

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.04.015

特高压GIS断路器用管型绝缘拉杆动态受力真型试验与材料压缩特性分析

刘 鹏¹, 胡睿智¹, 陈 允², 王浩然², 吴泽华¹, 靳守锋¹, 彭宗仁¹

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘技术应用协同创新中心, 西安 710049; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 作为特高压GIS断路器中连接触头与操作机构的关键部件,绝缘拉杆在操作过程中需要承受外载荷作用。为掌握绝缘拉杆动态受力特性、材料力学性能,文中通过在特高压GIS断路器中布置力传感器测得其主绝缘拉杆操作过程中动态受力情况,根据测试结果进行了拉杆材料管型试样的压缩试验,并利用仿真分析了不同长径比拉杆的压缩屈曲特性。试验结果表明,操作过程中主绝缘拉杆受交变冲击载荷作用,操作机构对绝缘拉杆所施加压力峰值与拉力峰值相差不大,且二者均达到110 kN以上,绝缘拉杆材料的压缩特性应得到关注。压缩试验结果表明长度和内、外径将会直接影响管型绝缘拉杆材料压缩性能,大长径比绝缘拉杆更容易在压缩载荷下出现塑性变形和屈曲失稳现象,所能承受的最大压缩载荷更小。基于材料压缩试验,文中通过仿真计算建立了管型绝缘拉杆临界屈曲载荷与长度之间的近似关系式,并提出通过管型试样压缩试验得到原尺寸拉杆临界屈曲载荷的方法。文中研究成果可为特高压GIS绝缘拉杆材料试验、设计制造提供参考。

关键词: 绝缘拉杆; 动态受力特性; 压缩特性; 临界屈曲载荷

Dynamic Stress Test and Analysis on Compression Characteristics of Tubular Insulation Rod Material for UHV GIS Circuit Breaker

LIU Peng¹, HU Ruizhi¹, CHEN Yun², WANG Haoran², WU Zehua¹, JIN Shoufeng¹, PENG Zongren¹

(1. Collaborative Innovation Center of Electrical Insulation and Power Equipment Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The insulation rod, as the key element for connecting the contact and operating mechanism of UHV GIS circuit breaker, needs withstanding external stress during the operation. For mastering the dynamic stress characteristics and the material's mechanical characteristic of the insulating rod, the force sensor is arranged in the UHV GIS circuit breaker to measure the dynamic stress of its main insulation rod during the operation period. According to the measurement results, the compression test of tubular sample of the insulation rod is carried out, and the compression buckling characteristics of samples with different length diameter ratio are simulated and analyzed. The test results show that the insulation rod is subjected to alternating impact loads during operation. The peak of the pressure applied by the operating mechanism to the insulation rod is close to that of the tensile force in the test, and both of them are above 110 kN. Therefore, the compression characteristics of the material of insulation rod should be paid attention to. The compression test results show that the length, inner and outer diameters will directly affect the compression performance of the tubular insulation rod, plastic deformation and buckling instability under compressive force are more likely to occur for the insulation rod with large aspect ratio, and the bore maximum compressive load is smaller. Based on the compression test of the material, the approximate relationship between the critical buckling

收稿日期:2023-09-28; 修回日期:2023-12-08

基金项目:国家电网公司科技项目(SGSHDK00SPJS1800231)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(SGSHDK00SPJS1800231).

load and length of the insulating rod is set up through simulation calculation, and a method to obtain the critical buckling load of the original-sized rod is proposed through the compression test of the tubular specimen. The research results of this paper can provide reference for the material testing, design and manufacture of insulation rod for UHV GIS.

Key words: insulation rod; dynamic stress characteristics; compression characteristics; critical buckling load

0 引言

随着中国超/特高压输电工程建设不断推进, 气体绝缘金属封闭开关设备(gas insulated switchgear, GIS)由于其占地面积小、可靠性高和不受外界环境影响的特点被广泛使用^[1-6]。绝缘拉杆是高压GIS断路器中的关键部件, 位于低电位的操作机构和高电位的触头之间, 是连接导体、传递动能的关键环节, 同时承受电场和应力场的耦合作用^[7], 运行风险高、故障时有发生, 影响电网安全可靠运行^[8-14], 特高压GIS断路器用管型绝缘拉杆见图1。

