

电线电缆专业系列教材

# 橡皮绝缘电缆产品 技术及制造工艺

李冬梅 主编  
朱爱荣 主审

机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



电线电缆专业系列教材

# 橡皮绝缘电缆产品技术 及制造工艺

主编 李冬梅  
参编 解向前 胡学朝 刘仁卿  
熊巍 陈学武  
主审 朱爱荣



机械工业出版社

本书由经验丰富的橡皮绝缘电缆产品工程师、技术专家和专业课讲师联合编写。本书内容与企业生产实际接轨,详细介绍了橡皮绝缘类电线电缆产品的技术性能特征及生产制造工艺要求。全书共分六章,主要内容包括橡皮绝缘电缆的结构与材料、常用橡皮绝缘电缆产品品种及标准要求、橡皮及其配方、橡胶加工方法、挤橡与硫化工艺、橡皮绝缘电缆主要生产工序的工艺质量要求。本书内容与企业生产实际紧密结合,书中的工艺规范、质量分析、生产过程记录等都有很强的实用性。

本书可作为技工院校、职业技术学校电线电缆制造技术专业教材,也可作为电线电缆相关行业从业人员及对电线电缆技术感兴趣的各类人员的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

橡皮绝缘电缆产品技术及制造工艺/李冬梅主编. —北京:机械工业出版社, 2017. 10

电线电缆专业系列教材

ISBN 978-7-111-58309-7

I. ①橡… II. ①李… III. ①电力电缆—电工橡胶—绝缘电缆—制造—教材 IV. ①TM247

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 253790 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:王晓洁 责任编辑:王晓洁

责任校对:潘蕊 封面设计:陈沛

责任印制:李昂

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2018 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 13 印张 · 314 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-58309-7

定价:46.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

# 前 言

橡皮是人类发现及应用最早的绝缘材料之一。橡皮材料作为电缆的绝缘及护套材料，赋予了产品在柔软性、弹性、耐磨、抗扭等方面不可替代的性能。橡皮绝缘电缆作为电线电缆产品的一大类型，在材料、工艺、特殊用途等方面具有独特的研究价值。橡皮绝缘电线电缆产品技术及制造工艺作为电线电缆制造技术专业的一门细分学科，对橡皮绝缘电缆从业人员具有一定的学习指导意义。

本书内容与企业生产实际紧密结合，书中的工艺规范、质量分析、生产过程记录等都有很强的实用性。全书共分六章，第一章介绍了橡皮绝缘电缆各层结构的技术要求及材料性能，可为产品设计提供一定的技术指导；第二章介绍了国内橡皮绝缘类电缆产品的主要类型及技术标准；第三章介绍了橡皮绝缘电缆中橡皮材料的性能、常用的橡胶种类及配方设计知识；第四章介绍了橡皮材料的生产制造工艺；第五章介绍了橡皮挤出与硫化工艺；第六章介绍了橡皮绝缘电缆的工艺流程及主要工序工艺质量要求，引用了一定数量的工厂常用的工艺卡片及工艺记录表格。

本书主编从事橡皮绝缘电缆制造工艺研究及教学二十多年，对如何进行理论教学及实践指导有比较深刻的体会。本书的参编人员来自国内在橡皮绝缘电缆生产中产品技术和生产能力都处于领先地位的大型企业，在橡皮绝缘电缆技术、生产方面都具有丰富的实践经验。本书由郑州电缆技工学校李冬梅主编，河北华通线缆股份有限公司刘仁卿、江苏江南电缆股份有限公司熊巍、扬州光明电缆股份有限公司胡学朝、中天科技装备电缆公司解向前、河南德威电缆股份有限公司陈学武参与了部分章节的编写工作。本书由河南德威电缆股份有限公司教授级高工朱爱荣主审。在本书编写过程中，得到了郑州电缆技工学校和上述多家电缆企业的大力帮助，在此向他们给予的热情帮助表示衷心的感谢！

在本书编写过程中，参考和借鉴了不少专家的相关著述，特别是原机械工业部郑州电缆厂教育培训中心的橡皮绝缘电缆制造工艺培训教材，在此向他们表示真诚的感谢！虽然在参考文献中做了列举，但难免有遗漏之处，敬请谅解。

本书涉及内容广泛，加之编者专业水平有限，其中难免有不妥或错误之处，敬请读者批评指正。

编 者

# 目 录

## 前 言

<b>第一章 橡皮绝缘电缆的结构与材料</b> .....	1
第一节 导体结构与材料 .....	1
第二节 橡皮绝缘结构与材料 .....	9
第三节 缆芯结构及填充包带材料 .....	11
第四节 护套结构与材料 .....	13
第五节 屏蔽结构与材料 .....	17
<b>第二章 常用橡皮绝缘电缆产品品种及标准要求</b> .....	19
第一节 额定电压 450V/750V 及以下橡皮绝缘电缆 .....	19
第二节 矿用电缆 .....	23
第三节 船用电缆及海工电缆 .....	29
第四节 风力发电用电缆 .....	38
第五节 轨道交通机车电缆 .....	40
第六节 其他特种橡皮绝缘电缆 .....	45
<b>第三章 橡皮及其配方</b> .....	56
第一节 电线电缆用橡皮的性能 .....	56
第二节 橡胶 .....	67
第三节 橡胶配合剂 .....	80
第四节 橡皮配方设计 .....	100
<b>第四章 橡胶加工方法</b> .....	110
第一节 橡胶加工工艺流程 .....	110
第二节 原材料准备及处理 .....	111
第三节 橡胶加工设备 .....	114
第四节 橡胶的塑炼 .....	134
第五节 橡胶的混炼 .....	141
第六节 滤橡冷却及停放 .....	150
第七节 混炼胶质量要求及质量检验 .....	152



