

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.12.030

纤维增强高强高导铬锆铜弹簧触指

李家梅¹, 袁佳¹, 张实¹, 贾一凡¹, 苏谋², 李伟²

(1. 西安高压电器研究院股份有限公司, 西安 710077; 2. 西安西电光电电缆有限责任公司, 西安 710082)

摘要: 螺旋弹簧触指是高压开关关键零部件之一,对高压开关设备的性能起着至关重要的作用。针对现有牌号铬锆铜弹簧触指高导电、但强度、硬度低的性能瓶颈,文中通过设计高铬质量分数(10%~18%)铬锆铜合金配方,结合原位生成纤维技术,利用形变强化、固溶强化、界面强化等多种材料强化方式,制备出一种纤维增强高强高导铬锆铜螺旋弹簧触指。结果表明,该新型铬锆铜弹簧触指抗拉强度达791 MPa,导电率89.7%IACS,显微维氏硬度192HV_{0.1},达到力学性能和电性能的良好配合,各项性能指标均优于现有牌号铬锆铜弹簧触指(C18150)。

关键词: 高铬铬锆铜; 纤维增强; 高强度; 高导电; 弹簧触指

Cr-Zr-Cu Spring Contact Finger with Fiber-reinforced High-strength and High-conductivity

LI Jiamei¹, YUAN Jia¹, ZHANG Shi¹, JIA Yifan¹, SU Mou², LI Wei²

(1. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 2. Xi'an XD Cable Co., Ltd., Xi'an 710082, China)

Abstract: Spiral spring contact finger is one of the key parts of high voltage switchgear and plays a crucial role in the performance of high voltage switchgear. In view of such bottleneck as high conductivity but low strength and hardness performance of existing brand of Cr-Zr-Cu spring contact finger, a kind of new-type Cr-Zr-Cu spiral spring contact finger with fiber reinforced high strength and high conductivity is produced by designing Cr-Zr-Cu alloy formula with high Cr content (10%-18%), combining with in-situ generation fiber technology and using such multiple material reinforcement modes as deformation strengthening, solid-solution strengthening and interface strengthening. The result shows that the tensile strength, conductivity and micro vickers hardness of the new-type Cr-Zr-Cu spring contact finger reach 791 MPa, 89.7%IACS and 192HV_{0.1} respectively, reach good coordination of both mechanical and electrical performance and each performance data is superior to existing brand of Cr-Zr-Cu spring contact finger (C18150).

Key words: high Cr content Cr-Zr-Cu; fiber reinforcement; high strength; high conductivity; spring contact finger

0 引言

螺旋弹簧触指(简称弹簧触指)作为高压开关设备中重要的电连接元件,在高压开关产品中已经得到广泛应用,尤其在气体绝缘全封闭组合电器(gas insulated switchgear, GIS)系列产品中应用更为普遍。它是通过选用强度和导电性优良的铜合金丝,经绕制、焊接、定型、热处理后再镀银而成。因其结构简单、体积小,通流容量大^[1-12]而被广泛用于高压、特高压断路器中的滑动接触及静连接处,包括如高

中压开关、母线连接件、高电流连接件、断路器连接件、固封极柱和机械电子应用等方面^[13-14]。

弹簧触指主要有铍铜、铍钴铜、铬锆铜3种材质,随着开关电器的高电压、小型化及环境友好方向的发展趋势,铍铜和铍钴铜由于导电性差^[15],铍有毒,逐渐失去市场优势。目前使用的铬锆铜弹簧触指导电性虽好,但强度、硬度低,弹性小,使用过程中易变形^[7],只能用于制备小尺寸、低电压需求的弹簧触指。为迎合高压开关设备的高速发展需求,笔者采用新配方、新工艺制备出一种兼具高强度、高

导电、无污染的纤维增强新型铬锆铜弹簧触指, 以满足高压开关对弹簧触指提出的高要求。

1 试验材料及方法

现有牌号铬锆铜弹簧触指中的Cr质量分数为0.3%~1.2%^[6], 文中所述纤维增强新型铬锆铜弹簧触指采用高铬配方, Cr质量分数10%~18%具体成分见表1。是通过真空熔铸、均匀化退火、挤压、轧制, 多道次连续拉拔及中间再结晶退火得到线径为 $\phi 1.5$ mm的铬锆铜丝材, 再对丝材进行绕簧、焊接、定型、热处理等工序制备而成。

