

[文章编号] 1004-0609(2002)01-0036-05

家用微波炉磁控管用碳化 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ 阴极^①

罗丰华, 周美玲, 左铁镛

(北京工业大学 材料科学与工程学院, 北京 100022)

[摘 要] 研究了家用微波炉磁控管碳化 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ 阴极, 参照碳化 $\text{ThO}_2\text{-W}$ 阴极磁控管的制作工艺, 成功实现了 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ 阴极的碳化以及碳化 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ 阴极磁控管的去气、激活。碳化 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ 阴极的微波能量输出功率为 500 W, 而同类型的碳化 $\text{ThO}_2\text{-W}$ 阴极磁控管的额定微波能量输出为 900 W。通过分析认为, 碳化 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ 阴极磁控管微波输出能量不足的主要原因在于碳化 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ 阴极材料本身的电子发射能力不足。

[关键词] 稀土钼; 磁控管; 微波炉

[中图分类号] TG 146.4

[文献标识码] A

微波炉是利用微波特性制成的新型家用炊具, 利用磁控管产生微波, 均匀辐射到炉腔中, 被肉类、蔬菜等含水物质吸收, 水分子以高频率振动使物体加热^[1]。

微波炉用磁控管主要技术参数为: 频率 2 450 MHz, 阳极平均电流 200 mA, 灯丝电压 3.5 V, 阳极峰值电压 3.7 kV, 输入功率 900~1 300 W, 输出功率 500~700 W^[2]。目前, 微波炉用磁控管(包括理疗用磁控管)均采用碳化钨钨丝阴极。碳化钨钨阴极虽然有发射电流密度大等特点, 但由于钨元素具有放射性, 在生产和使用过程中会污染环境, 因此寻求替代钨钨的阴极材料成为当务之急。

近年来研制的稀土钼阴极具有接近碳化钨钨阴极的热电子发射水平, 并且具有高韧性和低工作温度等特点, 如果能够作为微波炉磁控管阴极, 不但可以解决钨元素的放射性污染问题, 还能减少磁控管在制作和应用过程中碳化钨钨丝的脆断失效, 并且由于阴极的加热功率减小, 从而提高了磁控管的热效率^[3~7]。本文作者尝试用 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ 阴极作为家用微波炉磁控管阴极材料, 阐述磁控管阴极的处理工艺, 通过实践重新认识目前 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ 阴极的发射能力。

1 材料和阴极制备

采用基本上与钨丝生产工艺类似的粉末冶金方法制备 La_2O_3 含量为 4% 的稀土钼丝。按照一定比

例将 $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ 与 MoO_2 混合均匀, 通过氢还原工艺得到 La_2O_3 与 Mo 的混合粉, 再经过压制、预烧结和高温烧结成形。烧结坯料通过旋锻、拉拔工艺, 加工成直径为 0.5 mm 的稀土钼丝。

2M167 型磁控管采用的是螺旋外径 4 mm, 螺距 1.11 mm 的单螺旋阴极, 单个阴极总圈数为 11.5 圈, 展开总长度为 127.65 mm。实际装配后, 两端各有 1.5 圈在端环中, 有效圈数为 8.5 圈, 有效长度为 94.35 mm。

2 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ 阴极磁控管制备

2.1 阴极碳化

钨钨丝经碳化后为碳化钨钨丝, 这种阴极比纯金属阴极的发射效率高, 可达到 50~70 mA/W(而未经碳化的纯钨阴极发射效率只有 25~40 mA/W), 而且耐正离子的轰击能力强^[8, 9]。对于 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ 阴极(Mo_2C 是使 La_2O_3 还原生成活性单质 La 的还原剂^[9, 10]), 同样需要采用碳化工艺, 碳化前先在真空中测定电压、电流及阴极表面温度的对应关系, 阴极表面温度用红外测温仪测定, 结果见图 1。

碳化时通过调节阴极电压来控制阴极表面温度, 电压与阴极表面温度的关系随真空度、稀土钼丝实际电阻等变化有所波动。碳化在苯气氛中进行, 由于对流散热, 相同电压下, 阴极表面温度比真空中略低。实验准备了 8 个阴极样品, 预先统一

① [基金项目] 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1998061316)
[作者简介] 罗丰华(1969-), 男, 博士。