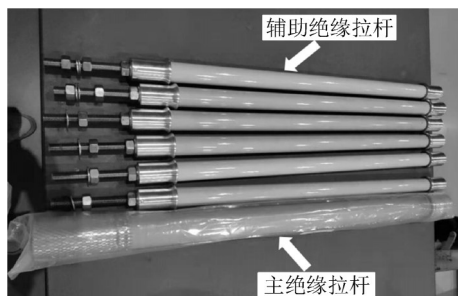


图1 特高压GIS断路器用管型绝缘拉杆

Fig. 1 Tubular insulation pull rod for UHV GIS circuit breaker

为限制操过程中电弧重燃, 确保断路器可靠操作, 绝缘拉杆需在操作机构的作用下在短时间内完成分、合闸位移过程, 使其在GIS操作过程承受较大的轴向冲击载荷, 操作机构的机械特性决定了绝缘拉杆的受力特性。马虎涛和张益舟对断路器不同状态下分、合闸时间进行了测试研究, 并提出了新的测试方法和故障预防措施^[15-16]。刘建寅比较了不同型号断路器动作时间测量原理、速度参数和合闸电阻投入方式等方面的不同, 研究了断路器操作机构运行状态的最优现场测试方案^[17]。刘超建立了72.5 kV真空断路器的Adams与MATLAB联合仿真模型并完成了动力学仿真, 得到了其空载条件下的机械特性^[18]。张红军对252 kV断路器配弹簧操动机机构样机进行动力学仿真计算, 得到了绝缘拉杆在分、合闸过程中的最大动态受力, 并通过实际操作过程中拉杆表面采集到的应变数据对比验证了仿真计算的准确性和可行性^[19]。刘煜对某型号高压断路器的机械行程曲线和分闸缓冲压力进行了实测, 并以此对绝缘拉杆进行压稳分析, 提出通过改进机

构的分闸缓冲特性来优化断路器机械特性^[20]。现有研究主要以较低电压等级断路器为测试对象展开, 并辅以仿真计算, 并较少直接对绝缘拉杆所受载荷进行分析; 然而断路器结构复杂, 部件间受力耦合关系、边界条件难以摸清, 尤其对实际特高压GIS中绝缘拉杆分、合闸过程中动态受力特性的实测难度较大, 相关研究鲜有报道。

纤维增强环氧复合管是绝缘拉杆的主体部分, 纤维的复合可以显著增强材料的抗拉性能, 使其能承受较大载荷。因此, 大部分研究重点关注了此类材料顺纤维方向的拉伸性能。但对于纤维增强环氧树脂复合材料而言, 其拉伸性能比如拉伸弹性模量、拉伸强度以及拉伸破坏延长率等相较于环氧树脂的提高程度要比压缩性能的提高程度大^[21-22]; 尤其是当所使用的增强纤维是芳纶纤维时, 由于芳纶纤维压缩性能和其与树脂的结合性较差, 芳纶纤维增强复合材料难以在承受压缩载荷较大的场合使用, 作为拉杆主体时需要重点关注。另一方面, 绝缘拉杆为细长管型结构, 根据材料力学相关知识可知在其承受压缩载荷时, 可能会在应力达到材料的压缩强度前发生屈曲失稳, 导致其由稳定的直线形状的转变成为不稳定的曲线形状的平衡。这个状态下压力的微小增加或微小的侧向干扰力都将引起弯曲变形的显著增大^[23-24]。此类现象将引发绝缘拉杆材料内部机械损伤, 在电场长期作用下导致放电, 危害拉杆和断路器的安全运行及可靠操作。

为此, 文中开展了特高压GIS四断口断路器动态受力特性测试分析, 研究不同工况下绝缘拉杆的拉、压受力特性, 在此基础上进行了不同尺寸拉杆试样的压缩试验, 并结合有限元仿真分析, 研究其临界屈曲载荷与试样尺寸的关系。研究结果可为特高压GIS绝缘拉杆结构设计、材料选型、标准制定提供参考。

1 管型绝缘拉杆动态受力测试

1.1 试验方案

为研究在操作过程中绝缘拉杆承受冲击载荷的变化情况, 文中选取某工程应用型号特高压四断口断路器, 开展了不同工况下的分、合闸操作, 并通过力传感器记录受力曲线。断路器试验样机见

图2。试验时,罐内按实际运行情况充有SF₆气体以模拟实际运行工况。试验中,不同操作编号下的断路器运行工况见表1。试验共进行了9次完整分、合闸操作。



图2 特高压GIS四断口断路器测试样机

Fig. 2 UHV GIS quadruple-break circuit breaker used in the test

表1 试验方案与编号说明

Table 1 Test scheme and number description

操作编号	操作顺序	断路器运行工况
1	合一分	高电压/高油压
2、3、4	合一分	低电压/低油压
5、6、7、8、9	合一分	额定电压/额定油压

试验中采用9071A型力传感器对拉杆受力进行测量,装配时通过两边夹紧接头和中心配套的双头螺杆、导套通过两端接头夹紧并按要求施加预紧力,将校正确认后的9071A传感器与断路器主绝缘拉杆连接,再通过连接螺母锁紧固定一端。传感器装配在断路器本体主传动轴上,串联在本体和液压机构之前,直接测量断路器操作机构分、合闸过程中对主绝缘拉杆所施加的瞬态力,力传感器在特高压GIS断路器中的安装位置见图3、4。