1.1 弹簧触指材料配方

本实验弹簧触指所用原材料选取纯度为99.9%铜、99.9%铬、99.9%锆、镁、硒。设计的4种配方(重量百分比)见表1。

表1 弹簧触指配方设计

Table 1 Formula design of spring contact				
试样	Cr/%	Zr/%	Mg和硒/%	Cu
1号	10.0	0.20	0.006~0.019	余量
2号	12.0	0.20	0.006~0.019	余量
3号	15.0	0.20	0.006~0.019	余量
4号	18.0	0.20	0.006~0.019	余量
现有牌号铬锆铜(C18150) ^[6]	0.3~1.2	0.03~0.30	—	余量

1.2 弹簧触指制备工艺

纤维增强弹簧触指制备工艺见图1。维持真空度 5.0×10^{-2} Pa的条件下熔炼铬锆铜合金, 并浇铸成锭; 接着对铸锭进行均匀化退火, 挤压开坯, 轧制减径, 多道次连续拉拔及中间再结晶退火, 得到 $\phi 1.5$ mm的铬锆铜丝材。将上述铬锆铜丝材在TK316电脑数控卷簧机上绕制成直圈弹簧, 绕制完成后在HWS-1000全数字精密智能补焊机上进行电子脉冲焊接, 并采用固定模具在压簧成型机上完成定型。最后在专门设计的热处理定型工装上对弹簧触指进行时效处理, 得到纤维增强弹簧触指样件。

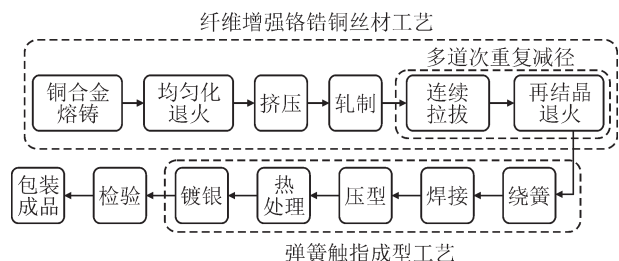


图1 弹簧触指制备工艺

Fig. 1 Molding process of spring contact

1.3 性能测试方法

弹簧触指丝材需要观察微观组织, 检测抗拉强

度、导电率; 弹簧触指样件需要进行外观尺寸检查, 硬度、电导率测试。其中铬锆铜丝材的抗拉强度在WDW-20电子万能拉伸试验机上进行; 电导率试验在QJ36型两用直流电桥上进行; 硬度用VH1202维氏显微硬度计进行测量, 并用VEGA3 TESCAN场发射扫描电镜进行微观组织观察, 所用腐蚀剂浓度为40% HNO_3 , 腐蚀后用超声波清洗, 清洗液用酒精溶液。

2 试验结果与分析

传统铬锆铜弹簧触指(C18150)Cr质量分数较低, 为0.3%~1.2%^[6], 强化方式主要为固溶强化和少量Cr及其化合物产生的弥散强化, 强化效果有限。文中所述纤维增强铬锆铜弹簧触指为高铬铬锆铜配方, Cr质量分数10%~18%, 它是往铜中加入过量的与其固态下既不溶解^[7], 也不形成化合物的合金元素Cr, 制得两相复合体。过量的Cr元素以单相形式, 呈枝晶状结构存在于凝固态合金中, 此后对合金进行强烈的冷变形, 通过控制拉丝速度、温度、道次变形及再结晶退火等工艺的匹配度, 促使Cr原子沿拉制方向呈纤维化分布, 形成Cr纤维增强铜基复合材料, 从而保证丝材高导电的同时获得优异的机械性能。

