

高功率脉冲氙灯钨钨电极工作过程中 表面稀土元素分布和价态演变

郭向朝^{1,2}, 刘作娇¹, 李海兵¹, 刘建军¹, 胡丽丽^{1,3}

(1. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

(2. 中国科学院大学, 北京 100049)

(3. 国科大杭州高等研究院, 浙江 杭州 310024)

摘要: 为阐明高功率脉冲氙灯钨钨电极运行过程中的演变过程及工作机理, 采用金相显微镜、扫描电镜 (SEM)、X 射线光电子能谱 (XPS) 等手段研究了运行不同发次的高功率脉冲氙灯阴极表面形貌、钨元素的价态演变及其浓度-深度分布状况。结果表明: 钨钨电极工作表面出现大量的龟裂纹, 其裂纹程度和深度、烧蚀状况均与运行发次有关, 工作次数越多裂纹和烧蚀情况越严重; 随着运行发次增加, 阴极表面钨元素含量向表面扩散, 含量升高, 最高达 12%, 分布更加均匀; 通过对 Ce^{3+}/Ce^{4+} 比例分析发现: 运行 10 083 发次的钨钨阴极表面活性处于较佳状态; 运行 14 486 发次的钨钨阴极表面活性层厚度明显减小, 仅有 6.66 nm, 氙灯性能处于下降状态。

关键词: 脉冲氙灯; 钨钨电极; 表面成分; 价态演变

中图分类号: TN604

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)05-1879-08

高功率脉冲氙灯具有寿命长、亮度高、效率高等优点, 被广泛应用于惯性约束激光聚变装置 (ICF) 中^[1-4]。美国 NIF 装置拥有 7680 支脉冲氙灯, Rochester 大学的 OMEGA 装置拥有 7000 支氙灯, 法国 LMJ 装置拥有 10 800 支氙灯。这些装置中数量庞大的高功率脉冲氙灯, 其可靠性和性能直接关系到装置能否正常运行^[5]。影响高功率脉冲氙灯可靠性和性能的主要因素有: 电极材料的发射性能、氙灯灯管的应力^[6]、灯头的绝缘性能、氙气的纯度^[7]等, 其中, 作为氙灯“心脏”的阴极, 其持续的发射能力对脉冲氙灯的着火性能、峰值功率等电学指标具有重要影响, 也是影响氙灯可靠性和寿命的关键指标^[8]。而稀土作为钨电极中的活性物质, 其在钨内部的扩散和分布直接影响了电极的性能, 成为多个领域的研究重点^[9-12]。高志坤^[13]等工作上万发次的高功率脉冲氙灯钨钨电极的工作表面进行了研究, 认为电极表面稀土元素含量较高, 电极内部存在贫稀土层, 其表面活性层厚度为 25 nm。曹贵川^[14]等对含钪钨钨电极的发射性能进行了研究, 结果显示电极中 BaO 与 Sc_2O_3 可结合成 $2BaO+0.5Sc_2O_3$, 该结合物能够作为氧化钪或钪原子的载体, 起到控制和补

充发射源的作用, 另外 Sc_2O_3 的加入还能够提高阴极的抗离子轰击能力, 减轻放电过程中阴极的损伤程度。Zhang^[15]等研究了 W-Ce 电极在 900~1200 °C 条件下表面活性层的理化性质、成分分布和化学态变化, 认为在经过 1100 °C 热处理后表面的钨元素含量最高, 活性层厚度 6 nm, 继续加热使电极表面氧化钨与 Ce^{4+} 含量减少。目前, 针对稀土钨电极的制备工艺、热电子发射机理研究较多, 但专门针对高功率脉冲氙灯钨钨阴极这种在极高功率 (峰值功率可超过 1×10^8 W) 工作条件下的表面状态及表面层的元素成分与价态分布规律的研究还鲜见报道。

本实验以放电电压为 22~24 kV 情况下运行不同发次的高功率脉冲氙灯的钨钨电极为研究对象, 通过比较、分析经过不同运行发次后高功率脉冲氙灯阴极表面形貌, 表面的钨、钪元素相对含量及钨元素的价态分布情况, 阐述高功率脉冲氙灯阴极表面损伤与运行发次的关系、钨元素的浓度-深度分布规律及其价态演变情况对高功率脉冲氙灯电极的发射机理和发射性能的影响。电极作为氙灯的核心部件决定了氙灯的寿命, 因此本研究对高功率脉冲氙灯的实际使用具有重要的指导意义。

收稿日期: 2021-11-15

基金项目: 国防科技基金 (GFZX0205010202.2-G)

作者简介: 郭向朝, 男, 1980 年生, 博士生, 高级工程师, 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800, 电话: 021-59962102, E-mail: gxc@siom.ac.cn

1 实验

实验材料及仪器包括：高功率脉冲氙灯若干支，金属清洗剂，无水乙醇；ZEISS Axio Imager A2m 金相显微镜，ZXQ-1 自动镶嵌机，PRESI MECATECH 234 自动磨抛机，JMQ-60Z 自动精密切割机，超声波清洗机，Auriga 场发射扫描电镜 (SEM)，K-Alpha™ X 射线光电子能谱仪 (XPS)。