1.2 绝缘拉杆动态受力测试结果

断路器操作机构存在3种典型工况,额定电压/油压、高电压/油压和低电压/油压,试验中测得3种工况下典型的操作机构对绝缘拉杆所施加的载荷曲线见图5、6,其中载荷为正值时代表压缩载荷,为负值时代表拉伸载荷。可以看出,合闸阶段拉杆所受载荷力会经历压力→拉力→压力的转变过程,分闸阶段拉杆载荷力会经历拉力→压力→拉力的转变过程,且分闸过程中操作机构对绝缘拉杆所施加载荷整体明显高于合闸过程。在操作机构额定电压、额定油压的工况与高电压、高油压的工况下测得的载荷曲线重合度高,而低电压、低油压的工况下的最大拉、压力略低于另外两种工况,说明低电压、低油压情况下操作机构对绝缘拉杆施加载荷整体小于另外两种工况,且载荷力曲线在时间轴上滞

后于另外两种工况。

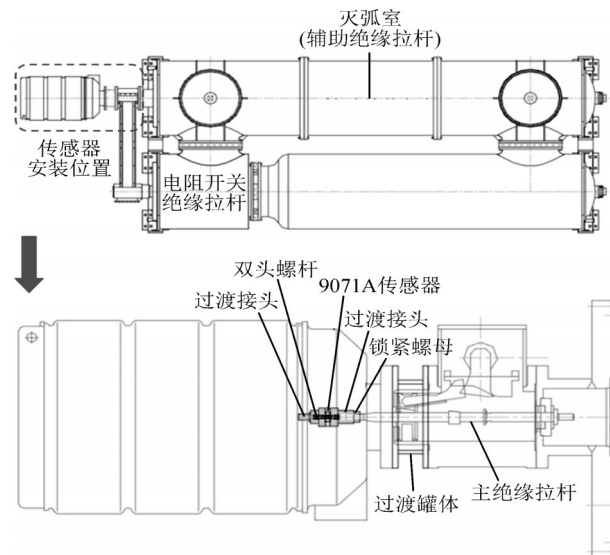


图3 力传感器在断路器中的位置

Fig. 3 The position of the force sensor in the circuit breaker

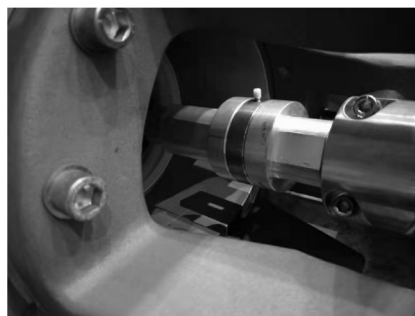


图4 力传感器现场安装形态

Fig. 4 Installation form of force sensor in testing field

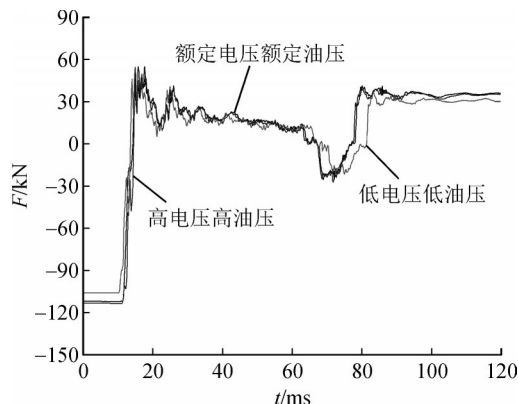


图5 不同工况下进行合闸过程中所测得载荷曲线对比

Fig. 5 Comparison of load curves measured during closing under different working conditions

对各次操作中所测得载荷峰值进行统计见图7、8,合闸过程3种工况最大压力基本相当,对于最大拉力而言,低油压/低电压工况明显低于另外两种工况。额定工况下,合闸压力峰值大约为55 kN,合闸拉力峰值大约为27 kN。分闸下高油压/高电压

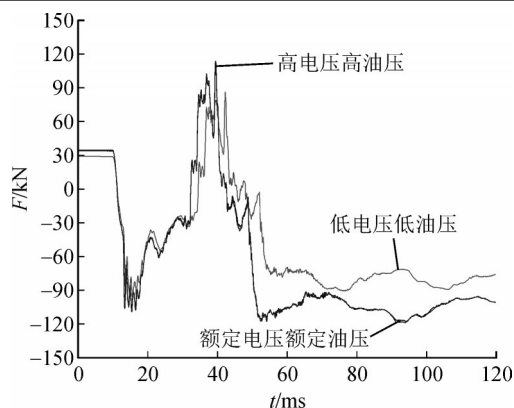


图6 不同工况下进行分闸所测得载荷曲线对比

Fig. 6 Comparison of load curves measured during opening under different working conditions

与额定油压/额定电压的最大拉、压应力基本相当,低油压/低电压工况最大拉、压应力明显低于另外两种工况。额定工况下,分闸压力峰值大约为113 kN,分闸拉力峰值大约为118 kN。

