

高等学校试用教材

# 电气绝缘结构设计原理

上册

电力电缆

西安交通大学 刘子玉 编



机械工业出版社

# 目 录

第一章	绪论	1
第二章	电力电缆各组成部分结构及其材料的性能	3
§ 2-1	线芯结构及其材料的性能	3
§ 2-2	绝缘层结构及其材料的性能	18
§ 2-3	护层结构及其材料的性能	50
第三章	电力电缆的典型结构	60
§ 3-1	粘性型浸渍纸绝缘电力电缆	60
§ 3-2	充油电缆	70
§ 3-3	充气电缆	77
§ 3-4	橡皮、塑料绝缘电力电缆	79
§ 3-5	管道充气电缆	86
§ 3-6	低温及超导电缆	88
第四章	电力电缆的电气参数、电磁损耗和电磁力	93
§ 4-1	线芯电阻	93
§ 4-2	电缆的电感	95
§ 4-3	电缆的绝缘电阻	105
§ 4-4	电缆的电容	107
§ 4-5	电缆金属护套中感应电势	109
§ 4-6	电缆金属护套及铠装中的损耗	119
§ 4-7	电缆中的电磁力	131
第五章	电缆绝缘层与护层厚度的确定	139
§ 5-1	电缆绝缘层中电场分布	139
§ 5-2	电力电缆在运行中承受的电压	155
§ 5-3	电缆绝缘层击穿强度的统计理论	163
§ 5-4	电缆绝缘层厚度的确定	166
§ 5-5	电缆护套及铠装厚度的确定	179
第六章	电力电缆稳态发热特性	183
§ 6-1	电缆发热方程及等值热路	183
§ 6-2	电缆绝缘层热阻	188
§ 6-3	电缆护层热阻	193
§ 6-4	电缆周围媒质热阻	194
§ 6-5	电缆连续额定载流量的计算	204
§ 6-6	影响电缆载流量的某些因素	210
§ 6-7	电缆的热稳定性	214
§ 6-8	强迫冷却电缆	218
第七章	电缆暂态发热特性及充油电缆供油系统设计	227
§ 7-1	裸电线的暂态发热方程和在变化负载条件下电缆载流量的计算	227

§ 7-2	电缆允许短路容量计算 .....	233
§ 7-3	塑料绝缘电缆金属屏蔽层短路容量计算 .....	235
§ 7-4	自容式充油电缆的需油率和需油量的计算 .....	239
§ 7-5	钢管式充油电缆的需油率和需油量的计算 .....	248
§ 7-6	充油电缆内的暂态压力 .....	250
§ 7-7	充油电缆供油设备容量和供油长度的确定 .....	259
<b>第八章</b>	<b>电缆终端、连接、阻止式接头盒设计原理 .....</b>	<b>270</b>
§ 8-1	电缆终端处电场分布 .....	270
§ 8-2	电缆终端接头盒的典型结构 .....	273
§ 8-3	电缆连接接头盒和阻止式接头盒的典型结构 .....	276
§ 8-4	连接接头盒的电气计算 .....	278
§ 8-5	终端接头盒的电气计算 .....	288
<b>第九章</b>	<b>直流电缆设计特点 .....</b>	<b>301</b>
§ 9-1	概述 .....	301
§ 9-2	直流电缆绝缘特点 .....	302
§ 9-3	直流电缆绝缘层中电场分布与传输容量 .....	305
§ 9-4	直流电缆工作电场强度 .....	311
§ 9-5	直流电缆连接接头盒、终端接头盒设计特点 .....	312
<b>第十章</b>	<b>电缆的试验 .....</b>	<b>314</b>
§ 10-1	电缆的例行和抽样试验 .....	314
§ 10-2	电缆的型式试验和研究性试验 .....	318
§ 10-3	电缆安装敷设后的试验及检查预防性试验 .....	321
<b>附录</b>	<b>.....</b>	<b>375</b>
<b>I</b>	<b>式 (4-3) 的推导 .....</b>	<b>325</b>
<b>II</b>	<b>单芯电缆热流场方程求解 .....</b>	<b>327</b>
<b>III</b>	<b>利用热流场方程的解 (附录 II) 求定电缆的需油率 .....</b>	<b>333</b>
<b>IV</b>	<b>用有限元素法计算电缆终端电场分布 .....</b>	<b>335</b>

# 第一章 绪 论

把电能传送到工厂、农村和城市，实现工业、农业以及服务行业的电气化，就需要用电线、电缆。如同在自来水系统中，水要通过管道才能供给人们使用，电能也需要通过电线、电缆才能供给用户。因此，电线、电缆是实现电气化不可缺少的、大量使用的器材。用于电力传输和分配的电缆，称为电力电缆。

电线用高电导系数材料（铜、铝）作成（裸电线），有的电线在导体外还有轻型绝缘层和保护层（绝缘电线）。电缆一般由高电导系数材料组成的线芯（单芯或多芯）、绝缘材料（油浸纸、橡皮、塑料等）组成的绝缘层和保护绝缘层不受机械损伤、化学侵蚀、潮气作用的重型保护层三部分组成。电缆和绝缘电线并没有严格的界限，一般说来，电缆用于电压比较高，传送功率比较大，可靠程度要求比较高的场合。因此，电缆的线芯截面比较大、绝缘层比较厚、电气性能要求高、护层结构质量要求比较高等。设计、制造经济、可靠、耐用的电缆是电力工业重要问题之一。

在大多数情况下，用架空线传送电能要比用电缆的成本低。但随着工业的发展，电缆用量在整个传输线中所占比例逐年提高。与架空线相比，电缆具有下列优点：

- （1）线间绝缘距离小，占地小，电缆作地下敷设不占地面上空间；
- （2）不受周围环境污染影响，送电可靠性高；
- （3）地下敷设电缆对人身安全可靠，不暴露目标，适于战备。

因此，在大城市人口稠密区的输配电网，城市郊区的输配电网，大型工厂、发电厂、交通拥挤区、电网交叉区要求占地小、安全，减少电网对交通、城市建设的影响，多采用电缆；在严重污染区，为了提高送电的可靠性，多采用电缆；对于过江、过河输电线路，跨度大，不宜敷设架空线，或为了避免架空线对船舶通航或无线电干扰，也多采用电缆；有的工程从国防战备需要，避免暴露目标而采用电缆；也有从建筑美观需要而采用电缆。图 1-1 是水力发电站布置示意，电缆引出线成为电站不可缺少的一个重要组成部分。

图 1-2 是世界上架空线和电缆的工作电压发展图。由图可见，在电力工业发展初期，电缆落后于架空线路的发展，但随着工业的发展，电缆的工作电压几乎跟上输电架空线工作电压的发展。这是因为随着电缆制造技术的发展，提供了制造与输电线路相同电压等级电缆的可能性；另一方面，说明电缆已成为近代电力网络提高工作电压不可缺少的组成部分。现在世界上工业发达的国家，在研究 1000 千伏及以上输电问题的同时，都在进行相应电压等级电缆的研究和试制工作。

