

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.08.001

气体绝缘刚性输电线路(GIL)导体过盈连接结构电性能分析

李 凯, 司晓闯, 徐仲勋, 宋继光, 苗晓军
(平高集团有限公司, 河南 平顶山 467000)

摘要: 为了验证低成本、高效率的过盈连接结构替代现有的焊接结构应用于GIL导体制造的可行性,对过盈连接结构的导体进行电性能分析研究。采用回路电阻测试仪测试了不同结构、不同制备工艺的导体的回路电阻,并利用Ansys对过盈连接结构的接触特性进行了仿真分析,然后选取合适的过盈连接结构和焊接结构一块进行了通流能力试验验证。结果表明:过盈量为0.15 mm的过盈连接结构的回路电阻与焊接结构相近,温升试验、短时耐受和峰值耐受电流试验结果合格,可以替代焊接连接结构用于GIL超长导体的制造,提高制造效率。

关键词: 气体绝缘刚性输电线路; 过盈连接; 电性能; 温升试验

Analysis for Electrical Properties of Gas Insulated Transmission Line(GIL) Conductor With Interference Fit Structure

LI Kai, SI Xiaochuang, XU ZHongxun, SONG Jiguang, MIAO Xiaojun
(Pinggao Group Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467001, China)

Abstract: In order to test and verify the feasibility of using low-cost, high-efficiency interference fit structure replaced conventional welded structure for GIL conductor manufacturing, electrical properties of conductors with interference bonding structures were analyzed. Loop resistances of conductors with different structures and different preparation processes were tested using loop resistance test instrument, the contact characteristics of interference fit structure analyzed using ANSYS software, and then, a suitable interference fit structure and welded structure were selected for verification of current carrying capacity. The results show that: the loop resistance of interference fit structure with 0.15 mm interference value and welded structure are similar, the results of temperature rise test, short-time withstand test and peak withstand test are authorized, interference fit structure can be replaced conventional welded structure in GIL manufacturing to improve manufacturing efficiency.

Key words: gas insulated transmission line; interference fit; electrical properties; temperature rise test

0 引言

气体绝缘刚性输电线路(gas insulated transmission line, GIL)具有不受恶劣气候和特殊地形等环境因素影响、有效利用空间资源、减少电磁影响、增大载流量以及故障率低、维护方便等优点,不仅广泛应用于水电、核电等重点工程的送出线部位^[1-6],同时替代原有常规架空输电线路和电力电缆的步伐正在加快,将成为中国未来超高压和特高压电力传输的重要电力装备。但是,目前GIL制造成本远远高于架空线路(约为是同长度架空线路的20倍)^[7],大大限制了GIL设备的推广应用,因此降低制造成本成

为当前重点研究的内容之一。

GIL的超长导体由于需要镀银而采用分体结构,两端接头镀银后与中间铝合金管材进行焊接^[8-10],其结构见图1。由于导体超长(一般18 m左右)不仅焊接困难,而且焊接后对焊缝位置进行打磨、抛光等工艺处理更是费时费力,造成导体制造成本高昂。过盈连接结构简单,承载能力大,承受冲击和变载的性能好,配合的定心精度高等,广泛应用于机械工程领域^[11-13]。目前过盈连接结构的过盈量设计、失效分析、装配工艺等方面已经进行了广泛深入的研究^[14-25],但是对过盈连接结构的电性能研究较少。

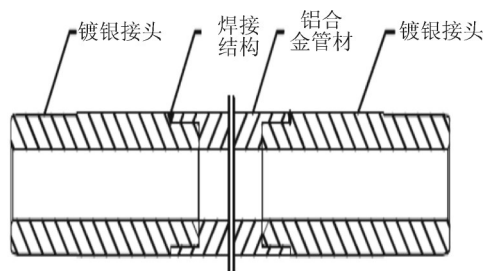


图1 GIL导体结构示意图

Fig. 1 Structure of GIL conductor

文中分别对使用冷装法和压装法装配的GIL过盈连接导体以及焊接结构的导体进行了电性能方面的研究,测试了不同工艺方法及过盈量导体的回路电阻,并对不同结构的通流能力进行了研究,以验证过盈连接结构替代焊接结构的可行性。