2.1 铬锆铜丝材的微观组织

不同成分铬锆铜丝材试样的纵向SEM形貌及1号(Cr10-Zr0.2-Cu)铬锆铜丝材的EDS图谱见图2。图2(a)-(d)分别为1号(Cr-10Zr0.2-Cu)、2号(Cr12-Zr0.2-Cu)、3号(Cr15-Zr0.2-Cu)、4号(Cr18-Zr0.2-Cu)铬锆铜丝材的纵向SEM图片; 图2(e)为1号铬锆铜丝材EDS线扫图, 其中曲线1、2、3分别为Cu、Cr、Zr元素分布曲线; 图2(f)为1号铬锆铜丝材Cr元素面扫图, 浅色区域为Cr元素在铜基体上的分布情况。结合图2(a)-(f)可以看出, 图中箭头处为生成的Cr纤维。图2(a)显示1号铬锆铜丝材中Cr相呈细长纤维状, 与基体Cu均匀交替排列, 界面结合良好; Cu基体相互连通, 呈连续网络状分布, 紧紧包裹着Cr纤维。图2(b)-(d)中的Cr纤维相出现团聚现象, 呈椭球状, 分布不均匀, 这是由于2~4号铬锆铜丝材中Cr质量分数过高, 产生密集的枝晶Cr, 导致大变形过程中Cr纤维的聚集。

2.2 铬锆铜丝材抗拉强度

按照GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第一部分: 室温试验方法》对直径为 $\phi 1.5$ mm的4种铬锆铜丝材试样进行抗拉强度检测, 检测结果见表2。从抗拉强度数据可以看出, 文中所制备的4种新型铬锆铜丝材抗拉强度分别为791、754、754、720 MPa均

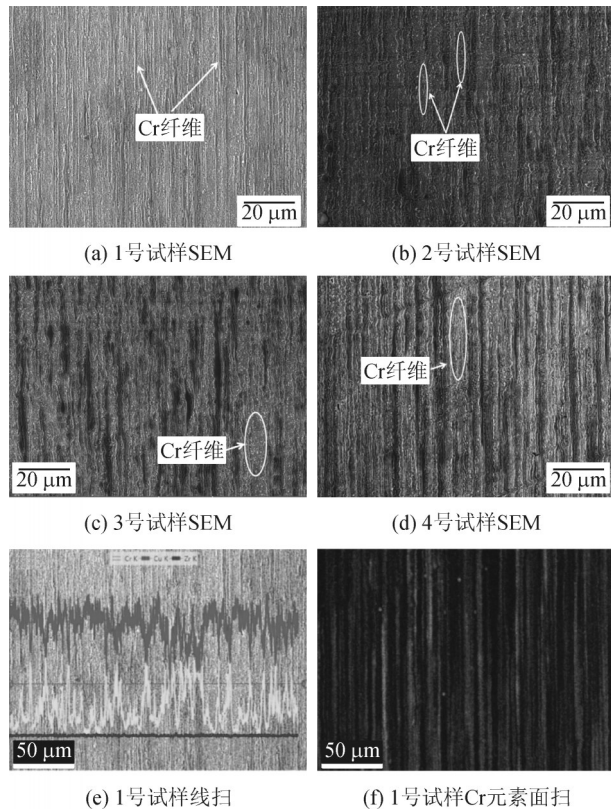


图2 不同成分铬锆铜丝材试样的纵向SEM形貌及1号铬锆铜丝材的EDS图谱

Fig. 2 SEM microstructures of different Cr-Zr-Cu wire on the longitudinal section and EDS micrographs of No.1 Cr-Zr-Cu

明显高于现有牌号铬锆铜弹簧触指丝材的抗拉强度(400~500 MPa),近乎为现有牌号铬锆铜丝材(C18150)抗拉强度的1.5倍。

表2 不同铬锆铜丝材试样的抗拉强度和电导率

Table 2 The tensile strength and conductivity of different Cr-Zr-Cu wire

试样	抗拉强度/MPa	电导率/%IACS
1号	791	86
2号	754	64
3号	754	60
4号	720	70
现有牌号铬锆铜 (C18150) ^[7]	400~500	75~80

文中弹簧触指丝材表现出的高强度,主要是该新型铬锆铜丝材采用高铬配方设计,结合原位生成纤维技术制备而成,是形变强化、固溶强化、和界面强化等多种强化方式共同作用的结果。由于所述铬锆铜合金中的Cr纤维增强体是原位生成的^[18-26],与基体Cu界面结合良好。当材料受载时,Cr纤维承担了外加载荷的作用,成为主要的应力承载体;而具有优异塑性变形能力的Cu基体只是作为媒介,起

