

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.03.007

# 高低温下复合绝缘子抗拉性能试验

马文俊<sup>1</sup>, 晏致涛<sup>2</sup>, 张 璞<sup>1</sup>, 裘 哲<sup>1</sup>, 游 溢<sup>3</sup>

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆科技学院 建筑工程学院, 重庆 401331;  
3. 国网新疆电力公司 电力科学研究院, 乌鲁木齐 830011)

**摘要:**复合绝缘子是由芯体和装配有金属附件的外套构成。芯体多采用环氧树脂浸渍的玻璃纤维增强塑料制成,是一种强度高、非脆性复合材料。但在芯棒与伞套之间的粘结层是薄弱环节,在大温差地区容易受力学破坏。文中采用 Instron1186 电子万能试验机,通过位移控制进行材料力学性能试验,研究复合绝缘子分别在高低温作用下的抗拉性能。试验表明,复合绝缘子机械破坏负荷取决于金具与芯棒连接强度,其破坏的主要特征为端部金具的滑移。因为端部金具的热膨胀系数与玻璃纤维增强环氧树脂芯棒有较大差异,无论是在高温还是低温,复合绝缘子的力学性能均较常温状态产生下滑,尤其是高温下,金具与芯棒的黏结-滑移性能会降低 50% 甚至更多。

**关键词:**复合绝缘子;高低温;连接;抗拉性能

中图分类号:TU311

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2020)03-062-08

## Tests of tensile properties of composite insulators at high and low temperatures

MA Wenjun<sup>1</sup>, YAN Zhitao<sup>2</sup>, ZHANG Pu<sup>1</sup>, QIU Zhe<sup>1</sup>, YOU Yi<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. School of Architecture and Engineering, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331, P. R. China;  
3. Institute of Electrical Science, State Grid Xinjiang Electric Power Corporation, Urumchi 830011, P. R. China)

**Abstract:** Composite insulators are composed of a core and a coat with metal attachments. The core is made of glass fiber reinforced plastics impregnated with an epoxy resin. This material is a kind of high strength and non-brittle composite. But the interface in an adhesive layer between a mandrel and an umbrella is the weak link, which is susceptible to mechanical damage in the areas with significant changing temperatures. The Instron1186 electronic universal testing machine is adopted to carry out the material mechanical property tests through controlling displacements, and the tensile properties of composite insulators under high and low temperatures are studied. The test shows that the mechanical failure load of composite insulators depends on the connection strength of the metal tool and the mandrel, and the main features of the failure are the slip of the end of the metal tool. Because the thermal expansion coefficient of

收稿日期:2019-10-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778097);重庆市自然科学基金资助(cstc2017jcyjB0210, cstc2018jcsx-msybX0284)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51778097); and by Chongqing Natural Science Foundation (cstc2017jcyjB0210, cstc2018jcsx msybX0284).

作者简介:马文俊(1994—),男,硕士研究生,主要从事输电线路风工程研究,(E-mail)34788750@qq.com。

通讯作者:晏致涛,男,博士,教授,主要从事结构风工程研究,(E-mail)yanzhitao@cqu.edu.cn。

the end fittings is significantly different from that of glass fiber reinforced epoxy mandrel, the mechanical properties of composite insulators are lower than normal temperature at high temperatures or low temperatures. Especially at a high temperature, the bonding-slip property of the metal tool and the core rod is greatly reduced.

**Keywords:** composite insulators; high and low temperatures; connections; tensile properties

复合绝缘子由各单个伞裙安装在芯体上构成。复合绝缘子结构主要特点是将机械强度与外绝缘性能分开。伞裙护套承担电气负荷,芯体由玻璃纤维作增强材料、环氧树脂作基体的玻璃钢复合材料制成,用来保证绝缘子的机械特性,充分发挥芯棒材料拉伸机械强度高和伞裙护套材料耐老化的优点。

