-focal X-ray Closed Tube and Electron Emission Difference of Cathode Wire

LI Fan^{1,2} CAO Yang¹ MOU Huan¹ LIU Yaning¹
LI Haitao¹ LI Baoquan^{1,2}

1(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

* 国家重点研发计划项目(2017 YFB0503300), 国家自然科学基金项目(41604152, U1938111)和中国科学院青年创新促进会项目(2018178)共同资助

2021-11-24 收到原稿, 2022-05-06 收到修定稿

E-mail: lifan_24@163.com

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Abstract *In-situ* measurement of planetary rock composition is the basic requirement of planetary exploration, and X-ray fluorescence analysis is an important technical means to carry out elemental composition measurement. In order to meet the needs of X-ray fluorescence analyzer for deep space detection, a miniature X-ray closed tube with micro-focal spot is designed and developed. It size is $\Phi 15\text{ mm}\times 22\text{ mm}$, and the focal spot size is $230\text{ }\mu\text{m}$. The anode is grounded in operation, and the cathode is connected to the floating negative high voltage with the maximum voltage of -50 kV . In this paper, the differences of electron emission of common hot cathodes such as spiral tungsten, linear tungsten and linear rhenium tungsten hot cathodes, are studied in detail, and the electron emission efficiency of each hot cathode is measured. The test results show that the maximum electron emission efficiency of linear rhenium tungsten wire is $27.87\text{ }\mu\text{A}\cdot\text{W}^{-1}$ at 200 V anode voltage, which is 4 times that of spiral tungsten wire and 9 times that of linear tungsten wire. In addition, rhenium tungsten wire has the characteristics of fast electron emission, low preheating requirement and low vacuum requirement, so it is an ideal choice for X-ray closed tube cathode wire for deep space exploration.

Key words Micro X-ray closed tube, X-ray fluorescence analysis, Micro focal spot, Cathode filament, Electron emission efficiency

0 引言

行星及小天体生命信息探测是深空探测领域的重要发展方向。一般而言,行星岩石里可能保存生命印迹或蕴藏行星过去宜居性的重要线索,这些是研究行星起源及其历史的重要信息,因此行星岩石(或土壤)化学成分测量是行星探测的基本需求。行星岩石化学成分测量一直伴随深空探测的发展历程,最早开始于 NASA 的 Apollo 任务。芝加哥大学的 Anthony Tuekevich 团队^[1]利用超铀核素 ^{242}Cm 放出的 α 粒子轰击月壤,测量背散射的 α 粒子能谱分布,通过计算背散射 α 粒子能量 E 与初始能量 E_0 的比值推算月壤的化学元素组成,这就是 α 粒子背散射技术。此外 α 粒子背散射技术还可以集成质子测量(α 粒子与靶核反应后辐射出质子)和 X 射线荧光测量仪器,称这种元素成分测量仪器为 α 粒子、质子、X 射线谱仪,简称 APXS^[2]。该仪器搭载于 1967 年和 1968 年发射的 Surveyor V, VI 和 VII 任务中,首次较完整地开展了月壤化学成分的原位测量^[3-5]。

20 世纪 70 年代,火星探测逐渐开展。1976 年 Viking 登陆器成功登陆火星^[6],自此几乎每一次登陆火星的任务都携带有用来测量岩石化学成分 APXS 仪器,包括 Pathfinder^[7], MER^[8], Sojourner, Opportunity^[9], Spirit, Curiosity^[10-11] 等火星探测任

