

# 高温超导电缆室温及液氮温度机械拉伸性能研究

黄逸佳<sup>1</sup>, 郑健<sup>2</sup>, 陈志越<sup>1</sup>

(1. 上海电缆研究所有限公司, 上海 200093)

(2. 国网上海市电力公司, 上海 200122)

**摘要:** 为研究高温超导电缆室温及液氮温度下的机械拉伸性能, 分别对 10 m 短段高温超导电缆和 10 m 短段铜衬芯在室温及液氮温度 ( $T=77\text{ K}$ ) 下的受力拉伸性能进行了实验研究。通过测试分别得到了两者在室温和  $T=77\text{ K}$  的应力应变曲线, 并根据应力应变关系得到了两者在相应温度下的杨氏模量。同时, 还针对 10 m 短段单芯高温超导电缆及 10 m 短段铜衬芯在受力情况下的降温收缩情况进行了研究, 并得到了在负载为 2000 kg 的情况下, 两者从室温将至液氮温度时的收缩变化量及收缩率, 为后续电缆敷设施工的裕度选择提供一定的参考依据。

**关键词:** 高温超导电缆; 机械拉伸性能; 应力应变关系; 杨氏模量; 收缩率

中图分类号: TM249<sup>+.7</sup>

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)11-3870-05

超导电缆能够在损耗较低的情况下传输电流, 这使得其具有十分广阔的应用前景。近几十年来, 世界各国均在大力发展高温超导电缆技术<sup>[1-4]</sup>, 美国、日本、韩国均推出了高温超导电缆项目<sup>[5-9]</sup>。而近几十年来, 中国也在大力发展高温超导电缆技术<sup>[10-16]</sup>。1998 年底, 中科院电工所研制了 1 m、1 kA 级 Bi 系高温超导电缆导体模型。2000 年又完成了 6 m、2 kA 级直流高温超导电缆的研制, 并进行了试验。2004 年, 北京云电英纳超导电缆公司实现了 33.5 m 长、35 kV/2 kA 三相交流高温超导电缆在云南昆明市普吉变电站的并网运行, 这是当时世界第 3 根、我国第 1 根实际并网运行的高温超导电缆<sup>[17]</sup>。2013 年 12 月, 上海电缆研究所的中国首条冷绝缘高温超导电缆系统, 在宝山钢铁股份有限公司投入实际供电线路。这标志着我国在使用冷绝缘高温超导电缆技术中获得重大突破, 成为国际上少数成功建设低温绝缘超导电力电缆示范工程的国家, 且该超导电缆系统在性能指标上已达到世界先进水平, 部分关键电气性能指标达到世界领先水平<sup>[18,19]</sup>。

高温超导电缆的优点很多, 但其在生产、敷设以及运行维护等多个方面, 仍然有很多工作需要研究、改进和优化。其中, 敷设作为超导电缆工程施工过程中不可或缺的一个环节, 仍需进行大量的研究工作来优化敷设工艺, 使超导带材在敷设过程中的受力尽可能小, 保证超导电缆的质量。为此, 需对高温超导电缆室温下的机械拉伸性能进行研究, 以掌握电缆自身的机械性能。

此外, 由于高温超导电缆实际运行过程中的运行温度为 77 K 以下。因此, 从室温降温到正常运行温度时, 电缆不可避免的发生收缩。若敷设时对电缆的长度余量考虑不足, 则电缆收缩后会绷紧, 同时也使得中接头及终端等电缆部件受到较大的拉力。若此拉力过大, 整个电缆系统机械性能较为薄弱的部分有可能出现变形甚至损坏。因此, 考虑到超导电缆长度的余量设计, 以及电缆在运行温度下的机械性能, 有必要对超导电缆降温时的收缩量以及在液氮温度下的机械拉伸性能进行研究。

基于以上 2 个研究目的, 本研究对 10 m 短样铜衬芯及 10 m 短样单芯高温超导电缆在室温和液氮温度  $T=77\text{ K}$  下的机械拉伸性能, 以及由室温降至液氮温度时的收缩率进行了研究。通过实验测量, 得到了 2 个试验样品 (铜衬芯和单芯超导电缆) 在室温和 77 K 下的应力应变关系曲线, 并利用杨氏模量的计算公式, 得到了样品在对应温度下的杨氏模量。同时, 也从实验上测量得到了 2 个样品由室温降温至 77 K 时的收缩率。通过上述实验的实验结果, 为后续超导电缆工程中的余量设计及电缆敷设工艺选择提供一定的理论指导和参考。

