



·高功率微波技术·

钡-钨阴极的组织特性与热电子发射性能*

王子玉, 尚吉花, 杨新宇, 张久兴

(合肥工业大学 材料科学与工程学院, 合肥 230009)

摘 要: 利用正交试验探讨了放电等离子技术工艺参数(温度、压力、保温时间)对钡-钨(Ba-W)阴极中的 W 的孔隙度的影响规律, 获得了孔隙率在 23%~30% 内变化时所需要的最佳工艺参数。在此基础上, 制备出了具有不同孔隙度的球形 W 基体和普通不规则的 W 基体。研究表明: 球形多孔 W 颗粒间堆积、排列有序, 无闭孔, 孔径分布集中而均匀, 在 26.3% 的孔隙度下中值孔径为 1.41 μm ; 机械性能方面, 球形钨粉基体维氏硬度低于传统普通不规则钨多孔体。在脉宽 10 μs 、频率 1000 Hz 的条件下, 阴极脉冲发射电流密度随着孔隙度的增大, 先增大后减小。当基体孔隙度为 26.3% 时, 阴极电流发射密度最大, 在 1050 $^{\circ}\text{C}$, 偏离点发射电流密度可达 24.62 A/cm^2 , 零场发射电流密度为 7.62 A/cm^2 , 功函数为 1.95 eV。

关键词: 放电等离子技术; 钡-钨阴极; 球形钨粉; 孔隙度; 热发射性能

中图分类号: TF125

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.200335

Microstructure characterization and thermionic emission performance of barium-tungsten cathode

Wang Ziyu, Shang Jihua, Yang Xinyu, Zhang Jiuxing

(School of Material Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The effect of the parameters (sintering temperature, pressure, holding time) of spark plasma sintering technique on the W porosity of Ba-W cathode was studied by orthogonal method. When the W porosity varied in the range of 23%–30%, the corresponding process parameters were obtained. On this basis, the spherical and traditional irregular W matrix with different porosity were sintered. The results show that the spherical porous W particles were packed and arranged orderly, and the pore size distribution was concentrated and uniform. When the porosity of spherical W was 26.3%, the size of the median pore was 1.41 μm . The vickers hardness of spherical tungsten matrix was lower than that of conventional irregular tungsten matrix. Under the condition of pulse width 10 μs and frequency 1000 Hz, the impulse current density of Ba-W cathode increased at first and then decreased with the increase in porosity. The maximum current density belonged to the Ba-W cathode with the matrix porosity of 26.3%. At 1050 $^{\circ}\text{C}$, the off-point emission current density of Ba-W cathode reached 24.62 A/cm^2 , the corresponding zero-field current density and workfunction were 7.62 A/cm^2 and 1.95 eV, respectively.

Key words: spark plasma sintering; barium-tungsten cathode; spherical tungsten powders; porosity; thermionic emission property

钡-钨(Ba-W)阴极由于其高脉冲电流发射密度、长使用寿命、耐离子轰击以及抗中毒能力被广泛应用于现代微波真空电子器件中, 为回旋行波管、强流直线感应加速器、速调管等器件提供源源不断的电子, 是真空电子设备的核心部件^[1-4]。钡-钨阴极是利用钨基体的多孔特性, 将活性物质储备在钨海绵体中, 在工作条件下, 盐与钨基体发生反应, 被还原出的自由钡沿孔隙扩散至阴极表面形成稳定的发射^[5-7]。通常钡-钨阴极的性能主要由两方面决定: 多孔钨基体以及填充在基体孔隙间的活性物质——盐。目前钡-钨阴极所使用的盐为 BaO, CaO, Al₂O₃ 按一定比例混合而成的铝酸盐。对盐的研究主要集中在改善盐的状态、含量和成分方面^[8-10], 特别是钪的加入, 使得阴极

* 收稿日期: 2020-12-14; 修订日期: 2021-03-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51501051)

作者简介: 王子玉(1995—), 男, 硕士研究生, 从事钡钨阴极材料研究。

通信作者: 杨新宇(1984—), 男, 副教授, 主要从事功能材料研究。

在 1030 °C 时电流密度高达 400 A/cm²[9], 然而这种盐的发射均匀性、寿命、控制等方面还有待改善。对多孔钨基体的研究主要集中在研究钨粉粒径、形貌和基体孔隙率对基体的微观特性(如孔径大小、孔径分布、孔径连通性)的影响, 进而影响阴极发射面的扩散、分布与覆盖状态, 最终对阴极性能产生影响[11]。P. Melnikova 在传统阴极基体制备方法的基础上研究了不同晶粒形貌钨粉的粒度、分布和基体参数对阴极电子发射能力以及使用寿命的影响, 认为等轴多面体晶粒形貌对于阴极性能最优[12], 然而传统阴极基体制备方法时间周期长, 工序繁多; Singh 等人使用直径 50 μm 钨丝束制作阴极基体, 引入了垂直开放式的柱状孔隙, 这有助于盐的扩散促进发射, 脉冲发射比传统 B 型阴极高出两倍[13], 钨束丝基体制备法虽然性能优良但工艺复杂、技术难度高; 为改善钨基体的特性, 胡可等人采用球形钨粉制备阴极基体, 基体孔隙结构与分布得到显著改善, 开孔率提高, 1050 °C 下饱和脉冲发射电流达 11.2 A/cm²[14], 但其研究主要集中在钨粉的球化方面, 对球形钨基体的特性与热发射性能之间的关系还有待进一步研究。

