

固体环氧树脂绝缘件中不同材料间界面粘接强度的研究

李水胜¹, 周振业¹, 李章云¹, 刘松², 谢辰璐²

(1. 北海银河开关设备有限公司, 广西 北海 536000; 2. 国网山东省电力公司临沂供电公司, 山东 临沂 276000)

摘要: 很多的固体环氧树脂绝缘件中使用了线膨胀率不相同的陶瓷、金属、硅橡胶、环氧树脂等材料, 这些不同材料间界面粘接强度将会是影响绝缘件本体质量的重要要素之一。通过研究不同类型硅橡胶及表面处理方式等对硅胶与各种材料间界面粘结性能的影响, 明确如何改善和提高固体环氧树脂绝缘件中不同材料间界面粘接性能, 以期使固体环氧树脂绝缘件具有更高的机械、电气和热的性能, 从而间接提高成套设备的整体性能。

关键词: 环氧树脂绝缘件; 界面; 粘接强度

Study on Interfacial Bonding Strength Between Different Materials in Epoxy Insulator Parts

LI Shuisheng¹, ZHOU Zhenye¹, LI Zhangyun¹, LIU Song², XIE Chenlu²

(1. Beihai Galaxy Switch Decices Co., Ltd., Guangxi Beihai 536000, China;

2. Linyi Electric Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Shandong Linyi 276000, China)

Abstract: Many solid epoxy insulating parts use materials with different linear expansion rates, such as ceramic, metal, silicone rubber and epoxy resin. The interfacial bonding strength between these different materials is one of the factors affecting the quality of the insulating parts themselves. By studying the effects of different types of silicone rubber and surface treatment on property of silicone rubber and interfacial adhesion between different materials, how to improve and enhance interface bonding properties between different material in solid epoxy insulating parts is researched in order to make solid epoxy insulating parts have a better mechanical, electrical and thermal performance, therefore the overall performance of the complete assembled equipment is improved.

Key words: epoxy insulator part; interface; bonding strength

0 引言

目前行业内的固体绝缘件主绝缘介质以环氧树脂和硅橡胶为主, 其中环氧树脂类的固体绝缘件用量最多。将导电回路中的带电体和开关触头通过固体环氧树脂包封起来, 其中开关触头在此指的是真空灭弧室, 因为固体环氧树脂是由液态经高温后固化而成的, 在材料固化的过程中材料会发生收缩, 为了保证真空灭弧室不受材料收缩力的影响, 一般预先采用硅橡胶包封真空灭弧室, 在真空灭弧室表面形成一层缓冲层, 之后与相应的导电件连接后整体压注在环氧树脂绝缘材料内。

固体环氧树脂绝缘件作为支撑开关设备的结构

件, 应有更高的机械可靠性; 因属于主绝缘介质, 应具有更高的绝缘可靠性; 因主回路部分全部用环氧树脂材料包封起来, 应具有更高的耐热性。然而, 由于线膨胀率不相同的陶瓷、金属、硅橡胶、环氧树脂材料组成的固体绝缘件, 因为环氧树脂绝缘件外表面进行金属化处理, 其内部电场分布发生了根本性的变化, 其中不同材料间的粘接界面就成为影响产品电性能的最薄弱环节, 因此如何改善提高环氧树脂绝缘件中不同材料间粘接界面性能, 就成为保证开关设备产品可靠性的基础^[1-8]。

文中就固体环氧树脂绝缘件中以下不同材料间界面处理的不同方式进行研究, 希望能使固体环氧树脂绝缘件具有更高的机械、电气和热的性能。

1) 氧化铝陶瓷和硅橡胶间界面;

