

钢化玻璃绝缘子自爆问题分析

王少华, 叶自强, 梅冰笑, 罗 盛

(浙江省电力试验研究院, 杭州 310014)

摘要: 钢化玻璃绝缘子自爆严重影响了输电线路的安全运行。笔者根据近年来中国输电线路发生的玻璃绝缘子集中自爆事例, 分析了钢化玻璃绝缘子自爆规律及残锤特性、自爆影响因素和自爆机理, 并在此基础上总结分析了降低钢化玻璃绝缘子自爆率的技术措施。结果表明: 玻璃绝缘子自爆具有“早期暴露, 逐年下降”的特点; 玻璃绝缘子零值自爆后, 由于它的残留强度高, 不致造成掉串事故。自然环境、机械荷载、严重污秽、生产工艺等对钢化玻璃绝缘子自爆有影响。玻璃件中间张应力层发生偏移, 不均匀分布是自爆的主要原因之一。采取二次热冷冲击试验、内水压试验、均质热处理技术、提高玻璃制料质量及改进玻璃件的钢化工艺等措施可降低钢化玻璃绝缘子的自爆率。

关键词: 玻璃绝缘子; 自爆; 自爆率; 内应力

中图分类号: TM216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2011)03-0093-07

Analysis of Self-shattering Problem of Toughened Glass Insulator

WANG Shao-hua, YE Zi-qiang, MEI Bing-xiao, LUO Sheng

(Zhejiang Electric Power Test and Research Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Self-shattering problem of toughened glass insulator is of great danger to the security of service of transmission lines. Based on several self-shattering cases occurred in China, this paper summarizes and analyzes the self-shattering rule, the influencing factors, and self-shattering mechanism. Besides, the technical measures of decreasing the self-shattering rate are summarized and analyzed. The results show that for glass insulator, a self-shattering peak value exists in the initial stage of service. The residual strength of the residual part is high enough for preventing the insulator string from fracture accident. Natural environment, mechanical load, severe pollution and production technology have influence on the self-shattering. Non-uniform distribution of tensile stress is one of the primary reasons for self-shattering. Technical measures such as secondary hot-and-cold shocking test, inner hydraulic test, homogenous heat treatment, improving glass material quality, and optimizing the toughening process, can be used to decrease the self-shattering rate of toughened glass insulator.

Key words: glass insulator; self-shattering; self-shattering rate; inner stress

0 引言

国产钢化玻璃绝缘子问世已有 52 年, 自从 20 世纪 60 年代 220 kV 鸡西至勃利 (高寒-40 ℃) 和 220 kV 西津至柳州 (湿热多雷) 2 条线路试用玻璃绝缘子以来, 由于具有零值自爆、检测方便、不发生掉线事故以及运行安全等特点, 钢化玻璃绝缘子在电网运行中越来越显示出其独特的安全性和优越性,

在全国 35~1 000 kV 电网中大量使用。目前, 国内玻璃绝缘子厂商主要有南京电气集团、浙江金利华、浙江泰仑及四川宜宾环球等本土公司, 以及意大利塞维斯玻璃集团旗下位于四川、天津和上海的三家独资或合资企业。表 1 所示为 2007~2009 年国家电网公司 220 kV 及以上线路玻璃、瓷及复合绝缘子招投标数量统计结果。从表 1 中可以看出, 玻璃绝缘子使用越来越普遍, 使用数量持续上升。

然而, 在取得了较好的运行经验的同时, 也发生

表 1 2007–2009 年国家电网公司 220 kV 及以上线路玻璃、瓷及复合绝缘子招投标数量

Tab.1 Amount of porcelain, glass and composite insulators used on transmission lines of State Grid with a voltage grade above 220 kV in 2007–2009

类型	2009 年	2008 年	2007 年	总计
复合绝缘子/支	341 657	262 502	242 083	846 242
瓷绝缘子/片	3 258 129	2 439 800	3 667 485	9 365 414
玻璃绝缘子/片	4 568 414	4 338 447	3 977 674	12 884 535

了多起玻璃绝缘子集中自爆事件,严重影响输电线路的安全运行。“零值自爆”是玻璃绝缘子的显著特点之一,但这既是优点,也是弱点。自爆率已成为判断输电线路能否安全运行的重要指标之一。

1 钢化玻璃绝缘子自爆事例

国产钢化玻璃绝缘子自 1965 年投入使用以来,集中自爆事件屡见不鲜。以下为近年来我国输电线路上的部分钢化玻璃绝缘子集中自爆事例。

1)1976 年 11 月 16 日,220 kV 南京长江大跨越线路的北长江北塔 LXP-160 玻璃绝缘子集中自爆 11 片,未造成污闪跳闸。经调查,自爆发生时雨雾交加,该塔高 125 m,LXP-160 为双联串 50 片,塔与热电厂烟囱等高,相距 200 m,烟灰使 LXP-160 表面污秽厚度达 5~20 mm^[1-3]。

2)1988 年 8 月 28 日,宁夏自治区 330 kV 靖大线(靖远至大坝)342 号耐张塔的玻璃绝缘子一次性自爆 48 片,开关跳闸,重合闸成功。更严重的是,1990 年 3 月 2 日,195 号、210 号和 220 号三基耐张塔分别被打破 43 片、47 片和 51 片,造成开关跳闸,重合闸未成功^[1]。

