

钨铼钨三元混合基扩散阴极的制备及发射性能

方浩鑫, 刘伟, 杨韵斐, 周帆, 王金淑

(北京工业大学 新型功能材料教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要: 采用固液混合法制备出铼钨核壳粉体, 然后加入钨粉经预处理后制备出具有特殊包覆结构的三元混合粉体。粉体经过压制、烧结、浸渍、洗盐和退火等工艺制备出钨铼钨三元混合基阴极, 经过 411 盐浸渍后, 脉冲发射测试发现三元混合基阴极中成分为 $W_2Re_1Os_1$ 阴极的电子发射性能最好, 在 1050 °C 电流发射密度能够达到 35 A/cm², 电流发射密度略高于同类型的二元混合基阴极, 达到覆钨铼钨三元膜阴极的水平。通过实验验证在钨铼钨三元混合基阴极浸渍过程中, Re 和 Os 与活性盐均不发生反应, 活性物质是由 W 和活性盐反应产生的。

关键词: 混合基阴极; 电子发射; 钨铼钨

中图分类号: TN104.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2024)06-1718-08

真空电子器件经过 100 多年的发展, 在工业生产、国防、医疗等领域有着广泛的应用, 在粒子加速器、高功率全相雷达、医用及工业辐照加速器、微波武器、高功率太赫兹源、半导体检测等方面真空微波电子器件仍将起到主导作用^[1]。真空电子器件的工作原理是通过电磁场控制电子在真空中的运动, 核心部件是作为电子源的阴极^[2-3]。阴极电子发射的本质是材料内部电子受激发逸出表面, 根据激发方式的不同, 阴极可分为热阴极、场发射阴极、次级电子发射阴极以及光电阴极等^[4-7]。其中热阴极由于发射电流密度大, 是目前主流的高发射阴极。热阴极是通过给阴极材料加热的同时外加强电场, 使阴极内部电子的能量升高, 克服表面势垒定向跃迁至真空中。

在热阴极中, 在钨钨阴极上覆铼 (Os)、铱 (Ir)、铼 (Re) 和钌 (Ru) 等过渡金属膜层得到的 M 型阴极, 是目前应用数量最大、应用器件型号较多的一类阴极^[8-11]。目前 M 型阴极已有覆二元膜阴极和覆三元膜阴极, 同时有文献报道覆三元膜阴极的发射性能优于二元膜阴极^[12]。与钨钨阴极相比, M 型阴极的逸出功更低, 发射能力更强, 但 M 型阴极存在膜层不稳定易脱落的问题, 且在长时间的高温工作过程中, 过渡金属膜层会不断向基体内部扩散而损耗, 导致阴极发射性能下降, 影响真空电子器件的寿命^[13-14], M 型阴极还存在制备工艺复杂、生产设备造价高、成本高等问题^[15]。混合基阴极由于在基体烧结过程中形成了稳

定均匀的合金相, 能够避免覆膜层脱落对阴极发射寿命的影响。研究表明, 混合基阴极是一种很有潜力的阴极材料, 具有耐离子轰击、工作稳定性好、抗中毒性能好、寿命长等优点^[16], 因此三元混合基阴极克服了覆三元膜阴极的固有缺陷同时能够具有良好的发射性能。本工作在钨铼 (W-Re) 和钨钨 (W-Os) 二元混合基阴极的基础上研究了钨铼钨 (W-Re-Os) 三元混合基阴极。

1 实验

本实验采用固-液混合法法制备了不同钨含量的三元混合粉体 (代号分别为 $W_2Re_1Os_{0.5}$ 、 $W_2Re_1Os_1$ 、 $W_2Re_1Os_2$ 和 $W_2Re_1Os_3$)。首先将偏钨酸铵 (AMT) 置于马弗炉中 600 °C 下分解 4 h 得到三氧化钨 (WO_3), 随后将 30 g WO_3 粉放入管式炉, 高纯氢气气氛下 550 °C 保温 3 h; 5 °C/min 室温升温至 950 °C, 保温 3 h; 随炉冷却至室温, 得到粒径在 2~5 μm 的钨 (W) 粉。再将 W 粉与高铼酸铵 (NH_4ReO_4) 以 16:14.31 的摩尔比混匀, 取 30 g W 与 NH_4ReO_4 的混合粉加入适量去离子水和乙醇打成膏状放入管式炉中, 230 °C 保温 4 h; 缓慢升温至 450 °C 后保温 1 h, 随炉冷却至室温, 得到 Re-W 核壳粉体。在 Re-W 核壳粉体中加入亚微米级超细 Os 粉, 采用固固混合法混合均匀, 通过高温氢气炉 1300 °C 保温 20 min 进行预处理, 冷却至室温后得到 Re、Os 包覆 W 的三元混合粉体。

收稿日期: 2023-06-25

基金项目: JG 军用关键材料科研项目 (XXXX-XX-0743-2)

作者简介: 方浩鑫, 男, 1998 年生, 硕士, 北京工业大学新型功能材料教育部重点实验室, 北京 100124, E-mail: fanghx@emails.bjut.edu.cn

以 W-Re-Os 混合粉体为原料进行模压成型，得到直径为 3 mm 的基体生坯。将生坯置于高温氢气炉中，10 °C/min 升温至 1500 °C 保温 30 min，随后冷却至室温得到三元混合基阴极基体。将“411”铝酸钡钙盐 (BaO:CaO:Al₂O₃ 的摩尔比为 4:1:1, 411 盐) 均匀涂敷在阴极表面，在高温氢气炉中，10 °C/min 升至 1450 °C；3 min 迅速升至 1660 °C 保温 3 min；迅速降温至 1500 °C，随后随炉冷却至室温。取出后超声清洗去除阴极表面残盐，烘干后获得 W-Re-Os 混合基阴极。

