

GIS/GCB 用三相盆式绝缘子水压强度的影响因素分析

费龙菲¹, 龚晓燕¹, 陈 维²

(1. 上海雷博司电气股份有限公司, 上海 201807; 2. 西安交通大学电气学院, 西安 710049)

摘要: 笔者通过试验并分析了三相不通孔盆式绝缘子水压试验过程中的应力变化, 结合盆式绝缘子的生产工艺, 确定了浇注件内应力特别是金属嵌件周围内应力大是造成水压破坏的根本原因, 而填料品质及嵌件周围导电橡胶质量则是决定内应力大小的主要材料因素, 控制导电橡胶、填料的技术指标, 避免嵌件与浇注体粘接不良, 防止填料在浇注料中沉降, 优化固化工艺, 注意过程设备及工装质量等是降低内应力、保证生产过程盆子水压强度稳定的有效措施。

关键词: 盆式绝缘子; 水压强度; 内应力; 填料; 导电橡胶

中图分类号: TM56 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2014)04-0125-06

Factors Influencing the Water Pressure of Insulating Spacer in GIS/GCB

FEI Longfei¹, GONG Xiaoyan¹, CHEN Wei²

(1. Shanghai Rox Electric Co., Ltd., Shanghai 201807, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Based on the analysis of stress variation during water pressure test and the manufacturing process of a three-phase closed insulating spacer for GIS/GCB, the failure of the insulating spacer in hydrotest is found to be caused by inner stress, especially the inner stress around the metal inserts. The inner stress mainly depends on the quality of the filler and the quality of the conductive rubber coating around the inserts. To reduce the inner stress and control the strength of water pressure of insulating spacer, it is necessary to meet the technical specifications of conductive rubber and filler, avoid poor adhesion between inserts and resin casting body, prevent filler from deposit during molding, optimize solidification process, and keep equipment stable.

Key words: insulating spacer; water pressure; inner stress; filler; conductive rubber

0 引言

环氧浇注件因其具有优良的电气绝缘性能和良好的机械强度, 在 GIS/GCB 等高压开关中起着绝缘、支撑、隔离、传动等作用^[1], 其质量直接决定了 GIS/GCB 等高压开关的品质好坏, 常常被称为高压开关的心脏。三相不通孔盆子是环氧浇注件中最重要的一类零件, 因其位于断路器和母线筒中, 需承载盆子两边的气体压力差, 故其机械强度特别是水压强度一直是 GIS/GCB 等高压开关生产厂家非常重视的环氧浇注件质量指标。目前各高压开关公司引进技术的盆式绝缘子全部实现了国产化及生产自给。一些外资企业由于成本压力也着眼于在国内一

些专业绝缘件制造商中确定合适的盆式绝缘子供货商。国内研究所及高压开关公司也陆续推出自主设计的 GIS/GCB 产品, 当然也包括了各式盆式绝缘子^[2-3]。从开关技术的发展来讲, 开关小型化使得盆式绝缘子的设计也走向小型化^[4]。上述因素使得在国内生产的三相不通孔盆式绝缘子不同厂家设计的外形尺寸不同, 且对于水压强度设计裕度的控制也不同。由于环氧浇注件生产过程的特殊性, 加之三相共箱盆式绝缘子由于应力分布比单相盆式绝缘子复杂得多, 这就使得三相不通孔盆子的水压强度一直是高压开关企业及绝缘件专业制造企业技术及质量人员关心的课题之一。笔者从试验角度出发^[5-9], 对造成水压强度波动的因素进行了分析讨论, 提出了相关解决措施。

收稿日期: 2013-11-07; 修回日期: 2013-12-11

1 影响水压强度的主要因素及提高水压强度的措施

1.1 水压强度应力测试实验

1.1.1 实验仪器及设备

实验采用 TG328A 型分析天平,NDJ-1 旋转型粘度计, WDS920 电子式万能试验机, DHG-9070 干燥试验箱, 水压试验手动试压泵, DH3820 静态应变测试系统。

1.1.2 试品及主要原材料

试品为 ZF-126 126 kV 三相共箱型 GIS 盆式绝缘子; 主要原材料为环氧树脂/固化剂 B4₁/5532、 Al_2O_3 :A-F-2、 SiO_2 :DHG-400-ZE;427 型导电橡胶自配;氯丁型导电橡胶自配; CNR-1 导电橡胶自配。

