

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.06.013

高压气体开关放电电极的显微结构表征

谢昌明, 钟 伟, 杜 涛, 谈效华, 金大志

(中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 在不同放电条件下对高压气体开关进行单次放电实验, 结果表明, 随着峰值电流和传递电荷量增大, 电极烧蚀范围逐渐增大, 烧蚀坑面积和深度增大(凹坑深度达 $5.4\ \mu\text{m}$), 表面熔融化、熔融液滴铺展和表面微突起现象越显著, 其中微突起主要来源于相对电极材料的溅射作用。针对钼和钨 2 种电极材料, 研究高压气体开关多次工作电极的显微结构。可知开关表面均出现突起和裂纹等特征; 钼开关电极表面烧蚀程度较严重, 形成的颗粒突起较大(直径达 $30\ \mu\text{m}$ 、高度达 $34\ \mu\text{m}$), 表面呈现的裂纹较宽($20\ \mu\text{m}$)、较深($18\ \mu\text{m}$)且数量较多, 而且表面呈明显熔融态; 而钨开关电极烧蚀程度较轻, 表面出现一定数量尺寸较小的突起(最大直径为 $20\ \mu\text{m}$, 最大高度为 $18\ \mu\text{m}$), 裂纹少且尺寸小(宽度为 $5\ \mu\text{m}$, 深度为 $8\ \mu\text{m}$)。

关键词: 高压气体开关(HVGSG); 电极; 显微结构; 表征

Microstructure Characterization of Electrodes of High Voltage Gas Spark Gap Switch

XIE Changming, ZHONG Wei, DU Tao, TAN Xiaohua, JIN Dazhi

(Institute of Electronic Engineering, CAEP, Sichuan Mianyang 621900, China)

Abstract: Single-discharge test was conducted to characterize the microstructure of electrodes of a high voltage gas spark gap (HVGSG) switch in different discharge conditions. It was observed that the erosion boundary of the electrodes and the dimension of the craters increased with the increase of peak current and transferred charge; the melted state and the small salience due to sputtering of the opposite electrode became evident on the surface of electrodes. The microstructures of Mo electrode and W electrode after several discharges were investigated, and the results showed that: 1) saliences and cracks appeared on the surfaces of both Mo and W electrodes; 2) the Mo electrode exhibits heavier erosion, bigger saliences ($30\ \mu\text{m}$ in diameter and $34\ \mu\text{m}$ in height), bigger and more cracks ($20\ \mu\text{m}$ in width and $18\ \mu\text{m}$ in depth), and more obvious melted state than the W electrode; and 3) the W electrode exhibits lighter erosion, smaller saliences ($20\ \mu\text{m}$ in diameter and $18\ \mu\text{m}$ in height), and narrower cracks ($5\ \mu\text{m}$ in width and $8\ \mu\text{m}$ in depth).

Key words: high voltage gas spark gap(HVGSG); electrode; microstructure; characterization

0 引言

近年来, 脉冲功率技术发展迅速, 开关技术是限制其发展的关键瓶颈之一^[1]。高压气体开关(high voltage gas spark gap, HVGSG) 具有工作电压高、通流能力强、导通电阻小、寿命长、环境适应性强和使用方便等多个优点, 广泛应用于高压脉冲发生器等多个领域^[2]。高压气体开关在工作过程中必将发生电极烧蚀, 电极表面状态劣化, 从而影响开关性能;

经多次工作后, 甚至出现失误或失控现象, 限制了其使用寿命^[3]。因此深入研究开关放电电极的微观结构, 利于寻找减少电极烧蚀对开关性能影响的措施, 以提升开关工作稳定性和可靠性, 是目前脉冲功率开关技术中重要的研究课题^[4-5], 国内外学者针对影响开关电极烧蚀的因素开展了大量实验研究^[6-15]。但是, 鲜有文献报道开关性能与电极烧蚀相结合研究以及深入研究电极烧蚀特征。在前期高压气体开关工作性能与电极烧蚀研究基础上^[16-18], 文中深入研究了高压气体开关在不同放电条件下单次工作的电极显微结构, 对比研究不同电极材料开关多次工作

收稿日期: 2016-02-22; 修回日期: 2016-03-26

基金项目: “十二五”预研基金资助项目(426010402-3)。

Project Supported by “Twelfth-five Year” Plan for Pre-research Project(426010402-3).

的烧蚀特征, 为提高开关工作性能和可靠性积累有效数据, 同时探索性能优异的电极材料, 寻找减弱电极烧蚀的有效措施, 为长寿命、高可靠性等场合高压气体开关设计与应用指明方向。

1 实验方法

高压气体开关放电实验装置由高压电源、高压电容、示波器、高压探头、Rogowski 线圈和高压气体开关组成, 装置的线路连接方式和高压气体开关结构等见文[17]。高压气体开关管内保持常压氮气环境, 分别采用钼(Mo)和钨(W)作为 2 组开关主电极(即阳极和阴极)材料。通过改变储能电容的容量来获得不同的放电条件, 测得的峰值电流以及计算所得的电极间单次传递电荷量见表 1, 可进行单次和多次开关放电实验。通过激光共聚焦显微镜(Olympus Lext OLS4500)在三维尺度上观测表征开关放电电极的显微结构, 分析开关电极烧蚀特征。

表 1 不同放电条件下的峰值电流和传递电荷量
Table 1 Peak current and transfer charge at different discharging conditions

