

纯石墨和铜-石墨的阴极斑点与截流值研究

张程煜¹, 乔生儒¹, 杨志懋², 王亚平²

(1. 西北工业大学 超高温结构复合材料国防科技重点实验室, 陕西 西安 710072)

(2. 西安交通大学, 陕西 西安 710049)

摘要: 研究了纯石墨和铜-石墨材料的阴极斑点的特性及真空电弧截流现象。发现纯石墨的阴极斑点呈现随机运动的特点, 斑点的直径小于 3 μm , 阴极斑点每次运动的距离约为阴极斑点的半径。而铜-石墨的阴极斑点的运动与 Cu 息息相关, 它选择性的发生在 Cu 相上, 阴极斑点的大小取决于 Cu 相的大小, 阴极斑点的运动距离为 Cu 相之间的距离。同时, 铜-石墨的真空电弧截流值 1.18 A, 远远大于纯石墨的截流值, 这主要是由于两种材料不同的阴极斑点运动特性引起的。

关键词: 石墨; 铜-石墨; 阴极斑点; 截流值; 真空电弧

中图分类号: TB32; TB33; TB71*6

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)03-0488-04

真空电弧在真空开关、真空电弧镀膜和电弧熔炼等领域取得了相当成功的应用。电弧稳定性与其电流密切相关, 电弧的稳定性随电流减小而降低。当电流减小到一定程度时, 在电流自然过零前, 电弧突然熄灭而引起放电电流突然下降到零的现象叫电流截断, 此时的电流值称为截流值^[1]。真空电弧的截流现象可以引起电路过电压, 它对系统和负载的绝缘产生严重的威胁。因此降低截流值的研究工作具有重要的理论意义和工程应用价值。

在物理本质上, 真空电弧是依靠阴极表面上旧阴极斑点熄灭与新斑点形成交替进行维持的^[2-4], 在小电流情况下, 当新产生的阴极斑点不能产生足够的金属蒸气或者电弧电流足够小到不能产生新的阴极斑点, 造成电弧在电流自然过零前突然熄灭, 引起截流现象。对于单质金属材料而言, 真空电弧的截流值一般在 2~10 A 范围内^[5]。但对于具有两相或者两相以上组成的合金或者复合材料来说, 电极材料的显微组织对阴极斑点的产生和运动规律与单质材料有显著区别^[6,7], 因此对电极材料的截流值大小有明显影响。

为此, 本实验研究了纯石墨以及铜-石墨材料的阴极斑点运动特征和电流截断现象, 以期揭示通过阴极斑点的运动特性对截流值的影响, 为通过优化电极材料的显微组织来调控阴极斑点的运动, 降低截流值提供思路。

1 实验

收稿日期: 2008-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(50702045, 50871078)和高等学校学科创新引智计划资助(B08040)

作者简介: 张程煜, 男, 1974 年生, 博士, 副教授, 西北工业大学材料学院, 陕西 西安 710072, 电话: 029-88492084

选择商用纯石墨(PG)和浸铜石墨(Cu-C)两种材料作为研究对象, 其中 Cu-C 通过石墨渗铜工艺获得。将两种材料加工成形状为 $\phi 8 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的试样, 抛光成镜面, 然后使用超声波震荡仪分别在丙酮、酒精和去离子水中清洗 10 min, 以去除电极表面的污染物, 保证电极表面的清洁度。然后在真空烘箱中进行 120 $^{\circ}\text{C}$ 保温 12 h, 以去除试样中的水分。在如图 1 所示的真空电弧试验平台中进行放电试验。试样放入真空室 VC 中, 其真空度小于 $1.0 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 。针尖状纯 W 作为阳极, 放电电阻为 800 Ω , 试验中放电电容为 0.5 μF , 用自耦变压器在两极间加上电压为 9.6 kV 的直流电, 使阴极以 0.1 mm/min 的速度接近阳极, 当电极之间距离小于一定距离时, 真空间隙被击穿, 引发真空电弧。在此过程中阴极和阳极间没有任何横向移动, 以保证数据的准确性。使用 Tektronics 公司生产的 TDS-2024B(200 MHz)型数字记忆式示波器通过取样电阻(R_s)获得电流-时间曲线。每种材料重复进行 5 次放电试验。