1.1.3 实验简介

笔者所在单位与西安交通大学联合,对三相不通孔盆子水压强度破坏过程进行应变(应力)点测试,以便寻找到应变(应力)最大的部位,实验采用先在盆子表面贴应变片,将应变片与应变测试系统连接,然后利用水压试验手动试压泵进行水压试验,采用 0.2 MPa/20 s 的速率缓慢升压,直到零件水压到极限值破裂,采集此期间盆子表面应变数据,从应变数据可以通过仪器自带的软件直接换算出应力数据,实验共进行了多次。

测试状态及应变片分布见图 1、2。



图 1 应变测试状态

Fig. 1 Strain test condition



图 2 应变片排布

Fig. 2 Arrangement of strain test piece

1.1.4 应力测试实验结果分析

从多次试验中选取典型的两次做应变(应力)分析,图 3、4 为两次测量的应变(应力)突变点。图 3 实验表明:在较低水压下破坏的盆子,在施压破坏前会发出声响,在金属嵌件周围应变会发生突变降低(图 3 中 a、b 点),表明破坏起源为嵌件周围;图 4 试验结果表明:水压破坏的起始点位于零件曲面的突变点(如图 4 中 a、b、c 各点),然后迅速扩展到嵌件界面。即外加水压载荷在两金属嵌件连线中点应变最大,而在嵌件周围应变较小。

从界面理论^[10-12]可知,两种不同基体材料(如盆子的嵌件和环氧材料)的界面在零件中具有消耗吸

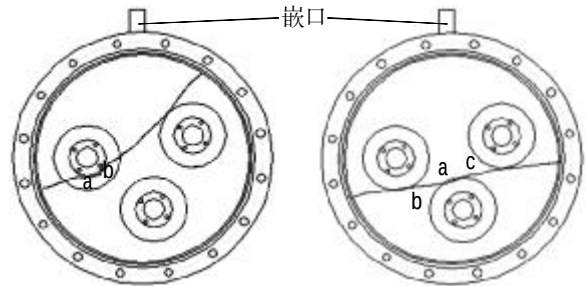


图 3 应变(应力)点分析(1)

Fig. 3 Strain (stress) point analysis(1)

图 4 应变(应力)点分析(2)

Fig. 4 Strain (stress) point analysis(2)

收能量功能,当受到外力时,不同基体间的界面部分是应力集中区域,好的界面可以吸收能量,降低应力集中,提高整个零件的机械强度;同时界面层还具有传递和均衡载荷的功能,将外力从一种基体传递到另一种基体上,使基体间受力均衡。

综合考虑上述应变(应力)点的变化,可以认为:金属嵌件周围由于界面的不均相,是内应力最集中的地方,当有外加水压载荷时,外加水压应力与内应力叠加,如果应力在嵌件周围得不到消耗吸收,金属嵌件周围应变会发生突变降低,此时会发出响声等,如果嵌件与浇注体粘接性差^[13],便会在嵌件周围形成微裂纹,随水压载荷的增加,这些微裂纹迅速扩散,从嵌件根部首先发生断裂最终导致盆子破坏(第 1 种情况);如果应力在嵌件周围得不到消耗吸收,但嵌件和浇注体粘接牢固,由于界面具有传递和均衡载荷的作用,会将外力转移到零件曲面的突变点,随水压载荷的增加,盆子应变达到极限,从应力最大处(图 4 中 a、b、c 点)迅速向金属嵌件扩散,如果应力在金属嵌件周围仍得不到消耗吸收或金属嵌件周围存在缺陷,增大的外加水压应力与内应力叠加就会造成盆子破坏(第 2 种情况)。实际试验时,水压强度较低的零件一般会出现“掰饼”状——即从嵌件根部或零件曲面极大点直接断裂成两半,见图 3、4,这与上面的分析是一致的。

通过理论分析及实际水压破坏应变(应力)测试,可得出如下结论:浇注件内应力特别是金属嵌件周围内应力大是造成水压破坏的根本原因,金属嵌件周围的状况如粘接强度(决定载荷的传递)、缓冲程度(决定载荷的消耗吸收)等对水压强度的高低具有重要作用。因此,降低金属嵌件周围内应力,保证界面的粘结、缓冲功能是保证盆式绝缘子水压强度的主要因素。

