

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.04.012

温度对瓷支柱绝缘子机械性能影响仿真研究

王 博¹, 张丹丹², 闫振华¹, 阳瑞霖², 黄勤清³, 马 波¹, 何志强¹

(1. 国网宁夏电力公司电力科学研究院, 银川 750000; 2. 华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室, 武汉 430074;
3. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430074)

摘要: 利用有限元软件对40.5 kV瓷支柱绝缘子在温度剧变条件下的机械性能进行了仿真研究, 包括温度剧变产生的温度应力以及对弯曲载荷和扭转载荷的影响, 温度范围为 $-40\sim+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ (初始温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$)。研究发现, 在低温或者高温条件下, 瓷支柱绝缘子不同介质的连接位置均会出现明显的应力集中现象; 同时, 在施加弯曲载荷时, 高温会使瓷支柱绝缘子承受更大的应力, 而在低温时应力会随温度的降低而减小; 而在施加扭转载荷时, 瓷柱的不同位置在不同温度下所承受的应力有所不同, 上瓷根所受应力随温度升高而减小, 下瓷根所受应力随温度升高而升高。该研究结果为绝缘子在不同环境下的运维提供了一定的理论指导。

关键词: 瓷支柱绝缘子; 弯曲载荷; 扭转载荷; 温度剧变

Simulation Study on the Influence of Temperature on the Mechanical Properties of Porcelain Post Insulator

WANG Bo¹, ZHANG Dandan², YAN Zhenhua¹, YANG Ruilin², HANG Qinqing³,
MA Bo¹, HE Zhiqiang¹

(1. State Grid Ningxia Electric Power Company Electric Power Research Institute, Yinchuan 750000, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China; 3. Wuhan NARI Limited Liability Company of State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: In this paper, the finite element software is used to simulate the mechanical properties of insulator of 40.5 kV porcelain post insulator under the condition of temperature upheaval, including the temperature stress produced by the temperature upheaval and the effect on the bending load and torsion load with the temperature range of $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ (the initial temperature is $20\text{ }^{\circ}\text{C}$). It is found that under the conditions of low temperature or high temperature, the stress concentration phenomenon appears in the connecting position of different medium of porcelain post insulator. At the same time, when the bending load is applied, the high temperature will make the porcelain post insulator bear greater stress, while the stress decreases with the decrease of the temperature at low temperature; and when the torsional load is applied, the stress of the porcelain column is different at different positions and temperatures, the stress of the upper porcelain root decreases with the increase of temperature, the stress of the lower porcelain root increases with the increase of temperature, which provides some theoretical guidance for the operation and maintenance of insulators in different environments.

Key words: porcelain post insulator; bending load; torsion load; temperature upheaval

0 引言

支柱绝缘子在电力系统中起绝缘与支撑的作

用,是电力系统的安全稳定运行的重要保障。然而支柱绝缘子长期在强电磁环境、机械载荷以及恶劣天气的多重影响下其机械性能将发生一定程度的

劣化,甚至引发断裂,造成严重后果。近年来,由支柱绝缘子断裂引发的事故屡有报导,给电网的安全运行带来巨大风险^[1-4]。

根据国家电网公司对支柱绝缘子事故调查报告^[5],绝缘子事故的发生呈现出北方多于南方的分布特点,尤其是东北地区,气温低,温差大,夏季温度接近 30 ℃,而最低温度则低于-30 ℃,气温年较差超过 60 ℃。温度不同时,不同材料结合处存在热胀冷缩现象,而产生较大的机械应力。因此,研究外界温度对支柱绝缘子机械性能的影响对支柱绝缘子的运维指导具有较大的意义。

从目前的研究现状来看,支柱绝缘子的电场是普遍关注的热点^[6-8],而对支柱绝缘子的机械特性研究则相对不足。文[9-11]利用仿真与试验相结合的手段分析了瓷支柱绝缘子在承受弯曲和扭转载荷时应力应变分布情况;文[12-14]讨论了支柱绝缘子的破坏机理并分析了裂纹对瓷支柱绝缘子机械性能劣化的影响。文[15-16]对瓷支柱绝缘子进行了温度循环试验研究,经过温度循环试验后,法兰连接部位防水密封胶膨胀并析出,法兰与瓷体之间外漏的胶装水泥出现裂纹,但是未对这一现象进行受力分析,也未进一步解释裂纹出现的原因;事实上,支柱绝缘子在运行过程中,除了支撑设备所承受的载荷以外,环境温度所带来的应力应变集中情况也是不容忽视的^[17-19],而目前的科技论文中少见有在温度变化条件下讨论支柱绝缘子的机械性能的相关研究。