国内外学者对复合绝缘子的力学性能做了研究,Paris等<sup>[1]</sup>研究了复合绝缘子玻璃纤维芯棒在持续荷载作用下的力学性能。Kumosa等<sup>[2]</sup>对受到轴向力作用,与金具为压接式连接的复合绝缘子芯棒进行了力学性能研究,对不合理的压接方法进行讨论。Tourreil等<sup>[3]</sup>对3种不同设计的高压复合绝缘子在长时间断裂失效情况做了对比分析,以设计出在长期荷载下每日负荷增长最小的复合绝缘子。丁京玲等<sup>[4]</sup>对±800 kV直流棒形悬式复合绝缘子的各个组成部分进行了设计,提出应采用低碱玻璃纤维制成的芯棒。张树华等<sup>[5]</sup>通过对复合绝缘子配玻璃纤维网格布探究绝缘子的拉伸力学性能,表明复合绝缘子拉伸力学性能随着纤维含量增加而增大。欧阳民康<sup>[6]</sup>对高电压悬式合成绝缘子芯棒考虑大气曝晒、水浸、温度等因素对绝缘子玻璃棒力学性质影响的情况做了张拉实验。武怀永<sup>[7]</sup>提出复合绝缘子的实际强度并不是取决于芯棒的机械强度,而是绝缘子端部连接件的机械强度。袁骏<sup>[8]</sup>对特高压复合绝缘子的机械性能做了实验数据对比,提出1 000 kV的复合绝缘子应采用压接式结构来满足机械性能要求。余涛等<sup>[9]</sup>对复合绝缘子接头处破坏进行了研究,提出了金具滑脱是绝缘子破坏的主要形式。谢占山<sup>[10]</sup>对500 kV的V串复合绝缘子进行机械疲劳试验。在试验中,对复合绝缘子疲劳损伤部位进行微观和宏观的对比分析,发现疲劳损伤首先是由芯棒与金具接触外表面开始,金具与芯棒连接过渡区为复合绝缘子发生疲劳断裂地方。

虽然复合绝缘子的玻璃纤维在机械荷载下承担所有负荷,但绝缘子的破坏形式主要是芯棒与金具的滑移破坏,尽管国内外对复合绝缘子做了诸多力学性能研究<sup>[11-16]</sup>,但对绝缘子在高低温环境下的拉伸滑移性能研究较少。研究采用原厂工艺生产的绝缘子模型,在高温、常温、低温3种环境下,对复合绝缘子机械拉伸性能进行研究,以探究绝缘子在不同环境下发生破坏的形态,为绝缘子制造和选型提供理论支持。

## 1 复合绝缘子破坏力学分析

压接结构虽然在国外复合绝缘子上已经普遍使用,经过十多年发展,同轴多向压接式已成为端部金具连接的主流形式,如图1(a)所示。压接式需要把金具设计成带有圆筒柱状内腔结构,这样可把芯棒插入圆筒内腔,再利用压接机器沿金具径向施加一定的预压力,通过金具塑性变形达到与芯棒粘结紧密,来抵抗机械拉伸负荷。与楔接式不同,压接式是非自锁结构,必须依靠足够的预压力使金具塑性变形来抵抗滑移。绝缘子受到拉伸荷载时,外荷载将由芯棒与金具接触表面形成的静摩擦力和轴向剪切力共同平衡承受,保障复合绝缘子的拉伸强度。复合绝缘子连接强度主要由接触面上静摩擦力决定,而静摩擦力与接触面上摩擦系数、预压力大小以及压接区长度等力学参数相关,芯棒端部受力如图1(b)所示。

设压缩负荷释放后,端部金具中的残余应变在界面处产生的法向(径向)接触压力为 $F_n$ ,金具与芯棒接触面的静摩擦系数为 $f_u$ ,则由预压力产生的静摩擦力为 $f_u F_n$ 。当复合绝缘子受到纵向拉力 $F_0$ 时,此时通过静力平衡有: $F_0 = f_u F_n$ ,设芯棒的原始半径为 $R$ ,金具与芯棒压接部分纵向长为 $l$ ,则给芯棒施加的径向压缩应力 $\sigma_r$ 为: $\sigma_r = F_n / (2\pi Rl)$ ;芯棒受到 $z$ 轴方向轴向应力 $\sigma$ 为: $\sigma = F_0 / (2\pi Rl)$ 。