我国解放前曾生产过极少量的 600 伏以下橡皮电缆，主要电缆产品几乎全部依赖进口。全国解放后，在中国共产党领导下，我国电缆工业得到迅速发展。以浸渍纸绝缘电力电缆为例，解放后不到一年就生产出 3 千伏浸渍纸绝缘电力电缆。1951 年即开始生产 6 千伏，1953 年开始生产 10 千伏，1956 年开始生产 35 千伏浸渍纸绝缘电力电缆。1958 年开始试制充油电缆，1964 年我国自行试制的 66 千伏充油电缆即投入运行。以后陆续生产了 110、220、

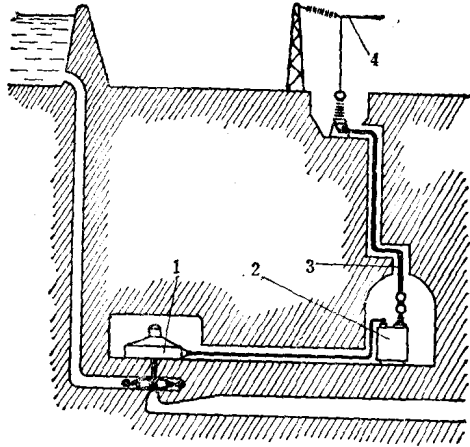


图1-1 水力发电站布置示意

1—发电机组 2—变压器 3—电缆引出线 4—架空线

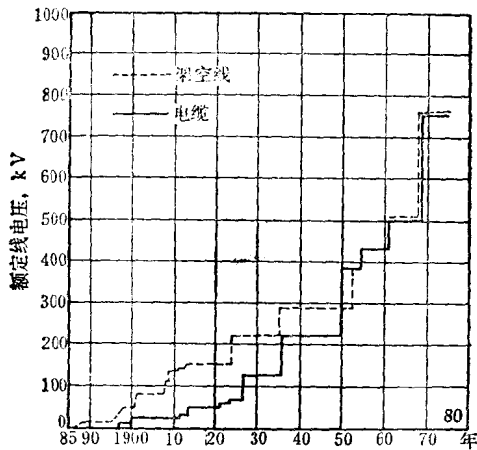


图1-2 架空输电线、电缆的工作电压逐年发展图

330 千伏充油电缆并投入运行，为发展我国电力工业作出了贡献。目前已生产出 500 千伏充油电缆样品。根据电力工业发展的需要，我国电缆工业正在开展 500 千伏及以上电压等级电缆的研究和试制工作。

为了实现祖国四个现代化，适应工、农业的迅猛发展，满足各方面的需要，还需要我们努力赶、超世界先进水平，这是摆在从事和即将从事电缆工业人员面前的光荣而艰巨的任务。

## 第二章 电力电缆各组成部分结构及其材料的性能

### § 2-1 线芯结构及其材料的性能

#### 一、线芯材料的性能

电力电缆线芯的作用是传送电流，线芯的损耗主要由导体截面和电导系数来决定。为了减小电缆线芯中的损耗和电压降，电缆线芯一般由具有高电导系数的金属材料——铜或铝制成。

(一) 铜 用作电力电缆的线芯具有许多技术上的优点，如电导系数大、机械强度相当高、加工容易（易于压延、拉丝、焊接等）、耐腐蚀等。它是最广泛采用电缆线芯的材料。铜的主要物理特性如下：

比重	8.9
线膨胀系数 (20~100°C)	$16.6 \times 10^{-6}$ 1/°C
热容系数 20°C	414 J/kg·°C
100°C	396 J/kg·°C
熔解热	$2.125 \times 10^5$ J/kg
熔解点	1084.5 °C
沸点	2310 °C

铜的电导系数仅次于银 ( $\gamma_{Ag} = 61.65 \times 10^6$  西/米)，标准纯铜在 20°C 时的电导系数  $\gamma_{Cu} = 58 \times 10^6$  西/米，相应的电阻系数  $\rho_{Cu} = 0.017241 \times 10^{-6}$  欧·米，铜的电阻温度系数为  $\alpha_{Cu} = 0.00393$  1/°C。一般金属或金属合金的导电能力常以标准初炼纯铜在 20°C 的电导系数为 100% 的百分比来表示，称为该金属的百分电导率 (%IACS)，或简称电导率。

铜的杂质含量对铜的电导系数影响很大，微量杂质会引起电导系数显著下降。各种杂质对铜的导电性能的影响如图 2-1 所示。根据国家标准 GB468-64 规定，导电线芯用压延线材和铜棒的铜线锭应符合 GB466-64 的一号或二号铜的规定。生产直径极小的铜丝(直径达 0.02 毫米)及高频用线则应用所谓无氧铜 (YB145-71)。一、二号铜的杂质容许含量如表 2-1 所示，号数越小，铜的纯度越高。

铜锭经过压延、冷拉等工艺过程制成所需要粗细的铜线。铜经过压延、拉丝、绞合、焊接等工艺过程后，由于金属结晶的变化，电导系数、伸长率下降，抗张强度、屈服强度、弹性增加。为了提高冷拉铜线的电导系数和柔软性，可将铜线经过初炼过程处理。初炼过程

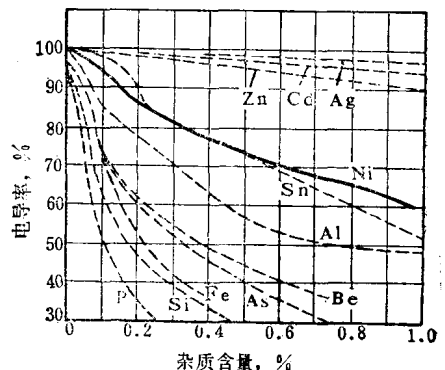


图2-1 杂质含量对铜的电导率的影响，  
(标准铜在20°C下的电导率为100%)

表2-1 一、二号品位铜的容许杂质含量 (GB466-64)

铜品号	代号	铜 (%) 不小于	杂质含量 (%) 不大于												
			铋	锑	砷	铁	镍	铅	锡	硫	氧	锌	磷	氧	总和
一号铜	Cu-1	99.95	0.002	0.002	0.002	0.005	0.002	0.005	0.002	0.005	0.02	0.005	0.001	0.05	0.05
二号铜	Cu-2	99.90	0.002	0.002	0.002	0.005	0.002	0.005	0.002	0.005	0.06	0.005	0.001	0.10	0.10