第五章 挤橡与硫化工艺 .....	155
第一节 橡胶挤出和硫化设备 .....	155
第二节 挤橡工艺 .....	167
第三节 硫化工艺 .....	170
第四节 硫化工序质量要求及检验 .....	178
第六章 橡皮绝缘电缆主要生产工序的工艺质量要求 .....	183
第一节 产品工艺流程 .....	183
第二节 主要生产工序质量要求 .....	184
第三节 主要工序工艺卡片 .....	190
第四节 主要工序生产工艺记录 .....	196
第五节 主要工序常见质量问题、原因分析及处理方法 .....	198
参考文献 .....	201

# 第一章

## 橡皮绝缘电缆的结构与材料

橡皮绝缘电线电缆具有优良的柔软性、弹性、耐弯曲性，又具有较高的电气性能，特别是因具有其他电线电缆无法比拟的柔软性和较好的物理性能而得到广泛的应用。橡皮绝缘电线电缆大多用于移动、碾压、扭转或其他工作条件严酷的场所，如船舶、矿山、井下、机车车辆等。随着橡胶工业的发展，各类人工合成橡胶不断被开发研制出来，如硅橡胶、氯丁橡胶、乙丙橡胶、丁苯橡胶、氯磺化聚乙烯橡胶等。合成橡胶在电线电缆工业中的普遍应用，使橡皮绝缘电线电缆的性能大为改善，其除具有天然橡胶的固有优点外，又增加了耐油性、阻燃性、耐寒性、耐热性等各种优良的性能，从而使橡皮绝缘电线电缆的品种更加丰富、应用范围更加广泛，涉及国民经济的各个方面。

除少数橡皮绝缘电线电缆产品（如矿用电缆、机车车辆用电缆、直流高压电缆）工作电压较高外，绝大多数橡皮绝缘电线电缆产品的工作电压并不太高，但由于用电设备的工作环境和要求多种多样，因此对各种橡皮绝缘电线电缆产品的性能要求比较特殊而且差异很大。总体上来说，橡皮绝缘电线电缆产品的技术特性体现在柔软性、耐高温性、耐候性等方面，近年来对产品性能也提出了无卤阻燃及环保要求，材料的多样性要求，结构的微细化、超大化、组合化要求，在橡皮绝缘电线电缆向高压领域的发展与突破方面也提出了要求。

橡皮绝缘电线电缆和其他电线电缆一样，通常由三个基本结构构成，即导电线芯、绝缘层和护套层。部分应用在特殊场合的橡皮绝缘电缆还有金属屏蔽层或金属铠装层。

电线与电缆，从结构上讲，没有一个严格的界限。一般认为，单根的是线，绞合的是缆，但有时也把直径较小的绞合品种作为线对待。橡皮绝缘电线电缆常见结构如图 1-1 所示。

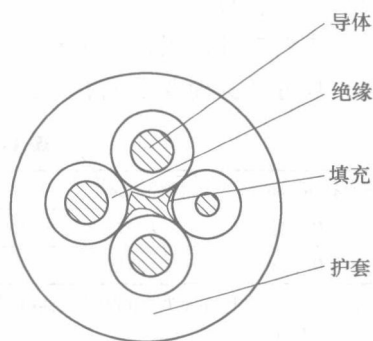


图 1-1 橡皮绝缘电线电缆常见结构

### 第一节 导体结构与材料

橡皮绝缘电线电缆的导电线芯是用来传导电流的，为了减少电能损耗，一般采用具有高电导率的金属材料制成，此外导体还应具有良好的力学性能（如较高的抗拉强度，一定的断后伸长率）及加工工艺性能。常用金属元素的性能见表 1-1。



表 1-1 常用金属元素的性能

名称	符号	密度 (20℃) /(g/cm <sup>3</sup> )	熔点 /℃	抗拉强度 /MPa	电阻率 /×10 <sup>-8</sup> Ω·m	电阻温度系数 /(×10 <sup>-3</sup> ℃ <sup>-1</sup> )
银	Ag	10.5	961.93	176	1.59	4.1
铜	Cu	8.89	1084.5	216	1.68	4.03
金	Au	19.3	1064.43	137	2.25	3.98
铝	Al	2.7	660.37	69~88	2.65	4.23
锌	Zn	7.14	419.58	108~147	5.9	4.17
镍	Ni	8.9	1455	392~490	7.24	5.21
铁	Fe	7.86	1541	245~324	9.7	6.57
锡	Sn	7.3	231.96	15~26	11.5	4.47
铅	Pb	11.37	327.5	10~30	20.65	4.22