图 1 压接式结构实物图与简图

Fig. 1 Physical drawings and sketches of crimping structure

另一方面,假定芯棒由均质材料构成,只考虑其压缩弹性变形阶段来求解压缩应力  $\sigma_r$ :

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_r}{E_r} - \mu \frac{\sigma_\varphi}{E_\varphi}; \varepsilon_\varphi = \frac{\sigma_\varphi}{E_\varphi} - \mu \frac{\sigma_r}{E_r},$$

得到

$$\sigma_r = \frac{E_r}{1 - \mu^2} (\varepsilon_r + \mu \varepsilon_\varphi). \quad (1)$$

同时,设芯棒受到径向压缩弹性变形为  $\Delta$ ,则有  $\varepsilon_r = \Delta/R$ ;  $\varepsilon_\varphi = \Delta/R$  代入上式可得

$$\sigma_r = \frac{E_r}{R(1 - \mu)} \Delta = \frac{F_n}{2\pi Rl}, \quad (2)$$

$$\Delta = \frac{F_n(1 - \mu)}{2\pi l E_r} = \frac{F_0(1 - \mu)}{2\pi l E_r f_u}. \quad (3)$$

从而整个芯棒端部压缩量  $u = 2\Delta$ 。

根据上海同春机电技术有限公司生产绝缘子压接机的技术标准规定,对于额定机械负荷 70 kN 长棒形芯棒生产试样,如图 2 所示,其提供的压接模具长度  $L = 35$  mm、 $R = 12$  mm、 $\mu = 0.3$ 、 $E_r = 4\ 300$  MPa、 $f_u = 0.7$ (考虑 E 类玻璃纤维环氧树脂棒中玻纤体积含量约为 0.62)、假定拉伸负荷 70 kN。通过上式可以算出:  $\Delta = 0.074\ 0$  mm,  $\sigma_r = 37.894$  MPa,  $\sigma = 26.526$  MPa。

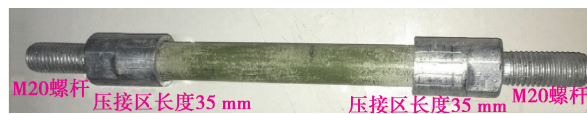


图 2 复合绝缘子芯棒拉伸试样实物图

Fig. 2 Picture of composite insulator rod specimen

通过常温下力学分析可知,当复合绝缘子受到 70 kN 拉伸荷载时,压接结构必须保证端部芯棒压缩量  $u$  为 0.148 mm,而此时芯棒仅承受 26.526 MPa 轴向拉伸应力,远低于玻璃纤维增强环氧树脂芯棒材料本身拉伸破坏强度 1 000 MPa。这也表明复合绝缘子机械破坏负荷取决于金具与芯棒连接强度,其破坏的主要特征为端部金具的滑移。因为端部金具的热膨胀系数与玻璃纤维增强环氧树脂芯棒有较大差异,在高低温环境下,两者的配合效果需要试验进行进一步证明。

## 2 试验简介

### 2.1 试验仪器

试验选在哈尔滨工业大学力学性能试验室进行,采用 Instron1186 电子万能试验机,通过位移控制试验,

最大载荷可达±200 kN、横梁速度范围可达0.002~500 mm/min、载荷精度±0.5%。有专门与万能试验机搭配用于高低温试验的环境箱,温度范围控制在-150~500℃。

## 2.2 试验材料

受到环境箱尺寸和最大拉伸载荷的限制,选取FXBW-220/70复合绝缘子芯棒作为拉伸试样,如图2所示,其总长为 $32\pm 0.5$  cm,该模型由厂家直接提供。由于研究重点在芯棒与金具之间接触滑移,所以选取常规电压220 kV输电线路复合绝缘子芯棒,直径为常用24 mm,压接区长度35 mm。

## 2.3 试验过程

复合绝缘子拉伸力学性能随温度变化试验,按照温度从低到高依次进行测试,具体高低温试验按以下步骤进行:

1)先进行低温环境下复合绝缘子拉伸力学性能试验,将环境箱安置于指定位置,与万能试验机进行有效搭接组合。提前把液氮储存罐与环境箱通过传输波纹管连接好,检查各接口密闭性,防止液氮传送过程中大量泄漏。

2)在环境箱里,将试样通过两端M20螺杆安装拧紧于试验机上下拉伸螺纹夹具之间。调整试验机横梁位置,插上插销,将拉伸螺纹夹具与万能试验机力学传感器固定死,最后合上环境箱阀门。

3)启动万能试验机的计算机控制程序,输入试样参数,设置加载方法。试验按照位移加载模式加载,起始阶段按照0.5 mm/min加载,曲线上升到平稳阶段后,为节约时间,逐渐升到1 mm/min加载。

4)开启液氮储存罐阀门,给环境箱注入液氮,阀门开关不可拧得过松,防止液氮泄漏。给温度控制系统设定指定温度,试验低温值为-50℃、-40℃、-30℃,每个温度点做3次拉伸试验,先降温到-30℃,待温度达到指定温度后,不可急于开始试验,先对试样进行30~40 min的保温处理。

5)保温处理后,启动计算机程序控制开关,万能试验机开始工作,计算机开始实时记录荷载-位移数据,显示荷载-位移曲线。待曲线上升到平稳阶段,为加快试验进度,逐渐将加载速率修改到1 mm/min。

6)加载直至金具与芯棒完全拉脱,控制计算机程序停止加载,打开环境箱大门,此时温度控制系统会自动停止液氮注入,然后快速取下试件,换上新试件,以此循环。

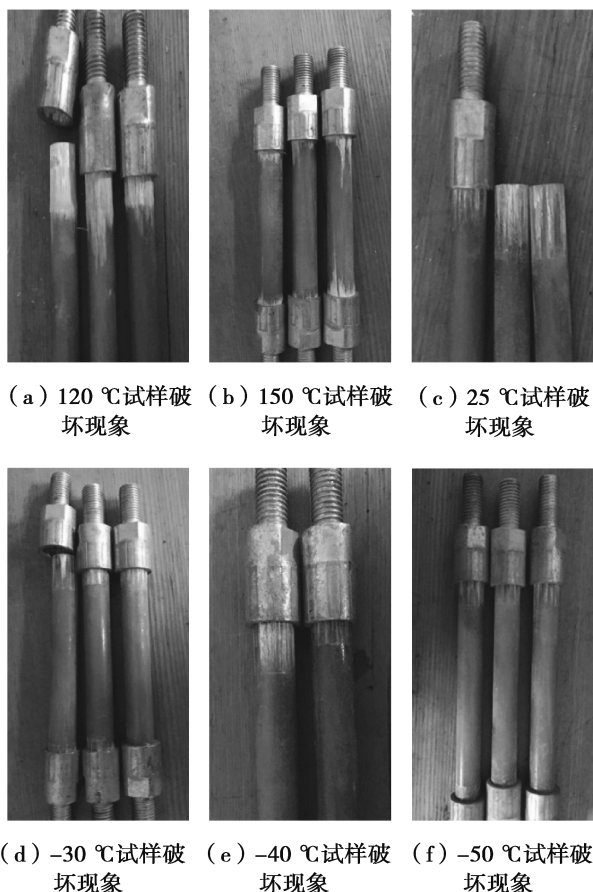
7)低温试验结束后,撤走液氮储存罐,开始准备进行高温试验,先进行常温25℃拉伸试验。试验高温值为120℃、150℃,同样每组温度值做3次拉伸测试,环境箱可直接对内部空气进行加热,试验更加方便,步骤与低温试验完全相同。

## 3 芯棒拉伸试验现象及分析

复合绝缘子芯棒拉伸力学性能实质上可以归结为端部压接金具与复合绝缘子芯棒的拉伸滑移过程,拉伸滑移全过程一般可分成3个阶段:荷载上升段、荷载达到第一个峰值后的继续增大强化阶段以及最后的拉脱荷载下降段。