到传递应力和松弛应力的作用,因而Cr纤维体的断裂控制了整个材料的断裂,如此通过两相协调变形得到弹簧触指丝材的高强度。由表2可知,随Cr质量分数增加,铬锆铜丝材的抗拉强度逐渐降低,是由于2、3、4号铜合金丝材中出现团聚的Cr纤维,排列不均,进而恶化了复合材料的抗拉强度。

2.3 铬锆铜丝材电导率

按照GB/T 3048.2—2007《电线电缆电性能试验方法 第2部分:金属材料电阻率实验》和GB/T 5586—1998《电触头材料基本性能试验方法》对直径为 $\phi 1.5$ mm的4种铬锆铜丝材试样进行电导率测试,试验结果见表2。由表2可以看出,当1号试样Cr质量分数为10%时,测得电导率为86%IACS,优于现有牌号铬锆铜(C18150)丝材电导率要求。究其原因,一是Zr的加入促进了Cr的析出,降低了Cr在基体中的固溶度,减少了材料电阻率;二是丝材拉制时的再结晶退火过程中,材料内部发生的再结晶现象也会使得电导率有所提升;再者对导电性起主导作用的Cu基体相互贯通,呈网络状分布,电流传递完全不受Cr纤维相的影响,进而保证这种弹簧触指丝材拥有较高的电导率。表2中也可看出,2、3、4号试样的电导率表现较低,是因为Cr元素过量添加所致。且随Cr质量分数增加,电导率表现出先减小后增大的趋势,是因为当Cr质量分数大于15%时,初次结晶的Cr枝晶团聚现象严重,局部区域内Cu富集,使电导率出现升高现象。

综合比较表2中抗拉强度和电导率的测试结果可得,当Cr质量分数为10%时,可保证纤维增强新型铬锆铜丝材高电导率(86%IACS)的同时拥有优异的抗拉强度(791 MPa),即1号试样为文中的优选配方。故将1号铬锆铜丝材(Cr10-Zr0.2-Cu)试样按照1.2节成型工艺得到图3螺旋弹簧触指样件,所制弹簧触指表面质量良好,均匀美观,外形质量满足产品的图纸要求。

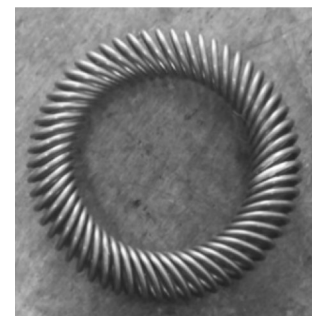


图3 新型铬锆铜螺旋弹簧触指样件(未镀银)
Fig. 3 Sample of new-type Cr-Zr-Cu spring contact (silver-unplated)

2.4 弹簧触指硬度

根据 GB/T 4340.1—2009《维氏硬度试验 第1部分: 试验方法》对优选配方1号铬锆铜丝材试样和弹簧触指样件进行显微维氏硬度测试, 结果见表3。可以看出1号铬锆铜丝材试样和弹簧触指样件硬度分别为189HV_{0.1}、192HV_{0.1}, 均明显高于现有牌号铬锆铜(C18150)丝材的硬度^[7], 已接近于铍钴铜的硬度。这是丝材受外力作用时, Cr纤维与Cu基体协调变形过程中界面强化与位错强化共同作用的结果。表3中1号铬锆铜丝材和弹簧触指成型件硬度值相近, 是因为铬锆铜丝材在制造过程中已经过固溶、时效处理, 焊接后进行时效处理的目的在于改变焊缝组织的组织, 调整焊缝区域性能, 对母材的性能影响不大^[27]。

表3 1号铬锆铜丝材试样和弹簧触指样件硬度

Table 3 Hardness of No.1 Cr-Zr-Cu wire and spring contact

试样	硬度 HV _{0.1}
1号(Cr10-Zr0.2-Cu)铬锆铜丝材	189
弹簧触指样件	192
现有牌号铬锆铜 CrZrCu(C18150) ^[7]	143 ~ 175
铍钴铜 CuCo2Be(C17500) ^[7]	200 ~ 290