放电条件	峰值电流/kA	传递电荷量/C
1	1.70	8.6×10^{-3}
2	3.22	2.5×10^{-2}
3	5.62	5.0×10^{-2}

2 单次工作后电极的显微结构

针对主电极材料为 Mo 的高压气体开关, 在不同放电条件下进行单次放电实验, 实验后的电极形貌见图 1。可知放电后电极表面均留下了明显的烧蚀痕迹, 即烧蚀凹坑和表面熔融化; 并且随着峰值电流增大, 电极烧蚀范围逐渐增大, 表面熔融化越明显。在放电条件 1、2、3 下, 主要烧蚀痕迹的面积分别为 8.5×10^4 、 1.7×10^5 、 $5.8 \times 10^5 \mu\text{m}^2$ 。在各个放电条件下均呈现出多个相互独立的烧蚀坑, 并且在附近区域电极表面趋于熔融态; 说明在放电过程中高温电弧作用于电极表面的多处, 同时使附近部分 Mo 电极材料熔化, 从而在表面形成多个烧蚀坑并使周围的电极表面熔融化, 并且峰值电流越大时, 熔融化效应也越明显。还可在图 1(b)和(c)中发现电极表面出现微米级的颗粒突起, 这些微颗粒突起四周均有烧蚀痕迹, 推测突起是由对面电极材料在高温电弧作用下被溅射至该电极而形成, 对面电极材料以熔融液滴形式附着于该电极表面, 冷却后形成微突起, 突起的四周伴有高温烧蚀痕迹。

为了深入研究电极微观结构, 利用激光共聚焦

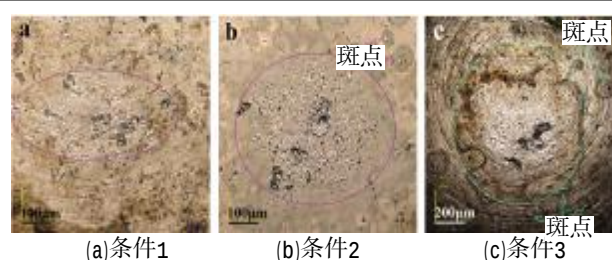


图 1 不同放电条件下 Mo 开关单次工作后的电极形貌对比图

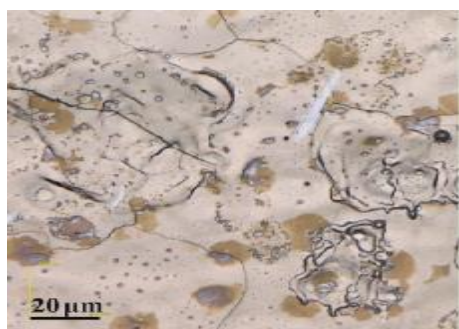
Fig. 1 Micrographs of Mo electrodes after a shot at different conditions

显微镜继续观测分析不同放电条件下电极烧蚀形貌, 获得了电极表面微观图、表面轮廓图(给出对应直线标识处的二维高度信息)和表面等高图(不同颜色对应于不同高度信息), 见图 2~4。

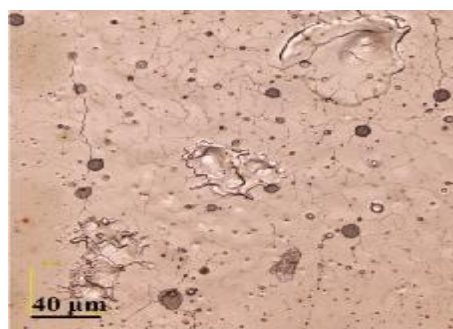
在放电条件 1 下, 电极表面呈现 3 处明显的微米级烧蚀坑, 如图 2 所示, 凹坑之间相互独立且距离较小(最大间距约 $30 \mu\text{m}$), 通过表面轮廓图可知凹坑深度可达 $2.7 \mu\text{m}$, 较大凹坑的面积可达 $1.2 \times 10^3 \mu\text{m}^2$, 在凹坑及其周围伴有一定微裂纹; 还可发现凹坑的边缘较周围电极表面稍高($0.8 \mu\text{m}$); 结合烧蚀坑对应的表面高度图可知, 烧蚀坑并非只含一个低凹处, 而是有 2~3 个低凹点, 说明放电电弧与电极作用点并不小, 并且电弧对电极材料损伤较大, 还可观测到熔融液滴铺展于烧蚀坑边缘, 液滴延伸长度达 $2 \mu\text{m}$ 。

在放电条件 2 下, 电极表面出现 3 处较大的微米级烧蚀坑, 凹坑之间相距 $50 \mu\text{m}$, 在烧蚀区中呈现大量曲折相连的微裂纹, 见图 3; 由表面轮廓图可知凹坑深度达 $3.4 \mu\text{m}$, 较大凹坑的面积可达 $1.6 \times 10^3 \mu\text{m}^2$, 凹坑边缘较周围电极高 $1 \mu\text{m}$, 烧蚀坑边缘的熔融液滴铺展现象较明显; 液滴延伸长度达 $10 \mu\text{m}$, 甚至可观测到液滴飞溅的痕迹, 即部分液滴被溅射而脱离电极, 另一部分液滴滞留或附着于电极烧蚀坑边缘或周围, 见图 3(b)。结合等高图 3(d)同样可发现烧蚀凹坑具有多个低凹点。

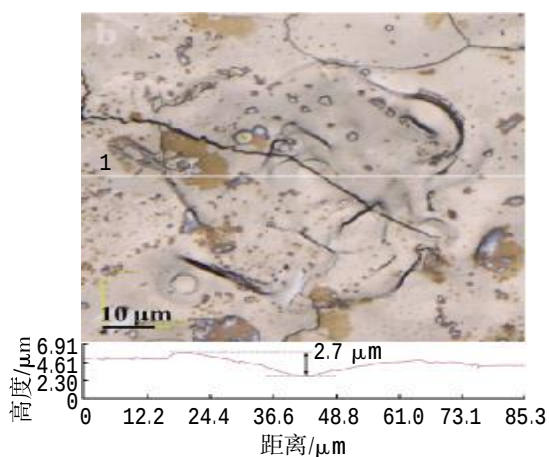
在条件 3 下 Mo 开关单次工作后电极的激光共聚焦显微图见图 4。在放电条件 3 下, 电极表面亦呈现 3 处明显烧蚀坑, 凹坑之间的最大间距为 $100 \mu\text{m}$, 见图 4(a)。还可发现, 在烧蚀区边缘出现多个熔融化颗粒突起, 对应区域的等高图验证了颗粒突起的存在; 由图 4(e)、(f)可知, 该微突起表面圆滑, 与电极紧密融为一体, 过渡非常平缓, 突起底端直径达 $20 \mu\text{m}$, 顶端呈凸出状, 高度达 $1.3 \mu\text{m}$; 还可知在突起附近的裂纹宽度和深度均接近 $1 \mu\text{m}$ 。由图 4(b)-(d)可知, 凹坑直径达 $50 \mu\text{m}$, 凹坑深度达 $5.4 \mu\text{m}$, 凹坑边缘高度达 $3.3 \mu\text{m}$, 较大凹坑的面积达 $2.5 \times 10^3 \mu\text{m}^2$; 还可