文中利用有限元软件 Comsol 针对 40.5 kV 瓷支柱绝缘子的机械特性进行了仿真研究,根据国标对瓷支柱绝缘子的试验方法,对瓷支柱绝缘子在不同温度下弯曲负荷、扭转负荷所产生的应力分布情况进行了仿真研究,为支柱绝缘子的强度设计提供了一定的参考。

1 模型建立

根据国家电网公司对支柱绝缘子事故调查报告^[5],中国支柱绝缘子断裂事故主要发生在 220 kV 以下电压等级,考虑到文中主要是对温度剧变对支柱绝缘子机械性能影响的规律性研究,建立了 40.5 kV 瓷支柱绝缘子的几何模型,主要尺寸参数见表 1。

瓷支柱绝缘子的主要材料包括硅质瓷、铸铁法兰、水泥胶合剂等,不同材料的热膨胀系数不同是造成瓷支柱绝缘子在温度变化条件下出现应力集中的主要原因,其中水泥胶合剂作为铸铁法兰与瓷质绝缘子连接部位为应力最为集中的位置之一,是文中关注的重点。瓷支柱绝缘子不同材料的特性

表 1 40.5 kV 支柱绝缘子几何参数
Table 1 40.5 kV geometrical parameters of pillar insulators

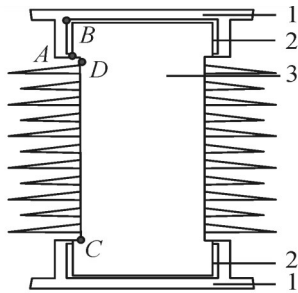
主要参数	结构高度	大伞裙半径	小伞裙半径	支柱半径
数值/mm	560	120	110	53

参数见表 2^[7]。

表 2 瓷支柱绝缘子主要材料属性
Table 2 Main material properties of porcelain pillar insulator

参数	瓷质	法兰	水泥
膨胀系数/ (1·K ⁻¹)	10.0×10 ⁻⁶	12.2×10 ⁻⁶	9.0×10 ⁻⁶
杨氏模量/ MPa	6×10 ⁴	2×10 ⁵	3×10 ⁴
密度/(kg·m ⁻³)	2 600	7 870	2 300
泊松比	0.170	0.290	0.215

所建立瓷支柱绝缘子的中心截面图见图 1。其中水泥胶合剂的厚度为 5 mm。C 点为瓷柱下根部, D 点为瓷柱上根部。



1—铸铁法兰; 2—水泥胶合剂; 3—瓷柱。
图 1 支柱绝缘子剖面图

Fig. 1 Section diagram of pillar insulator

2 边界条件设置

根据国标 GB/T 755—2008《绝缘子试验方法: 第三部分:机械试验方法》的要求,在对支柱绝缘子施加弯曲载荷、扭转载荷时应当固定支柱绝缘子底部法兰,同时在绝缘子顶部施加响应的载荷,其中,普通瓷质绝缘子要求承受的最大弯曲载荷为 4 kN,扭转载荷为 1.2 kN·m,在文中的仿真研究中采用同样的边界设置进行,其中弯曲载荷为 4 kN,扭转载荷为 1.2 kN·m。同时环境初始温度设定为 20 ℃。