钡-钨阴极的热发射性能与基体孔隙度存在关系, 孔隙度通过影响活性物质的浸渍, 以及阴极工作过程中钡原子的扩散迁移影响发射电流密度, 孔隙度过小, 基体中会存在闭孔, 影响活性物质浸入, 同时钡原子的扩散路径受阻, 导致表面钡原子减少, 影响发射; 孔隙度过大, 活性物质蒸发量变大, 也会影响发射[15]。因此, 选取合适的基体孔隙度对于阴极制备至关重要。本文首先通过正交工艺设计与实验结合的方法, 获得了所需孔隙度最佳的工艺条件, 然后采用放电等离子烧结法一步制备具有不同孔隙率的球形和普通多孔钨基体, 然后系统的考察钡-钨阴极的微观组织特性和热发射性能。

1 实 验

采用中值粒径相近、纯度 99.95% 的球形钨粉与普通不规则形貌钨粉为原料。图 1(a)、图 1(b) 分别为球形钨粉和普通不规则钨粉。可以看出, 球形钨粉球形度高、颗粒表面较光滑、分散性良好; 普通钨粉颗粒形状不规则, 存在团聚现象。钨粉粒径会对基体和孔隙产生影响[16], 粒径过小会造成粉末表面能较高, 而且粉末容易团聚, 不利于形状稳定、长使用寿命阴极的制备, 也会使基体形成封闭孔; 粒径过大, 孔隙也会变大, 蒸发增大, 影响阴极性能[15]。相关研究表明, 高发射阴极的钨粉粒径为 4~6 μm[12], 本文所用钨粉粒径约为 6 μm, 图 1(c) 为两种原料粉末的激光粒度分布图。由图可知, 两种粉末颗粒的中值粒径均约为 6 μm, 两者相比之下球形钨粉粒径分布更为集中。图 1(d) 为两种原料粉末的 XRD 图谱, 图谱中检测到的均为纯钨相, 未引入其他杂质。