从试验后拉伸破坏现象(见图3)可以看出:当温度达到120℃时,金具与压接区芯棒表面的滑移摩擦会造成该部位芯棒受损较严重,大大减弱了金具与芯棒的压接效果;继续升高温度达到150℃时,在拉伸过程中发现,不仅压接区芯棒表皮环氧树脂类材料受损严重,破坏范围甚至已经波及到非压接区域,造成整根芯棒受损。说明高温对芯棒表面的环氧树脂类材料有明显的软化作用,会造成芯棒机械性能下降。相比之下:常温25℃和低温-30℃、-40℃、-50℃,各3组试样在试验过程中压接区芯棒表面都没出现过度受损,只是金具在拉脱过程中对芯棒造成正常的摩擦滑移受损。





(a) 120 °C 试样破坏现象 (b) 150 °C 试样破坏现象 (c) 25 °C 试样破坏现象

(d) -30 °C 试样破坏现象 (e) -40 °C 试样破坏现象 (f) -50 °C 试样破坏现象

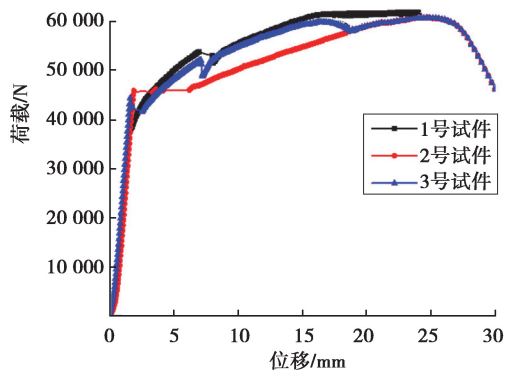
图 3 不同温度下试样端口破坏实物图

Fig. 3 Picture of the sample end failure at different temperature

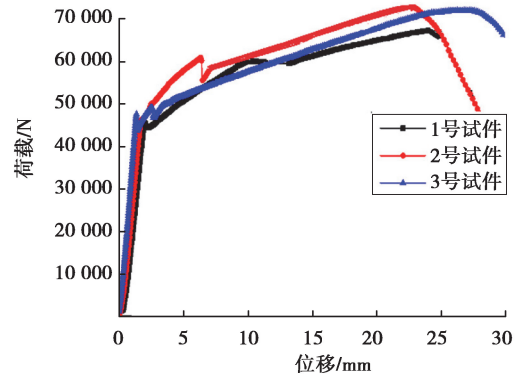
#### 4 芯棒拉伸试验结果及分析

试验测试出各个温度下,复合绝缘子端部金具与芯棒之间的黏结滑移曲线,如图 4 所示。由于试验中可能出现材料受力不均匀,材料制作工艺差异,试验时的人为误差,导致试验结果出现较大误差,故每组实验工况都采用了 2~3 个同种试件进行实验,编号为 1~3 号试件。图 4 表明,不同温度下的金具与芯棒滑移性能各有不同,在 25 °C 常温状态下,试件屈服荷载约为 50 kN,并在荷载达到 72 kN 左右时被拉脱破坏;低温状态下,在 -30 °C 和 -50 °C 时,试件的屈服荷载约为 45 kN,相比常温状态下降低了 10%,并在荷载达到 60 kN 左右时,金具与芯棒被拉脱破坏;而在 -40 °C 时,切线模量相比 -30 °C 和 -50 °C 有明显的增大,滑脱破坏荷载也相比 -30 °C 和 -50 °C 略大,达到了 66 kN;而在高温状态下,可以明显地看出,切线模量近乎为 0,即试件的屈服极限荷载相当于滑脱破坏荷载,随着温度升高,屈服极限荷载明显减小,如图 4(f) 所示,在 150 °C 时,屈服极限荷载仅为 31 kN 左右,明显小于试件在 120 °C 和常温下的屈服极限荷载值;由此可见,高低温都会导致金具和芯棒的粘结强度减小,高温的影响相比于低温更加显著。