收稿日期: 2016-04-04; 修回日期: 2016-06-26

- 2) 硅橡胶和环氧树脂材料间界面;
- 3) 金属(铜)和环氧树脂材料间界面。

1 试验

1.1 嵌件材料

嵌件为直径 15 mm、高 15 mm 的圆柱体, 材质分别为氧化铝陶瓷、金属(铜、铝、不锈钢)、硅橡胶和环氧树脂, 铝、铜圆柱体嵌件见图 1。

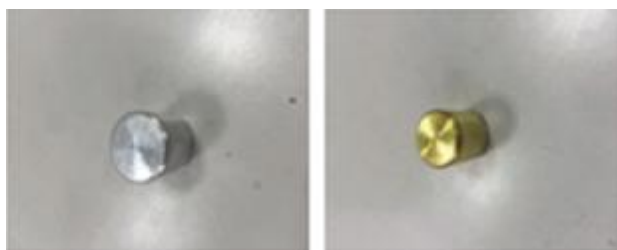


图 1 铝、铜圆柱体嵌件

Fig. 1 The Al/Cu insert

1.2 嵌件表面处理

嵌件表面处理方法:

- 1) 用无水乙醇清洗嵌件, 清洗后将嵌件吹干;
- 2) 若涂覆偶联剂, 则要求尽量涂薄, 没有起泡;
- 3) 进行喷砂处理时, 则粗糙度 R_a 控制为 10~15, 处理后用无水乙醇清洗;
- 4) 进行打磨处理时, 则用 240 号砂纸打磨, 粗糙度 R_a 控制为 2~3, 处理后用无水乙醇清洗;
- 5) 进行等离子表面处理时, 处理后 2 h 内进行试样制备。

1.3 试样制备

1) 预热模具: 试样直径为 (45 ± 0.2) mm, 厚度为 (15 ± 0.2) mm。预处理的嵌件放在模具中央, 见图 2;



图 2 装有铝、铜嵌件的试样浇注模具

Fig. 2 The mold with Al/Cu inserts

2) 用所需要的材料, 如环氧材料或硅橡胶进行浇注;

3) 固化 140 °C/12 h, 脱模;

4) 后固化, 试样完成, 见图 3, 图 3(a) 嵌件为环氧树脂材料, 本体为硅橡胶材料; 图 3(b) 嵌件为铜材料, 本体为环氧树脂材料。

1.4 粘接强度测试

用 XWW-20 系列万能试验机对试样进行粘接

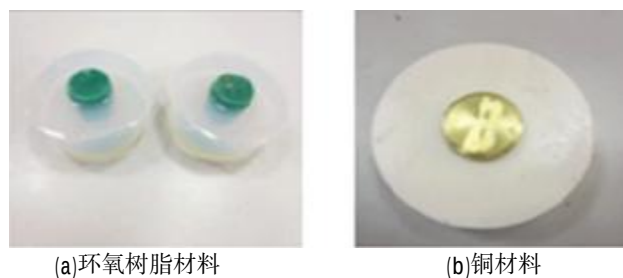


图 3 试验试样

Fig. 3 The test sample

强度测试, 见图 4。记录试样破坏的最大压缩力值, 每种试样的试验数量至少 5 个, 根据每个测试力值和试样的厚度及试样嵌件的直径计算出粘接强度, 在偏差小于 10% 条件下, 取其平均值作为该试验的测试试验结果。

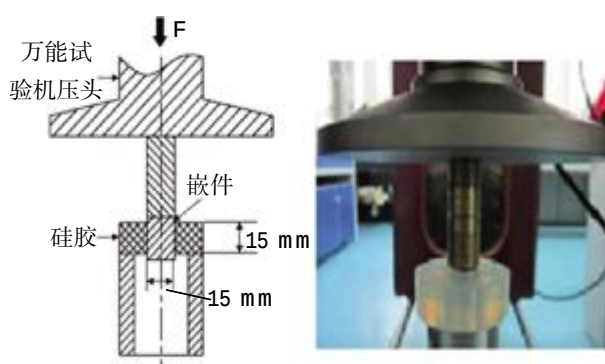


图 4 粘接强度测试

Fig. 4 The binding strength test

2 不同材料间界面处理试验结果与分析

2.1 陶瓷、不锈钢、铜和硅橡胶间界面

当固体环氧树脂绝缘件作为负荷开关或断路器用时, 其开关触头一般都采用硅橡胶包封的真空灭弧室, 为了解决进行环氧树脂材料二次固封时与陶瓷灭弧室因线膨胀率相差大而引起应力, 导致灭弧室最终开裂等破坏发生, 通常在真空灭弧室一层弹性绝缘缓冲层。