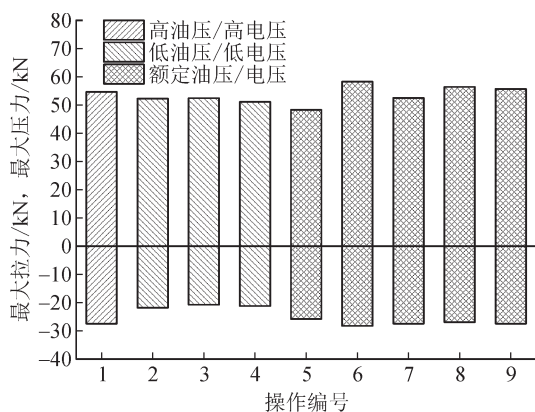


图7 各次合闸过程中测得拉、压力峰值

Fig. 7 Peak values of tensile and compressive load measured during each closing process

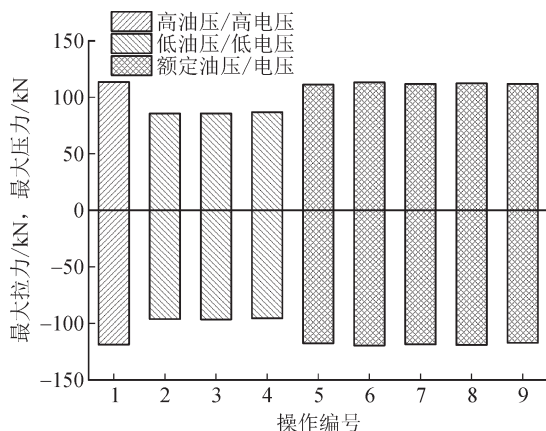


图8 各次分闸过程中测得拉、压力峰值

Fig. 8 Peak values of tensile and compressive load measured during each opening process

由基于实机操作的动态载荷测试可知,分闸过程中操作机构对绝缘拉杆所施加的最大压缩载荷只略小于拉伸载荷,而合闸过程中所测得压缩载荷

明显大于拉伸载荷。所以绝缘拉杆在操作过程中所受到的压缩载荷不可忽视,其材料的压缩性能尤其是压缩强度对于拉杆的安全可靠操作十分关键,拉杆材料的压缩特性应受到关注。且考虑到管型绝缘拉杆长而细的结构特点以及其所用纤维增强复合材料的特点,有必要对其开展进一步的压缩试验以研究其压缩性能,为绝缘拉杆的材料选用与性能评估、结构设计及故障分析提供依据。

2 绝缘拉杆试样压缩试验

为研究掌握特高压GIS用管型绝缘拉杆材料的压缩性能,文中从内外径差异明显的特高压GIS用芳纶/聚酯纤维增强管型绝缘拉杆上各截取3段作为轴向压缩试验的试样,根据尺寸特点试样可分为短粗管试样和长细管试样,各3支,具体尺寸见表2。试验中对分别对3支短粗管和长细管试样各进行一次压缩加载,试验过程中压缩载荷匀速增加,不同次试验所加载最大压缩力分别为60(或50)、70、90 kN,试验中测得压缩载荷—位移曲线见图9、10。

表2 不同芳纶/聚酯纤维增强管型拉杆试样尺寸

Table 2 Sample size of different aramid/polyester fiber reinforced tubular pull rods

试样编号	试样类型	高度H/mm	外径D/mm	壁厚t/mm
1	短粗管	77	92	8.5
2	长细管	110	46	8.0

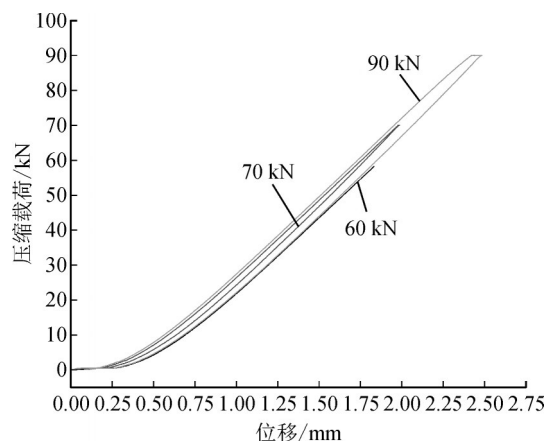


图9 试验中所测得短粗管试样载荷—位移曲线

Fig. 9 Load-displacement curve of short and thick tube sample measured in test

由上述试验结果可知,对长细管试样施加一定大小压缩载荷时其轴向上产生的位移与压缩载荷之间出现了明显的非线性关系,并且当压缩力卸载时,载荷—应变曲线并不与加载时的曲线重合,而

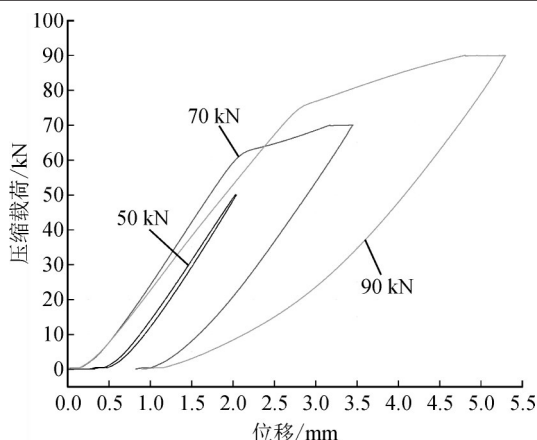


图10 试验中所测得长细管试样载荷—位移曲线

Fig. 10 Load-displacement curve of long and thin tube sample measured by compression test