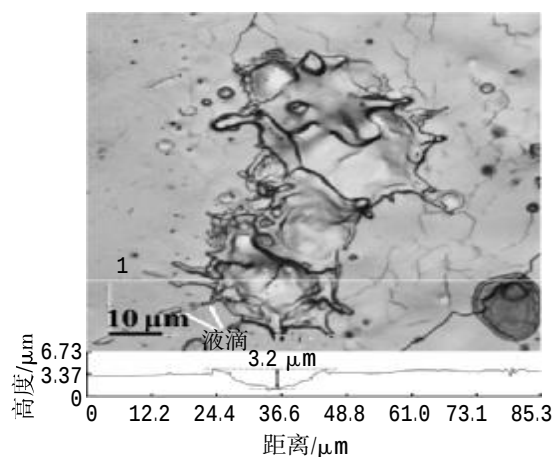
(a)低倍图



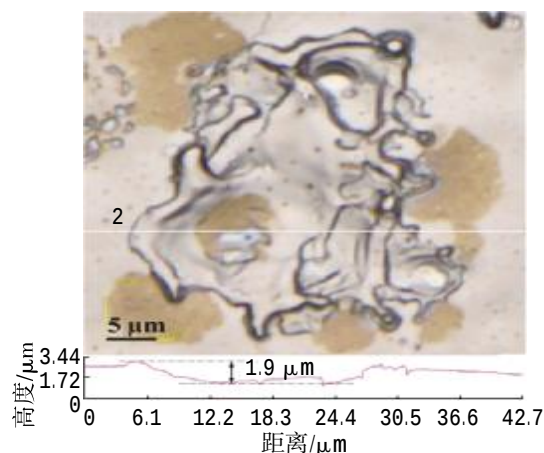
(a)低倍图



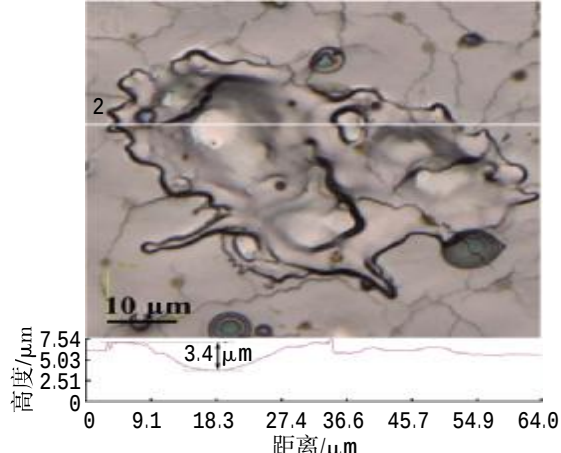
(b)图(a)的局部放大图及 1 线对应的断面轮廓图



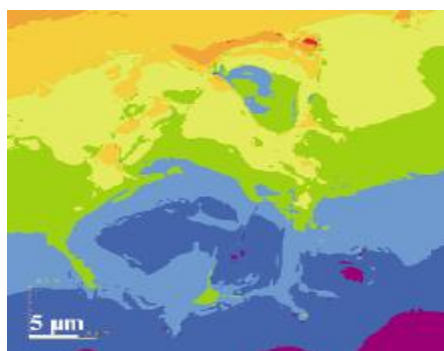
(b)图(a)的局部放大图及 1 线对应的断面轮廓图



(c)图(a)的局部放大图及 2 线对应的断面轮廓图



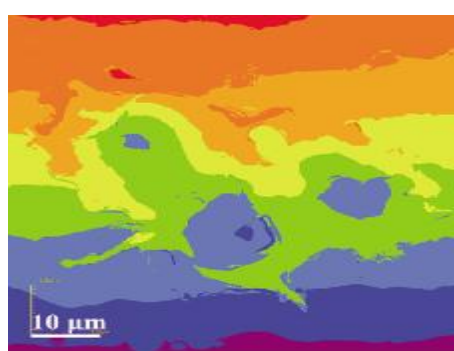
(c)图(a)的局部放大图及 2 线对应的断面轮廓图



(d)图(c)对应的等高图

图 2 在条件 1 下 Mo 开关单次工作后电极的激光共聚焦显微图

Fig. 2 Micrographs of Mo electrodes after one shot at condition 1



(d)图(c)对应的等高图

图 3 在条件 2 下 Mo 开关单次工作后电极的激光共聚焦显微图

Fig. 3 Micrographs of Mo electrodes after one shot at condition 2

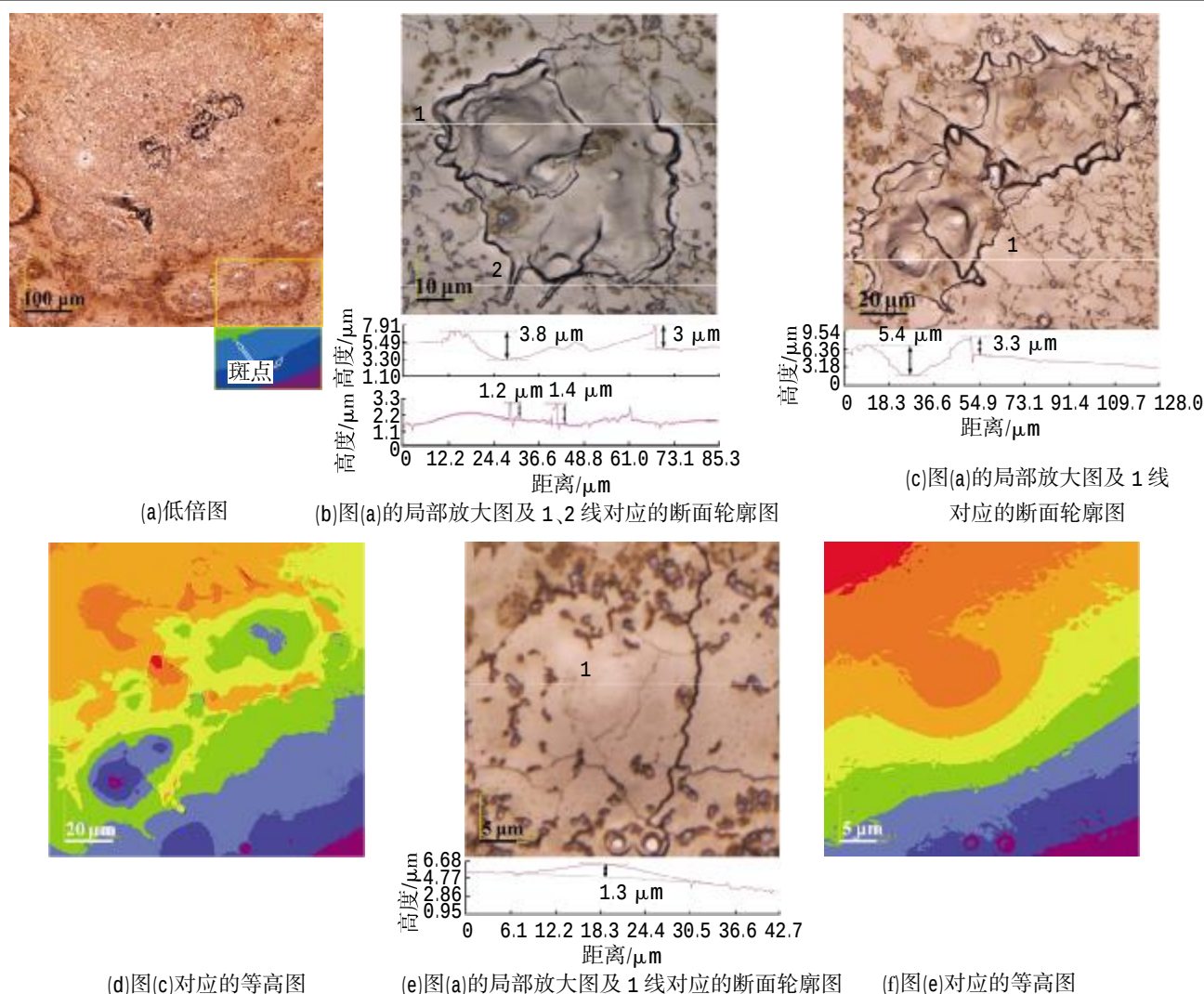


图4 在条件3下Mo开关单次工作后电极的激光共聚焦显微镜

Fig. 4 Micrographs of Mo electrodes after one shot at condition 3

由图4(b)、(c)发现,熔融液滴铺展现象明显,冷却形成的液滴呈细长状,延伸长度达 $10\ \mu\text{m}$,并且高于电极表面 $1.4\ \mu\text{m}$ 。