硅橡胶包封灭弧室后, 材料间界面从陶瓷和环氧材料界面转化为陶瓷和硅橡胶界面及硅橡胶和环氧树脂材料界面。界面的增多及界面粘接强度好坏对外表面直接接地的固体环氧树脂绝缘件的性能影响重大, 处理不好, 极易发生界面击穿的问题。存在多层材料粘接界面的固体环氧绝缘件的界面状况^[9-12], 见图 5。

2.1.1 不同硅橡胶与陶瓷、不锈钢、铜的粘接性能

灭弧室有陶瓷外壳, 不锈钢封盖及上下铜导杆, 因此硅橡胶包封灭弧室时, 会有硅橡胶与陶瓷界面, 也会有部分硅橡胶与不锈钢界面和硅橡胶与铜界面。选择 5 种不同类型的硅橡胶制作嵌件分别为陶

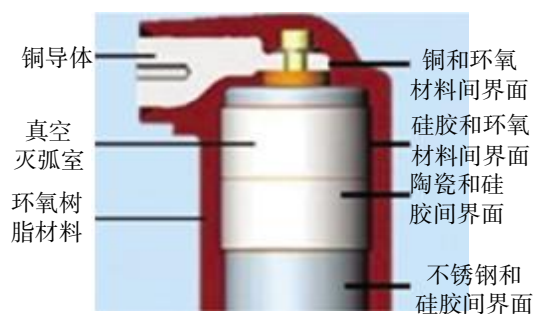


图 5 固体环氧绝缘件中不同材料间的界面状况

Fig. 5 The status of interface of different materials in solid insulation parts

瓷, 不锈钢和铜的不同试样, 每种试样至少 5 个, 然后进行粘接强度试验, 试验结果见表 1, 表 1 中嵌件尺寸为 $\phi 15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 。

表 1 硅橡胶与陶瓷、不锈钢、铜界面的粘接强度

Table 1 Binding strength between silicone rubber and porcelain, stainless steel, copper MPa

硅橡胶类型	陶瓷	不锈钢	铜	环氧树脂材料
A	1.60	1.23	0.99	1.57
B	1.66	1.10	1.40	1.33
C	0.41	0.45	0.27	0.18
D	1.11	1.08	1.16	1.59
E	1.61	1.32	1.42	1.29

对比试验结果可以得知, 不同类型的硅橡胶对不同材质材料有各自的亲和性, 如对于陶瓷, B、E 和 A 硅橡胶为好; 对于不锈钢, E、A 为好; 对于铜, E、B 为好, 因此选择何种硅橡胶适应于真空灭弧室的封装, 必须综合考虑各种界面的粘接性能。

2.1.2 不同偶联剂处理下陶瓷表面和硅橡胶间的粘接性能

真空灭弧室被硅橡胶包封后, 最大的界面是陶瓷和硅橡胶间的界面, 为了保证产品的可靠性, 对这个界面的粘接性能要求更高, 为此选用不同类型的偶联剂 a、b 和 c 分别进行处理, 希望能提高界面间的粘接性能, 每种偶联剂选择 1 个陶瓷样品进行试制试验, 测试结果见表 2。

表 2 不同偶联剂处理下的粘接强度

Table 2 The binding strength under various coupling agents MPa

嵌件	a	b	c
陶瓷	1.81	1.92	1.87

2.2 硅橡胶和环氧树脂材料间界面

固体环氧树脂件作为负荷开关或断路器使用时, 其开关触头一般都采用硅橡胶包封的真空灭弧室, 然后再用环氧树脂材料进行压注成型, 这时硅橡胶和环氧树脂材料间界面就成为整个固体绝缘开