试验所用电极原材料采购自厦门虹鹭钨钼工业有限公司的W-Ce (2% CeO₂) 棒材，后经加工、清洗、焊接、除气后制成电极，再制备成高功率脉冲氙灯供试验所用。

高功率脉冲氙灯的运行试验在特制的氙灯试验平台上进行。试验平台由装灯模块和放电电源组成。装灯模块如图1所示，用于固定高功率脉冲氙灯，同时配置了风冷装置以冷却氙灯。放电电源主要作用是产生高功率脉冲氙灯所需的电能和放电条件。

电源模块的电路原理如图2所示：试验频率为1发次/5 min，运行电压为22~24 kV，注入能量为40~50 kJ/灯。

3 个试验平台各运行了 6466、10 083、14 486。运行完成后，分别从 3 个装灯模块中各选取一支脉冲氙灯，分别编号为 1#、2#、3#，对应运行 6466、10 083 和 14486 发次。检测无异常后将氙灯进行切割、分离，



图 1 装灯模块

Fig.1 Running module box

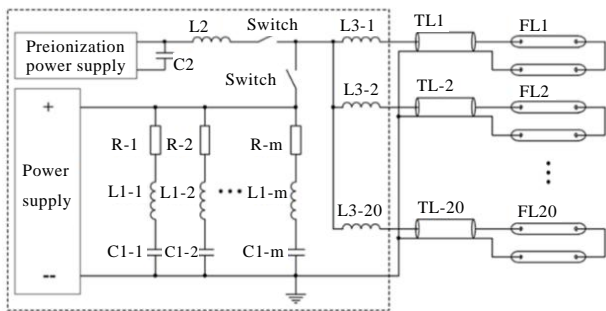


图 2 电源模块的电路原理图

Fig.2 Schematic of power module circuit

取出钨钨电极头，金属清洗剂进行清洗，无水乙醇脱水烘干，取样完成。

采用金相显微镜和SEM对比观察3支氙灯的阴极表面金相形貌及电极表面损伤情况；通过 XPS 表面及刻蚀分析对运行不同发次的阴极表面元素组成、元素价态和活性元素的浓度-深度分布情况进行分析。

在本研究中对工作不同发次的高功率脉冲氙灯电极表面进行 X 射线电子束刻蚀，分析每个刻蚀层的元素成分及稀土元素的价态情况。每次刻蚀时间 15 s，共刻蚀 4 次。刻蚀参数：2000 keV；束流：2.12 μA；X 射线光斑直径 400 μm；刻蚀面积 1 mm×1 mm。

刻蚀速率的计算可参照以下公式^[13]：

$$v = \frac{I\sqrt{V}}{a^2} \tag{1}$$

$$v_d = \frac{v_c I_d \sqrt{V_d}}{a_d^2} / \frac{I_c \sqrt{V_c}}{a_c^2} \tag{2}$$

式中，v 为刻蚀速率，I 为束流，V 为离子束能量，a 为刻蚀区域边长。其中下标 d 代表实际值，下标 c 代表标准值。

计算得到实际刻蚀速率为 v_d=0.1904 nm/s。计算得出不同刻蚀时间对应的刻蚀深度见表 1。

2 结果与讨论

2.1 表面形貌分析

2.1.1 钨钨电极表面金相形貌

图 3a、3b、3c、3d 分别是未运行、运行 6466、10083、14486 发次的高功率脉冲氙灯阴极表面的金相照片。可以看出，未运行的电极表面不存在裂纹，而运行不同发次的脉冲氙灯阴极表面均出现了不同程度的裂纹。阴极表面中心区域的裂纹程度较轻，外缘区域的裂纹严重，且外缘裂纹中心呈凸起状，是典型的热疲劳裂纹。从裂纹的形态看，其端部一般比较尖锐，裂纹中心宽度较宽，且源于表面，其扩展深度与产生热疲劳的程度有关。热疲劳裂纹的产生机制：一是钨钨电极材料中氧化铈以微米级大小^[15]的质点弥散分布于电极表面及基体内，尤其是钨的晶界处，由于“陷阱效应”及晶界平衡偏析作用，使掺杂材料出现聚集。由于氧化铈与钨的热膨胀系数不同，在受到高低温冲击时容易产生热应力，导致电极材料出现热疲劳。二是脉冲氙灯放电过程中，电极表面弧根区域的温度很高，钨元素聚集区域的熔点较低^[16]，出现元素的熔融甚至蒸发，当放电间隙灯内及电极表面温度下降，熔融的物质重新凝固后与周围材料之间产生应力，使电极表面出现微裂纹或凹坑。

表 1 不同刻蚀时间对应的刻蚀深度

Table 1 Etch depth corresponding to different etch time

Etch time/s	Etching depth/nm
0	0
15	2.856
30	5.712
45	8.568
60	11.424

由图 3b、3c、3d 对比可知，工作后的阴极表面均出现了不同程度的烧蚀现象，随着运行次数的增加，电极表面裂纹的密度也不断增加，说明受损伤程度增加。

图 4 和表 2 分别为运行不同发次电极纵向金相照片及表面裂纹的平均深度和宽度统计。6466 发次后，阴极表面平均裂纹深度 41 μm，裂纹宽度 15.25 μm；运行 10 083 发次后，其平均深度 99.5 μm，宽度 19.73 μm；运行 14486 发次的阴极表面裂纹数量和宽度最大，深度 208 μm，宽度 57.46 μm。裂纹形态和数量与氙灯运行发次呈正相关。