就是将冷拉后的铜线加热到 500~700℃, 保持一段时间, 然后逐渐冷却。初炼过程应在不与空气接触的条件下进行, 一般是充以保护气体 (如 N<sub>2</sub>), 否则在高温下铜线会氧化而发黑。初炼后, 铜线变软, 伸长率、电导系数增加, 但抗张强度有所降低, 如图 2-2 所示。曲线 1、2、3 分别表示铜线的抗张强度、伸长率、电导率随初炼温度的变化。

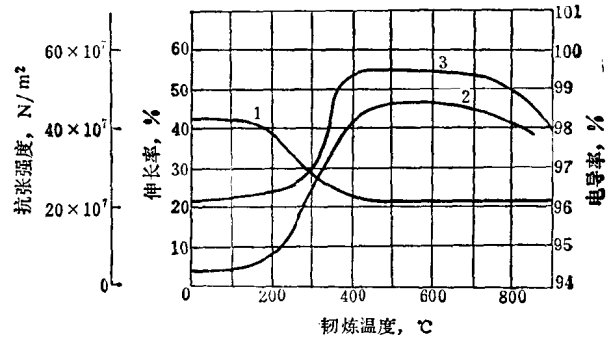


图2-2 初炼温度对铜的性能的影响

1—抗张强度 2—伸长率 3—电导率

未初炼铜线——硬铜线 (TY) 多用于架空裸线生产, 而初炼过的铜线——软铜线 (TR) 则多用于电缆线芯的制造。根据国家标准 JB647-77 的规定, 铜线的机械、电气性能能满足表 2-2、2-3 的要求。

表2-2 圆铜线的抗张强度、伸长率及电阻系数 (JB647-77)

单线直径 (mm)	TY①			TR		
	抗张强度 (N/m²) 不小于	伸长率 (%) 不小于	电阻系数② (Ω·m) 不大于 (20℃)	抗张强度 (N/m²) 不小于	伸长率 (%) 不小于	电阻系数③ (Ω·m) 不大于 (20℃)
0.020~0.050	42 × 10 <sup>7</sup>	0.5	0.01810 × 10 <sup>-6</sup>	—	12	0.01748 × 10 <sup>-6</sup>
0.060~0.100	42 × 10 <sup>7</sup>	0.5	0.01810 × 10 <sup>-6</sup>	—	15	0.01748 × 10 <sup>-6</sup>
0.110~0.200	42 × 10 <sup>7</sup>	0.5	0.01810 × 10 <sup>-6</sup>	20 × 10 <sup>7</sup>	18	0.01748 × 10 <sup>-6</sup>
0.210~0.700	42 × 10 <sup>7</sup>	0.5	0.01810 × 10 <sup>-6</sup>	20 × 10 <sup>7</sup>	20	0.01748 × 10 <sup>-6</sup>
0.710~1.000	42 × 10 <sup>7</sup>	0.6	0.01810 × 10 <sup>-6</sup>	20 × 10 <sup>7</sup>	25	0.01748 × 10 <sup>-6</sup>
1.01~2.00	41 × 10 <sup>7</sup>	0.8	0.01790 × 10 <sup>-6</sup>	20 × 10 <sup>7</sup>	25	0.01748 × 10 <sup>-6</sup>
2.01~3.00	40 × 10 <sup>7</sup>	1.0	0.01790 × 10 <sup>-6</sup>	21 × 10 <sup>7</sup>	30	0.01748 × 10 <sup>-6</sup>
3.01~4.00	39 × 10 <sup>7</sup>	1.2	0.01790 × 10 <sup>-6</sup>	21 × 10 <sup>7</sup>	30	0.01748 × 10 <sup>-6</sup>
4.01~5.00	38 × 10 <sup>7</sup>	1.5	0.01790 × 10 <sup>-6</sup>	21 × 10 <sup>7</sup>	30	0.01748 × 10 <sup>-6</sup>
5.01~6.00	37 × 10 <sup>7</sup>	1.5	0.01790 × 10 <sup>-6</sup>	21 × 10 <sup>7</sup>	30	0.01748 × 10 <sup>-6</sup>

① 标称直径在 0.800~6.000 毫米内的硬圆铜线承受弯曲次数不少于 5。

② 硬圆铜线的电阻温度系数 α = 0.00385 1/℃。

③ 软铜线的电阻温度系数 α = 0.00395 1/℃。

铜对于某些浸渍剂 (例如矿物油、松香复合浸渍剂等)、硫化橡胶有促进老化的作用。在此情况下, 可在铜线表面镀锡, 使铜不直接与绝缘层相接触, 以减低老化速度。采用镀锡铜线提高了电缆产品的质量, 并使对接头容易焊接, 但增加工序, 提高成本。

镀锡工序是将软铜线经过酸洗除去铜线表面上的油污及氧化层后, 通过熔融的锡热镀

而成。有的制造厂也采用电镀锡。铜线镀锡后,由于锡层及镀锡过程中铜线拉伸等因素,使铜线的电阻系数和抗张强度略有增加,伸长率则略有降低。根据JB1070-67规定,镀锡铜线的机械和电气性能应满足表2-3的要求。

表2-3 镀锡圆铜单线机械性能和电气性能 (JB1070-67)

镀锡铜线直径 (mm)	抗张强度 (N/m <sup>2</sup> )	伸长率 (%)	电阻系数 (Ω·m)
	不小于	不小于	不大于
0.03~0.08	20×10 <sup>7</sup>	8	0.0179×10 <sup>-6</sup>
0.09~0.15	20×10 <sup>7</sup>	12	0.0179×10 <sup>-6</sup>
0.16~0.50	20×10 <sup>7</sup>	15	0.0179×10 <sup>-6</sup>
0.51~0.70	20×10 <sup>7</sup>	15	0.0176×10 <sup>-6</sup>
0.71~2.00	21×10 <sup>7</sup>	20	0.0176×10 <sup>-6</sup>
2.01~4.00	22×10 <sup>7</sup>	25	0.0176×10 <sup>-6</sup>

(二) 铝 铝的体积电导系数仅次于银、铜和金,它是地壳中最多的元素之一,仅次于硅和氧,重量占地壳的8%。由于铜的资源匮乏,铝愈来愈多地作为导电材料来取代铜。铝的主要物理特性如表2-31所示。

经过初炼在20°C时化学纯铝的电导系数 $\gamma_{Al} = 38 \times 10^8$ 西/米,电阻系数 $\rho_{Al} = 0.0263 \times 10^{-8}$ 欧·米,电阻温度系数 $\alpha_{Al} = 0.00403$ 1/°C。不同杂质对于铝的电导系数有不同的影响,如图2-3所示。导电线芯、护套用压延线材和铝杆的铝线锭应符合YB813-55规定,不应低于GB1196-75中一号铝和特一号铝(护套用)的规定,其杂质容许含量如表2-4所示。