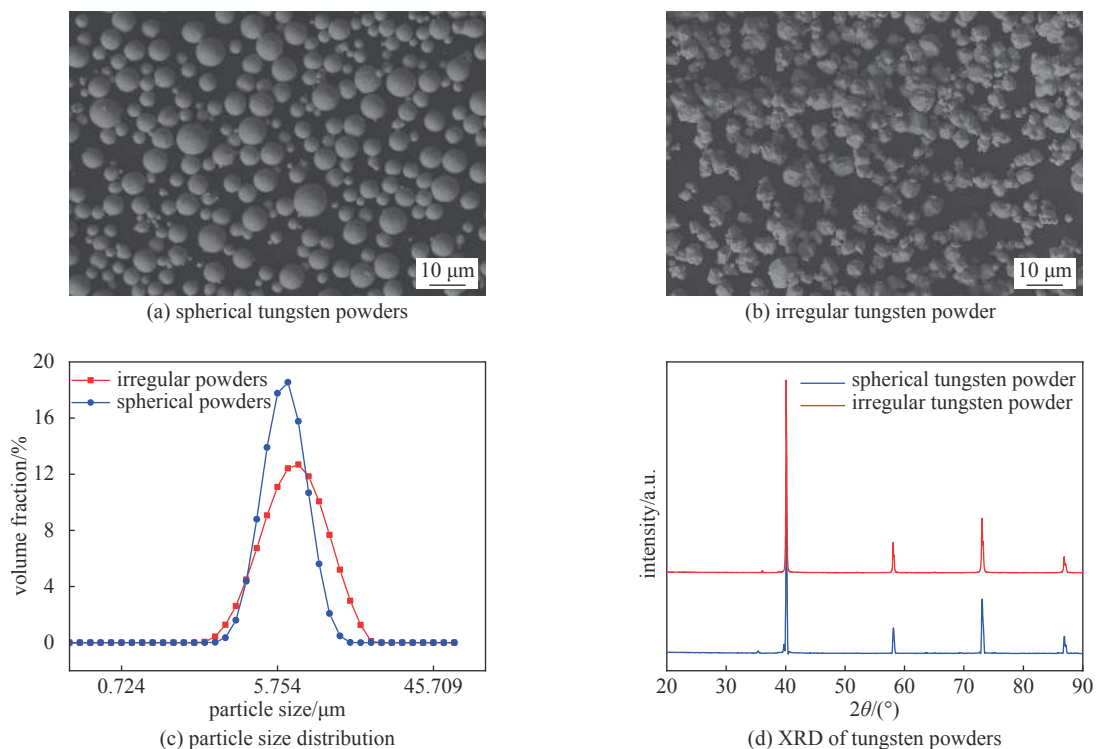


Fig. 1 Two kinds of raw material powder and their particle size distribution

图 1 原料粉末与粒度分布

粉末的致密化过程是在放电等离子烧结系统(Japan Sinter Land Inc.)中完成的。放电等离子烧结技术(SPS)作为一种新型粉末冶金烧结技术,近年来广泛应用于各种陶瓷材料、硬质合金和复合材料的制备中。不同于传统冷等静压和氢气气氛烧结的阴极基体制备方法,采用该技术通过大功率直流脉冲电流在粉末颗粒间产生等离子体,粉末颗粒间的瞬时温度可大于烧结温度数倍,甚至达上万度,在此效应下,颗粒表面迅速熔融联结而成烧结颈,这种点与点直接的“焊接”效应对于多孔体孔道的形成以及内部孔道的相互贯通有着积极的促进作用^[17-20]。

烧结过程中,烧结温度为 1500~1700 °C,压力 15~25 MPa,保温时间设定在 3 min 内。烧结完成后,使用不同目数的金刚石砂纸和抛光台对基体进行金相处理。将抛光后的样品在室温下用 1:1 的 H₂O₂(30%):NH₄OH(25%~28%)刻蚀液刻蚀 3 min 打开表面孔隙,然后在高温氢气炉中净化以去除刻蚀过程中引入的杂质。将基体在 1700~1800 °C 下的高温氢气炉中浸渍 6-1-2 铝酸盐。再对浸渍后的多孔钨基体使用砂纸进行金相处理去除表面多余的浸渍物,最后将阴极发射面进行等离子刻蚀后镀覆一层厚度约为 0.5 μm 的钨膜。

采用激光粒度分析仪(Malvern MS-2000)对原料粉末粒度进行分析。采用 X 射线衍射仪(Rigaku-SmartLab3KW)对原料粉末进行物相分析。采用阿基米德法测量致密度,进而求得孔隙度。采用压汞仪(Poremaster GT-60, Quantachrome Inc.)对多孔体进行孔径分布测试。使用扫描电子显微镜(SEM)(Zeiss Sigma-300)对粉末和多孔体的微观形貌进行表征。使用能谱仪(EDS)进行元素成分分析。使用维氏硬度计(DHV-1000Z)测量多孔体硬度。采用电子发射材料测试系统(QX-350)测试阴极的热发射性质,阴极与阳极间的距离为 0.8 mm,采用脉冲方式测量热发射电流密度,脉冲宽度为 10 μs,频率为 1000 Hz。

2 实验结果与讨论

2.1 正交试验

正交试验是一种常用的多因素多水平工艺优化试验设计和分析方法,它以概率论、数理统计和实践经验为基础,利用标准化正交试验设计优化试验方案,可以高效、快速、简单地找到试验优化方案^[21]。为探究烧结过程中各烧结参数(温度、保温时间、压力)对于孔隙度的影响程度以及找到最佳烧结条件,设计了以温度(A)、保温时间(B)、压力(C)为关键参数的正交试验,前期研究和相关报道表明孔隙度 18%~32% 的钨基体具有较好的发射性能^[11, 14, 22-23],本文以孔隙度为 23% 的多孔体作为目标孔隙率,制备样品尺寸为 φ20 mm×5 mm 的圆柱体,综合考虑温度 1500~1700 °C、保温时间 1~3 min、压力 15~25 MPa 的影响,正交试验因素水平如表 1 所示。

表 1 参数因素水平

Table 1 Parametric factor level

level	temperature/°C	holding time/min	pressure/MPa
1	1500	1	15
2	1600	2	20
3	1700	3	25

正交试验采用 L₉(3⁴)型正交表,试验方案与结果如表 2 所示,表中 A, B, C 即为表 1 中所对应三种影响因素,Error 列为冗余无关项,下同。可以看出,各因素对于多孔体孔隙度均会产生影响,随着烧结温度、保温时间以及压力的增加,多孔体逐渐致密化,孔隙率减小。

表 2 正交试验方案及结果

Table 2 Orthogonal experimental results

number	A	B	C	error	porosity/%
1	1500	1	15	1	28.34
2	1500	2	20	2	25.33
3	1500	3	25	3	21.00
4	1600	2	15	3	22.05
5	1600	3	20	1	19.56
6	1600	1	25	2	21.97
7	1700	3	15	2	19.46
8	1700	1	20	3	18.15
9	1700	2	25	1	15.97