务。APXS 技术的原理是基于来自放射性同位素 ^{242}Cm 衰变产生的粒子与物质的三种相互作用:卢瑟福背散射、 α 粒子核反应释放质子、 α 粒子轰击靶核产生特征 X 射线。通过测量背散射的 α 粒子能谱、核反应释放的质子能谱以及特征 X 射线,能够获得待测样品的化学元素丰度信息。APXS 应用到的这三种测量原理能够在灵敏度方面相互补充, α 粒子背散射对于测量 C 及 O 等轻元素效果很好,灵敏度高,而核反应产生的质子能谱对 Na, Mg, Al, Si, S 等中等质量的元素敏感,X 射线荧光对较重的元素(Na 到 Fe)更敏感。因此 APXS 融合的这三种测量方法,理论上只要其元素浓度占比高于 1% 以上,所有元素(H 和 He 除外)都能够被检测出来。因此 APXS 在很长一段时间内,一直是深空探测岩石成分测量的主角。APXS 有许多优势:激活不需要消耗电源,也不存在失效的风险,而且体积小重量轻,因此无论是月壤探测、火星探测或者彗星探测,APXS 一直被广泛采用,中国嫦娥三号巡视器也搭载了类似功能的仪器,用于月岩或月壤表面的元素分析^[12-13]。但 APXS 也有其固有缺陷:一是 APXS 持续存在比较强的放射性,对仪器的存放、安装,以及其他操作都需要专业人员执行;二是完成一次测量需要时间过长,大概需要 10 h 以上。根据 Kelliher 等^[14]公布的数据,Pathfinder 和 MER 上的 APXS 获得一个样品的元素谱图大概

需要 20~70 h, 在 2003 年美国 MER 探测计划中, 一年的探测时间内只测到 16 种矿物元素信息。APXS 的探测效率严重制约了行星探测科学成果的产出。为满足 NASA Mars 2020 探测需要, 美国喷气动力实验室(JPL)开展了基于 X 射线荧光分析的新型岩石成分分析仪器 PIXL^[15-16] (Planetary Instrument for X-ray Lithochemistry) 的研制, 并于 2021 年 2 月随 NASA Perseverance 火星探测任务成功着陆火星^[17]。PIXL 主要包括微型 X 射线激活源和高能谱分辨的 SDD 探测器。PIXL 在实验室对 BHVO-2 玄武岩样品进行测试^[18], 测试结果显示, 5 s 内可检测到岩石中含量较多的部分微量元素, 2 min 内大部分微量元素也能被检测到, 1 h 内便对 Na 以上的所有元素进行高精度检测, 探测灵敏度为 10^{-5} 。相比 APXS, PIXL 的灵敏度和探测效率都有大幅提升, 属于行星岩石成分原位分析的新一代仪器。

1 微型微焦斑 X 射线闭管的设计与研制

针对中国深空探测的需要, 开展了用于地外行星岩石成分原位分析的微型 X 射线荧光光谱仪的研究, 设计研制了具有微焦斑功能的微型 X 射线闭管。设计过程中优化出一种阴极光学透镜结构, 该结构包括两个操场型的中空结构, 这两个中空结构正交堆叠, 如图 1 所示, 这种结构可以实现直线型阴极丝在轴向和径向发射电子的聚焦, 在加工中可以将正交型操场结构在一块材料上加工。仿真结果显示, 这种静电聚焦阴极光学如果采用直径 30 μm 的钨丝, 长度 4 mm, 得到的焦斑直径为 230 μm , 物像比例缩小至 1/17, 取得了非常好的聚焦效果。这种结构应用中采

用直线型阴极丝, 质量可以忽略不计, 抗震性能良好, 更能适应火箭发射或者航天器着陆时的应力环境, 而且结构简单, 体积小, 同时也简化了阴极丝的研制难度和焊接难度, 特别适用于深空探测的资源约束和可靠性要求。目前该新型的阴极光学结构设计已获得专利授权^[19]。另外, 本阴极光学结构末端开放, 相对于限束孔的阴极光学结构而言, 热电子通过率更高, 相同功耗情况下, 采用这种阴极光学结构产生的 X 射线强度更大。目前研制的 X 射线管尺寸为 $\Phi 15 \text{ mm} \times 22 \text{ mm}$, X 射线闭管工作时采用阳极接地, 阴极接负高压的透射型结构, 负高压最大 -50 kV, 比 PIXL 的 X 射线管高压高出 15 kV (PIXL 高压为 35 kV), 因此理论上测量的元素种类比 PIXL 更丰富。