1.2 影响水压强度的因素分析

造成盆子内应力大的原因存在于浇注生产的

整个过程,环氧浇注的生产过程见图 5。

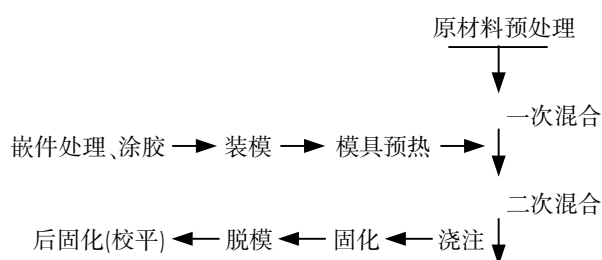


图 5 环氧浇注的生产过程

Fig. 5 The production process of epoxy casting

1.2.1 填料品质的影响

填料粒度、粘度、可使时间不佳,易在浇注件中沉降,造成嵌件上下比重偏差较大,这些点成为应力集中点也即水压破坏的起始点^[4-17]。为证明此点,对水压强度不佳的氧化铝型盆子嵌件周围填料分布进行了分析;以浇注方向为上部,沿嵌件周围取样,煅烧后测出氧化铝含量,包封料中填料含量按式(1)计算:

$$w = \frac{w_i}{w_0} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中: w_i 、 w_0 分别为煅烧后填料和煅烧前包封料固化物的重量; A 为沿嵌件上部取样; B 为沿嵌件侧部取样; C 为沿嵌件下部取样; D 为盆子顶端取样; E 为盆子底部取样。

表 1 为嵌件周围填料量。

表 1 嵌件周围填料量

Tab. 1 The quantity of filler around insert

试样编号	A	B	C	D	E
填料量/%	77.87	72.34	66.80	71.45	72.36
填料量/份	492.60	366.50	281.60	350.36	366.51

表 3 氧化铝填料浇注料粘度曲线

Tab. 3 Viscograph of alumina filler casting material

参数	数值							
时间/min	10	15	20	25	30	35	40	45
粘度/cP	2 250	2 500	3 250	3 750	4 250	5 250	6 000	7 250
参数	数值							
时间/min	50	55	60	65	70	75	80	83
粘度/cP	8 250	9 500	11 000	12 500	14 250	15 720	18 250	20 000

应有的缓冲作用,如果橡胶与嵌件间或嵌件与浇注料之间有间隙,这些间隙将成为水压破裂的直接诱因。

为印证导电橡胶的作用,用不涂导电橡胶而改为喷沙的中心导体进行浇注,零件破坏形状较均匀,没有出现从嵌件根部断裂的“掰饼”现象,但水压强度不高,这是由于喷沙嵌件与浇注料之间粘接力强,嵌件与浇注料之间没有中间过渡层,但由于没有缓冲层,浇注件内应力无处消耗吸收,故从应力最大点:

实验结果表明:氧化铝填料在盆子上部与下部分布不均,下部存在填料沉淀。在嵌件周围填料分布表现为在嵌件上部填料沉积,填料量达 492 份;嵌件下部,填料沉淀,填料量低到 281 份。即在嵌件周围存在严重的填料不均匀。

为进一步证明浇注料粘度对填料沉淀的影响,采用硅微粉系统浇注料,在不同粘度下,直立浇注 100 mm 长条状试样,固化后,按上中下部分别截取 10 mm 长试样进行煅烧,用热失重的方法测定试样不同部位的填料含量,结果见表 2。表 2 中, w_u 、 w_m 、 w_d 分别为试样上、中、下 3 段填料含量的平均值。

表 2 不同粘度浇注时填料含量

Tab. 2 The quantity of filler in different viscosity

浇注起始粘度/cP	w_u /%	w_m /%	w_d /%
900	50.1	57.0	61.3
1 500	52.7	55.0	57.1
2 500	53.4	54.8	56.8
3 000	53.7	54.3	56.5