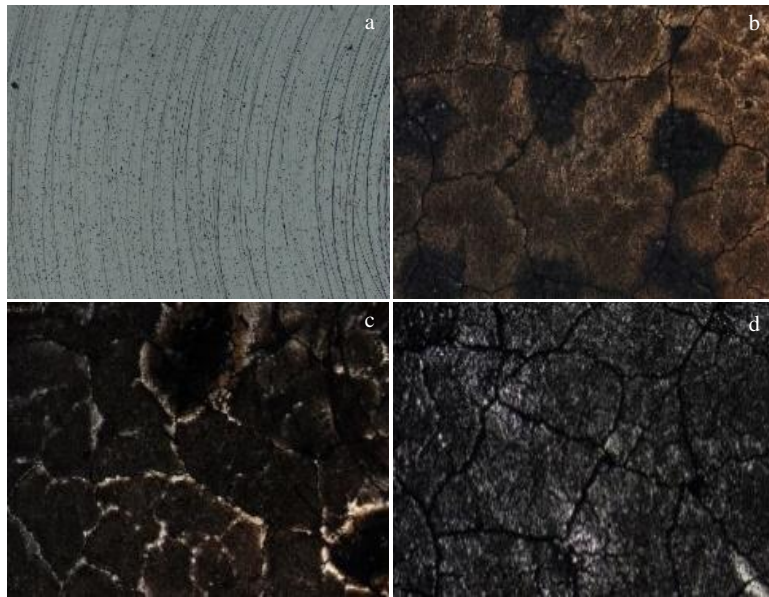


图 3 运行不同发次的钨钨电极金相形貌

Fig.3 OM morphologies of W-Ce electrode with different operation times: (a) 0-cathode, (b) 6466-cathode, (c) 10 083-cathode, and (d) 14 486-cathode

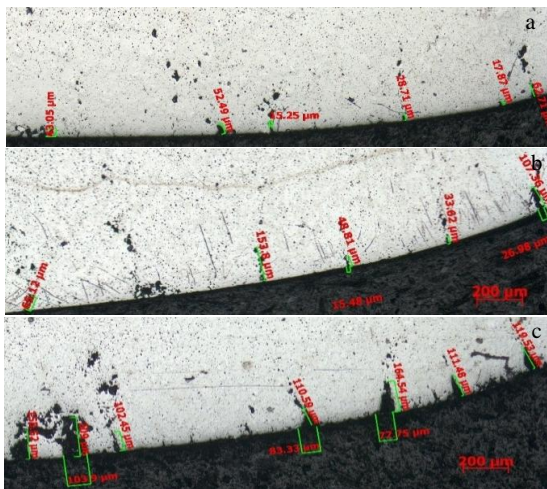


图 4 运行不同发次电极纵向剖切金相照片

Fig.4 OM images of longitudinal section for electrode with different operation times: (a) 6466, (b) 10 083, and (c) 14 486

表 2 运行不同发次下脉冲氙灯表面裂纹的平均深度和宽度

Table 2 Depth and width of surface cracks on cathode of high-power pulsed xenon lamp

Frequency/times	Crack depth/nm	Crack width/nm
6466	41	15.25
10 083	99.5	19.73
14 486	208	57.46

2.1.2 钨钨电极表面微观形貌

图 5 分别为运行 6466、10 083、14 486 发次的钨钨阴极表面 SEM 照片。图 5a、5c 和 5e 的放大倍率为 100 倍，可以看出电极运行后，表面出现了明显的裂纹，存在大量的裂纹中心，与金相显微镜观察结果一致，这是放电过程中正离子轰击造成的。钨钨阴极运行发次越多，表面裂纹的密度越大。将运行不同发次的阴极表面裂纹中心区域放大到 500 倍，得