是处于其下方,形成近似包络线。当压缩载荷完全卸载之后,试样仍有残余变形,说明试样在70 kN和90 kN的压缩力的作用下出现了塑性变形。而短粗管的压缩试验载荷—位移曲线则保持较好线性且载荷卸载过程所测得曲线与加载过程曲线重合度较好,表明3支短粗管在试验中都只发生了弹性变形,且形变量明显小于长细管试样。载荷—位移曲线包络面积代表着试样发生塑性形变所存储在材料内部的外界载荷所做的功,且由于塑性形变不可逆,这部分能量并不会由于外加载荷卸载而释放。并且根据计算可知长细管试样载荷—位移曲线发生出现非线性时对应的压缩载荷产生的压缩应力还未达到材料的屈服应力或压缩强度,说明造成试样明显塑性变形的原因可能是屈曲现象而不是材料的屈服或破坏。

上述试验结果说明对于管型绝缘拉杆而言,尺寸尤其是长度和内、外径将会直接影响其压缩性能。当绝缘拉杆的长径比变大时,其承受轴向压缩载荷时更容易发生塑性变形并发生屈曲失稳现象,所能承受的最大压缩载荷会减小。

3 绝缘拉杆试样线性屈曲仿真分析

由前文试验结果可知,细长绝缘拉杆的压缩性能受临界屈曲载荷的影响,而尺寸较长的绝缘拉杆不便于直接用来进行压缩试验,要通过工厂厂房里的拉伸/压缩试验机以及特制的压缩工装来施加压缩载荷,实验室条件下无法进行试验。并且金属件与绝缘管的粘接面可能会影响到试验结果,偶然性较大,无法测得绝缘管本身的屈曲性能。故需要研究用较小尺寸试样代替原尺寸拉杆进行临界屈曲载荷校核的检测方法。

由材料力学相关理论可得,对于采用各向同性材料制成的管状样品而言,其临界屈曲载荷可由式(1)计算

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(\mu l)^2} \quad (1)$$

式(1)中: μ 为长度因数,由管状杆件两端的约束条件决定; I 为横截面惯性矩,受杆件内、外径影响。当材料所受应力不超过其比例极限时可以运用以上公式计算各向同性材料所制成的管状杆件的临界屈曲载荷。但是目前尚无明确可用于计算各向异性材料所制成的杆件的临界屈曲载荷的公式,而绝缘拉杆的主要部分绝缘管所采用的纤维增强复合材料便是各项异性材料。文中通过有限元仿真进行线性屈曲分析,计算得到不同尺寸管形绝缘拉杆的临界屈曲载荷,在一系列计算结果的基础上建立临界屈曲载荷与尺寸参数的近似公式。

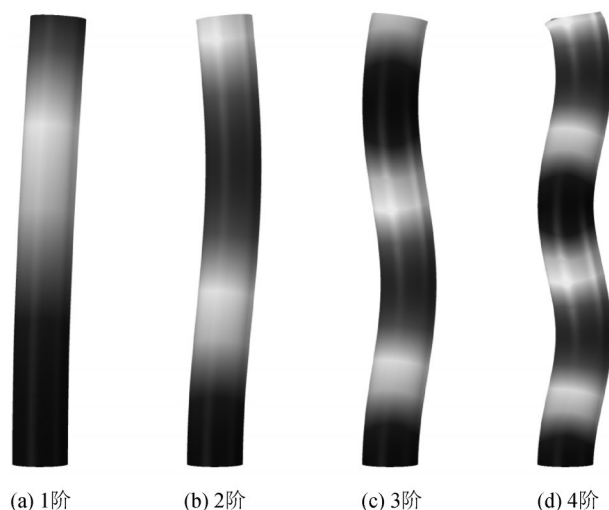
建立管型绝缘拉杆的有限元计算模型,初始长度为400 mm,内径 d 为36 mm,外径 D 为50 mm。由于管型绝缘拉杆材料非主方向上的杨氏模量以及各个方向上的剪切模量测试难度较大,文中在进行仿真计算过程中,材料主方向模量采用已测得的主方向模量,其他方向上的模量以及剪切模量均采用纤维增强环氧树脂复合材料的典型参数,仿真中所使用的具体材料参数见表3,其中 X 方向为材料的主方向,即增强纤维铺设的方向。根据对绝缘拉杆试样进行轴向压缩试验时的条件,仿真中对模型一端施加固定约束,另一端施加轴向压缩力。可计算得到该尺寸绝缘拉杆的多阶屈曲模态及对应的临界屈曲载荷,结果见图11、表4,在工程实际中只需考虑第1阶屈曲模态。

表3 仿真中所用材料在各个方向上的力学参数

Table 3 The mechanical parameters of the materials used in the simulation in all directions