2 X 射线管阴极丝选型

阴极丝主要功能是发射电子, 希望阴极丝在消耗尽可能少的功耗情况下, 产生尽可能多的电子电流, 一般情况下, 用于荧光分析的 X 射线管电子电流在 1~100 μA 范围内。考虑到闭管在真空钎焊时的真空度, 通常都选用结构简单、成本较低且对真空度要求不太高的热阴极丝。这里主要针对螺旋型钨丝、直线型钨丝以及低铯含量的直线型铯钨丝^[20] 三种常用的热阴极丝进行对比测试, 研究其电子发射的差异性, 选出适合微型 X 射线闭管的高效阴极丝。表 1 列出了实验所选用阴极丝的物理参数。

三种阴极丝都焊在同一个 X 射线闭管阴极端, 阴极结构如图 2 所示, 其中阴极固定结构⑤与阴极丝电极柱③一体, 属于电联通状态。焊接阴极丝的电极柱②与③之间的距离为 4 mm。

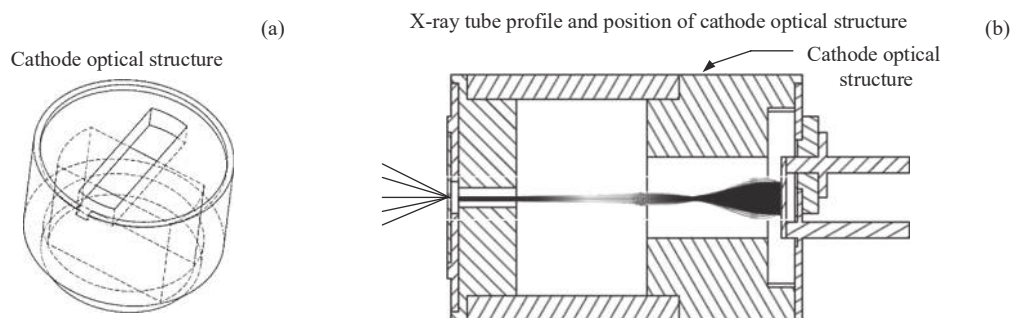


图 1 X 射线管一体化阴极光学结构

Fig. 1 Integrated cathode optical structure of X-ray tube

表 1 测试阴极丝物理参数
Table 1 Test physical parameters of cathode wire

序号	类型	钨丝直径/ μm	钨丝长度/mm	备注
1	螺旋型钨丝	30	4	螺旋直径150 μm , 螺旋圈数20圈
2	直线型钨丝	25	4	—
3	直线型铌钨丝	12	4	铌含量3%

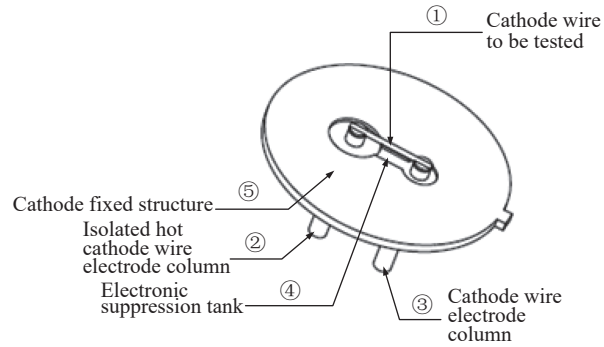


图 2 微型 X 射线管阴极热电子塑形部分
Fig. 2 Thermoelectronic forming part of cathode of miniature X-ray tube



图 3 阴极测试结构
Fig. 3 Cathode test structure

3 测试电路与方法

电子发射特性测试结构采用微型 X 射线闭管, 实物结构如图 3 所示。整套测试电路的原理如图 4 所示。将微型 X 射线闭管置于高真空腔内, 采用阳极接正高压的方式测试电子电流, 在高压电源与闭管之间串入 1 k Ω 精密电阻, 电阻、高压模块、阴极丝电源都通过真空法兰接入真空腔内与 X 射线管接通, 高压模块供电固定在 200 V, 电流测试时, 通过万用表监控 1 k Ω 精密电阻两端的压降, 换算成电流。不同种类的阴极丝点焊至图 2 所示①的位置后, 再将热电子塑形结构固定到 X 射线管上。