试验结束后, 将试样取出, 使用 HITACHI S-4700 型扫描电镜对电极表面的阴极斑点运动轨迹和阴极斑点形貌进行观察。使用 SEM 附带的能谱(EDX)进行化学成分分析。

2 实验结果

图 2 为 Cu-C 的显微组织。其显微组织明显不同于纯石墨。可以看出, Cu-C 有两种相组成, 其中深色

的组织为石墨，浅色组织为 Cu 合金，经 EDX 也验证了这一点。

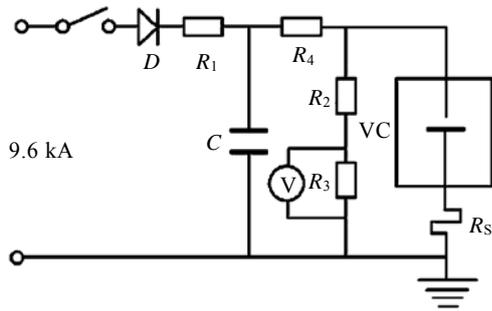


图1 试验电路示意图

Fig.1 Experimental circuit diagram

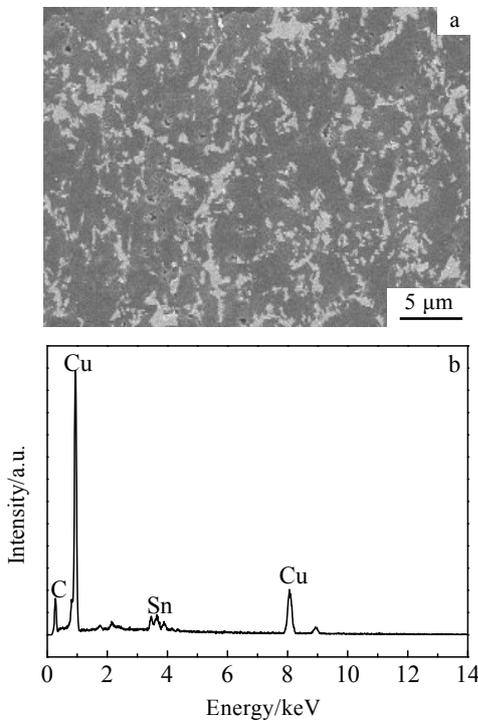


图2 Cu-C 材料的 SEM 照片和其中浅色组织的 EDX 结果

Fig.2 SEM image of Cu-C(a) and EDX result on the bright phase in Fig.1a(b)

图3为 PG 和 Cu-C 两种电极材料在峰值电流约为 12 A 时的放电曲线。可见 PG 的截流值为 0.72 A，远远小于 Cu-C 的截流值(1.18 A)。同时 PG 的电弧寿命为 1.2 ms，大于 Cu-C 电弧寿命(0.09 ms)。说明 Cu 合金的加入将会增加石墨材料的真空电弧截流值，同时缩短真空电弧的寿命。

一个阴极斑点在阴极表面运动会留下一系列火山口状的痕迹^[1]。图4是纯石墨的阴极斑点运动轨迹。

可见火山口的排列呈杂乱无章的特点，因此可知阴极斑点在纯石墨的运动为随机运动^[2, 8]。每一个火山口的直径就等于阴极斑点的直径，火山口之间距离就是阴极斑点每次运动的距离^[9]。因此可以得出，纯石墨的阴极斑点的大小小于 3 μm，阴极斑点每次运动的距离约为阴极斑点的半径。

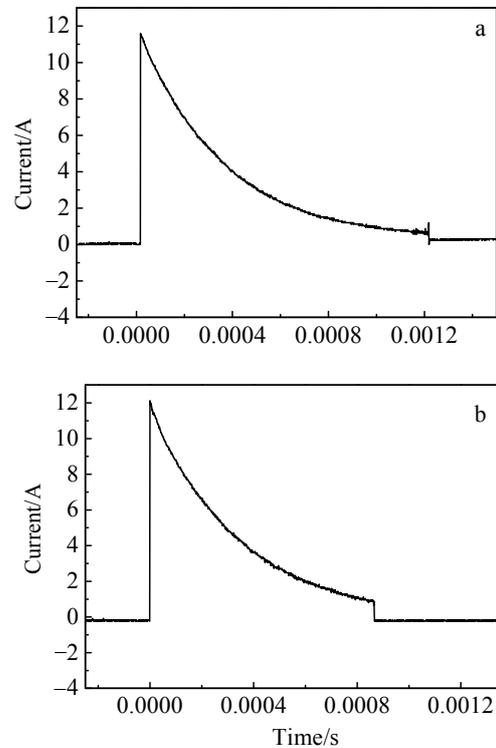


图3 PG 和 Cu-C 材料的电弧电流随时间的变化曲线

Fig.3 Discharge waveforms on the surface of pure graphite(a) and Cu-C(b)