3)1999 年 5 月 20 日,500 kV 瓶斗线(瓶窑至斗山线)249 号耐张塔的 LXY3-160 玻璃绝缘子(37 片,四联串计 148 片)在毛毛雨的情况下,集中自爆 9 片,没有发生污闪。经调查,该塔附近有 2 个污秽源,距塔 200 m 处有一耐火材料厂,距塔 400 m 处有水泥厂,二厂烟尘使 LXY3-160 玻璃绝缘子表面积污厚度 0.5~5 mm^[1,3]。

4)2003 年 5 月 6 日–8 日,500 kV 武繁线(武南至繁昌)16 号直线塔的 LXHY3-160 玻璃绝缘子集中自爆 10 片,开关未动作。经调查,该塔至水泥厂 50 m,水泥烟尘污染后,铁塔标记牌已看不清字迹,绝缘子呈灰白色^[1]。

5)2004 年 8 月 20 日,江苏省 500 kV 阳东二线

382 号塔(双串、每串 28 片)自爆 16 片 LXHY4-160 型玻璃绝缘子,其中仅上相大号侧串自爆 9 片、上相小号侧串自爆 3 片;同时,388 号塔(双串、每串 28 片)自爆 16 片 LXHY4-160 型玻璃绝缘子,其中下相小号侧串自爆 6 片、下相大号侧串自爆 3 片^[4]。

6)2005 年 10 月 16 日,500 kV 武瓶线(武南至瓶窑)四基直线塔(111 号、113 号、114 号和 139 号) LXHY3-160 玻璃绝缘子发生集中自爆 20 片,未造成停电事故。经现场调查,排除了外力破坏线路,但该线段地处河网和水稻田,晨雾的湿度较大, LXHY3-160 玻璃绝缘子表面有轻度积污,积污盐密检测达 II 级污区,有可能因积污受潮持续时间过长,引起了 LXHY3-160 产品产生集中自爆现象^[5]。

2 钢化玻璃绝缘子自爆特性

2.1 钢化玻璃绝缘子自爆规律

不同于瓷和复合绝缘子的老化率,玻璃绝缘子的自爆具有“早期暴露,逐年下降”的特点,见图 1^[3,6-8]。纵观应用于中国输电线路上的不同生产线(手工生产线、国产生产线及引进生产线)的玻璃绝缘子,都存在投运初期的自爆峰值,一般为 1~3 年,而后自爆率逐年下降并趋于平稳。

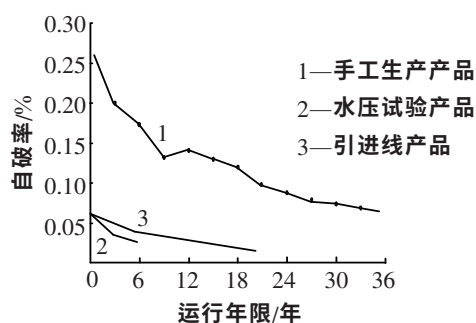


图 1 钢化玻璃绝缘子自爆率与运行时间的关系

Fig.1 Relationship between the self-blast ratio of the toughened glass insulators and operation time

表 2、3 所示的具体线路自爆情况也说明了钢化玻璃绝缘子自爆率逐年下降的规律^[9-10]。

表 2 500 kV 岗云线钢化玻璃绝缘子自爆情况

Tab.2 Self-blast state of toughened glass insulators of 500 kV Gang-yun transmission line

	年份			
	1988– 1989 年	1988– 1990 年	1990– 1991 年	1991– 1992 年
自爆 数量/片	137	94	50	50
年自 爆率/‰	3.8	2.5	1.2	1.2

表 3 500 kV 葛常株线钢化玻璃绝缘子自爆情况

Tab.3 Self-blast state of toughened glass insulators of 500 kV Ge-chang-zhu transmission line

参数	年份	
	1986-1988 年	1988-1994 年
自爆数量/片	124	773
年自爆率/‰	2.75	1.79
备注	葛岗段, 220 kV 运行	岗云段

2.2 钢化玻璃绝缘子的自爆残锤分析

钢化玻璃绝缘子自爆后, 伞盘玻璃破碎散落后形成残锤, 见图 2。玻璃绝缘子自爆是从张应力层开始释放应力, 并伴有轻微的爆破声音。

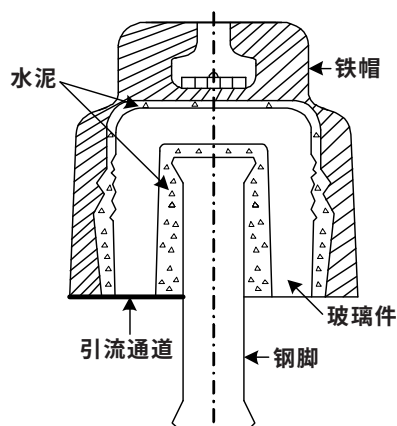


图 2 玻璃绝缘子自爆残锤及电弧引流通道

Fig.2 Residual part of self-blast glass insulator and current-leading channel of arc

