

文章编号: 1004-0609(2004)06-0985-05

稀土镧钼热阴极材料稳定发射机理 ——碳化及发射寿命^①

周文元, 张久兴, 刘燕琴, 万小峰, 周美玲, 左铁镭
(北京工业大学 新型功能材料教育部重点实验室, 北京 100022)

摘 要: 探讨了碳化 $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 热阴极的寿命机理, 分析了阴极工作温度和碳化度(碳化层厚度)对碳化 $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 阴极电子管寿命的影响。研究表明: 碳化 $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 热阴极的发射寿命是由碳化层中 Mo_2C 的损耗决定的, 阴极表面 Mo_2C 消耗殆尽, 阴极发射寿命即终结。阴极表面 Mo_2C 一方面作为还原剂与 La_2O_3 作用被消耗, 另一方面它在高温下会发生分解, 阴极中 Mo_2C 的损耗包括上述两个方面。在相同温度时, 碳化 $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 阴极中与 La_2O_3 还原反应损耗的 Mo_2C 和 Mo_2C 在高温下分解损耗的相当。通过理论分析与计算建立了各因素影响寿命的数学模型, 并通过高温分解实验得到了 Mo_2C 在不同温度下的分解速率。在 1 673 K, Mo_2C 的分解速率为 $1.21 \times 10^{-7} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, 碳化度 $\delta \geq 15\%$, $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 热阴极可稳定发射 1 000 h 以上。

关键词: $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 阴极; 碳化; 发射寿命; 数学模型

中图分类号: TG 146.4; O 462.1

文献标识码: A

Stable emission mechanism of $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ cathode —Carbonization and emission lifetime

ZHOU Wen-yuan, ZHANG Jiu-xing, LIU Yan-qin, WAN Xiao-feng,
ZHOU Mei-ling, ZUO Tie-yong

(Key Laboratory of Advanced Functional Materials, Ministry of Education,
Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: The lifetime mechanism of $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ cathode was discussed, and the effect of the operating temperature of cathode and the carbonized ratio (thickness of carbonized layer) on lifetime of tubes equipped with carbonized $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ cathode was analyzed respectively. The emission can keep stable only when the operating temperature is in range of 1 600 K to 1 700 K and the carbonized layer must be composed of Mo_2C . The results show that the lifetime of carbonized $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ cathode is decided by the consuming velocity of Mo_2C of the carbonized layer of cathodes. The Mo_2C is consumed as reducer for La_2O_3 and vaporized after decomposition during the working time. At 1 673 K, The consuming velocity is $1.21 \times 10^{-7} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$. The stable emission lifetime of tubes equipped with carbonized $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ cathodes can exceed 1000h if the carbonized ratio is above 15%.

Key words: $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ thermionic cathode; carbonization; emission lifetime; mathematical mode

20 世纪 70 年代, 瑞士 BBC 公司^[1, 2]首次报道了表面涂覆 Pt、Re 等稀有贵金属的 $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 热阴

极材料。因其具有工作温度低、发射电流大、抗中毒、抗离子轰击性能好, 特别是具有无放射性污染

① 基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1998061316)

收稿日期: 2003-09-12; 修订日期: 2004-01-28

作者简介: 周文元(1970-), 男, 博士研究生。

通讯作者: 周文元, 电话: 010-67392169; E-mail: zwy@emails.bjtu.edu.cn

等一系列 W-ThO₂ 阴极无法比拟的优点, 引起了各国电子管专家和材料科技工作者的极大兴趣。1980 年, Goebel 等^[3]进行了 Mo-La₂O₃ 空心阴极产生大电流等离子体代替 LaB₆ 的研究, 发现 Mo-La₂O₃ 阴极发射电流在发射 10 h 后才达到一个稳定数值, 而且随着时间的进一步延长(100 h), 发射电流出现衰减现象; 1985 年他们又对大面积 Mo-La₂O₃ 阴极发射体进行了研究^[4], 制备出了直径为 76 mm、厚度为 64 mm 的圆盘状间热式阴极, 这种阴极在 1 973 K 发射电流密度可达 11~12 A/cm²。研究表明, Mo-La₂O₃ 热阴极表面碳化层情况、晶粒结构、表面钨元素的富集情况都对阴极的发射性能产生重大影响, 特别是阴极表面碳化层是影响 Mo-La₂O₃ 阴极的发射稳定性和发射寿命的关键因素。

