

玻璃纤维增强塑料电缆导管环向拉伸强度的测量及不确定度评定

王伟¹ 曾建梅² 王建¹

(1.重庆市计量质量检测研究院; 2.重庆商务职业学院)

摘要:以编织缠绕拉挤(BWFRP)玻璃纤维增强塑料电缆导管为研究对象,建立了环向拉伸强度测量不确定度的数学模型,根据DL/T 802.2-2017测定样品环向拉伸强度,探讨了破坏载荷、数值修约、试样宽度和试样厚度等参数对测定结果的影响。结果表明:影响环向拉伸强度测量结果的最主要因素是破坏载荷测量重复性,适当增加试验次数可减少因测量重复性引起的不确定度,是提高测量准确性的关键;当玻璃纤维增强电缆导管拉伸强度为273.3MPa时,其扩展不确定度为10.7MPa(包含因子k=2)。

关键词:玻璃纤维增强塑料电缆导管,环向拉伸强度,不确定度,测量重复性

DOI编码: 10.3969/j.issn.1674-5698.2023.01.020

Measurement and Uncertainty Evaluation of Circumferential Tensile Strength of Glass Fiber Reinforced Plastic Cable Conduit

WANG Wei¹ ZENG Jian-mei² WANG Jian¹

(1. Chongqing Institute of Metrology and Quality Test; 2. Chongqing Business Vocational College)

Abstract: A mathematical model of the uncertainty of the measurement of the circumferential tensile strength of the braided winding pultrusion glass fiber reinforced plastic cable conduit was established. The circumferential tensile strength of the sample was measured according to DL/T 802.2-2017. The influences of failure load, numerical modification, sample width and thickness on the measurement results were discussed. The results show that the most important factor affecting the measurement results of circumferential tensile strength is the repeatability of failure load measurement. Increasing the number of tests appropriately can reduce the uncertainty caused by the repeatability of measurement, which is the key to improve the accuracy of measurement. When the tensile strength of glass fiber reinforced cable conduit is 273.3MPa, its expansion uncertainty is 10.7MPa (including k=2).

Keywords: fiberglass reinforced plastic cable conduit, circumference tensile strength, degree of uncertainty, repeatability of measurement

基金项目:本文受重庆市教委科技项目“面向深度学习的多模态情感识别研究”(项目编号:KJQN202204404)资助。

作者简介:王伟,硕士研究生,工程师,主要从事塑料制品质量检测方面的研究。

1 引言

在城市建设工程中,电力电缆管线铺设是极其重要的一部分,牵涉到城市的安全正常运行,是城市电力安全运行的重要保障。由于城市电力工程中的管线铺设环境复杂、管线众多等情况,对电力电缆保护套管的品质和性能有很高的要求。玻璃纤维增强塑料电缆导管凭借新型材料和高性能优势,成为了城市电力电缆管线铺设工程中不可忽视的配套产品,在城市电力市场中具有广阔发展前景。

编织缠绕拉挤(BWFRP)玻璃纤维增强电缆导管以高性能树脂为基体、无碱玻璃纤维无捻粗纱为增强材料,通过横向和纵向相互交错编织拉挤成型的纤维拉挤电缆保护管,一般为浅绿色,色泽均匀、无杂质,管道端口整齐、光滑,无任何可见缺陷。BWFRP纤维拉挤电缆保护管具有“环刚度高、拉伸强度高、耐高低温、电绝缘性高、导热性优越、耐腐蚀、耐水、阻燃、安全环保、管材轻便”这十大优势,可以克服金属管材不耐腐蚀、寿命短等劣势;改善传统缠绕玻璃钢管管道夹砂严重、纵向强度不够易断裂等不足;消除PVC管材、PP管材强度低、不能承载高温等隐患。

BWFRP纤维拉挤电缆保护管的环向拉伸强度是其重要的力学性能项目,是保证玻璃纤维增强电缆导管产品质量最为重要性能指标之一^[1]。在实际测试中,由于测量误差的存在,导致测量结果的不确定性^[2]。本文通过DL/T 802.2-2017^[3]标准对玻璃纤维增强电缆导管环向拉伸强度的进行测量,分析影响测量结果的因素,并对其不确定度进行评价,提高玻璃纤维增强电缆导管环向拉伸强度的测量结果的可靠度和准确性^[4-7]。