2.2.1 残锤上碎玻璃渣的形状分析

分析玻璃绝缘子自爆后的绝缘子残锤上的碎玻璃形状, 可以判断绝缘子自爆的起始点。

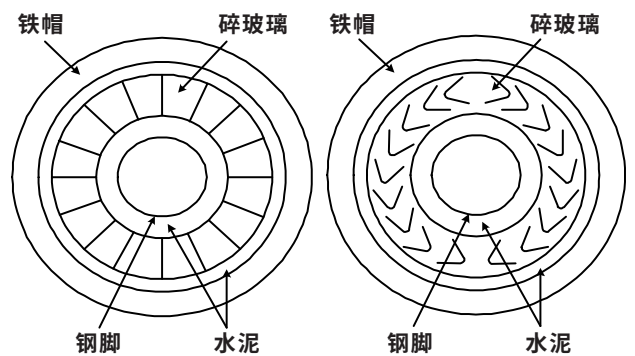
1) 若残锤上的碎玻璃渣呈放射性形状时, 则自爆起始点位于玻璃件的头部(见图 3(a)), 该情况下的自爆是玻璃件自身质量引起, 如配料、熔制工序等。

2) 若残锤上的碎玻璃渣呈鱼鳞状, 则自爆起始点位于玻璃件靠近铁帽底部附近(见图 3(b)), 该情况下的自爆原因有两种可能, 可能是由于产品自身的缺陷(比如杂质)引起的自爆或者外力引起的玻璃破碎, 这种外力可以是机械应力; 也可能是电应力(比如持续的电火花打击, 工频大电流的破坏等)。

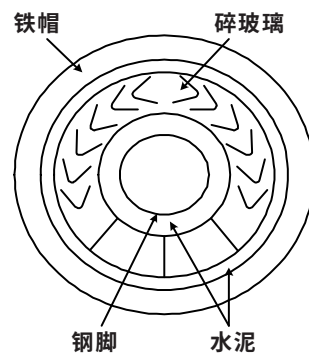
3) 若残锤上的碎玻璃渣呈鱼鳞状和放射性形状同时存在时, 则自爆起始点位于玻璃件的伞裙上(见图 3(c)), 该情况下的自爆, 内因及外因都有可能导致, 或者是两者共同作用的结果。

2.2.2 残锤运行特性分析

玻璃绝缘子自爆后, 不会导致掉线事故。究其原因



(a) 自爆起始位置在头部 (b) 自爆起始位置在铁帽底部附近



(c) 自爆起始位置在伞盘上

图 3 自爆玻璃绝缘子残锤上碎玻璃渣的形状

Fig.3 Shape of residual broken glass dregs on the self-blast glass insulator

因, 一方面, 伞盘玻璃会脱落成碎块或碎粒, 绝缘子头部玻璃也碎成碎粒, 因自爆产生膨胀力的作用, 玻璃碎粒牢牢地卡死在铁帽内, 有足够的残余强度, 能保持绝缘子串的完整性而不致有导线落地的危险。另一方面, 电弧的引流通道从铁帽边缘和钢脚杆径直接连通(如图 2 所示), 不会引起绝缘子爆炸而导致掉线事故^[11-16]。

3 钢化玻璃绝缘子自爆的影响因素

3.1 玻璃绝缘子自身质量

应用于中国输电线路上的玻璃绝缘子按采用生产工艺可分为 3 种, 即手工生产玻璃绝缘子、国产线玻璃绝缘子和引进线玻璃绝缘子。生产工艺的不同对玻璃绝缘子的质量起着关键性的影响, 并直接影响着绝缘子的自爆率。

根据 1979 年对运行的 52 万片玻璃绝缘子的统计, 手工玻璃绝缘子的自爆率为 0.305%, 国产线玻璃绝缘子为 0.17%。经内水压试验考核的玻璃绝缘子的运行自爆率为 0.02%~0.05%。引进线玻璃绝缘子的自爆率稳定在 0.01%~0.04%^[3, 17]。

3.2 自然环境

输电线路的环境温度对手工生产玻璃绝缘子和

国产线玻璃绝缘子的自爆率有一定的影响。北方输电线路运行的产品自爆率要比南方的低一些;一年之中的 6-9 月,其自爆率要比其他月份高一些。例如,220 kV 鸡勃线(鸡西至勃利)、220 kV 西柳线(西津水电站至柳州)的运行统计显示,每年 7-9 月,产品自爆片数比其他月份要多一些。以全年统计,鸡勃线(北方地区)运行的产品自爆率比西柳线(华南地区)的低一些。云、贵、川高海拔地区因气温变化无常,日温差大,有时一座高山存在四季的温度分布,有时还伴有雷电、覆冰等恶劣气候,对产品的自爆率存在一定影响^[16]。

另一方面,随着生产技术的提高,气温变化对经内水压试验考核的玻璃绝缘子和引进线玻璃绝缘子的自爆率没有明显影响^[3, 8, 17]。

3.3 机械荷载

输电线路导线荷载大小对手工生产玻璃绝缘子和国产线玻璃绝缘子自爆率有明显的影响,如导线截面积大和用于耐张串的玻璃绝缘子,其自爆率高于导线截面积小和悬垂串的玻璃绝缘子。这个时期生产的产品均采用高压鼓风机的风进行钢化冷却处理,所获得的钢化强度偏低,在长期运行时,对机械负荷有较大的敏感性,显然,自爆率要高一些。

另一方面,国产线的内水压试验产品,因剔除了玻璃元件头部钢化不良的制品,导线荷载的机械力作用对这批产品的自爆率的影响不明显。同样,引进线的产品,采用压缩空气进行钢化冷却处理,因工艺设施和控制手段完善,它所获得的钢化强度远高于鼓风机钢化冷却处理的强度,后者产品的自爆率对导线荷载大小无明显的规律,有时还出现了耐张串产品的自爆率低于悬垂串的现象^[3, 16-18]。