对表 2 进行极差分析结果如表 3 所示,表中 K 为各因素水平的结果加和, R 为各因素的极差。比较各影响因子的极差 R 可发现温度影响因子所对应的极差最大,压力次之,保温时间的极差最小,说明放电等离子烧结中温度对于孔隙度的影响最大,压力和保温时间的影响水平居后递减。表 3 中各影响因子 K 值均值与目标孔隙度差值最小,所对应的水平即为该影响因素下的最优水平,因此据表可知各因素的最优水平为 A2B1C1,即孔隙度为 23% 的多孔体对应的最佳烧结条件为温度 1600 °C、保温时间 1 min、压力 15 MPa。

表 3 正交试验极差分析
Table 3 Orthogonal experiment range analysis

	A	B	C	error
	74.67	68.46	69.85	63.87
K	63.58	63.35	63.04	66.76
	53.58	60.02	58.94	61.20
R	21.09	8.44	10.91	5.56

为验证表 3 中极差分析的结果,再对表 2 进行方差分析,得到如表 4 所示的方差分析表。方差分析又称为变异数检验或 F 检验,是一种将不同因素水平变化所引起的试验结果间的差异与误差波动所致的试验结果间的差异区分开的数学统计方法。对于表 4 中, S_A 为各因素的偏差平方和; f 为自由度; α 为置信度; F 为因素的均方差与误差的均方差比值,其比值越大表示该因素对评定指标的影响越显著。

表 4 正交试验方差分析,各因素偏差平方和 (S_A)、自由度 (f) 与置信度 (α)

Table 4 Orthogonal experiment variance analysis, sum of variance (S_A), degree of freedom (f) and confidence (α) of each factor

source	S_A	f	F	α	degree
temperature(A)	74.20	2	14.39	0.1	high
holding Time(B)	12.05	2	2.34	0.25	low
pressure(C)	20.25	2	3.93	0.25	middle
error	5.16	2			
SUM	111.66	8			

标准 F 检验临界值表所得置信度分别为 0.1 与 0.25,其 F_α 临界值为 $F_{0.1}(2, 2) = 9$, $F_{0.25}(2, 2) = 3$,该值与表 4 中的 F 值相比可以看出对于因素 A(温度) $F > F_{0.1}$,因此温度对于多孔体孔隙度的影响最为显著;对于因素 C(压力) $F_{0.1} > F > F_{0.25}$,因此压力对于多孔体孔隙度有一定影响;对于因素 B(保温时间) $F < F_{0.25}$,因此保温时间对于多孔体孔隙度影响相对较弱。方差分析结论与极差分析一致。

经正交试验分析,放电等离子烧结多孔体过程中,温度、压力、保温时间对于多孔体孔隙度的影响显著性依次递减;对于 23% 孔隙度多孔钨基体,最佳烧结条件为 1600 °C, 15 MPa、保温 1 min。同理,本文通过正交实验法分别得到了孔隙度分别为 26%, 30% 时,所需要的烧结工艺参数分别为 1500 °C, 20 MPa, 保温 2 min($\phi 25$ mm \times 5 mm); 1500 °C, 15 MPa, 1 min($\phi 25$ mm \times 5 mm),制备得到了孔隙度分别约为 23%, 26%, 30% 的多孔钨基体,并以此为对象,研究基体性能以及制备而成的钨-钨阴极热发射性能。

2.2 多孔钨基体性能

图 2 是多孔钨基体的放电等离子烧结曲线,图 2(a) 是一个典型的温度位移量随着时间变化的烧结曲线,烧结体经历升温、保温与冷却阶段完成了从粉末到多孔钨基体的制备过程。在烧结初期的升温阶段,粉坯位移量随着温度升高而不断增大,这是因为钨粉粉体本身受热膨胀,同时升温速率快,粉末内气体排放受阻,气体分子内能增大使烧结体产生膨胀,位移增大。随着温度进一步升高至 1200 °C 时,粉末内大量气体已经排出,钨粉受热软化,相比低温下其塑性得到提升,在热能与机械能的共同作用下,烧结体高温塑性变形,位移减小不断致密化,并一直持续至烧结完成。图 2(b) 球形钨粉与普通钨粉的烧结行为对比,可以看出,普通不规则粉末在烧结至约 1000 °C 时,完成了主要的膨胀阶段,位移开始保持恒定,这是粉末的线性膨胀与烧结体的致密收缩保持平衡所致;温度继续升高,烧结体会再次经历一个短暂的膨胀期,这是由于烧结体内粉末颗粒形貌的不规则形成了一定的封闭孔阻碍气体排出;当温度再升高,烧结体开始出现明显的致密化收缩现象。而球形粉末的热膨胀阶段则会一直持续