分析微突起的来源,可以发现这些突起现象在较大峰值电流放电条件下更为显著,并且以熔融态形式散布于烧蚀区域,与电极表面结合紧密,而且每个突起均被高温烧蚀痕迹所包围;可以推测这些颗粒突起来源于对面电极,在放电过程中,高温电弧与两主电极作用,将对面熔融液滴态的电极材料溅射至该电极,高温液滴与电极表面接触并铺展开,冷却后形成微突起并在其周围留下高温烧蚀痕迹;在此过程中,两只电极均经历“因溅射作用形成烧蚀坑”和“对面喷溅物附着而形成微突起”的过程。

综上所述,在不同单次放电条件下Mo电极的形貌特征见表2。随着峰值电流和传递电荷量逐渐增大,烧蚀范围增大,烧蚀凹坑面积逐渐增大,凹坑深度增大(峰值电流为 $5.62\ \text{kA}$ 时深度达 $5.4\ \mu\text{m}$),凹坑边缘增高(至 $3.3\ \mu\text{m}$),熔融液滴铺展现象越明显

且液滴延伸长度越大,电极表面形成微突起现象越显著。分析原因,峰值电流和传递电荷量值越大,放电电弧作用于电极表面的能量越大,使作用处温升越高,因此电极材料熔融化越显著,同时电弧的作用力越大,引起的表面电极材料喷溅程度越大,喷溅物量越多,使之形成的烧蚀坑深度和直径越大。

表2 不同放电条件下Mo电极的形貌特征

Table 2 Characteristic of Mo electrodes at different discharging conditions

放电条件	最大凹坑面积/ μm^2	凹坑深度/ μm	突起高度/ μm
1	1.2×10^3	2.7	0.8
2	1.6×10^3	3.4	1.0
3	2.5×10^3	5.4	1.3

3 多次工作后电极的显微结构

为了深入研究开关多次工作后电极的显微结构,从而分析探索电极烧蚀对开关性能和使用寿命的影响,文中针对Mo和W作为主电极材料的2种

高压气体开关,在放电条件 2 下工作 8 000 次,放电频率为 12 次/min,实验后利用激光共聚焦显微镜观测分析开关电极,在三维尺度上表征开关电极的显微结构,并分析推测在放电过程中开关电极状态的演化过程。Mo 开关多次工作后电极的激光共聚焦显微镜图见图 5,包括电极表面微观图、表面轮廓图(给出对应直线标识处的二维高度信息)和对应区域的表面高度图(不同颜色对应于不同高度信息)。由图 5 可以发现,Mo 电极烧蚀严重,表面熔融化明显,