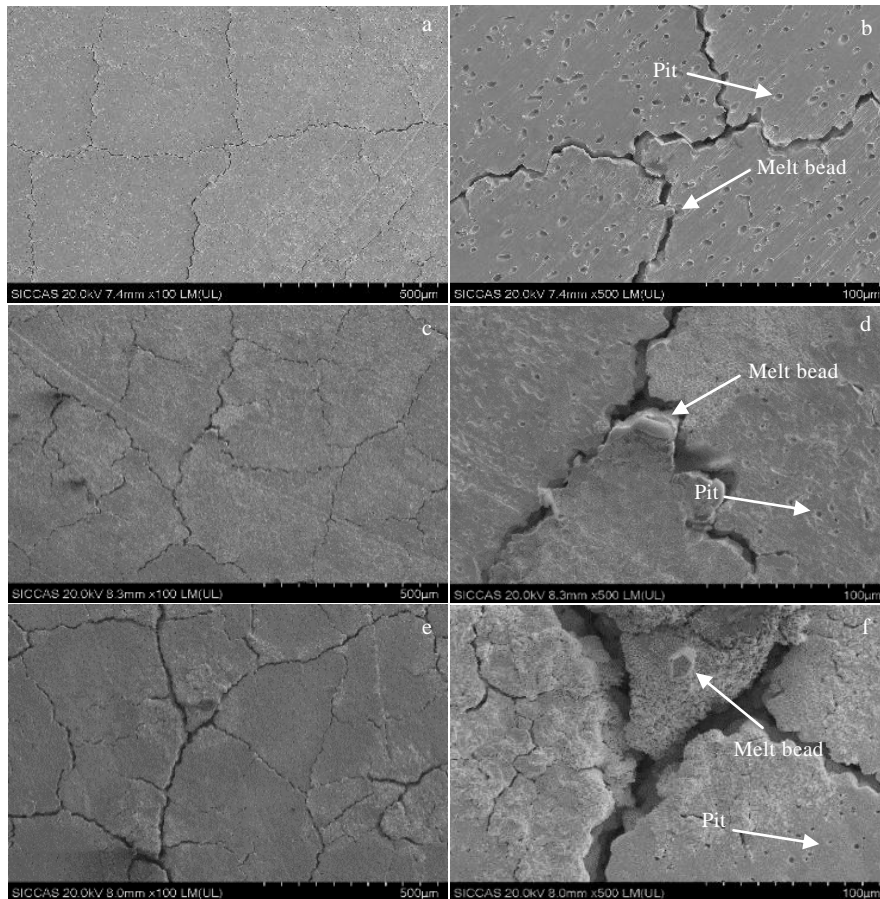


图 5 分别运行 6466、10 083、14 486 发次的阴极 SEM 照片

Fig.5 SEM images of the cathode after running for 6466 (a, b), 10 083 (c, d) and 14 486 (e, f) times

到图 5b、5d、5f，可以看出，阴极表面裂纹中心均出现了不同程度的熔蚀现象，即裂纹中心有“熔珠”出现。此外，从图 5b、5d、5f 中可见电极表面分布着众多的凹坑，其尺寸在 1~5 μm 之间。随着运行发次的增加，电极受到的损伤越发严重，表面的凹坑被溶蚀更严重的熔珠和裂纹掩盖，数量反而出现了减少现象。

2.2 氙灯阴极铈元素含量分析

图 6 为运行不同发次后阴极表面及刻蚀层铈元素的 XPS 图谱。根据图 6 对运行不同发次的高功率脉冲氙灯阴极表面及刻蚀层的铈、钨元素相对含量进行计算，结果如表 3。为排除电极从脉冲氙灯内切割、清洗、制样及测试过程中电极表面发生氧化的影响，只计算电极表面及刻蚀层中铈、钨 2 种元素的相对含量。

图 7 为高功率脉冲氙灯阴极的铈元素浓度-深度分布曲线。铈钨电极在制灯前经过真空高温处理，对电极进行除气和激活，然后用于制备高功率脉冲氙灯。因此，高功率脉冲氙灯在运行前其电极表面及近表面

的铈元素含量及价态均取决于真空高温处理后的效果。真空高温处理后电极表面及近表面的铈元素含量曲线(图 7)可参考。由图 7 可知，经过真空高温处理即高功率脉冲氙灯工作前电极表面的铈元素含量为 5.14%，刻蚀 20 s 后铈元素含量已经低于 2.5%，基本接近原材料的铈元素掺杂量。基于前期研究的结论^[17]，真空高温处理后的铈钨电极表面铈元素的富集厚度为 3.33 nm，对应的刻蚀时间为 17.5 s，结果比较符合。

以高功率脉冲氙灯未运行前的阴极，即真空高温处理过的电极表面及近表面铈元素含量为标准，比较工作不同发次阴极的铈元素分布情况。运行 6466 发次的阴极表面铈元素含量 8.64%，随着刻蚀深入，铈元素含量明显降低，当刻蚀 60 s 后，铈元素含量仅为 4.35%，这是基体内低熔点的铈元素向表面迁移的结果。同时由于运行发次较少，铈元素的扩散量不足，所以随着刻蚀进行，铈元素含量逐渐减少。运行 10083 发次的阴极表面铈元素含量最低，仅为 7.55%，但随着刻蚀的进行，其铈元素含量较稳定，基本保持在