3 仿真分析

3.1 温度变化下瓷支柱绝缘子的应力分布

随着物体的温度变化,由于热胀冷缩将导致物体产生线性应变,而不同物体的热膨胀系数的不

同,物体在膨胀或收缩过程中将不可避免的受到其他物体的限制而产生应力^[20]。物体的线性应变可通过式(1)进行计算。

$$\varepsilon = \alpha(T - T_0) \quad (1)$$

式(1)中: α 表示温度膨胀系数; T 表示当前温度; T_0 为初始温度;此时,产生的温度应力 σ 可以由式(2)进行计算。

$$\sigma = D\varepsilon \quad (2)$$

式(2)中, D 为弹性矩阵。

为了研究瓷支柱绝缘子在温度剧变条件下的应力情况,对-40~80℃温度条件下瓷支柱绝缘子应力变化进行仿真,其中,高温(80℃)、低温(-40℃)条件下的瓷支柱绝缘子中心剖面的应力分布见图2。其中法兰与瓷质界面最大应力出现在图1中的A点;水泥胶合剂与法兰界面最大应力出现在图1中的B点。

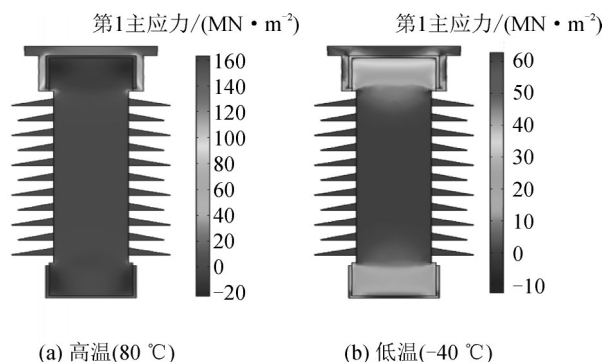


图2 不同温度条件下瓷支柱绝缘子中心剖面应力

Fig. 2 Stress of core profile of porcelain pillar insulator under different temperature conditions

不同温度下水泥胶合剂与法兰界面以及法兰、瓷质界面最大应力的应力大小的计算结果见表3。二者应力大小与温度变化关系曲线见图3。当外界环境温度高于或低于20℃时(环境温度),A、B点的应力均会明显变大。同时,无论环境温度升高还是降低,在不同材料的交界面,温度变化与应力大小的关系近似呈线性关系。进一步分析可以发现,温度降低所产生的影响比温度升高所产生的影响更为剧烈。温度升高时A点与B点的应力变化基本一致,而温度降低时,B点的应力比A点的应力更大,而在实际运用过程中,水泥胶合剂部位是断裂事故的高发位置,也与仿真的结果相符合。

3.2 温度变化对弯曲应力的影响

将下端金属法兰固定,在上部金属法兰施加弯曲载荷。当外界环境温度发生急剧变化,而支柱绝缘子又承受着弯曲载荷时,瓷支柱绝缘子不仅需要承受不同部件膨胀系数不同而产生的应力,也需要承受弯曲载荷的作用。一般普通瓷质绝缘子的最大弯曲载荷要求为4 kN,为此,建立了考虑弯曲

表3 不同温度条件下瓷支柱绝缘子的应力情况

Table 3 Stress situation of porcelain pillar insulator under temperature changing condition

温度/℃	水泥胶合剂最大应力/MPa	法兰、瓷质界面最大应力/MPa
-40	48.80	31.70
-20	32.40	21.10
0	16.10	10.53
20	0.00	0.00
40	3.29	3.57
60	6.57	7.71
80	9.91	10.80