2.5 弹簧触指电导率

经检测, 弹簧触指样件电导率达89.7%IACS, 相比表2中热处理之前电导率有微微提升, 是因为经热处理后进一步促进了Cu基体中Cr和Zr析出。该电导率是在弹簧触指未镀银之前的测试结果, 明显优于牌号为C18150铬锆铜电导率指标。

3 结论

1)文中通过设计高铬质量分数铬锆铜合金配方(10%~18%), 结合原位生成纤维技术制备的纤维增强铬锆铜弹簧触指, 抗拉强度达791 MPa, 显微维氏硬度192HV_{0.1}, 电导率89.7%IACS, 各项性能指标均明显优于现有牌号低铬(0.3%~1.2%)铬锆铜弹簧触指(C18150)。

2)文中通过对高铬质量分数的铬锆铜弹簧触指进行梯度试验, 表明Cr质量分数为10%时, 纤维增强铬锆铜丝材的综合性能最好, 为文中的优选配方设计。

参考文献:

[1] 黎 斌, 张正周. 弹簧触头的设计[J]. 高压电器, 2007, 43(5): 358-360.
LI Bin, ZHANG Zhengzhou. Design of spring contacts[J].

High Voltage Apparatus, 2007, 43(5): 358-360.
[2] 李 健. 浅析弹簧触指在GIS中的应用[J]. 高压电器, 2007, 43(6): 438-439.
LI Jian. Application of the canted coil spring to GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(6): 438-439.
[3] 马金财, 刘 刚, 何 龙. 基于电-热-力耦合的螺旋弹簧触指稳态温升分布仿真研究[J]. 高压电器, 2023, 59(8): 223-231.
MA Jincan, LIU Gang, HE Long. Simulation study on steady-state temperature rise distribution of helical spring contact finger based on electrical-thermal-mechanical coupling[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(8): 223-231.
[4] 张正周, 黎 斌. 弹簧触头设计(IV)——弹簧触头的损坏与对策[J]. 高压电器, 2013, 49(5): 18-20.
ZHANG Zhengzhou, LI Bin. Spring contact design (IV)—Damage and countermeasure of spring contact[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(5): 18-20.
[5] 王兆军, 谢田桑, 聂二磊. 弹簧触指在GIS中的应用[J]. 装备材料, 2013(7): 44-46.
WANG Zhaojun, XIE Tiansang, NIE Erlei. The use of spring contacts in GIS[J]. Equipment Materials, 2013(7): 44-46.
[6] 夏立国. 弹簧触头在隔离开关中的应用[J]. 科学技术创新, 2010(30): 55.
XIA Ligu. The application of spring contacts in isolating switches[J]. Science and Technology Innovation, 2010(30): 55.
[7] 赵江涛, 陈文革. 螺旋弹簧触指及其材料的研究与进展[J]. 上海电气技术, 2012, 5(4): 30-37.
ZHAO Jiangtao, CHEN Wenge. Research and development of screw spring contact and materials[J]. Journal of Shanghai Electric Technology, 2012, 5(4): 30-37.
[8] 张正周, 郭 薪, 黎 斌. 滑动电接触设计现状与发展动态[J]. 高压电器, 2012, 48(5): 121-123.
ZHANG Zhengzhou, GUO Xin, LI Bin. Design actuality and develop trends of sliding electric contact[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(5): 121-123.
[9] 张正周, 黎 斌. 弹簧触头设计(II)[J]. 高压电器, 2011, 45(3): 70-72.
ZHANG Zhengzhou, LI Bin. Design of spring contact(II)[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 45(3): 70-72.
[10] 郭自豪, 赵献臣, 薛红涛. 弹簧触指在隔离开关中的应用研究[J]. 电工电气, 2016(9): 43-46.
GUO Zihao, ZHAO Xianchen, XUE Hongtao. Application research on spring contacts in disconnectors[J]. Electrical Apparatus, 2016(9): 43-46.
[11] 胡金祥. 弹簧触指的设计与应用[J]. 电工电气, 2017(10): 60-64.
HU Jinxiang. Design and application of spring contact finger[J]. Electrical Apparatus, 2017(10): 60-64.