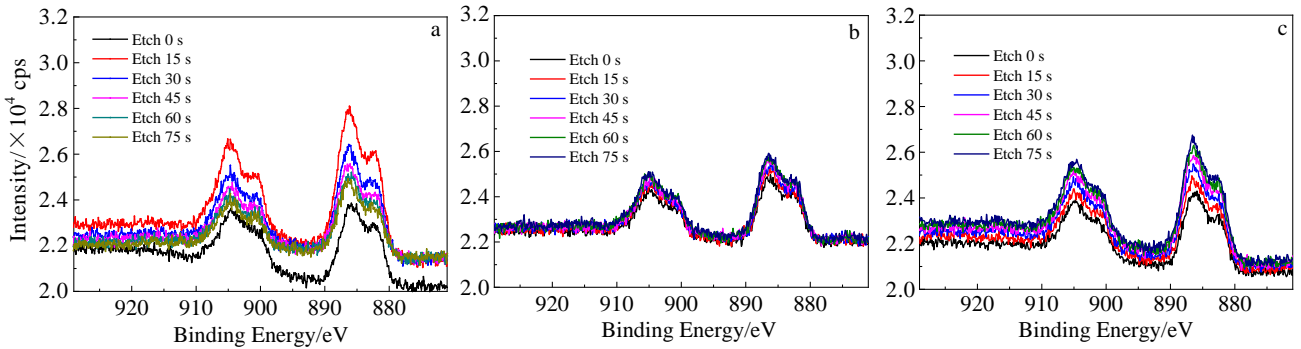


图 6 运行 6466、10 083、14 486 发次的高功率脉冲氙灯阴极刻蚀层的铈元素谱图

Fig.6 Cerium spectrogram of cathode etched layer of high power pulsed xenon lamp operated for 6466 (a), 10 083 (b), 14 486 (c) times

表 3 电极刻蚀不同时间铈、钨元素的相对含量

Table 3 Relative percentage content of cerium and tungsten after different etch time

Etch time/s	Element	6466 times	10 083 times	14 486 times
0	Ce	8.64	7.55	11.03
	W	91.36	92.45	88.97
15	Ce	8.26	7.73	11.39
	W	91.74	92.27	88.61
30	Ce	6	7.36	11.59
	W	94	92.64	88.41
45	Ce	4.84	7.65	11.78
	W	95.16	92.35	88.22
60	Ce	4.35	7.78	12
	W	95.65	92.22	88

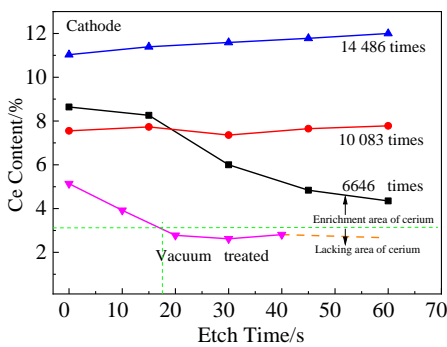


图 7 电极中铈元素的含量

Fig.7 Contents of cerium in electrodes

7%~8%之间，且处于缓慢上升的趋势。运行 14 486 发次的阴极表面铈元素含量 11.03%，处于 3 个不同发次的阴极中表面铈元素含量的最高水平，铈元素含量随刻蚀深度略有上升，当刻蚀 60 s 后，刻蚀层铈元素含量达到 12%。综合不同发次的刻蚀分析，随着脉冲氙灯运行发次的增加，电极内部的稀土元素铈有向表面扩散的趋势，这与稀土钨电极的热处理过程比较类似，因为

脉冲氙灯放电等离子体的温度接近 10 000 K，由于运行过程间隔长、电压高、能量大，高功率脉冲放电类似一个场发射和热发射综合作用的反复加热过程。

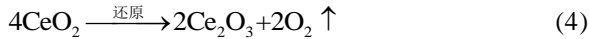
钨钨电极在制备过程中存在一定数量的空位、位错和晶界等晶体缺陷。晶体缺陷是导致材料扩散和材料结构敏感性的物理根源。钨电极内部大量的、且无规则分布的空位、位错及晶界等缺陷共同组成了可供铈元素向表面迁移的高扩散率通道网络。氙灯放电过程中，灯内会形成高温等离子体，高速粒子的不断碰撞使电极温度升高，运行发次越多，这种热效应不断累积，使晶格中钨原子的热振动加剧，使钨原子能够突破周围原子的势垒而脱离原来的位置，形成新的空位，即空位浓度随着反复的热冲击而不断增加。随着运行过程的进行，铈元素沿着这些缺陷向电极表面的扩散不断加剧^[12]，使其在表面及近表面的含量不断增加，有助于钨电极发射性能的提升。在高电势和热冲击的共同作用下，随着氙灯运行发次的增加，铈的含量分布有一个不断提升和均化现象，同时铈元素在表层区域存在富集，这与热电子发射阴极是不同的^[18]。

2.3 脉冲氙灯运行过程中铈元素的价态演变

目前对于稀土钨电极的研究中，对表面活性层的定义多以稀土元素的含量^[15]为依据，但钨钨阴极不同于其它稀土元素掺杂的阴极，因为铈元素在电极中同时存在 Ce^{3+} 、 Ce^{4+} 2 种价态，阴极发射性能不仅与铈元素的含量有关，在很大程度上与铈元素的价态变化有关，即 Ce^{3+} 的相对含量高更加有利于电极发射。

Ce 元素的外层电子结构为 $4f^1 5d^1 6s^2$ ，因此 Ce 更加倾向于失去外层的 4 个电子而形成 $4f^0$ 的稳定结构^[19]。 Ce^{3+} 的外层电子结构为 $4f^1$ ，并非 $4f^0$ 的稳定结构，发射性能更好。 Ce^{4+} 具有较强的氧化性，在还原气氛或还原剂作用下能够转变成 Ce^{3+} ，因此在真空中经历高温还原作用下，电极内大量的 Ce^{4+} 转化成 Ce^{3+} ，使 Ce^{3+} 含量明显增多。 Ce^{3+} 的电子结构受到外界因素，如高