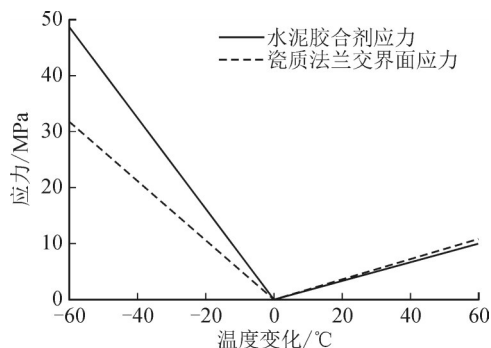


图3 应力与温度变化程度关系

Fig. 3 Relationship between stress and temperature change degree

载荷的模型,见图4。其中在法兰顶部施加4 kN横向力以模拟弯曲载荷,可以发现,弯曲载荷会使整个支柱绝缘子会发生位移变化,与固定金属法兰越远,位移变化越显著。

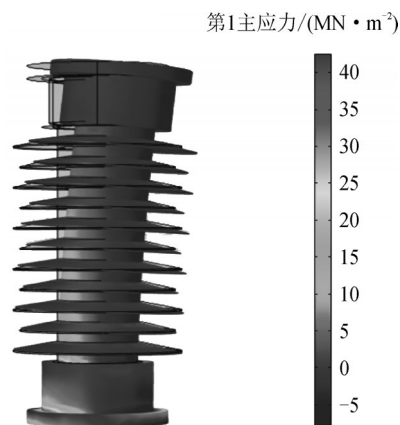


图4 弯曲载荷下瓷支柱绝缘子位移图

Fig. 4 Displacement diagram of porcelain pillar insulator under bending load

-40、20、80℃中心剖面的应力情况见图5。不同温度条件下瓷柱根部的最大应力见表4。(图1中C点所示),温度变化与瓷柱根部最大应力分布曲线见图6。当承受弯曲载荷时,高温与低温环境所造成的影响是相反的,在温度低于环境温度时,瓷

柱根部的最大应力随着温度的降低而减小,而当温度高于环境温度时,瓷柱根部的所承受的应力随温度的上升而增大,这说明在低温条件下,材料遇冷收缩所产生应力的方向与弯曲载荷所产生应力的方向相反,二者相互抵消,使得支柱绝缘子瓷柱根部承受的应力减小。进而使得支柱绝缘子根部承受更大的应力作用;而受热膨胀所产生应力的方向与弯曲载荷所产生应力的方向相同,进而使得支柱绝缘子根部承受更大的应力作用。

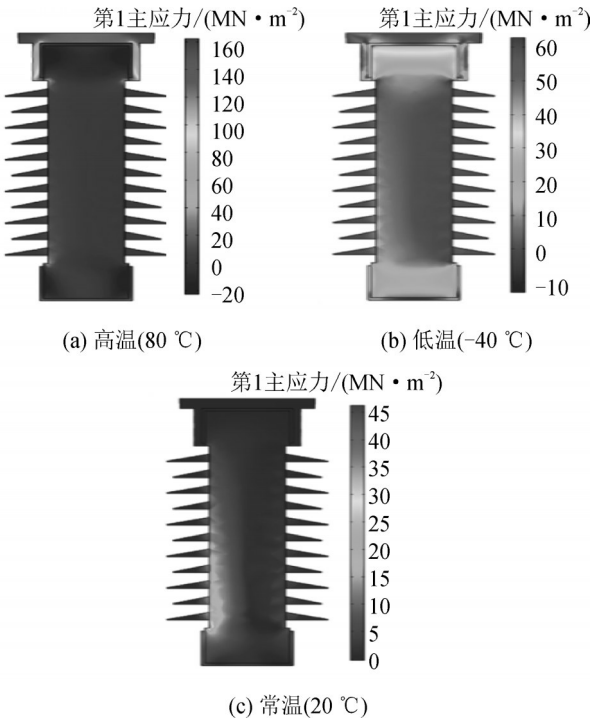


图 5 不同温度下弯曲载荷下瓷支柱绝缘子应力分布云团
Fig. 5 Stress of porcelain pillar insulator under bending load at different temperature

表 4 不同温度情况下施加弯曲应力情况

Table 4 Bending stress under different temperature conditions

温度/ $^{\circ}\text{C}$	-40	-20	0	20	40	60	80
瓷柱最大应力/ MPa	21.4	23.5	32.0	36.7	41.5	46.2	60.0

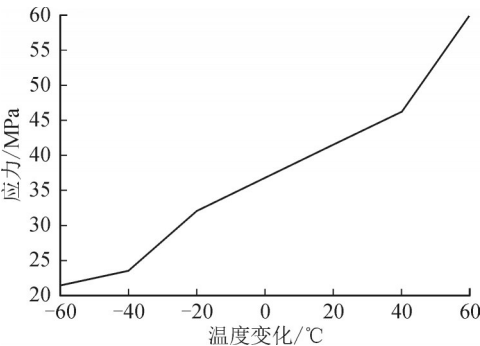


图 6 瓷根应力与温度变化关系曲线

Fig. 6 Relationship between stress and temperature change degree

3.3 温度变化对扭转应力的影响

将下端金属法兰固定,在上部金属法兰施加扭转载荷,普通瓷瓷质绝缘子的最大扭转载荷一般为 $1.2\text{ kN} \cdot \text{m}$,因此,在法兰顶部施加 $1.2\text{ kN} \cdot \text{m}$ 的扭转载荷。