[收稿日期] 2001-03-15; [修订日期] 2001-06-18

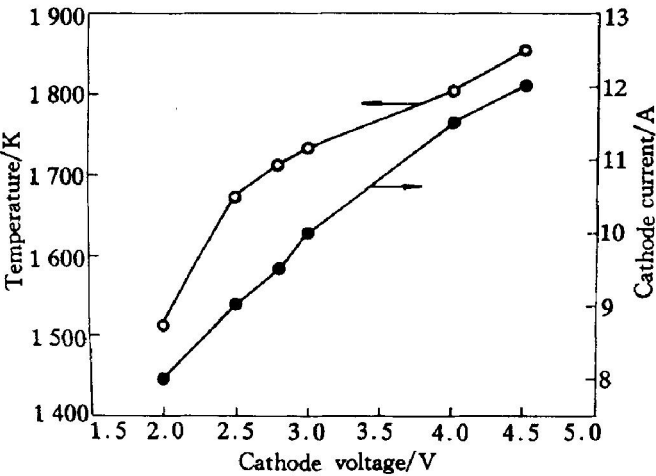


图 1 微波炉磁控管用 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ 阴极的电压—温度关系

Fig. 1 Relationship between voltage and temperature of $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ cathode

测定电阻数据,发现碳化前电阻明显分为两组。根据前期实验结果, $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ 阴极在 1 400~ 1 500 ℃ 碳化效果比较理想,因此将样品分为两组,分别选择电压为 9.5 V 和 10 V 做碳化实验。碳化在玻璃钟罩中进行,首先抽真空到 1.33×10^{-1} Pa,再通以约 20Pa 的苯蒸汽,具体工艺制度及结果见表 1。

从表 1 可以看到,碳化的结果比较理想,并且重现性好。碳化完成后,将阴极和阳极组件通过氩弧焊焊合在一起,阳极组件包括谐振腔、上下磁靴、导波天线、排气管等。

2.2 磁控管老炼、去气

对于高频管,必须达到 10^{-6} Pa 的高真空才能正常工作,因此必须实行严格的排气工艺。事实上磁控管工作时,由于温升的作用,阴极、阳极内表面及其他暴露在真空腔内的表面上的吸附气体都会

挥发出来,造成真空破坏^[13],因此,在排气过程中必须通过调整灯丝电压 U_f 和阳极电压 U_a ,使整个组件达到一定的温度,才能达到排气的效果。观察发现虹光电子管厂的 2M167 型磁控管排气时阳极外表面温度达到 900 K。

另外,对于 $\text{ThO}_2\text{-W}$ 阴极,排气时还要实行阴极的激活工序,即将阴极加热到较高温度,通过 W_2C 对 ThO_2 的还原作用,使阴极中生成部分 Th 单质原子。

表 2 所列为虹光电子管厂的 2M167 型碳化钽钨阴极磁控管排气工艺和碳化 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ 阴极的排气工艺。

磁控管去气、老炼前先预抽真空到 10^{-6} Pa,在整个过程中都开启真空扩散泵,最后封管时真空度要求高于 10^{-6} Pa,实验管封管真空度都需达到要求。从表 2 可以看出,碳化钽钨阴极的去气、老炼工艺共有 12 个步骤,前 9 个步骤主要作用是去气,即通过逐步提高阴极电压将灯丝逐步加热到一定温度,一般高于工作电压(2M167 型磁控管阴极工作额定电压为 3V);同时通过不断增加阳极电压以达到增大热电子发射电流和提高阳极功率的作用,从而使阳极和整个磁控管真空腔内充分加热,通过温升和热电子不断轰击阳极腔来达到去除真空腔内吸附气体的作用。第 11 步采用较高的阴极电压,使阴极温度升高促进 ThO_2 还原,起到老炼、激活的作用。

对于碳化 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ 阴极,基本上采用与碳化 $\text{ThO}_2\text{-W}$ 类似的去气、老炼工艺,所不同的是由于碳化 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ 阴极工作温度低,所以阴极加热电压 U_f 按比例降低,阴极激活的电压为 4.5 V,参照图 1,对应温度约为 1 850 K。同时发现,热电子发

表 1 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ 磁控管阴极的碳化工艺

Table 1 Carbonization techniques for $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ magnetron cathode

Sample	Resistivity before carbonization	Carbonized voltage/ V	Carbonized current/ A	Carbonized time/ min	Resistivity after carbonization	Carbonized degree/ %
L1	0.045 4	4	11.0	4	0.051 3	13.0
L2	0.043 7	4	11.4	4	0.052 5	20.0
L3	0.047 0	4	10.6	4	0.052 1	10.9
L4	0.046 4	4	11.0	4	0.053 2	14.7
L5	0.041 0	3.5	10.8	4	0.046 1	12.4
L6	0.040 8	3.5	11.0	4	0.0460	12.7
L7	0.040 1	3.5	10.8	4	0.047 2	17.7
L8	0.041 2	3.5	11.0	4	0.047 5	15.3