从导电性和经济性综合考虑, 电缆导体常用的金属材料是铜和铝。

### 一、橡皮绝缘电缆导体的材料

通常橡皮绝缘电缆导体采用的是裸铜线和镀锡铜线。铝线由于强度及拉伸工艺性能差, 一般不用于橡皮绝缘电缆。随着铝合金技术的成熟, 铝合金导线及铝线的力学性能得到很大提高, 铝合金细丝也逐渐在橡皮绝缘电缆软导体中得到应用。近年来国外市场也有大量的铝线(铝合金丝)绞合导体的橡皮绝缘护套电缆订单。

#### 1. 橡皮绝缘电缆用铜圆线技术标准及基本性能要求

- 1) 执行标准: GB/T 3953—2009。
- 2) 型号: TR。
- 3) 主要电性能指标: 20℃最大电阻率 $\rho_{20}$ 为 $0.017241\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$ 。
- 4) 尺寸及其他要求见表 1-2。

表 1-2 电工圆铜线尺寸及其他要求

标称直径 $d/\text{mm}$	偏差/ $\text{mm}$	$f$ 值/ $\text{mm}$	标称直径 $d/\text{mm}$	偏差/ $\text{mm}$	$f$ 值/ $\text{mm}$
0.020~0.025	$\pm 0.002$	0.002	0.126~0.400	$\pm 0.004$	0.004
0.026~0.125	$\pm 0.003$	0.003	0.401~14.00	$\pm 1\% d$	$1\% d$

注: 1.  $f$ 值: 是指在垂直于圆铜线轴线的同一截面上测得的直径最大值和最小值之差, 其应不超过标称直径偏差的绝对值。

2. 外观: 圆铜线表面应光洁, 不得有与良好工业产品不相称的任何缺陷(工厂内控要求: 铜线表面要光洁, 不得有三角口、毛刺、裂纹、机械损伤、划痕等, 铜线表面不能氧化变黑)。

#### 2. 橡皮绝缘电缆用镀锡圆铜线技术标准及基本性能要求

- 1) 执行标准: GB/T 4910—2009。
- 2) 型号规格: TXR 镀锡软圆铜线、TXRH 可焊型镀锡软圆铜线。
- 3) 主要电性能指标见表 1-3。

表 1-3 镀锡圆铜线主要电性能指标

标称直径/ $\text{mm}$	电阻率 $\rho_{20}/(\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m})$	
	TXR	TXRH
$0.25 < d \leq 0.50$	0.01770	0.01793
$0.50 < d \leq 4.00$	0.01760	0.01775



4) 外观要求: 镀锡圆铜线的镀层应光滑连续, 不得有与良好工业产品不相称的任何缺陷 (工厂内控要求: 表面应光洁, 锡层应连续, 不得有氧化变色、露铜现象, 不允许有超过外径偏差要求的锡瘤及机械损伤等)。

### 3. 橡皮绝缘电缆用铝 (铝合金) 绞合导体要求

目前橡皮绝缘橡皮护套电缆用铝 (铝合金丝) 绞合导体的标称截面积为  $6\text{mm}^2$  及以上, 单丝标称直径为  $0.40\text{mm}$  或  $0.50\text{mm}$ 。为提高绞合导体的柔软性, 导体束丝后应对股丝进行退火处理。铝 (铝合金) 绞合导体直流电阻按 GB/T 3956—2008/IEC 60228—2004 《电缆的导体》中相应标称截面积铝 (铝合金) 导体电阻值考核。

## 二、橡皮绝缘电缆的绞合导体

橡皮绝缘电线电缆要具有良好的柔软性, 以满足制造工艺和不同场合的要求。通常为了使电芯具有较好的柔软性, 一般采用多根细单线复绞 (先束再绞) 而成。组成电芯的单线越细、根数越多, 则线芯越柔软。此外, 提高导体强度也是不能忽视的问题。有些特殊产品采用在导体中添加承载介质 (如尼龙丝) 的方法, 既可保证柔软性, 又能增加导体抗拉耐扭等力学性能。

导体截面的大小, 则要根据传输电流的大小而定, 务使导体发热较少而不致损坏绝缘层。

国家标准 GB/T 3956—2008 《电缆的导体》规定了电缆和软线用导体的各种技术参数, 标称截面积为  $0.5 \sim 2500\text{mm}^2$ , 并规定了单线根数、单线直径及其电阻值。导体共分四种: 第 1 种、第 2 种、第 5 种和第 6 种。第 1 种为实心导体, 第 2 种为绞合导体。第 1 种和第 2 种用于固定敷设电缆的导体。第 5 种 (软导体) 和第 6 种 (比第 5 种更柔软的导体) 导体用于软电缆和软电线, 也可用于固定敷设。

橡皮绝缘电线电缆一般要求比较柔软, 即使用于固定敷设场合, 也很少采用第 1 种导体, 只是在小截面积 (如  $6\text{mm}^2$  及以下) 的情况下才偶尔采用。用于固定敷设的橡皮绝缘电缆大多采用第 2 种中非紧压圆形导体, 以保持其最起码的柔软性。

在橡皮绝缘电线电缆中采用最多的是第 5 种和第 6 种导体。所有的橡皮绝缘软线, 通用橡套软电缆、矿用橡套软电缆等均采用第 5 种导体。电焊机电缆等采用第 6 种导体。