杨氏模量/MPa			泊松比			剪切模量/MPa		
X	Y	Z	XY	YZ	XZ	XY	YZ	XZ
10 390	6 000	6 000	0.31	0.40	0.30	5 000	3 846	5 000

在材料详细各个方向模量以及泊松比等力学性能参数明确的条件下,可以采用有限元仿真计算进行临界屈曲载荷的计算校核。但在实际工程应用中,由于不同运用场景需求存在差异,不同材料制成的不同内外径、不同长度的管型绝缘拉杆被广泛使用,而绝缘拉杆管型空心的结构特点致使从成品中合理取样进行材料各个方向上模量和泊松比的测试较为困难,尤其是对于内外径相差较小也就是壁厚较小的绝缘拉杆。所以在工程中材料参数



(a) 1阶 (b) 2阶 (c) 3阶 (d) 4阶

图11 仿真所得前4阶屈曲模态

Fig. 11 The first four buckling modes are obtained by simulation

表4 仿真所得各阶屈曲模态所对应临界屈曲载荷

Table 4 Critical buckling load corresponding to each buckling mode obtained by simulation

屈曲模态阶数	临界屈曲载荷/kN
1	23.62
2	191.63
3	447.09
4	708.67

测试结合有限元线性屈曲分析的方法对绝缘拉杆临界屈曲载荷的校核并不适用。

文中提出通过有限元线性屈曲分析结合小尺寸试样的临界屈曲载荷试验的方式对原尺寸绝缘拉杆屈曲性能进行校核的方法。在有限元仿真软件中通过参数扫描的方式,在材料参数保持不变的情况下,计算不同内径、外径以及长度的绝缘管的临界屈曲载荷。采用表3中材料参数情况下,外径保持为50 mm不变而内径不同时临界屈曲载荷 F_{cr} 随长度 L 的变化曲线见图12,对该组曲线进行拟合发现两个物理量之间满足幂函数关系 $F_{cr}=a \cdot L^b$ 且随内径变化 b 在-1.84~-1.80之间变化,而改变材料主方向上的模量对最终拟合结果中的 b 几乎没有影响,且根据材料力学可知当基体树脂相同而增强纤维不同时不同纤维增强复合材料模量差异主要体现在主方向上。对比式(1)可推论拟合式中参数 b 取决于绝缘管内外径,参数 a 则跟材料模量相关。

为了计算得到长拉杆的临界屈曲载荷,应先进进行小尺寸试样的压缩试验并通过校核试样发生破坏时的压缩应力确保小尺寸试样的压缩破坏是由屈曲失稳造成的。参考前文中试样的压缩试验中的试样长度,应从长拉杆上截取 $L=100\sim 150$ mm的

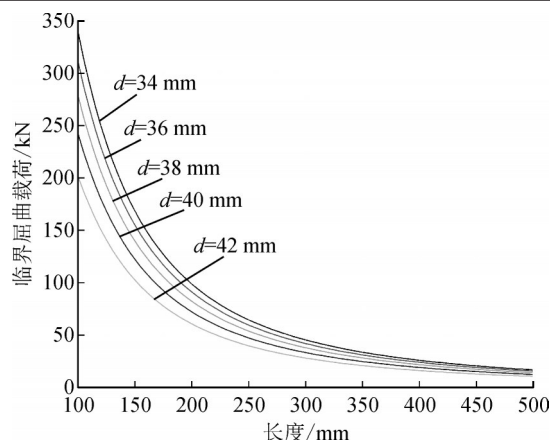


图12 内径不同时临界屈曲载荷—长度曲线

Fig. 12 Critical buckling load-length curves for different inner diameters

多段作为试样,试样两端面应相互平行并垂直于轴向。对该试样进行压缩试验得到其临界屈曲载荷 F_{cr}' 。按照该试样的内外径进行建模并进行线性屈曲分析计算出不同长度时临界屈曲载荷的大小,并拟合得到该内外径情况下的幂函数指数 b 。将 F_{cr}' 、 L 和 b 代入到幂函数关系式中便可求得由材料参数决定的系数 a 。由此便建立起在临界屈曲载荷与长度的拟合关系式,从而求得原尺寸绝缘拉杆的临界屈曲载荷。

结合特高压GIS断路器用管型绝缘拉杆临界屈曲载荷计算及其动态受力特性的试验结果,可以为管型绝缘拉杆压缩特性实验提供参考,指导GIS用管型绝缘拉杆的设计、制造。

4 结论

文中开展了特高压四断口断路器动态受力测试分析,得到了不同工况下特高压GIS绝缘拉杆的受力特性,分析了不同尺寸绝缘拉杆轴向压缩性能,仿真得到了尺寸对拉杆材料临界屈曲载荷的影响规律。主要结论如下:

1)特高压GIS用绝缘拉杆在合、分闸操作过程中受到交变拉伸—压缩冲击载荷的作用,绝缘拉杆在高油压/高电压和额定油压/额定电压工况下受力基本相同,载荷幅值整体高于低油压/低电压工况。