## 1 实验

所采用的实验装置如图 1 所示, 实验样品放置在电缆拉伸试样放置架的试样槽内, 放置着样品的试

收稿日期: 2019-11-15

基金项目: 国家电网公司科技项目 (520940180014)

作者简介: 黄逸佳, 男, 1989 年生, 硕士, 上海电缆研究所有限公司, 超导工程技术研究中心, 上海 200093, E-mail: huangyijia@secri.com

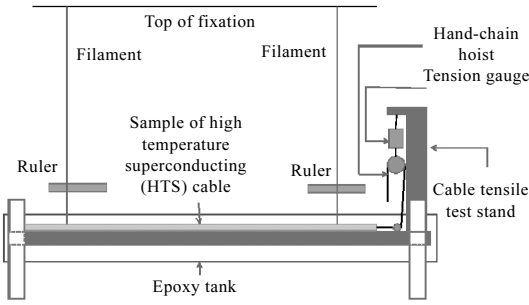


图 1 机械拉伸性能实验及收缩实验装置

Fig.1 Experimental device of tensile test and shrinkage test

样槽则置于环氧液氮槽中。样品的一端通过 U 型环固定在放置架的一端，另一端则通过 U 型环和不锈钢索与 5 T 手动葫芦相连，而 5 T 手动葫芦悬挂在数显拉力计下。

实验时，通过手动葫芦对实验样品施加拉力和释放拉力，样品的受力大小则可通过数显拉力计读取。为了测量得到样品受力时的形变量，于样品的两端系上细线，并将细线的另一端固定于固定支架顶端。同时在距离槽钢一定高度的位置，水平放置用于读取数值的标尺。当样品受力形变时，样品两端的细线会随着样品的形变而移动，此时便可通过读取两端细线在尺子上的位置变化来得到样品的形变量。最后，根据拉力值及相应的形变量，利用杨氏模量的计算公式：

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{1}$$

即可得到样品在不同温度下的杨氏模量，其中  $\sigma$  为应力， $\varepsilon$  为应变。

收缩率测量实验的实验原理与上述实验类似。在室温时，先对实验样品施加 2000 kg 左右的负载，并记录样品两端测量点上的悬垂线在尺子上的位置。随后向环氧槽中添加液氮，并使样品完全浸泡在液氮中。待实验样品完全冷却后，保持负载不变，并记录此时样品两端悬垂线在尺子上的位置。分别将两端降温前后的位置结果相减，得到降温前后样品两端测量点的位置变化。再由公式：

$$\Delta = \delta_1 + \delta_2 \tag{2}$$

得到样品总的收缩量  $\Delta$ ，其中  $\delta_1$  和  $\delta_2$  分别表示样品左右两侧测量点降温前后的位置变化量。利用公式：

$$\rho = \frac{\Delta}{L} \tag{3}$$

即可得到样品的收缩率。其中  $\rho$  为收缩率， $L$  为样品的原长。

## 2 实验结果

### 2.1 铜衬芯机械拉伸实验

实验所测得的铜衬芯在室温下的应力-应变关系曲线如图 2 所示。由图 2 可知，当拉力负载增加时，铜衬芯的应力与应变之间呈现了较好的线性关系。而当负载减少时，其卸载曲线却与加载曲线不重合。而且当负载刚开始减少时，应变变化很小，而应力却急剧减小；当负载减少至某一数值时，卸载曲线出现拐点，且应力随应变的变化趋势变得缓和。

为了搞清上述曲线不重合的原因，改变不同的实验条件及环境并进行多次测试。图 3 给出了室温下，在 2 种不同实验条件下得到的铜衬芯的应力应变曲线，其中实验条件 1 为改善铜衬芯与电缆拉伸支架间的摩擦，减少两者间的静摩擦系数，实验条件 2 为延长载荷施加时间，由 15 min 延长至 30 min，保证铜衬芯有足够的弛豫时间。由实验结果可以看出，不同实验条件得到的加载曲线和卸载曲线的变化趋势相同。因此，可推断造成这种实验结果的原因与实验条件无关。

