

# 电动汽车电池用电缆结构的材料设计与选用

彭立沙<sup>1</sup>, 王志辉<sup>2</sup>, 廖锦仁<sup>2</sup>, 叶永盛<sup>2</sup>, 邓腾飞<sup>2</sup>, 马平<sup>2</sup>, 李锻能<sup>2</sup>

(1. 广东南洋电缆有限公司, 广东 广州 5107002; 2. 广东工业大学机电学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 传统电线的隔离层材质是 PVC、橡胶线、XLPE, 但其电性能和机械性能不适应电动汽车用线的使用和安装。经过对电动汽车电池用电缆结构的材料优化设计和选用, 使其在柔韧性、耐磨性、耐化学药品、耐油、耐高温性能上都具有优良的表现。同时该用线相对来说轻便, 易于安装, 机械性能和电气性能都可以达到 ISO6722 C 级 125℃ 线缆性能指标的要求。

**关键词:** 电动汽车; 高压用线; 辐照工艺; 电缆绝缘

中图分类号: TM201.4

文献标志码: B

文章编号: (2020) 03-03-04

## Structure design and material selection of cable used in electric car battery

PENG Lisha<sup>1</sup>, WANG Zhihui<sup>2</sup>, LIAO Jinren<sup>2</sup>, YE Yongsheng<sup>2</sup>, DENG Tengfei<sup>2</sup>, MA Ping<sup>2</sup>, LI Duanneng<sup>2</sup>

(1. Guangdong Nanyang Cable Co., Ltd. Guangdong Guangzhou 5107002; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangdong Guangzhou 510006)

**Abstract:** Traditional wire insulation layer material includes PVC, rubber wire, XLPE, but their electrical and mechanical properties are not suitable for the use and installation of electric vehicle wires. The optimized design of high-voltage cables in electric vehicles have excellent performance in flexibility, abrasion resistance, chemical resistance, oil resistance and temperature resistance. At the same time, the cable is relatively light and easy to install, its mechanical and electrical properties can meet the requirements of ISO6722 C-class 125℃ cable performance indicators.

**Keywords:** electric vehicle; high voltage wire; irradiation process; cable insulation

国内以电动汽车为代表的新能源车, 在政府政策的大力扶持下取得了长足的发展<sup>[1]</sup>。随着电动汽车产业的稳步发展, 车内能源传输系统越来越受到各大汽车整机厂商的关注, 各大线缆厂家和认证机构都纷纷投入到电动汽车电池高压用线的产品研发中。而电动汽车电池的高压用线用于连接高电压电池、逆变器、空调压缩机、三相发电机和电动机, 是动力电能传输的关键部件, 其设计和生产技术直接影响电动汽车行驶的安全性和可靠性。

本文参考了本公司内部企业标准 Q/GZNY 22—2019<sup>[2]</sup>、常用的行业标准和相关的文献, 并且结合公司自身实际生产经验, 对电动汽车电池高压用线的功能结构设计、工艺设计等方面进行介绍,

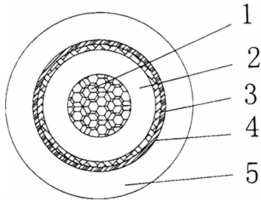
指出在相关环节中需要注意的问题。

## 1 电动汽车电池高压用线简介

### 1.1 高压用线的性能需求与基本结构

电动汽车电池高压用线的耐压等级和载流量与传统汽车相比要高出数倍甚至数十倍。为了保障电动汽车安全运行和有效工作, 电动汽车高压用线需要满足额定电压 AC 600 V/DC 900 V 及以上电压等级的电缆, 额定温度也要达到 125 - 250℃ 才能满足组件发热的基本要求。由于其使用场合的特殊性和危险性, 电缆需要满足耐高低温、阻燃、耐油、耐酸碱、耐摩擦、电磁屏蔽效果等性能要求, 并能达到高电流、高电压和柔韧度要求。本文所研究的电动汽车电池高压用线的设计主要参照 Q/GZNY 22—2019 标准, 其规定了高压用线额定电压为 AC

1000 V/DC 1500 V 及以下，载流量达 250 A 以上，电缆主要部件普遍采用 150℃ 耐温等级材料，高压用线的基本结构如下图 1 所示。



1 - 导体 2 - 绝缘 3 - 屏蔽 4 - 铝箔 5 - 护套

图 1 电动汽车电池高压用线结构图

## 1.2 高压用线的标准化现状

近年来，随着电动汽车产业的蓬勃发展，电动汽车应用的高压电缆不断在电压、温度、工作寿命和屏蔽效果等方面提出新的挑战，因此建立和发展新的电缆标准才能满足供应商、线束厂以及主机厂的迫切需要。