1 试验过程及条件

文中采用的导体接头结构模型见图2。由镀银接头和铝管组成,镀银接头和铝管均采用6063-T6铝合金材料,外径 $\Phi 60$ mm,壁厚15 mm。镀银接头和铝管接触部位表面光洁度 $R_a 1.6$,镀银接头长125 mm,铝管长85 mm,其中重叠部分长40 mm。过盈连接分别采用液氮冷装法和压力机压装法进行过盈装配,结构如图2(a)所示;焊接结构采用TIG+MAG相结合的焊接工艺,焊材为ER7043,焊后对焊缝进行打磨和抛光处理,结构如图2(b)所示。

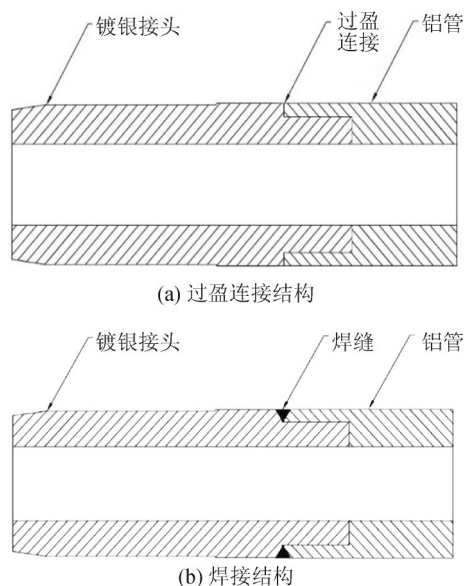


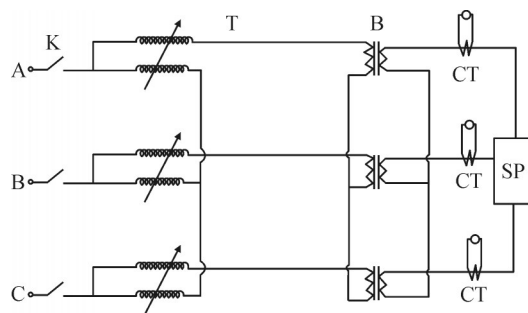
图2 导体接头结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of conductor connector

采用直流电压降法,利用MOM 690电阻测试仪对采用冷装法和压装法及焊接结构的样件的回路电阻进行测试,测量电流100 A,环境温度24℃,相

对湿度为65%RH。

根据电阻测试结果,选取合适的过盈量,设计并制备用于温升试验和动热稳定实验的样件,样件外径 $\Phi 60$ mm,由2段组成,长度分别940、340 mm,重合部分长度40,总长1 200 mm,分别采用冷装法和压装法过盈装配以及焊接连接。温升试验按照GB/T11022《高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求》进行,温升试验回路原理见图3。温升测量点示意图见图4。



T—调压器; B—升流器; CT—电流互感器; SP—试品;

图3 试验回路原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the test circuit

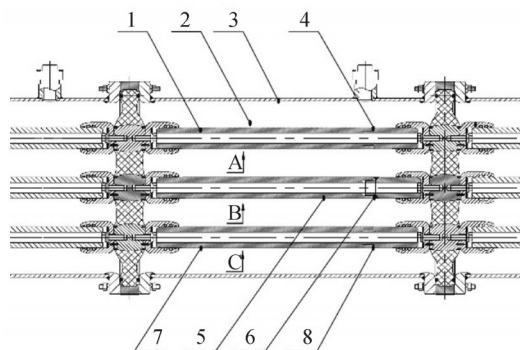
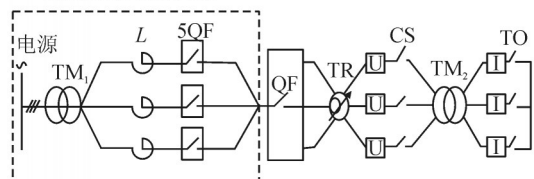