采用日立 SU8020 扫描电镜进行样品微观形貌分析及 EDS 能谱分析。采用岛津 7000X 射线衍射仪 (Cu K α ($\lambda=0.15406$ nm) X 射线，工作电压 40 kV，电流 200 mA，扫描速度 10 °/min) 对样品进行物相测定。阴极电子发射性能测试在北京工业大学自行设计建立的动态真空平板二极管测试系统上进行。阴极在 1100 °C 激活 2~6 h，整个激活发射测试过程中，系统真空度优于 1×10^{-6} Pa，在 950~1100 °C 进行脉冲电子

发射测试。采用 0~1000 V 高压脉冲电源，提供 10 μ s、200 Hz 的方波脉冲。使用 KELLER PV11 型光学高温计直接测量阴极发射体的光学温度。利用 PHI Quantera SXM 型 X 射线光电子能谱仪对阴极表面微区的元素含量进行分析。

2 结果与讨论

2.1 W-Re-Os 混合粉体研究

图 1 为 W 粉和 Re-W 核壳粉体及不同 Os 含量的三元混合粉体形貌。结果显示，包覆粉体外观呈准球形，且颗粒之间和颗粒表面存在大量的裂纹，同时裂纹分布较均匀。从图 1c~1f 可发现三元混合粉体中 Os 粉会依附在 Re-W 核壳粉体表面，形成 Re、Os 包覆 W 的特殊核壳结构。

通过对 W₂Re₁Os₁ 的粉体进行 EDS 点扫，验证了三元混合粉体的核壳结构状态，点扫描选取位置如图 2 所示，EDS 点扫描分析结果见表 1。结果显示，颗粒表面的合金层中有 W、Re、Os 3 种元素，而内部的

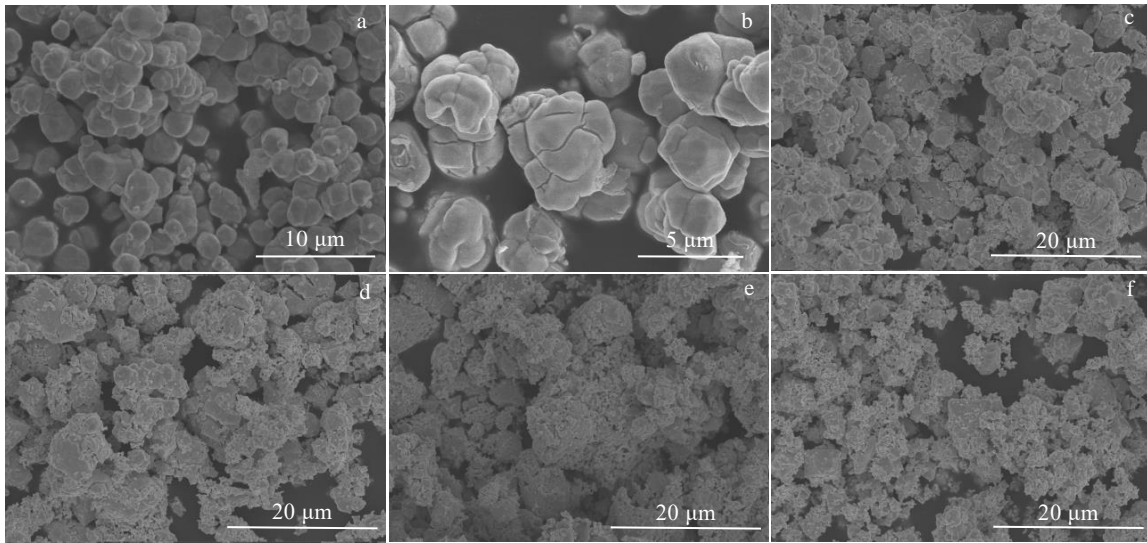


图 1 W 粉和 Re-W 核壳粉体及不同 Os 含量的三元混合粉体形貌

Fig.1 Morphologies of tungsten powder, rhenium-tungsten core-shell powder and ternary mixed powder with different Os contents: (a) W, (b) W₂Re₁, (c) W₂Re₁Os_{0.5}, (d) W₂Re₁Os₁, (e) W₂Re₁Os₂, and (f) W₂Re₁Os₃

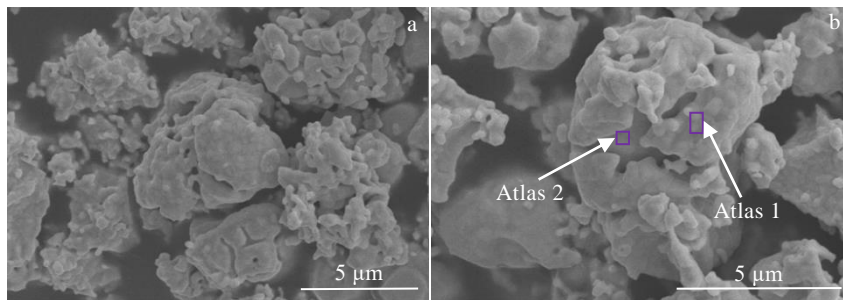


图 2 W₂Re₁Os₁ 三元混合粉体在 1300 °C 预处理后 EDS 点扫描位置

Fig.2 EDS spot scanning position of W₂Re₁Os₁ ternary mixed powder after pretreatment at 1300 °C

表 1 图 2b 中 EDS 元素点扫分析结果

Table 1 EDS element spot scanning analysis in Fig.2b (at%)