将下端金属法兰固定,在上部金属法兰施加扭转载荷。当外界环境温度发生急剧变化,而支柱绝缘子又承受着扭转载荷时,瓷支柱绝缘子不仅需要承受不同部件膨胀系数不同而产生的应力,也需要承受扭转载荷的作用。一般普通瓷瓷质绝缘子的最大弯曲载荷要求为 $1.2\text{ kN} \cdot \text{m}$,为此,建立了考虑弯曲载荷的模型。

支柱绝缘子在 -40 、 20 、 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 中心剖面的应力情况见图 7。在扭转载荷的作用下,瓷柱上瓷根部(图 1 中 D 点)、下瓷根部(图 1 中 C 点)以及各个伞裙根部都会出现应力集中现象。具体的应力值计算结果见表 5。根据表 5 计算得到温度变化程度与扭转应力关系图见图 8。

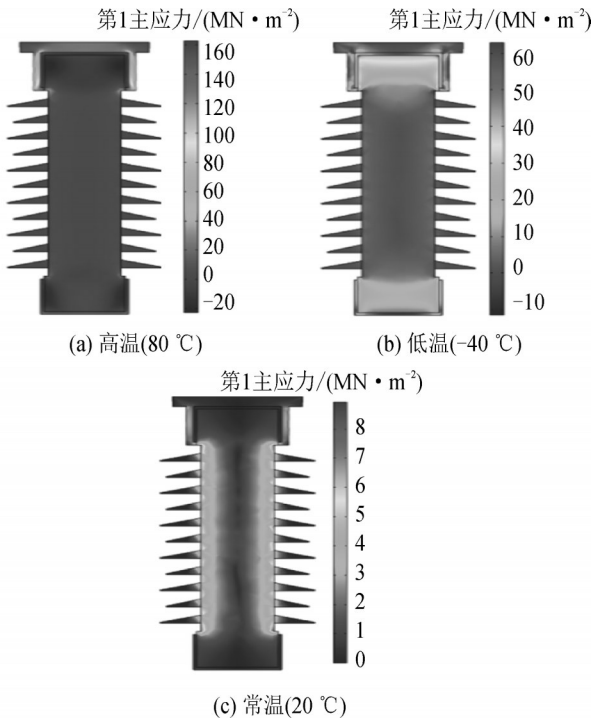


图 7 不同温度情况扭转载荷下瓷支柱绝缘子面应力

Fig. 7 Stress on insulator surface of porcelain pillar under torsion load under different temperature conditions

在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,扭转应力会使得支柱绝缘子在伞裙根部,瓷体根部产生应力集中现象,随着外界环境温度的变化,绝缘子的不同位置在扭转载荷下承受的应力也发生变化:当温度升高时,下瓷柱根部的应力(C 点)显著增加,上瓷柱根部(D 点)的应力缓慢减小;而温度降低时,下瓷柱根部的应力几乎

不变,上瓷柱应力明显增加。

表5 不同温度下扭转载荷所产生应力情况

Table 5 Stress and strain of torsion load at different temperature

温度/℃	上瓷根部 应力/MPa	下瓷根部 应力/MPa
-40	16.70	6.60
-20	12.60	6.80
0	11.40	6.90
20	10.10	8.80
40	6.20	14.50
60	5.60	19.90
80	5.10	25.70