呈现大量宽裂纹和少量突起(图 5(a));还可知,突起呈圆球状,底端较大(直径达 $30\ \mu\text{m}$),顶端较小(直径达 $20\ \mu\text{m}$),底端与电极表面结合紧密,从下至上层层相叠,顶端呈圆滑,突起高度达 $34\ \mu\text{m}$ (图 5(b)、(d));在烧蚀区中大量裂纹纵横交错,宽度大(达 $20\ \mu\text{m}$);结合分析微观图、轮廓图和高度图(图 5(d)、(e)),可知裂纹与裂纹之间的连接处深度最大,达 $18\ \mu\text{m}$,还可发现在裂纹处 Mo 电极表面熔融化尤其明显。

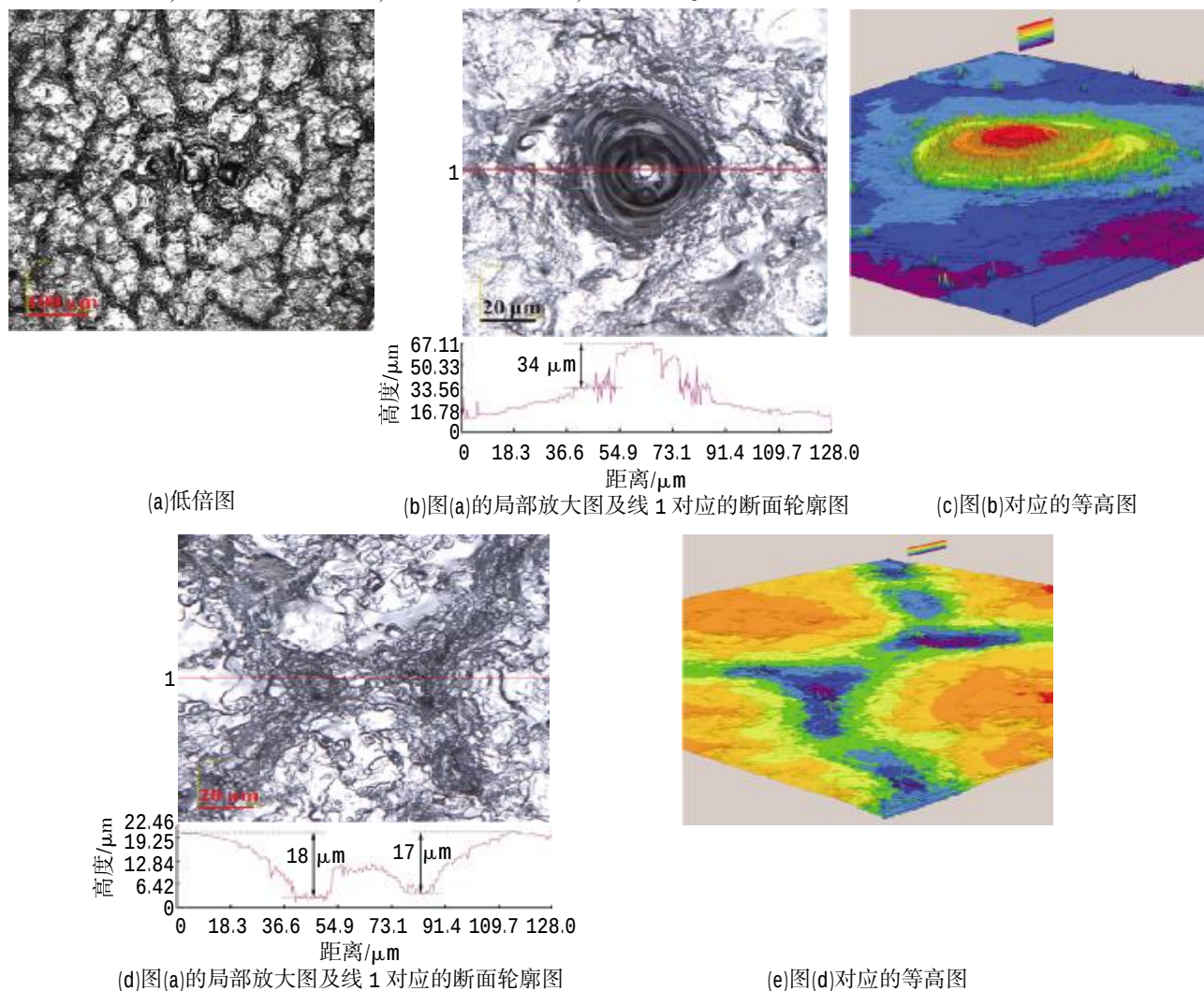


图 5 多次工作后 Mo 开关电极的激光共聚焦显微图

Fig. 5 Micrographs of Mo electrode after several shots

W 开关电极的微观结构分析见图 6,包括电极表面微观图、表面轮廓图和对应区域的表面高度图。由图 6 可以发现,在电极烧蚀区域,表面呈现一定烧蚀痕迹和 3 处较为集中的突起分布(图 6(a));深入分析,可发现每处呈现出 10 余个微米级颗粒突起,突起呈圆球状(其形貌与 Mo 开关电极相似),大多数突起相互独立(相距 $20\ \mu\text{m}$),同时也存在突起颗粒之间相融合的现象,伴有一定的微裂纹(图 6(b));结合轮廓图和高度图(图 6(c)、(d)),可知较大突起的直径达

$20\ \mu\text{m}$,高度达 $18\ \mu\text{m}$,裂纹处低凹,并且越靠近突起分布区中心,裂纹深度越大;深入分析裂纹形貌(图 6(d)、(e)),可知裂纹较宽处的宽度为 $5\ \mu\text{m}$,深度为 $8\ \mu\text{m}$ 。