Element	Atlas 1	Atlas 2
W	10	100
Re	68.65	0
Os	21.35	0

颗粒中只有 W 元素，表明此时已经形成 Re、Os 包覆 W 的核壳结构，同时包覆层厚度较为均匀，并且已有部分的 W 元素扩散到 Re、Os 壳层表面，但是 Re 和 Os 并没有向 W 中扩散。

2.2 三元混合基阴极的制备与研究

2.2.1 三元混合基阴极基体的制备与研究

将三元混合粉体用于制备 W-Re-Os 三元混合基扩散阴极。首先称取质量为 0.125 g 的粉体装入直径 3 mm 的模具中，采用 0.8 MPa 的压制压力双向模压成型，保压时间 25 s，获得高度 1.5~1.7 mm 的混合基阴极基体生坯。阴极基体生坯表面平整，边缘无明显掉边现象可用于下一步烧结。

将三元混合基生坯置于高温氢气炉中在 1500 °C 烧结 30 min，烧结成型得到三元混合基阴极基体。基体的形貌如图 3 所示。结果显示，随着 Os 含量的增加，基体中出现形成岛状结构的趋势，并且 Os 含量较高时，部分 Os 倾向于聚成细小的 Os 球分布在 Re-W 颗粒的缝隙处。W、Re、Os 比例为 2:1:0.5 和 2:1:1 的

基体表面孔隙结构良好，这也证明三元混合基阴极中 Os 的含量不宜过高。

对不同 Os 含量的三元混合基基体做 XRD 分析，明确了三元混合基基体的物相组成，其结果如图 4。结果显示基体中主要物相均为单质相，基体中的合金相含量较少，这能够为浸渍阶段提供更多的 W，有利于 W 和活性盐反应产生阴极发射所需的活性物质。将结果与 W、Re、Os 的 XRD 标准卡片对比，发现 W 的峰向右偏移，Re 峰不发生偏移，Os 峰向左偏移，说明原子半径较小的 Re 和 Os 在基体烧结阶段扩散到 W 单质中形成 bcc 相固溶体。

2.2.2 三元混合基阴极微观形貌及物相分析

为了探究三元混合基阴极的电子发射机制，首先在扫描电子显微镜下观察不同成分的三元混合基阴极，其结果如图 5 所示，阴极表面上有较多的纳米粒子，众多学者研究认为阴极表面的纳米粒子是对阴极发射性能有利的因素。结果显示，随着 Os 含量的增加阴极表面的孔隙率不断降低，通过排水法计算阴极基体孔隙率也能得到进一步证实，基体的孔隙率较小会影响活性盐的浸渍以及阴极工作过程中活性盐的扩散，若孔隙率过大则会降低阴极的有效发射面积，从而影响电流发射密度。图 5a 所示的 $W_2Re_1Os_{0.5}$ 阴极中孔隙率较大，这成为导致该阴极电流发射密度较小的原因之一；图 5c、5d 所示的 $W_2Re_1Os_2$ 、 $W_2Re_1Os_3$ 随着孔隙率的降低使得阴极中活性物质不足也使得发射性能较差。

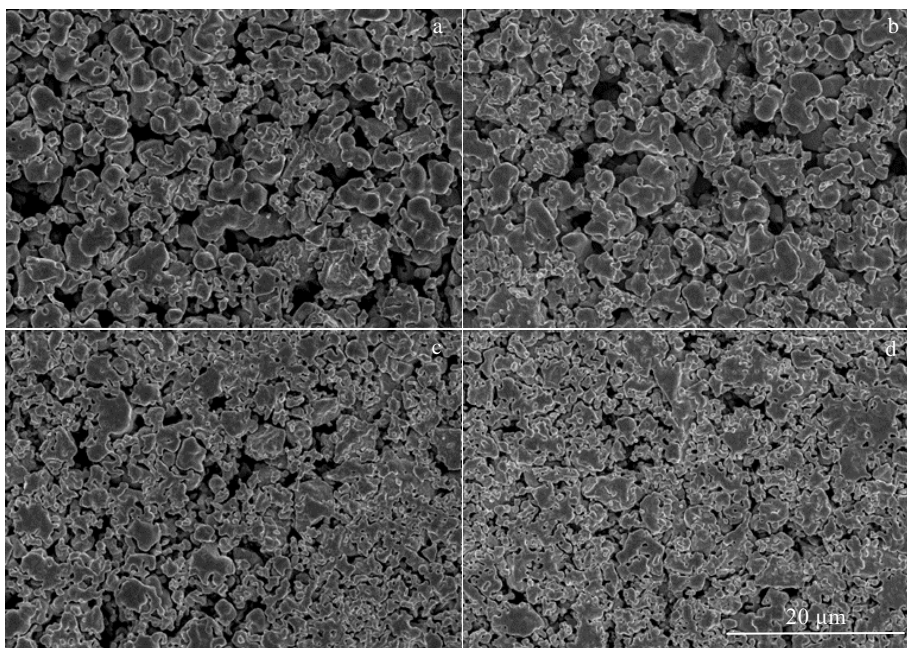


图 3 不同 Os 含量的三元混合基体形貌

Fig.3 Morphologies of ternary mixed matrix with different Os contents: (a) $W_2Re_1Os_{0.5}$, (b) $W_2Re_1Os_1$, (c) $W_2Re_1Os_2$, and (d) $W_2Re_1Os_3$