图4 温升测量点示意图

Fig. 4 Temperature rise measurement point diagram

试验电流:2 000 A $\times$ 1.1, 50 Hz。试验极数:3级。测量设备:1级允差T型热电偶。充SF₆气体压力:0.42 MPa(表压,20℃)。短时耐受电流和峰值耐受电流试验采用三相试验回路,试验按照GB 2706《交流高压电器动热稳定试验方法》进行,试验原理图见图5。

动热稳定电源回路



TM₁—试验变压器1; L—电抗器; 5QF—操作断路器1;
TR—调压变压器; CS—合闸开关; QF—操作断路器2
TM₂—试验变压器; 2U—电压测量元件; I—电流测量元件;
TO—试品。

图5 动热稳定试验原理图

Fig. 5 Schematic diagram of dynamic thermal stability test

2 试验结果及讨论

2.1 不同连接结构的电阻测试

分别对采用冷装法和压装法装配的极小过盈量(0.01 mm)、小过盈量(0.05 mm)、中等过盈量(0.11 mm)、较大过盈量(0.15 mm)的过盈连接结构以及焊接结构的回路电阻进行测试,测试结果见图6。

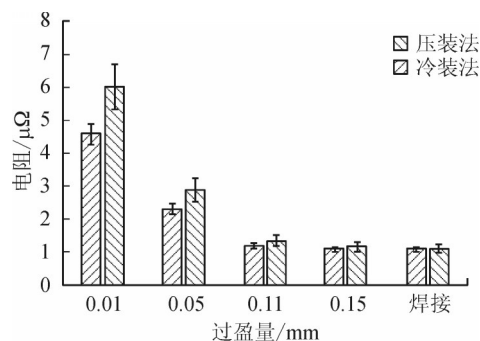


图6 不同连接结构的电阻

Fig. 6 Resistance of different connection structures

随着过盈量的增加,连接结构的电阻逐渐减小,当过盈量达到0.15 mm时,过盈连接结构的电阻与焊接结构的电阻基本相当,约为 $1.1 \mu\Omega$ 。同时随着过盈量的增加,电阻的减小不是呈现线性相关的减少趋势,当过盈量大于0.1 mm后,电阻的减小趋势变缓。

对不同过盈连接结构的接触应力的仿真分析,结果见图7。随着过盈量的增加,连接结构的包容件上承受的应力逐渐增大,过盈量为0.01、0.05、0.11、0.15 mm时,包容件上承受的最大应力分别为13.8、66.8、146.5、199.7 MPa。

根据文[26]研究结果,静态电接触面之间的接触电阻随着接触压力的增加而减小。其主要原因是:随着接触压力不断增大,导电斑点数量增多,造成接触电阻降低。但是,当过盈量为0.15 mm,包容件承受的应力为199.7 MPa,接近6063-T6材料的屈服强度214 MPa,所以过盈量不宜进一步增大,因此0.15 mm的过盈量较为理想。

采用压装法装配的过盈连接结构的电阻比同等过盈量采用冷装法装配的连接结构的电阻要小,其主要原因是:采用压装法装配时,接触表面的微小凸起在压装力的作用下发生滑移,不仅使接触面平滑,导电斑点数量增加,同时也将接触表面的氧化膜去除,减少接触面的膜电阻,从而进一步减小接触面的总体电阻。