关设备产品中最为关键的界面之一。

无论是这个界面的大小, 还是界面形成的工艺状况和生产实际情况, 它受外界条件的影响最大, 一旦界面粘接出现问题, 就会产生局放甚至是击穿, 而且是不可恢复的。在开关设备中, 只要绝缘内部发生放电或击穿就直接宣告整台设备报废, 其造成的经济损失将是十分巨大的, 因此如何提高和保证硅橡胶和环氧树脂材料间界面粘接强度, 直接关系到开关设备的可靠性^[13-15]。

2.2.1 不同类型硅橡胶和环氧树脂材料间界面的粘接强度

不同类型的硅橡胶与环氧树脂材料间的粘接强度试验结果如表 1 中所列, 可知不同类型的硅橡胶与环氧树脂材料的粘接强度有很大的区别, 实际应用中必须考虑这一重要指标, 结合硅橡胶与陶瓷、不锈钢和铜等金属材料的粘接强度, 综合考虑, 做出最佳的选择。

2.2.2 硅橡胶表面处理对硅橡胶与环氧树脂材料间界面粘接强度的影响

硅橡胶本身具有憎水性, 加之与环氧树脂材料的线膨胀系数相差很大, 两者之间的粘接极易出现问题。为了保证硅橡胶与环氧树脂材料间界面粘接强度, 必须考虑对真空灭弧室的硅橡胶外表面进行处理, 以期提高两者界面间的粘接强度。

选择 6 个硅橡胶个把作为嵌件, 对其表面进行 6 种处理, 用环氧树脂材料压注试样, 硅橡胶与环氧树脂材料间界面粘接强度试验结果见表 3。

表 3 不同硅橡胶表面处理下硅橡胶与环氧树脂材料间界面粘接强度

Table 3 The binding strength between silicone rubber and epoxy resin under treatment of various silicone rubber

嵌件处理	粘接强度/MPa
无	1.38
偶联剂	1.78
打磨	3.01
喷砂	2.98
等离子	1.78
等离子+偶联剂	1.51

表 3 表明, 硅橡胶表面各种不同处理方式可以有效提高硅橡胶与环氧树脂材料间的界面粘接性能, 其中进行喷砂及打磨处理效果最佳。

2.3 铜和环氧树脂材料间界面

固体环氧树脂绝缘件中环氧树脂材料与金属嵌件之间的结合面在力学上是最薄弱环节, 界面材料的热膨胀系数差别大, 在生产和使用过程中产生间

隙,导致局部放电的产生,严重时击穿或开裂。为了解决这一界面问题,对金属嵌件进行各种表面处理,以期改善和提高其与环氧树脂材料间的粘接强度。铜嵌件表面处理后与环氧树脂材料间的粘接强度对比^[3],见表4。

表4 铜和环氧树脂材料间界面粘接强度

Table 4 The binding strength between copper and epoxy resin

嵌件处理	粘接强度/MPa
无	11.1
偶联剂	17.8
喷砂	35.6

表4表明,铜嵌件表面处理可以有效提高其与环氧树脂材料间的界面粘接性能,处理方式不同粘接强度的效果也不同。但是,当固体环氧绝缘材料的外表面进行金属化处理后,铜嵌件作为高压带电部位,其间电场强度提高很多,若铜嵌件表面粗糙度过大,可能产生尖端放电,导致局部放电甚至击穿事故的发生。很显然从喷砂处理可以得到启示,增加铜嵌件表面粗糙度可以大大提高界面粘接强度,但是由于滚花处理后嵌件表面都是尖端,易出现局部放电现象发生,因此滚花处理即便有利于铜嵌件与环氧树脂材料间的粘接强度,但在表面金属化的固体环氧树脂绝缘件中不适用。即使是喷砂处理,对喷砂粗糙度也是有着严格的要求,可采用金钢砂46号,对其铜嵌件表面进行喷砂后,铜嵌件表面粗糙但却没有明显尖端产生。