2 试验部分

2.1 测量原理

通过电子万能试验机以规定速率进行拉伸套住环形试样的分离盘,根据玻璃纤维增强电缆导管破坏载荷计算其环向拉伸强度。

2.2 仪器与材料

ETM504C微机控制电子万能试验机: 测量范围

为0~50kN,准确度等级0.5级,深圳万测试验设备有限公司生产;

环形试样拉伸试验分离盘: 承德市金建检测仪器有限公司制造;

数显卡尺: 测量范围为0~200mm,最小分度值0.01mm,桂林广陆数字测控股份有限公司制造;

编织缠绕拉挤(BWFRP)玻璃纤维增强电缆导管: 规格型号为d100mm×e3.0mm,某企业委托检验用试样。

2.3 数学模型

根据DL/T 802.2-2017,本文选用规格为d100mm×e3.0mm BWFRP玻璃纤维增强电缆导管。按照DL/T 802.2-2017附录A标准规定,采用专用切割机制备10件环形试样,在(23±2)℃和湿度(50%±5%)RH的状态下调节24h后并在此环境条件下进行试验,以(10±2)mm/min的速率对试样进行拉伸,根据试样破坏时载荷计算环向拉伸强度,公式如(1)所示。

$$\sigma = \frac{P}{2bh}$$

式中: σ —试样环向拉伸强度, MPa; P—破坏载荷, N; b—试样宽度, mm; h—试样厚度, mm。

3 测量不确定度来源分析

在测量BWFRP玻璃纤维增强电缆导管环向拉伸强度试验中,主要是由电子万能试验机测量的破坏载荷、试样宽度和厚度决定。不确定度来源分析如图1所示。

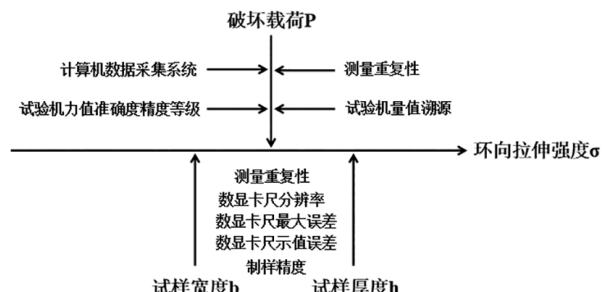


图1 BWFRP玻璃纤维增强电缆导管环向拉伸强度不确定来源分析

(1) 破坏载荷P测量的不确定度的主要来源:

- 1) 破坏载荷P测量重复性引入的不确定度;
 - 2) 电子万能试验机力值准确度精度等级引起的不确定度;
 - 3) 计算机数据采集记录所带来的不确定度;
 - 4) 电子万能试验机量值溯源的影响。
- (2) 试样宽度b和试样厚度h测定的不确定度的主要来源:
- 1) 试样宽度b和厚度h测量重复性引入的不确定度;
 - 2) 数显游标卡尺的分辨率;
 - 3) 数显游标卡尺的最大允许误差;
 - 4) 数显游标卡尺的精度等级。
- (3) 数值修约引起的不确定度。

4 不确定度分量评定

4.1 破坏载荷P测量不确定度的来源

破坏载荷P有4个不确定度来源: 破坏载荷P测量的重复性,采用A类评定方法,电子万能试验机因校准引入的不确定度、准确度等级引入的不确定度及计算机数据采集系统引起的不确定度和试验机,均采用B类评定方法^[7]。

4.1.1 破坏载荷P因测量重复性引入的测量不确定度评定

用切割机从导管上切取10个环形试样,在 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ 和湿度 $(50\% \pm 5\%) \text{RH}$ 的状态下调节24h后并在此环境条件下进行试验,以 $(10 \pm 2) \text{ mm/min}$ 的试验加载速度进行拉伸试验,直到试样破坏,记录破坏载荷,记为 P_i ($i=1, 2, \dots, 10$)。测量重复性试验结果见表1。

应用贝塞尔公式计算单次测量的标准偏差 $s(P)$:

$$s(P) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (P_i - \bar{P})^2}{10 - 1}} = 543.38 \text{ N}$$

