

纳米 CuCr50 触头材料电弧侵蚀特性

赵来军^{1,2}, 李震彪¹, 王珂¹, 邱安宁³, 李慧杰³

(1. 华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室, 武汉 430074; 2. 河南理工大学电气工程与自动化学院, 焦作 454003; 3. 阿尔斯通电网技术中心有限公司, 上海 201114)

摘要: 近年来, 纳米 CuCr 触头材料在截流水平、耐压能力等方面的表现优于微晶 CuCr 触头材料。笔者利用真空触点模拟装置和基于虚拟仪器的电器电寿命测试系统, 研究了直流低电压、小电流下的纳米 CuCr50 触头材料的电弧侵蚀量与分断燃弧时间和触头表面形貌之间的关系, 同时采用两种微晶 CuCr50 触头材料作为对比。利用电光分析天平纳米 CuCr50 触头材料的侵蚀量, 利用电子扫描显微镜测量触头表面形貌。结果表明: 纳米 CuCr50 触头材料的平均分断燃弧时间和侵蚀量均高于两种微晶 CuCr50 触头材料。纳米 CuCr50 触头表面 Cr 颗粒细化及均匀分布, 有利于分散电弧。纳米 CuCr50 阴极触头表面电弧烧蚀比较均匀, 而两种微晶 CuCr50 触头阴极表面电弧局部烧蚀严重, 出现明显的凹坑侵蚀。

关键词: 纳米材料; CuCr 材料; 燃弧时间; 电弧侵蚀

中图分类号: TM206; TB383 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2012)05-0015-05

Arc Erosion Characteristics of Nanocrystalline CuCr50 Contact Material

ZHAO Lai-jun^{1,2}, LI Zhen-biao¹, WANG Ke¹, QIU An-ning³, LI Hui-jie³

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. College of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 3. ALSTOM Grid Technology Center Co., Ltd., Shanghai 201114, China)

Abstract: In recent years, nanocrystalline copper-chromium (Cu-Cr) contact material performed well in high withstand voltage, low chopping current, and so forth. Therefore, it has a big potential application in vacuum switches. The objective of this paper was to investigate vacuum arc erosion characteristics of a nanocrystalline CuCr (Cr50 wt.%) contact material. The vacuum contact simulation device was used to conduct contact materials arc erosion tests, and voltage waveforms of making and breaking arcs between the electrodes were recorded with LabVIEW. Using electric-light analytical balance and scanning electron microscopy, the mass loss and the surface structure of CuCr contact materials were obtained. Experiments indicated that the average break arcing time and the contact mass loss of nanocrystalline CuCr50 material were higher than those of two microcrystalline CuCr50 materials. The eroded contact surface structure showed a clear difference that the cathode contact surface of nanocrystalline CuCr50 contact material was uniform, while each cathode contact surface of two microcrystalline CuCr50 materials had an obvious arc erosion pit.

Key words: nanocrystalline materials; CuCr materials; arcing time; arc erosion

0 引言

目前真空开关使用的触头材料主要是铜基触头材料, 其中 CuCr 触头材料由于具有较高的耐电压

强度、大的分断电流能力、良好的抗熔焊性以及较低的截流值而广为应用^[1]。触头材料的微观结构对其宏观性能有重要的影响, 触头材料的电性能, 如抗熔焊性、耐电弧烧蚀和耐压能力不仅和组成触头材料的成份有关, 而且和组成材料晶粒的大小有关^[2-3]。

收稿日期: 2011-11-07; 修回日期: 2011-12-26

近年来,纳米 CuCr 触头材料在截流水平、耐压能力等方面的表现优于微晶 CuCr 触头材料^[4-12]。如文[6-8]中研究发现,纳米 CuCr 触头材料的直流真空电弧比微晶 CuCr 触头材料稳定,并且截流值低于微晶 CuCr 触头材料;文[9]中研究发现,微晶 CuCr 材料阴极触头表面电弧侵蚀坑的深度,是纳米 CuCr 材料触头的 7-8 倍;文[10]中研究发现,大电流下的纳米 CuCr 材料的燃弧能量和平均燃弧电压均低于微晶 CuCr 材料,单个阴极斑点的电流是微晶 CuCr 触头材料的 1/3。