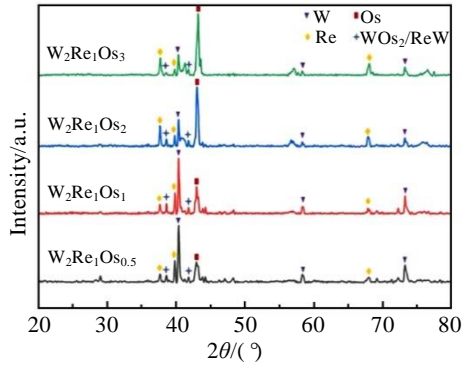


图 4 不同 Os 含量的三元混合基体的 XRD 图谱

Fig.4 XRD patterns of ternary mixed matrix with different Os contents

通过对不同 Os 含量的三元阴极进行 X 射线衍射分析，探究了阴极表面的物相成分，其结果如图 6a 所示。结果显示，阴极中的主要物相均为单质相，测试时发射水平最好的 $W_2Re_1Os_1$ 阴极中的 ReW/W_2Os 相的含量最高，通过查阅 W、Re、Os 和 σ 相的 XRD 标准图谱发现 bcc 相 W 的主要暴露面为 (110) 面，hcp 相 Os 和 Re 的主要暴露面为 (101) 面， σ 相的主要暴露面为 (410)、(330)、(202)、(212)、(411)、(331)；通过对比可以发现 σ 相拥有更多的暴露面，有研究^[18-20]表明 W 的 (110) 面和 Re 的 (101) 面等暴露面对 Ba、O 等活性物质的吸附能力较差，而 σ 相拥有更多的易暴露面，因此 σ 相对 Ba、O 等活性物质更好的吸附效果，这也是 $W_2Re_1Os_1$ 阴极发射水平较好

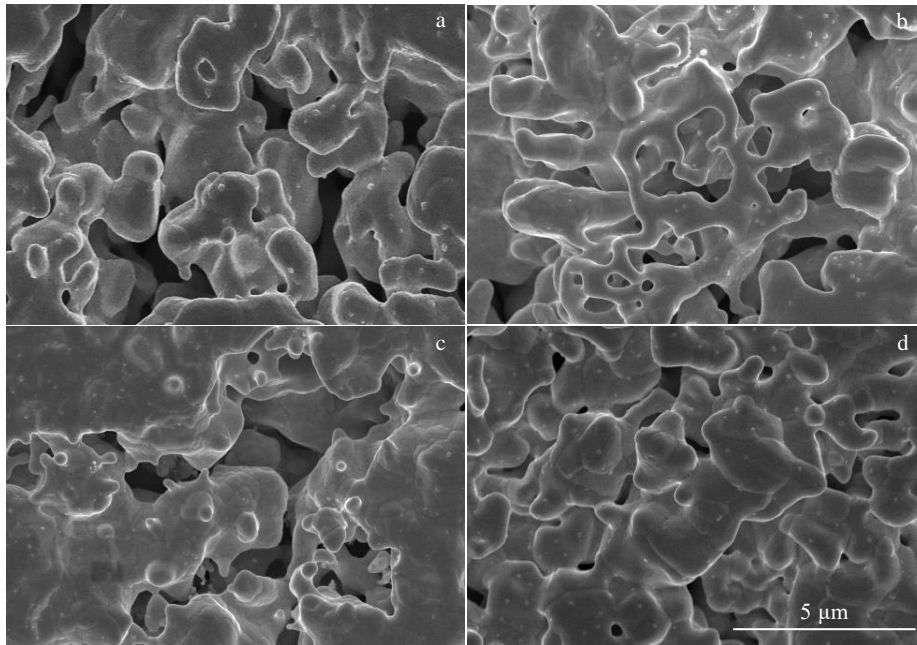


图 5 不同 Os 含量三元混合基阴极的 SEM 形貌

Fig.5 SEM morphologies of ternary mixed cathodes with different Os contents: (a) $W_2Re_1Os_{0.5}$, (b) $W_2Re_1Os_1$, (c) $W_2Re_1Os_2$, and (d) $W_2Re_1Os_3$

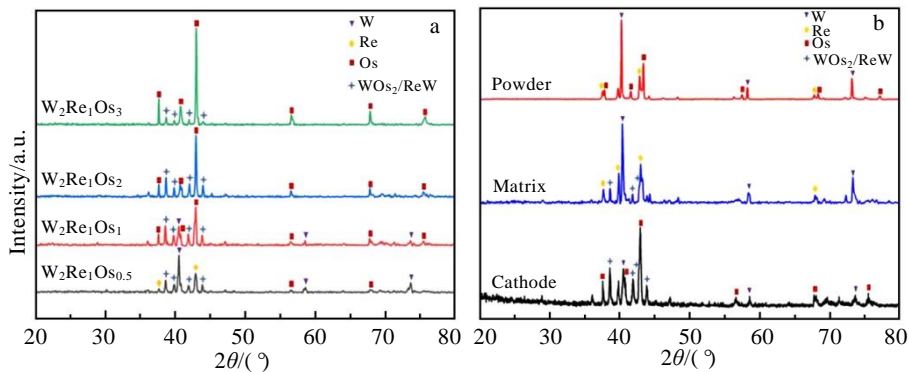


图 6 不同 Os 含量的三元阴极及 $W_2Re_1Os_1$ 阴极不同阶段的 XRD 图谱

Fig.6 XRD patterns of ternary cathodes with different Os contents (a); XRD patterns of different phases of $W_2Re_1Os_1$ cathode (b)

的原因。如图 6b 所示，对比 $W_2Re_1Os_1$ 阴极在不同阶段的 XRD 图谱，发现 ReW/W_2Os 合金相的产生应当发生在高温浸渍活性盐的阶段。

