

稀土钨电极在电推进系统中的耐烧蚀性能研究

韦银河, 杨建参, 陈 然, 郭胤宸

(北京工业大学, 北京 100124)

摘要: 阴极作为电弧加热发动机的“心脏”, 担负着加热工质气体产生推进力的作用, 由于卫星服役周期长, 点火次数频繁, 对阴极材料的寿命及耐烧蚀性能提出了很高的要求。为寻求耐烧蚀性能优异的阴极材料, 以 W-La-Ce-Y 与 W-La-Y-Zr 电极为基础, 采用氢还原-中频烧结的方法制备 W-La-Ce-Y-Re 与 W-La-Y-Zr-Re 电极材料。模拟发动机实际工况在 250 A 电流下进行燃弧试验, 测量燃弧后电极的质量损失并对电极尖端的组织形貌进行观察。结果表明, 加铈电极在燃弧 2 h 后的烧损质量更少, 尖端形貌变化程度更小, 耐烧蚀性能更好。在扫描电镜下观察到铈的加入抑制了尖端表面枝晶的生长, 弱化了钨基体晶粒的再结晶程度, 并探讨了稀土氧化物的迁移途径; 在金相显微镜下观察到加铈电极的再结晶晶粒更细小, 铈起到了细化再结晶晶粒的作用。在不同工作电流下测得加铈电极的阴极压降更低, 铈的加入提升了电极材料的电子发射性能。

关键词: 稀土钨电极; 铈; 耐烧蚀; 电推进

中图分类号: TG422.1; TG146.4⁺¹¹

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)10-3892-08

空间电推进与传统的化学推进相比, 具有比冲高、推力精确可控、发动机体积更小、服役寿命更长等优势, 是目前空间推进领域发展最为迅速的先进推进技术^[1,2], 已广泛应用在美国、俄罗斯及欧洲多国的航天器中, 电推进系统也成为多个 GEO 卫星平台的标准配置^[3,4]。中国对电推进技术研究起步于 20 世纪 70 年代, 在 2012 年也正式迈入电推进工程应用的行列。按照工作原理, 电推进可分为电磁式、静电式与电热式^[5], 电热式推进系统凭借其结构简单、质量与体积较小、运行电压低等特点, 应用前景十分广阔^[1]。电弧加热发动机主要由阴极、阳极与电源组成, 依靠阴极电弧对工质气体进行加热后由阳极喷出, 达到产生推进力的作用。在微纳卫星的一个服役周期中, 发动机阴极燃弧时间达数十甚至上百小时, 引弧超 1000 次, 电弧中心温度可达 20 000 K, 这对阴极材料的耐烧蚀及热电子发射性能提出了很高的要求^[6-10]。

钨作为广泛应用于惰性气体保护焊、等离子等领域的热电子发射材料, 凭借其高熔点 (3410 °C)、低蒸气压等优点, 纯钨电极是最早用作热电子发射的材料^[11,12]。但纯钨的电子逸出功高, 会导致电极的烧蚀, 研究表明, 在钨中加入逸出功更低的轻稀土氧化物能显著提升阴极的耐烧蚀性能^[13-16]。20 世纪 90 年代日本学者认为按 1:1:3 的比例在钨中添加 La₂O₃、CeO₂、Y₂O₃ 3 种稀土氧化物所制得的三元稀土钨电极, 其综合性能最佳^[13]。

近年来, 北美研究者将 ZrO₂ 作为添加物制备出 E3 三元电极, 主要成分为 W-La₂O₃-Y₂O₃-ZrO₂, 朱文光等^[17,18]对 E3 电极与传统多元电极的焊接性能进行了对比, 在 200 A 电流下燃弧 5 h, E3 电极烧损量最小, 且尺寸稳定性好, 再结晶程度较弱。

此外, 钨的晶粒间结合力小, 受低温脆性以及再结晶脆性的影响, 塑性加工困难, 也对钨材的使用性能产生影响^[19]。金属铈由于其极高的熔点和优异的高温性能, 被广泛用于高温合金制备领域^[20-22]。将钨与铈合金化是目前唯一已知的通过添加合金元素来提高钨合金塑性的途径^[23,24], 在钨中加入铈从而降低钨合金塑脆转变温度的现象也称为“铈效应”^[20,23,24]。研究表明, 在钨合金中引入铈可以提高钨合金的强度, 改善钨合金的加工成型性能和焊接性能, 提高阴极的发射能力^[20,21,25]。因此, 本研究选择 W-La₂O₃-CeO₂-Y₂O₃ 与 W-La₂O₃-Y₂O₃-ZrO₂ 2 种性能优异的稀土钨电极成分配比, 在其中加入金属铈, 制备出三元稀土钨铈电极, 并通过燃弧试验模拟电弧加热发动机实际工况, 对比各成分电极间组织、性能的差异以及铈元素对电极的影响。

1 实验

本实验以纯钨粉、稀土氧化物粉末、铈酸铵粉末为原料, 采用固-固掺杂, 中频烧结的方式制备电极材料。

收稿日期: 2021-09-28

基金项目: 北京控制工程研究所先进空间推进技术实验室和北京市高效能及绿色宇航推进工程技术研究中心开放基金课题 (LabASP-2019-07)

作者简介: 韦银河, 男, 1996 年生, 硕士生, 北京工业大学材料与制造学部, 北京 100124, E-mail: weiyinhe326@163.com