目前对于纳米 CuCr 触头材料在直流低电压、小电流下的电弧侵蚀特性研究,还未见文献报道。笔者利用真空触点模拟装置和基于虚拟仪器的电器电寿命测试系统^[11-12],研究了直流低电压、小电流下的纳米 CuCr50 触头材料电弧侵蚀量与分断燃弧时间和触头表面形貌之间的关系,同时采用两种微晶 CuCr50 触头材料作为对比。

1 试验准备

触头材料共 3 种,分别是采用热压烧结方法制备的商用微晶 CuCr50 材料(Cr, 50 wt.%, 晶粒尺寸小于 60 μm, 记为 G-CuCr50),采用放电等离子体烧结方法制备的微晶 CuCr50 材料(Cr, 50 wt.%, 晶粒尺寸小于 40 μm, 记为 H-CuCr50)和纳米 CuCr50 材料(Cr, 50 wt.%, Cr 晶粒平均尺寸约 60 nm, 记为 Nano-CuCr50),把 3 种 CuCr50 触头块体材料加工成铆钉状触头,安装在真空触点模拟装置的触头系统上进行电弧侵蚀试验。触头直径 4 mm,触头间隙 1 mm,无外加吹弧磁场。触头闭合接触压力 35 N,分断力 70 N。试验电源为直流 24 V/10 A,阻性负载,真空度小于 1×10⁻³ Pa。每种 CuCr50 材料各 3 对触头,对称配对,每对触头试验操作次数 5 000 次,触头操作周期 4 s(3 s 通,1 s 断)。利用虚拟仪器电器电寿命测试系统,记录每次操作过程中触头两端的电压和电流波形,采样频率 f=200 kHz。试验结束后,分别计算每对触头的分断燃弧时间,用电光分析天平测量触头侵蚀量,用扫描电子显微镜(SEM)观测触头表面形貌。

2 试验结果

2.1 分断燃弧时间

为研究触头分断燃弧时间随操作次数的变化规律,根据式(1)计算了 3 种 CuCr50 触头材料每 100 个波形的平均分断燃弧时间。

$$\bar{t}_{b100(i)} = \frac{1}{100} \sum_{100i-99}^{100i} t_{100i-99} \quad (1)$$

图 1 所示为 100 次平均分断燃弧时间与操作次数之间的关系。从图 1 可以看出,试验中平均分断燃弧时间比较稳定,随着操作次数的增加,3 种 CuCr50 触头材料的平均分断燃弧时间没有表现出明显的单调递增或递减的规律。

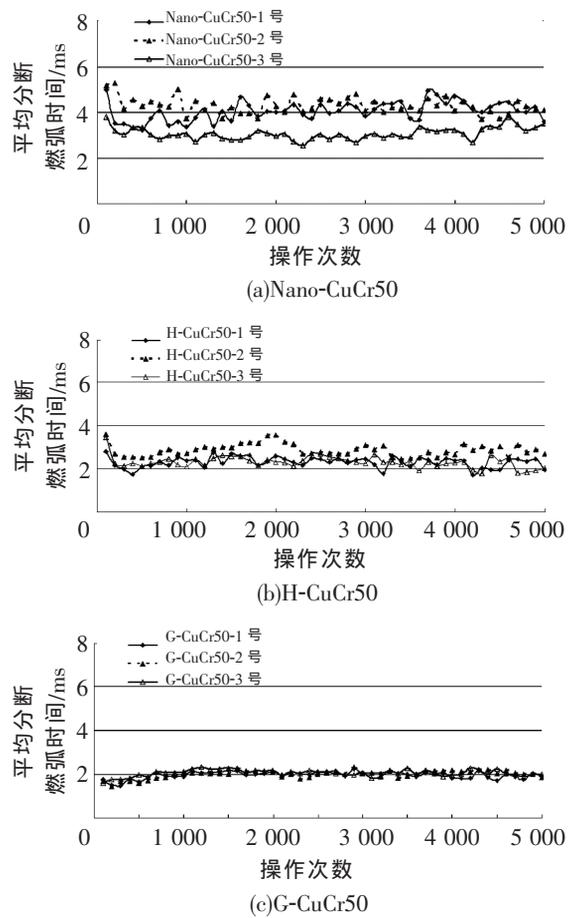


图 1 100 次平均分断燃弧时间随操作次数变化曲线
Fig. 1 Average break arc durations for every 100 waveforms data vs. number of contact operations