测试在真空腔内进行, 真空腔的真空度优于 10⁻⁴ Pa, 通过调整阴极丝连接电源的输出电压, 控制阴极丝两端电压逐渐升高, 阴极丝电流随之增大, 用万用表测量记录 1 k Ω 电阻两端的电压, 电阻电压除以电阻值得到阴极丝发射电子电流的大小。从测到电子开始记录数据, 直到阴极丝熔断为止, 分析得到的数据, 将阴极丝发射的电子电流与阴极丝消耗功率的比值作为阴极丝发射效率的比较标准, 比值越大, 阴极丝的电子发射效率越高。

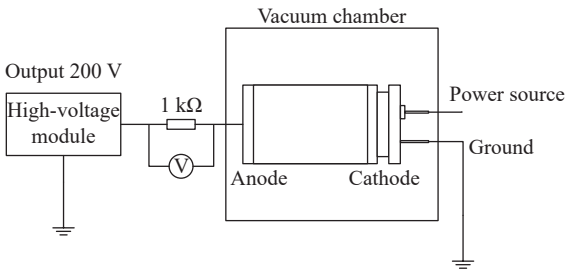


图 4 实验测试电路
Fig. 4 Experimental test circuit

4 实验结果与讨论

虽然三种阴极丝的焊接长度一样, 都是 4 mm, 但是阴极丝的直径不同, 所以电阻也不同, 评价阴极丝的发射效率需要有统一的评价标准。这里将阴极丝发射的电子电流与阴极丝消耗功率的比值作为阴极丝发射效率的比较标准, 比值越大, 则阴极丝的电子发射效率越高。这个标准比较符合实际情况, 因为使用阴极丝的目的是产生电子电流, 所以在使用时希望阴极丝的功耗低, 但产生电子电流强。由于该微型 X 射线闭管是用于 X 射线荧光分析的, 正常情况下在 30~50 kV 的高压下, 20 μA 的电子电流足够满足应用需要, 阴极丝发射特性测试阴极与阳极之间的电

压仅有 200 V, 相比应用情况下的高压场强, 收集电子的能力显著降低, 但评价电子的发射效率时该高压能够满足测试要求。基本的实验过程是: (1) 200 V 高压、精密电阻、阴极及阳极间距在整个实验过程中都不改变, 保证各型阴极丝测试条件一致; (2) 阴极丝电压从 0 V 开始增加, 测量到电子电流时开始记录数据, 不断增加阴极丝电压, 并记录阴极丝电压、电流和精密电阻的压降, 直至阴极丝在真空条件下烧断。表 2 给出的是三种阴极丝实验数据, 其中阴极丝电流和电压已转换为其功率, 对应阴极丝最大功率的下一个数据点是熔断功率, 表 2 中没有列出。

三种阴极丝发射效率的比较如图 5 所示。从图 5(a)中可以看出, 发射同样的电子电流, 直线型铯

钨丝消耗功率最小, 螺旋型钨丝消耗功率次之, 直线型钨丝消耗功率最多。从表 2 及图 5(b)中能够看到, 螺旋型钨丝的最大发射效率为 $6.81 \mu\text{A}\cdot\text{W}^{-1}$, 直线型钨丝的最大发射效率为 $3.07 \mu\text{A}\cdot\text{W}^{-1}$, 直线型铯钨丝的最大发射效率达到 $27.87 \mu\text{A}\cdot\text{W}^{-1}$ ($33.74 \mu\text{A}\cdot\text{W}^{-1}$ 是熔断前一刻的数据, 属于非正常工作条件), 是螺旋型钨丝的 4 倍, 是直线型钨丝的 9 倍, 发射效率远高于另外两种。螺旋型钨丝的发射效率高于直线型钨丝, 这是由于螺旋形的线圈相互靠近, 热量辐射有利于线圈相互吸收, 相比直线型钨丝热辐射减少, 因此需要的加热功率更低。直线型铯钨丝发射效率最高, 证实了在钨中掺杂低含量的铯能够显著提高钨丝的电子发射性能。