目前国内高压电缆最常参照的标准有 ISO 6722 和 ISO 14572，它的大多数要求对于 600 V 电缆还是通用的，但是当电压等级提高至 1000 V 或者 1500 V 以上就不适用了。而美国 SAE 重新调整了 SAE J1654 高压电缆的要求，涵盖了 600 V - 1000 V 的额定电压范围，且新创建尚未发布的标准 SAE J2840 将定义为屏蔽类型的电缆。欧洲的 LV 目前也推出了额定电压 600 V 的电动汽车高压电缆标准 LV 216，涵盖单芯和多芯的屏蔽电缆。

为规范国内新能源汽车产业发展，增质增效，由国家电线电缆质量监督检验中心（江苏）提出，我公司联合多家与行业密切相关的著名公司共同起草了 T/CAS 356 - 2019《新能源电动汽车用高压电缆》行业标准文件<sup>[3]</sup>，对电缆的电压、温度和屏蔽效果等指标进行了规定，个别指标对比如下表 1 所示。

表 1 各标准相关指标对比表

项目	本标准	ISO	
		6722/14572	LV 216
额定电压	AC600 V/DC900 V AC1000 V/DC1500 V	60 V 600 V	600 V AC 1000 V DC
工作温度	125 - 250℃	85 - 250℃	180℃
屏蔽效率	屏蔽层电阻、转移阻抗和屏蔽衰减	有 (无要求)	有 (无要求)
绝缘体积电阻率	额定工作温度时 900 V10 <sup>11</sup> 1500 V10 <sup>12</sup>	70℃时 10 <sup>9</sup>	70℃时 10 <sup>13</sup>

## 2 高压用线的功能结构设计

### 2.1 导体

电缆导体的设计主要根据电缆的传输容量、安装方式、使用环境等相关技术要求来进行。电缆的传输容量上，主要考核了传输大电流的能力（载流量），在设计时考虑了导体的类型、电阻、允许最高温度和环境参数（如环境温度等）。

根据 Q/GZNY 22—2019 标准中的技术要求，电缆导体选材采用裸软圆铜线或镀锡软圆铜线，符合标准 GB/T 3953 - 2008 规定，绞合而成的导体应符合 GB/T 3956 - 2008 第五类和第六类导体规定。之所以选择国标第六类软导体（单根铜丝伸长率必须大于 25%，单丝直径小于 0.30mm），是因为要保证单丝拥有优良的柔韧性能。同时导体加工时还采用了传统的束丝、复绞等生产工艺（特别注意导体绞合时必须退扭消除内应力防止线材扭转过程中开裂），以确保导体的圆整和柔软。另外导体直流电阻应符合表 2 的规定，此处引用了 GB/T 25085 - 2010<sup>[4]</sup>标准中的表 5，数据严于 GB/T 3956 - 2008 标准中软导体的导体电阻要求。

表 2 导体电阻

导体规格	20℃ 单位长度最大导体电阻 (mΩ/m)	
	裸铜	镀锡铜
1.5	12.7	13.0
2.5	7.60	7.82
4	4.71	4.85
6	3.14	3.23
10	1.82	1.85
16	1.16	1.18
25	0.743	0.757
35	0.527	0.538
50	0.368	0.375
70	0.259	0.264
95	0.196	0.200
120	0.153	0.156

### 2.2 绝缘

绝缘是电线电缆必不可少的一部分，绝缘材料的作用是在电气设备中把电势不同的带电部分隔离开来，因此绝缘材料应具有较高的绝缘电阻和耐压强度，并能避免发生漏电、击穿等事故。其次，绝缘材料需要具备良好的耐热性能，避免因长期过热而老化变质；此外，还应有良好的导热性、耐潮