2.2 不同连接结构温升试验

根据回路电阻测试结构,选取0.15 mm的过盈

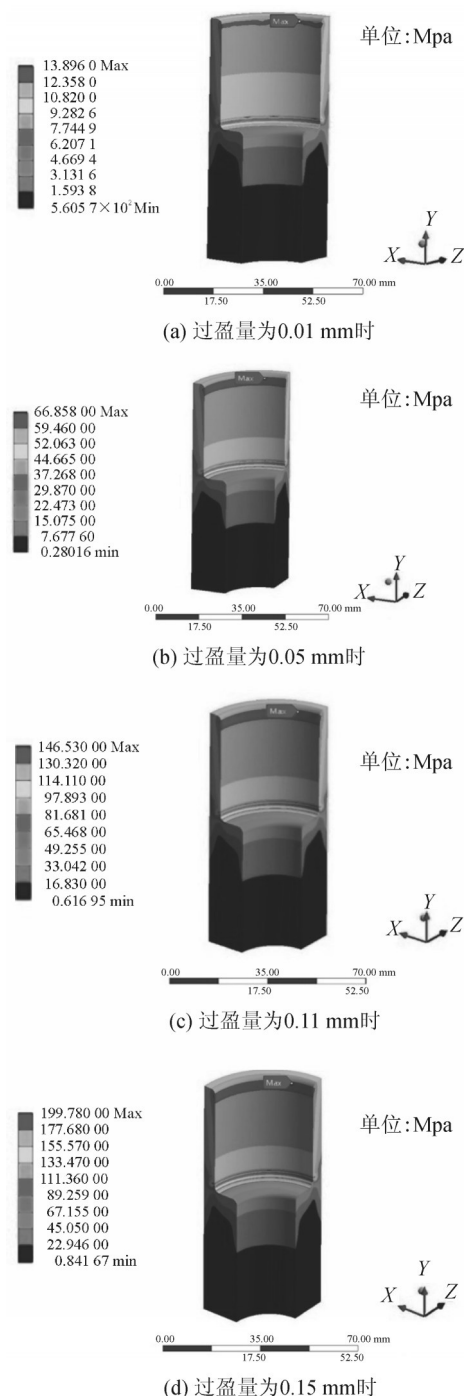


图7 不同过盈量连接结构的接触应力

Fig. 7 Contact stresses of connection structures with different interferences

量,分别采用冷装法和压装法制备温升试验样件,与焊接结构一同进行温升试验验证。试验样件的A相为压装法过盈连接结构的样件,B相为焊接结构样件,C相为冷装法过盈连接结构样件,三相成一字型布置在一个垂直于地面的平面内,A相处于最上部。环境温度为 28.7°C ,试品姿态见图8。

不同连接结构的导体样件的温升试验结果见表1。过盈连接结构和焊接结构的温升值均小于标

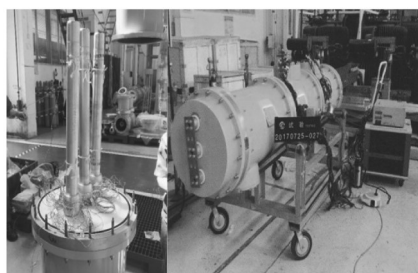


图8 试品姿态

Fig. 8 Test sample attitude

准要求的 75 K, 且有较大的裕度, 同时壳体和气体的温升也满足标准要求。

表1 不同结构的温升值

Table 1 Temperature rise results of different structures

序号	测量部位	实测值/K	允许值/K
1	导体	53.5	75
2	气体	37.3	50
3	外壳	24.2	30
4	过盈连接结构(压装)	53.6	75
5	导体	54.7	75
6	焊接连接结	54.2	75
7	导体	54	75
8	过盈连接结构(冷装)	55.7	75

温升试验结果显示, 采用压装法的过盈连接结构的温升值小于冷装法过盈结构, 主要是因为采用压装法制备的样件其接触端面接触压力较冷装法更大, 接触更加可靠, 其通流能力更强。