表 2 磁控管排气工艺

Table 2 Exhaust techniques for magnetron

Step	Time / min	ThO ₂ -W			La ₂ O ₃ -Mo		
		U _f /V	U _a /V	I _a /mA	U _f /V	U _a /V	I _a /mA
1	1	2.5	0	0	2.0	0	0
2	1	4.0	0	0	3.5	0	0
3	1	3.5	100	0	3.0	150	
4	2	3.5	140	80	3.0	190	
5	5	4.0	200	120	3.5	250	
6	5	4.0	240	170	3.5	290	
7	10	4.5	250	200	4.0	300	50
8	10	4.5	270	230	4.0	320	100
9	15	5.0	260	220	4.5	310	100
10	5	0	0	0	0	0	0
11	3	6.5	0	0	5.0	0	0
12	20	4.5	210	180	4.0	210	110

射电流达不到要求, 因此采用提高阳极电压 U_a 的方法, 来保证阳极功率和磁控管的温升。按照表 2 的工艺, 碳化 La₂O₃-Mo 阴极磁控管的真空度能达到要求, 经高压击穿检验合格。

3 测试结果

表 3 列出了两种不同阴极的 2M167 型磁控管测试的基本参数。从表 3 可知, 采用碳化 La₂O₃-Mo 阴极, 阴极工作电压为 1.8 V, 对照图 1, 对应阴极表面温度为 1 510 K, 阴极工作电压和阴极加热功率大大降低。但是, 阳极电流, 也即阴极热电子发射电流达不到 ThO₂-W 阴极的水平, 继续增加阳极电压也没有作用, 这将导致微波输出功率不能满足要求。

表 3 两种不同阴极 2M167 型磁控管测试结果

Table 3 Test results of two different cathodes of 2M167 magnetron

Cathode	Cathode work voltage / V	Cathode work current / A	Cathode heat power / W	Anode voltage under magnetic field/ kV
ThO ₂ -W	3.3	14	46.2	4.2
La ₂ O ₃ -Mo	1.8	6.4	11.5	3.5

Cathode	Anode current/ mA	Anode power/ W	Microwave output power/ W
ThO ₂ -W	300	1 260	900
La ₂ O ₃ -Mo	200	700	500

4 讨论

4.1 碳化 La₂O₃-Mo 阴极的发射能力

表 4 所列为几种阴极的发射特性。可见, 目前碳化 La₂O₃-Mo 阴极所能获得的发射本领实际上只达到纯钨的下限值, 而并非文献[4, 5, 12]所报导的能达到 Th-W 阴极的上限值。对于碳化 Th-W 阴极, 工程应用设计时一般采用其最大发射效率的一半, 即 25~45 mA/W 作为设计依据^[11], 可见, 碳化 La₂O₃-Mo 阴极的最大发射效率甚至都达不到 Th-W 阴极设计水平的一半, 不能满足取代碳化 Th-W 阴极的能力。

表 4 几种阴极的发射特性

Table 4 Thermionic emission properties of different cathodes

Cathode	Work temperature / K	Emission current density / (A·cm ⁻²)	Emission efficiency / (mA·W ⁻¹)
Clean W ^[8, 9, 11]	2 450~2 650	0.3~0.7	4~10
Th-W ^[8, 9, 11]	1 950~2 000	0.7~1.5	50~70
La ₂ O ₃ -Mo ^[4, 5, 12]	1 523~1 723	0.318~0.367	11.8

从发射效率考虑, Th-W 阴极磁控管工作的阴极加热功率约为 46 W(见表 3), 如果不考虑冷端效应, 即使按碳化 Th-W 阴极设计时所采用的 25 mA/W 的最低发射效率计算, 其阴极发射能力也可达到 1 150 mA, 远大于磁控管工作要求的 300 mA。而对于碳化 La₂O₃-Mo 阴极, 阴极加热功率仅为 11.6 W, 即使发射效率按最大值 11.8 mA/W 计算, 阴极最大发射能力为 136 mA, 这个结果比测试获得的发射电流(约 200 mA)还要低, 这是由于电子回轰功率没有计算在内, 一般磁控管电子回轰功率为阳极功率的 2%~10%^[8]。