3.4 严重污秽

玻璃绝缘子内伞裙污秽严重,在大气中湿气形成的雾露或小雨的作用下,污秽堆积物被浸湿变成导体并产生泄漏电流,泄漏电流产生的热使玻璃件上的水被蒸发,在玻璃件表面上形成局部“干带”,“干带”常出现在钢脚附近。钢脚附近“干带”部位的大泄漏电流会导致局部放电,长时间的局部放电会造成玻璃体局部受热不均匀,进而引起热击穿。

在文中第 1 节所列举的实例 1)、5)、6)都说明了严重积污对玻璃绝缘子自爆的影响。

3.5 电场强度

220 kV 鸡勃线(鸡西至勃利)以 110 kV 电压运行 13 年后升压 220 kV 运行,220 kV 西柳线(西津水电站至柳州)以 110 kV 运行 3 年后升压 220 kV 运行,500 kV 葛常株线路(葛洲坝水电厂至常德、株洲)

以 220 kV 运行 2 年后升压 500 kV 运行。线路玻璃绝缘子自爆率统计结果表明,线路电压等级虽升高,但产品的自爆率未出现升高现象^[8, 17],说明电场强度对玻璃绝缘子自爆无明显影响。

4 钢化玻璃绝缘子的自爆机理

钢化玻璃绝缘子的自爆与玻璃绝缘子的制料及生产工艺等有着紧密的关系。

4.1 钢化玻璃绝缘子的制料

玻璃属于硅酸盐材料之一,是由石英砂、白云石、长石、石灰石等矿物原料和化工原料(碳酸钡、钾、钠)组成,再经高温(1 500 ℃)熔融成液体,经冷凝而成质地均匀、结构致密、透明如镜的非晶体材料,没有确定的熔点,状态变化(液态变固态或相反)是在一定温度区域内进行的,即质点的物理化学性质为逐渐和连续的变化,而且是可逆的。玻璃件就是利用以上特性进行配料、熔制、成形和钢化处理的^[12, 19-22]。

4.2 钢化玻璃绝缘子的生产工艺

钢化玻璃绝缘子的生产工艺流程见图 4。熔制与钢化等是钢化玻璃绝缘子的关键工序^[15, 19, 23-24]。

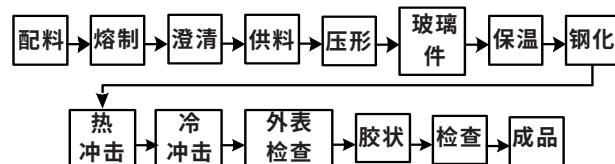


图 4 钢化玻璃绝缘子的生产工艺流程

Fig. 4 Production flow of toughened glass insulator

4.2.1 熔制

玻璃件中的结石(通称杂质)、疙瘩、条纹和气泡等缺陷都是在熔制过程中产生的,这些缺陷破坏了玻璃的化学均匀性,使钢化困难,造成钢化制品易自动破碎。

4.2.2 钢化

玻璃件成形后,因各部位有温差而产生了内应力。工艺上可采用钢化的热处理方法来使内应力均匀分布。玻璃的钢化可在特制的钢化风栅中进行急剧的快速冷却,使玻璃件获得了均匀分布的内应力。

1) 钢化内应力的生成

钢化玻璃件的内应力包含表面的压应力层和内部的张应力层。内应力的生成过程如下:当已被加热至软化温度(760~780 ℃)的玻璃件快速冷却时,表面因急冷力求收缩,而内部处在热膨胀状态,阻止表面层的收缩,此时表面层感受到张应力的作用,内部感受到压应力的作用。当玻璃件继续快速冷却,应力状态随之变化,内部因急冷要求占据最小体积,却受到

了表面层已经硬化成脆性体的阻碍, 不让内层收缩, 这时表面层产生了压应力, 内层产生了张应力, 这两种应力一直到完全冷却和温度梯度全部消失后均匀分布在玻璃件内, 通常称这两种应力为永久应力。

2) 钢化内应力的分布

理想的钢化内应力分布状态见图 5, 即玻璃件两侧表面是透明、厚度相等的压应力层, 正中间为不透明、白絮状的张应力层, 是属于应力层的对称性分布。如果钢化处理不当或玻璃件内含有杂质和条纹等缺陷(因缺陷物的膨胀系数与玻璃不相同)时, 压、张两种应力会在玻璃件内产生偏移现象, 达不到均匀分布的目的, 见图 6^[15, 19]。