铝导体只用于第 1 种和第 2 种结构, 不用于橡皮绝缘电缆。

现将四种导体的结构和性能要求, 择要分列于表 1-4 ~ 表 1-7。

表 1-4 第 1 种单芯和多芯电线电缆实芯导体的结构和性能要求

标称截面积 / $\text{mm}^2$	最大外径/ $\text{mm}$	20℃时导体最大直流电阻/ ( $\Omega/\text{km}$ )		
		不镀金属	镀金属	铝芯
0.5	0.9	36.0	36.7	—
0.75	1.0	24.5	24.8	—
1	1.2	18.1	18.2	—
1.5	1.5	12.1	12.2	—
2.5	1.9	7.41	7.56	—
4	2.4	4.61	4.70	—
6	2.9	3.08	3.11	—
10	3.7	1.83	1.84	3.08
16	4.6	1.15	1.16	1.91

注: 1. 导体最大外径引自于 GB/T 3956—2008 标准中的附录。

2. 表中省略了很少使用的大截面 ( $25 \sim 1200\text{mm}^2$ ) 规格。



表 1-5 第 2 种单芯和多芯电线电缆圆形绞合导体的结构和性能要求

标称截面积 /mm <sup>2</sup>	导体中单线最少根数		最大外径 /mm	20℃时导体最大直流电阻/(Ω/km)		
	铜 芯	铝 芯		退火铜导体		铝或铝合 金导体
				不镀金属单线	镀金属单线	
0.5	7	—	1.1	36.0	36.7	—
0.75	7	—	1.2	24.5	24.8	—
1	7	—	1.4	18.1	18.2	—
1.5	7	—	1.7	12.1	12.2	—
2.5	7	—	2.2	7.41	7.56	—
4	7	—	2.7	4.61	4.70	—
6	7	—	3.3	3.08	3.11	—
10	7	7	4.2	1.83	1.84	3.08
16	7	7	5.3	1.15	1.16	1.91
25	7	7	6.6	0.727	0.734	1.20
35	7	7	7.9	0.524	0.529	0.868
50	19	19	9.1	0.387	0.391	0.641
70	19	19	11.0	0.263	0.270	0.443
95	19	19	12.9	0.193	0.195	0.320
120	37	37	14.5	0.153	0.154	0.253
150	37	37	16.2	0.124	0.126	0.206
185	37	37	18.0	0.0991	0.100	0.164
240	37	37	20.6	0.0754	0.0762	0.125
300	61	61	23.1	0.0601	0.0607	0.100
400	61	61	26.1	0.0470	0.0475	0.0778
500	61	61	29.2	0.0366	0.0369	0.0605
630	91	91	33.2	0.0283	0.0286	0.0469
800	91	91	37.6	0.0221	0.0224	0.0367

注：1. 导体最大外径引自于 GB/T 3956—2008 标准中的附录。

2. 表中所列导体均为非紧压圆形绞线。

表 1-6 第 5 种单芯和多芯电线电缆软铜导体结构和性能要求

标称截面积 /mm <sup>2</sup>	导体中 单线最 大直径 /mm	最大外 径/mm	20℃时导体最大 直流电阻/(Ω/km)		标称截面积 /mm <sup>2</sup>	导体中 单线最 大直径 /mm	最大外 径/mm	20℃时导体最大 直流电阻/(Ω/km)	
			不镀 金属	镀金属				不镀 金属	镀金属
(0.06)	0.11	—	366	384	16	0.41	6.3	1.21	1.24
(0.08)	0.13	—	247	254	25	0.41	708	0.780	0.795
(0.12)	0.16	—	158	163	35	0.41	9.2	0.554	0.565
(0.2)	0.16	—	92.3	95.0	50	0.41	11.0	0.386	0.393
(0.3)	0.16	—	69.2	71.2	70	0.51	13.1	0.272	0.277
(0.4)	0.16	—	48.2	49.6	95	0.51	15.1	0.206	0.210
0.5	0.21	1.1	39.0	40.1	120	0.51	17.0	0.161	0.164
0.75	0.21	1.3	26.0	26.7	150	0.51	19.0	0.129	0.132
1	0.21	1.5	19.5	20.0	185	0.51	21.0	0.106	0.108
1.5	0.26	1.8	13.3	13.7	240	0.51	24.0	0.0801	0.0817
2.5	0.26	2.6	7.98	8.21	300	0.51	27.0	0.0641	0.0654
4	0.31	3.2	4.95	5.09	400	0.51	31.0	0.0486	0.0495
6	0.31	3.9	3.30	3.39	500	0.61	35.0	0.0384	0.0391
10	0.41	5.1	1.91	1.95	630	0.61	39.0	0.0287	0.0292