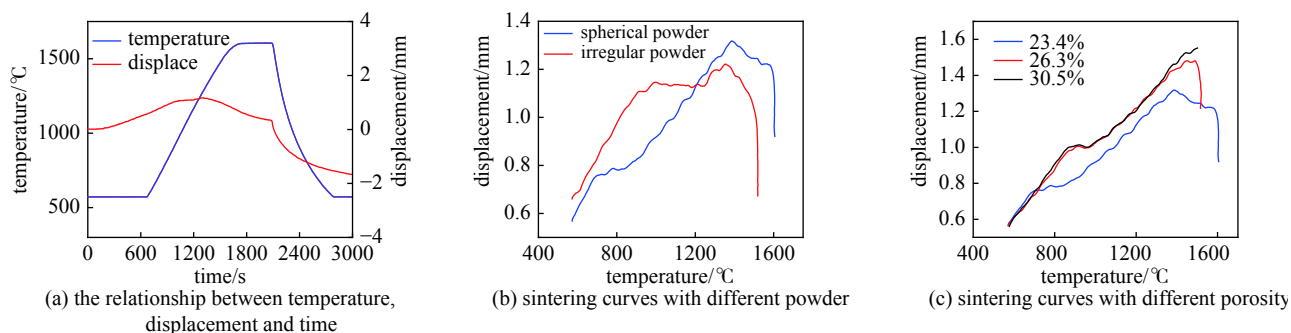


Fig. 2 Spark plasma sintering curves

图2 放电等离子烧结曲线

到约 1350 °C, 这是由于球形粉末的表面积更小, 其在烧结过程中所需的烧结活化能更高, 所以致密化温度也更高。并且由于球形粉末形貌规则, 堆积性能好, 粉末颗粒间已充分堆积排列, 所以在致密化过程中收缩量比普通不规则粉末低。图 2(c) 制备得到的三种孔隙度球形钨基体的烧结曲线对比, 由图可知, 随着孔隙度的升高和致密度的降低, 烧结体位移收缩量不断减小。高孔隙率基体, 在烧结体还未进行致密化收缩时便停止烧结, 故位移收缩量小; 低孔隙率基体对于烧结体致密化程度要求高, 烧结过程中压力大、保温时间长, 位移收缩量大。

图 3 为球形钨粉与普通不规则钨粉经放电等离子烧结后得到的多孔钨基体断面组织。从图 3 中可以看出, 使用球形钨粉制备的多孔钨基体孔隙更加规则, 孔隙分布更均匀, 粉末颗粒间的堆积、排列和连接更具规律, 在烧结过程中形成的烧结颈十分明显; 普通粉末烧结而成的多孔体, 在空间结构上更加复杂, 孔径的分布与均一性不如前者, 粉末颗粒间的紧凑程度更高。由此可见, 粉末形貌对于多孔体的微观结构有很大影响, 由于球形粉末具有良好的分散性、流动性和堆积性能, 其在烧结过程中可以堆积形成更加规则的空间结构, 形成大小适宜且分布均匀的孔隙, 粉末颗粒间的烧结颈尺寸均匀, 在各粉末颗粒与烧结颈之间即为相互连通的多孔孔隙, 这使得球形钨粉烧结而成的多孔钨基体具有良好的孔隙结构。

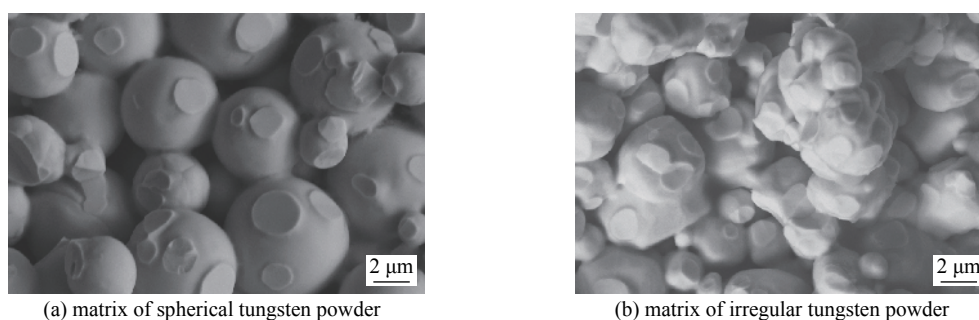


Fig. 3 Microstructures of the porous tungsten matrix

图3 多孔体基体微观组织形貌

图 4 为不同形貌钨粉制备的孔隙度为 26% 的多孔钨基体的孔径分布。从图 4 中可以看出, 通过 SPS 制备的多孔体孔隙分布窄而集中, 两种基体的中值孔径分别为 1.16 μm, 1.41 μm。球形钨粉多孔基体的中值孔径明显大于普通不规则钨粉基体, 平均孔径大小也更大, 并且球形基体整体孔径分布区间更窄、更集中, 整体孔隙结构更好。

图 5 为球形钨粉与普通不规则钨粉烧结多孔体不同孔隙度下的维氏硬度表征。首先, 多孔体的硬度随着孔隙度的上升而递减。其次, 在相同孔隙度下, 普通粉末烧结而成的多孔体硬度要高于球形钨多孔体, 这是由于普通钨粉颗粒形貌不规则, 粉末颗粒间的紧促程度要明显高于球形钨粉, 因此硬度更高。