温、氧化剂等作用后 Ce^{3+} 易转变成 Ce^{4+} 而稳定地存在于基体中，见式 (3)。



在制灯前电极前处理中， CeO_2 中的 Ce^{4+} 作为氧化剂，得到电子，被还原成 Ce^{3+} 。通过这一氧化还原反应生成大量的 Ce^{3+} ，同时使电极材料中的氧空位增多，增强了稀土氧化物的离子性能；另外， Ce^{3+} 的金属性强于 Ce^{4+} ，因此 Ce^{3+} 所形成的化合物 Ce_2O_3 的离子性能也强于 CeO_2 ，即 Ce_2O_3 得失电子的能力更强。 Ce_2O_3 的功函数为 2.3 eV，远低于金属 W (4.9 eV) [16]，所以 Ce^{3+} 的含量增加是有利于电极发射的。高功率脉冲氙灯在运行过程中， Ce^{3+} 的相对含量增加和表面富集

现象，有利于提高铈钨阴极的发射性能。

因此，以 Ce^{3+} 的相对含量为标准，通过对比铈钨阴极表面及刻蚀层的 Ce^{3+} 相对含量，可以比较准确地评价运行不同发次后阴极的发射性能及寿命，才能更好地评价氙灯的工作状态。

分别对运行 6466、10 083 和 14 486 发次的高功率脉冲氙灯阴极表面及刻蚀层的铈元素谱图进行分峰拟合(文中仅展示 14 486 发次的阴极铈元素的分峰拟合结果)。图 8 为 14 486 发次的高功率脉冲氙灯阴极铈元素的分峰拟合结果，其中 886 和 904.5 eV 为 Ce^{3+} 的 3d 峰，882.5、900.9、898、916 eV 为 Ce^{4+} 的 3d 特征峰 [110-21]，其它峰为 Ce^{4+} 的卫星峰。根据分峰拟合结果，计算运行 6466、10 083 和 14 486 发次的高功率脉冲氙灯阴极表面及刻蚀层的 Ce^{3+} 相对含量，结果见表 4。

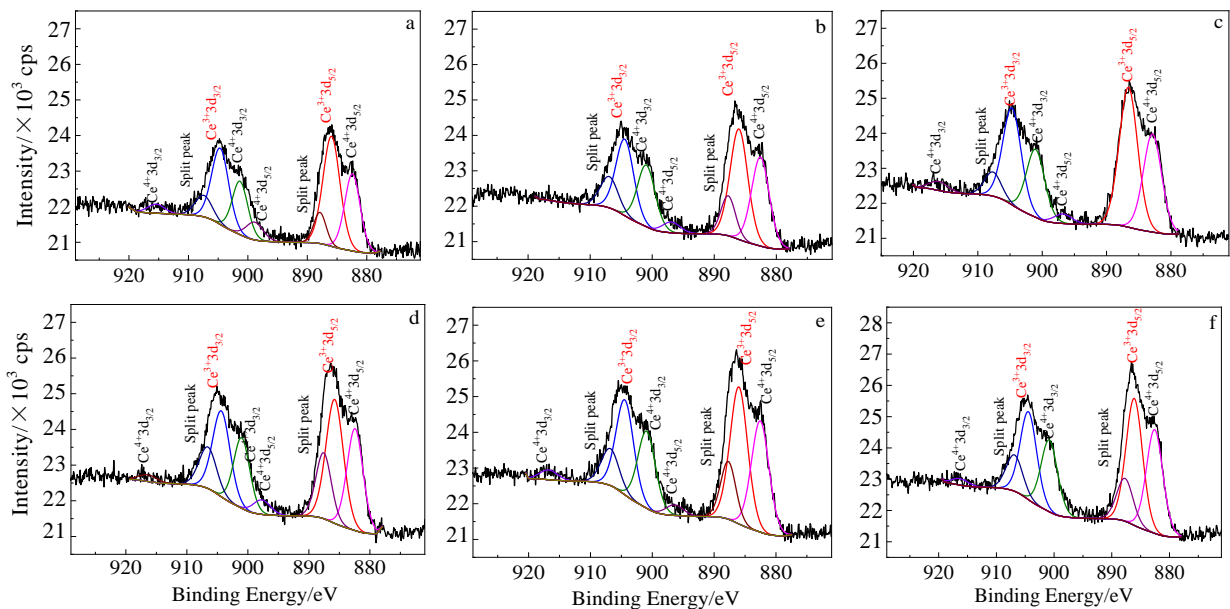


图 8 运行 14 486 发次的高功率脉冲氙灯阴极铈元素的分峰结果

Fig.8 Peak separation results of cerium in cathode of high power pulsed xenon lamp operated for 14 486 times: (a) 0 s, (b) 15 s, (c) 30 s, (d) 45 s, (e) 60 s, and (f) 75 s