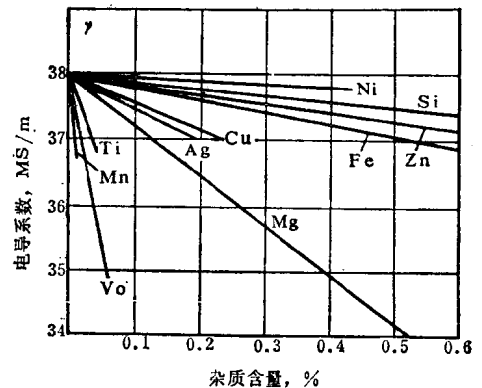


图2-3 杂质含量对初炼铝的电导系数的影响

表2-4 一号铝和特一号铝容许杂质含量 (GB1196-75)

铝品号	代号	铝不小于 %	杂质(%)不大于				
			铁	硅	铁+硅	铜	杂质总和
特一号铝	A1-00	99.7	0.14	0.13	0.26	0.010	0.30
一号铝	A1-1	99.5	0.30	0.22	0.45	0.015	0.50

从铝锭制造铝线的工艺与铜线相似,最近我国有的电缆厂已采用连铸连轧取代压延工序。为了使铝线柔软性增加,用于制造电力电缆线芯的铝线,除小截面外(10毫米<sup>2</sup>以下),铝线一般也经过初炼。由于铝线表面极易形成氧化铝膜,可以防止铝线在初炼过程中进一步氧化,因此与铜线初炼时不同,无需与空气隔绝。铝的再结晶温度比铜的低,因此铝线的初炼温度(300~350°C)较铜低,其初炼时间也较铜线少。铝线经过初炼过程后,柔软性提高,抗张强度降低,它的机械性能与初炼温度的关系如图2-4所示。由于铝线机械性能较铜差,一般多用于固定敷设电力电缆线芯。根据JB648-77的规定,圆铝线的机械、电气性能如表2-5所示。



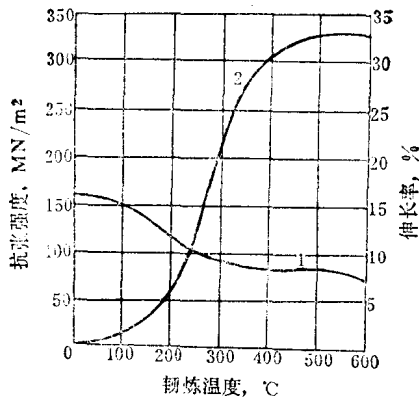


图2-4 韧炼温度对铝线机械性能的影响  
1—抗张强度 2—伸长率

表2-5 圆铝线的机械性能 (JB648-77)

标称直径 (mm)	硬圆铝线(LY型)			半硬圆铝线(LYB型)			软圆铝线(LR型)	
	抗张强度 (N/m <sup>2</sup> ) 不小于	伸长率 (%) 不小于	弯曲次数 不小于	抗张强度 (N/m <sup>2</sup> ) 不小于	伸长率 (%) 不小于	弯曲次数 不小于	抗张强度 (N/m <sup>2</sup> ) 不小于	伸长率 (%) 不小于
0.060~0.200	18×10 <sup>7</sup>	—	6	(9.5~14)×10 <sup>7</sup>	1.0	14	(7.0~9.5)×10 <sup>7</sup>	—
0.210~0.500	18×10 <sup>7</sup>	0.5	6	(9.5~14)×10 <sup>7</sup>	1.0	14	(7.0~9.5)×10 <sup>7</sup>	8
0.510~0.800	18×10 <sup>7</sup>	1.0	6	(9.5~14)×10 <sup>7</sup>	1.5	14	(7.0~9.5)×10 <sup>7</sup>	10
0.890~1.000	18×10 <sup>7</sup>	1.2	6	(9.5~14)×10 <sup>7</sup>	1.5	14	(7.0~9.5)×10 <sup>7</sup>	10
1.01~1.20	18×10 <sup>7</sup>	1.2	6	(9.5~14)×10 <sup>7</sup>	1.5	14	(7.0~9.5)×10 <sup>7</sup>	12
1.21~1.50	18×10 <sup>7</sup>	1.2	6	(9.5~14)×10 <sup>7</sup>	1.5	14	(7.0~9.5)×10 <sup>7</sup>	12
1.51~2.00	17×10 <sup>7</sup>	1.2	6	(9.5~14)×10 <sup>7</sup>	2.0	14	(7.0~9.5)×10 <sup>7</sup>	15
2.01~2.50	17×10 <sup>7</sup>	1.5	6	(9.5~14)×10 <sup>7</sup>	2.0	14	(7.0~9.5)×10 <sup>7</sup>	15
2.51~2.60	16×10 <sup>7</sup>	1.5	6	(9.5~14)×10 <sup>7</sup>	2.5	14	(7.0~9.5)×10 <sup>7</sup>	18
2.61~3.50	16×10 <sup>7</sup>	1.5	6	(9.5~14)×10 <sup>7</sup>	2.5	12	(7.0~9.5)×10 <sup>7</sup>	18
3.51~5.00	15×10 <sup>7</sup>	2.0	6	(9.5~14)×10 <sup>7</sup>	3.0	12	(7.0~9.5)×10 <sup>7</sup>	20
5.01~6.00	15×10 <sup>7</sup>	2.0	6	(9.5~14)×10 <sup>7</sup>	3.0	12	(7.0~9.5)×10 <sup>7</sup>	20

铝线在20°C时的电阻系数是：LY型不应大于 $0.0290 \times 10^{-6}$  欧·米，LYB型和LR型不应大于 $0.0283 \times 10^{-6}$  欧·米。电阻温度系数：LY型采用等于 $0.00403$  1/°C，LYB型和LR型采用等于 $0.0041$  1/°C。

例2-1 用裸铜、铝电线传送相同功率，如传送距离、线路损耗相等，试比较用铜量和用铝量。

铜 电阻系数  $\rho_{Cu} = 0.01748 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$

比 重  $\gamma_{Cu} = 8.9$

铝 电阻系数  $\rho_{Al} = 0.0283 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$

比 重  $\gamma_{Al} = 2.7$

〔解〕 设铜导体和铝导体截面分别为 $A_{Cu}$ 、 $A_{Al}$ ，如传送距离为 $l$ ，则铜、铝导体电阻分别为

$$R_{\text{Cu}} = \rho_{\text{Cu}} \frac{l}{A_{\text{Cu}}}$$

$$R_{\text{Al}} = \rho_{\text{Al}} \frac{l}{A_{\text{Al}}}$$

因为在同一传输网络中，传送功率相等，即电流相等。当线路损耗相等时，应有

$$R_{\text{Cu}} = R_{\text{Al}}$$

即

$$\frac{\rho_{\text{Cu}}}{A_{\text{Cu}}} = \frac{\rho_{\text{Al}}}{A_{\text{Al}}}$$