图 6(a) 为球形多孔钨基体浸盐后的表面微观组织形貌 BSE 成像图。根据背散射电子成像原理, 图中浅色区域因为原子序数较大的元素(钨), 深色区域为原子序数较小的元素(铝酸盐)。由图 6(a) 可知, 基体内部孔隙得到充分填充, 在球形基体浸渍体当中, 球形粉末颗粒形状规则排列均匀, 在磨抛过程相较于浸渍物更难被打磨, 表面平整度相对较差, 因而造成了其图像存在一定的阴影衬度。对深色区域谱点 1 进行能谱成分分析得到图 6(b) 所示的 EDS 图谱, 通过谱图与元素定量分析结果显示各元素成分均可被检测到, 表明盐已被成功浸入多孔基体内, 这是浸渍时钨基体通过毛细作用将熔融状态的铝酸盐自发地吸入孔隙内。

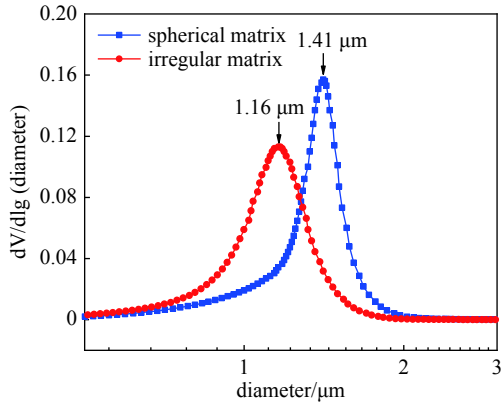


Fig. 4 Pore size distribution of matrix

图 4 基体孔径分布

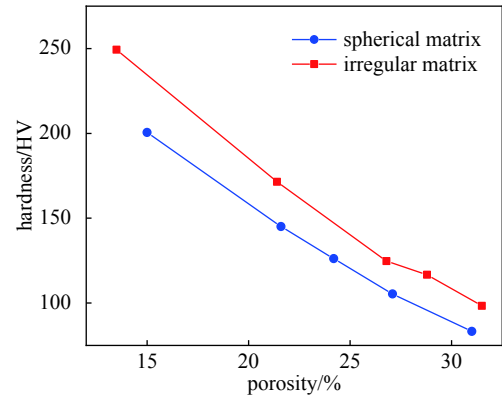
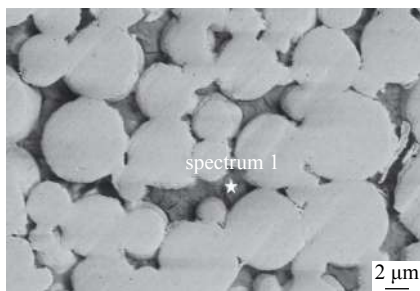
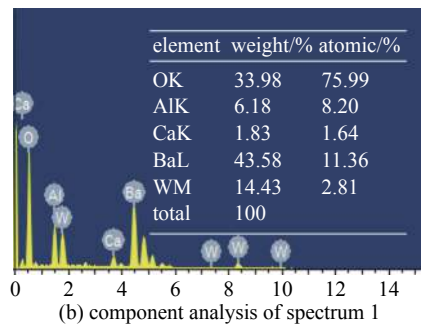


Fig. 5 Vickers hardness of matrix

图 5 基体维氏硬度



(a) microstructure of the impregnated matrix



(b) component analysis of spectrum 1

Fig. 6 Microstructure and component analysis of the impregnated matrix

图 6 浸渍基体微观组织形貌与元素分析

2.3 钡钨阴极发射性能

图 7 为不同孔隙度球形钨粉基体制备得到的钡-钨阴极的伏安特性曲线。其中, 图 7(a) 为 1050 °C 下 3 种孔隙度阴极的伏安特性曲线, 由图 7(a) 可以看出, 孔隙度对于阴极发射性能影响显著, 其中 26.3% 的孔隙度阴极电流发射密度明显高于其他两种孔隙度的阴极。图 7(b) 为孔隙度 26.3% 的球形基体阴极在不同温度下的伏安特性曲线, 由图 7(b) 可知, 随着温度升高, 阴极整体电流发射密度也不断增大。在 950 °C 下, 阴极的空间电荷限制区较小, 电流发射密度的偏离点来临较早, 约在 1000 V 到达偏离点 (也称拐点, 即空间电荷限制区与加速场区分界点), 而后进入加速场区, 发射电流密度增加放缓; 随着温度的增加, 空间电荷限制区增大, 偏离点向着高电压区域漂移。表 5 给出了不同孔隙度球形钨粉阴极在不同工作温度下的偏离点电流密度。由表 5 可知, 各阴极的偏离点电流密度均随着温度的升高而增大, 在 900 °C 时, 23.4% 的球形基体钡-钨阴极偏离点电流密度为 8.42 A/cm², 当温度进一步升高至 1000 °C, 1050 °C 和 1100 °C 时, 偏离点电流密度分别为 10.66, 12.37 和 13.95 A/cm²。对比各孔隙度的球形基体钡-钨阴极可知: 钡-钨阴极发射电流密度与孔隙度相关, 随着基体孔隙度的升高, 电流发射密度先增加后减少, 在本实验中, 当基体孔隙度为 26.3% 时, 阴极发射性能最好, 在工作温度 1050 °C 时, 偏离点电流密度可达 24.62 A/cm²。