2.3 短时耐受电流和峰值耐受电流试验

温升试验后对样件进行短时耐受电流和峰值耐受电流试验, 试品姿态见图9。

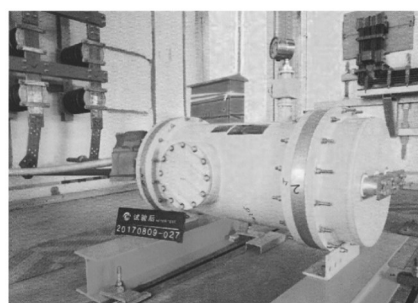


图9 短时耐受电流和峰值耐受电流试验姿态

Fig. 9 Test stance of dynamic thermal stability test

动热稳定试验前后主回路电阻见表2。从表2可看出, 试验前后主回路电阻值均小于 $40 \mu\Omega$, 且试验前后主回路电阻变化未超过试验前电阻的 20%; 不同结构的短时耐受电流和峰值耐受电流见表3。压装过盈结构短时耐受电流 41.1 kA, 峰值耐受电流 101.0 kA, 且试验中该结构的导体均未发生异常损坏, 符合标准 GB/T 7674 中 6.6 条的规定。试验过程

的典型示波图见图10。试验结果表明: 上述过盈连接结构可以替代焊接结构应用于产品上。

表2 动热稳定试验前后主回路电阻

Table 2 Resistance of main loop before and after dynamic thermal stability test

状态	电阻值/ $\mu\Omega$			环境 温度/ $^{\circ}\text{C}$	规定值/ $\mu\Omega$
	A极	B极	C极		
试验前	31.1	33.6	32.8	28.9	≤ 40.0
试验后	26.4	28.3	28.7	29	≤ 40.0

表3 不同结构的短时耐受电流和峰值耐受电流

Table 3 Short-time withstand currents and peak withstand currents for different structures

相序	峰值耐受 电流/kA	短时耐受电流/kA		短路持续 时间/s	$P_{tl}/(\text{kA}^2\text{s})$
		有效值	平均值		
A	101.0	41.1			
B	75.0	41.7	40.9	3.05	5102
C	71.0	39.8			

3 结论

通过对不同过盈量和不同装配方法制备的过盈连接结构件的回路电阻测试、温升试验及短时耐受电流和峰值耐受电流试验验证, 得出以下结论:

1) 随着过盈量的增加, 过盈连接结构的电阻逐渐减小, 当过盈量增加到一定值时, 电阻趋于稳定。

2) 相同过盈量的过盈连接结构, 采用压装法装配的电阻小于采用冷装法装配的样件; 当过盈量达到一定值时, 二者电阻基本相当。

3) 过盈连接结构能够满足产品温升试验及动热稳定试验要求, 可以替代焊接连接结构应用于 GIL 超长导体的制造。

参考文献:

- [1] BENATO B, MARIO C D, KOCH H. High-c-apability applications of long Gas-insulated lines in structures[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1):619-626.
- [2] KOCH H, HOPKING M. Overview of gas in-sulated lines[C]// Power Engineering Society General Meeting. San Francisco: [s.n.], 2005:940-944.
- [3] SCHOEFFNER G, GRAF R. Suitability of $\text{N}_2\text{-SF}_6$ gas mixtures for the application at gas insulated transmission lines GIL[C]//IEEE Bologna Power Tech Conference, Bologna: IEEE, 2003:2-6.
- [4] 高 凯, 李莉华. 气体绝缘输电线路技术及其应用[J]. 中国电力, 2007, 40(1):84-88.
GAO Kai, LI Lihua. Technology and application of gas-insulated transmission lines[J]. Electric Power, 2007, 40(1): 84-88.