通过 XPS 测试进一步分析阴极表面物质的价态，图 7 为 $W_2Re_1Os_1$ 阴极表面的 XPS 谱。由图 7a 结果可知阴极表面的 $W_{4f_{7/2}}$ 有 2 种化学态，分别位于 30.8 和 35.2 eV 处，分别对应着 W^{0+} 与 W^{6+} ，这与 XRD 中 W 以单质和 Ba_2CaWO_6 相对应。由图 7b、7c 结果可知阴极中的 $Re_{4f_{7/2}}$ 和 $Os_{4f_{7/2}}$ 分别在 40.43 和 50.23 eV 处各有一个 0 价的化学态，对应的是 Re^{0+} 和 Os^{0+} 。说明 Re 和 Os 并不能够与活性盐发生反应产生活性物质。活性 Ba 是 $Ba-W$ 阴极的主要活性物质，由图 7d 结果可知 $Ba_{3d_{7/2}}$ 只在 780 eV 处的 1 个氧化态，并不存在单

质 Ba ，由此推断认为具有发射活性的单质 Ba 只在高温真空状态下存在。

图 8a 为不同成分阴极表面 W 元素的 XPS 谱，对不同含量阴极的 XPS 谱进行对比。对 XPS 谱半定量分析，发现随着阴极中 W 含量的增加阴极中 0 价的 W 峰逐渐增强，且 $W_2Re_1Os_1$ 阴极中 +6 价的 W 峰要远高于其它阴极，+6 价的 W 通常存在于 Ba_2CaWO_6 中，因此这说明 $W_2Re_1Os_1$ 阴极中有更多 W 参与了产生该物质的反应，产生 Ba_2CaWO_6 及其它物质的相关反应过程将在反应机制中加以研究。图 8b 为不同成分阴极表面 Ba 元素的 XPS 谱。结果显示， $W_2Re_1Os_1$ 阴极中的 Ba 含量也略高于其它成分的阴极，但是此处的曲线差距较小，分析认为 XPS 检测到的 Ba 为常温下的 Ba 元素，而高

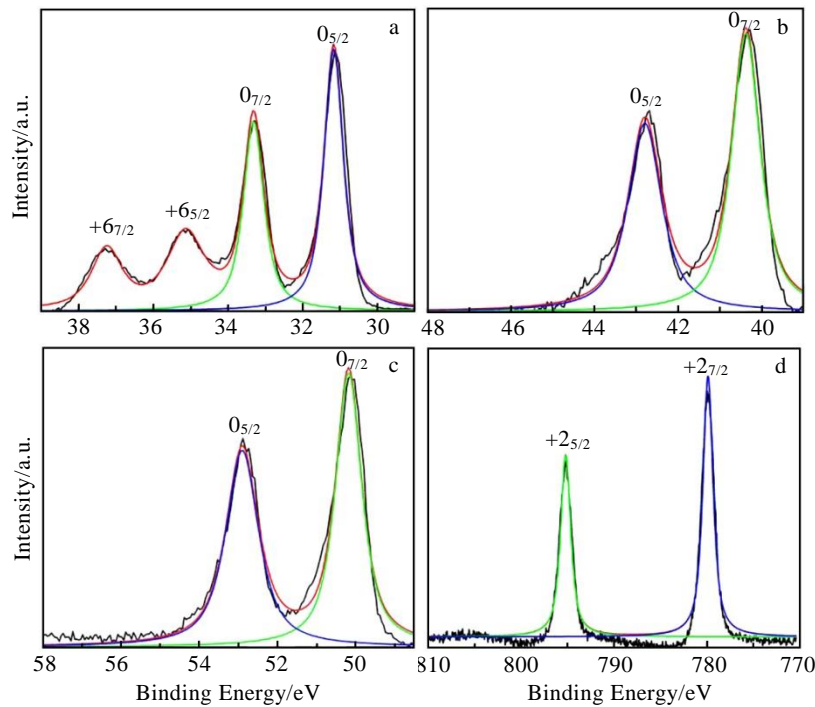


图 7 $W_2Re_1Os_1$ 三元混合阴极的 XPS 分析

Fig.7 XPS analysis of $W_2Re_1Os_1$ ternary hybrid cathode: (a) W 4f, (b) Re 4f, (c) Os 4f, and (d) Ba 3d

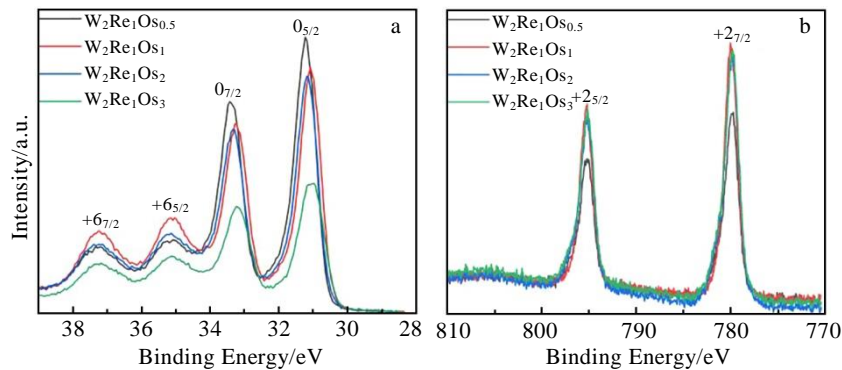


图 8 不同成分阴极表面 XPS 谱

Fig.8 XPS spectra of cathode surfaces with different compositions: (a) W 4f and (b) Ba 3d

温工作状态下阴极表面活性物质中的活性 Ba 只在工作温度下产生, 其含量可能随着阴极降温发生改变, 因此 XPS 半定量分析 Ba 含量不能准确的反应工作状态下的活性 Ba 含量。