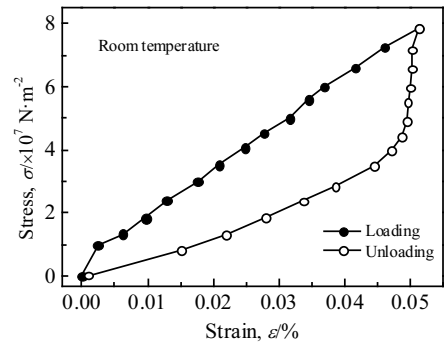


图 2 短样铜衬芯室温下的应力-应变关系曲线

Fig.2 Stress-strain curves of 10 m copper core at room temperature

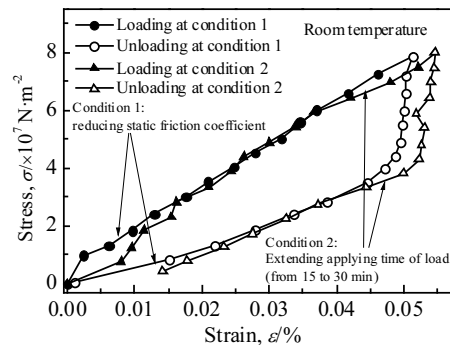


图 3 铜衬芯室温下 2 次不同实验条件下的结果对比

Fig.3 Comparison of two experimental results of copper core at room temperature (Condition 1: reducing the static friction coefficient between copper core and support; Condition 2: extending the applying time of load (from 15 to 30 min))

铜衬芯在室温及 77 K 下的应力-应变关系曲线如图 4 所示。由图 4 可知，铜衬芯在 77 K 下应力-应变曲线的变化趋势与室温的一致。

根据图 4 中的数据，利用公式 (1)，计算得到了铜衬芯在 2 个温度下的杨氏模量，不同温度下铜衬芯的杨氏模量如表 1 所示。

### 2.2 单芯高温超导电缆机械拉伸实验

单芯电缆样品在室温和液氮温度 (77 K) 下的应力-应变曲线如图 5 所示，曲线的变化趋势与铜衬芯的一致。此外，根据图 5 数据，利用公式 (1)，计算得到了单芯电缆样品在不同温度下的杨氏模量，如表 2 所示。

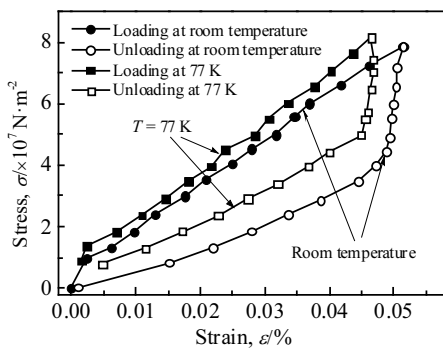


图 4 铜衬芯在室温及 77 K 下的应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves of copper core at room temperature and 77 K

表 1 室温及 77 K 下铜衬芯的杨氏模量 E

Table 1 Young's modulus E of copper core at room temperature and 77 K

| Temperature      | Young's modulus, E/GPa |
|------------------|------------------------|
| Room temperature | 148                    |
| 77 K             | 157                    |

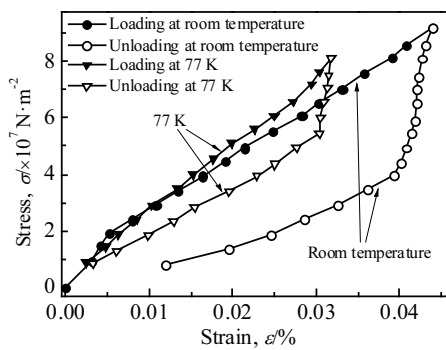


图 5 超导电缆在室温及液氮温度 77 K 下的应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of HTS cable at room temperature and 77 K

表 2 超导电缆在室温及 77 K 下的杨氏模量 E (GPa)

Table 2 Young's modulus E of HTS cable at room temperature and 77 K

| Temperature      | Young's Modulus, E/GPa |
|------------------|------------------------|
| Room temperature | 196.22                 |
| 77 K             | 239.33                 |

为进一步比较同一温度下铜衬芯及单芯电缆的机械拉伸性能，将铜衬芯和单芯电缆在室温及液氮温度下的应力-应变曲线分别绘制于图 6 和图 7。

### 2.3 铜衬芯及超导电缆收缩实验

本研究针对铜衬芯及单芯超导电缆由室温降温至 77 K 时的收缩量进行了研究。由公式 (2) 与公式 (3)，可计算得到铜衬芯及超导电缆样品在维持负载为 2000 kg 情况下，由室温至液氮温度的收缩率，具体数值如表 3 所示。