于是用铜量和用铝量体积比为

$$\frac{V_{\text{Cu}}}{V_{\text{Al}}} = \frac{A_{\text{Cu}} l}{A_{\text{Al}} l} = \frac{\rho_{\text{Al}}}{\rho_{\text{Cu}}} = \frac{0.01748}{0.0283} = 0.618$$

用铜量和用铝量重量比为

$$\frac{G_{\text{Cu}}}{G_{\text{Al}}} = \frac{A_{\text{Cu}} l \gamma_{\text{Cu}}}{A_{\text{Al}} l \gamma_{\text{Al}}} = \frac{\rho_{\text{Cu}}}{\rho_{\text{Al}}} \frac{\gamma_{\text{Cu}}}{\gamma_{\text{Al}}} = 0.618 \times \frac{8.9}{2.7} = 2.03$$

由计算可知，如采用铝导体，其面积和直径将分别比铜导体面积和直径大 38.2% 和 21.5%，但其重量只约为铜导体的一半。因此，一吨铝导体产品相当于两吨铜导体产品。换言之，如铝价格不超过铜价格一倍，则采用铝作裸电线较用铜为经济。当然，如采用铝作电缆的线芯，计算电缆成本时，还要考虑由于线芯直径增加，绝缘材料和护层材料用量随之增加而增加的成本。

## 二、线芯结构的一般原理

为了增加电缆的柔软性或可曲度，较大截面的电缆线芯由多根较小直径的导线绞合而成。由多根导线绞合的线芯柔软性好、可曲度较大，因为单根金属导线沿某一半径弯曲时，其中心线圆外部分必须伸长，而其圆内部分必须缩短，如线芯是由多根导线平行放置而组成，导线之间可以滑动，因此，它比相同截面单根导线作相同弯曲时要省力得多。为了保持线芯结构形状的稳定性和减小线芯弯曲时每根导线的变形，多根导线组成的线芯都应绞合而成。图 2-5 a)、b)、c) 表示一组平行放置的导线，弯曲后变直时，由于导线的塑性变形可能在线芯表面产生凸出部分，使电缆绝缘层中电场分布产生畸变，并损伤电缆绝缘。而在绞合的线芯结构（图 2-5 d、e) 中，线芯中心线内外两部分可以互相移动补偿，弯曲时不会引起导线的塑性变形，因此线芯的柔软性和稳定性大大提高。要求线芯有较高的柔软性和稳定性，可采用较小直径导线用较小绞合节距绞合。此外，由多根导线绞合的线芯，与大截面的单根线芯不同，弯曲较平滑地分配在一段线芯上，因而弯曲时不容易损坏电缆的绝缘。

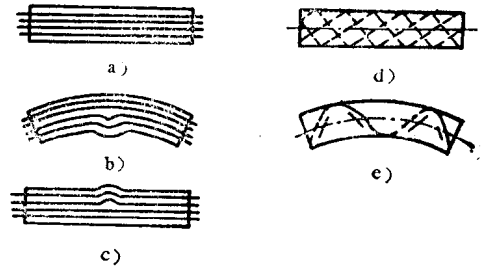


图 2-5 线芯弯曲时变形示意

- a) 平行导线，弯曲前 b) 平行导线，弯曲后  
c) 平行导线，弯曲再恢复平直 d) 绞合线芯，弯曲前 e) 绞合线芯，弯曲后

电缆的用途不同，对线芯可曲度的要求也有所不同。移动式橡皮、塑料绝缘电力电缆要求最高，其次是固定式橡皮、塑料绝缘电力电缆，它多用于可曲度要求较高的场合。油

浸纸绝缘电力电缆线芯的可曲度比橡皮、塑料绝缘电力电缆低。因为油浸纸绝缘电力电缆的可曲度主要由护层结构来决定，线芯对电缆的可曲度影响较小，一般只要求线芯在生产制造、安装敷设过程中不致损伤绝缘即可。

在扇形线芯结构中，稳定性问题应予以足够重视。扇形芯的中间两旁导线往往是平行放置，应防止它们在弯曲时变形而损伤绝缘。

### (一) 绞合形式的分类

一般电缆线芯的绞合形式可分为两类：

1. 规则绞合 导线有规则、同心且相继各层依不同方向的绞合称为规则绞合。它还可分正常规则绞合和非正常规则绞合，后者系指层与层间的导线直径不尽相同的规则绞合(图 2-7)，而前者系指所有组成导线的直径均相同的规则绞合(图 2-6)。

除此之外，规则绞合又可分简单规则绞合和复合规则绞合(图 2-8)，后者系指组成规

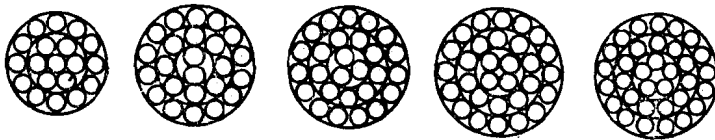


图2-6 不同中心导线数的正常规则绞合

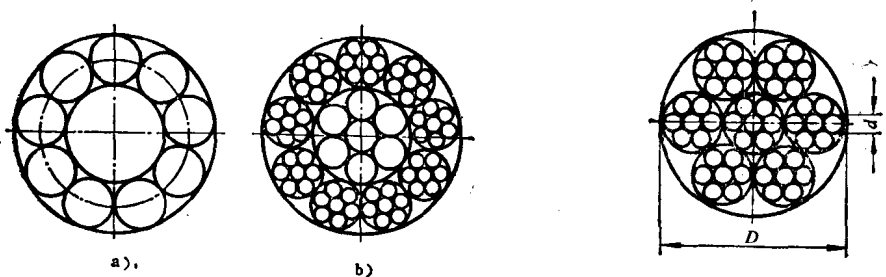


图2-7 非正常规则绞合

a) 简单非正常规则绞合 b) 复合非正常规则绞合

图2-8 复合正常规则绞合

则绞合的导线不是单根的，而是由更细的导线按规则绞合组成股，再绞合成线芯。这种绞合形式多用于移动式橡皮绝缘电缆的线芯结构，以提高其柔软性。一般正常简单规则绞合在电力电缆中应用最为广泛。如无特别说明，规则绞合一般均指正常简单规则绞合。

2. 不规则绞合(束绞) 所有组成导线都依同一方向的绞合。

绞合方向规定如下：将绞合线芯垂直放置，如单线从下至上的方向向左称为左向绞合(图 2-9 a)，反之向右称为右向绞合(图 2-9 b)。

规则绞合稳定性较高，几何形状固定，可以用组合导线的几何关系来表示。在空间利用和绞合设备成本方面说来，束绞较为有利，束绞填充系数较高，相同截面积外径较小，可曲度较高，因而多用于绝缘软线和移动式橡皮绝缘电缆。电力电缆的线芯则多采用规则绞合。下面介绍规则绞合的一般规律。