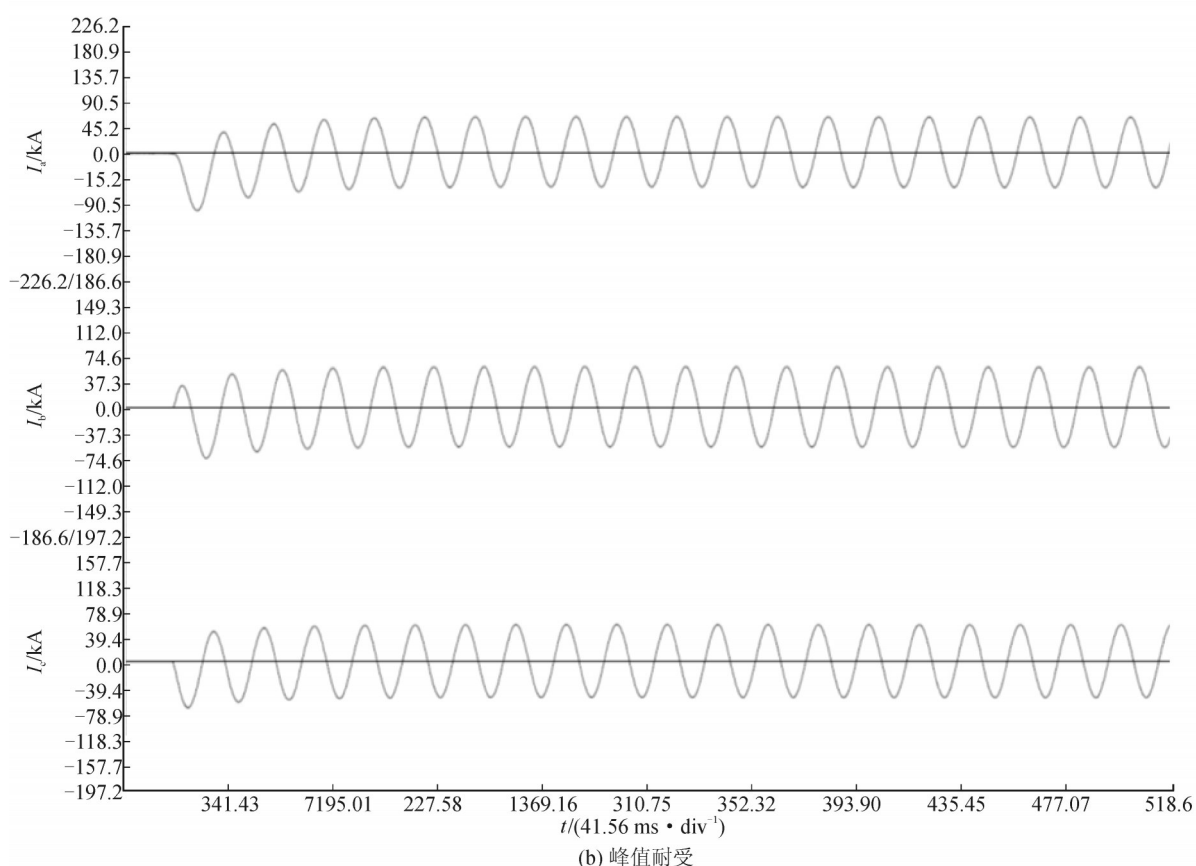