## 3 结果与分析

通过测量，得到了铜衬芯和单芯超导电缆在室温及液氮温度 (77 K) 下的应力-应变关系曲线，如图 2~图 7 所示。

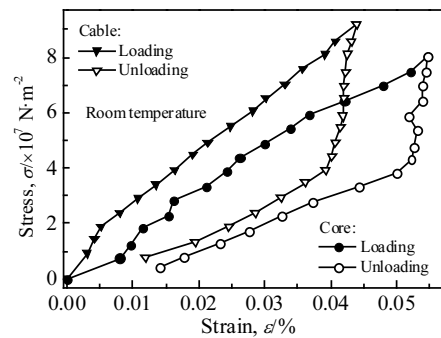


图 6 室温下铜衬芯及单芯电缆的应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves of copper core and HTS cable at room temperature

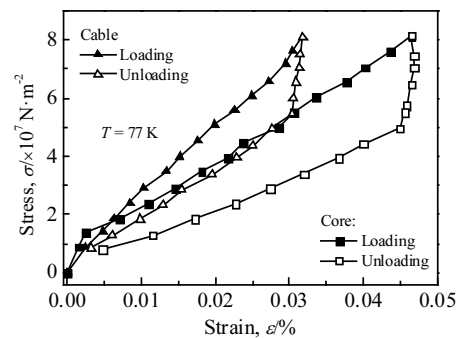


图 7 液氮温度 (77 K) 下铜衬芯及单芯电缆的应力-应变曲线

Fig.7 Stress-strain curves of copper core and HTS cable at 77 K

表 3 铜衬芯及超导电缆由室温降温至 77 K 的收缩率

Table 3 Rates of contraction of copper core and HTS cable cooled from room temperature to 77 K

| Sample      | Contraction rate/% |
|-------------|--------------------|
| Copper core | 0.28               |
| HTS cable   | 0.29               |

对于铜衬芯, 由图 2 和图 3 可以看出, 其应力应变曲线的加载部分及卸载部分无法重合, 且改变实验条件并未改变结果。由此推断, 造成该实验结果的原因, 与实验条件无关, 推测可能与实验样品的主要受力部分为经过绞合工艺的型线有关, 具体原因仍需后续进一步研究。

由图 4 可知, 在液氮温度 (77 K) 下, 铜衬芯的加载曲线的斜率比室温下的加载曲线的斜率要大, 即其液氮温度下的杨氏模量要比室温下的大。由表 1 可知, 铜衬芯在室温下拉伸实验得到的杨氏模量为 148 GPa, 而其在液氮温度 (77 K) 下的杨氏模量为 157 GPa。铜衬芯在 2 个温度下的杨氏模量均比铜的杨氏模量 (110~128 GPa) 大, 原因可能是由于铜衬芯已经过绞制工艺, 使其内部具有一定应力所致。

对于单芯超导电缆, 其应力应变曲线的加载及卸载部分与铜衬芯的类似, 也出现不重合的现象, 如图 5 所示, 这是由于单芯超导电缆的主要受力机构为铜衬芯的缘故。此外, 由图 5 可看出, 电缆在 77 K 下的加载曲线的斜率要比室温下的大, 即超导电缆在 77 K 下的杨氏模量要比室温下的大, 这与铜衬芯拉伸实验得到的结果一致。单芯超导电缆室温及液氮温度下的杨氏模量如表 2 所示, 室温下杨氏模量的值为 196.22 GPa, 在 77 K 下杨氏模量的值为 239.33 GPa。

通过比较同一温度下铜衬芯和单芯超导电缆的应力应变曲线可知, 在 2 个温度下单芯电缆的杨氏模量均比铜衬芯的大, 如图 6 和图 7 所示。这可能与电缆的结构有关。电缆铜衬芯的外部有超导导体层、绝缘层、超导屏蔽层及铜屏蔽层 4 层主要结构, 每层结构之间均紧密缠绕。因此, 当超导电缆拉伸时, 各层之间的摩擦力将会对衬芯的拉伸形变造成阻碍, 可能会导致衬芯的形变量变小, 由式 (1) 可知, 这将导致电缆的杨氏模量变大。

对于铜衬芯和单芯超导电缆的收缩性能。由表 3 可知, 当从室温降至液氮温度 (77 K) 时, 铜衬芯的收缩率为 0.28%, 而超导电缆样品的收缩率为 0.29%, 超导电缆的收缩率略大于铜衬芯的收缩率。造成以上差异的原因, 可半定量的从如下角度分析。假设施加负载和降温的顺序与实验样品的机械拉伸性能及收缩