由表 2 可见,在浇注粘度较低情况下浇注,存在严重的填料沉淀现象,随着浇注粘度的提高,填料的沉淀现象得到改善,但即使在粘度为 3 000 以上浇注仍存在着沉淀。对于氧化铝填料,其粘度变化见表 3,氧化铝比重为 3.9 g/cm³ 以上,接近硅微粉填料的 2 倍,如果掌握不好浇注粘度,其沉淀将更严重。因此,选择合适的浇注粘度和工艺,对于影响和控制填料沉降非常重要。

1.2.2 导电橡胶的作用

嵌件表面的导电橡胶失去应有的效能,起不到

曲面变化最大点断裂,见图 6,故而水压强度不高。

模具预热温度过高,时间过长,会导致导电橡胶老化失效。对导电橡胶的耐温性做如下试验,见表 4。由表 4 可见,温度对导电橡胶的性能有较大影响。

其次,导电橡胶的品质对缓冲层的缓冲效果影响很大,导电橡胶介于浇注料与金属嵌件之间,固化时导电橡胶产生的收缩应能紧紧包覆在嵌件上,不与嵌件间产生间隙(这时金属嵌件的表面清理也很

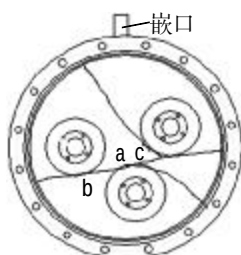


图6 喷沙嵌件零件破坏形状

Fig. 6 Broken shape of sandblast embedded part

表4 温度时间对导电橡胶老化的影响

Tab. 4 Effects of time and temperature on the aging of conductive rubber

温度/℃	时间/min	伸长率/%
130	120	199
155	240	59

重要), 导电橡胶与浇注料之间应有较强的粘接性, 最好橡胶与胶料之间能产生互穿网络结构, 选用不同胶料配方的导电橡胶作零件水压强度的对比试验, 结果见表5。由表5可见, 采用CNR-1导电橡胶涂敷嵌件, 零件的水压强度最好。

表5 不同配方导电橡胶的水压试验对比

Tab. 5 Hydraulic test comparison of different formulations of conductive rubber

零件水压值/MPa	填料种类	导电橡胶类型
1.4	SiO ₂	427 型导电橡胶
1.3	Al ₂ O ₃	427 型导电橡胶
1.4	SiO ₂	氯丁型导电橡胶
1.2	Al ₂ O ₃	氯丁型导电橡胶
1.6	Al ₂ O ₃	CNR-1 导电橡胶
1.9	SiO ₂	CNR-1 导电橡胶

1.2.3 其他因素的影响

1) 填料本身强度不够, 造成浇注件在较低强度下破裂。用熔融硅微粉取代普通硅微粉浇注零件进行试验, 零件水压值高于普通硅微粉零件水压值。

2) 浇注料缺乏韧性, 造成浇注件在较低外力下发生脆断。在浇注料中加入增韧剂, 所浇注零件水压值高于不加增韧剂的零件。但由于增韧剂一般会影

响零件的热变形温度及电性能, 故在实际生产应加以考虑。

3) 模具工装的影响。浇注件在脱模校平过程中, 由于校平工装本身平行度差, 造成零件平行度差。水压试验时, 变形零件与工装不匹配, 造成零件受外力作用而在较低压力下破裂。另外, 水压工装本身平行度差, 也会造成零件受外力作用而在较低压力下破裂。

4) 固化设备的影响。浇注件在固化过程中, 由于固化设备老化, 炉底部被浇注料堵塞等, 使得固化环

境温度不均匀, 造成浇注件固化不均匀, 浇注件强度受到影响。

5) 固化及后固化工艺的影响。环氧浇注件的生产过程实际上是一个固化反应过程, 反应的快慢与温度有直接关系。起始温度太低, 固化反应得不到足够的能量, 浇注料不能及时凝胶, 填料易沉降。固化脱模后, 浇注件没有及时进行后固化, 或对浇注件没有及时进行保温, 后固化温度设置不当, 开炉门太早等造成零件由高温迅速降至低温, 造成浇注件内应力增大^[18-19]。