对于 W-La₂O₃-CeO₂-Y₂O₃-Re 与 W-La₂O₃-Y₂O₃-ZrO₂-Re 样品, 将铈酸铵粉末与钨粉进行混合, 经过五温区十五管还原炉还原, 将铈酸铵还原成铈粉后再经中频烧结后进行开坯旋锻^[26,27], 最终制得直径为 3.0 mm 的稀土钨铈电极材料, 4 种电极试样成分见表 1。在实际生产过程中, 还原得到的铈粉颗粒较大, 细小的钨粉会包覆在铈表面形成更大的粉末颗粒, 在过筛后导致铈含量的减少。因此本实验在粉末还原阶段增加铈酸铵的加入量, 按照铈含量 5% (质量分数) 进行掺杂。经中频烧结后采用辉光放电质谱法对加铈样品的各元素含量进行检测, 结果见表 2。检测结果表明, 由铈酸铵还原制得的铈粉经过固-固掺杂会对样品中的稀土含量产生影响, 导致稀土氧化物的实际含量略低于理论值。

在 2350 °C 烧结温度下, 铈在钨中溶解形成体心立方结构的固溶强化相, 稀土第二相均匀分布在晶界处。测出烧结后坯条的实际密度并计算出烧结体的致密度, 见表 3, 由于铈粉经还原制得, 其颗粒大小与形状未经控制, 使烧结体致密度有所降低, 但整体仍保持在 95% 左右的较高水平, 能够满足后续旋锻加工要求。图 1 为成品电极的纵截面金相组织, 由于材料拉伸形变量较大, 经旋锻加工后电极内部组织呈细长纤维状, 纵向晶界与材料拉伸方向平行, 横向晶界不明显, 添加的稀土第二相也被拉长, 沿晶界均匀分布。由于铈添加量较少, 4 种成分的电极材料组织结构差异不大。

采用松下 YC-300WX 逆变氩弧焊机对电极进行直流燃弧试验, 以水冷铜板作为阳极。在空间电推进领域, 电弧加热发动机功率一般在 100~2000 W 范围内, 工作

电流在 20 A 左右, 为了在有限时间内模拟出阴极长时间工作的烧蚀情况, 在合理范围内增大工作电流, 因此本实验拟定在 250 A 电流下进行烧蚀实验, 实验工艺参数见表 4。实验前, 将电极一端削尖, 再用丙酮进行浸泡清洗, 烘干后称重并记录。按拟定参数在水冷铜板上进行燃弧试验, 待电弧稳定后开始计时, 熄弧后延迟通氩气 3 min, 以避免钨极氧化。每隔 0.5 h 对电极进行称重

表 1 电极型号及成分

Electrode	Oxide content (mass fraction)
W-La-Ce-Y	W-0.44%La ₂ O ₃ -0.44%CeO ₂ -1.32%Y ₂ O ₃
W-La-Ce-Y-Re	W-0.44%La ₂ O ₃ -0.44%CeO ₂ -1.32%Y ₂ O ₃ -3%Re
W-La-Y-Zr	W-1.5%La ₂ O ₃ -0.10%Y ₂ O ₃ -0.10%ZrO ₂
W-La-Y-Zr-Re	W-1.5%La ₂ O ₃ -0.10%Y ₂ O ₃ -0.10%ZrO ₂ -3%Re

表 2 稀土元素实际含量

Electrode	La	Ce	Y	Zr	Re
W-La-Ce-Y-Re	0.360	0.320	1.280	0.000	2.400
W-La-Y-Zr-Re	1.410	0.000	0.078	0.087	2.342

表 3 烧结体密度与致密度

Electrode	Theoretical density/g cm ⁻³	Actual density/g cm ⁻³	Compactness/%
W-La-Ce-Y	19.050	18.129	95.16
W-La-Ce-Y-Re	19.101	18.121	94.87
W-La-Y-Zr	19.130	18.391	96.14
W-La-Y-Zr-Re	19.180	18.348	95.66

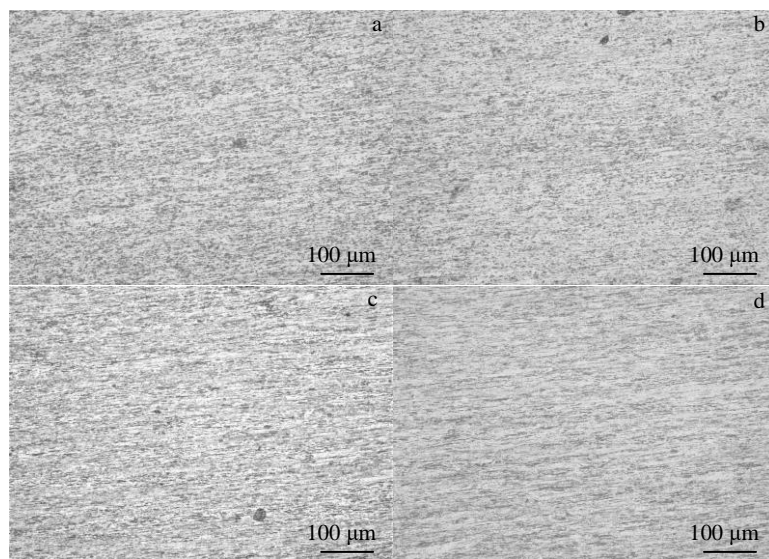


图 1 不同成品电极纵截面金相组织

Fig.1 Metallographic microstructures of different finished electrode lengthwise section: (a) W-La-Ce-Y, (b) W-La-Ce-Y-Re, (c) W-La-Y-Zr, and (d) W-La-Y-Zr-Re