无关, 即无论先降温后加负载还是先加负载再降温, 样品的形变量不变。则令收缩率为  $\rho$ ,  $L$  表示在室温下的原长,  $L'$  表示在 77 K 下的原长,  $\Delta l$  为负载为零的情况下的收缩量,  $L=L'+\Delta l$ ,  $\sigma(\varepsilon, T)$  表示在某个温度  $T$  及某个应力  $\varepsilon$  下的应变, 且由公式 (1) 有:

$$\sigma(\varepsilon, T) = \frac{\varepsilon}{E(T)} \quad (4)$$

则在保持负载  $\varepsilon$  不变的情况下, 由室温  $T_R$  降温至 77 K 的收缩率  $\rho$  可表达为:

$$\rho = \frac{L(\varepsilon, T_R) - L(\varepsilon, 77 \text{ K})}{L(\varepsilon, T_R)} \quad (5)$$

式中,  $L(\varepsilon, T_R)$  和  $L(\varepsilon, 77 \text{ K})$  可分别表示为:

$$L(\varepsilon, T_R) = L + L\sigma(\varepsilon, T_R) \quad (6)$$

$$L(\varepsilon, 77 \text{ K}) = L' + L'\sigma(\varepsilon, 77 \text{ K}) \quad (7)$$

因此, 式 (5) 可变为:

$$\rho = \frac{\Delta l + L[\sigma(\varepsilon, T_R) - \sigma(\varepsilon, 77 \text{ K})] + \Delta l \cdot \sigma(\varepsilon, 77 \text{ K})}{L[1 + \sigma(\varepsilon, T_R)]} \quad (8)$$

式 (8) 中分子上的最后一项是一个小量, 可忽略, 因此 (8) 式可进一步变为:

$$\rho \cong \frac{\Delta l + L[\sigma(\varepsilon, T_R) - \sigma(\varepsilon, 77 \text{ K})]}{L[1 + \sigma(\varepsilon, T_R)]} \quad (9)$$

将 (4) 式代入 (9) 式化简后, 可得:

$$\rho \cong \frac{\Delta l \cdot E(T_R)}{L[E(T_R) + \varepsilon]} + \frac{\varepsilon[1 - \frac{E(T_R)}{E(77 \text{ K})}]}{E(T_R) + \varepsilon} \quad (10)$$

注意到, 式 (10) 中右侧第 2 项中,  $\varepsilon \propto 10^7$ ,  $E \propto 10^{11}$ , 所以式 (10) 中的第 2 项从数量级上约为  $10^{-5} \sim 10^{-6}$ , 与第 1 项相比可忽略。因此, 式 (10) 进一步化简为:

$$\rho \cong \frac{\Delta l \cdot E(T_R)}{L[E(T_R) + \varepsilon]} = \rho_0(\varepsilon = 0) \frac{E(T_R)}{E(T_R) + \varepsilon} \quad (11)$$

其中,  $\rho_0 = \Delta l/L$ 。由式 (11) 可知, 在负载一定的情况下, 样品的收缩率分别与负载为零时的收缩率  $\rho_0$  及室温下的杨氏模量有关。由于单芯超导电缆的主要受力机构为铜衬芯, 2 个实验样品的  $\rho_0$  可认为几乎相等的。因此, 2 个样品收缩率的差异就主要来自于室温杨氏模量的差别。由于在室温下, 单芯超导电缆的杨氏模量比铜衬芯的大, 因此由式 (11) 可知, 电缆样品的收缩率比铜衬芯的略大, 如实验结果所示。

## 4 结 论

1) 铜衬芯和单芯超导电缆在室温及 77 K 下的加载曲线和卸载曲线并不重合, 推测其原因可能与实验样品的主要受力部分为经过绞制工艺的型线有关, 具体原因待后续进一步研究。

2) 铜衬芯室温下的杨氏模量为 148 GPa, 液氮温

度 (77 K) 下的杨氏模量为 157 GPa; 单芯超导电缆室温下的杨氏模量为 196.22 GPa, 在 77 K 下杨氏模量的值为 239.33 GPa, 铜衬芯和单芯超导电缆在 77 K 下的杨氏模量比室温下的杨氏模量大。而单芯超导电缆在 2 个温度下的杨氏模量均大于铜衬芯的杨氏模量, 造成此现象的部分原因, 可能与超导电缆本身的结构有关。

3) 铜衬芯与超导电缆从室温降温至 77 K 时的收缩率分别约为 0.28% 和 0.29%, 单芯超导电缆的收缩率略大于铜衬芯的收缩率, 这主要是由于单芯超导电缆的杨氏模量大于铜衬芯的杨氏模量所致。