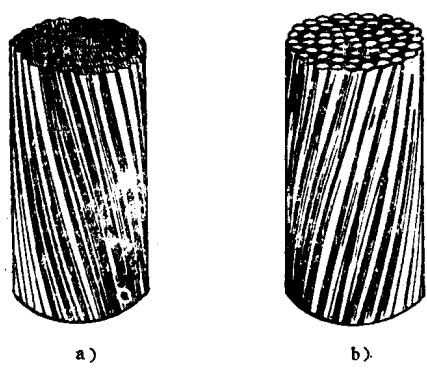


图2-9 绞合方向规定说明  
a) 左向绞合 b) 右向绞合

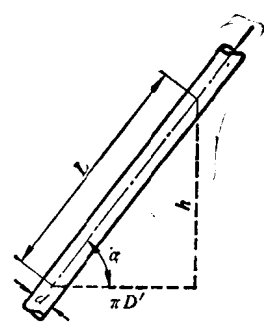


图2-10 绞合导线展开

(二) 绞合角和绞入率

如果将规则绞合的线芯中任一沿螺旋线绞合的单线展开，则得一直角三角形。单线的中心轴绕线芯一周的长度  $L$  构成该直角三角形的斜边，穿过该层各单线中心的圆周之长（即所谓平均周长）构成该直角三角形的一直角边，而绞合节距  $h$  即单线在绞合时绕线芯一周沿线芯中心线所量得的长度构成该直角三角形的另一直角边长，如图 2-10 所示。图中  $D'$  表示通过该层单线中心的圆周直径，角  $\alpha$  称为绞合角。由图可见

$$\alpha = \text{tg}^{-1} \frac{h}{\pi D'} \tag{2-1}$$

一般把  $\frac{h}{D'}$  称为节距比，又称扭绞节距倍数或称为绞合系数，用  $m$  表示，即

$$m = \frac{h}{D'} \tag{2-2}$$

该层任一单线沿螺旋线在一节距内的长度为

$$L = \sqrt{h^2 + (\pi D')^2} = h \sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{m}\right)^2} \tag{2-3}$$

在一绞合节距 ( $h$ ) 内，单线长度  $L$  比线芯长度  $h$  长  $\Delta L$

$$\Delta L = L - h = h \left( \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{m^2}} - 1 \right) \tag{2-4}$$

而电缆技术上常用的绞入率（扭增率）定义为

$$k = \frac{\Delta L}{h} = \left( \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{m^2}} - 1 \right) \times 100\% \tag{2-5}$$

一般节距比大于 7，因为  $\left(1 + \frac{\pi^2}{m^2}\right)^{1/2} \approx 1 + \frac{1}{2} \frac{\pi^2}{m^2}$ ，于是 (2-5) 式可写成

$$k = \frac{\Delta L}{h} = \frac{1}{2} \frac{\pi^2}{m^2} \times 100\% \tag{2-6}$$

$k$  表示单线长度比线芯长度增长的百分比。

由上列各式可见，节距比  $m$  愈小，绞合角  $\alpha$  愈小 ( $\alpha = \text{tg}^{-1} \frac{m}{\pi}$ )，柔软程度愈高。但

$m$  愈小,  $k$  值愈大, 节距与单线长度相差愈大, 即绞制同样长度线芯, 需用较长单线。绞入率与节距比的关系如图 2-11 所示。由图可见, 绞入率随节距比增加而减小, 例如, 当  $m = 9$  时, 绞入率等于 6%, 而当  $m = 15$  时, 绞入率仅为 2.2%。

(三) 最小节距比、层数与单线根数的关系

如对规则绞合线芯沿其垂直线芯长度方向切开, 每根单线的截面积将为椭圆形, 如图 2-12 所示。椭圆长轴

$$d' = \frac{d}{\sin \alpha} = d \sqrt{1 + \text{ctg}^2 \alpha} \tag{2-7}$$

式中  $d$  ——单线的直径;  
 $\alpha$  ——该层单线的绞合角。

如  $\alpha$  足够地大, 则  $\sqrt{1 + \text{ctg}^2 \alpha} \approx 1 + \frac{1}{2} \text{ctg}^2 \alpha$ , 于是

$$d' = d(1 + k) \tag{2-8}$$

式中  $k$  为绞入率,  $k = \frac{1}{2} \frac{\pi^2}{m^2}$  (式 2-6)。

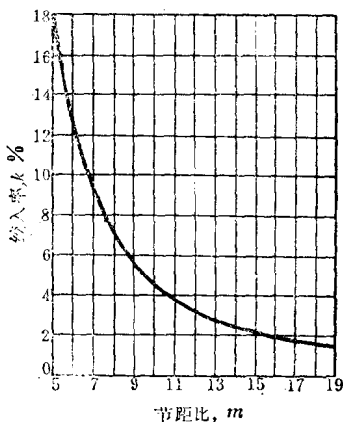


图2-11 绞入率与节距比的关系曲线

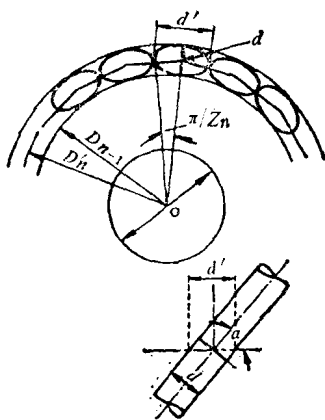


图2-12  $n$ 层规则绞合的几何关系说明

由图 2-12 可见, 规则绞合线芯某一层  $n$  上单线数  $Z_n$  约等于该层各单线中心的圆周除以椭圆形之长轴, 即

$$Z_n = \frac{\pi(D_{n-1} + d)}{d'} = \frac{\pi(D_{n-1} + d)}{(1 + k_n)d} \tag{2-9}$$

式中  $k_n$  ——第  $n$  层的绞入率。

第  $n - 1$  层上单线数

$$Z_{n-1} \approx \frac{\pi(D_{n-2} + d)}{(1 + k_{n-1})d} \tag{2-10}$$

式中  $k_{n-1}$  ——第  $n - 1$  层的绞入率。

而

$$D_{n-1} = D_{n-2} + 2d$$

作为第一近似, 取  $k_n = k_{n-1} = k$ , 则相邻两层单线根数之差

$$Z_n - Z_{n-1} = \frac{2\pi}{1+k} \approx 6 \quad (2-11)$$

由此可知, 如各层均以同一直径单线作规则绞合, 则相邻两层单线根数相差为 6。但有一例外, 中心单线根数为 1 的规则绞合, 第二层单线根数为 6, 两层单线根数相差是 5 而不是 6。