按照阴极发射电流密度计算, 阴极的有效发射面积与阴极的等位面有关, 对于螺旋式阴极, 按工程计算方法^[11], 只能取表面的一半作为有效发射面积:

$$S = 0.5\pi L_1 d = 0.5 \times 3.14 \times 94.35 \times 0.5 = 0.74 \text{ cm}^2 \quad (1)$$

式中 L_1 为阴极有效长度, d 为丝直径。

碳化 La₂O₃-Mo 阴极的最大发射电流密度为 0.367 A/cm²^[4, 5, 12], 那么最大发射电流为:

$$I_{k, \max} = 364 \times 0.74 = 271 \text{ mA} \quad (2)$$

实际上, 由于冷端的散热作用, 碳化时阴极两

端的温度达不到所需的碳化温度, 碳化实验观察到仅有 6 圈螺旋温度比较均衡, 这样碳化 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ 阴极 2M167 型磁控管的发射能力要低于 269 mA。测试的结果大约为 200 mA, 符合工程计算结果, 同时说明本实验所采用的去气和阴极激活工艺是合理的, 能够反映出目前研究的碳化 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ 的阴极发射水平。

可见, 由于碳化 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ 阴极达不到 Th-W 阴极的发射能力, 造成了磁控管阴极发射电流不足, 达不到要求的微波输出功率。

4.2 磁控管碳化 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ 阴极过热分析

碳化 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ 阴极的工作温度范围比较窄, 大致为 1 240~ 1 450 $^{\circ}\text{C}$, 高于此温度时发射能力下降^[5]。表 5 为碳化 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ 阴极 2M167 型磁控管在不加磁场情况下测得的发射能力。

表 5 碳化 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ 阴极 2M167 型
磁控管无磁场时的发射能力

Table 5 Emission ability of carbonized
 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ cathode of 2M167 magnetron
without magnetic field

Estimated temperature / $^{\circ}\text{C}$	Cathode voltage / V	Cathode current / A	Anode voltage / V	Anode current / mA	Cathode power / W	Cathode state
1 240	2. 0	7. 7	200	200	15. 4	Normal
1 440	3. 0	9. 6	200	238	28. 8	Normal
1 500	3. 5	10. 6	200	180	37. 1	Over heat

表 5 中的阴极表面温度是参照图 1 估计出来的。从表 5 可知, 当温度高达 1 500 $^{\circ}\text{C}$ 时, 即阴极自热功率大于 37. 1 W 时, 阴极发射能力下降, 阴极过热。

磁控管工作时, 除了微波输出功率外, 其它能量都以热的形式释放。一般磁控管电子回轰功率为阳极功率的 2%~ 10%。如果要获得 900 W 的微波能量输出, 那么按照碳化钨钨阴极磁控管的参数计算, 阳极功率为 1 260 W, 即使取回轰功率的最小比例, 即 2%, 回轰功率也可达 25. 2 W。在功率测试实验中, 阴极自身发热功率为 11. 52 W, 再加上最少回轰功率 25. 2 W, 达到 36. 5 W, 参照表 5, 灯丝肯定过热。

表 6 为碳化 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ 阴极在外加磁场和无外加磁场两种状态下阴极的电压与电流的对比关系。从表 6 可以看出, 在外加磁场状态下, 阴极电流明显降低, 这是由于阴极电子回轰使阴极温度升高, 阴极电阻增大的缘故。

表 6 碳化 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ 阴极电压电流关系

Table 6 Voltage and current relationship of
carbonized $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ cathode

Cathode voltage/ V	Cathode current/ A	
	Without magnetic field	Under magnetic field
1. 8	7. 3	6. 4
2. 0	7. 8	6. 6
2. 5	8. 8	7. 6

从以上分析可知, 碳化 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ 阴极不能达到 2M167 型磁控管 900 W 的微波输出功率的要求, 主要原因在于这种阴极材料没有达到钨钨阴极材料发射水平, 从而使磁控管阴极发射电流不足, 造成微波输出不足。在深入研究稀土钨阴极材料发射机理的基础上, 进一步提高稀土钨阴极材料的发射能力, 才能真正实现代替钨钨阴极材料。同时, 在开发新型磁控管用稀土材料阴极时, 还应保证阴极材料具有较宽的工作温度, 才能避免由于电子回轰而引起的阴极过热。