- [12] 张正周,宋新锋,独田娃,等. 弹簧触头设计(Ⅲ)[J]. 高压电器,2011,47(5):87-91.
ZHANG Zhengzhou, SONG Xinfeng, DU Tianwa, et al. Design of spring contacts(Ⅲ)[J]. High Voltage Apparatus, 2011,47(5):87-91.
- [13] BARAGETTI S, TERRANOVA A, VIMERCATI M. Friction behaviour evaluation in beryllium-copper threaded connections[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2009,51(11/12):790-796.
- [14] MU S G, GUO F A, TANG Y Q, et al. Study on microstructure and properties of aged Cu-Cr-Zr-Mg-Re alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2008,475(1-2):235-240.
- [15] CHENTOUF S M, BOUABDALLAH M, CHENITI H, et al. Ageing study of Cu - Al - Be hypoeutectoid shape memory alloy[J]. Materials Characterization, 2010, 61(11): 1187 - 1193.
- [16] Special wrought copper alloys - chemical composition and forms of wrought products: ISO 1187—1983[S].1983.
- [17] 刘平,苏娟华. 新型铜铬系合金及其制备技术[M]. 北京:科学出版社,2007.
LIU Ping, SU Juanhua. New copper-chromium alloys and their preparation technology[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [18] 刘平,赵冬梅,田保红. 高性能铜合金及其加工技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2005.
LIU Ping, ZHAO Dongmei, TIAN Baohong. High-performance copper alloys and their processing technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005.
- [19] 张家涛,陈敬超,甘国友,等. Cu-Cr 自生复合材料研究进展[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版),2002,27(3): 130-133.
ZHANG Jiatao, CHEN Jingchao, GAN Guoyou, et al. Research progress of Cu-Cr self-generating composite materials[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2002, 27(3): 130-133.
- [20] 段辉,李林蔚,宋羽,等.宽温域自粘结复合材料的量子化学研究及应用[J]. 大电机技术,2023(6):85-89.
DUAN Hui, LI Linwei, SONG Yu, et al. Quantum chemistry study and application of self - adhesive composites with wide temperature range[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2023(6): 85-89.
- [21] 郭凯强,李洋.激光自动焊接在金属化薄膜电容器的应用及技术研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023,44(1):27-33.
GUO Kaiqiang, LI Yang. Application and technical research of laser automatic welding in metallized film capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(1):27-33.
- [22] 张家涛,陈敬超,甘国友,等. Cu-Cr 自生复合材料研究进展[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版),2002,27(3):130-133.
ZHANG Jiatao, CHEN Jingchao, GAN Guoyou, et al. Research progress of Cu - Cr self - generating composite materials[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2002, 27(3): 130-133.
- [23] 张妍,武松杰,宋瀚生,等.不同浓度的缓蚀剂对水轮机常用低合金钢的腐蚀防护研究[J]. 大电机技术, 2022(3):77-81.
ZHANG Yan, WU Songjie, SONG Hansheng, et al. Study on corrosion protection of low alloy steel commonly used in power generation equipment with different concentrations of corrosion inhibitors[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2022(3): 77-81.
- [24] 张晋寅,李西育,韦晓星,等.干式套管芯体复合材料的机械损伤性能研究[J]. 电瓷避雷器,2023(6):226-233.
ZHANG Jinyin, LI Xiyu, WEI Xiaoxing, et al. Mechanical damage properties of dry bushing core composites[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(6): 226-233.
- [25] WEN H Q, ZOU Q M. Directional solidification of Cu-Cr alloy[J]. Rare Metals, 1998,17(4):104-108.
- [26] WEN H Q. The microstructure study on the directional solidified Cu - Cr alloys with high strength and conductivity[J]. Foundry Equipment Research, 1997(4):39-41.
- [27] 范艳艳,赵飞,刘作庆,等.新型铬铜大电流弹簧触指焊接和时效处理工艺参数研究[J]. 热加工工艺,2017(11):185-187.
FAN Yanyan, ZHAO Fei, LIU Zuoqing, et al. Study on process parameters of welding and aging treatment of Cr-Zr-Cu large current screw - contact[J]. Hot Working Technology, 2017(11):185-187.

李家梅(1986—),女,工程师,硕士,主要从事电工合金材料技术方面的研究工作(E-mail:24142102@qq.com)。