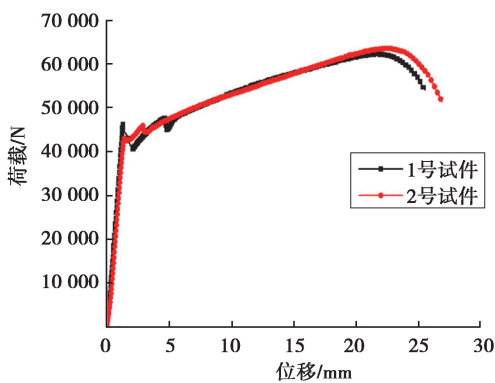
各相应拐点对应荷载位移值如图 5 和图 6 所示。可以看出,高温对滑移强化段荷载峰值影响较大,当温度达到 120 °C 时,滑移强化段荷载峰值为额定破坏荷载值的 61.21%;当温度升高到 150 °C 时,荷载滑移曲线没有强化段,金具拉脱荷载值变为滑移上升段荷载峰值,此时对应最大荷载值仅为额定破坏荷载值的 44.94%,从破坏现象可以清楚看到,高温对芯棒表面环氧树脂有极强溶解作用,在滑移过程中芯棒表面受损严重,造成金具拉脱力大大降低。当温度降为 -30 °C 时,对应最大荷载峰值为额定破坏荷载值的 90.25%,说明复合绝缘子强度略有降低。当温度为 -40 °C 时,滑移强化段荷载峰值相比 -30 °C 还略有升高,为额定破



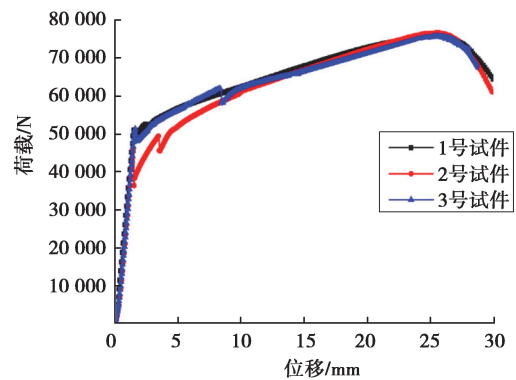
(a) -50 °C 下黏结-滑移曲线



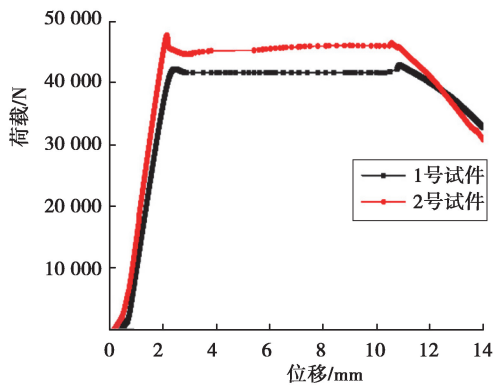
(b) -40 °C 下黏结-滑移曲线



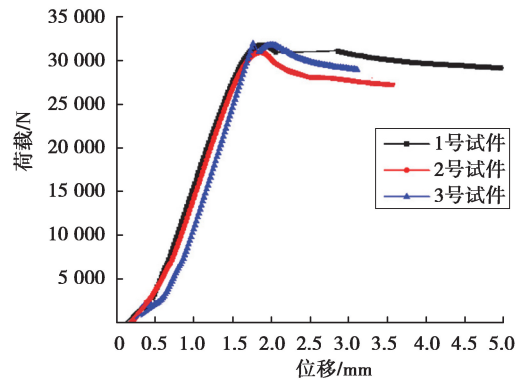
(c) -30 °C 下黏结-滑移曲线



(d) 常温25 °C 下黏结-滑移曲线



(e) 120 °C 下黏结-滑移曲线



(f) 150 °C 下黏结-滑移曲线

图 4 不同温度下复合绝缘子拉伸黏结-滑移曲线图

Fig. 4 The bond-slip curve of the end-fittings at different temperature

坏负荷值的 93.15%，因为温度的稍微降低，引起金具的热胀冷缩，增强了压接作用，引起粘结强度略微增大。当温度降到-50 °C，对应最大荷载峰值降到额定破坏负荷值的 86.91%，表明温度过低，会降低金具对芯棒的压接效果。因为芯棒是由环氧树脂包裹的玻璃纤维增强塑料制成，相较于玻璃纤维的高刚度，环氧树脂的分子链结构更加灵活，造成其刚度较低，所以会引起芯棒在低温下有更大的横向收缩率，影响到金具对芯棒的压接性能。