5 结论

- 1) 在约 1 450 $^{\circ}\text{C}$ 苯蒸汽中碳化 4 min, $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ 阴极碳化效果良好, 可以获得 10%~ 18% 的碳化度。
- 2) 采用合理的去气工艺和约 1 580 $^{\circ}\text{C}$ 的阴极激活工艺, 获得了反映碳化 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ 阴极发射水平的磁控管。
- 3) 采用同样规格的碳化 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ 阴极, 只能获得约 500 W 的微波能量输出, 而碳化 Th $\text{O}_2\text{-W}$ 阴极的标准是 900 W。微波输出能量不足的主要原因在于碳化 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ 阴极达不到 Th-W 阴极的电子发射能力。

[REFERENCES]

[1] 余菊美, 侯德亭. 微波炉加热的物理原理 [J]. 物理通报, 1998(3): 45.
YU Jurmei, HOU De-ting. Microwave oven heating physics principle [J]. Physics bulletin, 1998, 3: 45.

[2] 周康生. 家用微波炉的结构、原理和维修 [J]. 电子技术, 1992, 327(7): 39.
ZHOU Kang-sheng. Structure, principle and maintain of civil microwave oven [J]. Electronic technology, 1992, 327(7): 39.

[3] ZHANG Jir-xing, LIU Lu. Fracture toughness of sin-

- tered Mo-La₂O₃ alloy and the toughening mechanism [J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 1999, 17: 405–409.
- [4] ZHANG Jiu-xing, NI Zuoren. Advances in Mo-Re₂O₃ thermionic cathode [J]. Materials, Applied Surface Science, 1999, 146: 117–119.
- [5] NIE Zuoren, ZHOU Meiling. Thermionic emission of carbonized La-Mo cathode [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 1999, 9(2): 230–234.
- [6] 聂祚仁, 周美玲. Mo-Y₂O₃ 阴极的热电子发射性能 [J]. 中国稀土学报, 1998, 16(1): 80–83.
- NIE Zuoren, ZHOU Meiling. Thermionic emission properties of Mo-Y₂O₃ cathode [J]. J of the Chinese Rare Earth Society, 1998, 16(1): 80–83.
- [7] WANG Jiu-shu, ZHOU Meiling. Emission mechanism of Mo-Y₂O₃ cathode [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2000, 10(5): 576–580.
- [8] 电子管设计手册编辑委员会. 磁控管设计手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1979. 16–20, 207–211.
- Vacuum Tube Design Book Compile Committee. Magnetron Design book [M]. Beijing: National Defence Industry Publish Company, 1979. 16–20, 207–211.
- [9] 承欢, 江剑平. 阴极电子学 [M]. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1986. 46–50.
- CHENG Huan, JIANG Jianping. Cathode Electronics [M]. Xi'an: Xidian University Publish Company, 1986. 46–50.
- [10] Buxbaum C, Gessinger G. Lanthanum cathode [P]. US 4083811, 1978.
- [11] 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. 57–71.
- Vacuum Tube Design Book Compile Committee. Vacuum Tube Design Book [M]. Beijing: National Defence Industry Publish Company, 1980. 57–71.
- [12] 聂祚仁, 周美玲. 稀土钼阴极材料的进展 [J]. 材料导报, 1999, 13(5): 20–21.
- NIE Zuoren, ZHOU Meiling. Recent development of rare earth molybdenum cathode [J]. 1999, 13(5): 20–21.
- [13] Weissler G L, Carlson R W. 国强译. 真空物理和技术 [M]. 北京: 原子能出版社, 1979. 15–20.
- Weissler G L, Carlson R W. GUO Qiang trans. Vacuum Physics and Technology [M]. Beijing: Atomic Energy Publish Company, 1979. 15–20.

Carbonized La₂O₃-Mo cathode for civil microwave oven magnetron

LUO Feng-hua, ZHOU Meiling, ZUO Tie-yong

(School of material Science and Engineering, Beijing polytechnic University,
Beijing 100022, China)

[Abstract] Carbonized La₂O₃-Mo cathode applied in civil microwave oven magnetron was studied. Referred to carbonized ThO₂-W cathode, the carbonizing techniques of La₂O₃-Mo cathode and exhausting, activating process of carbonized La₂O₃-Mo cathode magnetron were made. Compared to 900 W microwave energy output of same type carbonized ThO₂-W cathode magnetron, only 500 W microwave output can be acquired for carbonized La₂O₃-Mo cathode. It is pointed out that the limited microwave energy output is brought by the lower electron emission ability of carbonized La₂O₃-Mo cathode.

[Key words] rare earth molybdenum; magnetron; microwave oven

(编辑 杨 兵)