表 4 刻蚀不同时间 Ce^{3+} 和 Ce^{4+} 的相对含量

Table 4 Relative contents of Ce^{3+} after different etch time

Etch time/s	6466 times	10 083 times	14 486 times
0	49.06	47.12	49.53
15	46.97	45.81	45.33
30	46.92	48.34	46.23
45	47.17	48.07	42.84
60	47.04	48.94	41.05

表 5 为未经任何处理和工作的原始状态下铈钨电极原材料表面及近表面的 Ce^{3+} 相对含量，由表可知，原始状态下铈钨电极内部的 Ce^{3+} 相对含量在 33%~44.24% 之间，因此 Ce^{4+} 的含量占绝对优势。以该状态下电极表面及近表面 Ce^{3+} 的相对含量为标准，认为 Ce^{3+} 含量高于 45% 即为有利于阴极发射的状态，结果见图 9。

图 9 为 3 个运行发次的铈钨阴极表面及刻蚀表面 Ce^{3+} 的含量曲线。对比图 9 中运行不同发次的阴极中 Ce^{3+} 的含量曲线可知，氙灯工作后阴极表面的 Ce^{3+} 含

量会随着工作发次增加而增多，即运行后氙灯的电极状况会获得一定改善；运行 6466 和 10 083 发次后阴极中近表面 Ce^{3+} 的相对含量较为稳定。运行 10 083 发次的氙灯 Ce^{3+} 的含量高一些，说明钨钨阴极的发射性能处于较佳的状态；运行 14 486 发次的阴极中 Ce^{3+} 的相对含量随着刻蚀时间延长， Ce^{3+} 的含量有下降趋势，直至刻蚀 60 s 后 Ce^{3+} 的相对含量降至 41.05%，低于电极真空热处理后 Ce^{3+} 的占比，说明经过 14486 发次的工作后，电极近表面 Ce^{3+} 的聚集状态已经呈现衰减的趋势，电极或已接近其使用寿命。

图 9 中绿色虚线框是电极真空热处理后的 Ce^{3+} 含量，处于绿色虚线框内的区域为电极状态优于氙灯初始发射性能。由图 9 可见，运行 6466 发次和运行 10 083 发次的钨钨阴极在刻蚀 60 s 时间对应的深度内 Ce^{3+} 的相对含量均处于虚线框内，说明发射性能较好，60 s 的刻蚀时间对应的刻蚀深度为 11.42 nm；运行 10 083 发次的电极 Ce^{3+} 的相对含量更高，且一直处于绿色框内，说明电极处于更好的发射状态；运行 14 486 发次的阴极表面刻蚀 0、15、30 s 的 Ce^{3+} 含量处于线框内，继续刻蚀后 Ce^{3+} 含量均处于线框下方，说明发射性能已经变差，根据计算该电极只有近表面 6.66 nm 的范围内 Ce^{3+} 含量处于优势水平，因此阴极发射性能出现较为明显的衰减迹象，氙灯电极性能处于下降状态。

表 5 钨钨电极原材料表面及近表面的 Ce^{3+} 含量

Table 5 Ce^{3+} contents near the surface of raw materials for W-Ce electrodes (%)

Etching time/s	0	10	20	30	40
Ce^{3+}	33.33	42.41	38.67	44.24	44.14

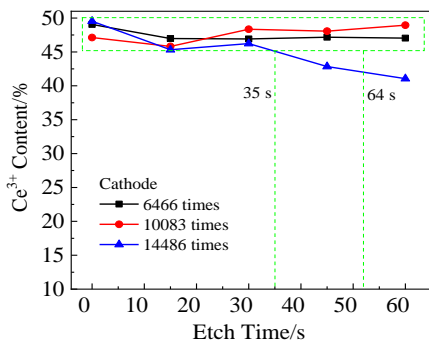


图 9 阴极 Ce^{3+} 相对含量曲线

Fig.9 Relative content curves of Ce^{3+} in cathodes

3 结 论

1) 从运行 6466、10 083、14 486 发次的高功率脉

冲氙灯电极金相形貌分析可知，脉冲氙灯工作后阳极表面会产生大量的龟裂纹，呈树枝状分布，裂纹中心的宽度更大、烧蚀现象更为严重，烧蚀状况随着运行发次增多而加重。

2) 通过 XPS 对阴极表面钨、钨元素的相对含量进行分析可知，随着氙灯的运行，钨元素有向表面扩散的趋势，运行 14 486 发次的氙灯表面钨元素含量最大，最高达 12%；同时，氙灯运行发次对表面钨元素的含量分布有一个均化现象，钨元素在表层区域的分布趋于均匀。

3) 通过 XPS 对电极表面及刻蚀层钨元素价态演变及深度分布进行分析，以 Ce^{3+} 含量为依据来分析氙灯阴极的发射性能，结果表明：运行 6466 和 10 083 发次的阴极表面 Ce^{3+} 含量较高，分布均匀，阴极处于较好发射状态，特别是运行 10 083 发次的电极处于最佳发射状态；运行 14 486 发次的阴极表面活性层厚度 6.66 nm，与 10 083 发次的阴极相比已经出现明显的衰减趋势，说明运行 14 486 发次后的钨钨阴极性能非最佳状态。