6) 嵌件的影响。嵌件结构不佳, 嵌件表面流入脱模剂, 造成嵌件与浇注料粘附面积减少、粘附性能降低, 使此处成为零件破裂的脆弱点。

1.3 提高水压强度措施

1.3.1 原材料

1) 控制导电橡胶涂敷工艺, 保证导电橡胶质量。实际生产中须严格按照工艺规程, 保证导电橡胶的涂敷厚度, 对固化温度、时间等工艺参数须专人负责控制纪录, 使导电橡胶起到应有的缓冲作用; 模具预热时, 须严格控制温度、时间, 避免导电橡胶老化; 选择弹性好、收缩率恰当、与浇注料能产生互穿网络结构的导电橡胶, 制定合适的入厂检验指标, 严格入厂检验, 保证弹性率、粘接性等重要指标。

2) 严格控制氧化铝的技术指标。选用两种技术指标的氧化铝进行对比试验, 填料粒度见图7。由图7可见: a 较之 b 粒度明显要小, 同时 a 填料碱性增大, 粘度也有适当增大, 这些都有利于消除填料在浇注件中的沉降。水压强度数据证明用 a 填料浇注的零件要好于用 b 填料浇注的零件; 此外, 采用由偶联剂处理的填料, 可以增加填料与树脂的结合强度, 减少填料在浇注件中的沉降, 提高零件强度^[20]。

3) 采用有韧性的原材料。鉴于加入增韧剂会引起浇注件 HDT 降低, 如果从变换树脂品种入手, 选用含有增韧成分的树脂, 以求改善材料韧性会取得较好效果。

1.3.2 工艺

依据浇注料粘度上升曲线, 寻找最佳浇注时间, 制定合适的固化工艺, 减少固化过程中的浇注料沉降, 防止由于沉降而产生应力集中。后固化降温太快, 浇注件中存在的残余应力得不到消耗吸收, 浇注件水压强度易受影响, 采用计算机控制徐冷降温较随炉冷却效果要好^[20-23]。

1.3.3 固化设备

为保证炉温的准确性须对固化设备定期进行温度测量, 采用特殊防漏板防止浇注料进入炉底部或

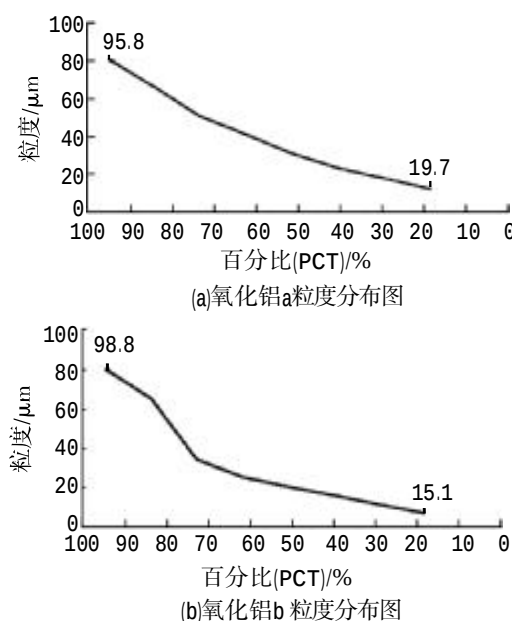


图7 两种氧化铝粒度对比

Fig. 7 Comparison of two kinds of alumina particle size distribution. 定期对炉底部浇注料残渣进行清理, 这对于保证炉温的均匀性很重要。

1.3.4 模具工装

校平工装的平行度直接决定了三相盆子的平行度, 为此须定期对校平工装的平行度进行测量, 同时须定期对水压工装的平行度进行测量。

1.3.5 嵌件

采用提高滚花深度、增大喷沙粒径等可以提高嵌件的表面粗糙度, 增大嵌件与浇注料的接触面积, 这些都有利于盆子水压强度的提高, 在实际操作中尤其是装模过程中须防止脱模剂污染, 这也是保证水压强度的重要措施。

2 结语

三相不通孔盆子金属嵌件周围应力集中是造成水压破裂的重要原因, 严格控制原材料特别是导电橡胶、填料的技术指标, 避免嵌件与浇注体粘接不良、防止填料在浇注料中沉降是保证三相盆子水压强度的关键因素, 优化浇注、固化、后固化工艺, 保证固化设备温度的均匀性、提高工装的精度、严格嵌件操作工艺等也是稳定三相盆子水压强度的重要措施。

参考文献:

[1] 黎 斌.SF₆高压电器设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
LI Bin.SF₆ high voltage apparatus design [M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
[2] 卢彦辉,段晓辉,张友鹏,等.基于 SolidWorks 和 ANSYS 的盆式绝缘子设计与分析[J]. 科技信息, 2010(25): 412.