表 4 电极烧损实验参数

Table 4 Parameters of electrode erosion experiment

Electrode diameter/mm	Welding current/A	Ar flow rate/L min ⁻¹	Arc gap/mm	Tip angle/(°)	Electrode out of nozzle/mm
3.0	250.0	8.0	3.0	30.0	6.0

并计算质量损失，最长燃弧时间为 2 h，重复试验多次，绘制烧蚀量曲线。在烧损 1 与 2 h 时用体式显微镜与扫描电镜对尖端进行观察。最后测量并绘制电极燃弧过程中伏安特性曲线，实验测试参数与烧蚀实验一致，待电弧稳定后调节工作电流，由 20 A 依次增加至 260 A，用多功能万用表记录电压变化，绘制 $U-I$ 特性曲线。

2 结果与讨论

2.1 燃弧烧损量

各电极烧损量与燃弧时间的关系见图 2。2 组掺铈电极在燃弧过程中的质量损失显然更小，且烧损量与工作时间整体呈线性关系；W-La-Ce-Y 与 W-La-Y-Zr 电极在燃弧初期烧损量更大，在 1 h 后质量变化趋于平稳。目前，电极的烧损机制被认为是阴极内部的活性稀土氧化物不能及时扩散迁移至电极尖端，无法及时弥补尖端氧化物的蒸发，加上钨基体的电子逸出功较高，使工作温度升高，导致尖端熔化蒸发，造成电极烧损同时也使尖端形貌发生变化。电极尖端稀土氧化物蒸发电极内部产生浓度差，在浓度梯度的推动下，稀土元素由基体向表面发生扩散迁移。在燃弧初期，稀土元素的蒸发速率大于扩散速率，尖端处稀土元素补充不及时，使电极工作温度升高，因此在工作初期电极的质量损失更大。随着工作温度升高，稀土元素的扩散速率增加，与尖端的蒸发速率逐渐达到动态平衡，电极稳定工作，其质量损失也有所减小且趋于稳定。对比 2 组不含铈的电极，W-La-Ce-Y 电极的烧损量更小，这主要是由于氧化物成分不同所导致的，在 W-La-Ce-Y 电极中，稀土氧化物含量更高，且 Y_2O_3 占比更大，在大电流下，W- Y_2O_3 的燃弧性能更佳，这也与文献[16]所报道的结果吻合。而 W-La-Y-Zr 电极中钨所占比例更大，使材料的电子逸出功增加，加重了电极的烧损。对比 2 组含铈的电极，在燃弧过程中，2 组电极的烧损量交替增加，质量损失差别不大，耐烧损能力相当。显然，铈的加入对 W-La-Y-Zr 电极的耐烧损能力提升更大，这是因为经过烧结后铈在钨中溶解以钨铈固溶强化相的形式存在，W-La-Y-Zr 电极中钨含量更高，能为铈提供的钨基体也就更多，纯钨与铈固溶后形成钨铈合金，耐烧损能力提升更大。因此认为铈能够通过钨基体形成固溶体的形式，优化三元稀土钨电极的烧蚀性能，减少电极的烧损，且电极工作初期烧蚀更为严重的现象也得到改善。

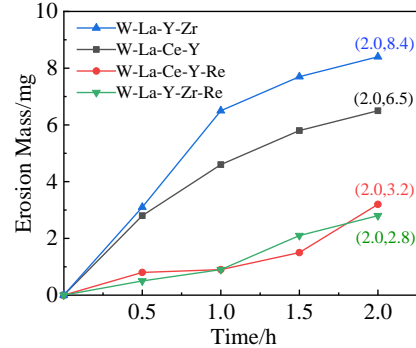


图 2 各成分电极烧损质量与燃弧时间关系曲线

Fig.2 Erosion mass-time curves of electrode with different composition

2.2 尖端表面形貌

在电弧和电阻热的共同作用下，燃弧过程中电极表面一方面会发生钨的熔化与蒸发，另一方面会发生重结晶，以枝晶的方式生长^[13]，在枝晶的末端会产生热量集中，加重电极的烧蚀。在较高的燃弧温度下，电极尖端会发生熔化变形甚至烧断，尖端的烧蚀以及电极形状的变化会对阴极的引弧与长时间使用造成不利影响，燃弧后尖端的变形程度是对电极耐烧蚀性能的一个关键考量。图 3 为体式显微镜下电极燃弧后的尖端宏观形貌，W-La-Ce-Y 电极燃弧 1 h 后尖端发生熔断，表面形成了粗糙的溅射状凸起，并在距尖端约 5 mm 的位置观察到表面为深色物质的区域，EDS 分析结果表明该物质为钇的氧化物，这是电极内部的氧化钇向尖端表面扩散迁移的结果；在燃弧 2 h 后电极尖端变形程度更大，并能明显观察到表面重熔后枝晶的生长，氧化物覆盖区域更为致密并逐渐向电极根部扩大。图 3b 中，W-La-Ce-Y-Re 电极在燃弧 2 h 后形貌保持良好，仅在尖端处观察到细小的重熔区，并未明显观察到氧化物的富集；W-La-Y-Zr 电极也表现出相同规律，燃弧后尖端形貌产生较大变化，表面出现大量的熔融物堆积（图 3c），加铈电极尖端表面整体仍保持光滑平整，烧蚀区更小（图 3d）。因此认为铈对燃弧后的尖端烧蚀形貌有明显改善。