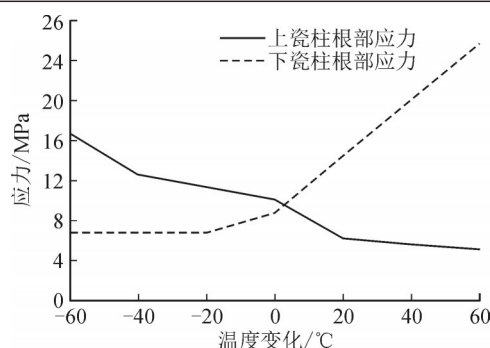


图8 扭转应力随温度剧变程度关系

Fig. 8 Relationship between torsional stress and temperature upheaval degree

3.4 瓷支柱绝缘子的强度

瓷质材料属于脆性材料,其断裂机理符合材料力学中第一强度理论,主要断裂原因是材料的最大应力(第1主应力)达到临界值。根据第一强度理论,实际工况中,第1主应力为 σ_1 ,而材料的断裂最大应力为 σ_b ,许用应力 $[\sigma] = \sigma_b/n$, n 为设计裕度,故第一强度准则见式(3)。

$$\sigma_{eq1} = \sigma_1 \leq [\sigma] \quad (3)$$

从图8仿真中可以看出,随着环境温度的改变,瓷支柱绝缘子在弯曲、扭转载荷的作用下其应力分布情况与常温条件下相比会产生变化,特别是在低温条件下,瓷支柱绝缘子下端根部会随温度降低应力集中情况不断加剧,使得瓷柱下端根部成为较易产生机械破坏的起始点,而在实际运行过程中,大多数瓷支柱绝缘子的断裂事故均发生在下瓷柱根部,符合仿真计算的结果。

4 结论

对40.5 kV瓷支柱绝缘子在不同温度环境下的机械特性进行了仿真研究,包括温度变化本身所带

来的应力集中现象以及不同温度条件下弯曲载荷与扭转载荷的变化情况,通过仿真解释了瓷支柱绝缘子断裂事故大多数发生在瓷质根部的原因。产生的主要结论有:

1)温度变化会导致瓷支柱绝缘子发生应力集中现象,在水泥胶合剂、铸铁法兰、瓷质绝缘子三者结合处最为明显。

2)在弯曲载荷作用下,支柱绝缘子瓷柱根部会产生明显的应力集中现象,但是不同的环境温度会产生不同的影响,在温度下降时,瓷柱根部所承受的应力得到减轻,并随温度降低不断减小,而温度升高时,瓷柱根部所承受的应力显著增加,且随温度升高而不断增加。

3)在扭转载荷作用下,支柱绝缘子瓷柱根部、伞裙根部均会产生应力集中现象,同时,随着温度的变化瓷柱的上下根部的应力情况会产生不同的变化,其中上瓷柱根部的应力随着温度下降而明显增加,而在温度上升时变化不大;下瓷柱应力随温度上升显著增大,而在温度下降时变化不明显。

参考文献:

- [1] 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 feature reason for composite insulator [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11):3093-3100.
- [2] 曹枚根,高政国,张健,等.高压瓷绝缘子振动疲劳试验及损伤识别[J].高压电器,2017,53(10):7-12.
CAO Meigen, GAO Zhengguo, ZHANG Jian, et al. Vibration fatigue test and damage identification of high-voltage porcelain insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(10): 7-12.
- [3] 韦晓星,黎建平,楚金伟,等.换流站复合外绝缘应用及雨闪事故分析[J].高电压技术,2017,43(12):3958-3963.
WEI Lixing, LI Jianping, CHU Jinwei, et al. Application of composite insulators and analysis of rain flashover in converter stations[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12): 3958-3963.
- [4] 郭晨璠,王科,颜冰,等.线弹性断裂力学的支柱瓷绝缘子断裂特性及断裂机理研究[J].云南电力技术,2018,46(2):12-18.
GUO Chenyun, WANG Ke, YAN Bing, et al. Study on fracture properties and mechanism of porcelain post insulator based on linear elastic fracture mechanics[J]. Yunnan Electric Power, 2018, 46(2): 12-18.
- [5] 国家电力公司发输电运营部高压支柱瓷绝缘子事故调查工作小组.高压支柱瓷绝缘子事故调查分析及预防措施