4 开关电极表面状态变化分析

在 Watson 建立的电极材料液滴溅射模型^[19]基础上,结合上述实验结果可对开关电极表面状态进行深入分析,见图 7。开关单次工作过程包括电弧与

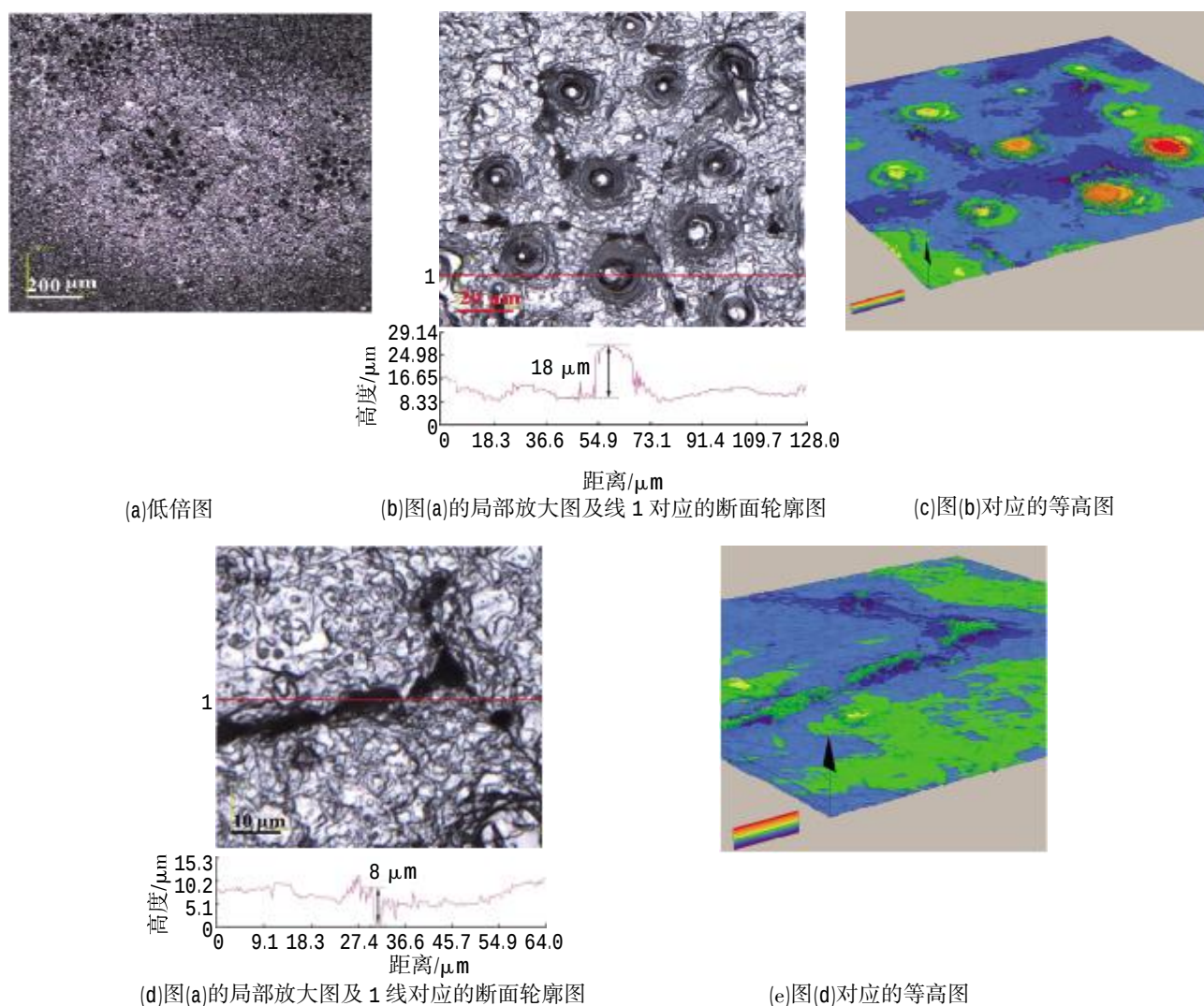


图6 多次工作后W开关电极的激光共聚焦显微镜

Fig. 6 Micrographs of W electrode after several shots

电极作用以及电极表面特征形成两个过程。即在单次放电过程中,开关主间隙被击穿时,电弧柱高速轰击电极表面,产生大量热能,致使电极表面局部金属材料熔化或汽化(图7(a));同时驱使熔融金属向电弧柱四周快速扩散,甚至出现液滴溅射现象,在作用处电极厚度减小并形成浅的微米级烧蚀凹坑(深度可达 $5\text{ }\mu\text{m}$,直径可达 $50\text{ }\mu\text{m}$);结合前期总结的开关电极材料喷溅模型^[18],可知部分喷溅物被溅射带离电极表面,散布于周围区域(包括附着于对面主电极表面,并形成与表面融合良好的微突起),同时损失一定电极材料;另一部分喷溅物在粘着力作用下以熔融态形式滞留于烧蚀坑边缘,并向四周铺展开,最终冷却后呈现出微凸的边缘和液滴铺展延伸现象;在电弧放电处电极材料经历受热膨胀和冷却过程,在热胀冷缩效应下产生较强内应力^[20],当材料不足以承受此内应力时,即产生微裂纹(图7(b))。而在不同放电条件下,烧蚀范围和烧蚀特征尺寸随峰值电流升高而增大;这是由于在峰值电流更高时,电弧与电