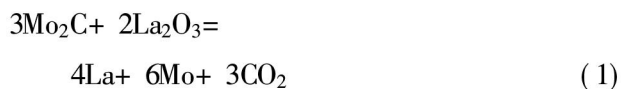
Mo-La₂O₃ 阴极是极具希望取代已使用百年具有放射性污染的 W-ThO₂ 材料的新一代热阴极材料。但由于其发射稳定性差、工作温度范围窄、寿命短等原因, Mo-La₂O₃ 阴极至今未真正进入工业应用。

1 碳化 Mo-La₂O₃ 阴极的寿命机理

关于 Mo-La₂O₃ 阴极的热电子发射机理, Buxbaum 等^[5, 6]认为与 W-ThO₂ 阴极的原子膜机理相同, 即碳化-还原-单原子层-电子发射。他们认为阴极在工作过程中稀土氧化物被碳化层中的 Mo₂C 还原成单质原子 La, 稀土单质 La 原子在阴极表面单个均匀地排列着, 在阴极表面形成一层钨原子薄膜, 当吸附至一单层时, 电子发射最大; 聂等^[7-9]通过热力学计算认为, Mo-La₂O₃ 阴极在工作温度下, La₂O₃ 是不能被 Mo₂C 还原的, 但他们通过高温 XPS 和 AFM 等实验观察到在 Mo-La₂O₃ 阴极发射时有钨单质的出现, 进而提出了超额钨的“纳米微粒子(薄膜)”假说。

以上两种假说都认为, Mo-La₂O₃ 阴极在工作时, 阴极内部作为活性发射物质的钨是促进 Mo-La₂O₃ 阴极电子发射和发射稳定的关键因素, 是保证 Mo-La₂O₃ 阴极电子发射的稳定性和发射寿命的基础。

碳化 Mo-La₂O₃ 阴极工作时, 阴极中单质 La 的产生方式可能有以下两种方式:



根据热化学动力学的 Gibbs-Helmholz 自由能方程式:

$$\ln k = - \frac{\Delta H^\ominus(T_0)}{RT} + \frac{\Delta S^\ominus(T_0)}{R} \quad (3)$$

而

$$\Delta H^\ominus = \sum n_i \cdot H_i^\ominus - \sum n_k \cdot H_k^\ominus \quad (4)$$

$$\Delta S^\ominus = \sum n_i \cdot S_i^\ominus - \sum n_k \cdot S_k^\ominus \quad (5)$$

式中 i 表示生成物; k 表示反应物。

反应(1)、(2)中各物质的 $\Delta H^\ominus$ 、 $\Delta S^\ominus$ 可由热力学数据手册查得, 根据式(4)和(5)计算, 反应(1)和(2)的热力学函数分别为

$$\begin{aligned} \Delta H_{1T}^\ominus = & -110.25T + 40.04 \times 10^{-3}T^2 - \\ & 6.86 \times 10^{-6}T^3 - 36.24 \times 10^5T^{-1} + \\ & 4\,309\,507.95 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta S_{1T}^\ominus = & -110.25 \times \ln T + 80.08 \times 10^{-3}T - \\ & 10.29 \times 10^{-6}T^2 - 18.12 \times 10^5T^{-2} + \\ & 1\,714.15 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta H_{2T}^\ominus = & -74.51T + 22.59 \times 10^{-3}T^2 - \\ & 3.43 \times 10^{-6}T^3 - 46.74 \times 10^5T^{-1} + \\ & 2\,497\,600.68 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta S_{2T}^\ominus = & -74.51 \times \ln T + 45.18 \times 10^{-3}T - \\ & 5.15 \times 10^{-6}T^2 - 23.37 \times 10^5T^{-2} + \\ & 1\,241.69 \end{aligned}$$