3 结语

在设计固体绝缘件时,界面性能直接关系着环氧树脂材料厚度、电气绝缘、机械强度设计和热应力等方面的设计,需要引起特别重视。

不同类型的硅橡胶对不同材料有各自的亲和性,由于硅橡胶与陶瓷、金属和环氧树脂材料间都存在粘接界面,因此选择硅橡胶时要综合考虑各个界面的粘接强度。

材料表面的不同处理方式对界面的粘接强度影响不同。例如硅橡胶和环氧树脂材料间界面,对硅橡胶表面进行喷砂或打磨处理是最佳方式;金属和环氧树脂材料间界面,对嵌件表面进行喷砂处理是最理想的处理方式,它不但能增加粘接强度,还可以防止局部放电或闪络击穿的问题发生。

通过研究固体环氧绝缘件中的不同材料间界面的粘接及其处理方式,从而使固体环氧树脂绝缘件具有更高的机械、电气、热的性能,保证开关设备的

可靠性。

参考文献:

- [1] 缪全波,池俊锋,郑志贤.浅谈固体绝缘技术的应用[J]. 中国电业(技术版),2016(4):17-20.
MIAO Quanbo,CHI Junfeng,ZHENG Zhixian. Application on partial discharge intensive care system in the high voltage cable line[J]. China Electric Power (Technology Edition),2016(4):17-20.
- [2] 李水胜,刘桂华,周振业.固体绝缘表面屏蔽接地层的作用及注意事项[J]. 中国电业(技术版),2014(6):14-18.
LI Shuisheng,LIU Guihua,ZHOU Zhenye. The functions and key points of shielded/earthed layer in solid insulated [J]. China Electric Power(Technology Edition),2014(6):14-18.
- [3] 刘振林,卢智成,张博宇,等.特高压瓷套避雷器标准化抗震性能优化[J]. 电网技术,2016,40(5): 1570-1575.
LIU Zhenlin,LU Zhicheng,ZHANG Boyu,et al. Optimization research on seismic safety performance of UHV porcelain bushing lightning arrester standardization[J]. Power System Technology,2016,40(5): 1570-1575.
- [4] 李水胜,刘蜀江,刘松,等.绝缘件表面半导电接地层的生产工艺研究[J]. 中国电业(技术版),2015(12):115-119.
LI Shuisheng,LIU Shuijiang,LIU Song,et al. An investigation into the production process of semi-conductive layer of insulated component[J]. China Electric Power(Technology Edition),2015(12):115-119.
- [5] 杨伟辉,郝旭东,褚志强,等.35 kV带电作业绝缘防护及遮蔽用具的研发及应用[J].中国电业(技术版),2015(6): 69-72.
YANG Weihui,HAO Xudong,ZHU Zhiqiang,et al. Development and application of 35 kV insulating protective and insulation shielding appliances for hot-line work [J]. China Electric Power(Technology Edition),2015(6): 69-72.
- [6] 王世山,王德林,李彦明.大型有限元软件 Ansys 在电磁场领域的使用[J]. 高压电器,2002,38(3):27-33.
WANG Shishan,WANG Delin,LI Yanming. Using software Ansys to analysis electromagnetic process[J]. High Voltage Apparatus,2002,38(3):27-33.
- [7] 张冠军,赵文彬,郑楠,等.真空中固体绝缘沿面闪络现象的研究进展[J]. 高电压技术,2007,30(7):30-35.
ZHANG Guanjun,ZHAO Wenbin,ZHENG Nan,et al. Influence of void dimensions on partial discharge in solid insulation [J]. High Voltage Engineering,2007,30(7):30-35.
- [8] YAMADA N,YOKOSUKA S,MIKUNI K,et al. Development of next-generation switchgear targeting high reliability and maintenance savings[J]. Hitachi Review,2009:58 (5):208-212.
- [9] 庞骁刚.开关柜局部放电原因分析和处理[J]. 云南电力技术,2011,39(4):56-58.