100 次平均最大分断燃弧时间;Nano-CuCr50 为 5.2 ms,H-CuCr50 为 3.8 ms,G-CuCr50 为 2.6 ms,即 100 次最大平均分断燃弧时间有 Nano-CuCr50>H-CuCr50>G-CuCr50。

表 1 是 3 种触头材料 5 000 次平均分断燃弧时间。从表 1 中可以看出,5 000 次平均分断燃弧时间 Nano-CuCr50>H-CuCr50>G-CuCr50。

表 1 CuCr50 触头 5 000 次平均分断燃弧时间
Tab.1 Average break arc durations for 5000 waveforms data

触头材料	Nano-CuCr50			H-CuCr50			G-CuCr50		
编号	1号	2号	3号	1号	2号	3号	1号	2号	3号
平均分断燃弧时间/ms	4.0	4.3	3.1	2.3	2.8	2.3	1.9	2	2.1

根据以上分析可知, 纳米 CuCr50 触头材料的 100 次平均最大分断燃弧时间和总平均分断燃弧时间, 均高于两种微晶 CuCr50 触头材料。

2.2 侵蚀量

采用高精度电光分析天平测量触头材料侵蚀量。称重之前, 把触头放在盛放酒精的烧杯内, 用超声波清洗仪对触头进行清洗, 去除表面的污秽。在试验前后, 分别测量触头的质量, 得到触头质量的变化。该试验中, 动触头为阳极, 静触头为阴极。表 2 是试验前后阳极和阴极触头的质量损失。

表 2 触头材料质量损失

Tab. 2 Mass loss of contact materials

触头材料编号	阳极质量损失/mg	阴极质量损失/mg
Nano-CuCr50-1 号	1.9	-2
Nano-CuCr50-2 号	0.8	-1.7
Nano-CuCr50-3 号	1.1	-1.8
H-CuCr50-1 号	0.6	-0.8
H-CuCr50-2 号	0.2	-0.3
H-CuCr50-3 号	0.4	-0.4
G-CuCr50-1 号	0.6	-1.1
G-CuCr50-2 号	0.3	-0.5
G-CuCr50-3 号	0.2	-0.4

如果触头质量损失为负值, 代表该触头质量减少; 如果触头质量损失为正值, 代表该触头质量增加。从表 2 中可以看出, 试验后 3 种 CuCr50 材料的阴极触头质量均减小, 阳极触头质量均增加。假设单个触头的质量为 T , 则某类材料的 N 个触头的平均质量损失, 可用式(2)计算。

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad (2)$$

依据式(2), Nano-CuCr50、H-CuCr50、G-CuCr50 材料的阴极质量损失分别是 -1.83、-0.5、-0.67 mg, 阳极增重分别是 1.27、0.4、0.37 mg, 即阴极损失的大小顺序 Nano-CuCr50>G-CuCr50>H-CuCr50, 阳极增重的大小顺序是 Nano-CuCr50 >H-CuCr50 >G-CuCr50。

2.3 触头表面形貌分析

图 2 为利用扫描电镜观测到的纳米和微晶 CuCr50 材料的阴极触头表面电弧侵蚀形貌。从图 2(a)可以看出, Nano-CuCr50 阴极触头表面电弧烧蚀比较均匀, 没有出现明显的凹坑; 图 2(b)和(c)中, H-CuCr50 和 G-CuCr50 阴极触头表面中心部位电弧烧蚀较严重, 出现了明显的凹坑; 图 2(d)、(e)和(f)是阴极触头的微观形貌, 为扫描电镜背散射电子成像图。从图 2(b)、(d)和(f)可以看出, 纳米 CuCr50 材料和