将以上热力学函数代入式(3), 就可求得上述两反应在不同温度下的平衡常数 k , 计算结果见表 1。

表 1 反应(1)、(2)的平衡常数 k

Table 1 Equilibrium constants of reactions (1) and (2)

T/K	k_1	k_2
1 500	$7.644\,49 \times 10^{-95}$	$8.598\,55 \times 10^{-46}$
1 600	$1.096\,29 \times 10^{-85}$	$1.595\,49 \times 10^{-40}$
1 700	$1.296\,67 \times 10^{-77}$	$7.020\,79 \times 10^{-36}$
1 800	$1.919\,62 \times 10^{-70}$	$9.321\,9 \times 10^{-32}$
1 900	$4.942\,87 \times 10^{-64}$	$4.516\,05 \times 10^{-28}$
2 000	$2.879\,69 \times 10^{-58}$	$9.291\,77 \times 10^{-25}$

由平衡常数定义可知:

$$k_1 = p_{\text{CO}_2}^3 \cdot p_{\text{La}}^4 \cdot a_{\text{Mo}}^6 / (a_{\text{Mo}_2\text{C}}^3 \cdot a_{\text{La}_2\text{O}_3}^2) \quad (6)$$

$$k_2 = p_{\text{CO}}^3 \cdot p_{\text{La}}^2 \cdot a_{\text{Mo}}^6 / (a_{\text{Mo}_2\text{C}}^3 \cdot a_{\text{La}_2\text{O}_3}) \quad (7)$$

式中 p_{CO} 、 p_{La} 、 p_{CO_2} 分别为各气态物质的平衡蒸气压, Pa; $a_{\text{La}_2\text{O}_3}$ 、 a_{Mo} 、 $a_{\text{Mo}_2\text{C}}$ 分别为各物质的活度。

根据反应过程中质量守恒定律, 对反应(1)有:

$$p_{\text{CO}_2} = \frac{3}{4} p_{\text{La}}^{(1)} \quad (8)$$

对反应(2)有:

$$p_{\text{CO}} = \frac{2}{3} p_{\text{La}}^{(2)} \quad (9)$$

因此

$$k_1 = \frac{27}{64} (p_{\text{La}}^{(1)})^7 \cdot a_{\text{Mo}}^6 / (a_{\text{Mo}_2\text{C}}^3 \cdot a_{\text{La}_2\text{O}_3}^2) \quad (10)$$

$$k_2 = \frac{8}{27} (p_{\text{La}}^{(2)})^5 \cdot a_{\text{Mo}}^6 / (a_{\text{Mo}_2\text{C}}^3 \cdot a_{\text{La}_2\text{O}_3}^2) \quad (11)$$

假设阴极中各成分是相互独立, 不存在中间相和固溶现象, 则 $a_{\text{La}_2\text{O}_3}$ 、 a_{La} 、 a_{Ma} 、 $a_{\text{Mo}_2\text{C}}$ 均为 1, 代入式(6)和(7)可以得到不同温度各反应的平衡蒸气压, 结果见表 2。 $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 阴极工作温度在 1 600~ 1 700 K 之间, 电子管内真空度一般为 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ Pa^[10], 因此只有反应(2)才可以进行。

表 2 反应(1)、(2)中镧的平衡蒸气压(Pa)

Table 2 Equilibrium vapour pressure of lanthanum in reactions (1) and (2)