由DL/T 802.2-2017附录A.8可知,环向拉伸强

度是通过单次破坏载荷P计算得出,可以用破坏载荷的试验标准偏差 $s(P)$ 来表征其测量重复性:

$$u_A(P) = s(P) = 543.38 \text{ N}$$

4.1.2 试验机因准确度等级引入的测量不确定度评定

本试验所用设备为ETM504C微机控制电子万能试验机,该设备准确度等级为0.5级,根据JJG 139-2014^[8]中检定规程4.1可知,当试验机的最大示值相对误差为 $\pm 0.5\%$,误差范围区间的半宽度 $\alpha_{B1}(P) = 17105.98 \times 0.5\% = 85.53 \text{ N}$ 。假设均匀分布的,并满足矩形分布,即包含因子 $k_{B1}(P) = \sqrt{3}$,则试验机准确度等级引入的标准不确定度为:

$$u_{B1}(P) = \frac{\alpha_{B1}(P)}{k_{B1}(P)} = \frac{85.53}{\sqrt{3}} = 49.38 \text{ N}$$

4.1.3 计算机数据采集系统采集破坏载荷引起的不确定度评定

由JJF 1103-2003^[9]计量规范B3可知,计算机数据采集系统所引入的B类相对标准不确定度为:

$$u_{B2}(P) = 0.2\% \text{。故其标准不确定度为:}$$

$$u_{B2}(P) = \bar{P} \times u_{B2}(P) = 17105.98 \times 0.2\% = 34.21 \text{ N} \text{。}$$

4.1.4 试验机因校准引入的不确定度评定

试验机采用0.1级标准测力仪进行检定校准,标准测力仪最大示值相对误差为 $\pm 0.1\%$,误差范围区间的半宽度 $\alpha_{B3}(P) = 17105.98 \times 0.1\% = 17.11 \text{ N}$,假设均匀分布的,即包含因子 $k_{B3}(P) = \sqrt{3}$ 。电子万能试验机因校准引入的标准不确定度为:

$$u_{B3}(P) = \frac{\alpha_{B3}(P)}{k_{B3}(P)} = \frac{17.11}{\sqrt{3}} = 9.88 \text{ N}$$

4.1.5 破坏载荷P标准不确定度的合成

不确定度分量 $u_A(P)$ 、 $u_{B1}(P)$ 、 $u_{B2}(P)$ 和 $u_{B3}(P)$ 互不相关,故环向拉伸强度P标准不确定度采用方和根方法合成为:

$$\begin{aligned} u_C(P) &= \sqrt{u_A^2(P) + u_{B1}^2(P) + u_{B2}^2(P) + u_{B3}^2(P)} \\ &= \sqrt{543.38^2 + 49.38^2 + 34.21^2 + 9.88^2} = 546.78 \text{ N} \end{aligned}$$

表1 破坏载荷P测量重复性试验结果统计

试验次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
破坏载荷P/N	17625.14	16562.36	17647.56	16574.74	17764.38	16640.26	16910.48	16643.66	16845.84	17845.39
平均值/N	17105.98									
标准差s (P)	543.38									

其相对标准不确定度为:

$$U_{\text{rel. } C}(P) = \frac{u_C(P)}{P} = \frac{546.78}{17105.98} \times 100\% = 3.196\%$$

4.2 试样宽度b和试样厚度h测量所引入的不确定度评定

本试验中试样宽度b和厚度h的测量不确定度主要来源于: 试样宽度b和厚度h的测量重复性, 采用A类评定方法; 数值修约、数显游标卡尺的示值误差和精度等级, 均采用B类评定方法。

4.2.1 试样宽度b和厚度h因测量重复性引入的测量不确定度评定

用游标卡尺分别测量试样的宽度和厚度, 在垂直对称位置测量10个点, 测量结果精确到0.02mm, 记为 b_i ($i=1, 2, \dots, 10$) 和 h_j ($j=1, 2, \dots, 10$)。试样宽度b和厚度h测量重复性试验结果见表2、表3。

应用贝塞尔公式计算单次测量的标准偏差 $s(b)$ 和 $s(h)$:

$$s(b) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (b_i - \bar{b})^2}{10 - 1}} = 0.07451\text{mm}$$

$$s(h) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{10} (h_j - \bar{h})^2}{10 - 1}} = 0.05534\text{mm}$$