性、较高的机械强度以及良好的加工工艺性等特点。对电动汽车内高压用线而言，绝缘材料还要有其它的一些对应性特点，如：电缆整体要柔软，易于弯曲，具有良好的加工性能等。

通过对常用的车内用线的绝缘材料试样和性能实验发现以下各方面特点：传统聚氯乙烯材料（PVC）热稳定性和抗冲击差，且是有卤产品，不够环保；硅橡胶材料制作工艺复杂，机械强度较差；乙丙橡胶材料硫化速度慢，与其它不饱和橡胶并用难，自粘和互粘性都很差，故加工性能不好；交联聚乙烯材料耐热粘连性能较差，硬度较大；TPE（热塑性弹性体）材料的特性比较适合电动汽车线材设计要求，但是该材料不耐高温，温度高于80℃以后，材料性能下降明显。

对上述国内外常用的绝缘材料进行大量对比和试验，认为很多都不适宜在电动汽车车内使用，如表3所示。本文则是以TPE为研究基础，结合辐照加工工艺改善TPE耐温较差的缺点。辐照加工技术的基本原理就是利用高能射线照射物质或材料而产生的物理、化学及生物效应，实现对物质或材料的加工处理<sup>[5]</sup>。目前主要利用放射性同位素（如钴-60、铯-137等）放射出的 $\gamma$ 射线和电子加速器产生的高能电子束或韧致辐射（X射线）实现辐照加工。

表3 车用电缆专用绝缘材料的性能参数

性能名称	XLTPE	PVC	EPDM	XLPE	TPV	TPE
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.10	1.45	1.55	1.35	1.30	1.10
抗拉强度 (MPa)	10.3	10.3	8.27	13.8	10.3	8.27
伸长率 (%)	200	200	300	300	300	300
体积电阻率 ( $\Omega \cdot M$ )	10 <sup>10</sup>	10 <sup>10</sup>	6 × 10 <sup>13</sup>	10 <sup>16</sup>	10 <sup>14</sup>	10 <sup>10</sup>
相对介电常数 (20℃, 50 Hz)	2.50	7	3.25	2.30	2.32	2.50
击穿强度 (MV/m)	30	23	28	35	28	30
长期使用 温度(℃)	125	105	150	125 <sup>[4]</sup>	125	105
脆化温度(℃)	-50	-40	-50	-40	-60	-50
耐水性	优	优	优	优	优	优
耐气候性	优	优	优	差	优	优
耐热老化性	优	可	优	优	优	优

(续表3)

性能名称	XLTPE	PVC	EPDM	XLPE	TPV	TPE
耐热变形性	优	可	良	优	可	可
耐油性	优	优	差	良	优	优
阻燃性能	优	优	良	优	优	良

采用经电子加速器进行加速的电子束或经变换产生的X射线来进行工业辐照加工，效率高、功率大，束流和能量可调，射线利用率高，易于启闭<sup>[6]</sup>。与钴源的不间断辐射不同，电子加速器关机后无辐射、无能源消耗。电子加速器的线缆辐照示意图如图2所示，图3和图4分别为电子加速器实物图和对应的操作及束下监控平台。



图2 电子加速器线缆辐照示意图



图3 电子加速器 图4 操作及束下监控平台

试验结果发现TPE材料通过辐照以后，耐热性得到了显著提高，机械性能也有所增强，能较好地弥补TPE材料的不足缺点，极易加工，阻燃性能也得到明显改善，单根垂直燃烧测试效果良好，是较为理想的电动汽车电池高压用线的绝缘材料。

### 2.3 屏蔽

电缆传输大电流时对车内其他信号线和器材（导航、多媒体、电子控制、自动驾驶等）将产生大干扰，会影响各种信号的传播，如声信号出现杂

音, 视频信号失真等现象, 对于以上问题, 车内高压用线要通过屏蔽结构解决。

通常屏蔽结构有纵包屏蔽、绕包屏蔽和编织屏蔽三种。电缆在汽车内部布线时需要经常弯曲和移动, 电缆屏蔽应具有柔软性和高可靠性, 而以上三种屏蔽结构中编织屏蔽的结构性能最稳定, 因此本文中研究的电缆屏蔽采用编织屏蔽结构。在设计中, 我们一般采用线径为 0.10 mm、0.12 mm、0.15 mm、0.16 mm、0.20 mm 的单丝镀锡铜或多股不镀锡裸铜进行 16 锭、24 锭和 36 锭交叉网状编织, 要求编织均匀、无断丝、无跳股和无毛刺等, 编织密度一般要求大于 80%。编织层覆盖密度按公式 (1) 计算:

$$P = (2\rho - \rho^2) \times 100 \quad (1)$$

式中:

$P$ ——编织层覆盖密度, %;