- 施[J]. 电力设备, 2002, 3(4): 32-37.
- High Voltage Porcelain Insulators Pillars of the Accident Investigation Team for National Electricity Generation and Transmission Company Operations. High voltage porcelain insulators pillar analysis of accident investigation and prevention measures[J]. Electrical Equipment, 2002, 3(4): 32-37.
- [6] 曹 雯, 林晓焕. 110 kV 复合绝缘子电场分布影响因素[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(7): 8-13.
- CAO Wen, LIN Xiaohuan. Influencing factors of electric field distribution for 110 kV composite insulator[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(7): 8-13.
- [7] 张继超. 复合绝缘子内部空气间隙对电场分布影响研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- ZHANG Jichao. Research on composite insulators internal air gap influence on the electric field distribution[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [8] 刘向实. 污秽条件下复合绝缘子电场研究仿真研究[J]. 电瓷避雷器, 2014(5): 31-36.
- LIU Xiangshi. Study on electric field distribution of composite insulator under pollution conditions[J]. Insulators and Surge Arresters, 2014(5): 31-36.
- [9] 邱志斌, 姚文军, 李慧慧, 等. 高压隔离开关支柱瓷绝缘子机械特性研究[J]. 绝缘材料, 2013, 46(5): 37-42.
- QIU Zhibin, YAO Wenjun, LI Huihui, et al. Mechanical properties study of porcelain post insulator[J]. Insulating Materials, 2013, 46(5): 37-42.
- [10] 孙 涛, 肖汉宁. 棒形支柱瓷绝缘子弯曲应力的有限元仿真分析[J]. 电瓷避雷器, 2007(2): 19-21.
- SUN Tao, XIAO Hanning. Simulation analysis of bending stress of solid core postinsulator by finite element method [J]. Insulators and Surge Arresters. 2007(2): 19-21.
- [11] 秦 楷, 赵 坚, 董 伟. 单节支柱瓷绝缘子的有限元应力仿真分析[J]. 广西电力, 2015, 38(2): 27-30.
- QIN Kai, ZHAO Jian, DONG Wei. Simulation analysis of finite element stress of single post porcelain insulator[J]. Guangxi Electric Power, 2015, 38(2): 27-30.
- [12] 彭苏华. 棒形支柱瓷绝缘子应力分布的数值模拟及破坏机理分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- PENG Suhua. Numerical simulation of the stress distribution and failure mechanism analysis on rod post porcelain insulator[D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [13] 周 松, 陈本荣. 高压瓷瓶支柱绝缘子有限元应力分析及安全性评定[J]. 四川电力技术, 2006, 29(3): 32-35.
- ZHOU Song, CHEN Benrong. Finite element stress analysis and safety evaluation of insulators in HV porcelain insulator[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2006, 29(3): 32-35.
- [14] FEHL B D, TRUMMAN K Z. An evaluation of fracture mechanics quarter - point displacement techniques used for computing stress intensity factors[J]. Engineering Structures, 1999, 21(5): 406-415.
- [15] 魏晓伟. 支柱绝缘子机械性能研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- WEI Xiaowei. Study on mechanical properties of the post insulators[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [16] 杨 彬. 支柱瓷绝缘子机电性能检测技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- YANG Bin. Research on detecting technique of electromechanical properties of strut porcelain insulators[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [17] 薛伟江. 低温下陶瓷结构的相变、断裂机理与性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- XUE Weijiang. Research on transformation and fracture mechanism of structural ceramics at cryogenic temperature [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [18] 杨思炫. 机械零件热膨胀影响研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- YANG Sixuan. Research on thermal expansion of mechanical parts[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
- [19] 林凤羽. 送电性能绝缘子性能综述[J]. 电力建设, 1999 (1): 26-29.
- LIN Fengxiang. Summarized description on properties of insulators in transmission lines[J]. Electric Power Construction, 1999(1): 26-29.
- [20] 黄 杰, 帅映勇, 孙 舒, 等. 水泥基材料早期热膨胀系数试验结果的分析[J]. 江苏建筑职业技术学院学报, 2016, 16(2): 10-13.
- HUANG Jie, SHUAI Yinyong, SUN Shu, et al. Analysis on experimental results of thermal expansion coefficient of cement-based materials at early age[J]. Jiangsu Vocational Institute of Architectural Technology, 2016, 16(2): 10-13.
- 王 博(1975—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事输变电设备状态评估技术。