4) 利用机械拉伸性能实验以及收缩率测量实验得到的结果, 可为后续各种超导电缆工程的电缆敷设提供一定的理论指导, 也为工程所需考虑的设计余量提供一定的参考。

#### 参考文献 References

- [1] De S T B W, Kottonau D, Bock J *et al.* *IEEE Trans Appl Supercond*[J], 2018, 28(4): 5 400 105
- [2] Kim W J, Kim S H, Yang D G *et al.* *IEEE Trans Appl Supercond*[J], 2016, 26(4): 5 402 504
- [3] Bumby C W, Badcock R A, Long N J. *IEEE Trans Appl Supercond*[J], 2013, 23(3): 4 801 805
- [4] Miyoshi K, Mukoyama S, Tsubouchi H *et al.* *IEEE Trans Appl Supercond*[J], 1999, 9(2): 428
- [5] Mukoyama S, Maruyama S, Yagi M *et al.* *Cryog*[J], 2005, 45: 11
- [6] Takigawa H, Yumura H, Masuda T *et al.* *Physica C*[J], 2007, 463-465: 1127
- [7] Masuda T, Yumura H, Watanabe M. *Physica C*[J], 2008, 468: 2014
- [8] Yumura H, Ohya M, Ashibe Y *et al.* *J Phys: Conf Ser*[J], 2010, 234: 032 069
- [9] Schmidt F, Maguire J, Welsh T *et al.* *Physics Procedia*[J], 2012, 36: 1137
- [10] Wang B Z, Yang N, Hu Z H *et al.* *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng*[J], 2019, 490: 072 031
- [11] Ren Anlin(任安林), Xi Haixia(席海霞), Xing Ying(信 赢). *International Electric Power for China*(国际电力)[J], 2005, 9(3): 59
- [12] Ying Qiliang(应启良), Huang Chongqi(黄崇祺), Wei Dong(魏东). *Electric Wire & Cable*(电线电缆)[J], 2003(5): 3
- [13] Zhang Junlian(张俊莲), Jin Jianxun(金建勋). *Central China Electric Power*(华中电力)[J], 2006, 19(6): 16
- [14] Hu Yi(胡 毅), Tang Yuejin(唐跃进), Ren Li(任 丽) *et al.* *High Voltage Engineering*(高电压技术)[J], 2007, 33(7): 1
- [15] Ying Qiliang(应启良). *Electric Wire & Cable*(电线电缆)[J], 2009(2): 7
- [16] Zhang Zhiyong(张智勇), Zong Xihua(宗曦华), Zhang Xize(张喜泽) *et al.* *Electric Wire & Cable*(电线电缆)[J], 2009(5): 9
- [17] Guo Lijie(郭立杰). *Stability Study of Cold Dielectric High Temperature Superconducting Cable*(冷绝缘高温超导电缆的稳定性研究)[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012
- [18] Wei Dong(魏 东), Zong Xihua(宗曦华), Xu Cao(徐 操) *et al.* *Electric Wire & Cable*(电线电缆)[J], 2015, 37(1): 1
- [19] Li Honglei(李红雷), Lin Yi(林 一), Huang Xingde(黄兴德). *Power & Energy*(电力与能源)[J], 2017, 38(3): 255

## Mechanical Extension Property of High-Temperature Superconducting Cable at Room Temperature and 77 K

Huang Yijia<sup>1</sup>, Zheng Jian<sup>2</sup>, Chen Zhiyue<sup>1</sup>

(1. Shanghai Electric Cable Research Institute Co., Ltd, Shanghai 200093, China)

(2. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

**Abstract:** In order to investigate the mechanical extension property of high-temperature superconducting (HTS) cable at room temperature and 77 K, the mechanical extension properties were studied of 10 m HTS cable and 10 m copper core at room temperature and 77 K. The stress-strain curves and Young's modulus of the samples at corresponding temperature were obtained by experiments. Meanwhile, the contraction of 10 m HTS cable and 10 m copper core was investigated in a cooling process from room temperature to 77 K with tensile load of 2000 kg. The experimental results could provide references to the determination of margin of cable-laying.

**Key words:** high-temperature superconducting cable; mechanical extension property; stress-strain relationship; Young's modulus; contraction rate

Corresponding author: Huang Yijia, Master, Superconducting Project Technologies Research Centre, Shanghai Electric Cable Research Institute Co., Ltd, Shanghai 200093, P. R. China, E-mail: huangyijia@secr.com