根据相邻层单线根数相差为 6 的关系, 可以推出中心单线根数为 1, 2, 3, 4, 5 时, 单线总根数与层数的关系式, 如表 2-6 所示。

表 2-6 规则绞合线芯的单线总数与层数之关系

中心单线根数	第 $n$ 层单线根数 ( $Z_n$ )	单线总根数 ( $Z$ )
1	$6(n-1)$	$3n^2 - 3n + 1$
2	$6\left(n - \frac{2}{3}\right)$	$3n^2 - 3n + 2n$
3	$6\left(n - \frac{1}{2}\right)$	$3n^2 - 3n + 3n$
4	$6\left(n - \frac{1}{3}\right)$	$3n^2 - 3n + 4n$
5	$6\left(n - \frac{1}{6}\right)$	$3n^2 - 3n + 5n$

从图 2-12 和式 (2-8) 可知, 当绞入率  $k$  值增加 (或绞合角  $\alpha$  减小), 每根单线在圆周上所占长度增加, 如相邻层的单线根

数仍需保持相差 6, 则  $k$  有一容许最大值  $k_{\max}$ , 当  $\frac{2\pi}{1+k_{\max}} = 6$  时,  $k_m = 0.047$ , 相应之节距比称为极限节距比, 此时

$$m = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{\pi^2}{0.047}} \approx 10 \quad (2-12)$$

相应于极限节距比的绞合角称为极限绞合角。

对于油浸纸绝缘电力电缆, 圆形线芯的节距比  $m$  一般为 18 ~ 22, 对于橡皮、塑料绝缘电力电缆  $m$  值为 16 ~ 20, 外层  $m$  值可达 10 ~ 12。复合绞合线芯的每股绞合的节距比要比股绞合成线芯的绞合节距比小。绞合节距比  $m$  小于 10, 仅用于弯曲稳定性和柔软性要求特别高的场合 (例如矿用、探测电缆), 此时相邻两层单线根数相差小于 6。

根据图 2-12, 也可计算电缆线芯内垫芯的直径  $D_r$ 。如线芯最内层单线直径为  $d$ , 根数为  $Z_n$ , 绞合角为  $\alpha$ , 则

$$D_r = D_{n-1} = d \left( \sqrt{\frac{1 + \operatorname{ctg}^2 \frac{\pi}{Z_n}}{\sin \alpha}} - 1 \right) \quad (2-13)$$

#### (四) 线芯的填充系数

线芯的填充系数定义为线芯导体实际面积与线芯轮廓截面积之比。对于圆形绞合线芯有

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^{i=Z} A_i}{\frac{\pi}{4} D^2} \quad (2-14)$$

式中  $A_i$  —— 每根单线截面积;  
 $Z$  —— 线芯单线总根数;  
 $D$  —— 绞合线芯外接圆的直径。

规则绞合线芯的填充系数不仅与层数有关而且与中心导线根数有关，如图 2-13 所示。中心一根导线的绞合线芯的填充系数随层数增加而减小，而中心导线根数为 2, 3, 4, 5 线芯的填充系数随层数增加而增加，但其绝对值比中心导线根数为 1 的小。从提高填充系数和稳固性考虑，中心为一根导线的规则绞合的结构最好，故在绝大多数情况下，电力电缆的线芯都采用中心为一根导线的规则绞合结构。

三、线芯的典型结构形式

电力电缆的线芯按其外形可以分为圆形线芯、中空圆形线芯、扇形芯、卵形或椭圆形线芯四类。

(一) 圆形线芯

对于 35 千伏及以下浸渍纸绝缘电力电缆，根据国家标准电 (D) 78-62 线芯结构应按照表 2-7 规定制造。为了保证线芯的柔软性，该标准中还规定了线芯的单线根数 (表 2-8)。

对于橡皮和塑料绝缘电线电缆用铜线芯，根据 JB947-76 按用途分成 5 种，第 I 种主要用于固定敷设的电线电缆，第 II 种主要用于固定敷设时要求柔软的电线电缆，第 III 种主要用于移动电线电缆，第 IV 种主要用于移动频繁的电线电缆，第 V 种主要用于特别柔软的电线电缆。对于橡皮和塑料绝缘电线电缆用铝线芯，根据 JB948-76 按用途分为二种，第 I

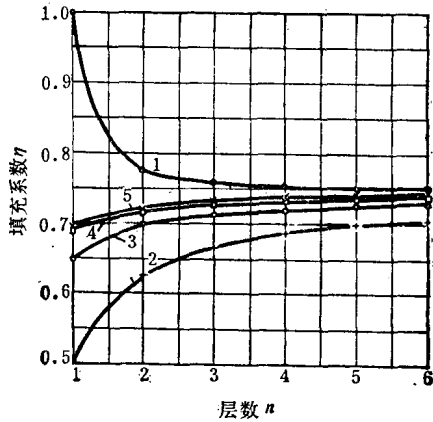


图 2-13 填充系数 η 和层数 n 的关系曲线 (曲线上的数字表示中心导线根数)

表 2-7 35kV 及以下油浸纸绝缘电缆线芯结构 [电 (D) 78-62]

电缆的额定电压及型式		1 及 3kV			6 及 10kV		20 及 35kV
		各种型式电缆	粘性浸渍电缆	干绝缘统包电缆	干绝缘分相铅包电缆		
16 及以下	铜	由单根导线构成					—
	铝						
25 及 35	铜	多根导线允许单根	多根导线	多根导线允许单根	单根导线	多根导线	
	铝	单根软线或多根导线			单根软线		
50	铜	多根导线			单根导线允许多根导线		
	铝	单根软线及多根导线			单根软线或多根导线		
70 及以上	铜	多根导线			单根导线允许多根导线		
	铝				单根软线或多根导线		

种主要用于固定敷设的电线电缆，第 II 种主要用于移动频繁和特别柔软的电线电缆。铜芯的第 I、II 二种，铝芯的第 I 种具体结构分别根据 JB947-76 和 JB948-76 规定制造，如表 2-9 所示。对于铜线芯单线直径在 0.10 毫米以下者可用软铜线，也可以用硬铜线，单线直径在 0.10 毫米以上者必须用软铜线制造。对于第 I 种铝线芯，截面积在 6 毫米<sup>2</sup> 以下者，采用半硬铝线，10 及 16 毫米<sup>2</sup> 者允许采用半硬铝线或软铝线，25 毫米<sup>2</sup> 及以上者采用软铝线制造。

表2-8 35kV及以下油浸纸绝缘电纜线芯导线根数〔电(D)78-62〕

标称截面 mm <sup>2</sup>	线芯中的单线根数		标称截面 mm <sup>2</sup>	线芯中的单线根数	
	圆形, 不少于	扇形或半圆形, 不少于		圆形, 不少于	扇形或半圆形, 不少于
25及35	7	12	185	37	36
50及70	19	15	240	37	36
95	19	18	300, 400及500	37	—
120	19	24	625及800	61	—
150	19	30			