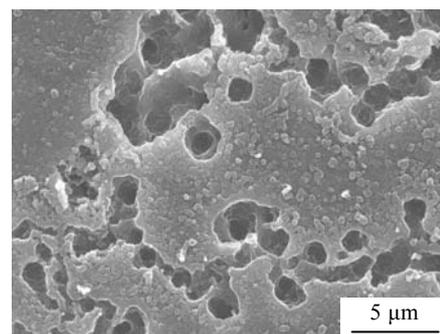


图4 纯石墨材料表面的阴极斑点运动的轨迹

Fig.4 Craters caused by the random walk of the cathode spots on pure graphite

图5a为 Cu-C 的阴极斑点运动轨迹。通过与图2a比较，可以看出，在电击穿区域，浅色的 Cu 相被消耗，在电极表面可以看到许多球状颗粒，经 EDX 分析，

其成分与图 2b 一致。图 5b 为 5a 的放大图。可以看出 Cu 相喷溅的痕迹,证明电极表面的球状颗粒为喷发出来的 Cu 合金,并且在电击穿过程中阴极斑点的运动选择性的发生在 Cu 相上,阴极斑点的运动方式为跳跃式的,每次运动的距离为 Cu 相的间距。另外可以看出阴极斑点的大小也主要取决于 Cu 相的大小。这一点与纯石墨的阴极斑点明显不同。

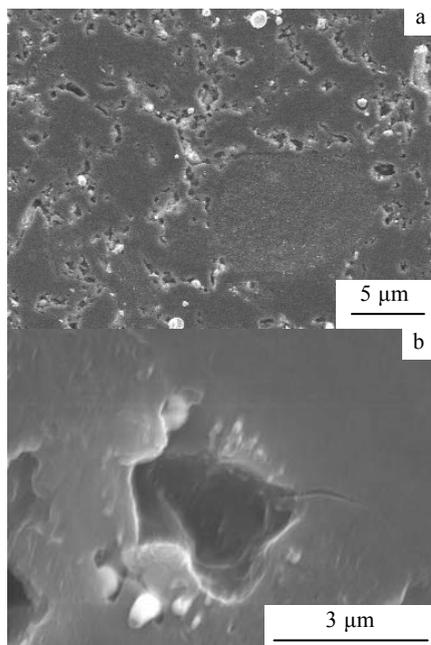


图 5 Cu-C 材料表面的阴极斑点运动轨迹

Fig.5 Traces of cathode spot movements on Cu-C; Fig5.b is a magnified image of Fig5.a

3 分析与讨论

一个阴极斑点最大承载电流和最小承载电流是固定的。当电弧电流变小,一些阴极斑点就会熄灭而保证一定的承载电流^[10]。当电流继续变小到不能维持阴极斑点运动时,电弧开始不稳定,电流波形发生振荡,最后导致电流截断。对于纯石墨材料来说,阴极斑点的产生和运动与阴极表面的微凸起有关。由爆破电子发射模型^[11,12]可知,在真空间隙加很高的电压时,阴极表面上某些微突起点就会因场致发射产生焦耳热,这些地方的温度迅速升高,导致爆发性的金属蒸发和火花(电击穿),同时在等离子体压力的作用下形成‘火山口’,从而产生了阴极斑点。新的阴极斑点产生位置主要决定于温度和电场强度。由于石墨表面可以看作均匀一致的,所以其阴极斑点运动特性表现为电极表面的随机运动特征。

但是对于 C-Cu 复合材料来言,阴极斑点的产生与材料各相的电子逸出功有关。电子要脱离金属表面进入真空中,必须克服表面势垒的作用^[13]。为了使具有最大能量的电子能够克服表面势垒,必须给予它的最小能量叫逸出功^[14]。Cu 的功函数为 4.7 eV,小于 C 功函数(5.0 eV)^[15],小的逸出功意味着 Cu 相更容易发射电子。因此在电场中,C-Cu 复合材料的阴极斑点选择性的发生在 Cu 相上,Cu 的分布和大小决定了阴极斑点的大小和运动距离。每次阴极斑点的运动距离就会大于纯石墨。当电弧电流逐渐变小时,电流强度不足以维持阴极斑点长距离的运动,因此 C-Cu 的截流值大于 PG 的截流值。