- PANG Xiaogang. Analysis and processing reason of switch cabinet partial discharge[J]. Yunnan Electric Power, 2011, 39(4): 56-58.
- [10] 颜 群. 一种固体绝缘开关柜绝缘结构的设计与分析[J]. 设计与制造, 2009, 77(5): 77-80.
- YAN Qun. Design and analysis of insulation structure of solid insulation switchgear[J]. Design and Manufacture, 2009, 77(5): 77-80.
- [11] 胡明辉. 绝缘缺陷检测方法在电力电缆中的应用研究[J]. 中国电业(技术版), 2015(6): 57-59.
- HU Minghui. Research on insulation fault detection method in power cable[J]. China Electric Power(Technology Edition), 2015(6): 57-59.
- [12] 潘 浩, 殷庆铎, 高文胜. 固体绝缘中气隙尺寸对局部放电过程的影响[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 458-461.
- PAN Hao, YIN Qingduo, GAO Wensheng. Influence of void dimensions on partial discharge in solid insulation [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3): 458-461.
- [13] 焦全平. 一种用于固体绝缘环网柜的气体间隙绝缘结构研究[J]. 中国电业(技术版), 2015(6): 66-68.
- JIAO Quanping. Research on gas insulated structure for solid insulation switchgear[J]. China Electric Power(Technology Edition), 2015(6): 66-68.
- [14] 张伟平, 魏东亮, 何俊达. 开关柜局部放电检测技术的应用[J]. 高压开关, 2014(4): 14-18.
- ZHANG Weiping, WEI Dongliang, HE Junda. The detecting technology of partial discharge applied on switchgear [J]. High Voltage Switchgear, 2014(4): 14-18.
- [15] 易 平, 张重乐, 梁 丽. 配电网中的固体绝缘环网柜研究[J]. 中国电业(技术版), 2014(6): 32-34.
- YI Ping, ZHANG Chongle, LIANG Li. Research on solid insulated ring main unit in power distribution grid [J]. China Electric Power(Technology Edition), 2014(6): 32-34.
- 李水胜(1979—), 男, 工程师, 研究方向为固体绝缘技术应用。
- 周振业(1975—), 男, 工程师, 研究方向为高压开关设备的结构设计。

(上接第 137 页)

- LI Xiangyu, HAN Xiaodong, ZHANG Fulin, et al. The selection of the interface between composite insulator core rod and housing and the determination of the bonding process[J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(6): 7-13.
- [16] 张福增, 宋 磊, 李锐海, 等. 复合绝缘子断裂原因分析及缺陷评价方法[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 3093-3100.
- ZHANG Fuzeng, SONG Lei, LI Ruihai, et al. Evaluation method of defect and fracture reason for composite insulator[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 3093-3100.
- [17] 陈 原, 刘燕生, 沈 健, 等. 复合绝缘子隐蔽性缺陷检测方法[J]. 电网技术, 2006, 30(12): 58-63.
- CHEN Yuan, LIU Yansheng, SHEN Jian, et al. Inner-defect detection method for composite insulators[J]. Power System Technology, 2006, 30(12): 58-63.
- [18] GB 11177—1989 无机胶粘剂套接压缩剪切强度试验方法[S]. 1989.
- GB 11177—1989 Testing method for compressive shear strength of dowel joint by inorganic adhesives[S]. 1989.
- [19] 赵建伟. 胶粘剂的粘弹性与粘接强度[J]. 橡胶译丛, 1995(3): 36-46.
- ZHAO Jianwei. Viscoelasticity and adhesive strength of adhesives[J]. Selected Translations on Rubber, 1995(3): 36-46.
- 段明明(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事高电压绝缘技术方面研究工作。
- 王 璁(1980—), 男, 讲师, 主要从事高电压绝缘技术及过电压保护研究工作。
- 屠幼萍(1966—), 女, 教授, 博导, 主要从事高电压绝缘技术、电介质介电特性及过电压保护研究工作。