注：1. 表中括号内数值摘自 GB 3956—1983，可供参考。

2. 导体最大外径引自于 GB/T 3956—2008 标准中的附录。



表 1-7 第 6 种单芯和多芯电线电缆软导体结构和性能要求

标称截面积 /mm <sup>2</sup>	导体中 单线最 大直径 /mm	最大外 径/mm	20℃时导体最大直流 电阻/(Ω/km)		标称截面积 /mm <sup>2</sup>	导体中 单线最 大直径 /mm	最大外 径/mm	20℃时导体最大直流 电阻/(Ω/km)	
			不镀 金属	镀金属				不镀 金属	镀金属
(0.012)	0.06	—	1466	1534	6	0.21	3.9	3.30	3.39
(0.03)	0.09	—	748	783	10	0.21	5.1	1.91	1.95
(0.06)	0.08	—	349	365	16	0.21	6.3	1.21	1.24
(0.12)	0.08	—	174	183	25	0.21	7.8	0.780	0.795
(0.2)	0.08	—	93.5	97.8	35	0.21	9.2	0.554	0.565
(0.3)	0.08	—	68.0	71.2	50	0.31	11.0	0.386	0.393
(0.4)	0.11	—	52.3	54.8	70	0.31	13.1	0.272	0.277
0.5	0.16	1.1	39.0	40.1	95	0.31	15.1	0.206	0.210
0.75	0.16	1.3	26.0	26.7	120	0.31	17.0	0.161	0.164
1	0.16	1.5	19.5	20.0	150	0.31	19.0	0.129	0.132
1.5	0.16	1.8	13.3	13.7	185	0.41	21.0	0.106	0.108
2.5	0.16	2.6	7.98	8.21	240	0.41	24.0	0.0801	0.0817
4	0.16	3.2	4.95	5.09	300	0.41	27.0	0.0641	0.0654

注：1. 表中括号内数值摘自 GB 3956—1983，可供参考。

2. 导体最大外径引自于 GB/T 3956—2008 标准中的附录。

### 三、绞合导体的技术参数及结构计算

#### 1. 绞合导体的技术参数

(1) 绞合节距 线沿绞线轴线一周所线平面前进的距离称为绞合节距；节距与绞线直径之比称为节径比或实用节距倍数；节距与绞线节圆外径之比称为理论节径（距）倍数，用  $m'$  表示。绞线实际外径与节圆外径如图 1-2 所示。

$$m = h/D \quad (1-1)$$

式中  $m$ ——节径比或实用节径（距）比；

$h$ ——节距（mm）；

$D$ ——绞线外径（mm）。

$$m' = h/D' \quad (1-2)$$

式中  $m'$ ——节径比或理论节径（距）比；

$D'$ ——绞线节圆外径（mm）。

$$D = D' + d \quad (1-3)$$

式中  $D$ ——绞线外径（mm）；

$D'$ ——绞线节圆外径（mm）；

$d$ ——单线外径（mm）。

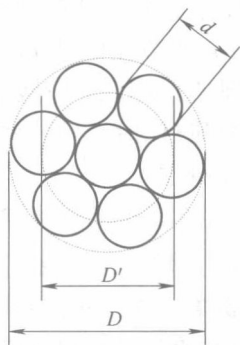


图 1-2 绞线实际外径与节圆外径

(2) 绞入系数、绞入率、螺旋线升角 绞入系数是指绞线在一个绞合节距内，单线实际长度与绞线节距之比，即

$$k = L/h \quad (1-4)$$

式中  $k$ ——绞入系数；



$L$ ——绞线中每一节距长度单线展开校直后的长度 (mm)。

在绞线中常采用平均绞入系数, 其数值为

$$k_m = \frac{n_0 k_0 + n_1 k_1 + n_2 k_2 + \dots + n_n k_n}{n_0 + n_1 + n_2 + \dots + n_n} \quad (1-5)$$

式中  $k_m$ ——平均绞入系数;

$n_0 \sim n_n$ ——各层单线根数;

$k_0 \sim k_n$ ——各层绞入系数。

绞入率是指一个节距内, 单线实际长度和绞线节距的差值与绞线节距之比, 即

$$\lambda = \frac{L - h}{h} \quad (1-6)$$

式中  $\lambda$ ——绞入率。

绞线中单线走向与绞线径向所形成的夹角称为绞线的螺旋线升角, 如图 1-3 所示。

螺旋线升角和绞线的节距有关, 即

$$\tan \alpha = h / [\pi(D - d)] = m' / \pi \quad (1-7)$$

式中  $\alpha$ ——螺旋线升角 ( $^\circ$ );

$d$ ——单线直径 (mm)。

### (3) 技术参数对绞线质量的影响

1) 若节径比小, 则绞线比较柔软, 绞合紧密, 生产效率低, 且由于绞入率增大, 材料消耗增大, 绞线单位重量也增大, 同时降低了绞线的电导率, 因为电流主要沿单线流通, 特别是当单线表面电阻较大时, 影响更大。另外我们知道, 单线在绞线横截面上不是正圆, 它的长轴随节距倍数的增大而加大, 如果节距倍数过小, 会造成个别单线拱起, 破坏绞线的圆整性和稳定性。

2) 当节径比过大时, 制造和使用时容易松股, 使绞合不紧密, 但是避免了节距过小造成的缺点。因此, 绞线节距倍数的确定, 要综合考虑绞线的柔软性、生产效率、电导率、结构的规则性和稳定性等要求。绞线的节径比在相应的生产工艺文件中各有规定, 内层节径比均大于外层。

### 2. 橡皮绝缘电缆用复绞线导体结构计算

#### (1) 确定复绞线结构的方法

**例 1:** 确定一个裸铜  $6\text{mm}^2$  第 5 种导体结构。

1) 查标准: 单丝最大直径  $0.31\text{mm}$  (计算时取  $0.30\text{mm}$ ), 直流电阻值  $3.30\Omega/\text{km}$ 。