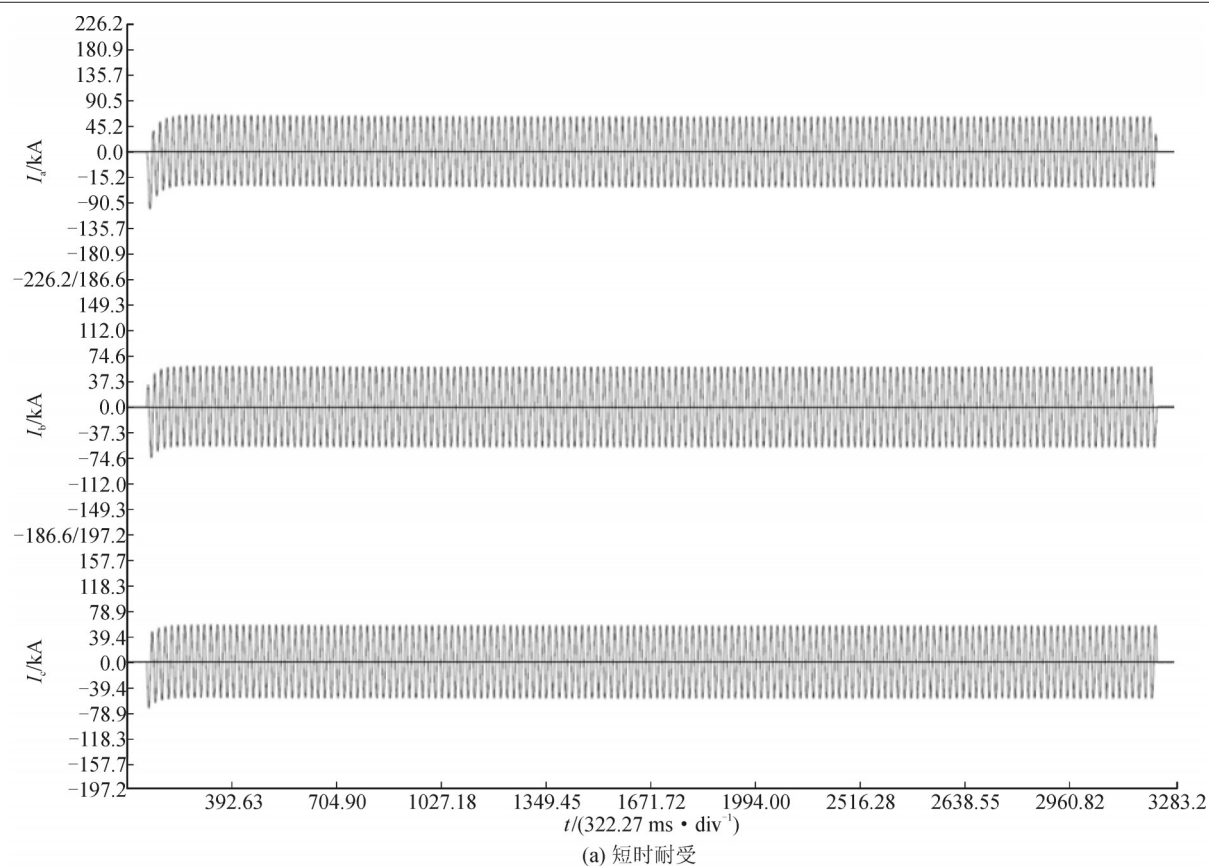