参考文献 References

[1] Yang Zefeng(杨泽峰), Mo Yongpeng(莫永鹏), Jia Shenli(贾申利) et al. *High Power Laser and Particle Beams*(强激光与粒子束)[J], 2014, 26(9): 092 004-1

[2] Smith B. *Flashlamp Pumped Laser Technology*[J], 1986(6): 1

[3] Liu Jianjun, Jiang Baocai, Tang Xianzhong et al. *Chinese Journal of Lasers*[J], 2006, 33(3): 326

[4] Yang Zefeng(杨泽峰), Li Xingwen(李兴文), Mo Yongpeng(莫永鹏). *High Power Laser and Particle Beams*(强激光与粒子束)[J], 2015, 27(9): 092 006-1

[5] Chen Guangy(陈光宇), Yang Dong(杨东), Zhang Xiaomin(张小民) et al. *High Power Laser and Particle Beams*(强激光与粒子束)[J], 2007, 19(7): 1125

[6] Chen Jia(陈佳), Shao Ruoyan(邵若燕), Cui Xinqiang(崔新强) et al. *Optics and Precision Engineering*(光学精密工程)[J], 2016, 24(12): 2988

[7] Fang Daoyu(方道腴), Cai Zuquan(蔡祖泉). *Electric Light Source Process*(电光源工艺)[M]. Shanghai: Fudan University Press, 2003: 184

[8] Ma Yongbo(马永波), Peng Shuming(彭述明), Long Xinggui(龙兴贵) et al. *High Power Laser and Particle Beams*(强激光与粒子束)[J], 2010, 22(10): 2483

[9] Nie Zuoren(聂柞仁), Zhou Meiling(周美玲). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 1997, 26(6): 1

- [10] Hao Guanghui(郝广辉), Li Zepeng(李泽鹏), Gao Yujuan(高玉娟). *Acta Physica Sinica*(物理学报)[J], 2019, 68(3): 037 901-1
- [11] He Defu(何德孚), Yin Deyu(殷德余), Zhao Jianguo(赵建国) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2003, 32(6): 475
- [12] Selcuk C, Wood J V. *Power Metallurgy*[J], 2005, 48(3): 241
- [13] Gao Zhikun(高志坤), Yang Jianchan(杨建参), Hao Wanli(郝万立) *et al. High Power Laser and Particle Beams*(强激光与粒子束)[J], 2019, 31(1): 012 001-1
- [14] Cao Guichuan(曹贵川), Qi Kangcheng(祁康成), Wang Xiaoju(王小菊). *Lamps & Lighting*(光源与照明)[J], 2018(2): 36
- [15] Zhang Y C, Wang P, Yang J C *et al. Applied Surface Science*[J], 2019, 479(7): 815
- [16] Yu Yongning(余永宁). *Principles of Metallurgy*(金属学原理)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010: 201
- [17] Guo Xiangchao(郭向朝), Liu Zuojiao(刘作娇), Li Haibing(李海兵) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(3): 902
- [18] Nie Zuore(聂祚仁), Chen Ying(陈颖), Zhou Meiling(周美玲) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 1999, 35(9): 981
- [19] Zhang Zudeng(张祖德). *Inorganic Chemistry*(无机化学)[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2014: 550
- [20] Sánchez-Amaya J M, Blancob G, Garcia-Garcia F J *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2012(11), 213: 105
- [21] Wang Peng(王鹏). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2018

Surface Cerium Element Distribution and Valence Evolution of the Cerium-Tungsten Electrode in High-Power Pulsed Xenon Lamp During Operation

Guo Xiangchao^{1,2}, Liu Zuojiao¹, Li Haibin¹, Liu Jiangjun¹, Hu lili^{1,3}

(1. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

(2. University of China Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3. Hangzhou Institute for Advanced Study, UCAS, Hangzhou 310024, China)

Abstract: The cerium tungsten electrode in the operation of high power pulsed xenon lamp was analyzed by metallographic microscope, scanning electron microscope (SEM) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). The evolution process and working mechanism of cerium tungsten electrode were confirmed and the cathode surface morphology, valence evolution and concentration depth distribution of cerium were studied. The results show that a large number of turtle cracks appear on the working surface of cerium tungsten electrode, and the degree and depth of cracks and ablation status are related to the operation times. The more working times lead to more serious cracks and ablation. With the increase of operation times, the cerium element in the cathode diffuses to the surface, and the cerium content on the surface increases, up to 12% and the distribution on the surface is more uniform. Through the analysis of Ce^{3+}/Ce^{4+} ratio, it is found that the surface activity of cerium tungsten cathode running 10 083 times is in a better state. The thickness of the surface active layer of cerium tungsten cathode running 14 486 times decreases significantly, only 6.66 nm, and the performance of xenon lamp decreases.

Key words: pulsed xenon lamp; cerium-tungsten; surface composition; valence evolution;

Corresponding author: Guo Xiangchao, Candidate for Ph. D., Senior Engineer, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, P. R. China, Tel: 0086-21-59962102, E-mail: gxc@siom.ac.cn