2.3 三元混合基阴极的发射性能与机制研究

2.3.1 三元混合基阴极的发射性能测试

将不同 Os 含量的三元混合基阴极及钡钨阴极在 1150 °C 激活 8 h 达到最佳的激活状态后, 测量脉冲发射曲线。不同比例的 W-Re-Os 三元混合基阴极发射性能测试结果如图 9 所示, $W_2Re_1Os_{0.5}$ 、 $W_2Re_1Os_1$ 、 $W_2Re_1Os_2$ 、 $W_2Re_1Os_3$ 阴极在 950 °C 的发射电流密度分别为 7.03、10.51、6.32、4.36 A/cm², 斜率分别为 1.38、1.44、1.42、1.42。测试结果显示不同成分的三元混合基阴极的电子发射能力较传统的钡钨阴极有了较大的提升, 其中 $W_2Re_1Os_1$ 阴极的电子发射密度最高, 950 °C 时其电流发射密度能够达到 10.51 A/cm², 结果表明 $W_2Re_1Os_1$ 的电子发射水平略高于二元混合基阴极, 已经达到了覆 W-Re-Os 三元膜阴极的水平, 并且其曲线斜率最好, 达到了 1.44, 说明具有较好的发射均匀性, 此时阴极中 W、Re、Os 的含量分别为 50%、25%、25%, 这一比例也与文献[17]报道的覆 W-Re-Os 三元膜阴极的表面 W: 45%~65%、Re: 25%~45%、Os: 10%~30% (质量分数) 的含量相近。这也再次证

实 W、Re、Os 比例为 2:1:1 是三元阴极中较为合适的元素比例。Re、Os 包覆 W 的核壳结构的形成是本研究中 W-Re-Os 三元混合基阴极发射性能较好的原因之一, 图 9e 为用固-固混合法制备的三元混合基阴极, 没有核壳结构, 其基体成分与图 9b 成分相同。可以发现拥有核壳结构的阴极在 1050 °C 曲线斜率为 1.438, 发射电流密度 35.64 A/cm²; 而没有核壳结构的 W-Re-Os 三元混合基阴极在 1050 °C 的曲线斜率为 1.391, 发射电流密度为 15.31 A/cm²。对比便可发现核壳结构使得三元混合基阴极的电流密度提高约 2.3 倍。三元混合基阴极的电子发射性能也远好于钡钨阴极 (图 9a、9b 中 1100 °C 下数据未测到拐点故未标出数值)。

2.3.2 三元混合基阴极发射机制研究

阴极基体中存储的活性盐被认为是影响阴极的热电子发射能力的关键因素, 为探究三元混合基阴极的发射机制, 针对不同成分的活性盐与 W 及 Re、Os 的合金相反应进行了研究。在研究过程中, 首先将活性盐与难熔金属粉按照摩尔比 3:1 进行固相混合。之后将混合粉体在氢气气氛中进行焙烧, 按照阴极制备工艺, 焙烧温度首先设定为 1650 °C, 保温时间为 20 min。之后对焙烧后的粉体在 1100 °C 进行长时间焙烧。采用该方法的原因主要是浸渍型阴极中活性盐成分较低, 表征过程中, 活性盐的 XRD 峰强较弱, 可能对物相会有一定的