$\rho$ ——单向覆盖系数。

单向覆盖系数按公式 (2) 计算:

$$\rho = \frac{m \times n \times d}{\pi \times D} \left( 1 + \frac{\pi^2 \times D^2}{L^2} \right)^{1/2} \quad (2)$$

式中:

$D$ ——编织层的节圆直径, mm;

$d$ ——编制铜线的直径, mm;

$m$ ——编织机同一方向的锭数;

$n$ ——每锭的编织线根数;

$L$ ——编织节距, mm。

在编织过程结束后, 将铝箔按固定的绞距绕包在编织层上 (铝箔面向内, 重叠率大于 25%), 进一步加强线缆传输电能时的屏蔽效果, 同时防止弹性体材料压出时渗入到编织纹路内, 从而导致无法剥皮或编织时个别突出的毛刺扎破护套导致耐压试验时击穿, 产生安全隐患。

## 2.4 护套

电缆护套指的是电缆的最外层, 起到隔离内部绝缘层等与外界的接触, 防止绝缘受潮, 使内部不受机械伤害等作用。因此, 电缆在使用过程中对护套材料有严格的要求。目前其材质的选择多种多样, 有 TPE、TPU、NBR + PVC、氯丁橡胶、TPV 等。PVC 线耐温只能达到 105℃, 不适应电动汽车电机工作时的高温环境。橡胶线加工工艺复杂, 且抗张强度基本在 3.5 Mpa 左右, 机械性能较差。TPE 材料的耐热性不好, 随着温度上升其物理性能下降幅度较大, 因而适用范围受到限制。同时传统

材料的压缩变形、弹性回复、耐磨、耐撕裂性能都达不到电动汽车车内的安装使用要求。

当前电动车起火现象经常发生, 为了保证产品安全, 产品的阻燃性能不能忽略, 电缆的单根垂直燃烧测试必须优良, 在充分考虑上述因素的情况下, 我们产品护套选择使用 TPV 材料, 几款挑选的护套材料的性能对比可参照表 3。

从表中对比分析可以看出该 TPV 护套材料, 性能比一般材料在机械性能、电气性能上数据更好, 同时其具有优异的柔软性, 耐磨性, 耐温性。特别是在耐磨耐撕裂 (可以达到 40 N/mm)、耐油、耐水等性能上是其它材料无法比拟的。另外该材料易于加工, 不需要硫化、辐照等特殊工艺就可以通过 ISO 6722 标准中 C 级材料从 -40℃ 到 125℃ 且时长为 3000 小时的测试。与此同时, 该材料的密度仅为 1.1 g/cm<sup>3</sup>, 是普通材料的 70% 左右, 这样电缆会更加轻便、耐用。

## 3 结语

传统电缆隔离层材质是 PVC、橡胶线、XLPE, 但其电性能和机械性能不适应电动汽车用线的使用和安装。本文设计的电动汽车车内高压线, 在柔韧性、耐磨性、耐化学药品、耐油、耐温等性能上都具有优良的表现。同时该线相对来说轻便, 易于安装, 机械性能和电气性能都可以达到 ISO6722 C 级 125℃ 线缆性能指标的要求。该高压用线已经开始在国内多家整车内电池部位开始使用, 我们希望不断积累使用经验, 进一步地提高产品同整机的默契程度。

## 参考文献:

- [1] 夏德建. 电动汽车研究综述 [J]. 能源技术经济, 2010, 22 (07): 49-55.
- [2] Q/GZNY 22—2019 《额定电压 AC 1000 V/DC 1500 V 及以下电动汽车车内用高压电缆》
- [3] T/CAS 356—2019 《新能源电动汽车用高压电缆》
- [4] GB/T 25085—2010 道路车辆 60 V 和 600 V 单芯电线
- [5] 张珊珊. 高能辐射接枝在纺织品改性方面的研究进展 [J]. 现代纺织技术, 2012, 20 (05): 56-60.
- [6] 柴万东, 肖家浩, 张子民. 低能宽幅电子束引出特性研究 [J]. 原子核物理评论, 2016, 33 (04): 433-436.

作者简介: 彭立沙, 男, 1987 年 9 月出生, 籍贯湖南, 大专学历, 中级机械工程师职称, 当前致力于电力电缆及新能源系列电缆的研发, 当前已发论文 2 篇。

项目信息: 广州市科技计划项目—新能源汽车内部用高压电缆的研发与产业化 项目编号: 201802010049