由DL/T 802.2-2017附录A.5可知, 试样宽度和厚度均由4次算术平均值计算得出, 故因重复性引入的标准不确定度 $u_A(b)$ 和 $u_A(h)$:

$$u_A(b) = \frac{s(b)}{\sqrt{4}} = 0.03770\text{mm}$$

$$u_A(h) = \frac{s(h)}{\sqrt{4}} = 0.02767\text{mm}$$

4.2.2 试样宽度b和厚度h因数值修约引入的测量不确定度评定

由DL/T 802.2-2017标准中要求试样宽度b和厚度h测量结果精确到0.02mm, 则包含区间半宽度 α_B (b/h) = 0.01mm, 通常假设数值修约均匀分布, 包含因子 k_B (b/h) = $\sqrt{3}$, 则试样宽度b和厚度h标准不确定度 $u_B(b)$ 和 $u_B(h)$:

$$u_{B1}(b) = u_{B1}(h) = \frac{\alpha_B(b/h)}{k_B(b/h)} = \frac{0.01}{\sqrt{3}} = 0.00577\text{mm}$$

4.2.3 游标卡尺示值误差引入的不确定度评定

本试验中采用数显游标卡尺测量试样宽度和厚度, 查看该卡尺检定证书最大示值误差为0.03mm, 假设测量值在该区间内的概率呈均匀分布, 区间半宽度为0.03mm, 包含因子为 $\sqrt{3}$ 。则游标卡尺因示值误差引入的标准不确定度为:

$$u_{B2}(b) = u_{B2}(h) = \frac{0.03}{\sqrt{3}} = 0.01732\text{mm}$$

4.2.4 游标卡尺的精度等级引入的不确定度评定

本试验所使用的数显游标电子卡尺的分辨力为0.01mm, 同样假设测量值在该区间内的概率呈均匀分布, 半区间宽度为0.005mm, 包含因子为 $\sqrt{3}$ 。则数显游标卡尺因精度等级引入标准不确定度为:

$$u_{B3}(b) = u_{B3}(h) = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.00289\text{mm}$$

4.2.5 试样宽度b和厚度h不确定度的合成

由于试样宽度b和厚度h的不确定度分量 $u_A(b/h)$ 、 $u_{B1}(b/h)$ 、 $u_{B2}(b/h)$ 、 $u_{B3}(b/h)$ 彼此独立互不相关, 则试样宽度b和厚度h合成标准不确定度 $u_C(b)$ 和 $u_C(h)$ 为:

$$\begin{aligned} u_C(b) &= \sqrt{u_A^2(b) + u_{B1}^2(b) + u_{B2}^2(b) + u_{B3}^2(b)} \\ &= \sqrt{0.03770^2 + 0.00577^2 + 0.01732^2 + 0.00289^2} \\ &= 0.04199\text{mm} \end{aligned}$$

表2 试样宽度b测量重复性试验结果统计

试验次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
试样宽度b/mm	10.24	10.08	10.10	10.20	10.06	10.24	10.26	10.20	10.10	10.14
平均值/mm	10.16									
标准差s (b)	0.07451									

表3 试样厚度h测量重复性试验结果统计

试验次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
试样宽度b/mm	3.02	3.10	3.16	3.14	3.10	3.08	3.04	2.98	3.08	3.12
平均值/mm	3.08									
标准差s (b)	0.05534									

$$\begin{aligned} u_c(h) &= \sqrt{u_A^2(h) + u_{B_1}^2(h) + u_{B_2}^2(h) + u_{B_3}^2(h)} \\ &= \sqrt{0.02767^2 + 0.01732^2 + 0.00577^2 + 0.00289^2} \\ &= 0.03328 \text{ mm} \end{aligned}$$

那么试样宽度b和厚度h相对标准不确定度为:

$$U_{\text{rel. } c}(b) = \frac{u_c(b)}{b} = \frac{0.04199}{10.16} \times 100\% = 0.413\%$$

$$U_{\text{rel. } c}(h) = \frac{u_c(h)}{h} = \frac{0.03328}{3.08} \times 100\% = 1.081\%$$