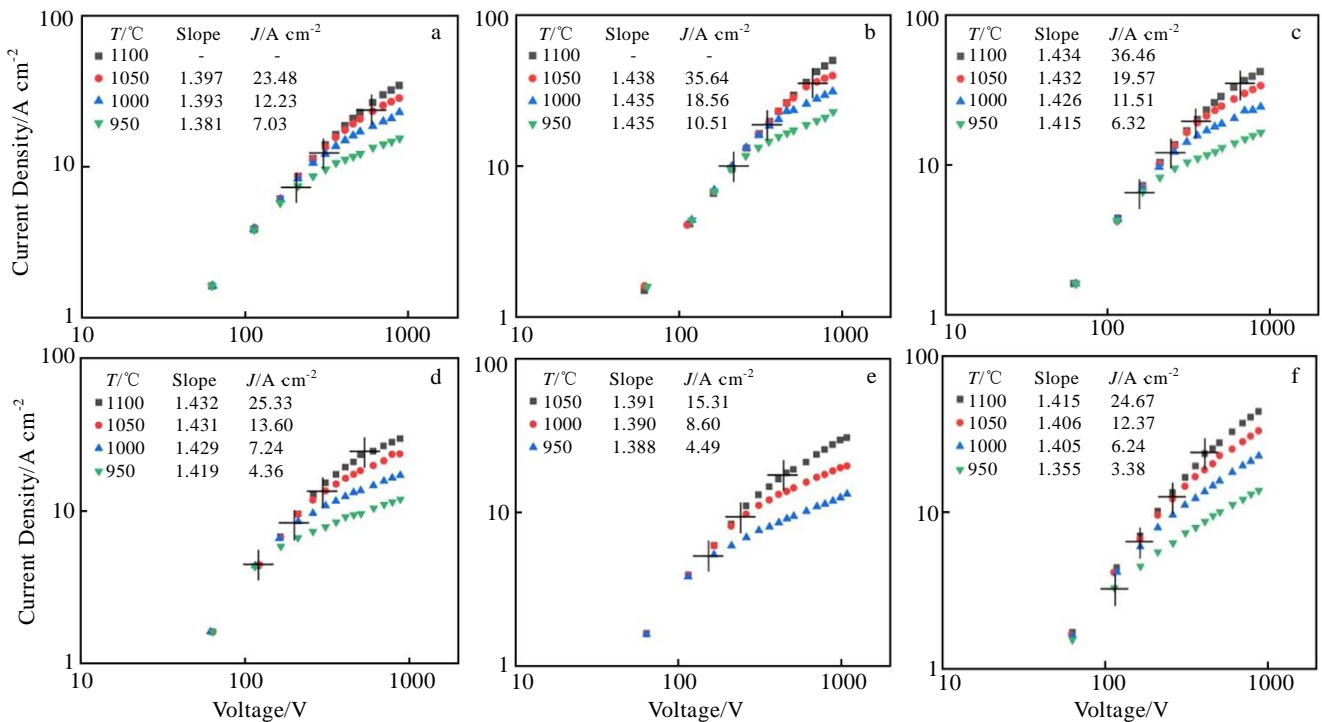


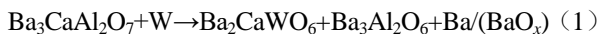
图 9 不同 Os 含量的 W-Re-Os 三元混合基阴极与钡钨阴极发射图

Fig.9 Emissions of ternary mixed-base cathodes of tungsten-rhenium-osmium with different Os contents (a-e) and Ba-W cathode (f): (a) $W_2Re_1Os_{0.5}$, (b) $W_2Re_1Os_1$, (c) $W_2Re_1Os_2$, (d) $W_2Re_1Os_3$, (e) $W_2Re_1Os_1$ cathode without core-shell structure, and (f) Barium tungsten cathode

影响，因此本研究采用粉体混合的方法进行试验。

但是需要注意的是，本研究所采用的实验方法与浸渍型阴极制备的区别在于浸渍活性盐与基体金属的反应接触时间不同，浸渍的过程活性盐在前期升温过程中与基体金属只有表面接触，而后瞬间升温后迅速熔化虹吸到基体中，此时活性盐与基金属反应时间较短，反应可能处于未反应完全状态。而本研究所采用的方法，在混合后活性盐与基体金属在加热升温阶段便保持较大的接触面积，且保温时间较长，因此可认为此时活性盐与基金属的反应已经达到平衡。

不同难熔金属与 411 盐反应后的 XRD 分析结果如图 10 所示。结果显示，411 盐的主要物相是 Ba₃CaAl₂O₇，单质金属 W 可以与 411 盐反应，反应后产生 Ba₂CaWO₆和 Ba₃Al₂O₆ 2 种物相，W 在反应中被氧化，故一定有元素被还原，但没有明确的还原相出现在产物中，故推测有部分 Ba 在这一过程中被还原为了还原相，随后在高温条件下蒸发了。推断其发生了如下的反应：



411 盐与 Re、Os 的混合粉体中，Ba₃CaAl₂O₇ 的物相没有发生任何变化，说明 Re、Os 与 411 盐经过浸渍温度反应后其物相并没有发生变化，即 Re 和 Os 与 411 盐不发生反应，Re 和 Os 不参与活性物质的产生过程。对比 411 盐混合 W-Re-Os 与 W 粉体的试验结果可以发现，两者中难熔金属与 411 盐反应后生成的物相中均有 Ba₂CaWO₆，因此认为三元混合粉体与 411 盐的反应过程与 W 和 411 盐的反应过程类似，均发生了如上方程式的反应。

而与 Re、Os 的混合粉体中，除了金属以外，411 盐依旧保持着原有的物相。推断其可能是生成挥发相或者没有物相变化。为此，对其中 W、Re、Os 样品进行 XPS 分析，其结果如图 11 所示。只有 W 混合

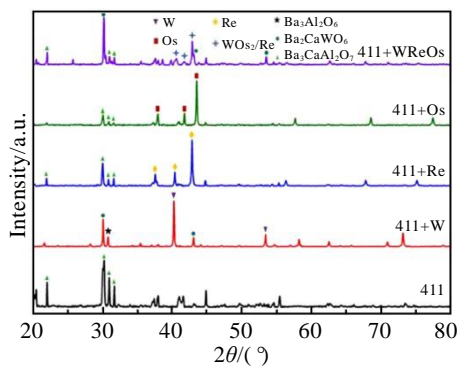


图 10 不同难熔金属与 411 盐在 1650 °C 反应后的 XRD 图谱
Fig.10 XRD patterns of different refractory metals after reaction with 411 salt at 1650 °C

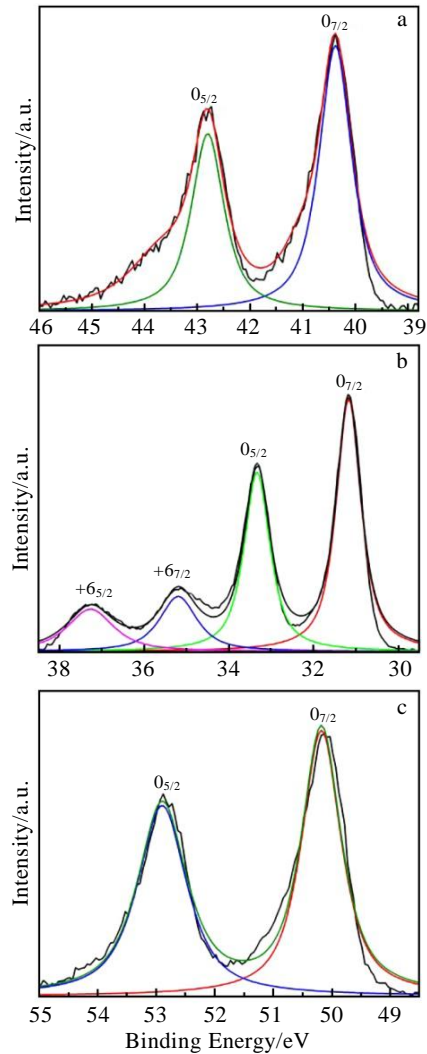


图 11 W、Re、Os 与活性盐反应后 XPS 分析
Fig.11 XPS spectra of W, Re, Os after reaction with impregnant:
(a) W 4f, (b) Re 4f, and (c) Os 4f