表 2 三种阴极丝的实验数据
Table 2 Experimental data of three kinds of filament

螺旋型钨丝			直线型钨丝			直线型铯钨丝		
阴极丝功率/W	电子电流/ μA	发射效率/ $(\mu\text{A}\cdot\text{W}^{-1})$	阴极丝功率/W	电子电流/ μA	发射效率/ $(\mu\text{A}\cdot\text{W}^{-1})$	阴极丝功率/W	电子电流/ μA	发射效率/ $(\mu\text{A}\cdot\text{W}^{-1})$
0.25	0.1	0.39	0.26	0.1	0.38	0.08	1.0	12.02
0.31	0.6	1.95	0.28	0.2	0.72	0.10	1.1	11.51
0.36	1.2	3.33	0.30	0.2	0.67	0.11	2.5	21.75
0.43	1.8	4.20	0.32	0.3	0.95	0.12	2.3	18.44
0.50	2.3	4.64	0.36	0.6	1.68	0.13	2.9	21.50
0.58	2.9	5.01	0.40	0.9	2.27	0.14	3.3	23.10
0.67	3.6	5.37	0.44	1.1	2.49	0.15	3.6	23.92
0.76	4.4	5.76	0.49	1.3	2.65	0.16	4.0	25.10
0.88	5.2	5.88	0.54	1.5	2.78	0.17	4.3	25.66
1.00	6.0	5.99	0.59	1.8	3.07	0.18	5.1	27.87
1.15	7.3	6.34	0.64	1.9	2.97	0.19	5.2	27.06
1.32	9.0	6.81	0.69	2.0	2.89	0.20	4.9	24.05
1.45	9.5	6.55	0.74	2.0	2.70	0.21	5.0	23.43
1.60	10.6	6.61	0.79	2.2	2.78	0.22	5.1	22.78
1.78	11.8	6.63				0.24	5.4	22.72
1.96	11.2	5.72				0.26	6.3	24.56
2.02	11.6	5.75				0.28	9.3	33.74
2.09	11.9	5.71						
2.13	12.1	5.69						
2.21	12.5	5.67						
2.28	12.0	5.27						
2.32	12.3	5.29						

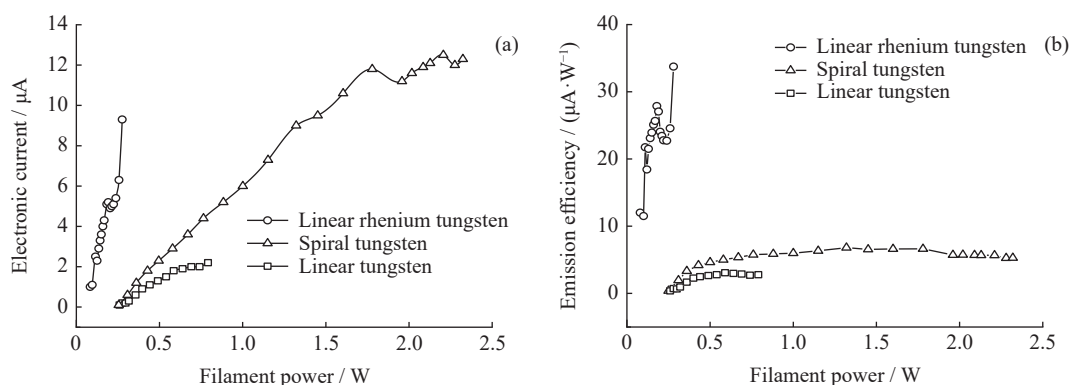


图 5 三种阴极丝发射效率对比

Fig. 5 Comparison of emission efficiency of three kinds of filament

三种阴极丝发射电子电流的变化曲线对比如图 6 所示。结合表 2 的数据不难看出,直线型铼钨丝在阴极丝功率 0.08 W 时产生了 1 μA 的电子电流,而直线型钨丝和螺旋型钨丝在灯丝功率 0.25 W 左右时才产生 0.1 μA 的电子电流。这表明相对于钨丝,铼钨丝预热功率需求基本在可忽略的状态,在灯丝供电的同时基本就产生电子发射。电子电流的产生意味着 X 射线的产生,相比钨丝,采用铼钨丝微型 X 射线闭管基本不需要预热,提高了微型 X 射线闭管的使用效率。