4.3 环向拉伸强度 σ 不确定度的评定

由于破坏载荷、试样宽度和试样厚度3个不确定度分量互不相关,根据环向拉伸强度计算公式,试样环向拉伸强度 σ 相对标准不确定度采用方和根方法合成:

$$\begin{aligned} U_{\text{rel. } c}(\sigma) &= \sqrt{U_{\text{rel. } c}^2(P) + U_{\text{rel. } c}^2(b) + U_{\text{rel. } c}^2(h)} \\ &= \sqrt{3.196^2 + 0.413^2 + 1.081^2} = 3.399\% \end{aligned}$$

由DL/T 802.2-2017附录A可知,最少取3组试样的环向拉伸强度的算术平均值作为最终结果,故环向拉伸强度平均值的相对合成标准不确定度:

$$U_{\text{rel. } c}(\bar{\sigma}) = \frac{U_{\text{rel. } c}(\sigma)}{\sqrt{3}} = \frac{3.399}{\sqrt{3}} = 1.962\%$$

4.4 环向拉伸强度 σ 扩展不确定度及不确定度报告

4.4.1 环向拉伸强度 σ 扩展不确定度评定

根据JJF 1059.1-2012第4.5章可知,在一般测量中,通常取包含因子k=2(其包含概率约为95%),则

环向拉伸强度的相对扩展不确定度为:

$$\begin{aligned} U_{\text{rel. } c}(\bar{\sigma}) &= k U_{\text{rel. } c}(\sigma) = 2 \times 1.962\% \\ &= 3.924\% \approx 3.9\% \end{aligned}$$

根据环向拉伸强度计算公式,试样环向拉伸强度公式: $\sigma = \frac{P}{2bh}$ 可得, $\bar{\sigma} = 273.321 \text{ MPa}$, 故其扩展不确定度为:

$$\begin{aligned} U(\bar{\sigma}) &= \bar{\sigma} \times U_{\text{rel. } c}(\bar{\sigma}) = 273.321 \times 3.9\% : \\ &= 10.660 \text{ MPa} \end{aligned}$$

4.4.2 不确定度报告表示

根据DL/T 802.2-2017标准,环向拉伸强度测量结果数值修约至0.1MPa, $\bar{\sigma} = 273.3 \text{ MPa}$,按照不确定度的末位应与测试结果的末位对齐的要求^[10], U95%取10.7MPa。因此本试验环向拉伸强度测量结果可表示为: $\bar{\sigma} = 273.3 \text{ MPa}$, $U = 10.7 \text{ MPa}$, $k = 2$

5 结 论

在玻璃纤维增强电缆导管环向拉伸强度测量中,破坏载荷对测量结果的影响最大。在破坏载荷的测量中,测量重复性影响环向拉伸前强度不确定度的主要因素,由于试验机的性能是设备固有的,因此在实际检测试过程中,通过适当增加测量次数可以减少因测量重复性引起的不确定度,是提高测量准确性的关键。

参 考 文 献

- [1] 周仕刚,付强. RPM管环向拉伸强度的测试[J]. 玻璃钢/复合材料, 2004, 6: 3-6+34.
- [2] 国家质量监督检验检疫总局. JJF 1059. 1-2012测量不确定度评定与表示[S]. 北京: 中国质检出版社, 2012.
- [3] 中国电力企业联合会. DL/T 802.2-2017电力电缆用导管 第2部分: 玻璃纤维增强塑料电缆导管[S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [4] 马博. 改性聚丙烯弯曲强度不确定度的评定[J]. 现代测量与实验室管理, 2015, 23(02): 26-28.
- [5] 吴鹏, 匡莉. 玻纤增强PA6简支梁缺口冲击强度不确定度的评定[J]. 广州化学, 2018, 43(01): 35-40.
- [6] 史伟, 李志霞, 杨莉, 等. 测量不确定度与不确定性原理的概念辨析[J]. 物理测试, 2019, 34(03): 58-60.
- [7] 李学伟, 周永红, 周朝旭, 等. 聚乙烯(PE)双壁波纹管环刚度不确定度的评定[J]. 塑料, 2018, 47(3): 68-71.
- [8] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 139-2014拉力、压力和万能试验机[S]. 北京: 中国质检出版社, 2014.
- [9] 国家质量监督检验检疫总局. JJF 1103-2003万能试验机计算机数据采集系统评定[S]. 北京: 中国质检出版社, 2003.
- [10] 程小琴,罗兰,马庭,等. ABS简支梁缺口冲击强度的测量不确定度评定[J]. 装备环境工程, 2011, 8(02): 46-48+77.