T/K	$p_{\text{La}}^{(1)}$	$p_{\text{La}}^{(2)}$
1 500	$4.057\ 97 \times 10^{-14}$	$1.237\ 48 \times 10^{-9}$
1 600	$8.248\ 81 \times 10^{-13}$	$1.400\ 34 \times 10^{-8}$
1 700	$1.173\ 99 \times 10^{-11}$	$1.188\ 32 \times 10^{-7}$
1 800	$1.241\ 67 \times 10^{-10}$	$7.935\ 16 \times 10^{-7}$
1 900	$1.022\ 89 \times 10^{-9}$	$4.331\ 18 \times 10^{-6}$
2 000	$6.814\ 78 \times 10^{-9}$	$1.991\ 93 \times 10^{-5}$

$\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 阴极工作时, 阴极中扩散到阴极表面的 La_2O_3 不断被 Mo_2C 还原, 产生单质镧^[11, 12]。阴极表面 La_2O_3 和 Mo_2C 的存在是保证单质镧生成的必要条件, 当阴极中 La_2O_3 或 Mo_2C 耗尽时, 阴极的发射寿命也就终结。由此可知, 碳化 $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 阴极寿命终止是由于阴极中 La_2O_3 或 Mo_2C 的损耗殆尽。

得到阴极工作时 La 的平衡蒸气压后, 进而可由 Knudsen 方程得到 $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 阴极表面单位时间单位面积 La 蒸发的质量 m , 需要注意的是, Knudsen 计算的是纯物质的蒸发质量, 计算 $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 阴极中 La_2O_3 的损耗速度时应乘以 La_2O_3 在合金中所占体积分数。在不同温度时, 碳化 $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 阴极中 La_2O_3 的损耗速度和一根直径为 1 mm 氧化镧阴极中 La_2O_3 完全耗尽所需时间见表 3。在 $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 阴极的工作温度为 1 600~ 1 700 K 时, La_2O_3 耗尽时间均在 50 000 h 以上, 可见 La_2O_3 的损耗并不是影响 $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 阴极寿命的关键因素, 而主要取决于碳化层中 Mo_2C 的损耗。

表 3 $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 阴极中 Mo_2C 、 La_2O_3 的

损耗速度及 La_2O_3 耗尽所需时间

Table 3 Consuming rate of Mo_2C and La_2O_3 of carbonized $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ cathode

T/K	$v(\text{Mo}_2\text{C}) / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$v(\text{La}_2\text{O}_3) / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$t(\text{La}_2\text{O}_3) / \text{h}$
1 500	$2.201\ 28 \times 10^{-9}$	$9.999\ 26 \times 10^{-10}$	6 944 957
1 600	$2.411\ 87 \times 10^{-8}$	$1.095\ 59 \times 10^{-8}$	633 855
1 700	$1.985\ 58 \times 10^{-7}$	$9.019\ 47 \times 10^{-8}$	76 994
1 800	$1.288\ 55 \times 10^{-6}$	$5.853\ 2 \times 10^{-7}$	11 864
1 900	$6.845\ 58 \times 10^{-6}$	$3.109\ 59 \times 10^{-6}$	2 233
2 000	$3.068\ 6 \times 10^{-5}$	$1.393\ 91 \times 10^{-5}$	498

$v(\text{Mo}_2\text{C})$ is consuming rate of Mo_2C ; $v(\text{La}_2\text{O}_3)$ is consuming rate of La_2O_3 ; $t(\text{La}_2\text{O}_3)$ is lifetime of La_2O_3 .

2 碳化 $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 阴极发射寿命数学模型

由上面分析可知, 碳化 $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 阴极的寿命是由碳化层中 Mo_2C 的损耗决定的。 Mo_2C 一方面作为还原剂与 La_2O_3 作用被损耗, 另一方面它在高温下会发生分解, 阴极中 Mo_2C 的损耗包括上述两个方面, 因此碳化 $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 阴极的发射寿命 τ 与工作温度 T 、碳化层厚度 H (碳化度 δ)、发射电流 I_f 等因素有关, 即:

$$\tau = f(T, \delta, I_f) \quad (12)$$

Mo_2C 在高温下的分解速度 v 与温度 T 的关系, 可用指数函数表示:

$$v = \text{d}r/\text{d}t = v_0 \cdot e^{\alpha(T - T_0)} \quad (13)$$

式中 v_0 为温度 T_0 时的分解速度; α 为分解常数, 与阴极表面状况、工作气氛等有关。

假定碳化层耗尽时阴极工作温度为 T_e , 则寿命 τ 为

$$\tau = \frac{e^{\alpha T_0}}{v_0} \int_0^H e^{-\alpha r} \text{d}r \quad (14)$$