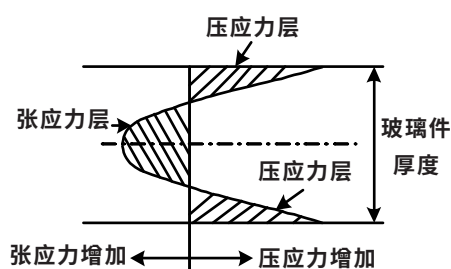


图 5 理想的钢化内应力分布状态

Fig.5 Perfect distribution state of toughened inner stress

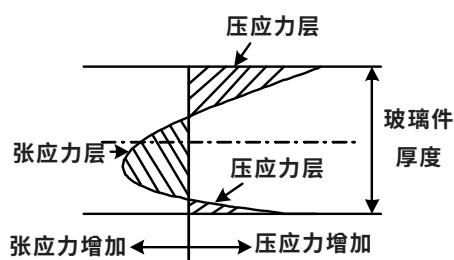


图 6 钢化内应力偏移的分布状态

Fig.6 Distribution state of deviated toughened inner stress

3) 钢化内应力与玻璃热膨胀系数的关系

玻璃件经钢化处理获得的内应力(视为钢化强度)与玻璃的热膨胀系数有密切关系, 玻璃热膨胀系数越大, 产生的钢化强度越大。另一方面, 设计悬式绝缘子时, 要求玻璃件和铁帽、钢脚之间任何部分的膨胀和收缩应匹配良好, 避免产生的热应力导致其劣化, 这同样要求选用热膨胀系数较大的玻璃。基于这两个因素的考虑, 国内外生产厂家均采用热膨胀系数较大的玻璃来制造玻璃件。但是, 影响玻璃热膨胀系数的是钠和钾氧化物, 若 Na^+ 和 K^+ 含量过高, 虽能提高玻璃的膨胀系数, 但会导致电绝缘性能下降。因此, 应通过工艺试验, 选择合理的玻璃成分。

4.3 钢化玻璃绝缘子自爆原因

4.3.1 玻璃液化学均一性

影响玻璃液化学均一性的因素有原料的清洁、

称量的准确性、配合料的均匀度以及玻璃熔制过程中配合料的熔化、均化和澄清程度。只有玻璃液在没有杂质、条纹等情况下, 才能获得较好的钢化处理效果^[19]。

杂质来源于不清洁的原料、原料颗粒偏大、玻璃熔窑和供料机耐火材料的剥落及未熔化的石英颗粒等。玻璃熔窑砌筑时的电焊渣和玻璃原料加工设备(如石英砂、长石等破碎机)磨损而混入玻璃料中会导致玻璃液中含有硫化镍(NiS)杂质。

由于杂质和玻璃热膨胀系数的差异, 它会扰乱钢化内应力的分布, 致使在钢化或经热、冷冲击试验过程中产生自爆。大量试验研究表明, 杂质直径在 0.01 mm 以下(与玻璃形成共融体), 分布在压应力层内, 这种钢化玻璃件基本上不会发生自爆。若杂质直径大于 0.01 mm , 又分布在张应力层, 那么, 钢化玻璃件在生产、存放、运输和线路运行时会产生自爆, 有时会延续多年后或遇到有外界突发冲击时, 才产生自爆。

条纹是由于玻璃液熔化工艺不稳定, 未充分熔化、均化和澄清而呈现的线条分层, 破坏了玻璃液的化学均一性, 用这种玻璃液制成的玻璃件在钢化处理时也会产生内应力分布不均匀。

4.3.2 钢化工艺存在缺陷

若钢化玻璃件中间张应力层发生偏移, 甚至贴近玻璃表面时, 会削弱钢化玻璃件的品质。然而, 玻璃件各部分厚度不均匀, 尤其是伞盘的伞棱较高, 头部内腔较深, 伞棱根部又厚, 在钢化处理时, 要使各部位同时均匀冷却, 并不容易, 难免给钢化玻璃件的自爆留有隐患。

5 降低钢化玻璃绝缘子自爆率的技术措施

5.1 提高玻璃绝缘子制料的质量

制料包括配料和玻璃熔制两个环节。一方面, 要加强原料和配合料的管理, 杜绝杂质或颗粒大的原料掺入, 对玻璃熔窑和供料道要选择耐火度高的耐火材料, 减少剥落情况; 另一方面, 要改进玻璃的熔制工艺, 做到以下几方面。

- 1) 选择合理的熔制温度, 使玻璃在熔制过程中得到充分地澄清和均化。
- 2) 保持炉温稳定, 炉压稳定, 料面稳定, 加料均匀, 出料均匀。
- 3) 在选择熔炉时, 应考虑有足够的熔化面积。
- 4) 采用高热质值燃料, 以提高熔制温度和熔制质量。常用的燃料是重油、煤气和天然气等。
- 5) 配合料的成分要准确, 混合要均匀。

5.2 改进玻璃件的钢化工艺

钢化工艺包括玻璃件的恒温温度和时间、钢化风栅的结构和风嘴的配置、冷却用压缩空气的净化 and 压力、玻璃件钢化处理时间和支架的旋转速度等。

5.3 剔除钢化不良玻璃绝缘子方法

5.3.1 二次热、冷冲击试验

含有杂质的钢化玻璃件遭受 400 °C 热冲击试验破坏时,其碎片呈细小颗粒状,并能找到杂质的自爆中心。冷冲击试验(温差 110 °C)主要剔除钢化不良或弱钢化的制品,它的碎片较大或呈整体裂纹^[23]。

第 1 次热、冷冲击(通常称为“次热、冷冲击”),往往达不到降低产品自爆率的目的,仍需对钢化玻璃件加做第 2 次热、冷冲击试验,其淘汰率为 0.02% 左右。冷、热冲击试验的内应力分布见图 7。