4 结论

1) Cu-C 的截流值(1.18 A)远远大于 PG 的截流值(0.72 A),而电弧寿命小于 PG 的电弧寿命。

2) 阴极斑点在纯石墨表面的运动以随机运动的方式进行,斑点的直径小于 3 μm,每次阴极斑点运动的距离约为阴极斑点的半径。而铜-石墨的阴极斑点的运动选择性的发生在 Cu 相上,阴极斑点的大小取决于 Cu 相的大小,阴极斑点的运动距离为 Cu 相之间的距离。

致谢:感谢西北工业大学超高温结构复合材料实验室王超博士帮助进行了 SEM 观察,同时感谢德国 Humboldt- Universität Berlin 的 B Jüttner 教授与作者进行有益的讨论。

参考文献 References

- [1] Jüttner B. *J Phys D: Appl Phys*[J], 2001, 34: R103
- [2] Djakov B E, Jüttner B. *J Phys D: Appl Phys*[J], 2002, 35: 2570
- [3] Duan Wenxin(段文新), Guo Conghui(郭聪慧), Yang Zhimao(杨志懋) et al. *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2005, 34(6): 998
- [4] Djakov B E, Holmes R. *J Phys D: Appl Phys*[J], 1971, 4: 504
- [5] Peter R, Smeets P. *IEEE Trans Plasma Sci*[J], 1989, 17(2): 303
- [6] Wang Fazhan(王发展). *Doctoral Thesis*(博士论文)[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2003.
- [7] Ding B, Yang Z, Wang X. *IEEE Trans Comp, Package, Manufact Technol*[J], 1996, 19(1): 76
- [8] Restrepo E, García L A, Castro J J et al. *Appl Surf Sci*[J], 2005 252: 1276
- [9] Zhang C Y, Yang Z M, Wang Y P et al. *J Phys D: Appl Phys*[J], 2003, 36: 2276
- [10] Marakhtanov M K, Marakhtanov A M. *Technical Physics Letters*[J], 1998, 24(7): 504

- [11] Beilis I I. *IEEE Trans Plasma Sci*[J], 2001, 29(5): 657
- [12] Su Yafeng(苏亚凤), Yang Zhimao(杨志懋), Ding Bingjun(丁秉钧). *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(1): 68
- [13] Song Hua(宋 华), Wang Xingang(王新刚), Feng Yu(冯 宇) *et al. Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2007, 34(10): 1601
- [14] Cheng Huan(承 欢), Jiang Jianpin(江剑平). *Cathode Electronics*(阴极电子学)[M]. Xi'an: Xi'an Institute of Telecommunication Engineering Press, 1986
- [15] Dean J A. *2004 Lange's Handbook of Chemistry*[M]. Ohio: McGraw-Hill Professional, 2004: 480

Cathode Spot Movements and Chopping Current of Pure Graphite and Copper-Graphite in Vacuum

Zhang Chengyu¹, Qiao Shengru¹, Yang Zhimao², Wang Yaping²

(1. National Key Laboratory of Thermostructure Composite Materials, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In the paper, the cathode spot movements and chopping current of pure graphite and copper-impregnated metallized graphite (Cu-C) in vacuum were investigated. It can be found that cathode spot movements produce an arc erosion pattern composed of a large number of craters with varying distances between them. The size of the craters is less than 3 μm in diameter. This pattern indicates that the cathode spot walk randomly on the surface. Whereas, cathode spots initiated selectively on the Cu phases in Cu-C materials. The diameter of the cathode spots depends on the dimension of the Cu phases and the displacement of a cathode spot moving is equal to the distance between the Cu phases. Meanwhile, the chopping current of Cu-C is 1.18 A, far larger than that of pure graphite. The phenomenon can be explained by the different characteristics of the cathode spot movement.

Key words: graphite; copper-graphite; cathode spots; chopping current; vacuum arc

Biography: Zhang Chengyu, Ph. D., Associate Professor, Department of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, Tel: 0086-29-88492084