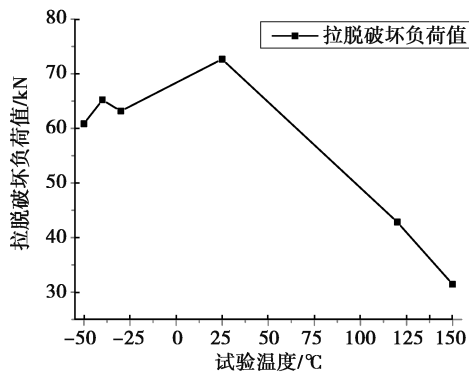


图 5 不同温度下复合绝缘子拉伸破坏负荷值

Fig. 5 The pull-out failure load value of the end-fittings at different temperature

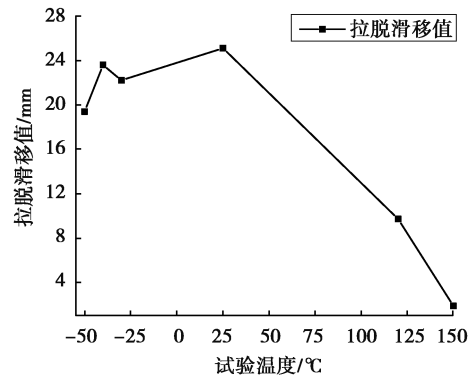


图 6 不同温度下复合绝缘子拉伸破坏滑移值

Fig. 6 The pull-out failure slippage value of the end-fittings at different temperature

## 5 结 论

芯棒与端部金具的黏结-滑移为复合绝缘子力学破坏的主要形式。针对现有市场普遍适用的端部金具压接式复合绝缘子,原厂工艺加工端部金具的样式,设计出了压接式复合绝缘子拉伸试验的通用试样。对不同温度下复合绝缘子芯棒进行拉伸试验。研究表明:

1) 复合绝缘子机械破坏负荷取决于金具与芯棒连接强度,其破坏的主要特征为端部金具的滑移。

2) 因为端部金具的热膨胀系数与玻璃纤维增强环氧树脂芯棒有较大差异,无论是高温还是低温,复合绝缘子的力学性能均产生下滑。

3) 温度超过 120 °C 时,金具与芯棒的黏结-滑移性能大大降低;温度达到 150 °C,金具芯棒黏结-滑移曲线没有荷载强化上升段。

4) 在低温环境下,复合绝缘子端部金具拉脱破坏负荷值只是略微降低,当温度为 -50 °C 时,试验测出拉脱力为额定破坏负荷值的 86.91%。

### 参考文献:

- [1] Paris L, Pargamin L, Dumorora D, et al. Rating of composite suspension insulators related to the long term mechanical strength of rods[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(4):2055-2063.
- [2] Kumosa M, Han Y, Kumosa L. Analyses of composite insulators with crimped end-fittings; Part I-non linear finite element computations[J]. Composites Science & Technology, 2002, 62(9):1191-1207.
- [3] De Tourreil C, Roberge R, Bourdon P. Long-term mechanical properties of high voltage composite insulators[J]. Power Apparatus & Systems IEEE Transactions on, 1985, PAS-104(10):2918-2921.
- [4] 丁京玲,党镇平,姚喜年,等.±800 kV 直流棒形悬式复合绝缘子的研究[J].电瓷避雷器,2011(2):1-6.  
DING Jingling, DANG Zhenping, YAO Xinian, et al. +800 kV DC rod suspension composite insulator [J]. Electric Porcelain Lightning Arrester, 2011(2): 1-6.(in Chinese)
- [5] 张树华,张丽珍.绝缘子的拉伸破坏分析研究[J].绝缘材料,2001(4):41-43.  
ZHANG Shuhua, ZHANG Lizhen. Tensile failure analysis of insulators [J]. Insulating Materials, 2001(4): 41-43.(in Chinese)
- [6] 欧阳民康.高电压悬式合成绝缘子玻璃钢棒芯材料的力学性能分析[J].武汉水利电力学院学报,1984(4):23-31.  
OUYANG Minkang. Mechanical properties analysis of high voltage suspension composite insulator FRP rod-core material [J]. Journal of Wuhan Institute of Water Resources and Electricity, 1984(4): 23-31.(in Chinese)
- [7] 武怀永.复合绝缘子的力学性能研究[J].农村电气化,2005(10):48-49.