微晶 CuCr50 材料冷却熔体微观形貌相似, 如熔体呈片状, 没有方向性, 局部均有裂纹出现。

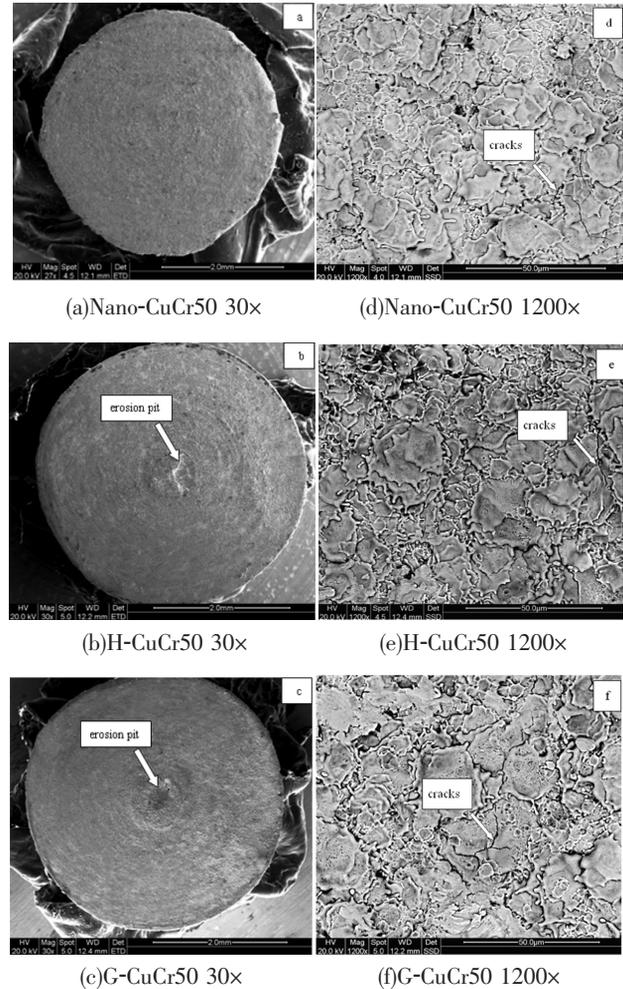


图 2 阴极触头侵蚀形貌(分断电流 10 A, 操作 5 000 次)

Fig. 2 SEM micrographs of CuCr cathode contact materials eroded by arc after switching 5 000 times 10 A current

3 讨论

由于组成微粒尺寸减小, 纳米触头材料热学性能及机械性能与微晶触头材料有较大的差异。和微晶触头材料相比, 纳米材料的熔点降低^[13-18], 比热容增大^[19-21]、热导率减小^[22-24], 硬度和强度增大。热学性能和机械性能上的差异, 导致纳米 CuCr 材料和微晶 CuCr 材料的电弧侵蚀特征有明显的不同。

3.1 分断燃弧时间

在小电流情况下, 触头间分断燃弧时间的长短主要由分断过程中产生的金属蒸汽的多少决定, 而蒸汽压又与材料的显微结构有密切的关系。冯宇等^[25]建立了晶粒尺寸与饱和蒸汽压的关系模型, 得出了饱和蒸汽压与晶粒半径的关系曲线。当晶粒尺寸为 60 nm 时, 纳米 CuCr50 材料的饱和蒸汽压约为 0.9×10^7 Pa, 大约为微晶 CuCr50 材料的 10 倍。蒸汽

压越高,越能长时间的提供维持电弧燃烧所必须的金属蒸汽,所以纳米 CuCr50 触头材料的平均分断燃弧时间高于微晶 CuCr50 触头材料。

3.2 触头侵蚀量

对于真空开关电器,电弧侵蚀是造成触头材料损失的重要原因。在低电压、小电流下主要是阴极型电弧造成触头材料的侵蚀与转移。文[26-27]研究指出:材料的 $\theta_m \sqrt{C_p \rho_m \lambda}$ 值越小(θ_m 、 C_p 、 ρ_m 、 λ 分别为材料的熔点、比热容、密度和热导率),则材料越易熔化和蒸发。纳米材料的熔点、热导率和密度降低的比例,较比热容增加的比例大,如 ZHANG^[15]等人研究发现纳米 Cu 的熔点比微晶 Cu 的熔点降低了约 30%;RUPP^[21]等人指出纳米 Cu 的比热容比微晶 Cu 增大 9%~11%;曹一琦^[24]等人研究发现常温下纳米 $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ 的热导率比微晶材料降低了 31%。因此纳米材料的 $\theta_m \sqrt{C_p \rho_m \lambda}$ 值小于微晶材料,纳米 CuCr50 触头材料比微晶 CuCr50 材料容易熔化和蒸发,导致其阴极触头的侵蚀量高于微晶 CuCr50 触头。