LU Yanhui, DUAN Xiaohui, ZHANG Youpeng, et al. Design and analysis of salver-shaped insulator based on SolidWorks and ANSYS[J]. Science & Technology Information, 2010(25):412.
[3] 赵文强.盘(盆)式绝缘子的设计方法探讨[J]. 华通技术, 2005, 24(3): 27-30.
ZHAO Wenqiang. Probe on design method of basin spacer [J]. Huatong Technology 2005, 24(3): 27-30.
[4] 郭文勇, 独亚军, 魏存娣, 等. 数学形态学在绝缘子泄漏电流在线监测中的应用[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(11): 20-24.
GUO Wenyong, DU Yajun, WEI Cundi, et al. Application of mathematical morphology in on-line leakage current monitoring of insulators[J]. Power System and Clean Energy, 2011, 27(11): 20-24.
[5] 韩 轩, 马永其, 吴风琳, 等. 高压电缆终端应力锥应力变化的现场测试分析[J]. 高压电器, 2009, 45(3): 49-51.
HAN Xuan, MA Yongqi, WU Fenglin, et al. Field measurement and analysis of stress variation in stress cone of high voltage cable terminal[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(3): 49-51.
[6] 林丽华, 陈立功, 顾明元. 残余应力测量技术现状及其发展动向[J]. 机械, 1998, 25(5): 46-49.
LIN Lihua, CHEN Ligong, GU Mingyuan. Residual stress measurement technology and its development trend [J]. Machinery, 1998, 25(5): 46-49.
[7] 郝如江, 田 中, 陈静波, 等. 注塑件残余应力的测试方法[J]. 工程塑料应用, 2002, 30(5): 46-48.
HAO Rujiang, TIAN Zhong, CHEN Jiangbo, et al. Measuring method of the residual stress of the injection plastic parts [J]. Engineering Plastics Application, 2002, 30(5): 46-48.
[8] 于莲芝, 应启夏, 徐 操, 等. 电缆附件接触应力的光弹性实验研究[J]. 上海理工大学学报, 2004, 26(3): 255-257.
YU Lianzhi, YING Qijia, XU Cao, et al. Photoelastic experiment study of cable accessory stresses [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2004, 26(3): 255-257.
[9] 张铂雅, 李 光, 朱建广, 等. 输电线路绝缘子放电模式的识别[J]. 陕西电力, 2011, 39(7): 29-33.
ZHANG Boya, LI Guang, ZHU Jianguang, et al. Pattern recognition of transmission line insulator discharge [J]. Shanxi Electric Power, 2011, 39(7): 29-33.
[10] 孙曼灵. 环氧复合物的界面层及其功能[J]. 环氧树脂应用技术, 2011(4): 6-9.
SUN Manling. The interface layer and the function of epoxy composites [J]. Epoxy Resin Applied Technology, 2011(4): 6-9.
[11] 杨序纲. 复合材料界面[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.