- WU Huaiyong. Mechanical properties of composite insulators [J]. Rural electrification, 2005 (10): 48-49.(in Chinese)
- [8] 袁骏.特高压线路用复合绝缘子的机械性能[J].电网技术,2006(12):29-32.  
YUAN Jun. Mechanical properties of composite insulators for UHV transmission lines [J]. Power grid technology, 2006 (12): 29-32.(in Chinese)
- [9] 余涛,杨新华.压接式复合绝缘子接头处的破坏分析[J].水电能源科学,2010,28(10):139-141.  
YU Tao, YANG Xinhua. Damage analysis at the joint of pressed composite insulators [J]. Hydropower Energy Science, 2010, 28 (10): 139-141.(in Chinese)
- [10] 谢占山. 500kV“V”串复合绝缘子机械疲劳试验研究[D]. 北京:华北电力大学, 2012.  
XIE Zhanshan. Mechanical fatigue test of 500 kV "V" series composite insulators [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.(in Chinese)
- [11] 徐如恬.瓷绝缘子强度及瓷材料种类强度水平的探讨[J].电瓷避雷器,1988(1):1-8.  
XU Rutian. Study on the strength of porcelain insulators and the strength level of different kinds of ceramic materials [J]. Electric Porcelain Arresters, 1988(1): 1-8.(in Chinese)
- [12] 滕国利,魏宁,徐礼贤.±800kV特高压直流棒形悬式复合绝缘子的研制[J].电网技术,2006(12):83-86.  
TENG Guoli, WEI Ning, XU Lixian. ±800 kV UHVDC rod suspension composite insulator development [J]. Power Grid Technology, 2006 (12): 83-86.(in Chinese)
- [13] 易春芳,梁培松,梁英,等.陶瓷改性复合绝缘子材料的力学性能研究[J].绝缘材料,2015,48(1):10-14.  
YI Chunfang, LIANG Peishong, LIANG Ying, et al. Mechanical properties of ceramic modified composite insulators [J]. Insulation Materials, 2015, 48(1): 10-14.(in Chinese)
- [14] 姚莉娜,吴颖晖,王少华,等.挂网运行复合绝缘子的电气及力学性能研究[J].绝缘材料,2015,48(8):23-27.  
YAO Lina, WU Yinghui, WANG Shaohua, et al. Electrical and mechanical properties of composite insulators for hanging-net operation [J]. Insulation Materials, 2015, 48(8): 23-27.(in Chinese)
- [15] 张玥,谢强,何畅,等.特高压复合支柱绝缘子力学性能试验研究[J].南方电网技术,2017,11(11):27-33,67.  
ZHANG Yue, XIE Qiang, HE Chang, et al. Experimental study on mechanical properties of UHV composite post insulators [J]. Southern Power Grid Technology, 2017, 11 (11): 27-33,67.(in Chinese)
- [16] 张硕,姚宁,吴继平,等.玻璃纤维增强环氧树脂复合材料的力学性能[J].电工材料,2016(1):11-14.  
ZHANG Shuo, YAO Ning, WU Jiping, et al. Mechanical properties of glass fiber reinforced epoxy resin composites [J]. Electrical Materials, 2016 (1): 11-14.(in Chinese)

(编辑 陈移峰)