极作用越大,电极局部温升越高,引起的喷溅效应越大,从而呈现出更大的烧蚀特征尺寸和更明显的表面熔融态。

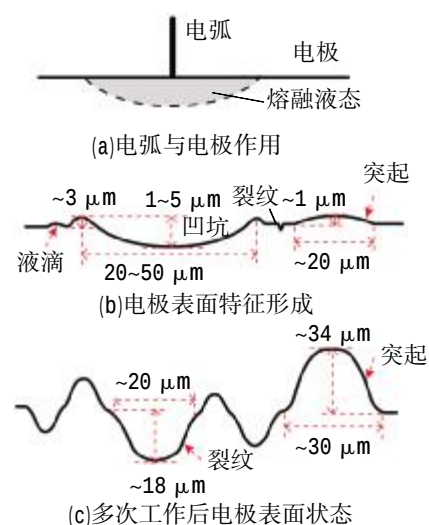


图7 开关电极表面状态变化示意图

Fig. 7 Surface condition of switch electrode

继续进行开关多次放电实验,开关电极的表面状态受放电电弧烧蚀作用和材料溅射沉积作用的综合影响。在单次放电后形成的微突起和烧蚀坑微凸边缘处,电场发生变化(增强),在这些地方容易引发下次电弧放电,从而将其部分烧蚀,形成新的烧蚀坑和溅射突起,而在未被烧蚀的突起处,容易被喷溅物附着形成更大突起,当突起累积长大至 $10\text{ }\mu\text{m}$ 乃至几十 μm 时,电弧作用则不能将其完全烧蚀,而仅将其表面部分烧蚀,此现象在W电极表面尤为突出;在8000次放电过程中,部分微米级的突起不断累积长大成直径达 $30\text{ }\mu\text{m}$ 、高达 $34\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒突起(Mo电极),由于突起主要来源于高温电弧周围的电极材料铺展和熔融喷溅物,因此突起与电极之间的结合良好、附着力强,同时呈现出底端大、顶端小且圆滑的层叠状态,见图5、6和图7(c);每次放电前后的热胀冷缩作用导致裂纹不断变宽、变深,多次循环使得裂纹增宽至 $20\text{ }\mu\text{m}$,变深至 $18\text{ }\mu\text{m}$ (Mo电极)。

经多次放电后Mo电极和W电极表面呈现的特征类似,包括突起、裂纹和熔融态表面,两者的主要区别在于Mo电极表面的突起较大,裂纹尺寸较大且数量较多,表面熔融态较明显,W电极表面的突起较小且数量较多。分析原因,结合文[16]中材料抗烧蚀常数,Mo的抗烧蚀常数为4680,抗烧蚀性能较差,在放电过程中Mo电极材料喷溅程度较大,电极表面状态变化较大,热胀冷缩引起的裂纹越多且尺寸越大;又由于Mo熔点较低($2610\text{ }^{\circ}\text{C}$)^[24],放电形成的微突起易被高温电弧烧蚀,因此经多次放电后累积长大的突起数量较少,但较大的喷溅程度决定了长大的突起尺寸也较大,同时表面熔融化更明显。由于W熔点高($3410\text{ }^{\circ}\text{C}$),电极材料溅射形成的微突起不易被电弧烧蚀或只有部分烧蚀,从而致使累积长大的突起数量增多,然而W抗烧蚀性能优异(抗烧蚀常数高达7151),电极材料喷溅程度较小,因此W突起尺寸较小。此现象与前期开关电性能研究结果^[20]相吻合,进一步验证了开关电性能与电极的表面状态密切相关。

5 结语

研究不同放电条件下高压气体开关单次放电Mo电极显微结构,发现随着峰值电流和传递电荷量增大,电极烧蚀范围增大,表面熔融化越明显,烧蚀坑尺寸增大,包括深度(达 $5.4\text{ }\mu\text{m}$)、面积和边缘高度,熔融液滴铺展和表面形成微突起现象越显著;分析可知微突起来源于相对电极材料的溅射作用。分别采用Mo和W作为2种高压气体开关的电极材

料,研究开关多次工作后电极的显微结构。结果表明,开关表面均呈现出突起和裂纹等特征;Mo电极表面烧蚀严重,突起尺寸较大(直径达 $30\text{ }\mu\text{m}$ 、高度达 $34\text{ }\mu\text{m}$),裂纹较宽、较深且数量较多(宽至 $20\text{ }\mu\text{m}$,深至 $18\text{ }\mu\text{m}$),而且表面呈明显熔融态;而W电极烧蚀程度较轻,突起数量较多但尺寸较小,表面呈现的裂纹较少且尺寸小。分析可知在多次放电过程中,表面凸出引起电场增强从而使其易被烧蚀,则形成的突起在下次放电时被部分烧蚀(Mo电极较明显),另一部分突起被相对电极溅射物堆积不断长大,经多次放电后形成更大的突起;裂纹的形成、扩宽和变深主要归因于多次放电中的热胀冷缩循环效应。

参考文献:

- [1] 许日,宁辉,邱爱慈,等.重复率气体火花开关绝缘恢复特性[J].强激光与粒子束,1996,8(4):518-522.
XU Ri, NING Hui, QIU Aici, et al. Experiment researches of rep-rate gas spark gap insulation recovery[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1996, 8(4): 518-522.
- [2] 廖复疆.真空电子技术[M].北京:国防工业出版社,2008:320.
LIAO Fujiang. Vacuum electronics[M]. Beijing: National Defense University Press, 2008: 320.
- [3] WANG H, CHANG J, TONG X, et al. Study on the characteristics of the gas switch electrode erosion[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(9): 6-11.
- [4] 程新兵.高功率重复频率气体火花开关研究[D].长沙:国防科学技术大学,2008.
CHENG Xinbing. Investigation of high power repetitive gas spark gap Switch[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.
- [5] GRAY E W, PHARNEY J R. Electrode erosion by particle ejection in low-current arcs[J]. Journal of Applied Physics, 1974, 45(2): 667-671.
- [6] MOROZOV I V, NORMAN G E, INSEPOV Z, et al. Sheath parameters for non-debye plasmas: Simulations and arc damage[J]. Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 2012, 15(5): 53501(1-10).
- [7] 罗敏,江金生,常安碧,等.高功率气体火花开关电极烧蚀机理研究[J].强激光与粒子束,2004,16(6):781-786.
LUO Min, JIANG Jinsheng, CHANG Anbi, et al. Study on mechanism of electrode erosion of high-power gas spark gap switch[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(6): 781-786.
- [8] GORDON L B, KRISTIANSEN M, HAGLER M O, et al. Materials studies in a high energy spark gap[J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 1982, 10(4): 286-293.