粉体中出现了氧化态，这与 XRD 分析结果相同。结合文献中活性盐挥发性能分析，认为这是由于活性盐发生分解，高 Ba 含量物相释放 BaO 并挥发到表面形成了 BaO 吸附层。

3 结论

1) 不同 Os 含量的三元混合基阴极中 W₂Re₁Os₁ 的电子发射性能最好，其在 950 °C 的电流发射密度能够达到 10.5 A/cm²，电流发射密度略高于同类型的二元混合基阴极，同时发现核壳结构的存在使得三元混合基阴极的电流密度提高约 2.3 倍。

2) 在 W-Re-Os 三元混合基阴极中只有 W 能够与钨酸盐发生反应生成钨酸盐，同时产生活性物质，Re、Os 很难与活性盐发生反应生成铼酸盐和锇酸盐，因此

Re 和 Os 在基体中无法产生活性 Ba。分析认为 $W_2Re_1Os_1$ 阴极发射性能优于其它阴极的原因有两点: 第一, $W_2Re_1Os_1$ 阴极中有更多的 W 与 411 盐发生了反应, 生成了更多的活性物质; 第二, $W_2Re_1Os_1$ 阴极中的 σ 相的含量更高, 能够吸附更多的活性钡。

参考文献 References

- [1] Zhang Zhaotang(张兆镛). *Vacuum Electronics(真空电子技术)*[J], 2019(3): 1
- [2] Ding Yaogen(丁耀根), Liu Pukun(刘濮鲲), Zhang Zhaochuan(张兆传) et al. *High Power Laser and Particle Beams(强激光与粒子束)*[J], 2011(8): 1989
- [3] Ding Yaogen(丁耀根), Liu Pukun(刘濮鲲), Zhang Zhaochuan(张兆传) et al. *Journal of Microwaves(微波学报)*[J], 2010(S1): 397
- [4] Ren F, Yin S Y, Lu Z P. *2018 IEEE International Vacuum Electronics Conference*[C]. Monterey, CA: IEEE, 2018: 241
- [5] Sary G, Garrigues L, Boeuf J P. *Plasma Sources Science and Technology*[J], 2017, 26(5): 055007
- [6] Jin C, Ottaviano A, Raitses Y. *Journal of Applied Physics*[J], 2017, 122(17): 173301
- [7] Lange S L, Noori N K, Kawai N et al. *2020 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves [C]. IRMMW-THz: IEEE, 2020: 1*
- [8] Urban F, Passacantando M, Giubileo F et al. *Nanomaterials*[J], 2018, 8(3): 151
- [9] Hetman O I, Kapitanchuk L M. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*[J], 2018, 57(7-8): 410
- [10] Longo R T, Adler E A, Falce L R. *International Electron Devices Meeting*[C]. San Francisco: IEEE, 1984: 318
- [11] Liu Wei(刘伟), Li Shilei(李世磊), Zhou Fan(周帆) et al. *Powder Metallurgy Technology(粉末冶金技术)*[J], 2021, 39(5): 9
- [12] Fang C S, Tse W S, Maloney C E. *Applied Surface Science*[J], 1988, 33: 1189
- [13] Jenkins R O. *Vacuum*[J], 1969, 19(8): 353
- [14] Zhang H L, Liu Y W, Zhang M C et al. *Applied Surface Science*[J], 2005, 251(1-4): 130
- [15] Swartzentruber P D, John B T, Effgen M P. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*[J], 2014, 32(4): 040601
- [16] Wang J S, Yang Y F, Wang Y et al. *Tungsten*[J], 2019, 1(1): 91
- [17] Yin Shengyi(阴生毅), Zhang Yongqing(张永清), Zhang Honglai(张洪来) et al. *Chinese Patent(中国专利)*, CN101335166B[P]. 2010
- [18] Lai C, Wang J S, Zhou F et al. *Applied Surface Science*[J], 2018, 440: 763
- [19] Lai C, Wang J S, Zhou F et al. *Applied Surface Science*[J], 2017, 427: 874
- [20] Gao J, Chu F, Wang J S et al. *Applied Surface Science*[J], 2022, 581: 15237

Preparation and Emission Properties of Tungsten-Rhenium-Osmium Ternary Mixed Matrix Diffusion Cathode

Fang Haoxin, Liu Wei, Yang Yunfei, Zhou Fan, Wang Jinshu

(Key Laboratory of Advanced Functional Materials, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Rhenium-tungsten core-shell powder was prepared by solid-liquid mixing method and then osmium powder was added to prepare ternary mixed powder with special coating structure after pretreatment. After the powder was pressed, sintered, impregnated with salt, washed and annealed, a ternary mixed-base cathode of tungsten-rhenium osmium was prepared. After impregnation with 411 salt, the pulse emission test found that $W_2Re_1Os_1$ cathode which is a ternary mixed-base cathode has the best electron emission performance and the current emission density can reach $35 A/cm^2$ at $1050\text{ }^\circ\text{C}$, which is slightly higher than that of the same type of binary mixed-base cathode, and which reaches the level of the ternary film cathode covered with tungsten, rhenium and osmium. It is verified by experiments that neither Re nor Os reacts with the active salt during the impregnation process of the ternary tungsten-rhenium-osmium mixed-base cathode, and the active substance is produced by the reaction of W and the active salt.

Key words: mixed-base cathode; electron emission; tungsten-rhenium-osmium

Corresponding author: Liu Wei, Ph. D., Associate Research Fellow, Key Laboratory of Advanced Functional Materials, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China, E-mail: liuw@bjut.edu.cn