2) 确定导体的设计截面积。

$$A = \frac{\rho_{20}}{R_{20}} k_1 k_2 k_3 \quad (1-8)$$

式中  $A$ ——线芯截面积 ( $\text{mm}^2$ );

$\rho_{20}$ —— $20^\circ\text{C}$  时线芯材料的电阻率 ( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ );

$R_{20}$ —— $20^\circ\text{C}$  时线芯材料的直流电阻 ( $\Omega/\text{m}$ );

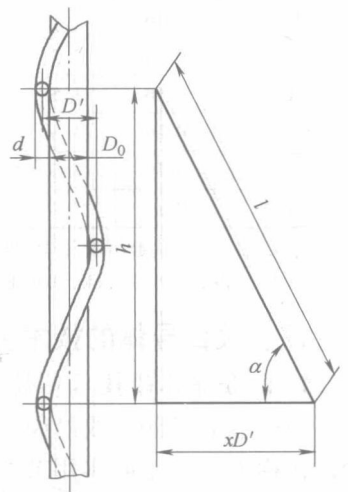


图 1-3 绞线中单线形成的螺旋线升角



$k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ ——导体加工中对电阻的影响因素。

$k$  值的确定:

$k_1$ ——考虑单根导线加工引起电阻率增加所引入的系数 (1.02 ~ 1.12), 与导线直径大小、金属种类、表面是否有涂层等有关 ( $\approx 1.04$ )。

$k_2$ ——考虑多根导线绞合使单线长度增加所引入的系数 (1.00 ~ 1.04)。实芯  $k_2 = 1$ , 紧压绞合线芯  $k_2 = 1.02$  (200mm<sup>2</sup>以下) ~ 1.03 (250mm<sup>2</sup>以上), 非紧压绞合线芯  $k_2 = 1.03$  (4层及以下) ~ 1.04 (4层以上)。

$k_3$ ——考虑成缆绞合使线芯长度增加所引入的系数 ( $\approx 1.03$ )。

计算导体的设计截面积。

$$A = \frac{0.017241}{3.30 \times 10^{-3}} \times 1.04 \times 1.03 \times 1.03 \\ = 5.764 (\text{mm}^2)$$

3) 确定导体的组成根数。

$$A = \frac{\pi d^2}{4} n k_m \quad (1-9)$$

式中  $d$ ——单丝直径 (mm);

$n$ ——绞线的单丝根数;

$k_m$ ——绞线的平均绞入系数 (复绞线一般取 1.015)。

计算组成绞线的根数  $n_0$ 。

$$n = \frac{4A}{\pi d^2 k_m} = \frac{4 \times 5.764}{3.14 \times 0.30^2 \times 1.015} \approx 81$$

4) 确定导体的绞合结构

束线根数: 总根数/股数。

股数: 按正规绞合方式确定, 一般为 1+6、3+9、5+11, 本结构取 7。

束线根数为:  $81/7 = 11.6$ , 取 12 根。

确定复绞线结构为: 7/12/0.30 (84/0.30)。

经工艺验证后即可确定。

(2) 计算复绞线的外径及结构用量

1) 束线外径的计算。束线过程中单线都是同方向不分层一次绞合而成的, 在线束中单线的相对位置不固定, 排列不规则, 线束的外形不一定是正圆, 单线间紧密相接, 束线的外径比同样根数的普通绞线略小, 一般取近似计算公式

$$D_{\text{束}} = k D_{\text{绞}} \\ k = 0.991 \sim 1.0 \quad (1-10)$$

也可按表 1-8 中的公式 (选自电缆手册) 计算束线的最小外径。

表 1-8 束线的最小外径计算公式

相当于绞线中心层的单线根数	束线最小外径/mm	公式编号
1, 6	$1.18 \sqrt{z} d$	(1-11)
2	$1.17 \sqrt{z} d$	(1-12)
3, 4, 5	$1.154 \sqrt{z} d$	(1-13)