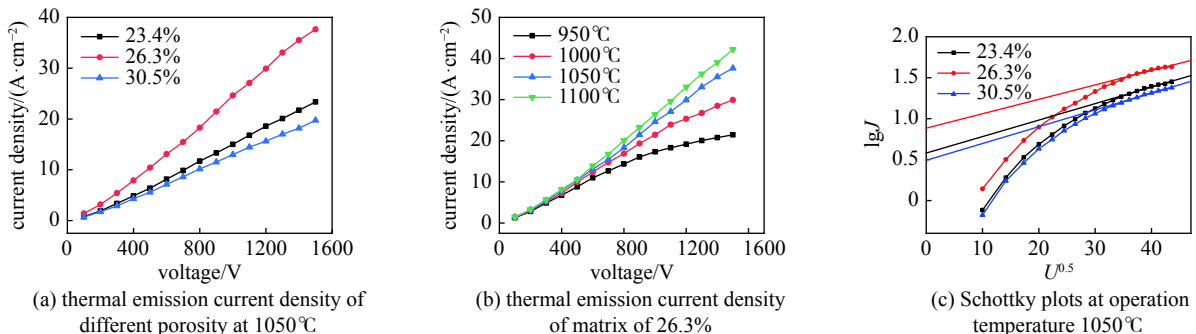


Fig. 7 Volt-ampere characteristics and Schottky curve of cathode thermal emission performance

图 7 阴极热发射性能伏安特性与肖特基曲线

表 5 不同温度与孔隙度阴极偏离点电流密度
Table 5 Cathode deviation point values of different temperature and porosity

temperature/℃	J_{dev} with different spherical matrix cathode/(A·cm ⁻²)		
	23.4%	26.3%	30.5%
900	8.42	10.27	8.60
1000	10.66	14.77	11.43
1050	12.37	24.62	13.00
1100	13.95	33.07	14.56

图 7(c)为不同孔隙度球形基体阴极在 1050 ℃ 下的肖特基曲线,通过反向延长肖特基区域至外加电压为零时可以得到 $\lg J_0$,进而求得零场电流发射密度 J_0 与有效功函数 Φ ,阴极的零场发射电流密度 J_0 由肖特基方程确定^[2]

$$\lg J = \lg J_0 + 0.191 \frac{\sqrt{a}}{T} \sqrt{U} \quad (1)$$

式中: a 为二极管结构常数; U 为外加脉冲电压; J 为实际电流密度; T 为阴极工作温度。其中有效功函数可以根据 Richardson-Dushman 方程计算^[2],即

$$\Phi_e = -kT \ln(J_0/120.4T^2) \quad (2)$$

式中 k 是玻耳兹曼常数, $k=8.62 \times 10^{-5}$ eV/K。

其结果在表 6 中给出, 26.3% 孔隙度下的球形基体阴极零场电流密度最大且功函数最小, 发射性能最好。

表 6 1050 ℃ 下各阴极 J_0 与 Φ
Table 6 J_0 and Φ values of three cathodes after activated at 1050 ℃

activated temperature/℃	J_0 /(A·cm ⁻²)			Φ /eV		
	23.4%	26.3%	30.5%	23.4%	26.3%	30.5%
1050	3.79	7.62	3.10	2.03	1.95	2.05

3 结 论

(1) 放电等离子烧结多孔体过程中, 温度、压力、保温时间对于多孔体孔隙度的影响显著性依次递减, 各孔隙度对应的最佳烧结条件可通过正交试验确定。

(2) 与普通钨粉制备的多孔钨基体相比, 球形钨粉多孔钨基体结构性能更优异, 拥有更好的孔结构: 孔径分布窄而集中, 孔径更大, 在 26% 的孔隙度下中值孔径为 1.41 μm 。

(3) 与普通钨粉制备的多孔钨基体相比, 球形钨粉多孔钨基体在机械性能方面并不具备明显优势, 两者维氏硬度都随孔隙度升高而降低, 但球形多孔体要低于普通多孔钨基体。

(4) 钡-钨阴极发射电流密度与孔隙度相关, 随着基体孔隙度的升高, 电流发射密度先增加后减少, 在本实验中, 当基体孔隙度为 26.3% 时, 发射性能最优, 在工作温度 1050 ℃ 下, 阴极偏离点发射电流密度可达 24.62 A/cm², 零场发射电流密度为 7.62 A/cm², 功函数为 1.95 eV。