表2-9 橡皮和塑料绝缘电纜线芯结构

标称面积 (mm <sup>2</sup> )	铜芯 (JB947-76)		铝芯 (JB948-76)	标称面积 (mm <sup>2</sup> )	铜芯 (JB947-76)		铝芯 (JB948-76)
	第Ⅰ种结构 根数/单线直径 (mm)	第Ⅱ种结构 根数/单线直径 (mm)	第Ⅰ种结构 根数/单线直径 (mm)		第Ⅰ种结构 根数/单线直径 (mm)	第Ⅱ种结构 根数/单线直径 (mm)	第Ⅰ种结构 根数/单线直径 (mm)
0.03	1/0.20	—	—	(10)	—	(19/0.82)	—
0.06	1/0.30	—	—	16	7/1.70	49/0.64	7/1.70
0.12	1/0.40	—	—	25	7/2.12	98/0.58	7/2.12
0.2	1/0.50	—	—	35	7/2.50	—	7/2.50
0.3	1/0.60	—	—	50	19/1.83	—	19/1.83
0.4	1/0.70	—	—	70	19/2.12	—	19/2.12
0.5	1/0.80	7/0.30	—	95	19/2.50	—	19/2.50
0.75	1/0.97	7/0.37	—	120	37/2.00	—	37/2.00
1.0	1/1.13	7/0.43	1/1.13	150	37/2.24	—	37/2.24
1.5	1/1.37	7/0.52	1/1.37	185	37/2.50	—	37/2.50
2.0	1/1.60	7/0.60	1/1.60	240	61/2.24	—	61/2.24
2.5	1/1.76	19/0.41	1/1.76	300	61/2.50	—	61/2.50
(2.5)*	—	(7/0.68)	—	400	61/2.85	—	61/2.85
4	1/2.24	19/0.52	1/2.24	500	91/2.62	—	91/2.62
(4)	—	(7/0.85)	—	630	127/2.50	—	127/2.50
6	1/2.73	19/0.64	1/2.73	800	127/2.85	—	127/2.85
(6)	—	(7/1.03)	—	1000	—	—	127/3.15
10	7/1.33	49/0.52	7/1.33				

注: 有括号的表示应用较少的结构。

对于第Ⅰ种铜线芯, 绞线节距规定内层绞线节距比不应大于40, 外层不应大于20。对于第Ⅱ种铜线芯束绞和一次绞的绞合节距比不应大于20, 多层绞线内层节距比不应大于30, 外层不应大于16。对于第Ⅰ种铝线芯, 内层绞线节距比不应大于40, 外层不应大于20。所有线芯最外层绞向均规定为左向。

在某些线路中, 例如在铁路电气化线路中, 有时采用线芯内具有一根至二根控制线芯的圆形线芯电纜, 其结构如图2-14所示。控制线芯由三根铜线绞合, 其外包绕绝缘纸带而成。绝缘后控制线芯的外径近似等于其他导线的直径。绞合时, 控制线芯(一般放在线芯最外层)代替一根导线与其他导线绞合而成线芯, 此控制线芯一般作信号传送用。

为了节约材料, 降低电纜成本, 很多电纜采用紧压圆形线芯结构。线芯经过紧压后, 每根导线不再是圆形而呈不规则形状, 原来空隙部分被导线变形而填满, 如图2-15所示。表2-10列有几种截面的紧压圆形线芯的结构参数。



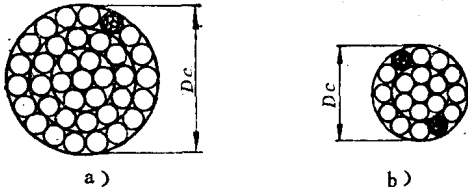


图2-14 具有控制线芯的电力电缆的线芯结构  
a) 一根控制线芯 b) 二根控制线芯

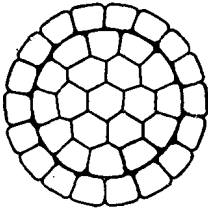


图2-15 紧压后圆形线芯截面

表2-10 紧压圆形线芯结构参数

标称面积 (mm <sup>2</sup> )	每根导线直径及线芯结构	线芯直径 (mm)
70	(1 + 6) × 2.60 + 12 × 2.19	9.59
95	(1 + 6) × 3.00 + 12 × 2.57	11.2
120	(1 + 6) × 3.38 + 12 × 2.88	12.5
185	(1 + 6) × 3.19 + 12 × 2.80 + 18 × 2.52	16.0
240	(1 + 6 + 12) × 3.17 + 18 × 2.87	18.2
300	(1 + 6 + 12) × 3.54 + 18 × 3.21	20.4
400	(1 + 6) × 3.72 + 12 × 3.46 + 18 × 3.05 + 24 × 2.85	23.1
500	(1 + 6) × 4.16 + 12 × 3.88 + 18 × 3.41 + 24 × 3.07	25.8

(二) 中空圆形线芯

主要用作充油电缆或充气电缆的线芯。我国用于充油电缆的中空圆形线芯主要有两种结构：其一是用一镀锡硬铜带（6 × 1 毫米）做成的螺旋（螺旋节距一般为 9 毫米）支撑，支撑的直径由所需油道直径大小来确定，一般为 12 毫米，在支撑外面同心圆地绞合镀锡导线（规则绞合），如图 2-16 所示。其二由型线绞合而成，第一层为 Z 形线，第二层及以上用弓形线绞合，如图 2-17 所示。为了使线芯中心油道与绝缘相通，在 Z 形线内边缘相距 1 ~ 3 毫米刻有深 0.3 ~ 0.4 毫米的细槽（如图 2-17 虚线所示）。这两种结构各有其优点，例如型线结构省材料（没有中心支撑螺旋），稳定性好（不易变形），油道内表面光滑，在制造过程中遗留的脏物容易被油冲洗带出。但有螺旋支撑结构的柔软性，工艺性较好。



图2-16 具有螺旋支撑的中空线芯示意

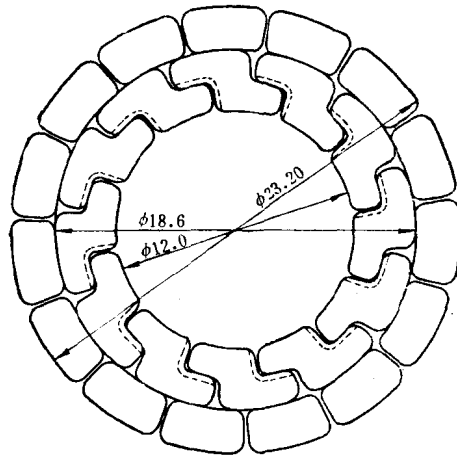


图2-17 由型线构成的中空线芯剖面

对于大截面导电线芯，为了减小其集肤效应而采用四分割或六分割中空导电线芯，如图 2-18 所示。它的结构特点是四根或六根相互绝缘的扇形芯绞合而成，而每股扇形芯又是多根单线围绕其中心绞合而成。采取这样的线芯结构，使在每一节距长度上，从线芯中心