- [9] KOUTSOUBIS J M, MACGREGOR S J. Electrode erosion and lifetime performance of a high repetition rate, triggered, corona-stabilized switch in air[J]. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 2000, 33(9): 1093-1103.
- [10] YAO X L, ZENG Z Z, CHEN J L. Electrode erosion of a high energy impulse spark gap switch[J]. *Plasma Science & Technology*, 2005, 7(6): 3157-3160.
- [11] 白峰, 邱毓昌, 姜惟. 气体火花开关电极材料的冲击电流侵蚀特性[J]. *电工技术学报*, 2001, 16(4): 76-79.
BAI Feng, QIU Yuchang, JIANG Wei. Erosion characteristics of the electrodes used for gas spark gap[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2001, 16(4): 76-79.
- [12] 陈维青, 曾正中, 邹丽丽, 等. 100 kA 微秒级气体火花开关电极材料熔蚀研究[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(2): 239-242.
CHEN Weiqing, ZENG Zhengzhong, ZOU Lili, et al. Selection of gas spark gaps electrode material under microsecond 100 kA current pulse[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(2): 239-242.
- [13] 吴昊, 周志成, 吉亚民, 等. 真空开关的触发失效与主电极烧蚀特性研究[J]. *高压电器*, 2015, 51(1): 115-120.
WU Hao, ZHOU Zhicheng, JI Yamin, et al. Investigation to trigger failure and main electrode ablation of vacuum switch[J]. *High Voltage Apparatus*, 2015, 51(1): 115-120.
- [14] 李岩, 黄涛, 丛培天, 等. 双平行电极场畸变气体火花开关电极优化与实验研究[J]. *高压电器*, 2010, 46(11): 53-56.
LI Yan, HUANG Tao, CONG Peitian, et al. Simulation and optimization of the dual parallel electrodes for field distortion spark gas switch[J]. *High Voltage Apparatus*, 2010, 46(11): 53-56.
- [15] 曾清. 低电感强流气体火花开关的特性研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2006.
ZENG Qing. Characteristics of the low inductance, high electrical current gas spark gap[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2006.
- [16] 谢昌明, 尚绍环, 谈效华, 等. 高气压大电流放电条件下的电极烧蚀[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(9): 2181-2187.
- XIE Changming, SHANG Shaohuan, TAN Xiaohua, et al. Electrode erosion in high pressure and high current discharges[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(9): 2181-2187.
- [17] 谢昌明, 谈效华, 杜涛, 等. 气体火花开关电极烧蚀研究[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(1): 248-255.
XIE Changming, TAN Xiaohua, DU Tao, et al. Electrode erosion research of gas spark gap[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(1): 248-255.
- [18] 谢昌明, 谈效华, 杜涛, 等. 大电流放电条件下气体火花开关电性能研究[J]. *高压电器*, 2014, 50(12): 1-5.
XIE Changming, TAN Xiaohua, DU Tao, et al. Investigation on electrical performances of gas spark gaps in high current discharge[J]. *High Voltage Apparatus*, 2014, 50(12): 1-5.
- [19] WATSON A, DONALDSON A L, IKUTA K, et al. Mechanism of electrode surface damage and material removal in high current discharges[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1986, 22(6): 1799-1803.
- [20] INSEPOV Z, NOREM J. Can surface cracks and unipolar arcs explain breakdown and gradient limits[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology*, 2013, 31(1): 11302(1-10).
- [21] 饭田修一, 大野和郎, 神前熙, 等. 物理学常用数表[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 71-92.
IIDA S, OONO K, SHINZEN H, et al. Major numerical tables of physics[M]. Beijing: Science Press, 1979: 71-92.

谢昌明(1986—), 男, 硕士, 主要从事高电压电真空技术及材料等方面的研究。

钟伟(1989—), 男, 硕士, 主要从事高电压电真空技术及材料等方面的研究。

杜涛(1971—), 男, 研究员, 主要从事脉冲功率技术及高电压电真空技术等方面的研究。

谈效华(1970—), 男, 研究员, 主要从事脉冲功率技术及高电压电真空技术等方面的研究。

金大志(1970—), 男, 研究员, 主要从事高电压电真空技术等方面的研究。

(上接第 77 页)

- [18] 董淑建. 750 kV 超高压交流油纸电容式变压器套管的研制[M]. 南京: 江苏大学, 2007.
DONG Shujian. Study on 750 kV ultra high voltage AC oil impregnated paper condenser bushing[M]. Nanjing: Jiangsu University, 2007.
- [19] 刘晓亮, 蔡水利, 赵树平, 等. 特高压交流油纸电容式套管的研究[J]. *电瓷避雷器*, 2007(2): 1-6.
LIU Xiaoliang, CAI Shuili, ZHAO Shuping, et al. Study on UHV AC oil impregnated paper condenser bushing[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2007(2): 1-6.
- [20] 张国强, 张元录, 崔翔. 高压套管均压球电极形状优化

的研究[J]. *中国电机工程学报*, 1999, 19(11): 37-40.

ZHANG Guoqiang, ZHANG Yuanlu, CUI Xiang. Optimal design of the shielding of high voltage bushing[J]. *Proceedings of the CSEE*, 1999, 19(11): 37-40.

- [21] 杜伟. 浅析充气(SF₆)电容式穿墙套管的研制[J]. *电瓷避雷器*, 2014(2): 39-41.

DU Wei. Development of inflation (SF₆) capacitive wall bushing[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2014(2): 39-41.

熊俊(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事高电压试验技术、绝缘监督及电力大数据分析等方面的研究工作。