选择耐烧损性能更好的 W-La-Ce-Y 系电极进行观察，图 4 为电极的尖端形貌示意图。该图示意性地表示了电极尖端晶粒组织特征与稀土氧化物的分布情况，并根据形貌差异将尖端表面分为 I、II、III 3 个区域，并在

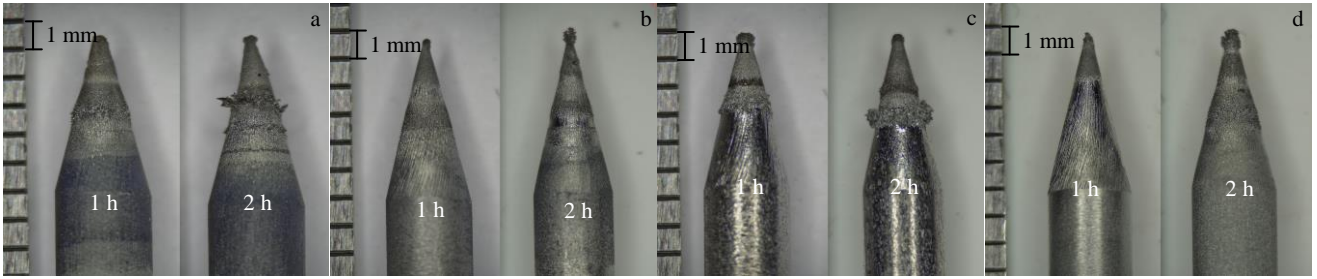


图 3 燃弧后不同电极尖端宏观形貌

Fig.3 Macroscopic morphologies of different electrode tips after burning arc: (a) W-La-Ce-Y, (b) W-La-Ce-Y-Re, (c) W-La-Y-Zr, and (d) W-La-Y-Zr-Re

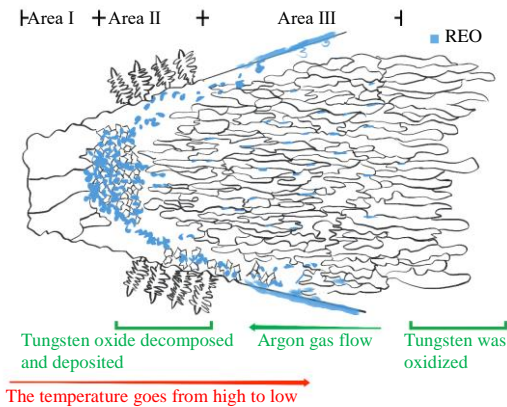


图 4 W-La-Ce-Y 电极燃弧后的尖端示意图

Fig.4 Schematic diagram of W-La-Ce-Y electrode tips after burning arc

扫描电镜下对不同区域表面进行观察对比。

图 5 为 W-La-Ce-Y 电极燃弧 1 h 后纵截面金相组织，燃弧后电极尖端晶粒明显长大，稀土氧化物聚集在长大晶粒的晶界处，并且尖端两侧晶粒在高温作用下也发生了再结晶，晶粒呈尺寸较小的等轴状，稀土氧化物在晶界处聚集。而远离电极表面的晶粒仍沿加工方向伸长，与成品电极相比晶粒的长径比明显减小，稀土氧化

物均匀分布在晶界处。

图 6 为 W-La-Ce-Y 系电极尖端各区微观形貌，其中 I 区温度最高，电极表面发生了重熔，晶粒的形核与长大受到尖端高温的限制，无法观察到长大的枝晶，同时该区还受到电弧中正离子的轰击，在表面形成形状不规则的轰击坑，呈凹凸不平的类火山口形貌，见图 6a、6b；II 区温度较 I 区低，更有利于枝晶生长，在 II 区前端可观察到大量细小的钨晶粒，随着温度的降低加速了枝晶的生长，在 II 区后端观察到到密集的晶柱，见图 6c、6d。此外在枝晶长大的同时还伴随着钨的沉积，电极内部的杂质氧与工况中氧气的侵蚀使电极表面的钨在低温区发生氧化，钨的氧化物随氩气向高温区流动，在高温区又分解成纯钨沉积在长大的枝晶表面，形成过程见示意图 4，因此 II 区表面形貌是基体再结晶长大、钨的氧化物分解、沉积共同作用的结果；III 区温度进一步减低，基体表面并未出现大规模熔化，整体较为平整，可观察到大小形状不一的再结晶晶粒，见图 6e、6f。对比 2 种电极，W-La-Ce-Y-Re 电极 I 区表面明显更为平整光滑，熔融物堆积程度更弱；W-La-Ce-Y-Re 电极 II 区表面枝晶长大不明显，仅能观察到独立存在的细小晶粒，并未出现粗大的晶柱，氧化钨在该区域的沉积现象也明显减弱；在