注:  $z$ ——单线总根数;  $d$ ——单线直径 (mm)。



当束线的中心为单根导线时，束线外径也可按下式计算

$$D_{\text{束}} = \sqrt{\frac{4z-1}{3}}d \quad (1-11)$$

例 2：计算上题中的复绞线外径。

$$D_{\text{束}} = 1.154 \times \sqrt{12} \times 0.30 = 1.20(\text{mm})$$

2) 复绞线外径的计算。按普通正规绞合绞线外径计算，普通正规绞合绞线外径见表 1-9。

表 1-9 普通正规绞合绞线外径

中心层根数	结构数据	绞线层数						
		中心层	1	2	3	4	5	6
1	各层的单线根数	1	6	12	18	24	30	36
	绞线总根数	1	7	19	37	61	91	127
	绞线外径 $D/\text{mm}$	$1d$	$3d$	$5d$	$7d$	$9d$	$11d$	$13d$
2	各层的单线根数	2	8	14	20	26	32	38
	绞线总根数	2	10	24	44	70	102	140
	绞线外径 $D/\text{mm}$	$2d$	$4d$	$6d$	$8d$	$10d$	$12d$	$14d$
3	各层的单线根数	3	9	15	21	27	33	39
	绞线总根数	3	12	27	48	75	108	147
	绞线外径 $D/\text{mm}$	$2.15d$	$4.15d$	$6.15d$	$8.15d$	$10.15d$	$12.15d$	$14.15d$
4	各层的单线根数	4	10	16	22	28	34	40
	绞线总根数	4	14	30	52	80	114	154
	绞线外径 $D/\text{mm}$	$2.4d$	$4.4d$	$6.4d$	$8.4d$	$10.4d$	$12.4d$	$14.4d$
5	各层的单线根数	5	11	17	23	29	35	41
	绞线总根数	5	16	33	56	85	120	161
	绞线外径 $D/\text{mm}$	$2.7d$	$4.7d$	$6.7d$	$8.7d$	$10.7d$	$12.7d$	$14.7d$
6	各层的单线根数	6	12	18	24	30	36	42
	绞线总根数	6	18	36	60	90	126	168
	绞线外径 $D/\text{mm}$	$3d$	$5d$	$7d$	$9d$	$11d$	$13d$	$15d$

查结构计算复绞线外径，为

$$D_{\text{复绞}} = 3 \times 1.20 = 3.60(\text{mm})$$

3) 复绞线结构用量计算。

例 3：计算上题中的复绞线结构用量。

$$W = \frac{\pi}{4}d^2 n \rho k_m \quad (1-12)$$

式中  $W$ ——绞线的单位长度质量 ( $\text{kg}/\text{km}$ )；

$\rho$ ——绞线材质的密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )；

$d$ ——单丝外径 ( $\text{mm}$ )；

$n$ ——绞线总根数；

$k_m$ ——绞线的平均绞入系数。

计算绞线的结构用量。



$$W = \frac{3.14}{4} \times 0.30^2 \times 84 \times 8.89 \times 1.015 = 53.55 (\text{kg/km})$$

## 思考题

1. 橡皮绝缘电缆一般采用何种导体形式?
2. 橡皮绝缘电缆的导体有何特性要求? 结构特点体现在哪些方面?
3. 确定 16mm<sup>2</sup>复绞线第 5 种裸铜导体的结构并计算其外径及结构用量。

## 第二节 橡皮绝缘结构与材料

包在导体外面防止电流径向泄漏即起绝缘作用的橡皮层称为绝缘层。绝缘层是电线电缆的主要组成部分, 可保证产品具有良好的电气性能, 其结构和质量直接影响着电缆的使用寿命。

### 一、绝缘层结构设计

绝缘层的设计包括绝缘材料和结构(挤包型、绕包型、组合型)的选择, 以及绝缘层厚度的确定, 此外还必须确定加工工艺方法等。

#### 1. 绝缘材料的选择原则

根据产品的使用条件来选择绝缘材料时必须考虑以下几方面。

(1) 按性能要求选择材料 电气性能是选择材料首先要考虑的因素, 因为绝缘层的主要作用就是电绝缘, 但产品的电绝缘是指产品在足够长的使用期间内, 在受热、机械应力及其他因素致使绝缘老化, 以及各种使用条件(例如拉伸、弯曲、扭绞)的情况下, 仍须保证电性能不降低到产品所要求的最低指标的要求。因此, 必须考虑材料的其他有关性能, 以保证产品的电气性能。最后判断产品能否继续使用的指标, 仍然是以电气性能为主。

对于绝大多数橡皮绝缘电线电缆来说, 产品的工作电压不太高, 同时橡皮作为一种有机材料, 其耐热等级、热变形和长期热老化往往是选择绝缘材料最重要的因素。

绝缘材料的力学性能(抗拉强度、断后伸长率及柔软性)同样是重要的因素。对某些机械应力破坏较突出的场合所应用的产品, 机械应力主要由护套来承受, 但绝缘材料也应具有足够的机械强度。

(2) 材料的经济性和来源 在满足性能要求的前提下, 应该尽量采用国内能大量生产的廉价材料, 同时要充分贯彻有关材料的经济政策, 例如以合成材料代替天然材料, 节约棉麻丝绸, 以塑料作为铅的代用品等。

(3) 工艺上的方便与可能性 使其易于生产。

(4) 护套结构与材料 对于有护套结构的产品, 绝缘材料的选择应结合护套结构与材料来考虑。例如有护套的产品, 对绝缘的机械强度要求可略微降低。反之, 有的绝缘材料机械强度较差, 就应适当增加护套的厚度。

#### 2. 绝缘层厚度的确定

从电压等级来讲, 电压越高, 绝缘层越厚。对于高压产品, 绝缘层厚度主要根据电性能要求来进行设计, 同时在结构上还应考虑均匀内外电场的半导体层的设计。

对于低压电气装备用电线电缆, 在绝缘材料选定之后, 确定绝缘层厚度时, 电性能一般



不是主要的考虑因素，而是以力学性能为主，一般应考虑下列几点。

(1) 按力学性能来确定绝缘层厚度 产品在制造、安装敷设或使用中，会受到弯曲和拉力等，这样绝缘层会受到拉、压、弯、扭、剪切等机械应力的作用。而导线截面的大小对这些应力的数值影响很大。截面越大，弯曲应力越大，自重也大。因此在每一产品中，绝缘层厚度总是随着导电线芯截面的增大而增加的。为了方便，适当将其分成几档。