在碳化 $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 阴极工作温度范围内, r 与 T 的关系近似于线性, 其比例因子 $K = \frac{T_e - T_0}{r_e - r_0}$, 替换 $T = r/K$, 则

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{e^{\alpha T_0}}{v_0} \int_0^e \left[\exp\left(-\frac{\alpha r}{K}\right) - \exp\left(-\frac{\alpha r_e}{K}\right) \right] \text{d}r \\ &= \frac{e^{\alpha T_0}}{\alpha v_0} \frac{r_e - r_0}{T_e - T_0} \left[\exp(-\alpha T_0) - \exp(-\alpha T_e) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

式(15)是表征碳化 $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 阴极发射寿命和阴极

工作温度及碳化层厚度的基本关系式。

3 碳化 $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 阴极发射寿命模拟实验

3.1 实验

由前面计算与理论分析可知, 碳化 $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 阴极的发射寿命是由阴极表面碳化层中 Mo_2C 的损耗决定的。在实际电子管高温工作时, 阴极中 Mo_2C 的损耗量非常微小, 而且电子管中的栅极、阳极等其它部分中的 Mo 、 O 、 C 和其它杂质元素也会发生分解和蒸发。目前分析技术还无法进行实际电子管中 Mo_2C 分解的准确分析, 为了对电子管阴极发射寿命进行预测, 模拟电子管的工作环境, 采用分析纯的 Mo_2C 粉末, 测定 Mo_2C 在高温时的分解速度, 进而得到 $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 阴极的理论发射寿命。

实验分析仪器是 Rheometric Scientific STA-1500 热重分析仪。将纯 Mo_2C 粉末装在直径 5 mm 的高纯氧化铝坩埚中压实。分析时试样室真空度保持在 10^{-5} Pa 以上, 升温速度 10 K/min, 当温度升到 1 473、1 573、1 673 K 时各保温 10 min, 测试在各阶段 Mo_2C 的质量损失。

3.2 结果与分析

Mo_2C 高温时分解质量损失曲线见图 1。

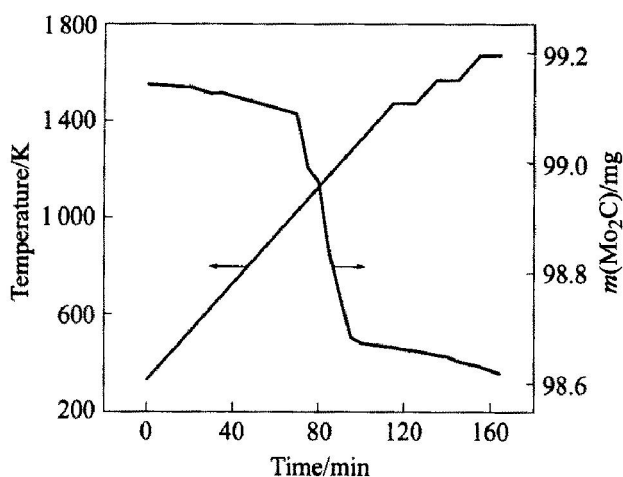


图 1 Mo_2C 高温分解曲线

Fig. 1 Decomposing rate of Mo_2C at high temperature

由上面曲线可得到不同温度 Mo_2C 的分解质量 m_d , 因此单位面积单位时间内 Mo_2C 分解质量即分解速率 v_d 为:

$$v_d = \frac{\Delta m_d}{\Delta t \cdot \Delta S} \quad (16)$$

将分析结果代入上式即可求得不同温度时 Mo_2C 的分解速度, 如表 4 所示。计算时需要注意的是, 用 Mo_2C 粉末模拟分解实验要考虑其分解面积并不是坩埚口的面积, 必须进行修正, 修正系数 n 为理论 $\rho(\text{Mo}_2\text{C})$ 与粉末 $\rho(\text{Mo}_2\text{C}_f)$ 之比, 即

$$n = \frac{\rho(\text{Mo}_2\text{C})}{\rho(\text{Mo}_2\text{C}_f)} \quad (17)$$

表 4 不同温度时 Mo_2C 的分解速度

Table 4 Decomposing rate of Mo_2C at different temperatures

T/K	m_d/g	$v_d/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$
1 473	6.09×10^{-6}	5.17×10^{-8}
1 573	1.079×10^{-5}	9.16×10^{-8}
1 673	1.42×10^{-5}	1.21×10^{-7}

由前面计算和上面实验结果可看出, 在阴极工作的温度范围内 (1 600~1 700 K), 碳化 $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 阴极中与 La_2O_3 还原反应 Mo_2C 损耗速率和 Mo_2C 在高温下分解损耗速率基本相同, 因此, $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 阴极的寿命是由阴极碳化层分解和与 La_2O_3 还原反应损耗共同决定的。因此碳化 $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 阴极发射寿命可计算为

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{M(\text{Mo}_2\text{C})}{(v_d + v_r) \cdot S} \\ &= \frac{V(\text{Mo}_2\text{C}) \cdot \rho(\text{Mo}_2\text{C})}{2v_d \cdot S} \\ &= \frac{[\pi(\frac{d}{2})^2 - \pi(\frac{d-2H}{2})^2] \cdot l \cdot \rho(\text{Mo}_2\text{C})}{2v_d \cdot \pi dl} \quad (19) \end{aligned}$$

式中 $M(\text{Mo}_2\text{C})$ 为阴极中碳化层 Mo_2C 的质量; v_d 、 v_r 分别为阴极中 Mo_2C 的分解和还原损耗速度; S 为阴极表面发射有效面积; $\rho(\text{Mo}_2\text{C})$ 为 Mo_2C 的密度, 为 8.92 g/cm³; $V(\text{Mo}_2\text{C})$ 为阴极中碳化层的体积; d 、 l 分别为阴极直径和长度; H 为阴极碳化层厚度。因此

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{[\pi(\frac{d}{2})^2 - \pi(\frac{d-2H}{2})^2] \cdot l \cdot \rho(\text{Mo}_2\text{C})}{2v_d \cdot \pi dl} \\ &= \frac{(dH - H^2) \cdot \rho(\text{Mo}_2\text{C})}{2v_d d} \quad (19) \end{aligned}$$

若阴极工作温度为 1 673 K, 直径为 1.0 mm, 不同碳化度的 $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 阴极碳化层耗尽时间(发射寿命)见表 5。

从上面计算结果可知, 要满足 $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 阴极

表 5 不同碳化度 $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 阴极的发射寿命

Table 5 Influence of carbonization ratio on stable emission lifetime

$\delta/\%$	$H/\mu\text{m}$	τ/h		
		1 473 K	1 573 K	1 673 K
5	16.177 16	1 144.148	645.769 1	488.8
10	32.914 26	2 288.296	1 291.538	977.7
15	50.273 83	3 432.444	1 937.307	1 466.6
20	68.330 95	4 576.592	2 583.076	1 955.5
25	87.177 14	5 720.74	3 228.845	2 444.3
30	106.925 9	6 864.888	3 874.615	2 933.2

FU-6051 电子管稳定工作 1 000 h 以上, 阴极碳化度必须大于 15%。而且, 工作温度对 $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 阴极的发射寿命影响很大, 如碳化度为 15% 的阴极在 1 473 K 时阴极寿命为 3 432 h, 1 573 K 时阴极寿命为 1 937 h, 1 673 K 时阴极寿命仅为 1 466 h。由前面讨论可知, $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 阴极工作温度为 1 600~1 700 K 较为合适, 因此 $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 阴极碳化度必须大于 15%, 才能保证 $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 阴极电子管稳定工作寿命 1 000 h 的要求。