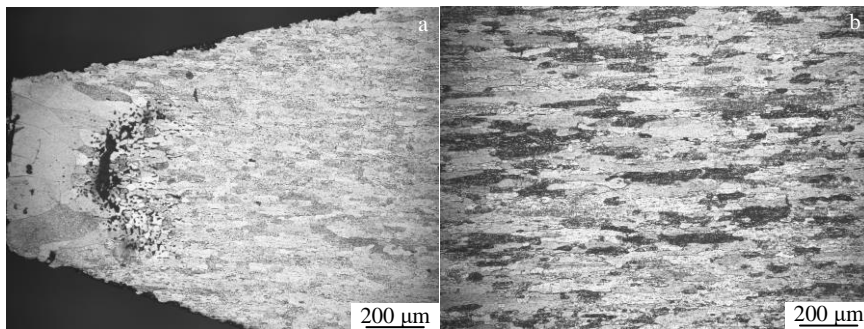


图 5 W-La-Ce-Y 电极燃弧 1 h 后尖端纵截面金相组织

Fig.5 Metallographic microstructures of W-La-Ce-Y electrode tips lengthwise section after burning arc for 1 h: (a) front of electrode tips and (b) middle of electrode tips

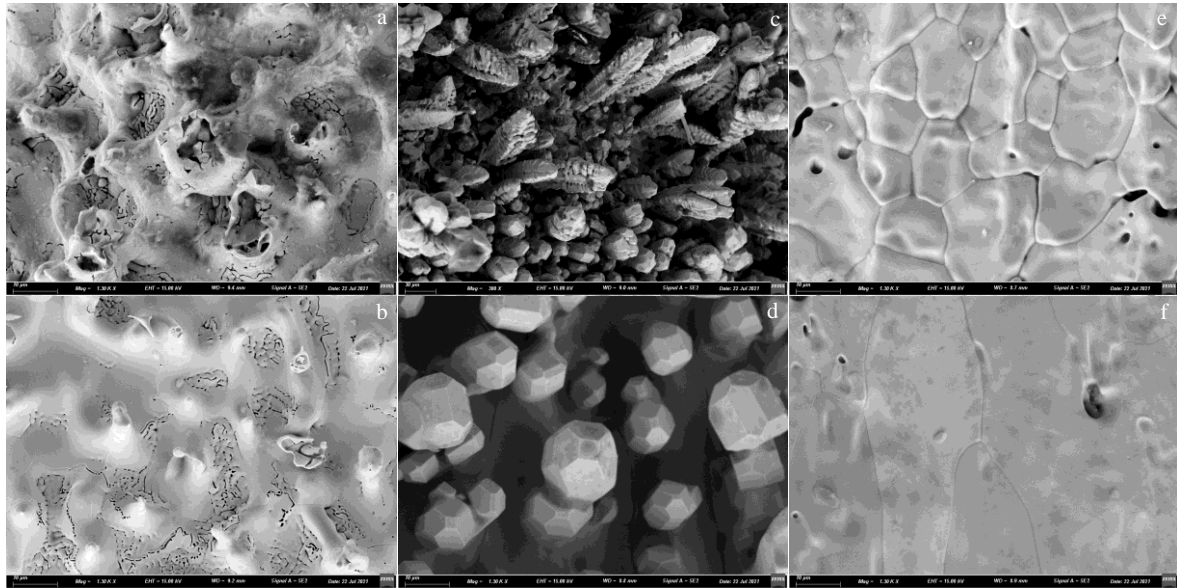


图 6 W-La-Ce-Y 与 W-La-Ce-Y-Re 电极燃弧后尖端不同区域的微观形貌

Fig.6 Morphologies of different regions of W-La-Ce-Y (a, c, e) and W-La-Ce-Y-Re (b, d, f) electrode tips after burning arc: (a, b) area I, (c, d) area II, and (e, f) area III marked in Fig.4

III 区, W-La-Ce-Y 电极表面的再结晶晶粒近似等轴晶, W-La-Ce-Y-Re 电极再结晶晶粒长径比更大, 晶粒沿电极尖端存在一定取向, 更利于活性物质向尖端迁移, 晶粒再结晶程度更弱。因此, 认为铈的加入对电极尖端形貌的保持有明显的促进作用, 能够缓解电极尖端表面的烧蚀, 抑制枝晶的生长以及钨的氧化, 提高基体的再结晶温度, 弱化晶粒再结晶程度, 利于活性物质向尖端迁移。

2.3 稀土氧化物的迁移

稀土氧化物逸出功低, 在尖端的均匀分布以及由基体向尖端的补充能有效提高电极的电子发射性能, 降低电极的烧蚀。在表面温度更高的 I、II 区表面并未明显观察到有稀土氧化物的存在, 说明稀土氧化物在尖端表面发生了较为剧烈的熔化与蒸发。随着温度降低, 在 III 区表面明显观察到晶界处有第二相析出, 在 W-La-Ce-Y 电极中, 该相沿基体晶界析出后相互联结呈网状分布, 见图 7a, 并且随着电极表面温度降低, 析出相甚至完全覆盖了钨基体, 仅在空隙中观察到钨基体, 见图 7b 与图 7c。这是稀土氧化物向表面扩散迁移的结果。随着燃弧时间延长, 观察到该氧化物富集区的覆盖面积明显增加, 且覆盖层更为致密, 这是因为电极长时间工作造成尖端基体烧蚀与活性物质蒸发, 使电极的工作温度升高, 从而加快了第二相的扩散迁移速率, 更多的活性物质扩散到表面并在温度较低的 III 区富集。