图 10 试验中的典型示波图

Fig. 10 Typical oscillography of experiment

- WANG Tongde, WANG Xiaoqi, WAN Fanghua, et al. Design and application of high voltage AC GIL[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(10):107-111.
- [6] 栾俊, 王义平, 杜云华. 金属全封闭气体绝缘输电线路在溪洛渡水电站的应用[J]. 水力发电, 2013, 39(8):66-68.
- LUAN Jun, WANG Yiping, DU Yunhua. Application of metal enclosed gas insulated transmission line in Xiluodu hydropower station[J]. Water Power, 2013, 39(8):66-68.
- [7] 陈轩恕, 胡毅, 辛耀中, 等. 高压长距离压缩空气绝缘输电线路的发展前景[J]. 高电压技术, 2009, 35(12):3137-3142.
- CHEN Xuanshu, HU Yi, XIN Yaozhong, et al. Prospect of high voltage long distance compressed air insulated transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12):3137-3142.
- [8] 雷鸣, 陈琳. 关于GIL和GIS母线产品基本结构尺寸设计探讨[J]. 高压电器, 2013, 49(4):128-133.
- LEI Ming, CHEN Lin. Discusses on basic structure design of GIL and GIS bus bar[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(4):128-133.
- [9] 鲁加明, 曹伟伟, 周振华. 550 kV GIL母线的结构设计[J]. 电气技术, 2015(9):59-63.
- LU Jiaming, CAO Weiwei, ZHOU Zhenhua. The structural design of 550 kV GIL bus[J]. Electrical Engineering, 2015(9):59-63.
- [10] 杨琪. GIL与GIS母线的结构特点与应用[J]. 高压电器, 2011, 47(8):72-74.
- YANG Qi. Characteristics and applications of GIL and GIS bus[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(8):72-74.
- [11] TRUMAN C E, BOOKER J D. Analysis of a shrink-fit failure on a gear hub/shaft assembly[J]. Engineering Failure Analysis, 2007, 14(4):557-572.
- [12] RADIE E, STROZZI A. Jeffery solution for an-elastic disk containing a sliding eccentric circular inclusion assembled by interference fit[J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 46(25-26):4515-4526.
- [13] MIRZAEI-SISAN A, FOKES A J, TRUMAN C E, et al. Residual stress measurement in a repair welded header in the as-welded condition and after advanced post weld treatment [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2007, 84(5):265-273.
- [14] OZEL A, TEMIZ S, AYDIN M D, et al. Stress analysis of shrink-fitted joints for various fit forms via finite element method[J]. Materials & Design, 2005, 26(4):281-289.
- [15] CROCCOLO D, DE AGOSTINIS M, VINCENZIN. Static and dynamic strength evaluation of interference fit and adhesively bonded cylindrical joints[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010, 30(5):359-366.
- [16] 滕瑞静, 张余斌, 周晓军, 等. 圆柱面过盈连接的力学特性及设计方法[J]. 机械工程学报, 2012, 48(13):160-166.
- TENG Ruijing, ZHANG Yubin, ZHOU Xiaojun, et al. Mechanical properties and design method of cylindrical interference fit[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(13):160-166.
- [17] 黄庆学, 王建梅, 静大海, 等. 油膜轴承锥套过盈装配过程中的压力分布及损伤[J]. 机械工程学报, 2006, 42(10):102-108.
- HUANG Qingxue, WANG Jianmei, JING Da-hai, et al. Pressure distribution and damages of oil-film bearing sleeve during the process of interference fit[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(10):102-108.
- [18] 杨广雪, 谢基龙, 李强, 等. 过盈配合微动损伤的关键参数[J]. 机械工程学报, 2010, 46(16):53-59.
- YANG Guangxue, XIE Jilong, LI Qiang, et al. Key parameters of fretting damage under shrink-fit[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(16):53-59.
- [19] 陈连. 过盈连接可靠性设计研究[J]. 中国机械工程, 2005, 16(1):28-30.
- CHEN Lian. Study on reliability design method for interference fit[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(1):28-30.
- [20] OSWALD F B, ZARETSKY E V, POPLAWSKI J V. Interference-fit life factors for roller bearings[J]. Tribology Transactions, 2009, 52(4):415-426.
- [21] BOUTOUTAOU H, BOUAZIZ M, FONTAINE J F. Modeling of interference fits taking form defects of the surfaces in contact into account[J]. Materials & Design, 2011, 32(7):3692-3701.
- [22] SEN S, AKSAKAL B. Stress analysis of interference fitted shaft hub system under transient heat-transfer conditions[J]. Materials & Design, 2004, 25(5):407-417.
- [23] LANOUE F, VADEAN A, SANSCHAGRIN B. Fretting fatigue strength reduction factor for interference fits[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2011, 19(9):1811-1823.
- [24] OZTURK F W. Simulations of interference and interfacial pressure for three disk shrink fit assembly[J]. Gazi University Journal of Science, 2010, 23(2):233-236.
- [25] 刘凌. 过盈连接件装配研究[J]. 机床与液压, 2011, 39(4):47-78.
- LIU Ling. Research on interference connector's assembly[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2011, 39(4):47-78.
- [26] 任万滨, 支宏旭, 付颖华, 等. 铆钉电触头接触温升与接触电阻特性研究[J]. 低压电器, 2015(4):7-11.
- REN Wanbin, ZHI Hongxu, FU Yinghua, et al. Research on temperature rise and contact resistance of rivets contacts[J]. Low Voltage Apparatus, 2015, (4):7-11.

李凯(1984—),男,硕士研究生,工程师,主要从事高压开关设备的研发及制造技术研究。