4 结论

- 1) 碳化 $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 热阴极的发射寿命是由碳化层中 Mo_2C 的损耗决定的, 阴极表面 Mo_2C 消耗殆尽, 阴极发射寿命也就终结。
- 2) 阴极表面 Mo_2C 一方面作为还原剂与 La_2O_3 作用被损耗, 另一方面它在高温下会发生分解, 阴极中 Mo_2C 的损耗包括上述两个方面。在相同温度时, 碳化 $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 阴极中与 La_2O_3 还原反应损耗的 Mo_2C 和 Mo_2C 在高温下分解损耗的相当。
- 3) 碳化 $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 热阴极的发射寿命与工作温度和碳化层厚度的函数关系为 $\tau = \frac{e^{\frac{dT_0}{\alpha_0}}}{\alpha_0} \cdot \frac{r_e - r_0}{T_e - T_0} \cdot [\exp(-dT_0) - \exp(-dT_e)]$ 。温度越高, 寿命越短; 碳化层越厚, 寿命越长。
- 4) 碳化 $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 热阴极的发射寿命与碳化度成正比关系。在 1 600~1 700 K, 碳化度 $\delta \geq 15\%$, 碳化 $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ 热阴极可稳定发射 1 000 h 以上。

[1] Baxbaum C, Gessinges G. Reaction Cathode [P]. US 4019081, 1977.

[2] Baxbaum C, Gessinges G. Lanthanated Thermionic Cathodes [P]. US 4083811, 1978.

[3] Goebel D M, Forrester A T, Johnston S. La-Mo emitter in hollow cathode[J]. Rev Sci Instrum, 1980, 51(11): 1468 - 1470.

[4] Goebel D M, Hirooka Y, Campbell G. A Large area lanthanum molybdenum electron emitters[J]. Rev Sci Instrum, 1985, 56(10): 1888 - 1893.

[5] Buxbaum C, Baden P. The La-Mo cathode —A new thermionic high-performance metal cathode [J]. Brown Boveri Review, 1979, 1 - 79: 43 - 45.

[6] Baxbaum C. Thermionic Cathode [P]. US 4274030, 1981.

[7] 王金淑, 周美玲, 张久兴. La-Mo 阴极中单质 La 形成的热力学分析[J]. 稀有金属材料与工程, 1998, 27(增刊): 159 - 161.

WANG Jir-shu, ZHOU Mei-ling, ZHANG Jiur-xing. Thermodynamic analysis of formation of metallic lanthanum in $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ cathode[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1998, 27(Suppl): 159 - 161.

[8] NIE Zuoren, ZUO Tie-yong, ZHOU Mei-ling, et al. High temperature XPS/ AES investigation of $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ cathodes (II) —Variation of lanthanum during activation processes [J]. Journal of Rare Earths, 2000, 18(2): 110 - 114.

[9] NIE Zuoren, ZUO Tie-yong, ZHOU Mei-ling, et al. High temperature XPS/ AES investigation of $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ cathode (I) —Species and properties of oxygen on surface [J]. Journal of Rare Earths, 1999, 17(4): 267 - 270.

[10] 电子管设计手册编辑委员会. 发射管设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1980.

Vacuum Tube Design Book Committee. Vacuum Tube Design Book [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1980.

[11] WANG Jir-shu, ZHOU Mei-ling, NIE Zuoren, et al. A study of diffusion behavior of elements lanthanum and oxygen in $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ cathode [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2000, 311: 82 - 85.

[12] WANG Jir-shu, ZHOU Mei-ling, NIE Zuoren, et al. Surface segregation of La_2O_3 molecules in $\text{Mo-La}_2\text{O}_3$ cathode materials[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2000, 10 (6): 745 - 748.

(编辑 龙怀中)

REFERENCES