3.3 触头形貌

触头表面电弧侵蚀形貌与电弧斑点的运动特点有密切的关系。已有研究结果表明:微晶 CuCr25 合金的真空电弧阴极斑点扩散表现为原地重复燃烧或整体的跳跃式移动,且有选择性地分布在 Cr 相;而纳米 CuCr25 材料的击穿相均匀分布在整个阴极表面,阴极斑点扩散表现为准连续移动,不存在选择性的击穿^[28-29]。该试验中虽然纳米 CuCr50 触头材料分断燃弧时间和阴极触头侵蚀量均高于微晶 CuCr50 材料,但由于纳米 CuCr50 材料触头表面 Cr 颗粒的细化和均匀分布,消除了选择性击穿,因此触头表面电弧侵蚀较均匀;而微晶 CuCr50 触头材料真空电弧的阴极斑点有选择性的发生在耐电强度低的 Cr 相上,且受到电场强度的影响,阴极斑点的运动范围局限于阳极正下方,导致其触头局部烧蚀严重,中心处出现明显的凹坑侵蚀。

4 结论

在直流 24 V/10 A,阻性负载和真空环境下,利用触点模拟装置,进行了纳米 CuCr50 触头材料的电侵蚀试验,试验完成之后分析了材料侵蚀量与燃弧时间和触头表面形貌之间的关系。根据试验结果,可以得出以下结论:

1) 纳米 CuCr50 触头材料平均分断燃弧时间大于微晶 CuCr50 触头材料;

2) 纳米 CuCr50 材料阴极触头电弧侵蚀量大于微晶 CuCr50 触头材料;

3) 纳米 CuCr50 触头表面 Cr 颗粒细化及均匀分布,有利于分散电弧。纳米 CuCr50 阴极触头表面电弧烧蚀比较均匀,两种微晶 CuCr50 触头阴极表面电弧局部烧蚀严重,触头表面中心出现明显的凹坑侵蚀。

致谢

华中科技大学材料科学与工程学院的薛丽红和史昆玉博士对本论文的修改提出了很有价值的意见,在此向她们表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] SLADE P G. Advance in materials development for high power vacuum interrupter contacts[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part A, 1994, 17(1): 96-106.
- [2] 修士新, 邹积岩, 何俊佳. CuCr 触头材料微观特性对其宏观性能的影响[J]. 高压电器, 2000, 36(3): 40-42. XIU Shi-xin, ZOU Ji-yan, HE Jun-jia. Effects of the microstructure on the properties of CuCr contact material[J]. High Voltage Apparatus, 2000, 36(3): 40-42
- [3] RIEDER W F, SCHUSSEK M, GLATZLE W, et al, The influence of composition and Cr particle size of CuCr contacts on chopping current, contact resistance and breakdown voltage in vacuum interrupters[J]. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 1989, 12(2): 273-283.
- [4] WANG Y P, DING B J. The preparation and the properties of microcrystalline and nanocrystalline CuCr contact materials[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 1999, 22(3): 467-472.
- [5] DING B J, YANG Z M, WANG X T. Influence of microstructure on dielectric strength of CuCr contact materials in a vacuum[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part A, 1996, 19(1): 76-81.
- [6] YANG Z M, ZHANG Q L, WANG Q F, et al. Vacuum arc characteristics on nanocrystalline CuCr alloys[J]. Vacuum, 2006, 81(4): 545-549.
- [7] YANG Z M, ZHANG Q L, ZHANG C Y, et al. Influence of microstructure of CuCr25 cathode on the motion of vacuum arc spots[J]. Physics Letters A, 2006, 353(1): 98-100.
- [8] 冯宇, 张程煜, 丁秉钧. 纳米 CuCr 合金的制备及其截流值研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(9): 1439-1442. FENG Yu, ZHANG Cheng-yu, DING Bing-jun. Preparation of nanocrystalline CuCr contact materials and their chopping currents[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(9): 1439-1442.