此外,通过试验研究了铼钨丝对暴露大气环境的耐受度。将一条直线型铼钨丝先在大气条件下加电,阴极丝电流最高加到 100 mA,大气环境下加电持续时间约 1 min,之后放入真空腔中测试其电子发射性能。暴露大气点亮之后的铼钨丝与直接在真空中点亮的铼钨丝发射效率如图 7 所示。在小于 0.2 W 的阴极丝功耗下,暴露大气环境点亮的铼钨丝电子发射效率下降约 40%,但在大于 0.2 W 的功率下,二者发射效率基本接近,这可能是由于随着阴极丝功率加大,对氧化层有蒸发效应,致使氧化层的影响逐渐减弱。测试结果也显示,铼钨丝对大气环境的容忍度比纯钨丝要高,选择铼钨丝作为阴极丝对闭管的真空度要求可以适当降低。

5 结论

微型 X 射线闭管是 X 射线荧光分析仪的关键部件。针对中国深空探测需求,目前已研制完成适于深空探测应用的微型 X 射线闭管原理样机,其最大高压

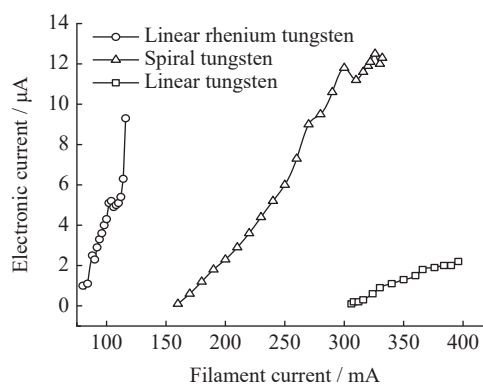


图 6 三种阴极丝实验数据

Fig. 6 Experimental data for three kind of filaments

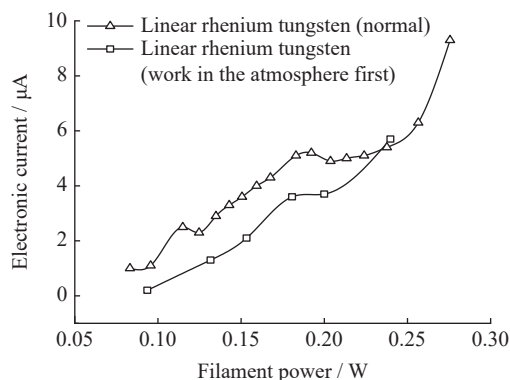


图 7 两次直线型铼钨丝实验发射效率比较

Fig. 7 Comparison of emission efficiency between two linear rhenium tungsten wire experiments

为 -50 kV,可以满足行星岩石成分主要元素和微量元素的激发需要。在微型 X 射线闭管的研制过程中,详细开展了螺旋型钨丝、直线型钨丝、直线型铼钨丝等常用热阴极的电子发射差异性研究,测量了各型热阴

极的电子发射效率。测试结果显示: 在 200 V 收集电压下, 低铈含量的直线型铈钨丝电子发射效率最大为 $27.87 \mu\text{A}\cdot\text{W}^{-1}$, 是螺旋型钨丝的 4 倍, 直线型钨丝的 9 倍; 掺铈钨丝电子发射效率远高于纯钨型阴极丝。此外, 试验还显示铈钨丝具有电子发射快、预热要求低、对大气环境耐受度高等优点, 是深空探测 X 射线闭管阴极丝材料较理想的选择。