在 W-La-Ce-Y-Re 电极中, 仅在燃弧 2 h 后的电极表面观察到氧化物的析出, 与 W-La-Ce-Y 相比, W-La-Ce-Y-Re 电极表面析出的第二相更少, 在扫描电镜

下观察到稀土氧化物呈颗粒状分布在晶界处, 见图 7d, 并未形成网状或片状结构覆盖在基体上, 这是因为铈的加入缓解了电极尖端的烧损, 降低了电极的工作温度, 氧化物的扩散速率也有所下降。

图 8a 为 W-La-Ce-Y 电极燃弧 1 h 后尖端纵截面的背散射电子像, 燃弧后基体内的稀土第二相大量聚集在再结晶晶粒前沿, 沿晶界向尖端扩散的通道显著减少。随着温度升高, 尖端两侧晶粒也发生了再结晶, 第二相开始由 A 点析出至表面, 形成图 7a 所示的氧化物富集区, 此时 A 点表面的活性第二相由表面扩散的形式向尖端补充。在电极引弧过程中, 电弧依附在阴极斑点上产生, 阴极斑点一般出现在材料逸出功低且能量集中的区域, 尖端位置的稀土元素蒸发后不能得到及时补充, 导致逸出功增加, 工作温度升高并向根部传递, 当逸出功更低的表面达到电子发射所需温度时, 阴极斑点将由尖端向根部移动, 阴极斑点的移动将影响到电弧的稳定性, 会出现“偏弧”现象, 同时阻碍稀土第二相由表面向尖端迁移, 进一步扩大烧蚀区域。需要特别指出的是, 在电推进系统中, 为保证在工作电流低、点火频次高的工况下顺利引弧, 阴阳两极间距一般在 10^{-1} mm 量级; 为提高推进效率, 阳极喉道直径小于 10^{-1} mm。阴极斑点向根部移动以及喉道处烧蚀将严重缩短电弧加热发动机的使用寿命。图 8b 为 W-La-Ce-Y-Re 电极燃弧 1 h 后的背散射电子像, 基体内的稀土第二相仍可通过晶界均匀向尖端补充, 再结晶晶粒对第二相的阻碍作用较弱。

图 9 为 W-La-Y-Zr 与 W-La-Y-Zr-Re 电极燃弧 1 h

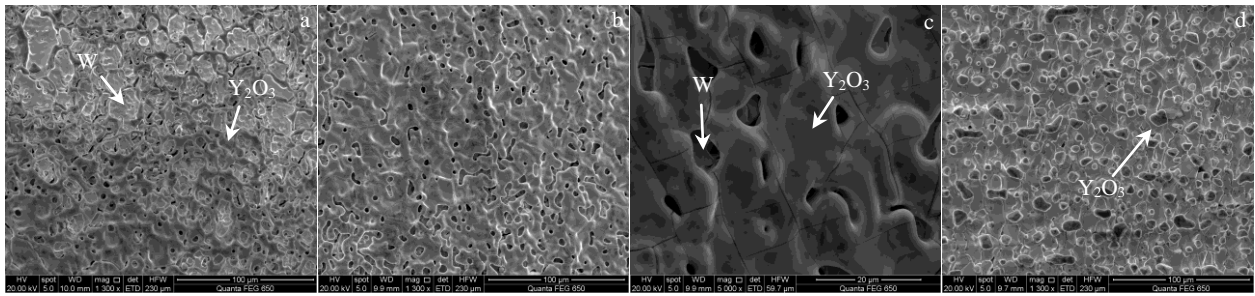


图 7 W-La-Ce-Y 与 W-La-Ce-Y-Re 电极燃弧后尖端区域 III 表面形貌

Fig.7 Microcosmic morphologies of area III in W-La-Ce-Y (a-c) and W-La-Ce-Y-Re (d) electrode tips after burning arc

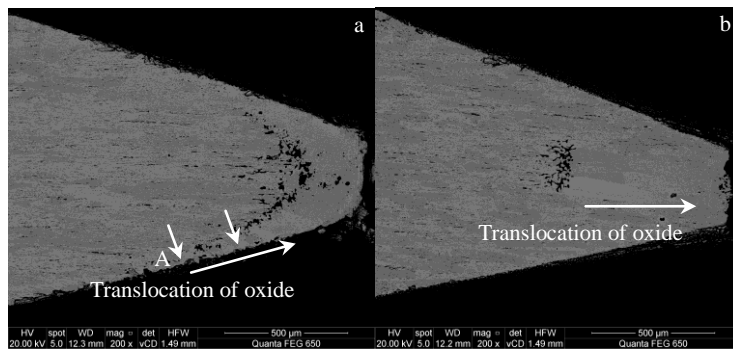


图 8 燃弧后电极纵截面的背散射电子像

Fig.8 BSE images of electrode tips lengthwise section after burning arc for 1 h: (a) W-La-Ce-Y and (b) W-La-Ce-Y-Re

后的尖端金相组织，电极均发生了一定程度的再结晶，且再结晶晶粒均沿电极加工方向伸长，而 W-La-Y-Zr-Re 电极中的晶粒明显更为细小，更利于稀土氧化物沿晶界向尖端迁移。因此，在 W-La-Y-Zr 电极中，铼同样能有效抑制晶粒长大，细化材料的再结晶晶粒。