- YANG Xugang. Interface of matrix composites[M]. Beijing: Chemical Industry Press (CIP), 2010.
- [12] 吴人杰. 高聚物的表面与界面[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- WU Renjie. Polymer interface and adhesion [M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [13] 张 璞, 许立宁, 路民旭. 金属表面预处理对环氧树脂粘结剂粘结强度的影响[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(8): 1662-1665.
- ZHANG Pu, XU Lining, LU Minxu. Effects of metal pre-treatment on the bonding strength of epoxy resin adhesive [J]. Science Technology and Engineering, 2007, 7(8): 1662-1665.
- [14] 陈 燕, 姚长江, 陈仲雄. 填料氧化铝粒度对环氧浇注体系粘度的影响[J]. 绝缘材料, 2004(1): 21-22.
- CHEN Yan, YAO Changjiang, CHEN Zhongxiong. The effect of crystallite size distribution of filler alumina in the viscosity of epoxy pouring system[J]. Insulating Materials, 2004(1): 21-22.
- [15] 付东升, 张康助, 孙福林. 环氧树脂灌封材料工艺性探讨[J]. 绝缘材料, 2003(6): 31-33.
- FU Dongsheng, ZHANG Kangzhu, SUN Fulin. Study on the processibility of epoxy resin casting material[J]. Insulating Materials, 2003(6): 31-33.
- [16] 张建宏. 环氧树脂浇注用 Al_2O_3 填料性能的对比分析[J]. 高压电器, 1992, 28(6): 12-16.
- ZHANG Jianhong. Analysis by Al_2O_3 filler properties of epoxy resin casting [J]. High Voltage Apparatus, 1992, 28(6): 12-16.
- [17] 王蓉蓉, 陈 维, 褚 磊, 等. 氧化铝粉体对环氧浇注体系性能影响[J]. 绝缘材料通讯, 1999(6): 17-19.
- WANG Rongrong, CHEN Wei, ZHU Lei, et al. Effect of alumina powder on the properties of epoxy casting system [J]. Insulating Materials, 1999(6): 17-19.
- [18] 王新衍, 巫松桢. 环氧浇注体内应力的研究[J]. 绝缘材料通讯, 1994(2): 23-25.
- WANG Xinyan, WU Songzheng. Study on epoxy casting internal stress[J]. Insulating Materials, 1994(2): 23-25.
- [19] 越智光一. 环氧树脂固化物的内部应力(译文)[J]. 绝缘材料通讯, 1990(6): 41-49.
- YUE Zhiguanyi. Internal stress in epoxy casting parts (translation)[J]. Insulating Materials, 1990(6): 41-49.
- [20] 陈 维. 电熔刚玉氧化铝粉体特性及其对环氧浇注物性能影响研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2002.
- CHEN Wei. Research on the characteristics of the electro-melting corundum powder and its effect on the performance of the epoxy resin-casting piece [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2002.
- [21] 吴海军. 环氧树脂真空浇注工艺过程及注意事项[J]. 变压器, 2000, 37(5): 33-36.
- WU Haijun. Resin vacuum cast process and its points for attention[J]. Transformer, 2000, 37(5): 33-36.
- [22] 徐击水, 张子蓬, 王淑青, 等. 基于GNBR算法的BP网络对绝缘子运行状态预测研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(6): 6-9.
- XU Jishui, ZHANG Zipeng, WANG Shuqing, et al. Research on the prediction for the operating state of insulators using BP network based on gnbr algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(6): 6-9.
- [23] 闫士涛, 何 宇, 石岩龙. 750 kV 直线塔整串绝缘子带电更换方法[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(2): 30-34.
- YAN Shitao, HE Yu, SHI Yanlong. Live replacement methods of the whole-bunch insulators on the 750 kV suspension tower[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(2): 30-34.
- 费龙菲(1967—), 女, 高级工程师, 从事真空浇注及APG注射环氧绝缘件技术及其管理。

(上接第124页)

- [18] 李晓萍, 文习山, 陈慈萱, 等. 变压器铁心磁耦合下非线性特性曲线的研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(12): 9-11.
- LI Xiaoping, WEN Xishan, CHEN Cixuan, et al. Study of nonlinear characteristic curve for the core of transformer with magnetic coupling [J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(12): 9-11.
- [19] 肖 华, 吴广宁, 蒋 伟, 等. 基于有限元法的单相变压器直流偏磁仿真研究[J]. 高压电器, 2010, 46(9): 39-42.
- XIAO Hua, WU Guangning, JIANG Wei, et al. Simulation of DC bias of single-phase transformer based on FEM[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(9): 39-42.
- [20] 李振强, 谷定燮, 戴 敏. 特高压空载变压器谐振过电压和励磁涌流分析及抑制方法[J]. 高电压技术, 2012, 38(2): 387-391.
- LI Zhenqiang, GU Dingxie, DAI Min. Analysis and suppression method of no-load ultra high voltage transformer resonance overvoltage and inrush current[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2): 387-391.
- 刘晓华(1968—), 女, 高级工程师, 主要从事电力测量、电能质量技术和管理。工作。
- 黄 静(1988—), 女, 助理工程师, 主要从事电力测量、电能质量技术工作。
- 阮绵晖(1967—), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统变电运行技术管理工作。
- 曾庆辉(1985—), 男, 工程师, 主要从事电力测量、电能质量技术工作。