- [9] WANG Ya-ping, ZHANG Cheng-yu, ZHANG Hui, et al. Effect of the microstructure of electrode materials on arc cathode spot dynamics[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2003, 36(21): 2649-2654.
- [10] YU L, WANG J H, GENG Y S, et al. High-current vacuum arc phenomena of nanocrystalline CuCr25 contact material[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(5): 1-9.
- [11] LI Zhen-biao, WEI Mei-fang, HASEGAWA M. Effect of arcing behavior characteristics on welding resistance of relay contacts [J]. IEICE Transactions on Electronics, 2007, E90-C(7):1385-1390.
- [12] ZHAO Lai-jun, LI Zhen-biao, HASEGAWA M. Random occurrence of contact welding in electrical endurance tests [J]. IEICE Transactions on Electronics, 2011, E94-C(9): 1362-1368.
- [13] 阎守胜. 固体物理基础 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2003. YAN Shou-sheng. Elements of solid state physics [M]. Beijing: Peking University Press, 2003.
- [14] 倪星元. 纳米材料的理化特性与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006. NI Xing-yuan. Properties and applications of nanometer materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [15] ZHANG Z K, CUI Z L, CHEN K Z, et al. Nano-copper and nanoconductive fibers structure [J]. Chinese Science Bulletin, 1995, 40(20):1852-1854.
- [16] 肖时芳. 纳米结构金属及合金热力学性能的原子模拟 [D]. 湖南: 湖南大学, 2007. XIAO Shi-fang. Atomistic simulations for thermodynamic properties of nanostructured metals and alloys[D]. Hunan: Hunan University, 2007.
- [17] XIAO S F, HU W Y, YANG J Y. Melting behaviors of nanocrystalline Ag [J]. Journal of Physical Chemistry B, 2005, 109(43): 20339-20342.
- [18] XIAO S F, HU W Y, YANG J Y. Melting temperature: From nanocrystalline to amorphous phase [J]. Journal of Chemical Physics, 2006, 125(18):1-4.
- [19] GLEITER. H. Nanocrystalline materials [J]. Progress in Materials Science, 1989, 33(4): 223-315.
- [20] 王广厚, 韩 民. 纳米微晶材料的结构和性质 [J]. 物理学进展, 1990, 10(3): 248-289. WANG Guang-hou, HAN Min. Structures and properties of nanocrystalline materials [J]. Progress in Physics, 1990, 10(3): 248-289
- [21] RUPP J, BIRRINGLR R. Enhanced specific-heat-capacity (C_p) measurements (150~300 K) of nanometer-sized crystalline materials [J]. Physical Review B, 1987, 36(15): 7888-7890.
- [22] 陈立东, 熊 震, 柏胜强. 纳米复合热电材料研究进展 [J]. 无机材料学报, 2010, 25(6): 561-568. CHEN Li-dong, XIONG Zhen, BAI Sheng-qiang. Recent progress of thermoelectric nano-composites [J]. Journal of Inorganic Materials, 2010, 25(6): 561-568.
- [23] POUDEL B, HAO Q, MA Y, et al. High-thermoelectric performance of nanostructured bismuth antimony telluride bulk alloys [J]. Science, 2008, 320(5876): 634-638.
- [24] 曹一琦. Te 基热电材料的纳米化及热电性能 [D]. 浙江: 浙江大学, 2009. CAO Yi-qi. Thermoelectric properties and nanostructures of Te based materials [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2009.
- [25] 冯 宇, 张程煜, 杨志懋, 等. CuCr 触头材料纳米化对真空放电性能的影响 [J]. 兵器材料科学与工程, 2005, 28(5): 19-22. FENG Yu, ZHANG Cheng-yu, YANG Zhi-mao, et al. Effects of nanocrystallization of CuCr contact materials on characteristics of vacuum discharge [J]. Ordnance Material Science Engineering, 2005, 28(5): 19-22.
- [26] 李震彪, 张逸成, 程礼椿. 电器热稳定性的理论分析 [J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(1):26-28. LI Zhen-biao, ZHANG Yi-cheng, CHENG Li-chun. Theoretical analysis on short time withstand current of electrical apparatus [J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 1998, 18(1):26-28.
- [27] 李震彪, 张冠生. 电触头材料及其不同配对时抗动熔焊能力的研究 [J]. 电工技术学报, 1993(3): 61-62. LI Zhen-biao, ZHANG Guan-sheng. The investigation on dynamic welding resistance of electric contact materials and their pairings [J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 1993(3): 61-62.
- [28] 冯 宇, 卜 涛, 王红理, 等. CuCr25 纳米晶化对真空电弧阴极斑点扩散的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(5): 929-932. FENG Yu, BO Tao, WANG Hong-li, et al. Influence of nanocrystallization of CuCr25 on spot diffusion of cathode by vacuum arc [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(5): 929-932.
- [29] 王庆丰, 崔树茂, 张锐丽, 等. 纳米 CuCr25 合金的阴极斑点运动特性 [J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(4): 641-643. WANG Qing-feng, CUI Shu-mao, ZHANG Rui-li, et al. Characteristics of cathode spot motion on nanocrystalline CuCr25 alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(4): 641-643.

赵来军(1980—),男,博士研究生,讲师,主要研究方向为电弧与电接触。