致 谢 感谢安徽华东光电技术研究有限公司给予的指导和帮助。

参考文献:

- [1] Thomas R E, Gibson J W, Haas G A, et al. Thermionic sources for high-brightness electron beams[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1990, 37(3): 850-861.
- [2] 林祖伦, 王小菊. 阴极电子学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013. (Lin Zulun, Wang Xiaojun. Cathode electronics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013)
- [3] Kirkwood D M, Gross S J, Balk T J, et al. Frontiers in thermionic cathode research[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018, 65(6): 2061-2071.
- [4] 李鹤. 扩散式钡钨阴极性能研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015. (Li He. Study on performance of impregnated dispenser cathode[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015)
- [5] Wang Xiaoxia, Chen Xiaojian, Zhang Shuai, et al. The work function of the ammonium perhenate impregnated W matrix Ba-W cathode[C]//Proceedings of the 2019 International Vacuum Electronics Conference (IVEC). 2019.
- [6] Li Jinglin, Zhao Weihua, Wei Jianjun, et al. Effect of BaO on the phase composition and properties of aluminates for Ba-W cathodes[J]. *Ceramics International*,

- 2019, 45(4): 4308-4315.
- [7] Shang Jihua, Yang Xinyu, Wang Ziyu, et al. Influence of the surface tungsten distribution on the emission properties of barium tungsten cathode[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2020, 67(6): 2580-2584.
- [8] Li Jinglin, Wei Jianjun, Feng Yongbao, et al. Effect of CaO on phase composition and properties of aluminates for barium tungsten cathode[J]. *Materials*, 2018, 11(8): 1380.
- [9] Gärtner G, Geittner P, Lydtin H, et al. Emission properties of top-layer scandate cathodes prepared by LAD[J]. *Applied Surface Science*, 1997, 111: 11-17.
- [10] Hu Mingwei, Wang Xiaoxia, Qi Shikai. Preparation, performance, and work function model of impregnated tungstate cathodes[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2019, 66(8): 3592-3598.
- [11] Wu Zhaohao. The relations of impregnated cathode properties to the tungsten matrix structure[J]. *Journal of Electronics (China)*, 1987, 4(4): 273-281.
- [12] Melnikova I P, Vorozheikin V G, Usanov D A. Correlation of emission capability and longevity of dispenser cathodes with characteristics of tungsten powders[J]. *Applied Surface Science*, 2003, 215(1/4): 59-64.
- [13] Singh A K, Ravi M, Bisht M S, et al. Study and development of active sintered controlled porosity dispenser cathode[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2015, 62(11): 3837-3843.
- [14] 胡可, 邱振涛, 杨新宇, 等. 等离子体球化处理和放电等离子烧结制备的钨钨阴极多孔钨基体[J]. *稀有金属材料与工程*, 2019, 48(2): 608-613. (Hu Ke, Qiu Zhentao, Yang Xinyu, et al. Porous tungsten matrix for Ba-W cathode prepared by plasma spheroidization process and spark plasma sintering[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2019, 48(2): 608-613)
- [15] Bao Jixiu, Wan Baofei. The tungsten powder study of the dispenser cathode[J]. *Applied Surface Science*, 2006, 252(16): 5873-5876.
- [16] Skorokhod V V, Get'Man O I, Zuev A E, et al. Correlation between the particle size, pore size, and porous structure of sintered tungsten[J]. *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 1988, 27(12): 941-947.
- [17] Deng Shenghua, Yuan Tiechui, Li Ruidi, et al. Spark plasma sintering of pure tungsten powder: densification kinetics and grain growth[J]. *Powder Technology*, 2017, 310: 264-271.
- [18] Qin Junhua, Chen Qing, Yang Chunyan, et al. Research process on property and application of metal porous materials[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 654: 39-44.
- [19] Dudina D V, Bokhonov B B, Olevsky E A. Fabrication of porous materials by spark plasma sintering: a review[J]. *Materials*, 2019, 12(3): 541-569.
- [20] Li Baoqiang, Sun Zhiqiang, Jin Huacheng, et al. Fabrication of homogeneous tungsten porous matrix using spherical tungsten powders prepared by thermal plasma spheroidization process[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2016, 59: 105-113.
- [21] 刘瑞江, 张业旺, 闻崇炜, 等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. *实验技术与管理*, 2010, 27(9): 52-55. (Liu Ruijiang, Zhang Yewang, Wen Chongwei, et al. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment[J]. *Experimental Technology and Management*, 2010, 27(9): 52-55)
- [22] 何学良. 扩散式钨钨阴极用钨基体材料的研究[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2018. (He Xueliang. Study on tungsten matrix material for diffusion barium tungsten cathode[D]. Beijing: General Research Institute for Nonferrous Metals, 2018)
- [23] Yin Shengyin, Zhang Zhaochuan, Peng Zhen, et al. A new impregnated dispenser cathode[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2013, 60(12): 4258-4262.