对低压产品来说，绝缘层在满足了力学性能的要求后，电性能也应相应得到满足。当产品的电压等级提高时，绝缘层厚度适当增加。如 1kV 级矿用电缆的绝缘层比 500V 级的要稍厚一些。

导电线芯的柔软度与绝缘层厚度的确定也有关系，柔软的导电线芯，弯曲时应力小些，但因为柔软型的产品均用于经常移动弯曲的场合，因此一般不再减薄绝缘层厚度。

材料的力学性能较好，就可适当减薄绝缘层厚度。

(2) 绝缘层的最薄厚度 应考虑到两方面的因素：一是工艺上的可能性；二是长期老化因素。同样的材料，绝缘层薄，则老化损坏快些，一般最薄的橡皮绝缘电线绝缘层，厚度不小于 0.3mm。

(3) 同样电压等级而有护套结构的产品 从电性能角度考虑，绝缘层厚度可以相应减薄些，但考虑到某些产品经常移动，对安全性要求较高，实际上并不一定减薄。

(4) 对安全性要求特别高的产品 可适当加厚绝缘层厚度。

目前，各类产品绝缘层厚度具体数值的确定，主要是据实际数据和试验数据，在这些数据基础上，可以做出有关的经验计算公式。

### 3. 绝缘结构考核指标的规定

(1) 标称厚度 标准或技术规范中规定的厚度。

(2) 最小厚度 一般要求不小于标准厚度的 90% - 0.1mm。

(3) 平均厚度 通常指包含最薄点在内的 6 点平均值，一般要求不小于标称厚度值。

(4) 偏心度 最大厚度与最小厚度之差与最大厚度的比值。

(5) 绝缘线芯不圆度 测量截面处最大外径与最小外径之差。

上述具体指标的测量要求及考核要求按具体产品标准执行。

## 二、绝缘用橡皮材料

绝缘用橡皮的性能和质量对电线电缆的使用性能影响极大。绝缘橡皮应具有较好的电绝缘性能，物理力学性能和老化性能。国家标准 GB 7594—1987《电线电缆橡皮绝缘和橡皮护套》规定了四类绝缘橡皮型号，绝缘橡皮性能符合表 1-10 的要求。

这里特别提醒注意：取决于混合胶组分的技术要求由材料标准中规定的型号及性能考核。某些产品标准不采用 GB 7594—1987 中规定的橡皮型号，要按照具体产品标准中规定的型号及性能要求对绝缘结构性能进行考核。

表 1-10 绝缘橡皮性能要求

序号	项 目	单 位	技 术 要 求			
			XJ-00	XJ-10	XJ-30	XJ-80
1	老化前试样					
1.1	抗拉强度，中间值，最小	MPa	5.0	5.0	4.2	5.0



(续)

序号	项 目	单 位	技 术 要 求			
			XJ-00	XJ-10	XJ-30	XJ-80
1.2	断裂伸长率: 中间值, 最小	%	250	250	200	150
2	空气箱热老化试验					
2.1	老化条件:					
2.1.1	温度	℃	75 ± 2	80 ± 2	135 ± 2	200 ± 2
2.1.2	时间	h	10 × 24	10 × 24	7 × 24	10 × 24
2.2	老化后抗拉强度:					
2.2.1	中间值, 最小	MPa	4.2	4.2	—	4.0
2.2.2	最大变化率	%	± 25	± 25	± 30	—
2.3	老化后断裂伸长率:					
2.3.1	中间值, 最小	%	250	250	—	120
2.3.2	最大变化率	%	± 35	± 35	± 30	—
3	热延伸试验					
3.1	试验条件					
3.1.1	温度	℃	200 ± 3	200 ± 3	250 ± 3	200 ± 3
3.1.2	载荷时间	min	15	15	15	15
3.1.3	机械应力	N/cm <sup>2</sup>	20	20	20	20
3.2	载荷下断裂伸长率: 最大	%	175	175	175	175
3.3	冷却后永久变形, 最大	%	25	20	15	25
4	适用的导体长期工作温度	℃	65	70	90	180

## 思 考 题

1. 橡皮绝缘材料的选择依据是什么?
2. 确定橡皮绝缘电缆绝缘层厚度主要考虑哪些因素?
3. 目前绝缘橡皮的国家标准是哪个? 规定了哪些绝缘橡皮型号?
4. 产品绝缘结构所考核的指标主要有哪些?

## ◇◇◇ 第三节 缆芯结构及填充包带材料

### 一、橡皮绝缘电缆的成缆及要求

成缆的定义: 将多根绝缘线芯按一定规则绞合在一起的工艺过程称为成缆 (绝缘线芯的标志采用分色或打号)。

成缆的目的: 满足使用中对多芯的要求; 多芯经成缆后, 线芯结构稳定; 增加电缆的柔软性。

成缆方向: 橡皮绝缘电缆成缆最外层方向为右向, 多层成缆时为了结构稳定, 大多是相邻层成缆方向相反; 有时为了增加电缆的柔软性而采用内、外层同向成缆。

橡皮绝缘电缆因使用中柔软性及弯曲性的要求, 必须采用带退扭机构的成缆机进行成缆。所谓退扭是指借助退扭装置始终使放线盘处于水平摆放状态, 单线或绝缘线芯不发生扭