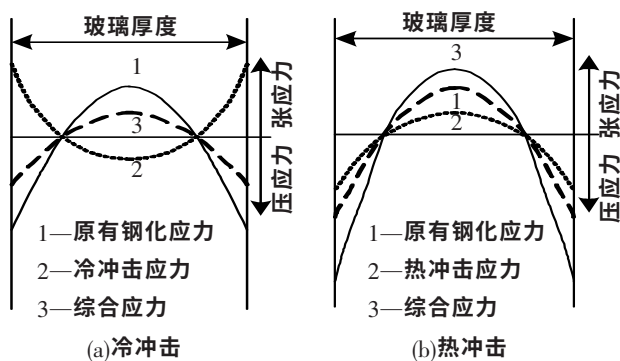


图 7 热、冷冲击试验的内应力分布图

Fig.7 Distributing map of inner stress for the heat shock and cold shock test

5.3.2 内水压试验

第 2 次热、冷冲击试验对剔除钢化玻璃件的伞盘部分的缺陷行之有效,但对钢化玻璃件头部内腔的热、冷冲击效果不明显,即头部内腔瞬时温差达不到冲击的目的。为此,可采用内水压试验方法,将钢化玻璃件头部内腔充水承受压力作用,其作用力均匀分布在头部内腔各部位,见图 8^[24]。如果钢化玻璃件头部内腔存在内应力不均匀时,薄弱部位因受力作用会产生敏感的冲击,当超过它的固有强度时,钢化玻璃件自爆,其淘汰率为 1%~2%。

5.3.3 均质热处理技术

玻璃均质热处理技术是剔除产品钢化内应力不均匀分布(即钢化不良制品)的一种新方法。

将钢化玻璃件在恒温炉中缓慢升温,当温度达到 $(290\pm 10)^{\circ}\text{C}$ 时,恒温 2 h,见图 9,再进行缓慢冷却^[25]。恒温过程有两个作用:一方面,玻璃件在钢化处理时获得的内应力(如金属淬火)在 2 h 恒温过程中经受了回火作用,致使钢化内应力再次得到均匀分布,改善和提高了制品的钢化质量;另一方面,NiS 杂质的

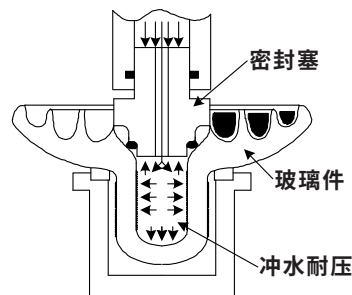


图 8 玻璃绝缘子头部内水压试验示意图

Fig.8 Sketch map of inner water-pressure test of the head of glass insulator

膨胀系数受热后产生的内应力与玻璃件中原有的钢化内应力产生了较大差异,它扰乱了内应力的均匀分布,含有 NiS 杂质的制品在恒温炉中因内应力突发集中便产生了自爆,它的自爆与玻璃件的几何形状和重量有关,其淘汰率较高,一般在 2%~5%。

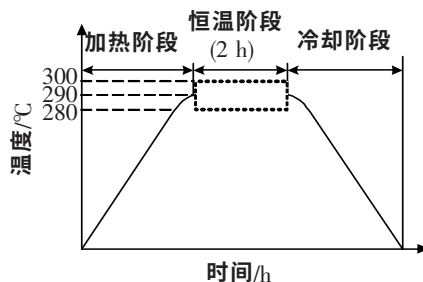


图 9 玻璃均质热处理过程

Fig.9 Procedure of homogeneous heat processing of glass

6 结论

1)玻璃绝缘子的自爆具有“早期暴露,逐年下降”的特点。

2)玻璃绝缘子零值自爆后,其电弧流经铁帽边缘与钢脚杆径间的捷径通道,由于它的残留强度高,不致造成掉串事故。通过分析玻璃绝缘子自爆后的绝缘子残锤上的碎玻璃形状,可以判断绝缘子自爆的起始点。

3)自然环境、机械荷载、严重污秽、生产工艺等对钢化玻璃绝缘子自爆有一定影响,而电场强度对钢化玻璃绝缘子自爆无影响。

4)玻璃液化学均一性较差、钢化工艺不良,进而导致钢化玻璃件中间张应力层发生偏移,是影响钢化玻璃绝缘子自爆的内因。

5)玻璃件中间张应力层发生偏移,不均匀的分布,将削弱了钢化玻璃件的品质,带来自爆隐患。

6)采用二次热冷冲击试验、内水压试验、均质热处理技术、提高玻璃制料质量及改进玻璃件的钢化工艺等技术措施可有效降低钢化玻璃绝缘子自爆率。

参考文献:

- [1] 顾洪连. 玻璃绝缘子集中自破的原因分析[J]. 电瓷避雷器, 2003(5):6-7.
GU Hong-lian. Cause analysis of concentrated self-blast phenomenon of glass insulators [J]. Insulators and Surge Arresters, 2003(5):6-7.
- [2] 李翔, 顾洪连. 玻璃绝缘子在大跨越线路上的运行概况[J]. 高电压技术, 2006, 32(7):120-122.
LI Xiang, GU Hong-lian. General situation of glass insulator used on long span power line [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(7):120-122.
- [3] 孙泽慧, 顾洪连. 浅析玻璃绝缘子运行质量的规律性[J]. 电瓷避雷器, 2000(5):3-5.
SUN Ze-hui, GU Hong-lian. Primary analysis of the operation quality rule of glass insulator [J]. Insulators and Surge Arresters, 2000(5):3-5.
- [4] 谢洪平. 500 kV 输电线路钢化玻璃绝缘子集中自爆现象分析[J]. 江苏电机工程, 2006, 25(2):55-57.
XIE Hong-ping. Analysis of the concentrated self-blast phenomenon of toughened glass insulator on 500 kV transmission lines [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2006, 25(2):55-57.
- [5] 吴健, 顾洪连. 玻璃绝缘子在浙江省 500 kV 电网的运行概况[J]. 电瓷避雷器, 2006(2): 24-25.
WU Jian, GU Hong-lian. The general situation of domestic glass insulators used on 500 kV electrical system in Zhejiang province [J]. Insulators and Surge Arresters, 2006 (2): 24-25.
- [6] 唐倍, 顾洪连. 国产玻璃绝缘子在超高压输电线路上的运行概况[J]. 电瓷避雷器, 2002(5): 27-29.
TANG Bei, GU Hong-lian. Operation situation of domestic glass insulator on EHV transmission lines [J]. Insulators and Surge Arresters, 2002(5): 27-29.
- [7] 顾洪连. 浅析 LXP-160 悬式玻璃绝缘子在南京 220 kV 跨江线路运行的稳定性[J]. 华东电力, 1992(12): 22-24.
GU Hong-lian. Primary analysis of the operation reliability of LXP-160 toughened glass suspension insulator on Nanjing 220 kV river-crossing lines [J]. East China Electric Power, 1992(12): 22-24.
- [8] 朱凯, 顾洪连. 国产玻璃绝缘子四十年运行概述[J]. 电瓷避雷器, 2006(5): 14-16.
ZHU Kai, GU Hong-lian. General situation of service of domestic glass insulators for 40 years [J]. Insulators and Surge Arresters, 2006(5): 14-16.
- [9] 肖国屏. 500 kV 岗云线钢化玻璃绝缘子运行状况分析[J]. 高电压技术, 1994, 20(2): 75-76.
XIAO Guo-ping. Analysis of operation of toughened glass insulator in 500 kV Gang-Yun line [J]. High Voltage Engineering, 1994, 20(2): 75-76.
- [10] 顾洪连. 悬式钢化玻璃绝缘子在 500 kV 线路上的运行[J]. 四川电力技术, 1996(6): 19-25.
GU Hong-lian. Operation of suspension tempering glass insulator in 500 kV power transmission line [J]. Sichuan Electric Power, 1996(6): 19-25.
- [11] 顾洪连, 沈其荣. 输电线路绝缘子掉串事故的原因分析[J]. 电力建设, 2002, 23(2): 30-31.
GU Hong-lian, SHEN Qi-rong. Analysis on causes of string breakage failure of insulators on transmission lines [J]. Electric Power Construction, 2002, 23(2): 30-31.
- [12] 崔超群, 童孝榜, 顾洪连. 玻璃绝缘子耐雷击闪络和工频电弧性能试验研究[J]. 电瓷避雷器, 2005(4): 8-11.
CUI Chao-qun, TONG Xiao-bang, GU Hong-lian. Study on arcing resistance performance of glass insulator at lightning and power frequency flashover [J]. Insulators and Surge Arresters, 2005(4): 8-11.
- [13] 崔超群, 顾洪连. 钢化玻璃绝缘子运行可靠性及机理分析[J]. 电瓷避雷器, 2005(1): 11-12.
CUI Chao-qun, GU Hong-lian. Service reliability and mechanism analysis on toughened glass insulator [J]. Insulators and Surge Arresters, 2005(1): 11-12.
- [14] 沈其荣, 顾洪连. 绝缘子防污闪性能的探讨和可靠性的评价[J]. 电瓷避雷器, 2001(5): 9-11.
SHEN Qi-rong, GU Hong-lian. Discussing on the anti-pollution flashover performance of insulator and evaluation of reliability [J]. Insulators and Surge Arresters, 2001(5): 9-11.
- [15] 童孝榜, 顾洪连. 浅析绝缘子钢化玻璃件的内应力和寿命周期[J]. 电力建设, 2006, 27(9): 68-69.
TONG Xiao-bang, GU Hong-lian. Primary discussion about internal stress and life cycle of toughened glass piece of insulators [J]. Electric Power Construction, 2006, 27 (9): 68-69.
- [16] 李翔, 顾洪连. 国产玻璃绝缘子在我国西部地区输电线路上的运行概况[J]. 电瓷避雷器, 2004(4): 5-8.
LI Xiang, GU Hong-lian. Service of domestic glass insulator on overhead transmission line of Western China [J]. Insulators and Surge Arresters, 2004(4): 5-8.
- [17] 顾洪连, 孙泽慧. 玻璃绝缘子运行特性分析[J]. 电力建设, 2000, 21(11): 48-50.
GU Hong-lian, SUN Ze-hui. Analysis on operation performance of glass insulators [J]. Electric Power Construction, 2000, 21(11): 48-50.
- [18] 夏庆辉, 寻凯. 500 kV 钢化玻璃绝缘子运行分析[J]. 高电压技术, 1992, 18(2): 69-70.
XIA Qing-hui, XUN Kai. The analysis on the operation of the 500 kV toughened-glass insulators [J]. High Voltage Engineering, 1992, 18(2): 69-70.
- [19] 童孝榜, 顾洪连. 钢化玻璃绝缘子自破原因及改进措施的探讨[J]. 电瓷避雷器, 2006(4): 5-8.