2.4 电极静特性曲线

在电极燃弧过程中，当弧长一定，电弧稳定燃烧时，阴阳两极间总电压与工作电流的关系曲线称为电弧的伏安特性或静特性曲线。起弧后，电弧由阴极区、阳极区与弧柱区组成，各区域与之对应的电压降为阴极压降 U_k 、阳极压降 U_a 与弧柱压降 U_c ，3 个区域压降之和

为电弧电压 U ，即 $U=U_k+U_a+U_c$ 。其中，弧柱压降 U_c 与电流和弧长有关，阳极压降 U_a 与阳极材料特性有关，因此在相同的实验条件下，弧柱压降与阳极压降是固定不变的，则电弧电压 U 只随阴极压降 U_k 变化。在热电子发射过程中，阴极压降 U_k 的产生是由于在阴极区发生了阳离子的聚集，电弧电流中电子流占比越大，阳离子流占比就越小，阳离子聚集所产生的阴极压降 U_k 就越小^[9,10]。因此，阴极材料的电子发射能力越强，阴极压降 U_k 就越小，在相同的实验条件下，电弧电压 U 就越小，于是可以通过测量电弧电压来表征阴极材料的电子发射能力。图 10 为 4 种电极的 $U-I$ 特性曲线，在不同的

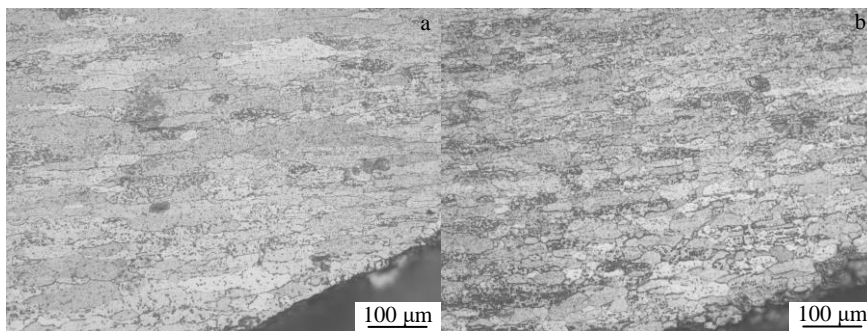


图 9 W-La-Y-Zr 与 W-La-Y-Zr-Re 电极燃弧 1 h 后的尖端金相组织

Fig.9 Metallographic microstructures of W-La-Y-Zr (a) and W-La-Y-Zr-Re (b) electrode tips after burning arc for 1 h

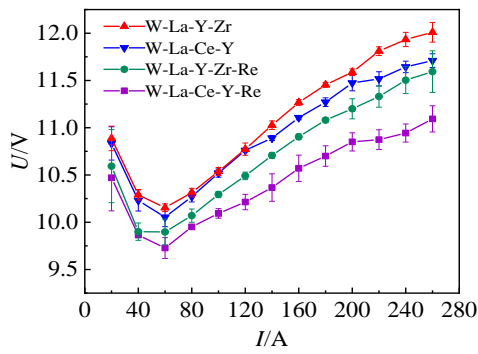


图 10 不同电极电弧的伏安特性曲线

Fig.10 Volt-ampere characteristic curves of burning arc for different electrodes

工作电流下, W-La-Ce-Y-Re 与 W-La-Y-Zr-Re 电极的电弧电压明显低于未添加铈的电极, 说明金属铈能够有效提高电极的电子发射能力, 降低材料的逸出功, 这都有利于提高阴极工作过程中的抗烧蚀能力, 延长阴极寿命。此外, 添加 CeO₂, La₂O₃, Y₂O 比例为 1:1:3 的电极电弧电压更低, 尤其是在较大的工作电流下, 其电子发射能力更强, 更适合大电流工况。

3 结 论

1) 在 250 A 工作电流下燃弧 2 h, W-La-Ce-Y-Re 与 W-La-Y-Zr-Re 电极的烧损质量均小于不加铈的电极, 加铈耐烧损性能更好, 质量损失与燃弧时间整体呈线性关系。此外, 铈对钨含量更高的 W-La-Y-Zr 电极耐烧损性能提升更大。

2) 铈的加入能明显改善电极燃弧后尖端的烧蚀形貌, 宏观上, 加铈电极 W-La-Ce-Y-Re 与 W-La-Y-Zr-Re 燃弧后尖端形貌保持良好, 并未出现明显变形; 微观上, 铈能够抑制表面枝晶的生长, 提高基体的再结晶温度, 弱化晶粒的再结晶程度。

3) 受基体再结晶晶粒的影响, 稀土第二相沿晶界向尖端扩散受到抑制, 在距尖端约 5 mm 处析出至表面并形成富集区, 该区域的稀土元素通过表面扩散的形式向尖端补充, 这种扩散方式对电推进系统的使用寿命将产生不利影响。

4) 铈的加入能提高电极材料的电子发射性能, 在 20 A 的工作电流下, 加铈电极的阴极压降更低, 电子发射能力更强; 此外, W-La-Ce-Y-Re 电极在大电流工况下优势更为明显, 更适用于大电流工况。

参考文献 References

[1] Martinez-Sanchez M, Pollard J E. *Journal of Propulsion and Power*[J], 1998, 14(5): 688

[2] Zhang Yu. *Journal of Rocket Propulsion*[J], 2005, 31(2): 27

[3] Goebel D M, Katz I. *Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters*[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2008

[4] Kang Xiaolu(康小录), Zhang Yan(张岩). *Aerospace Shanghai*(上海航天)[J], 2019, 36(6): 26