2)分闸过程中绝缘拉杆所受拉伸、压缩载荷明显高于合闸过程,操作过程中绝缘拉杆所受最大拉伸载荷大约为118 kN,压缩载荷大约为113 kN,均出现在分闸阶段。

3)绝缘拉杆试样的长径比会影响其压缩性能,相较于短粗杆试样,长细杆试样会在相对更小的轴向压缩载荷作用下产生塑性形变,在材料中产生损伤。

4)在材料参数和内外径不变的情况下,各向异性材料制成的管状空心绝缘拉杆的临界屈曲载荷与其长度近似呈幂函数关系,且幂指数主要与其内外径相关。通过测试从原尺寸绝缘拉杆截取的一段试样的临界屈曲载荷并代入拟合关系式中进行计算可以得到原尺寸绝缘拉杆的临界屈曲载荷,对于管型绝缘拉杆的设计制造有指导意义。

致谢

文中作者感谢西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室,感谢新东北电气集团高压开关有限公司提供的试验条件,感谢姜文、徐文佳对文中试验的协助。

参考文献:

- [1] 邱毓昌. GIS装置及其绝缘技术[M]. 北京:水利电力出版社,1994:18-22.
QIU Yuchang. GIS device and its insulation technology[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1994: 18-22.
- [2] HUANG Daochun, SHU Yinbiao, RUAN Jiangjun, et al. Ultra high voltage transmission in China: Developments, current status and future prospects[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(3): 555-583.
- [3] 董飞飞, 俞登科. 我国电网技术的回顾与展望[J]. 智慧电力, 2018, 46(4): 6-10.
DONG Feifei, YU Dengke. Retrospect and prospect of China power grid technology[J]. Smart Power, 2018, 46(4): 6-10.
- [4] 陈飞. GIS设备的发展和应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
CHEN Fei. Investigation of GIS development and application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [5] 谭东现, 王志川, 毛文奇. 不同标准体系下空气绝缘金属封闭开关设备环境适应性的要求与绝缘性能评估[J]. 高压电器, 2020, 56(10): 1-6.
TAN Dongxian, WANG Zhichuan, MAO Wenqi. Environmental adaptability requirements and insulation performance evaluation of air-insulated metal enclosed switchgear in different standard systems[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10): 1-6.
- [6] 王赞, 郑理威, 陈忠贤, 等. 基于光纤EFPI传感器的GIS局部放电研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(2): 67-75.
WANG Zan, ZHENG Liwei, CHEN Zhongxian, et al. Research on partial discharge of GIS based on optical fiber EFPI sensor[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(2): 67-75.
- [7] 陈允, 张鹏飞, 崔博源, 等. 特高压GIS断路器用绝缘拉杆应用现状[J]. 高电压技术, 2019, 45(9): 2699-2706.
CHEN Yun, ZHANG Pengfei, CUI Boyuan, et al. Application status of insulation pull rod for 1 100 kV GIS circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2699-2706.
- [8] 葛栋, 田阳, 田洪迅, 等. 500 kV GIS隔离开关绝缘击穿典型故障分析[J]. 高压电器, 2020, 56(8): 261-267.
GE Dong, TIAN Yang, TIAN Hongxun, et al. Analysis of typical fault caused by insulation breakdown of 500 kV GIS disconnector[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8): 261-267.
- [9] 邓建青, 白晓萍, 邱吉庆, 等. GIS隔离开关用绝缘拉杆的放电研究分析及防范措施[J]. 高压电器, 2019, 55(10): 247-252.
DENG Jianqing, BAI Xiaoping, QIU Jiqing, et al. Analysis and prevention measures of discharge research of insulated pull rod in GIS disconnector[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(10): 247-252.
- [10] 杨为, 朱太云, 赵恒阳, 等. GIS隔离开关气室电场模拟与绝缘故障分析[J]. 高压电器, 2020, 56(8): 205-210.
YANG Wei, ZHU Taiyun, ZHAO Hengyang, et al. Electric field simulation and insulation failure analysis of GIS disconnector gas chamber[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8): 205-210.
- [11] 李建鹏, 胡伟涛, 刘海锋, 等. 两起芳纶纤维增强型绝缘拉杆典型放电故障的联合分析[J]. 电瓷避雷器, 2020(6): 235-240.
LI Jianpeng, HU Weitao, LIU Haifeng, et al. Joint analysis of two typical discharge faults of aramid fiber reinforced insulating pull rods[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(6): 235-240.
- [12] 邓建青, 刘宝林, 孙会峰. 一起SF₆断路器用绝缘拉杆的放电故障浅析[J]. 电瓷避雷器, 2020(3): 243-248.
DENG Jianqing, LIU Baolin, SUN Huifeng. Analysis on a flashover fault of insulated pull rod for SF₆ circuit breaker[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(3): 243-248.
- [13] 陈宇民, 赵现平, 彭晶, 等. 一起销轴缺陷引起断路器合闸不到位故障分析[J]. 高压电器, 2019, 55(6): 247-252.
CHEN Yumin, ZHAO Xianping, PENG Jing, et al. Analysis of a circuit breaker inadequate closing failure due to pin defect[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(6): 247-252.
- [14] 吴旭涛, 赵晋飞, 马云龙, 等. 基于多频激励下振动响应的GIS机械缺陷诊断方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(4): 108-115.
WU Xutao, ZHAO Jinfei, MA Yunlong, et al. Mechanical defect diagnosis technology of GIS based on vibration response under multiple frequency excitation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(4): 108-115.
- [15] 马虎涛, 黄章强. LW6-220型断路器绝缘拉杆脱落故障分