- [2] 李宝忠,何金良,周 辉,等.核电磁脉冲环境中传输线的电磁干扰[J].高电压技术,2009,35(11):2753-2758.
LI Bao-zhong, HE Jin-liang, ZHOU Hui, et al. Electro-magnetic interference of transmission line in HEMP environment [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(11): 2753-2758.
 - [3] 周壁华.电磁脉冲及其工程防护[M].北京:国防工业出版社,2003.
ZHOU Bi-hua. EMP and EMP protection [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003.
 - [4] 李长胜,崔 翔.光学电场传感器研究综述[J].电气应用,2008,27(16):8-13.
LI Chang-sheng, CUI Xiang. Summary of the optical electric field sensor [J]. Electrotechnical Application, 2008, 27(16): 8-13.
 - [5] KUWABARA N, TAJIMA K, KOBAYASHI R, et al. Development and analysis of electric field sensor using LiNbO3 optical modulator [J]. IEEE Trans. on Electro-magnetic Compatibility, 1992, 34(4): 391-395.
 - [6] KORDI B, VETRI J L, BRIDGES G, et al. Calibration methods for electric field probes and GTEM cells [J]. International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2004(5): 908-912.
 - [7] MATSUI T. A wide band FET antenna and its calibration [J]. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 1991, 40(1): 47-49.
 - [8] KARST J P, CHRISTINE G. Calculable field generation using TEM cells applied to the calibration of a novel E-field probe[J]. IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, 2002, 44(1): 59-71.
 - [9] MATSUI T. A wide band FET antenna and its calibration [J]. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 1991, 40(1): 47-49.
 - [10] 张卫东,崔 翔.光纤瞬态电场传感器的研究[J].测控(上接第99页)
TONG Xiao-bang, GU Hong-lian. Approach to causes and improvement measures against self-shattering of toughened glass insulator body [J]. Insulators and Surge Arresters, 2006(4): 5-8.
 - [20] 顾洪连,童孝榜.漫谈输电线路绝缘子的可靠性[J].四川电力技术,1999(4): 13-18.
GU Hong-lian, TONG Xiao-bang. Reliability of power transmission line insulators [J]. Sichuan Electric Power, 1999(4): 13-18.
 - [21] 顾洪连.悬式钢化玻璃绝缘子长期运行性能的研究[J].电工技术学报,1989(4): 50-54.
GU Hong-lian. Study of the performance of the toughened glass insulators in long period operation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1989(4): 50-54.
 - [22] 王 来,顾洪连.悬式钢化玻璃绝缘子的质量改进和运行经验[J].电网技术,1991(4): 23-29.
WANG Lai, GU Hong-lian. Quality improvement and operation experiences of toughened glass suspension insulator [J]. Power System Technology, 1991(4): 23-29.
 - 技术,2004,23(4):7-9.
ZHANG Wei-dong, CUI Xiang. Research on optical fiber transient electric field sensor [J]. Measurement & Control Technology, 2004, 23(4): 7-9.
 - [11] 祝 敏,贺亦成,郑振兴.新型偶极电场探测器及对空间电场的测量[J].传感器技术,2000,19(4):9-50.
ZHU Min, HE Yi-cheng, ZHENG Zhen-xing. A new dipole electric field sensor and its application in EMP simulator [J]. Journal of Transducer Technology, 2000, 19(4): 9-50.
 - [12] 孟 萃,郭晓强,陈向跃.脉冲电场传感器灵敏度响应系数一致性的实验研究[J].核技术,2007,30(1):73-77.
MENG Cui, GUO Xiao-qiang, CHEN Xiang-yue. Test research of consistency for amplitude calibration coefficients of pulsed electric field sensor [J]. Nuclear Techniques, 2007, 30(1): 73-77.
 - [13] 李炎新,石立华,高 成.用宽带模拟量光纤传输系统测量脉冲电磁场[J].高电压技术,2006,32(2):34-36.
LI Yan-xin, SHI Li-hua, GAO Cheng. Measurement of pulse electromagnetic field using wide band fiber optic analogue transmission system [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(2): 34-36.
 - [14] FESER K, PFAFF W. A potential free spherical sensor for the measurement of transient electric fields [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1984, 103(10): 2904-2911.
 - [15] MANN W, PETERMANN K. VCSEL-based miniaturized E-field probe with high sensitivity and optical power supply [J]. Electronics Letters, 2002, 38(10): 455-456.
- 刘卫东(1983—),男,博士研究生,主要研究方向为瞬态脉冲场测试理论与技术。
- 刘尚合(1937—),男,教授,博导,中国工程院院士,研究领域为电磁环境模拟与防护技术。
-
- [23] 关志成.绝缘子及输变电设备外绝缘[M].北京:清华大学出版社,2006.
GUAN Zhi-cheng. Insulator and outdoor insulation of transmission and distribution equipment [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
 - [24] 吴艳红,顾洪连.运行30~40年后玻璃绝缘子寿命周期的性能测试[J].电瓷避雷器,2007(1): 16-17.
WU Yan-hong, GU Hong-lian. The product performance test of the glass insulators used for 30-40 years [J]. Insulators and Surge Arresters, 2007 (1): 16-17.
 - [25] 王李蕾,顾洪连.玻璃均质热处理技术在生产上的应用[J].电瓷避雷器,2009(3): 12-13.
WANG Li-lei, GU Hong-lian. The application of the glass homogenizer heat treatment technology on production [J]. Insulators and Surge Arresters, 2009(3): 12-13.
- 王少华(1981—),男,博士,工程师,主要从事高压输电线路外绝缘研究工作。