[5] Daniłko Dariusz. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*[J], 2014, 9290: 1

[6] Mao Genwang(毛根旺), Han Xianwei(韩先伟), Yang Juan(杨涓) et al. *Journal of Propulsion Technology*(推进技术)[J], 2000, 21(5): 1

[7] Ma Zhanhua(马占华), Wang Nanhao(汪南豪). *Aerospace Shanghai*(上海航天)[J], 2000(5): 47

[8] Schrade H O, Auweter-Kurtz M, Kurtz H L. *AIAA Journal*[J], 1987, 25(8): 1105

[9] Li Z F, Tang H B, Wang Y B et al. *Journal of Physics D: Applied Physics*[J], 2018, 51(8): 85 201

[10] Uematsu K, Morimoto S, Kuriki K. *Journal of Space-Craft and Rockets*[J], 2012, 22(4): 412

[11] Wang Luyan(王芦燕), Yu Yueguang(于月光), Peng Ying(彭鹰) et al. *Nonferrous Metals Engineering*(有色金属工程)[J], 2019, 9(10): 21

[12] Guo Yanqun(郭艳群), Nie Zuoren(聂祚仁), Xi Xiaoli(席晓丽) et al. *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2005, 29(2): 6

[13] Nie Zuoren(聂祚仁), Zhou Meiling(周美玲). *Materials Reports*(材料导报)[J], 1997, 11(5): 19

[14] Zhou Meiling(周美玲), Nie Zuoren(聂祚仁), Chen Ying(陈颖) et al. *China Tungsten Industry*(中国钨业)[J], 2000(1): 30

[15] Yang Jiancan(杨建参), Nie Zuoren(聂祚仁), Zhou Meiling(周美玲) et al. *China Tungsten Industry*(中国钨业)[J], 2007, 22(1): 39

[16] Nie Zuoren(聂祚仁), Zhou Meiling(周美玲), Zhang Jiuxing(张久兴) et al. *Journal of Beijing Polytechnic University*(北京工业大学学报)[J], 1998(2): 28

[17] Zhu Wenguang(朱文光), Yang Jiancan(杨建参), Xi Yuchen(西宇辰) et al. *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2014, 38(5): 793

[18] Li Peng(李鹏), Yang Jiancan(杨建参), Li Yan(李岩). *China Tungsten Industry*(中国钨业)[J], 2017, 32(3): 6

[19] Li Ping(李萍), Hua Rui(华睿), Xue Kemin(薛克敏) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(2): 529

[20] Liu Shiyong(刘世友). *Rare Metals and Cemented Carbides*(稀有金属与硬质合金)[J], 2000(1): 57

[21] Lai Chen(赖陈), Wang Jinshu(王金淑), Zhou Fan(周帆) et al.

- Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(7): 1871
- [22] Ge Chunqiao(葛春桥), Wang Xianyou(王贤友), Wang Jinshu(王金淑) *et al. Vacuum Electronics*(真空电子技术)[J], 2020(4): 34
- [23] Ren C, Fang Z Z, Koopman M *et al. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2018, 75: 170
- [24] Butler B G, Paramore J D, Ligda J P *et al. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2018, 75: 248
- [25] Wang Feng(王峰), Zheng Xin(郑欣), Li Laiping(李来平) *et al. China Tungsten Industry*(中国钨业)[J], 2014(2): 37
- [26] Ge Chunqiao(葛春桥), Wang Jinshu(王金淑), Zhu Huichong(朱惠冲) *et al. Powder Metallurgy Technology*(粉末冶金技术)[J], 2016, 34(4): 4
- [27] Shen Youyuan(申友元), Yi Xiaoming(易晓明), Liao Binbin(廖彬彬) *et al. Chinese Patent*(中国专利), CN1396027[P], 2002

Research on Erosion Resistance of Rare Earth Tungsten Electrode in Electric Propulsion

Wei Yinhe, Yang Jiancan, Chen Ran, Guo Yinchun
(Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: As the “heart” of the arcjet, cathode is responsible for heating the gaseous propellant to produce propulsion. Due to the long service cycle and frequent ignition times of satellite, high requirements are put forward for the service life and erosion resistance of cathode materials. In order to seek cathode materials with excellent erosion resistance, based on W-La-Ce-Y and W-La-Y-Zr electrodes, W-La-Ce-Y-Re and W-La-Y-Zr-Re electrode materials were prepared by hydrogen reduction-median frequency sintering. By simulating the actual working condition of the arcjet, the arcing test was carried out at 250 A current, the erosion resistance of each electrode material was studied, and the morphology of the electrode tip after arcing was observed. The results show that the rhenium electrode has less burning loss quality, better tip morphology stability, and better burning loss resistance after 2 h of arc burning. Under SEM, it is observed that the rhenium inhibits the growth of dendrites and weakens the recrystallization degree of tungsten matrix grains. And the migration pathway of rare earth oxides was also discussed. Under the metallographic microscope, it is observed that the recrystallized grains at the tip of the rhenium electrode are finer, and rhenium plays a role in refining the recrystallized grains. The cathode voltage drop of rhenium electrode is lower at different currents. The addition of rhenium improves the electron emission performance of electrode materials.

Key words: rare earth tungsten electrodes; rhenium; erosion resistance; electric propulsion

Corresponding author: Wei Yinhe, Candidate for Master, Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China, E-mail: weiyinhe326@163.com