参考文献

- [1] TURKEVICH A. Chemical analysis of surfaces by use of large-angle scattering of heavy charged particles[J]. *Science*, 1961, **134**(3480): 672-674
- [2] RIEDER R, WÄNKE H, ECONOMOU T, *et al.* Determination of the chemical composition of Martian soil and rocks: The alpha proton X ray spectrometer[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1997, **102**(E2): 4027-4044
- [3] TURKEVICH A L, FRANZGROTE E J, PATTERSON J H. Chemical composition of the lunar surface in Mare Tranquillitatis[J]. *Science*, 1969, **165**(3890): 277-279
- [4] FRANZGROTE E J, PATTERSON J H, TURKEVICH A L, *et al.* Chemical composition of the lunar surface in Sinus Medii[J]. *Science*, 1970, **167**(3917): 376-379
- [5] PATTERSON J H, TURKEVICH A L, FRANZGROTE E J, *et al.* Chemical composition of the lunar surface in a terra region near the crater Tycho[J]. *Science*, 1970, **168**(3933): 825-828
- [6] YODER C F, STANDISH E M. Martian precession and rotation from Viking Lander range data[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1997, **102**(E2): 4065-4080
- [7] GOLOMBEK M P. The Mars Pathfinder mission[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1997, **102**(E2): 3953-3965
- [8] RIEDER R, GELLERT R, BRÜCKNER J, *et al.* The new Athena alpha particle X-ray spectrometer for the Mars Exploration Rovers[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2003, **108**(E12): 8066
- [9] HAN Lin. The Mars Rover Opportunity has ended its mission[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2019, **39**(3): 272 (韩淋. 机遇号火星漫游器结束任务[J]. *空间科学学报*, 2019, **39**(3): 272)
- [10] SCHMIDT M E, CAMPBELL J L, GELLERT R, *et al.* Geochemical diversity in first rocks examined by the Curiosity Rover in Gale Crater: Evidence for and significance of an alkali and volatile-rich igneous source[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2014, **119**(1): 64-81
- [11] ZHAO Yufen, LIU Yan, HUANG Biling, *et al.* A potential biomarker phosphate for life exploration on Mars Biomarker for life[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021, **41**(1): 129-132 (赵玉芬, 刘艳, 黄碧玲, 等. 火星生命探测中一种潜在的生物标志物磷酸盐[J]. *空间科学学报*, 2021, **41**(1): 129-132)
- [12] WU Mingye. Research on Data Processing Method of Chang'E-3 Particle Excitation X-ray Spectrometer[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012 (吴明烨. 嫦娥三号粒子激发X射线谱仪数据处理方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012)
- [13] LI Chunlai, LIU Jianjun, ZUO Wei, *et al.* Progress of China's Lunar Exploration (2011-2020)[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021, **41**(1): 68-75 (李春来, 刘建军, 左维, 等. 中国月球探测进展(2011-2020年)[J]. *空间科学学报*, 2021, **41**(1): 68-75)
- [14] KELLIHER W C, CARLBERG I A, ELAM W T, *et al.* Performance of a Borehole X-ray fluorescence spectrometer for planetary exploration[C]//2008 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2008: 1-5
- [15] MARTIN P E, EHLMANN B L, THOMAS N H, *et al.* Studies of a lacustrine-volcanic mars analog field site with mars-2020-like instruments[J]. *Earth and Space Science*, 2020, **7**(2): e2019EA000720
- [16] HEIRWEGH C M, ELAM W T, FLANNERY D T, *et al.* An empirical derivation of the X-ray optic transmission profile used in calibrating the Planetary Instrument for X-ray Lithochemistry (PIXL) for Mars 2020[J]. *Powder Diffraction*, 2018, **33**(2): 162-165
- [17] UCKERT K, BHARTIA R, BEEGLE L W, *et al.* Calibration of the SHERLOC deep ultraviolet fluorescence-Raman spectrometer on the Perseverance rover[J]. *Applied Spectroscopy*, 2021, **75**(7): 763-773
- [18] ALLWOOD A C, WADE L A, FOOTE M C, *et al.* PIXL: Planetary instrument for X-ray lithochemistry[J]. *Space Science Reviews*, 2020, **216**(8): 134
- [19] LI Baoquan, CAO Yang, MOU Huan. A cathode lens structure of miniature micro-focus X-ray tubes: CN, 201910813860. X[P]. 2019-12-03 (李保权, 曹阳, 牟欢. 一种微型微焦斑X射线管的阴极光学结构: 中国, 201910813860. X[P]. 2019-12-03)
- [20] JIANG D Y, XIAO W B, LIU D S, *et al.* Structural stability, electronic structures, mechanical properties and debye temperature of W-Re alloys: a first-principles study[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2021, **162**: 112081