- 析[J]. 高压电器, 2014, 50(11): 128-132.
- MA Hutao, HUANG Zhangqiang. Falling-off failure analysis on insulation lever of LW6 - 220 circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(11): 128-132.
- [16] 张益舟, 程佳路, 汪 亮, 等. 两端接地断路器分、合闸时间测试方法研究[J]. 高压电器, 2019, 55(10): 59-64.
- ZHANG Yizhou, CHENG Jialu, WANG Liang, et al. Research of timing testing method on circuit breakers with both sides grounded[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(10): 59-64.
- [17] 刘建寅. SF₆高压断路器机械特性测试及其状态评价[J]. 高压电器, 2020, 56(6): 173-180.
- LIU Jianyin. Mechanical characteristic testing and status evaluation of SF₆ high - voltage circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6): 173-180.
- [18] 刘 超, 赵伟涛, 张 强, 等. 真空断路器弹簧操动机构机械特性的仿真与优化[J]. 高压电器, 2019, 55(8): 65-71.
- LIU Chao, ZHAO Weitao, ZHANG Qiang, et al. Simulation and optimization for mechanical characteristics of spring operating mechanism in vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(8): 65-71.
- [19] 张红军, 王文文, 张 强. 断路器绝缘拉杆的动力学仿真分析与试验研究[J]. 高压电器, 2012, 48(10): 83-87.
- ZHANG Hongjun, WANG Wenwen, ZHANG Qiang. Dynamics simulation analysis and experimental study of circuit-breaker's insulation pull rod[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(10): 83-87.
- [20] 刘 煜, 韩国辉, 雷 琴, 等. 操动机构缓冲对断路器传动系统的影响分析[J]. 高压电器, 2020, 56(1): 43-47.
- LIU Yu, HAN Guohui, LEI Qin, et al. Influence analysis of buffering performance of operating mechanism on the transmission system of circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 43-47.
- [21] KUMAR M S S, SELVAN C P, SAMPATH P S, et al. Enhanced mechanical properties of glass fiber/epoxy composites using nanoclay[C]//2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET). Dubai: [s.n.], 2019: 1-9.
- [22] KONGKAEW P, CHOAWANKLANG W. Fiber orientation effecting the mechanical properties at coconut fiber reinforce epoxy resin composite[C]//2015 International Conference on Science and Technology (TICST). Thailand: IEEE, 2015: 523-527.
- [23] 刘鸿文, 吕荣坤. 材料力学实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992: 304-309.
- LIU Hongwen, LYU Rongkun. Mechanics of materials[M]. Beijing: Higher Education Press, 1992: 304-309.
- [24] ZHANG Dongliang, WANG Binwu, LIU Fei. Analysis about the slender rod of buckling response[C]//2012 Second International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application. China: IEEE, 2012: 114-116.

刘 鹏(1979—), 男, 博士, 教授, 主要从事高端交/直流套管关键技术、特高压 GIL/GIS 关键技术、电力设备绝缘结构优化设计及多物理场仿真方面的研究工作 (E-mail: pengliu@mail.xjtu.edu.cn)。

胡睿智(1997—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电工材料性能检测和设备绝缘特性分析 (E-mail: 195754809@qq.com)。

(上接第 100 页)

- [26] 刘 波, 陈轩恕, 兰贞波, 等. 基于紧耦合分裂电抗器的冲击发电机保护断路器成套装置动稳定分析及试验研究[J]. 高压电器, 2019, 55(12): 23-31.
- LIU Bo, CHEN Xuanshu, LAN Zhenbo, et al. Analysis and experiment study on dynamic stability of setup for impulse generator protection circuit breaker based on tight coupling split reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(12): 23-31.
- [27] 庄稼人, 张 玲, 郑占锋. 高压断路器合成试验时工频恢复电压的规定和产生[J]. 高压电器, 2021, 57(7): 12-17.
- ZHUANG Jiaren, ZHANG Ling, ZHENG Zhanfeng. Specification and generation of power frequency recovery voltage for synthetic test of HV circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(7): 12-17.
- [28] 杨 为, 高享想, 朱太云, 等. 基于电流零点直流分量的中压断路器 T100a 试验 TRV 参数计算[J]. 高压电器, 2018, 54(8): 104-108.
- YANG Wei, GAO Xiangxiang, ZHU Taiyun, et al. Calculation of TRV parameters of T100a test for medium voltage circuit - breakers based on the DC component at current zero[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(8): 104-108.
- 白玉卓(1991—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电气工程设计 (E-mail: 719908044@qq.com)。